表 8-1-85（续）

型　号	额定容量/(kV·A)	空载损耗/W	负载损耗(120°)/W	空载电流/%	短路阻抗/%
SC10-630/10	630	1035	6120	0.89	6
SC10-800/10	800	1224	6260	0.86	
SC10-1000/10	1000	1427	7514	0.81	
SC10-1250/10	1250	1705	8584	0.78	
SC10-1600/10	1600	2016	10290	0.73	
SC10-2000/10	2000	2543	13100	0.69	
SC10-2500/10	2500	3025	17150	0.62	

表 8-1-86　SC11 系列 6~10kV 级包封线圈干式电力变压器技术参数

型　号	额定容量/(kV·A)	空载损耗/W	负载损耗/W	空载电流/%	阻抗电压/%
SC11-30/10	30	160	510	1.1	4
SC11-50/10	50	230	790	1.1	
SC11-80/10	80	300	1040	0.93	
SC11-100/10	100	330	1320	0.85	
SC11-125/10	125	380	1510	0.75	
SC11-160/10	160	450	1800	0.73	
SC11-200/10	200	520	2110	0.71	
SC11-250/10	250	600	2300	0.66	
SC11-315/10	315	730	2940	0.66	
SC11-400/10	400	810	3400	0.55	
SC11-500/10	500	990	4150	0.55	
SC11-630/10	630	1120	5060	0.45	
SC11-630/10	630	1070	5130	0.45	6
SC11-800/10	800	1260	6010	0.43	
SC11-1000/10	1000	1470	7010	0.43	
SC11-1250/10	1250	1760	8400	0.35	
SC11-1600/10	1600	2040	10150	0.25	
SC11-2000/10	2000	2340	12500	0.25	
SC11-2500/10	2500	2850	12510	0.25	
SCB11-500/10	500	990	4150	0.55	4
SCB11-630/10	630	1120	5060	0.45	
SCB11-630/10	630	1070	5130	0.45	6
SCB11-800/10	800	1260	6010	0.43	
SCB11-1000/10	1000	1470	7010	0.43	
SCB11-1250/10	1250	1760	8400	0.35	
SCB11-1600/10	1600	2040	10150	0.25	
SCB11-2000/10	2000	2340	12500	0.25	
SCB11-2500/10	2500	2850	12510	0.25	

表 8-1-87 SG10 系列 10kV 绝缘非包封线圈干式电力变压器技术参数

型 号	空载损耗/W	负载损耗/W	空载电流/%	短路阻抗/%
SG10-100/10	400	1352	0.8	4
SG10-160/10	540	1904	0.8	
SG10-200/10	620	2400	0.8	
SG10-250/10	720	2750	0.7	
SG10-315/10	880	3460	0.7	
SG10-400/10	970	3980	0.6	
SG10-500/10	1160	4870	0.6	6
SG10-630/10	1310	5870	0.6	
SG10-630/10	1290	5950	0.6	
SG10-800/10	1520	6950	0.5	
SG10-1000/10	1760	8120	0.5	
SG10-1250/10	2080	9690	0.5	
SG10-1600/10	2440	11730	0.5	
SG10-2000/10	3320	14450	0.4	
SG10-2500/10	4000	17170	0.4	

3. 35kV 级变压器技术参数

1）S9 系列 35kV 级电力变压器

该系列变压器为三相油浸自冷铜绕组无载调压电力变压器，在交流电 50Hz 的输配电系统中作为分配电能和变换电压之用，可在户内外连续使用。其技术参数见表 8-1-88。

表 8-1-88 S9 系列 35kV 级配电变压器技术参数

型 号	额定容量/(kV·A)	额定电压/kV		连接组标号	损耗/kW		空载电流/%	阻抗电压/%
		高压	低压		短路	空载		
S9-100/35	100	35±5%	0.4	Y,yn0	2.10	0.35	1.9	6.5
S9-160/35	160				2.80	0.45	1.8	
S9-250/35	250				3.90	0.61	1.6	
S9-315/35	315				4.70	0.72	1.5	
S9-500/35	500				6.90	1.03	1.3	
S9-630/35	630				8.20	1.25	1.2	
S9-800/35	800				9.50	1.48	1.1	
S9-1000/35	1000				11.05	1.76	1.0	
S9-1250/35	1250				14.50	2.10	1.0	
S9-1600/35	1600				17.50	2.50	0.8	
S9-2000/35	2000				20.50	3.26	0.8	
S9-500/35	500		3.15 6 10	Y,d11	6.90	1.03	1.3	
S9-800/35	800				8.80	1.48	1.1	

表8-1-88（续）

型　号	额定容量/(kV·A)	额定电压/kV		连接组标号	损耗/kW		空载电流/%	阻抗电压/%
		高压	低压		短路	空载		
S9-1000/35	1000	35±5%	3.15 6 10	Y,d11	11.00	1.80	1.0	6.5
S9-1250/35	1250				14.70	2.20	0.9	
S9-1600/35	1600				16.50	2.50	0.8	
S9-2000/35	2000				16.80	3.20	0.8	
S9-2500/35	2500				19.50	3.80	0.8	
S9-3150/35	3150				22.50	4.50	0.8	7
S9-4000/35	4000				27.00	5.40	0.8	
S9-5000/35	5000				31.00	6.50	0.7	
S9-6300/35	6300				34.50	7.90	0.7	

2）S10系列35kV级电力变压器

S10系列电力变压器在低损耗变压器系列中属最新型号，节能效果又有所提高。该系列变压器为三相油浸自冷铜绕组无载调压电力变压器，在交流50Hz的输配电系统中做分配电能和变换电压之用，可在户内外连续使用。其技术参数见表8-1-89。

表8-1-89　S10系列35kV级铜绕组特低损耗电力变压器技术参数

型　号	额定容量/(kV·A)	额定电压/kV		连接组标号	损耗/kW		空载电流/%	阻抗电压/%	质量/kg	外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)
		高压	低压		短路	空载				
S10-800/35	800	(35、38.5)±5%	(3.15、6.3、10.5)±2×2.5%	Y,d11	10.2	1.4	1.5		4055	2320×1290×2750
S10-1000/35	1000				12.5	1.6	1.4		5360	2530×1460×2660
S10-1250/35	1250				15.1	2.0	1.3		4750	2540×1290×2665
S10-1600/35	1600				17.9	2.4	1.2		5620	2540×1460×2830
S10-2000/35	2000				19.0	3.0	1.1		6140	2750×1480×2865
S10-2500/35	2500				21.8	3.5	1.1		7930	2790×2690×2920
S10-3150/35	3150				25.6	4.2	1.0		9170	2650×2940×2840
S10-4000/35	4000				30.4	5.0	1.0		9740	2860×2900×3270
S10-5000/35	5000				34.8	6.0	0.9		11260	4030×3340×3340
S10-6300/35	6300				38.5	7.2	0.9		12345	3600×2900×3330
S10-8000/35	8000	(35,38.5)±2×2.5%	3.15 3.3 6.3 6.6 10.5 11		37.8	7.94	0.4		17580	3500×2800×2980
S10-10000/35	10000				44.6	9.38	0.4		20550	3500×2900×3500
S10-12500/35	12500				53.0	11.04	0.3		24900	3600×3100×3500
S10-16000/35	16000				64.7	13.10	0.3		31800	3800×3300×3500

3）SZ9系列35kV级有载调压电力变压器

该系列产品为三相铜绕组有载调压35kV级电力变压器，适用于交流50Hz的输配电

系统，作为传输和分配电能、变换稳定电压之用，可在户内外连续使用。其技术参数见表8－1－90。

表8－1－90 SZ9系列35kV级铜绕组电力变压器技术参数

型 号	额定容量/(kV·A)	额定电压/kV		连接组标号	损耗/kW		空载电流/%	阻抗电压/%	质量/kg	外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)
		高压	低压		短路	空载				
SZ9－630/35	630	35 38.5	0.4	Y,yn0	8.61	1.28	1.3	6.5	3470	2280×1360×2530
SZ9－800/35	800				9.98	1.51	1.2		4120	2820×1820×2540
SZ9－1000/35	1000				12.68	1.79	1.1		4690	2715×1810×2710
SZ9－1250/35	1250				15.23	2.14	1		51110	2540×1460×1110
SZ9－1600/35	1600				18.44	2.55	0.9		6150	2650×1910×2000
SZ9－1000/35	1000			Y,d11	11.55	1.79	1.1		4850	2575×1600×2875
SZ9－1250/35	1250				14.8	2.14	1		5110	2575×1600×3075
SZ9－1600/35	1600				17.3	2.55	0.9		6150	2650×1910×3000
SZ9－2000/35	2000				17.68	3.35	0.9		6325	2650×2000×2510
SZ9－2500/35	2500				20.5	3.87	0.8	7	7270	2650×2140×2760
SZ9－3150/35	3150				23.4	4.67	0.8		8510	3235×2335×2825
SZ9－4000/35	4000				30	5.5	0.8		10600	3325×2960×3170
SZ9－5000/35	5000				32.6	6.3	0.8		11450	3040×2300×3500
SZ9－6300/35	6300				36.3	8.06	0.7		16680	3900×3200×3385
SZ9－8000/35	8000				52.4	10.4	0.7		17130	4430×3242×3220
SZ9－10000/35	10000				73	17.8	0.6		25230	4500×3300×3770

4）SZ10系列35kV级有载调压电力变压器

该系列为三相铜绕组有载调压35kV级电力变压器，是目前我国节能效果较好的35kV级有载调压电力变压器，用途、作用、使用环境和结构外形与SZ9系列相似。其技术参数见表8－1－91。

表8－1－91 SZ10系列35kV级新型节能双绕组有载调压电力变压器技术参数

型 号	额定容量/(kV·A)	额定电压/kV		连接组标号	损耗/kW		空载电流/%	阻抗电压/%
		高压	低压		短路	空载		
SZ10－2000/35	2000	35	6.3 10.5	YN,d11	17.5	2.49	0.85	6.5
SZ10－2500/35	2500				20.3	2.94	0.85	6.5
SZ10－3150/35	3150	35 38.5			24.3	3.49	0.8	7
SZ10－4000/35	4000				28.7	4.18	0.8	7
SZ10－5000/35	5000				33.6	5.01	0.7	7
SZ10－6300/35	6300				36.15	6.08	0.7	7.5
SZ10－8000/35	8000		6.3 6.6 10.5		39.9	8.49	0.65	7.5
SZ10－10000/35	10000				47.3	10.01	0.65	8
SZ10－12500/35	12500				55.9	11.8	0.65	8

5）SCR9 系列 35kV 级树脂绝缘缠绕干式电力变压器

SCR9 系列树脂绝缘绕包式干式电力变压器的最大特点是适用于要求防火防爆的场所。其技术参数见表 8－1－92。

表 8－1－92　SCR9 系列 35kV 级树脂绝缘缠绕干式电力变压器技术参数

型　号	电压组合		低压/kV	连接组标号	损耗/W		空载电流/%	短路阻抗/%	绝缘等级	质量/kg
	高压/kV	分接范围/%			空载	负载				
SCR9－315/35	35 38.5	±2×2.5 或 ±5	0.4	Y,yn0 或 D,yn11	1140	3640	1.3	6	H 级或 F 级	1570
SCR9－400/35					1330	4680	1.3			1810
SCR9－500/35					1565	5750	1.3			2130
SCR9－630/35					1800	6700	1.2			2450
SCR9－800/35					2110	7940	1.2			3060
SCR9－1000/35					2345	9130	1.2			3720
SCR9－1250/35					2740	11060	1.1			4120
SCR9－1600/35					3130	13440	1.1			5270
SCR9－2000/35					3675	15810	0.9			5990
SCR9－2500/35					4000	18930	0.9			6870
SCR9－800/35			3.15 6 6.3 10 10.5 11	Y,d11	2175	8165	1.2			3360
SCR9－1000/35					2580	9500	1.2			4090
SCR9－1250/35					3030	11210	1.1			4330
SCR9－1600/35					3565	13435	1.1			5800
SCR9－2000/35					4110	15810	1	7		6590
SCR9－2500/35					4690	18930	1			7550
SCR9－3150/35					5865	21300	0.9	8		8900
SCR9－4000/35					6805	25610	0.9			9520
SCR9－5000/35					8130	30360	0.7			12840
SCR9－6300/35					9620	35480	0.7			13860
SCR9－8000/35				Y,d11 或 YN,d11	10500	39340	0.6	9		16100
SCR9－10000/35					12510	48245	0.6			21180
SCR9－12500/35					14860	58070	0.5			25600
SCR9－16000/35					18000	71760	0.5			35700

6）SC9、SC10 系列 35kV 级环氧树脂浇注干式电力变压器

该系列变压器具有防火性能好、防潮性能好、放电量小、绝缘水平高、过载能力大、机械强度高、损耗小、噪声小等优点，适用于各类重点工程，并在许多场合已广泛使用。

其技术参数见表 8－1－93 和表 8－1－94。

表 8-1-93 SC9 系列 35kV 环氧树脂浇注干式电力变压器技术参数

型 号	额定容量/(kV·A)	空载损耗/W	负载损耗(120°)/W	空载电流/%	短路阻抗/%	质量/kg
SC9-30/35	30	286	732	2.96	6	490
SC9-50/35	50	363	984	2.88		680
SC9-80/35	80	504	1398	2.71		855
SC9-100/35	100	667	1672	2.66		995
SC9-125/35	125	759	1849	2.57		1215
SC9-160/35	160	955	2307	2.49		1295
SC9-200/35	200	1097	2565	2.34		1355
SC9-250/35	250	1200	3034	2.31		1430
SC9-315/35	315	1290	4340	2.27		1660
SC9-400/35	400	1480	5115	2.19		1910
SC9-500/35	500	1705	6796	2.02		2280
SC9-630/35	630	1985	7805	1.95		2695
SC9-800/35	800	2307	9693	1.89		3240
SC9-1000/35	1000	2612	10425	1.78		3830
SC9-1250/35	1250	3015	13505	1.67		4515
SC9-1600/35	1600	3491	15900	1.56		5525
SC9-2000/35	2000	4077	18770	1.45		6670
SC9-2500/35	2500	4790	22930	1.35		7325
SC10-30/35	30	234	648	2.59		490
SC10-50/35	50	308	871	2.47		680
SC10-80/35	80	427	1237	2.34		855
SC10-100/35	100	565	1480	2.31		995
SC10-125/35	125	643	1636	2.24		1215
SC10-160/35	160	809	2042	2.21		1295
SC10-200/35	200	930	2270	2.06		1355
SC10-250/35	250	1015	2685	2.02		1430
SC10-315/35	315	1130	3870	1.96		1660
SC10-400/35	400	1255	4527	1.83		1910
SC10-500/35	500	1445	6015	1.77		2280
SC10-630/35	630	1682	6907	1.69		2695
SC10-800/35	800	1955	8578	1.55		3240
SC10-1000/35	1000	2214	9226	1.43		3830
SC10-1250/35	1250	2560	11950	1.39		4515
SC10-1600/35	1600	2958	14100	1.27		5525
SC10-2000/35	2000	3469	16215	1.11		6670
SC10-2500/35	2500	4066	20290	0.98		7325

表 8－1－94　SC10 系列 35kV 环氧树脂浇注干式电力变压器技术参数

型　号	额定容量/(kV·A)	空载损耗/W	负载损耗(120°)/W	空载电流/%	短路阻抗/%	质量/kg
SC10－30/35	30	234	648	2.59	6	490
SC10－50/35	50	308	871	2.47		680
SC10－80/35	80	427	1237	2.34		855
SC10－100/35	100	565	1480	2.31		995
SC10－125/35	125	643	1636	2.24		1215
SC10－160/35	160	809	2042	2.21		1295
SC10－200/35	200	930	2270	2.06		1355
SC10－250/35	250	1015	2685	2.02		1430
SC10－315/35	315	1130	3870	1.96		1660
SC10－400/35	400	1255	4527	1.83		1910
SC10－500/35	500	1445	6015	1.77		2280
SC10－630/35	630	1682	6907	1.69		2695
SC10－800/35	800	1955	8578	1.55		3240
SC10－1000/35	1000	2214	9226	1.43		3830
SC10－1250/35	1250	2560	11950	1.39		4515
SC10－1600/35	1600	2958	14100	1.27		5525
SC10－2000/35	2000	3469	16215	1.11		6670
SC10－2500/35	2500	4066	20290	0.98		7325

4. 110kV 级电力变压器技术参数

1）SF10 系列 110kV 级电力变压器

该系列电力变压器为三相铜线双绕组油浸式电力变压器。其技术参数见表 8－1－95。

表 8－1－95　SF10 系列 110kV 级铜线双绕组特低损耗三相电力变压器技术参数

型　号	额定容量/(kV·A)	额定电压/kV		连接组标号	损耗/kW		空载电流/%	阻抗电压/%
		高压	低压		短路	空载		
SF10－6300/110	6300	(110、121)±2×2.5%	6.3 6.6 10.5 11	YN,d11	41	9.4	1.1	10.5
SF10－8000/110	8000				50	11.3	1.1	
SF10－10000/110	10000				59	13.3	1	
SF10－12500/110	12500				70	15.7	1	
SF10－16000/110	16000				86	18	0.9	
SF10－20000/110	20000				104	21	0.9	
SF10－25000/110	25000				123	24.5	0.8	
SF10－31500/110	31500				148	29.5	0.8	

2）SFZ9、SZ9D 系列 110kV 级有载调压电力变压器

SFZ9 系列变压器为三相油浸风冷铜线双绕组有载调压电力变压器，SZ9D 系列为三相油浸自冷铜线双绕组低噪音有载调压电力变压器，适用于在电压等级为 110kV 的输电及配电电网中变换电压，且当电压波动时可在带负荷运行状态下自动或手动调整电压，保持输出稳定的电压。

SFZ9、SZ9D 系列 110kV 电力变压器的技术参数见表 8－1－96。

表 8－1－96 SFZ9、SZ9D 系列 110kV 级三相铜线双绕组有载调压电力变压器技术参数

型 号	额定容量/(kV·A)	额定电压/kV		连接组标号	损耗/kW		空载电流/%	阻抗电压/%	质量/kg			外形尺寸 长×宽×高/(mm×mm×mm)
		高压	低压		短路	空载			器身	油	总体	
SFZ9－6300/110	6300	110	6.3 6.6 10.5	YN,d11	39.8	11.5	0.95		10030	3850	18820	4560×3240×3190
SFZ9－8000/110	8000				45	13.2	0.9		11890	5100	21420	4610×3270×3280
SFZ9－10000/110	10000				54	15.2	0.85		13560	6190	26140	4690×3420×3570
SFZ9－12500/110	12500				65.9	17.5	0.8		15180	7300	28740	4830×2680×4130
SFZ9－16000/110	16000				82.2	20.5	0.75		17700	8100	32730	4950×4050×4570
SFZ9－20000/110	20000				1000	23.5	0.7		22220	9240	39700	5110×4530×4735
SFZ9－25000/110	25000				114	27	0.65		27810	10500	43800	5330×4590×4830
SFZ9－31500/110	31500				133	31	0.6		29900	11470	48800	5410×4630×4964
SFZ9－40000/110	40000				156	37	0.55		34470	14740	56660	5830×4820×5150
SFZ9－50000/110	50000				194	44	0.5		35710	15780	65240	6060×5010×5129
SFZ9－63000/110	63000				260	56	0.45		41645	16250	72405	6420×5180×5450
SZ9D－6300/110	6300				39.8	11	1.08	10.3	10535	4016	19760	5600×4100×4000
SZ9D－8000/110	8000				45	12	1.13	10.3	12480	5350	22495	5670×4100×4100
SZ9D－10000/110	10000				54	14.4	0.9	10.3	14236	6500	27450	5700×4200×4200
SZ9D－12500/110	12500				65.9	16.4	0.85	10.4	15940	7700	30108	53730×4200×4300
SZ9D－16000/110	16000				82.2	19.5	0.81	10.6	18590	8500	34375	5750×4300×4600

5. 电力变压器的选择

为了降低电能损耗，变压器应首选低损耗节能型。当厂区配电母线电压偏差不能满足要求时，总降压变压器可选用有载调压变压器。车间变压器一般采用普通变压器。在具有三级高压的大型工厂变电所，如果通过主变压器各侧的功率均达到该变压器容量的 15% 以上，宜采用三绕组变压器。

矿区变电所主变压器的台数、容量，应经技术经济论证确定。主变压器台数不得少于 2 台，当断开 1 台时其余变压器应能保证维持正常煤炭生产所需电力负荷，且不得少于全部负荷的 75%。

6. 电力变压器的试验

1）油中溶解气体色谱分析

试验周期（运行中的电力变压器）：①120MV·A 及以上的发电厂主变压器为 6 个月；

②8～120MV·A及以上的变压器为1年；③8MV·A以下的变压器自行规定。大修后及必要时也需要立即进行该项试验。

要求：①运行设备的油中H_2与烃类气体含量（体积分数）超过下列任何一项值时应引起注意：总烃含量大于150×10^{-6}，H_2含量大于150×10^{-6}，C_2H_2含量大于5×10^{-6}（500kV变压器为1×10^{-6}）；②烃类气体总和的产气速率大于0.25mL/h（开放式）和0.5mL/h（密封式），或相对产气速率大于10%/月，则认为设备有异常。

2）绕组直流电阻

试验周期：①1～3年或自行规定；②无励磁调压变压器变换分接位置后；③有载调压变压器的分接开关检修后（在所有分接侧）；④大修后；⑤必要时。

要求：①1.6MV·A以上变压器，各相绕组电阻相互间的差别不应大于三相平均值的2%；无中性点引出的绕组，线间差别不应大于三相平均值的1%；②1.6MV·A及以下的变压器，相间差别一般不大于三相平均值的4%，线间差别一般不大于三相平均值的2%；③与以前相同部位测得值比较，其变化不应大于2%。

3）绕组绝缘电阻、吸收比或（和）极化指数

试验周期：①1～3年或自行规定；②大修后；③必要时。

要求：①绝缘电阻换算至同一温度下，与前一次测试结果相比应无明显变化；②吸收比（10～30℃范围）不低于1.3或极化指数不低于1.5。

4）绕组的tanδ

试验周期：①1～3年或自行规定；②大修后；③必要时。

要求：①20℃时tanδ值，66～220kV时不大于0.8%；35kV及以下时不大于1.5%；②tanδ值与历年的数值比较不应有显著变化（一般不大于30%）；③试验电压，绕组电压10kV及以上为10kV，绕组电压10kV以下为其额定电压；④用M型试验器时试验电压自行规定。

5）电容型套管的tanδ和电容值

试验周期：①1～3年或自行规定；②大修后；③必要时。

要求：参见表8-1-57。

6）绝缘油试验

（1）试验周期：①1～3年或自行规定；②大修后；③必要时。

（2）要求：参见表8-1-97。

表8-1-97　变压器油的试验项目和要求

序号	项　目	要　求	
		投入运行前的油	运行油
1	外观	透明、无杂质或悬浮物	
2	水溶性酸pH值	5.4	4.2
3	酸值/(mg·g^{-1})	0.03	0.1
4	闪点（闭口）/℃	140（10号、25号油） 135（45号油）	不应比左栏要求低5℃； 不应比上次测定值低5℃

表 8-1-97（续）

序号	项 目	要 求	
		投入运行前的油	运 行 油
5	水分/(mg·L^{-1})	(66～110kV)20	(66～110kV)35
6	击穿电压/kV	(15kV 以下)30 (15～35kV)35 (66～220kV)40	(15kV 以下)25 (15～35kV)30 (66～220kV)35
7	界面张力（25℃）(mN·m^{-1})	35	19
8	tanδ（90℃）/%	(330kV 及以下)1	(330kV 及以下)4
9	体积电阻率（90℃）/(Ω·m)	6×10^{10}	(330kV 及以下)3×10^{10}

注：对全密封式设备如电压互感器，不易取样或补充油，应根据具体情况决定是否采样；有载调压开关用的变压器油试验项目、周期和要求按制造厂规定。

7）交流耐压试验

试验周期：①1～5 年（10kV 及以下）；②大修后（66kV 及以下）；③更换绕组后；④必要时。

要求：①油浸变压器试验电压值按定期试验、部分更换绕组电压值；②干式变压器全部更换绕组时，按出厂试验电压值；部分更换绕组和定期试验时，按出厂试验电压值的 0.85 倍。

8）铁芯（有外引接地线的）绝缘电阻

试验周期：①1～3 年或自行规定；②大修后；③必要时。

要求：①与以前测试结果相比无显著差别；②运行中铁芯接地电流一般不大于 0.1A。

9）穿心螺栓、铁轭夹件、绑扎钢带、铁芯、线圈压环及屏蔽等的绝缘电阻

试验周期：①大修后；②必要时。

要求：220kV 及以上者绝缘电阻一般不低于 500MΩ，其他自行规定。

10）绕组泄漏电流

测试周期：①1～3 年或自行规定；②必要时。

要求：①试验电压见表 8-1-98；②与前一次测试结果相比应无明显变化。

表 8-1-98 绕组泄漏电流测试电压 kV

绕组额定电压	3	6～10	20～35	66～330	500
直流试验电压	5	10	20	40	60

11）绕组所有分接的电压比

试验周期：①分接开关引线拆装后；②更换绕组后；③必要时。

要求：①各相应接头的电压比与铭牌值相比，不应有显著差别，且符合规律；②电压 35kV 以下，电压比小于 3 的变压器，电压比允许偏差为 ±1%，其余所有变压器的额定分接电压比允许偏差为 ±0.5%，其他分接的电压比应在变压器阻抗电压值（%）的 1/10 以内，但不得超过 ±1%。

12）三相变压器的组别或单相变压器极性校核

周期：更换绕组后。

要求：必须与变压器铭牌和顶盖上的端子标志一致。

13）空载电流和空载损耗

试验周期：①更换绕组后；②必要时。

要求：与前次试验值相比，无明显变化。

14）短路阻抗和负载损耗

测试周期：①更换绕组后；②必要时。

要求：与前次试验值相比，无明显变化。

15）局部放电测量

测量周期：①大修后（220kV及以上）；②更换绕组后（220kV及以上，120MV·A及以上）；③必要时。

要求：①对于油浸式电力变压器，在线端电压为$1.5U_m/\sqrt{3}$时（U_m为设备最高电压，下同），放电量一般不大于500pC；在线端电压为$1.3U_m/\sqrt{3}$时，放电量一般不大于300pC；②对于干式电力变压器，当变压器接到大接地电流系统时，应先加$1.5U_m/\sqrt{3}$的线对地预加电压，其感应耐压时间为30s，然后不切断电源再施加$1.1U_m/\sqrt{3}$的线对地电压3min，并测量此期间的局部放电量；当变压器接到小接地电流系统时，应先加$1.5U_m$的相对相预加电压，其感应耐压时间为30s，此时有一个线路端子接地，然后不切断电源再施加$1.1U_m$相对相电压3min，并测量此期间的局部放电量；然后将另一个线路端子接地，重复进行本试验。所测得的局部放电量允许值应由制造厂与用户协商确定。

16）有载调压装置的试验和检查

（1）检查动作顺序和动作角度：范围开关、选择开关、切换开关的动作顺序应符合制造厂的技术要求，其动作角度应与出厂试验记录相符。

（2）操作试验：变压器带电时手动操作、电动操作、远方操作各2个循环。手动操作应轻松，必要时用力矩表测量，其值不超过制造厂的规定；电动操作应无卡涩，没有连动现象，电气和机械限位动作正常。

（3）检查和切换测试：①测量过渡电阻的阻值应与出厂值相符；②测量切换时间；③检查插入触头、动静触头的接触情况和电气回路的连接情况；三相同步的偏差、切换时间的数值及正反向切换时间的偏差应均与制造厂的技术要求相符，动静触头平整光滑，触头烧损厚度不超过制造厂的规定值，回路连接良好；④单、双数触头间非线性电阻的试验按制造厂的技术要求进行；⑤检查单、双数触头间放电间隙，应无烧伤或变动。

（4）检查操作箱：接触器、电动机、传动齿轮、辅助触点、位置指示器、计数器等工作正常。

（5）切换开关室绝缘油试验：符合制造厂的技术要求，击穿电压一般不低于25kV。

（6）二次回路绝缘试验：绝缘电阻一般不低于1MΩ。

17）测温装置及其二次回路试验

试验周期：①1～3年；②大修后；③必要时。

要求：密封良好，指示正确，测温电阻值应与出厂值相符；绝缘电阻一般不低

于 1MΩ。

18）气体继电器及其二次回路试验

试验周期：①1～3 年（二次回路）；②大修后；③必要时。

要求：整定值符合运行规程要求，动作正确；绝缘电阻一般不低于 1MΩ。

19）压力释放器校验

试验周期：必要时。

要求：动作值与铭牌值相差应在 ±10% 范围内或按制造厂规定。

20）整体密封检查

测试周期：大修后。

要求：①35kV 及以下管状和平面油箱变压器采用超过油枕顶部 0.6m 油柱试验（约 5kPa 压力）；对于波纹油箱和有散热器的油箱采用超过油枕顶部 0.3m 油柱试验（约 2.5kPa 压力）；试验持续 12h 无渗漏；②110kV 及以上变压器，在油枕顶部施加 0.035MPa 压力，试验持续 24h 无渗漏。试验时带冷却器，不带压力释放装置。

21）冷却装置及其二次回路检查试验

测试周期：①日行规定；②大修后；③必要时。

要求：①投运后，流向、温升和声响正常，无渗漏；②强油水冷装置的检查和试验，按制造厂规定；③绝缘电阻一般不低于 1MΩ。

22）套管中的电流互感器绝缘试验

测试周期：①大修后；②必要时。

要求：绝缘电阻一般不低于 1MΩ。

23）全电压下空载合闸试验

试验周期：更换绕组后。

要求：①全部更换绕组，空载合闸 5 次，每次间隔 5min；②部分更换绕组，空载合闸 3 次，每次间隔 5min。

24）油中糠醛含量测量

测量周期：必要时。

要求：①含量超过表 8－1－99 中的值时，一般为非正常老化，需跟踪检测；②跟踪检测时，注意增长率；③测试值大于 4mg/L 时，认为绝缘老化已比较严重。

表 8－1－99 变压器油中糠醛含量参照值

运行年限	1～5	5～10	10～15	15～20
糠醛量/(mg·L^{-1})	0.1	0.2	0.4	0.75

25）绝缘纸（板）聚合度测试

测试周期：必要时。

要求：当聚合度小于 250 时，应引起注意。

26）阻抗测量测试

测试周期：必要时。

要求：与出厂值相差在 ±5% 范围内，与三相或三相平均值相差在 ±2% 范围内。

27）振动测试

测试周期：必要时。

要求：与出厂值相比不应有明显差别。

28）噪声测试

周期：必要时。

要求：与出厂值相比不应有明显差别。

29）油箱表面温度分布测试

周期：必要时。

要求：局部热点温升不超过 80K。

30）电力变压器交流试验电压值及操作波试验电压值（表 8－1－100）

表 8－1－100　电力变压器交流试验电压值及操作波试验电压值

额定电压/kV	最高工作电压/kV	线端交流试验电压值/kV		中性点交流试验电压值/kV		线端操作波试验电压值/kV	
		全部更换绕组	部分更换绕组	全部更换绕组	部分更换绕组	全部更换绕组	部分更换绕组
<1	≤1	3	2.5	3	2.5	—	—
3	3.5	18	15	18	15	35	30
6	6.9	25	21	25	21	50	40
10	11.5	35	30	35	30	60	50
15	17.5	45	38	45	38	90	75
20	23	55	47	55	47	105	90
35	40.5	85	72	85	72	170	145
66	72.5	140	120	140	120	270	230
110	126	200	170（195）	95	80	375	319

注：1. 括号内数值适用于不固定接地或经小电抗接地系统。

2. 操作波的波形为：波头大于 20μs，90% 以上幅值持续时间大于 200μs，波长大于 500μs；负极性 3 次。

7. 不同容量、不同类型变压器应进行的试验项目

容量在 1.6MV · A 以上的油浸式电力变压器其定期试验项目见上述 1）、2）、3）、4）、5）、6）、7）、8）、10）、16）、17）、18）、21）项，其一般性大修试验项目见上述 1）、2）、3）、4）、5）、6）、7）、8）、9）、15）、16）、17）、18）、20）、21）、22）项，其更换绕组大修的试验项目见上述 1）、2）、3）、4）、5）、6）、7）、8）、9）、11）、12）、13）、14）、15）、16）、17）、18）、20）、21）、22）、25）项。

容量在 1.6MV · A 及以下的油浸式电力变压器，其定期试验项目见上述 2）、3）、4）、5）、6）、7）、8）、17）、18）项，其中 4）、5）项适用于 35kV 及以上变电所用变压器。其大修试验项目见上述 2）、3）、4）、5）、6）、7）、8）、9）、11）、12）、13）、14）、17）、18）、20）项，其中 11）、12）、13）、14）项适用于更换绕组时，4）、5）项适用于 35kV 及以上变电所用变压器。

干式电力变压器定期试验项目见上述2）、3）、7）、17）项，更换绕组的大修试验项目见上述2）、3）、7）、9）、11）、12）、13）、14）、15）、17）项，其中15）项适用于浇注型干式变压器。

1.3.2.9 电力架空线路

电力架空线路担负着传导电流的作用，它通过绝缘子架设在电杆的横担上面。架空线除承受自身的重力和经常承受风、雨、冰、雪等因素的作用外，还要承受周围空气所含化学杂质的侵蚀，因此架空线必须具备良好的导电性能和足够的机械强度以及耐腐蚀的性能，并尽可能质量轻且价廉。

在输电线路中多采用钢芯铝绞线，其技术参数见表8－1－101。铝导线一般使用在10kV及以下的配电线路上。除在特殊要求的地方采用铜线外，一般都采用铝导线代替铜导线。钢芯铝线广泛应用于高压电力线路中。

表8－1－101 JL/G钢芯铝绞线技术参数

标称截面积（钢/铝）/mm²	结构 根数（根）/直径（mm）		计算截面积/mm²			外径/mm	直流电阻/（Ω·km⁻¹）	计算拉断力/N	计算质量/（kg·km⁻¹）
	铝	钢	铝	钢	总计				
10/2	6/1.50	1/1.50	10.60	1.77	12.37	4.05	2.706	2140	242.3
16/3	6/1.85	1/1.85	16.13	2.69	18.82	5.55	1.779	6130	65.2
25/4	6/2.32	1/2.32	25.36	4.23	29.59	6.96	1.131	9290	102.6
35/6	6/2.72	1/2.72	34.86	5.81	40.67	8.36	0.8230	12630	141.0
50/8	6/3.20	1/3.20	48.25	8.04	56.29	9.60	0.5946	16870	195.1
50/30	12/3.32	7/2.32	50.73	29.59	80.32	11.60	0.5692	42620	372.0
70/10	6/3.80	1/3.80	68.05	11.34	79.39	11.40	0.4217	23390	275.2
70/40	12/2.72	7/2.72	69.73	40.67	110.40	13.60	0.4141	58300	511.3
95/15	26/2.15	7/1.67	94.39	15.33	109.72	13.61	0.3058	35000	380.8
95/20	7/4.16	7/1.85	95.14	18.82	113.96	13.87	0.3019	37200	408.9
95/55	12/3.20	7/3.20	96.51	56.30	152.81	16.00	0.2992	78110	707.7
120/7	18/2.90	1/2.90	118.89	6.61	125.50	14.50	0.2422	27570	379.0
120/20	26/2.38	7/1.85	115.67	18.82	134.49	15.07	0.2496	41000	466.8
120/25	7/4.72	7/2.10	122.48	24.25	146.73	15.74	0.2345	47880	526.6
120/70	12/3.60	7/3.60	122.15	71.25	193.40	18.00	0.2364	98370	895.6
150/8	18/3.20	1/3.20	144.76	8.04	152.80	16.00	0.1989	32860	461.4
150/20	24/2.78	7/1.85	145.68	18.82	164.50	16.67	0.1980	46630	549.4
150/25	26/2.70	7/2.10	148.86	24.25	173.11	17.10	0.1939	54110	601.0
150/35	30/2.50	7/2.50	147.26	34.36	181.62	17.50	0.1962	65020	676.2
185/10	18/3.60	1/60	183.22	10.18	193.40	18.00	0.1572	40880	584.0
185/25	24/3.15	7/2.10	187.04	24.25	211.29	18.90	0.1542	59420	706.1
185/30	26/2.98	7/2.32	181.34	29.59	210.93	18.88	0.1592	64320	732.6

表 8－1－101（续）

标称截面积（钢/铝）/mm²	结构 根数(根)/直径(mm)		计算截面积/mm²			外径/mm	直流电阻/(Ω·km⁻¹)	计算拉断力/N	计算质量/(kg·km⁻¹)
	铝	钢	铝	钢	总计				
185/45	20/2.80	7/2.80	184.73	43.10	227.83	19.60	0.1564	80190	848.2
210/10	18/3.80	1/3.80	204.14	11.34	215.48	19.00	0.1411	45140	650.7
210/25	24/3.33	7/2.22	209.02	27.10	236.12	19.98	0.1380	65990	789.1
210/35	26/3.22	7/2.50	211.73	34.73	246.09	20.38	0.1363	74250	853.9
210/50	30/2.98	7/2.98	209.24	48.82	258.06	20.86	0.1381	90830	960.8
240/30	24/3.60	7/2.40	244.29	31.67	275.96	21.60	0.1181	75620	922.2
240/40	26/3.42	7/2.66	238.85	38.90	277.75	21.66	0.1209	83370	964.3
240/55	30/3.20	7/3.20	241.27	56.30	297.57	22.40	0.1198	102100	1108
300/15	42.300	7/1.67	296.88	15.33	312.21	23.01	0.09724	68060	939.8
300/20	45/2.93	7/1.95	303.42	20.91	324.33	23.43	0.09520	75680	1002
300/25	48/2.85	7/2.22	306.21	27.10	333.31	23.76	0.09433	83410	1058
300/40	24/3.99	7/2.66	300.09	38.90	338.99	23.94	0.09614	92220	1133
300/50	26/3.83	7/2.98	299.54	48.82	348.82	24.26	0.09636	103400	1210
300/70	30/3.60	7/3.60	305.36	71.25	376.61	25.20	0.09463	128000	1402
400/20	42/3.51	7/1.95	406.40	20.91	427.31	26.91	0.07104	88850	1286
400/25	45/3.33	7/2.22	391.91	27.10	419.01	26.64	0.07370	95940	1295
400/35	48/3.22	7/2.50	390.88	34.36	425.24	26.82	0.07389	10390	1349
400/50	54/3.07	7/3.07	399.73	51.82	451.55	27.63	0.07232	123400	1511
400/65	26/4.42	7/3.44	398.94	65.06	464.00	28.00	0.07236	135200	1611
400/95	30/4.16	19/2.50	407.75	93.27	501.02	29.14	0.07087	171300	1860
500/35	45/3.75	7/2.50	497.01	34.36	531.37	30.00	0.05812	119500	1640
500/45	48/3.60	7/2.80	488.58	43.10	531.68	30.00	0.05912	128100	1688
500/65	54/3.44	7/3.44	501.88	65.06	566.94	30.96	0.05760	15400	1897
630/45	45/4.20	7/2.80	623.45	43.10	666.55	33.60	0.04633	148700	2060
630/55	48/4.12	7/3.20	639.92	56.30	696.22	34.32	0.04514	164400	2209
630/80	54/3.87	19/2.32	635.19	80.32	715.51	34.82	0.04551	19200	2388
800/55	45/5.80	7/3.20	814.30	526.30	870.60	38.40	0.03547	191500	2690
800/70	48/4.63	7/3.60	808.15	71.25	879.40	38.58	0.03574	207000	2791
800/100	54/4.33	19/2.60	795.17	100.88	896.05	38.98	0.03635	241100	2991

电力架空线路型号第一个字母均用 J，表示同心绞合；单一导线在 J 后面为组合导线的单线代号；组合导线在 J 后面为外层线和内层线的代号，二者用“/”分开；在型号尾

部加防腐代号 F，则表示导线采用涂防腐油结构。

1. 电力架空线路的选择

架空线路选择与校验项目见表 8－1－102。

表 8－1－102 架空线路选择与校验项目

按工作条件选择	电压、电流、机械强度
校验	热稳定、动稳定
按环境条件选择	温度、湿度、海拔高度、地震影响

注：按环境条件修正见本章附录 B。

（1）按经济电流密度选择导线截面。应先确定最大负荷利用小时 T_{max}，然后根据导线材料由表 8－1－103 查出经济电流密度 J_{ec}，按线路正常运行最大长时工作电流 I_{ca}，由下式求出经济截面积（mm^2）：

$$S_{ec}=\frac{I_{ca}}{J_{ec}} \tag{8-1-66}$$

表 8－1－103 经 济 电 流 密 度 A/mm^2

T_{max}		1000～3000	3000～5000	5000 以上
裸导体	铜	3	2.25	1.75
	铝（钢芯铝绞线）	1.65	1.15	0.9
	钢	0.45	0.4	0.35

（2）按长时允许电流选择导线截面。选择导线截面应使线路长时最大工作电流 I_{ca} 不大于导线的长时允许电流 I_{ac}，即

$$I_{ac}\geqslant I_{ca} \tag{8-1-67}$$

裸导体的长时允许电流见表 8－1－104。

表 8－1－104 裸导体的长时允许电流（环境温度为 25℃，导线最高允许温度 70℃）

铜 线			铝 线			钢芯铝绞线	
导线截面积/mm^2	长时允许电流/A		导线截面积/mm^2	长时允许电流/A		导线截面积/mm^2	室外长时允许电流/A
	室内	室外		室内	室外		
4	50	25	16	105	80	16	105
6	70	35	25	135	110	25	135
10	95	60	35	170	135	35	170
16	130	100	50	215	170	50	220
25	180	140	70	265	215	70	275
35	220	175	95	325	260	95	335
50	270	220	120	375	310	120	380
70	340	280	150	440	370	150	445
95	415	340	185	500	425	185	515
120	485	405	240	610	—	240	610
150	570	480	—	—	—	300	700
185	645	550	—	—	—	400	800
240	770	650	—	—	—	—	—

（3）按允许电压损失选择导线截面。各类电网最大允许电压损失百分数见表 8－1－105。

在选择导线截面时，要求实际电压损失百分数 $\Delta U\%$ 不超过允许电压损失百分数 $\Delta U_{ac}\%$，即

$$\Delta U\% \leqslant \Delta U_{ac}\% \tag{8-1-68}$$

$$\Delta U\% = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100\% \tag{8-1-69}$$

① 终端负荷电压损失计算。单相对称系统的线电压损失 ΔU 为

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx IR\cos\varphi + IX\sin\varphi \tag{8-1-70}$$

式中　I——负荷电流，A；

R——线路每相电阻，Ω；

X——线路每相电抗，Ω；

φ——负荷的功率因数角，（°）。

三相对称系统的线电压损失 ΔU 为

$$\Delta U = \sqrt{3}I(R\cos\varphi + X\sin\varphi) \tag{8-1-71}$$

用功率表示为

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_N} = \frac{1}{U_N}(Pr_0 + Qx_0) \tag{8-1-72}$$

式中　P——负荷的有功功率，kW；

Q——负荷的无功功率，kvar；

U_N——线路额定电压，kV；

r_0、x_0——导线单位长度的电阻、电抗，Ω/km。

② 分布负荷电压损失计算。分布负荷的特点是一条线路沿途接有许多负荷，其电压损失计算式为

$$\Delta U = \frac{1}{U_N}\sum_{i=1}^{n}(p_iR_i + q_iX_i) = \frac{1}{U_N}\sum_{i=1}^{n}(P_ir_i + Q_ix_i) \tag{8-1-73}$$

式中　p_i——各分布负荷的有功功率，kW；

q_i——各分布负荷的无功功率，kvar；

P_i——各线段上负荷的有功功率，kW；

Q_i——各线段上负荷的无功功率，kvar；

r_i、x_i——各线段上的电阻及电抗，Ω；

R_i、X_i——电源至各负荷的线路电阻及电抗，Ω。

当各段导线截面相同（即均一导线）时，式（8－1－73）可改写为

$$\Delta U = \frac{1}{U_N}\left(r_0\sum_{i=1}^{n}p_il_i + x_0\sum_{i=1}^{n}q_il_i\right) \tag{8-1-74}$$

式中　r_0、x_0——导线单位长度的电阻、电抗，Ω/km；

l_i——电源至各负荷的距离，km。

允许电压损失是有功功率在电阻上的电压损失与无功功率在电抗上的电压损失之和，即

$$\Delta U_{ac} = \Delta U_R + \Delta U_X \tag{8-1-75}$$

$$\Delta U_R = \frac{Plr_0}{U_N} = \frac{Pl}{\gamma S U_N} \tag{8-1-76}$$

$$\Delta U_X = \frac{Qlx_0}{U_N} \tag{8-1-77}$$

上式中 ΔU_R 为有功功率电压损失，ΔU_X 为无功功率电压损失，γ 为导线的电导率，Q、l、U_N 均为已知数据，x_0 随导线截面变化很小，可取其平均值（$x_0 = 0.35 \sim 0.4\Omega/km$），故 ΔU_X 值即可求得。此时有功功率的电压损失为

$$\Delta U_R = \Delta U_{ac} - \Delta U_X = \frac{Pl}{\gamma S U_N} \tag{8-1-78}$$

由上式可求得导线截面积为

$$S = \frac{Pl}{\gamma U_N \Delta U_R} \tag{8-1-79}$$

（4）按机械强度条件选择导线截面。架空导线的最小允许截面见表 8-1-106，此规定是为了防止架空导线受自然条件影响而发生断线。

高压架空线路导线截面的选择，首先按经济电流密度初选，然后按其他条件进行校验，最后按各种条件中最大者选取。低压架空线路往往负荷电流较大，宜按电压损失条件或按长时允许电流条件选择导线截面，按其他条件进行校验，但不按经济电流密度选择。

表 8-1-105 电力网允许电压损失百分数 ΔU_{ac}%

电网种类及运行状态	ΔU_{ac}%	备 注
(1) 室内电压配电线路	1~2.5	(1)、(2) 两项总和不大于 6%
(2) 室外电压配电线路	3.5~5	
(3) 工厂内部供给照明与动力的低压线路	3~5	
(4) 正常运行的高压配电线路	3~6	(4)、(6) 两项之和不大于 10%
(5) 故障运行的高压配电线路	6~12	
(6) 正常运行的高压输电线路	5~8	
(7) 故障运行的高压输电线路	10~12	

表 8-1-106 架空线路按机械强度要求的最小允许截面 mm^2

导线材料种类	6~35kV 架空线路		1kV 以下线路
	居民区	非居民区	
铝及铝合金绞线	35	25	16
钢芯铝绞线	25	16	18
铜线	16	18	(ϕ3.2mm)

2. 电力架空线路试验

1kV 以上的架空电力线路的试验项目、试验周期和试验要求见表 8-1-107。

表 8－1－107　1kV 以上的架空电力线路的试验项目、试验周期和试验要求

序号	项　目	周　期	要　求
1	检查导线连接管的连接情况	(1) 2 年； (2) 线路检修时	(1) 外观检查无异常； (2) 连接管压接后的尺寸及外形应符合要求
2	悬式绝缘子串的零值绝缘子检测（66kV 及以上）	必要时	在运行电压下检测
3	线路的绝缘电阻（有带电的平行线路时不测）	线路检修后	自行规定
4	检查相位	线路连接有变动时	线路两端相位应一致
5	间隔棒检查	(1) 3 年； (2) 线路检修时	状态完好，无松动无胶垫脱落等情况
6	阻尼设施的检查	(1) 1～3 年； (2) 线路检修时	无磨损松动等情况
7	绝缘子表面等值附盐密度	1 年	结合运行经验，将测量值作为调整耐污绝缘水平和监督绝缘安全运行的依据。盐密度值超过规定时，应根据情况采取调整爬距、清扫、涂料等措施

注：关于架空电力线路离地距离、离建筑物距离、空气间隙、交叉距离和跨越距离的检查，杆塔和过电压保护装置的接地电阻测量、杆塔和地下金属部分的检查、导线断股检查等项目，应按架空电力线路和电气设备接地装置有关规程的规定进行。

1.3.2.10　电力电缆

电力的输送通常采用两种形式，即架空线路和电缆线路。电缆易做成较大的导体截面，输送容量大，线路压降小，但成本较高。电力电缆按绝缘类型和结构可分为以下几类：油浸纸绝缘电力电缆；塑料绝缘电力电缆，包括聚氯乙烯绝缘电力电缆、聚乙烯绝缘电力电缆、交联聚乙烯绝缘电力电缆；橡皮绝缘电力电缆，包括天然丁苯橡皮绝缘电力电缆、乙丙橡皮绝缘电力电缆、丁基橡皮绝缘电力电缆等；除以上所述，还有低温电缆、超导电缆、气体绝缘电缆等。

电缆的额定电压用 $U_0/U(U_m)$ 表示，均为有效值，单位为 kV，其中：

U_0 为电缆导体与屏蔽层或金属套之间的额定工频电压；

U 为电缆任何两个导体之间的额定工频电压；

U_m 为电缆任何两个导体之间的运行最高电压。

1. 电力电缆技术参数

1）塑料绝缘电力电缆

用于塑料绝缘电力电缆中的塑料材料，主要有聚氯乙烯塑料和交联聚乙烯塑料以及它们的派生产品：阻燃型聚氯乙烯塑料和阻燃型聚乙烯塑料。

塑料绝缘电力电缆加工简单，敷设时没有位差限制，非磁性，具有良好的耐热性。随着技术的发展，塑料绝缘电力电缆的耐电压水平不断提高，耐老化性能不断改善，逐渐替代了纸绝缘电力电缆。塑料绝缘电力电缆的命名代号见表 8－1－108。

表 8－1－108 塑料绝缘电力电缆的命名代号

名 称	代 号	名 称	代 号
铜导线	T	聚乙烯绝缘或护套	Y
铝导线	L	交联聚乙烯绝缘	YJ
聚氯乙烯绝缘或护套	V		

2）聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆

该电缆长期使用温度不得超过 70℃，5s 短时不超过 160℃，敷设时的环境温度不低于 0℃。敷设时电缆的最小弯曲半径：单心电缆为 $20(d+D)$ mm，多心电缆为 $15(D+d)$ mm。D 与 d 分别为电缆和导体的实际外径。

聚氯乙烯绝缘电力电缆型号及技术参数见表 8－1－109～表 8－1－111。

表 8－1－109 聚氯乙烯绝缘电力电缆型号

型 号		名 称
铜 芯	铝 芯	
VV	VLV	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆
VY	VLY	聚氯乙烯绝缘聚乙烯护套电力电缆
VV22	VLV22	聚氯乙烯绝缘钢带铠装聚氯乙烯护套电力电缆
VV23	VLV23	聚氯乙烯绝缘钢带铠装聚乙烯护套电力电缆
VV32	VLV32	聚氯乙烯绝缘细钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆
VV33	VLV33	聚氯乙烯绝缘细钢丝铠装聚乙烯护套电力电缆
VV42	VLV42	聚氯乙烯绝缘粗钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆
VV43	VLV43	聚氯乙烯绝缘粗钢丝铠装聚乙烯护套电力电缆

表 8－1－110 聚氯乙烯绝缘电力电缆的规格

型 号		芯 数	额定电压/kV		
			0.6/1	1.8/3	3.6/6.6/6.6/10
铜 芯	铝 芯		标称截面积/mm^2		
VV、VY	—	1	1.5～800	10～800	10～1000
—	VLV、VLY		2.5～1000	10～1000	10～1000
VV22、VV23	VLV22、VLV23		10～1000	10～1000	10～1000

表8-1-110（续）

型号		芯数	额定电压/kV		
			0.6/1	1.8/3	3.6/6.6/6.6/10
铜芯	铝芯		标称截面积/mm^2		
VV、VY	—	2	1.5～185	10～185	10～150
—	VLV、VLY		2.5～185	10～185	10～150
—	VLV22、VLV23		4～185	10～185	10～150
VV、VY	—	3	1.5～300	10～300	10～300
—	VLV、VLY		2.5～300	10～300	10～300
VV22、VV23	VLV22、VLV23		4～300	10～300	10～300
VV32、VV33	VLV32、VLV33				16～300
VV42、VV43	VLV42、VLV43				16～300
VV、VY	VLV、VLY	3+1	4～300	10～300	
VV22、VV23	VLV22、VLV23		4～300	10～300	
VV、VY	VLV、VLY	4	4～185	10～185	
VV22、VV23	VLV22、VLV23		4～185	10～185	

表8-1-111　600/1000V单芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆技术参数

标称截面/mm^2	绝缘厚度/mm	VV、VLV				VLV、VLV32					
		护套厚度/mm	电缆外径/mm	电缆质量/（$kg \cdot km^{-1}$）		衬垫厚度/mm	钢丝直径/mm	外护套厚度/mm	电缆外径/mm	电缆质量/（$kg \cdot km^{-1}$）	
				铜	铝					铜	铝
50	1.4	1.4	15.1	600	290	0.8	1.25	1.5	19.1	1010	700
70	1.4	1.4	16.9	810	380	0.8	1.25	1.6	21.2	1280	850
95	1.6	1.5	19.4	1100	510	0.8	1.25	1.6	23.4	1620	1030
120	1.6	1.5	21.0	1350	610	1.0	1.6	1.7	26.3	2100	1360
150	1.8	1.6	23.2	1650	720	1.0	1.6	1.7	28.3	2460	1530
185	2.0	1.7	25.8	2080	920	1.0	1.6	1.8	30.8	2940	1800
240	2.2	1.8	29.0	2670	1180	1.0	1.6	1.9	34.1	3660	2170
300	2.4	1.9	32.1	3320	1460	1.0	1.6	1.9	37.0	4390	2530
400	2.6	2.0	35.3	4190	1710	1.2	2.0	2.1	42.0	5720	3240
500	2.8	2.1	39.6	5230	2140	1.2	2.0	2.1	45.6	6890	3800
630	2.8	2.2	43.8	6630	2720	1.2	2.0	2.2	49.7	8440	4530

3）交联聚乙烯电力电缆

交联聚乙烯塑料：用化学方法或物理方法使聚乙烯分子由线性结构转变为立体网状结

构，即将热塑性的聚乙烯转变为热固性的交联聚乙烯。交联聚乙烯有优良的机械性能，在工作温度下，耐局部应力好，在高温下仍有较高的机械性能。

交联聚乙烯电缆的型号及主要用途和技术参数，见表8－1－112和表8－1－113。

表8－1－112 交联聚乙烯电缆型号及主要用途

型号		名称	主要用途
铜芯	铝芯		
YLV	YJLV	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆	敷设于室内、隧道、电缆沟及管道中，也可埋在松散的土壤中，电缆不能承受机械外力作用，但可承受一定敷设牵引
YJY	YJLY	交联聚乙烯绝缘聚乙烯护套电力电缆	
YJV22	YJLV22	交联聚乙烯绝缘钢带铠装聚氯乙烯护套电力电缆	适用于室内、隧道、电缆沟及地下直埋敷设，电缆能承受机械外力作用，但不能承受大的拉力
YJV23	YJLV23	交联聚乙烯绝缘钢带铠装聚乙烯护套电力电缆	
YJV32	YJLV32	交联聚乙烯绝缘细钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆	敷设在立井、水下及具有落差条件下的土壤中，电缆能承受机械外力作用的相当的拉力
YJV33	YJLV33	交联聚乙烯绝缘细钢丝铠装聚乙烯护套电力电缆	
YJV42	YJLV42	交联聚乙烯绝缘粗钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆	适用于水中、海底，电缆能承受较大的正压力和拉力的作用
YJV43	YJLV43	交联聚乙烯绝缘粗钢丝铠装聚乙烯护套电力电缆	

表8－1－113 交联聚乙烯电缆技术参数

型号	芯数	额定电压/kV					
		0.6/1	1.8/3	3.6/6，6/6	6/10，8.7/10	8.7/15～12/20	18/20～26/35
		标称截面积/mm^2					
YJV、YJLV	1	1.5～800	10～800	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJY、YJLY		2.5～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJV32、YJLV32		10～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJV33、YJLV33		10～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJV42、YJLV42		10～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJV43、YJLV43		10～1000	10～1000	25～1200	25～1200	35～1200	50～1200
YJV、YJLV	2	1.5～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJY、YJLY		2.5～300	10～300	20～300	25～300	35～300	
YJV22、YJLV22		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJV23、YJLV23		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJV32、YJLV32		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJV33、YJLV33		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJV42、YJLV42		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	
YJV43、YJLV43		4～300	10～300	25～300	25～300	35～300	

表 8-1-114　经济电流密度　A/mm²

年最大负荷利用小时/h	1000～3000	3000～5000	5000 以上
铜芯纸绝缘电缆	2.5	2.25	2
橡皮绝缘电缆铝芯电缆	1.92	1.73	1.54

2. 电力电缆的选择

1）按经济电流密度选择电缆截面

根据高压电缆线路所带负荷的年最大负荷利用小时以及电缆芯线材质，查出经济电流密度 J_{ec}（表 8-1-114），然后计算正常运行时的长时最大负荷电流 I_{ca}（如为双回路并联运行的线路，不考虑一条线路故障时的最大负荷电流），电缆的经济截面积为

$$S_{ec}=\frac{I_{ca}}{J_{ec}} \tag{8-1-80}$$

2）按长时允许电流校验

按经济电流密度选择的标准截面，在实际介质温度下的载流量 I_p 须满足下式要求：

$$I_p=KI_{ac}\geqslant I_{ca} \tag{8-1-81}$$

$$K=K_1K_2K_3 \tag{8-1-82}$$

式中　I_{ac}——环境温度为 25℃时电缆长时允许电流，A；

K——环境温度不同时允许电流的修正系数；

K_1——电缆的温度修正系数；

K_2——直埋时的土壤热阻率修正系数；

K_3——空气中多根并列时修正系数；

I_{ca}——通过电缆的最大持续负荷电流，A。

由于电缆的电抗值较小，一般每千米约为 0.08Ω，故计算电压损失时，只考虑导线电阻的影响，电抗值常忽略不计。

对于终端负荷，其电压损失为

$$\Delta U=\frac{Pl}{SU_Nr} \tag{8-1-83}$$

式中　P——负荷的有功功率；

S——电缆横截面积；

U_N——负荷额定电压；

r——电缆的导电率；

l——电缆的长度。

对于均一导线分布负荷，则电压损失为

$$\Delta U=\frac{\sum_1^n P_nl_n}{SU_N\gamma} \tag{8-1-84}$$

式中　l_n——选取电缆的长度。

3）按短路电流校验热稳定性

$$S_{min}=I_\infty\frac{\sqrt{t_f}}{C} \tag{8-1-85}$$

式中　S_{min}——电缆最小截面积；

I_∞——三相最大稳态短路电流，A；

t_f——短路电流作用的假想时间，s；

C——热稳定系数，见表 8－1－115。

3. 橡塑绝缘电力电缆线路

橡塑绝缘电力电缆是指聚氯乙烯绝缘、交联聚乙烯绝缘和乙丙橡皮绝缘电力电缆。

橡塑绝缘电力电缆线路的试验项目、周期和要求见表 8－1－116。橡塑绝缘电力电缆的直流耐压试验电压见表 8－1－117。

表 8－1－115 各种电缆的热稳定系数 C 值

芯线材料	铅				铜					
芯线绝缘材料	短时允许最高温度/℃									
	120	150	175	200	120	150	175	200	230	250
油浸纸	75	87	93	95	120	120	130	—	—	165
聚氯乙烯	63	—	—	—	95	—	—	—	—	—
橡胶	75	87	—	188	100	120	—	145	—	—
交联聚乙烯	53	70	—	87	80	100	—	—	141	—

表 8－1－116 橡塑绝缘电力电缆线路的试验项目、周期和要求

序号	项 目	周 期	要 求
1	电缆主绝缘的绝缘电阻	（1）重要电缆：1 年； （2）一般电缆：3.6/6kV 及以上，3 年；3.6/6kV 以下，5 年	自行规定
2	电缆外护套绝缘电阻	（1）重要电缆：1 年； （2）一般电缆：3.6/6kV 及以上，3 年；3.6/6kV 以下，5 年	每千米绝缘电阻值不应低于 0.5MΩ
3	电缆内衬层绝缘电阻	（1）重要电缆：1 年； （2）一般电缆：3.6/6kV 及以上，3 年；3.6/6kV 以下，5 年	每千米绝缘电阻值不应低于 0.5MΩ
4	铜屏蔽层电阻和导体电阻比	（1）投运前； （2）重做终端或接头后； （3）内衬层破损进水后	对照投运前测量数据自行规定
5	电缆主绝缘直流耐压试验	新做终端或接头后	（1）试验电压值按表 8－1－116 规定，加压时间 5min，不击穿； （2）耐压 5min 时的泄漏电流不应大于耐压 1min 时的泄漏电流
6	交叉互联系统	2－3 年	

表 8－1－117　橡塑绝缘电力电缆的直流耐压试验电压　　kV

电缆额定电压 U_0/U	直流试验电压	电缆额定电压 U_0/U	直流试验电压
1.8/3	11	21/35	63
3.6/6	18	26/35	78
6/6	25	48/66	144
6/10	25	64/110	192
8.7/10	37	127/220	305

注：U_0 为电缆导体与金属套或金属屏蔽之间的设计电压，U 为导体与导体之间的设计电压。

1.3.2.11　限流电抗器

交流设备中，为限制和调节电流，必须在独立的回路中接入电抗器。干式空芯电抗器采用环氧玻璃纤维包封多层，与油浸式电抗器相比，具有重量轻、线性度好、机械强度高、噪声低、安装方便等优点。因此干式空芯电抗器广泛用于电力行业，是传统的油浸式电抗器的替代产品，故本节仅介绍干式空芯电抗器。

常见的干式空芯限流电抗器的型号有 XKGKL 系列、LKGKL 系列、GKGKL 系列和 BKGK 系列等。

1. 干式空芯限流电抗器技术参数

本部分以 XKGKL 干式空芯限流电抗器为例来阐述。图 8－1－32 所示为 XKGKL 干式空芯限流电抗器的型号含义。表 8－1－118 为 XKGKL 干式空芯限流电抗器部分型号技术参数。

表 8－1－118　XKGKL 干式空芯限流电抗器部分型号技术参数

型　号	额定电流/A	额定电压/kV	电抗率/%	单相无功容量/kvar	三相通过容量/kvar	额定电感/mH	动稳定电流峰值/kV	热稳定电流/kV	每相损耗/W
XKGKL－6－500－4	500	6	4	69.3	3*173 2.1	0.882	31.88	12.5	2200
XKGKL－6－500－5			5	86.3		1.103			2600
XKGKL－6－500－6			6	103.9		1.132			2870
XKGKL－6－500－8			8	138.6		1.764			3610
XKGKL－6－500－10			10	173.2		2.203			4210
XKGKL－10－500－4		10	4	115.5	3*288 6.8	1.47	31.88	12.5	3110
XKGKL－10－500－5			5	144.3		1.838			3680
XKGKL－10－500－6			6	173.2		2.205			4210
XKGKL－10－500－8			8	230.9		2.94			5280
XKGKL－10－500－10			10	288.7		3.676			6190

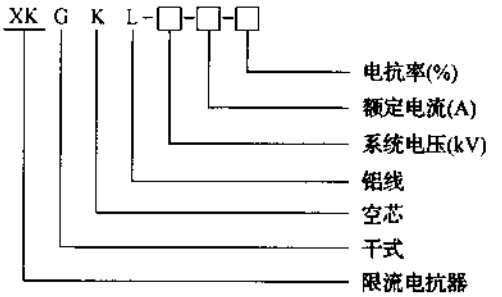


图 8-1-32 XKGKL 干式空芯限流电抗器型号含义

2. 限流电抗器的选择与校验

1）限流电抗器的参数选择

限流电抗器应按表 8-1-119 所列的技术条件选择。需要补充说明的有下列 3 点：

（1）电抗器几乎没有过负荷能力，所以主变压器或出线回路的电抗器，应按回路最大工作电流选择，而不能用正常持续工作电流来选择。

（2）对于发电厂母线分段回路的电抗器，应根据母线上事故时，切断最大一台发电机可能通过电抗器的电流来选择。一般取该台发电机额定电流的 50% ~80% 。

（3）变电所母线分段回路的电抗器应满足用户的一级负荷和大部分二级负荷的要求。

表 8-1-119 限流电抗器选择与校验项目

选择与校验项目	常用计算公式	选择与校验项目	常用计算公式
按电压	$1.1U_N \geqslant U_e$	按动稳定	$i_N \geqslant i_{kr}$
按电流	$I_N \geqslant I_l$	按热稳定	$I_t \geqslant I_k(t_f/t)$

注：1. U_N、I_N—电抗器的额定电压和电流；U_e—电路正常工作电压；i_N、I_t—电抗器允许的动、热稳定电流；I_l—电路最大的工作电流；t_f—短路假想时间；t—短路持续时间；i_{kr}、I_k—短路冲击电流和稳态电流。

2. 按环境条件选择修正见本章附录 B。

2）电抗百分值的选择与校验

普通电抗器的电抗百分值应按下列条件来选择及校验。

（1）将短路电流限制到要求值。此时所必须的电抗百分值可按下式计算：

$$X\% = \left(\frac{I_b}{I''} - X_b^*\right)\frac{I_N U_{bc}}{I_b U_N} \times 100 \qquad (8-1-86)$$

式中 U_{bc}——基准电压，kV；

I_b——基准电流，A；

X_b^*——以 U_{bc}、I_b 为基准，计算到所选用的电抗器之前网络电抗标么值；

U_N——电抗器的额定电压，kV；

I_N——电抗器的额定电流，A；

I''——被电抗器限制后所要求的短路次暂态电流，kA。

（2）正常工作时电抗器上的电压损失 $\Delta U\%$ 不宜大于额定电压的 5%，其值可按下式计算：

$$\Delta U\% = X\% \frac{I_g}{I_N} \sin\varphi \tag{8-1-87}$$

式中 I_g——正常通过电抗器的负荷电流，A；

φ——正常通过电抗器的负荷功率因数角，一般取 $\cos\varphi = 0.8$，则 $\sin\varphi = 0.6$。

（3）校验短路时母线上的剩余电压。当出线电抗器的继电保护装置带有时限时，应按在电抗器之后发生短路来计算，并按下式来校验：

$$\Delta U_{res}\% = X\% \frac{I''}{I_N} \geqslant 60\% \sim 70\% \tag{8-1-88}$$

式中 I''——电抗器出口处在最小运行方式下短路的次暂态电流，A。

要求母线的剩余电压百分值 $\Delta U_{res}\%$ 不应低于额定电压的 60% ~70%，以保证母线上其他设备工作。若电抗器接在 6kV 发电机主母线上，则母线剩余电压应尽量取上限值。

若剩余电压不能满足要求，则可在线路继电保护及线路电压降允许范围内，增加出线电抗器的电抗百分值，或采用快速继电保护切除短路故障。对于母线分段电抗器、带多回出线的电抗器及其他具有无时限继电保护的出线电抗器，不必按短路时来校验母线的剩余电压。

3. 电抗器预防性试验

1）油浸式电抗器

定期试验项目见 1.3.2.8“电力变压器的试验”中 1）、2）、3）、4）、5）、6）、8）、17）、18）项，10kV 及以下只作 2）、3）、6）、7）项。

大修试验项目见 1.3.2.8“电力变压器的试验”中 1）、2）、3）、4）、5）、6）、8）、9）、17）、18）、20）、21）、22）项，10kV 及以下只作 2）、3）、6）、7）、9）、20）项。

2）干式电抗器

在所连接的系统设备大修时作交流耐压试验项目，具体见 1.3.2.8 中“电力变压器的试验”中第 7）项。

1.3.2.12　电力电容器

1. 电力电容器的种类

电力电容器按用途可分为 8 种，即并联电容器、串联电容器、耦合电容器、断路器电容器、电热电容器、脉冲电容器、直流和滤波电容器、标准电容器。

本部分主要阐述并联电力电容器。并联电力电容器包括油浸式和环氧浇注干式两种，连接于额定频率为 50Hz 的工频交流系统中，以提高系统的功率因数。

油浸式并联电容器的型号含义如图 8-1-33 所示。

环氧浇注干式高压并联电容器由多个自愈式锌铝复合金属化膜电容元件串并联组合后，用环氧树脂整体浇注封装而成。内部元件有压力保护，当某一元件被击穿时，其发生的气体压力能将该元件的内部熔丝强行拉断，从而将故障元件安全隔离。环氧型高压电容器外壳为全环氧浇注、全绝缘结构，可落地安装。

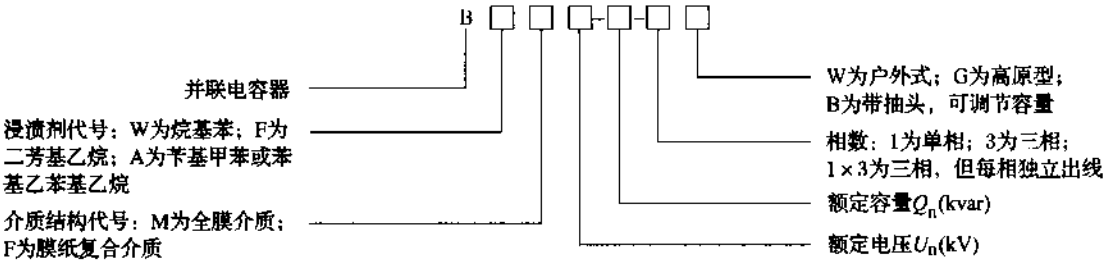


图 8－1－33 油浸式并联电容器的型号含义

2. 电力电容器技术参数

表 8－1－120 列出了部分油浸式并联电力电容器的技术参数；表 8－1－121 列出了油浸式并联电力电容器端子与外壳的绝缘水平应承受的试验电压；表 8－1－122 列出了油浸式并联电力电容器工频稳态过电压。

表 8－1－120 部分油浸式并联电力电容器参数

型 号	额定电压/kV	额定容量/kvar	标称电容/μF	瓷套裙边/条
BFM6.3－25－1W	6.3	25	2.01	4
BFM6.3－30－1W	6.3	30	2.41	4
BFM6.3－50－1W	6.3	50	4.01	4
BFM6.3/$\sqrt{3}$－25－1W	6.3/$\sqrt{3}$	25	6.02	4
BFM6.3/$\sqrt{3}$－30－1W	6.3/$\sqrt{3}$	30	7.22	4
BFM6.3/$\sqrt{3}$－50－1W	6.3/$\sqrt{3}$	50	12.03	4
BFM6.6/$\sqrt{3}$－50－1W	6.6/$\sqrt{3}$	50	10.97	4
BFM6.6/$\sqrt{3}$－100－1W	6.6/$\sqrt{3}$	100	21.94	5
BFM6.6/$\sqrt{3}$－200－1W	6.6/$\sqrt{3}$	200	43.88	5
BFM11/$\sqrt{3}$－25－1W	11/$\sqrt{3}$	25	1.97	5
BFM11/$\sqrt{3}$－30－1W	11/$\sqrt{3}$	30	2.37	5
BFM11/$\sqrt{3}$－50－1W	11/$\sqrt{3}$	50	3.95	5
BFM11/$\sqrt{3}$－100－1W	11/$\sqrt{3}$	100	7.89	5
BFM11/$\sqrt{3}$－150－1W	11/$\sqrt{3}$	150	11.84	5
BFM11/$\sqrt{3}$－200－1W	11/$\sqrt{3}$	200	15.79	6
BFF11/$\sqrt{3}$－200－1W	11/$\sqrt{3}$	200	15.79	6
BFM11/$\sqrt{3}$－250－1W	11/$\sqrt{3}$	250	19.74	6
BFM11/$\sqrt{3}$－300－1W	11/$\sqrt{3}$	300	23.68	6

表 8－1－120（续）

型　　号	额定电压/kV	额定容量/kvar	标称电容/μF	瓷套裙边/条
BFM11/$\sqrt{3}$－334－1W	11/$\sqrt{3}$	334	26.37	6
BFMr11/$\sqrt{3}$－334－1W	11/$\sqrt{3}$	334	26.37	6
BFF11/$\sqrt{3}$－334－1W	11/$\sqrt{3}$	334	26.37	6
BFM11－25－1W	11	25	0.66	5
BFM11－50－1W	11	50	1.32	5
BFM11－100－1W	11	100	2.63	5
BFM11－200－1W	11	200	5.26	6
BFF11－200－1W	11	200	5.26	6
BFM11－334－1W	11	334	8.79	6
BFF11－334－1W	11	334	8.79	6

表 8－1－121　油浸式并联电力电容器端子与外壳绝缘水平

绝缘等级/kV	电容器额定电压/kV	绝缘水平/kV		
		工频实验电压（1min）		雷电冲击试验电压（1.2～5/50μs，峰值）
		一般	淋雨	
3	3.15	18	18	40
6	6.6/$\sqrt{3}$，6.3	25	25	60
10	10.5，11，11/$\sqrt{3}$	35	35	75
20	19，20	55	55	120

表 8－1－122　油浸式并联电力电容器工频稳态过电压

工频过电压	最大持续时间	说　　明
1.10U_n	长期	按长期工作电压的最高值应不超过 1.10U_n
1.15U_n	每 24h 中 30min	系统电压调整与波动
1.20U_n	5min	轻负荷时电压升高
1.30U_n	1min	轻负荷时电压升高

注：U_n 电力电容器的额定工作电压。

3. 电力电容器的选择

电力电容器的选择与校验项目见表 8－1－123。

表 8－1－123　电力电容器选择与校验项目

选择与校验项目	常用计算公式
额定电压	$U_{max} \geqslant U_n$

4. 高压并联电力电容器的预防性试验

高压并联电容器预防性试验的项目、周期和要求见表 8－1－124。

表 8－1－124 高压并联电容器预防性试验的项目、周期和要求

序号	项 目	周 期	要 求
1	极对壳绝缘电阻	(1) 投运后 1 年内； (2) 1～5 年	不低于 2000MΩ
2	电容值	(1) 投运后 1 年内； (2) 1～5 年	(1) 电容值偏差应在额定值的－5% ～ +10% 范围内； (2) 电容值不应小于出厂值的 95%
3	并联电阻值测量	(1) 投运后 1 年内； (2) 1～5 年	电阻值与出厂值的偏差应在－10% ～ +10% 范围内
4	渗漏油检查	6 个月	漏油时停止使用

1.3.2.13 电流互感器

1. 电流互感器的种类

电流互感器的种类繁多，按原边匝数多少分为单匝式和多匝式，按安装方式分为支持式、穿墙式和套管式，按绝缘方式分为空气绝缘、瓷绝缘和浇注绝缘，按安装地点又分为户内、户外两大类。其型号含义如图 8－1－34 所示。

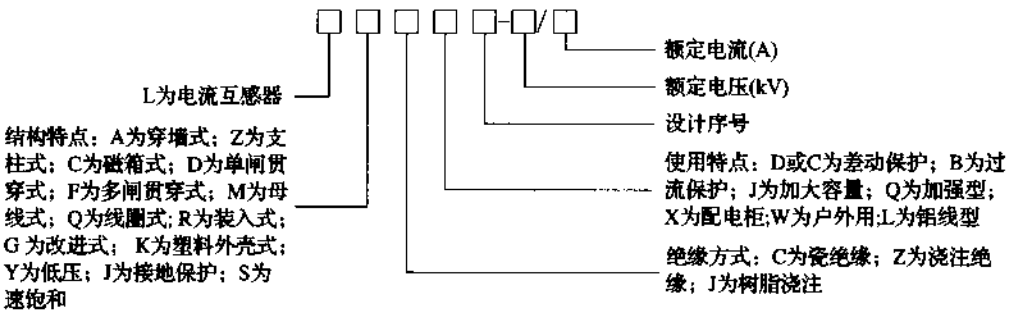


图 8－1－34 电流互感器型号含义

电流互感器使用时的注意事项：电流互感器的二次侧，工作中不准开路或接熔断器；电流互感器二次侧的一端必须接地，以确保安全；电流互感器连线时，必须认定其端子极性是对的，否则应校正端子极性。

2. 技术参数

本部分以 LZZW－6/10 型电流互感器为例来阐述。

LZZW－6/10 型电流互感器采用进口户外环氧树脂浇注绝缘全封闭的户外支柱式结构，具有高动热稳定、高精度、防污、阻燃等特点，供额定频率为 50Hz、额定电压为 6/10kV 户外电力系统中，做电流、电能测量及继电保护用。

LZZW－6/10 型电流互感器技术数据：

（1）额定绝缘水平为 12/42/75（kV）；

（2）负荷功率因数为 $\cos\varphi = 0.8$（滞后）；

（3）额定频率为 50Hz；

（4）额定二次电流为 5/2/1（A）；

（5）可制成各种复变比结构；

（6）额定一次电流、准确级组合、额定输出、额定短时热电流及动稳定电流，见表 8－1－125。

3. 电流互感器选择与校验

电流互感器选择与校验项目见表 8－1－126。

测量与计量用的电流互感器选择，应满足一次回路的额定电压、额定电流、最大负荷电流，并满足测量与计量仪表对准确度的要求。继电保护用的电流互感器应满足 10% 误

表 8－1－125　LZZW－6/10 型电流互感器技术数据

额定一次电流/A	准确级组合	额定输出/VA			额定短时热电流（有效值）/kA	额定动稳定电流（峰值）/kA
		0.2	0.5	10P15		
20～40；40	0.2/10P 0.5/10P	10	10	15	6.3	15
30～60；60					9	22.5
40～75；75					15	37.5
50～100；100					18	45
75～150；150					25	55
100～200；200					50	110
150～300；300					60	110
200～400；400						
300～600；600						
400～800；800						
500～1000；1000					80	100
1200～1500						
2000～3000						

表 8－1－126　电流互感器选择与校验项目

按工作条件	电　压	电　流
校验	热稳定	动稳定
	$I_t \geqslant I_k \sqrt{\frac{t_f}{t}}$	$i_{lim} \geqslant i_{kr}$
按环境条件	温度、湿度、海拔高度、地震影响	

注：1. 按环境条件修正见本章附录 B。

2. I_t—电流互感器在 t 秒内的热稳定电流，I_k—最大短路稳态电流，t_f—短路电流作用的假想时间，t—热稳定电流允许的作用时间，I_{lim}—电流互感器的极限电流通过峰值，i_{kr}—三相短路冲击电流。

差特性曲线的要求。电流互感器选定后，都应进行热稳定与动稳定校验。

1）电流互感器的热稳定校验

电流互感器的热稳定是用一定时间内热稳定倍数 K_{th} 来表明，它是互感器的热稳定电流与互感器的原边电流（一次电流）的比值，即

$$K_{th}=\frac{I_t}{I_{1N}} \tag{8-1-89}$$

式中 I_t——电流互感器在 t 时间内的热稳定电流，A；

I_{1N}——电流互感器的原边额定电流，A；

K_{th}——热稳定倍数。

因此，电流互感器热稳定校验，可按如下要求计算：

$$K_{th}I_{1N}\geqslant I_k\sqrt{\frac{t_f}{t}}\times 10^3 \tag{8-1-90}$$

式中 t_f——短路电流作用假想时间，s；

t——热稳定电流允许的作用时间，s；

I_k——短路稳态电流，kA。

2）电流互感器的动稳定校验

电流互感器的动稳定包括内部动稳定和外部动稳定。

（1）内部动稳定。内部动稳定用动稳定倍数 K_d 表示，它是互感器所能承受的最大电流的瞬时值 i_{max} 与该互感器的额定电流幅值之比，即

$$K_d=\frac{i_{max}}{\sqrt{2}I_{1N}} \tag{8-1-91}$$

因此，电流互感器的内部动稳定校验，可按如下要求计算

$$\sqrt{2}K_dI_{1N}\geqslant I_{kr}\times 10^3 \tag{8-1-92}$$

式中 I_{kr}——三相短路冲击电流值，kA。

（2）外部动稳定（三相母线平行放置在同一平面内）。

① 样本标明允许力 F 的电流互感器，可按下式校验：

$$F\geqslant 8.624i_{kr}^2\frac{l}{a}\times 10^{-2} \tag{8-1-93}$$

式中 F——电流互感器一次侧绕组出线端允许力，N；

a——相间距离，cm；

i_{kr}——三相短路冲击电流；

l——电流互感器出线端至相邻较远的一个固定点的距离，cm。

② 样本未标明允许力 F，而只给出 $A=40$cm，$l=50$cm 时动稳定倍数 K_d 的电流互感器，可按式（8-1-94）校验。

当 $a\neq 40$ 时，式（8-1-94）左边再乘以 $\sqrt{a/40}$。

当 $l\neq 50$ 时，如 $l=100$cm，在式（8-1-94）左边再乘以 0.8；如 $l=20$cm，在式（8-1-94）的左边乘以 1.15。

③ 样本标明允许力 F_B 的母线型电流互感器，可按下式校验：

$$F_B \geq 17.25 i_{kr}^2 \frac{l_B}{a} \times 10^{-2} \qquad (8-1-94)$$

式中　F_B——母线型电流互感器瓷套帽处允许力，N；

l_B——母线相互作用段的计算长度$\left(l_B = \frac{l_1 + l_2}{2}\right)$，cm；

l_1——母线型电流互感器瓷套帽至相邻较远的一个固定点距离，cm；

l_2——电流互感器内部长度，cm。

3）常用电流互感器动、热稳定简化计算

（1）电流互感器的热稳定简化计算。常用互感器的热稳定校验，可根据条件从表 8－1－127 直接查出允许通过的短路稳态电流与实际短路稳态电流进行比较。

（2）电流互感器的动稳定简化计算。常用电流互感器的动稳定校验，可根据条件直接由表 8－1－128 查出允许通过的短路冲击电流值，然后再用它与实际的短路冲击电流值进行比较，若前者比后者大则表示通过校验，该互感器可以使用。

4. 电流互感器预防性试验

1）绕组及末屏的绝缘电阻试验

试验周期：①投运前；②1～3 年；③大修后；④必要时。

要求：①绕组绝缘电阻与初始值及历次数据比较，不应有显著变化；②电容型电流互感器末屏对地绝缘电阻一般不低于 1000MΩ。

2）tanδ 及电容量试验

试验周期：①投运前；②1～3 年；③大修后；④必要时。

要求：①主绝缘 tanδ(%)不应大于表 8－1－129 中的数值，且与历年数据比较，不应有显著变化；②电容型电流互感器主绝缘电容量与初始值或出厂值差别超出 ±5% 范围时应查明原因；③当电容型电流互感器末屏对地绝缘电阻小于 1000MΩ 时，应测量末屏对地 tanδ，其值不大于 2%。

3）油中溶解气体色谱分析

试验周期：①投运前；②1～3 年（66kV 及以上）；③大修后；④必要时。

要求：油中溶解气体组分含量（体积分数）超过下列任一值时应引起注意：总烃，100×10^{-6}；H_2，150×10^{-6}；C_2H_2，2×10^{-6}（110kV 及以下）。

4）交流耐压试验

（1）测试周期：①1～3 年（20kV 及以下）；②大修后；③必要时。

（2）要求：①一次绕组按出厂值的 85% 进行试验，出厂值不明的按表 8－1－130 进行试验；②二次绕组之间及末屏对地为 2kV；③全部更换绕组绝缘后，应按出厂值进行试验。

5）局部放电测量

试验周期：①1～3 年（20～35kV 固体绝缘互感器）；②大修后；③必要时。

要求：固体绝缘互感器在电压为 $1.1U_m/\sqrt{3}$（U_m 为设备最高电压，下同）时，放电量不大于 100pC；在电压为 $1.1U_m$ 时（必要时），放电量不大于 500pC；110kV 及以上油浸式互感器在电压为 $1.1U_m/\sqrt{3}$时，放电量不大于 20pC。

表8-1-127 电流互感器热稳定计算表

（表列数值为允许通过的短路稳态电流值 I_k）

额定电流/A	精确度	假想时间 t_f/s												
		0.1	0.15	0.2	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5	3	3.5
LFC－10、LFCD－10型电流互感器/kA															
5	0.5、0.5/0.5、0.5/3	1.18	0.97	0.84	0.75	0.53	0.43	0.37	0.33	0.30	0.28	0.26	0.23	0.21	0.20
	1、1/1、1/3、3	1.26	1.03	1.89	0.8	0.56	0.46	0.4	0.35	0.32	0.3	0.28	0.25	0.23	0.21
7.5	0.5、0.5/0.5、0.5/3	1.78	1.45	1.26	1.12	0.79	0.65	0.56	0.5	0.46	0.42	0.39	0.35	0.32	0.3
	1、1/1、1/3、3	1.9	1.55	1.34	1.2	0.85	0.69	0.6	0.53	0.49	0.45	0.42	0.38	0.34	0.32
10	0.5、0.5/0.5、0.5/3	2.37	1.94	1.68	1.5	1.06	0.87	0.75	0.67	0.61	0.56	0.53	0.47	0.43	0.40
	1、1/1、1/3、3	2.53	2.06	1.79	1.60	1.13	0.92	0.8	0.71	0.65	0.6	0.56	0.5	0.46	0.42
15	0.5、0.5/0.5、0.5/3	3.56	2.91	2.51	2.25	1.59	1.3	1.12	1.0	0.92	0.85	0.8	0.71	0.65	0.6
	1、1/1、1/3、3	3.8	3.1	2.68	2.4	1.7	1.38	1.2	1.07	0.98	0.9	0.85	0.76	0.69	0.63
20	0.5、0.5/0.5、0.5/3	4.75	3.88	3.36	3.0	2.12	1.73	1.56	1.34	1.22	1.13	1.06	0.95	0.87	0.8
	1、1/1、1/3、3	5.05	4.13	3.58	3.2	2.26	1.85	1.6	1.45	1.3	1.2	1.13	1.01	0.92	0.84
30	0.5、0.5/0.5、0.5/3、1、1/1、1/3、3	7.11	5.82	5.03	4.5	3.18	2.6	2.25	2	1.84	1.7	1.59	1.42	1.3	1.2
		7.6	5.03	5.37	4.8	3.4	2.77	2.4	2.14	1.96	1.81	1.7	1.52	1.38	1.27
40	0.5、0.5/0.5、0.5/3	9.5	7.75	6.71	6	4.25	3.46	3	2.67	2.45	2.26	2.12	1.9	1.73	1.6
	1、1/1、1/3、3	10.1	8.25	7.15	6.4	4.52	3.7	3.2	2.85	2.6	2.41	2.26	2.02	1.85	1.69
50	0.5、0.5/0.5、0.5/3	11.9	9.7	8.4	7.5	5.3	4.34	3.75	3.35	3.0	2.82	2.65	2.37	2.16	2
	1、1/1、1/3、3	12.7	10.3	8.95	8	5.65	4.62	4	3.56	3.26	3.01	2.82	2.53	2.3	2.11
75	0.5、0.5/0.5、0.5/3 D、D/D、D/0.5、D/3	17.8	14.5	12.6	11.3	7.95	6.5	5.6	5	4.6	4.25	3.97	3.56	3.25	3.0
	1、1/1、1/3、3	19	15.5	13.4	12	8.5	6.92	6	5.35	4.9	4.52	4.24	3.8	3.46	3.17
100	0.5、0.5/0.5、0.5/3 D、D/D、D/0.5、D/3	23.7	19.4	16.8	15	10.6	8.7	7.5	6.7	6.1	5.65	5.3	4.75	4.33	4
	1、1/1、1/3、3	21.3	20.6	17.9	16	11.3	9.25	8	7.13	6.5	6.03	5.63	5.05	4.62	4.24

表 8-1-127（续）

额定电流/A	精确度	假想时间 t_f/s													
		0.1	0.15	0.2	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5	3	3.5
150	0.5、0.5/0.5、0.5/3 D、D/D、D/0.5、D/3 1、1/1、1/3、3	35.6 38	29.1 31	25.1 26.8	2.5 24	15.9 17	13 13.85	11.2 12	10 10.7	9.2 9.8	8.5 9.04	8 8.5	7.1 7.6	6.5 6.9	6 6.35
200	0.5、0.5/0.5、0.5/3 D、D/D、D/0.5、D/3 1、1/1、1/3、3	47.5 50.5	38.8 41.2	33.6 35.8	30 32	21.2 22.6	17.3 18.5	15 16	13.4 14.3	12.2 13	11.3 12.1	10.6 11.3	9.5 10.1	8.7 9.25	8 8.45
300	0.5、0.5/0.5、0.5/3 D、D/D、D/0.5、D/3 1、1/1、1/3、3	71.1 76	58.2 62	50.3 53.7	45 48	31.8 34	26 27.7	22.5 24	20 21.4	18.4 19.6	17 18.1	15.9 17	14.2 15.2	13 13.9	12 12.7
400	0.5、0.5/0.5、0.5/3 D、D/D、D/0.5、D/3 1、1/1、1/3、3	95 101	77.5 82.5	67.1 71.5	60 64	42.5 45.2	34.6 37	30 32	26.7 28.5	24.5 26	22.6 24.1	21.2 22.6	19 20.2	17.3 18.5	16 16.9
LFCQ－10、LFCQD－10型电流互感器/kA															
5	1、1/1、1/3 3	1.74 3.8	1.42 3.1	1.23 2.68	1.1 2.4	0.78 1.7	0.63 1.39	0.55 1.2	0.49 1.07	0.45 0.98	0.41 0.9	0.39 0.85	0.35 0.76	0.31 0.69	0.29 0.64
7.5	1、1/1、1/3 3	2.61 5.7	2.13 4.65	1.85 4.03	1.65 3.6	1.17 2.54	0.95 2.08	0.82 1.8	0.74 1.6	0.67 1.47	0.62 1.36	0.58 1.27	0.52 1.14	0.47 1.04	0.44 0.96
10	1、1/1、1/3 3	3.48 7.6	2.58 6.2	2.46 5.37	2.2 4.8	1.55 3.4	1.27 2.77	1.1 2.4	0.98 2.14	0.9 1.96	0.83 1.81	0.78 1.7	0.7 1.52	0.63 1.38	0.59 1.28
15	1、1/1、1/3 3	5.21 11.4	4.27 9.3	3.7 8.05	3.3 7.2	2.33 5.1	1.9 4.15	1.65 3.6	1.47 3.21	1.34 2.94	1.24 2.71	1.16 2.54	1.04 2.28	0.95 2.07	0.88 1.92
20	1、1/1、1/3 3	6.95 15.2	5.7 12.4	4.92 10.8	4.4 9.6	3.11 6.8	2.53 5.55	2.2 4.8	1.96 4.28	1.8 3.92	1.66 3.61	1.55 3.4	1.4 3.04	1.27 2.77	1.18 2.56
30	0.5、0.5/0.5、0.5/1 0.5/3、1/1、1/3、1 3	10.4 22.8	8.55 18.6	7.4 16.1	6.6 14.4	4.67 10.2	3.8 8.3	3.3 7.2	2.95 6.42	2.7 5.9	2.49 5.43	2.33 5.1	2.1 4.56	1.91 4.15	1.77 3.85

表 8-1-127（续）

额定电流/A	精确度	假想时间 t_f/s													
		0.1	0.15	0.2	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5	3	3.5
40	0.5、0.5/0.5、0.5/1 0.5/3、1/1、1/3、1	13.9	11.4	9.85	8.8	6.22	5.08	4.4	3.93	3.6	3.31	3.11	2.78	2.54	2.35
	3	30.4	24.8	21.5	10.2	13.6	11.1	9.6	8.4	7.85	7.25	6.8	4.1	5.52	5.12
50	0.5、0.5/0.5、0.5/1 0.5/3、1/1、1/3、1	17.4	14.2	12.3	11	7.78	6.35	5.5	4.9	4.5	4.15	3.9	2.5	3.18	2.95
	3	38	31	26.8	24	17	13.9	12	10.7	9.8	9.05	8.5	7.6	6.92	6.41
75	0.5、0.5/0.5、0.5/1、 0.5/3、1/1、1/3、1、 D、D/D、D/0.5、 D/1、D/3	26.1	21.3	18.5	16.5	11.7	9.5	8.25	7.4	6.73	6.2	5.83	5.22	4.77	4.4
	3	51	56.5	40.3	36	25.4	20.8	18	16	14.7	13.6	12.7	11.4	10.4	9.61
100	0.5、0.5/0.5、0.5/1、 0.5/3、1/1、1/3、1、 D、D/D、D/0.5、 D/1、D/3	34.8	28.5	24	22	15.6	12.7	11	9.8	9	8.3	7.8	7	6.35	5.9
	3	76	62	53.7	48	34	22.7	24	21.4	19.6	18.1	17	15.2	13.8	12.8
150	0.5、0.5/0.5、0.5/1、 0.5/3、1/1、1/3、1、 D、D/D、D/0.5、 D/1、D/3	52.1	42.7	37	33	23.3	19	16.5	14.7	13.45	12.4	11.64	10.5	9.5	8.8
	3	114	93	80.5	72	51	41.5	36	32.1	29.4	27.1	25.4	22.8	20.7	19.2
200	0.5、0.5/0.5、0.5/1、 0.5/3、1/1、1/3、1、 D、D/D、D/0.5、 D/1、D/3	69.5	57	49.2	44	31.1	25.3	22	19.6	18	16.6	15.6	14	12.7	11.8
	3	152	124	108	96	68	55.6	48	42.8	39.2	36.1	34	30.4	27.7	25.6

表 8-1-127（续）

额定电流/A	精　确　度	假想时间 t_j/s													
		0.1	0.15	0.2	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5	3	3.5
300	0.5、0.5/0.5、0.5/1、0.5/3、1/1、1/3、1、D、D/D、D/0.5、D/1、D/3	104	85.5	74	66	46.7	38	33	29.5	27	24.9	23.3	21	19.1	17.7
LQJ-10A、LQJC-10A 型电流互感器/kA															
5	0.5/1、0.5/3	1.03	0.84	0.73	0.65	0.46	0.38	0.33	0.28	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.17
	1/1、1/3	1.11	0.9	0.78	0.7	0.5	0.4	0.35	0.31	0.29	0.26	0.25	0.22	0.2	0.19
10	0.5/1、0.5/3	2.05	1.68	1.45	1.3	0.92	0.75	0.65	0.58	0.53	0.49	0.46	0.41	0.38	0.35
	1/1、1/3	2.21	1.81	1.56	1.4	0.99	0.81	0.7	0.63	0.57	0.53	0.5	0.44	0.4	0.37
15	0.5/1、0.5/3	3.08	2.52	2.18	1.95	1.38	1.12	0.98	0.87	0.8	0.74	0.69	0.62	0.56	0.52
	1/1、1/3	3.31	2.71	2.34	2.1	1.48	1.21	1.05	0.94	0.85	0.79	0.74	0.66	0.61	0.56
20	0.5/1、0.5/3	4.1	3.35	2.9	2.6	1.84	1.5	1.3	1.16	1.05	0.98	0.92	0.82	0.75	0.69
	1/1、1/3	4.42	3.61	3.12	2.8	1.98	1.62	1.4	1.25	1.14	1.05	0.99	0.89	0.81	0.75
30	0.5/1、0.5/3	6.15	5.03	4.35	3.9	2.75	2.25	1.95	1.74	1.59	1.47	1.38	1.23	1.13	1.04
	1/1、1/3	6.63	5.42	4.68	4.2	2.97	2.42	2.1	1.88	1.71	1.59	1.49	1.33	1.21	1.12
40	0.5/1、0.5/3	8.21	6.7	5.8	5.2	3.67	3	2.6	2.32	2.12	1.96	1.84	1.64	1.5	1.39
	1/1、1/3	8.85	7.23	6.25	5.6	3.96	3.23	2.8	2.5	2.29	2.12	1.98	1.77	1.62	1.5
50	0.5/1、0.5/3	10.26	8.38	7.25	6.5	4.58	3.07	3.25	2.9	2.65	2.45	2.3	2.05	1.88	1.74
	1/1、1/3	11.1	9.03	7.82	6.94	4.95	4.04	3.5	3.13	2.86	2.65	2.46	2.21	2.02	1.87
75	0.5/1、0.5/3	15.4	12.6	10.9	9.74	6.88	5.62	4.48	4.35	3.98	3.68	3.45	2.08	2.82	2.6
	C/0.5、C/1														
	1/1、1/3	16.6	13.6	11.7	10.5	10.42	6.05	5.25	4.7	4.29	3.97	3.72	3.32	3.03	2.31

表 8-1-127（续）

额定电流/A	精确度	假想时间 t_f/s													
		0.1	0.15	0.2	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5	3	3.5
100	0.5/1、0.5/3	20.5	16.8	14.5	13	9.18	7.5	6.5	5.8	5.3	4.91	4.6	4.1	3.75	3.47
	C/0.5、C/1														
	1/1、1/3	22.1	18.1	15.6	14	9.89	8.08	7	6.25	5.72	5.28	4.95	4.43	4.04	3.74
150	0.5/1、0.5/3	30.8	25.2	21.8	19.5	13.8	11.2	9.75	8.72	7.95	7.36	6.9	6.61	5.63	6.2
	C/0.5、C/1														
	1/1、1/3	33.1	27.1	23.4	21	14.8	12.1	10.5	9.38	8.57	7.93	7.42	6.64	6.07	5.6
200	0.5/1、0.5/3	41.1	33.5	29	26	18.4	15	13	11.6	10.6	9.81	9.19	8.2	7.5	6.94
	C/0.5、C/1														
	1/1、1/3	44.2	36.1	31.2	28	19.8	16.2	14	12.5	11.4	10.6	9.9	8.85	8.08	7.68
300	0.5/1、0.5/3	61.6	50.3	43.5	38.9	27.5	22.5	19.5	17.4	15.9	14.7	13.8	12.3	11.3	10.4
	C/0.5、C/1														
	1/1、1/3	64.3	54.2	46.8	42	29.7	24.2	21	18.8	17.1	15.9	14.7	13.3	12.1	11.2
400	0.5/1、0.5/3	82.1	67	58	51.9	36.7	30	26	23.2	21.2	19.6	18.4	16.4	15	13.9
	C/0.5、C/1														
	1/1、1/3	84.5	72.3	62.5	56	39.6	32.3	28	25	22.9	21.2	19.8	17.7	16.2	15
LDC－10、LDCD－10 型电流互感器/kA															
600	0.5、0.5/3、1、1/1、1/3 3、D、D/D、D/1、D/3	152	124	108	96	68	55.3	48	43	39.1	36.2	34	30.4	27.7	25.6
750	0.5、0.5/0.5、0.5/1、1 1/1、1/3、3	190	155	134	120	85	69	60	53.5	49	45	42	38	34	31
1000	D、D/D、D/0.5、D/1、D/3	253	206	179	160	113	92	80	71.5	65	60	56	50	46	42
1500	0.5、0.5/0.5、0.5/3、2 D、D/D、D/0.5、D/3	380	310	268	240	170	138	120	107	98	90	85	76	65	63

表8-1-127（续）

额定电流/A	精确度	假想时间 t_f/s												
		0.1	0.15	0.2	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5	3	3.5
LDCQ-10、LDCQD-10型电流互感器/kA															
400	1、1/3	152	124	108	96	68	55.3	48	43	39.1	35.2	34	30.4	27.7	25.6
	3	304	248	215	192	136	111	96	86	78	72.5	68	61	55.4	51.2
600	0.5、0.5/3、1、1/1、1/3 D、D/D、D/1、D/3	228	186	161	144	102	83	72	64.3	58.8	54.3	51	45.5	41.5	38.5
	3	455	372	322	288	203	166	144	129	118	109	102	91	83	77
750	0.5、0.5/0.5、0.5/3、1 1/1、1/3、D、D/D D/0.5、D/1、D/3	285	233	202	180	128	104	90	80.5	73.5	68	63.5	57	52	48
	3	570	465	403	360	254	208	180	161	147	136	127	114	104	96
1000	0.5、0.5/0.5、0.5/3、1 1/1、1/3、D、D/D D/0.5、D/1、D/3 3	380	310	268	240	170	139	120	107	98	90.5	85	76	69.5	64.2
LMJ-10A、LMJC-10A型电流互感器/kA															
600	0.5/3 C/0.5	123	101	87.2	78	55.2	45	39	34.9	31.9	29.5	27.6 36.846 69	24.7	22.5	20.8
800		165	134	114	104	73.5	60	52	45.5	42.5	39.3		32.9	30	27.8
1000		205	168	145	130	92	75	65	58.2	53.1	49.2		41.1	37.5	34.8
1500		308	252	218	159	138	113	97.5	87.3	79.6	73.3		61.7	56.3	52.2
LCW-35、LCWD-35型电流互感器/kA															
15	0.5/3 D/0.5	3.1	2.51	2.18	1.95	1.38	1.12	0.98	0.87	0.8	0.73	0.69	0.62	0.56	0.52
20		4.1	3.36	2.91	2.6	1.84	1.5	1.3	1.16	1.06	0.98	0.92	0.82	0.75	0.69
30		5.2	5.03	4.35	3.9	2.75	2.25	1.95	1.74	1.59	1.47	1.38	1.23	1.13	1.04
40		8.2	6.7	5.81	5.2	3.67	3	2.6	2.32	2.12	1.96	1.84	1.64	1.5	1.39
50		10.3	8.4	7.28	6.5	4.6	3.75	3.25	2.9	2.65	2.45	2.3	2.05	1.88	1.74
75		15.4	12.6	10.9	975	6.9	5.62	4.87	4.35	3.98	3.67	3.45	3.07	2.81	2.6
100		20.6	16.8	14.5	13	9.2	7.5	6.5	5.8	5.7	4.9	4.6	4.3	3.75	3.47
150		31	25.1	21.8	19.5	13.8	11.2	9.8	8.7	8	7.35	6.9	6.2	5.6	5.2

表 8-1-127（续）

额定电流/A	精确度	假想时间 t_f/s													
		0.1	0.15	0.2	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.5	3	3.5
200	0.5/3 D/0.5	41	33.6	29.1	26	18.4	15	13	11.6	10.6	9.8	9.2	8.2	7.5	6.95
300		62	50.3	43.6	39	27.5	22.5	19.5	17.4	15.9	14.7	13.8	12.3	11.3	10.4
400		82	67	58.1	52	36.7	30	26	21.2	21.2	19.6	18.4	16.4	15	13.9
600		123	101	87.2	78	55	45	39	34.8	31.6	39.4	27.5	24.7	22.5	20.8
750		154	126	109	97.5	69	56.2	48.7	43.5	39.8	36.7	34.5	30.7	28.1	26
1000		205	168	145	130	92	75	65	58	53	49	46	41	37.5	34.7
LCWQ-35、LCWQD-35 型电流互感器/kA															
15	0.5/1 D/0.5	4.26	3.5	3.02	2.7	1.91	1.85	1.35	1.2	1.1	1.02	0.95	0.85	0.78	0.72
20		5.7	4.65	4.03	3.6	2.54	2.08	1.8	1.67	1.47	1.36	1.27	1.14	1.04	0.96
30		8.5	7	6.05	5.4	3.82	3.12	2.7	2.41	2.2	2.03	1.91	1.71	1.56	1.44
40		11.4	9.3	8.05	7.2	5.1	4.16	3.6	3.21	2.94	2.71	2.55	2.28	2.08	1.92
50		14.2	11.6	10.1	9	6.35	5.2	4.5	4.02	3.67	3.4	3.18	2.85	2.6	2.4
75		21.3	17.4	15.1	13.5	9.55	7.8	6.75	6.1	5.5	5.1	4.77	4.28	3.9	3.61
100		28.5	23.2	20.2	18	12.7	10.4	9	8.03	7.35	6.8	6.37	5.7	5.2	4.82
150		42.6	35	30.2	27	19.1	15.6	13.5	12	11	10.2	9.55	8.55	7.8	7.2
200		57	46.5	40.3	35	25.4	20.8	18	16.7	14.7	13.6	12.7	11.4	10.4	9.6
300		85	70	60.5	54	38.2	31.2	27	24.1	22	20.3	19.1	17.1	15.6	14.4
400		114	93	80.5	72	51	41.6	36	32.1	29.4	27.1	25.5	22.8	20.8	19.2
600		170	140	121	108	76.2	62.3	54	48.2	44	40.7	38.2	34.2	31.2	28.9
LCWDL-110 型电流互感器/kA															
50	0.5/D/D	11.9	9.68	8.38	7.5	5.3	4.33	3.75	3.35	3.06	2.83	2.65	2.37	2.16	2
75		17.8	14.5	12.5	11.3	7.95	6.49	5.63	5.03	4.59	4.25	3.97	3.56	3.24	3
100		23.7	19.4	16.8	15	10.6	8.65	7.5	6.7	6.12	5.67	5.3	4.74	4.33	4.01
150		35.6	29	25.1	22.5	15.9	13	11.3	10.1	9.18	8.5	7.95	7.11	6.48	6.01
200		47.4	38.7	33.5	30	21.2	17.3	15	13.4	12.2	11.3	10.6	9.48	8.65	8.02
300		71.1	58	50.2	45	31.8	26	22.5	20.1	18.4	17	15.9	14.2	13	12
400		94.8	77.4	67	60	42.4	34.6	30	26.8	24.5	22.7	21.2	19	17.3	16.4
600		142	116	100	90	63.6	51.9	45	40.2	38.7	34	31.8	28.4	26	24.1
1200		285	232	201	180	127	104	90	80.5	73.5	68	63.7	56.9	52	48.1

表 8-1-128 电流互感器动稳定计算表 kA

额定电流/A	内部动稳定															
	LFC-10				LFCQ-10				LFCD-10	LFCQD-10	LQJ-10A	LQJC-10A	LCW-35	LCWD-35	LCWQ-35 LCWQD-35	LCWDL-110
	精确度															
	0.5	0.5/0.5 0.5/3	1 3	1/1 1/3	0.5 0.5/0.5 0.5/1 0.5/3	1	1/1 1/3	3	D、 D/D、 D/0.5、 D/3	D、 D/D、 D/0.5、 D/1、D/3	0.5/1、 0.5/3、 1/1、 1/3	C/0.5 C/1	0.5/3	D/0.5	0.5/1 D/0.5	0.5/D/D
	允许通过短路稳态电流值 I_k/kA															
5	0.35	0.32	0.74	0.63		0.74	0.63	2.82			1.06					
7.5	0.79	0.69	1.59	1.37		1.59	1.37	5.3								
10	1.41	1.27	2.82	2.47		2.82	2.47	7.05			2.12					
15	3.28	2.96	5.3	5.3		5.3	5.3	10.6			3.18		2.12	3.18	3.18	
20	4.65	4.65	7.05	7.05		7.05	7.05	14.1			4.24		2.83	4.24	4.24	
30	7	7	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	21.2			6.36		4.24	6.36	6.36	
40	9.3	9.3	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	28.2			8.48		5.66	8.48	8.48	
50	11.6	11.6	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	35.3			10.6		7.07	10.6	10.6	9.53
75	17.4	17.4	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	53	17.4	26.5	15.9	15.9	10.6	15.9	15.9	14.3
100	23.2	23.2	35.3	35.3	35.3	35.3	35.3	70.5	23.2	35.3	21.2	21.2	14.1	21.2	21.2	19
150	35	35	53	53	53	53	53	106	35	53	31.8	31.8	21.2	31.8	31.8	28.6
200	46.5	46.5	70.5	70.5	70.5	70.5	70.5	141	46.5	70.5	42.4	42.4	28.3	42.4	42.4	38.1
300	70	70	106	106	106	106	106		70	106	63.6	63.6	42.4	63.6	63.6	57.2
400	93	93	141						93		84.8	84.8	56.6	84.8	84.8	76.3
600													84.8	127	127	114
750													106	159		
1000													141	141		
2000																229

表 8-1-128（续）

外部动稳定																
型号		LFC-10、LFCD-10、LFCQ-10、LFCQD-10														
相间距离 a/cm		25					30					35				
支持点间距离 l/cm		25	50	75	100	120	25	50	75	100	120	25	50	75	100	120
		允许通过短路稳态电流值 I_k/kA														
单次级	护盖 L1	130	92	75	65	59.5	142	101	82.4	71.1	65	153	109	88.7	76.8	70.2
	护盖 L2	107	75.2	61.5	53.2	48.6	116	82.5	67.4	58.2	53.2	126	89	72.8	63	57.7
双次级	护盖 L1	130	92	75	65	59.5	142	101	82.4	71.1	65	153	109	88.7	76.8	70.2
	护盖 L2	92	65	53	46	42	101	71.2	58.1	50.3	46	108	77	62.8	54.4	49.8

外部动稳定																
相间距离 a/cm	支持点间距离 l/cm	额定电流/A	LDC-10							LDCQ-10						
			精确度							精确度						
			0.5	0.5/0.5	0.5/3	1	1/1	1/3	3	0.5	0.5/0.5	0.5/3	1	1/1	1/3	3
			允许通过短路稳态电流值 I_k/kA													
35	20	400											136		121	152
		600	136		121	152	121	136	152	136		121	152	121	136	152
		750	152	121	136	152	136	136	152	152	121	136	152	136	136	152
		1000	152	136	136	152	152	152	152	152	136	136	152	152	152	
		1500	152	152	152				152							
	50	400							132				119		104	132
		600	119		104	132	104	119	132	119		104	132	104	119	132
		750	132	104	119	132	119	119	132	132	104	119	132	119	119	132
		1000	132	119	119	132	132	132	132	132	119	119	132	132	132	
		1500	132	132	132											
	100	400											95		84	105
		600	95		84	105	84	95	105	95		84	105	84	95	105
		750	105	84	95	105	95	95	105	105	84	95	105	95	95	105
		1000	105	95	95	105	105	105	105	105	95	95	105	105	105	
		1500	105	105	105				105							

表 8-1-128（续）

相间距离 a/cm	支持点间距离 l/cm	额定电流/A	外部动稳定													
			LDC-10							LDCQ-10						
			精确度							精确度						
			0.5	0.5/0.5	0.5/3	1	1/1	1/3	3	0.5	0.5/0.5	0.5/3	1	1/1	1/3	3
			允许通过短路稳态电流值 I_k/kA													
40	20	400											146		129	
		600	146		129	162	129	146	162	146		129	162	129	146	162
		750	162	129	146	162	146	146	162	162	129	146	162	146	146	162
		1000	162	146	146	162	162	162	162	162	146	146	162	162	162	162
		1500	162	162	162				162							
	50	400											127		112	
		600	127		112	141	112	127	141	127		112	141	112	127	141
		750	141	112	127	141	127	127	141	141	112	127	141	127	127	141
		1000	141	127	127	141	141	141	141	141	127	127	141	141	141	141
		1500	141	141	141				141							
	100	400											102		90	113
		600	102		90	113	90	102	113	102		90	113	90	102	113
		750	113	90	102	113	102	102	113	113	90	102	113	102	102	113
		1000	113	102	102	113	113	113	113	113	102	102	113	113	113	
		1500	113	113	113				113							

表 8-1-128（续）

外部动稳定															
相间距离 a/cm	支持点间距离 l/cm	额定电流/A	LDCD-10							LDCQD-10						
			精确度							精确度						
			D	D/D	D/0.5	D/1	D/3			D	D/D	D/0.5	D/1	D/3		
			允许通过短路稳态电流值 I_k/kA													
35	20	400														
		600	152	121		121	136			152	121		121	136		
		750	152	121	121	121	136			152	121	121	121	136		
		1000	152	136	136	136	136			152	136	136	136	136		
		1500	152	136	152		152									
	50	400														
		600	132	104		104	119			132	104		104	119		
		750	132	104	104	104	119			132	104	104	104	119		
		1000	132	119	119	119	119			132	119	119	119	119		
		1500	132	119	132		132									
	100	400														
		600	105	84		84	95			105	84		84	95		
		750	105	84	84	84	95			105	84	84	84	95		
		1000	105	95	95	95	95			105	95	95	95	95		
		1500	105	95	105		105									

表 8-1-128（续）

外部动稳定																
相间距离 a/cm	支持点间距离 l/cm	额定电流/A	LDCD-10							LDCQD-10						
			精确度							精确度						
			D	D/D	D/0.5	D/1	D/3			D	D/D	D/0.5	D/1	D/3		
			允许通过短路稳态电流值 I_k/kA													
40	20	400														
		600	162	129		129	146			162	129		129	146		
		750	162	129	129	129	146			162	129	129	129	146		
		1000	162	146	146	146	146			162	146	146	146	146		
		1500	162	146	162		162									
	50	400														
		600	141	112		112	127			141	112		112	127		
		750	141	112	112	112	127			141	112	112	112	127		
		1000	141	127	127	127	127			141	127	127	127	127		
		1500	141	127	141		141									
	100	400														
		600	113	90		90	102			113	90		90	102		
		750	113	90	90	90	102			113	90	90	90	102		
		1000	113	102	102	102	102			113	102	102	102	102		
		1500	113	102	113		113									

表 8-1-129 电流互感器主绝缘 tanδ(%)值

电压等级/kV		20~35	66~110	220	330~550
大修后	油纸电容型	—	1.0	0.7	0.6
	充油型	3.0	2.0	—	—
	胶纸电容型	2.5	2.0	—	—
运行中	油纸电容型	—	1.0	0.8	0.7
	充油型	3.5	2.5	—	—
	胶纸电容型	3.0	2.5	—	—

表 8-1-130 电压等级及试验电压

电压等级/kV	3	6	10	15	20	35	66
试验电压/kV	15	21	30	38	47	72	120

6）极性检查

试验周期：①大修后；②必要时。

要求：与铭牌标志相符。

7）各分接头的变比检查

试验要求：①大修后；②必要时。

要求：与铭牌标志相符。

8）校核励磁特性曲线

试验周期：必要时。

要求：与同类型互感器特性曲线或制造厂提供的特性曲线相比较，应无明显差别。

9）密封检查

试验周期：①大修后；②必要时。

要求：应无渗漏油现象。

10）一次绕组直流电阻测量

试验周期：①大修后；②必要时。

要求：与初始值或出厂值比较，应无明显差别。

11）绝缘油击穿电压

试验周期：①大修后；②必要时。

定期试验项目见 1.3.2.8“电力变压器的试验”中 1）、2）、3）、4）、5）项。大修后试验项目见 1.3.2.8“电力变压器实验”中 1）、2）、3）、4）、5）、6）、7）、9）、10）、11）项，不更换绕组，可不进行 6）、7）、8）项试验。

1.3.2.14 电压互感器

1. 电压互感器的种类

电压互感器按相数分单相和三相，按绕组个数分双绕组和三绕组，按绝缘形式分油浸

式、柱式和干式，按装设地点分户内、户外两大类。其型号含义如图 8－1－35 所示。

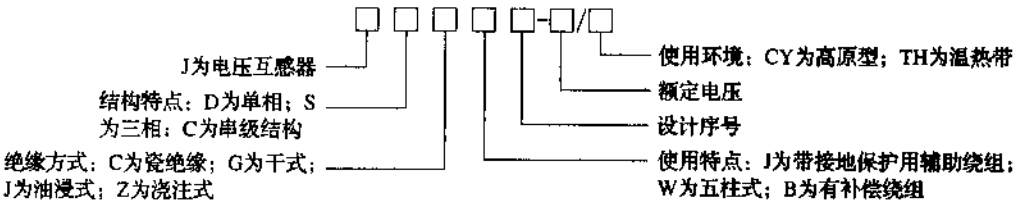


图 8－1－35　电压互感器型号含义

这里需要说明，在小电流接地系统中，用于监视绝缘状态的电压互感器，只能用三相五柱式而不能用三相三柱式。

电压互感器使用时的注意事项：一、二次侧都应接有熔断器作短路保护用；连接时要注意电压互感器的极性，我国规定：一次侧用大写字母标注、二次侧用小写字母标注、同音字母同极性；电压互感器二次侧的一端必须接地，以免一、二次间绝缘击穿时危害二次设备和工作人员。

2. 技术参数

本部分以 JDZ3－12W 型电压互感器和 JDZ10－6、10A（B、C、D、E）型电压互感器为例来阐述。

1）JDZ3－12W 型电压互感器

JDZ3－12W 型电压互感器为户外环氧树脂浇注绝缘全封闭结构，适用于额定频率 50Hz 或 60Hz、额定电压 10kV 及以下中性点非有效接地电力系统中，作电能计量、电压检测和继电保护用。

JDZ3－12W 型电压互感器的技术数据，见表 8－1－131。

表 8－1－131　JDZ3－12W 型电压互感器技术数据

额定电压比/V	额定输出/VA			极限输出/VA	额定绝缘水平/kV
	0.2	0.5	1		
3000/100	15	30	60	300	3.6/25/40
6000/100					7.2/32/60
10000/100					12/42/75

2）JDZ10－6、10A（B、C、D、E）型电压互感器

JDZ10－6、10A，JDZ10－6、10 B，JDZ10－6、10 C，JDZ10－6、10D，JDZ10－6、10E 型电压互感器为单相环氧树脂浇注全封闭户内式，适用于海拔 1000m 及其以下地区、频率 50Hz、最高工作电压 12kV（标称电压 10kV）、7.2kV（标称电压为 6kV）中性点绝缘或非有效接地的电力系统中，作精密电压、电能测量及继电保护用。

JDZ10－6、10A（B、C、D、E）型电压互感器技术数据，见表 8－1－132。

表 8-1-132 JDZ10-6、10A（B、C、D、E）型电压互感器技术数据

型 号	额定电压/V		额定输出/VA			极限输出/VA	结构
	一次线圈	二(三)次线圈	0.2	0.5	1		
JDZ10-6A	6000	100	15	30	60	150	单相双绕组
JDZ10-6B			25	50	150	300	
JDZ10-6C			50	120	240	500	
JDZ10-10A	10000	100	15	30	60	150	单相双绕组
JDZ10-10B			25	50	150	300	
JDZ10-10C			50	120	240	500	
JDZ10-6D	6000	100/100	40	80		500	单相三绕组
JDZ10-6E			30	50		500	
JDZ10-10D	10000	100/100	40	80		500	单相三绕组
JDZ10-10E			30	50		500	

3. 电压互感器选择

电压互感器选择见表 8-1-133。

表 8-1-133 电压互感器选择

选择与校验项目	常用计算公式
按额定电压选择 无需校验	$U_{max} \geq U_y$

4. 电压互感器预防性试验

1）绝缘电阻

试验周期：①1～3 年；②大修后；③必要时。

要求：自行规定。

2）tanδ(20kV 及以上)

试验周期：①对绕组绝缘，1～3 年、大修后和必要时；②对 66～220kV 串级式电压互感器支架，投运前、大修后和必要时。

要求：①绕组绝缘 tanδ(%)不应大于表 8-1-134 中数值；②支架绝缘 tanδ 一般不大于 6%。

表 8-1-134 绕组绝缘 tanδ（%）值

温 度/℃		5	10	20	30	40
35kV 及以下	大修后	1.5	2.5	3.0	5.0	7.0
	运行中	2.0	2.5	3.5	5.5	8.0
35kV 及以上	大修后	1.0	1.5	2.0	3.5	5.0
	运行中	1.5	2.0	2.5	4.0	5.5

3）油中溶解气体的色谱分析

试验周期：①投运前；②1～3 年（66kV 及以上）；③大修后；④必要时。

油中溶解气体组分含量（体积分数）超过下列任一值时应引起注意：总烃，100×

10^{-6}；H_2，150×10^{-6}；C_2H_2，2×10^{-6}。

4）交流耐压试验

试验周期：①3年（20kV及以下）；②大修后；③必要时。

要求：①一次绕组按出厂值的85%进行，出厂值不明的，按表8-1-135电压进行试验；②二次绕组之间及末屏对地为2kV；③全部更换绕组绝缘后按出厂值进行。

表8-1-135　电压等级及试验电压　　kV

电压等级	3	6	10	15	20	35	66
试验电压	15	21	30	38	47	72	120

5）局部放电测量

试验周期：①投运前；②1～3年（20～35kV固体绝缘互感器）；③大修后；④必要时。

要求：①固体绝缘相对地电压互感器在电压为$1.1U_m/\sqrt{3}$（U_m为设备最高电压，下同）时，放电量不大于100pC；在电压为$1.1U_m$时（必要时），放电量不大于500pC。固体绝缘相对相电压互感器，在电压为$1.1U_m$时，放电量不大于100pC；②110kV及以上油浸式电压互感器在电压为$1.5U_m/\sqrt{3}$时，放电量不大于20pC。

6）空载电流测量

测试周期：①大修后；②必要时。

要求：①在额定电压下，空载电流与出厂数值比较无明显差别；②在下列试验电压下，在中性点非有效接地系统为$1.9U_m/\sqrt{3}$，中性点接地系统为$1.5U_m/\sqrt{3}$电压下试验时，空载电流不应大于最大允许电流。

7）密封检查

测试周期：①大修后；②必要时。

要求：应无渗漏油现象。

8）铁芯夹紧螺栓（可接触到的）绝缘电阻

试验周期：大修时。

要求：自行规定。

9）连接组别和极性

试验周期：①更换绕组后；②接线变动后。

要求：与铭牌和端子标志相符

10）电压比

试验周期：①更换绕组后；②接线变动后。

要求：与铭牌标志相符。

11）绝缘油击穿电压

试验周期：①大修后；②必要时。

要求：参见表8-1-97。

电磁式电压互感器的定期试验项目见1.3.2.8“电力变压器的试验”中1）、2）、3）、

4）、5）项，大修时或大修后试验项目见1.3.2.8“电力变压器的试验”中1）、2）、3）、4）、5）、6）、7）、8）、9）、10）、11）项，不更换绕组可不进行9）、10）项和表8－1－147中试验。

电容式电压互感器的试验项目、周期和要求见表8－1－136。

表8－1－136 电容式电压互感器的试验项目、周期和要求

序号	项 目	周 期	要 求	说 明
1	电压比	（1）大修后； （2）必要时	与铭牌标志相符	
2	中间变压器的绝缘电阻	（1）大修后； （2）必要时	自行规定	采用2500V兆欧表
3	中间变压器的tanδ	（1）大修后； （2）必要时	与初始值相比不应有显著变化	

1.3.2.15 配电直流屏

配电直流屏适用于变电厂、发电厂、工矿企业、邮电通信、高层建筑等场合，作为直流操作、继电保护、控制信号及事故照明等不停电的直流电源使用。

1. 配电直流屏（柜）的技术

本部分以ZKA系列镉镍电池直流屏为例进行阐述。

ZKA系列镉镍电池直流屏（柜）适用于工矿企业作为控制保护电源，可满足正常运行和事故状态下的继电保护、信号继电及事故负荷的需要。

ZKA46型直流屏是由控制电源整流器、保护电源和GNY型全封闭镉镍电池组成。工作电源和备用交流电源配有互投装置，可提高输入电源的可靠性。保护电源整流器采用了磁饱和式稳压电路，使母线电压具有一定的稳定性，并可保证电池不致过充或欠充。另外当交流输入电压降低至50%时，其直流输出尚能满足4台开关同时分合闸的需要。

ZKA56型直流屏由强充电整流器和浮充电整流器及一组GNG型高倍率镉镍电池组成，能适应较大放电电流的冲击，还配有全手动调压的工作方式。

ZKA66型直流屏是ZKA56的发展型，可装设两组电池，两组电池可以并联运行，可靠性大幅度提高。屏内增设了独立的充电母线，电池可分别进行维护，而负荷用电不受影响，具有更高的灵活性和可靠性。

ZKA系列直流屏技术数据见表8－1－137。

2. 配电直流屏的预防性试验

镉镍蓄电池直流屏（柜）的试验项目、周期和要求见表8－1－138。

1.3.3 继电保护

煤矿高压电网的继电保护，应当满足可靠性、选择性、灵敏性及速动性四项基本要求。如果由于电网运行方式、装置性能等原因，不能兼顾选择性、灵敏性和速动性的要求，则应在整定时，按照如下原则合理取舍：

表 8－1－137　ZKA 系列直流屏技术数据

装置型号及规格	装置内主要设备参数					
	电池型号规格	电池数量/支	浮充机容量	合闸整流器容量	馈出回路数	
					合闸	分闸控制
ZKA46－200A/220V 5Ah	GNY－5Ah	160	3kW	220A/220V	4	5
ZKA46－300A/220V 5Ah				300A/220V		
				强充机容量		
ZKA56－120A/220V 10Ah	GNG－10Ah	180	2kW	2kW	6	6
ZKA56－220A/220V 20Ah	GNG－20Ah		3kW	6kW	8	8
ZKA56－360A/220V 40Ah	GNG－40Ah			7kW	8	10
ZKA66－240A/220V 10Ah	GNG－10Ah	360	3kW	3kW	4	6
ZKA66－360A/220V 20Ah	GNG－20Ah			6kW	6	8
ZKA66－480A/220V 40Ah	GNG－40Ah		10kW	10kW	8	10

表 8－1－138　镉镍蓄电池直流屏（柜）的试验项目、周期和要求

序号	项　目	周　期	要　求
1	镉镍蓄电池组容量测试	（1）1 年； （2）必要时	按 DL/T459 规定
2	蓄电池放电终止电压测试	（1）1 年； （2）必要时	按 DL/T459 规定
3	各项保护检查	1 年	各项功能均应正常
4	镉镍屏（柜）中控制母线和动力母线的绝缘电阻	必要时	绝缘电阻不应低于 10MΩ

（1）下一级电网服从上一级电网。

（2）局部问题自行消化。

（3）尽可能照顾下一级电网的需要。

（4）保证重要用户供电。

1.3.3.1　继电保护基本原理

矿井供电系统近些年来获得了飞速发展，供电电压等级不断提高，110kV 等级电压已经大量出现在矿井供电系统中。电压等级的提高对电网继电保护的要求也越来越高，使得各种基于新原理新技术的继电保护装置在矿井电网中得到了广泛应用。

矿井供电系统作为主保护应用最多的有电流保护、距离保护、差动保护和接地保护等。其中差动保护包括线路纵联电流差动保护（以下简称纵差）、变压器纵差保护、母线电流差动保护等。

1. 三段式电流保护

电流保护是矿井供电系统中最常用的保护方式，这种保护方式一般由三段构成，其典型配置为：Ⅰ段电流速断保护、Ⅱ段限时电流速断、Ⅲ段定时限过电流保护（或反时限

过流保护)。定时限过流保护和反时限过流保护的不同体现在动作时限上。定时限方式的动作时限经设定后是固定的；反时限方式的动作时限是按照一定规律的曲线来设定的，当电流大时动作的时限短，当电流小时动作的时限长，具有一定的自适应性。

电流保护Ⅰ段的特点是依靠动作电流整定值（I_{dz}）取得选择性，所以动作快速，但不能保护线路全长，灵敏性差，即牺牲了灵敏性换取了选择性。电流保护Ⅲ段，依靠动作时限取得选择性，其动作电流值只要躲过负荷电流，保证负荷电流不误动，所以灵敏度高，但是保护的动作慢，即牺牲快速性换取了灵敏性。电流保护Ⅱ段是Ⅰ段和Ⅲ段折中的设计，它部分通过动作电流值，部分通过动作时限来实现选择性，也就是以动作电流和动作时限同下一段线路配合的方式取得动作选择性。

三段式电流保护在综合考虑对继电保护要求上已经比较完善，在矿井电网的实际应用中灵活搭配、合理设值是发挥电流保护优势的关键。其动作逻辑框图如图 8－1－36 所示。

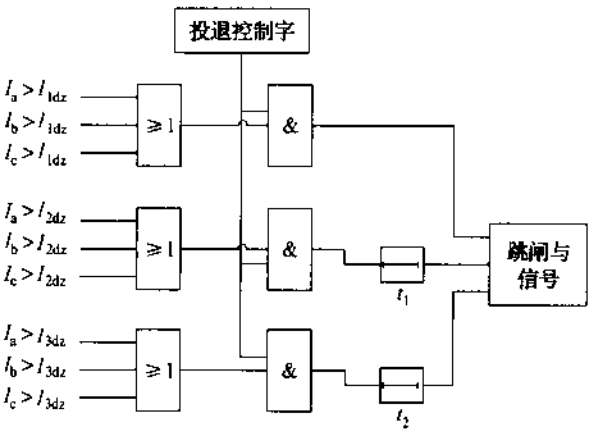


图 8－1－36 三段式电流保护逻辑框图

2. 距离保护

距离保护是从根本上解决电力系统运行方式对继电保护中故障点定位与判别影响的一种方法。目前精确短路距离的测量很困难，理论上比较理想的短路距离测量方法是用脉冲行波的反射时间来测距，但是目前技术上实现这种方法有困难，因此在实际中，都是通过间接反映短路距离的量来实现距离保护。现在通常所谓距离保护就是通过短路阻抗的测量来实现距离测量的保护，所以也称之为阻抗保护。

同电流保护一样，距离保护也由三段构成，其逻辑框图如图 8－1－37 所示。阻抗保护和三段式电流保护的不同之处在于保护的判据上，当测量阻抗小于阻抗整定值（Z_{dz}）时保护启动。同电流保护相比，距离保护的性能要优越得多，但是保护的构成也复杂得多，应用中要根据现场实际情况酌情选择。

3. 差动保护

电流差动保护是比较理想的一种保护方式，具有绝对的选择性。其选择性的实现靠基尔霍夫电流定律，即流向一个节点的电流之和等于零。差动保护动作无延时，且不需要和其他保护配合。这种保护已经广泛应用于线路、变压器、母线等，而且均作为主保护。

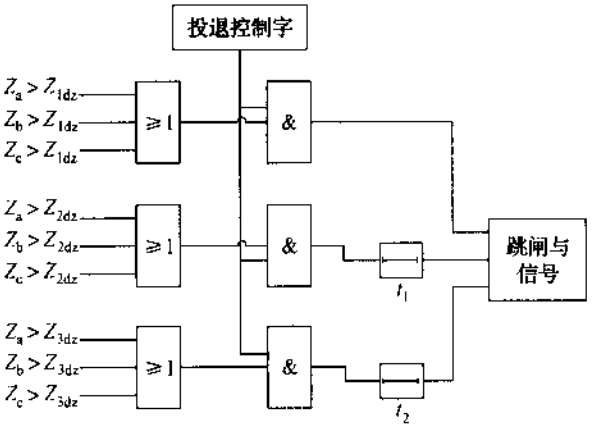
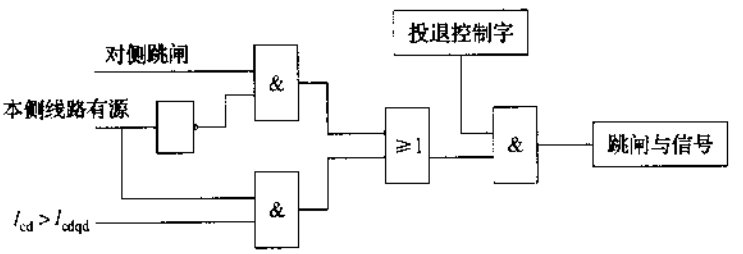


图 8－1－37　距离保护逻辑框图

1）线路纵联电流差动保护

随着光纤通信的普及，长期以来因为不能在一侧计算差动电流而无法推广的线路差动保护获得了大量使用。线路电流纵差的原理很简单，只要两侧电流的差值超过定值就可以启动保护。在实际使用中，要注意以下影响保护性能的因素：电流互感器的误差和不平衡电流、长距离输电线路的电容性电流、电流互感器饱和、电流互感器二次断线和光纤通道的可靠性等。其逻辑框图如图 8－1－38 所示。



I_{cd}—差动电流；I_{cdqd}—差动启动电流

图 8－1－38　线路纵联电流差动保护逻辑框图

2）变压器纵差保护

变压器纵差保护的原理是基尔霍夫电流定律。理想变压器在正常工作或者发生外部故障时，流入变压器的电流等于流出变压器的电流（二者折算到同一侧，下同），此时纵差保护不动作；当变压器内部故障时只有流进变压器的电流而没有流出变压器的电流，此时纵差保护动作，切除变压器。

实际变压器在正常运行、外部故障、变压器空载投入以及外部故障切除后的暂态过程中，其流入电流与流出电流相差较大或者很大，在这种情况下变压器纵差保护是不应该动作的。为此要实现变压器纵差保护，需要注意以下几点关键问题：①变压器两侧电流的大小及相位；②由励磁电流、有载调压和各侧电流互感器的变比误差产生的稳态不平衡电

流；③励磁涌流等各种暂态不平衡电流。

实际变压器的纵差保护根据涌流闭锁方式的不同可以分为“或门”闭锁式纵差保护和“分相”闭锁式纵差保护，其逻辑框图如图 8－1－39、图 8－1－40 所示。“或门”闭锁方式是指在三相涌流闭锁元件中，只要有一相满足闭锁条件，立即将三相差动元件全部闭锁。“分相”闭锁方式是指某相的涌流闭锁只对本相的差动元件有闭锁作用。这两种方式各有利弊：“或门”闭锁的差动保护，空投变压器时不会误动，但发生内部故障时有可能拒动或延缓动作；“分相”闭锁的差动保护，如果空投变压器时发生内部故障，保护能迅速而可靠地动作并切除变压器，但是空投变压器时容易误动。

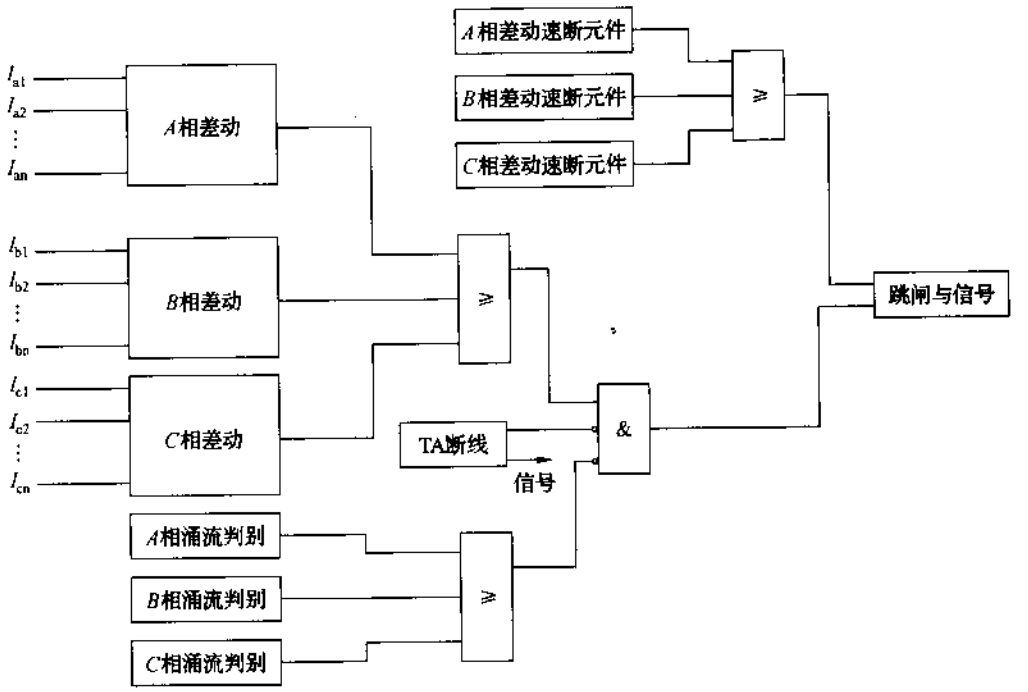


图 8－1－39 “或门”闭锁式变压器纵差保护逻辑框图

3）母线差动保护

母线差动保护主要由三个分相差动元件（同变压器纵差）构成。为了提高保护的可靠性，在保护中还设置有启动元件、复合电压闭锁元件、电流互感器二次回路断线闭锁元件及电流互感器饱和检测元件等。

双母线或单母线分段母差保护的逻辑框图如图 8－1－41 所示。可以看出，每相差动保护由两个小差元件和一个大差元件构成。大差元件用于检查母线故障，小差元件用于选择出故障所在的母线。

4. 接地保护

矿井供电系统广泛采用中性点非有效接地系统。按照电力规程规定，小电流接地系统发生单相接地故障时应在 1～2h 之内选择出故障线路，并在必要的负荷转移后将接地线路从系统中切除，以确保系统的其他部分安全运行。

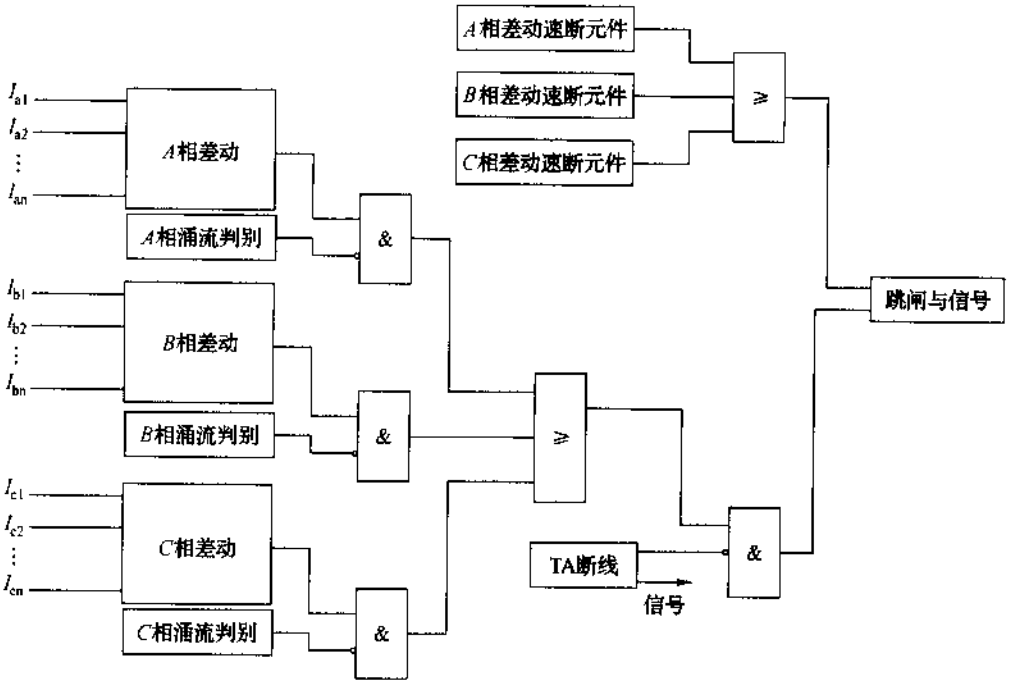


图 8-1-40　“分相”闭锁式变压器纵差保护逻辑框图

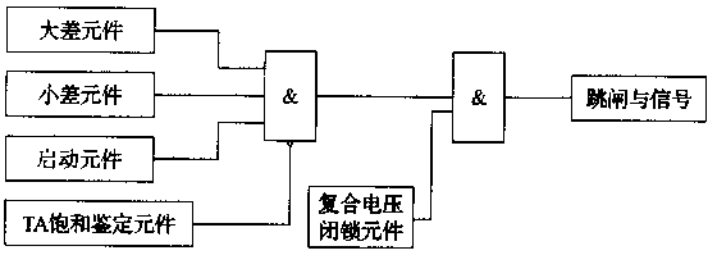


图 8-1-41　双母线或单母线分段母线差动保护逻辑框图

小电流接地选线装置已经在我国煤矿供电系统中获得了广泛的应用并取得良好的实际效果。小电流接地选线的方法有多种，归纳如下：

1）零序电流幅值比较选线方法

零序电流幅值比较法利用故障线路零序电流幅值比非故障线路大的特点来选择故障线路。现在使用较多的是群体比幅法，应用微机技术采集并比较接地母线上所有出线零序电流，将幅值最大的线路选为故障线路。此法的缺陷是不适用于中性点经消弧线圈接地的电网。

2）零序无功功率方向选线方法

故障线路零序电流落后零序电压 90°，非故障线路则相反，据此可利用零序电流的无功分量来判别故障线路。如果某线路的零序无功功率方向为正，则说明零序电容电流的方

向是由线路流向母线，该线路就被选为故障线路。此法也不适用于中性点经消弧线圈接地的电网。

3）零序有功功率方向选线方法

非故障线路中不存在零序电流有功分量（假设线路的对地绝缘电阻无穷大），而故障线路中存在。在欠补偿和过补偿运行方式下，无功分量可能相反，但有功分量方向不变。所以在补偿电网中，可利用有功分量来判别单相接地故障。有功分量法的优点是不受消弧线圈的影响，但需要在消弧线圈上串联或并联电阻增加有功电流来提高选线可靠性。

4）五次谐波选线方法

在谐振接地电网中，五次谐波电容电流不会被消弧线圈抵消，当发生单相接地故障时，其五次谐波电容电流的分布规律基本上与中性点不接地系统中基波电容电流的分布规律相同。故障线路五次谐波零序电流基本上等于非故障线路的五次谐波电容电流之和，方向相反。据此特点，可通过比较五次谐波电流大小、方向或功率方向来区分故障线路和非故障线路。

5）首半波选线方法

首半波原理是基于单相接地故障发生在电压接近最大值瞬间。当接地故障发生在电压峰值附近时，故障相电容电荷通过故障线路向故障点放电，造成放电电流首半波对于故障线路和非故障线路电流方向相反。在谐振接地系统中，由于故障首半波消弧线圈尚未起作用，因此不受消弧线圈的影响。

6）“S 注入法”选线方法

这种选线原理是当系统发生单相接地故障时，人为地向系统注入一个特殊电流信号，通过检测注入信号的路径和特征来实现接地故障选线。

以上几种是目前常用的小电流接地选线原理，实际装置多是同时采用几种原理，发挥各自的优势以提高选线的准确率。

1.3.3.2 *矿区主变压器保护*

煤矿电力变压器应该按照下列故障以及异常运行方式，装设相应的继电保护设备：

（1）绕组及其引出线的相间短路。

（2）绕组部分线匝间的匝间短路。

（3）由外部短路引起的过电流。

（4）过负荷。

（5）油面下降。

（6）温度过高。

上述（1）、（2）两项的保护作用于瞬时跳闸，（3）项的保护应该带时限动作于跳闸，（4）、（5）、6 项的保护作用于信号。

油浸式电力变压器应装设瓦斯保护。瓦斯保护有重、轻之分，重瓦斯断开变压器各电源侧的断路器，轻瓦斯动作于信号。瓦斯保护反应于油箱内部故障所产生的气体（或油流）或漏油而动作，应注意出口继电器的触点抖动，动作后应有自保持措施。

对变压器引出线、套管及其内部的故障，应采取下列保护方法：

（1）纵联差动保护：适用于矿井地面变电所并列运行的电力变压器。

① 矿井地面变电所单独运行的 3150kV·A 以上的电力变压器。

② 其他辅助单独运行的 6300kV · A 及以上的电力变压器。

（2）电流速断保护：适用于 3150kV · A 以下的电力变压器。如果过电流保护的时限大于 0.5s，同时电流速断保护灵敏度不满足要求时，应该采用纵联差动保护。

上述保护均动作于断开变压器各电源侧的断路器。

对变压器外部的相间短路，一般采用过电流保护。如过电流保护不符合要求时，可装设复合电压或低电压起动的过电流保护。

目前矿区主变压器的典型保护配置包括差动保护、高压侧后备保护、低压侧后备保护和非电量保护四部分。

矿区 35kV、110kV 主变压器微机保护配置配合见表 8 - 1 - 139。

1.3.3.3　配电变压器保护

煤矿电力系统中的 10kV 以下配电变压器大量应用在矿井地面或选煤厂等动力照明网中，变压器二次均为三相四线制系统。

矿井 400/230V 动力照明网的配电变压器保护应按下列原则装设：

（1）100kV·A 及以下变压器可用熔断器作为多相及单相短路保护。

（2）160 ~ 315kV · A 的变压器可用熔断器作多相短路保护；采用负荷开关和零序过流作为单相短路保护，保护动作使负荷开关掉闸。

（3）400kV · A 及以上的变压器，一次采用相差接线方式作为过流和多相短路保护；采用接在二次侧中性线上的零序过流作为单相短路保护。

（4）400kV · A 及以上变压器应装设瓦斯保护。

（5）过流与速断保护均可采用反时限电流继电器。

1. 保护装置的整定计算

1）电流速断

应按躲过变压器二次三相短路电流计算，保护动作电流为

$$I_{dz} = K_{rel} K_c \frac{I_{k^3 max K^2}}{K_j} \tag{8-1-95}$$

式中　K_{rel}——可靠系数，取 1.3 ~ 1.5；

K_c——接线系数，接相上为 1，相差上为$\sqrt{3}$；

$I_{k^3 max K^2}$——变压器二次最大三相短路电流；

K_j——电流互感器变比。

2）过电流保护

动作电流为

$$I_{dz} = K_{rel} K_c \frac{I_{NT1}}{K_{ret} K_j} \tag{8-1-96}$$

式中　K_{rel}——可靠系数，取 2 ~ 3；

I_{NT1}——变压器一次侧额定电流，A；

K_{ret}——返回系数，取 0.85；

K_j——电流互感器变比。

2. 灵敏度校验

1）多相短路灵敏系数

表 8－1－139　矿区 35kV 、110kV 主要变压器微机保护配置配合表

保护设置	原　　则　　描　　述		备　　注
纵联差动保护	制动曲线斜率 S	$S=K_{rel}\ (K_{ap}K_{cc}K_{er}+\Delta U+\Delta m)$	I_e—变压器的额定电流； K_{rel}—可靠系数，一般可取 1.3～1.5； K_{ap}—非周期分量系数，一般可取 1.5～2； K_{cc}—电流互感器的同型系数，型号相同时取 0.5，不同时取 1； K_{er}—电流互感器综合误差，取 $K_{er}=10\%$； ΔU—为偏离额定电压最大调压百分数； Δm—不平衡电流系数，为可靠起见，仍沿用常规取值，$\Delta m=0.05$
	最小启动电流	$I_{op.min}=0.3I_e+K_{rel}\ (\Delta U+\Delta m)\ I_e$，一般取 $0.4I_e$	
	二次谐波制动系数	0.12～0.15，一般取 0.15 或者根据厂家说明书选取	
	TA 断线闭锁差动保护	通过保护装置的控制字选用	
	差动速断保护	躲过变压器空投时的励磁涌流： $I_{dz}\geq K_k\cdot I_e$ K_k—一般取 5～8	
	纵联差动保护应满足下列要求： 1. 应能躲过励磁涌流和外部短路产生的不平衡电流； 2. 在变压器过励磁时不应误动作； 3. 在电流回路断线时应发出断线信号或电流回路断线允许差动保护动作跳闸； 4. 在正常情况下，纵联差动保护的保护范围应包括变压器套管和引出线，如不能包括引出线时，应采取快速切除故障的辅助措施		

表 8-1-139（续）

保护设置	原则描述			备注
相间短路后备保护	复合电压闭锁（方向）过流保护	负序电压元件整定值	$U_{2.set}=(0.06\sim0.08)\dfrac{U_N}{n_{TV}}$	U_N—额定相电压； U_{min}—变压器正常运行时可能出现的最低相电压，一般可取 $0.8\sim0.9U_N$； K_{rel}—可靠系数，一般可取 1.2； n_{TV}—电压互感器变比； I_e—保护安装侧变压器的额定电流； n_{TA}—电流互感器变比
		低电压整定值	取自低压侧：$U_{set}=\dfrac{U_{min}}{K_{rel}K_r n_{TV}}$，$K_r$—返回系数，取 1.05	
			取自高压侧：$U_{set}=0.7\dfrac{U_N}{n_{TV}}$	
		电流定值整定	$I_{set}=\dfrac{K_{rel}}{K_r}\cdot\dfrac{I_e}{n_{TA}}$，$K_r$—返回系数，取 0.95	
		1. 对外部相间短路引起的变压器过电流，变压器应装设相间短路后备保护。保护带延时跳开相应的断路器。相间短路后备保护宜选用过电流保护、复合电压（负序电压和线间电压）启动的过电流保护或复合电流保护（负序电流和单相式电压启动的过电流保护）； 2. 单侧电源双绕组变压器相间短路后备保护宜装于各侧。非电源侧保护带两段或三段时限，用第一时限断开本侧母联或分段断路器，缩小故障影响范围；用第二时限断开本侧断路器；用第三时限断开变压器各侧断路器。电源侧保护带一段时限，断开变压器各侧断路器； 3. 两侧有电源的双绕组变压器各侧相间短路后备保护可带两段或三段时限。为满足选择性的要求或为降低后备保护的动作时间，相间短路后备保护可带方向，方向宜指向各侧母线，但断开变压器各侧断路器的后备保护不带方向		

表 8-1-139（续）

保护设置	原则描述					备注
零序（接地）保护 110kV	零序过流保护（中性点直接接地）				在中性点直接接地的电网中，如变压器中性点直接接地运行，对单相接地引起的变压器过电流应装设零序过电流保护。保护可由两段组成，其动作电流与相关线路零序过电流保护相配合。每段保护可设两个时限，并以较短时限动作于缩小故障影响范围或动作于本侧断路器，以较长时限动作于断开变压器各侧断路器	
	中性点不接地时	中性点分级绝缘	有放电间隙	间隙零序电流保护	间隙零序电流保护一次动作值一般取 100A。作为开放间隙零序电流保护启动元件，取 25～35A	
				零序电压保护	U_{0dz} = (150～180) V	
			无放电间隙	零序电压保护	U_{0OP} = (15～30) V　一般取较低值	
		中性点全绝缘	零序电压保护，一般取 180V，为避免单相接地时暂态过程的影响，零序电压带 0.3～0.5s 时限			

速断保护灵敏系数

$$K_m = \frac{I_{K^2minK^1}}{I_{aq}K_i} > 2 \tag{8-1-97}$$

过流保护灵敏系数

$$K_m = \frac{I_{K^2minK^2}}{I_{aoc}K_iK_u} > 1.5 \sim 2 \tag{8-1-98}$$

式中　$I_{K^2minK^1}$——变压器一次最小两相短路电流；

$I_{K^2minK^2}$——变压器二次最小两相短路电流；

K_i——变压器一次侧电流互感器变比；

K_u——变压器变比。

2）单相短路灵敏系数

$$K_m = \frac{I_{K^1minK^2}K_{mr}}{I_{aoc}K_iK_u} > 1.5 \sim 2 \tag{8-1-99}$$

式中　$I_{K^1minK^2}$——变压器二次最小单相短路电流；

K_{mr}——单相短路的相对灵敏系数。继电器接在相差上，$K_{mr}=0$；继电器接在相上，$K_{mr}=0.5$；继电器接在相和上，$K_{mr}=1$。

3. 零序过流保护

根据变压器运行规程，Y/Y_0-12 接线的配电变压器的不平衡电流不得大于 25% I_{NT}，保护的动作电流为

$$I_{dz} = \frac{K_{rel}I_{umax}}{K_i} = \frac{0.25K_{rel}I_{NT}}{K_i}$$

式中　K_{rel}——可靠系数，取 2；

I_{umax}——最大不平衡电流；

K_i——零序电流互感器变比（零序电流互感器额定电流取 $I_{NCT} \geqslant 0.5I_{NT2}$）。

1.3.3.4　线路保护

（1）煤矿 110kV 电网在符合下列条件时应装设一套纵联保护作为全线速动保护。

① 根据系统稳定要求有必要时。

② 线路发生三相短路，如使发电厂用母线电压低于允许值（一般约为 70% 额定电压），且其他保护不能无时限和有选择地切除短路时。

③ 全线速动后不仅能改善本线路保护性能，而且能改善整个电网保护的性能。

（2）110kV 线路对接地短路，应按下列规定之一装设保护：

① 宜装设阶段式或反时限零序电流保护。

② 可采用接地距离保护，并辅之以阶段式或反时限零序电流保护。

③ 装设全线速动保护外，还应按照上述①、②规定装设接地后备保护。

（3）110kV 线路相间短路，应按照下列规定装设保护装置：

① 单侧电源单回线路，可装设三相电流电压保护，如不能满足要求，则装设距离保护。

② 双侧电源宜装设距离保护。

③ 装设全线速动后，还应按照上述规定装设相间短路保护。

(4) 并列运行的110kV平行线，宜装设横联保护。

(5) 煤矿6kV（10kV）、35kV系统为小电流接地系统，因此不存在单相短路故障类型。通常只需装设反映三相短路和两相相间短路的保护装置。

① 一般均应装设两段电流保护：第一段无时限电流速断保护，第二段带时限过电流保护。

② 采用两相式接线时，整个系统中继电器皆应装设在同名相的两相上（一般为A、C相）。

③ 当速断保护不能满足15%最小保护范围要求时，且过电流保护时限不大于0.5～0.7s可不装设电流速断保护，或只装设反时限过电流保护。

④ 对由发电厂直接供电的6kV（10kV）矿井变电所，应采用无时限电流速断保护。其保护范围内应能切除使母线残压低于60%额定电压的各种故障。

⑤ 6kV（10kV）馈电线应装设具有选择性的高压漏电保护装置。

负载较大，总长度小于1km的主要用户的电缆线路可采用纵联差动保护。双回路供电的线路可采用横联差动保护装置，任一回路发生故障时双回线路同时被切除。负荷较小的非重要用户可采用熔断器保护。

矿井馈线保护典型配置由过流保护、三相一次重合闸及加速保护、小电流接地选线、过负荷保护等组成。其中过流保护为主保护，实际中可配置两段式或三段式，还可分为带方向和不带方向两种。

矿井电网距离保护典型配置由三段式相间距离保护、不对称故障相继速动、三相一次重合闸及加速保护、小电流接地选线等组成。

矿井电网光纤纵差保护典型配置由光纤纵差保护、三段式电流保护（每段均可选择方向或低压闭锁）、小电流接地选线、三相一次重合闸及加速保护等组成。

矿井电网常用线路保护配置配合见表8－1－140。

1.3.3.5 电力电容器保护

对3kV及以上的并联补偿电容器组的下列故障及异常运行方式，应装设如下的保护：

(1) 电容器组和断路器之间连接线短路。

(2) 电容器内部故障及其引出线短路。

(3) 电容器组中某一故障电容器切除后所引起的过电压。

(4) 电容器组的单相接地故障。

(5) 电容器组过电压。

(6) 所连接的母线失压。

对电容器组和断路器之间连接线的短路，可装设带有短时限的电流速断和过流保护，动作于跳闸。速断保护的动作电流，按最小运行方式下，电容器端部引线发生两相短路时有足够灵敏系数整定；过流保护的动作电流，按电容器组长期允许的最大工作电流整定。

对电容器内部故障及其引出线的短路，宜对每台电容器分别装设专用的熔断器，熔丝的额定电流为电容器额定电流的1.5～2倍。

当电容器组中故障电容器切除到一定数量，引起电容器端电压超过110%额定电压时，保护应将电容器断开。为此，可采用下列任意一种保护措施：

表 8-1-140　矿井电网常用线路保护配置配合表

保护设置	原则描述	动作时限
无时限电流速断保护	(1)按躲过线路末端故障整定： $I_{dz}^{I}=K_{rel}I_{d3.max}^{(3)}$ 式中　K_{rel}—可靠系数，取 1.2～1.3； $I_{d3.max}^{(3)}$—最大方式下线路末端三相短路超瞬变电流。 (2)按与相邻变压器保护配合： ① 当变压器为差动保护时 $I_{dz}^{I}=K_{rel}I_{k.max}$ 式中　K_{rel}—可靠系数，取 1.2～1.3； $I_{k.max}$—变压器低压侧短路时，流过本线路最大短路电流。 ② 变压器为无时限电流速断保护时 $I_{dz}^{I}=K_{rel}I_{op.T}$ 式中　K_{rel}—可靠系数，取 1.1； $I_{op.T}$—并列变压器的电流速断定值。 当无时限电流速断保护的灵敏度不能满足要求时，可采用无时限电流闭锁电压速断保护以提高灵敏度。测量元件由电流和电压共同组成。 整定原则是在正常的运行方式下有较大的保护范围。 (1)保护动作电流： $I_{dz}^{I}=\dfrac{E_s}{(Z_s+z_1l_1)}$ 式中　E_s—系统等效相电势； Z_s—系统正常运行方式下的等值阻抗； z_1—线路单位长度正序阻抗； l_1—正常运行方式下保护范围长度，可选取全长的 70%～80%。 (2)动作电压： $U_{dz}^{I}=\sqrt{3}I_{dz}^{I}z_1l_1$	保护固有动作时间 $t=0s$

表 8-1-140（续）

保护设置	原则描述	动作时限
带时限电流速断保护	为了保证有选择性，带时限电流速断保护的整定值必须与相邻元件的保护配合，通常是与相邻元件的无时限速断配合。它的整定计算和相邻元件的保护类型有关。 （1）相邻线路装设无时限电流限速断时： $I_{dz}^{\mathrm{II}}=K_{rel}I_{op.n}^{\mathrm{I}}$ 式中 K_{rel}—可靠系数，取 1.1～1.2； $I_{op.n}^{\mathrm{I}}$—相邻元件的无时电流限速断保护动作值。 （2）相邻线路装设瞬时电流闭锁电压速断时： 与电流元件配合： $I_{dz}^{\mathrm{II}}=K_{rel}I_{op.n.B}^{\mathrm{I}}$ 式中 $I_{op.n.B}^{\mathrm{I}}$—相邻元件的瞬时电流闭锁电压速断保护电流动作值。 与电流元件配合： $I_{dz}^{\mathrm{II}}=K_{rel}I_{k.max}$ 式中 $I_{k.max}$—相邻线路电压最小保护区末端短路时，流过线路的最大短路电流； K_{rel}—可靠系数，取 1.1～1.2	与相邻线路Ⅰ段配合 $t^{\mathrm{II}}=t_n^{\mathrm{I}}+\Delta t$， 式中 t^{II}—本段线路限时速断保护动作时限； t_n^{I}—相邻线路电流速断保护动作时限，取 0s； Δt—保护动作时限差
过流保护	按躲过线路的最大负荷电流整定： $I_{dz}^{\mathrm{III}}=\frac{K_{rel}K_{ss}I_{los.max}}{K_{res}}$ 式中 K_{rel}—可靠系数，取 1.2； K_{ss}—负荷自启动系数，取 2～5； K_{res}—返回系数，取 0.95； $I_{los.max}$—最大负荷电流	动作时间按阶梯原则整定

表 8-1-140（续）

保护设置	原则描述		动作时限
低电压闭锁过流保护	当过电流保护不能满足灵敏度要求时，可采用低电压闭锁过流保护。 电流元件动作值：$$I_{dz}^{\text{Ⅱ}}=\frac{K_{rel}I_{loa}}{K_{res}}$$ 电压元件动作值：$$U_{dz}^{\text{Ⅱ}}=\frac{K_{rel}U_{w.min}}{K_{res}}\approx 0.7U_n$$ 式中 $U_{w.min}$—最小工作线电压； I_{loa}—正常负荷电流； U_n—额定线电压； K_{res}—返回系数，取 0.9； K_{rel}—可靠系数，取 1.15		动作时间按阶梯原则整定
过负荷保护	对经常出现过负荷的线路应装设过负荷保护：$$I_{dz}=\frac{K_{rel}I_n}{K_{res}}$$ 式中 K_{rel}—可靠系数，取 1.05； I_n—线路的额定电流； K_{res}—返回系数，取 0.85		长延时动作于信号
单相接地保护	按保护装置最小灵敏系数 1.25 整定：$$I_{dz}=\frac{I_{c\Sigma}-I_{cx}}{1.25}$$ 式中 $I_{c\Sigma}$—电网的总的单相接地电容电流； I_{cx}—线路的电容电流		按设备的具体情况整定
低频减载	低周保护频率整定	系统频率低于 45Hz	
	低周保护低压闭锁定值	0.65～0.7 倍额定电流，带 0.5s 延时	
	低周保护频率滑差闭锁定值	频率滑差大于 3Hz/s	
	低周保护低压闭锁只有在系统内有电源备自投和自动重合闸时，才有现实意义		

（1）单星形接线电容器组的零序电压保护、电压差动保护或利用电桥原理的电流平衡保护等。

（2）双星形接线电容器组的中性点电压或电流不平衡保护。

对电容器组的单相接地故障，应装设单相接地保护，但安装在绝缘支架上的电容器组可不再装设单相接地保护。

对电容器组应装设过电压保护，带时限动作于信号或跳闸。

电容器装置应设置失压保护，当母线失压时带时限动作于跳闸。

单星形、双星形、三角形接线电容器组保护的典型配置由定时限过流保护、过电压保护、低电压保护、不平衡电压保护和不平衡电流保护等组成。

桥型接线并联电容器组保护的典型配置由定时限过流保护、过电压保护、低电压保护、桥差电流保护或差电压保护等组成。

并联补偿电容器保护配置配合见表 8－1－141。

1.3.3.6 母线与联络开关保护

煤矿地面变电所的 6kV（10kV）母线保护，一般由上级变电所的送电线路或者变压器的后备保护来实现。

在利用变压器一次侧带时限过流保护作为母线保护不能满足灵敏度要求时，或者在 6kV（10kV）母线上的馈出线上装有电抗器时，应在变压器二次侧断路器上装设带时限电流闭锁电压速断作为母线保护。

重要的母线（如并列运行或高电压等级的母线）应采用电流差动母线保护方式，母线保护装置仅连接在与母线相连接的各元件上。

母线母联断路器应装设电流速断保护和时限过流保护，作为母线耐压试验的速断保护，并作为配出线电流保护的后备。

矿井电网重要变电所（枢纽变电所或高压变电所）母线保护的典型配置由母线差动保护、母联充电保护、母联失灵保护、母联死区保护、母联过流保护和母联非全相运行等组成。

常用母线与联络开关保护配置配合见表 8－1－142。

1.3.3.7 高压电动机保护

电压为 3kV 以上的异步电动机和同步电动机，对下列故障及异常运行方式，应装设相应的保护：

（1）定子绕组相间短路。

（2）定子绕组单相接地。

（3）定子绕组过负荷。

（4）定子绕组低电压。

（5）相电流不平衡。

2MW 以下的电动机，装设电流速断保护，保护宜采用两相式。2MW 以上的电动机，或 2MW 以下但电流速断保护灵敏系数不符合要求的电动机，应装设纵联差动保护。

以下电动机应装设过负荷保护：

（1）生产过程中易发生过负荷的电动机，保护应根据负荷特性，带时限动作于信号或跳闸。

（2）启动或自启动困难，需要防止启动或自启动时间过长的电动机，保护动作于

表 8-1-141　并联补偿电容器保护配置配合表

保护设置	原则描述	动作时限
瞬时或限时电流速断保护	按电容器端部引线故障时有足够的灵敏系数整定： $I_{dz}=K_kI_e$ 式中　K_k—可靠系数，取3～5； I_e—电容器组额定电流	$t=0s$ 或 $t=0.1\sim0.2s$
过电流保护	按可靠躲过电容器组额定电流整定： $I_{dz}=K_kI_e$ 式中　K_k—可靠系数，取1.5～2； I_e—电容器组额定电流	$t=0.3\sim1s$
过电压保护	按电容器组端电压不长期超过1.1倍额定电压的原则整定： $U_{dz}=K_V\left(1-\frac{X_L}{X_C}\right)U_E$ 式中　K_V—过电压系数，取1.1； X_L—为串联分路电抗器感抗； X_C—分路电容器组容抗； U_E—电容器组额定相间电压	$t\leqslant60s$
低电压保护	按电容器所接母线失压能可靠动作，而在母线恢复正常能可靠返回整定： $U_{dz}=(0.3\sim0.6)U_E$ 式中　U_E—电容器组额定相间电压	保护的动作时间应与本侧出线后备保护时间配合： $t=t'+\Delta t$ 式中　t—保护动作时间； t'—本侧出线后备保护动作时间； Δt—保护动作时间差
接地保护	一次动作电流按最小灵敏系数1.5整定，如果电容器安装在绝缘支架上可以不装设接地保护。 $I_{dz}=\frac{I_{c\Sigma}}{1.5}$ 式中　$I_{c\Sigma}$—电网的总单相接地电容电流	$t=0s$

表 8-1-141（续）

保护设置	原则描述	动作时限
单星形接线电容器组电压差动保护	通过检测同相电容器两串联段之间的电压，并作比较。当设备正常时，两段的容抗相等，各自电压相等，因此两者的压差为零。当某段处理故障时，由于容抗的变化而使各自分压不再相等而产生压差，当压差超过允许值时，保护动作。故障相其余单台电容器所承受的电压不长期超过 1.1 倍额定电压的原则整定，同时，还应可靠躲过电容器组正常运行时的段间不平衡差电压。 $$\Delta U_C=\frac{3\beta U_{EX}}{3N[M(1-\beta)+\beta]-2\beta} \quad (1)$$ $$\Delta U_C=\frac{3KU_{EX}}{3N(M-K)+2K} \quad (2)$$ $$U_{de}=\frac{\Delta U_C}{K_{LM}} \quad (3)$$ $$U_{de}\geqslant K_k\Delta U_{BP} \quad (4)$$ $$K=\frac{3MN(K_V-1)}{K_V(3N-2)} \quad (5)$$ 式中 ΔU_C—故障相的故障段与非故障段的差压； ΔU_{BP}—正常时不平衡差压； M—每相各串联段并联的电容器台数； N—每相电容器的串联段数； U_{EX}—电容器组的额定相电压； β—单台电容器内部击穿小元件段数的百分数，取 0.5～0.75； K_k—可靠系数，$K_k\geqslant 1.5$； K—因故障切除的同一并联段中的电容器台数，$K=1\sim M$ 的整数，按式（5）计算时取接近计算结果的整数； K_V—过电压系数，$K_V=1.1\sim 1.15$； K_{LM}—灵敏系数，$K_{LM}\geqslant 1$。 其中，式（1）适用于电容器未装设专用单台熔断器的情况，式（2）适用于电容器装有专用单台熔断器的情况。为提高定值的灵敏系数，用式（3）计算时应尽量降低定值，同时，还应可靠躲过正常运行时的不平衡电压	$t=0.1\sim 0.2$s

表 8-1-141（续）

保护设置	原则描述		动作时限
单星形接线电容器组开口三角电压保护（不平衡电压保护）	分别检测电容器的端电压，再在二次端接成开口三角形得出零序电压，从而发现三相是否平衡而得出设备是否有故障		$t=0.1\sim0.2$s
	$U_{CH}=\dfrac{3\beta U_{EX}}{3N(M(1-\beta)+\beta)-2\beta}$ (1) $U_{CH}=\dfrac{3KU_{EX}}{3N(M-K)+2K}$ (2) $U_{dz}=\dfrac{U_{CH}}{K_{LM}}$ (3) $U_{dz}\geqslant K_k U_{BP}$ (4) $K=\dfrac{3NM(K_V-1)}{K_V(3N-2)}$ (5) 符号的含义及说明与电压差动保护相同	$U_{CH}=\dfrac{3kU_{EX}}{3n(m-k)+2K}$ (1) $U_{dz}=\dfrac{U_{CH}}{K_{LM}}$ (2) $U_{dz}\geqslant K_k U_{BP}$ (3) $K=\dfrac{3nm(K_V-1)}{K_V(3n-2)}$ (4) 式中　m—单台密集型电容器内部各串联段并联的电容器小元件数； n—单台密集型电容器内部的串联段数	
双星形电容器中性线不平衡电流保护	保护所用的低变比 TA 串接于双星形接线的两组电流器的中性线上，在正常情况下，三相阻抗平衡，中性点间电压差为零，没有电流流过中性线。如果某一台或几台电容器发生故障，故障相的电压下降，中性点出现电压，中性线有不平衡电流 I_0 流过，保护采集到不平衡电流后即动作跳闸		$t=0.1\sim0.2$s
	按中性线不平衡电流整定： $I_0=\dfrac{3MKI_E}{6N(M-K)+5K}$ (1) $I_0=\dfrac{3M\beta I_E}{6N(M(1-\beta)+\beta)-5\beta}$ (2) $I_{dz}\geqslant\dfrac{I_0}{K_{LM}}$ (3) $I_{dz}\geqslant K_k I_{BP}$ (4)	I_0—中性点流过的不平衡电流； I_E—单台电容器的额定电流； I_{BP}—正常时不平衡电流； M—每相各串联段并联的电容器数； N—每相电容器的串联段数。 式（1）适用于电容器装设有专用熔断器，式（2）适用于未装设有单台熔断器的情况；其余符号的含义以及说明与开口三角电压保护相同	

表 8-1-142　常用母线与联络开关保护配置配合表

保护设置		整定量	整定原则描述	动作时限	备注
母线保护	带时限电流闭锁，电压速断保护	动作电流值 I_{dz}	$I_{dz}=\frac{I^{(2)}_{dmin}}{K_m K_i}$	0.5s	K_m—灵敏系数； K_i—电流互感器变比； K_u—电压互感器变比； K_{rel}—可靠系数； K_{ol}—过负荷系数； $I^{(2)}_{dmin}$—母线最小两相短路电流； I_{el}—电流互感器一次额定电流； I_{max}—任一段母线最大工作电流
		动作电压值 U_{dz}	$U_{dz}=\frac{U_{rmin}}{K_{rel}K_u}$		
	不完全差动保护	速断动作电流值 I_{dz}	$I_{dz}=\frac{I^{(2)}_{dmin}}{K_m K_i}$	0s	
		过流动作电流值 I_{dz}	$I_{dz}=\frac{K_{rel}I_{max}}{K_i}$	较配出线过流保护最大的时限大一个时限阶段	
母联保护	电流速断保护	速断动作电流值 I_{dz}	$I_{dz}=\frac{K_{rel}K_{ol}I_{el}}{K_i}$	0s	
	过电流保护	过流动作电流值 I_{dz}	$I_{dz}=\frac{K_{rel}I_{max}}{K_i}$	较配出线过流保护最大的时限大一时限阶段	

跳闸。

下列电动机应装设低电压保护，保护应动作于跳闸：

（1）当电源电压短时降低或短时中断后又恢复时，为保证重要电动机自启动而需要断开的次要电动机。

（2）当电源电压短时降低或短时中断后，不允许或不需要自启动的电动机。

（3）需要自启动，但为保证人身和设备安全，在电源电压长时间消失后，须从电力网中自动断开的电动机。

（4）属一类负荷并装有自动投入装置的备用机械的电动机。

2MW 及以上电动机，为反映电动机相电流的不平衡，也作为短路主保护的后备保护，可装设负序过流保护。保护动作于信号或跳闸。

高压电动机典型保护配置由过流保护（二段）、负序过流保护（二段）、过负荷保护、过热保护、接地保护、过压欠压保护、非电量保护等组成。

电动机保护配置配合见表 8－1－143。

1.3.4　自动装置

1.3.4.1　自动重合闸

对自动重合闸装置的基本要求：

（1）直接向井下供电的高压馈电线上，严禁装设自动重合闸。

（2）煤矿中一般采用一次重合的重合闸装置。

（3）用控制开关或通过遥感装置将断路器断开，或将断路器投入故障线路上，由保护将其断开时，自动重合装置均不动作。

（4）在任何情况下（包括装置本身的元件损坏，以及继电器触点粘住或拒动），自动装置的动作次数应符合预先的规定（如一次重合闸只应动作一次）。

（5）自动重合闸动作后，应自动复归。

（6）自动重合装置，应能在重合闸后加速继电保护的动作；必要时，可在重合闸前加速其动作。

（7）自动重合闸装置应具有接收外来闭锁信号的功能。

1.3.4.2　备用电源自动投入

1. 备用电源自动投入装置的装设

（1）由双电源供电的矿井变电所，其一个电源经常断开作为备用。

（2）矿井变电所内备用变压器或有互为备用的母线段。

（3）矿井变电所的所用电。

所以备用电源自动投入一般在备用线路、备用变压器、备用机组和母线分段开关上装设。

2. 备用电源自动投入的接线要求

（1）应保证在工作电源或设备断开后且备用电源有足够的电压时，方允许投入备用电源或设备。

（2）在工作电源或设备上的电压不论何种原因消失时，备用电源自动投入装置均应动作。

（3）应保证备用电源自动投入装置只动作一次。

表 8-1-143 电动机保护配置配合表

保护设置	原则描述		动作时限
纵差动保护 2000kW 以上电机或速断保护灵敏系数不满足要求时	比率差动保护	根据具体的保护装置，有不同的制动特性，分别选取最小启动电流、拐点电流、计算制动曲线斜率	$t=0.05$s
	差动速断	按躲过电动机起动瞬间最大不平衡电流整定	$t=0$s
速断保护 2000kW 以下电机	异步电动机按躲过电动机最大启动电流整定： $$I_{dz}=K_{rel}K_{st}I_n$$ K_{rel}—可靠系数； K_{st}—启动倍数； I_n—异步电动机的额定电流。 同步电动机除了躲过电动机最大启动电流外，还要躲过外部短路时电动机输出电流： $$I_{dz}=K_{rel}I''^{(3)}_{dd}$$ $I''^{(3)}_{dd}$—同步电动机接线端三相短路时，输出的超瞬变电流： $$I''^{(3)}_{dd}=\left(\frac{1.05}{X''_d}+0.95\sin\varphi_e\right)I_{ed}$$ 式中 X''_d—同步电动机超瞬变电抗值； $\sin\varphi_e$—同步电动机额定功率因数角； I_{ed}—同步电动机额定电流	$t=0$s
过电流保护	按额定电流整定： $$I_{dz}=K_{rel}I_n$$ K_{rel}为 1.3 倍的额定电流整定	躲过电动机全部启动时间，可取 1.2 倍最长时间
单相接地保护	单相接地电流大于 5A 时应装设接地保护，保护装置一次动作电流躲过被保护元件发生单相接地时最小灵敏度 1.25。 $$I_{dz}=\frac{I_{c\Sigma}-I_{ed}}{1.25}$$ 式中 $I_{c\Sigma}$—电网总单相接地电容电流； I_{ed}—电动机单相接地电容电流	对于接地电流 5～10A 动作于信号或跳闸，大于 10A 动作于跳闸。 $t=0$s
过负荷保护	按躲过电动机额定电流下的可靠返回条件整定： $$I_{dz}=\frac{K_{rel}}{K_r}I_n$$ 式中 K_{rel}—电动机可靠系数，取 1.05； K_r—电动机返回系数，取 0.9	与电动机允许的过负荷时间配合，一般取最长启动时间

表8-1-143（续）

保护设置	原则描述			动作时限
过热保护	负序电流热效应系数	$K_2=6$		
	正序热效应系数	$K_1=0.5$（启动中）或1（启动后）		
	发热时间常数 τ	按厂家数据提供，一般取8～9min		
	散热时间常数	取32～36min，电动给水泵可取45min，按厂家数据提供，一般取4τ		
	过热告警系数	一般取跳闸过热值的70%～80%		
负序电流保护	负序Ⅰ段	$I_{2.dz}=100\%I_n$		t可取0.05s
	负序Ⅱ段	$I_{2.dz}=(30\sim35)\%I_n$		设置了外部短路故障负序电流闭锁判据时取0.4s
				不设置外部短路故障负序电流闭锁判据时，按电动机供电电压等级相间短路故障后备保护最长动作时限，大一级时限，级差取0.3～0.5s
低电压保护	当供电网络电压消失或降低时，保证重要电动机自启动，断开次要电机		$U_{dz}=(60\%\sim70\%)U_n$	$t=0.5$s
	当电源电压短时降低或短时中断后，根据生产要求不允许或不需要自启动的电动机		$U_{dz}=(40\%\sim50\%)U_n$	$t=0.5\sim1$s
	根据生产过程和技术要求，在电源电压长时间消失后不允许自启动的重要电动机应装设低电压保护		$U_{dz}=(40\%\sim50\%)U_n$	$t=10$s
过电压保护	过电压定值按1.3倍的额定电压整定			$t=2$s
失步保护	按同步电动机的额定电流整定，过负荷保护可兼做失步保护 $I_{dz}=\dfrac{K_{rel}I_{ed}}{K_h}$ 式中 K_h—返回系数； I_{ed}—额定电流			同过负荷保护
非同步冲击保护	煤矿系统不允许自动重合闸和未装备用电源自动投入装置，故不装设防止断电后非同步冲击保护			
失磁保护	负荷变化较大同步电动机，当反映定子过负荷的失步保护时，应增设失磁保护			根据实际情况整定

（4）备用电源自动投入动作的时间应尽量缩短，但必须与相邻的保护时限相配合。

（5）当电压互感器的熔断器之一熔断时，备用电源自动投入不应误动作。

（6）备用电源自动投入一般应与电动机自启动配合使用以增大效果。

采用备用电源自动投入应校验备用电源的过载能力及电动机自启动条件，若备用电源的过载能力不够或电动机自启动不能保证时，应在备用电源自动投入动作的同时切除一部分负荷。

3. 备用电源自动投入接线方式

备用电源自动投入在一次接线中一般有两种方式：

（1）具有一条工作线路和一条备用线路的矿井变电所，备用电源自动投入安装在进线断路器上，如图 8－1－42a 所示。正常时备用线路断开，当工作线路因故断开后，备用线路自动投入。

（2）具有两条独立工作线路的矿井变电所，备用电源自动投入安装在母线分段开关上，如图 8－1－42b 所示。正常时分段开关断开，当其中任一条工作线路因故切除后，分段开关自动投入，由另一条线路供给全部负荷。

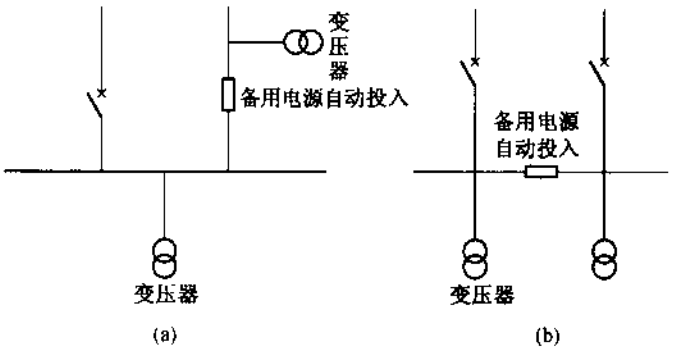


图 8－1－42 备用电源自动投入在一次接线图中的位置

1.3.5 无功补偿与谐波治理

1.3.5.1 补偿容量计算方法

1. 无功补偿容量的确定

确定无功补偿容量的方法有多种，但其目的都是为了提高配电网的某种运行指标。下面介绍几种确定无功补偿容量的方法。

1）从提高功率因数需要确定补偿容量

如果电力网最大负荷月的平均有功功率为 P_{av}，补偿前的功率因数为 $\cos\varphi_1$，补偿后的功率因数为 $\cos\varphi_2$，则补偿容量可用式（8－1－100）和式（8－1－101）计算。

$$Q_c = P_{av}(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) = Q_{av}\left(1 - \frac{\tan\varphi_2}{\tan\varphi_1}\right) \tag{8-1-100}$$

$$Q_c = P_{av}\left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_2} - 1}\right) \tag{8-1-101}$$

式中 Q_c——所需补偿容量，kvar；

Q_{av}——最大负荷日平均无功功率，kvar；

P_{av}——最大负荷日平均有功功率，kW。

如果将 $\cos\varphi_1$ 提高到大于 $\cos\varphi_2$、小于 $\cos\varphi_3$，则补偿容量应满足下式：

$$P_{av}\left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_1}-1}-\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_2}-1}\right)\leqslant Q_c\leqslant P_{av}\left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_1}-1}-\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_3}-1}\right) \quad (8-1-102)$$

$\cos\varphi_1$ 应采用最大负荷日平均功率因数，$\cos\varphi_2$ 确定必须适当。通常，将功率因数从 0.9 提高到 1 所需的补偿容量，与将功率因数从 0.72 提高到 0.9 所需的补偿容量相当。因此，在高功率因数下进行补偿，其效益将显著下降。这是因为在高功率下，$\cos\varphi$ 曲线的上升率变小，因此，提高功率因数所需的补偿容量将要相应地增加。

2）从降低线损需要来确定补偿容量

线损是电网经济运行的一项重要指标。在网络参数一定的条件下，线损与通过导线的电流的平方成正比。

如设补偿前流经电网的电流为 $\dot{I}_1$，其有功分量和无功分量分别为 $\dot{I}_{1a}$ 和 $\dot{I}_{1r}$，则 $\dot{I}_1=\dot{I}_{1a}-j\dot{I}_{1r}$。

若补偿后，流经网络的电流为 $\dot{I}_2$，其有功分量和无功分量分别为 $\dot{I}_{2a}$ 和 $\dot{I}_{2r}$，则 $\dot{I}_2=\dot{I}_{2a}-\dot{I}_{2r}$。

但是，加装电容器后，将不会改变补偿前的有功分量，$\dot{I}_{1a}=\dot{I}_{2a}$。补偿前的线损 $\Delta P_1=3I_1^2R=3\left(\frac{I_{1a}}{\cos\varphi_1}\right)^2R$，补偿后的线损 $\Delta P_2=3I_2^2R=3\left(\frac{I_{2a}}{\cos\varphi_2}\right)^2R$。

补偿后线损降低的百分数为

$$\Delta P_s\%=\frac{\Delta P_1-\Delta P_2}{\Delta P_1}\times 100\%=\left[1-\left(\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2}\right)^2\right]\times 100\% \quad (8-1-103)$$

式中　ΔP_1——补偿前的线损；

ΔP_2——补偿后的线损。

补偿容量为

$$Q_c=\sqrt{3}U\Delta I_x=\sqrt{3}U(I_1\sin\varphi_1-I_2\sin\varphi_2)=P(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2) \quad (8-1-104)$$

式中　ΔI_x——补偿前后容性电流差值；

U——线路电压；

P——有功功率。

3）从提高运行电压需要来确定补偿容量

在配电线路的末端，特别是重负荷、细导线的线路运行电压较低，加装补偿电容后，可以提高运行电压，这就可能在补偿电容过大时产生过电压，因此需选择合理的补偿电容。此外，在网络电压正常的线路中装设补偿电容时，网络电压的压升不能越限，为了满足这一约束条件，也必须求出无功容量 Q 和网络电压增量之间的关系。

当装设补偿电容以前，网络电压为

$$U_1=U_2+\frac{PR+Qx}{U_2} \quad (8-1-105)$$

装设补偿电容后，电源电压 U_1 不变，变电所母线电压 U_2 升到 U_2'，且

$$U_1 = U_2' + \frac{PR + (Q - Q_c)x}{U_2'}$$

所以有

$$\Delta U = U_2' - U_2 = \frac{Q_c x}{U_2'} \qquad Q_c = \frac{U_2' \Delta U}{x}$$

式中 U_2'——投入电容母线电压值，kV；

x——阻抗容性分量；

U_1——电源电压；

U_2——变电所母线电压；

ΔU——投入电容后电压增量，kV。

三相所需总容量为

$$\sum Q_c = 3Q_c = 3\frac{U_{2L}'}{\sqrt{3}} \times \frac{\Delta U_L}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{x} = \frac{\Delta U_L U_{2L}'}{x} \qquad (8-1-106)$$

式中 U_{2L}'——线电压；

ΔU_L——投入电容后线电压增量。

4）用补偿当量确定补偿容量

当采用补偿当量确定补偿容量时，可将线路分成 n 段，算出每段的有功损耗值 ΔP_i，即

$$\Delta P_i = \frac{Q_{ri}(2Q_i - Q_{ri})R_i \times 10^3}{U_N^2} \qquad (8-1-107)$$

式中 Q_i——第 i 段线路的补偿容量；

Q_{ri}——第 i 段线路的无功功率；

R_i——第 i 段线路的电阻；

U_N——额定电压。

则 n 个线路有功损耗减少的总值为

$$\sum \Delta P_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_{ri}(2Q_i - Q_{ri})R_i \times 10^3}{U_N^2} \qquad (8-1-108)$$

因此，补偿容量为

$$Q_c = \frac{\sum \Delta P_i}{C_b} \qquad (8-1-109)$$

式中 C_b 为无功经济当量，即线路投入单位补偿容量时有功损耗的减少量，C_b 的选取可参考表 8-1-144。

表 8-1-144 无功经济当量 C_b

发电厂直配线供电时	0.03
二级变压供电时	0.06
三级变压供电时	0.09

2. 谐波补偿容量的计算

总谐波电流为

$$I_h = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} I_i^2} \qquad (8-1-110)$$

消除谐波需要提供的容量为

$$S = \sqrt{3}U \times I_h \tag{8-1-111}$$

式中　U——谐波治理点线电压。

为了保证系统在任何情况下都能安全运行，需要保证用于消除谐波的容量有 20% 的裕量，即

$$S_{总} = \sqrt{3}U \times I_h \times 120\% \tag{8-1-112}$$

1.3.5.2　高压并联电容器组

1. TBBF 分组投切高压并联电容器装置

分组投切的条件为：①分组投切时，不允许发生谐振；②投切一组电容器时，不允许母线电压变动值超过 2.5%；③应与配套设备的技术参数相适宜。

该装置型号及其含义如图 8-1-43 所示，其主要技术参数见表 8-1-145。

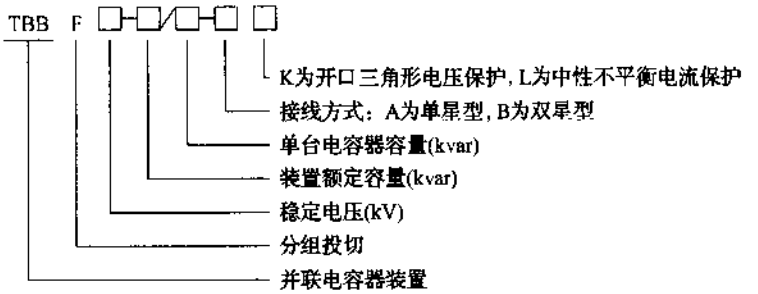


图 8-1-43　TBBF 分组投切高压并联电容器装置的型号及其含义

1）使用环境条件

（1）户内使用。

（2）海拔高度不超过 1000m。

（3）周围空气温度 -25 ~ 40℃。

（4）相对湿度：日平均不大于 96%，月平均不大于 90%。

（5）安装地点无腐蚀性气体、水蒸气等严重污染，无火灾，无爆炸危险。

2）主要特点：

（1）装置能在 1.1 倍额定电压下运行。

（2）装置的额定电压 6kV 或 10kV，总额定容量为 1000 ~ 10000kvar。

（3）装置一般在单星形接线时采用开口三角形电压保护，在双星形接线时采用中性不平衡电流保护。

（4）装置采用 CKGKL 型或 CKS 型三相串联电抗器，用来减小成套装置投入时的涌流和操作过电压以及抑制电容器投切时的高次谐波。电抗器的绝缘等级为母线额定电压，额定电流与成套装置额定电流相同，额定容量选配一般按成套装置总标称容量来考虑。

（5）电容器组实测电容量偏差不超过额定值的 10%，在稳定电压和温度为 20℃时，损耗角正切值小于 0.0003。

2. ZGWG - Ⅲ型调压式高压无功补偿装置

表 8-1-145 TBBF 分组投切高压并联电容器装置主要技术参数

序号	型 号	额定电压/kV	额定容量/kvar	额定电流/A	保护方式	并联电容器型号
1	TBBF6-(600+600)/100-AK	6	1200	105	单台电容器熔断器保护	BFM6.6.$\sqrt{3}$-100-1
2	TBBF6-(900+900)/100-AK		1800	157.4		BFM6.6.$\sqrt{3}$-100-1
3	TBBF6-(1200+1200)/100-AK		2400	210		BFM6.6.$\sqrt{3}$-100-1
4	TBBF10-(600+600)/100-AK	10	1200	63		BFM1.1.$\sqrt{3}$-100-1
5	TBBF10-(900+900)/100-AK		1800	94.4		BFM1.1.$\sqrt{3}$-100-1
6	TBBF10-(1200+1200)/100-AK		2400	128		BFM1.1.$\sqrt{3}$-100-1
7	TBBF10-(1200+1800)/100-AK		3000	157		BFM1.1.$\sqrt{3}$-100-1
8	TBBF10-(1200+2400)/100-AK		3600	189		BFM1.1.$\sqrt{3}$-100-1
9	TBBF10-(1800+3000)/100-AK		4800	252		BFM1.1.$\sqrt{3}$-100-1
10	TBBF10-(2400+2400)/100-AK		4800	252		BFM1.1.$\sqrt{3}$-100-1
11	TBBF10-(1800+4200)/100-AK		6000	315		BFM1.1.$\sqrt{3}$-100-1

ZGWG-Ⅲ型调压式高压无功补偿装置是针对电网的无功平衡而开发的，特别适用于电流大，无功、谐波分量、电压波动非常大的场所，可广泛应用于供电、钢铁、煤矿、化工、铁路等大型工矿企业，适合安装于 6kV、10kV、35kV、110kV 电压等级的各类变电站。该装置电容器不分组、不投切，调节电容器两端的工作电压，可改变向电网馈送的无功总量。调节电压、无功，不产生投切过电压及合闸涌流，改善了供电质量。

使用条件：

环境温度	20~55℃
相对湿度	≤95%
海拔高度	<2000m
使用环境	无易燃、无易爆、无导电尘埃的场所

测量精度：

电压	≤0.5%
电流	≤2.0%
功率因数	≤1.0%

输入输出：

电压	0~150V（PT）
电流	0~5A（CT）
输出继电器触点容量	AC 220/5A
控制器电源电压	AC 176~264V/50VA
补偿系统额定电压	6.3kV、10.5kV、38.5kV
最大输出容量	6000kvar(6.3kV)、10000kvar(10.5kV)、20000kvar(38.5kV)
动态补偿阶梯数	9~15
功率因数	0.9~1 之间可任意设定

1.3.5.3　SVC（静止无功补偿器）

1. TCR－SVC

TCR－SVC 主要由 FC 滤波器、TCR 晶闸管控制电抗器和控制保护系统构成。其单相原理如图 8－1－44 所示。FC 滤波器用于提供容性无功功率补偿及谐波滤波，TCR 晶闸管控制电抗器用于平衡系统中由于负载的波动所产生的感性无功功率。通过调节晶闸管触发角的大小，控制流过电抗器的电流达到控制无功功率的目的。根据负荷无功功率的变化情况，改变电抗器的无功功率（感性无功功率），即不管负载的无功功率如何变化，总要使二者之和为常数，这个常数等于电容器组发出的容性无功功率的数值，使取自电网的无功功率为常数或为 0，最终使得电网的功率因数保持在设定值，电压几乎不波动，从而达到无功补偿的目的。其主要技术参数见表 8－1－146。

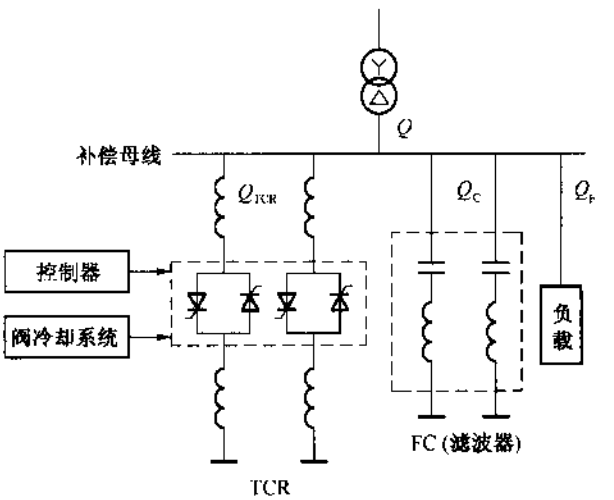


图 8－1－44　TCR－FC 型单相原理图

表 8－1－146　TCR－SVC 技术参数

补偿容量	1～100Mvar
额定电压	6kV、10kV、27kV、35kV
控制系统	全数字化智能控制系统
电压波动	<20%
平均功率因数	≥0.92
总电压畸变率	<3.0%
谐波电流	满足 GB/T 14549 的要求
调节系统响应时间	10ms
装置能耗	≤3%
高压滤波电容器	满足 GB 3983.2—1989 的要求

表 8-1-146（续）

滤波电抗器	满足 GB 10229—1988 的要求	
回路接法	TCR 晶闸管控制电抗器	FC 滤波器
	三角形接法	星形接法
	晶闸管阀体水冷（35kV） 晶闸管阀体风冷（35kV 以下） 主电抗器风冷	空冷、自冷却
安装方式	户外安装	户外安装

2. MCR－SVC

MCR－SVC 通过 MCR 控制器对系统的无功功率参数进行采集，进而自动控制晶闸管的导通角，改变铁芯的磁饱和度，实现输出容量的连续可调。其内部为全静态结构。

MCR－SVC 主接线如图 8－1－45 所示。

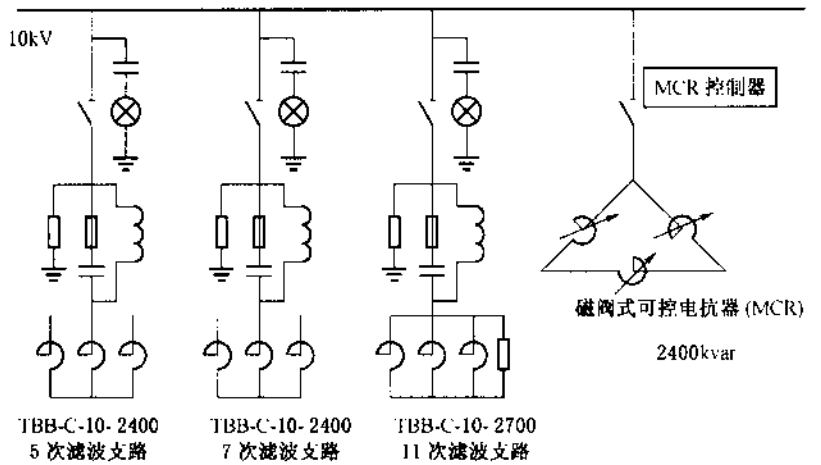


图 8－1－45 MCR－SVC 主接线图

1）使用环境条件

安装地点	户内或户外
海拔高度	2000m 及以下（≥2000m 采用高原型）
环境气温	－25～45℃
月平均最大相对湿度	90%（25℃）
耐地震能力	地面水平加速度 0.2g，垂直加速度 0.1g。按标准试验，安全系数≥1.67

2）电气要求：

（1）主要技术参数。系统额定电压为 6kV（10kV），最高电压为 6.6kV（11kV），额定频率为 50Hz，短路电流为 31.5kA 有效值。

（2）绝缘水平。高压端绝缘耐压、全波冲击耐压（1.2/50μs）为 60kV（峰值），工

频1min耐压为32kV（有效值），二次绕组之间及绕组对地的工频耐压（1min）为3kV（有效值）；外绝缘相对地最小有效爬电距离：瓷绝缘距离不小于216mm，合成绝缘距离不小于240mm。

3）主要特点：

（1）磁控电抗器不需要外接直流励磁电源，完全由电抗器的内部绕组来实现自动控制。

（2）通过控制晶闸管的控制角进行自动控制，可实现连续可调，并且从最小容量到最大容量的过渡时间很短，因此可以真正实现柔性补偿。

（3）控制元件为低压晶闸管，其端电压仅为系统电压的1%～2%，无须串并联，运行时不需要承受高电压、大电流，安全可靠，发热量很小，自然冷却即可，无需辅助冷却设备。

（4）晶闸管动作，整流控制产生的谐波不流入外部交流系统。

（5）即使晶闸管或二极管损坏，磁控电抗器也仅相当于一台空载变压器，不影响系统其他装置的运行。

（6）经济优势明显：后期免维护；磁控电抗器结构简单，占地面积小，基础投资少；MCR－SVC自身有功损耗低。

1.3.5.4　STATCOM（静止同步无功补偿器）

STATCOM的基本原理是利用可关断大功率电力电子器件（如IGBT）组成自换相桥式电路，经过电抗器并联在电网上，适当地调节桥式电路交流侧输出电压的幅值和相位，或者直接控制其交流侧电流，就可以使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流，实现动态无功补偿的目的。图8－1－46为其主电路三电平PWM变流器结构图，图8－1－47为STATCOM装置与6kV/10kV电网接线图。

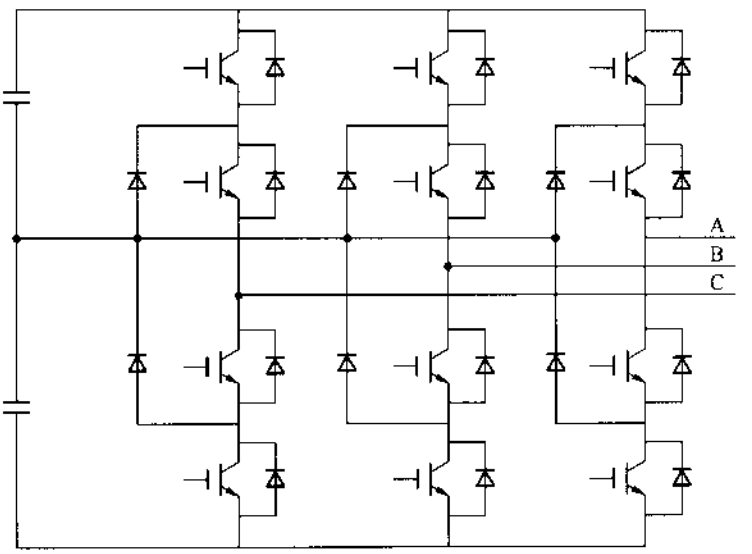


图8－1－46　STATCOM主电路三电平PWM变流器结构

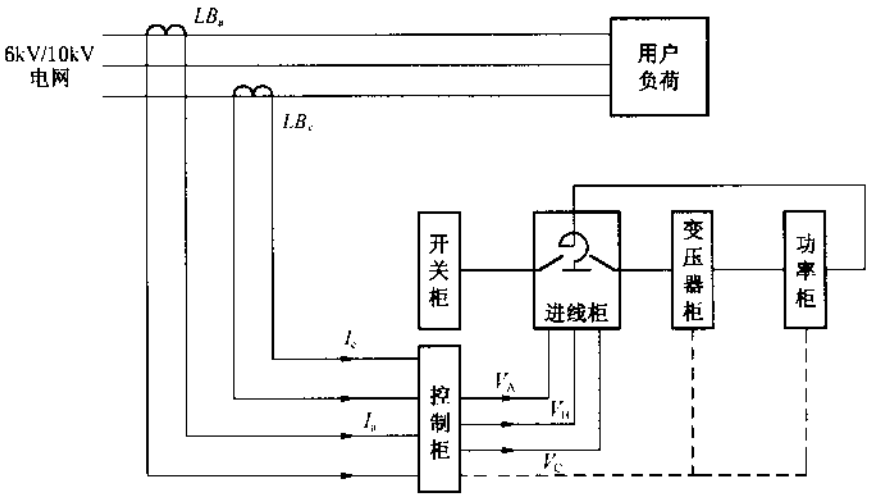


图 8－1－47 STATCOM 装置与 6kV/10kV 电网的连接图

技术参数：

额定容量	0～±500kvar，0～±1000kvar，0～±2000kvar
额定电压	6～10kV
系统频率	50Hz
响应时间	≤10ms
损耗	≤3%
输出电流 THD	≤5%
无功调节方式	容感性连续可调
防护等级	IP20 级

使用环境：

储存温度	－20～65℃
运行温度	－10～0℃
相对湿度	<95%，无凝露
海拔高度	<1000m

1.3.5.5 无源滤波器

1. 工作原理

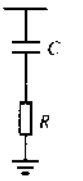
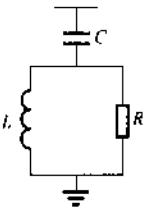
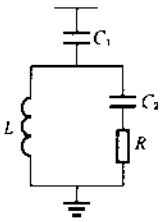
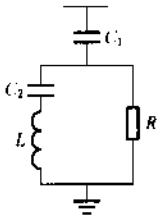
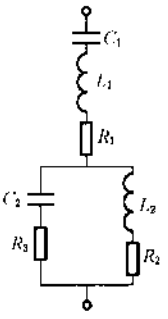
无源滤波器的工作原理是电路的串联谐振。在某一个谐波频率下，当电容器的容抗和电抗器的感抗相等时，其串联等效电抗值很低，对相应频次谐波表现出低阻抗，从而有效地抑制了流向系统或其他负荷的谐波电流，改善了系统的电压畸变。其主要类型见表 8－1－147，无源滤波原理如图 8－1－48 所示。

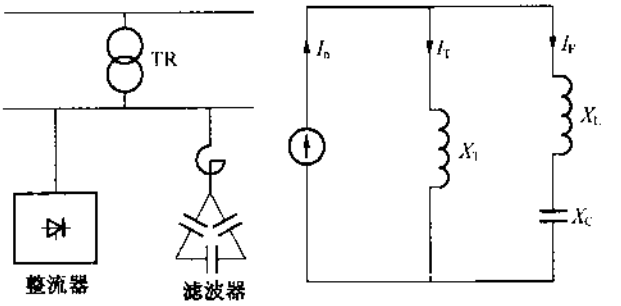
设 X_F 为滤波器的阻抗值，f_R 为滤波器的调谐频率，f_h 为谐波频率，则 $X_F = X_L - X_C$。

（1）当 $f_h < f_R$ 时，滤波器呈容性，有 $I_n = I_T - I_F$ 或 $I_T = I_n + I_F$；流过变压器的谐波电流 I_T 会增大。

（2）当 $f_h > f_R$ 时，滤波器呈感性，有 $I_n = I_T + I_F$ 或 $I_T = I_n - I_F$；流过变压器的谐波电流 I_T 会被滤波器分流减少；分流的谐波电流 I_F 越多，流过变压器的谐波电流 I_T 就越少，

表 8-1-147　无源滤波器的主要类型

类　型		接线方式	简　要　说　明
单调谐			单调谐波滤波器是工程中使用最多的滤波器，它仅对某一次谐波起滤波作用，谐振次数 $n=\frac{1}{\omega_n\sqrt{LC}}$，其中，$\omega_n$ 为基波角频率。其特点是结构简单，但对元件的工作稳定性要求高，较小的额定值改变会带来较大的滤波效果劣化
高通	一阶		一阶高通滤波器需要的电容太大，基波损耗也太大，因此一般不采用
	二阶		二阶高通滤波器的滤波性能最好，但与三阶相比，其基波损耗较高，截止频率 $f_0=\frac{1}{2\pi RC}$
	三阶		三阶高通滤波器比二阶的高通滤波器多一个电容 C_2，C_2 容量与 C_1 相比很小，它提高了滤波器对基波频率的阻抗，从而大大减少基波损耗，这是三阶高通滤波器的主要优点
	C 型		C 型高通滤波器的性能介于二阶和三阶之间。C_2 与 L 调谐在基波频率上，故可大大减少基波损耗。缺点是对基波频率失谐和元件参数漂移比较敏感
双调谐			双调谐波滤波器同时吸收两种频率的谐波，实际上相当于两个并联的单调谐波滤波器，但减少了回路，基波损耗较小，只有一个电抗器承受全部冲击电压。这种滤波器结构复杂，调谐困难，但在高压大容量装置中采用有一定的技术优势



X_T—变压器的电抗值；X_L—滤波电抗器的电抗值；X_C—滤波电容器的容抗值

图 8-1-48 无源滤波原理图

滤波效果就越好。

2. TF 无源滤波器

TF 无源滤波器的型号含义如图 8-1-49 所示，其技术参数见表 8-1-148。

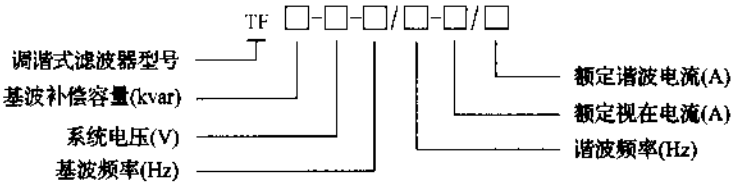


图 8-1-49 TF 无源滤波器型号含义

1）主要技术指标：

额定电压	400V、690V
额定测量电压	400V
额定测量电流	5A
精度	电压、电流 0.5 级；功率 1.5 级
基波无功补偿	功率因数可达到 0.9～0.95 以上
功耗	电容器不大于 0.25W/kvar；整机不大于 1% 装置容量
冷却方式	风冷
结构形式	柜式结构
防护等级	IP20
安装与施工	按电力配电柜的要求安装与施工

2）使用环境：

（1）运行环境温度为 -40～45℃。

（2）海拔高度不超过 2000m。

（3）环境温度 20℃时，相对湿度不超过 90% 。

（4）无剧烈振动及冲击。

（5）无导电及爆炸性尘埃，无腐蚀性气体。

表 8－1－148　TF 无源滤波器技术参数

型　　号	基波容量/kvar	调谐次数	额定电流/A	柜体尺寸（宽×深×高）/（mm×mm×mm）
TF116－400－50/250－310/261	116	5	310	800×1000×2200
TF162－400－50/250－435/367	162	5	435	800×1000×2200
TF208－400－50/250－559/472	208	5	559	800×1000×2200
TF213－400－50/250－573/484	213	5	573	800×1000×2200
TF231－400－50/250－621/524	231	5	621	800×1000×2200
TF250－400－50/250－585/461	250	5	585	800×1000×2200
TF302－400－50/250－630/456	302	5	630	800×1000×2200
TF91－400－50/350－243/205	91	7	243	600×1000×2200
TF113－400－50/350－304/257	113	7	304	800×1000×2200
TF150－400－50/350－366/295	150	7	366	800×1000×2200
TF178－400－50/350－321/175	178	7	321	800×1000×2200
TF181－400－50/350－487/411	181	7	487	800×1000×2200

1.3.5.6　有源电力滤波器（APF）

有源电力滤波器也是一种电力电子装置，目前主要采用的是 IGBT 技术。与无源滤波器相比，APF 具有高度可控制和快速响应性，不仅能补偿各次谐波，还可以抑制电压闪变，补偿无功电流，性价比较合理。其滤波特性不受系统阻抗的影响，可消除与系统阻抗发生谐振的危险。另外，APF 还具有自适应功能，可自动跟踪补偿变化着的谐波。

APF 按与系统连接方式可分为串联型、并联型和串—并联型。

并联型 APF，由于与系统并联，可等效为一个受控电流源。并联型 APF 主要用于感性电流源型负载的谐波补偿。由于其输出功率较小时，自身损耗小，效率高，且目前技术已相当成熟，投入运行的 APF 多为此连接方式。

串联型 APF，通过变压器连接在电源与负载间，可等效为一个受控电压源，主要用于消除带电容的二极管整流电路等电压型谐波源负载对系统的影响，以及系统侧电压谐波与电压波动对敏感负载的影响。由于此类 APF 中流过的电能为非线性负载电流，因此损耗较大。目前国内外很少单独使用这种方案，通常将其与 LC 无源滤波器构成混合型的 APF。

串—并联型 APF，其兼有串、并联型 APF 的功能，可解决电力系统发生的绝大多数电能质量问题，具有较高性价比。

同使用并联型无源滤波器的道理一样，工程上很少采用串联型式的滤波器，几乎全采用并联滤波方式。

1. 工作原理

APF 的检测电路检测出补偿对象的电压和电流后，经指令电流运算电路，计算得出补偿电流的指令信号，该信号经补偿电流发生电路放大，得出补偿电流，补偿电流与负载电流中要补偿的谐波电流及无功电流相抵消，最终得到期望的电源电流。补偿器原理图如图 8－1－50 所示。设负荷电流 i_L 为方波电流（图 8－1－50a），其中所含的高次谐波分量为 i_H（图 8－1－50b）。有源电力滤波器如果产生一个如图 8－1－50c 所示的电流 i_F，其幅值与 i_H 相等，相位与 i_H 相反，则 i_F 和 i_L 综合后，电源侧的电流 i_S 就变成如图 8－1－50d 所示的正弦波形。

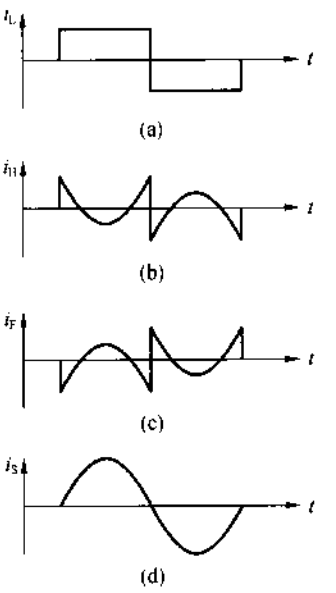


图 8－1－50 有源滤波补偿原理

这种滤波器能对频率和幅值都变化的谐波进行补偿，且补偿特性不受电网阻抗的影响，因而受到广泛的重视。它由高次谐波电流的检测、调节和控制器、脉宽调制器（PWM）的逆变器和直流电源等主要环节组成，结构如图 8－1－51 所示。

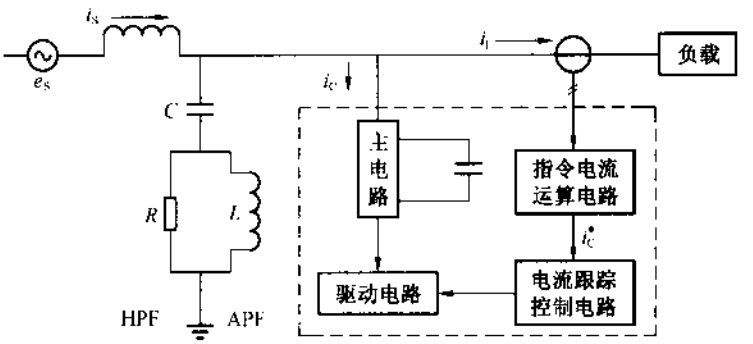


图 8－1－51 有源滤波器结构图

图 8－1－51 中，e_S 表示交流电源，负载为谐波源，它产生谐波并消耗无功。有源电力滤波器系统由两大部分组成，即指令电流运算电路和补偿电流发生电路（由电流跟踪控制电路、驱动电路和主电路三个部分构成）。其中，指令电流运算电路的核心是检测出补偿对象电流中的谐波和无功等电流分量，因此也称之为谐波和无功电流检测电路。补偿电流发生电路的作用是根据指令电流运算电路得出补偿电流的指令信号，产生实际的补偿电流。主电路目前均采用 PWM 变流器。

2. SHAPF－Ⅱ型有源电力滤波柜

SHAPF－Ⅱ型有源电力滤波柜规格参数见表 8－1－149。

（1）技术参数：

额定工作电压	380V/220V
额定谐波补偿容量	50A、100A、150A、200A
整机功耗	小于容量的 3%
抑制谐波效果	达到国标要求，稳态 THD 可降至 5% 以下
额定绝缘电压	3000V AC、2500V DC

（2）使用环境：

安装点电压	380/220（1 ± 15%）V
环境温度	－35～60℃
相对湿度	<90%（40℃），短时允许 100%
大气压力	79.5～106.6kPa（海拔 2000m 以下）
使用环境	无较强的振动与冲击

表 8－1－149　SHAPF－Ⅱ型有源电力滤波柜规格参数

结构类型	谐波补偿容量/A	额定电压/V	应用范围
三桥臂	50	380	三相三线制系统
	100	380	三相三线制系统
	150	380	三相三线制系统
	200	380	三相三线制系统
四桥臂	50	380	三相四线制系统
	100	380	三相四线制系统
	150	380	三相四线制系统
	200	380	三相四线制系统

3. 赛因思尔有源电力滤波器

该滤波器的功能特性如下：

（1）同时滤除 2～50 次谐波，或可选择滤除指定次数谐波。

（2）响应时间小于 1ms，对阶跃变化的谐波完全补偿时间小于 10ms（1/2 周波）。

（3）采用 3DSP＋CPLD 全数字控制方式和高速 IGBT，闭环控制。

（4）自动消除谐振，不受电网阻抗和系统阻抗变化影响。

（5）具有补偿谐波，补偿谐波和无功，补偿谐波、无功和三相电流不平衡电流等三种工作模式。

（6）并联安装，方便简单，易于扩展。

（7）设计选型简单，只需测量系统谐波电流大小。

（8）维护方便，在符合要求的工作环境下工作，非机器故障无须维护。

赛因思尔有源电力滤波器的规格及技术参数见表 8－1－150 和表 8－1－151。

表 8-1-150 赛因思尔有源电力滤波器技术参数

输 入	
工作电压/V	$380^{+20\%}_{-40\%}$
工作频率/Hz	$50/60^{+10\%}_{-10\%}$
性 能 指 标	
整机效率	>97%
滤波能力	THDi（电流畸变率）<5%
滤波范围/次	2~50
响应时间/ms	1
全响应时间/ms	10
中性线滤波能力	3 倍于相线
IGBT 频率/kHz	20
自诊断及保护功能	有
通信接口	RS232
通信协议	电总协议
环 境 条 件	
环境温度/℃	0~40
储存温度/℃	-40~70
相对湿度	最大 95%，无凝露
海拔高度	不大于 1500m，1500~4000m 之间，根据国标 GB/T 3859.2，每增加 100m，功率降低 1%

表 8-1-151 赛因思尔有源电力滤波器规格

产品型号	Sinexcel 25	Sinexcel 50	Sinexcel 100	Sinexcel 300
额定补偿电流/A	25	50	100	300
尺寸(高×宽×深)/(mm×mm×mm)	260×405×178	88×440×680	176×440×680	530×440×680
	88×440×680	176×440×680		
净重/kg	15	25	50	150
安装方式	壁挂	壁挂/机架	壁挂/机架	壁挂/机架
进线方式	上进线	上进线/后进线	上进线/后进线	上进线/后进线
风冷模式	智能风冷，151L/Sec			
噪声指标	<56dB			
防护等级	NEMA1（IP20）			
可并联台数	不限（推荐最大 6 台）			
CT 互感器（开口）	300∶5、600∶5、900∶5、1200∶5、2000∶5、3000∶5、4000∶5			

4. ALF 型有源滤波器

ALF 型有源滤波器的规格、型号、技术参数见表 8－1－152、表 8－1－153、表 8－1－154。

表 8－1－152　ALF 型有源滤波器技术参数

线电压/V	400
频率/Hz	50/60
相线补偿电流/A	25、50、100、150、200
中性线补偿电流（仅用于三相四线）/A	75、150、300、450、600
响应时间/ms	≤1
功耗/W	550、950、2000、3000、4100
防护等级	IP30

表 8－1－153　ALF 型有源滤波器规格

线电压/V	频率/Hz	谐波电流 I_{rms}/A	连　接
U_e = 208/400/480	50/60	25	三相三线/三相四线
U_e = 208/400/480	50/60	50	三相三线/三相四线
U_e = 208/400/480	50/60	100	三相三线/三相四线
U_e = 208/400/480	50/60	150	三相三线/三相四线
U_e = 208/400/480	50/60	200	三相三线/三相四线

表 8－1－154　ALF 型有源滤波器型号

型　号	额定电压/V	功率/（kV·A）	输出电流/A	系　统
ALF 17/3L	400/415	17	25	三相三线
ALF 35/3L	400/415	35	50	三相三线
ALF 69/3L	400/415	69	100	三相三线
ALF 104/3L	400/415	104	150	三相三线
ALF 138/3L	400/415	138	200	三相三线
ALF 17/4L	400/415	17	25	三相四线
ALF 35/4L	400/415	35	50	三相四线
ALF 69/4L	400/415	69	100	三相四线
ALF 104/4L	400/415	104	150	三相四线
ALF 138/4L	400/415	108	200	三相四线

1.3.5.7 混合谐波滤波器（HAPF）

图8-1-52为串联型有源滤波器与LC滤波器混合使用方式的原理图。在并联的负载、LC滤波器与电源之间串入有源电力滤波器，其中谐波基本由LC滤波器滤除。有源电力滤波器的作用是改善LC滤波器的滤波特性。可将有源电力滤波器看做一个可变阻抗，它对基波的阻抗为零，对谐波却呈现高阻抗，阻止谐波电流流入电网，迫使谐波电流流入LC滤波器。换言之，有源电力滤波器起到了谐波隔离器的作用。这样还可抑制电网阻抗对LC滤波器的影响，以及抑制电网与LC滤波器之间可能发生的谐振，从而极大地改善了LC滤波器的性能。

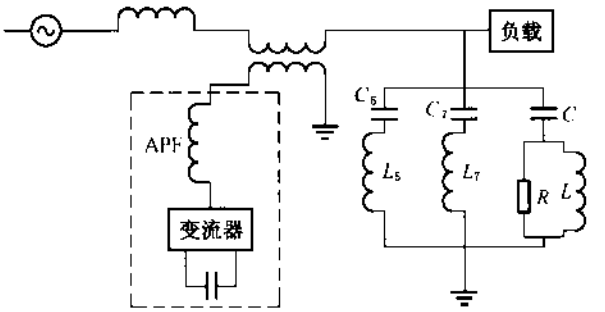


图8-1-52 串联型有源滤波器与LC无源滤波器混合使用

HF混合滤波装置的技术参数如下：

额定电压	400V
精度	电压、电流为0.5级，功率为1.5级
基波无功补偿	功率因数可达到0.92～0.95以上
滤波性能	可滤出2～51次谐波
通信方式	RS232/USB，RS485/RS422，Ethernet Card
功耗	电容器和电抗器不大于0.5W/kvar；有源滤波装置不大于3%装置容量
冷却方式	风冷
结构形式	柜式结构
防护等级	IP20
安装与施工	按电力配电柜的要求安装与施工

HF混合滤波装置的使用环境条件如下：

运行环境温度	0～40℃
设备存储温度	-20～70℃
海拔高度不超过	2000m
环境温度20℃时，相对湿度不超过	90%
无剧烈振动及冲击	
无导电及爆炸性尘埃，无腐蚀性气体	

HF混合滤波装置的型号含义如图8-1-53所示，其型号、规格见表8-1 155。

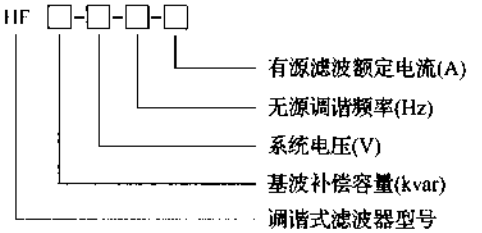


图8-1-53　HF混合滤波装置型号含义

表8-1-155　HF混合滤波装置型号及规格

型　号	基波容量/kvar	无源电抗系数及调谐次数	有源电流/A
HF100-400-189-60	100	7%	60
HF200-400-189-90	200	7%	90
HF300-400-189-120	300	7%	120
HF100-400-245-60	100	4.2%，5次	60
HF200-400-245-90	200	4.2%，5次	90
HF300-400-245-120	300	4.2%，5次	120
HF100-400-345-60	100	2.1%，7次	60
HF200-400-345-90	200	2.1%，7次	90
HF300-400-345-120	300	2.1%，7次	120
HF100-400-245/345-60	100	5次、7次	60
HF200-400-245/345-90	200	5次、7次	90
HF300-400-245/345-120	300	5次、7次	120

1.3.6　电容电流危害与治理

1.3.6.1　电容电流的危害

矿井高压（6~10kV）供电线路主要是由电缆组成，由于电缆主芯线对地线（包括铠装电缆的铅包和铠装层，屏蔽电缆的屏蔽层）的电容远大于架空线，1km电缆主芯线对地线的电容值约为20~30km架空线对地的电容值，所以矿井6~10kV电网对地的电容较大。随着开采年限的增加和产量的提高，矿井供电网络不断扩大、延伸，电缆长度随之加长，其对地分布电容越来越大，导致矿井高压电网电容电流也在不断增加。

而煤矿井下由于巷道狭窄，空气潮湿，电气设备和电缆的绝缘容易受潮，电缆也可能被脱落的岩石和煤块砸坏，甚至被移动的机器设备等挤压，从而造成漏电和接地事故。发生单相漏电和接地故障时，接地点会流过较大的电容电流，对煤矿的安全生产造成危害和影响，如引起人身触电，瓦斯煤尘爆炸和电气雷管先期爆炸事故，对通信、控制线路产生电磁干扰。

1.3.6.2 电容电流的限值

《煤矿安全规程》规定：矿井高压电网必须采取措施限制单相接地电容电流不超过20A。《工业与民用电力装置的过电压保护设计规范》规定：3～35kV的电力网应采用中性点非直接接地的方式。当3～10kV电力网单相接地故障电流大于30A，以及20kV及以上电力网单相接地故障电流大于10A时，均应装设消弧线圈。

1.3.6.3 电容电流的治理措施——消弧线圈

限制单相接地电容电流的方法主要有改变系统运行方式、缩小系统规模、改变中性点接地方式等。其中，改变中性点接地方式是将中性点不接地系统改造为中性点经消弧线圈接地系统，利用消弧线圈产生的电感电流抵消系统的单相接地电容电流，从根本上使接地故障点的接地电流减小。这是治理电容电流超标的最有效也是最根本的方法。

1. 工作原理

消弧线圈接于电网中性点与大地之间，其作用是在电网发生单相接地、中性点对地电压升高时，产生一个感性的接地电流，来补偿电网分布电容产生的接地电流，使流入接地点的总电流减小或消失，从而有利于故障点电弧的自行熄灭，使故障的危害程度降低。

按照消弧线圈对电容电流补偿程度，消弧线圈有欠补偿、过补偿和全补偿三种工作模式。欠补偿方式下消弧线圈提供的感性电流小于电网的电容电流，单相接地时接地点处仍然有一个容性的电流从大地流向线路。过补偿方式下感性电流大于容性电流，此时接地点的电流具有感性的性质。全补偿是使感性电流与容性电流相等，使接地点仅剩下量值很小的有功电流及谐波电流。

从减小接地点电流、有利于电弧熄灭的角度看，全补偿效果最好。但由于电网的结构及运行方式是不断变化的，系统对地电容电流并不是一个恒定不变的量，所以要实现全补偿，消弧线圈必须采用可变电感，在电网运行方式改变后，自动调节电感值，使其产生的感性电流始终与容性电流相等，这就是消弧线圈自动跟踪补偿的原理。

2. 消弧线圈的分类

按照绝缘介质的不同可分为油浸式和干式。

按照装置投入及退出补偿状态的方式可以分为预调式和随调式两种：

（1）预调式自动调谐消弧线圈是在电网正常运行时实时检测电网对地电容的变化，同时实时调整电感量，时刻保证消弧线圈产生的感性电流抵消系统对地电容电流。预调式自动调谐消弧线圈的主要优点是在接地发生前已将消弧线圈调至谐振状态，发生接地瞬间即可直接起到补偿作用，因而补偿的效果比较好。其主要缺点是在发生接地故障前已将补偿电感与分布电容调至谐振状态，容易因三相电压不对称而引起中性点电位升高，出现较高零序电压。因此一般预补偿消弧线圈需要并联或串联一个阻尼电阻以抑制谐振，限制中性点偏移电压过高，在发生单相接地故障后，为确保接地点电流最小，需要尽快地将阻尼电阻短接或切除。

（2）随调式自动调谐消弧线圈在出现接地故障前并不调节消弧线圈，一般为感抗小于容抗的欠补偿，远离谐振状态，出现接地后，根据预测的系统对地电容电流大小，调节消弧线圈的电感量，使接地电流达到最小，故障点电弧熄灭，瞬时性故障将自动消除，永久性故障的危害同样会大为降低。随调式的优点是正常运行时中性点对地电压较低，不需要加阻尼电阻。其缺点是在系统单相接地后，消弧线圈两端已经有很高的电压，这时对其

进行调节比较困难，且调节需要一定的时间，在调至调谐状态前，接地点仍会有较大的接地电流，有可能在消弧之前已经把绝缘烧毁，使本属于瞬时性的故障转化为永久性故障。

按照调节原理分为调匝式、调气隙式（动铁式）、偏磁式（直流助磁式）、磁阀式、调容式和调感式：

（1）调匝式。利用有载开关调节消弧线圈上设置的若干分接头，实现电感量的有级调整。所需设备包括接地变压器、抽头式消弧线圈、高压有载开关、阻尼电阻箱、壳体、控制柜等；其调节方式属于有挡调节、预调式；其优点是容量大，缺点是有挡调节，调节精度低，调节速度慢。

（2）调气隙式（动铁式）。改变磁路中的气隙长度实现电感量的连续可调。其所需设备包括接地变压器、可调气隙消弧线圈、电动机及其机械传动部件、阻尼电阻箱、开关柜壳体；其调节方式属于无级调节、预调式；其优点是连续无级可调，缺点是要求采用精密的机械传动部件，响应速度慢，噪声大，机构易失灵。

（3）偏磁式（直流助磁式）。通过改变铁芯磁化段磁路上的直流助磁磁通大小来调节交流等值磁导以实现电感的连续可调。其所需设备包括接地变压器、可助磁消弧线圈、控制柜（含直流助磁回路）壳体。其调节方式为无级调节、随调式。其优点是连续无级可调，缺点是需外部直流电源，响应时间一般大于 20ms，维护量大。

（4）磁阀式。利用自耦励磁技术控制铁芯的饱和程度，实现对补偿电流的连续调节。其所需设备包括接地变压器、磁阀式消弧线圈、控制柜壳体；其调节方式为无级调节、随调式，其优点是可实现连续无级可调，缺点为随调式，响应时间一般大于 20ms，调节原理复杂，易发生故障。

（5）调容式。采用改变消弧线圈二次侧低压电容电流的方法来调节消弧线圈的电感电流。其所需设备包括三相五柱消弧线圈、多组电容器、阻尼电阻箱、控制柜、壳体；其调节方式为有挡调节、预调式；其优点为调节范围大，缺点为属于有挡调节，调节精度低，占用设备多，维护量大。

（6）调感式。采用改变消弧线圈二次侧低压电感电流的方法来调节消弧线圈的电感电流，以实现电感的连续可调。其所需设备包括三相五柱消弧线圈、电抗器、阻尼电阻箱、壳体；其调节方式为有挡调节、预调节；其优点是连续无级可调，调节精度高，缺点为调节范围稍小。

3. 消弧线圈的容量选择

消弧线圈容量主要是根据系统单相接地故障时电容电流的大小来确定，并留一定裕度，以适应系统的发展和满足设备裕度的要求等。消弧线圈的容量为

$$Q = 1.35 I_C \frac{U_n}{\sqrt{3}} \tag{8-1-113}$$

式中　Q——消弧线圈的容量，kV · A；

U_n——系统标称电压，kV；

I_C——接地电容电流，A。

对于改造工程，I_C 应以实测值为依据。对于新建工程，则应根据配电网络的规划、设计资料进行计算。

4. XBSC 系列消弧线圈成套装置

XBSG 系列消弧线圈成套装置型号含义如图 8－1－54 所示。

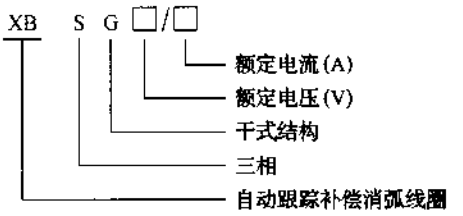


图 8－1－54 XBSG 系列消弧线圈成套装置型号含义

1）使用环境

（1）海拔高度不超过 1000m。

（2）环境温度：－10～45℃，且通风状况良好。

（3）空气相对湿度不大于 95%。

（4）无导电尘埃存在。

（5）无火灾和爆炸危险。

（6）不含有腐蚀金属和绝缘的气体和蒸汽。

（7）无剧烈震动和强力颠簸。

2）技术参数

（1）额定电压：6kV、10kV。

（2）额定电流：40A、50A、60A、70A。

（3）调节范围：30A、40A、50A。

（4）工作电源：AC220V ±10%，50Hz 或 DC220V ±10%。

（5）安装柜型：GG－1A、KGN、KYN28、JYN2 或定制。

（6）运行时间：成套装置能在单相直接接地的情况下运行超过 2h，满足电力系统运行规程的规定。

1.3.7 过电压及其防护

1.3.7.1 外部过电压

1. 雷电过电压的基本特性

雷电是带有电荷的雷云之间或雷云对大地（或物体）之间产生急剧放电的一种自然现象。雷电的特点是时间短、电流大、频率高、感应或冲击电压大。雷电出现的地方可能对电气设备、建筑物造成破坏，对人畜造成伤害，甚至可能造成爆炸、火灾事故。

雷击时，雷电流很大，其数值可达数十到数百千安培；雷电的放电时间很短，通常只有 50～100μs；放电陡度高，每微秒达 50kA；雷电压极高，感应雷一般可达 300～400kV，直击雷电压更高。雷电流波形的上升沿非常陡直，波头时间为 10μs，而下降沿相对缓慢，半值时间为 350μs。

2. 雷电过电压的危害

1）直击雷的危害

雷电放电主通道通过被保护物，被保护物被直击雷击中。电力系统设备或电力系统所

在建筑物被雷电直接击中会造成设备损坏、人员伤亡等危害。直击雷电过电压的破坏作用表现如下：数十万至数百万伏的冲击电压可能毁坏发电机、电力变压器、断路器、绝缘子等电器设备的绝缘，烧断电线或劈裂电线杆，造成大面积停电；绝缘损坏可能引起短路、导致火灾或爆炸事故，还会造成高压窜入低压，引起严重触电事故；巨大的雷电流流入地下时，会在雷击点及其连接的金属部分产生很高的接触电压或跨步电压，形成触电危险。

2）感应雷的危害

雷电放电主通道没有经过被保护物，但放电过程中产生强大的瞬变电磁场在附近的导体中感应到电磁脉冲，称为 LEMP，即感应雷。LEMP 可通过静电感应和电磁感应两种不同的感应方式侵入导体。静电感应，即在雷云中的电荷积聚时，就近的导体会感应相反的电荷，当雷击放电时，雷云中电荷迅速释放，而导体中的静电荷在失去雷云电场束缚后也会沿导体流动寻找释放通道，就会在电路中形成 LEMP。最常见的电子设备危害并不是由于直击雷引起的，大多数情况下是由感应雷感应出雷电过电压引起的。这种感应出的瞬间过电压、过电流的现象通常称为雷电引起的电源浪涌。电源浪涌又称为瞬态过电，是电路中出现的一种短暂的电流、电压波动，在电路中通常持续万分之一秒，但却会对电子设备造成灾难性或积累性的危害。电力系统与外界连接有各种长距离电缆，可在更大范围内产生 LEMP，并沿电缆传入电力系统，因此防雷是电力系统过电压的重点。为了确保电力系统和人身的安全，对雷电过电压必须采取相应的防雷保护措施。

1.3.7.2　内部过电压

电力系统内部运行方式发生改变而引起的过电压叫内部过电压。它是由于电网中磁能转化为电能和各部分之间电容能量传递产生的电网电压升高。内部过电压有暂态过电压、操作过电压和谐振过电压。

暂态过电压是由于断路器操作或发生短路故障，使电力系统经历过渡过程以后重新达到某种暂时稳定的情况下所出现的过电压，又称工频过电压。常见的有：①空载长线电容效应（费兰梯效应），在工频电源作用下，由于远距离空载线路电容效应的积累，使沿线电压分布不等，末端电压最高；②不对称短路接地，三相输电线路 A 相短路接地故障时 B、C 相上的电压会升高；③甩负荷过电压，输电线路因发生故障而被迫突然甩掉负荷时，由于电源电动势尚未及时自动调节而引起的过电压。

操作过电压是由于进行断路器操作或发生突然短路而引起的衰减较快、持续时间较短的过电压。常见的有：空载线路合闸和重合闸过电压，切除空载线路过电压，切断空载变压器过电压，弧光接地过电压等。

谐振过电压是电力系统中电感、电容等储能元件在某些接线方式下与电源频率发生谐振所造成的过电压。

总之，内部过电压的能量都来源于电网本身，过电压的大小与电网工频电压成正比，一般不超过相电压的 7 倍，这是确定电力系统内各种电气设备正常绝缘水平的主要依据。这就是说内部过电压可由电气设备本身较高的绝缘水平来防护，只要对设备的绝缘强度预先进行合理考虑，在运行期间加强定期检查和耐压试验，及时地排除绝缘弱点，内部过电压造成的破坏是可以防止的。运行经验证明，内部过电压一般不会超过系统正常运行时相对地（即单相）额定电压的 3 ~ 4 倍，因此对电力线路和电气设备的威胁不是很大。

1.3.7.3　内部过电压的抑制

1. 工频过电压的抑制

系统中的工频过电压一般由线路空载、接地故障和甩负荷等引起。对110kV及系统，工频过电压一般不超过2.0p.u.；3～10kV和35～66kV系统，一般分别不超过1.1$\sqrt{3}$p.u.和$\sqrt{3}$p.u.，可不采取保护措施。但应避免在110kV有效接地系统中偶然形成局部不接地系统，此时可能产生较高的工频过电压。对可能形成的这种局部不接地系统、低压侧有电源的110kV变压器不接地的中性点应装设间隙。因接地故障形成局部不接地系统时该间隙应动作，系统以有效接地方式运行发生单相接地故障时，间隙不应动作。间隙距离的选择除应满足这两项要求外，还应兼顾雷电过电压下保护变压器中性点标准分级绝缘的要求。

2. 谐振过电压的抑制

谐振过电压包括线性谐振和非线性（铁磁）谐振过电压，一般因操作或故障引起，因此可采取防治措施，避免出现谐振过电压的条件，或用保护装置限制其幅值和持续时间。

110kV系统采用带有均压电容的断路器开断连接有电磁式电压互感器的空载母线，经验算有可能产生铁磁谐振过电压时，宜选用电容式电压互感器。已装有电磁式电压互感器时，运行中应避免可能引起谐振的操作方式，必要时可装设专门消除此类铁磁谐振的装置。

3～66kV不接地系统或消弧线圈接地系统偶然脱离消弧线圈的部分，当连接有中性点接地的电磁式电压互感器的空载母线，因合闸充电或在运行时接地故障消除等原因，使电压互感器过饱和，也可能产生铁磁谐振过电压。为限制这类过电压，可选取下列措施：

（1）选用励磁特性饱和点较高的电磁式电压互感器。

（2）减少同一系统中电压互感器中性点接地的数量，电源侧电压互感器高压绕组中性点接地除外，其他电压互感器中性点尽可能不接地。

（3）个别情况下，在10kV及以下的母线上装设中性点接地的星形接线电容器组或用一段电缆代替架空线路，以减少电网对地容抗X_{C0}，使$X_{C0}<0.01X_m$（X_m为电压互感器在线电压作用下单相绕组的励磁电抗，下文同）。

（4）在互感器的开口三角形绕组装设$R_\Delta \leqslant 0.4$（X_m/K_{13}^2）的电阻（K_{13}为电压感器一次绕组与开口三角形绕组的变比）或装设其他专门消除此类铁磁谐振的装置。

（5）10kV及以下互感器高压绕组中性点将$R_{yn} \geqslant 0.06X_m$（容量大于600W）的电阻接地。

3～66kV不接地及消弧线圈接地系统，应采用性能良好的设备并提高运行维护水平，以避免在下述条件下产生铁磁谐振过电压：

（1）配电变压器高压绕组对地短路。

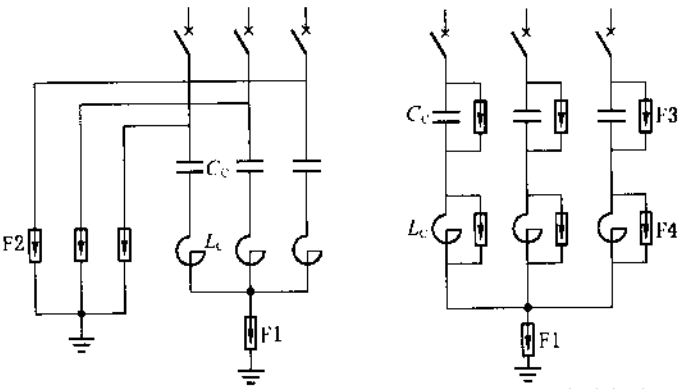
（2）送电线路一相断线且一端接地或不接地。

3. 操作过电压的抑制

空载线路开断时，如断路器发生重击穿，将产生操作过电压。开断110kV架空线路过电压不超过3.0p.u.，开断110kV电缆线路可能超过3.0p.u.。为此，开断空载架空线路宜采用不重击穿的断路器，开断电缆线路必须采用不重击穿的断路器。对66kV及以下系统，开断空载线路断路器发生重击穿时的过电压一般不超过3.5p.u.。开断前系统已有

单相接地故障，使用一般断路器操作时产生的过电压可能超过4.0p.u.；为此，选用操作断路器时，应该使其开断空载线路过电压不超过4.0p.u.。

开断3~66kV系统的并联电容补偿装置，如断路器发生单相重击穿时，电容器高压端对地过电压可能超过4.0p.u.；开断前电源侧有单相接地故障时，该过电压将更高，开断时如发生两相重击穿，电容器极间过电压可能超过$2.5\sqrt{2}U_{nC}$（U_{nC}为电容器额定电压），因此操作并联电容补偿装置时，应采用开断时不重击穿的断路器。对于需频繁投切的补偿装置，宜按图8-1-55a装设并联电容补偿装置金属氧化物避雷器（F1或F2），作为限制单相重击穿过电压的后备保护装置。在电源侧有单相接地故障不要求操作补偿装置的条件下宜采用F1。断路器操作频繁且开断时可能发生重击穿或者合闸过程中触头有弹跳现象时，宜按图8-1-55b装设并联电容补偿装置金属氧化物避雷器（F1及F3或F4），F3或F4用以限制两相重击穿时在电容器极间出现的过电压。当并联电容补偿装置电抗器的电抗率不低于12%时，宜采用F4。



(a) 单相重击穿过电压的保护接线　　(b) 两相重击穿过电压的保护接线

图8-1-55　并联电容器补偿装置的避雷器保护接线

开断空载变压器时，断路器强制熄弧（截流）产生的过电压，与断路器形式、变压器铁芯材料、绕组形式、回路元件参数和系统接地方式等有关。当开断具有冷轧硅钢片的变压器时，过电压一般不超过2.0p.u.，可不采取保护措施；开断具有热轧硅钢片铁芯的110kV变压器时，过电压一般不超过3.0p.u.，66kV及以下变压器一般不超过4.0p.u.。采用抑制熄弧性能较强的断路器开断激磁电流较大的变压器时会产生高幅值过电压，可在断路器的非电源侧装设阀式避雷器（建议优先选用金属氧化物避雷器）加以限制。保护变压器的避雷器可装在其高压侧或低压侧，但高、低压侧系统接地方式不同时，低压侧宜装设操作过电压保护水平较低的避雷器。在可能只有一条线路运行的变压器中性点消弧线圈上，宜用避雷器限制因切除最后一条线路两相接地故障时，强制开断消弧线圈电流产生的过电压。空载变压器合闸产生的操作过电压一般不超过2.0p.u.，可不采取保护措施。

因断路器的截流、三相同时开断和高频重复重击穿等，开断高压感应电动机会产生过电压（后两种仅出现于真空断路器开断时），过电压幅值与断路器熄弧性能、电动机和回

路元件参数等有关。开断空载电动机的过电压一般不超过 2.5p.u.；开断启动过程中的电动机时，截流过电压和三相同时开断过电压可能超过 4.0p.u.，高频重复重击穿过电压可能超过 5.0p.u.。采用真空断路器截流值较高时，宜在断路器与电动机之间装设旋转电机金属氧化物避雷器或 RC 阻容吸收装置。高压感应电动机合闸的操作过电压一般不超过 2.0p.u.，可不采取保护措施。

66kV 及以下系统发生单相间歇性电弧接地故障时，可产生过电压，过电压的高低随接地方式不同而异。一般情况下最大过电压不超过下列数值：不接地 3.5p.u.，消弧线圈接地 3.2p.u.，电阻接地 2.5p.u.。具有限流电抗器、电动机负荷且设备参数配合不当的 3～10kV 某些不接地系统，发生单相间歇性电弧接地故障时，可能产生危及设备相间或相对地绝缘的过电压。对这种系统根据负荷性质和工程的重要程度，可进行必要的过电压预测，以确定保护方案。

采用无间隙金属氧化物避雷器限制各类操作过电压时，其持续运行电压和额定电压不应低于表 8－1－156 所列数值（表中 U_m 为系统最高电压）时，避雷器应能承受操作过电压作用的能量。

表 8－1－156 无间隙金属氧化物避雷器持续运行电压和额定电压

系统接地方式	持续运行电压/kV		额定电压/kV		
	相 地	中性点	相 地	中 性 点	
有效接地	110kV	$U_m/\sqrt{3}$	$0.45U_m$	$0.75U_m$	$0.37U_m$
不接地	3～20kV	$1.1U_m$	$0.64U_m$	$1.38U_m$	$0.8U_m$
	35kV、66kV	U_m	$U_m/\sqrt{3}$	$1.25U_m$	$0.72U_m$
消弧线圈	3～20kV、35kV、66kV	U_m	$U_m/\sqrt{3}$	$1.25U_m$	$0.72U_m$
低电阻		$0.8U_m$	—	U_m	—
高电阻		$1.1U_m$	$1.1U_m/\sqrt{3}$	$1.38U_m$	$0.8U_m$

1.3.7.4 避雷针

1. ESE 系列避雷针

ESE 系列避雷针型号含义如图 8－1－56 所示。图中 ΔT 为根据法国国标 NFC17—102 规定的启动抢先时间，实际测试值大于规定值。不同型号避雷针的提前放电时间见表 8－1－157；ESE 系列避雷针保护半径见表 8－1－158。

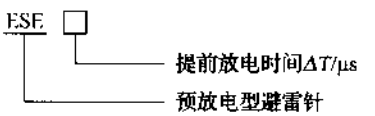


图 8－1－56 ESE 系列避雷针型号含义

表8-1-157　ESE系列避雷针提前放电时间

型　号	避雷针提前放电时间 $\Delta T/\mu s$	型　号	避雷针提前放电时间 $\Delta T/\mu s$
ESE2500 提前放电避雷针	25	ESE5000 提前放电避雷针	50
ESE4000 提前放电避雷针	40	ESE6000 提前放电避雷针	60

表8-1-158　ESE系列避雷针保护半径

不同型号不同安装高度的“statelit+”避雷针对各类防雷建筑物的保护半径 Rp

“statelit+”针尖高度	高于被保护物的水平高度 h/m								
	2	4	5	7	10	15	20	45	60
第一类防雷建筑物									
ESE2500	17	34	42	43	44	45	45		
ESE4000	24	46	58	59	59	60	60		
ESE5000	28	55	68	69	69	70	70		
ESE6000	32	64	79	79	79	80	80		
第二类防雷建筑物									
ESE2500	23	45	57	59	61	63	65	70	
ESE4000	30	60	75	76	77	80	81	85	
ESE5000	35	69	86	87	88	90	92	95	
ESE6000	40	78	97	98	99	101	102	105	
第三类防雷建筑物									
ESE2500	26	52	65	66	69	72	75	84	85
ESE4000	33	66	84	85	87	89	92	99	100
ESE5000	38	76	95	96	98	100	102	110	110
ESE6000	44	87	107	108	109	111	113	120	120

2. SLE半导体少长针消雷装置

SLE半导体少长针消雷装置型号含义如图8-1-57所示；其技术数据见表8-1-159。

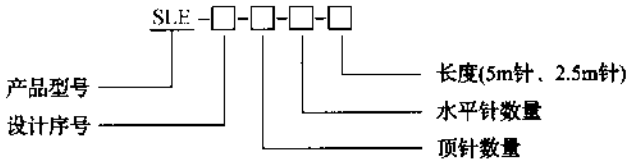


图8-1-57　SLE半导体少长针消雷装置型号含义

表 8-1-159 SLE 半导体少长针消雷装置技术数据

型 号	规 格	针 数	重量/kg	适 用 范 围
SLE-V-3	500mm×3	3	45	输电线路
SLE-V-4	500mm×4	4	50	输电线路
SLE-V-9	500mm×9	9	95	中层民用建筑
SLE-V-13	500mm×13	13	120	重要保护设施
SLE-V-13/8	500mm×（13/8）	13+8	120+80	60m 以上铁塔
SLE-V-13/16	500mm×（13/16）	13+16	120+160	80m 以上铁塔
SLE-V-19	500mm×19	19	160	重要保护设施
SLE-V-19/8	500mm×（19/8）	19+8	160+80	60m 以上铁塔
SLE-V-19/16	500mm×（19/16）	19+16	160+160	80m 以上铁塔
SLE-V-25	500mm×25	25	205	重要保护设施

3. AR 限流避雷针

AR 限流避雷针阻止高层建筑雷电上行先导的产生，具有普通避雷针的引雷作用，并将雷电流导入大地。

AR 限流避雷针型号含义如图 8-1-58 所示，其技术数据见表 8-1-160。

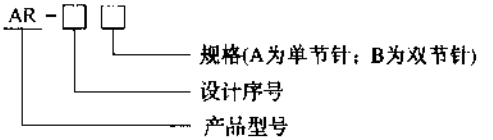


图 8-1-58 AR 限流避雷针型号含义

表 8-1-160 AR 限流避雷针技术数据

型 号	总长度/mm	直径/mm	重量/kg	限流容量/kA	适 用 范 围
AR-ⅠA	2090	62	18.3	150	较重要设施直击雷防护
AR-ⅠB	3690	62	26.7	250	较重要设施直击雷防护
AR-ⅡA	2175	90	27.8	200	重要设施的直击雷防护
AR-ⅡB	3735	90	39.5	300	重要设施的直击雷防护
AR-ⅢA	1415	51	6.5	100	防雷单元的直击雷防护，如卫星接收天线、交通系统的收费站、场外摄像机等

4. DXH01-ZU（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）（TY）型避雷针

DXH01-ZU（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）（TY）型避雷针技术数据见表 8-1-161。

表8-1-161　DXH01-ZU（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）（TY）型避雷针技术数据

型　号	DXH01-ZUⅠ	DXH01-ZUⅡ	DXH01-ZUⅢ	DXH01-ZUTY
通流容量/kA	200	300	200	200
陡度衰减倍率/%	33	33	25	
幅值衰减倍率/%	80	80	60	
电阻/Ω	5	5	5	5
高度/m	3	3	2	1.5
重量/kg	42	45	20	3.2
抗风强度/($m \cdot s^{-1}$)	40	40	40	40

1.3.7.5　避雷线

避雷线又称架空地线，架设在杆塔顶部，一根或两根，用于防雷，110～220kV线路一般沿全线架设。

架空送电线着雷时，可能落在导线上，也可能落在杆塔上。雷击导线时，在导线上将产生远高于线路额定电压的所谓“过电压”，有时达几百万伏。它超过线路绝缘子串的抗电强度时，绝缘子串将“闪络”，往往引起线路跳闸，甚至造成停电事故。避雷线可以遮住导线，使雷尽量落在避雷线本身上，并通过杆塔上的金属部分和埋设在地下的接地装置，使雷电流流入大地。雷击杆塔或避雷线时，在杆塔和导线间的电压超过绝缘子串的抗电强度时，绝缘子串也将“闪络”，而造成雷击事故。通常用降低杆塔接地电阻的办法，来减少这类事故。

避雷线的保护效果还同它下方的导线与它所成的角度有关，角度较小时，保护效果较好。在架有两根避雷线的情况下，容易获得较小的保护角，线路运行时的雷击跳闸故障也较少，但建设投资较大。我国近年来新建的220kV以下线路，多采用一根避雷线。

在雷击不严重的110kV及较低电压的线路上，通常仅在靠近变电所两公里左右范围内装设避雷线，作为变电所进线的防雷措施。

避雷线也会因风吹而振动，常易发生振动的地方通常装有防振锤。

近年来，国外超高压线路有采用良导线架空地线的趋势，主要采用铅包钢线，它具有强度较高、不生锈、又有适当的导电率的优点。一般用绝缘子使之与杆塔相互绝缘，利用间隙引导雷电流入地，这样可利用架空地线作为载波通道，并减少电能感应损耗。

避雷线应满足电气和机械使用条件要求，一般选用镀锌钢绞线。其与导线的配合见表8-1-162。

表8-1-162　避雷线采用镀锌钢绞线时与导线配合表

导线型号	JL/G-185/30及以下	JL/G-185/45～JL/G-400/50	JL/G-400/65及以上
镀锌钢绞线最小标称截面/mm^2	35	50	70

1.3.7.6　避雷器

1. 常用氧化锌避雷器

氧化锌避雷器是当前最先进的过电压保护设备，是传统碳化硅阀式避雷器的升级换代产品，用于保护电力系统中各种电气设备的绝缘免受过电压损坏。氧化锌避雷器分为无间隙氧化锌避雷器和有间隙氧化锌避雷器。氧化锌避雷器的型号含义如图 8－1－59 所示。

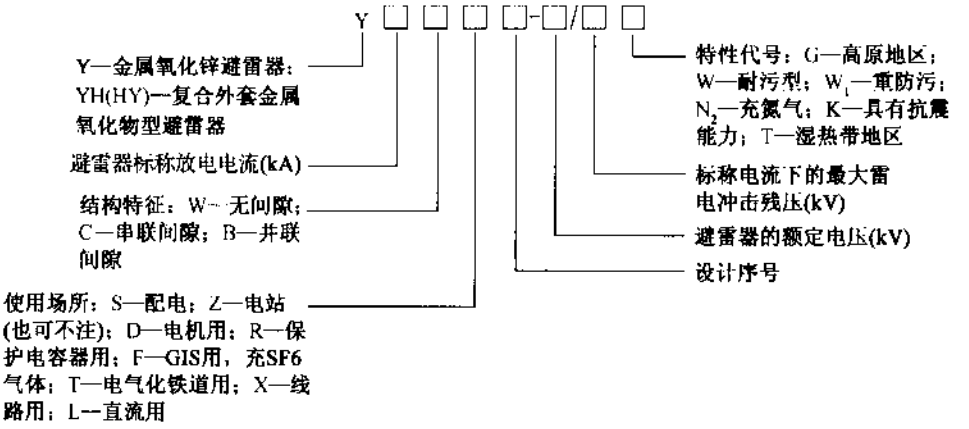


图 8－1－59 金属氧化锌避雷器型号含义

1）3～110kV 交流无间隙瓷壳式氧化锌避雷器

额定电压 3～110kV 的交流无间隙瓷壳式氧化锌避雷器，用于保护交流输变电设备免受大气过电压和操作过电压损害的重要保护电器，适用于户内、户外，具有优异的保护特性，大的通流能力，能吸收各种雷电过电压、操作过电压和工频暂态过电压。

这种避雷器的正常使用条件：交流系统额定频率 48～62Hz；海拔高度 <1000m；最大风速 <35m/s；环境温度 －40～＋40℃；地震烈度 <8 度；太阳光最大辐射强度 1.1kW/m^2。

使用在异常条件下的避雷器，有高原型、耐污型和抗震型。高原型用于海拔超过 1000m 的高海拔地区；耐污型用于爬电比距不小于 25mm/kV，等值附盐密度为 0.03mg/cm^2（重污秽地区）的地区；抗震型使用于地震烈度 8 度以上的地区。

3～110kV 交流无间隙瓷壳式氧化锌避雷器分类见表 8－1－163。

2）SF_6 罐式氧化锌避雷器

罐式氧化锌避雷器是全封闭组合电器（GIS）的重要配套产品，近年来得到迅速发展。罐式氧化锌避雷器的结构与瓷套式氧化锌避雷器完全不同。罐式氧化锌避雷器的电阻片串联叠装在金属罐体内，内部充有 0.35～0.50MPa 额定压力的 SF_6 气体。高压侧通过特殊环氧浇注的盆式绝缘子出线与 GIS 相连，低压侧通过密封端子及放电计数器或泄漏电流监测仪接地。110kV 及以下等级的产品采用三相共罐结构，减小相间、相地之间的距离，结构更加紧凑。为了改善产品的电位分布，内部装有不同形状和尺寸的均压屏蔽屏。

GIS 用罐式氧化锌避雷器，除了具有瓷壳式氧化锌避雷器所具有的优点外，还具有以下特点：

表8-1-163　3~110kV交流无间隙瓷壳式氧化锌避雷器分类

保护对象	电压等级/kV	产品型号	标称电流/kA	备注
3~110kV电站或线路	110	Y10W5-96~126	10	爬电比距31mm/kV、25mm/kV，有高原型、耐污型和普通型
		Y5W5-96~126	5	
	66	Y10W5-84~94	10	爬电比距31mm/kV、25mm/kV，有高原型、耐污型和普通型
		Y5W5-84~94	5	
	35	Y10W5-51~55	10	爬电比距大于31mm/kV，有耐污型、高原型
		Y5W5-51~55	5	
	3~10	Y5W5-5~17	5	
110kV变压器中性点	110	Y1.5W5-55~37	1.5	
并联电容器组	35	Y5WR5-48~54	5	2ms方波电流400~2000A，爬电比距大于25mm/kV
		Y10WR5-48~54	10	
	3~10	Y5WR5-5~17	5	2ms方波电流400~1000A

注：1. 110kV交流用氧化锌避雷器最高海拔3000m。

2. 3~110kV交流用氧化锌避雷器全部为单柱式结构，不采用多柱电阻片并联的方式。

3. 110kV交流用氧化锌避雷器分为普通充氮型、微正压充氮型及微正压充SF_6型。

4. 35~110kV交流用氧化锌避雷器的绝缘底座为整体瓷底座。

（1）保护性能优异，陡波响应好，对于伏秒特性比较平坦的GIS产品保护非常有利。

（2）性能稳定，不受外界气象条件及污秽的影响。

（3）内部采用特殊均压措施，改善电位分布，电位分布比较均匀。

（4）罐体内部充入一定压力的SF_6气体，绝缘性能优异，较空气绝缘性能高许多倍，可大幅减小相间及相地间距离。

（5）密封性能可靠，出厂前进行SF_6气体检漏，年漏率小于1%。

（6）SF_6气体水分含量检测，含量小于150×10^{-6}。

3）带串联间隙系列金属氧化物避雷器

Y5CS系列有串联间隙配电型金属氧化物（氧化锌）避雷器，适用于6kV、10kV中性点对地绝缘的配电系统。当系统发生单相接地故障或弧光接地时可能产生比较严重的暂态过电压，且持续时间较长，无间隙氧化锌避雷器难于承受此种过电压，而有串联间隙的Y5CS系列氧化锌避雷器克服了上述缺点，在单相接地和较低幅值的弧光接地过电压下，串联间隙不动作，使避雷器与系统隔离；在高于上述过电压下，间隙放电，氧化锌阀片优异的伏安特性限制了避雷器两端的残压，且通过避雷器的续流值很小，极易切断，对变压器的绝缘提供可靠保护。

Y5CS 系列有串联间隙系列金属氧化物避雷器的主要特点如下：

（1）由具有十分优良非线性伏安特性的氧化锌电阻片和带并联电阻环的间隙串联组成。在正常工作状态时，电压由电阻环和氧化锌电阻片共同承担，由于电阻环的分压作用，减轻了氧化锌电阻片在工作电压下的负担，使氧化锌电阻片的老化基本可忽略。

（2）冲击系数低，工频过电压耐受能力强。

（3）由于采用了特殊的间隙结构，消除了淋雨、污秽等外界因素对产品的影响。

其使用条件：适用于户外；环境温度 －40～＋40℃；海拔高度 ＜1000m。避雷器安装点电力系统的短时工频电压升高不得超过避雷器的额定电压，避雷器顶端承受导线的最大允许水平拉力为 200N。

对于 6～27.5kV 系统弱绝缘的保护，可采用带并联间隙的金属氧化物避雷器。

4）交流系统用复合外套金属氧化物避雷器

该产品是一种性能优异的过电压保护设备，复合外套金属氧化物避雷器用于限制雷电过电压和操作过电压，适用于发变电设备、电缆终端及输电线路的保护。其除具有瓷外套金属氧化物避雷器的优点外，还具有体积小、重量轻、密封性能好、耐污性能优良和极好的压力释放特性等特点。安装方式灵活、可座式安装，也可用于线路悬挂，进行沿线保护，降低整个系统的过电压水平。

其使用条件：户内或户外；环境温度 －40～＋40℃；海拔高度 ＜2600m；电源频率 48～62Hz；长期施加在避雷器端子间的工频电压不超过避雷器的持续运行电压；地震烈度 ＜8 度；最大风速 ＜35m/s；适用于严重污秽地区、防爆地区、紧凑型开关柜内、预防性检验困难和不宜维护地区；覆冰厚度 ＜2cm。

5）35～110kV 线路悬挂式复合外套氧化锌避雷器

交流输变线路用悬挂式有机复合外套氧化锌避雷器并联，连接于绝缘子（串）两端，限制线路雷电过电压，提高线路耐雷水平，降低系统因雷击故障引起的跳闸率。复合外套氧化锌避雷器内装有优异伏安特性的氧化锌电阻片，复合外套采用高压注射、整体成型的先进工艺。其具有以下特点：

（1）高压注射整体成型，密封性能好。

（2）散热性能好，具有较大的过电压能量吸收能力。

（3）耐污性能优良。

（4）特殊结构，防潮，防爆。

（5）体积小，重量轻，安装灵活。

（6）抗拉强度高，耐碰撞，运输无破损。

其使用条件：海拔高度 ＜2000m；环境温度 －40～＋40℃；电源频率 48～62Hz；最大风速 ＜35m/s；避雷器允许摆脱，根据塔形，考虑悬挂方式。

该避雷器最适宜下列场合和地区使用：耐雷水平较低、雷击跳闸率偏高的输电线路；干旱、少雨的丘陵、山区等地区；接地电阻较高的杆塔及地区；较大跨距的过江杆塔；操作过电压较高，需要在进入变电站前进行限制的场合；严重污秽地区；不宜维护地区。

2. 常用氧化锌避雷器技术数据

3～110kV 电站型和线路型无间隙瓷氧化锌避雷器的技术参数见表 8－1－164；变压器

中性点保护用瓷氧化锌避雷器的技术参数见表8－1－165；并联补偿电容器组保护用瓷氧化锌避雷器技术参数见表8－1－166；带并联间隙的金属氧化物避雷器的技术参数见表8－1－167；63～110kV SF_6 罐式金属氧化物避雷器技术参数见表8－1－168；带串联间隙系列金属氧化物避雷器技术参数见表8－1－169。配电型3～110kV复合外套座装式氧化锌避雷器技术参数见表8－1－170。电站型3～110kV复合外套座装式氧化锌避雷器保护发电厂、变电站的交流电气设备，免受大气过电压和操作过电压的损坏，其技术参数见表8－1－171。并联电容器型3～35kV复合外套座装式氧化锌避雷器，抑制真空开关操作电容器组产生的过电压，保护电容器组免受过电压的破坏并吸收过电压能量，其技术参数见表8－1－172。旋转电机型3～20kV复合外套座装式氧化锌避雷器，限制真空开关切换旋转电机时产生的过电压，保护旋转电机免受操作过电压损坏，其技术参数见表8－1－173。变压器中性点型110kV复合外套座装式氧化锌避雷器，保护相应等级的变压器中性点免受大气过电压的损坏，其技术参数见表8－1－174。35～110kV线路悬挂式复合外套氧化锌避雷器技术数据见表8－1－175。

3. 氧化锌避雷器的选择

1）无间隙避雷器的选择

（1）按照使用地区的气温、海拔、风速、污秽和地震等环境条件，确定避雷器的使用条件。

（2）根据被保护对象选择避雷器的类型。

（3）按照系统中长期作用在避雷器上的最高电压确定避雷器的持续运行电压。

（4）估算避雷器安装点暂时过电压的幅值和持续时间，选择避雷器的额定电压，并与工频电压耐受时间特性进行校核。

（5）估算通过避雷器的雷电放电电流幅值，选择避雷器的标称放电电流。

（6）估算通过避雷器的操作冲击电流和能量，选择避雷器的线路放电等级、方波冲击试验电流幅值以及能量吸收能力。

（7）根据被保护设备的额定雷电冲击耐受电压和操作冲击耐受电压，按照绝缘配合的要求，确定避雷器雷电冲击保护水平和操作冲击保护水平。

（8）按照避雷器安装处的最大故障电流，选择避雷器的压力释放等级。

（9）按照避雷器安装处的污秽情况，选择避雷器外套的爬电比距。在外绝缘选择中，要考虑设备外绝缘与海拔高度的关系。

（10）按照避雷器安装处的引线拉力、风速和地震条件，选择避雷器的机械强度。

（11）当避雷器不能满足绝缘配合要求时，可采取以下一种或几种办法予以改进：调整避雷器的位置；选择保护性能较好的避雷器；适当降低避雷器的额定电压；增加避雷器的台数等。

2）有间隙避雷器的选择

（1）按照使用地区的气温、海拔、风速、污秽和地震等环境条件，确定避雷器的使用条件。

（2）根据被保护对象选择避雷器的类型。

（3）对于有并联间隙或串联间隙上有并联电阻的避雷器，按照系统中长期作用在避雷器上的最高工作电压，确定避雷器的持续运行电压。

（4）估算避雷器安装点过电压的幅值及间隙遮断续流的能力，对有串联间隙避雷器，考虑避雷器电阻片部分的额定电压；对有并联间隙避雷器，考虑避雷器无并联间隙的电阻片部分的额定电压。

（5）估算通过避雷器的雷电放电电流幅值，选择避雷器的标称放电电流。

（6）若避雷器在部分操作过电压下动作，应估算通过避雷器的操作冲击电流和能量，选择避雷器的线路放电等级、方波冲击试验电流幅值以及能量吸收能力。

（7）根据被保护设备的额定雷电冲击耐受电压和操作冲击耐受电压，按照绝缘配合的要求，确定避雷器雷电冲击保护水平和操作冲击保护水平。

（8）根据被保护设备的绝缘水平，确定有串联间隙避雷器雷电冲击放电电压上限。

（9）根据被保护设备可耐受的操作过电压倍数（避雷器不应动作），确定避雷器工频放电电压下限。

（10）按照避雷器安装处的最大故障电流，选择避雷器的压力释放等级。

（11）按照避雷器安装处的污秽情况，选择避雷器外绝缘的爬电比距。在外绝缘选择中，要考虑设备外绝缘与海拔高度的关系。

（12）按照避雷器安装处的引线拉力、风速和地震条件，选择避雷器的机械强度。

4. 避雷器的预防性试验

氧化锌避雷器的预防性试验项目、周期和要求见表 8－1－176。金属氧化物避雷器直流 1mA 电压值见表 8－1－177。

表 8－1－164 3～110kV 电站型和线路型无间隙瓷氧化锌避雷器的技术参数

型 号	避雷器额定电压（有效值）/kV	系统额定电压（有效值）/kV	避雷器持续运行电压（有效值）/kV	直流参考电压/kV	方波电流（2ms）/A	陡波冲击电流残压（峰值）/kV	雷电冲击电流残压（峰值）/kV	操作冲击电流残压（峰值）/kV	备注
Y5WS5－5/15	5	3	4.0	7.5	100	17.3	15	12.8	
Y5WZ5－5/13.5	5	3	4.0	7.5	150	15.5	13.5	11.5	
Y5WS5－10/30	10	6	8.0	15.0	100	34.6	30	25.6	
Y5WZ5－10/27	10	6	8.0	15.0	150	31.0	27	23.0	操作冲击电流250A
Y5WS5－17/50	17	10	13.6	25.0	100	57.5	50	42.5	
Y5WZ5－17/48	17	10	13.6	25.0	100	55.5	48	41.0	
Y5WZ5－17/45	17	10	13.6	24.0	150	51.8	45	38.3	
Y5WZ5－17/44	17	10	13.6	24.0	150	50.5	44	37.5	

表 8-1-164（续）

型　号	避雷器额定电压（有效值）/kV	系统额定电压（有效值）/kV	避雷器持续运行电压（有效值）/kV	直流参考电压/kV	方波电流（2ms）/A	陡波冲击电流残压（峰值）/kV	雷电冲击电流残压（峰值）/kV	操作冲击电流残压（峰值）/kV	备注
Y5W5-51/134	51	35	40.8	73.0	400	154	134	114	操作冲击电流500A
Y5W5-51/130	51	35	40.8	73.0	400	150	130	112	
Y5W5-51/125	51	35	40.8	73.0	400	145	125	110	
Y5W5-52.7/134	52.7	35	42.2	76.0	400	154	134	114	
Y5W5-52.7/130	52.7	35	42.2	74.0	400	150	130	112	
Y5W5-52.7/125	52.7	35	42.2	73.0	400	145	125	110	
Y5W5-54/134	54	35	43.2	76.0	400	154	134	114	
Y5W5-54/130	54	35	43.2	74.0	400	150	130	112	
Y5W5-54/125	54	35	43.2	73.0	400	145	125	110	
Y5W5-84/215	84	63	67.2	122	600	245	215	181	操作冲击电流1kA
Y5W5-84/221	84	63	67.2	121	600	254	221	188	
Y5W5-90/235	90	63	72.5	130	600	270	235	201	
Y5W5-90/224	90	63	72.5	128	600	258	224	190	
Y5W5-94/234	94	63	75.2	134	600	270	234	198	
Y5W5-96/250	96	110	75	140	600	288	250	213	
Y5W5-100/260	100	110	78	145	600	299	260	221	
Y5W5-102/266	102	110	79.6	148	600	305	266	226	
Y5W5-108/281	108	110	84	157	600	323	281	239	
Y5W5-116/302	116	110	90	168	600	338	302	256	

表 8-1-165 变压器中性点保护用瓷氧化锌避雷器技术参数

型 号	变压器额定电压(有效值)/kV	避雷器额定电压(有效值)/kV	避雷器持续运行电压(有效值)/kV	雷电冲击电流残压(峰值) /kV	操作冲击电流残压(峰值) /kV	直流参考电压/kV	方波电流(2ms)/A
Y1.5W5-55/132	110	55	44	132	126	79	400
Y1.5W5-60/144	110	60	48	144	135	85	400
Y1.5W5-72/186	110	72	58	186	174	103	400

表 8-1-166 并联补偿电容器组保护用瓷氧化锌避雷器技术参数

型 号	避雷器额定电压(有效值)/kV	系统额定电压(有效值)/kV	避雷器持续运行电压(有效值)/kV	直流参考电压/kV	2ms 方波电流/A	雷电冲击电流残压(峰值)/kV	操作冲击电流残压(峰值)/kV
Y5WR5-5/13.5	5	3	4.0	7.2	400	13.5	10.5
Y5WR5-10/27	10	6	8.0	14.4	400	27.0	21.0
Y5WR5-17/46	17	10	13.6	24	400~1000	46	35.0
Y5WR5-48/134 Y10WR5-48/134	48	35	38.4	70	400~2000	134	105
Y5WR5-51/134 Y10WR5-51/134	51	35	40.8	73	400~2000	134	105
Y5WR5-52.7/134 Y10WR5-52.7/134	52.7	35	42.2	76	400~2000	134	105
Y5WR5-54/134 Y10WR5-54/134	54	35	43.3	78	400~2000	134	105

表 8-1-167 带并联间隙的金属氧化物避雷器技术参数

型 号	系统额定电压(有效值)/kV	避雷器额定电压(有效值)/kV	持续运行电压(有效值)/kV	标称放电电流下残压(峰值)/kV	直流 1mA 参考电压/kV	2ms 方波通流容量/A	伞径/mm	高度/mm
Y0.5B-8/15	6.3	8	6.3	15	11.5	400	110	208
Y0.5B-13.5/28	10.5	13.5	10.5	28	21	400	110	255
Y0.5B-7.6/15	6	7.6	4	15	11.5	400		
Y0.5B-12.7/28	10	12.7	6.7	28	21	400		
Y0.5B-42/79	27.5	42	31.5	79	60	400		

表 8－1－168　63～110kV SF_6 罐式金属氧化物避雷器技术参数

型　号	避雷器额定电压（有效值）/kV	系统额定电压（有效值）/kV	避雷器持续运行电压（有效值）/kV	直流参考电压/kV	2ms方波电流（峰值）/A	陡波冲击电流残压（峰值）/kV	雷电冲击电流残压（峰值）/kV	操作冲击电流残压（峰值）/kV	标称放电电流/kA	内绝缘耐受	
										1min 工频耐受电压（有效值）/kV	全波冲击耐受电压（峰值）/kV
Y5WF5－90/235	90	63	72.5	130	600	270	235	201	5	230	550
Y5WF5－94/245	94	63	73.3	137	600	281	245	208			
Y5WF5－96/250	96	110	75.0	140	600	288	250	213			
Y5WF5－100/260	100	110	78.0	145	600	299	260	221			
Y5WF5－102/266	102	110	79.6	148	600	305	266	226			
Y5WF5－108/281	108	110	84.2	157	600	323	281	239			
Y5WF5－116/302	116	110	92.8	169	600	347	302	257			
Y10WF5－90/235	90	63	72.5	130	600	264	235	201	10		
Y10WF5－94/228	94	63	75.2	133	600	263	228	200			
Y10WF5－96/250	96	110	75.0	140	600	280	250	213			
Y10WF5－100/260	100	110	78.0	145	600	291	260	221			
Y10WF5－102/266	102	110	79.6	148	600	297	266	226			
Y10WF5－108/281	108	110	84.2	157	600	315	281	239			
Y10WF5－116/302	116	110	90.5	169	600	338	302	257			
Y10WF5－126/328	126	110	98.3	183	600	367	328	279			

表 8－1－169　带串联间隙系列金属氧化物避雷器技术参数

型　号	系统标称电压（有效值）/kV	避雷器额定电压（有效值）/kV	持续运行电压（有效值）/kV	工频放电电压（有效值）/kV	1.2D/50μs 冲击放电电压（峰值）/kV	最大残压 8/20μs（峰值）/kV 5kA	2ms 方波通流容量/A	伞径/mm	高度/mm
Y5CS－3.8/13.5	3	3.8	2	9	20	13.5	75	114	298
Y5CS－7.6/27	6	7.6	4	16	35	27	150	114	298
Y5CS－12.7/45	10	12.7	6.6	26	45	45		114	430
Y5CZ－22/58	18	22	12	42	58	58	400	232	1080

表 8-1-170　配电型 3~110kV 复合外套座装式氧化锌避雷器技术参数(座装式)

避雷器型号	系统额定电压/kV	避雷器额定电压/kV	避雷器持续运行电压/kV	直流参考电压(U_{1mA})/kV	陡波冲击电流下残压/kV	雷电冲击电流下残压/kV	操作冲击电流下残压/kV	2ms 方波通流容量/A	大电流冲击耐受/kA	爬电比距/(cm·kV^{-1})		最大伞径/mm	总高/mm
										(1)	(2)		
YH5WS5-5/17	3	5	4.0	8.0	19.6	17	14.5	100	65	3.1		87	155±5
YH5WS5-5/16	3	5	4.0	8.0	18.8	16	13.5	100	65	3.1		87	155±5
YH5WS5-10/30	6	10	8.0	16.0	34.5	30	25.5	100	65	3.1		87	230±5
YH5WS5-10/28	6	10	8.0	16.0	32.5	28	24.5	100	65	3.1		87	230±5
YH5WS5-17/50	10	17	13.6	25.0	57.5	50	38.5	100	65	3.1		204	275±5
YH5WS5-17/47	10	17	13.6	25.0	54.5	47	36.5	100	65	3.1			
YH5W5-51/134	35	51	40.8	76.0	154	134	114	400	65	3.1	2.5	(1) 150 (2) 150	592 740
YH5W5-51/130	35	51	40.8	75.0	150	130	112	400	65	3.1	2.5		
YH5W5-51/125	35	51	40.8	73.0	145	125	110	400	65	3.1	2.5		
YH5W5-52.7/134	35	52.7	42.2	77.0	154	134	114	400	65	3.1	2.5		
YH5W5-52.7/130	35	52.7	42.2	76.0	150	130	113	400	65	3.1	2.5		
YH5W5-52.7/125	35	52.7	42.2	73.0	145	125	110	400	65	3.1	2.5		
YH5W5-54/134	35	54	43.2	77.0	154	134	114	400	65	3.1	2.5		
YH5W5-54/130	35	54	43.2	76.0	150	130	113	400	65	3.1	2.5		
YH5W5-54/125	35	54	43.2	74.0	145	125	110	400	65	3.1	2.5		
YH5W5-84/208	63	84	67.2	122	245	208	178①	600	100	3.1		220	1295±5
YH5W5-84/221	63	84	67.2	125	254	221	188①	600	100	3.1			
YH5W5-90/224	63	90	72.5	130	258	224	188①	600	100	3.1			
YH5W5-94/233	63	94	75.2	133	268	233	195①	600	100	3.1			
YH5W5-96/250	110	96	76.8	145	287	250	213②	600	100	2.5			
YH5W5-100/260	110	100	80.0	151	299	260	221②	600	100	2.5			
YH5W5-102/265	110	102	81.6	154	305	265	226②	600	100	2.5			
YH5W5-108/281	110	108	86.4	163	323	281	239②	600	100	2.5			
YH5W5-116/302	110	116	92.8	175	347	302	256②	600	100	2.5			

注：① 30/60μs 1kA 下的残压。

② 30/60μs 2kA 下的残压。

表 8－1－171　电站型 3～110kV 复合外套座装式氧化锌避雷器技术参数

避雷器型号	系统额定电压（有效值）/kV	避雷器额定电压（有效值）/kV	避雷器持续运行电压（有效值）/kV	直流参考电压（U_{1mA}）/kV	陡波冲击电流下残压/kV	雷电冲击电流下残压/kV	操作冲击电流下残压/kV	2ms 方波通流容量/A	大电流冲击耐受/kA	爬电比距/（cm·kV^{-1}）		最大伞径/mm		总高/mm	
										(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
YH5WZ5－5/13.5	3	5	4.0	7.5	15.5	13.5	11.5	150	65	3.1		87			
YH5WZ5－10/27	6	10	8.0	15.0	31.0	27	23.0	150	65	3.1		87			
YH5WZ5－17/45	10	17	13.6	24.0	51.5	45	38.3	150	65	3.1		108			
YH5WZ5－17/45	10	17	13.6	24.0	50.5	44	37.5	150	65	3.1					
YH5W5－51/134	35	51	40.8	76.0	154	134	114	400	65	3.1	2.5	150	140	592 742	593±5 741±5
YH5W5－51/130	35	51	40.8	75.0	150	130	112	400	65	3.1	2.5				
YH5W5－51/125	35	51	40.8	73.0	145	125	110	400	65	3.1	2.5				
YH5W5－52.7/134	35	52.7	42.2	77.0	154	134	114	400	65	3.1	2.5				
YH5W5－52.7/130	35	52.7	42.2	76.0	150	130	113	400	65	3.1	2.5				
YH5W5－52.7/125	35	52.7	42.2	73.0	145	125	110	400	65	3.1	2.5				
YH5W5－54/134	35	54	43.2	77.0	154	134	114	400	65	3.1	2.5				
YH5W5－54/130	35	54	43.2	76.0	150	130	113	400	65	3.1	2.5				
YH5W5－54/125	35	54	43.2	74.0	145	125	110	400	65	3.1	2.5				
YH10W5－51/134	35	51	40.8	75.0	154	134	114	400	100	3.1	2.5				
YH10W5－51/130	35	51	40.8	73.0	150	130	112	400	100	3.1	2.5				
YH10W5－51/125	35	51	40.8	74.0	144	125	110	600	100	2.5		178	554		
YH10W5－51/120	35	51	40.8	72.0	140	120	108	600	100	2.5					
YH10W5－52.7/134	35	52.7	42.2	75.0	154	134	114	400	100	3.1	2.5	150	140	592 742	593±5 741±5
YH10W5－52.7/130	35	52.7	42.2	74.0	150	130	112	400	100	3.1	2.5				
YH10W5－52.7/125	35	52.7	42.2	72.5	144	125	110	600	100	2.5		178		554	
YH10W5－54/134	35	54	43.2	76.0	154	134	114	400	100	3.1	2.5	150		592，740	
YH10W5－54/130	35	54	43.2	75.0	144	130	112	600	100	2.5		178		554	
YH10W5－94/228	63	94	75.2	133	263	228	200	600	100	3.1		220		1295±5	
YH10W5－96/250	110	96	76.8	146	280	250	212	600	100	2.5					
YH10W5－100/260	110	100	80.0	152	291	260	221	600	100	2.5					
YH10W5－102/265	110	102	81.6	155	297	265	225	600	100	2.5					
YH10W5－108/281	110	108	86.4	164	314	281	239	600	100	2.5		220	1295±5		
YH10W5－116/302	110	116	92.8	176	338	302	257	600	100	2.5					
YH10W5－126/328	110	126	100.8	192	367	328	279	600	100	2.5					

表 8－1－172　并联电容器型 3～35kV 复合外套座装式氧化锌避雷器技术参数

避雷器型号	系统额定电压(有效值)/kV	避雷器额定电压(有效值)/kV	避雷器持续运行电压(有效值)/kV	直流参考电压(U_{1mA})/kV	雷电冲击电流下残压/kV	操作冲击电流下残压/kV	2ms 方波通流容量/A	大电流冲击耐受/kA	爬电比距/(cm·kV^{-1})		最大伞径/mm	总高/mm
									(1)	(2)		
YH5WR5－5/13.5	3	5	4.0	7.2	13.5	10.5	400	65	3.1		116	160±5
YH5WR5－10/27	6	10	8.0	14.4	27.0	21.0	400	65	3.1		120	225±5
YH5WR5－17/44	10	17	13.6	24.0	44	35.0	400	65	3.1		120	275±5
YH5WR5－17/42					42	34.0	600	100	3.1		140	354±5
YH5WR5－17/42					42	34.0	800		3.1			
YH5WR5－17/41					41	34.0	1000		3.1		158	360±5
YH5WR5－17/40					40	34.0	1200		3.1			
YH5WR5－48/134	35	48	38.4	72.5	134	105	400	65	3.1	2.5	150	592 740
YH5WR5－48/130					130				3.1	2.5		
YH5WR5－48/125					125				3.1	2.5		
YH5WR5－48/125	35	48	38.4	72.0	125	102	600	100	2.5		178	554
YH5WR5－48/120				71.0	120	102						
YH5WR5－48/134				73.0	134	105						
YH10WR5－48/134				73.0	134	105						
YH10WR5－48/125				72.0	125	104						
YH5WR5－48/125	35	48	38.4	73.0	125	104	800	100	2.5		178	554
YH5WR5－48/120					120							
YH5WR5－48/134					134							
YH10WR5－48/134					134							
YH10WR5－48/125					125							

表 8-1-172（续）

避雷器型号	系统额定电压(有效值)/kV	避雷器额定电压(有效值)/kV	避雷器持续运行电压(有效值)/kV	直流参考电压(U_{1mA})/kV	雷电冲击电流下残压/kV	操作冲击电流下残压/kV	2ms 方波通流容量/A	大电流冲击耐受/kA	爬电比距/(cm·kV^{-1})		最大伞径/mm	总高/mm
									(1)	(2)		
YH5WR5-48/134	35	48	38.4	74.0	134	105	1000	100	2.5		178	554
YH5WR5-48/125				74.0	125	105						
YH5WR5-48/120				73.0	120	102						
YH10WR5-48/134	35	48	38.4	73.0	134	105	1000	100	2.5		178	554
YH10WR5-48/125				71.0	125	103						
YH10WR5-48/120				70.0	120	100						
YH5WR5-51/134	35	51	40.8	72.5	134	105	400	65	3.1	2.5	150	592
YH5WR5-51/130					130				3.1		150	740
YH5WR5-51/125					125				3.1			
YH5WR5-51/134	35	51	40.8	73.0	134	105	600	100	2.5		178	554
YH5WR5-51/125				72.0	125	104						
YH5WR5-51/120				71.0	120	102						
YH10WR5-51/134				73.0	134	105						
YH10WR5-51/125				72.0	125	104						
YH5WR5-51/134	35	51	40.8	73.0	134	104	800	100	2.5		178	554
YH5WR5-51/125					125							
YH5WR5-51/120					120							
YH10WR5-51/134					134							
YH10WR5-51/125					125							

表 8-1-172（续）

避雷器型号	系统额定电压(有效值)/kV	避雷器额定电压(有效值)/kV	避雷器持续运行电压(有效值)/kV	直流参考电压(U_{1mA})/kV	雷电冲击电流下残压/kV	操作冲击电流下残压/kV	2ms 方波通流容量/A	大电流冲击耐受/kA	爬电比距/(cm·kV^{-1})		最大伞径/mm	总高/mm
									(1)	(2)		
YH5WR5-51/134	35	51	40.8	74.0	134	105	1000	100	2.5		178	554
YH5WR5-51/125				74.0	125	105						
YH5WR5-51/120				73.0	120	102						
YH10WR5-51/134	35	51	40.8	73.0	134	105	1000	100	2.5		178	554
YH10WR5-51/125				71.0	125	103						
YH10WR5-51/120				70.0	120	100						
YH5WR5-52.7/134	35	52.7	42.2	73.0	134	105	400	65	3.1	2.5	150	592
YH5WR5-52.7/130					130						150	740
YH5WR5-52.7/125	35	52.7	42.2	73.0	125	105	400	65	3.1	2.5	178	554
YH5WR5-52.7/134	35	52.7	42.2	73.5	134	105	600	100	2.5		178	554
YH5WR5-52.7/125				73.5	125	105						
YH10WR5-52.7/134				73.5	134	105						
YH10WR5-52.7/125				72.5	125	104						
YH5WR5-52.7/134	35	52.7	42.2	74.5	134	105	800	100	2.5		178	554
YH5WR5-52.7/125				74.5	125	105						
YH5WR5-52.7/120				72.5	120	104						
YH10WR5-52.7/134				74.5	134	105						
YH10WR5-52.7/125				72.5	125	104						

表 8-1-172（续）

避雷器型号	系统额定电压(有效值)/kV	避雷器额定电压(有效值)/kV	避雷器持续运行电压(有效值)/kV	直流参考电压(U_{1mA})/kV	雷电冲击电流下残压/kV	操作冲击电流下残压/kV	2ms 方波通流容量/A	大电流冲击耐受/kA	爬电比距/(cm·kV^{-1})		最大伞径/mm	总高/mm
									(1)	(2)		
YH5WR5－52.7/134	35	52.7	42.2	74.5	134	105	1000	100	2.5		178	
YH5WR5－52.7/125				74.5	125	105						
YH5WR5－52.7/120				73.5	120	103						
YH10WR5－52.7/134				74.5	135	105						
YH10WR5－52.7/125				73.5	125	105						
YH10WR5－52.7/120				71.0	120	103						
YH5WR5－54/134	35	54	43.2	75.0	134	105	600	100	2.5		178	554
YH5WR5－54/125					125							
YH10WR5－54/134	35	54	43.2	75.0	134	105	600	100	2.5			
YH5WR5－54/134	35	54	43.2	75.0	134	105	800	100	2.5			
YH5WR5－54/125					125							
YH10WR5－54/134					134							
YH5WR5－54/134	35	54	43.2	75.0	134	105	1000	100	2.5			
YH5WR5－54/125	35	54	43.2	75.0	125	105	1000	100	2.5		178	554
YH5WR5－54/122				74.0	122	104						
YH10WR5－54/134				75.0	134	105						
YH10WR5－54/130				75.0	130	105						
YH10WR5－54/125				74.0	125	104						

表 8-1-173　旋转电机型 3~20kV 复合外套座装式氧化锌避雷器技术参数

避雷器型号	系统额定电压/kV	避雷器额定电压/kV	避雷器持续运行电压/kV	直流参考电压(U_{1mA})/kV	陡波冲击电流下残压/kV	雷电冲击电流下残压/kV	操作冲击电流下残压/kV	2ms 方波通流容量/A	大电流冲击耐受/kA	爬电比距/(cm·kV^{-1})	最大伞径/mm	总高/mm
YH5W5-4/9.5	3.15	4	3.2	5.7	10.7	9.5	7.6	400	65	3.1	116	160±5
YH5W5-8/18.7	6.3	8	6.3	11.3	21.0	18.7	15.0	400	65	3.1	120	225±5
YH5W5-13.5/31	10.5	13.5	10.5	18.9	34.7	31.0	25.0	400	65	3.1	120	275±5
YH5W5-17.5/40	13.8	17.5	13.8	24.8	44.8	40.0	32.0	400	65	3.2	120	275±5
YH5W5-20/45	15.8	20	15.8	28.4	50.4	45.0	36.0	400	65	2.5		
YH5W5-21/48	20.0	21	16.8	29.0	54.6	48.0	44.0	1200	100	2.51	158	360±5
YH5W5-23/51	18.0	23	18.0	32.0	57.2	51.0	40.8	400	65	2.5	120	275±5
YH5W5-25/56.2	20.0	25	20.0	35.4	62.9	56.2	45.0	400	65	2.5		
YH2.5W5-4/9.5	3.15	4	3.2	5.7	10.7	9.5	7.6	200	65	3.11	97	155±5
YH2.5W5-8/19	6.3	8	6.3	11.3	21.0	19.0	15.0	200	65	3.11	97	230±5
YH2.5W5-13.5/31	10.5	13.5	10.5	18.9	34.7	31.0	25.0	200	65	3.11	108	275±5
YH1.5W5-2.4/6	3.15	2.4	1.9	3.4		6.0		200	65	3.11	97	155±5
YH1.5W5-5/12	6.3	5	4.0	7.1		12.0		200	65	3.11	97	230±5
YH1.5W5-8/19	10.5	8	6.4	11.3		19.0		200	65	3.11	108	275±5

表 8-1-174　变压器中性点型 110kV 复合外套座装式氧化锌避雷器技术参数

避雷器型号	系统额定电压/kV	避雷器额定电压/kV	避雷器持续运行电压/kV	直流参考电压(U_{1mA})/kV	雷电冲击电流下残压/kV	操作冲击电流下残压/kV	2ms 方波通流容量/A	大电流冲击耐受/kA	爬电比距/(cm·kV^{-1})	最大伞径/mm	总高/mm
YH1.5W5-55/132	110	55	44.0	79	132	126	400	65	3.1	150	592
YH1.5W5-60/144	110	60	48.0	86	144	135	400	65	3.1		
YH1.5W5-72/186	110	72	58.0	103	186	174	400	65	3.1		
YH1.5W5-73/200	110	73	58.4	105	200	165	400	65	3.1		

表 8－1－175　35～110kV 线路悬挂式复合外套氧化锌避雷器技术参数

避雷器型号	系统额定电压(有效值)/kV	避雷器额定电压(有效值)/kV	避雷器持续运行电压(有效值)/kV	直流参考电压(U_{1mA})/kV	陡波冲击电流下残压/kV	雷电冲击电流下残压/kV	操作冲击电流下残压/kV	2ms 方波通流容量/A	大电流冲击耐受/kA	爬电比距/(cm·kV^{-1})		避雷器雷电冲击 $U_{50\%}$ 放电电压/kV	最大伞径 ϕ/mm	总高 H/mm	备注
										1	2				
YH5WX5－17/50	10	17	13.6	25.0	57.5	50.0	42.5	150	65	3.1			108	275±5	无间隙型悬挂
YH5WX5－51/134	35	51	40.8	76.0	154	134	114	400	65	3.1	2.5		150	710±5	
YH5WX5－54/134	35	54	43.2	77.0	154	134	114	400	65	3.1	2.5				
YH10WX5－102/265	110	102	81.6	152.0	297	265	225	600	100	2.5			210	1435±10	
YH10WX5－108/281	110	108	86.4	164.0	314	281	239	600	100	2.5					
YH10WX5－114/300	110	114	91.2	173.0	336	300	255	600	100	2.5					
YH10WX5－120/320	110	120	96.0	184.0	358	320	272	600	100	2.5					
YH10WX5－126/328	110	126	100.8	190.0	367	328	279	600	100	2.5					
YH10CX5－84/240	110	84	67.2	132.0	276	240	204	600	100	2.5		560			外间隙型悬挂
YH10CX5－96/260	110	96	76.8	145.0	299	260	221	600	100	2.5					
YH10CX5－108/281	110	108	86.4	164.0	314	281	239	600	100	2.5					

表 8-1-176 金属氧化物避雷器的试验项目、周期和要求

序号	项 目	周 期	要 求
1	绝缘电阻	(1) 发电厂、变电所避雷器每年雷雨季节前； (2) 必要时	(1) 35kV 以上，不低于 2500MΩ； (2) 35kV 及以下，不低于 1000MΩ
2	直流 1mA 电压(U_{1mA})及 0.75U_{1mA}下的泄漏电流	(1) 发电厂、变电所避雷器每年雷雨季前； (2) 必要时	(1) 不得低于表 8-1-179 规定值； (2) U_{1mA}实测值与初始值或制造厂规定值比较，变化不应大于 ±5%； (3) 0.75U_{1mA}下的泄漏电流不应大于 50μA
3	运行电压下的交流泄漏电流	(1) 新投运的 110kV 及以上者投运 3 个月后测量 1 次；以后每半年 1 次；运行 1 年后，每年雷雨季节前 1 次； (2) 必要时	测量运行电压下的全电流、阻性电流或功率损耗，测量值与初始值比较，有明显变化时应加强监测，当阻性电流增加 1 倍时，应停电检查
4	工频参考电流下的工频参考电压	必要时	参考电压等于该工频电压峰值除以$\sqrt{2}$或制造厂规定
5	底座绝缘电阻	(1) 发电厂、变电所避雷器每年雷雨季前； (2) 必要时	自行规定
6	检查放电计数器动作情况	(1) 发电厂、变电所避雷器每年雷雨季前； (2) 必要时	测试 3～5 次，均应正常动作，测试后计数器指示应调到“0”

表 8-1-177 金属氧化物避雷器直流 1mA 电压 kV

避雷器额定电压有效值	避雷器持续运行电压有效值	直流 1mA 参考电压不小于				避雷器用途
		10kA 标称放电电流	5kA 标称放电电流	2.5kA 标称放电电流	1.5kA 标称放电电流	
5	4.0	—	7.2	—	—	
10	8.0	—	14.4	—	—	
12	9.6	—	17.4	—	—	
15	12.0	—	21.8	—	—	
17	13.6	—	24.0	—	—	电
51	40.8	—	73.0	—	—	
84	67.2	—	121	—	—	站
90	72.5	130	130	—	—	
96	75	140	140	—	—	用
100	78	145	145	—	—	
102	79.6	148	148	—	—	
108	84	157	157	—	—	

表8-1-177（续）

避雷器额定电压有效值	避雷器持续运行电压有效值	直流1mA参考电压不小于				避雷器用途
		10kA标称放电电流	5kA标称放电电流	2.5kA标称放电电流	1.5kA标称放电电流	
5	4.0	—	7.5	—	—	配电用
10	8.0	—	15.0	—	—	
12	9.6	—	18.0	—	—	
15	12.0	—	23.0	—	—	
17	13.6	—	25.0	—	—	
5	4.0	—	7.2	—	—	并联补偿电容器用
10	8.0	—	14.4	—	—	
12	9.6	—	17.4	—	—	
15	12.0	—	21.8	—	—	
17	13.6	—	24.0	—	—	
51	40.8	—	73.0	—	—	
84	67.2	—	121	—	—	
90	72.5	—	130	—	—	
4	3.2	—	5.7	5.7	—	电机用
8	6.3	—	11.2	11.2	—	
13.5	10.5	—	18.6	18.6	—	
17.5	13.8	—	24.4	—	—	
20	15.8	—	28.0	—	—	
23	18.0	—	31.9	—	—	
25	20.0	—	35.4	—	—	
2.4	1.9	—	—	—	3.4	电机中性点用
4.8	3.8	—	—	—	6.8	
8	6.4	—	—	—	11.4	
10.5	8.4	—	—	—	14.9	
12	9.6	—	—	—	17.0	
13.7	11.0	—	—	—	19.5	
15.2	12.2	—	—	—	21.6	
60	48	—	—	—	85	变压器中性点用
72	58	—	—	—	103	
96	77	—	—	—	137	
144	116	—	—	—	205	
207	166	—	—	—	292	

1.3.7.7　输电线路防雷

输电线路的距离长，遭受雷击的机会较多，因此电力系统雷害事故多发生在线路上。

在长距离的输电线路上，只要有一处发生雷击闪络形成短路之后，整个输电线路就要跳闸而引起送电的中断，经济损失较为严重。

为了消除或减少线路雷害事故，可以在线路上加装避雷线，当雷击时在绝大部分情形下雷电流就会被安全地导入大地。只有在极少数的情况下，当雷电流过大发生逆闪络时或者当雷绕过避雷线直击导线时，线路才会发生闪络。为了减少逆闪络的可能性，也可以加强线路绝缘或降低避雷线的接地电阻。

即使在雷击时线路发生冲击闪络，线路也不一定会产生稳定的电弧。例如，当雷电冲击波作用在工频电压的零点附近或者当闪络的距离过长时，线路不会因雷击而跳闸，也就是说送电不会中断，因此线路仍然可以说没有遭受雷害事故。为了使冲击闪络不致产生电弧，可以增加线路每串绝缘子的数目，或者在中性点不接地时装设消弧线圈，也可以在线路的适当处架设避雷器，利用这些措施来防止线路跳闸。

如果线路设有自动重合闸，那么即使在雷击时形成了稳定的电弧，也不一定会使送电中断，因为在绝大多数情况下，雷击短路是暂时性的故障，当断路器断开线路后，线路的绝缘性能就会很快地恢复，因此当断路器自动重合时，线路又能继续送电。由于线路断开的时间很短，所以对用电单位不会发生影响。

输电线路防雷的目的就是要使线路的雷害跳闸次数减少到最低限度，同时又要保证防雷措施的经济性，使线路的年运行费用最少。

1. 常规防护措施

1）装设避雷线（架空地线）

目前沿全线装设避雷线仍然是 110kV 及以上架空输电线路最重要和最有效的防雷措施，它除了能避免雷电直接击中导线而产生极高的雷电过电压以外，还是提高线路耐雷水平的有效措施之一。

110kV 线路一般沿全线架设避雷线，在山区和雷电活动特别强烈地区，宜架设双避雷线；在少雷区可不沿全线架设避雷线，但应装设自动重合闸装置。

66kV 线路负荷重要且所经地区平均年雷暴日数为 30 天以上的地区，宜沿全线架设避雷线。

35kV 及以下线路，一般不沿全线架设避雷线，但在山区和雷电活动特别强烈地区建议全线架设。

杆塔上避雷线对边导线的保护角，一般采用 20°～30°，山区宜采用较小的保护角。杆塔上两根避雷线间的距离不应超过导线与避雷线间垂直距离的 5 倍。

2）降低杆塔接地电阻

降低杆塔接地电阻是提高线路耐雷水平和减少反击概率的主要措施。杆塔的工频接地电阻一般为 10～30Ω，具体数值可按表 8－1－178 选取。

表 8－1－178　有避雷线的线路杆塔的工频接地电阻

土壤电阻率/(Ω·m)	≤100	>100～500	>500～1000	>1000～2000	>2000
接地电阻/Ω	10	15	20	25	30

3）加强线路绝缘

例如增加绝缘子串的片数，改用大爬距悬式绝缘子，增大塔头空气间距，等等，这样能提高线路的耐雷水平、降低建弧率，但实施起来会有相当大的局限性。一般为了提高线路的耐雷水平，均优先考虑采用降低杆塔接地电阻的办法。

4）耦合地线

对于某些建成投运后雷击故障频发的线路，作为一种补救措施，可在导线的下方加一条耦合地线，它虽然不能像避雷线那样拦截直击雷，但因具有一定的分流作用和增大导地线之间的耦合系数，所以也能提高线路的耐雷水平和降低雷击跳闸率。

5）安装线路避雷器

不作密集安装，仅用作线路上雷电过电压特别大或绝缘薄弱点的防雷保护。它能免除线路绝缘的冲击闪络，并使建弧率降为零。交流输电线路用复合外套金属氧化物避雷器并联连接在线路绝缘子的两端，用于限制线路上的雷电过电压及（或）操作过电压，复合外套金属氧化物避雷器分无间隙避雷器和带串联间隙避雷器。无间隙避雷器主要用于限制雷电过电压及操作过电压；带串联间隙避雷器，由复合外套金属氧化物避雷器本体和串联间隙两部分构成，主要用于限制雷电过电压及部分操作过电压。

对一般高度的杆塔，线路的耐雷水平主要与4个因素有关：线路绝缘子的50%放电电压；有无架空避雷线；雷电流强度；杆塔的接地电阻。为了减少输电线路的雷击故障，可以采取各种综合防雷措施，如降低杆塔接地电阻、提高线路绝缘水平、采用负角保护、架设耦合地线等。目前越来越多的工程采用避雷器保护方案。

6）采用中性点非有效接地运行

当绝缘闪络时，尽量减少由冲击电弧转变为稳定工频电弧的概率，应采用中性点非有效接地方式。这样可使由雷击引起的大多数单相接地故障能够自动消除，不致引起相间短路和跳闸。

7）自动重合闸

由于线路绝缘具有自恢复功能，大多数雷击造成的冲击闪络和工频电弧在线路跳闸后能迅速自行消除，线路绝缘不会发生永久性的损坏或劣化，因此装设自动重合闸的效果很好。

2. 一般线路的保护

（1）有避雷线的线路应设防止雷击档距中央反击导线。15℃无风时，档距中央反击导线与避雷线间的距离宜为

$$S_1 = 0.012l + 1 \qquad (8-1-114)$$

式中　S_1——档距中央反击导线与避雷线间的距离，m；

l——档距长度，m。

当档距长度较大，按式（8-1-114）计算出的S_1大于表8-1-183的数值时，可按后者要求。

（2）中雷及以上地区，35kV及66kV无避雷线线路应采取措施，减少雷击引起的多相短路和两相异点接地引起的断线事故。钢筋混凝土杆和铁塔宜接地，接地电阻不受限制，但多雷区不宜超过30Ω。钢筋混凝土杆和铁塔应充分利用其自然接地作用，在土壤电阻率不超过100Ω·m或有运行经验的地区，可不另设人工接地装置。

（3）钢筋混凝土杆铁横担线路和钢筋混凝土瓷横担线路的避雷线支架、导线横担与

绝缘子固定部分或瓷横担固定部分之间，应有可靠的电气连接并与接地引下线相连。主杆非预应力钢筋如上下已用绑扎或焊接连成电气通路，则可兼作接地引下线。利用钢筋兼作接地引下线的钢筋混凝土电杆，其钢筋与接地螺母、铁横担间应有可靠的电气连接。

(4) 与架空线路相连接的长度超过50m的电缆，应在其两端装设避雷器或保护间隙；长度不超过50m的电缆，只在任何一端装设即可。

(5) 绝缘避雷线的放电间隙应根据避雷线上感应电压的续流熄弧条件和继电保护的动作条件确定，一般采用10～40mm；在海拔1000m以上的地区，间隙应相应加大。

3. 线路交叉部分的保护

(1) 线路交叉挡两端的绝缘不应低于其邻挡的绝缘。交叉点应尽量靠近上下方线路的杆塔，以减少导线因初伸长、覆冰、过载温升、短路电流过热而增大弧垂的影响和降低雷击交叉挡时交叉点上的过电压。

(2) 同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时，两交叉线路导线间或上方线路导线与下方线路避雷线间的垂直距离，当导线弧垂温度为40℃时，不得小于表8－1－179所列数值。对按允许载流量计算导线截面的线路，还应校验当导线为最高允许温度时的交叉距离，且不得小于0.8m。

表8－1－179 同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时的交叉距离

系统标称电压/kV	3～10	20～110	220	330	500
交叉距离/m	2	3	4	5	6

(3) 3kV及以上的同级电压线路相互交叉或与较低电压线路、通信线路交叉时，交叉挡一般采取下列保护措施：

① 交叉挡两端的钢筋混凝土杆或铁塔（上、下方线路共4基），不论有无避雷线，均应接地。

② 3kV及以上线路交叉挡两端为木杆或木横担钢筋混凝土杆且无避雷线时，应装设金属氧化物避雷器或保护间隙。

③ 与3kV及以上电力线路交叉的低压线路和通信线路，当交叉挡两端为木杆时，应装置保护间隙。

门型木杆上的保护间隙，可由横担与主杆固定处沿杆身敷设接地引下线构成。单木杆针式绝缘子的保护间隙，可在距绝缘子固定点750mm处绑扎接地引下线构成。通信线的保护间隙，可由杆顶沿杆身敷设接地引下线构成。

如交叉距离比表8－1－179所列数值大2m及以上，则交叉挡可不采取保护措施。如交叉点至最近杆塔的距离不超过40m，可不在此线路交叉挡的另一杆塔上装设交叉保护用的接地装置、避雷器或保护间隙。

4. 大跨越挡的雷电过电压保护

(1) 大跨越挡的绝缘水平不应低于同一线路的其他杆塔。全高超过40m有避雷线的杆塔，每增高10m，应增加一个绝缘子。避雷线对边导线的保护角，对66kV及以下和

110kV及以上线路分别不宜大于20°和15°。接地电阻不应超过表8－1－178接地电阻选择中所列数值的50%，当土壤电阻率大于2000Ω·m时，也不宜超过20Ω。全高超过100m的杆塔，绝缘子数量应结合运行经验，通过雷电过电压的计算确定。

（2）未沿全线架设避雷线的35kV及以上新建线路中的大跨越段，宜架设避雷线。对新建无避雷线的大跨越挡，应装设避雷器或保护间隙，并应比表8－1－180的要求增加一个绝缘子。

（3）根据雷击挡距中央避雷线防止反击的条件，大跨越挡导线与避雷线间的距离不得小于表8－1－181的要求。

表8－1－180　线路绝缘子每串最少片数和最小空气间隙

系统标称电压/kV	20	35	66	110
雷电过电压间隙/cm	35	45	65	100
操作过电压间隙/cm	12	25	50	70
工频电压间隙/cm	5	10	20	25
悬垂绝缘子串的绝缘子个数	2	3	5	7

注：1. 绝缘子型式为XP型。

2. 绝缘子适用于0级污秽。污秽地区绝缘加强时，间隙一般仍用表中的数值。

表8－1－181　防止反击要求的大跨越挡导线与避雷线间的距离

系统标称电压/kV	35	66	110
距离/m	3.0	6.0	7.5

1.3.7.8　变配电所防雷

1. 变配电所建筑物防雷保护

装设避雷针保护整个变配电所建筑物以免直接雷击。避雷针是利用尖端放电原理，避免设置处所遭受直接雷击。同时变压器、其他电气设备或建筑物均在其保护范围内，以防止遭到直击雷的破坏。

避雷针可单独立杆，也可利用户外配电装置的构架或投光灯的杆塔，但变压器的门型构架不能用来装设避雷针，以防止雷击产生的过电压对变压器发生闪络放电。

选择独立避雷针的安装地点时，避雷针及其接地装置与配电装置之间应保持以下距离：在地上，由独立避雷针到配电装置的导电部分之间，以及到变电所电气设备与构架接地部分之间的空气隙一般不小于5m；在地下，由独立避雷针本身的接地装置与变配电所接地网间最近的地中距离一般不小于3m。

110kV及以上的配电装置，一般将避雷针装在配电装置的架构或房顶上，但在土壤电阻率大于100Ω·m的地区，宜装设独立避雷针。否则，应通过验算，采取降低接地电阻或加强绝缘等措施。

66kV 的配电装置允许将避雷针装在配电装置的架构或房顶上，但在土壤电阻率大于 500Ω·m 的地区，宜装设独立避雷针。

35kV 及以下高压配电装置架构或房顶不宜装避雷针。

装在架构上的避雷针应与接地网连接，并应在其附近装设集中接地装置。装有避雷针的架构上，接地部分与带电部分间的空气中距离不得小于绝缘子串的长度；但在空气污秽地区，如有困难，空气中距离可按非污秽区标准绝缘子串的长度确定。

2. 变电所进出线段防雷保护

装设架空避雷线及其他避雷装置作为变电所进出线段的防雷保护，主要是用来保护主变压器，以免雷电冲击波沿高压线路侵入变电所，损坏主变压器这一关键设备。为此，要求避雷器应尽量靠近主变压器安装。35kV 电力线路一般不采用全线装设架空避雷线的方法来防直击雷，但为防止变电所附近线路上受到雷击时，雷电沿线路侵入变电所破坏设备，需在变电所进出线 1～2km 段内装设架空避雷线作为保护，使该段线路免遭直接雷击。为使保护段以外的线路受雷击时侵入变电所内的过电压有所限制，一般可在架空避雷线的两端装设避雷器，其接地电阻不得大于 10Ω。

对于 35～110kV 变配电所的电缆进出线，在电缆和架空线的连接处应装设避雷器保护，其接地必须与电缆的金属外皮线连接。当电缆长度不超过 50m 或根据经验算法装设一组避雷器即能满足保护要求时，可只装设一组避雷器；当电缆长度超过 50m，而且断路器在雨季可能经常短路运行时，应在电缆末端装设避雷器。此外，靠近电缆段的 1km 架空线路上还应架设避雷线保护。

对于 10kV 以下的高压配电线路进出线段的防雷保护，通常也需装设避雷器，以保护线路断路器及隔离开关。

为了限制进入变电所的雷电过电压波的波前陡度和避雷器动作后流过的电流（例如不超过 5kA），均应采取措施防止或减少在直接接近变电所的一段线路上发生雷击闪络。为此，对未沿全线装设避雷线的 35～110kV 架空线路，应在接近变电所 1～2km 的进线段上装设避雷线；对全线装有避雷线的架空线路，亦应取接近变电所 2km 的线路段为进线保护段。

对上述两种进线保护段要采取措施提高其耐雷性能，具体要求如下：

（1）在进线保护段内，避雷线的保护角不宜超过 20°，最大不应超过 30°。

（2）采取措施（例如降低杆塔接地电阻）以保证进线保护段的耐雷水平不低于表 8－1－182 的要求。

表 8－1－182 进线保护段耐雷水平要求

额定电压/kV	35	66	110
耐雷水平/kA	30	60	75

3. 变电所雷电侵入波过电压的保护

采用避雷器进行雷电过电压保护时，除旋转电机外，对不同电压范围、不同接地方式的系统，避雷器选型如下：气体绝缘全封闭组合电器（GIS）和低电阻接地系统应该选用

金属氧化物避雷器；不接地、消弧线圈接地和高电阻接地系统，根据系统中谐振过电压和间歇性电弧接地过电压等发生的可能性及其严重程度，可任选金属氧化物避雷器或碳化硅避雷器。

下面介绍防雷保护接线的选择：

（1）3150～5000kV·A变电所35kV侧，可根据负荷的重要性及雷电活动的强弱等条件适当简化保护接线，变电所进线段的避雷线长度可减少到500～600m，但其首端避雷器F1或保护间隙（FG）的接地电阻不应超过5Ω（图8－1－60）。

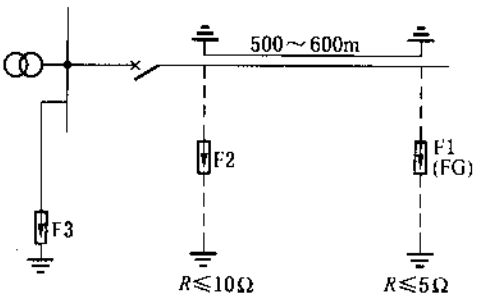
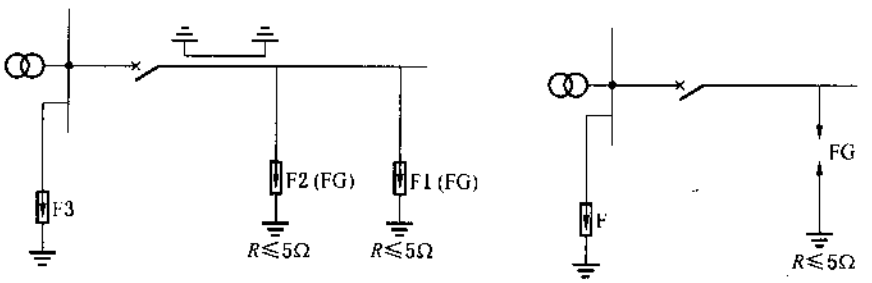


图8－1－60　3150～5000kV·A变电所35kV侧简易保护接线

（2）小于3150kV·A供非重要负荷的变电所35kV侧，根据雷电活动的强弱可采用图8－1－61a的保护接线；容量为1000kV·A及以下的变电所，可采用图8－1－61b的保护接线。



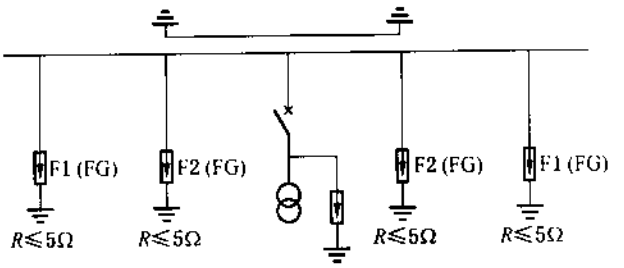
(a) 采用避雷线保护的接线　　(b) 不采用避雷线保护的接线

图8－1－61　小于3150kV·A变电所的简易保护

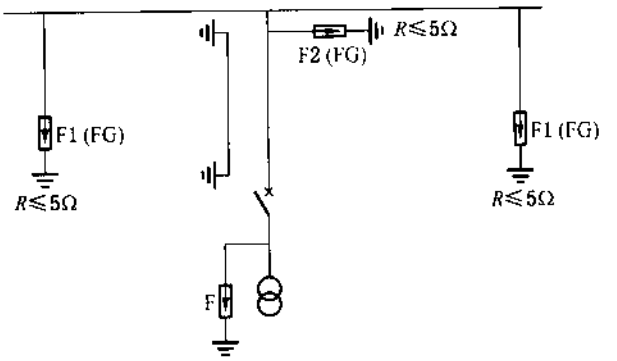
（3）小于3150kV·A供非重要负荷的35kV分支变电所，根据雷电活动的强弱，可采用图8－1－62的保护接线。

4. 低压侧装设避雷器

低压侧装设避雷器主要用在多雷区，防止雷电波沿低压线路侵入而击穿电力变压器的绝缘。当变压器的低压侧中性点不接地时（如IT系统），其中性点可装设金属氧化物避



(a) 分支线较短时的保护接线



(b) 分支线较长时的保护接线

图 8－1－62 小于 3150kV·A 分支变电所的简易保护

雷器或保护间隙。

1.3.7.9 旋转电机防雷

直接与架空线路连接的旋转电机（如发电机、同步调相机、变频机和电动机）的保护方式，应根据电机容量、雷电活动的强弱和供电可靠性的要求确定。

因旋转电机的绝缘比较薄弱，过高的避雷器残压，也会使其绝缘受到损坏，故由架空线直接供电的电机，一般均采用残压较低的避雷器。该避雷器通常安装在电机的出线处，并尽量靠近它。为了进一步削平侵入波的陡度和幅值，在避雷器上并联装设电容器，而且在进线段敷设避雷线或采用电缆进线，进线电缆段应直埋土中，以充分利用其金属外皮的分流作用。

旋转电机的雷电侵入波过电压保护，应采用旋转电机金属氧化物避雷器。

（1）单机容量为 25000～60000kW 的直配电机，应采用图 8－1－63 所示的保护接线。60000kW 以上的电机，不应与架空线路直接连接。

进线段上的避雷器的接地端，应与电缆的金属外皮和避雷线连在一起接地，接地电阻 R 不应大于 3Ω。

（2）单机容量为 6000～25000kW（不含 25000kW）的直配电机，宜采用图 8－1－64 所示的保护接线。在多雷区，也可采用图 8－1－63 所示的保护接线。

（3）单机容量为 6000～12000kW 的直配电机，如出线回路中无限流电抗器，可采用

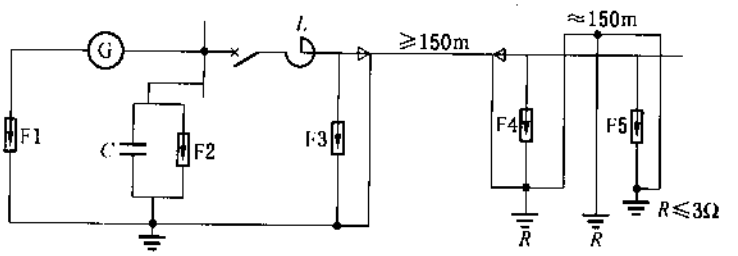


图 8－1－63　25000～60000kW 直配电机的保护接线

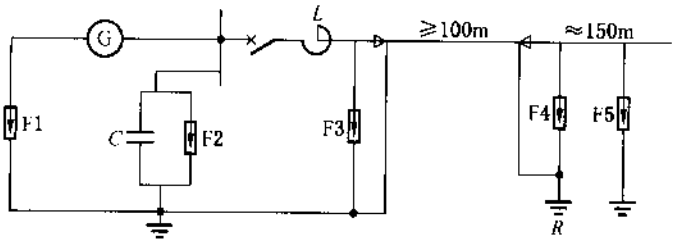
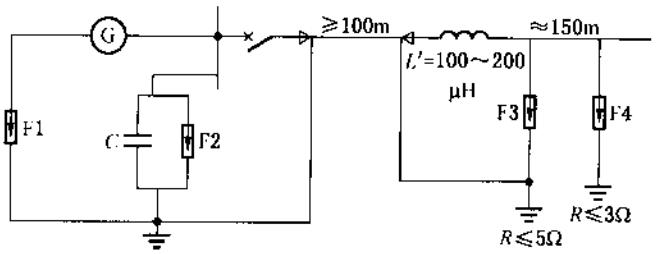
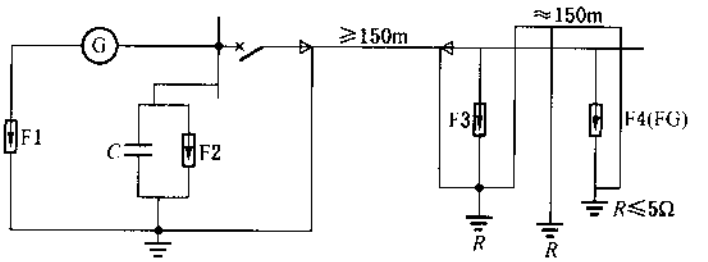


图 8　1－64　6000～25000kW（不含 25000kW）直配电机的保护接线



(a) 进线段采用电感线圈的保护接线



(b) 进线段采用避雷线的保护接线

图 8－1－65　6000～12000kW 直配电机的保护接线

图 8－1－65 所示的保护接线。在雷电活动特别强烈地区，应采用图 8－1－65a 所示的有电抗线圈的保护接线。

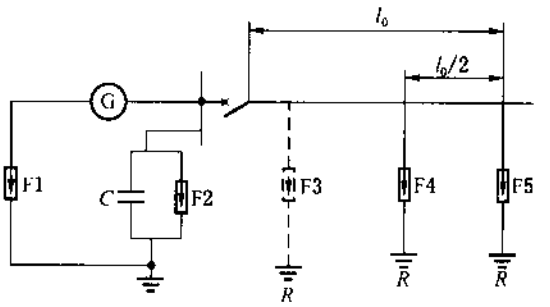
（4）单机容量为 1500～6000kW（不含 6000kW）或少雷区 60000kW 及以下的直配电机，可采用图 8－1－66 所示的保护接线。

进线保护段长度一般采用 450～600m。在进线保护段长度 l_0 内，应装设避雷针或避雷线。

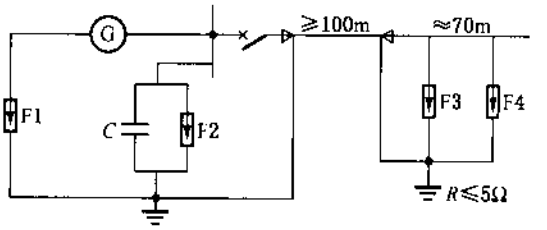
进线保护段长度与避雷器接地电阻的关系应符合下列要求：对 3kV 和 6kV 线路两者之比应大于等于 200，对 10kV 线路两者之比应大于等于 150。

图 8－1－66a 中的避雷器 F3 主要用来保护断路器或隔离开关。

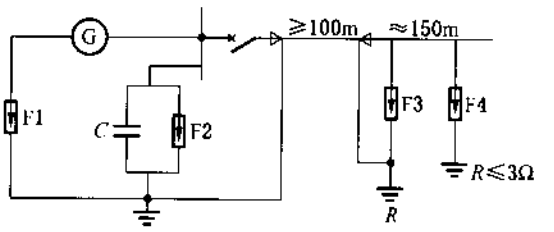
（5）单机容量为 1500～6000kW 或列车电站的直配电机，可采用图 8－1－67 有电抗



(a) 进线段采用 FE 的保护接线



(b) 进线段采用耦合地线的保护接线



(c) 进线段采用 F 的保护接线

图 8－1－66 1500～6000kW（不含 6000kW）或少雷区 60000kW 及以下直配电机的保护接线

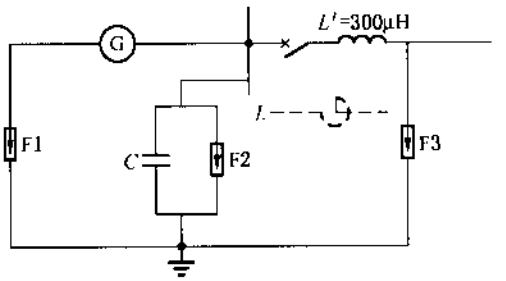
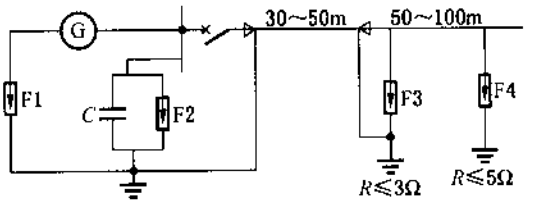


图 8－1－67　1500～6000kW 或列车电站直配电机的保护接线

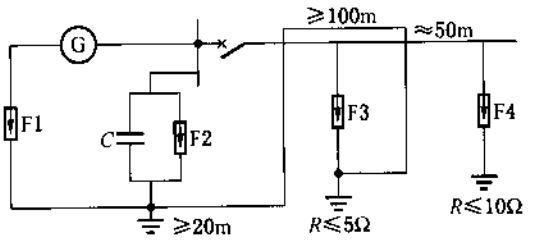
线圈或限流电抗器的保护接线。

单机容量为 1500kW 以下的直配电机，采用（6）、（7）规定的保护方式有困难时，也可采用图 8－1－67 所示的保护接线。

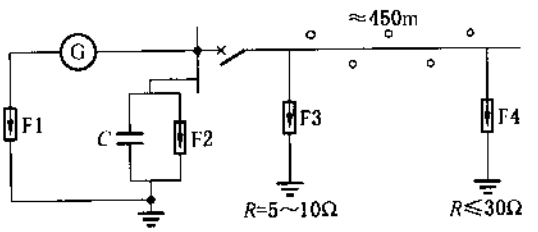
（6）单机容量为 1500kW 及以下的直配电机，应采用图 8－1－68 所示的保护接线。



(a) 进线段采用避雷器的保护接线



(b) 进线段采用避雷线的保护接线



(c) 进线段采用避雷针的保护接线

图 8－1－68　1500kW 及以下直配电机的保护接线

（7）容量为25000kW及以上的直配电机，应在每台电机出线处装设一组旋转电机用的避雷器；25000kW以下的直配电机，避雷器也应尽量靠近电机装设。在一般情况下避雷器可装在电机出线处，如接在每一组母线上的电机不超过两台，避雷器也可装在每一组母线上。

（8）如直配电机的中性点能引出且未直接接地，应在中性点上装设旋转电机中性点避雷器。

（9）保护直配电机用的避雷线，对边导线的保护角不应大于30°。

（10）为保护直配电机匝间绝缘和防止感应过电压，装在每相母线上的电容器，包括电缆段电容在内应为0.25～0.5μF；对于中性点不能引出或双排非并绕绕组的电机，应为1.5～2μF（图8－1－63至图8－1－68）。电容器应有短路保护。

（11）无架空直配线的发电机，如发电机与升压变压器之间的母线桥或组合导线无金属屏蔽部分的长度大于50m，应采取防止感应过电压的措施。在发电机回路或母线的每相导线上装设不小于0.15μF的电容器或旋转电机避雷器。与架空线路连接的三绕组自耦变压器、变压器（包括一台变压器与两台电机相连的三绕组变压器）的低压绕组如有开路运行的可能，以及发电厂双绕组变压器当发电机断开由高压侧倒送厂用电时，应在变压器低压绕组三相出线上装设避雷器，以防来自高压绕组的雷电波感应电压危及低压绕组绝缘；但如该绕组连有25m及以上金属外皮电缆段，则可不必装设避雷器。如已装设避雷器，则可不再采取措施，但该避雷器应选用旋转电机避雷器。

（12）在多雷区，经变压器与架空线路连接的非直配电机，如变压器高压侧的系统标称电压为66kV及以下时，为防止雷电过电压经变压器绕组的电磁传递而危及电机的绝缘，应在电机出线上装设一组旋转电机避雷器。变压器高压侧的系统标称电压为110kV及以上时，电机出线上是否装设避雷器可经校验确定。

1.4 矿井井下供电

1.4.1 井下供电系统

矿井供电方式取决于矿区范围、采用机械化方式、矿层结构、采煤方法、矿层埋藏深浅、井下涌水量大小等因素。目前主要有深井、浅井、平硐三种典型供电方式，深井供电系统设有井下中央变电所、采区变电所及工作面配电点；浅井供电系统在井下一般只设井底车场配电所及采区配电所。

1.4.1.1 井下中央变电所

1. 作用

井下中央变电所为井下供电的中心，它直接由地面变电所供电，并向下列设备及地点配电：

（1）采区变电所及高压电动机，例如主排水泵的高压电动机。

（2）井底车场及附近巷道的低压动力及照明。

（3）井下电机车。

2. 主接线

井下中央变电所主接线相关规定及要求：

（1）井下中央变电所高压母线接线及运行方式，应与相对应的地面变电所母线接线

及运行方式相适应。高压母线应采用单母线分段接线方式，并应设置分段联络开关，正常情况下分列运行，且高压母线分段数应与下井电缆回路数相协调。

（2）各类高压负荷宜均衡地分接于各段母线上，但同一用电设备的多台驱动电机应接在同一段母线上。

（3）当主排水泵为低压负荷且由井下中央变电所供电时，井下中央变电所应符合下列规定：

① 井下中央变电所内的动力变压器不应少于 2 台，当 1 台停止运行时，其余变压器应能保证一、二级负荷用电。

② 低压母线应采用单母线分段接线方式，并应设置分段联络开关，正常情况下分列运行。

（4）井下中央变电所内设备之间的电气连接：联台设备间应采用母线连接，其余设备间应采用电缆连接。

3. 位置选择及硐室布置

1）井下中央变电所的位置选择

（1）位于负荷中心，这样可以节省配电网路材料，减少电能与电压损失。

（2）供电电缆便于引入。

（3）变电所有良好的通风。

（4）井下中央变电所位置，应设置在靠近副井的井底车场范围内，并应符合下列规定：

① 经钻孔向井下供电的井下中央变电所，钻孔应靠近中央变电所。

② 井下中央变电所可与主排水泵房、牵引变流室联合布置，亦可单独设置硐室。当为联合硐室时，应有单独通至井底车场或大巷的通道。

③ 井下中央变电所不应与空气压缩机硐室联合或毗邻。

（5）每个水平应设置一个中央变电所。当多水平中的某一水平由临近水平供电经济合理时，该水平可不设中央变电所。

（6）当矿井涌水量很大，有几个主排水泵房时，应经过技术、经济比较后确定中央变电所的位置和数量。

2）硐室布置

考虑到上述条件，一般变电所硐室多设置在井底车场，直接与中央泵房相连，有条件时与电机车用的直流所联合建筑。

井下中央变电所硐室布置要注意：

（1）井下中央变电所内的动力变压器不应少于 2 台，当 1 台停止运行时，其余变压器应能保证一、二级负荷用电。

（2）井下中央变电所应特别注意防水、通风及防火问题。

（3）《煤矿安全规程》第四百六十条规定：永久性井下中央变电所和井底车场内的其他机电设备硐室，应砌碹或用其他可靠的方式支护。采区变电所应用不燃性材料支护。硐室必须装设向外开的防火铁门。铁门全部敞开时，不得妨碍运输。铁门上应装设便于关严的通风孔。装有铁门时，门内可加设向外开的铁栅栏门，但不得妨碍铁门的开闭。从硐室出口防火铁门起 5m 内的巷道，应砌碹或用其他不燃性材料支护。硐室内必须设置足够数

量的扑灭电气火灾的灭火器材。井下中央变电所和主要排水泵房的地面标高，应分别比其出口与井底车场或大巷连接处的底板标高高出0.5m。

（4）不得有渗水、滴水现象。

（5）硐室门的两侧及顶端，预埋穿电缆的钢管，钢管内径不应小于电缆外径的1.5倍。

（6）电缆沟应设有盖板，宜采用花纹钢盖板。

（7）硐室内应设置固定照明。

（8）硐室的电缆应用不带黄麻保护层的，硐室应设有砂箱及灭火器材。

（9）井下中央变电所硐室尺寸应按设备最大数量及布置方式确定，并应满足下列要求：

① 高压配电设备的备用位置，按设计最大数量的20%考虑，且不少于2台；当前期设备较少，后期设备较多时，宜按后期需要预留备用位置。

② 低压配电的备用回路，按最多馈出回路数的20%计算。

③ 主变压器为2台及2台以上时，不预留备用位置；当为1台时，预留1台备用位置。

④ 中央变电所内设备布置时，其通道尺寸不宜小于表8－1－183～表8－1－185规定。

表8－1－183 高压开关柜（箱）通道尺寸 mm

开关柜（箱）型式	操作走廊（正面）		维护走廊	
	单列布置	双列布置	背面	侧面
固定式	1500	2000	800	800
手车式	1800	2100	800	800
隔爆式	1500	2000	500～800	1000

表8－1－184 低压开关柜（箱）通道尺寸 mm

开关柜（箱）型式	操作走廊（正面）		维护走廊	
	单列布置	双列布置	背面	侧面
固定式	1500	1800	800	800
手车式	1800	2000	800	800
隔爆式	1500	1800	500	1000

表8－1－185 变压器通道尺寸 mm

开关柜（箱）型式	操作走廊（正面）		维护走廊	
	单列布置	双列布置	背面	侧面
固定式	1500	—	500	800
手车式	1500	—	500	1000
隔爆式	1500	1800	500	1000

（10）高、低压配电设备同侧布置时，高、低压配电设备之间的距离应按高压维护走廊尺寸考虑。高、低压配电设备互为对面布置时，走廊应按高压单列操作走廊尺寸考虑。

（11）井下中央变电所应在硐室的两端各设一个出口。

（12）在布置设备时，高、低压配电装置应分别布置；各设备之间应留 0.8m 以上的间距；硐室内各种设备与墙壁之间应留出 0.5m 以上的通道，不需要从两侧或后面进行检查的设备可以不留通道。

（13）井下中央变电所的高压馈电线上，必须装设有选择性的单相接地保护装置。

（14）硐室内的电缆应悬挂在电缆沟中或墙壁上，电缆沟应用带有网栅的盖板覆盖。

（15）机电硐室的空气温度不得超过 30℃，空气温度超过 34℃时，必须停止供电。

（16）在机电硐室的出入口处，应分别配备 2～4 个适用于电气火灾的灭火器，以及不少于 0.2m^3 的干燥的灭火砂和撒砂工具（或配置同体积的砂袋，但每个砂袋重量不得超过 5kg）。

（17）机电硐室和机电设备，一切可能危及人身安全的部分及转动部位，均须设防护罩、防护栏，并悬挂危险警告标志。

（18）变电所和有高压电气设备的硐室（含移动变电站）内，要有经定期试验合格的绝缘手套、绝缘靴和绝缘台，无人值班的变电所要设有瓷瓶支持的合格绝缘台。

（19）硐室入口处应悬挂“非工作人员禁止入内”的警告牌和硐室名称牌。硐室内有高压电气设备时，入口处和硐室内都必须在明显处悬挂“高压危险”牌。

变电所硐室的主要设备有高压配电箱、低压配电装置、低压动力及照明用的变压器。高、低压配电装置应根据规程要求，按照井下不同的条件，分别选用矿用一般型或矿用隔爆型。

井下中央变电所的设备布置一般如图 8－1－69 所示。

4. 下井供电电压等级的选择

《煤矿安全规程》规定：井下各级配电电压和各种电气设备的额定电压等级中，高压不超过 10000V。目前，煤矿下井电缆供电电压有 6kV、10kV 两种，随着矿井生产规模的不断扩大，10kV 下井供电的优势逐渐显现：

（1）现在大部分地方煤矿的电源，取自电力系统 10kV 电压供电，直接 10kV 下井供电，节省了投资，减少了损耗，提高了供电系统可靠性。

（2）随着井下采掘运机械化的发展，一个年产 3～6Mt 的大型煤矿，井下电气设备容量达 16000～32000kW，井下送电距离平均达 2.5～3km，如仍用 6kV 供电已经不能满足生产要求。把下井供电电压提高到 10kV，电网输送能力可增加 3 倍，有时可减少设置在风井的 35/6kV 变电站，节约了投资。

1.4.1.2　采区变电所

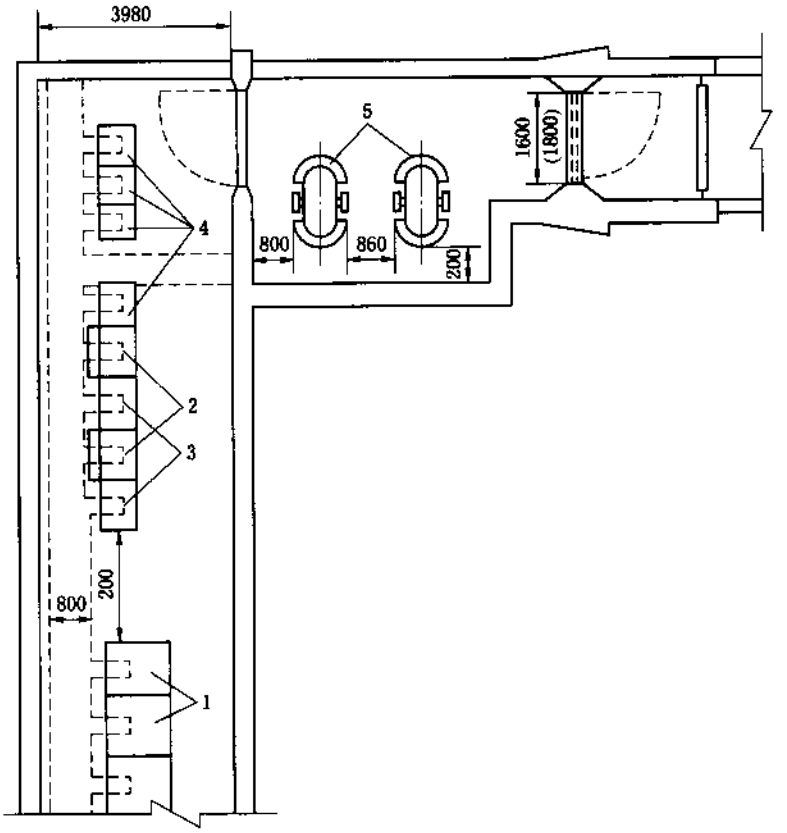
1. 作用

采区变电所为采区用电中心，其任务是将井下中央变电所送来的高压电或是地面直供的高压电变为低压电，并将此电力配送至采掘工作面及其他设备。

2. 主接线

井下采区变电所主接线相关规定及要求：

（1）对井下变（配）电所（含井下各水平中央变（配）电所和采区变（配）电所）、



1—高压配电箱；2—硅整流器柜；3—直流配电箱；4—低压配电装置；5—隔爆干式变压器

图 8-1-69 井下中央变电所设备布置图

主排水泵房和下山开采的采区排水泵房供电的线路，不得少于两回路。当任一回路停止供电时，其余回路应能担负全部负荷。向局部通风机供电的井下变（配）电所应采用分列运行方式。

（2）严禁井下配电变压器中性点直接接地。

3. 位置选择及硐室布置

1）采区变电所位置选择

（1）通风良好，且进出线和运输设备方便。

（2）每个采区最好只设一个变电所对全采区采掘工作面供电。如不可能，也尽量少设变电所，并应尽量减少变电所的迁移次数。

（3）尽量接近负荷中心，变电所至工作面的最远距离与最大容量用电设备的电压损失，应保证在允许的范围以内。

（4）顶、底板稳定并避免淋水。实际上，在大多数情况下，是把采区变电所设置在上（下）山巷道靠近运输平巷的地方。

（5）采区变电所宜设在采区上（下）山的运输斜巷与回风巷之间的联络巷内，或在车场附近的巷道内。

（6）在多煤层的采区中，各分层是否分别设置或集中设置变电所，应经过技术、经济比较后择优选择。

（7）当采用集中设置变电所时，应将变电所设置在稳定的岩（煤）层中。

2）采区变电所硐室布置

（1）为了通风良好，变电所硐室长度超过 6m 时，必须在硐室的两端各设一个出口，必须有独立的通风系统。

（2）按《煤矿安全规程》第四百六十条执行。

（3）硐室敷设的电缆应选用交联电缆，硐室应设有砂箱及灭火器材。

（4）硐室中高、低压设备应分开布置。

（5）硐室中所有电气设备的外壳部必须接地。接地干线沿墙壁敷设，接地极埋入水沟中或潮湿的地方。

（6）硐室内不宜设电缆沟，高低压电缆宜吊挂在墙壁上。

（7）变压器宜与高低压电气设备布置于同一硐室内，不应设专用变压器室。

（8）硐室门的两侧及顶端应预埋穿电缆的钢管，钢管内径不应小于电缆外径的 1.5 倍。

（9）硐室内应设置固定照明。

（10）单电源进线的采区变电所，当变压器不超过两台且无高压出线时，可不设置电源进线开关；当变压器超过两台或有高压出线时，应设置进线开关。

（11）双电源进线的采区变电所，应设置电源进线开关。当一回路供电、另一回路备用时，母线可不分段；当两回路电源同时供电时，母线应分段并设联络开关，正常情况下应分列运行。

（12）由井下中央变电所向采区供电的单回电缆线路上串接的采区变电所数不应超过 3 个。

（13）硐室入口处必须悬挂“非工作人员禁止入内”字样的警示牌。硐室内必须悬挂与实际相符的供电系统图。硐室内有高压电气设备时，人口处和硐室内必须在明显地点悬挂“高压危险”字样的警示牌。采区变电所应设专人值班。无人值班的变电硐室必须关门加锁，并有值班人员巡回检查。硐室内的设备，必须分别编号，标明用途，并有停送电的标志。

（14）井下由采区变电所、移动变电站或配电点引出的馈电线上，应装设短路、过负荷和漏电保护装置。

（15）采区变电所的低压检漏保护装置，应使用不断电试验装置和漏电脱扣机构的后备保护装置。

（16）硐室内的电缆应悬挂在电缆沟中或墙壁上，不得随便置于地上或凌乱悬挂。

（17）机电硐室的空气温度不得超过 30℃，空气温度超过 34℃时，必须停止供电。

（18）对高瓦斯双突矿井，其采区变电所应设双路电源且分段运行，电源分别来自中央变电所或由地面工广变电所提供。

3）采区变电所的主要设备

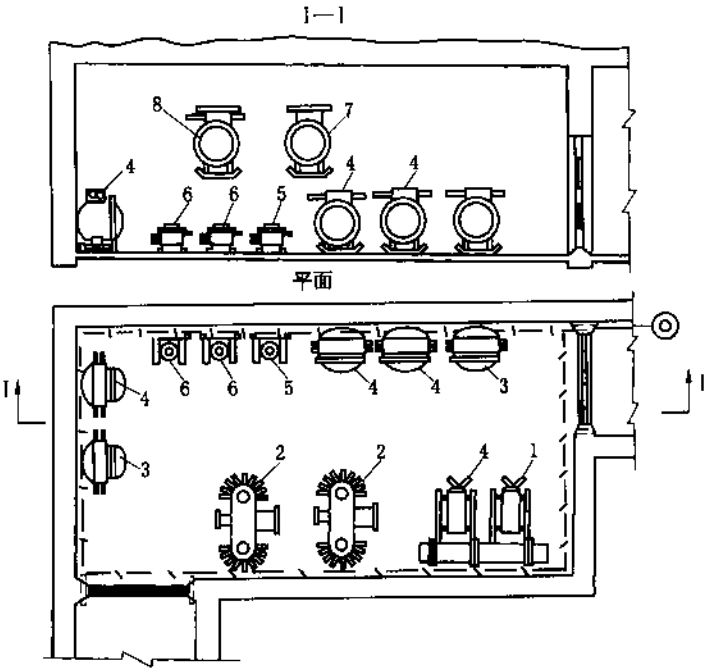
（1）用于进线、通路、断路及保护降压变压器的高压配电箱。

（2）用于将 6kV 或 10kV 降至 380V、660V 或 1140V 的动力变压器。

(3) 用于通路、断路及保护低压供电线路的低压隔爆馈电开关。

(4) 用于对变电所硐室及附近巷道照明用的变压器、检漏继电器等。

采区变电所硐室主要设备布置如图 8-1-70 所示。



1—高压配电箱；2—矿用变压器；3、4—隔爆自动开关；5、6—隔爆手动启动器；7—照明综合保护装置；8—馈电开关

图 8-1-70 采区变电所硐室主要设备布置图

由图 8-1-70 可知，变电所每台动力变压器高压侧都装有一台高压配电箱，变压器低压侧各装有一台总开关，采掘工作面等处的用电则是经过各分开关配送出去，照明变压器一般是用手动开关控制。井下照明和信号装置，应采用具有短路、过载和漏电保护的照明信号综合保护装置配电。

4) 装在硐室中的采区变电所的缺点

(1) 硐室开拓费高。

(2) 变电所迁移时停电时间长。

(3) 变电所距工作面的距离较远，电缆中电压损失较大。

因此，对供电距离远、满足不了供电技术要求的、机械化程度较高的采区，特别是综合机械化的采区，应采用移动变电站。

1.4.1.3 移动变电站

1. 作用

移动变电站就是由特制的高压配电装置、干式变压器及低压配电装置所组成的整体，放在车子上，在平巷（顺槽）的轨道上移动，距工作面一般为 50～300m，用来为工作面

电气设备供电。

2. 移动变电站适用情况及要求

（1）下列情况宜采用移动变电站供电：

① 综采、连采及综掘工作面供电。

② 由采区固定变电所供电困难或不经济时。

③ 独头大巷掘进、附近无变电所可利用时。

（2）向采煤工作面供电的移动变电站及设备列车宜布置在进风巷内，且距工作面的距离为 100 ~ 150m。

（3）由采区变电所向移动变电站供电的单回电缆供电线路上，串接的移动变电站数不宜超过 3 个。不同工作面的移动变电站不应共用电源电缆。

（4）全封闭式移动变电站、箱体应有可靠的保护接地。移动变电站和用电设备应采用橡套电缆的专用接地芯线接地或接零，并应配备相应的地线监测系统。

（5）巷道内移动变电站或平板车上综采设备的最突出部分，与巷帮支护的距离不得小于 0.3m。

（6）井下由移动变电站或配电点引出的馈电线上，应装设短路、过负荷和漏电保护装置。

（7）移动变电站应装设局部接地极。

（8）由架空线向移动式高压电气设备和移动变电站供电的分支线路应采用橡套电缆。

（9）移动变电站向移动电气设备供电的输配电线路的电压高于 1kV 时，应装设短路和过负荷保护装置。

（10）爆破危险区的架空输电线、电缆和移动变电站等，在爆破时应停电。恢复送电前，必须对这些线路进行检查，确认无损后方可送电。

（11）安装在巷道内的移动变电站、综采工作面设备列车上的机电设备等最突出部分，同巷道支护之间的距离不应小于 250mm，同输送机的距离不得小于 700mm。

3. 井下 3.3kV 供电

随着机械化水平的不断提高，综采工作面装机容量由过去几百千瓦发展到几千千瓦，用电容量越来越大，1.14kV 供电系统越来越不适用（从电压损失、设备的启动电流、电缆截面等方面考虑），将供电电压提高到 3.3kV 已迫在眉睫。国内大部分的高产高效综采工作面大都采用了 3.3kV 供电系统。

高产高效工作面的装机容量不断增大，供电距离不断延伸、系统的电压损失、设备的启动电流、启动压降都增大等问题，在原有的 1.14kV 供电系统中不断暴露出来，主要表现为重载启动电动机时间过长和真空磁力启动器在吸合后保持不住。这些影响了工作面设备性能的发挥。而把 1.14kV 供电系统升压到 3.3kV，这一问题就可以得到缓解，同时可带来明显的经济效益。

为适应高产、高效综采设备对电力的需求，采区工作面 3.3kV 供电系统必须满足安全、可靠、便于操作和维护等基本要求，同时还必须具备远距离输送大功率负荷的能力。因此，在设计供电系统时，不仅要保证供电系统的技术要求，具备较好的技术经济指标，同时还应考虑今后全自动化工作面关于供电系统的发展趋势。鉴于目前煤矿井下实际情况，建议采用 3.3kV 和 1140V 混合供电系统，对单机容量较大的采煤机、工作面刮板输

送机等设备采用3.3kV供电电压，以保证采煤机、工作面刮板输送机等设备频繁启动的要求；对装载机、液压泵等单机容量较小的设备，仍采用1140V电压供电，以降低整个供电系统的成本。

1.4.1.4 工作面配电点

1. 作用

为了便于操作工作面的动力设备，必须在工作面附近巷道中设置控制开关和启动器，由这些装置所组成的总体叫做工作面配电点。

工作面配电点可以分为采煤与掘进两种，它是随着工作面的推进而定期地移动的。工作面配电点是由采区变电所或移动变电站供电，并通过控制开关及启动器把电能送至工作面的用电设备。

2. 井下工作面配电点相关要求

（1）《煤矿安全规程》第四百六十一条规定：采掘工作面配电点的位置和空间必须能满足设备检修和巷道运输、矿车通过及其他设备安装的要求，并用不燃性材料支护。

（2）综采工作面的动力电缆应敷设在刮板输送机挡煤板的电缆槽内，采煤机的移动电缆应整齐地盘放在电缆架上；综采工作面采煤机的移动段电缆，必须放入电缆槽由拖拽链牵引伸缩。采煤机的固定段电缆和刮板输送机电缆必须设在刮板输送机挡煤板的下层电缆槽内；照明、通信、控制电缆应在支架的掩护梁下方，可同主供液胶管并行整齐敷设，但应敷设在其上方；在工作面端头支护段，吊挂的电缆应用胶皮包扎防护，可将各种电缆集中包扎，但此段电缆不得有连接头，不得将电缆同胶管混吊。

3. 采区供电系统的拟定原则

采区供电系统是根据采区机械配置图来拟制的。采区供电系统的拟制应符合安全、经济、操作灵活、系统简单、保护完善和便于检修等项要求。其原则如下：

（1）在保证用电可靠的前提下，力求所用开关、启动器及电缆等设备最省。

（2）当采区变电所动力变压器多于一台时，应合理分配变压器的负荷，原则上一台变压器负担一个工作面的用电设备（综合机械化工作面例外），这样可以减少事故时停电的范围。

（3）采煤机组与运输巷输送机宜采用单独电缆供电，自工作面配电点到各个动力设备宜采用辐射式供电，上山及运输巷运输机应采用干线式供电。

（4）配电点启动器在3部以下者，一般不设配电点进线自动开关。

（5）工作面配电点最大容量电动机用的启动器应靠近配电点进线，这样可以减少启动器间连接电缆的截面。

（6）上山绞车一般多在绞车房设置变压器供电，上山输送机多在上山入口处设置变压器供电。

供电系统用单线图画出，图中应标出开关、启动器、变压器、动力设备的型号、容量或电流等。另外，还应标出所选用的电缆型号、截面、芯线数目及长度等。

1.4.1.5 主接线示例

井下中央变电所主接线示例如图8-1-71、图8-1-72所示。

采区变电所主接线示例如图8-1-73、图8-1-74所示。

移动变电站主接线如图8-1-75所示。

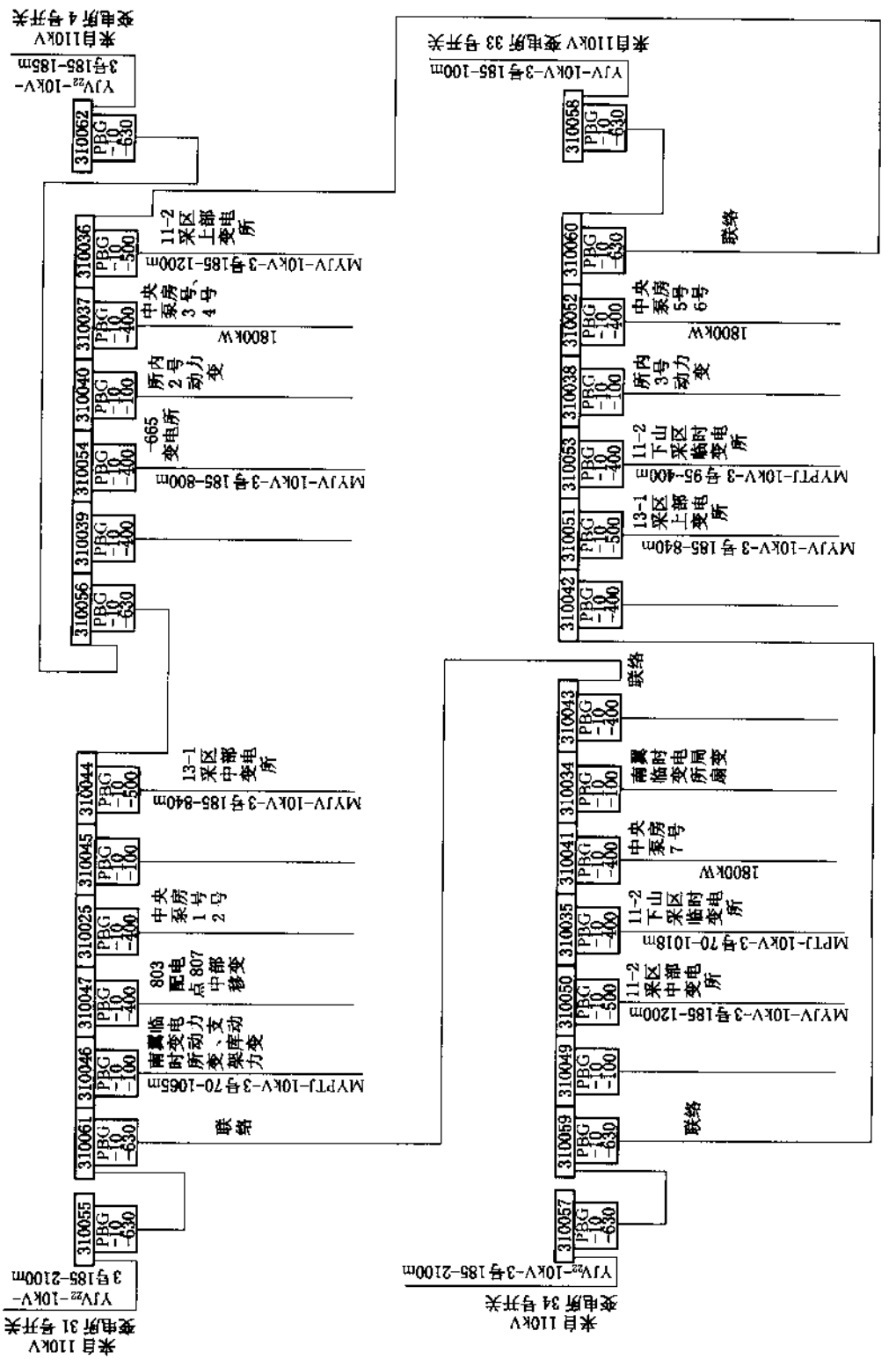


图 8－1－71　某矿井下中央变电所主接线图

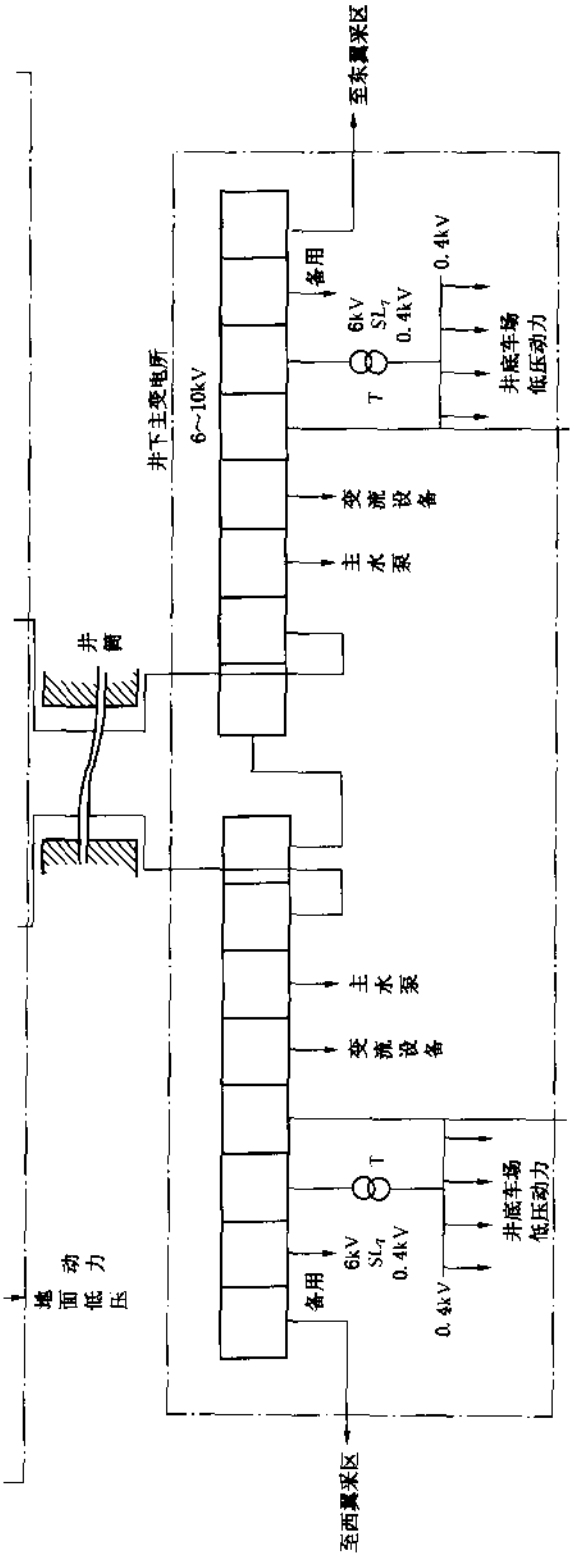


图 8-1-72 典型井下中央变电所主接线图

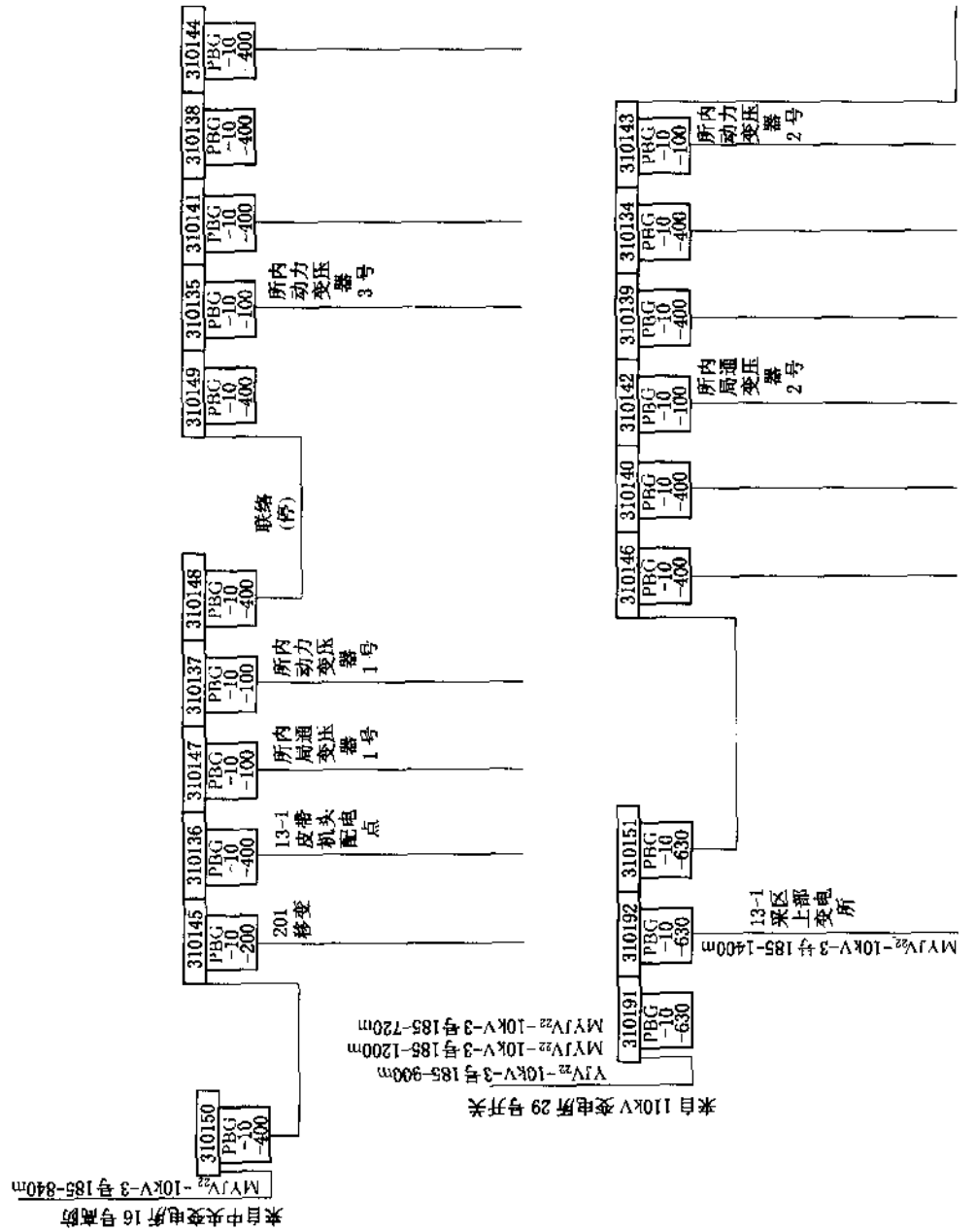
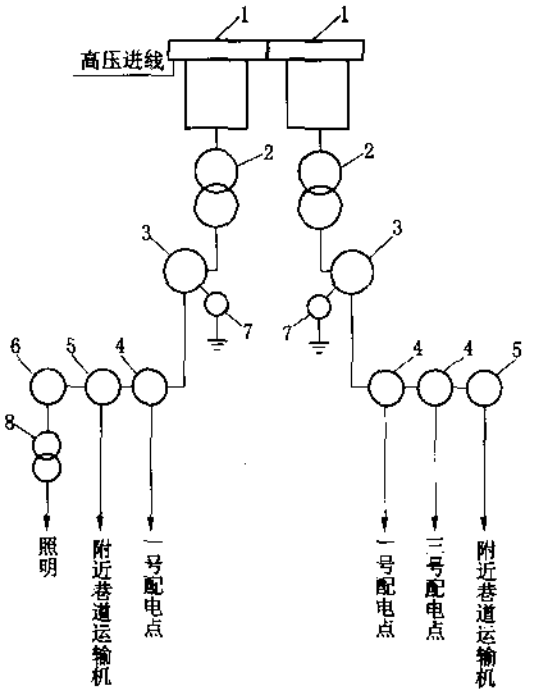


图 8-1-73　某矿采区变电所主接线图



1—高压配电箱；2—矿用变压器；3、4—低压隔爆自动开关；5、6—隔爆手动启动器；7—检漏继电器；8—照明变压器

图 8－1－74 采区变电所原则接线图

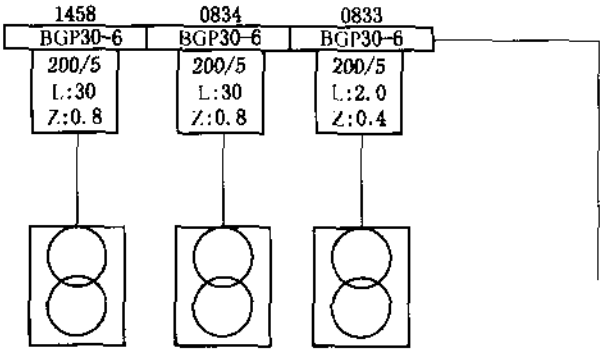


图 8－1－75 某矿移动变电站主接线图

采煤工作面配电点的布置及配电示意图如图 8－1－76 所示。主接线示例如图 8－1－77 所示。

1.4.2 井下供电设备

1.4.2.1 矿用电气设备的分类和要求

矿用电气设备分为矿用一般型电气设备和矿用防爆电气设备两大类。

1. 矿用一般型电气设备

名称	型号	参数	名称	型号	参数
采煤机	MGTY50/1715-3.3D	1715kW	上风巷无极绳绞车	SQ-1200/75	75kW
链板机	SGZ-1000/2×700	2*700kW 长度 190 m	工作面运输巷无极绳绞车	SQ-1200/75	75kW
转载机	SZZ-1000/400	400kW 长度 48m	上风巷内绞	JD25	25kW
破碎机	PCM250	250kW	工作面运输巷内绞	JD25、JD11.4 各 1 台	25kW 11.4kW
乳化泵	BRW400/31.5	250kW 管路长度 900m	液压支架	ZY9200-24/50	108 架
喷雾泵	BPW-315/10	75kW	过渡架	ZZG9200/21/42	6 架
工作面运输巷带式输送机	DTL1200/2*315S	2*315kW 长度 860m			

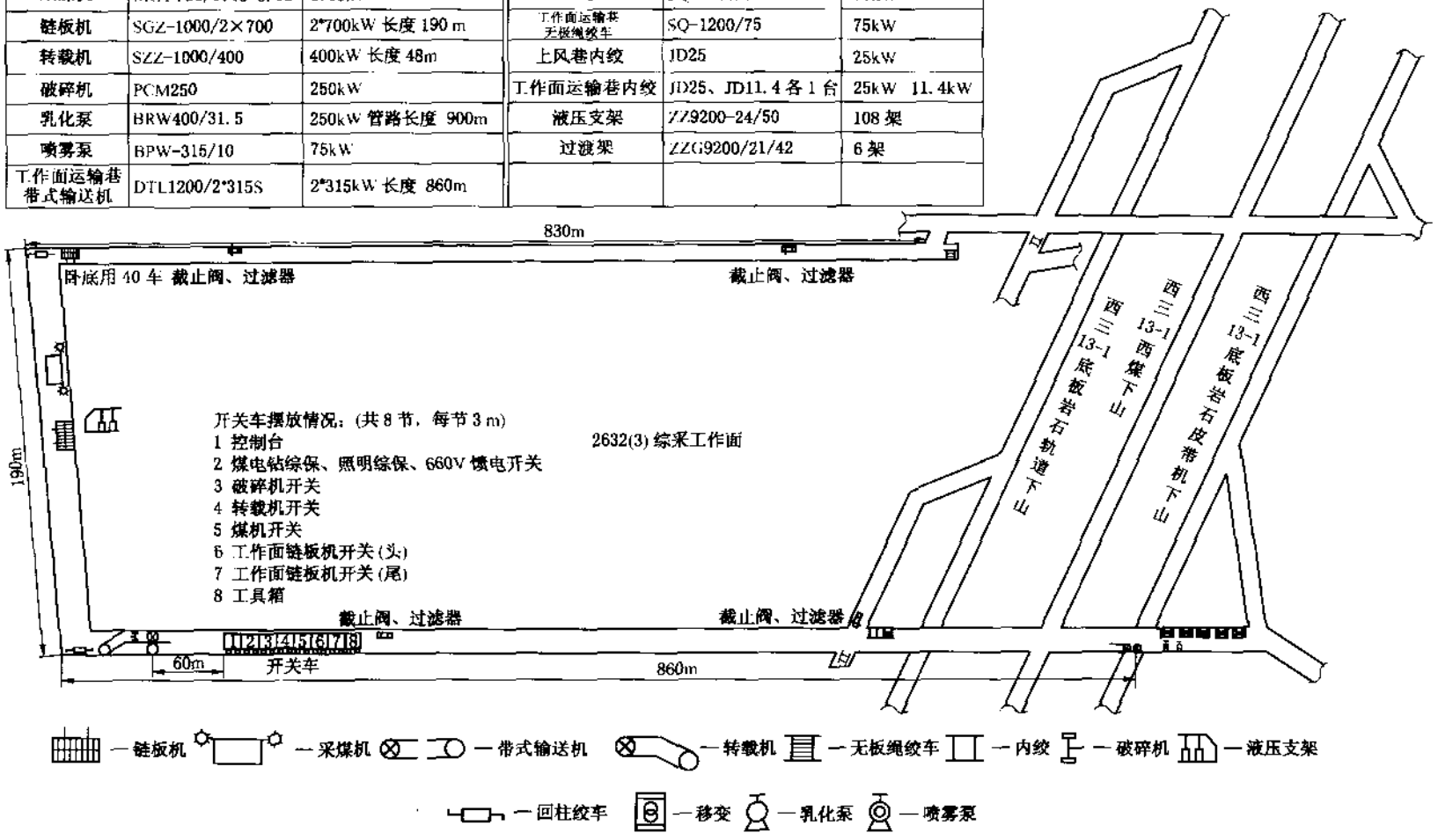


图 8-1-76 某矿采煤工作面配电点布置及配电示意图

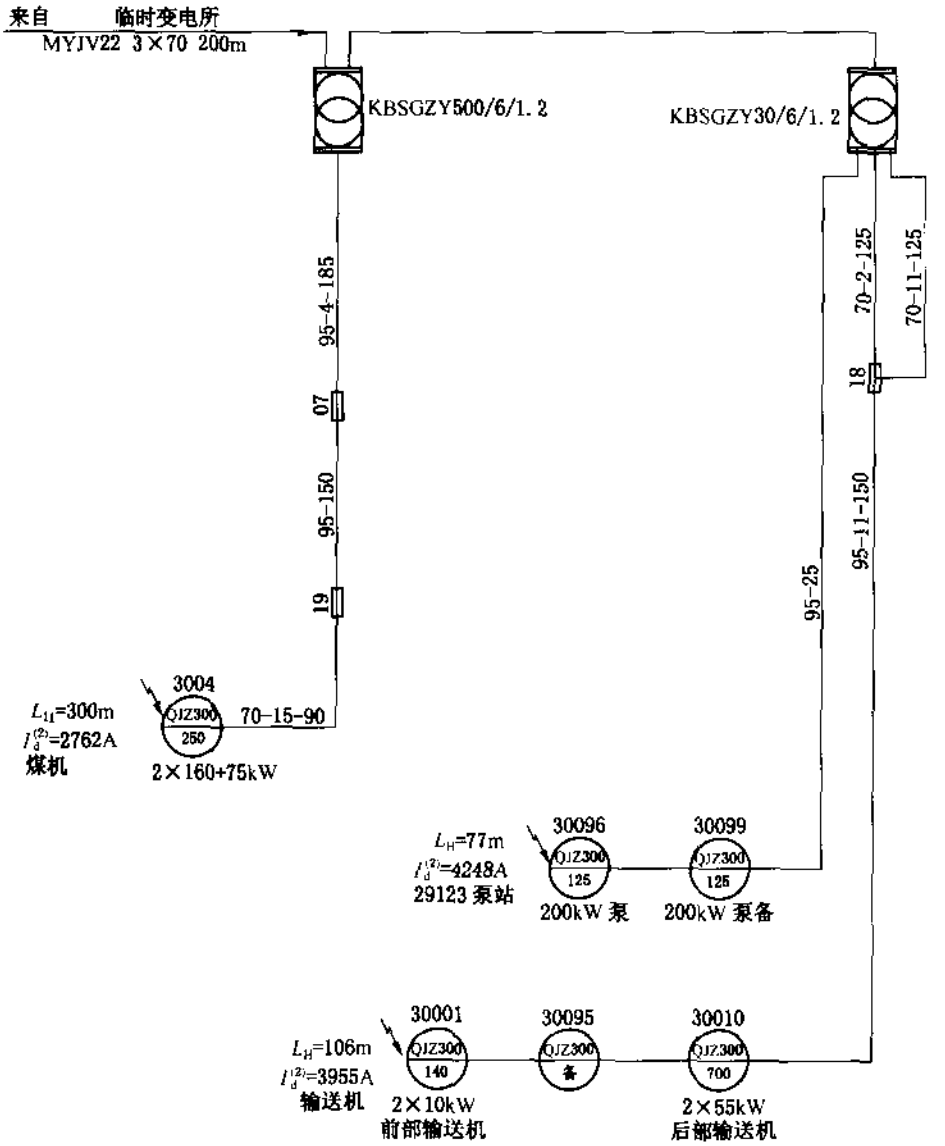


图 8-1-77 某矿工作面

矿用一般型电气设备是一种煤矿井下用的非防爆型电气设备，它只能用于井下无瓦斯、煤尘爆炸危险的场所。

对矿用一般型电气设备的基本要求是：外壳坚固、封闭，能防止从外部直接触及带电部分；防滴、防溅、防潮性能好；有电缆引入装置，并能防止电缆扭转、拔脱和损伤；开关手柄和门盖之间有连锁装置等。矿用一般型电气设备外壳的明显处，均有清晰的永久性凸纹标志“KY”。

2. 矿用防爆型电气设备

使用在煤矿井下的防爆电气设备，应为国家标准（GB 3836）中防爆电气设备的 I

类。矿用防爆型电气设备共分有 9 种防爆形式：隔爆型，本质安全型，增安型，正压外壳型，充油型，充砂型，n 型，浇封型，气密型，特殊型。

井下供电设备的选用首先应符合《煤矿安全规程》的规定，见表 8－1－186。井下电气设备的选用还应贯彻经济和维护简便的原则。隔爆型造价昂贵且维护不便，故在可用一般型或增安型的场所，尽量选用这些类型。对于控制、监测、通信等弱电系统的电气设备，应优先考虑采用本安型防爆设备。这类设备体积小，重量轻，便于携带，造价低廉，安全程度高。

表 8－1－186　井下电气设备选用规定

使用场所	煤（岩）与瓦斯（二氧化碳）突出矿井和瓦斯喷出区域	瓦斯矿井				
		井底车场、总进风巷和主要进风巷		翻车机硐室	采区进风巷	总回风巷、主要回风巷、采区回风巷、工作面和工作面进风巷
		低瓦斯矿井	高瓦斯矿井①			
高低压电机和电气设备	矿用防爆型（矿用增安型除外）②	矿用一般型	矿用一般型	矿用防爆型	矿用防爆型	矿用防爆型（矿用增安型除外）
照明灯具	矿用防爆型（矿用增安型除外）③	矿用一般型	矿用防爆型	矿用防爆型	矿用防爆型	矿用防爆型（矿用增安型除外）
通信、自动化装置和仪表、仪器	矿用防爆型（矿用增安型除外）	矿用一般型	矿用防爆型	矿用防爆型	矿用防爆型	矿用防爆型（矿用增安型除外）

① 使用架线电机车运输的巷道中及沿该巷道的机电设备硐室内可以采用矿用一般型电气设备（包括照明灯具、通信、自动化装备和仪表、仪器）。

② 煤（岩）与瓦斯突出矿井的井底车场的主泵房内，可使用矿用增安型电动机。

③ 允许使用经安全检测鉴定，并取得煤矿矿用产品安全标志的矿灯。

3. 矿用电气设备的通用要求

由于煤矿井下环境潮湿，伴有煤块、岩石冒落的危险，并存在爆炸性混合物，因此，用于煤矿井下的电气设备应具备以下一些基本条件（矿用电气设备的通用要求）：

（1）电气设备的外壳应具有一定的防护能力。

（2）具有良好的防潮性能，以保证电气设备良好的绝缘性能。

（3）各种类型的电气设备在满足技术要求的前提下，应尽量减小体积；且操作、维修方便，以适合井下工作环境狭小的特点。

1.4.2.2　矿用一般型开关柜

矿用一般型开关柜其旧型号包括 GKW 型、GKF 型，新型号有 KYGG 和 KYGC 等。KYGC 矿用一般型手车式高压开关柜是在 KYGG 参数不变的基础上，对产品结构进行的改进，具有体积小、维修方便等优点。矿用一般型开关柜的主要技术数据见表 8－1－187。

1.4.2.3　矿用变压器

1. 矿用变压器的分类

表 8-1-187 矿用一般型开关柜的主要技术数据

名 称	技术参数	名 称	技术参数
额定电压/kV	3、6、10	额定短路关合电流(峰值)/kA	31.5、63
最高工作电压/kV	3.6、7.2、12	额定短时耐受电流(2s)/kA	12.5、25
额定电流/A	5~630、1250	额定峰值耐受电流(峰值)/kA	31.5、63
额定短路开断电流/kA	12.5、25		

矿用变压器是指为了适应煤矿生产而对变压器结构提出特殊要求的特种变压器。矿用变压器可以分为矿用一般型变压器和矿用隔爆型变压器。

矿用一般型变压器专为煤矿井下条件生产的不防爆的一般型电气设备。这种变压器与通用变压器相比，其介质温度、耐潮性能、外壳材质及强度、进线装置、接地端子都能满足煤矿具体条件的要求。矿用一般型变压器是一种没有采取任何防爆措施，安装在煤矿井下虽有瓦斯、煤尘但无爆炸危险场所的电气设备。

矿用一般型变压器按照绝缘介质的不同可分为油浸式和干式，目前煤矿常用的主要是矿用干式变压器。

KS9 系列矿用变压器属于油浸式矿用一般型变压器，适用于煤矿井下中央变电所、井底车场、总进风道和主要进风道，虽有瓦斯但无爆炸危险的场所；也适用于隧道比较潮湿的环境中，作为矿用照明或电力拖动的电源变压器。其型号含义如图 8-1-78 所示。

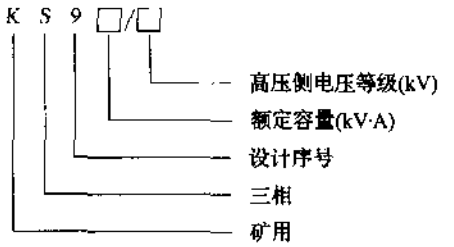


图 8-1-78 KS9 系列矿用变压器型号含义

矿用一般型干式变压器常用型号为 KSG 系列。KSG 系列是替代矿用油变压器 KS9 的电气设备，是无油化安全生产管理的方向，它主要用于煤矿或其他金属矿井 10kV、6kV 的井下供变电。其型号含义如图 8-1-79 所示。

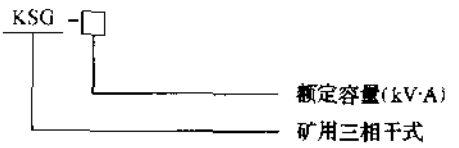


图 8-1-79 KSG 系列矿用变压器型号含义

矿用隔爆型变压器是专门为了适应井下存在甲烷混合气体和煤尘等有爆炸危险的环境而设计的变压器。常用型号有 KBSG 系列、KBSG－T 系列等。

KBSG 系列变压器是矿用隔爆型干式变压器，适用于有甲烷混合气体和煤尘，且有爆炸危险的矿井、矿山、隧道等环境，也适用于不足以腐蚀金属和破坏绝缘的气体及蒸汽环境中；在额定频率为 50Hz，一次侧电压为 10kV 或 6kV 中性点不接地的三相电力系统中运行，为使用环境中的各种动力设备和各种用电装置提供电源。其型号含义如图 8－1－80 所示。

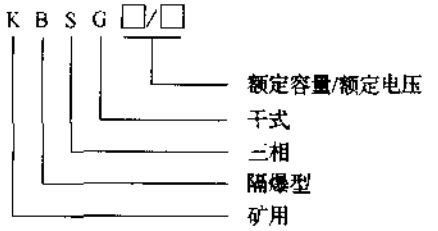


图 8－1－80　KBSG 系列矿用隔爆型变压器型号含义

KBSG－T 系列干式隔爆变压器用于有甲烷混合气体和煤尘并有爆炸危险的矿井中，作为煤矿井下综合机械化采掘设备的配电设备。其型号含义如图 8－1－81 所示。

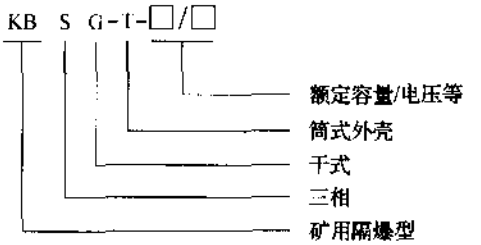


图 8－1－81　KBSG－T 系列矿用隔爆型变压器型号含义

2. 矿用变压器技术参数

KS9 系列矿用一般型变压器技术参数见表 8－1－188。

KSG 矿用一般型变压器技术参数见表 8－1－189。

KBSG 系列矿用隔爆型变压器技术参数见表 8－1－190。

KBSG－T 系列矿用隔爆型变压器技术参数见表 8－1－191。

1.4.2.4　矿用高压隔爆开关

矿用高压隔爆开关是由多种高压电器、保护装置、测量用仪器仪表和隔爆装置组成的成套配电装置，主要用于具有甲烷混合气体和煤尘爆炸危险的煤矿井下，对额定电压为 6kV、10kV，频率为 50Hz 中性点不直接接地的三相交流供电系统进行控制、保护、测量及启动电动机。

表 8-1-188 KS9 系列矿用一般型变压器技术参数

额定容量/(kV·A)	电压组合/kV	连接方式	损耗/kW		空载电流/%	阻抗电压/%	重量/kg			外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)
			空载	负载			器身重	油重	总重	
50	高压 10 或 6 低压 0.693/0.4	Yy0 或 Yd11	0.17	0.87	2.0	4	230	80	390	1200×950×900
80			0.25	1.25	1.8		310	100	530	1300×950×950
100			0.29	1.50	1.6		360	110	600	1300×950×1000
125			0.34	1.80	1.5		425	120	690	1300×950×1000
160			0.40	2.20	1.4		480	140	810	1350×950×1040
200			0.48	2.60	1.3		580	170	955	1400×970×1080
250			0.56	3.05	1.2		670	180	1100	1450×1000×1100
315			0.67	3.65	1.1		775	240	1305	1500×1000×1150
400			0.80	4.30	1.0		930	280	1570	1600×1050×1150
500			0.96	5.10	1.0		1155	300	1790	1650×1050×1200
630			1.20	6.20	0.9	4.5	1310	345	2150	1650×1120×1220

注：移动变电站长度和重量等各参数根据开关厂家不同而略有差异（下同）。

表 8-1-189 KSG 矿用一般型变压器技术参数

额定容量/(kV·A)	高压/kV	分接范围/%	低压/kV	连接组标号	空载损耗/W	负载损耗/W	空载电流/%	短路阻抗/%
50	6，10	±5%	0.693/0.4 或 1.2/0.693	Yy0（d11）	320	990	2.8	4
63					370	1130	2.2	4
80					410	1360	2.2	4
100					460	1630	2.2	4
125					540	1930	2.2	4
160					630	2320	2.2	4
200					720	2720	2.2	4
250					850	3220	2.2	4
315					990	3860	1.8	4
400					1170	4540	1.8	4
500					1350	5440	1.8	4
630					1570	6350	1.8	5
800					1900	7770	1.3	6
1000					2210	9130	1.3	6

表8-1-190　KBSG系列矿用隔爆型变压器技术参数

型　号	额定容量/(kV·A)	额定电压及分接电压			损耗/W		空载电流/%	短路阻抗/%	连接组别
		高压/kV	高压分接/%	低压/kV	空载	负载			
KBSG-100/6	100	6	±5	1.2 0.693	520	920	2.5	4	Yy0 或 Yd11
KBSG-200/6	200				820	1550	2.0		
KBSG-315/6	315				1100	2150	1.8		
KBSG-400/6	400				1300	2600	1.8		
KBSG-500/6	500				1500	3100	1.5		
KBSG-630/6	630				1800	3680	1.5		
KBSG-800/6	800				2050	4500	1.0		
KBSG-1000/6	1000				2350	5400	1.0		
KBSG-1250/6	1250				2750	6500	1.0		
KBSG-1600/6	1600			1.2 0.693 3.45	3350	8000	0.8		
KBSG-2000/6	2000				3800	9500	0.6	4.5	Yyn0
KBSG-2500/6	2500			3.45	4500	10600	0.6	5	
KBSG-100/10	100	10		1.2 0.693	560	1050	2.5	4	Yy0 或 Yd11
KBSG-200/10	200				950	1800	2		
KBSG-315/10	315				1300	2500	1.8		
KBSG-400/10	400				1500	3000	1.8		
KBSG-500/10	500				1750	3500	1.5		
KBSG-630/10	630				2000	4100	1.5		
KBSG-800/10	800				2300	5100	1.2		
KBSG-1000/10	1000				2600	6100	1.0	4.5	
KBSG-1250/10	1250				3100	7400	1.0	4.5	
KBSG-1600/10	1600			1.2	3800	8500	1.0	5	
KBSG-2000/10	2000			0.693 3.45	4500	9700	0.7	5	Yyn0
KBSG-2500/10	2500			3.45	5200	10800	0.6	5.5	

注：负载损耗为145℃（绝缘耐热等级为H级时的参考温度）的值；按照GB 8286—2005，变压器二次额定电压为3450V时，应该有中性线引出端（后文同）。

目前常见的高压隔爆开关型号为BGP系列或被称作PBG系列。BGP系列的型号含义如图8-1-82所示。BGP系列矿用隔爆型高压真空配电装置技术参数见表8-1-192。

表 8-1-191 KBSG-T 系列矿用隔爆型变压器技术参数

型 号	额定容量/(kV·A)	额定电压/kV		损耗/W		短路阻抗/%	空载电流%	连接组号
		高压	低压	空载	负载			
KBSG-T-100/6	100	6	0.69~0.4	600	1000	4	3	Yy0 或 Yd11
KBSG-T-200/6	200	6		950	1700		2.5	
KBSG-T-315/6	315	6	1.2~0.69	1300	2300			
KBSG-T-315/10	315	10		1450	2700	4.5		
KBSG-T-500/6	500	6		1800	3300	4	2	
KBSG-T-500/10	500	10		2000	3800	4.5		
KBSG-T-630/6	630	6		2100	4000	5		
KBSG-T-630/10	630	10		2300	4500	5.5		
KBSG-T-800/6	800	6	1.2	2300	5200	5.5	1.5	Yy0
KBSG-T-1000/6	1000	6		2700	6100	6		
KBSG-T-1250/6	1250	6		3200	7200			

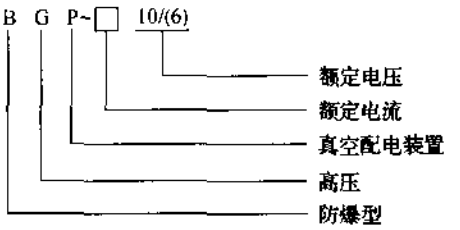


图 8-1-82 BGP 系列高压隔爆开关型号含义

表 8-1-192 BGP 系列矿用隔爆型高压真空配电装置主要技术参数

额定电压/kV	6	10
额定电流/A	50、100、150、200、250、315、400	50、100、150、200、250、315、400
开断容量/MVA	100	200
开断电流/kA	12.5	25
热稳定电流/kA	12.5	12.5
机械寿命/次	10000	10000
操作过电压倍数	小于 3 倍相电压峰值	小于 3 倍相电压峰值

1.4.2.5 低压馈电开关

矿用隔爆型馈电开关，用于交流电压至 660V、频率为 50Hz 的配电线路中，作为配电开关。当线路发生过载、短路或漏电时，能自动切断电动机及其他负荷。它具有隔爆性能，在有爆炸危险混合物和煤尘的矿井中能安全可靠使用。

以前生产的矿用隔爆型馈电开关有DW81系列及DW80系列等，现已经基本淘汰。目前常见的馈电开关为BKD系列和KBZ系列。其型号含义如图8-1-83、图8-1-84所示。KBZ系列低压馈电开关主要技术参数见表8-1-193～表8-1-195。

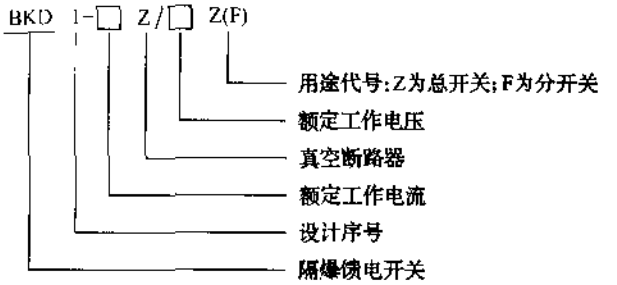


图8-1-83　BKD系列矿用隔爆型馈电开关型含义

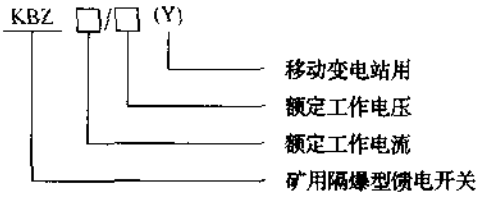


图8-1-84　KBZ系列矿用隔爆型馈电开关型号含义

表8-1-193　KBZ-200、400/1140（660）主要技术参数

项　目	主要技术参数		项　目	主要技术参数
额定工作电压/V	1140	660	分断时间/ms	30
额定工作电流/A	200、400		切断短路电流时间/ms	60、
极限分断能力/kA	8			

表8-1-194　KBZ-500、630/1140（Y）主要技术参数

项　目	KBZ-500/1140（Y）		KBZ-630/1140（Y）	
额定电流/A	500		630	
额定电压/V	1140	660	1140	660
极限分断能力/kA	12.5	15	12.5	15
电寿命/次	3000			
机械寿命/次	15000			

表 8-1-195 KBZ-630（500）/1140（660）主要技术参数

项 目	KBZ-500/1140		KBZ-630/1140	
额定电流/A	500		630	
额定电压/V	1140	660	1140	660
极限分断能力/kA	9	12.5	12.5	15
电寿命/次	3000			
机械寿命/次	15000			

1.4.2.6 隔爆型磁力启动器

隔爆型磁力启动器是将隔离开关、接触器、熔断器、继电保护装置、按钮等元件装在隔爆外壳中组成的一种组合电器，主要用于煤矿井下和其他周围介质中含有甲烷及煤尘混合物的爆炸性气体环境中。矿用隔爆型磁力启动器型号较多，主要有 QBZ 系列，QBD 系列，QJZ 系列，其型号含义分别如图 8-1-85 至图 8-1-87 所示。其中 QBZ 系列主要技术参数和 QJZ 系列主要技术参数分别见表 8-1-196 和表 8-1-197。

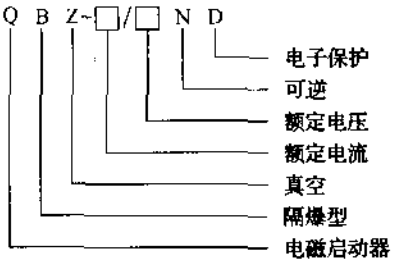


图 8-1-85 QBZ 系列磁力启动器型号含义

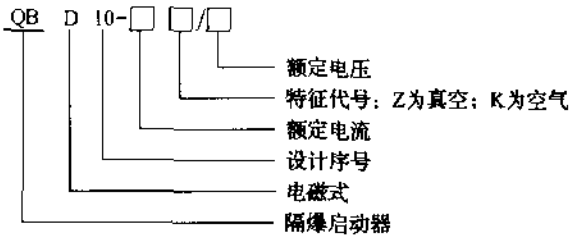


图 8-1-86 QBD 系列磁力启动器型号含义

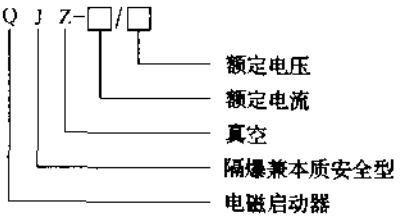


图 8-1-87 QJZ 系列磁力启动器型号含义

表 8－1－196　QBZ 系列主要技术参数

型　号		QBZ－80	QBZ－120	QBZ－200
额定电压/V		1140、660、380	140、660、380	140、660、380
额定电流/A		80	120	200
接通能力/A		960	1200	2000
分段能力/A		800	960	1600
电寿命/万次		6	6	6
机械寿命/万次		300	300	300
$\eta\cos\phi=0.75$ 时，控制电动机的最大功率/kW	1140V	110	170	290
	660V	65	100	170
	380V	40	58	98

表 8－1－197　QJZ 系列主要技术参数

型　号	额定电压/V	额定电流/A	$\eta\cos\phi=0.75$ 时控制电动机的最大功率/kW		真空接触器极限分断能力/A	保护元件
			380V	660V		
QJZ－200/1140（660）	660、1140	200	290	170	4500（3 次）	ABD8－250
QJZ－300（315）/1140（660）		315	450	270	4500（3 次）	ABD8－315
QJZ－400/1140（660）		400	590	340	4500（3 次）	ABD9－400

1.4.2.7　矿用隔爆兼本质安全型组合开关

矿用隔爆兼本质安全型多回路电磁启动器简称矿用组合开关，主要是用来控制煤矿井下采煤、掘进、运输等成套设备的组合电器。其特点是有利于设备的频繁搬迁，加快工作面的推进速度，简化电缆连接，减少电缆使用量和电气设备占地面积；同时，还可减少供电线路的电压降损耗，减少生产安装和维护的工作量，极大地提高了生产效率和供电可靠性，降低了采煤成本，方便用户，适应矿区的各种需要。

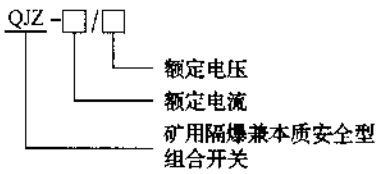


图 8－1－88　QJZ 系列矿用隔爆兼本质安全型组合开关型号含义

QJZ 系列矿用隔爆兼本质安全型组合开关（四回路、六回路、八回路）适用于含有爆炸性危险气体和煤尘的矿井，在交流 50Hz、额定电压 660～1140V 的线路中，对单台或者多台三相鼠笼异步电动机的启动、停止进行控制和保护，在停止时可改变相序。其型号含义如图 8－1－88 所示。其主要技术参数见表 8－1－198。

表 8-1-198 QJZ 系列矿用隔爆兼本质安全型组合开关技术参数

额定工作电压		1140/660V
最大控制功率	315A	470kW
	250A	370kW
	125A	180kW
真空接触器	主回路接通能力	
	接通	4000A
	分断	3200A
	极限分断能力（各 3 次）	
	额定电流为 400A、250A	4500A
	额定电流为 125A	2500A
	电寿命 AC-3	60 万次
	AC-4	6 万次
	400A	2 万次
	机械寿命	300 万次
隔离开关分断能力		3780A
隔离开关机械寿命		3000 次
本安电路最大开路电压		AC20V
本安电路最大短路电流		AC85mA

1.4.2.8 矿用隔爆型移动变电站

移动变电站通常放在工作面附近区段平巷的轨道上，可随着工作面的推进而移动。由于高压电能送至工作面附近，从而缩短了供电距离，减少了电能损耗和低压电缆的需用量，提高了供电的经济性，同时也保证了供电电压质量。

矿用隔爆型移动变电站常用型号有 KBSGZY 系列和 KBSGZY2-T 系列。KBSGZY 系列矿用隔爆型移动变电站主要技术参数见表 8-1-199。KBSGZY2-T 系列矿用隔爆型移动变电站主要技术参数见表 8-1-200 和表 8-1-201。

1.4.2.9 矿用电缆

1. 矿用电缆的类型

煤矿井下常用的动力电缆主要有铠装电缆、橡套电缆、塑料电缆等。铠装电缆主要在井筒和巷道中作井下输电干线向固定设备供电用，橡套电缆主要在采掘工作面供移动机械连线用，而塑料电缆近年来已在煤矿得到了广泛应用。

1）铠装电缆

铠装电缆的芯线有铝芯和铜芯两种，芯线常用多根细铝丝或细铜丝绞合而成。铝芯电

表 8－1－199　KBSGZY 系列矿用隔爆型移动变电站主要技术参数

型　号	额定容量/(kV·A)	电压组合及分接电压		连接组标号	损耗/W		空载电流/%	阻抗电压/%	绝缘耐温等级	外形尺寸（长×宽×高）/(mm×mm×mm)	轨距/mm
		高压/kV	低压/kV		空载	负载					
KBSGZY－315/6	315	6	1.2 0.693	Yy0（d11）	1100	2150	1.8	4	H	3590×895×1450	600 (900)
KBSGZY－400/6	400				1300	2600	1.8			3625×925×1530	
KBSGZY－500/6	500				1500	3100	1.5			3700×950×1535	
KBSGZY－630/6	630				1800	3680	1.5			4020×990×1600	
KBSGZY－800/6	800		1.2 3.45	Yy0 Yyn0	2050	4500	1			4180×1060×1655	
KBSGZY－1000/6	1000				2350	5400	1			4215×1050×1750	
KBSGZY－1250/6	1250				2750	6500	1			4355×1120×1920	
KBSGZY－1600/6	1600				3350	8000	1.8			4440×1260×1855	
KBSGZY－2000/6	2000				3800	9500	0.8	4.5		4440×1260×1885	
KBSGZY－315/10	315	10	1.2 0.693	Yy0（d11）	1300	2500	1.8	4	H	3590×895×1450	600 (900)
KBSGZY－400/10	400				1500	3000	1.8			3625×925×1530	
KBSGZY－500/10	500				1750	3500	1.5			3700×950×1535	
KBSGZY－630/10	630				2000	4100	1.5			4020×990×1600	
KBSGZY－800/10	800		1.2 3.45	Yy0 Yyn0	2300	5100	1.2			4180×1060×1655	
KBSGZY－1000/10	1000				2600	6100	1.2	4.5		4215×1050×1750	
KBSGZY－1250/10	1250				3100	7400	1	4.5		4355×1120×1920	
KBSGZY－1600/10	1600				3800	8500	1	5		4440×1260×1855	
KBSGZY－2000/10	2000				4500	9700	0.7	5		4440×1260×1885	

表 8－1－200　KBSGZY2－T 系列矿用隔爆型移动变电站主要技术参数

额定容量/(kV·A)	电压组合		连接组标号	损耗/W		短路阻抗/%	空载电流/%	耐热等级
	一次电压/V	二次电压/V		空载损耗	负载损耗			
100	6000±5%	693/400	Yy0（d11）	520	920	4	2.5	H
200				820	1550	4	2	
315		1200/693		1100	2150	4	1.8	
400				1300	2600	4	1.8	
500				1500	3100	4	1.5	
630				1800	3680	4	1.5	

表 8-1-200（续）

额定容量/（kV·A）	电压组合		连接组标号	损耗/W		短路阻抗/%	空载电流/%	耐热等级
	一次电压/V	二次电压/V		空载损耗	负载损耗			
800	6000±5%	1200/693 3450	Yy0（d11） Yyn0	2050	4500	4	1.0	H
1000				2350	5400	4	1.0	
1250		1200 3450	Yy0 Yyn0	2750	6500	4	1.0	
1600				3350	8000	4	0.8	
2000		3450	Yyn0	3800	9500	4.5	0.6	
2500				4500	10600	5	0.6	
3150		3450	Dy11 或 Dyn11	5300	12500	5.5	0.6	C
4000				6100	14000	6	0.6	

表 8-1-201 KBSGZY2-T 系列矿用隔爆型移动变电站主要技术参数

额定容量/（kV·A）	电压组合		连接组标号	损耗/W		短路阻抗/%	空载电流/%	耐热等级
	一次电压/V	二次电压/V		空载损耗	负载损耗			
100	10000±5%	693/400	Yy0（d11）	560	1050	4	2.5	H
200				950	1800	4	2	
315		1200/693		1300	2500	4	1.8	
400				1500	3000	4	1.8	
500				1750	3500	4	1.5	
630				2000	4100	4	1.5	
800		1200/693 3450	Yy0（d11） Yyn0	2300	5100	4	1.2	
1000				2600	6100	4.5	1.2	
1250		1200 3450	Yy0 Yyn0	3100	7400	4.5	1.0	
1600				3800	8500	5	1.0	
2000		3450	Yyn0	4500	9700	5	0.7	
2500				5200	10800	5.5	0.7	
3150		3450	Dy11 或 Dyn11	6100	12800	5.5	0.7	C
4000				7000	15000	6	0	

缆重量轻、价格便宜，但其抗拉强度较低，在受到外力冲击时，极易伤害芯线，因此在井下的使用范围受到限制。其型号及使用场所见表 8 1 202。

2）橡套电缆

橡套电缆型号及使用场所见表 8－1－203。

不同用途的矿用橡套电缆的主要规格见表 8－1－204 至表 8－1－208。

表 8－1－202　铠装电缆型号及使用场所

型号	结　构	使　用　地　点
ZQ20	铜芯油浸纸绝缘铅包裸钢带铠装	45°以下及水平巷道有可燃性支架的场所及硐室
ZLQ20	铝芯油浸纸绝缘铅包裸钢带铠装	45°以下及水平巷道有可燃性支架的场所及硐室，但应符合铝芯电缆在井下使用范围，一般可用于井下主变电所至采区变电所
ZQP20	铜芯干绝缘铅包裸钢带铠装	在高差不大于 100m 的 45°以下的井巷中
ZQP30	铜芯干绝缘铅包裸细钢丝铠装	在高差不大于 100m 的 45°以下的井巷中
ZQP50	铜芯干绝缘铅包裸粗钢丝铠装	能承受相当的拉力，用于井筒中
ZQD30	铜芯不滴流铅包裸细钢丝铠装	垂直或 45°以上的井巷中，垂高不限
ZQD50	铜芯不滴流铅包裸粗钢丝铠装	深井井筒作井下电缆
YJV50	铜芯交联聚氯乙烯绝缘，聚氯乙烯护套内粗钢丝铠装	深井井筒作井下电缆
VV29	铜芯聚氯乙烯绝缘，聚氯乙烯护套内钢带铠装	水平或 45°以下巷道

表 8－1－203　橡套电缆型号及使用场所

型号	名　称	使　用　场　所
UG	矿用高压橡套电缆	采区变电所至移动变电站
UGF	矿用高压氯丁橡胶护套电缆	采区变电所至移动变电站
UGSP	矿用监视型双屏蔽高压橡套电缆	采区变电所至移动变电站
UCP	采掘机械用屏蔽橡套电缆	各种采掘机械
UC	采掘机械用橡套电缆	各种采掘机械
UP	矿用移动屏蔽橡套电缆	各种移动电气设备
U	矿用橡套电缆	各种电气设备及采区动力线路
UCPQ	千伏级采煤机用屏蔽橡套电缆	采煤机用
UCPJQ	千伏级采煤机用加强型屏蔽橡套电缆	采煤机用
UPQ	千伏级矿用移动屏蔽橡套电缆	千伏级各种电气设备
UZ	矿用电钻电缆	电钻及控制信号线
UM(UMP)	矿灯电缆	

注：U—矿用；Z—电钻；J—监视型；F—非燃性；C—采掘用；P—屏蔽；G—高压。

表 8-1-204 0.66~1.14kV 矿用移动橡套电缆主要规格

芯数×截面/mm²	电缆外径/mm						20℃时的直流电阻/(Ω·km⁻¹)		20℃时的绝缘电阻/(MΩ·km)
	UY-0.38/0.66		UYP-0.38/0.66		UYP-0.66/1.14				
	最小	最大	最小	最大	最小	最大	镀锡	不镀锡	
3×4+1×4	20.3	23.4	23.7	27.2	—	—	5.09	4.95	200
3×6+1×6	23	26.4	26.4	30.1	—	—	3.39	3.3	180
3×10+1×10	27.5	31.3	30.9	34.7	32.4	36.2	1.95	1.91	160
3×16+1×10	29.6	33.4	33	36.8	34.6	38.4	1.24	1.21	120
3×25+1×16	35.6	39.8	39	43.2	41.1	45.3	0.795	0.78	
3×35+1×16	38.7	42.9	42.1	46.3	44.2	48.4	0.565	0.554	100
3×50+1×16	43.6	47.9	47.1	51.4	49.1	53.4	0.393	0.386	
3×70+1×25	49.7	54.4	52.4	57.1	55.5	60.2	0.277	0.272	80
3×95+1×25	—	—	—	—	61.2	65.9	0.21	0.206	

表 8-1-205 0.66~1.14kV 采煤机用橡套电缆主要规格

芯数×截面/mm²	电缆外径/mm						20℃时的直流电阻/(Ω·km⁻¹)	20℃时的绝缘电阻最小值/(MΩ·km)
	UC-0.38/0.66		UCP-0.38/0.66		UCP-0.66/1.14			
	最小	最大	最小	最大	最小	最大		
3×16+1×4+3×2.5	31.3	35.1	34.7	38.5	—	—	1.24	主芯 120 控制芯 50
3×25+1×6+4×2.5	37.8	42.0	41.3	45.5	—	—	0.795	
3×35+1×6+4×4	41.8	46.0	45.1	49.3	—	—	0.565	主芯 100 控制芯 50
3×35+1×6+3×6	—	—	—	—	47.2	51.4		
3×50+1×10+7×4	46.0	50.9	50.0	54.3	—	—	0.393	
3×50+1×10+3×6	—	—	—	—	54.3	58.6		
3×70+1×16+3×6	—	—	—	—	59.6	64.3	0.277	主芯 80 控制芯 50
3×95+1×25+3×10	—	—	—	—	64.5	70.1	0.210	

表 8-1-206 1.4kV 采煤机用屏蔽监视加强型橡套电缆主要规格

芯数×截面/mm²	电缆外径/mm				20℃时的直流电阻/(Ω·km⁻¹)
	UCPJR-0.66/1.14		UCPJB-0.66/1.14		
	最小	最大	最小	最大	
3×35+1×16+2×2.5	40	44.5	42	47	0.565
3×50+1×25+2×2.5	45.5	50.5	47.5	52	0.393
3×70+1×35+2×2.5	50.5	55	51	56.5	0.277
3×95+1×50+2×2.5	56	61.5	58	64	0.21

表 8－1－207　1.14kV 采煤机用金属屏蔽橡套电缆主要规格

芯数×截面/mm²	电缆外径/mm		20℃时的直流电阻/（Ω·km⁻¹）	20℃时绝缘电阻最小值/（MΩ·km）	20℃时地线与屏蔽线并联直流电阻最大值/（Ω·km⁻¹）	备　注
	最小	最大				
3×16+1×16+1×16	35.8	38.6	1.24	350	0.7	3×动力芯线+1×接地芯线+1×监视芯线
3×25+1×16+1×16	39.7	42.9	0.795	300	0.6	
3×35+1×16+1×16	43.1	46.3	0.565	260	0.6	
3×50+1×25+1×25	48.5	51.8	0.393	230	0.5	
3×70+1×35+1×35	55.1	58.8	0.277	210	0.34	
3×95+1×50+1×50	62.4	66.1	0.21	200	0.28	

表 8－5－208　UYPJ－3.6/6kV 屏蔽监视型矿用电缆主要规格

芯数×截面/mm²	电缆外径/mm		20℃时的直流电阻/（Ω·km⁻¹）	20℃时绝缘电阻最小值/（MΩ·km）		备　注
	最小	最大		动力芯线	监视芯线	
3×25+3×16/3+3×2.5	64.8	70.8	0.795	650	5	3×16/3 为接地芯线兼作地线，3×2.5 为监视芯线
3×35+3×16/3+3×2.5	68.3	74.3	0.565	550		
3×50+3×16/3+3×2.5	71.7	77.7	0.393	500		

3）塑料电缆

常用塑料绝缘电缆有交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆和聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆两种。塑料绝缘电缆导电芯线也分铜芯和铝芯，有铠装和无铠装、有屏蔽层和无屏蔽层、有外被层和无外被层等多种。由于裸铠装电缆结构不合理，现已淘汰。井下常用铠装塑料电缆的型号和敷设场合见表 8－1－209。

表 8－1－209　矿用铠装塑料电缆型号及使用场合

型号	名　称	敷　设　场　合
VV20	铜芯聚氯乙烯绝缘及护套裸钢带铠装	敷设在倾角 45°以上巷道中，垂直高度不大于 100m，中间有支撑点
VV30	铜芯聚氯乙烯绝缘及护套裸细钢丝铠装	敷设在垂直或倾角 45°以上巷道中，垂直高度不限
VLV20	铝芯聚氯乙烯绝缘及护套裸钢带铠装	同 VV20，但需要符合铝芯电缆在井下的使用范围
VLV30	铝芯聚氯乙烯绝缘及护套裸细钢丝铠装	同 VV30，但需要符合铝芯电缆在井下的使用范围

2. 矿用电缆的选择

1）电缆类型的选用原则

电缆的选择与供电的可靠性、安全性及是否经济合理有很大的关系。矿井供电系统中，高压供电线路一般采用铠装电缆，其故障率相对低压供电所采用的橡套电缆要少得多。采区供电是供电系统中的薄弱环节，工作环境又较差，因此对矿用电缆的选用必须严格遵守《煤矿安全规程》相关规定。选用原则如下：

（1）必须选用经检验合格的、并取得煤矿矿用产品安全标志的阻燃电缆。严禁采用铝包电缆。

（2）铅皮纸绝缘铠装电缆敷设的水平差超过允许值时，将会出现接头漏油或铅皮变形，严重影响电缆使用寿命，因此规定电缆实际敷设地点的水平差应与电缆规定的允许敷设水平差相适应。

（3）一般铅皮铠装电缆的铅皮和铠装，均可作为保护接地的导体。但采用塑料和橡套绝缘的电缆，必须要有单独的足够截面的导体供接地用，以便连接接地网络。电缆应带有供保护接地用的足够截面的导体，即保证作保护接地用的电缆芯线，其电阻值不超过规定值。用于移动式和手持式电气设备的电缆芯线的电阻值，作保护接地用时均不得超过1Ω；其他电气设备用电缆的电阻值，作保护接地用时不得超过2Ω。

（4）对固定敷设的高压电缆的选用应遵循以下原则：

① 在立井井筒或倾角在45°及以上的井巷内，由于机械强度的要求，规定要采用钢丝铠装不滴流铅包纸绝缘电缆、钢丝铠装交联聚乙烯绝缘电缆、钢丝铅装聚氯乙烯绝缘电缆或钢丝铠装铅包纸绝缘电缆或铝装聚氯乙烯护套电力电缆、交联聚氯乙烯绝缘粗钢丝铝装聚氯乙烯护套电力电缆。如果电缆敷设的高差超过电缆允许的要求时，应在中间设堵油接头，以保证电缆能长期稳定使用。

② 从经济安全出发，在水平巷道或倾角在45°以下的井巷内，应采用钢带铠装不滴流铅包纸绝缘电缆、聚氯乙烯绝缘钢带或细钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆、交联聚氯乙烯钢带或细钢丝铠装聚氯乙烯护套电力电缆。

（5）非固定敷设的高压电缆必须采用符合MT 818标准的橡套软电缆。

（6）铝芯电缆的选用原则：

① 在进风斜井、井底车场及其附近、井下中央变电所至采区变电所之间的电缆可采用铝芯电缆，其他地点的电缆必须采用铜芯电缆。

② 采区低压电缆严禁采用铝芯电缆。

③ 发现铝芯电缆的接线盒温度较高时，必须停电处理。

④ 接地线不得使用铝芯电缆。

（7）由于移动变电站在工作中经常移动，且使用地点接近工作面，所以地面移动变电站的供电电缆，应采用监视型屏蔽橡胶电缆。

（8）低压动力电缆的选用原则：

① 固定敷设的电缆应采用MVV铠装或非铠装电缆，或对应电压等级的移动橡套软电缆。

② 非固定敷设的低压电缆，必须采用符合MT818标准的橡套软电缆。移动式和手持式电气设备应使用专用橡套电缆。

③ 照明、通信、信号和控制用电缆，应采用铠装或非铠装通信电缆、橡套电缆或 MVV 型塑力电缆。

在遵守《煤矿安全规程》的前提下，电缆的选用要结合采区的地质条件、巷道长度及其负荷等一些实际情况综合合理选择。

2）电缆截面的选择原则

（1）井下高压动力电缆截面的选择原则。取下述截面最大者作为下井电缆截面，并应按正常涌水量时全部下井电缆送电及最大涌水量时一回路不送电，分别校验电压损失：

① 主排水泵由井下主（中央）变电所供电时，取矿井最大涌水量时井下的总负荷（计算负荷），按一回路不送电，以安全载流量选择电缆截面；主排水泵不由井下主（中央）变电所供电时，按一回路不送电，其余回路担负井下供电范围内总负荷，以安全载流量选择电缆截面。

② 取矿井正常涌水量时井下的总负荷，按全部下井电缆送电，以经济电流密度确定电缆截面。经济电流密度的年最大负荷利用小时数，一般按矿井最大负荷实际工作小时数计算，当排水负荷大于井下其余负荷时，取水泵年运行小时数计算。

③ 按最大运行方式下发生三相短路故障，以校验电缆的热稳定性来选择电缆截面。

④ 当电缆通过最小两相短路电流时，必须满足过电流保护装置最小灵敏度的要求。

（2）井下低压动力支线电缆截面的选择原则：

① 按机械强度选择电缆截面，其芯线截面应不小于各种用电设备按机械强度要求所规定的最小截面。

② 按电缆实际通过的最大工作电流不超过电缆长时允许电流进行校验。

③ 当用熔断器作短路保护时，熔断器中熔件的额定电流与所选电线截面相配合。

（3）井下低压动力干线截面的选择原则。一般采区低压供电线路较长，运行中电缆流过电流会产生压降而发热，为保证井下安全、正常供电，在选择截面时应遵循以下原则：

① 按低压系统允许电压损失选择电缆主芯线截面。

② 按电缆长时允许电流校验电缆截面。

③ 按启动条件校验所选电缆截面。校验时，距电源最远、容量最大的一台电动机启动，其余电动机正常运行时的电压损失应小于电网的允许电压损失。

④ 当电缆通过最小两相短路电流时，应满足过电流保护装置最小灵敏度的要求。

3）电缆长度的确定

（1）立井井筒中按电缆所经井筒深度的 1.02 倍计算长度，斜井按所经井筒长的 1.05 倍计算长度。

（2）地面及井下铠装电缆按所经路径的 1.05 倍计算长度，套装电缆按所经路径的 1.08 ~ 1.10 倍计算长度。

（3）若有接头，则安装下井电缆用的固定支架或电缆挂钩，应按前后期电缆的最多根数考虑，并宜留有 1 ~ 2 回路备用位置。

（4）每根电缆两端各留 8 ~ 10m 余量。移动设备用的橡套软电缆的实际选用长度按使用最远点的计算长度，再加 3 ~ 5m 活动长度。

（5）上述长度之和，应为一根电缆的计算长度。

4）电缆芯线数的选择

（1）动力干线电缆，一般选4芯电缆。

（2）向采掘机械供电的电缆要根据具体设备的控制方式、信号系统的要求，相应增加控制芯线数。

（3）专用通信电缆的芯线数，要按通信、信号及控制系统的实际要求数选取，并留有一定数量的备用线数。

（4）电缆接地芯数除用作监测接地回路外，不得兼作他用。

3. 矿用电缆的敷设

由于井下电缆的用量是很大的，因此在井下恶劣环境下使用如此多的电缆，必须严格执行《煤矿安全规程》中的有关规定。

（1）敷设电缆（与手持式或移动式设备连接的电缆除外）应遵守下列规定：

电缆必须悬挂：①在水平巷道或倾角在30°以下的井巷中，电缆应用吊钩悬挂；②在立井井筒或倾角在30°及其以上的井巷中，电缆应用夹子、卡箍或其他夹持装置进行敷设。夹持装置应能承受电缆重量，并不得损伤电缆。

水平巷道或倾斜井巷中悬挂的电缆应有适当的弛度，并能在意外受力时自由坠落。其悬挂高度应保证电缆在矿车掉道时不受撞击，在电缆坠落时不落在轨道或输送机上。

电缆悬挂点间距，在水平巷道或倾斜井巷内不得超过3m，在立井井筒内不得超过6m。

沿钻孔敷设的电缆必须绑紧在钢丝绳上，钻孔必须加装套管。

（2）电缆不应悬挂在风管或水管上，不得淋水。电缆上严禁悬挂任何物件。电缆与压风管、供水管在巷道同一侧敷设时，必须敷设在管子上方，并保持0.3m以上的距离。在有瓦斯抽放管路的巷道内，电缆（包括通信、信号电缆）必须与瓦斯抽放管路分挂在巷道两侧。盘圈或盘“8”字形的电缆不得带电，但给采掘机组供电的电缆不受此限制。

井筒和巷道内的通信和信号电缆应与电力电缆分挂在井巷的两侧。如果受条件所限，在井筒内，应敷设在距电力电缆0.3m以外的地方；在巷道内，应敷设在电力电缆上方0.1m以上的地方。

高、低压电力电缆敷设在巷道同一侧时，高、低压电缆之间的距离应大于0.1m。高压电缆之间、低压电缆之间的距离不得小于50mm。

井下巷道内的电缆，沿线每隔一定距离、拐弯或分支点以及连接不同直径电缆的接线盒两端、穿墙电缆的墙两边都应设置注有编号、用途、电压和截面的标志牌。

（3）立井井筒中所用的电缆中间不得有接头；因井筒太深需设接头时，应将接头设在中间水平巷道内。

运行中因故需要增设接头而又无中间水平巷道可利用时，可在井筒中设置接线盒。接线盒应放置在托架上，不应使接头承力。

（4）电缆穿过墙壁部分应用套管保护，并严密封堵管口。

（5）电缆的连接应符合下列要求：

电缆与电气设备的连接，必须用与电气设备性能相符的接线盒。电缆线芯必须使用齿形压线板（卡爪）或线鼻子与电气设备进行连接。

不同型电缆之间严禁直接连接，必须经过符合要求的接线盒、连接器或母线盒进行连接。

同型电缆之间直接连接时必须遵守下列规定：

① 橡套电缆的修补连接（包括绝缘、护套已损坏的橡套电缆的修补）必须采用阻燃材料进行硫化热补或与热补有同等效能的冷补。在地面热补或冷补后的橡套电缆，必须经浸水耐压试验，合格后方可下井使用。在井下冷补的电缆必须定期升井试验。

② 塑料电缆连接处的机械强度以及电气、防潮密封、老化等性能，应符合该型矿用电缆的技术标准。

1.4.2.10　井下电气设备、电缆的检查、维护和调整

为了保证井下供电系统能安全可靠地不间断供电，必须做好井下电气设备的检查、维护、修理和调整工作，以便消除隐患，确保安全供电。根据《煤矿安全规程》的规定，井下电气设备的检查、维护、修理和调整必须遵守以下规定：

（1）电气设备的检查、维护、修理和调整工作必须由专责的或临时指派的电气维修工进行。高压电气设备的修理和调整工作，应有工作票或有施工措施。

在特殊的情况下，采区电钳工可对采区变电所内高压电气设备进行停、送电的操作，但是不得擅自打开电气设备进行修理。经维修单位机电主管人员授权者，不受此限制。

（2）井下防爆电气设备的运行、维护和修理工作，必须符合防爆性能的各项技术要求。防爆性能受到破坏的电气设备，应立即处理或更换，不得继续使用。

（3）矿总工程师应组织实现表 8－1－210 所列的电气设备和电缆的检查、调整工作，检查和调整结果应记入专用的记录簿内。检查和调整中发现的问题，应指派专人限期解决。井下电气设备检查项目、周期见表 8－1－210。

表 8－1－210　井下电气设备的检查项目、周期

序号	检查项目	周期	备注
1	使用中的防爆电气设备防爆性能检查	每月一次	负责电工应每日检查一次
2	配电系统继电保护装置检查整定	每 6 个月一次	负荷变化时应及时整定
3	高压电缆的泄漏和耐压试验	每年一次	
4	主要电气设备绝缘电阻检查	每 6 个月不少于一次	
5	固定敷设电缆的绝缘盒外部检查	每季度一次	每周由专责电工检查外部和悬挂情况一次
6	移动电气设备的橡胶电缆绝缘检查	每月一次	每班由当班司机或专责电工检查一次外皮有无破损
7	接地网电阻测定	每季度一次	
8	新安装的电气设备绝缘电阻和接地电阻的测定		投入运行前

（4）电气设备使用的绝缘油的物理化学性能和电气耐压试验，每年应进行一次，但对其中操作频繁的电气设备使用的绝缘油，每半年进行一次电气耐压试验。

油断路器经3次切断短路故障后，其绝缘油应加试1次耐压试验，并检查有无游离碳。

不合标准的绝缘油，应及时处理或更换。油浸电气设备的绝缘油量，应定期检查，并保持规定油量。

更换和试验矿用电气设备绝缘油应有记录。

1.4.3 井下继电保护

1.4.3.1 井下低压电网过流保护

1. 井下低压电网过流保护措施

井下低压电网的过流保护，是指电网的短路保护和电动机的过载（或过负荷）保护的总称。短路保护可用熔断器、过流继电器或综合保护装置等，过载保护可用热继电器或综合保护装置等。

井下低压供电系统中短路电流、过载电流大小和持续时间长短，决定了对供电系统中电气设备的危害程度，必须采取有效措施将短路电流、过载电流的危害限制在最低程度。为此，一般采取下列措施：

（1）选择各类开关设备时，其短路分断能力要大于所保护的供电系统可能产生的最大短路电流。

（2）正确整定各类开关设备的过电流、短路电流保护装置，并按其所保护电网的最小短路电流来校验其灵敏度，保证在开关所保护的供电系统产生最小短路电流时，保护装置能可靠动作，切断故障。

井下低压供电系统采用的是中性点不接地的供电方式，只能发生三相及两相短路。分析可知，三相短路电流大于两相短路电流，因此采用最大三相短路电流选择开关设备；采用最小两相短路电流，校验开关装置过流保护灵敏度。

2. 过流保护原理

1）短路电流计算

三相短路电流计算

$$I_d^{(3)}=\frac{U_e}{\sqrt{3}\sqrt{(\sum R)^2+(\sum X)^2}} \tag{8-1-105}$$

两相短路电流计算

$$I_d^{(2)}=\frac{U_e}{2\sqrt{(\sum R)^2+(\sum X)^2}} \tag{8-1-106}$$

$$\sum R=R_1/K_b^2+R_b+R_2$$

$$\sum X=X_X+X_1/K_b^2+X_b+X_2$$

式中 $I_d^{(2)}$——两相短路电流，A；

$I_d^{(3)}$——三相短路电流，A；

U_e——变压器二次侧额定电压，对于380V电网，U_e以400V计算；对于660V电网，U_e以690V计算；对于1140V电网，U_e以1200V计算；对于127V网路，U_e以133V计算；

$\sum R$、$\sum X$——短路回路内一相有效电阻、电抗值的总和，Ω；

X_X——根据井下中央变电所母线上的三相短路容量计算并折算至变压器二次侧的系统电抗值，Ω；

R_1、X_1——高压电缆的电阻、电抗值，Ω；

K_b——变压器的变压比，取变压器一、二次侧线路的平均电压之比；

R_b、X_b——矿用变压器的电阻、电抗值，Ω；

R_2、X_2——低压电缆的电阻、电抗值，Ω。

2）过流保护的整定

井下低压电网过流保护装置的电流整定值，按下列规定选择：

（1）对保护电缆干线的装置按下式选择：

$$I_z \geqslant I_{Qe} + K_x \sum I_e \tag{8-1-107}$$

式中 I_z——过流保护装置的电流整定值，A；

I_{Qe}——容量最大的电动机的额定启动电流，对于同时启动的数台电动机，若其总功率大于单台制动容量最大的电动机功率时，I_{Qe}则为同时启动的电动机额定启动电流之和，A；

$\sum I_e$——其余电动机的额定电流之和，A；

K_x——需用系数，取 0.5～1。

（2）对保护电缆支线的装置按下式选择：

$$I_z \geqslant I_{Qe} \tag{8-1-108}$$

煤矿井下电动机的额定启动电流和额定电流，可以从电动机的铭牌或相关技术资料中查出其额定电流，并计算出电动机的额定启动电流近似值。对鼠笼电动机，其近似值可用额定电流乘以 6；对绕线型电动机，其近似值可用额定电流乘以 1.5。当选择启动电阻不精确时，启动电流可能大于计算值。在此情况下，整定值也要相应增大，但不能超过额定电流的 2.5 倍。在启动电动机时，如继电器动作，则应变更启动电阻，以降低启动电流值。

对于某些大容量采掘机械设备，由于位置处在低压电网末端，且功率较大，启动时电压损失较大，其实际启动电流要远低于额定启动电流。若能测出其实际启动电流时，则式（8－1－107）和式（8－1－108）中的 I_{Qe}应以实际启动电流计算。

3）过电流保护的校验

$$K_s = \frac{I_d^{(2)}}{I_z} \geqslant 1.5 \tag{8-1-109}$$

式中 $I_d^{(2)}$——被保护电缆干线或支线距变压器最远点的两相短路电流值，A；

I_z——过电流保护装置的电流整定值，A；

K_s——保证保护装置可靠动作的灵敏度系数。

若线路上串联两台及以上开关时（其间无分支线路），则上一级开关的整定值，也应按下一级开关保护范围最远点的两相短路电流来校验。在此情况下校验的灵敏度应满足 1.2～1.5 的要求，以保证双重保护的可靠性。

若经校验，两相短路电流不能满足式（8－1－109）时，可采取如下措施：

（1）加大干线或支线电缆截面。

（2）设法减少低压电缆线路的长度。

（3）采用相敏保护器或软启动等新技术提高灵敏度。

（4）换用大容量变压器或采取变压器并联。

（5）增设分段保护开关。

（6）采用移动变动站或移动变压器等措施。

1.4.3.2 井下低压电网漏电保护

漏电保护有多种方式，如附加电源直流检测式、零序功率方向式、自动复电式等。附加电源直流检测式是无选择性的漏电保护方法，一般运用于电网总馈电开关处，负责整个电网的漏电保护和总漏电后备保护。零序功率方向式是有选择性的漏电保护方法，一般运用于分支开关处，当本支路发生漏电故障时，可靠动作，切除对本支路用电设备的供电。自动复电式是由无选择性的直流检测式漏电保护和有选择性的零序功率方向式漏电保护组成的混合保护。

1. 附加电源直流检测式漏电保护

附加直流电源检测原理是利用附加在电网与地之间的直流电源来检测电网是否发生漏电故障。电网正常运行时绝缘水平很高，若电网发生漏电故障，最容易检测到的是电网各相对地绝缘电阻的下降，因此可以在三相电网中附加一个独立的直流电源，使之作用于三相电网与大地之间，这样三相对地绝缘电阻上将有一直流电流通过，该电流大小的变化就直接反映了电网对地绝缘电阻的变化。有效地检测和利用该电流，就可以构成附加直流检测式漏电保护，原理如图 8－1－89 所示。

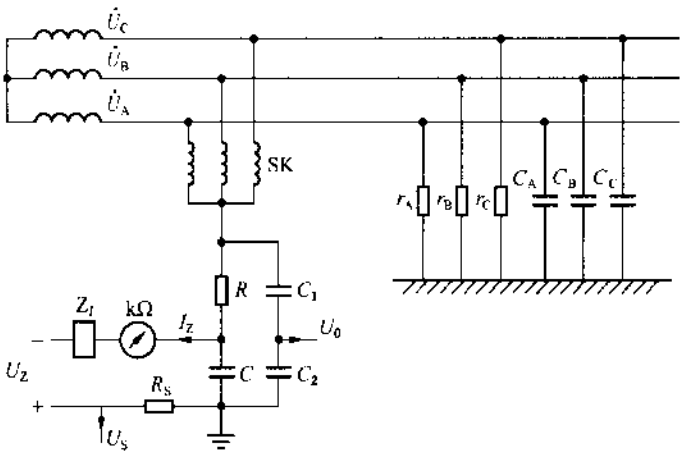


图 8－1－89 附加直流电源检测原理图

图 8－1－89 中 R_S 为取样电阻，R 为限流电阻，C_1 和 C_2 组成零序电压取样回路。附加直流电源 U_Z 通过由三相电抗器 SK 所组成的人为中性点（也可以通过变压器中性点 N）加在三相电网与地之间，直流电流 I_Z 由电源正极流出入地，经绝缘电阻 r_A、r_B 和 r_C 进入三相线路，再由三相电抗器 SK、千欧表 kΩ（直流毫安表）和直流继电器 Z_J 返回电源负极。对于稳定的直流，隔直电容 C 和电网对地电容 C_A、C_B 和 C_C 相当于开路，不会有电流流过。可以得到

$$I_Z = \frac{U_Z}{R_{SK}/3 + R + R_\Omega + R_J + R_E + R_S + r_\Sigma} \tag{8-1-110}$$

$$r_\Sigma = \frac{1}{1/r_A + 1/r_B + 1/r_C} \tag{8-1-111}$$

式中　R_{SK}——三相电抗器每相线圈的直流电阻；

R_Ω——千欧表电阻；

R_J——直流继电器线圈的直流电阻；

R_E——接地电阻；

r_Σ——r_A、r_B 和 r_C 并联后的总电阻。

对于直流回路，r_Σ 相当于三相电网各相对地的绝缘电阻并联。若单相（如 A 相）绝缘电阻降低，其余两相为正常或无限大，则 $r_\Sigma = r_A$；若 A、B 两相绝缘电阻同时降低，且 $r_A = r_B = r_C = r$，而 C 相都为正常或无限大，则 $r_\Sigma = r/2$；若三相绝缘电阻同时下降，且 $r_A = r_B = r_C = r$，则 $r_\Sigma = r/3$。

对式（8-1-110），由于 R_E 很小（不大于 2Ω）可以忽略不计，而 R_{SK}、R、R_J、R_Ω、R_S 均为定值，若令 $R_\Sigma = R_{SK}/3 + R + R_J + R_\Omega + R_S$ 为保护装置的内阻，因此可简化为

$$I_Z = \frac{U_Z}{R_\Sigma + r_\Sigma} \tag{8-1-112}$$

因此，当 r_Σ 和 U_Z 一定时，直流继电器 Z_J 和千欧表 kΩ 中的电流值将随着 r_Σ 的变化而变化；在 Z_J 被选定后，其动作电流 I_{dz} 是已知的。因此当 r_Σ 下降到一定程度（漏电故障发生），使得电流 $I_Z > I_{dz}$（I_{dz} 为动作电流）时，Z_J 便会动作，其常开或常闭触点将接通自动馈电开关的分励脱扣线圈，或断开其无压释放线圈，使自动馈电开关跳闸，从而达到漏电保护的目的。

作为直流检测型的漏电保护装置，它的动作值应能直接反映电网对地的绝缘状态，所以不能以 Z_J 的动作电流 I_{dz} 作为动作值，而必须以 r_Σ 为动作值并加以整定。由于人身安全电流为 30mA，故 r_Σ 的整定要满足人身触电电流 $I_{am} \leqslant 30$mA 的条件。

在 660V 的电网中，根据人身触电电流的条件，当人体电阻为 1kΩ 时，可以计算出电网对地电阻为 35kΩ。说明对于 660V 电网，实际绝缘水平必须保持在 35kΩ 以上，若低于此值，则发生人身触电时就非常危险。据此可以决定单相漏电时保护装置动作电阻的整定值，即 $R_{dz} = 35/3 = 11.6$kΩ。同理，可以计算出其他电压等级的电网单相漏电时保护装置动作电阻的整定值，见表 8-1-211。

表 8-1-211　井下低压电网的直流检测型漏电保护继电器的动作电阻值

电压/V	单相/kΩ	两相/kΩ	三相/kΩ
380	6.3	12.6	18.9
660	11	22	33
1140	20	40	60

电网正常运行时，直流检测型漏电保护继电器可实现对电网绝缘电阻的连续监测。当人身触电或发生漏电故障，使 r_Σ 达到装置动作设定值时，迅速将电源切除。另外，即使电网

的绝缘电阻均匀下降，仍可将此故障现象检测出来，这是附加直流电源漏电保护的一大优点。

2. 零序功率方向式漏电保护

保护无选择性是直流检测式漏电保护的最大缺点，为了使漏电保护具有选择性，就必须寻求新的保护方式。

根据供电理论，在中性点不接地的放射式电网中，如果某一支路发生不对称漏电故障或人身触电事故，则所有的支路都将有零序电流（主要是电容电流）流过，漏电电流或人身触电电流等于非故障支路零序电流的总和。从电源的母线往负荷端看，流过故障支路的零序电流，不仅大小而且方向都和非故障支路不同。在故障支路中流过的是各非故障支路零序电流之和，而各非故障支路中流过的只是本支路的零序电流，因而必小于前者。利用装设在各支路的零序电流互感器来反映各支路零序电流的大小，可以做到有选择性地切除漏电故障，这就是利用零序电流幅值的漏电保护原理。

当发生漏电故障时，流过故障支路的零序电流为

$$I'_0=\frac{3\omega(C-C')U_a}{\sqrt{1+9\omega^2R_R^2(C-C')^2}} \tag{8-1-113}$$

式中 ω——电源的角频率；

U_a——a 相相电压；

C'——故障支路每相对地电容值；

C——每相对地总电容；

R_R——对地绝缘电阻。

故障支路零序电流的方向是由线路流向母线，而各非故障支路的零序电流方向则由母线流向线路并入地，二者的相位基本上是相反的。当电网对地电阻为无限大时发生单相直接接地故障，二者的相位就恰好相反，前者滞后零序电压，后者超前零序电压。利用故障支路和非故障支路零序电流的方向不同也可以做到有选择性的漏电保护，这就是利用零序电流方向的漏电保护原理。

利用零序电流的大小来整定方向保护，首先，要确定符合实际的电网对地电容数值范围，因为它对零序电流的大小影响最大；其次，还要确定是否要在电网中设置附加接地电容器组，因为它增加了对地电容的数值。

具体的零序电流动作值整定数据，一般要考虑与传统的直流检测式漏电保护装置动作电阻值相适应。对于 660V 电网可取为 35mA 左右，这一整定值相当于在 $C=0.25\sim1.25\mu F$ 情况下，电网单相对地电阻降到 10～11kΩ 之间，漏电保护装置动作。

3. 自动复电选择性漏电保护系统

自动复电选择性漏电保护系统是由无选择性的直流检测式漏电保护和有选择性的零序功率方向式漏电保护组成的混合保护，具有动作速度快、可靠性高、有选择性、保护功能齐全等特点，既可保证人身安全，又能减少漏电故障对生产的影响。自动复电选择性漏电保护系统如图 8－1－90 所示。

图 8－1－90 中馈电开关分为 3 种形式，均为真空馈电开关。

Ⅰ型具有绝缘监视、漏电跳闸、漏电闭锁、短路跳闸、短路闭锁、自动复电等功能，适于低压总开关。

Ⅱ型具有选择性漏电跳闸、漏电闭锁、短路闭锁、自动复电等功能，适于作分支

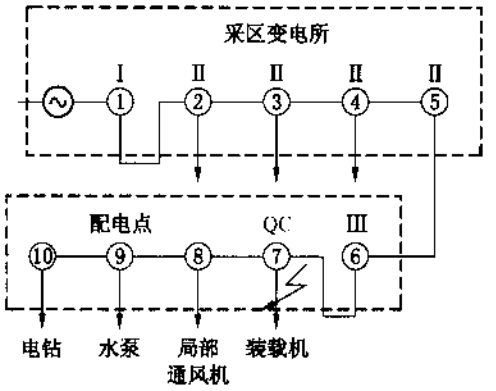


图 8－1－90　自动复电选择性漏电保护系统

开关。

Ⅲ型具有漏电闭锁、短路跳闸、短路闭锁、自动复电等功能，适于作配电点开关。

假设图 8－1－90 中的装载机支路发生非对称性漏电故障，则采区变电所内 5 号开关（Ⅱ型）选择性跳闸，其余 1～4 号开关不跳闸。此时，配电点 6 号开关（Ⅲ型）因失电也跳闸，漏电故障被切除。延时 2.5s 后，5 号开关自动复电，再延时 1s 后 6 号开关也自动复电，配电点恢复电源。7 号开关（磁力启动器）因漏电闭锁动作不能启动，其余 8～10 号开关都可以正常送电。

为安全起见，自动复电装置必须确保在下列任一情况下都不能动作：短路跳闸、漏电闭锁、开关正常分闸和一次复电不成功等。

1.4.3.3　井下监视线保护

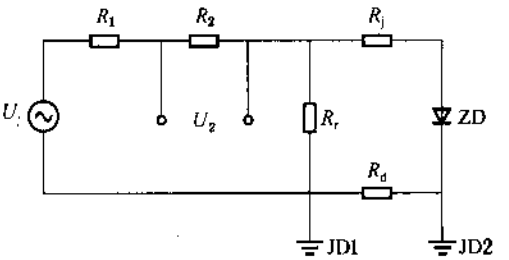
1．监视线保护原理

所谓监视线保护，就是监视双屏蔽电缆的监视线和接地线之间有无短路或监视线和接地线有无断线故障的一种保护。当矿用双屏蔽电缆受外界损伤时，监视层与绝缘层间的绝缘首先遭受破坏，在尚未发生直接接到或相间短路故障前，由监视线保护切断故障回路电源，从而减少了因故障扩大而产生的短路火花引起的瓦斯、煤尘爆炸的危险。

常用的监视线保护有终端加整流二极管的直流监视线保护、终端加电阻附加直流电源的监视线保护、终端加整流二极管的二次谐波监视线保护和终端加电阻附加交流电源的监视线保护。

1）终端加整流二极管的直流监视线保护原理

终端加整流二极管的直流监视线保护原理图如图 8－1－91 所示。



R_j—监视线电阻；R_d—地线电阻；R_r—监视线和地线之间的绝缘电阻；ZD—终端附加二极管；R_1—限流电阻；R_2—取样电阻

图 8－1－91　终端加整流二极管的直流监视线保护原理图

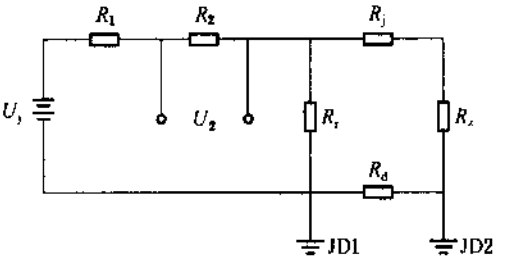
正常情况下，可以认为 R_r 趋于无穷大，R_j 趋于零，R_d 趋于零。双屏蔽电缆正常的情况下，由于二极管的作用，电阻 R_2 两端的电压 U_2 只有正半周的波形，为一直流分量。

当监视线和接地线之间因为电缆被砸或其他原因造成短路时，这时终端整流二极管被短接，从而使整流二极管失去整流作用。此时，电阻 R_2 两端的电压 U_2 为交流量，所以检测不到直流分量。

由此可见，通过检测电阻 R_2 两端电压 U_2 中直流分量的大小就可以检测出监视线和接地线之间有无短路或者断路故障。

2）终端加电阻附加直流电源的监视线保护原理

终端加电阻附加直流电源的监视线保护原理如图 8－1－92 所示。



R_j—监视线电阻；R_d—地线电阻；R_r—监视线和地线之间的绝缘电阻；R_x—终端附加电阻；R_1—限流电阻；R_2—取样电阻

图 8－1－92 终端加电阻的附加直流电源的监视线保护原理图

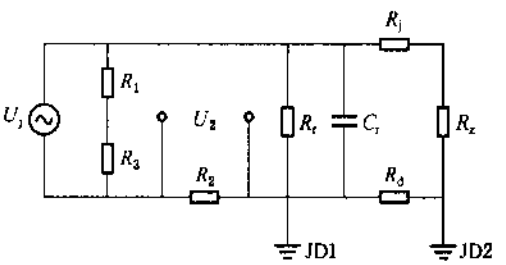
由图 8－1－92 可以看出，当监视线与接地线之间发生短路或绝缘下降故障时，电阻 R_2 两端的电压 U_2 大于正常情况下的电压值。当监视线或接地线发生断线故障或监视线回路电阻增大时，电阻 R_2 两端的电压 U_2 小于正常情况下的电压值，因此通过判断电阻 R_2 两端的电压 U_2 的大小就可以判断出监视线回路是否处于故障状态。

3）终端加整流二极管的二次谐波监视线保护原理

该原理图同终端加整流二极管的直流监视线保护原理图一样，所不同的是，该方法是取电阻 R_2 两端电压 U_2 中的二次谐波分量作为判断监视线回路是否正常的依据。而终端加整流二极管的直流监视线保护原理是取电阻 R_2 两端电压 U_2 的直流分量作为监视线回路是否正常的判断依据。

4）终端加电阻附加交流电源的监视线保护原理

终端加电阻附加交流电源的监视线保护是通过正交的数学方法来提高和消除干扰信号影响的一种监视线保护，原理图如图 8－1－93 所示。



R_j—监视线电阻；R_d—地线电阻；R_r—监视线和地线之间的绝缘电阻；C_r—监视线和地线之间的分布电容；R_x—终端附加电阻；R_1、R_3—分压电阻；R_2—取样电阻

图 8－1－93 终端加电阻附加交流电源的监视线保护原理图

正常情况下，电阻 R_2 两端的电压为

$$U_2 = \frac{R_2}{R_\Sigma + R_2} U_{jm} \cos\omega t \tag{8-1-114}$$

上式中，U_{jm} 为附加交流电源电压的最大值。其中

$$R_\Sigma = \frac{R_r(R_j + R_x + R_d)}{R_r + R_j + R_x + R_d} \tag{8-1-115}$$

当监视线或接地线出现断线故障时，因为电流不能形成回路，所以电阻 R_2 两端的电压 U_2 为零。当监视线与接地线之间发生短路故障时，因为终端电阻 R_2 被短接，此时

$$U_2 = U_{jm}\cos\omega t \tag{8-1-116}$$

可见，当监视线回路的电阻增大或者出现断线故障时，电阻 R_2 两端的电压 U_2 小于正常工作时的电压；当监视线与接地线之间的绝缘电阻阻值降低或者出现短路故障时，电阻 R_2 两端的电压 U_2 大于正常工作电压，因此通过判断电阻 R_2 两端电压 U_2 的大小，就可以判断出监视线回路是否有故障。

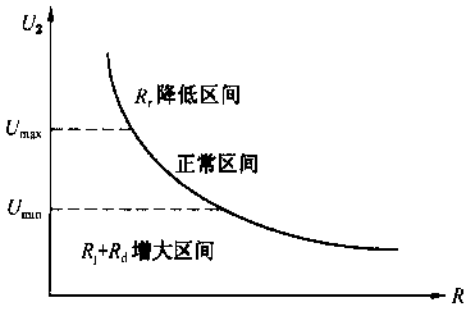


图 8-1-94　监视线故障区间的划分

监视线保护的正常与故障区间的划分如图 8-1-94 所示。

当电阻 R_2 两端的电压 U_2 大于整定值 U_{max} 时，可认为监视线与接地线之间发生短路故障或绝缘下降；当电阻 R_2 两端的电压 U_2 小于整定值 U_{min} 时，可认为监视线或接地线发生短路故障或者接触电阻过大。

2. 绝缘监视线动作值整定

上述 4 种原理的动作值整定方法类似，现仅以终端加电阻附加交流电源监视线动作值整定为例作介绍。

根据《矿用隔爆型配电装置 JB8739》，绝缘监视线保护的整定值要求见表 8-1-212。

表 8-1-212　绝缘监视线保护整定值要求

保护工作状态	可靠动作	允许动作	不允许动作
监视线与地线之间回路电阻 R_k/kΩ	>1.5	0.8~1.5	<0.8
监视线与地线之间绝缘电阻 R_r/kΩ	<3.0	3.0~5.5	>5.5
动作时间/s	—	<0.1	—

但高压防爆开关微机保护测控系统中监视线保护的数据要求比相关标准中的要求更高。现以实际数据为依据，可认为，当 $R_j + R_d > 0.8\text{k}\Omega$ 时，保护装置应动作；当 $R_j + R_d < 0.4\text{k}\Omega$ 时，保护装置不动作；当 $R_r < 3\text{k}\Omega$ 时，保护装置应该动作；当 $R_r > 8\text{k}\Omega$ 时，保护装置不动作。因此，必须合理选择 R_Z 阻值的大小，使电阻 R_2 两端的电压在故障区间有较大变化，有利于信号的监测。在实际的硬件电路中，R_2 为焊在电路板上的检测电阻，而 R_Z 为外接电阻，为了便于外接电阻阻值的选取，令 $R_2 = R_Z$。考虑理想情况下，认为 R_r 趋于无穷大，R_j 趋于零，R_d 趋于零。根据保护装置动作时 R_r 的临界范围，取中间值 5kΩ。并且为了便于计算，假设附加电源为 1V，则在理想情况下 R_2 两端的电压 U_2 为 0.5V。据此可由式（8-1-117）求得 R_2 和 R_Z 的值。

$$\frac{R_2}{R_2 + R_Z/5} - 0.5 = 0.5 - \frac{R_2}{R_r + R_2 + 0.4} \tag{8-1-117}$$

上式中，左边为绝缘降低情况下 U_2 的实际值与 0.5V 的差值（此处假设 $U_2 > 0.5\text{V}$），

右边为断线情况下 0.5V 与 U_2 实际值的差值（此处假设 $U_2 < 0.5V$）。解上式，可得：$R_2 = R_Z = 1.414k\Omega$，实际应用中可取 $R_2 = R_Z = 1.5k\Omega$。

所以监视线回路正常工作时，电阻 R_2 两端电压的正常区间为 $[0.4U_{jm}, 0.6U_{jm}]$。当电阻 R_2 两端电压 $U_2 > 0.6U_{jm}$ 时，可以认为监视线与接地线发生了短路故障或绝缘电阻下降；当电阻 R_2 两端电压 $U_2 < 0.4U_{jm}$，可以认为监视线发生了断线故障或监视线回路电阻增大。

1.4.4 井下保护设备功能要求

井下保护设备主要是对煤矿井下电气设备起保护作用，目前应用较多的有综合保护装置和检漏继电器。

《煤矿安全规程》中对井下设备应该具有的保护功能有如下规定：

（1）井下高压电动机、动力变压器的高压控制设备，应具有短路、过负荷和欠压释放保护。

（2）井下由采区变电所、移动变电站或配电点引出的馈电线上，应装设短路、过负荷和漏电保护装置。

（3）低压电动机的控制设备，应具有短路、过负荷、单相断线、漏电闭锁等保护功能及远程控制功能。

（4）井下配电网路（变压器馈出线路、电动机等）均应装设过流、短路保护装置。

（5）地面变电所和井下中央变电所的高压馈电线上，必须装设有选择性的单相接地保护装置。

（6）供移动变电站的高压馈电线上，必须装设有选择性的动作于跳闸的单相接地保护装置。

（7）井下低压馈电线上，必须装设检漏保护装置或有选择性的漏电保护装置，保证自动切断漏电的馈电线路。

（8）煤电钻必须使用设有检漏、漏电闭锁、短路、过负荷、断相、远距离启动和停止煤电钻功能的综合保护装置。

（9）井下照明和信号装置，应采用具有短路、过载和漏电保护的照明信号综合保护装置配电。

根据《煤矿安全规程》及其他相关标准中对井下保护设备的规定，结合井下保护设备的现状和发展趋势，给出煤矿井下保护设备所需具有的功能总结，见表 8－1－213。

表 8－1－213 井下保护设备应具有的保护功能表

电气保护功能	井下保护设备								
	煤电钻综合保护器	照明综合保护器	高压开关综合保护装置	低压开关综合保护装置	高压磁力启动器综合保护装置	低压磁力启动器综合保护装置	移动变电站综合保护器		检漏继电器
							高压侧	低压侧	
短路保护	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
过负荷保护	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
负序过流保护			●	●	●	●			
漏电保护	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲

表 8－1－213（续）

电气保护功能	井下保护设备								
	煤电钻综合保护器	照明综合保护器	高压开关综合保护装置	低压开关综合保护装置	高压磁力启动器综合保护装置	低压磁力启动器综合保护装置	移动变电站综合保护器		检漏继电器
							高压侧	低压侧	
漏电闭锁	▲			▲	▲	▲		▲	▲
过压保护			▲	●	▲	▲	▲	▲	
欠压保护			▲	▲	▲	▲	▲	▲	
PT 断线告警			●	●	●	●	●	●	
断相保护	▲			▲	▲	▲	▲		
低频保护			●	●	●	●	●	●	
绝缘监视保护			▲		▲			▲	

注：1. 以上设备均为矿用。

2. 欠压保护包含低压保护和欠压释放。

3. “▲”表示根据相关标准、规程规定，井下保护设备必须具有的保护功能。

4. “●”表示根据井下保护设备现状和发展趋势，建议具有的保护功能。

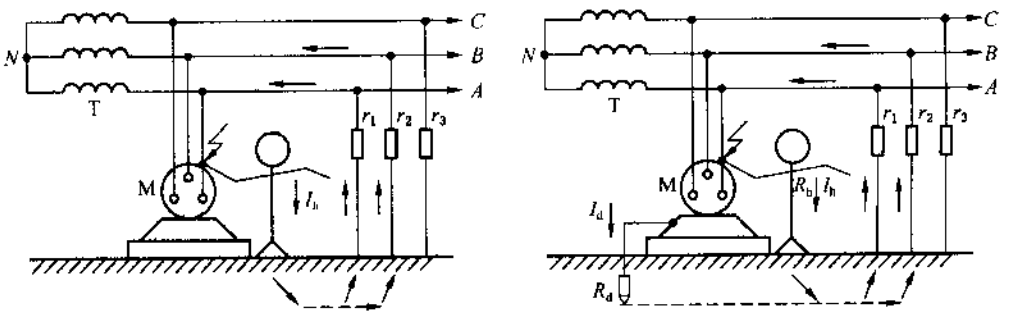
1.4.5　保护接地

为了减少人身触电电流和非接地电气设备对地电流的火花能量，防止电气事故的发生，《煤矿安全规程》规定：“电压在 36V 以上和由于绝缘损坏可能带有危险电压的电气设备的金属外壳、构架，铠装电缆的钢带（或钢丝）、铅皮或屏蔽护套等必须有保护接地。”

1. 保护接地及其作用原理

所谓保护接地，就是用导体把电气设备中所有正常不带电，当绝缘损坏时可能带电的外露金属部分（电动机、变压器、测量仪表的金属外壳，配电装置的金属构件，电缆终端盒与接线盒的金属外壳等）与埋在地下的接地极连接起来。它是预防人身触电的一项极其重要的措施。

在井下电网中，保护接地的作用如图 8－1－95 所示。



(a) 没有保护接地　　(b) 有保护接地

图 8－1－95　保护接地的作用

图 8－1－95a 是没有保护接地时的示意图。当电气设备内部绝缘损坏而使一相带电体与外壳相碰时，若人接触此外壳，则电流经过人体入地，再经其他两相对地绝缘阻抗回到电源。当电网对地绝缘阻抗较低时，则通过人身的电流将超过最大安全电流，造成人身触电伤亡事故；同时，碰壳处出现的漏电电流还可能引起瓦斯、煤尘爆炸。图 8－1－95b 是有保护接地时示意图。当人接触外壳时，电流将通过人体电阻与接地装置的接地电阻所构成的并联支路入地，再通过其他两相对地绝缘阻抗回到电源。由于接地装置的分流作用，通过人体的电流将大大减少。通过人体的电流与流经接地极的电流有如下关系：

$$\frac{I_d}{I_h}=\frac{R_h}{R_d} \tag{8-1-118}$$

通过人体的电流为：

$$I_h=\frac{R_d}{R_h}I_d \tag{8-1-119}$$

式中 R_d——接地极的接地电阻，Ω；

I_d——流过接地极的电流，A；

R_h——人身电阻，Ω；

I_h——通过人身的电流，A。

由式（8－1－119）可以看出，接地电阻越小，则流经人体的电流就越小，电流大部分由接地极入地，所以只要将接地电阻的数值控制在规定的范围以内，就可以使通过人身的电流达到安全值以下，确保人身安全。《煤矿安全规程》中对接地电阻有明确的规定："接地网上任一保护接地点的接地电阻值不得超过 2Ω。每一移动式和手持式电气设备至局部接地极之间的保护接地用的电缆芯线和接地连接导线的电阻值，不得超过 1Ω。"

此外，由于装设了保护接地装置，碰壳处的漏电电流大部分将经接地极入地。即使设备外壳与大地接触不良而产生火花，由于接地装置的分流作用，使电火花能量大大减小，从而避免了引爆瓦斯、煤尘的危险。

当电气设备单相碰壳，接地电流经接地极入地以后，便向四面八方流散开来，形成地中电流。距接地极越近的地方，电流通过土壤的导电面积越小；反之，导电面积越大。因此距接地极越近的地方，电阻越大；反之，电阻越小。电流通过电阻要产生压降，离接地极 20m 以外的地方，土壤电阻很小，差不多等于零，几乎没有电压降，因而认为该处的电位为零，这就是通常所说的电气上的"地"。接地回路中任何一点对"地"的电位差称为对地电压。接地极附近土壤中的电位分布曲线如图 8－1－96 所示。

接地极的对地电压 U_d 与经接地极流入地中的接地电流之比称为接地极的流散电阻。电气设备接地部分的对地电压与接地电流之比称为接地装置的接地电阻，它等于接地线的电阻与接地极的流散电阻之和。因为接地线的电阻很小，可略去不计，故一般认为接地电阻等于流散电阻。

在接地电流范围内，人站在地上，身体某一部分碰到带电的导体或金属外壳时，人体接触部分与站立点的电位差称为接触电压 U_c。由于接地极与带电外壳之间的电气距离为零，故可认为接触电压为接地极电位与站立点电位之差。

在离接地极 20m 的圆内，地面上将呈现出不同的电位分布。当人的两脚站在这种带有不同电位的地面时，两脚间的电位差叫做跨步电压 U_K。在计算时，一般取步距 0.8m，

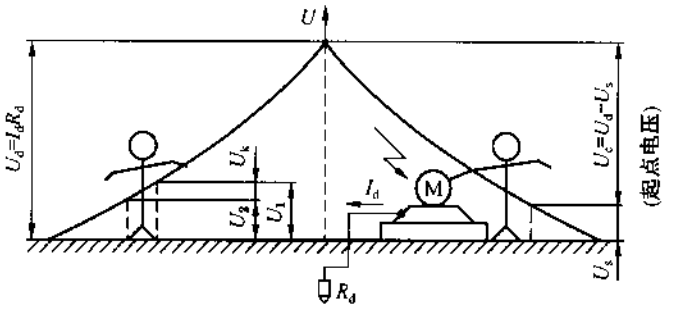


图 8－1－96　接地极周围土壤电位分布及接触电压、跨步电压

即取 0.8m 间的电位差为跨步电压。由图 8－1－96 可知，距接地极越近，跨步电压越大，反之越小。

从接触电压的角度看，保护接地的作用原理也可以这样解释：由于接地极的电阻很小，漏电电流在接地电阻上产生的电压降也很小，使得漏电设备外壳的对地电压大大降低，从而降低了接触电压，保证了触电人员的安全。

2. 井下保护接地系统

井下各种电气设备装设了单独的保护接地装置，并不能完全消除触电的危险。如图 8－1－97 所示的系统中，电动机 M_1 和 M_2 均装设了单独的保护接地装置。当电动机 M_1 的一相绝缘击穿（例如 A 相），使其外壳带电，如电网没有绝缘监视或绝缘监视失灵，这一接地故障将长期存在下去。若电动机 M_2 的另一相（如 C 相）绝缘击穿碰壳，这时电网就发生了两相对地短路，短路电流如图 8－1－97 中箭头所示。如果这一短路电流不足以使过流保护装置动作，这一故障将长期存在下去，这时电气设备外壳将带有危险电压。两电动机外壳对地电压的大小，与两电动机的接地电阻成正比。若电动机 M_1 和 M_2 的接地电阻大小相等，则两电动机外壳对地电压相等，为电网电压的一半，即 380V 电网对地电压为 190V。可见，这时如果人触及该电动机外壳时，是非常危险的。

为了提高保护接地的安全性和可靠性，通常利用供电的高、低压铠装电缆的金属外皮（铅包和金属铠装层）和橡套（塑料）电缆的接地芯线或屏蔽护套，把分布在井底车场、运输大巷、采区变电所以及工作面配电点的电气设备（36V 以上）的金属外壳在电气上连接起来，这样就使各处埋设的接地极（或称局部接地极）也并联起来，形成一个井下保护接地网，如图 8－1－98 所示。这样做不仅降低了接地电阻，而且也防止了不同电气设备的不同相同时碰壳（接地）所带来的危险。因为这时两相短路电流主要通过接地网流通，所以提高了两相短路电流的数值，保证过流保护装置可靠动作。

井下保护接地系统如图 8－1－99 所示。

由图 8－1－99 可知，井下保护接地系统由主接地极、局部接地极、接地母线、辅助接地母线、接地导线和连接导线等组成。

设置在井底主、副水仓或集水井内的接地极称为主接地极。主接地极要用面积不小于 0.75m^2、厚度不小于 5mm 的钢板做成。如矿井水为酸性时，应视其腐蚀性情况适当加大

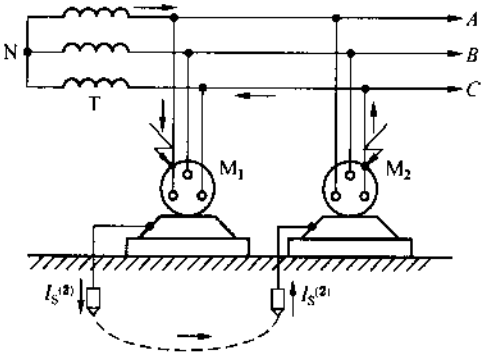


图 8-1-97 具有单独保护接地时，两相对地短路

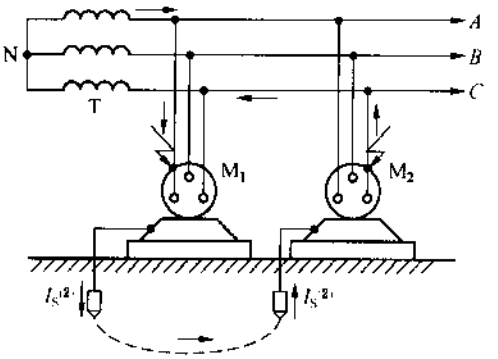


图 8-1-98 接成接地网后两相对地短路

其厚度，或镀上耐酸金属，或采用其他耐腐蚀钢板。一般在主、副水仓内各设一个主接地极，以保证清理一个水仓或检修接地极时，另一个起保护作用。有几个水平的矿井，每个水平的总接地网都要与主接地极连接。

为加强接地系统的可靠性，在装有电气设备的地点独立埋设的接地极称为局部接地极。

需要装设局部接地极的地点有：

（1）采区变电所（包括移动变电站和移动变压器）。

（2）装有电气设备的硐室和单独装设的高压电气设备。

（3）低压配电点或装有 3 台以上电气设备的地点。

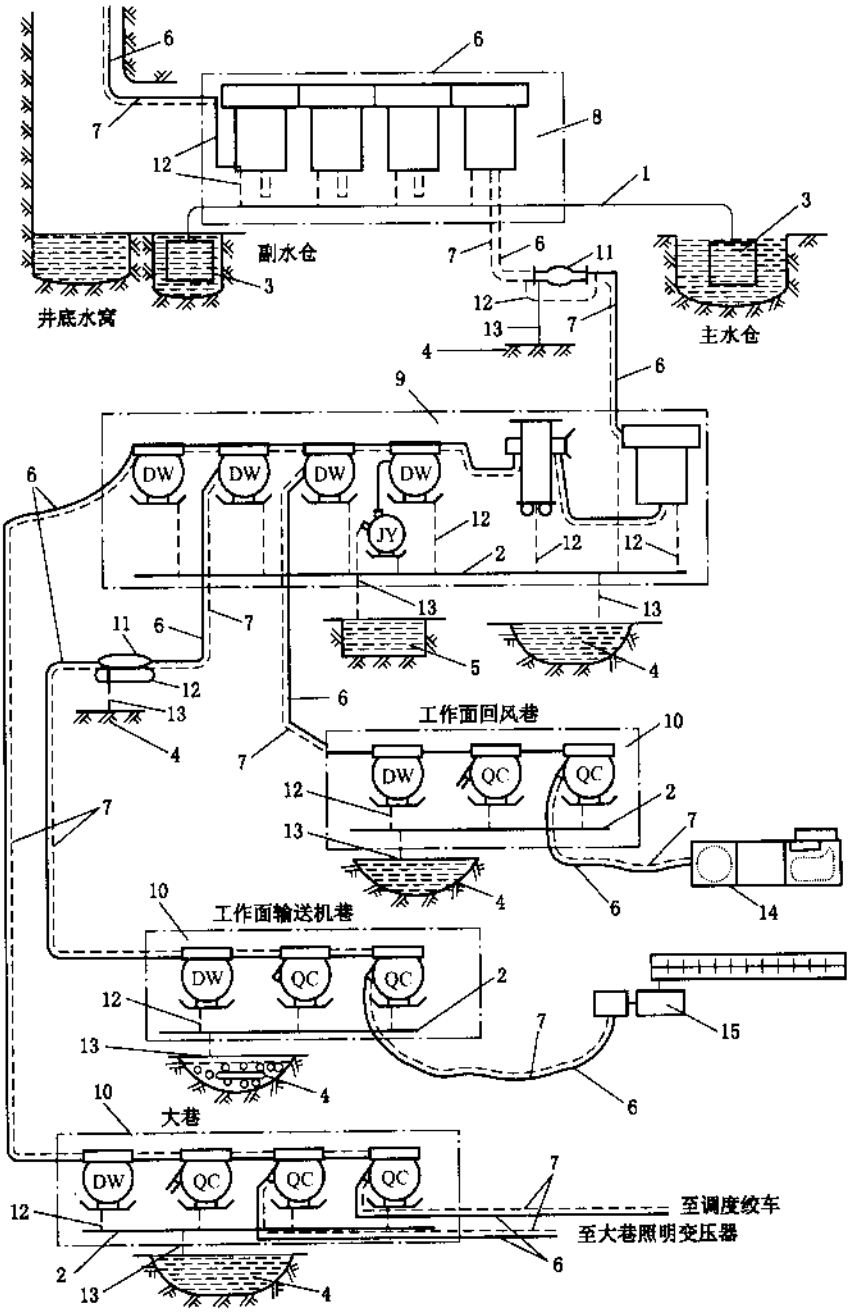
（4）无低压配电点的采煤机工作面的运输巷、回风巷、集中运输巷以及由变电所单独供电的掘进工作面，至少应分别设置一个局部接地极。

（5）连接高压动力电缆的金属连接装置。

局部接地极可设置于巷道水沟内或其他就近的潮湿处。设置在水沟中的局部接地极应用面积不小于 0.6m^2，厚度不小于 3mm 的钢板或具有同等有效面积的钢管制成，并应平放于水沟深处。设置在其他地点的局部接地极，可用直径不小于 35mm，长度不小于 1.5m 的钢管制成，管上应至少钻 20 个直径不小于 5mm 的透孔，并垂直全部埋入底板。也可用直径不小于 22mm，长度为 1m 的两根钢管制成，每根管上应钻 10 个直径不小于 5mm 的透孔，两根钢管相距不得小于 5m，并联后垂直埋入底板，垂直埋深不得小于 0.75m。

连接井底主、副水仓内主接地极的母线称为接地母线。接地母线应采用截面不小于 50mm^2 的铜线，或截面不小于 100mm^2 的镀锌铁线，或厚度不小于 4mm，截面不小于 100mm^2 的扁钢。电气设备的外壳与接地母线或局部接地极的连接，电缆连接装置两头的铠装、铅皮的连接，应采用截面不小于 25mm^2 的铜线，或截面不小于 50mm^2 的镀锌铁线，或厚度不小于 4mm，截面不小于 50mm^2 的扁钢。

接地母线与主接地极、局部接地极的连接要用焊接。接地导线和接地母线（或辅助接地母线）的连接最好也采用焊接。无条件时，可用直径不小于 10mm 的镀锌螺栓加防松装置（弹簧垫、双螺母）拧紧连接，连接处还应镀锡或镀锌。



1—接地母线；2—辅助接地母线；3—主接地极；4—局部接地极；5—漏电保护辅助接地极；6—电缆；7—电缆接地层；8—中央变电所；9—采区变电所；10—配电点；11—电缆接线盒；12—连接导线；13—接地导线；14—采煤机组；15—输送机

图 8-1-99　井下保护接地系统示意图

采掘工作面的移动机械以及不便装设固定接地极的设备，它们的外壳应利用 6 芯或 4 芯橡套软电缆中的接地芯线来接地。这时接地总线的一端接移动设备外壳，另一端接采区

配电点设备外壳。巷道内固定照明接线盒，可以每隔100m左右设一个局部接地极。

对矿井接地系统的总接地电阻，一般可不进行计算，但必须定期测定，其值必须满足《煤矿安全规程》的要求。

1.4.6 三专两闭锁

在《煤矿安全规程》中明确规定了掘进工作面实现“三专两闭锁”。“三专”即供电系统中所说的专用变压器、专用开关、专用线路，“两闭锁”指的是风电闭锁、瓦斯电闭锁。“三专两闭锁”是煤矿发展过程中一项重要的安全措施，它是从供电系统中给安全生产提供的一个重要技术保证。在一般矿井的供电系统中风电闭锁通常采用两台开关来实现，将两台风机开关的远控点串到一起。当采用这种方式时，两台风机同时启动后工作面设备才能启动，对掘进设备的电源开关进行闭锁，就实现了风电闭锁。瓦斯电闭锁是利用瓦斯传感器采集瓦斯信号，当采集的瓦斯信号超过一定数值时，瓦斯传感器发出断电信号并传到分站，分站则进行工作面断电。

1.“三专”供电的有关规定

《煤矿安全规程》规定：低瓦斯矿井掘进工作面的局部通风机，可采用装有选择性漏电保护装置的供电线路供电，或与采煤机工作面分开供电。高瓦斯矿井掘进工作面的局部通风机应采用“三专”（专用变压器、专用开关、专用线路）供电。

1）专用变压器

专用变压器是一台可不断电调压的变压器，它的一次侧与井下供电线路并联。它有三个作用：一是分离作用，将井下供电（井下其他生产用电设备）与局部通风机供电隔离。二是调压作用。目前小煤矿普遍存在开采距离较远，线路压降损失大，局部通风机不能正常运转的问题，调压可确保井下局部通风机在额定电压下启动与运转，为掘进工作面提供需要的风速和风量。三是不断电作用。一般变压器在调整电压时要停电，改换抽头后再送电，造成调压时局部通风机停转。该专用变压器在调整电压时供电不间断，可确保调压时通风不受影响。

2）专用线路

在专用变压器的二次输出端接一回路，专供掘进工作面局部通风机供电，不论井下回采运输及其他用电设备发生什么故障，均能确保掘进工作面局部通风机不受影响，极大地提高了井下局部通风机运行的可靠性和连续性。

3）专用开关

在井下掘进工作面局部通风机供电的总线路上装设隔爆馈电开关，并在总供电线路上安装与隔爆馈电开关配套使用的隔爆检漏继电器，对该支路实现漏电保护。局部通风机专用开关与掘进面总控开关和瓦斯断电仪配套使用，实现两闭锁。

2.“两闭锁”有关规定

《煤矿安全规程》规定：高瓦斯矿井必须装备矿井安全监控系统。没有装备矿井安全监控系统的煤巷、半煤巷和有瓦斯涌出的岩巷的掘进工作面，必须装备甲烷风电闭锁装置或甲烷断电仪和风电闭锁装置。没有装备矿井安全监控系统的无瓦斯涌出岩巷掘进工作面，必须装备风电闭锁装置。

1）风电闭锁

不需增加电气设备，只需将掘进工作面的总控开关与局部通风机专有开关中的一个辅

助常开触头 CK 用外线连接，便可实现风电闭锁，如图 8－1－100 所示。

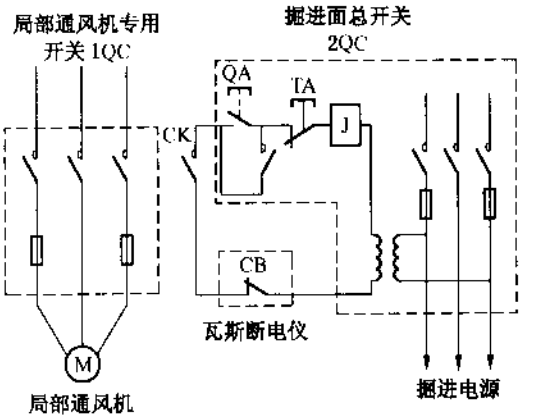


图 8－1－100　风电闭锁原理图

由图 8－1－100 可知掘进工作面总控开关（2QC）受控于局部通风机专用开关（1QC）中的辅助常开触头 CK，只有局部通风机专用开关（1QC）动作时，它的辅助常开触头 CK 才闭合，掘进工作面的总控开关（2QC）才能合闸启动。一旦局部通风机停转，风机专用开关的辅助常开触头 CK 断开，则掘进工作面总控开关中的低压控制回路形成开路状态，切断掘进工作面电源。

2）瓦斯电闭锁

在上述电电闭锁线路的基础上增加一台瓦斯断电仪，将瓦斯断电仪中的一个常闭触头 CB，串接于风电闭锁线路中，当掘进工作面瓦斯超限时，常闭触头 CB 断开，切断掘进工作面电源。“三专”、“两闭锁”技术在地方煤矿中普及应用，将会提高矿井的抗灾能力，杜绝和预防瓦斯、煤尘爆炸事故的发生。

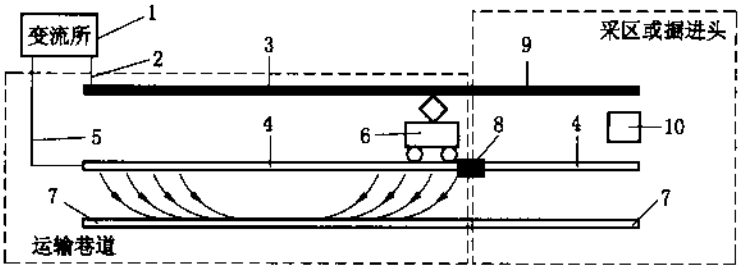
1.4.7　杂散电流的危害与防治

在煤矿井下，杂散电流主要是指不按规定路径流通的电流。所谓规定路径，是指“变流所正极—馈电线—架线—机车—钢轨—回电线—变流所负极”这一通路。

图 8－1－101 表示单电源供电的线路上有一台机车时杂散电流的流通情况。分析表明，绝大部分牵引电流经过钢轨返回至牵引变电所。但由于环境潮湿，钢轨与大地之间直接接触等原因，总会有一部分电流泄漏进入大地后，经过管路或电缆外皮等介质返回到牵引变电所。这一部分电流是杂散电流的主要来源。此外，如果架线的瓷瓶绝缘性不好或架线末端（运输巷道与掘进巷道或采区连接处）电压过高，也可能造成电流外泄，这一部分外泄电流也将构成杂散电流的一部分。

1.4.7.1　杂散电流的危害

杂散电流对煤矿的安全生产造成了严重威胁。井下直流牵引供电系统产生杂散电流的危害主要包括对管线及金属结构的腐蚀，使电雷管发生先期放炮，引起瓦斯爆炸，造成煤仓着火，人身触电，干扰井下通信系统，造成漏电保护误动作等。这将影响到煤矿的正常生产。随着煤矿井下的电压等级、设备容量等不断增加，杂散电流的危害问题将更加突



1—牵引变电所；2—馈电线；3—接触线；4—钢轨；5—回流线；
6—电机车；7—管线；8—绝缘夹板；9—金属假顶；10—采区煤仓

图 8-1-101 井下直流电机车杂散电流的流通示意图

出，因此杂散电流及其危害是煤矿井下必须高度重视的问题。

《煤矿安全规程》规定：变电所（站）、整流站、绞车房等重要场所，以及大中型采掘运输设备应配备通信设备。通信设备应不受接触网、高压线、雷雨放电和杂散电流的影响。《爆破安全规程（GB 6722）》规定：爆破作业场地的杂散电流值大于 30mA 时，禁止采用普通电雷管。

根据《煤矿井下牵引网络杂散电流防治技术规范》的规定，下列地点的杂散电流值不大于 60mA：

（1）采区内各巷道中的轨道对总接地网间。

（2）采煤工作面内的金属假顶对总接地网间。

（3）采区内上、下山的轨道与运输大巷连接处的绝缘夹板附近的轨道对总接地网间。

（4）掘进工作面与掘进巷道内任何地点的轨道对总接地网间。

（5）掘进巷道的轨道与运输大巷连接处的第二道绝缘夹板处的轨道对总接地网间。

（6）采区煤仓对轨道间。

（7）井下爆炸材料库铁门对轨道间。

1.4.7.2 杂散电流的防治措施

1. 降低轨道纵向电阻和轨道接缝电阻

轨道纵向电阻越高，轨道上各点电位越高，相应杂散电流值越高。如果现场轨道接缝连接不好或接缝电阻过大，则杂散电流值更大。

降低轨道纵向电阻，可采取的措施包括：

（1）设法减小轨道的接缝电阻。《煤矿安全规程》第三百五十四条要求必须用导线或采用轨缝焊接工艺加以连接，并对连接后的接缝电阻作了具体规定。例如，按《煤矿安全规程》规定 15kg/m 钢轨的接缝电阻为 0.00027Ω。另外一种减小轨道接缝电阻的措施是加设导线（如电缆）的方法连接两回流轨。

（2）尽量采用电阻率较低的钢轨。截面积越大的钢轨，电阻率越低。

（3）保证各平行回流钢轨之间每隔一段距离连接一根导线，以及道岔各部分和道岔心之间有导线连接，为杂散电流提供一条低电阻通路。

2. 降低机车电流

轨地电压和杂散电流随着机车电流的升高而升高。进一步分析发现，机车电流与杂散电流成正比。当机车电流降低 50% 时，轨地电压和杂散电流均将降低 50% 。

根据功率公式 $P = UI$ 可知，在相同的牵引功率下，提高牵引电压，可以按相同的比例降低机车电流，从而达到减小杂散电流的目的。井下直流牵引供电系统对机车供电电压主要有 250V 和 550V 两种。采用 550V 电压对机车供电所产生的杂散电流相对小些。

3. 缩短供电区间长度

机车与牵引变电所之间的距离越远，接触电压越高，杂散电流从电缆或管路返回轨道的区段越长，即腐蚀区域越大。当机车在架线末端启动时，泄漏电流的总和与区间长度的平方成正比，因此缩短供电半径是降低杂散电流，减小腐蚀区域的有效手段之一。

增设变流所是缩短供电区间长度的方法之一，但这种方法的成本较高。

为了降低成本，可以采用设立回流线的方法，这样电流从回流电缆返回到牵引变电所，相当于缩短了轨道的长度（供电区间长度）。

4. 增大轨地过渡电阻

轨地过渡电阻值的降低是产生杂散电流的最主要原因。当轨地过渡电阻小于一定值时，杂散电流急剧增加，杂散电流的最大值有可能达到机车电流的 80% ，这是十分危险的情况，因此在设计阶段应确保轨地过渡电阻处于较高水平。

进一步分析表明，降低轨道纵向电阻，减小机车电流和缩短供电区间长度虽然是杂散电流防护的重要手段，但更适合在直流牵引供电系统的设计阶段考虑。一般在直流牵引供电系统运行若干年后才会发生杂散电流危害，因此通过注重维护来保持一定的过渡电阻。所谓“注重维护”，就是要从源头上防治杂散电流，保证良好的轨地绝缘，对道床经常清理，应无杂物、无浮煤、无积水。

5. 消除采区和掘进巷道中的杂散电流

在没有牵引网络的采区或掘进巷道内，杂散电流主要是通过轨道进入采掘区的，将杂散电流的主要通道切断是限制杂散电流的一种有效办法，因此在运输主巷道与采区或掘进巷道交界处安装绝缘道夹板，有助于减小杂散电流。

为防止列车或采掘设备进入采区或掘进巷道将绝缘道夹板短路，有必要安装两道绝缘夹板，且两道绝缘夹板之间的距离要大于列车或采掘设备的全长。同时，要加强维护，确保绝缘夹板附近的巷道底板干燥，设法防止该处积水和潮湿而失去绝缘作用。

装设绝缘夹板（特别是装设两道绝缘夹板）对于采区或掘进巷道中杂散电流的降低，效果特别明显。当绝缘夹板电阻为 1kΩ 时，采区或掘进巷道中的轨地电压和杂散电流几乎为零，电雷管两端电压和流过电雷管的电流几乎为零，因此绝缘夹板电阻越大越好。

当然，还要经常并及时地了解采区或掘进巷道中直流或交流设备的漏电情况，以确保没有杂散电流。

6. 消除架线的泄漏电流

架线的泄漏电流是存在杂散电流的一个重要根源。架线的绝缘瓷瓶潮湿或落满煤尘，会降低绝缘瓷瓶的绝缘效果，导致架线的泄漏电流增加，因此架线绝缘瓷瓶必须定期维护。

7. 合理排流

采取措施将回流轨道向地下泄漏的电流引回到变流所负极，是防止杂散电流腐蚀的一

项有效措施。此外，利用排流法还可以用来测量轨地过渡电阻的大小以及估算杂散电流（轨道泄漏电流）的大小。

在注意到排流法优点的同时，应特别注意排流时间不能过长，且保证轨地电压和架线泄漏电流不超标，绝缘夹板电阻符合安全要求，因为总接地网与回电点连接之后，实质上减小了原杂散电流流通路径的电阻，导致杂散电流增加。

8. 改变井下直流牵引变流所电网极性

直流牵引电网改变极性就是把牵引变流所的正电源接钢轨，负电源接架线，牵引电机的电极电流与磁场电流方向同时改变，故电机的旋转方向不变。而变流所的极性改变后可减少电缆管线等金属腐蚀，避免漏电保护装置误动作。

附录 A 矿井供电标准及规范

A1 供配电设计标准及规范

（1）电工术语（GB/T 2900）；
（2）电气图用图形符号（GB/T 4728）；
（3）煤矿电气图专用图形符号（MT/T 570）；
（4）高压开关设备电气图形符号及文字符号（JB/T 5872）；
（5）煤炭安全规程电气部分；
（6）煤炭工业矿区总体规划规范（GB 50465）；
（7）煤炭工业矿井设计规范（GB 50215）；
（8）矿山电力设计规范（GB 50070）；
（9）煤矿井下供配电设计规范（GB 50417）；
（10）爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范（GB 50058）；
（11）供配电系统设计规范（GB 50052）；
（12）低压配电设计规范（GB 50054）；
（13）35～110kV 变电所设计规范（GB 50059）；
（14）35～110kV 无人值班变电所设计规程（DL/T 5103）；
（15）10kV 及以下变电所设计规范（GB 50053）；
（16）变配电所总布置设计技术规程（DL/T 5056）；
（17）火力发电厂、变电所二次接线设计技术规程（DL/T 5136）；
（18）通用用电设备配电设计规范（GB 50055）；
（19）110～500kV 架空送电线路设计技术规程（DL/T 5092）；
（20）66kV 及以下架空电力线路设计规范（GB 50061）；
（21）10kV 及以下架空配电线路设计技术规程（DL/T 5220）；
（22）电力工程电缆设计规范（GB 50217）；
（23）电力变压器选用导则（DL/T 573）；
（24）高压配电装置设计技术规程（DL/T 5352）；
（25）电流互感器和电压互感器选择及计算导则（DL/T 866）；
（26）交流高压断路器参数选用导则（DL/T 615）；

（27）电力装置的电测量仪表装置设计规范（GB/T 50063）；

（28）电力装置的继电保护和自动装置设计规范（GB 50062）。

A2　供配电设备标准及规范

（29）3～110kV 高压配电装置设计规范（GB 50060）；

（30）圆线同心绞架空导线（GB/T 1179）；

（31）交流电气装置的过电压保护和绝缘配合（DL/T 620）；

（32）交流电气装置的接地（DL/T 621）；

（33）煤矿井下用电器设备通用技术条件（MT/T 661）；

（34）煤矿井下低压供电系统及装备通用安全技术要求（AQ 1023）；

（35）煤矿井下电气设备安全技术要求；

（36）矿用一般型电气设备（GB 12173）；

（37）矿用一般型电力变压器（JB 3955）；

（38）高压交流断路器（GB 1984）；

（39）交流输电线路用复合外套金属氧化物避雷器（DL/T 815）；

（40）矿用隔爆型移动变电站（GB 8286）；

（41）矿用隔爆型高压配电装置（JB/T 8739）；

（42）矿用隔爆型馈电开关（JB/T 3956）；

（43）矿用隔爆型低压交流真空馈电开关（MT 871）；

（44）矿用隔爆型低压交流真空电磁启动器（MT 111）；

（45）矿用隔爆型低压交流双速真空电磁启动器（MT/T 592）；

（46）煤矿用阻燃电缆（MT 818）；

（47）矿用隔爆型检漏继电器（MT 189）；

（48）矿用隔爆型煤电钻变压器综合装置（JB/T 6312）；

（49）矿用断电控制器（MT/T 1079）；

（50）矿用隔爆型电缆连接器（JB/T 5350）；

（51）煤矿用隔爆型高压电缆连接器（MT/T 947）；

（52）隔爆型电气设备低压接线端子（MT/T 412）；

（53）煤矿用隔爆型低压电缆接线盒（MT 428）。

A3　电能质量和无功的标准及规范

（54）电能质量　电力系统频率允许偏差（GB/T 15945）；

（55）电能质量　供电电压允许偏差（GB 12325）；

（56）电能质量　电压波动和闪变（GB 12326）；

（57）电能质量　公用电网谐波（GB/T 14549）；

（58）电能质量　三相电压允许不平衡度（GB/T 15543）；

（59）电能质量　暂时过电压和瞬态过电压（GB/T 18481）；

（60）电能质量技术监督规程（DL/T 1053）；

（61）电磁兼容环境工厂低频传导骚扰的兼容水平（GB/T 18039.4）；

（62）电力网电能损耗计算导则（DL/T 686）；

（63）国家电网公司电力系统无功补偿配置技术原则（国家电网生［2004］435 号）；

（64）电力系统电压和无功电力技术导则（SD325－89）；
（65）电力系统电压和无功电力管理条例（能源电［1988］18号）；
（66）并联电容器装置设计规范（GB 50227）；
（67）高压静止无功补偿装置（DL/T 1010）；
（68）低压成套无功功率补偿装置（GB/T 15576）；
（69）低压无功功率自动补偿控制器（JB/T 9663）；
（70）低压无功就地补偿装置（JB/T 7115）；
（71）矿用隔爆型低压无功功率终端补偿器（MT/T 10480）；
（72）并联电容器用串联电抗器设计选择标准（CECS 32）；
（73）并联电容器装置的电压、容量系列选择标准（CECS 33）。

A4 其他相关标准

（74）电业安全工作规程（发电厂和变电所电气部分）（DL 408）；
（75）煤矿用电器设备产品型号编制方法和管理办法（MT/T 154.2）；
（76）电气装置安装工程电气设备交接试验标准（GB 50150）；
（77）变电站运行导则（DL/T 969）；
（78）电力变压器检修导则（DL/T 573）；
（79）电力变压器运行规程（DL/T 572）；
（80）电力设备预防性试验规程（DL/T 596）；
（81）互感器运行检修导则（DL/T 727）；
（82）交流电力系统金属氧化物避雷器使用导则（DL/T 804）；
（83）气体绝缘金属封闭开关设备运行及维护规程（DL/T 603）；
（84）煤矿井下牵引网络杂散电流防治技术规范（MT 670）。

附录B 特殊环境条件下的修正

B1 特殊温度条件下的修正

若电器在高于 θ_0 的环境温度，但不超过60℃下工作时，其允许工作电流 I_x 应小于额定电流使用，I_x 可按式（1）计算

$$I_x = I_N \sqrt{\frac{\theta_n - \theta_x}{\theta_n - \theta_0}} \tag{1}$$

式中 θ_n——电器正常允许发热温度，见表B1；

θ_x——实际环境温度；

θ_0——计算温度。

若电器在最高环境温度低于 θ_0 工作时，则电器的允许工作电流可略增大，每低于计算温度（θ_0）一度，高压电器（如断路器、隔离开关、负荷开关、电流互感器、绝缘套管等）的允许工作电流，可以比额定值增大0.5%，但总增值不能超过额定值的20%。

注：干热带额定最高空气温度在按绝缘热老化寿命计算温升时可采用45℃。

交流高压电器长期工作时最大发热温度见表B1，国产电器使用环境温度条件见表B2。

表 B1　交流高压电器长期工作时的最大发热温度

序号	电器零件、材料及类别[1][2][3][4]		最高允许温度/℃			周围空气温度为 40℃ 时的允许温升/K		
			空气中	SF_6 中	油中	空气中	SF_6 中	油中
1	触头[5][6]	裸铜或裸铜合金	75	90	80	35	50	40
		镀锡	90	90	90	50	50	50
		镀银或镀镍(包括镀厚银及镶银片)	105	105	90	65	65	50
2	用螺栓或其他等效部分连接的导体接合部分[7]	裸铜、裸铜合金和裸铝、裸铝合金	90	105	100	50	65	60
		镀（搪）银	105	105	100	65	65	60
		镀银（包括镀厚银）或镀镍	115	115	100	75	75	60
3	用其他裸金属制成或表面镀其他金属的触头或连接[8]							
4	用螺栓或螺钉与外部导体连接的端子[9]	裸铜、裸铜合金和裸铝、裸铝合金	90			50		
		镀(搪)锡或镀银（包括镀厚银）	105			65		
		其他镀层[8]						
5	起弹簧作用的金属零件[9]							
6	下列等级的绝缘材料及与其接触的金属零件[10][11]	（1）需要考虑发热对机械强度影响的：						
		Y（对不浸渍材料）	85	90	—	45	50	—
		A（对浸在油中或浸渍过的材料）	100	100	100	60	60	60
		E、B、F、H	110	110	100	70	70	60
		（2）不需要考虑发热对机械强度影响的：						
		Y（对不浸渍材料）	90	90	—	50	50	—
		A（对浸渍过的材料）	100	100	100	60	60	60
		E	120	120	100	80	80	60
		B	130	130	100	90	90	60
		F	155	155	100	115	115	60
		H	150	180	100	140	140	60
		（3）漆						
		油基漆	100	100	100	60	60	60
		合成漆	120	120	100	80	80	60

表 B1（续）

序号	电器零件、材料及类别①②③④		最高允许温度/℃			周围空气温度为40℃时的允许温升/K		
			空气中	SF_6 中	油中	空气中	SF_6 中	油中
7	不与绝缘材料（油除外）接触的金属零件（触头除外）	需要考虑发热对机械强度影响的：						
		裸铜、裸铜合金或镀银	120	120	100	80	80	60
		裸铝、裸铝合金或镀银	110	110	100	70	70	60
		钢、铸铁及其他	110	110	100	70	70	60
		不需要考虑发热对机械强度影响的：						
		裸铜、裸铜合金、镀银	145	145	100	105	105	60
		裸铝、裸铝合金、镀银	135	135	100	95	95	60

① 相同零件、材料及介质，其功能属于表中所列的几种不同类别时，电器最高允许温度和温升按各类别中最低值考虑。

② 表中数值不适用于处于真空中的零件和材料。

③ 封闭式组合电器、金属封闭开关设备等外壳的最高允许温度和温升由其相应的标准规定。

④ 以不损害周围的绝缘材料为限。

⑤ 当动、静触头有不同镀层时，其允许温度和温升应选取表中允许值较低的镀层之值。

⑥ 涂、镀触头，在按电器的相应标准进行下列试验后，接触表面仍应保留镀层，否则按裸触头处理。

a）关合试验和开断试验（如果有的话）。

b）热稳定试验。

c）机械寿命试验。

⑦ 当两种不同镀层的金属材料紧固连接时，允许温升值以较高者计。

⑧ 其值应根据材料的特性来决定。

⑨此值不受所联外导体端子涂镀情况的影响。

⑩ 以不损害材料之弹性为限。

⑪ 绝缘材料的耐热分级按 GB11021 的规定执行。

⑫ 对不需要考虑发热对机械强度影响的铜、铜合金、铝、铝合金，最高允许温度既不高于所接触的绝缘材料的最高允许温度，亦不得高于本表中序号 7 项（2）所规定的值。

⑬ 耐压等级超过 H 级者以不导致周围零件损坏为限。

表 B2 国产电器使用环境温度条件 ℃

环境温度	普通电工产品	热带电工产品	
		湿度带	干热带
最高	40	40	50
最低	−30	0	−5
年平均	20	27	27
日平均	30	—	—
月平均最高	—	35	45
最大日变化	—	—	30

B2　特殊海拔高度下的修正

对于安装在海拔 1000m 以上的高压电器，该使用场所要求的绝缘耐受电压是在标准参考大气条件下的绝缘耐受电压乘以修正系数 K_a 来决定，K_a 的计算式为：

$$K_a = e^{m(H-1000)/8150} \tag{2}$$

式中　H——海拔，m；

m——为了简单起见，取下述确定值：$m=1$ 用于工频、雷电冲击和相间操作冲击电压，$m=0.9$ 用于纵绝缘操作冲击电压，$m=0.75$ 用于相对地操作冲击电压。海拔修正系数 K_a 也可以由图 B1 选取。

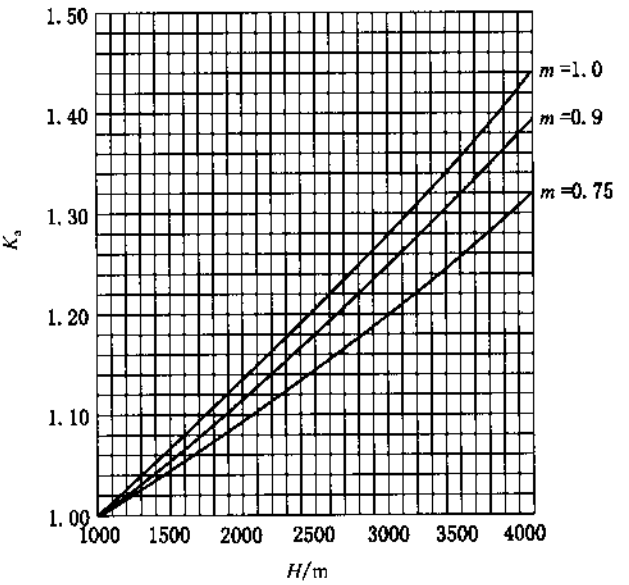


图 B1　海拔修正系数 K_a 与海拔 H 的关系曲线

随着海拔的增加，对导体载流量也有影响。裸导体的载流量应按所在地区的海拔和环境温度修正，其综合修正系数见表 B3。

表 B3　裸导体载流量在不同海拔及环境温度下的综合修正系数

导体最高允许温度/℃	适用范围	海拔/m	实际环境温度/℃						
			20	25	30	35	40	45	50
70	屋内矩形导体和不计及日照的屋外软导线		1.05	1.00	0.94	0.88	0.81	0.74	0.67
80	计及日照时屋外软导线	≤1000	1.05	1.00	0.95	0.89	0.83	0.76	0.69
		2000	1.01	0.96	0.91	0.85	0.79		
		3000	0.97	0.92	0.87	0.81	0.75		
		4000	0.93	0.89	0.84	0.77	0.71		

B3 地震影响条件下的修正

按有关规程规定，地震基本烈度为7度及以下地区的高压电器可不采取防震措施；对于地震烈度高于7度的地区，宜取消变压器的滚轮及其轨道，并应固定在基础上。对开关柜（屏）、保护屏等应采取螺栓固定或焊接方式安装；当地震烈度为8度或9度时，可将几个柜（屏）在中心位置上连成整体。

2 矿井排水

2.1 矿井排水技术与设备

现代矿井排水已把矿井水作为资源考虑，矿井水管理已进入了系统化管理阶段，集中了规范化、统计化、实时化和运筹化管理水资源质量及水环境的优点，运用系统论、信息论、控制论和计算机技术，建立起了资源管理信息系统。

2.1.1 井下涌水

在矿井建设和生产过程中，随时都有各种来源的水涌入矿井，涌入矿井的水被称为矿井水。矿井水按来源可分为地面水和地下水。地面水是指江、河、湖、沟渠、池塘里的积水以及季节性雨水、融雪和山洪等，如果有巨大裂缝与井下沟通时，就会造成水灾。地下水包括含水层水、断层水和采空区水。含水层水是指地下厚土层和各种各样的岩层中含的水，其中砾石层、流砂层、石灰岩层含水丰富，一旦与地面水相连通，将对矿井生产产生很大威胁。断层水是指断层附近破碎岩石中的积水，当断层把煤层和含水层或地面水沟通时，断层附近积存的大量水就会有造成矿井水灾的危险。采空区水指废弃井巷和采空区的积水，通常在煤层上部，离地面较浅，静水压力大，来势凶猛，且常含有害气体，危及人身安全。采掘工作面接近这些地区时，一不注意，就有发生井下透水事故的可能。上述各种水源不是单一存在和起作用的，在一定条件下可以相互沟通，互相补给。

矿井的涌水量就是单位时间涌入矿井的总水量，也称绝对涌水量，用 q 表示，通常以 m^3/h 度量。涌入矿井的水量也可用相对涌水量来表征。为了比较各矿涌水量的大小，常用同时期内相对于单位煤炭产量的涌水量作为比较的参数，称为含水系数，以 k_s（单位为 m^3/t）表示，可表达为

$$k_s = \frac{24q}{T} \tag{8-2-1}$$

式中　q——绝对涌水量，m^3/h；

　　T——同期内煤炭日产量，t。

由于涌水量的多少受到地质、水文地质、地形特征、气候条件、地面地下积水和开采方法等多种因素的影响，因此各矿涌水量可能不一致。一个矿在不同季节涌水量也是变化的，涌水高峰时的水量称为最大涌水量。一年内持续时间较长的涌水量称为正常涌水量。正常涌水量和最大涌水量呈季节性的变化。据统计，矿井排水量是采煤量的2～7倍，涌水量大的矿井可多达40倍。因此，搞好矿井排水是提高经济效益的重要组成部分。

溶于矿井水的物质很多，矿井水性质相对复杂。水穿过岩层并沿坑道流动时溶入各种物质，所以矿井水密度比清水大，15℃的矿井水密度为1015～1025kg/m³。矿井水按氢离

子浓度 pH 值可分为：碱性——pH > 7、中性——pH = 7、弱酸性——pH = 4 ~ 6 和强酸性——pH = 0 ~ 3。酸性水对排水设备的非耐酸金属零件会产生腐蚀作用，对于 pH < 3 的强酸性矿井水，应加以中和处理或采用耐酸排水设备。矿井水中含有的悬浮状固体颗粒进入水泵后会加速叶轮金属表面的磨损，因此，矿井水中的悬浮颗粒应在进入水泵前加以沉淀，而后再经泵排出矿井。

2.1.2 井下排水系统

矿井排水应根据矿井深度、开拓方式以及各水平涌水量大小的不同，采用不同的排水系统。图 8 - 2 - 1 所示给出了几种单水平开采时的排水系统。立井单水平开采时，可以将全部巷道的水聚集于水仓中，并用排水装置直接排至地面（图 8 - 2 - 1a）。斜井单水平开采时，可沿井筒敷设排水管或通过专用的钻孔设置排水管，用泵将水直接排至地面（图 8 - 2 - 1d）。直接排水系统较简单，开拓量小，管路敷设较易，基建费用低，便于管理，是我国通常采用的系统。目前我国直接排水井深达到 1100 多米。

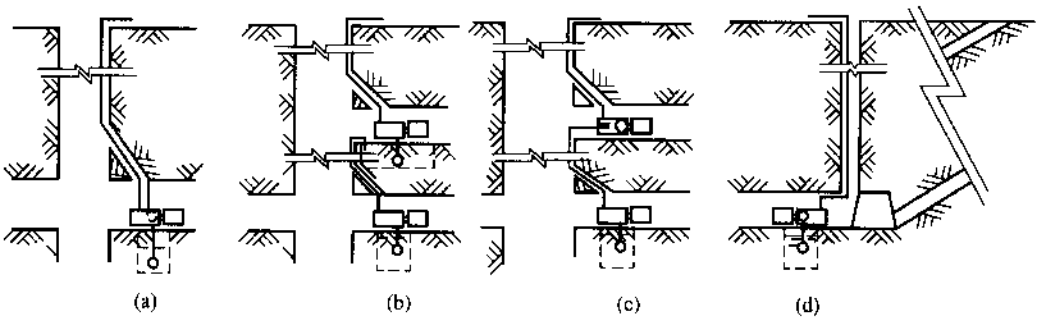


图 8 - 2 - 1 单一水平开采时的排水系统

单一水平开采时，若井筒较深，排水所需压头超过了水泵可能产生的扬程时，可以采用分段排水系统。有两种方案：其一是在井筒中部开拓泵房，并且设有水仓（图 8 - 2 - 1b），首先将矿井水排至中间水仓，然后再由该泵房的水泵，将水排至地面；其二是只开中间泵房，不设水仓，上、下部的排水装置按间接串联方式工作，将水排至地面（图 8 - 2 - 1c）。二者相比较，前者的优点是上、下装置互不影响，缺点是必须开拓中间水仓；后者的优点是不需要中间水仓，缺点是要求上、下相互配合，其中上、下任意两台泵应能串联工作，这使管路布置变得十分复杂，而且下部的排水装置可能承受相当于全井深的水头水压。因此，为了保证工作可靠，应尽可能采用前一方案。

两个或多个水平同时开采时，各水平可分别设置水仓、泵房和排水装置，将各水平的水分别直接排至地面（图 8 - 2 - 2a）。此方案的优点是上、下水平互不干扰，缺点是装置多、管路多。当上水平的涌水量较小，没有必要单独设置排水装置时，可将上水平的水下放到下水平，而后由该水平的排水装置直接排至地面（图 8 - 2 - 2b）。此方案的优点是只需一套排水设备，缺点是上水平的水下放后再上提，损失了水的位能，增加了电耗。

多水平同时开采时，除采用上述直接排水系统外，还可采用分段排水系统。如图

8－2－2c 所示，此系统常用于开采具有下山的缓倾斜煤层的矿井中。若下水平的水量较小，则在该水平可以设置辅助排水装置，将水转排至上水平有大型排水装置的水仓。这种系统的最大缺点是上水平装置停止运转时，两水平都有被淹没的危险。

总而言之，无论单一水平还是多水平开采，选用哪一种排水系统，都要经过技术和经济的综合比较后才能确定。

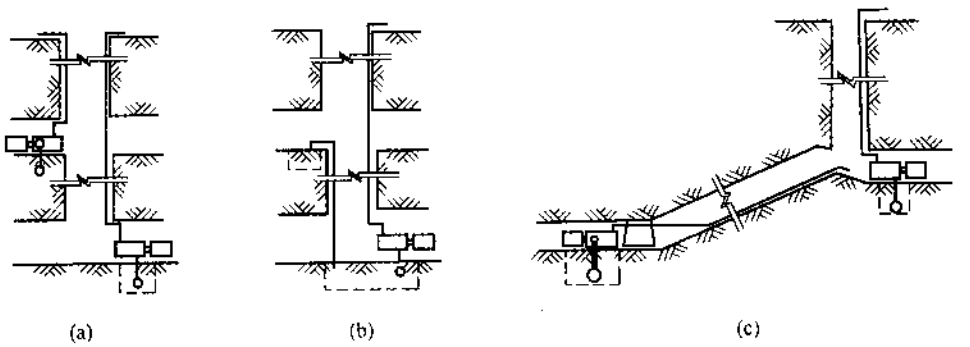


图 8－2－2　多水平同时开采时的排水系统

2.1.3　矿井排水方式

涌入矿山坑道的水可以沿倾斜坑道流往露天的水沟而排出矿外，称为自流排水。借助排水设备将矿井水排到地面，称为扬水排水。

在平硐矿井可采用自流排水，借助地势利用平硐朝出口方向的斜坡通过水沟将水放出。在露天开采情况下，若地势允许也可利用倾斜的水道自流排出。

大多数矿井采用扬水排水。主排水设备负责把全矿或大部分涌水排至地面，辅助排水设备负责把下一开采水平的水排至主排水设备所在水平，区域排水设备负责把区域的涌水直接排至地面（通常沿专用钻孔中的管道排出），转载排水设备负责把由于反向坡度不能自流集中到主排水设备的水，转载到主排水设备。中央排水设备负责把几个涌水量不大的矿井涌水，汇集起来排出矿井。这些排水设备，通常都是固定在专门的硐室内，故统称为固定式排水设备。

为了把掘进工作面或淹没坑道中的水排除，要求水泵随工作面前进或水位下降而移动。所用水泵和电机，配套装在整体的底架上，而底架被绞车用钢绳牵引移动，故称为移动式排水设备。

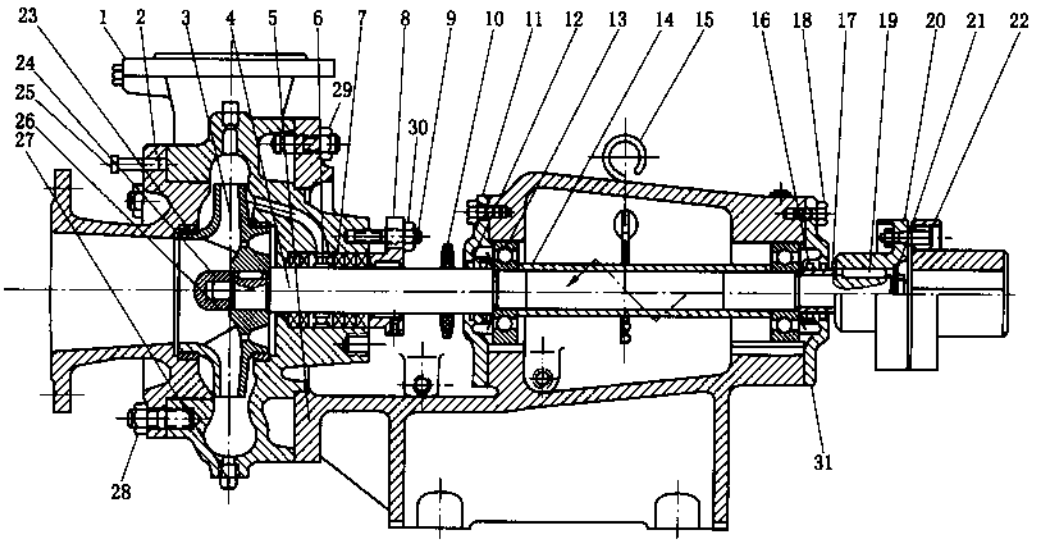
2.1.4　矿井排水设备

矿井排水设备主要包括水泵、配套电机、管路及其附件。矿井排水可以分为采区排水与矿井主排水，排水设备主要为矿用水泵。矿用水泵按使用特点可分固定式和移动式两类。固定式水泵安装在泵房内，多用卧式离心泵，如主排水泵、区域水泵和辅助水泵。主排水泵和区域水泵均为多级离心泵，辅助水泵一般是单级悬臂泵。排酸性水时需用耐酸泵。移动式水泵用于井巷掘进和被淹没矿井的排水。为适应不同的工作条件，所用水泵种类甚多，目前，矿山主要排水设备常用 D 型、DA 型和 TSW 型多级离心式水泵，而井底水窝和采区局部排水则常用 B 型、BA 型和 BZ 型单级离心式水泵。除常用的卧式离心泵

和立式离心吊泵外，尚有往复泵、蜗杆泵、喷射泵（压力扬水器）、气升泵（压气扬水器）、潜污泵、潜水泵等。

2.1.4.1 矿用排水泵

图 8-2-3 所示是一种单级泵，它的吸水短管呈收缩锥形，与泵盖 2 铸成一体。叶轮、泵盖、泵体和托架等都是铸铁件，泵轴由优质碳素钢制成。这类泵体积小、重量轻、结构简单，便于搬运和维护检修，用于排除井底水窝积水或作为压缩空气站的供水泵，以及其他的辅助供、排水设施。

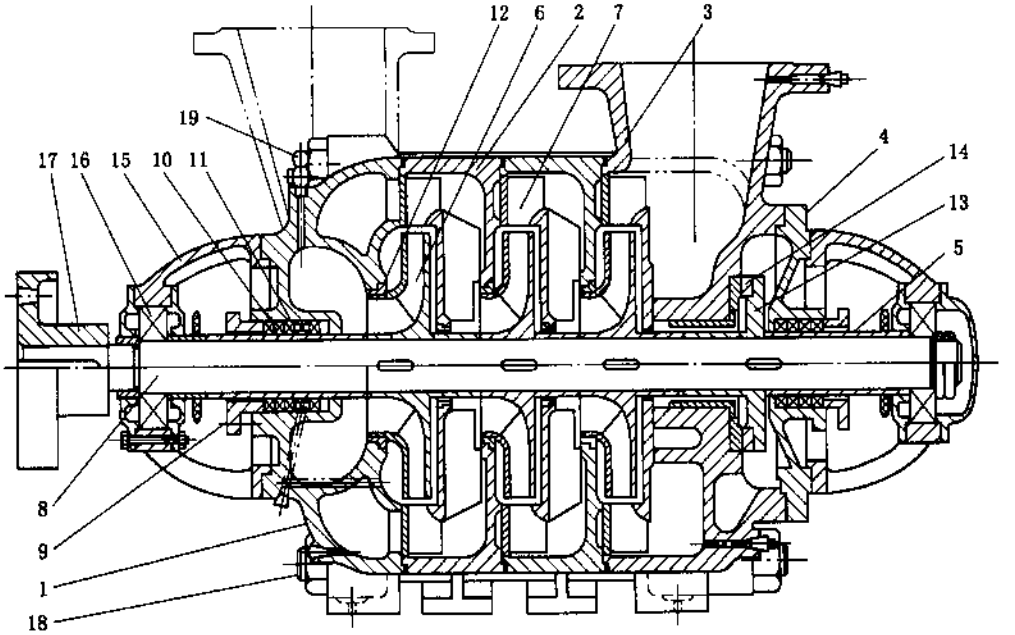


1—泵体；2—泵盖；3—叶轮；4—轴；5—托架；6—水封环；7—填料；8—填料压盖；9—双头螺栓；10—挡水圈；11—轴承端盖；12—挡油圈；13—滚珠轴承；14—定位套；15—油标；16—挡油圈；17—挡套；18—螺栓；19—键；20—联轴节；21—止退垫圈；22—小圆螺母；23—密封环；24—叶轮螺母；25—螺钉；26—外舌止退垫圈；27—四方螺塞；28、29、30—六角螺母；31—轴承端盖

图 8-2-3 卧式、单级、单吸水泵

图 8-2-4 所示是一种多级泵，其结构特点是泵体由进水段、出水段和中段等分段组成。可以看出，第一级叶轮入口直径比其余各级叶轮的大，这是为了提高泵的吸水性能。泵进、出水口法兰盘侧边上的螺孔，用于装配真空计和压力表。在进水段上方的气嘴，可以在向泵内充水时放出空气。环境温度在冰点以下，若长期停泵时，可通过进水和出水段下部的四方螺塞，放出存水以防冻裂。目前这类泵最高扬程可达 1200 多米，流量达 450m^3/h，效率达 80%。在矿山工业中，它是主排水设备的常用水泵。

如图 8-2-5 所示是深井泵，这类泵属于立式、多级分段水泵。开凿井筒时，在井周围打钻孔，将泵体送入钻孔中抽水，可作为立井掘进和淹没矿井排水时的移动式排水设备。泵工作时，其工作部分和输水管插入钻孔中，其传动部分则坐落在地面的底架上。由于工作部分深入钻孔水位以下，因而不必注水，不需底阀，只有很短的滤水网。这种泵适用于水位大约在 10～100m 范围变化的排水工作。



1—进水段；2—中段；3—出水段；4—尾盖；5—轴套；6—叶轮；7—导水圈；8—泵轴；
9—填料压盖；10—填料；11—水封环；12—密封环；13—平衡盘；14—平衡环；
15—轴承部件；16—滚柱轴承；17—联轴节；18—拉紧螺栓；19—放气栓

图8-2-4　卧式、单吸、多级分段式水泵

如图8-2-6所示为吊泵。吊泵用于凿井时的掘进排水，可以借助于吊挂装置在井筒内上下移动，通过绳轮的钢丝绳伸长或缩短来实现。泵工作部分最下端，装有带底阀的吸水软管，利用软管可以尽可能地将水窝内的水吸干。泵传动部分直接与工作部分相接，排水管则装于泵的最上部。工作人员可以在随泵一起移动的操纵台上控制排水闸阀和电机。

移动式高压潜水电泵，其水泵和电动机成为一体一同置于水中，在地面通过电缆使电动机与电源接通，驱动水泵叶轮旋转。移动式高压潜水电泵具有结构紧凑、流量大、扬程高、安装移动方便、运行安全可靠等特点，可跟随水位高低上下移动，多用于矿山排水等临时抢险。

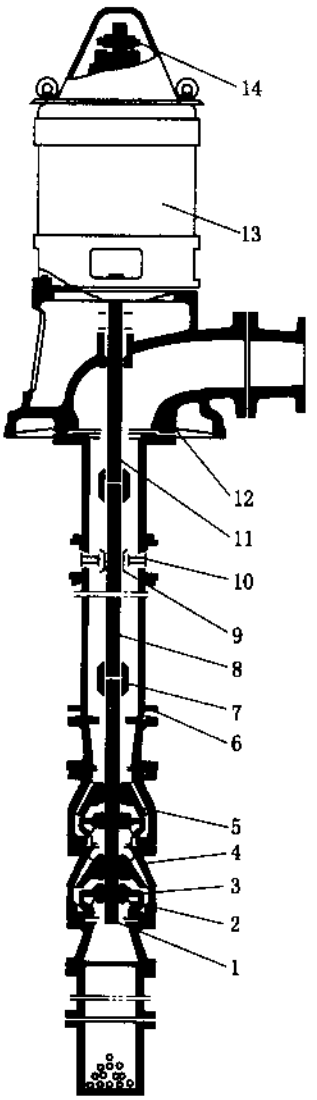
这种水泵的结构特点：水泵为离心式或混流式，采用水润滑轴承，水泵主轴与电动机轴用联轴器刚性连接。电动机为密封式充水湿式结构，定子绕组采用耐水的聚乙烯、绝缘的尼龙护套多层结构电磁线，电动机内部充满清水，用以冷却机体和轴承，可以长时间工作。井用潜水电泵目前有QJ系列和YQ系列。

2.1.4.2　管路及其附件

一般情况下，排水设备上应设如下附件。

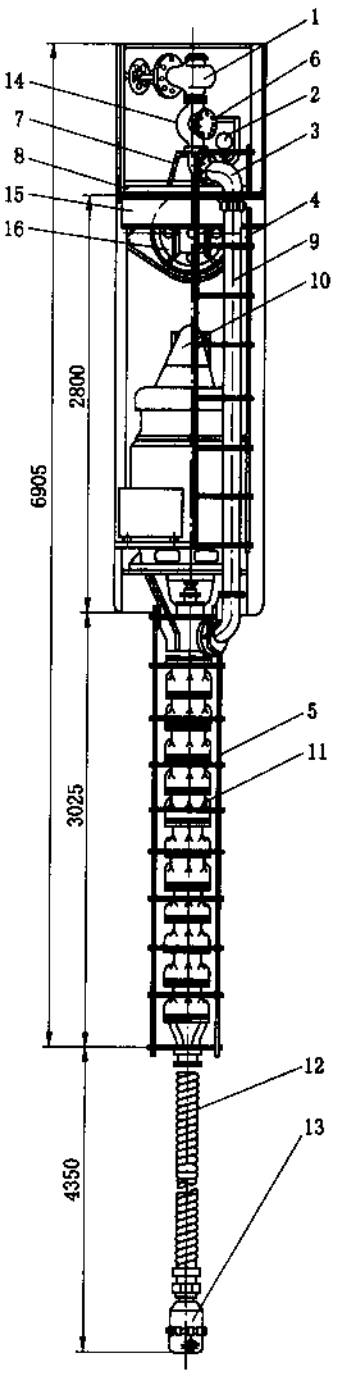
1. 带过滤网的底阀

用带过滤网的底阀滤去水中的木屑等固体颗粒，以防吸入泵内阻塞流道或损坏泵的有关设备。底阀用来挡住水泵启动前充入吸水管道内的水泄漏，当水泵启动后自动打开底阀。因底阀会增大吸水阻力，一般只用在中、小型水泵中。大型水泵通常没有底阀，常采



1—泵轴；2—锥形套；3—叶轮；4—泵壳；5—轴承衬套；6—输水管；7—联轴器；8—传动轴；9—轴承衬套；10—轴承体；11—电机轴；12—泵座；13—电机；14—调整螺母

图8-2-5 深井泵



1—闸阀；2—压力表；3—弯头；4—上部梯子；5—下部梯子；6—直嘴旋塞；7—弯头支架；8—活动操作台；9—输水管；10—电动机；11—泵工作部分；12—吸水软管；13—底阀；14—逆止阀；15—吊架；16—吊挂绳轮

图8-2-6 吊泵

用射流泵或水环式真空泵进行抽气灌水。

2. 闸阀

一般情况下吸水管道上不装闸阀。但是，当泵的吸水管道与其他管道相连，或者处于正压进水的情况下，吸水管道上应装设闸阀。

排水管路必须装闸阀，用来调节泵的流量，启动时应将此阀关闭。闸阀也可用于控制泵与水管的通路。

闸阀分为手动、电动、液动 3 种。电动闸阀主要由闸板和电动执行机构两部分组成。其输出轴采用阀杆螺母式连接形式，由接盘法兰带动阀杆上下运动，从而驱动阀杆带动闸板做上升和下降的直线运动，以达到开启和关闭阀门的目的。电动闸阀与自动控制系统连接后，可对阀门进行远程操作。阀门上设有手动操作机构，在无电源时可采用手动操作来启动和关闭，手轮顺时针转动时关闭阀门，逆时针转动时则开启阀门。

液动闸阀主要由阀板和液压驱动机构两部分组成，由液压站输出的压力液通过进入液动阀门的液压缸，推动柱塞杆往复运动，带动与柱塞杆相连的阀杆上下运动，从而带动闸板做上升和下降的直线运动，以达到开启和关闭阀门的目的。电动闸阀与自动控制系统连接后，可对阀门进行远程操作。

目前从现场使用的情况看，电动闸阀维护量和故障率相对较少，使用效果比液动闸阀好。

3. 逆止阀

逆止阀安装在闸阀上方，只能让水自下而上通过，从某种意义上说它是一个单向阀，其作用是用来阻止排水管路中的水倒流。特别是排水高度较大时，由于停电等事故，使水泵突然停止工作时，排水管中水突然返流形成水击，容易损坏水泵。

4. 真空表

连接在泵的吸入口法卡接头上，用来测定泵的进口真空度。

5. 压力表

连接在泵的出口法卡接头上，用来测定泵的出口压力。

2.1.4.3　对排水设备的要求

1. 固定排水设备

装在井下专门硐室内的固定式排水设备，即使在很短的时间内遭到破坏，矿井水也有可能淹没巷道。为保障安全生产，对它提出的主要要求有：

（1）工作水泵的能力是指在 20h 内排出 24h 的正常涌水量（包括充填水及其他用水）。除工作水泵外，还应配备作为备用和轮换维修的水泵。备用水泵的能力应不小于工作水泵能力的 70%，并且工作水泵和备用水泵的总能力，应在 20h 内排出矿井 24h 的最大涌水量。检修水泵的能力，应不小于工作水泵能力的 25%。水文地质条件复杂的矿井，可根据具体情况，在主泵房内预留安装一定数量水泵的位置或另外增设水泵。

（2）必须有工作和备用的水管，其中工作水管的能力，应能配合工作水泵在 20h 内排出 24h 的正常涌水量。工作和备用水管的总能力，应能配合工作水泵和备用水泵，在 20h 内排出 24h 的最大涌水量。

（3）配电设备应同工作水泵、备用水泵和检修水泵相适应，并能够同时开动工作水

泵和备用水泵。主排水泵房的供电线路不得少于两回路，当一回路停止供电时，另一回路应能担负全部负荷的供电。

（4）工作的水泵机组必须工作可靠。

（5）主排水设备，应有预防涌水突然增加致使设备被淹没的措施。

（6）水泵除要保证工作可靠外，还必须有较高的运行效率，否则应根据经济核算结果进行更换。

（7）应尽量采用体积小的水泵，以减少泵室尺寸。泵室结构应适合井下安装、拆卸、运输和维修。

（8）采用自动或远距离的操作系统。

（9）装在需要采取防爆措施的地区的水泵机组，其电气设备应是防爆型的。

2. 移动式排水设备

移动式排水设备的特点是随着掘进工作面的推进或水位下降而移动，因此要求：

（1）其水力特性应适合流量变化不大而扬程有较大变化的需要；有较好的吸水性能，以保证把水排干；可以排除泥水。

（2）在垂直泵轴平面上的外形尺寸不宜过大，以适应在横断面较小的巷道中工作。除此之外，还应能做到方便而迅速地转移。在需要倾斜放置时，应能在轴线倾斜的情况下正常工作。

2.1.5 国内外矿井排水设备对比

1. 国外排水设备主要生产厂家

ITT 飞力公司在流体技术领域已积累了 50 多年的经验，产品被广泛应用在污水处理厂、污水系统和其他应用领域中。ITT 飞力潜水排水泵是专门为恶劣工作环境设计的，它最为理想的应用场合是在含有大量黏土、碎石、钻屑末等的水和其他液体中。

格兰富也是世界上最主要的泵类产品制造商之一，循环泵（UP）、潜水泵（SP）和离心泵（CR）为它的三大主要类型泵。此外，格兰富还生产泵类产品及泵系统控制装置中的先进电子设备。

2. 国内排水设备主要生产厂家

目前国内煤矿使用较多为 MD 型矿用耐磨多级离心泵和 BQW 型矿用隔爆型潜污水电泵。生产厂家主要集中在上海、浙江等城市。

3. 国内外矿井排水设备的比较

与进口品牌泵相比较，目前国产排水设备在结构和性能方面仍存在问题，需进一步改进。但就价格而言，进口品牌为国内排水设备的 3～5 倍。此外，国产设备在售后服务和安装上有很大优势，国产矿井排水设备的防爆系列更加完善，有更多的选择空间。

虽然进口矿井排水设备的结构更合理、性能更突出，但就目前使用的情况看，国产排水设备由于有价格、售后服务和安装上的优势，在矿井主排水及采区排水中应用较多。

2.2 矿井排水设备运行工况

水泵运行工况与水泵的压力特性和管网压头特性有关。

2.2.1 排水管路及其特性

排水时水所经过的管路称为排水管路，矿井水通过管网时，其流量与所需压头之间的

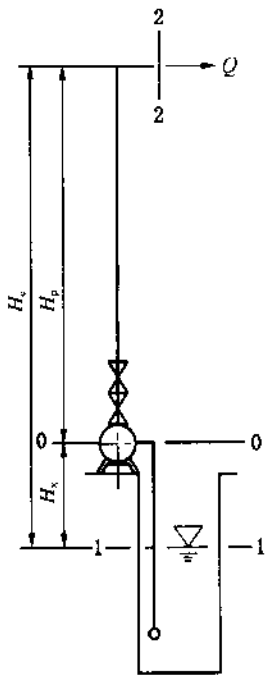


图 8－2－7　排水设备简图

关系称作管网压头特性。为了使矿井水在管网中流动，需要水泵输给流体一定的能量以克服在管网中的压头损失和位差。图 8－2－7 所示为一台工作水泵用一条管路排水的简图。水泵排水时泵输给水的压头与水需要泵输给它的压头是相等的。

排水管路特性方程式为

$$H = H_c + R_T Q^2 \tag{8-2-2}$$

$$R_T = \frac{8}{\pi^2 g}\left[\lambda_x \frac{l_x}{d_x^5} + \lambda_p \frac{l_p}{d_p^5} + \sum\xi_x \frac{1}{d_x^4}\left(\sum\xi_p + 1\right)\frac{1}{d_p^4}\right] \tag{8-2-3}$$

式中　H——需要泵输给水的压头高度，m；

H_c——测地高度，m；

Q——通过管路的流量，m^3/s；

R_T——管路阻力系数，s^2/m^5；

λ_x、λ_p——沿程阻力损失系数；

l_x、l_p——沿程管路长度，m；

$\sum\xi_x$、$\sum\xi_p$——管路上局部阻力损失系数之和；

d_x、d_p——管路内径，m；

g——重力加速度，$g = 9.807 m/s^2$。

式（8－2－2）表达了通过管路的流量与需要的压头之间的关系。分析式（8－2－2）可以看出，所需压头取决于测地高度 H_c、管路阻力系数 R_T 和流量 Q。对于具体矿井来讲，其 H_c 是确定的，因而当流量一定时，所需压头将取决于 R_T。R_T 的大小与管长、管径、管内壁状况及管件的种类和数量有关。如图 8－2－8 所示，以曲线形式表示的管网压头特性称作管网压头特性曲线。由排水管路特性方程式，取压头 H 为纵坐标，流量 Q 为横坐标的直角坐标系，绘于该坐标图上。该曲线 c 为一抛物线，顶点位于纵坐标轴上坐标值为 H_c 处。对于具体管路来讲，其参数完全确定时，特性曲线也是确定的。由曲线可看出，尽管测地高度 H_c 不变，通过管路流量不同时，所需的压头将随之而变，这显然是由于压头损失随流量的增加而增加的结果。

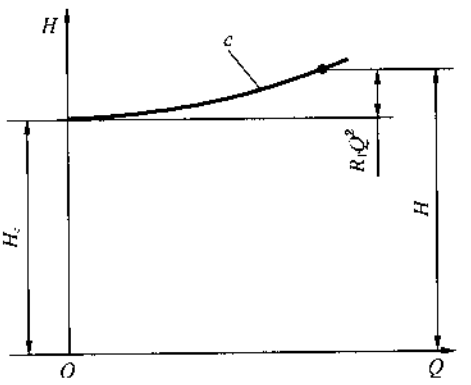


图 8－2－8　管网压头特性曲线

泵输给单位质量流体的能量 H 与排水过程单位质量流体所获得的有益能量 H_e 的比值，称为管路效率，用 η_g 表示，即

$$\eta_g = \frac{H_e}{H} \tag{8-2-4}$$

分析式（8-2-4）可知，为提高管路效率，必须减少管路阻力系数 R_T，以减少 H。为此，应尽量缩短管路敷设长度，保持管内壁的清洁和光滑，选择阻力较小的管件，减少其用量，管径大小要适当，以取得较好经济效益。

2.2.2 水泵实际特性及工况

叶轮是水泵传递能量的唯一部件。它的几何形状、尺寸和转速制约着流体在叶轮中流动的特征，决定着通过叶轮的流体量、传递给流体的压头、流量与压头之间的关系。当水泵转速一定时，其流量与压头之间的关系是确定的，此关系称为水泵压头特性。

对于水泵，在设计叶轮时通常都是按无预旋设计，故其叶片无限多时的理论压头或扬程为

$$H_{T\infty} = \frac{1}{g} u_2 c_{2u} \tag{8-2-5}$$

确定的水泵以一定转速旋转时，其叶轮外缘圆周速度 u_2、叶片出口角 β_2 和叶片出口面积 F_2 均为定值。此时，上式可化成

$$H_{T\infty} = A + BQ_T \tag{8-2-6}$$

式（8-2-6）即为水泵叶片无限多时的理论压头特性方程式，表示在 Q_T—$H_{T\infty}$ 坐标图上，如图 8-2-9 所示。

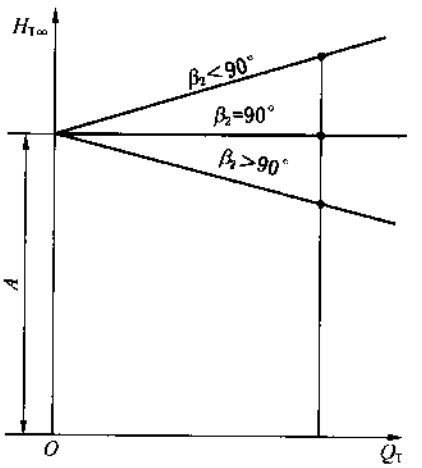


图 8-2-9 叶片无限多时的理论压头与理论流量的关系

水泵工作时有各种损失，即能量损失、容积损失和机械损失。这些损失使水泵的实际压头小于理论压头，实际流量小于理论流量，实际压头特性不同于理论压头特性。水泵理论压头特性曲线如图 8-2-10 所示。

水泵的实际压头、流量和功率的可靠数据只能用试验方法求得，而效率则可以借助水

泵效率计算公式求出。根据实验数据绘制的定转速下的压头与流量，功率与流量和效率与流量的关系曲线组成水泵实际特性。在泵特性曲线中还有允许吸上真空度与流量的关系曲线，如图 8－2－11 所示。

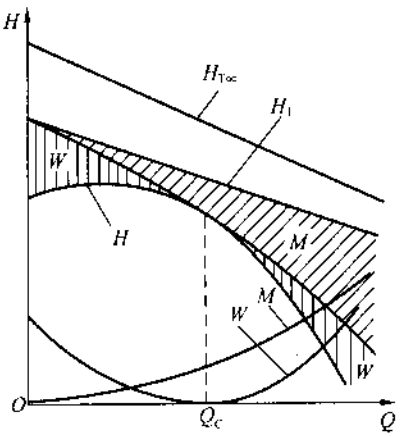


图 8－2－10　水泵理论压头特性

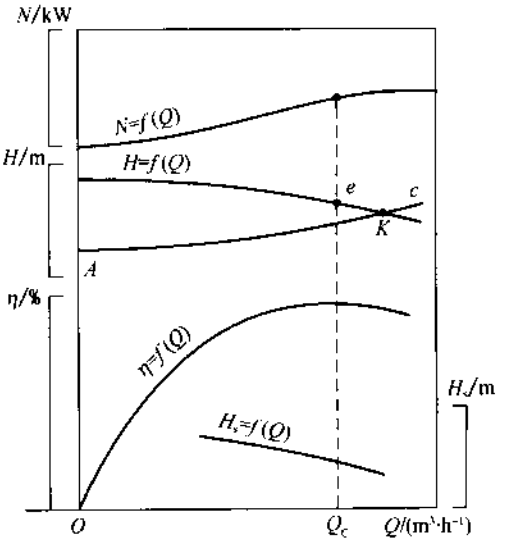


图 8－2－11　水泵实际特性曲线及工况

2.2.3　水泵正常工作及工况点

由水泵实际特性可知，它的压头、流量、轴功率和效率诸参数都是可变的，并且按一定规律变化。但水泵在一定的管网中工作时，这些参数都有确定值。这些确定值可由水泵实际特性的压头特性曲线与绘在同一坐标图上的管网特性的交点决定，该点称为工况点。工况点决定的各参数称为工况参数。如图 8－2－11 所示，扬程特性与管路特性的交点 k 为其工况点。水泵正常工作要求保证工况点处于高效区，一般在最高效率的 85% ~90% 区域。

2.2.4　水泵联合运行

当一台水泵单独工作不能达到排水目的或不能满足排水要求时，可以采用多台水泵同时联合工作。联合工作的方式是多种多样的，但其基本方式是并联和串联两种。

1. 并联工作

当多台泵同时向一条管路输水时称为并联。图 8－2－12 所示为两台泵并联时的工作情况，泵Ⅰ和Ⅱ的出水口接于一条管路 c 并同时向该管输水。在该情况下，若忽略两泵各自吸水管的差异，可以认为它所产生的扬程相等，并等于管网所需的压头，两泵的流量之和等于通过管路 c 的流量，这是并联工作的特点。

为求得联合工作中的联合工况和各自的工况，可以设想由一台等效泵代替两泵的作用。根据并联工作的特点，该等效泵产生的扬程应等于两泵并联时的扬程，等效泵产生的流量应等于两泵并联工作时的流量之和。在 H—Q 坐标图上做一条等扬程线 a—a，它与泵Ⅰ的扬程特性曲线交于 a_1 点，若 a_1 为泵Ⅰ在联合工作中的工况，则该等扬程线与泵Ⅱ

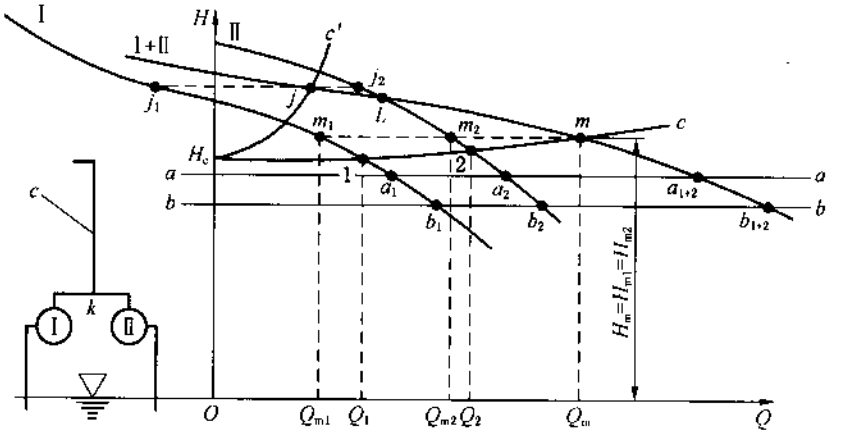


图 8-2-12 两泵并联工作示意图及工况

扬程特性曲线Ⅱ的交点 a_2，为泵Ⅱ在联合工作中的工况。因为 a_1 和 a_2 的扬程相等，可以设想等效泵的工况亦必然存在，为此等扬程线上的某点 a_{1+2} 处的流量应等于 a_1 和 a_2 两点流量之和。同理，可以找到等效工况点 b_{1+2}、m、j 等，连接这些点做成光滑曲线Ⅰ + Ⅱ，即为等效泵的扬程特性。简而言之，在同一坐标图上按照“等扬程线上流量相加”的原则，将两泵扬程特性曲线相叠加起来，即得到并联等效泵的扬程特性曲线。

等效泵扬程特性曲线Ⅰ + Ⅱ与管路特性曲线 c 的交点 m，为等效工况点或联合工作工况点。此时排水量为 Q_m，泵产生的扬程为 H_m。

并联的目的是增加通过排水管路的流量。并联的效益可以用并联后的流量 Q_m，与并联前扬程较高的泵Ⅱ单独工作的流量 Q_2 之差，对扬程较低的泵Ⅰ单独工作的流量 Q_1 的比值度量，用“q”表示，则有

$$q=\frac{Q_m-Q_2}{Q_1}\times 100\% \tag{8-2-7}$$

很明显，管路阻力系数越小，管路特性曲线越平缓，并联效益越高。反之，管路阻力系数越大，管路特性曲线越陡，并联效益越差。当管路阻力系数大到一定程度，管路特性曲线如图 8-2-12 中的曲线 c'所示时，并联后的工况点居于两泵各自工况 j_1 和 j_2 之间，亦即联合工作的流量比泵Ⅱ单独工作流量还要小。两泵中的第Ⅰ台以负流量工作，也就是说泵Ⅱ产生流量的一部分通过管路排出，另一部分则通过泵Ⅰ倒流回水池。在这种情况下失去了并联的意义。

若等效工况点为等效泵特性曲线与扬程较高的泵的特性曲线之交点 L，则联合工作的流量等于泵Ⅱ单独工作的流量，泵Ⅰ的流量为零。点 L 为并联有效和无效的分界点，称为并联极限工况。当等效工况流量大于极限工况流量时并联工作有效，反之则无效。

2. 串联工作

多台水泵的吸水口和排水口彼此首尾相接于一条管路工作，称为串联。若彼此首尾直接相接，称为直接串联；间隔一段管路，称为间接串联。

两台泵直接串联排水的情况如图 8-2-13 所示，两台泵间接串联排水情况如图 8-2-

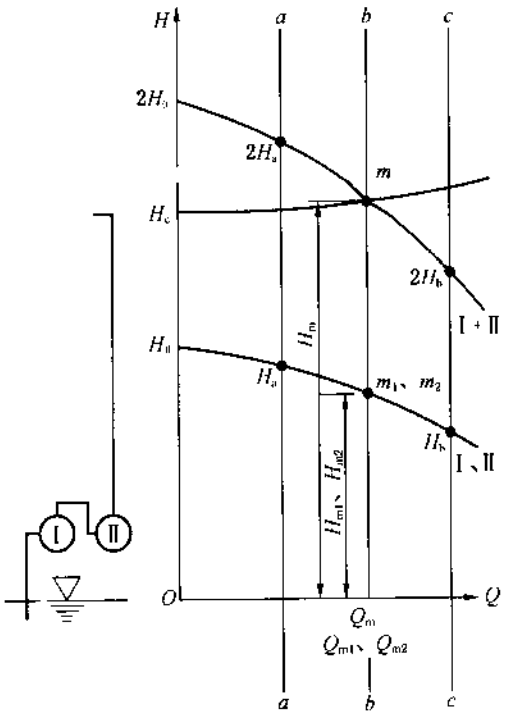


图 8－2－13　两泵直接串联排水示意图及工况

14 所示。无论直接串联还是间接串联，它们共同的特点是串联时各泵流量相等并等于管路流量，而管路所需扬程为各泵扬程之和。因此，若设想用一台等效泵代换串联的各泵，则可在同一坐标图上，按“等流量线上扬程相加”的原则将串联的各泵扬程特性曲线叠加，即得等效泵的扬程特性。

图 8－2－13 所示为两泵扬程特性曲线相同（曲线Ⅰ，Ⅱ）的两台泵直接串联情况。为求得等效泵特性，取一系列等流量线 a—a、b—b 和 c—c 等，将它们与泵扬程特性曲线交点的扬程值加大一倍，即为等效泵的扬程值，从而得到串联等效泵扬程特性曲线Ⅰ＋Ⅱ。后者与管路特性曲线的交点 m 为等效工况点或串联工作工况点。通过 m 点做等流量线与泵特性线Ⅰ、Ⅱ相交于 m_1、m_2 点（重合），即为两泵在串联工作中各自的工况点。等效工况 m 与串联中各自工况 m_1、m_2 的参数之间的关系为 $Q_{m1}=Q_{m2}$，$H_m=H_{m1}+H_{m2}$。

对于图 8－2－14，两泵间接串联排水的情况仍可用等效泵方法求解。然而，除此之外还必须解决一个间接串联中的特殊问题，即居于下部的水泵排水后，上部的水泵能否接续排水。为此，必须求得能够可靠地接续排水的条件。很明显，若居于下部的水泵将水排至上部泵位处还有剩余扬程，则可以接续排水。

串联时各泵流量相等，因此，自 m 点做等流量线分别与Ⅱ和Ⅰ交于 m_2 和 m_1 点，即为泵Ⅱ和Ⅰ在串联中的各自工况，显然，$Q_m=Q_{m1}=Q_{m2}$。

当泵Ⅰ有剩余扬程补给泵Ⅱ时，泵Ⅱ处于压力给水下工作。若泵Ⅰ没有剩余扬程或在扬程不足的情况下工作，则泵Ⅱ必须以吸水方式进水，这在实际上是很难办到的。因此，可靠接续排水的条件是：

$$\Delta H_{m1}>0 \tag{8-2-8}$$

或

$$Q_{m1}<Q_1 \tag{8-2-9}$$

式中　ΔH_{m1}——串联中居于下部的泵工况点剩余扬程；

Q_{m1}——串联中居于下部的泵工况点流量；

Q_1——下部泵单独对下部管路工作时的工况流量。

上述简单联合工作的方法，可以推广到多台泵联合工作中去。

2.2.5　泵的调节

排水设备不能达到正常工作条件或由于某种原因必须改变其工作参数时，需要进行调节。所谓调节就是改变工况，而工况是管路特性与泵扬程特性的交点。因此，若改变工

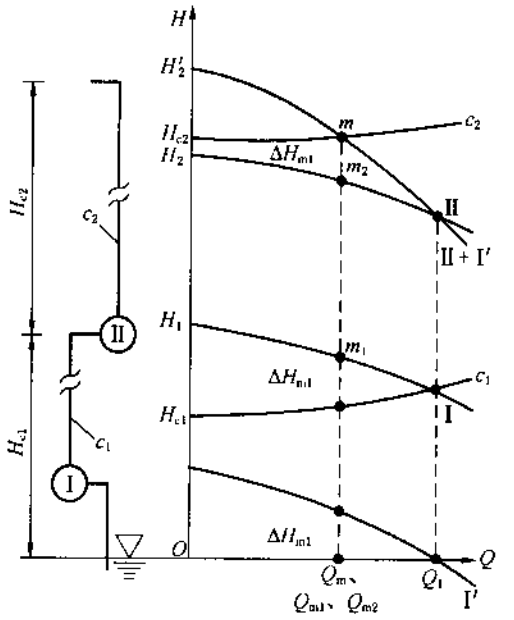


图 8－2－14 两泵间接串联排水示意图及工况

况，就必须改变管路特性或泵特性。水泵的调节方法一般有 4 种。

1. 节流调节

对于确定的排水管路，适当改变管路上闸阀的开启程度，水泵的某些特性将在测地高度不变的情况下发生变化，从而可以改变工况，以增大或减少流量，如图 8－2－15 所示。应当指出，利用这种方法调节时，应当进行经济核算。调节后的能耗往往大于调节前，其原因是排水管阻力增加了，而为了克服该阻力需多做功。因此，这种方法不能作为长期调节使用，只能在特殊情况下作为临时措施。例如，配置的电机功率过小，在 a 点运行时电机超负荷，为了在更换电机前继续排水，可暂时关小闸阀减小排水量，使电机在允许负荷

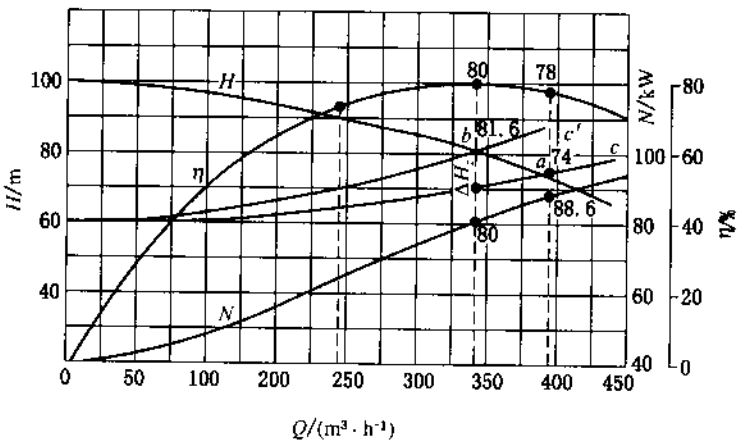


图 8－2－15 节流调节

下运行。

2. 减少叶轮数目

多级泵的扬程几乎与其叶轮数目成正比。因此，根据所需扬程可以决定所需叶轮数目

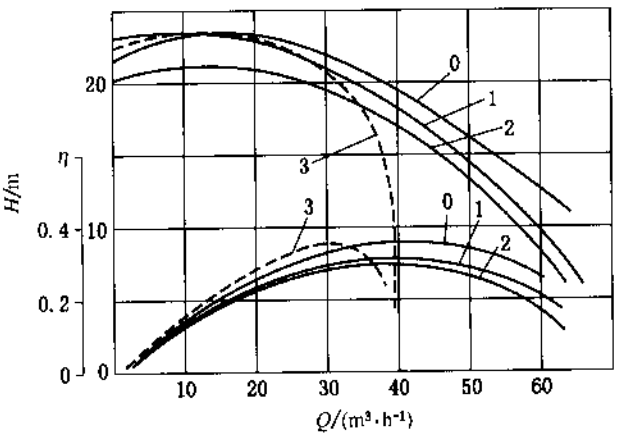
$$i=\frac{H}{H_i} \tag{8-2-10}$$

式中　i——所需叶轮数目；

H——所需扬程，m；

H_i——泵平均单级扬程，m。

知道需要的级数后，可拆除多余叶轮。根据实验结果（图 8-2-16），若拆除吸水侧一个叶轮（图 8-2-16 中曲线 3），由于增加了吸水侧阻力损失而过早发生汽蚀，使扬程特性在较小流量时就突然跌落。曲线 1 和 2 表示拆除最后一级和中间一级时的平均单级特性，它与拆除前的特性曲线比较，变化不大。从性能上看，拆除最后一级的影响最小。对于分段式水泵，可拆去包括叶轮在内的中间一段，但必须更换轴和拉紧螺栓。



0—原特性；1—拆除最后一级；2—拆除中间一级；3—拆除吸水侧一级后的平均单级特性

图 8-2-16　拆除叶轮前后的平均单级特性比较

3. 削短叶轮叶片

在保持转速不变的情况下，若将叶轮原直径 D_2 经车削后减到 D_2'，而且车削量不超过最大值（表 8-2-1）时，则车削后的特性参数可依切割定律换算，该定律可用下式表达：

$$H'=H\left(\frac{D_2'}{D_2}\right)^2 \tag{8-2-11}$$

$$Q'=Q\left(\frac{D_2'}{D_2}\right) \tag{8-2-12}$$

$$N'=N\left(\frac{D_2'}{D_2}\right)^2 \tag{8-2-13}$$

$$n_s'=n_s\left(\frac{D_2}{D_2'}\right) \tag{8-2-14}$$

表 8-2-1 离心泵叶轮的车削限度

比转速	60	120	200	300	350
最大车削量/mm	0.2	0.15	0.11	0.09	0.07

由式（8-2-11）和式（8-2-12）消去直径比，得到切割比例曲线表达式：

$$H' = \frac{H}{Q^2}Q'^2 \tag{8-2-15}$$

该比例曲线为一条通过坐标原点的二次抛物线。

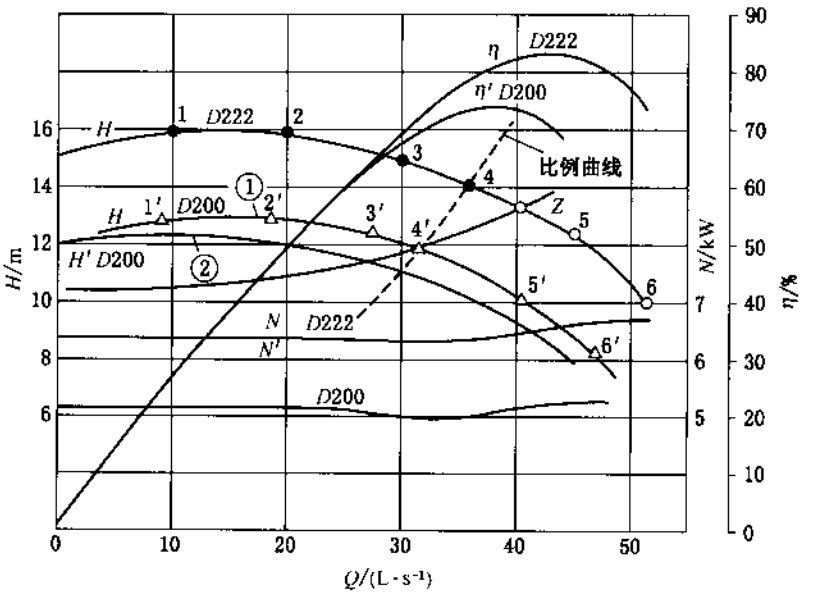
图 8-2-17 给出了按切割定律换算的特性曲线和实测的特性曲线，两者相较，实测曲线低于换算曲线。若拟使实测曲线接近计算结果，就必须减少车削量。实际车削量可用下式换算：

$$\frac{\Delta D}{2} = k\frac{D_2 - D_2'}{2} \tag{8-2-16}$$

式中 $\frac{\Delta D}{2}$——实际车削量，mm；

k——校正系数，该值随比转速而异。

车削后的效率有变化，它与原效率之比值，随车削量和比转速而异，如图 8-2-17 所示。由图 8-2-17 可看出，比转速低的水泵车削量较小时，其效率还可稍有提高；比转速较高时，则随车削量的加大效率降低。



①—按切割定律换算的曲线；②—实测曲线

图 8-2-17 按切割定律换算和实验特性曲线对比

4. 改变叶轮转速

水泵转速变化时，相应工况的压头、流量和功率分别按转速比的平方、一次方和三次方而变。这种关系称为比例定律，即

$$\frac{H}{H'}=\left(\frac{n}{n'}\right)^2 \tag{8-2-17}$$

$$\frac{Q}{Q'}=\frac{n}{n'} \tag{8-2-18}$$

$$\frac{N}{N'}=\left(\frac{n}{n'}\right)^3 \tag{8-2-19}$$

$$\eta=\eta' \tag{8-2-20}$$

比例定律说明水泵转速变化时，其压头特性曲线上的每一点都沿着通过该点的特定轨迹曲线移动。如图8-2-18所示，点1为转速n_1时特性曲线上的一点，当转速顺序变化至n_2、n_3和n_4时，点1相应变化至2、3和4。由点1到4移动的轨迹曲线称为比例曲线，它表达了相应工况移动的轨迹曲线。显然，比例曲线是一条通过确定工况和H—Q坐标图原点的二次抛物线。在转速变化的一定范围内，比例曲线与等效率曲线（图8-2-18的虚线）重合。这说明推导相应工况参数关系式时，关于效率不变的假设与实际相符。利用比例定律可以方便地由某一转速特性推算出另一转速时的特性。

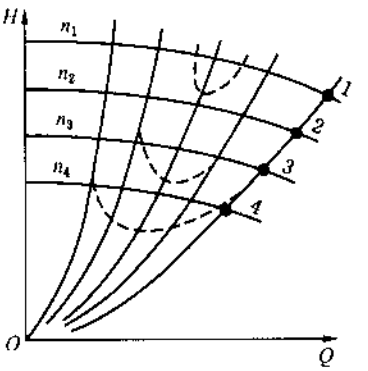


图8-2-18　转速变化时的比例曲线

泵主轴转速变化时，其特性将按比例定律变化。通过改变水泵转速来改变水泵的特性曲线，从而改变工况点。目前变频技术在煤矿得到广泛应用，采用变频技术改变水泵转速以达到调节目的。

2.2.6　矿井排水系统的工作（启动与停止）

在煤矿，泵对管路工作的方式可以是多种多样的，但都是以单台泵对管路的工作作为基础。

2.2.6.1　吸水高度

目前我国多数煤矿用于矿井排水的水泵，都装在水井水面以上的泵房底板上，如图8-2-19所示。水泵靠叶轮入口处的负压和水面上大气压之差使水升高，将水吸入泵内。吸

水高度是泵轴线的水平面与吸水池水平面标高之差，用 H_x 表示，则

$$H_x = Z_1 - Z_0 \tag{8-2-21}$$

由能量方程可得

$$H_x = \frac{P_a}{\rho g} - E_{x1} - \Delta H_x \tag{8-2-22}$$

式中 P_a——大气压强；

E_{x1}——泵入口截面处单位流体的能量，$E_{x1} = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$；

ΔH_x——吸水管水头损失。

分析式（8-2-22）可知，即使入口处速度降到零、压强降到绝对真空、吸水管上无损失，吸水高度理论上也只能达到 10m（按 $P_a = 98070\text{Pa}$，$\rho = 1000\text{kg/m}^3$ 计算）。但实际上这是不可能的，一般矿井水泵吸水高度只有 4～6m。

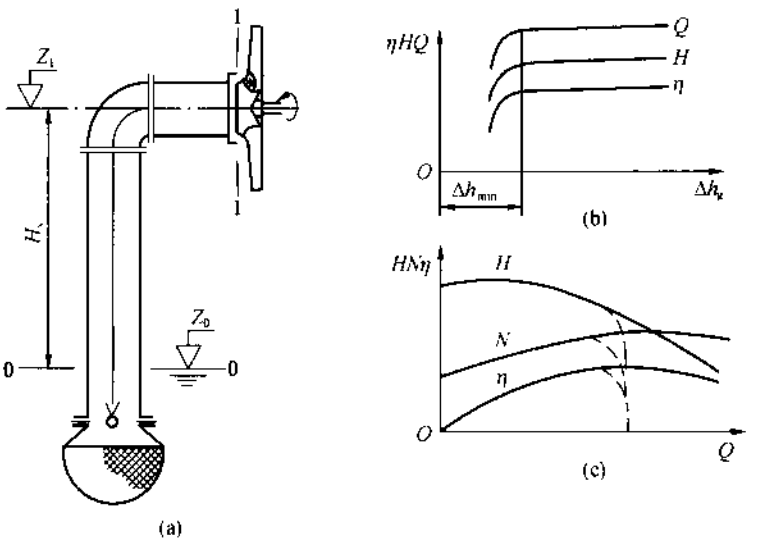


图 8-2-19 吸水高度

2.2.6.2 *启动和停止*

启动水泵以前，除必须的机械检查外，首先要向泵腔和吸水管内注水并逐出腔内空气。若在泵腔内无水的情况下启动，由于工作介质为密度比水小得多的空气，即使泵可以达到额定转速运行，也不可能把水吸入泵内。其次，由于在无水情况下，填函中的密封填料与轴会产生干摩擦，有可能发生定子与转子的热咬合。因此，必须在保证泵腔和吸水管中充满水的情况下启动。启动时要确保出口闸阀是关闭的，因为离心式水泵轴功率曲线在零流量时有最低值，启动电流最小。在开启闸阀下启动，有时由于不能形成正常的真空度，就不能上水。泵达到额定转速后，它已经具备了该转速时的性能，这时逐渐开启出口闸阀。如图 8-2-20 所示，闸阀开启前的工况点为 0，随着闸阀开度的逐渐加大，管网阻

力逐渐减小，工况由 0 沿扬程特性曲线 $H=f(Q)$ 朝流量加大方向移动，直至全部开启时的工况点 8 为止。

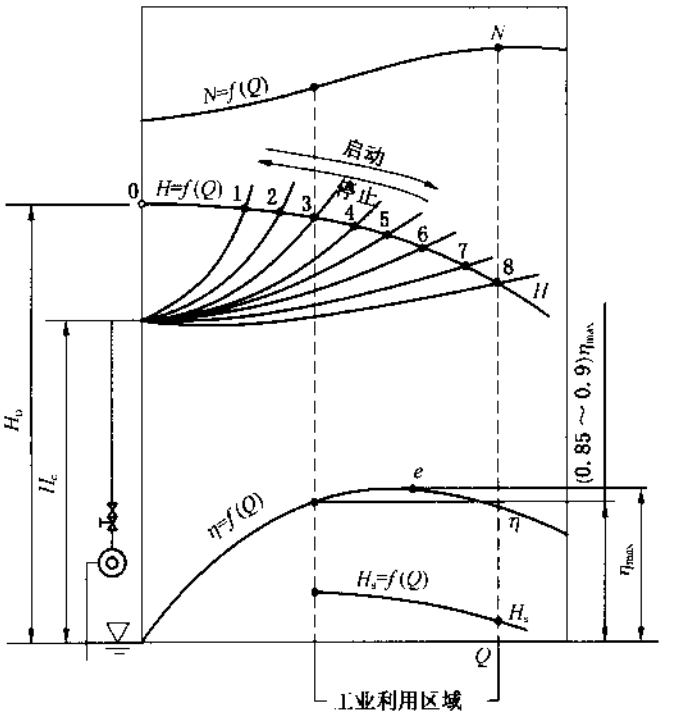


图 8-2-20　泵房动和停止过程的工况变化

停泵时首先关闭出口闸阀，在此过程中工况点由 8 朝流量减小的方向沿特性曲线 $H=f(Q)$ 移动，直至全闭时的 0 点为止，而后停机。先关闸阀后停机，是为了防止发生水击。水击严重时，可击毁管路，甚至击毁水泵。

2.2.6.3　正常工作条件

煤矿生产要求排水设备安全、可靠，节约成本。为此，必须满足一些工作条件。

1. 泵稳定工作条件

以主排水设备为例，介绍泵不稳定工作的情况和保证稳定工作的条件。如图 8-2-21 所示，泵以正常转速 n 工作时，其扬程特性曲线为 H_0—n，它对管路特性曲线为 $H_c=f(Q)$ 的管路工作，工况点为 1，工作稳定。由于吸水井水位变化缓慢，可认为管路特性不变。而经常发生的是由于外加电压的变化，带来电动机和泵转速的变化，转速变化时泵特性按比例定律收缩或放大，从而引起工况变化。此时，扬程特性按比例定律收缩，随着转速下降的程度不

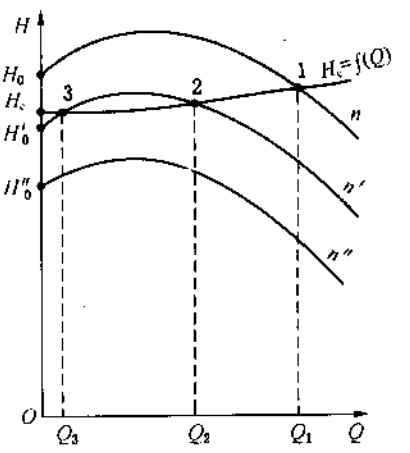


图 8-2-21　泵不稳定工作工况

同，可能出现两种情况：

（1）同时出现两工况。如图 8－2－21 中转速为 n' 时的工况 2 和 3。此时，由于供电电压不稳，扬程曲线上下波动，水量忽大忽小，呈现不稳定工作情况。

（2）无工况点。由于转速下降至 n''，扬程特性缩至 H_0''—n''，不再与管网特性相交，无工况。从有工况到无工况的过程中，管中水的势能高于泵扬程，水将倒灌入水泵。待管中水位降到其势能低于泵扬程时，泵又将水排入管路，周而复始地产生震荡，直到能量平衡为止。但是，往往由于各种条件的变化，很难维持平衡，处于不稳定状态下工作，不能排水。

上述两种情况，都是发生在泵零流量时的扬程小于管路测地高度的情况之下（$H_0' < H_c$，$H_0'' < H_c$）。因此，为了保证稳定工作，必须保持 $H_0 > H_c$，考虑到泵转速可能下降 2% ~ 5%，致使扬程下降 5% ~10% 的情况，可以规定稳定工作的条件为

$$(0.9 \sim 0.95) H_0 \geqslant H_c \tag{8-2-23}$$

式中 H_0——泵工作时，正常转速下零流量扬程，m；

H_c——管路测地高度，m。

2. 泵经济工作条件

一般情况下，排水所用电耗占全矿电耗相当大的比例。因此，保证泵有较高的工作效率是十分必要的。通常限制正常运行时的效率（即工况下的效率）不得低于最高效率的 85% ~90%，并依此划定一定的区域，称做工业利用区。有时也会用匹配电机的容量，作为划定工业利用区上限的依据，以避免超负荷运行。

总之，保证泵正常工作的条件是：①满足稳定工作条件；②吸上真空度不得超过允许值；③工况点位于工业利用区内。

2.2.7 矿井排水系统维护

排水装置的耗电量，占矿井总耗电量的比例是相当大的。如在运行过程中，由于某些原因使其运转性能下降，将产生大量的能量浪费。因此，长期保持排水系统在良好性能下工作，具有重要意义。

（1）保持良好的水泵性能。泵在使用过程中，由于多种原因可能会导致其特性恶化，如水力损失和机械损失，这些损失的大小直接影响泵的效率和特性。在水泵使用过程中，叶片出口边缘的背面将受到磨损，水泵叶轮叶片出口角不同时可能引起水泵性能的变化。对此，应充分估计水泵叶轮磨损后的影响。由于外加电压变化，泵机组转速也随之变化，它的特性将按比例定律变化。这种变化是由外部原因引起的。因此，水泵应选用性能好的电机，并应注意对水泵电网的维护。

（2）减小水泵漏损。水泵工作时有容积损失，特别是大、小口环的密封缝隙大小对泵特性影响较大。为保持泵原有特性，应按说明书的要求定期检查和更换。水泵叶轮堵塞也将对水泵特性产生影响。无论局部或全部堵塞流道，都会使扬程曲线明显收缩，导致水泵效率降低。在使用过程中，要保持良好的吸水条件，适当加大吸水管径，尽量采用阻力较小的吸水管件。管路弯头曲率半径应尽量加大，特别注意不要采用死角弯头。吸水管各连接处不严密，注水后未关紧放气阀，以及吸水过滤网的淹没深度小于 300 ~ 400mm 时，空气可能穿过水层并渗透到泵中，使排水量减少。吸水过滤网被污物堵塞，底阀被固体颗粒或木屑卡住，是造成吸水事故的主要原因。因此，目前多数矿井都采用了无底阀排水，

或利用喷管抽空吸水，或利用真空泵抽空吸水。

（3）保持管路效率，应定期清理管路。清理的方法很多，如“水压棘球法”清理管路等。

2.2.8　常见故障及处理方法

排水设备发生故障时，势必影响排水工作的进行，严重时影响正常生产。因此，必须学会诊断故障的基本方法，以求准确、迅速地排除故障。

排水设备的故障可分为两类，一类是泵本身的机械故障，一类是排水系统的故障。因为泵不能脱离排水系统而孤立工作，当排水系统发生故障时，虽不是泵本身的故障，但能在泵上反映出来。下面对各方面的故障加以综合分析。

1. 判断故障的基本方法

判断故障的基本方法是观察泵工作时压力表和真空表读数的变化，了解泵是否发生了故障。

出口压力表和进口真空表的值分别为

$$P_{\infty} \approx \gamma(H_{p} + \Delta H_{p}) \tag{8-2-24}$$

$$P_{i} \approx \gamma(H_{x} + \Delta H_{x}) \tag{8-2-25}$$

式中　ΔH_{p}——排水管路损失；

　　ΔH_{x}——吸水管路损失。

如果在工作中排水高度不变，而压力表读数却发生了变化，说明 ΔH_{p} 发生了变化，ΔH_{p} 的变化说明了排水管路有可能堵塞和流量发生了变化。如果工作中吸水高度未变，真空度却发生了较大的变化，同样也可以了解泵的工作是否正常。

由此可见，要想用仪表判断泵的故障，首先要了解泵正常工作时压力表和真空表的读数。除此之外，还可以从听声、看电流表的变化等方法帮助判断故障。

造成泵故障的原因很多，归纳起来有 4 个方面：泵内有气、吸水管堵塞、排水管堵塞和排水管破裂，也可归纳为 3 个字：气、堵、裂。

2. 泵和排水系统的故障分析与处理方法

水泵发生故障时的特点是压力表和真空表读数同时变化，这是因为泵的流量和扬程是相互影响的，吸入部位发生故障，影响排出过程；同样，排出部位发生故障也会影响吸入过程。所以，在判断水泵故障时不能只看一个表的读数就下结论。现逐一分析如下：

（1）泵内有气。两表特征：真空表和压力表读数都比正常小，常常不稳定，甚至降到零，这是因为泵进入空气之后，压头显著降低，流量也急剧下降的缘故。

图 8－2－22 所示是人为把空气引入吸水管内，测得水泵扬程特性变化的情况，图中符号 q 表示引入的空气量与排气量之比值。试验结果表明，对各种水泵可引入的空气量都有一定限量，引入太多则会使吸水管中水流中断。

泵内有气是由吸水系统不严密引起的。容易发生漏气的部位及原因有吸水管系统连接处不严、填料箱密封不严、真空表接头松动和吸水口淹没水中过少等。

此外，当吸水管和泵安装不合适时（图 8－2－23），由于吸水管最高处不能完全充满水，有空气憋在里面，泵也可能不能正常工作。

应特别注意，离心泵转速降低或反转，也有类似征兆，两表读数偏小，但比较稳定。

（2）吸水管堵塞。两表特征：真空表读数比正常大，压力表读数比正常小。因为吸水管堵塞，吸水管阻力增加，也就加大了吸上真空度，所以真空表读数比正常大。同时，

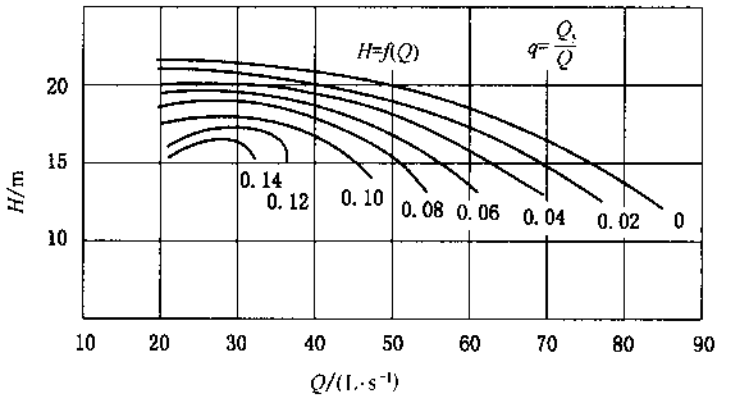


图 8－2－22 泵内有气对扬程特性的影响

由于流量减小，排出阻力便减小，因此压力表读数比正常小。

吸水管堵塞容易发生的部位及原因有：吸水管插入太深，由于吸水井淤泥太多，没有及时清理，底闸与泥接触；滤网太脏；底阀未能全打开等。

（3）排水管堵塞。两表特征：压力表读数比正常大，真空表读数比正常小。因为排水管堵塞，使排水管阻力增大，因而压力表读数上升。又因排水管阻力增大，使流量减小，故真空度下降。

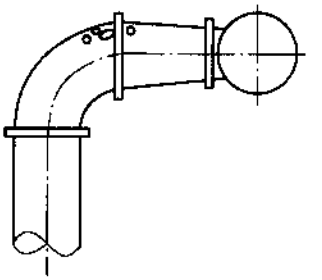


图 8－2－23 不正确的吸水管安装

排水管堵塞使排出系统发生故障，容易发生该类故障的部位及原因是排水闸阀未打开或开错阀门。

（4）水泵叶轮堵塞。两表特征：压力表和真空表读数均比正常读数小。这是因为叶轮堵塞后，都会使扬程曲线明显收缩，则工况点向流量减小的方向移动，扬程减小，故压力表和真空表的读数均比正常读数小。图 8－2－24 所示为叶轮堵塞对性能的影响。其中曲线Ⅰ是原扬程曲线，当它对管路特性为 g 的管路工作时，工况点为 1；曲线Ⅱ为叶轮中三条叶道入口部分堵塞时的扬程曲线，工况点为 2；曲线Ⅲ为叶轮中的三条叶道全部堵塞时的扬程曲线，工况点为 3。

（5）排水管破裂。两表特征：一般是压力表读数下降，真空表读数突然上升。这是因为排水管破裂后，排水管阻力减少，使流量增大，从而造成真空度上升。

从两表读数来看，同吸水管堵塞时真空度增大、压力表下降一样，但是排水管破裂往往是突然发生的，因此两表读数变化比吸水管堵塞时要快一些。另外，流量增大会引起负荷增加，可从声响、电流表读数的变化与吸水管堵塞引起负荷降低的情况加以区别。在这种情况下，应立即停泵，查明原因。

排水管路破裂的原因主要是管路焊接质量不高、钢管锈蚀严重、操作中猛开猛关闸阀而引起水击等。但是，最根本的原因是思想上麻痹大意。只要严格执行操作规程，认真检

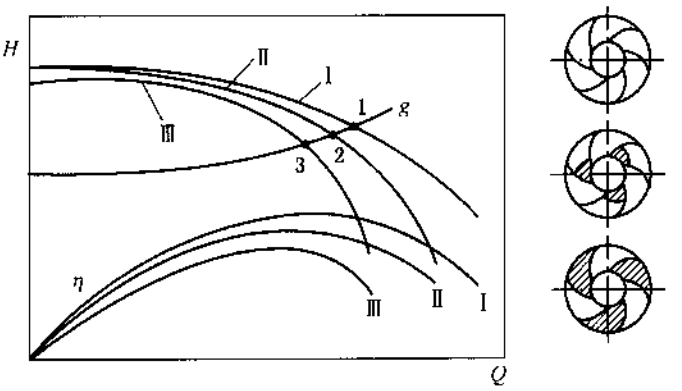


图 8－2－24　叶轮流通堵对性能的影响

查管路的锈蚀情况并定期试压，就能避免事故的发生。

(6) 泵产生汽蚀。一般来讲，泵产生汽蚀时，真空表和压力表读数常常不稳定，比正常小，有时甚至降到零。但由于引起泵产生汽蚀的直接原因不同，所以两表的变化规律也不完全相同。

① 若吸水管严重堵塞时，使真空表读数增大，但真空度过大，超过泵的允许吸上真空度时，便会引起汽蚀，这时真空度降低，甚至降到零。

② 若泵的允许吸上真空度本来就低（或泵安装位置过高），刚打开排水闸阀就可能产生汽蚀，这时真空度不一定是先增加后降低，往往是一开始就低下来，甚至为零。

③ 若排水管破裂发生在泵站的附近时，使真空表读数增加太多，超过了泵的最大允许吸上真空度而产生汽蚀，这时真空表读数的变化情况是突然升高然后又下降。

防止和消除汽蚀应从设计和使用两方面考虑：

① 从泵的设计上看，应尽量减小允许汽蚀余量 $[\Delta h]$，从而使 H_s 值增大。

② 从吸水装置的设计上看，一是尽量减小吸水管路水头损失，即减少吸水管长、减小吸水管附件（如底阀）、增大吸水管径；二是减小实际安装高度。

③ 从操作使用上看，减少吸水管路损失，具体方法是关小泵排水闸阀，使系统的流量减小，吸水管的水头损失随之减小。

2.2.9　矿井排水系统测试

测定水泵的目的是求得泵的运转特性，以便检查泵的性能是否正常。

2.2.9.1　测定原理

如前所述，排水装置运转时的工况点，为扬程特性曲线与管路特性曲线的交点。在外界条件保证泵运转不变的情况下，若逐渐改变闸阀开启程度来改变管路阻力，使管路特性曲线逐步改变，工况点必随之改变，工况点移动的轨迹即为泵的扬程特性。很明显，将泵稳定于各工况点工作时的参数（扬程、流量、轴功率、转速和效率）测定出来或依靠部分参数换算得出，经整理后即可得到运转特性。

水泵的扬程 H 定义为单位重量的水经过水泵时所获得的能量。对图 8－3－25 所示的排水系统，列水泵进口处安有真空表的Ⅰ－Ⅰ断面和出口处安有压力表的Ⅱ－Ⅱ断面间有能量输入的伯诺里方程，得

$$z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{v_1^2}{2g}+H=z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{v_2^2}{2g} \qquad (8-2-26)$$

考虑到真空表和压力表的安装高差及表的示值单位，经过简单推导，上式可写成

$$H=\frac{p_b+p_v}{\gamma}+\frac{8Q^2}{\pi^2 g}\left(\frac{1}{d_p^4}-\frac{1}{d_x^4}\right)+\Delta Z \qquad (8-2-27)$$

式中 H——水泵扬程；

p_b——出口压力；

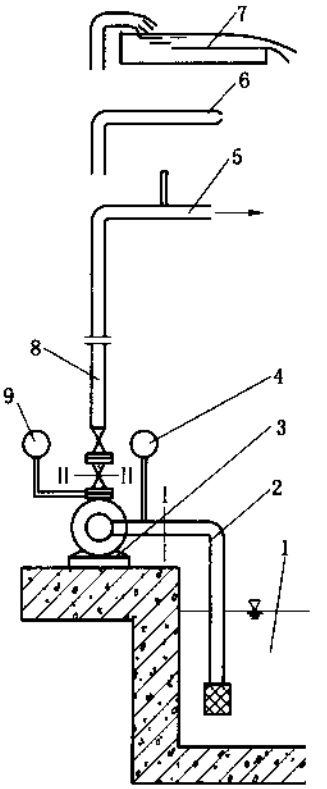
p_v——入口真空度；

d_p、d_x——进、出口管径；

ΔZ——压力表中心与真空表中心的高度差。

当测出泵流量后，则可由式（8-2-27）算出该工况时的扬程，如果同时记录该工况时的转速及轴功率，即可得到一组工况参数。同理可求不同闸阀开启量的工况参数（H_1、Q_1、N_1、n_1），（H_2、Q_2、N_2、n_2），…，（H_i、Q_i、N_i、n_i），…，（H_n、Q_n、N_n、n_n）。根据测得的参数，换算为水泵在额定转速下的工况，其换算公式如下：

$$\left.\begin{aligned} H_i&=\left(\frac{n_i}{n_i'}\right)^2 H_i' \\ Q_1&=\left(\frac{n_i}{n_i'}\right) Q_i' \\ N_i&=\left(\frac{n_i}{n_i'}\right)^3 N_i' \end{aligned}\right\} \qquad (8-2-28)$$



1—吸水井；2—吸水管；3—水泵；4—真空表；5—均压管；6—喷嘴；7—水堰；8—排水管；9—压力表

图 8-2-25 水泵性能测试方案

对于各工况点的效率可以从下式求出：

$$\eta_i=\frac{\rho g Q_i H_i}{N_i} \qquad (8-2-29)$$

这样，根据换算后各工况点的参数及计算所得的效率，可绘出额定转速下的特性曲线。

这里应该指出，对于安装在特定管路中的水泵，要想通过测试获得全特性曲线是不可能的。因为，当闸阀全部开启时，对应的工况点为 M，如图 8-2-26 所示，则其对应流量和扬程为 Q_M、H_M，在这种情况下，要想得到比 Q_M 还大的流量是不可能的，所以水泵特性曲线只能测到 M 点。

要想获得水泵在全流量下的特性，只有降低测地高度 H_c。这在实验室条件下是可以做到的。

2.2.9.2 性能参数的测量及计算方法

1. 扬程测量

由式（8-2-27）可以看出，对于确定的排水系统 γ、ΔZ、d_p 和 d_x 是已知的，只要测得 p_b、p_v 和流量 Q，通过上式就可计算出扬程 H。p_b 和 p_v 可以从压力表和真空表上直

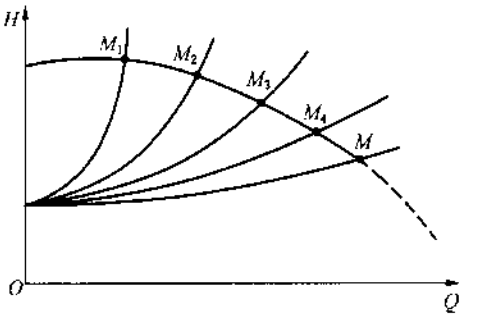
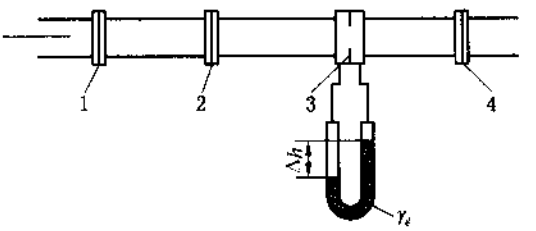


图 8－2－26　扬程特性曲线测试原理

接读出，因此关键是测流量。

2. 流量的测量

流量是一个重要的性能参数，测取的方法很多，主要有容积法、流量计法、速度法和堰流法。常用的仪表和装置有孔板或喷嘴、水堰、超声波流量计和均压管等。



1—上游侧第二个局部阻力件；2—上游侧第一个局部阻力件；
3—节流线；4—下游侧第一个局部阻力件

图 8－2－27　节流测流量装置

（1）孔板、喷嘴测量装置。孔板、喷嘴装置的工作原理是，在管道内装入孔板或喷嘴节流件，图 8－2－27 所示为测流量的装置。当水流过节流件时，在节流件前后产生压差，这一压差通过取压装置可用液柱式压差计测出。当其他条件一定时，节流件前后产生的差压值随流量而变，两者之间有确定的关系。根据流体力学的伯诺里方程经过简化后的计算公式如下：

$$Q=\mu K\sqrt{\Delta p} \tag{8-2-30}$$

$$K=\sqrt{\frac{2}{\rho}}\cdot\frac{\pi D^2}{4}\cdot\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^4-1}}$$

式中　μ——流量修正系数，通常 $\mu=0.95\sim0.98$；

K——节流件尺寸常数；

D——管径，m；

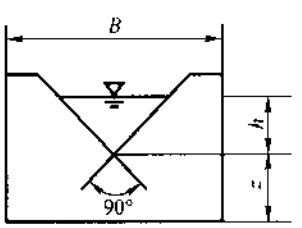
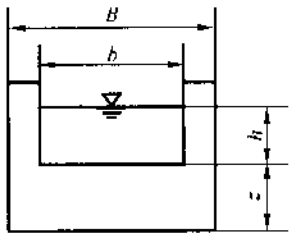
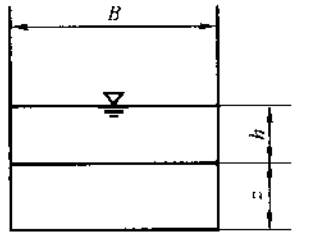
d——节流件孔径，m；

Δp——节流件前后压力差，$\Delta p=(\gamma_g-\gamma)\Delta h$。

采用孔板、喷嘴测量装置测定流量是一种比较简单、可靠的方法，仪表的价格也较低。一般流量较小时用孔板，流量较大时用喷嘴。孔板和喷嘴的尺寸、形状及加工已标准化，并且同时规定了它们的取压方式和对前后直管段的要求，其流量和压差之间的关系及测量误差可按国家标准直接计算确定。

（2）水堰。在容器中安装一板状障碍物（称堰口板），让水从障碍物上流过，则其上游的水位被抬高，这种装置叫水堰。按堰口形状可分为全宽堰、矩形堰和三角堰3种，通过测量水堰上游的水位高度，可求得流量。水堰的参数及流量计算公式见表8-2-2。

表8-2-2 水堰的参数及计算流量公式

堰口名称	三角堰	矩形堰	全宽堰
图样			
计算流量公式	$Q=c\cdot h^{5/2}$ $c=1354+\frac{4}{h}+\left(140+\frac{200}{\sqrt{z}}\right)\times\left(\frac{h}{B}-0.09\right)^2$	$Q=c\cdot h^{3/2}\cdot b$ $c=1785+\frac{2.95}{h}+237\frac{h}{z}-428\sqrt{\frac{(B-b)h}{B\cdot z}}+34\sqrt{\frac{B}{z}}$	$Q=c\cdot h^{3/2}\cdot B$ $c=1785+\left(\frac{2.95}{h}+237\frac{h}{z}\right)(1+\varepsilon)$ 式中 ε—修正系数 $z<1$m时，$\varepsilon=0$ $z>1$m时，$\varepsilon=0.55(z-1)$
流量系数c的适用范围	$B=0.5\sim1.2$m $z=0.1\sim0.75$m $h=0.07\sim0.26$m （$h=B/3$以内）	$B=0.5\sim6.3$m $b=0.5\sim5.0$m $z=0.15\sim3.5$m $\frac{b\cdot z}{B^2}\geqslant0.06$ $h=(0.03\sim0.45)\sqrt{b}$m	$B\geqslant0.5$m $z=0.3\sim0.25$m $h=0.03\sim2$m （但$h<0.8$m） $h\leqslant B/4$

（3）超声波流量计。超声波测流量的原理是超声波在流体中向上游和下游的传播速度由于叠加了流体流速而不相同，因此，可以根据超声波向上、下游传播速度之差测得流体流速。测定传播速度之差的方法很多，主要有测量上、下游等距离处接收到的超声波信号的时间差、相位差或频率差等方法。

设静止流体中的声速为c，流体流速为v，发送器与接收器之间距离为L，则传播时间

差为

$$\Delta t = \frac{L}{c - v} - \frac{L}{c + v} = \frac{2Lv}{c^2 - v^2} \tag{8-2-31}$$

当 c 远大于 v 时

$$\Delta t \approx \frac{2Lv}{c^2} \tag{8-2-32}$$

如发生器发出的是连续正弦波，则上、下游接收到的波的相位差为

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t = 2\omega Lv/c^2 \tag{8-2-33}$$

式中　ω——超声波的角频率。

由式（8-2-32）、式（8-2-33）可以看出，测得 Δt 或 $\Delta\varphi$ 就能求得流速 v。但是流体中声速 c 是随流体温度而变的，水中声速 c 的温度系数为 0.2%/℃。因此在流速一定时，Δt 和 $\Delta\varphi$ 的温度系数约为 0.4%/℃，造成测量误差。一般需采用流体温度补偿装置。采用频率法的优点是可消除声速 c 的影响，因为上、下游接收到的超声波的频率之差为

$$\Delta f = \frac{c + v}{L} - \frac{c - v}{L} = \frac{2v}{L} \tag{8-2-34}$$

可见，在频率法中，频率差与声速 c 无关，因此工业上常用频率法。

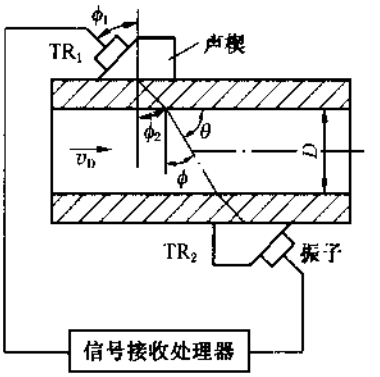


图 8-2-28　超声波流量计的原理图

超声波流量计的原理如图 8-2-28 所示。在管壁斜对面固定两个超声振子 TR_1、TR_2 兼作为超声波的发送和接收元件。由一侧的振子产生的超声波穿过管壁—流体—管壁被另一侧的振子所接收，并转换为电脉冲，经放大后再用此电脉冲来激发对面的发送振子，形成单环自激振荡。振荡周期由超声波在流体中的顺流传播速度决定，周期的倒数即单环频率 f_1。一定时间间隔以后，经切换电路使发送振子切换成接收振子，而接收振子切换成发送振子，测出超声波在逆流中传播速度的单环频率 f_2。如此循环交替地测出 f_1、f_2。设管径平均流速为 v_D，超声波速与管轴间的夹角为 θ，管径为 D，静止流体中声速为 c，则

$$f_2 = \left[\frac{D}{\sin\theta(c + v_D\cos\theta)} + \tau\right]^{-1}$$

$$f_1 = \left[\frac{D}{\sin\theta(c - v_D\cos\theta)} + \tau\right]^{-1}$$

式中 τ——超声波在管壁内和电脉冲信号在电路中传输产生的滞后时间的总和。

当 c 远大于 v_D 且 τ 很小时，可得

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{\sin 2\theta}{D}\left(1 + \frac{\tau c}{D}\sin\theta\right)^{-2} v_D \qquad (8-2-35)$$

所以，当 D、θ、τ、c 为常数时，Δf 与 v_D 呈线性关系，由于 τ 很小，在大口径管道中 τc 一项可忽略。通过运算电路算得的 Δf 值可供指示、记录和计算。

值得注意的是，超声波流量计测得的是超声波通道上流体的平均流速，也就是沿管道直径上的平均流速 v_D，它不等于求体积流量所需要的管道截面上的平均流速 v。在层流情况下 $v = \frac{3}{4}v_D$；在紊流情况下 v 与 v_D 之间的比值与雷诺数有关，但在一般的流量范围内雷诺数变化不会太大，往往可以认为该比值是一常数。因此，在用超声波流量计测量流量时，考虑到截面平均流速 v 与沿直径平均流速 v_D 之间关系的影响，体积流量 Q 与频率差 Δf 之间的关系为

$$Q = \frac{\pi}{4}D^2 v = \frac{\pi}{4K}D^2 v_D = \frac{\pi\Delta f D(D + \tau c\sin\theta)^2}{4K\sin 2\theta} \qquad (8-2-36)$$

式中 K——流量修正系数，$K = \frac{v_D}{v}$，当雷诺数从 3×10^4 到 3×10^6 变化时，K 值的变化约为 ±1%。

另外，仪表前后必须要有足够的直管段（前 $20D$，后 $5D$），否则，流速分布要发生变化，并且不稳定，使流量指示的离散性很大，准确度很差。使用中还应注意被测流体流动中可能含有的气泡、未充满的空气层等对超声波传播的干扰，以及泵和其他声源所混入的超声杂音干扰。

超声波流量计的最大优点是仪表可装设在管外，不需要改造原来的管路系统。必须指出，由于管内结垢，使实际排水管径减小，应用超声波流量计时，容易造成流量测定值大于实际值。因此，应注意把测头架设在污垢较少的地方，以减小误差。

（4）均压管。均压管是一根开有若干个感压小孔的金属管，可用来测量管道中流体的平均总压。均压管若与管壁上的静压测孔相配合，可一次测出管道中的平均动压，据此可计算出平均速度和流量。

为测出管道中的平均动压，设想将断面分成若干个面积相等的圆环，在每个圆环中取一个测点，使该点所在的圆又将圆环分成面积相等的两半。据此原则，各测点的半径为

$$r_i = R\sqrt{\frac{2i-1}{2n}} \qquad (8-2-37)$$

式中 R——管道半径，m；

n——分割的圆环数；

i——由中心算起的圆环序号。

采用均压管时，测量断面通常是选在管内压力不是很高的管道出口附近的直管段上（图 8-2-29）。图 8-2-29 是用均压管测取管内的平均动压 p_d 的示意图，其中分割的圆环数 $n=5$，在每个圆环上对称地取 2 个测点。管道的壁面上开有静压测孔。测得平均动

压后，可用下式计算断面上的平均速度：

$$v=\sqrt{\frac{2p_d}{\rho}}=\sqrt{2gh_d} \tag{8-2-38}$$

考虑到均压管的损失，可得流量：

$$Q=\frac{\pi d_p^2}{4}\phi\sqrt{2gh_d} \tag{8-2-39}$$

式中　Q——流量，m^3/min；

ϕ——均压管系数，可取 0.96～0.98；

d_p——水管直径，m；

h_d——测压管动压示值高差，m。

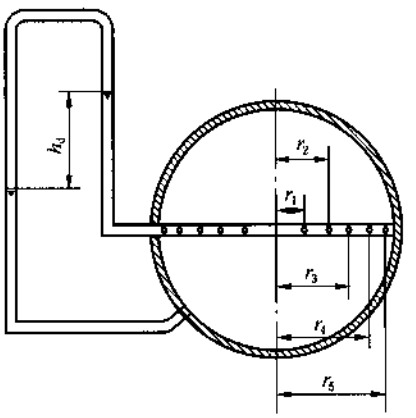


图 8-2-29　均压管测流量

3. 轴功率 N

一般可以用功率表测出电动机输入功率 N_d，然后按下式算出轴功率：

$$N=N_d\eta_d\eta_c \tag{8-2-40}$$

式中　η_d——电动机效率，可以从电机效率曲线查出；

η_c——传动效率，直接传动时，$\eta_c\approx1$。

电机输入功率 N_d 可用电压表、电流表和功率因数表（$\cos\varphi$ 也可根据说明书或有关资料估算）的读数来计算：

$$N_d=\sqrt{3}VI\cos\varphi \tag{8-2-41}$$

式中　V——电源电压，从电压表读数，V；

I——输入电机的电流，从电流表读数，A；

$\cos\varphi$——电机的功率因素，由功率表或根据有关资料估算。

电动机输入功率 N_d 还可用三相或两个单相功率表测得。

4. 轴转速 n

可用机械式转速表或感应式光电转速仪直接测出泵轴的转速，也可用闪光测速法（又叫日光灯测速法）。闪光测速法是利用日光灯闪光频率和轴转动频率（转速）间的关

系进行测速的。测量时，首先在轴头上画好黑白相间的扇形图形（图 8－2－30），白（或黑）扇形的块数要与电动机的极数相对应，可用下式计算：

$$m=\frac{60f}{n_0}\times 2 \tag{8-2-42}$$

式中 f——日光灯源（即电动机电源）的频率，Hz；

n_0——电动机同步转速，r/min。



图 8－2－30 轴头测速圆盘示意图

用与电动机同电源的日光灯照射电动机轴头，当电动机旋转时，轴头扇形块的闪动频率与日光灯的闪光频率相接近，由于电动机的实际转速总是低于其同步速度，扇形块向与电动机实际旋转方向相反的方向徐徐转动，以秒表记下 1min 内扇形块转过的转数 n'，则电动机实际转速 n 为

$$n=n_0-n' \tag{8-2-43}$$

式中 n——电动机实际转速，r/min。

测试注意事项：测试前应根据水泵及管路系统的具体条件拟订测试方案，选择测定装置和仪表，并对仪表进行必要的检查和校准。参加测试的人员要有明确的分工和服从统一指挥。

测试时，闸阀至少要改变 5～7 次，即至少应有 5～7 个测点，条件允许时设 8～10 个测点，特别是在水泵工作区域和最高效率附近多布几个测点，这对分析水泵性能是有益的。在操作上，闸阀可以由大到小（闸阀由全开到逐渐关闭）也可以由小到大，这两种方法可以交替进行，以便相互校对，修正其特性曲线。

在记录读数时，每调节一次工况，应停留 2～3min，待各表上的读数稳定后，同时读取各参数值，随测随记，并及时整理，发现问题应及时补测。

2.2.10 矿井排水的信息化管理

矿井局部排水系统承担着排出井下部分涌水的重要任务，是保证矿井安全生产的关键环节。排水系统各种设备能否安全、可靠、有效地运行，关系到整个矿井的生产与安全。

传统的矿井人工排水系统由于完全依靠人工操作，虽然可满足煤矿排水的基本要求，但其缺点十分明显。首先是效率低、可靠性差。这种排水系统的工作流程完全由手工完成，工人按部就班地完成各个执行件的操作。另外，对水位、涌水量大小等现场数据的判断依赖于工人的经验。作业过程比较复杂，要求工人具有很强的责任心，否则可能出现误操作，甚至发生大的事故。其次是工人劳动强度大。人工操作无法避免高强度的劳作，尤其是闸阀的操作，劳动量最大。通径 DN200 的闸阀开启时，往往需要两个工人同时转动阀门手柄。而且，水泵房要时时有人值守，以便在发生异常情况时，及时报警检修。此外

是能耗大、效率低、生产成本高。排水设备一般功率大，耗电量多，传统排水只能靠人工手动控制泵的启停，无法利用排水设备与仓容科学、合理地调度排水量与排水时间。因而，传统的矿井排水方式普遍存在能耗大、效率低、生产成本高的缺点。

随着现代科学技术的进步，尤其是微电子技术和控制理论的发展，使现有的工业设备的安全可靠性、经济性都得到了很大的提高。传统的矿井排水系统已经不适应现代煤矿企业的管理和操作，急需一种新的排水系统来保障煤炭开采工作的安全高效。基于以上原因，为了实现矿井排水自动化，出现了各种类型的矿井信息化管理系统，从而实现排水系统的安全性、可靠性及经济性。其中，主排水设备的远程在线监控系统为井下信息化管理中最为重要的部分。它采用计算机控制技术及微处理器为核心的智能控制器，结合矿井排水系统的特点，在确保先进性与可靠性的基础上，采用智能测控分站，通过各种先进可靠的传感器、保护装置等设备组成矿井排水自动控制系统，通过智能测控分站和光纤适配器与井下以太网连接，将信息传输到地面控制主机，实现排水系统的自动化。该系统使井下水泵房在实现无人化运行的同时，能够根据井下具体情况和要求，选择最佳运行方案，并为井上监控系统提供有用的数据资料。其优势为：①可依据水仓水位启停水泵，提高水泵有效利用率，大大降低生产成本；②可减少看护人员，相应减少工资投入，并可充实设备维护检修队伍，提高维护质量，减少事故发生，变事故发生后的被动检修为主动的定期检修，提高设备的使用率；③可以保证安全生产，改善工作环境，提高劳动生产率；④可有效地保护水泵电机等设备，延长使用寿命，减少事故停机时间，提高排水能力；⑤通过调整开停时间避开电力负荷高峰期，有效地削峰填谷，节约电费开支。

井下排水监控系统可概括为 6 个环节，即自动注水（抽真空）环节、闸阀操纵环节、水位自动监控环节、参数传示环节、故障保护环节及电动机的自动控制环节。

（1）自动注水（抽真空）环节。水泵只有在其叶轮完全淹没于水中的情况下，泵体内部才能造成真空度实现正常排水。若真空度不够，泵内有空气存在，将会造成不上水和转动部件“干烧”等故障。系统采用射流泵抽真空，由真空表监测真空度，通过控制静压水管开关来控制射流泵的启动和停止。

（2）自动闸阀操纵环节。为减小启动功率，水泵操作规程规定离心式水泵一定要关闭出水闸阀启动，而当水泵停车时，为避免水击事故，必须先关闭闸阀，缓慢减小流速，最后停泵。

（3）水位自动监控环节。水位自动监控环节的任务是根据水位的高低自动准确发出开、停水泵命令。依据双位逻辑控制原理，采集水位信号，以开关量（水位开关）和模拟量形式输送给 PLC。水位传感器的可靠性和准确性直接影响整个控制系统的工作可靠性，为此选用超声波液位传感器，它具有高精度、非接触式、非机械型、维护方便、安装容易、标定简单等许多优点。

（4）参数传示环节。主控柜的模拟屏上可模拟显示水仓水位、水泵流量、水泵压力及电动机、电磁阀和自动闸阀的各种工作状态。所有的检测参数及工作状态均可由井下 PLC 通过传输网络传送给地面计算机，由计算机分析处理，在显示器上模拟显示，并做出曲线、报表，以利于地面管理人员作出正确判断，向井下可编程控制器发出控制命令。

（5）故障保护环节。流量保护：水泵启动后或正常运行中，如流量达不到正常值，通过流量保护装置使本台水泵停车，转为启动另一台水泵。电动机故障：PLC 监视水泵电