·科技生产力应用决策读物·

（干部选读）

地质技术装备丛书

温家宝

主编 李双新 副主编 赵光德



第四卷

地球物理探测及测绘仪器（下）



地质出版社

登录号 091213
分类号 P631
种次号 057

科技生产力应用决策读物

地质技术装备丛书


200400805

（干部选读）

第四卷

5043/10

地球物理探测及测绘仪器（下）



主　编　李双新
副主编　杜祥麟　袁学诚　赵光德


0081 9404

地质出版社
·北　京·

(京)新登字 085 号

图书在版编目(CIP)数据

地球物理探测及测绘仪器 (下)/李双新主编.--北京:地质出版社,1995.6

(地质技术装备丛书 第四卷)

ISBN 7-116-01844-1

Ⅰ.地… Ⅱ.李… Ⅲ.①地球物理勘探-地质勘探仪器②地球物理勘探-测量仪器 Ⅳ.P631

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 01305 号

地质出版社出版发行

(100013 北京和平里七区十楼)

责任编辑:陈军中

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:850×1168 1/32 印张:5.875 字数:148 000

1995 年 6 月北京第一版·1995 年 6 月北京第一次印刷

印数:1--3600 册 定价:43.00 元(1—6 卷)

ISBN 7-116-01844-1

P·1454

编委会名单

顾　问　夏国治　陈洲其　许宝文

主　编　李双新

副主编　杜祥麟　袁学诚　赵光德

编　委　（按姓氏笔划为序）

于荫平　王　达　王治海　刘祖浩　杜祥麟
吴天彪　李家熙　李双新　孟宪琛　郎世荣
袁学诚　曾家松　温洪进　郭剑雄　赵光德

撰稿人名单

（按姓氏笔划为序）

丁悌平　于荫平　于铭强　王庆海　王　钢
朱玉伦　刘祖浩　刘永东　刘敦一　刘腾耀
刘绍伶　刘贵元　余日初　张锦茂　张　勤
杜祥麟　吴连生　吴天彪　陈克樵　应志春
李正泉　李家熙　李维华　李家俊　罗延钟
林润南　杨啸涛　杨光荣　杨孝球　相重琨
柳志斌　赵亨达　翁　校　姜洪涛　顾钧兆
梁国立　袁玄晖　姚修仁　郭剑雄　郭立鹏
廖锦初　熊　焰　瞿兴昌

地质技术装备丛书

第一卷　钻掘机械设备(上)

第一篇　地质机械发展史　杜祥麟
第二篇　岩心钻机　郭剑雄
第三篇　水井钻机　于荫平
第四篇　坑道钻机　杨光荣、翁校
第五篇　泥浆泵及其它　廖锦初

第二卷　钻掘机械设备(下)

第六篇　基础施工工程钻机　相重琨
第七篇　GPS 系列工程钻机　刘祖浩、顾钧兆
第八篇　GQ 系列工程钻机　李正泉
第九篇　水平钻机　吴连生、熊焰
第十篇　锚杆钻机　杜祥麟、刘绍伶
第十一篇　装修工程钻机　余日初、刘贵元
第十二篇　坑道掘进设备　杨孝球、姜洪涛

第三卷　地球物理探测及测绘仪器(上)

第十三篇　地震仪　刘永东、王庆海
第十四篇　磁力仪　吴天彪
第十五篇　重力仪　林润南

第四卷　地球物理探测及测绘仪器(下)

第十六篇　电法仪器　罗廷钟
第十七篇　地下电磁波仪　翟兴昌
第十八篇　放射性测量仪器　李家俊、于铭强、刘腾耀
第十九篇　测绘仪器　柳志斌

第五卷　实验分析仪器(上)

第二十篇　原子吸收分光光度计　杨啸涛、李家熙
第二十一篇　分光光度计　朱玉伦
第二十二篇　X 射线荧光光谱仪　梁国立

第二十三篇　等离子体光谱仪　袁玄晖
第二十四篇　等离子体质谱仪　袁玄晖
第二十五篇　极谱仪　姚修仁、王钢
第二十六篇　激光分析仪　李维华
第六卷　实验分析仪器(下)
第二十七篇　电子探针X射线分析仪　陈克樵
第二十八篇　同位素质谱计　丁悌平、刘敦一
第二十九篇　红外光谱仪　郭立鹤
第三十篇　热电图谱仪　赵亨达
第三十一篇　氢化物-原子荧光分析仪　张锦茂、张勤
第三十二篇　实验室信息管理系统　应志春

用现代科学技术知识武装起来

——《现代科学技术基础知识》(干部选读)序

江 泽 民

我多次建议编写一本书，系统地介绍马克思主义关于科学技术是生产力的基本观点，深入浅出地论述世界科技发展的现状、趋势和我们的对策，供县级以上干部阅读，以丰富大家的科技知识，提高领导现代化建设的水平。经过国家科委等单位的同志们共同努力，这个愿望现在实现了。

科学技术是生产力发展的重要动力，是人类社会进步的重要标志。纵观人类文明的发展史，科学技术的每一次重大突破，都会引起生产力的深刻变革和人类社会的巨大进步。本世纪以来，特别是二次世界大战以后，以电子信息、生物技术和新材料为支柱的一系列高新技术取得重大突破和飞速发展，极大地改变了世界的面貌和人类的生活。科学技术日益渗透于经济发展和社会生活各个领域，成为推动现代生产力发展的最活跃的因素，并且归根到底是现代社会进步的决定性力量。现代国际间的竞争，说到底是综合国力的竞争，关键是科学技术的竞争。邓小平同志敏锐地洞察这一历史大趋势，鲜明地提出"科学技术是第一生产力"的科学论断，丰富和发展了马克思主义关于生产力的学说，对于我们建设富强、民主、文明的社会主义现代化强国，具有重大的指导意义。

本世纪90年代到下世纪中叶，是中华民族振兴的关键时期。和平与发展的世界进步潮流，蓬勃兴起的新科技革命，为我国的改革开放和经济发展提供了契机。我们要牢牢把握这一难得的历史机遇，紧紧追踪世界科学技术产业，加快发展新兴产业，不断提高

科技进步在推动经济增长中的作用，促进整个国民经济持续、快速、健康发展。从世界近现代史看，不少贫弱的民族和落后的国家，能在不太长的时间内实现经济起飞，虽然有着各不相同的具体条件和有利因素，但重视教育，善于采用先进科学技术，则是其共同特点。我们有优越的社会主义制度，有勤劳智慧的人民，只要我们毫不动摇地坚持建设有中国特色社会主义理论和党的基本路线，坚定地依靠科技进步，经过五六十年坚韧不拔的努力，就一定能够实现社会主义现代化的宏伟目标。

加速我国的科技进步，一定要提高各级领导干部的科技素质。改革开放以来，我们的干部队伍朝着知识化、专业化方向迈进了一大步，多数县级以上领导干部具有大专以上文化程度。但这并不意味着大家都已熟悉和掌握现代科学技术知识。我们的干部，无论是学社会科学的还是学自然科学的，无论是毕业早一点的还是近几年走出校门的，都有重新学习的必要。应当看到，现代科学技术的发展日新月异，新发明、新理论层出不穷，知识更新异常迅速。我们只有锲而不舍地努力学习，不断汲取新的知识，充实自己，才能提高决策水平和领导艺术。科技知识浩如烟海，我们的中、高级干部不可能都成为某一领域或某一学科的专家，但完全可以做到知识面相对广一些、深一些，甚至在某些方面有所专长。否则，就不能算是一个合格的、称职的领导者。

抓紧学习和掌握现代科技知识，是摆在我们面前的一项重要任务，各级干部要从事关国家富强、民族振兴的高度来认识学习的重要性，增强学习的自觉性。学习科技知识要知难而进，不耻下问，学以致用，持之以恒。我们的干部担负着领导社会主义现代化建设的繁重任务，工作确实很忙，但是越忙越要挤出时间学习。了解现代科技知识，这本书可以作为“入门”的读物，大家要多下一点功夫仔细阅读。在此基础上，不同岗位的干部要根据工作需要，多读几本自然科学和社会科学方面的论著，不断丰富和拓宽自己的知识面。我们的中、高级干部如果用更多的科技知识把自己武装起来，提高认识自然、利用自然、改造自然和保护自然的能力，那么，我们

在领导建设有中国特色社会主义的伟大事业中，就能够更好地动员和组织亿万人民，在祖国辽阔的土地上描绘出更新更美的画卷。

1994年2月6日

（新华社北京4月7日电）

转载《人民日报》1994年4月8日第一版

编 者 的 话

地质技术装备丛书，是一套现实的科技生产力要素选择的决策性读物，是集科技知识及技术装备应用实例为一体的丛书，是应社会主义市场经济发展的需要，建国以来第一次系统地向社会介绍地质技术装备及其应用的丛书。它适于干部，特别是县以上领导干部，经济部门领导人，企事业单位的科技、经济专家，以及工程勘察、地勘单位和有关制造厂领导参阅；也可作为院校师生教学参考书。

“隔行如隔山”的传统观念，在现代科学技术相互渗透的今天，一定程度上束缚了生产力的发展。具有多学科知识及功能的现代地质技术装备，各类钻机、物理、化学探测及分析仪器，航空遥感，地形测绘设备等，已经冲破“地质专用”的范围，在国民经济领域里发挥着作用。建筑业中的桩基工程、松软地基处理、地下连续墙、楼宇修理改造工程；交通行业的铁路、公路、港口、机场、地铁、桥梁、涵洞、隧道基础工程；能源领域中水电、火电、原子电站、电力、电讯基础工程、地下管线探测及测图；环境保护中的滑坡、泥石流、地震、水污染等地质灾害防治；城市、乡镇建设区划的小区规划、水土分析、农林作物种植最优化分析测图；水力工程的水井、水坝防漏治漏、围幕灌浆、引水隧洞以及各种物理、化学实验鉴定中的选矿实验，元素成分分析，金、银、贵金属、宝石鉴定，食品、医学公安案件侦破实物化验分析等。

对于地质技术装备这样广泛的应用领域，在计划经济观念封闭的体制下，并没有被更多的人所认识。中国地质设备管理协会，为了深入贯彻邓小平同志关于“科学技术是第一生产力”的科学论断和江泽民总书记关于“要在干部特别是领导干部中普及现代科学技术知识”的精神，组织了几十位地质机械、仪器、设备管理专家

及学者，编纂了这套地质技术装备丛书。其主要内容是设备的基本原理、构造，历史渊源，国内外水平，应用领域及实例，以及设备新产品介绍等。全套丛书按设备性质分六卷32篇，介绍了几十种机械、仪器装备。中共中央书记处书记温家宝同志对出版此套丛书甚为关怀，并为丛书题写了书名。

设备是物化的科学技术，是现实的生产力要素。从书既向社会各界普及具体、现实的科技生产力知识，并重点为三个方面服务。第一个方面是为用户服务，用户有什么社会、经济、事业工程问题，选择哪些技术装备最适宜，有哪些地勘单位的队伍可以帮助去完成，以利做出决策；第二个方面是为有关地质设备制造厂商服务，自己的产品除向地矿行业销售外，还应该向哪些用户找买主，开拓推销产品的领域；第三个方面是为地勘单位服务，自己拥有的装备除地质找矿外，还应该向哪些方面找用户，发挥潜力，为更多的用户服务。在国内，拥有地质技术装备的单位，多在地矿行业的三千个相当于县团级的单位，如地勘公司、地质队、探矿队、物探队、水文队、测绘队、实验室、勘察院、研究院等，遍布全国，是一个规模宏大、装备精良的队伍，可为社会广泛服务。

本丛书编纂出版，得到地质矿产部领导和许多单位同志的支持。地矿部的经济研究院张茂举、物化探研究所冯沛南、地质科学院测试所王忠凤三位同志是本丛书联络员，做了大量联络和初审工作；部直管局张谦、傅芳财以及王谦、刘同良、王昭、张拯等，在组织联络方面都给予了支持。对给予帮助、支持的单位、同志，在此一并表示感谢。由于水平有限，本丛书错误、不当之处在所难免，望读者指正。

地质技术装备丛书编辑委员会

1994年8月

第十六篇

电法仪器

罗延钟　编著

目　录

第一章　电法勘探方法及仪器 …… (4)

一、电法勘探方法 …… (4)

二、电法仪器装备的配置和基本要求 …… (4)

三、电法仪的发展和现状 …… (8)

第二章　常用的电法仪 …… (11)

第一节　直流电法仪 …… (11)

一、LZSD-B 型自动直流数字电测仪 …… (12)

二、MIR-1B 型多功能直流电测仪 …… (16)

第二节　激电仪 …… (20)

一、S-3B 型抗耦双频激电仪 …… (21)

二、DJS-6 型微机激电仪 …… (25)

三、DJS-4A 型时间域激电发送机 …… (28)

第三节　天然电磁场法仪器 …… (31)

第四节　管线探测仪 …… (33)

一、GX-2 型管线探测仪 …… (34)

二、各种管线探测仪的对比 …… (38)

第五节　瞬变电磁仪 …… (39)

一、LC 型微机电法勘探系统 …… (39)

二、SD-1 型瞬变电磁仪 …… (42)

第三章　电法仪的应用 …… (45)

第一节　在金属和非金属矿产勘查中的应用 …… (45)

第二节　在石油、煤、地热等能源勘查中的应用 …… (49)

第三节　在地下水资源勘查中的应用 …… (52)

一、电阻率法在黄河冲积扇蓄水构造调查中的应用 …… (52)

二、电阻率法在勘查古河道型蓄水构造中的应用 …… (53)

三、电阻率法在岩溶蓄水构造调查中的应用 …… (54)

四、电阻率法在寻找基岩裂隙水水源地中的应用 …… (55)
五、激电法在寻找地下水中的应用 …… (56)
六、甚低频电磁法和音频大地电场法找水应用 …… (57)
七、充电法或自然电场法确定地下水流向和流速 …… (57)
八、电法在咸水地质体调查中的应用 …… (58)
第四节 电法仪在工程基础勘查中应用实例 …… (59)
一、房基勘探应用 3 例 …… (59)
二、坝基勘查应用 2 例 …… (60)
三、桥基勘查应用 2 例 …… (61)
四、路基和隧道探测应用 2 例 …… (61)
第五节 电法仪在岩土工程力学参数和施工质量的原位检测应用 2 例 …… (62)
第六节 电法仪用于地下管线探测 3 例 …… (64)
第七节 电法仪在考古探测中应用 …… (65)
第八节 电法仪在环境污染和灾害的调查与防治方面的应用 …… (66)
一、地下水污染监测 2 例 …… (66)
二、滑坡探测应用 2 例 …… (67)
三、城市地裂缝探测 2 例 …… (68)
四、堤坝渗漏探测 2 例 …… (69)
五、电法仪寻找地下土蚁巢 …… (70)
六、黄淮海盐渍土的调查 …… (71)
主要参考文献 …… (72)

第一章　电法勘探方法及仪器

一、电法勘探方法

电法勘探（简称电法）是通过观测和研究地球电（磁）场，来了解地下地质情况或地下埋藏物情况的一大类地球物理探测（简称物探）方法。其物性基础是不同的岩石、矿石或地下埋藏物与周围岩土之间，存在电学性质上的差别。这里所说的电学性质包括导电性、导磁性、介电性、自然极化性和激发极化性等。

根据所研究电(磁)场的成因、性质及观测场所不同，电法又分为不同类型的分支方法或变种。例如，根据观测电(磁)场的场所不同，可划分为航空电法、海洋(或水上)电法、地面电法和地下电法。根据所观测电(磁)场的成因不同，可分为天然场法(观测大地天然存在的电(磁)场)和人工场法(观测人工供电产生的电磁场)。根据电磁场性质，可分为传导类电法和感应类电法等。

电法解决的问题很多，应用范围很广，见表 1.1。

二、电法仪器装备的配置和基本要求

开展电法工作，首先要用一定的仪器装备，观测地球的电(磁)场。图 1.1 示出了电法野外观测工作中仪器和装备配置的示意图。对于一般的人工场法，需要有一个直流或交流的供电电源；由它输出的电流，通过发送机变换为规定波形和频率的电流；由供电导线传输到接地的供电电极 A 和 B，供入大地或输入不接地的发送线框（回线）F，形成人工电（磁）场。这部分称为供电线路。地球（内部、表面或上空）的电（磁）场，通过接地的测量电极 M 和 N 或不接地的接收线框（磁探头）S，变换为电位差 ΔU_{MN} 或感应电动势 ε，经测量导线传输到接收机，由后者测出其强度和相对供电电流的相位移。这部分称为测量线路。电法野外观测的仪器和装备包括以下部分。

表 1.1　常用电法分支方法及其主要应用领域

类别	电（磁）场性质	方法名称		主要方法变种	主要应用领域
传导类	天然场	自然电场法		电位法	金属与非金属矿产、水文地质、断层勘查
				环形梯度法	水文地质和工程地质
	人工场	电阻率法	测深法	对称四极测深	金属与非金属、煤田、水文及工程、地热、环境地质
				五极纵轴测深	
			剖面法	对称四极剖面法	水文及工程、金属与非金属矿产、煤田、环境地质
				联合剖面法	
				偶极剖面法	
			梯度法	纵向中间梯度法	探测高阻岩、矿脉 探测低阻岩、矿脉及断层
				横向中间梯度法	
				单极梯度法	
		充电法	电充电法	电位法	金属与非金属矿产，滑坡探测
				梯度法	
				直接追索等位线法	探测地下水流向和流速
			磁充电法		地下管线探测，金属、非金属矿产
		激发极化法	常规激电法	时间域激电法（中梯，测深）	金属与非金属矿产 油气藏，环境污染探测
				频率域激电法（偶极）	
			谱激电法	频谱激电法（偶极）	
				衰减时法（测深）	地下水探测
感应类	天然场	频率域	电磁测深法	大地电磁法	大地构造，油气构造，地热
				音频大地电磁法	金属与非金属 煤田，水文与工程 油气，立体地质填图
	人工场			可控源音频大地电磁法频率测深法	
	天然场		电磁剖面法	音频大地电流法	地下管线探测， 水文及工程，浅层地质填图
				甚低频电磁法	
	人工场			电磁偶极剖面法	地下管线探测，金属与非金属矿产
				大回线电磁法	金属与非金属矿产
	人工场	时间域	瞬变电磁测深法	长偏移瞬变测深法	油气勘查，金属矿，大地构造
				重迭回线法	水文及工程，油气和煤田， 金属与非金属矿产
				中心回线法	
			瞬变电磁剖面法	框一回线法	金属与非金属矿产 水文与工程，环境地质
				偶极剖面法	
辐射类	人工场	探地雷达		探地雷达	工程勘查，地下水探测

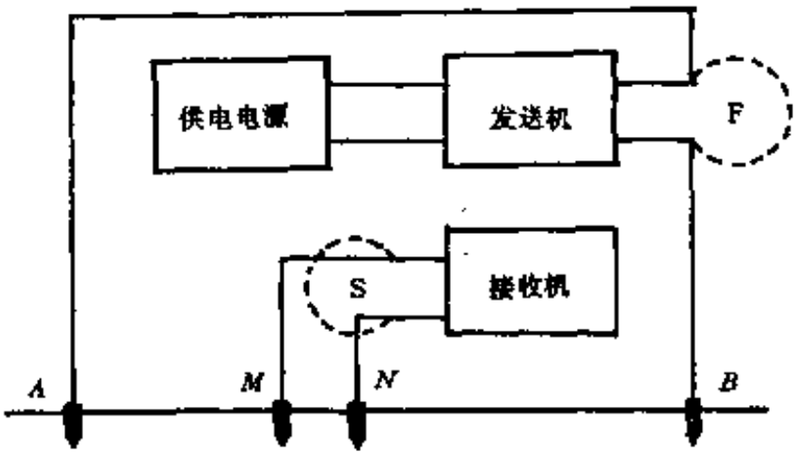


图 1-1　电法野外观测仪器和装备的配置示意图

1. 供电电源

供电电源是建立人工电（磁）场的能源。电法勘探使用的供电电源，要求有必要的功率，而且对于接地供电（电性场源）的情况，要求有足够高的输出电压；而对于向发送线框（回线）供电（磁性场源）的情况，要求能输出足够大的电流。此外，为便于野外工作，要求电源尽可能轻便、耐用、工作稳定和易于维护。

电法常用的供电电源有两大类，即化学电源和发电机。

（1）化学电源是将化学能直接转换为电能的直流电源，常用作小功率的供电电源，优点是比较轻便。其中，一次性电池有锌锰电池、锌空气电池等。一般说来，这类电池价格低廉，维护简单，因而被广泛采用。二次性电池有铅酸蓄电池、镍镉电池等。它们可多次进行充放电，但一次投入的购置价格较高，且维护较复杂。

（2）发电机通常在需要较大供电功率时使用。电法勘探中有时使用直流发电机，但更多的是使用频率为 50Hz 或 400Hz 的交流发电机。

2. 发送机

发送机的功能是把直流或交流的供电电源变换为波形、频率、振幅和相位符合一定要求的电源。当供电电源为交流电源时，发送机应具有调压、整流和滤波功能。发送机的主要电路，实质上

是一个或几个按一定时间顺序进行工作的开关。在电法勘探中，按额定功率的大小将发电机分为三类：10kW 以上的称为大功率发电机，一般是车载的；3kW—10kW 的称为中功率发电机；而不大于 3kW 的算作小功率发电机，它通常是可人力搬运的。

早期的发送机是针对不同分支方法分别设计的。但随着微电子技术的发展，现代已出现适用于多种分支方法的多功能自动发送机。不过，从经济和实用上考虑，不同功率（大、中、小功率）的发送机仍是分别设计和制造的。

3. 导线

电法工作中连接供电线路和测量线路内各部分仪器和装备的输电线为外表绝缘的导线，分为供电导线和测量导线两种。导线的技术指标有：横截面积，单位长度的电阻值，外表绝缘电阻或耐压强度，抗拉强度及单位长度的质量等。供电导线一般较粗，且要求允许通过导线的电流密度不小于 $5A/mm^2$，绝缘强度（耐压）大于最高供电电压的两倍和绝缘电阻大于 2MΩ/km。测量导线因无大电流通过，一般较细，为增加其抗拉强度常包含 3—4 股钢丝，绝缘电阻应大于 5MΩ/km。

4. 电极和线框、磁探头

采用电性人工场源和观测电场时，需要用电极接地。供电电极常用直径约 2cm，长度 70mm—100mm 的铁制或钢制杆状电极；在需要供大电流强度时，有时也用金属板或金属网埋入地下作供电电极。为使电极间的极化电位差小且稳定，测量电极常采用铜或铅电极；在作自然电场法、激发极化法及大深度电测深和电磁测深时，还要求采用“不极化电极”。

5. 接收机

接收机是观测地球电（磁）场的核心仪器，用以测量地球电（磁）场在测量电极 M、N 之间的电位差 ΔU 或在接收“天线”S 中生成的感应电动势 ε。所以，简单说来，接收机就是一台电位差计。其技术要求较严。

（1）灵敏度高，稳定性好，观测精度高。对于天然场法，待

测信号不为人所控制，仪器的灵敏度不高，就可能根本观测不出微弱的待测信号。

(2) 抗干扰能力强。电法野外观测常见的干扰可分为两类：一类是稳定的（“恒流”）电场，主要是地下稳定的自然电场和测量电极间的极化电位差。这可在电法仪中设计专门的“极化补偿电路”来消除。另一类是非稳定的电（磁）场，主要是工业游散电流所致。现代电法仪采用多次叠加、相关处理等先进的数字技术，已能十分有效地在强干扰背景上划分出微弱的待测信号。

(3) 输入阻抗高。在观测测量电极 M、N 之间的电位差时，待测电位差会在 M、N 电极的接地电阻 R_{MN} 上形成分压，引起观测误差。降低此种误差的方法是增大接收机的输入阻抗 Z。通常要求 $|Z|>100R_{MN}$。实际的 R_{MN} 可能相当大 ($n\cdot10^3$—$n\cdot10^4$)，所以，电法仪的输入阻抗一般应达到几兆欧。

(4) 对野外环境适应性强。一般要求电法仪工作的环境温度宽（−10℃—50℃），能在潮湿环境下（相对湿度大于 85%）正常工作。仪器本身功耗小，重量轻，防震性好，便于携带和运输。

(5) 操作简单，使用方便。现代电法仪几乎都是自动化的了，整个观测过程只需拨动一、两个开关即可完成，“保愚性”极佳。

三、电法仪的发展和现状

50 年代以前的电法仪，都是以电工线路为基础的电工仪表。典型代表是从前苏联引进的 ЭП-1 型补偿式电位计和 П-4 自然电位计及国产的地阻仪。它们的共同特点是操作繁琐，灵敏度与观测精度都较低。

50 年代末到 60 年代初，国内开始出现了电子管线路的电法仪。主要代表是苏制 ЭСК-1 型电子自动补偿器和在此基础上改进设计的国产 DC-601 型及 DDC-2 型电子自动补偿器。此外，还有一些当时国内研制的电磁法仪器（如感应法仪、强度仪及航电仪等），也属此类。

从 60 年代后期开始，国内电法仪先后用晶体管（半导体）电路代替了电子管电路；进而采用小规模的集成电路（运算放大器，

积分器及各种逻辑电路等）组装电法仪。这使得电法仪的体积、重量和功耗都显著减小，仪器的灵敏度、稳定性和观测精度也明显提高。这方面的代表性仪器有一直沿用至今的 DDC-2B 型电子自动补偿仪（重庆地质仪器厂），ZWD-2 型直流数字电测仪（浙江地矿局物探大队），LZSD-B 型自动直流数字电测仪（中国地质大学，武汉），DJS-2 及其改进型短导线激电仪（地矿部物探化探研究所与重庆地质仪器厂），JJ 系列积分式激电仪及 DG-Ⅰ型地下管线探测仪（平遥卜宜水利电探仪器厂），DBJ-1 型变频激电仪（上海地质仪器厂），S 系列双频激电仪和 C-1 型微测深仪（中南工业大学与三明无线电二厂），DDW-1 型多用电磁系统及 GX 系列管线探测仪（中国地质大学，北京），DDS-2 型甚低频电磁仪（成都地质学院与重庆地质仪器厂）和诸多引进的电法仪。

随着大规模集成电路和微电子技术的发展，70 年代中期，国际上出现了由微处理机控制的电法仪。第一台由微处理机控制的电法仪是 SWP-1 型自动激电仪，它于 1975 年在加拿大问世。此后，加拿大、美国、西欧、澳大利亚和中国纷纷推出新型的微机电法仪，引起了电法仪的一场深刻的革命。目前，国内外新出的电法仪，几乎已没有不是由微处理机或微计算机控制的了。

所谓“微处理机”是用大规模集成电路把除存储器以外的整个计算机系统（即中央处理单元 CPU），制在一块或几块半导体硅片上。另加一些半导体存储器，就能组成微型电子计算机。其特点是体积小，可装入野外仪器中。装于电法仪中的微处理机或微计算机（统称微机）可发挥多种功能，如：对仪器的操作进行程序控制；将待测的模拟信号作模-数转换后，自动计算待测参数和在现场对所测数据作实时处理；以及完成锁相、滤波、观测结果的数字显示和数字输出等多种复杂功能。装入微机，使电法仪发生了革命性的变化：（1）多用化（一机多用）。即一台仪器既可用作激电法，又能同时测视电阻率和自然电位（如 M-4），有的还能用来做电磁法（如地相位仪），甚至还能用于地面磁测和航空磁测（如 GDP-12）。近年新出的多功能电法仪（如加拿大凤凰公司的 V-

5型和美国 Zonge 公司的 GDP-16 型），几乎可用于当代常用的各种电法分支方法，特别是可用于近年新发展起来新方法变种，如谱激电法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁法和大地电磁法等。(2) 自动化。由于用微机对仪器进行程序控制，所以，从仪器的电源检查，校准、极化补偿、增益（测程）选择，直到视参数（ρ_s，η_s 或 P_s 等）的计算和观测数据的显示都是自动进行的；当干扰很大，观测结果不可靠时，还会自动报警。(3) 数字化。由于用微机控制实现模-数转换和数字运算，所以不仅观测结果用数字显示，而且测量的数据在观测过程中就进行实时处理。(4) 轻便化。

我国第一台微机电法仪，于 1983 年由地矿部物探所研制成功，投入使用。现在已有代表性的微机电法仪是：DWJ 系列、MR 系列、MIR 系列等，下面将重点介绍。

091213

第二章　常用的电法仪

本章将以某些典型仪器为例，介绍常用电法仪的功能、测量原理和主要技术性能。

第一节　直流电法仪

直流电法仪主要用于直流电阻率法、充电法和自然电场法。在前两种电法中，用来测量直流人工场源的供电电流强度 I 和由它在测量电极 M、N 之间产生的直流电位差 ΔU；在自然电场法中，不需人工供电，直流电法仪用来测量自然电场在 M、N 极之间的直流电位差 ΔU。

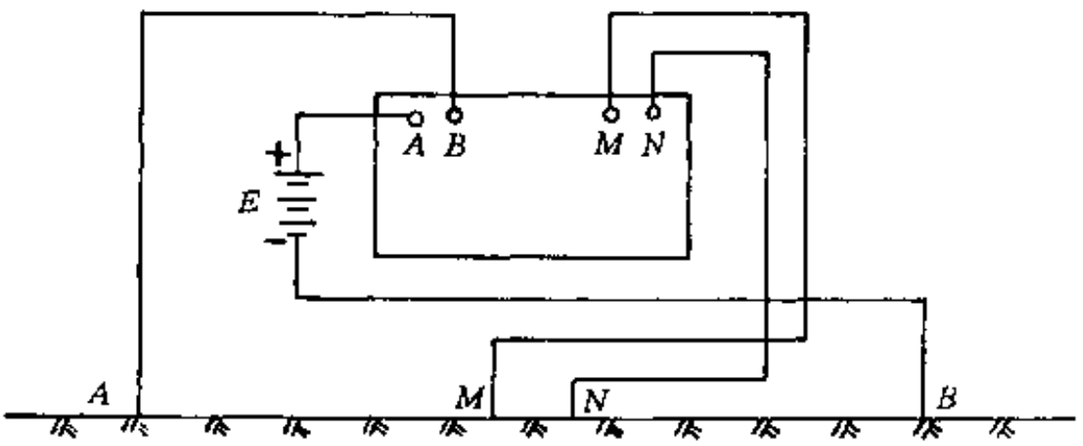


图 2.1　直流电法仪测量原理图

图 2.1 示出了直流电法仪的测量原理图。该仪器同时兼有发送机和接收机双重功能。直流电源 E 经过电法仪的供电控制（发送机）部分，与供电电极 A、B 相连，构成供电线路。当电法仪内开关 K_2 接通时，供电线路连通，有供电电流 I 经电极 B 供入大地，再由 A 极流回。电流 I 流过电法仪内已知阻值的标准电阻 R_0，在其上产生的电位降 $\Delta U_0 = I \cdot R_0$。用电法仪内的电位计 V 测出

ΔU_0，便可进一步算出供电电流强度 $I=\Delta U_0/R_0$。

将测量电极 M、N 与电法仪的测量（接收机）部分相连。在开关 K_2 断开（即未供电时），M、N 极之间的极化电位差和自然电位差（统称极差）输入接收机。可以用电法仪内的电位计 V 测出这一电位差值（在作自然电位观测时）；也可用专门的极化补偿器 JB 抵消此极差（在作人工源直流电法时）。在后一种情况下，当接通开关 K_2 向地下供电时，供电电流在 M、N 之间产生的电位差 ΔU 输入接收机，并由电位计 V 测出。测量电流 I 和电位差 ΔU 的电位计可以是共用的，通过开关 K_1 来转接（如图 2.1 所示）；也可以设计两只电表分别进行测量（如 LZSD-B 型自动直流数字电测仪）。

目前，国内常用的直流电法仪有 DDC-2B 型电子自动补偿仪（重庆地质仪器厂），ZWD-2 型直流数字电测仪（浙江地矿局物探大队），JD-2 型自控电位仪（平遥卜宜水利电探仪器厂），C-2 型微测深仪（中南工业大学与三明无线电二厂），LZSD-B 型自动直流数字电测仪（中国地质大学，武汉）和 MIR-1B 型多功能直流电测仪（地矿部机械电子研究所）。下面重点介绍后两种比较先进的仪器。

一、LZSD-B 型自动直流数字电测仪

1. 功能和特点

这是由笔者主持设计和研制的仪器，具有如下特点。

（1）用两只具有数字锁存控制端的 A/D 转换芯片组成的 $3\frac{1}{2}$ 位液晶数字电压表，分别显示供电电流 I 和电位差 ΔU。一但读数建立，立即锁存，克服了模拟记忆必然产生读数漂移的缺点；又因两只数字表同步锁存，可避免 I 和 ΔU 值人工读数不同步造成的误差。

（2）利用液晶数字表显示数字的笔段特点，设计了仪器测程自动转换电路。

（3）用积分器获取自然电位值，测电阻率时仪器自动减去该

值，实现自电自动补偿。

（4）在供电线路中设计了高性能双向模拟电子开关，导通电阻低于 1Ω，而关断电阻达 $n \cdot 10^3 M\Omega$，且通断速度远优于机械开关。

（5）主要用调节双积分式数字表积分取样周期为工频周期整倍数的方法，来压制 50Hz 干扰。不仅抗干扰能力强，且无因采用多节低通滤波器造成读数建立时间过长之弊。

（6）以定时器为基础，设计了自动控制电路。测视电阻率时，仅需将仪器工作开关由“自由”挡拨至“电阻率”挡（一步操作），即可自动完成以下功能：①自电位自动补偿；②接通仪器电源；③接通供电线路，向 A、B 供电；④自动选定测 I 和 ΔU 的适当测程；⑤发出锁存控制信号，锁定 I 和 ΔU 的数字表读数；⑥切断 A、B 供电线路和仪器的放大器电源。上述整个过程仅需 4s，可保证野外观测自动、高效和减少人为操作误差；并且，最大限度地节省 A、B 供电电源和仪器电源的功耗。

总之，本仪器以尽可能简单的电路设计，实现尽可能周全和自动化的功能，因而有极佳的性能价格比。其价格甚至低于老式的 DDC-2B 型电子自动补偿仪。

2. 技术指标

（1）读数显示范围：0～1999。

（2）测程：

电位差测程：20mV（10μV/字）、200mV（0.1mV/字）、2000mV（1mV/字）三挡。

电流测程：

×10mA 倍率：200mA（0.1mA/字）、2000mA（1mA/字）、＞2000mA（10mA/字）三挡，

×10μA 倍率：0.2mA（0.1μA/字）、2mA（1μA/字）、20mA（10μA/字）三挡。

（3）测量精度：满量程的 0.5%±2 个字。

（4）输入阻抗：大于 1000MΩ。

（5）电子开关供电功率 2kW（500V，4A）。

（6）对 50Hz 工频干扰衰减优于 80dB。

（7）内部电源平均功耗小于 50mW。

（8）仪器重量小于 4kg。

（9）外形尺寸：25.5cm×18cm×11.5cm

（10）仪器供电端 A、B 与接收端 M、N 之间，以及它们与仪器外壳之间的绝缘电阻大于 1000MΩ。

（11）仪器能在－10℃到 50℃的温度范围及相对湿度小于 95%的条件下正常工作。

3. 工作基本原理

本仪器由电位差测量系统及外部供电电流测量系统两个部分组成。图 2.2 为仪器电路原理方框图。图中上半部为电位差测量系统，下半部为供电电流测量系统。

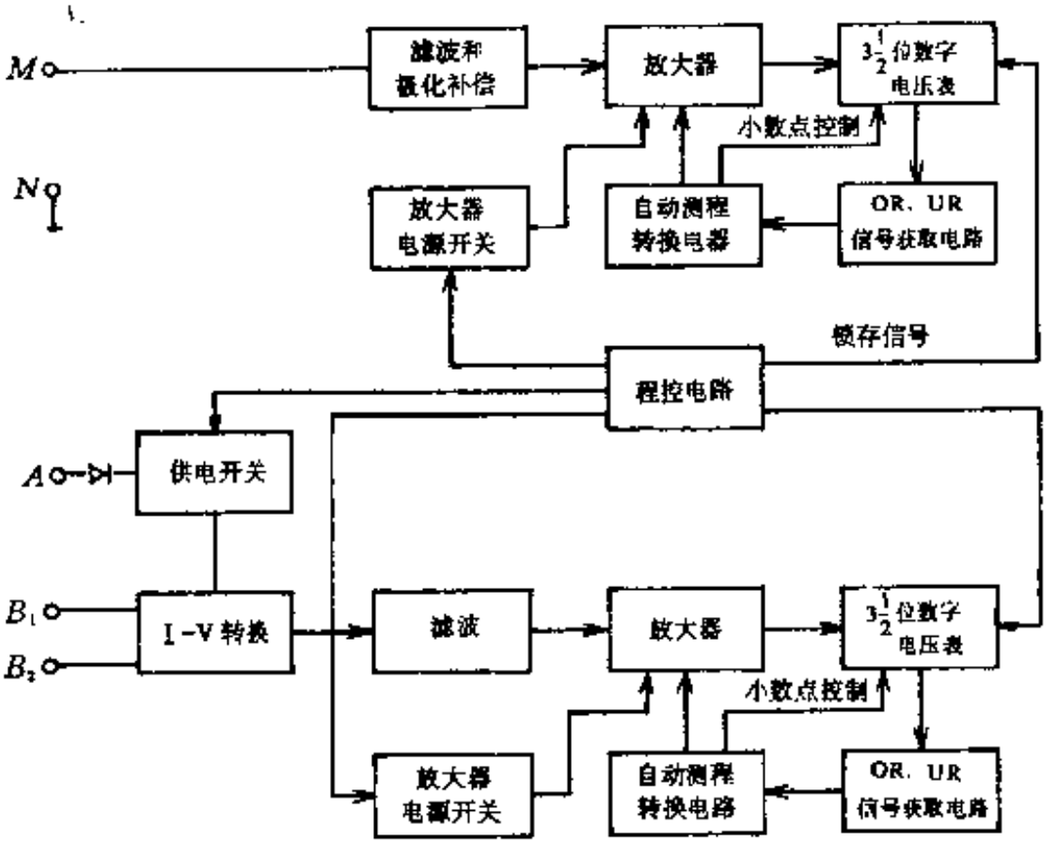


图 2.2　1.ZSD-B 型自动直流数字电测仪电路原理方框图

两测量系统的核心，皆由具数字锁存功能的 $3\frac{1}{2}$ 位液晶数字电压表及测程自动转换放大器所组成。用以测量来自 MN 电极的直流电位差 ΔU，标准电阻 R_0 上与供电电流强度成正比的电位差值 ΔU_0。

由液晶数字表的笔段信号产生过量程信号 OR 或欠量程信号 U_R，触发自动测程转换控制电路，改变放大器的增益，获得与待测电位差相适应的测程。

自动控制程序发生器由定时器及触发器两部分组成。当工作开关由“自由”转至“电阻率”挡位时，定时器开始工作；到一固定时间后，定时器将使触发器的状态发生反转，并加以保持。触发器状态反转前后都可从它的不同输出端分别输出高、低电平信号，但状态反转时，高、低电平状态同时互换。如工作开关转至“电阻率”挡的瞬间，程序发生器输给供电控制电子开关的是高电平，则给放大器供电的正、负电源的电子开关导通，使放大器工作；同时，程序发生器输给液晶数字表“HLDR”端的是低电平，也保证了液晶数字表能正常建立起读数；此外，通过光耦隔离器也给供电测量系统的大功率电子开关加上高电平，使 A、B 电极回路导通送电。状态反转时，因高低电平互换，结果使放大器电源截断而停止工作，A、B 极停止送电，液晶数字表 HLDR 端加上高电平（读电流值的液晶表则通过光耦器加上高电平）读数被锁定。这样自动地完成了电位差与电流值的测量工作。

滤波器与自然电位补偿电路由无源积分器组成，其作用是既衰减交流干扰信号，又完成直流自然位值的取样任务，在工作开关转至“电阻率”挡时，放大器将自动减去积分器所保持的自电值，以实现自电自动补偿的目的。

供电测量系统中的滤波器由低通滤波器组成，用以消除因供电极接地电阻变化等因素造成的供电电流瞬态变化的影响。

本仪器用 900V、6A 大功率 VMOS（垂直沟道场效应管）作供电电子开关，当其栅源之间加上控制电压时（栅极为高电平），

VMOS管导通，控制电压除去后关断，因电子开关无机械触点，通断过程不会产生电火花，可保证电子开关长期稳定的正常工作。由于使用电子开关，可方便的实现送电自动控制。

因N型VMOS管漏极必需接电源正端，源极接负端，才能正常工作，若电压极性相反，VMOS管将等效于一个正向导通的二极管，所以在A电极输入端加一高反压大功率定向二极管，以保护VMOS管。

为了照顾低阻大极距时需供大电流及高阻小极距供电电流很小（特别是测量高阻标本电阻率时）的不同要求，本仪器改变了DDC-2型仪器仅用一只0.1Ω标准电阻作*I-V*转换的传统方法，根据供电电流值的不同，分别采用0.1Ω与100Ω两只标准电阻来实现*I-V*转换。当电流大于20mA时用0.1Ω电阻，电流小于20mA时用100Ω电阻。这样由于测电流的自动测程转换放大器本身有三个测程，与两个取样电阻配合，使测电流值时具有6个测程，测量电流的范围覆盖了六个数量级，其分辨率从0.1μA/字直到10mA/字。这就大大扩大了仪器的使用范围，例如可用本仪器以微电极系装置检测水泥路面的质量。

二、MIR-1B型多功能直流电测仪

1. 功能和特点

MIR-1B型多功能直流电测仪是由地矿部机械电子研究所（河北，燕郊）设计和制造的由微机控制的电法仪。它不仅可用于常规电阻率法、充电法和自然电场法，而且还可做时间域激电法（包括衰减时法），还能配合GC-1型程控多路电极转换器进行高密度电阻率法探测。它是一种适用于多种探测任务的传导类电法仪器。其特点如下：

（1）发送机与接收机组装在同一箱体内，免去了以往野外施工中接收机与发送机搬运、联系（即同步）的麻烦。同时，既可用内部发送机工作，亦可配合外部发送机，采用短导线方式工作。

（2）具有单道和多道两种采集方式。单道方式即常规电法，单一偶极测量方式。多道测量方式又分为两种：一是自身可扩展为

六对偶极测量方式，可提高工作效率及开展新的勘探方法研究；二是配接GC-1型程控多路电极转换器，进行高密度电阻率法勘探。

(3) 适应温度变化范围宽(－20℃—50℃)，无需加温或降温。

(4) 测量过程中显示一次场电位差 ΔU 和供电电流 I 值，直接读出视电阻率 ρ_s、视极化率 η_s 和半衰时 T_h。

(5) 采用自动增益调节、自然电位自动跟踪及自动补偿技术，使测量过程自动化。

(6) 采取模拟和数字二重滤波、多次叠加、超差剔除、超程显示等措施，提高了系统的抗干扰能力和数据的准确性。

(7) 直接检查模拟通道零点漂移、电池电压高低、MN 和 AB 电极间接地情况。

(8) 用64K字节的大容量固体存储器保持野外数据，可存储多达8000个视电阻率值，常规激电可作600个记录点号的工作量。

(9) 可与带有标准RS-232C串行通讯口的任何计算机通讯，亦可与PC-1500袖珍机通讯。

(10) 整机操作简单。采用人机对话、菜单提示方式，便于操作掌握。

(11) 整机采用CMOS高品质器件，功耗低，寿命长，可靠性高。

2. 技术指标

(1) 通道数：一道为基本设置，六道选用；配接GC-1程控多路电极转换器，可扩展至60道。

(2) 电位测量范围：－2.5—2.5V，输入过压保护。

(3) 输入阻抗大于10MΩ。

(4) 自然电位自动补偿范围：±2.5V。

第二节　激　电　仪

激电仪是用作激电法的仪器。当电流流过大地时，由于电化学作用会产生随时间缓慢变化的附加电场，这种现象称为激发极化效应（简称激电效应）。基于观测激电效应引起的电（磁）场变化，来研究地下情况的电法分支方法称为激发极化法，简称激电法。

激电法既可在时间域中，也可在频率域中观测激电效应。前者称为时间域激电法，一般是通过供电电极 A、B 向地下供入一定持续时间（T）的方波电流；并在断电后，观测测量电极 M、N 之间随时间（t）缓慢衰减的纯激电二次场电位差 $\Delta U_2(T,t)$，并按下式计算视极化率 $\eta_s(T,t)$（西方国家称为视充电率 m_a）。

$$\eta_s(T,t)=\frac{\Delta U_2(T,t)}{\Delta U(T)}\times 100\% \qquad (2.1)$$

式中，$\Delta U(T)$是在方波供电电流断开前（即时间 T）测出的一次场（实为电流导电效应的一次场与激电二次场之和形成的总场）电位差。通常，为书写方便，都省去（2.1）式中诸量的时间符号（T 和 t），分别记为 η_s，ΔU_2 和 ΔU。

当代的时间域激电仪，并不是测量某一时刻（T 或 t）的电位差，而是记录其在某一时间间隔（ΔT 或 Δt）内的积分值，然后除以积分时间（称为积分窗口宽度 ΔT 或 Δt），获得其平均值，并记录于积分窗口中心时间（见图 2.7）。

在频率域中观测激电效应，称为频率域激电法，其最常用的方法变种是变频激电法。这种方法向地下供入两个电流强度（振幅）相同、频率分别为 f_G（高频）和 f_D（低频）的谐变或方波电流，观测相应频率的电位差（振幅）$\Delta U(f_G)$和 $\Delta U(f_D)$，并按下式计算视频散率 P_s（国外称为百分频率效应 PFE，国内还有人称为视幅频率 F_s）

$$P_s(f_D,f_G)=\frac{\Delta U(f_D)-\Delta U(f_G)}{\Delta U(f_G)}\times 100\% \qquad (2.2)$$

同样，为书写方便，往往省去上式中诸量的频率符号（f_D 和 f_G），

分别记为 P_s，ΔU_D 和 ΔU_G。

无论是时间域还是频率域激电法，它们在野外观测的对象，归根结底还是电位差。所以，激电仪和直流电法仪的基本部分（电位差测量单元）大体上是一致的。不过，激电法观测的是一定供电时间（T）和断电时间（t）或一定频率（f_D 和 f_G）的电位差，而且通常是由测量仪器直接指示出激电参数 $\eta_s(T, t)$ 或 $P_s(f_D, f_G)$ 值。因此，要求激电仪中设计某些时间或程序控制电路和归一或计算电路，故激电仪较一般的直流电法仪更复杂。

与直流电法仪相比，激电仪还有另一个特点，即发送机和接收机一般是分开的。

激电法是我国应用最广泛的电法分支方法之一。因此，我国的激电仪制造单位和仪器的类型都很多。有一定市场占有量的激电仪为：DWJ 系列微机激电仪（北京地质仪器厂），DJS 系列微机激电仪（重庆地质仪器厂），MIR 系列多道微机激电仪（地矿部机械电子研究所），JJ 系列积分式激发电位仪（平遥卜宜水利电探仪器厂），SWJ-Ⅱ型微机激电仪（冶金部地球物理勘查院），S 系列双频激电仪（中南工业大学与三明无线电二厂）和 DBJ-1 型变频激电仪（上海地质仪器厂）。除上述常规激电法仪器外，我国还研制有频谱激电法仪器，如 DW-83 型低频复电阻率仪（中科院地球物理研究所与无锡电子技术研究所）和 F-1 型频谱激电仪（中南工业大学与深圳华达电子有限公司）等。不过，由于种种原因，国产频谱激电仪未实用于生产；目前，我国频谱激电法应用的仪器，主要是加拿大凤凰公司的 V 系列（V-3，V-4 和 V-5）及美国 Zonge 公司的 GDP 系列（GDP-12 和 GDP-16）多功能电法仪器系统。

限于篇幅，下面具体介绍两种有代表性的国产常规激电仪。

一、S-3B 型抗耦双频激电仪

（一）功能和特点

本仪器是由中南工业大学研制的、带有独创特点的 S 系列双频激电仪中的最新型号。整机由分离的发送机和接收机两个部分组成。发送机同时供出高、低两个频率的方波；接收机则同时测

量这两个频率（基波）的极化总场电位差，并自动数字显示由它们算出的频散率 P_s（或称幅频率 f_s）。与传统的变频激电仪（如DJJ-1，P660 等）相比，它具有如下优点。

（1）高、低频同时供电和测量，单点观测速度提高一倍以上；而且，还免除了发送机和接收机之间频繁通讯联系造成的麻烦。

（2）同时供双频电流，使在中梯排列工作时，可实现一机供电，多机观测，从而大大提高野外生产效率。

（3）同时作双频供电和测量，使高、低频电位差受干扰的条件相同，因而按（2.2）式算出的频散率 P_s，抗干扰能力大大提高。

（4）接收机自动计算和数字显示频散率 P_s，读数快，观测精度高。

（5）在需要压制电磁耦合干扰时，发送机自动克服感应耦合引起的假频散率。

（6）具有鉴别发送和接收间相位同异的功能。

（二）技术指标

1. 发送机

（1）工作频率：4Hz 和 4/13Hz 混合双频。频率误差＜±0.02%。

（2）工作电压：45V—400V（直流）。

（3）输出电流：0.03A—1A（分 0.1A，0.3A，1A 三挡输出）。

（4）输出功率：$P_{max}=400W$。

（5）过流保护：输出电流超各挡量程的上限时，过流保护动作自动切断输出电流。

（6）输出相应的对接信号。

（7）自身功耗：＜400mW。

（8）外形尺寸：300×200×180mm^3

（9）重量 5kg。

2. 接收机

（1）工作频率：4Hz 和 4/13Hz 双频。

（2）电位差测量范围：0.2mV—2V 分四挡（2、20、200、2000mV）。

（3）频散率测量范围：--70%--99%。

（4）电位差挡差：优于 1.5%。

（5）频散率挡差：优于 0.5%。

（6）电位差漂移：优于 1.5%/4（h）。

（7）频散率漂移：优于 0.5%/4（h）。

（8）频散率自校差：≤0.5%。

（9）抗耦功能：感应耦合假频散率不大于 30%时，消除至 0.5%以内。

（10）具鉴别发送和接收间相位同异功能。

（11）读数方式：全数字化。

（12）输入阻抗：≥3MΩ。

（13）功耗：≤500mW。

（14）重量 3.5kg。

（15）体积：232×110×200mm³。

（16）使用电源：6F22 9V 电池 10 节。

（二）工作原理

发送机同时向地下供出包括高频 4.0Hz 和低频 4/13Hz 的复合电流，波形如图 2.4。

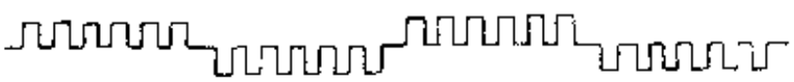


图 2.4 S-3B 型抗耦双频激电仪的供电波形

发送机整机方框图如图 2.5，其中高压直流电源（外供）、逆变器、斩波器和取样电阻组成供电主回路，其它为逻辑控制部分。

发送机同时还输出相应的脉冲信号，作为发-接系统鉴相使用。

振荡器产生 32768Hz 的振荡方波，经分频器后分别得到

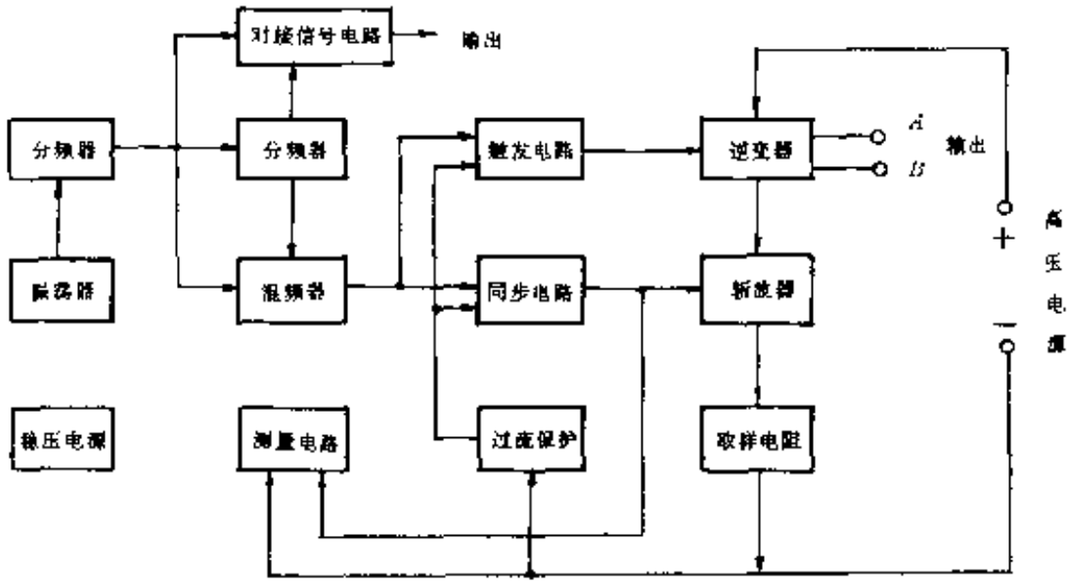


图 2.5　S 3B 型发送机原理方框图

1.0Hz 和 4/13Hz 的方波。混频器将高、低频方波混合后，一路送至触发电路产生两组触发脉冲以控制逆变器的可控硅工作；另一路送至同步电路产生同步方波以控制斩波器工作。高压直流电源经逆变器、斩波器，取样电阻将直流逆变成包络高、低频的复合双频电流由输出端“A”、“B”向大地供出。过流保护电路用以保护主回路功率元件，当输出超载时，自动切断供电系统。测量电路通过表头直读供电流值，稳压电源产生±6V 稳压电压供机内各控制电路工作使用。

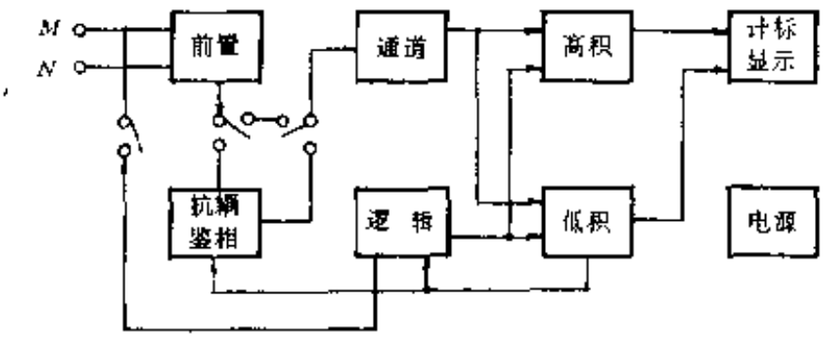


图 2.6　S 3B 接收机原理方框图

图 2.6 为接收机原理方框图。从 M、N 电极来的双频信号经过前置放大，抗耦网络处理，进入通道，放大并选出 4Hz 和 4/13Hz

两种频率信号，分别检波积分后，由数字表读出高、低频电位差 ΔU_G、ΔU_D，还进行发送和接收间的相位同异鉴别，并在计算单元进行 $P_s=\frac{\Delta U_D-\Delta U_G}{\Delta U_G}\times 100\%$ 的计算，由数字表显示出 P_s 值。当不需要抗耦鉴相时，前置放大后的信号直接进入通道选频放大。

逻辑单元提供整机工作的控制程序，控制高频低频积分单元的积分、保持、复零，还产生标准的双频信号供仪器“自校”时使用。电源单元提供整机工作的三组稳压电源。

二、DJS-6 型微机激电仪

（一）功能和特点

本仪器是由重庆地质仪器厂设计和制造的。由微机控制的短导线时间域激电仪。它与时间域发送机配合工作。既可测量个别延时的视极化率 η_s（本机用 M_s 表示）作普查用；也可观测激电二次场衰减过程（激电时间谱），为评价激电异常或激电找水提供宝贵信息。当与恒流源配合，还可进行直流电阻率法和充电法，也能用于自然电场法，是一种多功能的直流电法仪。其特点如下：

1. 测量参数多，可获得二次场衰减过程。

（1）仪器启动一次能同时测量五个参数——一次场电位差 ΔU 和四个不同延时的极化率 M_s 值（见图 2.7）。四个二次场取样（积分窗口）宽度之比为 $t_{s_1}:t_{s_2}:t_{s_3}:t_{s_4}=1:2:4:8$，$t_{s_1}$ 的基本宽度为 20ms。

（2）取样宽度可变

四块面积的宽度是可变的，以×1、×2、×4、×8 四种倍率变化，相应宽度如表 2.1 所示，宽度的单位均为 ms。

表 2.1

倍率 \ 宽度	T_{s_1}	T_{s_2}	T_{s_3}	T_{s_4}
×1	20	40	80	160
×2	40	80	160	320
×4	80	160	320	640
×8	160	320	640	1280

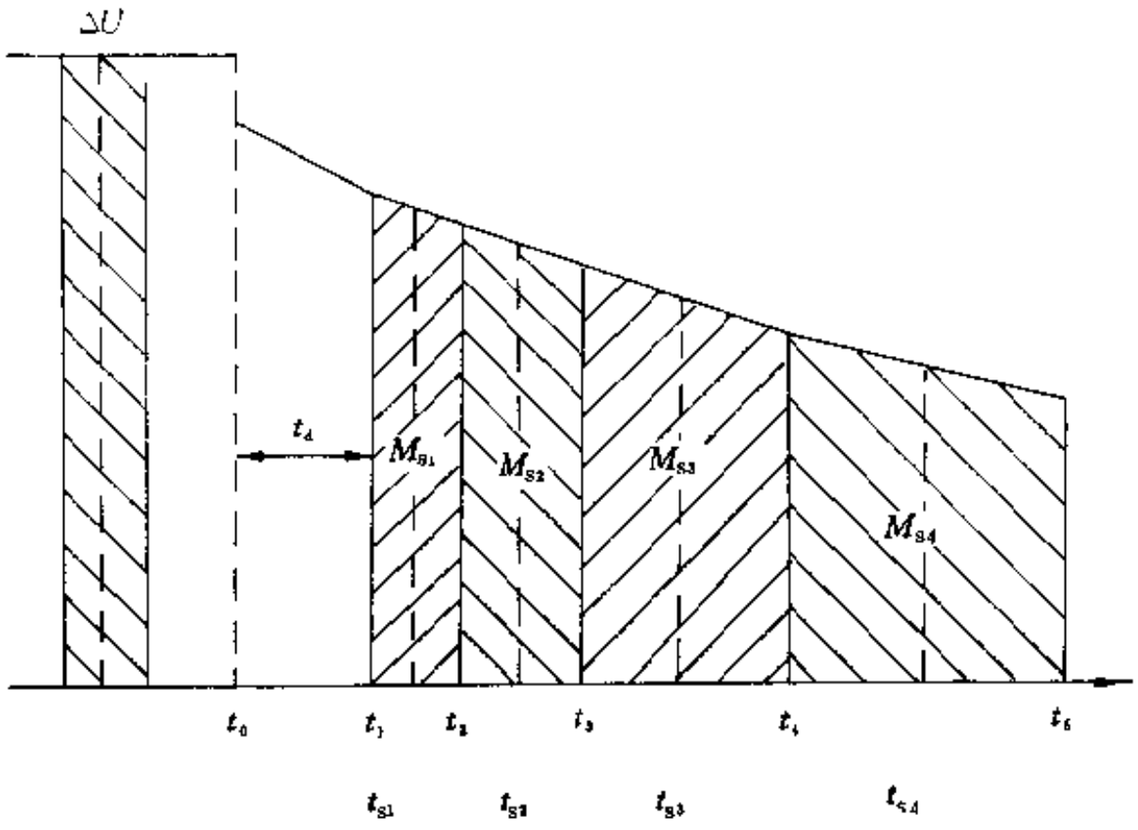


图 2.7　DJS-6 时域激电仪的取样（积分）窗口示意图

ΔU——一次场电位差；t_d　断电延时；

t_s—取样（积分窗口）宽度

用户只用确定第一块面积的宽度，另外三个宽度仪器自动选好。

(3) 延迟时间 T_d 可变

本仪器设有十种延迟时间，即 100、200、300、400、500、600、700、800、900 和 1000ms，可任选。改变取样宽度和延迟时间，在同一测点上，最多可测得 160 个 M_s 值，为进一步研究二次场衰减曲线，评价激电异常和用衰减时法找水提供了条件。

(4) 仪器还可测量视电阻率 ρ_s 与自然电位 U_{sp}，为综合研究异常，区分异常性质提供更多的参数。

2. 自动化程度高，操作极为简单。

工作时，操作员只需按一下测量键，则极化补偿、测程选择、倒相、归一、测量、运算均由微机控制自动运行。

3. 抗干扰能力强，观测精度高。

（1）仪器采用信号增强技术，每次观测的 ΔU 和 M_s 值均是几十次之算术平均值，使干扰降低 $1/\sqrt{n}$ 倍（n 为增强数）。

除求 M_s 算术平均数外，还能自动剔除超差大的点，以提高精度。

（2）为抗工频干扰，仪器设有 50Hz 无源双 T 滤波，50Hz 有源陷波器和低通滤波器，抑制工频干扰优于 60dB。另外，在取样点的安排上，也注意了克服工频干扰的问题。

4. 仪器使用晶体振荡器，时间精度高。

5. 仪器全部采用进口 CMOS 器件，性能稳定可靠，功耗低。

6. 仪器设有自动跟踪系统，能自动跟踪自电漂移和放大器的零漂，使测量更加准确。

7. 仪器测量次数由 1 次到 10 次任选，用户可根据测区干扰水平、信号大小等选择，以保证测量精度。

8. 仪器设有自检功能，当电源太低时显示 H001；当信号太大时显示 H003。

9. 仪器设有 1s、2s 和 4s 三种节拍，相应的周期为 4s、8s 和 16s，能与国内外多种发送机配套使用。

10. 仪器通用性强。通过改变延时及取样宽度，能与国内外多种仪器配套使用。

11. 仪器采用了密封结构，线路板经表面涂复，防潮性能好，且工艺先进，结构紧凑，适于在恶劣条件下工作。

12. 面板上装有小型指示器，用来粗略监视输入信号大小，外界干扰、MN 接地状况以及发射机是否供电。

（二）技术指标

1. 一次电位 ΔU 的测量范围：3mV—2500mV；

2. 一次电位 ΔU 的测量精度：

当 $3\text{mV} \leqslant \Delta U \leqslant 10\text{mV}$ 时，为 $\pm 0.2\text{mV} \pm 1$ 个字

$\Delta U > 10\text{mV}$ 时，为 $\pm 1.5\% \pm 1$ 个字

3. 极化率 M_s 的测量精度：

当 $M_n \leqslant 3\%$ 时，为二0.3±1 个字。$M_n > 3\%$ 时，为 ±2% 二1 个字。

4. 自然电位补偿范围不小于±400mV。

5. 仪器输入阻抗＞3MΩ。

6. 供电周期可为 4s、8s、16s 三种，占空比均为 1：1。

7. 仪器延迟时间：从 100ms- 1000ms，分 10 挡，可任选。

8. 仪器启动一次能同时测量 ΔU 及四个 M_n 值。

9. 对于 50Hz 工频抑制优于－60dB。

10. 重复测量次数：由 1—10 次任选。

11. 仪器工作温度范围：0—＋50℃（液晶显示）

相对湿度：93%（40℃时）。

12. 电源、3 节 9V 积层电池、工作电流小于 6mA；6 节 1 号干电池，工作电流小于 70mA。

13. 仪器重量：2kg；尺寸：240×95×220mm³。

（二）工作原理

DJS-6 型时域微机激电仪的电路原理方框图示于图 2.8。仪器由模拟处理、微处理器、键盘、显示和电源五部分组成。信号从 MN 输入，经过阻抗变换、滤波后，与 D/A 信号一起送到双 T 陷波器，去掉 50Hz 工频干扰；再经放大器放大后送至 A/D 进行模数转换；由微处理器将 A/D 值取出，并进行相应的处理；然后送至显示器显示。微机处理的模式，由操作员从键盘输入。仪器的电源部分提供±5V 电源。

三、DJS-4A 型时间域激电发送机

（一）功能和特点

本仪器是重庆地质仪器厂设计和制造的、用以与时间域激电接收机配合、进行短导线激电测量的发送机。其功能是将高压直流供电电源(外供)，自动转变成具有一定占空比的双向供电脉冲，通过供电电极 A、B，周期性地自动向地下供电。

本仪器的换向开关电路采用可控硅技术，控制部分用 CMOS 电路组成，控时采用 5C702 秒电路产生秒脉冲，设有继电器。所

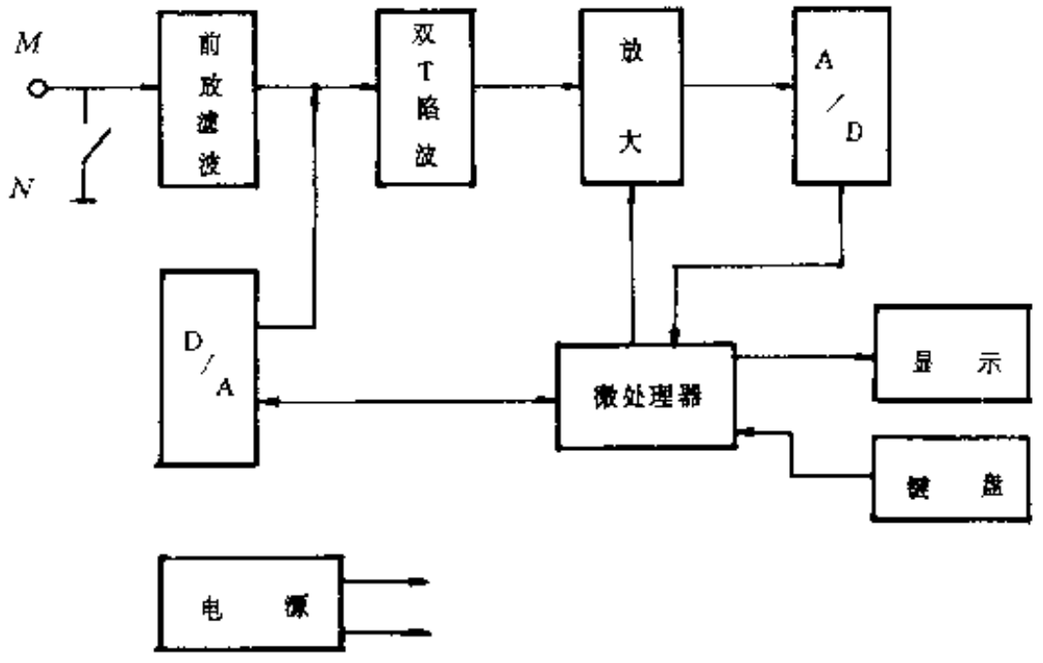


图 2.8 DJS-6 型微机激电仪的原理方框图

以，具有抗干扰能力强、功耗小及控时精度高的优点。本仪器有八种全部自动的供电拍节（见表 2.2），能与多种接收机配套使用。

表 2.2

节拍种类	正向供电（s）	断电（s）	反向供电（s）	断电（s）	供电周期（s）
1	1	1	1	1	4
2	2	2	2	2	8
3	4	4	4	4	16
4	8	8	8	8	32
5	10	10	10	10	40
6	120	10			130
7	10	10	10	30	60
8	10	20	10	20	60

仪器还设有测量 AB 电极接地电阻、供电电压和供电电流强度的装置及最小供电电流保护装置。

（二）主要技术指标

1. 供电节拍：有八种，见表 2.2。

2. 供电周期的时间误差：小于±1%。

3. 发送功率：最大发送功率 1.5kW（3A、500V），最小发送电流 50mA。

4. 电表指示精度：供电电压误差不大于±5%（满刻度），供电电流误差不大于±4%（满刻度）。

5. 工作电源和耗电量：用 12 节 1 号电池串联做为电源。整机工作时最大耗电为 18V×10mA；处于预备状态时最大为 18V×20mA。

6. 绝缘电阻：面板上各接线柱对机壳的绝缘电阻大于 100MΩ。

7. 接地电阻测量范围：15Ω--20kΩ。

8. 仪器使用环境条件：－10℃—＋40℃。相对湿度小于 85%。

（三）工作原理

本仪器由两大部分组成，即控制部分和执行部分。其原理框图见图 2.9。

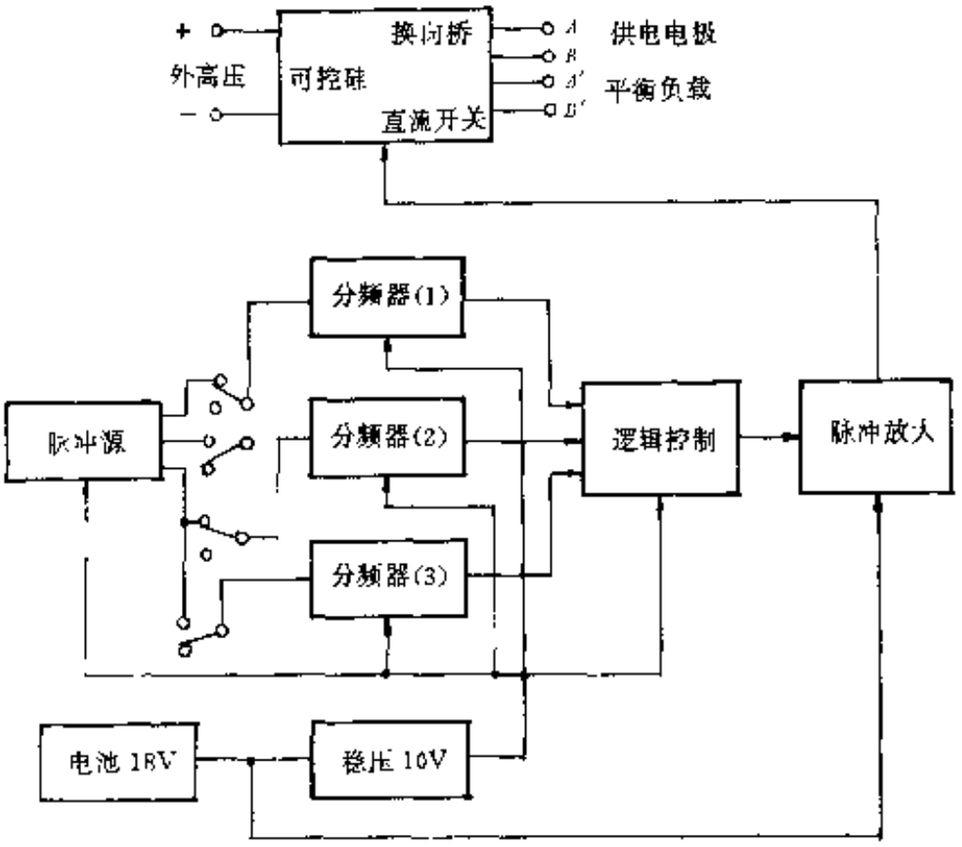


图 2.9 DJS-1A 发送机原理框图

执行部分由六只可控硅构成的直流开关和换向桥组成，实现了无触点换向和开关。

控制部分是由稳压电源、秒电路、分频器、逻辑控制和脉冲放大器等五个单元组成。

由钟源脉冲发生器输出的脉冲，经过分频器分频后，送入逻辑控制电路，输出定时的正向供电、断电、反向供电和再次断电的周期性方波脉冲，去触发脉冲放大器，脉冲放大器也按先后顺序分别输出触发脉冲，去触发可控硅换向桥直流供电开关电路工作，完成选定节拍的供电过程。"供电"状态时，电源被接到可控硅换向桥直流供电开关，接通由供电电极 A、B 及大地构成的负载；"断电"状态时，接通平衡负载，以保持外电源的负载稳定。

第三节　天然电磁场法仪器

天然电磁场法观测不是由电法勘探工作者主动供电产生的交变电磁场。其分为两个亚类，一类观测非人为因素产生的天然电磁场，主要分支方法有大地电磁法（MT）和音频大地电磁法（AMT）。目前，国内使用的 MT 和 AMT 法仪器，绝大部分是从国外引进的，主要仪器型号有 MT-1、MT-5，V-5（加拿大），MT-1（轻便型）（美国）及 MMS-2，MMS-3，MMS-4（西德）；此外，还有长春地质学院研制的大地电磁仪。

另一类天然电磁法观测与人类活动有关的"天然"电磁场。例如，观测工业和生活用电引起的"游散电流"场，其在音频段内有很宽的频谱，不过主要频率成分是工频（50Hz）及高次谐波；另一个特点是不稳定性，电（磁）场的方向和强度都随时间而变化。这种方法主要用于寻找地下水和在现有工矿区附近找矿。典型的仪器有"干扰场源法仪"（中南工业大学），SB-1 型大地电场比值仪（平遥卜宜水利电探仪器厂）和 TGE-3 型天然电场仪（地矿部机械电子研究所）等。还有一种方法观测海军与潜艇通讯的甚低频（15kHz—25kHz）电台发射的电磁波场，叫做甚低频（VLF）法，

这是一种十分轻便、高效率和低成本的方法，并且在寻找地下水、圈定浅层喀斯特发育带和构造破碎带及找矿等方面，已见有成效。成都地质学院和重庆地质仪器厂研制和制造的DDS-2型甚低频电磁仪，已获得较广泛的应用。本节将重点介绍这一仪器。

DDS-2型甚低频电磁仪

（一）功能和特点

本仪器是用来测定甚低频电磁场多种参数的一种小型轻便化仪器。测定对象是位于日本爱知县的NDT台（频率$f=17.4$kHz，功率$W=500$kW）和位于澳大利亚西北角的NWC台（$f=15.5$kHz，$W=1000$kW）为海军通讯发射的电磁波。仪器的特点是轻便、易于操作、工作方法简单和生产效率高。在找矿、找水、工程勘查和探测地下管、线等方面，有广泛用途。

（二）技术指标

1. 工作频率：17.4kHz和22.3kHz。

2. 测量参数：磁场水平分量H_y，极化椭圆倾角D。

磁场垂直分量H_z，电场水平分量E_x。

3. 测量范围分六挡：磁场水平分量，最灵敏挡满偏为0.7-1pT。电场水平分量，最灵敏挡满偏为3.2μV/m±15%。极化椭圆倾角±45°。

各相邻测程挡间衰减6dB（衰减一倍）

4. 仪器放大倍率：$20\times10^4\pm15\%$。

5. 刻度范围：场强计表头刻度为0—100格

倾角计±45°。

6. 读数误差：倾角读数误差≤±1°

场强计的非线性小于满刻度的±2%。

7. 输入阻抗≥1MΩ（测电场时）。

8. 内部噪声<0.35μV。

9. 整机功耗<120mW。供电电压9V（两只6F22）

10. 使用环境温度：0℃—+40℃，相对湿度85%。

11. 重量：3.5kg（包括电极、电缆）。

12. 外形尺寸：260×95×150mm³。

（二）工作原理

DDS 2 型甚低频电磁仪的原理方框图示于图 2.10。测量原理与超外差收音机相似。由磁性天线或测量电极接收来的 15kHz-25kHz 的甚低频信号，经输入级、信号放大级将信号放大，并经陶瓷滤波器滤波；再送到环形混频器与本振信号混频，将甚低频信号变成“中频”信号，并由选频放大器加以放大；放大的“中频”信号经线性检波和滤波，由 μA 表指示出磁场或电场振幅的平均值，由倾角计测出极化椭圆倾角。

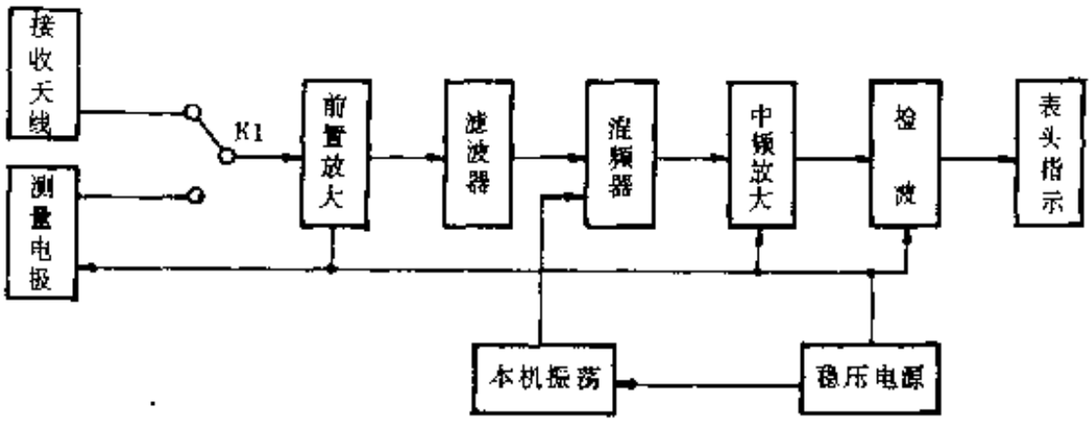


图 2.10 DDS-2 型甚低频电磁仪原理方框图

第四节 管线探测仪

管线探测仪是用来探测地下（或水下）动力电缆、通讯电缆及各类管道的专门仪器。由于地下电缆和管道的几何和物理特性及探测地下管线所处的恶劣工作环境（多为城市，工矿企业，建筑物群及各类固定设施等），现代管线探测几乎都是采用频率域电磁法。

目前，国内使用的管线探测仪有十几种，常用的有 DDW-1 型多用电磁系统及 GX 系列管线探测仪（中国地质大学，北京），DJT-C 型地下管线探测仪（吉林无线电四厂），DG-1 型地下管线

探测仪（南京工学院及扬州电器厂），GK-1 型高抗干扰电缆探测器（北京邮电工业学校实验工厂），DG-Ⅱ型地下管线探测仪（平遥卜宜水利电探仪器厂），MAC-51B 磁性及电缆探测器（美国 Schonstedt 仪器公司），610/650、810/850、50/60 与 50/60-180 型管线探测仪（美国 METROTECH 公司），GPR404 与 RD600（美国 Radiodetection 公司），金属管道探测器（日本?）和智能管道探测器（日本东京煤气工程公司等）。下面将重点介绍 GX-2 型管线探测仪，然后将上列各种仪器的技术指标和性能作一对比。

一、GX-2 型管线探测仪[1]

（一）功能和特点

本仪器是中国地质大学（北京）所研制 GX 系列管线探测仪中的最新型号。它由 GXJ-2 型接收机，GXF-2 型发送机和其它附属装备组成。与国外的管线探测仪及其仿制品相比，GX-2 型管线仪仅用同一套仪器，加之以不同的配件及相应的探测方法技术，就可胜任动力电缆、通讯电缆及其它各类管道的探测工作和电缆的各种故障探测工作。该仪器的特点是将其优良的性能和实用的功能，融于一整套科学的方法技术中。因此，能在不同的工作环境条件下，对埋设情况各不相同的地下管线，高效、快速地完成探测任务。具体说来，该仪器具有如下特点：

1. 能广泛地应用于城市市政工程和改建工程。对各种地下管道、电缆（动力电缆、通讯电缆、光纤电缆及各种传输用电缆）调查，在电缆故障（开路点，短路点及漏电点）查寻方面，非常精确、有效。

2. 能进行多种模式的探测工作。既能用主动源式又能用被动源式；既能在 1225Hz 和 3625Hz 这两个低频频率上作各种直连法（单端的或双端的），更能在这两个低频上作各种感应法（定源法，动源法），特别是能在没有任何地下管线资料及其地面标志（如井盖、检查孔等）的情况快速查明地下管线的现状分布。

---

[1] 杨旭，GX 系列地下管线探测仪设计、功能及其它，1993。

3. 能精确地测量交变磁场的三个方向分量（H_x、H_y和H_z）值。也可观测不同高度水平上的各磁场分量值。

4. 进行直连法工作时，发送电流大，最大可达1A。

5. 进行感应激发时，仪器能接不同尺寸大小的线圈以适用于在窨井中，地面上及人防工事内进行有效激发。

6. 发射机GXF除与GXJ接收机配套工作外，还能输出200Hz至数百千赫兹的信号及电流。

7. 接收机重量极轻，为1.5kg。用电极省，整机仅耗电几毫安。

8. 接收机备有两个不同种类的输出指示器——机电式指示器及液晶数字表。

9. 特殊设计的高品质扁圆空芯感应式传感器能方便地随铅直方向和水平轴向转动，因此能随意取向进行测量。

10. 接收机的控制器部件可作任意角旋转；它的手把的高度及方位角可以任意调节；接收机内不加音响无噪音干扰。

11. 高性能的电子电路设计；部件模块化的结构，性能稳定，方便维修。在－15℃——50℃的温度范围内及相对湿度达98%的环境条件下正常工作。

12. 探测系统的配套性好。除了发送，接收系统外，还配有专用的充电器及各种连接线。此外，各种自制的发射线圈均能与本仪器配合使用。

13. 在条件许可时，可加其它专用附件，对非金属管道，人防工事进行探测。

（二）技术指标

1. GXJ-2管线探测仪接收机。

探 测 对 象：各类地下电缆及金属管道及电缆故障。

观 测 参 数：交变磁场的三个分量H_x、H_y、H_z。

最佳异常响应：垂直管线走向的H_z剖面曲线 —单峰异常响应。

传 感 器：最符合理论要求的，高稳定度的空芯电感扁线

图，可转动。

数 据 显 示：机电式电表模拟显示和液晶数字显示（$3\frac{1}{2}$位）。

工 作 频 率："L"－ 1225Hz，"H" ——3625Hz。

增 益 控 制：步进控制 40dB，连续控制近 20dB。

平面定位精度：±5cm＋5%埋深（埋深 0 －5m 时）。

确定埋深精度：指示器精度±5cm±10%埋深（埋深 0 5m 时，正常工作环境）。

最大探测深度：10m

电 源：2×9V（6F22），一只供数字表，一只供接收机。

电 流 消 耗：200μA—数字表所耗，＜3mA--接收机所耗。

电 池 寿 命：1 年（数字表所用电），3 个月（接收机所用电池）。

工作环境温度：－18℃ －＋50℃

接收机箱尺寸：140×70×82mm³

接收机总长度：850mm

接 收 机 总 重：约 1.5kg。

2. GXF-2 管道探测仪发射机。

输出交变磁场

波形：连续正弦波（感应式激发），矩形波（直接接触式激发）。

振荡源：石英晶体振荡器。

振荡周期：1.5μs—4999.5μs，相对应的频率为 667kHz—200Hz。

最大输出电流：1A（有效值）。

最大发射磁矩：约 20 A. T. m²（3.6kHz 时），约 35 A. T. m²（1.2kHz 时）。

交变电流

指示器满偏值：500mA（可调）。

最大输出电压：20V（P—P）。

（矩形波）：

保护：过流、开路，反向保护。

电源：20GNY—3 可充电镉镍电池组，25V．3AH

工作环境温度：—18℃—+50℃

发射机控制箱

尺寸：175×85×100mm³

发射机控制箱重量：570g

发射线圈重量：约 2.5kg。

（二）工作原理

GX-2 型探测仪通过自己的发送机(GXF-2)，将某一频率的交变传导电流，送至被探测的地下管线（交流充电法或直接接触法）或送至一发射线圈（电磁感应法或感应激发接收工作方式），建立较强的交变电磁场，以激发地下管线及其周围介质。然后用接收机(GXJ-2)在地面上观测不同工作频率和不同方向的磁场分量。经过认真细致研究实测磁场分量的空间分布，便可准确地确定出地下管线的平面位置、走向、埋深和种类。

图 2.11 示出了 GXJ-2 型接收机的原理方框图。测量点处的交变磁场由传感器转换成感应电动势，经第一次滤波后送至接收机系统模块。在此模块中，信号经低噪声前置放大、滤波、测程转换、灵敏度控制及精密线性检波，最后送至模拟显示器和数字显示器（$3\frac{1}{2}$位），显示出某一磁场分量的场强值。

交变磁场传感器实质上是一圆形的扁空芯线圈。当线圈垂直放置时，测得的是沿线圈正交轴方向（假设为 x 方向）的磁场水平分量 H_x；当线圈水平放置时，所测的磁场垂直分量 H_z。

“工作-检查”开关打向“检查”时，模拟指示器显示接收机系统模块电源的工作电压值，以检查电源电池的可用性；开关打向“工作”时，模拟指示器和数字电压表同时显示传感器接收到的交

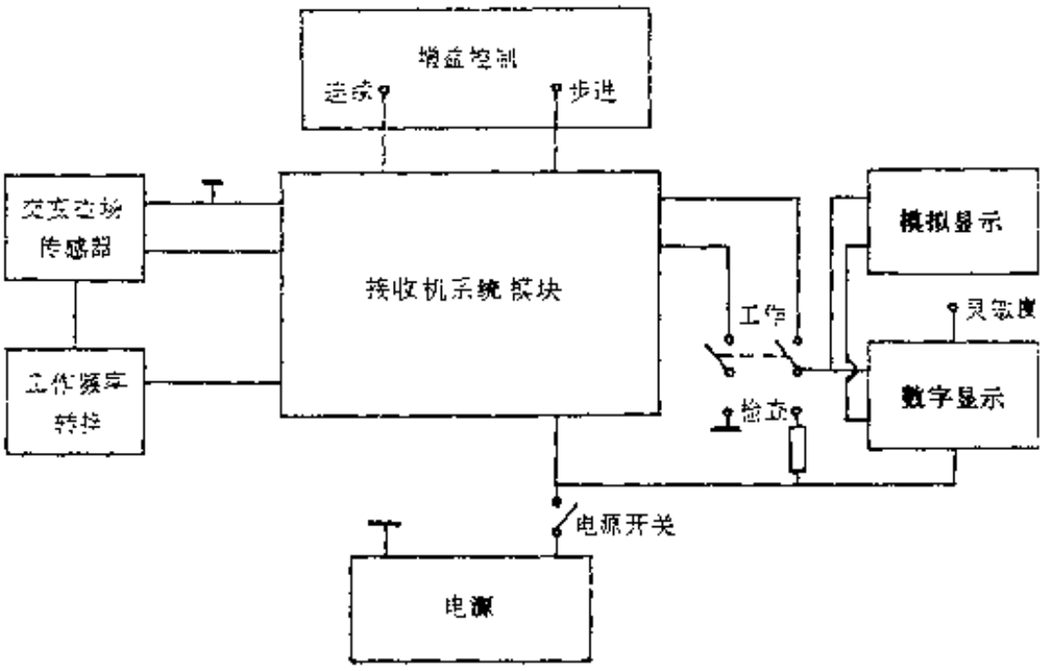


图 2.11　GXJ-2 型管线探测仪接收机原理方框图

变磁场分量（H_x，H_y 或 H_z）的场强。

“增益控制”分别通过测程开关（步进，三挡）和灵敏度调节旋纽（连续可调），改变放大器增益，使待测信号在显示器上的读数尽量接近满度值，以减小读数的相对误差。

GXF-2 型发送机由发送机控制箱，发送机负载（发送线框或直接接到地下管线的出露点）和充电电池组三大部分组成。发送机控制箱内装有频率可调的石英晶体振荡器、各类放大器、控制器和过流及负载开路保护器，以及发送电流和电压指示器等。功能是保证发送机以预定的频率和强度，向发送机负载安全地输送供电电流。供电电源采用 20GNY-3 型可充电电池组，其由 20 只单体镉镍电池串联而成。端电压通常为 24V—25V（最高不超过 30V），电池的容量为 3A·h。

二、各种管线探测仪的对比

目前，国内使用的管线探测仪有十几种，它们虽然都属频率域电磁系统，功能和性能各异。见表 2.3。

第五节　瞬变电磁仪

瞬变电磁仪是用作瞬变电磁法的仪器。国内采用的瞬变电磁仪有进口的 SIROTEM-Ⅱ轻便型瞬变电磁系统(澳大利亚),PEM 轻便型瞬变电磁仪（加拿大），EM-37 中功率及 EM-42 大功率瞬变电磁系统（加拿大）和 GDP-12 与 GDP-16 型（中—大功率）多功能电法系统。近几年国产瞬变电磁仪已占领了国内大部分市场，它们是 LC 型微机电法勘探系统(中型)及 EMES-1 型电磁工程勘查仪（小型）（西安地球物理地球化学勘探技术研究所），SD-1（小型）及 SD-2（中型）瞬变电磁系统（中南工业大学与智通新技术研究所）和 WDC-2 型（中型）瞬变电磁系统（地矿部物探化探研究所）。下面介绍两种国产的瞬变电磁仪。

一、LC 型微机电法勘探系统

（一）功能和特点

本仪器是多功能中功率电法仪器系统，它主要用于瞬变电磁法，此外，也可用作观测早期激电放电特性的时间域激电仪及用于直流电阻率法和自然电场法。该系统的特点是：

1. 用微机作自动控制、数据采集、数据处理、成果解释和成图。系统与用户共同开发，用户易于根据自己的需要修改某些指标或增删某些应用软件。

2. 应用脉冲压缩技术研制成功的手提式特殊供电电源，功率重量比很高，很轻的电源（约 15kg）可供强大电流（达 200A）。

3. 应用软件技术有效地解决了衰减(瞬变)曲线测量中，20ms 频谱范围内抗工业电流干扰问题。

（二）主要技术指标

1. 微机测量部分：

（1）A/D 转换　　12 位；

（2）最大增益　　84dB；

（3）浮点增益　　0 -48dB；

(4) 等效输入噪声　　≤1μV；

(5) 输入阻抗　　R＞10000MΩ；

(6) 有效信号动态范围　120dB；

(7) 抗工频干扰　　＞40dB；

(8) 采样时间　　①62.5μs；

②312.5μs—20.48s(V_1：15道，V_2：16道)，采样道据用户要求可扩展；

(9) 体积　　7×33.5×35cm³；

(10) 重量　　7.5kg。

2. 供电控制部分：

(1) 开关电流　　1mA—200A（600A）；

(2) 开关电压　　1V-- 600V（1200V）；

(3) 电流记忆　　625μs—10.24s（8道）；

(4) 过载保护　　超10%警告、保护；

(5) 体积　　15×26.5×33cm³；

(6) 重量　　10.7kg。

3. 手提电源部分：

(1) 输出电压　　0--600V（1200V）连续可调；

(2) 输出功率　　瞬时功率＞30kW（＞100kW）；

(3) 外形尺寸　　40×36×12cm³

(4) 重量　　15kg。

4. 附加设备：

(1) 地面接收探头（DJT-1），等效方形回线（50×50m²、100×100m²、200×200m²）；
外形尺寸：40×40×12cm³
重量：2kg。

(2) 井下接收探头（JJT-1），等效方形回线（100×100m²）；
全长1.4m
外部直径：30mm；
总重量：3kg。

（三）工作原理

LC 系统包括供电电源、供电控制（发送机）和接收测量（接收机）三个部分。

1. 供电电源部分（手携式电源箱）

供电电源部分是把 15V 的低压直流电源通过直流 -直流变换器变换成 600V 高压，然后对电容箱充电，电容器上保持下来的高压可以对负载提供高达 400A 的瞬时电流，其瞬时功率达 40—200kW，做到了长时间储存起来的一定能量在瞬时间内释放出来（即脉冲压缩技术）。

2. 供电控制部分（开关）

控制高达 400A 的强大电流，LC 系统是用可关断晶闸管（GTO），其线路框图如图 2.12 所示。

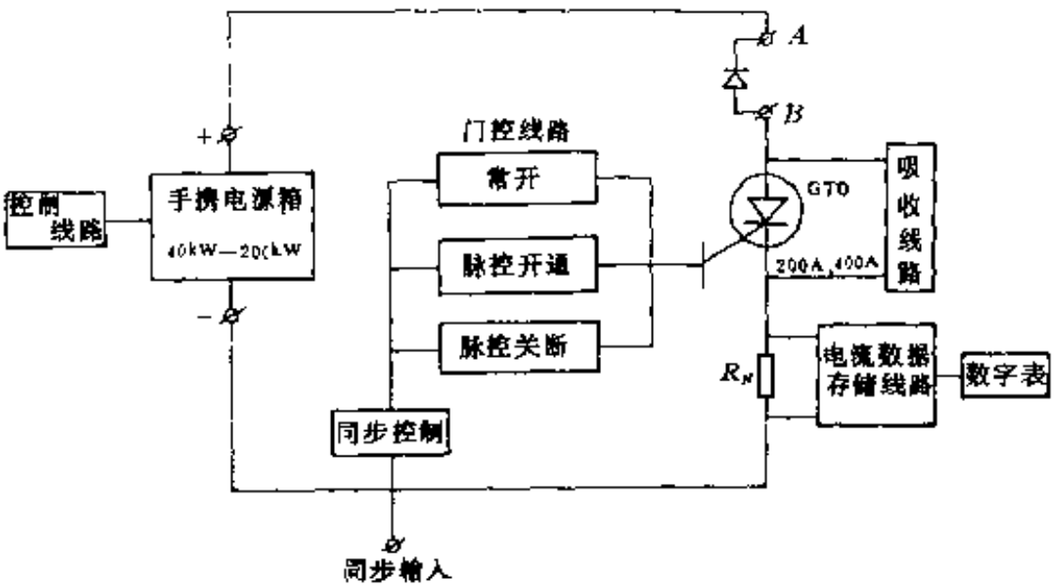


图 2.12　LC 系统的电源和发送机原理方框图

供电开关的动作受接收机中的微机控制（同步），GTO 开通的时间分别为 2.5、5、10、20、40、80、160、320ms，由操作人员选择使用。供电控制部分还包括供电电流值的存储记忆和读出线路，过载警告及其他指示电路等。

3. 接收测量部分

LC 系统的接收电机使用 PC1500A 微机控制，与模拟放大器、A/D 转换器及微机接口电路等配合，完成数据的采集和处理，其原理框图如图 2.13 所示。主要的技术指标如下：

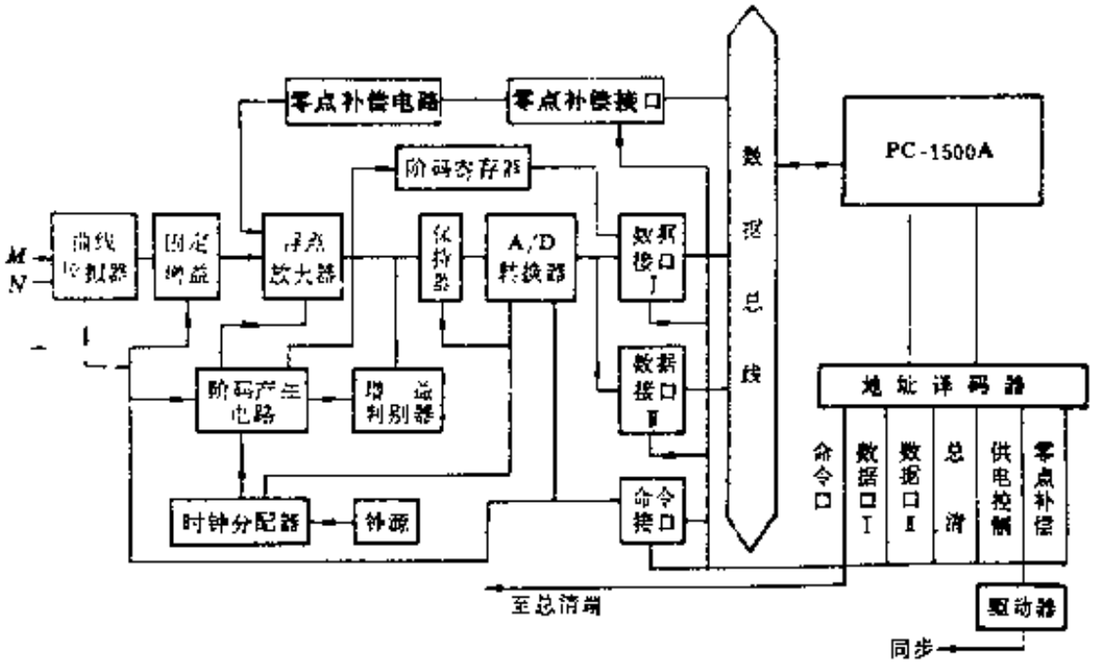


图 2.13　LC 系统的接收机原理方框图

频带宽：0　16kHz；

固定增益：2^0、2^2、2^4、2^6 四挡；

浮点放大器增益：2^0、2^2、2^4、2^6、2^8 五挡自动转换；

最大、最小增益：2^{14}、2^0；

等效输入噪声：≤1μV；

最大输入电压：±5V。

浮点放大器的设置，使仪器别具一格，它的主放大器由四级串联组成，逻辑控制电路跟踪放大器输出信号，并且判别子样的大小，然后决定放大倍数，从而实现了增益的自动转换。增益控制方式采用四进制浮点，增益台阶精度为±0.2%。

二、SD-1 型瞬变电磁仪

（一）功能和特点

SD-1 是一种便携式宽时窗范围智能化的通用型小功率仪器，主要适用于重叠回线及中心回线装置工作。仪器由中南工业大学、

智通新技术研究所和笔者密切合作下于1992年研制成功。仪器具有如下特点：电脑控制及数据处理；人机对话汉字菜单提示操作；大屏幕液晶显示现场观测数据、$V(t)/I$ 和 $\rho(t)$ 曲线；具有较宽的时窗范围，起始道时间提早至0.008ms，更适用于矿田、煤田测深及工程勘查中应用；能显示出供电电流切断的波形，并测出切断时间；抗干扰能力强；由于采用程控增益自适应设定技术，操作简便及使用灵活。

（二）主要技术指标

1. 发送波形：双极性方波；

2. 发送机电源：容量10A·h以上，12V—36V镉镍可充电电瓶；

3. 发送机最大输出电流10A；

4. 发送回线大小：$5\times5m^2$—$400\times400m^2$；

5. 同步方式：发、收同装于一个机箱内，用CTC定时中断内同步；

6. 发送基频频率及测道时间范围：

（Ⅰ）　2.5Hz　0.87-70.4ms内分20道，

（Ⅱ）　6.25Hz　0.348—28.2ms内分20道，

（Ⅲ）　25Hz　0.087—7.04ms内分20道，

（Ⅳ）　225Hz　0.0087—0.704ms内分20道。

前三挡的采样道标称时间与EM-37相同；

7. 叠加次数：10--2000次内任选；

8. 接收部分的频带宽：0—8kHz；

9. 观测信号动态范围及分辨灵敏度：120dB，0.5μV；

10. 显示：128×512LCD显示 $V(t)/I$、$\rho_s(t)$ 及标准离差 σ 数据，以及 $V(t)/I$、$\rho_s(t)$ 曲线和切断电流波形；

11. 存储量：可存储142个观测点的观测数据；

12. 接口：通过标准RS232接口传输给打印机（配件）或便携式386微机。进一步的数据处理及正反演由386微机完成；

13. 操作：LCD显示汉字菜单提示操作；

14. 尺寸及重量：330×230×110mm³，重 3kg（不包括电源）。

（三）工作原理

SD-1 型瞬变电磁仪的原理方框图示于图 2.14。整机包括主机、接收部分和发送部分，装于同一机箱内。三个部分的组成和作用如下：

1. 主机：由中央处理器 CPU、存储器 RAM、程序库 EPROM、可视存贮器 VRAM、CTC 定时器、液晶屏 LCD、键盘及电源组成。实现对整机的电脑控制、菜单提示操作及观测数据的数理、成图、显示和存储。

2. 接收部分：由程控增益自适应放大电路、A/D 转换器及模拟开关电路组成。放大器增益范围为 0～106dB。实现实测数据的采集。

3. 发送部分：发送电路由四个大功率晶体三极管及其控制和保护电路组成。发送部分与主机、接收部分采用光电隔离耦合。发送频率通过键盘预置选择，发送波形为占空比为 1∶1 的双极性方波，最大工作电流为 10A。作用是控制、形成和供出设定频率和波形的发送电流。

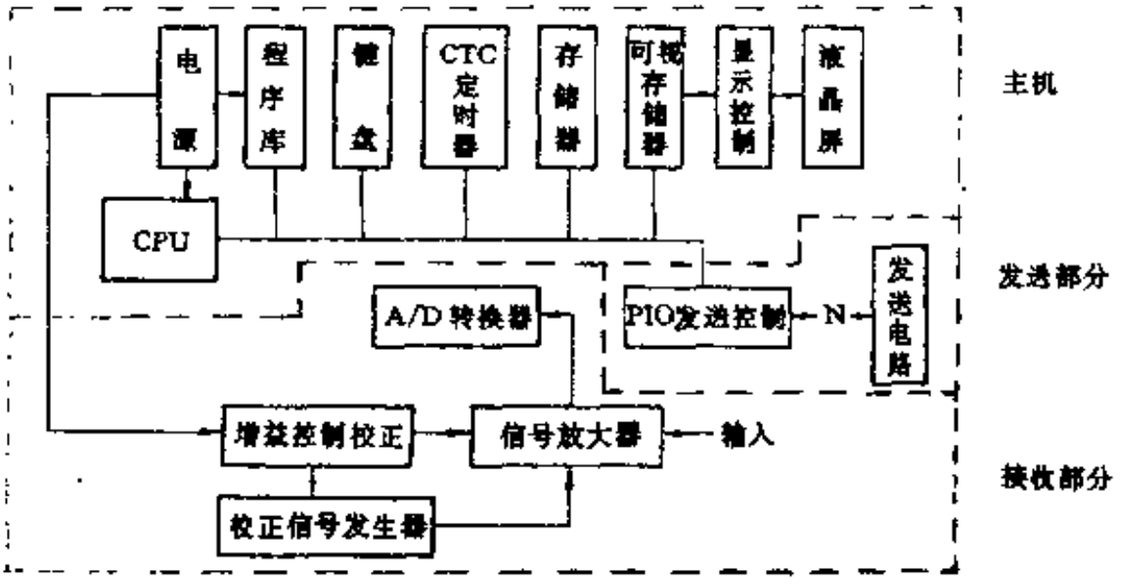


图 2.14　SD-1 型瞬变电磁仪的原理方框图

第三章　电法仪的应用

第一节　在金属和非金属矿产勘查中的应用

一、辽宁清源红透山铜、锌矿床电法找矿实例

1957年在浑河北岸进行两万五千分之一磁法和次生晕普查，获得三个铜次生晕异常。次年，对这三个异常投入五千分之一及两千分之一的自然电场法（以下简称“自电”）和次生晕详查和精查。然后，对自电和次生晕综合异常进行钻探验证，发现了红透山铜矿。以后，继续使用自电法，联合剖面法，充电法，激电法和次生晕法等，与地质工作紧密配合，取得了很好的找矿效果。

图3.1示出了红旗山矿床综合地质-物化探图。可以看出，自然电位等值线很好地反映出浅部矿体；而激电法异常（视极化率）等值线则同时反映出了向北西侧伏的深部矿。在该区，以自电法为主的各种电探方法都取得很好的找矿效果。

二、自由法在我国某黄铁矿床上的应用实例

黄铁矿化是热液活动的常见标志。电法是勘查硫铁矿的最重要方法之一。图3.2示出了我国某地区开展自电法大面积普查的一部分结果。在自然电位等值线图上，以－200mV为背景的整个异常呈北东走向、长约1500m和宽约700m的异常带。其中，有多处自行封闭的局部异常，形成负自然电位异常中心（简称“负心”）。在该异常带内，打了数十个钻孔，大约60%的钻孔打到工业硫铁矿体。说明该区自电法找矿效果极佳。

三、湖北大悟县陈家河铜矿激电法的找矿效果

该区进行1∶5000面积性物化探工作，发现了张家湾—仙姑洞激电（中梯）异常带。其中，陈家河异常规整，视极化率η_s极大值为6.9%。该异常位于稻田区，无法作化探。为对其作检查，

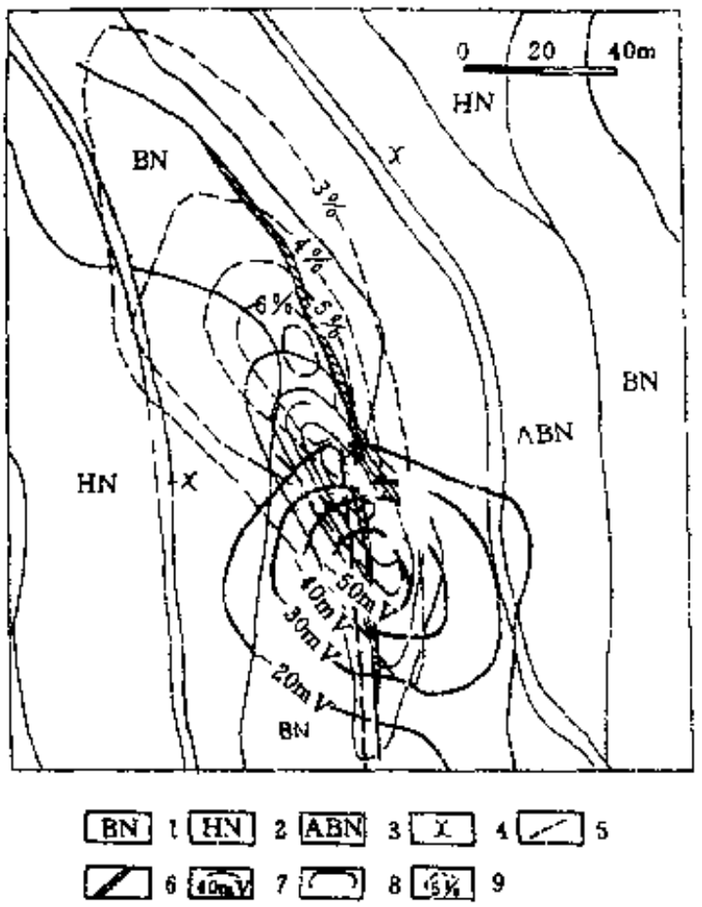


图 3.1 辽宁清源红旗山矿床综合地质-物化探图

1—黑云斜长片麻岩；2—角闪斜长片麻岩；3—石英黑云片麻岩；4—煌斑岩；5—断层；6 矿体；7—自电曲线；8—次生晕曲线；9—激电曲线

又作了激电测深和正负极极化法，均得异常反映。据此推断具为硫化矿体所引起，建议工程验证。施工 CK_1 孔，在深度 34m—36.44m 和 55m—60.54m，打到两层铜矿体，品位分别为 1.03% 和 1.07%。以后的钻探工程控制结果表明，在 η_s 为 3%的等值线范围内，十余个钻孔绝大部分都打到了工业矿体。

四、内蒙赤峰红花沟金矿区电法找矿效果

解放后地质队在红花沟金矿区曾多次进行过地质调查，并对 15 和 81 号矿脉进行过勘探，获得一定的金矿储量。但因区内 80% 被黄土覆盖，地质工作局限性很大。1980 年以来，第一冶勘公司第一物探大队用 MK-Ⅱ型大功率激电仪开展面积性工作，获得大量激电和视电阻率综合异常带。对七个异常作了钻探验证，结果

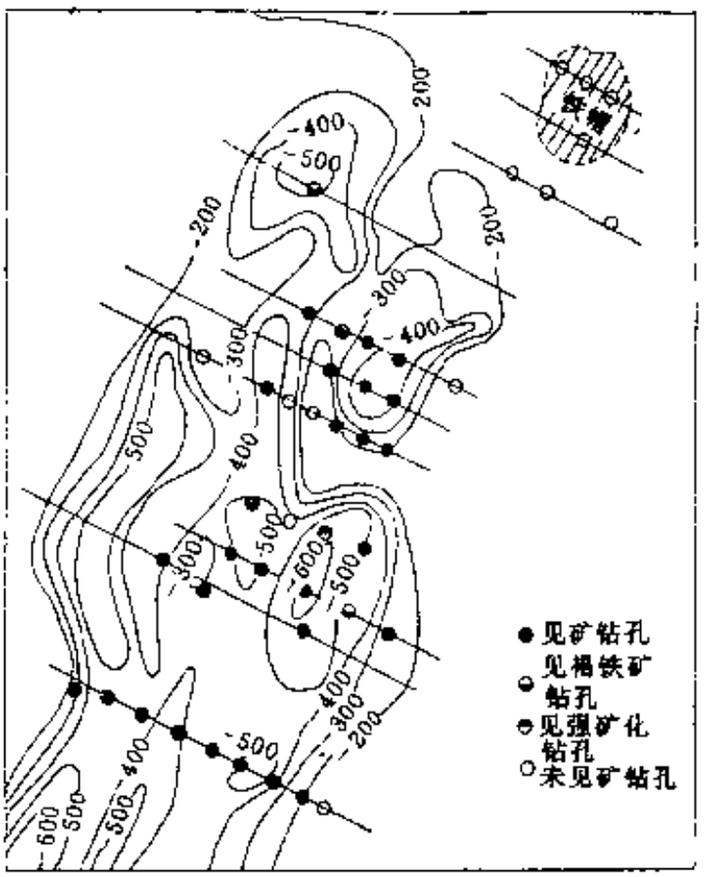


图 3.2　我国某黄铁矿床上自然电位平面等值线图（单位为 mV）

在十一个钻孔中有三个孔打到了含金石英脉，七个孔见到矿化蚀变带和石英脉，仅一个孔落空，取得了好的找金矿效果。

五、云南个旧锡矿电阻率法找矿实例

个旧是我国著名锡都。自 1953 年以来，先后投入了大量物化探工作，主要地质任务是：

1. 确定隐伏含矿断裂带的位置；

2. 圈定地下花岗岩的起伏形态；

3. 直接寻找深部硫化矿体。

电阻率法在解决上述问题中发挥了突出的作用。

从 1963 年开始，以 1∶5000—1∶10000 的比例尺、$AO=BO$ ＝55m 和 105m，双极距和 MN＝点距＝10m 的联合剖面法扫面。任务是确定隐伏含矿断裂带的位置，达到间接找矿的目的。主要工作量于 1966 年完成，共计面积 53km^2，获得 400 余条低阻异常带。据 1972 年统计，48%的异常带得到工程验证，增加了锡矿储

量。

接触交代锡石硫化矿床是本区主要矿床类型，致密状硫化矿体赋存于花岗岩突起的顶部成层状或赋存于舌状花岗岩舌根部位的凹陷处成凹兜矿。因此，圈定地下花岗岩的突起形态，对成矿预测和地质找矿具有重要意义。用电测深法圈定地下花岗岩起伏形态，获得11个突起异常。其中，4个为已知花岗岩突起，竹林和高山峰两个异常经钻探验证，前者已探明锡、铜矿数十万吨；后者初勘已获锡、铜和钨矿数万吨，进一步勘探可望成为中—大型矿田。

对电测深曲线作仔细分析，还可能直接找到地下隐伏（低阻）硫体矿体。例如，老厂第126点的测深曲线尾支，相对正常（无矿）花岗岩区的ρ_s值下降63%，推断为矿体所引起。钻探验证结果，于地下630m处见硫化锡、铜矿体，厚达17.31m。证实了电测深直接找矿的效果。

六、电阻率法在陕西渭北某铝土矿床的找矿效果

该矿的矿石类型属于“一水型”，无磁性，故不能按常规用高精度磁测找矿。铝土矿赋存的位置与奥陶系石灰岩侵蚀面的凹洼地带有关。因此，选用复合四极电阻率剖面法和电测深法，以查明奥陶系灰岩表面的凹洼地带，达到间接找矿的目的。结果在电法圈定的凹洼地带布置的三个钻孔，都证实确实存在石灰岩表面凹洼，且都打到了铝土矿。

七、湖南水口山铅锌金矿TEM法找矿效果

湖南水口山铅锌金矿田是著名的老矿，扩大矿田深部和外围的找矿工作已成当务之急。该矿为厚达数百米的低电阻率红层所覆盖，找矿难度极大。电参数测定结果表明，铅锌金矿石的平均电阻率$\rho_G=0.1\Omega\cdot m—1\Omega\cdot m$，比围岩电阻率低三个数量级，也明显低于红层覆盖层的电阻率($50\Omega\cdot m—100\Omega\cdot m$)。这对电法找矿有利，但常规电法探测深度不够。采用澳大利亚SIROTEM-Ⅱ型瞬变电磁仪，以200m×200m的重叠回线开展TEM剖面法观测。结果在康家湾找到了厚达300m的低电阻红层覆盖层下的隐

伏矿体。同时，应用 TEM 测深法可解决红层起伏和矿田构造，为进一步扩大找矿提供了重要信息。

第二节　在石油、煤、地热等能源勘查中的应用

一、华北油田激电法直接找油的应用效果

用激电法找油气始于前苏联 60 年代末，后来北美和我国也进行了有关的试验研究。激电法找油气田是以探测油气田上部的次生黄铁矿的激电效应为基础。从深部油气层“泄漏”的油气向上运移，其携带的烃类物质使上覆岩层中的高价铁 Fe^{+3} 和硫酸根 SO_4^{-2} 中的硫还原形成次生黄铁矿。后者的深度通常远比油气储层的深度小，因此，地面激电法有可能探测到由它们引起的激电异常，进而找到其下方的油气储层。常规油气物探方法主要是探测有利于储藏油气的地质构造，而激电法则是探测与油气有关的激电效应，故人们常说是激电法“直接”找油气。其实，它毕竟还是探测由油气活动形成的次生黄铁矿的效应，所以从本质上看，仍是间接找油气。

70 年代末，石油部物探局与原武汉地质学院合作，在冀中坳陷开展了大面积（约 1500km²）的激电找油试验研究工作。该区包括任丘和雁翎等古潜山式高产油田。石油储存于石灰岩的溶洞和裂隙中，埋深一般为 3000m 左右。激电工作主要采用复合四极剖面法，AB=1500m 和 2000m，探测油田上方的次生黄铁矿的激电效应。观测结果在视极化率 η_s=3%－4%的背景上，圈定了三个 η_s=4%—5%的高极化异常区。其中，两个异常区分别与任丘油田和雁翎油田范围十分一致，是已知油田的反映。第三个异常区即西演高异常覆盖的广大范围为未知区。考虑到该区没有岩浆活动和变质作用，也没有煤系地层 —即不存在原生矿化和石墨化的干扰，故推断该异常与油气相关，指出该异常区是寻找新油气田的很有希望的地区。经 1979 年下半年在 η_s 高异常区内的西柳 1

井、高3井和高14井试油结果、均获工业性油流；而在η_s低值区的高1井、高4井、高7井、高11井、任99井、雁15井和雁40井，均未见油气显示。这些结果表明，在该区激电油找油气是十分有效的。

二、安徽宿州西寺坡CSAMT法推覆体下找煤的效果

西寺坡位于著名的淮北煤田内。淮北煤田都产于二叠纪煤系地层（P）中，全区绝大部分被厚度数十米以上的第四系松散沉积（Q）所覆盖，煤系地层（P）下面是石炭系（C）、奥陶系（O）和寒武系（ϵ）等老地层。淮北煤田传统的找煤模式是，用物探（电测深或地震勘探）或钻探探测第四系覆盖层（Q）下面是煤系地层（P）还是老地层（C、O或ϵ），若是前者，则往下钻探，定能在煤系地层（P）中打到煤层；若是后者，则认为该处地下无煤，结束在那里的勘探。80年代以来，国内外推覆构造地质理论的发展，使人们开始重视在老地层推覆体下找煤。即若发现覆盖层Q下面是老地层（C、O或ϵ）人们并不放弃找煤的希望，还要探测老地层下面是否还有煤系地层（P）。

从物性测定结果看，Q和P具有低电阻率和低弹性波速；而老地层（C、O和ϵ）的电阻率和弹性波速都很高。所以，老地层推覆体下找煤的问题就归结果为，探测低阻、低速层（Q）覆盖下的高阻、高速层（老地层）下面，是否还存在低阻、低速层（P）？当老地层厚度超过100m—200m时，由于高速层的“屏蔽”，地震勘探难以收到老地层下面的弹性波信号；直流电阻率测深也不能“穿透”高阻层获得其下方的信息。所以，传统的煤田物探方法不能胜任推覆体下找煤的任务。电磁测深法，能穿透高阻层，且对低阻层反映灵敏，最适于承担此类任务。

90年代以来，安徽煤田物测队与中国地质大学（武汉）合作，利用从美国引起的GDP-12型多功能电法仪，选用了一种高效率的电磁测深法——电双极源CSAMT法，在西寺坡等几个地区开展推覆体和火山岩下找煤工作，都取得了很好的找煤效果。在西寺坡，CSAMT法观测结果，明显显示在高阻老地层下存在低阻

层。布置在三线和十二线的两个钻孔，在穿过第四系覆盖层（Q）和寒武-奥陶系老地层（∈-O）推覆体后，在300m—400m深处打到了煤系地层，证明了CSAMT法在推覆体下找煤的有效性。

三、西藏羊八井地热田电测深的应用效果

羊八井地热田是我国著名的蒸气田之一。多年来，在查明该热田的地热地质条件、热储层的分布和地下高温热流的运移等方面，电阻率测深法都起了重要作用。

电测深在该区主要解决了两个方面的问题，其一是确定该区基岩（花岗岩和花岗闪长岩）的埋深和变化趋势，为查明该区地热生成的地质条件提供资料。其二是根据视电阻率ρ_s的低值，圈定地热田范围，并进而确定热储的空间分布形态。电测深观测结果，推断了该区基岩埋深变化的总趋势是：从西北部较深（约400m），逐渐往东南方向变浅（到150m—200m）。这和钻探结果非常一致。根据$\frac{AB}{2}=900$m绘出的$\rho_s=30\Omega\cdot$m平面等值线，大致圈定了热田范围。其与5m测温勾绘的10℃等温线圈定的热异常

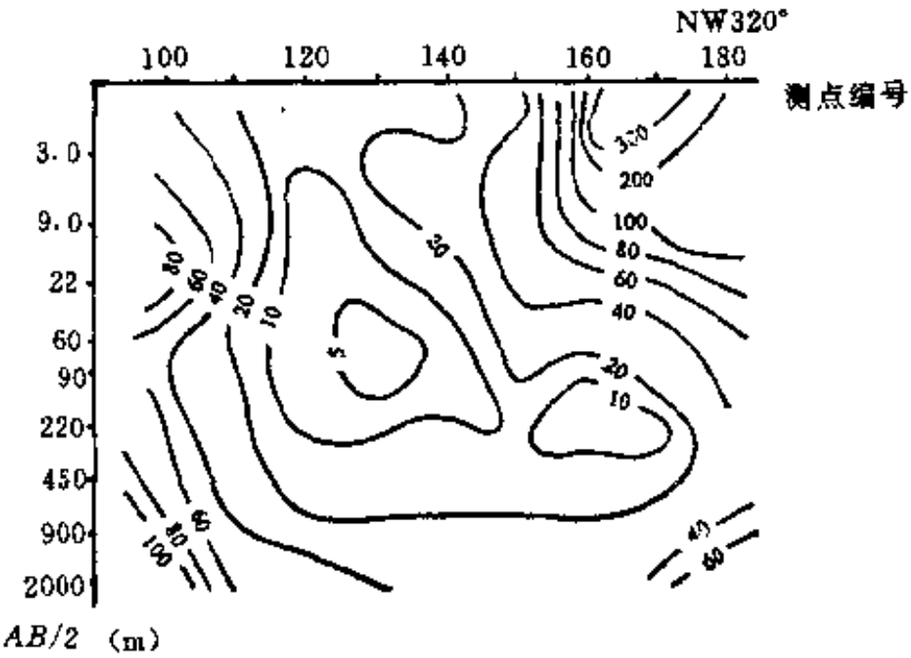


图3.3 西藏羊八井地热田112线电测深ρ_s断面图

[引自西藏物探大队]

区十分相近。图 3.3 示出了该 112 线电测深 ρ_s 断面图，其上 $\rho_s=20\Omega\cdot m$ 的等值线大致反映了地下热储的空间分布形态，并估算出热储顶板的深度，从西北向东南由深变浅的趋势。这已被钻探证实。图中东南侧 ρ_s 极小值正是温、沸泉大量出露的部位，符合矿化度较高的温、沸水具有较低电阻率的规律。据此，按 $\rho_s\leqslant 20\Omega\cdot m$ 的低电阻率等值线，圈定打深水井的最有利地段，效果甚佳。

第三节　在地下水资源勘查中的应用

合理开发利用地下水资源，对保证工业和城乡生活用水以及有效治理“旱、涝、盐、碱”自然灾害，提高农业生产水平，有重要意义。建国以来，我国在广大平原地区和山区、半山区，开展了以电法为主的综合物（化）探水文地质调查，对查明地下水资源分布、形成规律和储量评价，做出积极贡献。本节将举例说明电法（仪）在这方面的应用。

一、电阻率法在黄河冲积扇蓄水构造调查中的应用

黄河是我国第二大河，它进入中原后，塑造了我国东部地区最大的冲积扇。黄河冲积扇蓄水构造中蕴藏的丰富地下淡水资源，是这个地区工农业和生活用水的重要供水水源。为查明黄河冲积扇地区的水文地质条件，近 30 年来，开展了 1∶50000—1∶100000 的面积性电测深和电测井工作，查明了它的内部结构和边界条件，评价了其含水层的富水性，进而指导勘探工程布署和施工，为合理开发该区地下水资源提供了依据。

通过对黄河冲积扇电性特征的分析，基本查明了它是一个以黄河冲积形成的各类砂层为主体与粘性土交叠构成的巨大扇型蓄水构造。其总厚度约 70m—230m，呈顶部厚、边缘薄、顶面平缓倾斜、底面由西北向东南上翘的不规则楔状。扇体内砂层单层厚度 10m　40m，多数地区的含水层厚度比达到 30%—70%。地下水常年接受水量丰富的黄河河水补给。因此，是一个补给、径流、储存条件和调蓄能力俱佳的扇型蓄水构造。

目前，电法已经成为黄河冲积扇地区确定集中供水水源地不可缺少的手段。它曾经在郑州市东北部、郑州市火电厂、新乡市南郊、商丘市、睢县、濮阳等地集中供水水源勘察工作中，取得显著地质效果，产生了很大的社会经济效益。

例如，国家计划将原濮阳县改建成一个以石油化工工业为主的新兴城市，急待解决集中供水水源地的选址问题。为此，河南省地矿厅第一水文地质工程地质队，于1984年在这个地区开展了面积性电测深工作。在短期内提供了多种电极距的等ρ_s平面图、咸-淡水分布图、咸-淡水含水岩组顶界面和底界面埋深图等定性与定量解释资料。及时指导了勘探孔的布设和孔深设计等工作。在钻探过程中，又用电测井方法查明地层情况，划分咸-淡水界面，确定了取水和止水层段的具体位置。从而，利用较短的时间和较少的资金，找到了集中供水水源地，对这个地区经济发展规划决策和实施作出了贡献。

二、电阻率法在勘查古河道型蓄水构造中的应用

在广大冲积平原地区，地下一定深度范围内，常形成古河道带堆积。其中储藏着比较丰富的地下淡水，是相当重要的供水水源。浅部淡水古河道带沉积物，同咸水地质体及古河道间带堆积物，存在明显的电性差异——前者电阻率相对较高。故运用电法（仪）查明浅部古河道带的分布、埋藏规律，具有良好的地质效果。例如，在山东和江苏交界地区的沂沭河冲积平原地区，根据1：500000比例尺的电测深和电测井资料，圈定了三条具有相当规模的古河道带（见图3.4）。每条古河道带长90km—280km，宽度5km—40km，含水层厚度15m—40m，埋深40m—60m，成为该地区的重要淡水水源。

在古河道带密集地带或交汇地段，往往可以作为较大的集中供水水源地。如山东聊城市、临清市和河北泊头市、沧州市等地，便是以淡水古河道带中的地下水为供水水源地。在这些地区都首先进行了较大比例尺（如1：25000）的面积性电测深工作，然后在圈定的高阻区内布置钻探工程。例如，临清市近年来随着工农

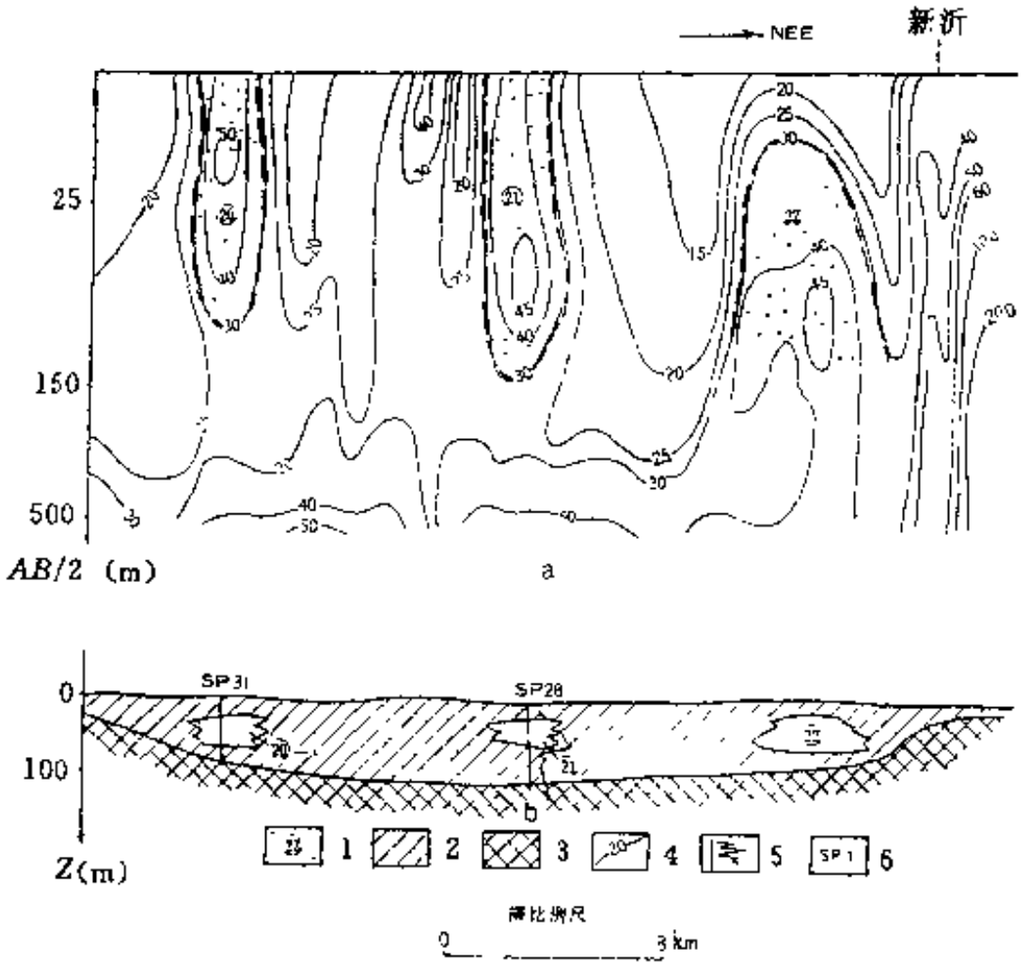


图 3.4　沂沭河冲积平原地区横切㉚、㉑、㉒号古河道带剖面（G -G'）电性-地质综合断面图

a—等 ρ_s（Ω·m）及推断古河道带断面图；b—电测井—地质综合断面图；1—物探推断古河道带及编号；2—亚粘土与粘土；3—基岩；4—ρ_s 等值线（Ω·m）；5—视电阻率梯度测井曲线；6—钻孔编号

业生产的发展，城市用水量日益增加，需要开辟新的水源地。于是，先进行了大比例尺电测深工作，初步查明古河道带及咸水、淡水分布，为钻孔布位提供了依据。在钻探过程中，又及时根据电测井资料确定成井深度，圆满地解决了寻找新水源地问题。例如，在聊城市电厂供水水源地选址勘察中，同样是先利用电测深查明淡水古河道带内的砂层相对富集地段，指导钻探孔的布设。然后，又利用电测井及钻探资料，圈定出三处富水地段，每处的单井出水量均在 1500m³/d ~2500m³/d 以上，满足了电厂供水的需要。

三、电阻率法在岩溶蓄水构造调查中的应用

碳酸盐类可溶性岩石（灰岩、白云岩及白云质灰岩等），受侵蚀性水流作用产生岩溶化，成为岩溶水的含水介质，即构成溶孔、溶隙含水层。使电法（仪）能成功地应用于隐伏岩溶的探测。具体说来，可以解决以下地质问题：

1. 确定隐伏碳酸盐岩地层顶界面埋深和分布范围。

2. 确定隐伏岩洞发育深度及分布范围。

3. 寻找岩溶富水地段，选定集中供水水源地。在黄淮海平原山前基岩浅埋区，已经找到了不少日产水量$5\times10^4m^3$的大型水源地。电法（仪）在其中发挥了重要作用。

例如，在燕山山前平原的三河县隐伏岩溶区，利用电测深资料划出的齐心庄、孤山、皮各庄等富水地段，经钻探验证，可日产地下水（5—6）$\times10^4m^3$。

例如，在太行山山前平原的邢台百泉地区，根据电测深和电测井资料确定的隐伏岩溶地下水供水水源地，可以满足日采水15$\times10^4m^3$的要求。

例如，在安徽淮北市二电厂供水水源地勘察工作中，首先利用电测深资料圈定出岩溶发育区，指导钻孔的布设。然后在钻探过程中，依据视电阻率等测井资料，确定成井段。所打成的采水井，单井出水量均超过$1000m^3/d$，有的甚至达到$10^4m^3/d$以上，满足了电厂用水之需。

四、电阻率法在寻找基岩裂隙水水源地中的应用

例1 电阻率法在花岗岩地区找水

我国海南岛花岗岩体分布广泛，其电阻率$\rho=400\Omega\cdot m$--$1600\Omega\cdot m$，含水花岗岩裂隙带的电阻率$\rho=120\Omega\cdot m$--$600\Omega\cdot m$，两者存在明显的导电性差异。为应用电阻率法寻找花岗岩裂隙水提供了良好的地电条件。近几年，海南地质大队在岛上十多个地方开展电法找花岗岩裂隙水，取得了较好的地质效果。经钻探验证，成井率达70%。例如，在琼中大丰农场利用联合剖面法和电测深法找水，在粗粒花岗岩裂隙带上，联剖大、小极距的ρ_s曲线均出现同步下降的低阻异常；在该异常上，电测深曲线呈KH

型，并在 ρ_s 极小点附近的 MN 接头处，曲线出现交叉现象。对此低阻异常钻井验证，打到了花岗岩裂隙水，单孔涌水量为 366t/d。

例 2 辽河安山岩地区电阻率法找水实例。该区地貌上属低山丘陵，地形起伏较大，相对高差达 20m—50m。除在河中分布较厚（4m－12m）第四系松散沉积外，燕山期花岗岩及侏罗系安山岩广布全区。在安山岩内有一条北东东向断层通过。电测深工作结果，在 90—115 点之间出现向南倾斜的低阻异常带，反映断裂带的存在。此断裂带内多为糜棱岩、断层泥等粉碎性物质组成，具有持水性强，透水性弱和富水性差的性质，不是赋存地下水的好场所。反映电阻率由低到高过渡的断裂影响带，即断裂带的两侧，特别是主动盘一侧，由于临空条件好，易产生各种张性裂隙。这些裂隙纵横交错，相互切割，形成透水性好、富水性强的网状裂隙发育带，可当作地下水水源地。经 ZK2 钻孔验证，在 20m 85m 的玄武质安山岩中裂隙发育。抽水结果为，单位涌水量 6.6t/m·h；水位下降 20m 时，涌水量为 288t/d。

五、激电法在寻找地下水中的应用

例 1 河南灵宝县文底乡台村黄土塬区找水。该村历来严重干旱缺水，全村无一眼机井，仅有人工大口机井一眼，井深 80m。天旱井干，需到数里以外担水。

在该村西头进行激电测深，获得视极化率 η_s，衰减度 D 和激发比 J 三条激电测深曲线。它们在 $AB/2=90$m 以后，曲线明显上升，说明深部有良好卵石含水层。曲线起始转折点对应的 $\frac{AB}{2}=90$m，乘以 0.8～1 的校正系数后，埋深应在 72m—90m。根据上述推断，设计钻井深度为 150m，实钻 150m。因井底淤积，实际下管 146m。成井后地下水位埋深 75m。安泵抽水，降深 10m 时，稳定连续出水量为 56t/h，解决了全村人畜用水。台村第一眼机井的成功，为灵宝县黄土塬区开发利用中深层地下水提供了范例。

例 2 内蒙草原牧区找水

1980 年在乌兰察布盟集宁市（新生界地层为玄武岩分布地

区）开展激电法找水，选定了四个井位，都已成井．最大涌水量为 68.1t/h，涌水量最小的井也有 20t/h，从而解决了该市供水问题。

六、甚低频电磁法和音频大地电场法找水应用

例 1 广东肇庆市某工地音频大地电场法找岩溶裂隙水的实例。采用 MN＝点距＝10m，沿剖面观测“天然”音频电场的电位差 ΔU；然后，绘制电位梯度（$\Delta U/MN$）剖面曲线。结合电阻率法资料，由 $\Delta U/MN$ 剖面曲线上的极小点，推断了充水的岩溶裂隙位置。钻探结果，在厚 24.31m 的第四系粘土覆盖层下，进入基岩（灰岩）；27.33m －28.27m 灰岩有明显溶蚀现象；42.90m--43.30m 和 68.20m--81.45m 为溶洞；49.00m—58.47m 为破碎段。孔内静止水位为 1.43m。经抽水试验，水位下降 4.64m，日产水量 2102t。

例 2 广西临桂岩溶区甚低频电磁法找水实例。该区地表为厚约 10m 的粘土层所覆盖，下部地层为泥盆系灰岩。地下岩溶发育，地表可见塌陷地形。工区测线方向为 NE70°，选择日本 NDT 台作为一次场场源，用 DDS-1 型甚低频电磁仪观测电场沿测线方向的水平分量 E_x 和与之正交的磁场分量 H_y，进而计算卡尼亚视电阻率 ρ_s；同时，选择澳大利亚 NWC 台作--次场场源，观测极化椭圆倾角 D 及磁场水平分量 H_y。在 90 和 104 号点，联剖 ρ_s 曲线出现低阻正交点；卡尼亚视电阻率 ρ_s 曲线上亦为低阻异常；D 曲线由负到正通过零值点；H_y 曲线出现极大值。推断为含水岩溶的反映。布置的钻孔 ZK5 和 ZK2 在 40m—50m 深处，打到了含水溶洞。

七、充电法或自然电场法确定地下水流向和流速

确定地下水的流向和流速，对于查明地下水与地表水的补给关系，调查区域水文地质条件及合理开发地下水资源都有重要意义。确定地下水流向和流速的传统水文地质方法，至少要求有 2--3 个钻孔或水井，既费钱又费时；而采用充电法或自然电场法，只需要一个或根本不需钻孔或水井，十分节省和简便。

图 3.5 为河南荥阳地区利用自然电场法环形测量，了解区域性地下水流向的实测结果。图中同时给出了根据水文地质资料绘出的地下水等水位线。可以看出，自电和水文地质资料反映的流向是一致的。在图的西北部，即在黄河附近，自电极形图反映的地下水流向为南东—北西向，表明地下水与黄河地表水存在补给关系。实际上，根据水文资料，地下水位高于黄河水位。这说明自电资料指示的地下水补给黄河水是符合实际的。

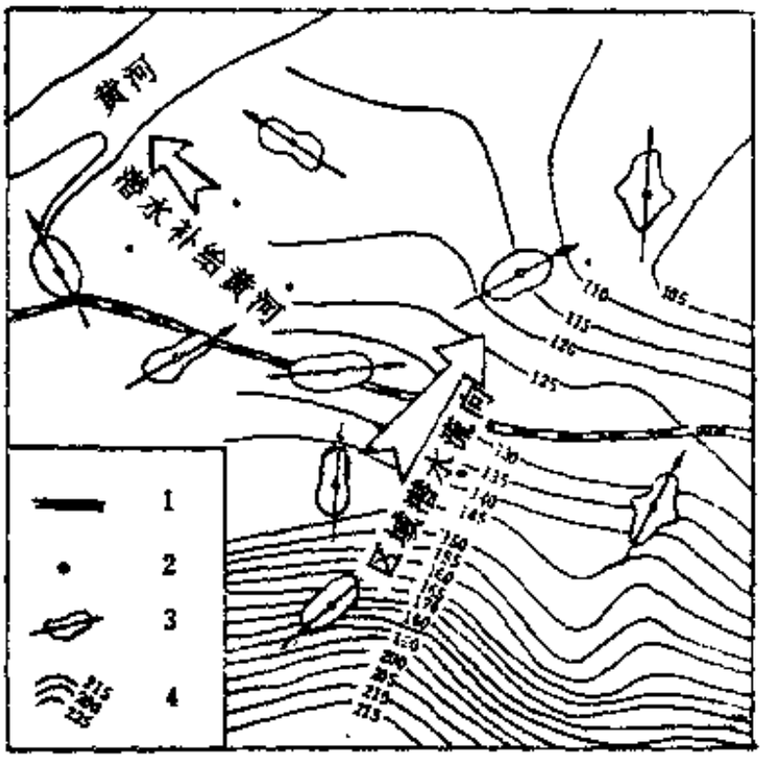


图 3.5 河南荥阳地区潜水流向图

1 铁道；2- 村庄；3 -电位差极形图；4－等水位线

八、电法在咸水地质体调查中的应用

矿化度高于 2g/L 的地下水称之为咸水，赋存咸水的第四系松散堆积物称为咸水地质体。咸水不适于灌溉或饮用；并且当浅层咸水水位较高时，容易使土壤发生盐碱化，浅层咸水还使得含水层在汛期的调蓄能力得不到发挥，致使不少淡水资源白白流失和消耗于蒸发，削弱了抗旱、防涝的能力。可见，咸水的存在是平原地区产生“旱、涝、盐、碱”自然灾害的主要内在因素之一，

必须查明地下咸水体的分布和埋藏条件，以便提出改造和利用地下咸水的措施。

高矿化度的咸水，其电阻率明显低于淡水的电阻率。因此，电法（仪）在查明低阻咸水的分布与埋藏条件，进而指导探水工程的布署和确定采水成井段，利用与改造地下咸水等方面，可起到重要作用。

我国黄河以北平原区，地下水为重要供水水源。1966 年以前，为解决农业灌溉用水，曾打过一些机民井。但因未查明咸、淡水的分布与埋藏条件，采取混合成井。成井后用咸水浇地，结果使土地盐碱化、庄稼枯死，经济损失严重。例如，河北省丘县 1964 年—1966 年，打井 1200 眼，由于没有查清咸、淡水分布情况，其中有 800 眼井成为废井。又如，山东省北部平原咸水区内，所成的机井，也有 90%以上是咸水井。在遭受以上挫折后，从 1966 年开始，采用了对咸水反映灵敏的视电阻率测深和电测井方法，初步查明了咸、淡水的分布和埋藏条件。先利用电测深资料圈出宜井地区，指导布孔；然后利用电测井资料确定成井层段。这样，便改变了过去的状况，使所打的机井，全部抽出了适用于灌溉的淡水，有力地支援了当地的农业生产。

第四节　电法仪在工程基础勘查中应用实例

在工程基础——高层建筑地基、桥基、路基、坝基及隧道工程探测中，电法的主要任务是对覆盖层及基岩风化层进行分层，确定它们的电性及厚度；确定基岩埋深及基岩面起伏；划分出基岩中可能存在的岩溶和断层。这对工程的选址、设计和施工，都有重要的指导作用。不同岩性的第四系沉积和基岩及岩溶和断层破碎带之间，通常存在明显的导电性差异，所以，电法在工程基础勘查中应用很广，而且效果甚佳。

一、房基勘探应用 3 例

例 1　广西南宁市近郊某地位于古河床Ⅱ、Ⅲ级阶地上，为设

计高层建筑，需查明该处地下土层的分布范围、埋深和变化特征，划分隐伏Ⅱ、Ⅲ阶地的分布。投入了电测深剖面测量，利用视电反射系数K断面图划分出了地下Ⅱ、Ⅲ级阶地的分界线；反演出了砂砾石层上的低阻软土层（亚砂七和亚粘上层），圈定了其分布范围。为高层建筑选址和结构设计提供了重要资料。

例2 南京市中山北路20层大楼地基稳定性的勘查结果。根据区域地质资料，有一条较大规模的北西向断裂可能从拟定的大楼底下通过，构成该楼地基稳定性的严重威胁。为查明断裂带的位置，布置了两条电测深剖面，点距20m—25m，最大极距$AB/2=340$m。电法工作结果表明，在剖面Ⅰ的14—16号点和剖面Ⅱ的6—8号点，有明显的陡立断层存在，其埋深约40m。此断层穿过原拟建筑场地的东北角。为确保安全，建筑设计部门根据电法结果，将设计的大楼位置作了修改，避开了该断裂。

例3 广东某城市建设区位于一条北东向大断裂带的南西端，西北部的供水水库已有渗漏现象。因此，查明区内断裂和破碎带，对城市建设规划（高层建筑群避开断裂破碎带或采取特殊建筑措施）和对水库防漏采取措施，都有重要意义。该区大部分被第四系砂土、粘土（厚约10m）所覆盖，地质工作困难。故投入了比较经济的电阻率法联剖（$AO=BO=90$m，$MN=20$m），在完整基岩（$\rho=500\Omega\cdot$m—$1000\Omega\cdot$m）背景上圈定低阻（$\rho=50\Omega\cdot$m—$150\Omega\cdot$m）断裂破碎带；并用电测深对破碎带做垂向了解和评价（最大$AB/2=700$m）。工作结果在第四系覆盖区圈定了七条隐伏断裂和两个低阻破碎区，并被钻探和测井所证实。为该地区城市建设规划提供了宝贵的资料。

二、坝基勘查应用2例

例1 宁夏某地拟在黄河上建设一水坝工程。据初步勘察，在所选坝线以南约700m存在一近东西走向的高倾角断层F_3，断层宽度约12m。从F_3断层与坝线相对位置可知，若断层倾向于南东，则其对坝基稳定性的影响可忽略不计；但若其倾向于北西，就应考虑它对坝基稳定性的影响。因此，查明该断层的倾向对预选坝

址的取舍及工程设计，有着特别重要的意义。用综合电法——电剖面法、电测深法和高密度电阻率法对该断层的倾向作了探测。三种电法的观测结果，一致表明F_3断层近于直立，略向南东倾斜，故对坝基稳定性影响甚小。此结论经部分钻探验证后，已得有关专家认可，作为该水坝勘测设计的依据。

例 2 长江三峡大坝将建于三斗坪花岗岩体上。建坝设计和施工，需了解三斗坪工区花岗岩风化层的情况。采用中心频率为50MHz的探地雷达作探测，所得雷达图上清晰地分辨出表土、全风化带、强风化带和弱风化带之间的界面，甚至弱风化带内的界面及与微风化带的交界面也可识别。与钻探结果十分吻合。尽管探测在雨后进行，潮湿的表土层（4m—8m厚）对电磁波强烈吸收，但探测深度亦达30余米。

三、桥基勘查应用2例

例 1 陇海线东段拟在沂河上建筑大型铁路桥。郯庐大断裂带通过该区，桥址应避开主干断裂和不良地质地段。该区为第四系覆盖区，基岩出露很少，地面地质工作困难。于是，在500km²范围内，投入了电阻率法等综合物探方法。结果只用了少量钻探，便查明了断层、岩体分界线和基岩埋深等，合理地选择了桥位。

例 2 湖北黄石市木兰山漫水河桥，为沉井施工急需关于桥墩基底形态和深度的资料。用探地雷达沿桥墩底四角的对角线作了探测，雷达图清楚地反映了基底形态和深度，还同时显示了基底以上七夹卵砂层、卵砂层、砾砂层及中砂层的界面。经钻探检查，各界面深度的最大误差仅为0.3m。雷达探测结果直接用于指导桥墩沉井施工，节省了时间和经费。

四、路基和隧道探测应用2例

例 1 青海湖边的高寒地区，浅层地下水在冬季结冰膨胀，会使地面变形。为使铁路安全通过该区，需查明地下水的分布和流动情况。投入电测深工作，绘出了基岩等高线圈。它表明基岩面上有几个沟槽，形成地下水通道。这是电法工作之前稀疏钻探网未能查出的。根据电法工作结果，重新布置了以验证为主要目的

的钻探；并进一步用充电法和自然电场法探测地下水的流向和流速。这样，查清了基岩面上地下水流的位置和流动情况及其与地面径流的补给关系，从而为预防和整治地面冻胀对铁路的破坏，提供了依据。

例 2 军都山隧道是大秦铁路的重点工程。在开挖过程中，出现了严重的突泥、突水现象，给施工带来了困难，要求物探迅速查明未开挖部分的地质构造情况。为此，投入了地面高密度电阻率法，即点距为 20m 的密集电测深剖面测量。工作结果划分出两个断层破碎带，正确地指导了隧道开挖工程。

第五节 电法仪在岩土工程力学参数和施工质量的原位检测应用 2 例

在论证现代岩土工程建筑的可行性和施工质量检查中，要求提供地基的各种岩土力学参数，如内摩擦角 φ、弹性模量 E_d、剪切模量 G_d、泊松比 μ、地基卓越周期 T、标准贯入试验锤击数 N、天然容重 γ 及上层容许承载力 R 等。确定这些岩土地基力学参数的传统方法工序复杂、工期长、成本高，而且精度不总是能满足要求。物探方法能以较低的成本和较短的时间，提供有一定精度的原位测定结果。不过，目前主要是采用地震勘探方法；利用电法（仪）测定岩石或土层的力学参数和作岩土工程施工质量检测，还在起步阶段，但也有一些成功应用的例子。

例 1 江苏连云港市经济开发区工程初探中，通过土层电阻率测定求取土层的容许承载力。土层的容许承载力 $[R]$ 是岩土工程设计必需的数据，传统的作法是用静力触探测定，既费时又费钱。地矿部第一综合物探队在连云港市经济开发区，以电测深作工程初探时，对区内 10 个钻孔的井旁已测深确定的土层电阻率 ρ 和静力触探确定的土层容许承载力 $[R]$，作了线性回归分析。发现 ρ 与 $[R]$ 有较好的线性相关关系，即

$$[R] = 1.18067 + 1.02658 \cdot \rho \ [\Omega.m] \quad tf/m^2$$

相关系数　　$\gamma=0.82039$。

利用 [R] 式在该区由电测深解释结果（上层电阻率 ρ）计算土层容许承载力 [R]，省钱省时；而且经静力触探检查（见表 3.1），最大相差仅为二倍，完全可满足工程初探的精度要求。

表 3.1　连云港经济开发区由电阻率 ρ 和由静力触探确定的土层容许承载力 [R] 的对比　　（单位 tf/m²）

土层 \ 方法	由 ρ 计算 [R]	静力触探确定 [R]
耕作土	6--20	5--10
淤泥层	2--5	5--6
砂粘土	16--30	20--30

例 2　用电法对漆伍公路施工质量作无损检测。国家重点建设项目中的漆伍公路属高等级的重载公路，是在原沥青路面的基础上铺设成的。混凝土路面设计厚度为 22cm±1cm；其下至原沥青路面之间的基层，由于弯道的原因各处厚度不一。按监理部门的要求，无损检测的内容是：1）混凝土路面和基层的铺设厚度；2）基层的铺设质量。采用微电极距的电测深法作检测，最大 $AB/2=100$cm。用反射系数 K 法对电测深曲线作定量解释，四个有代表性的解释结果见表 3.2。可以看出，电测深解释厚度与设计厚度

表 3.2　漆伍公路电法无损检测的典型结果

测深点号	测深曲线类型	混凝土路面厚度（cm）			基层厚度（cm）		
		设计厚度	电测深解释厚度	相对误差（%）	设计厚度	电测深解释厚度	相对误差（%）
28 左	HA	22	20.5	7.1	22	20.5	7.1
M_{3-2}	A	21.4（已知）	22	2.8	20	19	5.1
34 左	Q	22	21.5	2.0	16.5	12	23.4
32 左	D	22	19	14.6	22	29	27.5

基本吻合。34 和 32 点基层的解释厚度与设计厚度相差较大，其原因是这些测深点下原沥青路面已损坏，基层直接铺设在软质（低

电阻率）路基上，电测深曲线反映为Q和D型，这些点的铺设质量较差。特别是32（左）点，D型曲线在$AB/2=100$cm时，ρ_s降到约200Ω·m，反映出基底铺设在烂泥坑上的事实，其铺设质量最差。上述情况说明，利用电法对公路铺设质量作无损检测既快又好。

第六节　电法仪用于地下管线探测3例

在许多工程施工中，特别是在城镇及其近郊，往往需要及时查明地下通讯或动力电缆及各种管道的分布情况。电法，特别是电磁法在这方面有许多成功应用的例子。

例1　某电讯大楼附近地下电缆的探测效果。工作区位于交通要道，地下电缆的确切位置不清楚，周围有工业电源干扰，工作条件十分恶劣。采用DDW-1型多用电磁系统作虚分量-振幅法观测：先用被动源方式（类似于天然音频电场法）作普查，观测沿地下电缆聚集电流的音频电磁场（干扰场）的水平磁场分量（振幅）H_x，以发现地下电缆；然后，采用半定源水平线圈装置，将水平发送线圈安放在所发现电缆附近，沿与估计电缆走向相垂直的测线，观测水平磁场虚分量I_mH_z（收发距60m，工作频率1200Hz）。由I_mH_z剖面曲线的极大点确定地下电缆的水平位置；由半极值点间距Δx之半，确定电缆埋深（$h=0.5\Delta x=1.85$m）。开挖结果证明上述推断符号实际。

例2　浙江镇海石化总厂江南乡-算山码头地下管线普查效果。浙江省地球物理技术应用研究所在中国地质大学（北京）指导下，用DDW-1和GX-1等电磁仪和管线仪，采用多种观测方式，对江南乡-算山码头总长115km的地下管线进行了普查和追踪。基本查清了三类（输油、供水和通讯）、共计十三条专业地下管线的分布。经26处开挖检查，无一处定性错误；确定地下管线平面位置的误差平均为3.4cm（埋深h小于1m时）—4cm（h≥1m时）；确定管线埋深的平均误差为3.7cm（h<1m时）--5cm（h≥

1m时)。

例3 河南郑州市天然音频电场法找水泥管道的效果。测磁场的电磁法对高阻的水泥管道和地下人防工程反映不灵敏。郑州地质学校利用选频的天然音频电场仪找这类地下高阻管道，取得了好效果。他们在郑州市空军医院北面找地下排水管（水泥制做的圆形管，直径约2m），几种工作频率（$f=25$，67和170Hz）测得的电位差ΔU剖面曲线都有明显的异常。由异常极大值位置确定的高阻地下管道在地面的投影位置，与实际情况十分吻合。

在郑州市工人路人防工程上的测量也取得了好效果。该防空洞洞底宽4m，洞顶为半圆形，洞底到洞顶最高点距离为4m，洞顶埋深4m以上。在垂直防空洞走向的剖面上，实测了ΔU剖面曲线。其中，工作频率$f=25$Hz和67Hz时，对高阻的防空洞有明显的高值异常反映；$f=170$Hz的ΔU剖面曲线异常反映较差，可能是由于频率高，地表干扰影响所致。

第七节 电法仪在考古探测中应用4例

例1 电阻率法探测宋代东京（今开封市）地下城墙的效果。该城墙原建于地上，历经黄河水患淤没，现其顶部覆盖层厚达几厘米至数米不等。据露头测定，城墙夯土$\rho<25\Omega\cdot m$，围介砂土$\rho>40\Omega\cdot m$，地表耕土$\rho>80\Omega\cdot m$。根据城墙现存残状，以20m×5m测作了对称四极剖面观测（$AB=14$m，$MN=2$m）。在测得的ρ_s平面等值线圈上，两条$\rho_s=40\Omega\cdot m$的等值线构成的一条低阻异常带（宽约20m，沿磁方位10°延伸），清晰地反映出地下城墙遗存的存在和位置。配合联剖和偶极剖面的ρ_s曲线，更精确地确定了城墙遗存的位置和厚度。利用电测深资料，进一步揭示了城墙断面形态残存为半透镜状，城墙顶、底板埋深分别为1.1m和7.1m。钻孔验证，电法推断的城墙遗存确实存在；顶、底板埋深分别为0.7m和7.5m，与电法确定的深度十分接近。

例2 北京市明十三陵中定陵地下宫殿开挖前，曾投入电剖

面法寻找地下墓穴位置。相当大范围的 ρ_s 高阻异常，意外地显示地下可能存在较大规模的墓室。在其指导下开挖结果揭露了这一宏伟的地下宫殿。

例 3 河南固始县候古堆春秋战国时期古墓的探测效果。1978 年在候古堆北侧取土时，发现一个古墓的陪葬坑。然而，主墓葬的具体位置究竟在什么地方?是考古发掘中急待解决的问题。应河南博物馆的要求，河南地矿局物探队在候古堆开展了电测深和磁法测量。结果，在候古堆的三角点西南找到了充填地下水的低阻和低磁的主墓葬。随即经现场开挖，证明物探推断结果与实际主墓位置基本一致，最小相对误差 0%—1.4%，该古墓挖出的三乘肩舆是我国考古史上的首次发现，对研究古代历史有重要意义。由此也看到了电法考古的重要贡献。

例 4 在湖北铜录山古铜矿采坑遗址的探测中，地探雷达起了重要作用。不仅圈出了古采坑遗址的范围，而且区分了地下不同深度和不同区的回填物质。钻探结果验证了其推断的正确性。

第八节 电法仪在环境污染和灾害的调查与防治方面的应用

一、地下水污染监测 2 例

由于工业废水、生活污水、垃圾、废渣、矿渣、农药、化肥及污水灌溉等原因，通过地表水渗到地下，使地下水遭受污染，危及生活和生产用水的清洁，成为一大公害。地面电法观测可以又快又经济地解决问题。

例 1 某石油化工厂排入溜河的工业废水和生活污水长期超标，造成地下水污染。为了查明地下污水带的分布，投入了电法观测。经取水样测定，污水电阻率为 8 Ω·m，而净水电阻率为 90Ω·m。两者相差十倍以上，为用电阻率法划分污染区提供了充分的电性前提。在溜河河床及两岸附近布置了对称四极电测深，测线垂直河流方向，点距 100m，$AB/2=4$m--150m。根据电测深结果

绘制的 ρ_s 断面图和 ρ_s 平面等值图上，不规则的 ρ_s 低阻异常带，清楚地反映了地下水污染区在断面上和平面上的分布。从而为辟开污染区提取清洁地下水和为地下污染水的防治提供了宝贵资料。

例 2 某硫酸厂的酸性废水渗入地下，溶蚀了石膏质的岩石，形成地下溶洞或使原有洞穴加大，构成新的地下水通道。这样，既造成地下水污染，又危及地面建筑的稳定性。利用地面和河中的电阻率法测量，则 ρ_s 低阻异常圈定了地下岩溶水的通道位置；而且由不同时期测得的 ρ_s 低值范围的变化，测出了受酸性废水溶蚀，地下溶洞带加宽和发展的情况。给制订安全防范措施提供了资料。

二、滑坡探测应用 2 例

例 1 湖北巴东县新城滑波电法勘测成果

巴东县新城滑坡位于该县城西侧二公里处，由于三峡库区移民，现已成为巴东县新城建设区址。为保障新城区安全和合理开发，中国地质大学（武汉）物探系受长江流域规划委员会委托，沿该滑坡延伸方向 1.8km 的剖面上，投入了以电测深和探地雷达为主的综合物探勘测。主要任务是查明滑坡堆积体的厚度，滑带位置和形态及基岩松驰带。工作结果绘制了该剖面的推断地质断面图，指出新城滑波是一古滑坡，经年久剥蚀现残存滑体可分为两类三大段；分别查明了各段滑体和基岩的性质及基岩起伏形状；强调所划分的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ段仍为一完整的滑坡体系；警告不要因现残存滑体堆积物出露或消失而给人以古滑坡已不存在的假象所迷惑。这些结论，特别是关于滑体结构和基岩深度的推断结果，都与钻探结果十分吻合。从而为巴东县新城区址规划决策和滑坡预报提供了科学依据。

例 2 VLF 法探测宝成线 K410 滑坡水文地质条件的效果。该滑坡是一个规模较大的堆积层老滑坡体，平面范围长约 500m，宽约 200m。铁路自老滑体前通过。自 1955 年通车后，老滑体前部始终处于不稳定状态。曾于 1958 年雨季发生较大的滑动，造成铁路中断的危害。为了给治理该滑坡提供水文地质资料，在滑体

范围内投入了 VLF 法扫面。由 VLF 法观测绘制的磁场椭圆极化长轴倾角 α，倾角滤波值和波阻抗视电阻率 ρ_s 的平剖图和平面等值线图，一致反映出北东向和南东向的两条低阻异常带，它们在 4# 钻孔附近汇集后向北西方向延伸。结合已知钻孔资料，确定了滑坡区内地下水的分布范围和补给关系，为查清滑坡区水文地质条件及排水工程设计提供了依据。

三、城市地裂缝探测 2 例

西安市是地裂缝的多发区。近年来，由于频繁的构造运动、非正常的降落及大量开采地下水等原因，地面及地下常出现地裂缝，严重地破坏了现有建筑和设施，并对今后的城市规划造成困难。因此，查明地裂缝在市内的分布、走向延伸及其埋深、下延深度和产状，就成为城市规划和建设的重要问题之一。电法在这方面可以发挥积极作用。

例 1 小寨商场地裂缝探测效果。陕西地震局受西安市小寨商场委托，用电阻率中间梯度法对其所在大院（约 1km^2）进行详查。从地貌上看，地裂缝以北东 70°方向穿过大院，但地表未出露。为此，布设了两条测线进行控制，测线长 50m，点距 1m。在通过大院中心的剖面上，测出三个 ρ_s 高阻异常，推断其下存在地裂缝。经槽探证实，地表 0.4m 以下，有三条近于直立的地裂隙、缝宽 0.5cm—2.5cm；深 1.5m 处，裂缝错开原生土层 0.3m；缝中没有任何充填。

大院西侧剖面上，测出两个 ρ_s 高阻异常，也怀疑是地裂缝所致。经地表揭露，有两条平行地裂，缝宽 1cm—1.5cm，其中充填有砂粒。

例 2 高密度电法探测西安市三环路西段地区地裂缝的效果。西安地质学院在该市三环路西段，采用高密度电阻率法详细研究由中梯普查发现的隐伏地裂缝异常，指导开挖探槽，获得好效果。例如，在 A 剖面 A_3 段的高密度 ρ_s 等值线图上（图 3.6），193.5—195.5 点之间（点距 $=a=0.5$m）有 ρ_s 等值线密集、变化梯度大的陡立高阻闭合圈。其与该市旅馆村已知地裂缝上的异常

形态极为相似，进而推断该处地下存在一近于直立，延深约 18m 的地裂缝 F_1'；并在深约 13.5m 处该裂缝发生错动，形成东倾的裂缝 F_4'。在 190.5--192.5 点及 195.5--197.5 点间，浅部出现高密度 ρ_s 密集带，推断在该两处有浅部次生小裂缝 F_2' 和 F_3'。

中梯 ρ_s 剖面曲线（图 3.6）在 190—200 点间有一明显的高阻异常，与 F_1'，F_2' 和 F_3' 相对应；该异常反映向东（大号点）倾斜，这可能是由裂缝 F_4' 所致。故推断 F_1' 和 F_4' 是主裂缝，而 F_2' 和 F_3' 为次裂缝。根据上述推断，陕西第一水文队以 194.5 为中心，向东西两侧扩展开挖 10m 的 2# 探槽，揭示了与推断相符的 F_1、F_2、F_3 和 F_4' 地裂缝。

四、堤坝渗漏探测 2 例

堤坝渗漏是水利工程一大隐患，轻者会使水库白白流失蓄水，河堤不能有效防洪；重则可能导致堤坝决裂、崩塌，造成严重水灾。因此，必须及时查出漏水地点和通道，以便采取防治措施。在探测堤坝渗漏方面，电法是最经济和有效的方法之一。其物理基础是渗漏通道相对于完整的（堤）坝基和（堤）坝体具有较低的电阻率。

例 1 湖南澧水大堤渗漏探测。澧水黄沙湾段大堤因隐患导致汛期澧水大量从堤内电排站进水口涌出，引起防汛部门的高度重视，但无法找到隐患的渗漏通道。经过堤内外平台电阻率测深的剖面观测，绘制了两剖面的 ρ_s 和反射系数 K 等值线断面图。特别是后者，反映出整个剖面从上至下介质电性的变化，在断面图的底部出现了局部低阻异常，推断为隐患渗漏通道部位。钻探证实了电法推断的正确性，从而为在该处采用水泥幕墙堵漏提供了依据。

例 2 河北某水库渗漏的勘察。该水库建于 1972 年，目前坝基有渗漏现象，为保证大坝安全，采取堵漏措施，首先得查明渗漏通道位置。坝区河流左侧为断壁悬崖，右侧为水库辅助建筑及旅游设施，河床为卵石和碎石覆盖，所以接地条件很差，不便开展电阻率法。所以，采用不需接地的磁偶源频率测深法探测渗漏

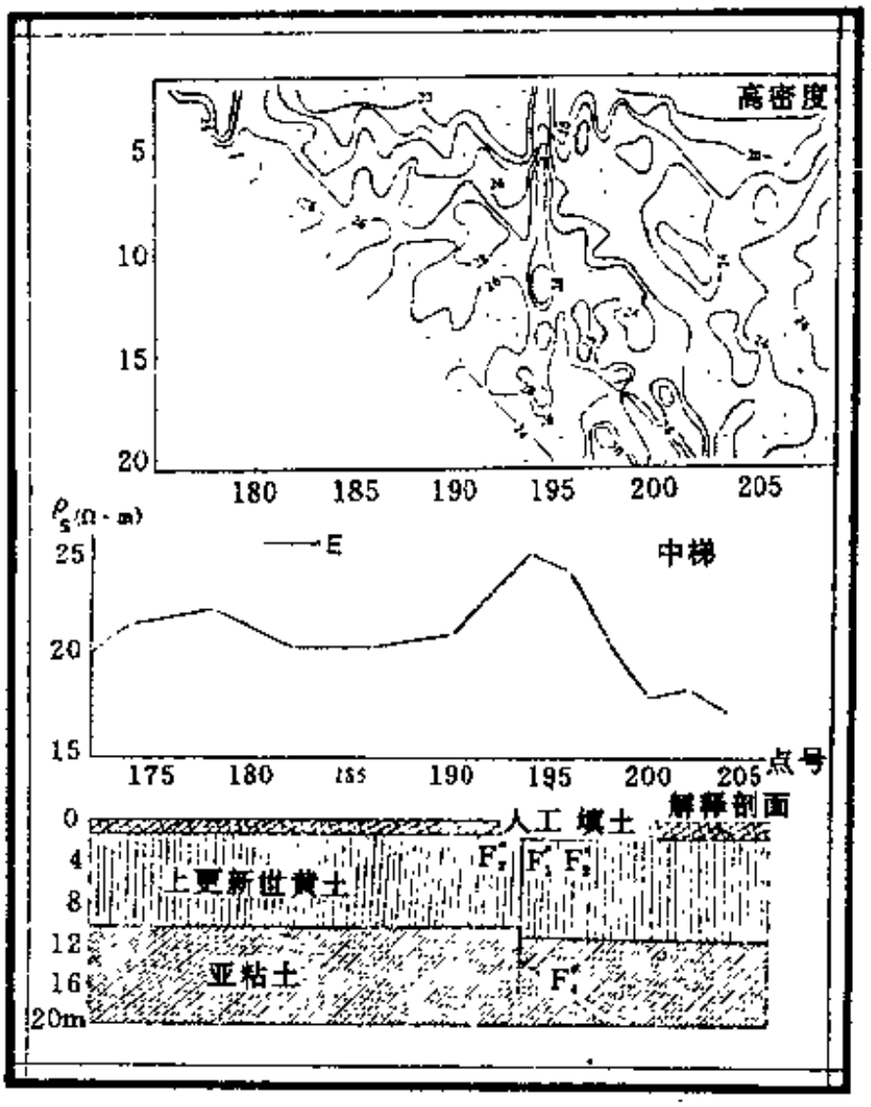


图 3.6　西安市三环路西段 A 剖面 A_3 段电法综合剖面图

通道。结果，在 36—48 点间发现一较宽的低阻带，呈楔形向下延深。推断在该处有一破碎带，近地表处破碎较厉害，范围较宽；向下范围逐渐变小，过渡为完整岩石。施工单位的工程揭露证实了上述推断。根据电法探测结果，在推断的漏水通道上布置钻孔灌浆堵漏处理。其中，一号孔打到漏水通道后灌进 1000t 水泥；在二号孔灌进 500t 水泥，成功地堵住了漏水通道。

五、电法仪寻找地下土蚁巢

土蚁是农林业的主要害虫，严重的是蚁巢造在堤坝内，往往造成水库漏水、塌方。寻找地下土蚁巢是农林和水利防灾的重要

课题。

蚁巢通常建造在均匀土层中，埋深 0.5m—1m，形状呈半月形，直径 0.6m—1m，其电阻率比周围土层高一至数倍。所以，它是电法的有利探测对象，采用最简单的小极距电阻率法便能奏效。例如，1977 年江西地矿局物探大队受南昌市白蚁防治研究所委托，在永修和进贤两县，用小极距的联合剖面法、中间梯度法和电测深法（$AB/2$=15cm—200cm，MN=点距=10cm—20cm）找土蚁巢。根据电法高阻异常开挖的见巢率达 60%左右，取得了较好的效果。

六、黄淮海盐渍土的调查

盐渍土是一种由于土中发生盐化和碱化而使其含有过量河溶性盐类，致使农作物生长受到危害的土壤之总称。在我国北方平原地区，盐渍化土壤是影响农业发展的一大自然灾害，必须对其进行改良治理。电法资料在查明盐渍土的分布情况，进而指导土壤改良工作方面，有着独到的作用。

土壤的盐渍化程度通常以 100g 土中所含可溶性盐类的总量（或称全盐量）来衡量。盐渍化程度越高的土壤，全盐量越大，因而其电阻率越低。表 3.3 列出了黄淮海平盐渍土的分类及其导电参数。可见根据电阻率法小极距测出的浅层视电阻率，可以成功划分出不同程度的盐渍土。

传统的地面土壤调查，反映的是地下 0cm—30cm 耕作层的平均含盐量。由于盐渍土的分布与盐渍化程度，容易随着年内和年际气象变化或人为因素影响而改变，因此，传统调查的资料比较零散，难以反映盐渍土分布的全貌和规律性，也不能预见潜在盐渍化的危险。电法资料则可避免这些缺点。例如，根据区域电测深资料编制的黄淮海平原 2m—3m 深度内的盐渍化土分布图，可以比较详细地刻划全区盐渍化土的分布范围和区域性变化规律。从而为深入研究该区盐渍土的形成条件、成因类型、潜在盐渍土的危险及综合治理途径等，提供丰富、具有长期使用价值的重要基础资料；而且也是制订土壤改良规划不可缺少的依据。

表 3.3　黄淮海平原盐渍土分类及其导电性参数

盐渍土分类	土层含盐量 (g/100g土)	视电阻率值 (Ω·m)				对农作物的危害程度
		海河—滦河平原	黄—淮平原	渤海滨海平原	黄海滨海平原	
非盐渍土	<0.2	>8	>15	>8或10	10	无
轻盐渍土	0.2—0.4	8—6	15—12	8—6或10—6	10—8	耐盐性较弱的作物如小麦、玉米、豆类等生长受到轻微影响；耐盐性较强的棉花、田菁等作物能够正常生长，但要加强幼苗的田间管理
中盐渍土	0.4—0.6	6 4	12 10	6 4	8 4	小麦、玉米、豆类等生长受到严重抑制，死苗现象严重；棉花、田菁等生长亦受到抑制
重盐渍土	>0.6	<4	<10	<4	<4	小麦、玉米、豆类、棉花、田菁等各类作物很难生长

谢　辞

本书承蒙中国地质大学等数十个单位和个人提供宝贵资料，难以一一列举，特统一致谢！

主要参考文献

中华人民共和国地质矿产部，1984，直流电法工作规范，地质出版社。

牛之琏，1992，时间域电磁法原理，中南工业大学出版社。

王惠生、邱兰士编，1992，黄淮海平原电性特征与地下水，地质出版社。

第十七篇

地下电磁波仪

翟兴昌　编著

前　言

地下电磁波法是利用电磁波探测地质目的物的一种方法，地下电磁波仪是地下电磁波法的专用仪器。我国自60年代初开始这方面的研究，经过30多年的实践，仪器的研制、生产及在一些领域的应用，都取得了肯定的效果。

今天，电磁波仪已不限于物理探矿，它已广泛地应用于其它部门，如煤炭、水电、铁道、城建、环保等工程当中。

本篇以通俗的方式介绍了地下电磁波仪器和方法的工作原理，着重介绍地下电磁波仪器性能指标、应用实例。

本篇编写过程中，得到了多方面的支持，引用了地矿部物探所、煤炭部河北煤研所及其它部门的资料；苗松森同志提供了有关钻孔电磁波仪应用效果的资料；王守新同志提供了有关坑道电磁波仪及其应用效果的资料，在此一并表示感谢。

作　者

1994年1月

目　录

第一章　地下电磁波法 …… (76)
一、方法原理 …… (76)
二、仪器研制及方法应用简史 …… (76)
第二章　地下电磁波仪 …… (78)
一、地下电磁波仪的分类 …… (78)
二、地下 电磁波仪的基本工作方式 …… (78)
三、地下电磁波仪的基本结构和工作原理 …… (78)
第三章　地下电磁波仪的应用实例 …… (82)
一、钻孔电磁波仪在铜矿床探测中的应用 …… (82)
二、钻孔电磁波仪在铬矿探测中的应用 …… (84)
三、钻孔电磁波仪在煤田矿井防治水患中的应用 …… (86)
四、坑道电磁波仪在煤田开采中的应用 …… (88)
五、地下电磁波仪在工程地质中的应用 …… (90)
第四章　地下电磁波仪产品介绍 …… (91)
一、JWT-1 型钻孔无线电波透视仪 …… (91)
二、JWT-2A 型钻孔无线电波透视仪 …… (92)
三、JWQ-3A 型钻孔无线电波仪 …… (92)
四、JW-4 型地下电磁波仪 …… (93)
五、WKT-Ⅱ、WKT-D 型坑道无线电波透视仪 …… (94)
结束语 …… (96)

第一章　地下电磁波法

一、方法原理

地下电磁波法是利用地质目标与围岩之间的高频电性差异来研究、确定地质目标的位置、形态、大小及物性参数的地下物探方法。

开展地下电磁波法的目的是寻找和圈划出钻孔（或坑道）之间、钻孔（或坑道）周围以及钻孔　坑道工程之间、钻孔（坑道）工程与地面之间各种地质目标的赋存情况：位置、形态、大小、物性参数等。各种地质目标包括：围岩中的矿体、溶洞、含水层或矿岩中的异物，如：煤层中的非煤陷落柱、建筑石材中的杂质包裹体、破碎带等。

因此，地下电磁波法适用于各种工程地质任务中的地基勘查，尤其适用于岩溶地区；适用于有钻探或坑探任务阶段的矿体普查和勘探；能配合煤矿区的综采、勘查煤层中的非煤陷落柱；配合矿区水文工作以及找老窑等工作；为建材及环保目的对岩体的质量评价等提供资料。

二、仪器研制及方法应用简史

在我国，地矿部物探研究所于60年代初首先开展了地下电磁波法的仪器研制和方法研究，当时把方法称为无线电波透视法。1960年在东北关门山铅、锌矿首次成功地进行了坑道无线电波透视；1964年在京郊平谷县金矿成功地进行了钻孔无线电波透视试验工作。这些工作奠定了地下电磁波仪研制和方法研究的基础。自1965年后，钻孔无线电波仪和坑道无线电波仪定型，由上海电子仪器厂、上海地质仪器厂、物探所实验工厂批量生产并投放市场。在长江中下游寻找富铜富铁会战以及东北、西北的地质找矿中，在水利水电、铁道等部门寻找岩溶的应用中取得肯定的地质效果并得到推广应用。70年代至80年代，物探所研制了第二代钻孔电磁

波仪，JWT-2 型和 JWQ-3 型，通过部级鉴定并在上海、重庆、物探所实验工厂等处批量生产，投入市场。这期间，在新疆、西藏寻找铬铁矿的工作中，煤田治水，铁道、水电等部门工作中方法得到了更广泛的应用，并取得很好的地质效果和经济效益。为此，JWT-2 型无线电波仪及方法的研究获 1978 年全国科技大会奖，JWQ-3 型钻孔无线电波仪获部科技成果二等奖。

80 年代以来，计算机技术已深入各学科领域。由地矿部物化探研究所和北京计算中心合作研制出利用计算机技术实现数据采集、数据处理、成图一体化的智能化系统——DXDB-ZK 电磁波法新系统。它包括数据采集系统（JW-4 型地下电磁波仪）和数据处理解释工作站（WS-V.1）。

我国其它部门也对方法和仪器进行了研制、生产和应用。比较突出的是煤炭部的几个研究所，研制出了适用于煤田开采过程中探测非煤陷落柱等灾害地质情况的适用于坑道的专用无线电波仪，发展了相应方法，卓有成效。许多矿务局已将方法列入生产规范和做为标准化矿井的一项内容。

在国外，前苏联开展地下电磁波法的方法研究和仪器研制最早、最系统，应用效果也最好。主要应用在地质找矿，包括金属矿和非金属矿；煤田开采等方面。其它国家如阿尔巴尼亚、罗马尼亚、匈牙利、朝鲜、印度等国也较早从我国和原苏联购买仪器，引进这一方法。德国已将该方法列为常规方法。美国在 70 年代中期也开始了钻孔电磁波法的试验。

到了 90 年代，地下电磁波法已在世界各地区：亚洲、北美、东欧、西欧、北欧、澳洲及非洲开展，几乎所有先进国家都参加了这一工作。大多数以时域为主，德国、美国则频域、时域都开展。应用面很宽，除地质找矿外，还包括工程、水文、环保、考古等方面。

第二章　地下电磁波仪

一、地下电磁波仪的分类

地下电磁波仪因其工作方式的不同，分为钻孔电磁波仪和坑道电磁波仪两大类。

1. 钻孔电磁波仪。它利用钻孔进行工作，包括放置于钻孔中的发射机，发射天线；放置于钻孔中的接收机、接收天线；放置在地面控制钻孔中仪器工作的发射机地面控制和数据采集器，接收机地面控制和数据采集器。另外还包括绞车、测井电缆、滑轮、重锤等辅助设备。

2. 坑道电磁波仪。它利用坑道进行工作，包括坑道发射机、发射天线，坑道接收机、接收天线。

二、地下电磁波仪的基本工作方式

地下电磁波仪工作时，发射机及其天线放置在一个钻孔中（或坑道的一条巷道中），接收机及其接收天线放置在另一个钻孔中（或坑道的另一条巷道中）。工作频率一般可在一百千赫至几十兆赫内选择。通过移动发射机和接收机，根据所接收信号（电磁波振幅）的变化，推断两钻孔（或两条巷道）之间剖面的地质情况，确定其间是否有矿体、溶洞、裂隙等地质目标。

钻孔电磁波法工作方式示意如图 2.1。

根据实地工作条件，也可以将钻孔电磁波仪和坑道电磁波仪灵活组合，组合成钻孔对钻孔、钻孔对坑道、坑道对坑道、钻孔或坑道对地面等多种的工作方式。也可以利用一个钻孔或一条巷道来研究其周围的地质情况。

三、地下电磁波仪的基本结构和工作原理

地下电磁波仪中，钻孔电磁波仪结构较为复杂，了解它的工作原理就不难理解其它形式的地下电磁波仪。

（一）钻孔发射机

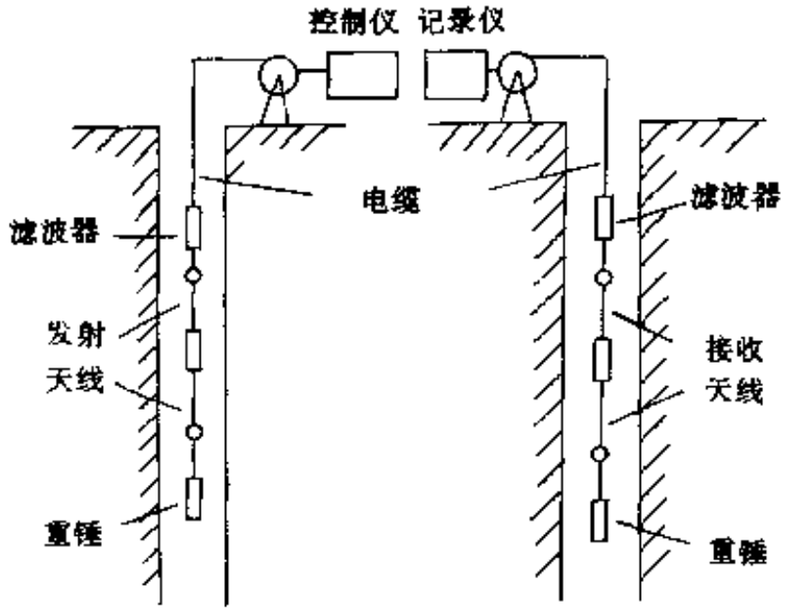


图 2.1 钻孔电磁波法

其基本框图如图 2.2 所示。

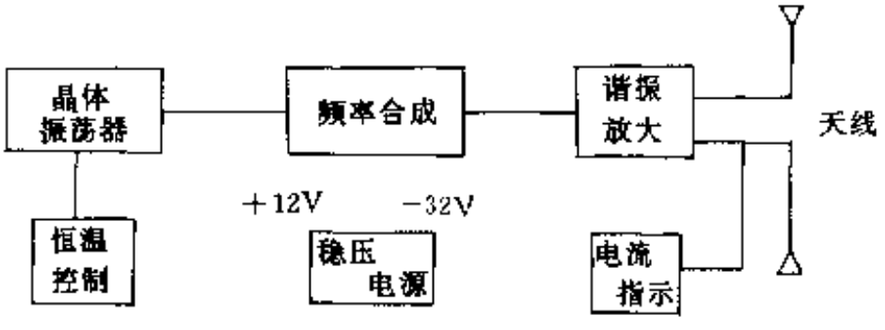


图 2.2 发射机原理方框图

各部分功能简述如下：

(1) 晶体振荡器。主要是高精度石英晶体和其他元件所组成的电容三点式振荡器。经放大后输出 0.5V 的 5MHz 振荡信号。由于窄带滤波的需要，晶体应在恒温状态下工作（温度为 42℃），这样才能保证其频率稳定度达 10^{-7} 以上。

(2) 频率合成器。晶体振荡器输出 5MHz 信号，但工作频率需要用 0.9MHz 至 30.9MHz 等六个频率。仪器采用频率合成的办法，用倍频器对取自 5MHz 的信号进行分频倍频，然后利用变频器，使两种频率相加，得到所需之频率，经过提纯，输出正弦

信号。

(3) 谐振放大器。由频率合成器输出的信号，功率仅数毫瓦，因此需加以功率放大。

(4) 天线电流指示器。用线圈在天线输入端感应出部分高频电压，检波成直流电压送到地面（与天线电流成比例），以监视发射机的工作情况。

仪器的电源是由地面送下的 800Hz300V 的方波整流稳压后取得。+12V 部分供晶体振荡器、恒温器、频率合成器；−32V 部分供谐振放大器。

发射机的地面控制部分由换流器（将蓄电池 12V 直流电转换成 800Hz300V 方波，由电缆送至井下，变换成交流是为了提高供电效率）、电压电流指示表（指示蓄电池电压，下井高压及下井电流、天线电流指示表等组成。发射天线采用半波偶极天线。

(二) 地面控制及数据记录

控制钻孔发射机开或关，记录发射机输出功率参数。

(三) 钻孔接收机

其基本框图如图 2.3 所示。

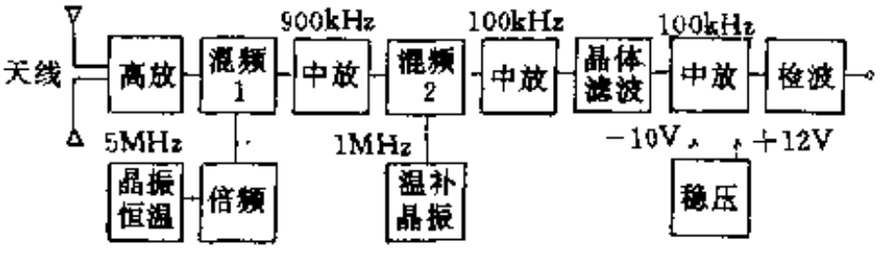


图 2.3 钻孔接收机框图

天线接收到的信号加到高放级输入端。高放后输出的信号，与来自第一恒温本振振荡器并经过倍频的信号混频，差出 900kHz 电压，中放后再与 1MHz 信号混频，得到 100kHz 的电压。中放后，经 100kHz 晶体滤波器和六级双增益对数放大器放大、最后经检波整流为直流送至地面。

为了提高仪器的灵敏度，除采用窄带滤波器来降低噪声外，对

混频器还需采用平衡式二极管混频器，以降低外差振荡器的噪声。在高放级，采用低噪声晶体管以降低高放级噪声。在线路结构方面，采取各级分别屏蔽，电源线单独屏蔽以减小外界干扰及内部反馈引起的自激。

为使频率稳定，对第一本振（5MHz）晶体振荡器，采用恒温控制，对第二本振（1MHz）晶体振荡器，采用温度补偿措施。

为了扩大测程，后面的放大器必须在整个动态范围内输出不饱和。采用双增益对数中频放大器，动态范围做到了120dB，输入输出特性呈较好的对数线性关系。

线路方面，采用以上措施，使仪器总增益达140dB。接收机的天线采用半波偶极天线。

（四）地面控制及数据记录器

控制钻孔接收机的开、关、测量等工作并指示（或记录）所测数据。

（五）辅助设备

①绞车：缠绕并操作电缆，控制钻孔仪在钻孔中的位置，通过集流环使地面仪与电缆相连。

②电缆：连接钻孔仪及地面控制器。传送控制信号给钻孔仪，传送测量数据给地面仪。

③井口滑轮。

第三章　地下电磁波仪的应用实例

地下电磁波法作为一种地下物探方法，自从我国开展研究和生产应用以来，已在铜、铁、铅锌、铬、煤等矿床的普查勘探，以及在岩溶、水文、工程地质勘察等方面取得了明显的地质效果和经济效益。实践证明，这种方法用来寻找钻孔或坑道之间的盲矿体、圈定矿体的空间位置和形态，确定被钻孔或坑道揭露的矿层产状以及矿体是否连接等问题，利用多频特性还可以研究浸染状或致密状等矿石结构，在有利条件下，有助于放稀勘探网度，提高勘探效率。利用钻孔电磁波法可以研究溶洞、地下暗河、断裂破碎带的存在与分布，为解决水文，工程地质问题提供新的手段。地下电磁波法具有广阔的应用和发展前景。

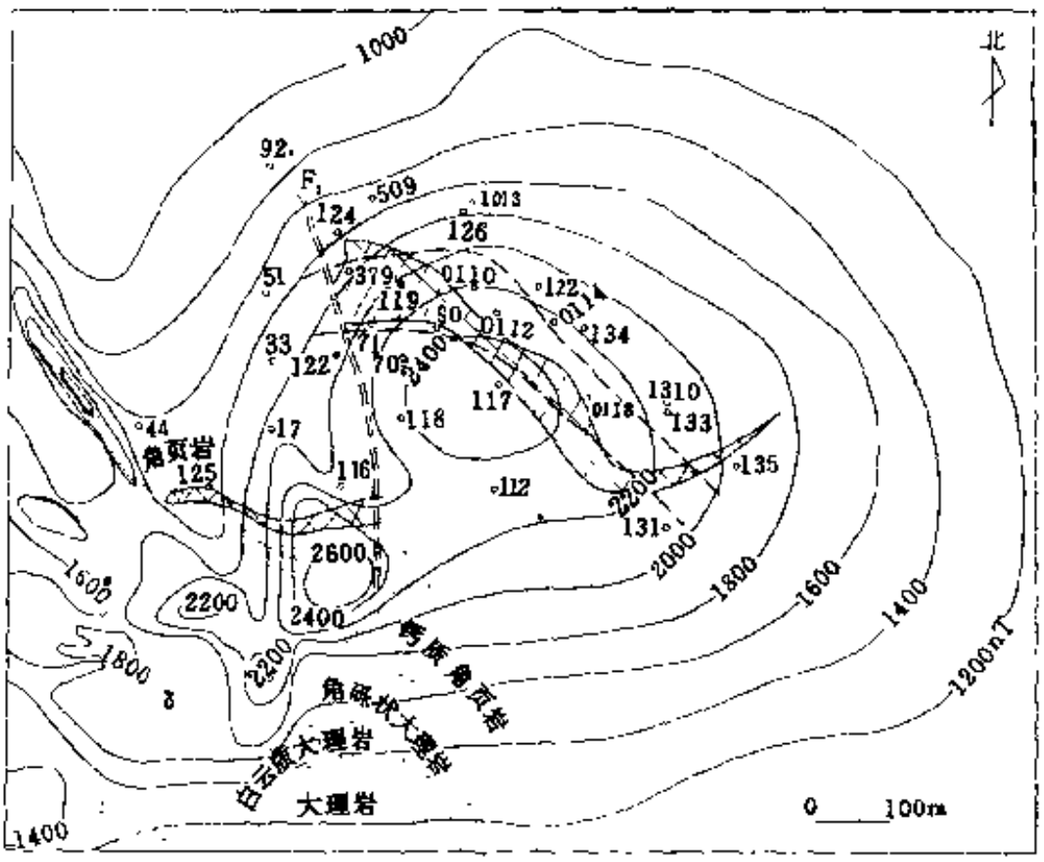
一、钻孔电磁波仪在铜矿床探测中的应用

例 1　安徽某铜矿是一个埋藏在地表以下 300m 处的深部盲矿。地表为大片水稻田。航空物探和地面物探首先发现这个矿床。60 年代，钻孔电磁波法在矿区普查勘探中，配合地质钻探，在发现深部盲矿、解决矿体产状、形态及各矿段间关系方面发挥了独到作用，地质效果明显。

（一）寻找孔间盲矿，确定其走向（中段主矿体）

在普查阶段初期，如何确定矿体走向、倾向等产状要素，以及如何布置钻孔是很重要的问题。当时工区仅有为数不多的几个钻孔（见图 3.1）其中 ZK119 见矿最好，主矿体（含铜磁铁矿）在钻孔剖面上厚度达 169m。然而在其周围十字剖面的四个方位上的 ZK122、ZK124、ZK126 和 ZK117，除 ZK124 深部 400m 以下有局部矽卡岩型铜矿外，其余各孔均未见矿。ZK119 孔所见巨厚矿体如何延伸？为了给下一步布置钻孔提供新的依据，在这几对钻孔中进行了钻孔电磁波法测量。结果发现：ZK122—ZK124 间 360m 以下，ZK117－ ZK126 间 260m 以下有强烈屏蔽电磁波的地质体

存在。利用交会法圈定了一较厚的徒立状体，推断在此两对钻孔间有隐伏的主矿体存在。在ZK117—ZK122，ZK124—ZK126两对钻孔间剖面内无矿异常。据此提出，主矿体在ZK119附近向近东西向西倾伏较陡，向东延伸平缓。在此后的钻探过程中，沿主矿体东西布置的ZK0110、ZK71、ZK0112、ZK90、ZK51及ZK379等孔均验证见矿，而在南、北两边的ZK509、ZK70等孔在电磁波法控制深度内均未见矿。这是钻孔电磁波法在该矿区为寻找孔间盲矿及圈定矿体产状方面所取得的重要地质成果。



1 2 3 4 5 6 nT 7

图 3.1　矿区综合平面图

1—闪长岩；2—实际矿体在某一标高上横截面的地面投影；
3—电波法推断矿体的地面投影；4—断层线；5—地层界线；
6—钻孔及其编号；7—等磁力线

（二）确定见矿孔各矿层间的关系及产状（东段主矿体）

中段主矿体上钻孔电磁波法结果被钻探验证之后，在东段矿

体的勘探中，在 ZK117--ZK114，ZK117—ZK134，ZK117--ZK133，ZK131- ZK134，ZK131--ZK1310 以及 ZK117—ZK131 等对钻孔中都做了钻孔电磁波法。根据资料处理结果确定，矿体走向和水平投影方面与地质结果基本上一致，即东段矿体走向南东，延伸较稳定。在垂直走向剖面内，上、下接触带的矿体是否连续，看法有明显分歧。地质方面的一种看法是：矿体在走向连续稳定，在垂直走向的剖面内接触带呈“S”形，矿体的空间形态亦如此。钻孔电磁波法认为，即使接触带稳定连续，生于上、下接触带的矿体也有局部断开或尖灭现象。电磁波法的这一结论为矿床勘探后期所验证。最后，地质综合电磁波法和钻探资料，对东段矿体的认识才更加接近于客观实际，即矿体走向上和倾向上都有局部的分叉，复合、尖灭、再现等现象。

南部矿体是指 ZK－17 及其以南所见矿体，北部矿体是指 ZK－117 所见东西走向主矿体。这两部分矿体在矿床成因和时间上是一样的，但在空间位置上是相连的一个矿体还是不相连的两个矿体，在矿床勘探初期是急待解决的地质问题。为此，在 ZK17－ZK122 间进行了电磁波法观测。资料处理结果表明，南部和北部矿体是不相连的。这一结论与井中充电法结果一致而且为以后实践所验证。原来矿体被 F_1：北西--南东向，斜向运动的正平移断层所断开。南部矿体在 F_1 的上盘，北部矿体在 F_1 的下盘。

综上所述，钻孔电磁波法在安徽某铜矿上的应用具有明显的地质效果，它先行于地质与钻探，起了指导作用。

二、钻孔电磁波仪在铬矿探测中的应用

铬矿是我国急缺矿种，主要产于新疆和西藏地区。开展钻孔电磁波法试验表明，它可以在强吸收的围岩背景上发现高阻铬铁矿，确定被钻孔揭露的矿体的延伸，倾向、倾角、两钻孔间矿体是否连接，寻找盲矿等。钻孔电磁波仪器和方法在铬铁矿床上的应用国内外尚无先例。

例 1 新疆萨尔托海铬铁矿勘查实例

该矿区的矿体由许多透镜状、扁豆状、囊状似脉状矿体组成。

矿体个数多、形态复杂，钻探作为普查勘探圈矿手段。网度打到$20\times20m^2$、甚至$10\times10m^2$，花费了大量人力物力和财力。开采结果表明，对大多数矿体仍不能控制其产状、形态和规模，直接影响储量计算。例如某矿群的27号和28号矿体，原圈定为两个北东85度方向分布的似脉状矿体，开采结果实际为四个单独小矿巢，储量误差大于60%。四个独立小矿巢的长轴方向均与原圈定矿体走向几乎相差90度。

利用钻孔电磁波法在$20\times20m^2$钻探网距间工作。在ZK2173和ZK2169剖面测量中，根据所测资料处理结果，推测ZK2173孔见矿的延伸并发现盲矿。在两孔间布置验证孔ZK2165，预计该孔在234.5m—244.5m深度将见厚10m的盲矿。钻探结果除打到了ZK2173延伸的27.62m原矿层外，在234.25m至242.87m打到厚8.6m的盲矿。盲矿上界面和推测深度仅差0.25m，厚度差1.44m。

以钻孔电磁波法为主配一台钻机，在萨尔托海矿区22群西部两个见矿地质孔基础上圈出一个长度近100m，最宽部位31m（钻探证实为27.62m）的一个主矿体并在该矿体下方发现一较大盲矿。追圈这些矿体主要工作时间三个半月，获铬矿储量近10万吨。

例2 西藏香嘎山铬铁矿勘查应用实例

1983年物探所与西藏物探队，西藏地质队合作在香嘎山铬铁矿区十六群开展工作。该矿群ZK45孔见矿总厚度41.4m，单层见矿最厚为37.81m。四周相距40m勘探线上的四个钻孔：ZK46、ZK47、ZK66、ZK13均未见到1m以上的矿层。ZK45所见矿体的产状、走向、规模无法确定。搞清该孔所见矿体产状对全区找铬铁矿有十分重要的指导意义。

通过钻孔电磁波法查明了ZK45中矿体在电波法透视范围内的走向、倾向、倾角，并计算了矿体延伸。资料处理结果表明，ZK45孔矿体向ZK67方向延伸15m，向ZK66延伸12.5m，总宽度27.5m，向北东倾斜，向ZK46孔延伸31m。在ZK45—ZK46剖面内距ZK45孔20m处布验证孔ZK1。结果在85.94m—111.83m

打到致密块状铬铁矿，厚 25.89m，从而证实在该矿区钻孔电波法的有效性。

此外，钻孔电磁波法在铁和其它多金属矿床上的应用也卓有成效。如黑龙江某铁矿上的应用，广东省某多金属矿床上的应用，对矿体的产状，延伸的推断结论均为钻探所验证。

三、钻孔电磁波仪在煤田矿井防治水患中的应用

煤炭是我国主要能源，煤田开采阶段是出经济效益的主要阶段。我国许多煤田矿井的开采都有受水威胁的问题，华北地区的一些矿山都受下部奥陶系灰岩水的威胁，大小突水事故时有发生，危及国家财产和人民安全。例如，唐山附近的开滦矿务局范各庄煤矿，1984 年 6 月 2 日大突水，水量达 2053m^3/min，是世界采煤史上罕见的大突水灾害，仅 20h55min 就淹没了生产 20 年、年产 300 万吨煤的大型煤矿，造成国家直接损失 5 亿多元。矿井防治水的首要任务是把隐伏的水源通道找出来，以后才能有效治理。深度在 200m 以下的水源通道难以用地面物探方法查找，钻探作为勘查手段也有局限性。水源通道可能是裂隙带，喀斯特溶洞，形态复杂多变，钻孔控制范围小，完全可能漏掉水源通道。在煤矿防治水工作中，经常要在深部、厚度仅数米的薄层灰岩中探查水源通道。

以地下电磁波法为主配合测井温等其它地下物探方法，形成了一套矿井防治水工作中探测水源通道的技术。以下是几个应用实例：

例 1 峰峰四矿垂直水源通道的勘查实例

河北邯郸峰峰四矿是个开采了 40 多年的老矿井。上部地层中煤炭已基本采完。1984 年统计，实际可采储量只能维持到 1987～1988 年。若不解放下部受水威胁的三层优质煤层，该矿将很快关闭。该矿区一直被认为是水文地质条件十分复杂的地区。煤系地层下部奥陶系灰岩中含有大量的水，距下面三层优质煤的最下层下架煤层有 25.5m，距中间一层大青煤层有 32m，距小青煤层 60m。在大青煤层顶板分布一层厚约 5m 的大青灰岩。该层灰岩富

水性强，导水性好，由奥灰水补给，水量极丰富。1972 年 5 月井下施工大 6 孔时，单孔涌水量达 14.9t/min。因担心突水淹矿，下三层煤一直未开采。为查清水源，水文地质人员组织了十次放水试验，历时十二年，而准确出水地段难以肯定。

钻孔电磁波法勘查发现，在注 4 孔和水 29 孔之间，大青灰岩中存在一个裂隙发育地带。在该裂隙发育地带布打了注 9 孔和注 10 孔。从注 9 孔对各方的电波透视及井温测量资料处理表明，它就处于导水裂隙通道中心。

上述结论为以后的注浆封堵通道进一步证实，9 孔和注 10 孔两孔注水泥量达 2116t。水位平均下降 90m，注浆堵水效率达 90% 以上。据四矿统计并经评审会核实，共节省了原计划施工的四个钻孔 1440m 进尺计 14.4 万元，水量减少了 370t/min，每年可省电费 392 万元。解放了受水威胁的煤炭工业储量 916 万吨。峰峰四矿服务年限延长十年以上。

例 2 淄博龙泉煤矿被淹矿井突水通道的勘查实例

淄博矿务局龙泉煤矿 1030 采区 149 工作面在开采第十层煤时突水，淹没了 1030 和 1040 两个采区。为了防止水位继续上涨淹没其它地区，每日排水不止。为堵注涌水，龙泉煤矿在开展地下物探工作以前，已施工了五个注浆钻孔，注 1、注 2、注 3、注 4、注 5 孔。注了 2257.1t 水泥，60.65m³ 水玻璃，还有其它物质，但堵水效果不显著。为什么注了这么多物质没有起到堵水的作用？问题是水源通道在哪里？

根据地下电磁波法资料处理结果分析，并参考其它地下物探资料。建议应将注 1 孔钻探编录的断层位置 470.9—475.6m 改正 454—458.5m，上移了 17m。正确的断层位置被钻探时下置的 24m 套管封住，所以以前注浆对这一通道不起作用。矿上根据建议去掉套管，然后填石子、注浆。井下突水量由 14.42t/min 减至 0.15t/min。每年可节费排水电费 201 万元，节省钻探工作量，解放可采煤 66.6 万 t，延长矿井服务年限 1.5 年。

例 3 河南鹤壁建设煤矿突水通道的勘查实例

河南鹤壁建设煤矿 1985 年 11 月突水，平均水量 43.1t/min，除淹了该矿外，还淹了鹤壁矿务局西井，并威胁鹤壁矿务局主要矿井六矿（已进水）。

通过钻孔电磁波法等地下物探方法查明了突水地段，后该矿打了三个堵水孔堵水，水量减至 1.5t/m。取得了如下经济效益：

1. 原计划打 13 个钻孔，进尺 4290m，只用了 1207m，节约了 3083m，计 46.77 万元；

2. 每年可节约排水电费 168.77 万元；

3. 保证了鹤壁矿务局、主矿井六矿的安全生产，及时恢复了八矿西井的生产。

综合上述三个矿区，已节省钻探进尺 4523m（龙泉矿未统计在内），合 60.64 万元；每年节省排水费 761.77 万元；解放煤炭工业可采量 982.6 万 t，可创产值 2.95 亿元，延长了矿山服务年限：山东龙泉矿 1.5 年，峰峰四矿 10 年以上。保证了五个矿井恢复或安全生产。

四、坑道电磁波仪在煤田开采中的应用

坑道电磁波透视法的应用已成为综采工作面必不可少的预测预报的先进手段，许多局矿已列入规范和标准化矿井的一项内容。采用坑道电磁波仪探测工作面地质小构造的经济效益直接或间接地体现在以下几个方面。

（一）为合理布置回采设备提供依据

先进的综合机械化回采设备及其它高档机械回采方法，在我国煤炭工业生产中，发挥着重要作用。据悉，我国煤炭产量有三分之二依靠现代化回采设备生产。科学地合理地布置和使用回采设备是关系到我国煤炭产量稳产高产的重大问题。

坑道电磁波仪作为先进的物探手段，可以预先探明回采工作面影响生产的各种地质构造并提出较准确的预测预报，为合理部署回采设备和开采方法提供可靠依据。从许多实例看经济效益是可观的。

例 1 峰峰矿务局孙庄矿 12235 工作面变更开采设计实例

走向长 500m，采长 150m，煤厚 3m，工作面巷道未揭露较大断层，矿上准备上综采设备。地质部门采用坑道透视预先对工作面进行探测发现工作面内有一个异常区，走向长 150—200m。预测预报会严重影响回采，为证实这种预测结果，按照坑透结果进行钻探，证实有三条隐伏断层存在，成为无煤区，据此矿方决定改综采为炮采。后回采证实坑透结果是正确的，避免了因地质构造不清盲目上回采设备可能造成的严重损失，估算间接经济效益达 550 万元。

（二）为合理布置辅助工程量提供依据

以往在采区或工作面内地质情况搞不清的情况下，往往需要布置一定的巷探或钻探工程量以探明未知的地质构造，但有时会产生盲目性，无效工程量和进尺占很大比例，造成经济损失不计其数。在具备透视条件的情况下，使用坑透法探测，可以取代不经济的辅助工程量或为合理布置工程量提供依据。

例 2 西山矿务局西煤矿 602 综采工作面陷落柱异常探查实例

走向长 950m，采长 120m，煤厚 3m。计划布署英国进口综采设备，为探明工作面内有无陷落柱存在，矿方在上下巷道内每隔 20—30m 布置一个钻孔位，计划钻探工作量 7995m。

开工之前，采用坑透法对整个工作面进行了探测，发现工作面中部存在一个陷落柱异常，推断直径 30m 左右。其它地段为正常区，根据这一预测预报，生产部门布置了少量的钻探工程量及巷探，证实了陷落柱的存在，从而节省了大量的钻探工程费用，直接经济效益 15 万元。在预先采取措施的情况下，保证了综采的顺利进行，多出了煤 5 万 t 左右，价值 100 多万元。

（三）减少煤炭资源损失，提高回采率

在开拓掘进中，由于地质构造不清，难以准确推断地质构造的边界位置。构造与构造之间的相互关系，因而造成许多废巷、无效钻探工程以及开切眼位置布置不合理，煤柱保留过大等情况，损失大量煤炭资源，降低了回采率。

例 3 肥城矿务局杨庄煤矿 8104 工作面

1986 年 10 月，煤炭部生产局地测处在肥城杨庄召开山东省物探传播会期间，采用坑道透视法在该矿 8104 工作面进行了探测陷落柱及其含水性预测试验。坑透结果预测 3 号陷落柱长轴不大于 30m，短轴不大于 20m 且不含水。矿方地质推断该陷落柱长轴 130m，短轴 60m。按照有关文件规定："在有陷落柱地区是煤层受水威胁特别严重的突水区，要及时探明和确定陷落柱的空间尺寸，开采时留足煤柱"。

1987 年 3 月，3 号陷落柱及其它构造已得验证，3 号陷落柱长轴 30m，短轴 10—13m。矿方在验证报告中提到的经济效益：与不探测相比，可为国家多出煤 15 万 t，按当时价 30 元/t 计，产值 450 万元。

五、地下电磁波仪在工程地质中的应用

（一）在铁路工程中的应用

例 1 我国铁路有关部门已应用地下电磁波法勘查铁路路基、隧道附近的岩溶、断裂构造，并取得好的效果。如 1988 年 6 月物探所受铁道部第三设计院邀请，与该院物探队合作开展地下电波法，勘查第四座黄河铁路大桥桥墩岩溶工作。采用单孔、双孔结合，孔间透视和钻孔对地面透视，查清了该岩溶的分布情况，并为地质所验证。

（二）在工程地质方面的应用实例

例 2 1985 年在内蒙古平庄矿务局五加煤矿，在河下采煤，采后裂隙带高度发育，进行勘测，取得成效。

例 3 1987 年完成了准备作为亚运会水上项目比赛场地、北京郊区平谷县海子水库大坝渗漏段的勘查工作。

例 4 1989 年开始进入香港地区，进行高层建筑物地基探测，效果显著，至今工作不断。已做了十多个工程，直接创收二百多万元。

第四章　地下电磁波仪产品介绍

为了适应地下电磁波方法研究和生产实践的需要，地矿部、二机部、煤炭部工厂都曾批量生产过各种型号的地下电磁波仪。随着技术的发展，有的型号仪器现在已不再生产和使用。为了反映出电磁波仪的发展过程，下面将曾定型并由工厂生产的地下电磁波仪产品作一介绍，使读者对电磁波仪有一个全面的了解。

已正式投入生产的仪器有：

一、JWT-1 型钻孔无线电波透视仪

该仪器由地质部物探所研制，上海电子仪器厂、物探所实验工厂都有产品。

主要技术性能：

1. 发射机技术指标

①工作频率：1、3、5、8、10MHz 六个频点；

②发射机输出功率：12W（±2W）；

③频率稳定度：不低于 10^{-5}（晶体稳频）；

④功耗≤60W；

⑤工作环境温度 −5℃ ~ +40℃；

⑥最大测深（充水孔）1000m；

⑦仪器尺寸：仪器主体长 1600mm，直径 42mm。

2. 接收机技术指标

①灵敏度　0.5μV；

②测量范围　0.5μV~10mV；

③中频频率　465kHz；

④功耗≤30W；

⑤其余指标与发射机同。

60 年代，70 年代中期以前的许多电波透视工作都由该型仪器完成，现在这种仪器已不再生产和使用。

二、JWT-2A 型钻孔无线电波透视仪

该仪器由地矿部物探所与二机部三所、上海电子仪器厂协作研制，与重庆地质仪器厂协作生产。该仪器特点是：接收机灵敏度高（0.03μV），频率范围宽，测量范围大等。用于跨孔无线电波法。主要指标有：

1. 发射机技术指标

①工作频率：0.9、2.9、5.9、10.9、20.9、30.9MHz 六个点频；

②输出功率：0.9—10.9MHz 大于 10W，20.9、30.9MHz 大于 5W；

③频率稳定度，开机一小时后不劣于 1×10^{-7}；

④开机特性：开机 20min 后仪器即能正常工作；

⑤功耗≤40W；

⑥工作环境温度－10℃—＋40℃；

⑦最大测深：1000m；

⑧仪器尺寸：井下仪器∅40×1900mm²，地面仪 260×170×80mm³；

2. 接收机技术指标

①接收机灵敏度，优于 0.05μV（$S/N\geqslant6$dB）；

②测量范围　0.05μV—100mV；

③功耗≤20W；

④其余指标与发射机同。

该型号仪器服役于 70 年代中、后期及 80 年代初期，目前已不生产。

三、JWQ-3A 型钻孔无线电波仪

由地矿部物化探所研制和生产，其特点是轻便，自带电源下钻孔，可做跨孔透视亦可做单孔测量。

主要技术指标如下：

①工作频率：0.5、1、2、4、8、16、32MHz，用石英晶体稳频；

②发射机输出脉冲功率>1W；

③接收机输入端噪声电平≤0.2μV；

④接收机测量范围 0.2μV--30mV 以上；

⑤接收机测量误差　小于±3dB；

⑥功耗：发射机探管 11 节 2 号电池，20mA；接收机探管 7 节 2 号电池，30mA；接收机控制面板　2 节 6F 229V 积层电池，3.5mA；

⑦尺寸：发射机探管　∅36×1110mm²，接收机探管　∅36×1110mm²，控制面板　　160×100×50mm³；

⑧井下探管密封性能≥120×1.01×10⁵Pa（120 大气压）；

⑨环境温度　0℃--50℃。

JWQ-3 型地下电磁波仪因其轻便、省电，能做单双孔测量等特点，在电波法扩大应用于其它领域，特别是 80 年代以来在工程方面的应用受到欢迎。目前这种仪器仍有产品出售。

四、JW-4 型地下电磁波仪

JW-4 型地下电磁波仪是地矿部物化探研究所和北京计算中心合作研制的地下电磁波法新系统，DXDB-ZK 的数据采集系统，是第三代地下电磁波仪。具有单孔和双孔测量能力，可适应小口径钻孔，轻便等适合野外工作的特点。

JW-4 型地下电磁波仪采用了微计算机、频率合成、功率合成等现代电子技术，具有宽频带程控扫频功能，能自动、迅速地获得大量信息。作为地下电磁波法的数据采集系统，与数据处理解释系统（地下电磁波法数据处理工作站）配套形成从数据采集到数据处理、解释、成图一体化的智能化系统。

JW-4 型地下电磁波仪包括钻孔发射机、钻孔接收机、地面数据收录控制器和分段地下天线。

数据处理解释工作站包括能对资料进行直线交会、层析成像、全息处理、双孔多频反演、图形等子系统。

JW-4 型地下电磁波仪的主要性能指标：

工作频率　扫频范围　0.5--32MHz；

扫频间隔	0.1　9.9MHz；
发射机输出脉冲功率	10W；
接收机灵敏度	输出端噪声电平＜0.2μV；
接收机测量范围	0.2μV—30mV；
接收机测量误差	＜±3dB；
钻孔仪密封性能	150×1.01×10⁵Pa（150大气压）不渗水；
工作环境温度	钻孔仪　5℃—45℃， 地面仪　0℃—45℃；
尺寸：钻孔仪	∅40×1400mm³；
地面仪	26×12×22mm³；
功耗　发射机	9.6V　200mA，
接收机	8.4V　＜200mA，
地面仪	7.2V　～100mA；

地面数据收录控制器：键盘操作控制钻孔发射机和接收机的工作方式，对数据进行测量，液晶屏显示，64K内存，音频磁带外存，RS-232口与处理系统的计算机通讯。

JW-4型地下电磁波仪及DXDB-ZK地下电磁波法系统1991年通过地矿部组织的技术鉴定。鉴定委员会认为："该系统的研究成果整体上达到了国际先进水平，建议迅速投产，形成批量产品，推广应用。"目前该系统已列为地矿部85重点科技成果推广项目，同时已批量生产投放市场。

五、WKT-Ⅲ、WKT-D型坑道无线电波透视仪

该仪器由煤炭部河北煤研所与地矿部物探所实验工厂协作研制、生产。主要用于煤矿井下探测采煤工作面内的陷落柱、断层、破碎带等地质构造，也可用于其它金属矿床的井下探测。

主要技术指标：

1. WKT-Ⅲ

接收机

①防爆方式：矿用本质安全型

②工作频率：0.5、1、1.5、3.0、6.0MHz；

③灵敏度　（信噪比 3：1）　优于 0.1μV；

④测量范围：0—10dB；

⑤测量方式：最大值测量；

多方位测量：间隔 15°，每测点观测 12 个方位；

⑥终端形式：数字显示，机内存储，通过 PC-1500 计算机打印输出或转录磁带；

⑦天线型式：铝屏蔽环形天线；

⑧整机功耗：小于 1W；

⑨重量：5kg。

发射机

①防爆形式：矿用本质安全型；

②工作频率：0.5、1.0、1.5、3.0、6.0MHz；

③输出功率：2W；

④工作方式：脉冲调制；

⑤天线型式：框形软天线；

⑥整机功耗：小于 1.5W；

⑦重量：5kg。

2. WKT-D 型

接收机：矿用安全型　Exibl（150℃）

技术指标与 WKT-Ⅲ型接收机相同。

发射机：隔爆型　标志“Exdl”

①工作频率：0.125，0.5MHz；

②输出功率：15W；

③工作方式：脉冲调制；

④天线形式：框形软天线；

⑤整机功耗：≤7W；

⑥整机重量：5kg。

结 束 语

地下电磁波仪的研制和方法研究，最初是以地质找矿为目的（主要是金属矿）。自60年代起在这一领域取得了显著的地质效果和社会效益、当时并不重视经济效益的统计。

70年代以后，地下电磁波法已不限于本部门地质找矿，扩大应用于铁道、煤炭、水电、冶金、建材、工程等部门。注重地质、社会效益的同时开始重视经济效益。

地下电磁波仪器，在扩大应用领域的同时，很早就进入市场。70年代初期已开始进入国际市场，第一批JWT-1型钻孔无线电波仪和坑道无线电波仪作为地矿部首批援外仪器援助阿尔巴尼亚。80年代物探所与匈牙利合作，应用钻孔电磁波法探测铝土矿卓有成效。80年代末至九十年代以来，钻孔电磁波法进入香港地区，在勘查高层建筑地基等工程地质领域应用中一直享有很好声誉。

地下电磁波仪自60年代定型投入生产，三十年来，作为产品，不断创造着可观的直接经济效益。

JWT-1型钻孔无线电波仪60年代由物探所和上海电子仪器厂、实验工厂生产销售40余台。

JWT-2型钻孔无线电磁波仪由物探所和重庆地质仪器厂生产销售30余台。

JWQ-3型地下电磁波仪由物探所、实验工厂几批生产销售近40台。

90年代问世的JW-4型地下电磁波仪现在已推广和投入市场。

钻孔电磁波仪销售量愈百台，创产值数百万元。

煤炭部几家研究所投产的坑道无线电波仪销售已超过百台，产值数百万元。

现在，JWT-1 型和 JWT-2 型钻孔无线电波仪已不再生产。JWQ-3 型仪因其轻便、操作简单等优点在继续使用，并有一定的市场。

JW-4 型地下电磁波仪处于推广应用阶段，正为用户所熟悉，会因其好的性能和指标，具有广阔的应用前景和很大的开发潜力。

地下电磁波仪器和方法的应用和发展正方兴未艾。除地质找矿外，工程物探这一广阔应用领域还有许多工作需要我们去做。电磁波法在石油勘探、环境保护、考古、农业找水等部门的应用目前还是空白，等待我们去开发。

第十八篇

放射性测量仪器

李家俊
于铭强 编著

前　言

放射性测量技术（仪器和方法）是在近代研究和探测天然及人工放射性过程中发展起来的。放射性测量技术在矿产普查勘探、放射性监测、地震预报、科研和国防军事等许多部门已获广泛的应用，取得了显著的社会效益和经济效益。

为使社会各界了解放射性测量技术的原理、应用及效果，我们编写了这本小册子。主要面向非地质行业技术经济决策人员、各行业和部门的领导及工程技术经济专家等，也可供各有关院校师生参考。

本篇由李家俊同志执笔、于铭强同志进行修改和补充，并请刘腾耀同志审定。共分三章。第一章主要阐述了放射性测量仪器的发展和在国民经济中的应用领域；第二章介绍了放射性测量仪器的基本工作原理，并结合国内外该类仪器的现状，介绍一些新型仪器；第三章通过仪器在各领域中的应用原理和范例，分析其社会和经济效益。

本书在编写过程中，承蒙核工业总公司北京地质研究院、核工业航测遥感中心、上海电子仪器厂等有关同志的帮助，在此仅致谢意。由于作者水平有限，本书难免有不当之处，敬请读者批评指正。

作　者

1994 年 12 月

目　录

第一章　概论 …… (103)

一、放射性和放射性元素 …… (103)

二、铀和放射性测量仪器的发展 …… (103)

三、放射性测量仪器的应用领域 …… (104)

第二章　放射性测量仪器 …… (106)

第一节　仪器基本工作原理 …… (106)

第二节　辐射探测器 …… (107)

一、电离型探测器 …… (107)

二、闪烁型探测器 …… (108)

第三节　常用的新型放射性测量仪器 …… (108)

一、航空放射性测量系统 …… (109)

二、汽车γ测量系统 …… (111)

三、地面γ测量仪器 …… (111)

四、γ测井仪器 …… (115)

五、测氡仪器 …… (116)

六、热释光剂量仪 …… (118)

七、X射线荧光仪 …… (119)

八、地化测铀分析仪器 …… (120)

九、多道分析仪 …… (120)

十、标定设施 …… (121)

十一、其他放射性测量仪器 …… (123)

第三章　放射性测量仪器的应用和社会、经济效益分析 …… (124)

第一节　放射性测量仪器的应用和范例 …… (124)

一、勘查放射性矿产 …… (124)

二、勘查非放射性矿产 …… (134)

三、进行地质研究和填图 …… (128)
四、采样地震 …… (129)
五、环境与核设施放射性监测 …… (129)
六、其他 …… (131)
第二节 社会、经济效益分析 …… (132)
主要参考文献 …… (134)

第一章 概 论

一、放射性和放射性元素

1896 年天然放射性元素的发现，拉开了揭示原子内部奥秘的序幕。原子是保持元素化学性质的最小微粒，中心为原子核——由带正电荷的质子和不带电荷的中子组成，核外有带负电荷的电子沿一定轨道绕核运动。由于原子核中质子数和中子数的比例存在一定的规律，故任何有过多质子或中子的原子核都不稳定，会自发地放出某种射线（α、β或γ）转变成另一种原子核，这种变化即为放射性衰变。物质能自发放射各种射线的性质被称为放射性，能放出α或β或γ射线的元素为放射性元素。

自然界有三个天然放射性系列：铀（U）系、钍（Th）系和锕铀（AcU）系，及一些不成系列的放射性元素；用人工放射性方法得到了已从自然界中消失了的镎（Np）系元素。1939 年发现了核裂变。中子与某些重原子核作用时，重核分裂成两个较轻的原子核，并释放出大量的能量（一公斤放射性元素铀核裂变放出的能量，相当于 2500t 煤燃烧所发出的热量），引起了人们极大的关注。

二、铀和放射性测量仪器的发展

铀是产生核能的裂变物质，在国防和民用两个方面都有重要作用。50 年代，铀主要用于军事目的，制造原子弹及各种核武器；进入 60 年代，开始用于发电，解决未来的能源问题。由于对铀需要的逐渐增长，放射性测量方法和仪器也就不断地发展和完善，并在铀矿勘探中发挥了重要作用。

放射性测量仪器主要由探测器和操作台两部分组成，前者探测各种射线并将之转换成电信号，后者对电信号作电路技术处理，进行显示和记录。共同达到测量放射性物质的目的。早期使用的探测器是盖革-缪勒（GM）计数管。

50年代初，随着碘化钠晶体伽马探测器的发展，放射性测量仪器开始采用闪烁晶体，凡被NaI（Tl）晶体吸收的γ光子，均可计录下来。由于这种探测器的低能响应好，使仪器的测量灵敏度有了显著的提高，但当时的γ辐射仪仍局限于总量测量，采用脉冲电路技术，率表显示。在放射性气体测量方面，开始使用金箔静电计和静电计电离室直接抽取土壤气瞬时测氡，通过测量电离电流的强度来确定放射性的强弱。

60年代，γ能谱仪兴起，开始测量放射性元素的地球化学含量及其分布，选择γ射线特定的能窗进行计数，就地测定地表及钻孔中钾、铀、钍γ射线的当量含量；并外延到铀矿勘探以外（地质填图、辐射本底及危害评价等）的领域应用。仪器均采用数字显示，并由显示脉冲数发展到直读当量含量。为了提高测量的稳定性和精度，电路普遍采用有源稳谱技术。氡的常规测量开始使用硫化锌闪烁室，并相继出现累计测氡（含子体）的活性炭吸附测量仪，α测量仪、径迹扫描仪及热释光测量仪等许多仪器。

70年代，世界范围内开始大面积地进行系统而迅速的放射性测量，使用了装在汽车上的总计数仪器或窗式能谱仪的汽车测量系统，采用纸带记录器和数字磁带机记录来自伽马测量仪器的信号；使用了装在飞机上的高灵敏γ能谱测量系统，采用方晶体[NaI（Tl）]组和光电倍增管构成的组合探测装置，信号被送到计算机控制的多道分析器完成磁带记录。测井仪器也在不断提高，除完善闪烁γ总量测井仪自动化程度外，又发展起了多用型轻便γ能谱仪构成的能谱测井系统，对各种影响因素进行自动修正的512道γ能谱测井系统，X荧光测井系统和不受放射性平衡破坏影响的各种直接测铀系统。同期，测氡出现了微处理机控制的多用型轻便射气仪和高精度的标定装置，及其他变种仪器。随着电子测量技术的不断发展和新材料的出现，放射性测量仪器在向数字化发展向智能化发展，功能在拓宽，正以更新的面貌出现。

三、放射性测量仪器的应用领域

随着放射性测量方法和仪器的日臻完善，使其在国民经济中

的许多部门中获得了广泛的应用。在矿产的普查勘探中，常用其寻找放射性矿物原料和伴有放射性元素的非放射性矿产（石油和天然气、金、铜、锡、铝及稀土元素等），并能用其进行地质研究和填图，探测地质构造和地下水等；在环境放射性监测中，常用其确定放射性污染源及其污染范围，监测水体、水源、空气及建筑材料等放射性元素含量，圈定氡的自然分布对人类健康能造成危害的地质环境；在地震预报中，提供震前明显的先兆信息；在国防和军事中，常用其寻找丢失的放射源，探测和圈定导弹坠毁地点，卫星放射性碎片散落，核反应堆事故的污染区及每种放射性元素的分布。此外，放射性测量仪器还在物质改性、测量灰分等方面得到新的应用。

第二章　放射性测量仪器

放射性测量仪器通过探测和记录 α、β 粒子和 γ 光子的数量，测定射线的能量。

第一节　仪器基本工作原理

放射性测量仪器种类繁多，但工作原理是基本相似的。仪器总体由探头和操作台两部分组成。探头包括探测器、前置放大和高压源、操作台主要电路为放大、甄别、整形、定标、率计及电源（图 2.1）。

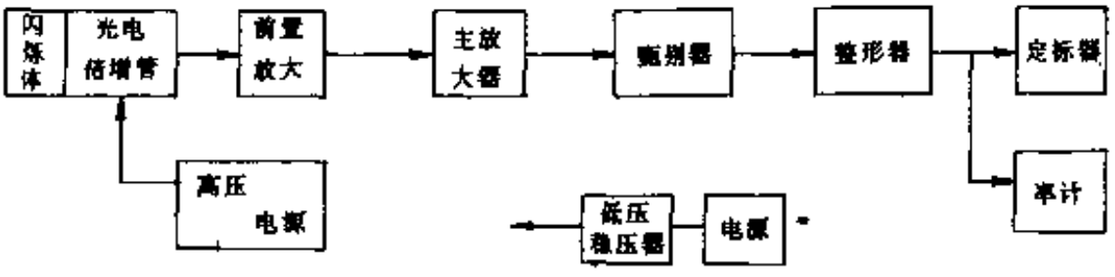


图 2.1　辐射仪基本原理电路方框图

当放射性射线作用于探测器的闪烁体，便会产生闪光，被光电倍增管转换为电信号，进入前置放大，然后由电缆传送到操作台；信号经主放大器后甄别，使具有一定阈值的信号通过，经过整形，将形状大小不一的脉冲信号变为幅度宽度相同的矩形脉冲，供定标器和率计电路记录、监听。野外放射性测量仪器，一般采用电池稳压供电，由直流电压变换器将直流低压变换为直流高压，作为探测器工作的高压电源。

第二节　辐射探测器

探测器是利用不同作用原理（效应），把辐射能转换成被记录的其他种类能量的装置，具体分为电离型和闪烁型。前者是利用辐射使物质产生电离效应，据其电离能力来探测辐射粒子的强度和能量；后者是利用辐射作用在闪烁晶体[NaI(Tl)，CsI、$Bi_4Ge_3O_{12}$……]产生闪光，由光电倍增管将其转变为电脉冲来探测辐射粒子的强度和能量。

一、电离型探测器

1. 电离室

射线与物质相互作用能使物质分子电离，通过加压电极，就能有效的把该范围内产生的电离离子收集起来形成电流，根据测得的电流强度可确定射线的强弱，这种装置谓之电离室。

（1）脉冲电离室

记录单个粒子的电离室。根据单位时间内产生数目的多少（记录辐射粒子的数目）来说明射线的强度；根据脉冲幅度的大小来说明辐射粒子的能量。一般信号幅度较小，不适于测量γ和β射线。

（2）电流电离室

记录大量辐射粒子引起总电离电荷的电离室。根据电离室检出平均电流的大小得知射线的强度，但不能探测入射射线的能量。常用来测量α射线的强度。

2. 盖革-缪勒和正比计数管

充有惰性或卤素等气体，装有阴极和阳极的密封玻璃管。极间施加高压后，入射粒子使气体电离、离子增殖引起放电，产生脉冲，由阳极负载输出。

盖革-缪勒计数管工作在极间电压的盖革区，输出信号大，灵敏度较高，可探测各种射线；正比计数管工作在正比区（极间电压较盖革区低），输出信号与原电离成正比，记录入射粒子的能量

范围宽，可用来探测低能粒子、γ射线、慢中子。在放射性测量中，主要是采用这种气体放电计数管记录β辐射。

3. 半导体探测器

为电场建立在电导率很低的半导体介质中的固体电离计数器。介质受射线照射后，便在其中产生空穴和电子，空穴-电子对被电场分开，分别进行收集，在外电路产生电流脉冲。一个粒子产生一个脉冲，故可用以探测入射射线。

常用的有锗、锂和某些元素的化合物（GaAs，CdTe……）探测器，特点是体积小且分辨率高，但也往往由于体积小而使探测γ射线的效率和灵敏度变低。有的还要在液氮冷却条件下才能工作和保存。

二、闪烁型探测器

又谓闪烁计数器。它是利用在射线照射下闪烁体发光来检测射线的装置。由闪烁体和光电倍增管组成，根据闪烁体的尺寸选择合适的光电倍增管，且彼此间保持可靠的光学接触。

1. 闪烁体

大致分有机和无机两类。常用有机闪烁体为蒽（$C_{14}H_{10}$）、三连苯（$C_{18}H_{14}$）、一般用来探测β射线的强度和能量；常用的无机晶体有用来探测α射线粒子的硫化锌［ZnS（Ag）］，用来探测γ射线强度和能量的碘化钠［NaI（Tl）］、碘化铯［CsI（Tl）］、锗酸铋（$Bi_4Ge_3O_{12}$）……等晶体。一般闪烁体闪光越亮越好，闪烁时间越短越好，输出的光子数要与入射粒子的能量成正比关系。

2. 光电倍增管

将闪烁体输出光子成比例地放大，并转变为电信号的器件。管子的阴极采用光敏化合物材料（Sb、Cs……），靠一系列光电倍增极实现电子增殖，然后，由阳极收集电子输出信号。

第三节　常用的新型放射性测量仪器

目前，国内外研制生产的放射性测量仪器中，有航空放射性

测量系统，测井、地面γ和γ能谱及射气仪等，型号繁多。有些仪器已采用微处理机控制，高精度、高效率。现分别作以下介绍。

一、航空放射性测量系统

航空放射性测量已由总计数率γ测量进入高灵敏γ能谱测量，所测参数多，并可根据U/Th或U/K或Th/K比值鉴别异常。高灵敏航放系统的特点是采用多个探头，使用小型计算机或微处理机控制，用数字、模拟两种形式记录和多种终端显示，并有各种自动记录、自动修正、自控自稳和自检电路。图2.2是现代高灵敏度航空γ能谱测量系统的方框图。新型的航测γ能谱仪使用由多块方晶体NaI（Tl）组成的航测探头，探测效率高，增益漂移小，本底低且分辨率好。还常采用下测/上测探头，上测探头用来消除大气氡对γ能谱测量的干扰影响。测量系统通常使用512道γ能谱仪，分别测量地表的γ辐射（下测探头）、大气氡（上测探头）和宇宙辐射。所测的能量范围为0—3.0MeV和3MeV—6MeV（宇宙射线）。各种信号均通过微处理机分别进行数字和模拟记录、光屏显示和打印输出。

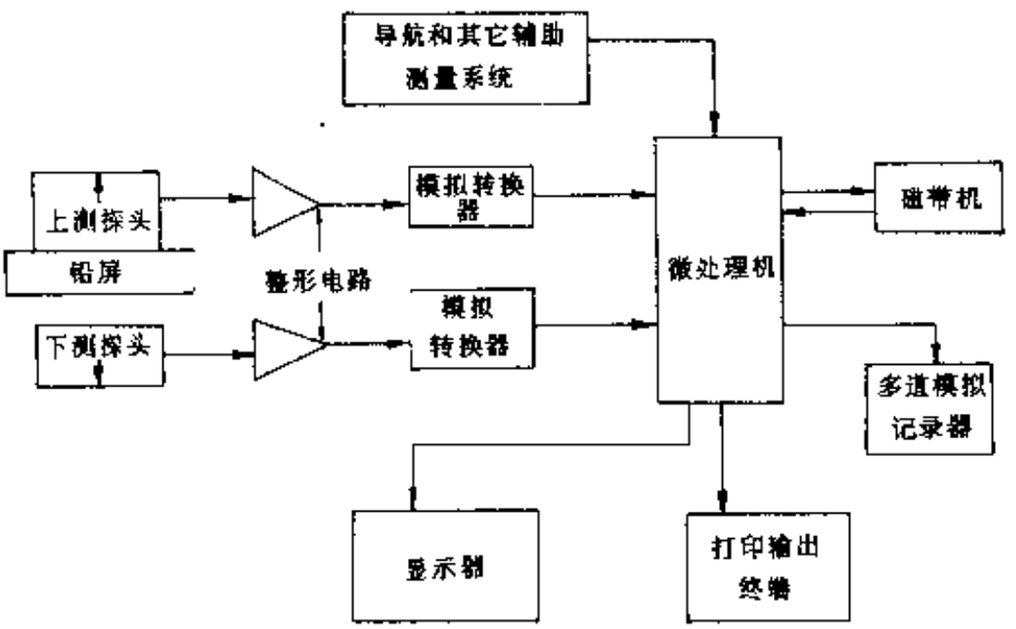


图2.2　航空γ能谱测量仪方框图

目前国外有多种性能较好的高灵敏航空γ能谱测量系统，其

中美国 GeoMetrics 公司的 GR-800 型、加拿大 Urtec 公司的 U-DAS、Seintrex 公司的 MCA-2、McPhar 公司的 Spectra Ⅱ 等均是用微处理机或小型计算机控制的 512 道高灵敏度航空 γ 能谱测量系统。国内核工业北京地质研究院研制生产的有 AS-2000 航空 γ 能谱仪，目前国内外多采用美国和加拿大产品，我国多用 GR-800 和 MCA-2 新型航空 γ 能谱仪，机装电子仪器和采集主要参数如下。

1. GR-800 航测系统

(1) GR-800γ 能谱仪系统。

GR-800 操作台为 512 道分析器；

GR-900 接口控制调整高压和温度；

DET 探测器为（上）256/2048（下）或 512/3072。

(2) G-803 或 G-823 航空质子磁力仪系统。

(3) G-714 或 DAS-8 数据收集系统（含 GAR-6 或 GR-33 模拟记录器）。

(4) 导航定位系统及外围辅助设备。

(5) 地面磁日变系统：采用 G-806 或 G-866 质子磁力仪和 G-724MP 或 Z-181 数字数据收录系统。

(6) 地面数据预处理系统，由 INTERDATA5/16 或 PDP11/23 小型计算机及外围设备组成。

2. MCA-2 航测系统

(1) MCA-2γ 能谱仪系统，包括 MCA-2 多道分析器，GSI-12 探测器接口，GSA-44（45A）探测系统。

(2) MAC-2 铯光泵磁力仪系统，包括 MEP-510 信号处理机，H10 型铯光泵探头和三线圈补偿系统。

(3) CDI-7 数据收录系统，由 CDT-7 控制数字接口，GR-33 图象记录仪和 P1C-100 外围设备接口控制台组成。

(4) HERI TOTEM 2A 甚低频电磁系统。

(5) PDS-4 电源分配系统和其他辅助设备。

(6) 地面基站：包括由 CDI-7 控制数字接口、DIGIDATA1640 磁带机等组成的地面数据校验基站；Scintrex MP-3 磁力仪基站和

VLF 基站。

3. PRIME-550 计算机数据处理系统。

该系统专为航空伽马能谱和航磁数据进行处理和自动成图，并能对数据作出统计分析和解释，软硬件配置较完善。

二、汽车 γ 测量系统

汽车 γ 测量已由 γ 总计数率测量进入 γ 能谱测量，具有仅次于航测的高效率。由于许多仪器公司生产的铀探测仪器均有很高的通用性，故任何有一定功能的 γ 辐射仪或 γ 能谱仪，配置相应的探头和记录器均能组成一套车测仪器系统。目前，在汽车 γ 能谱测量中也已开始采用恒温探头。

印度有一种以四道轻便 γ 能谱仪为主的新型车测系统，功能比较完善，通过可预置计数器能进行本底修正；通过模拟运算和用电位器进行标定，能进行康普顿散射修正；仪器采用单笔多参数记录器，通过能道开关转换记录技术，把 γ 强度分区段记录在纸带上，无需多笔式记录器记录。加拿大 Scintrex 公司生产的新型车测系统，由 GAD-6 型四道微分 γ 能谱仪、DP-2 数字打字机、TR-2 磁带记录器、CD1-2 控制器及 GSA-42 型探头组成，谱仪有康普顿散射自动修正电路，四道模拟输出和四道数字输出，通过 CD1-2 控制器（接口），打出或记录多道数据。

由核工业北京地质研究院开发，上海二六三厂生产的 GP-106 型汽车 γ 能谱仪，主机为 GAD-6 型轻便 γ 能谱仪，探头选用 NaI (Tl) 方晶体组（体积为 $100\times100\times480mm^3$）、主机通过 RS-232 接口与 PC-1500 微型计算机连接，完成数据采集记录和处理，实用性较强。

三、地面 γ 测量仪器

包括轻便 γ 辐射仪（总量）、γ 能谱仪（微、积分）和 γ 辐射取样仪等类型，每类仪器有许多型号，其功能和某些技术参数也有很大差别，且每年都有许多改进和发展。下面介绍几种新的各具特点的典型仪器。

1. 轻便 γ 辐射仪：主要用来测量地面岩石或土壤中的 γ 射

线。

GR-110 小型辐射仪是美国 GeoMetrics 公司新品。仪器内装有 4.5in³（1in＝2.54cm）的碘化钠晶体，具有 0.08MeV 和 0.4MeV 两个能量阈、灵敏度较高，有四位液晶显示，确保读数准确。另外，仪器可接不同的探头，适应不同的测量，并可外接模拟记录器、体积小、重量轻、耗电省、操作简便。

FD-3013 数字辐射仪和 FD-3014 数字两用仪是核工业上海二六三厂（我国地矿放射性测量仪器的专用生产厂）的产品。两者结构相同，参数相似。探测器均由∅30mm×50mm 碘化钠晶体和 GDB-23 光电倍增管组成，采用液晶数字显示，量程自动转换，输出读数可自动归一为 ppm eU（1 ppm eU＝$1.55\times10^{-1^{6}}$C/（kg·h））。前者为起始能量阈 40keV 的 γ 总量测量仪，具有较高的灵敏度（5cps/10^{-6}eU）；后者为 γ 积分式谱仪，具有＞40keV 和＞4000keV 两个总计数道，1.05MeV—1.90MeV 的铀道及 1.90MeV—2.95MeV 的钍道，能用来鉴别 γ 异常的性质。

FD-802 数字闪烁辐射仪是重庆地质仪器厂产品。探测器由∅30mm×25mm 的碘化钠闪烁体和光电倍增管（GDB-23）组成，两者之间用光导联接，探测器和操作台组合成一体，具有灵敏度高、性能稳定的优点，还能直读铀含量（$\times10^{-6}$）。

2. 轻便 γ 能谱仪：主要用来测量 γ 射线的能量。在天然产状下，可直接测定矿石、岩石中铀、钍和钾的含量。

UG-130 轻便积分 γ 能谱仪是加拿大 Urtec 公司的产品。它具有五个可变能量阈，分别用于测量一定阈值之上的 γ 辐射。仪器采用 56cm³ 的碘化钠晶体，五位数字液晶显示，读数用每秒脉冲数（cps）表示，最大测程 35000 脉冲/秒，自备 Ba-133 仪器校正源。

GRS-400 积分 γ 能谱仪和 GRS-500 微分 γ 能谱仪均系加拿大 EDA 公司产品，前者是具有五个可变能量阈的积分 γ 能谱仪，后者为微分 γ 能谱仪。GR-500 采用较大的方形晶体（124cm³），总道有两个能阈（0.08MeV 和 0.40MeV），微分道三个（1.35MeV--

1.59MeV，1.65MeV—1.87MeV，2.45MeV —2.79MeV），另有对Ba-133（0.5×3.7×10⁴Bq）0.352MeV峰进行自稳的校正道。仪器具有自动循环测量，自动报警和五位数字液晶多功能显示（脉冲/秒和电池寿命指示）。

GAD-6型四道微分γ能谱仪是加拿大Scintrex公司生产的一种多用型轻便γ能谱仪（上海二六三厂曾引进技术组装生产）。具有四道模拟输出和四道数字输出，配用不同的探头和其他有关仪器，可构成航测系统、测井系统和汽车测量系统等，功能较齐全。仪器采用Ba-133同位素源自稳，在正常的野外温度和计数率变化情况下，脉冲幅度稳定性为±1%，且具有康普顿散射自动修正电路，技术特性好。GAD-6既能作微分能谱仪使用，也可作积分能谱仪使用，积分用时，微分道的下限即是积分道的起始能量阈（总道0.15MeV —2.77MeV，钾道1.38MeV—1.56MeV，铀道1.66MeV—1.90MeV，钍道2.44MeV—2.77MeV）。

UG-140六道微分γ能谱仪是加拿大Urtec公司生产的一种新型多用γ能谱仪。可用于地面、汽车、航空γ能谱测量和γ能谱测井。突出的特点是采用较大体积的碘化钠晶体（148cm³）具有更高的灵敏度，增加了利用Bi-214高能峰和较低能峰测铀的道数，具有较高的稳定性和测量精度。

FD-3022微机四道γ能谱仪是上海二六三厂的新型γ能谱仪。探测器由∅75mm×75mm碘化钠闪烁体和GDB-76F光电倍增管组成，电路采用大规模和超大规模CMOS集成电路、液晶数字显示等器件，功耗小，温度系数小。仪器采用CS-137自动寻峰稳谱技术，避免了γ谱线的漂移，大大提高了仪器的稳定性，有较高的含量测量灵敏度（U为2—3×1.55×10⁻¹⁰C/(kg·h)、Th为3—5×1.55×10⁻¹⁰C/(kg·h)，K为0.5%）。

H-90A微机γ能谱仪是核工业北京地质研究院研制生产的，由一个控制台和带有∅75mm×75mm碘化钠晶体的探测器组成、能自动稳谱、自动定时测量，自动运算U、Th、K含量及其比值。设有掉电保护，手动或自动存储原始测量参数，并可重复读出或

通过 RS-232 接口与计算机连接作数据处理。全部工作由触摸式按键输入指定，单片机软件程序控制自动完成。

HF-91A 便携式微机多道 γ 能谱仪是华东地质学院研制的产品。特点是采用 256 道分析器和大屏幕液晶显示技术；除显示当量含量和计数率外，还能直接显示 γ 能谱线和进行各种实时处理；采用软件稳谱技术，排除了传统的有源稳谱低能测量窗口的影响；采用汉字操作菜单，使用方便，可随时提供各种出错信息指示。

3. γ 辐射取样仪

PS-872A 轻便定标器和 DS-1275 探头是美国 Mount Scpris 公司生产的配套 γ 辐射差值取样仪。PS-872A 定标器是一种多用途的轻便仪器，由数码管组成的六位数字显示读数，面板控制选用仪器的不同功能——配接多种探测器快速分析铀含量，土壤和水中氡含量及进行炮眼测量和 β-α 测量。在配接 DS-1275 探头时（探头中碘化钠晶体为 1.5in×1.0in（1in=2.54cm），带无锡的高强度青铜屏），将工作方式开关转到差值位置，仪器便能自动显示探头两次连续测量（带屏和不带屏）的差值，该值乘以仪器标定测定的换算系数，即为当量铀的 10^{-6} 值。

FD-3010β-α 测量仪是上海二六三厂产品。由六支 J-306β 计数管，前置脉冲成形器和高压电源组成探头，采用 CMOS 集成电路和四位液晶显示制作的小型化定标器为操作台。仪器具有快速扫描、读数归一、测量误差小（≤5%）一机多用等特点。配用不同探头，可进行岩矿心编录、进行浅孔 γ 测量、测定射气系数、岩石比重等。

FD-3025 微机 γ 定向辐射仪是上海二六三厂生产的单管又晶体补偿型 γ 辐射定向取样仪。一次定向测量 γ 辐射强度。探头中有主晶体（碘化钠）和副晶体（塑料），其间用锥形铅屏隔开。当 γ 射线与主、副晶体作用后，共同进入光电倍增管（GDB-44D）转换为电脉冲，由区分电路将主、副晶体各自产生的脉冲分开，达到定向测量的目的。由微机电路处理显示和打印。具有体积小、重量轻、定向灵敏、干扰辐射对被测辐射值影响小（≤10%）的特

点。主要用于辐射取样——确定铀含量。

四、γ测井仪器

γ测井仪器发展较快，总计数率γ测井仪实现连续测量和数字化记录之后，出现了γ能谱测井仪，相继高纯锗Ge（Li）探测器测井问世。采用天然γ能谱测量可确定铀、钍、钾三种元素的含量，但铀测量只直接反映镭含量、经平衡计数修正后才为铀含量，故为间接测铀方法。为了解决直接测铀的问题，国外出现了许多利用中子源（脉冲式中子管、^{252}Cf及其他中子源），通过裂变中子的探测直接确定铀含量的仪器；同时，为识别更多的元素，发展了荧光、中子次生γ能谱测量等多元素能谱测井仪。由于这些方法和仪器应用尚局限于一定范围内，目前广泛应用的仍为天然γ测井，方法简单、仪器轻便、生产效率高。

KUT型γ能谱测井仪是加拿大Seintrex公司生产的一种积木式仪器。核心是一台GAD-6γ能谱仪，组成部分包括控制器、数字打印器、盒式磁带记录器、绞车和探头。除后两者外，全部安装在一个防水地面操作台内。GSD-4S型探头内碘化钠晶体的体积为22cm³，有CLW-2和CLW-3型两种机动绞车，电缆高度分别为500m和1000m。仪器探头在井下稳谱后的漂移≤1%，绞车速度控制器往复测井深度误差≤2%，其他性能和功能同前GAD-6轻便γ能谱仪所述。

FD-3019闪烁γ测井仪是上海二六三厂生产的总量γ测井仪。采用碘化钠晶体（∅23mm×40mm）作探测器，起始能量阈为40keV，灵敏度为3cps/［1.55×10 ^{12}C/（kg.h）］，精度均方差≤±5%，数字显示与率表显示并存，并能自动转换量程，自动选时计数，达到等精度测量的功能，其最终读数能自动归一为每秒读数（cps）。测井深度可达1000m。

BSL-4001型伽马能谱测井仪是核工业北京地质研究院研制生产的新型测井仪。该仪器采用锗酸铋晶体（BGO=$Bi_4Ge_3O_{12}$）作γ探测元件，探测效率高，尤其对高能响应好。采用两个不同规格的晶体BGO-1（∅20mm×50mm）和BGO-2（∅20mm×20mm）

与 R-268 光电倍增管配套，分别测量不同含量级别的矿体。改用加拿大 GAD-6 四道伽马能谱仪作操作台，^{133}Ba 自动稳谱，测量道能量阈分别为 TC = 0.15MeV—2.77MeV，U_1 = 1.05MeV-1.50MeV、U_2 = 1.66MeV -1.90MeV、Th = 2.44MeV—2.77MeV；输出数据通过 RS-232 接口到 PC-1500 微型计算机，进行数据采集、运算、存储和打印。测井深度可达 1000m。

天然 γ 能谱、中子活化等核测井技术，已在石油、煤炭、金属矿勘探中起到了作用。近些年来，随着核探测技术和计算机技术的发展，和广泛应用，兴起了多元素测井——在钻孔中直接测定岩石的元素组成。美国斯仑贝谢公司(Schlumberger)的 GLT 型和 EGT 型仪器已投入石油勘探与开发的元素测井；普林斯顿伽马技术公司（PGT）型小口径多元素测井仪应用了高分辨率的高纯锗(HPGe)探测器和井下 4096 道幅度分析器。中国煤田地质总局浙江省煤田地质勘探公司和中国原子能科学研究院技术应用研究所研制成功高分辨率中子俘获伽马能谱测井系统，在钻孔中用中子源向地层发射快中子，使地层中产生中子俘获反应，放射出 γ 射线。采用具有高分辨率的锗半导体，探测俘获 γ 射线，进行特征 γ 能谱分析，求得对应的元素及其含量和研究解决有关的地质问题。该系统已在钻孔中直接测得煤和岩层中硅、铝、钙、铁、钾、钠、钛、碳、氢、硫、氯等 21 种元素及其含量，不仅为煤田地质勘探提供了重要的新手段，而且在油气田、金属矿床和水文地质勘探中都有着广阔的应用前景。

五、测氡仪器

主要测量土壤、水和大气中射气（$^{222}_{86}Rn$）浓度及氡子体中主要短寿 γ 辐射体（^{214}Bi、^{214}Pb、^{210}Tl）、α 辐射体（^{218}Po、^{214}Po、^{210}Po）。由于具体测量对象和方式的不同，仪器种类繁多。有射气仪（测氡仪）、α 测量仪（含 α 能谱、α 卡）、活性炭 γ 测量仪等。国外使用的多是两用或三用测氡仪，既能测土壤氡，也能测水中氡，还可以测量固体样品中的镭含量。新型微处理机控制的射气仪，有内存程序，自动完成数据采集、处理、修正、计算，并把脉冲数

/分换算成微微居里/升。下面介绍几种典型的仪器。

RD-200 型射气仪是加拿大 EDA 公司生产的多用型轻便闪烁射气仪。可在野外进行土壤层射气测量，也可与 RDU-200 型脱气系统配套测量水中的氡，配用过滤器测量氡子体。RD-200 射气仪由操作台、细管取样器，校正用闪烁室和一套测量用闪烁室组成。硫化锌闪烁室的灵敏面积为 14350mm^2、容积 170cm^3，对氡及其子体的测量灵敏度为 1.2 $\frac{1\cdot 2}{37}$脉冲·m^3/Bq（1 分钟后）。可手动或自动选择计数时间，五位发光二极管数字显示。RDU-200 型脱气系统是一种机械抽真空系统。由抽气泵、水样容器、干燥器和真空闪烁室（2ns、U=153cm^3）组成，三分钟内完成的脱气率可达 90%。

Alpha-Meter-400 是加拿大阿尔发核子公司生产的 α 仪，集电子探杯、存储器和读数仪三部分为一体累计测氡。α 仪采用的探测器是硅扩散结型的，灵敏面积为 400mm^2。硅探测器产生的信号微弱，需经低漂移高增益放大后被五位十进计数器记录，并根据指令用计算器型的显示器显示出来。该公司还生产一种 α 仪的数据处理系统，能同时与十个 α 卡仪相接，用微处理机控制数据自动采集和记录。

α 卡仪是加拿大生产的测氡子体 α 放射性强度的仪器。由 α 卡和 α 卡读数仪（或数据打字机）组成。χ 卡是两片 2in×1.75in（1in=2.54cm）的塑料薄片，中间开孔，两塑料片之间夹有一层镀铝的聚酯薄膜，用以收集氡的衰变产物；α 卡读数仪是具有两个扩散结型的 α 探测器，其间空隙用于置放被测 α 卡、测量 α 强度。有的 α 卡仪带微处理机和插件式存储器，插上后，α 数据打印机便可打出每个 α 卡的数据。上海二六三厂也生产类同仪器（FD-3012 α 卡仪），其探测效率≥50%。

南非原子能委员会研制的活性炭测量系统，由带有罩杯的活性炭吸附器和带有铅室的轻便定标器组成，用于测量氡子体的 γ 强度。活性炭吸附器为一个装活性炭和硅胶的塑料瓶，将其塞进

底部有圆孔的塑料罩杯内，埋置土壤中吸附氡；测量采用 MS-3 轻便型空标器和 SPA-2 型探头（∅25mm×25mm 碘化钠晶体），另加一个小型的铅室，设备简单，实用方便。国内核工业北京地质研究院曾生产类同仪器（BJS-391 活性炭测量仪），仪器能进行校正运算，自动扣除本底，自动记录，并以 CASIO HR-8 微型打印计算器作为终端显示。

FD-3016 闪烁测氡仪是上海二六三厂产品。仪器由硫化锌闪烁室（∅64mm×78mm），抽气泵、电动脱气泵（TDB-1 型）、取样器组成。样品注入闪烁室，α 辐射使磷光体产生游离作用，激发到高能级的电子返回基态时，能量转换为充电子辐射出来，光电倍增管产生电脉冲，放大甄别后计数显示。仪器灵敏度（换算系数）为 0.025×3.7Bq/（cpm·L）。此外，国内同类产品还有重庆地质仪器厂的 HDS-1 快速数字闪烁测氡仪，闪烁室为∅40mm×80mm，灵敏度为 0.2×3.7Bq/（cpm·L）。核工业北京二六一厂的 FD-125 氡钍分析器，可与负输入极性定标器配合使用，在闪烁器内充气一小时，测量时间为 100s 的条件下，测镭系数约为 1.4×10^{-13} 克镭/脉冲；采用测量时间为 300s，可准确测定万分之三以上的钍含量。

FD-3017 镭 A 测氡仪是上海二六三厂利用静电场收集氡子体（RaA）作为测量对象的新型便携式测氡仪。探测器采用∅26mm，面积为 531mm² 的金硅面垒型半导体探测器。抽气泵具有采取土壤中气样、水样，水样脱气和贮储收集氡子体的功能，极限探测灵敏度小于 0.1×3.7Bq/L，探测效率（2π）大于 40%，是快速、灵敏、准确的现场测量仪器。

此外，上海二六三厂还生产有 FD-3015 射气监测仪、FD-3005 低本底 α 测量仪；核工业长沙二三〇所生产有 WAY-80 五通道 α 测量仪，国内均有广泛的应用。

六、热释光剂量仪

当射线作用于固体物质时，使物质中的电子吸收能量，离开正常的位置而处于激发状态。当其回到原来位置时，便会发光

（释放多余的能量）。有些发光物质，由于自身晶格缺陷或掺有杂质等，形成所谓“能量陷井”，使射线照射产生的激发电子滞留储存在其中。只有受热时，陷井中的电子获得额外能量方才回到基态，能量以光的形式释放出来，谓之“热释光”。据其性质分为α热释光、γ热释光和天然热释光。测量的基本原理是利用对α和γ辐射灵敏的剂量探测器［$CaSO_4$（DY）；LiF……）累计测量α辐射（实为测氡变种）和γ辐射（γ测量变种）的热释光效应；利用天然矿物（本身即为探测器）在天然环境下经受各种辐射作用的热释光效应。仪器型号多，通用性好。

Harshaw-3000型热释光剂量仪和Harshaw-2271型自动热释光剂量测量系统均为美国哈肖公司产品。前者使用氟化锂剂量计的灵敏测程，为$10\times2.58\times10^{-7}$C/kg至$10000\times2.58\times10^{-4}$C/kg，前面板数字读数显示，后面板备有多种输出（记录和打印等）；后者采用计算机外部程序控制、为功能齐全、个人剂量监测用的自动热释光测量系统。核工业北京二六一厂生产有FJ-377热释光剂量仪，测量范围为2.58×10^{-6}C/kg—258×10^{-4}C/kg，自动校准灵敏度，自动调零点，自动扣除本底，可广泛用于辐射防护，环境监测，地质，考古等。

七、X射线荧光仪

X射线荧光仪是利用放射性同位素放出的X射线，激活岩石中的待测元素，致使产生特征X射线，据其能量区分元素，据其强度确定品位的人工放射性测量仪器，可实现一次多元素测量。

HYX-3微机X射线荧光仪是重庆地质仪器厂的产品。探头由激发源及防护屏、平衡滤光片和探测器组成，激发源采用两种^{238}Pu（$30\times3.7\times10^{9}$Bq）^{241}Am（$3\times3.7\times10^{10}$Bq），探测器元件为碘化钠晶体和光电倍增管；主机为400道脉冲幅度分析器，测量6keV—60keV能量的全微分谱，对SnK_α（25.2keV）测得的能量分辨率不大于60%，仪器具有键盘输入数据、测试结果、微机运行状态，错误类别指示等功能，自动化程度和测量精度较高。该厂生产的HYX-2轻便X射线荧光仪，上海地质仪器厂生产的

HY-4 型 X 射线荧光仪等均属同类产品。

BARS 3M、MARK-3M 和 Spectroscan-3M 荧光分析仪是原苏联 VNIIR 研究所的产品。前者采用 0.001BX-3 X 射线管，Ag、Cu、Cr、Mo 靶，可分析 Al-U（21 种）元素，灵敏阈（100s）为 $n\times10^{-3}\%$后两种仪器采用 BC-1 型 X 射线管，Ag、Cu、Re、Cr 靶，可分析 Ca-U 元素，灵敏阈（100s）为 $10^{-3}\%-10^{-4}\%$。这三种仪器均可通过 RS232C 接口与微机配套，就地分析各种元素，适用于多种技术领域，包括用于地质勘探的有关元素分析。

八、地化测铀分析仪器

UA-3 型铀分析仪是加拿大先达利公司的产品，是采用激光荧光方法直接测铀技术。用接近铀的特征激发波长（3650×10^{-10} m）的激光，照射液体样品，使铀原子基态跃迁到激发态，当返回基态时发出荧光。通常利用 5550×10^{-10}m 强的特征荧光带测量低含量的铀，仪器测铀灵敏度为 0.05×10^{-9}。

Ju-1 型激光测铀仪和 LMA-1 型激光微量物质分析仪是核工业北京地质研究院的产品。前者与 UA-3 类同，不再多述。后者，采用小型封闭式优质紫外脉冲激光器作光源，可对发光寿命在 1μs—10ms 的物质进行时间分辨的荧光分析仪，除可以高灵敏度分析铀外，还可分析其他许多痕量物质，对某些测量灵敏度可达 10^{-12}量级，应用范围相当广泛。

此外，这类仪器还有很多，象中子活化分析自动测量装置（如芬兰 Rapiduran），缓冲中子测量装置等。

九、多道分析仪

多道分析仪也称作脉冲高度分析仪，它与 γ 或 α 射线探测器相接则组成一种新的核物理仪器（多道能谱仪），广泛用于地质、元素分析、冶金、医疗卫生、海洋、环保等领域中。

不同的核素放出不同能量的射线，而通常使用的辐射仪探测的是被测物体放出各种能量的总效应。由于探测输出的电脉冲幅度与能量成正比，如在图 1 中自甄别器开始设置成 N 个分支，而且每个分支只接收一定高度范围的脉冲（称作“道宽”，或“窗

口"），那么 N 个连续的窗口，则可构成 N 道能谱仪。通常 $N=2^n$，所以常见有 512、1024、2048……道谱仪。

随着计算机技术的不断发展，当前较少生产单独的多道分析仪（硬件多道）。通常在微机内加装"多道卡"，使用多道仿真技术，在不改变计算机通用功能的条件下，使微机成为一台多道分析仪，且具有数据处理能力。例如，核工业北京核仪器厂生产的 BH1224 微机多道分析器，将包括线性放大器、模数变换器、微机接口的专用卡插入 286、386 微机扩展槽内，使微机具有多道的测量及处理能力。该系统由微机控制可选用 4096、2048、1024、512 道工作；增益 2、4、8、16、32 和 64 倍；其中的多道仿真软件可实时显示谱图，处理谱图（寻峰、平滑求全谱计数、求峰面积……），并可打印输出原始数据、处理结果、谱图和数据存取。国内具有类似功能的还有清华大学和核工业北京核仪器厂联合开发的 DD-90A 实际微机化多道分析器。中国原子科学研究院和上海原子核研究院等也有同类产品。

国外多道分析仪生产也颇多，像美国 EG&G 公司生产的 ADCAM300 伽马能谱分析系统，7500 型便携式多道分析仪和 CANBERRA 公司生产的 30 系列多道分析仪，都代表着当代多道的发展水平。

十、标定设施

伽马（射气）测量仪器均需进行标定测量换算系数，以便把仪器读数（经本底修正的）换算成地表放射性元素含量、土壤放射性核素的活度或环境照射量率。这种标定往往通过使用活度经过鉴定的放射性点源和体源进行。

（1）通常使用的伽马放射体点源^{226}Ra（复杂谱线），五号固体镭源（0.1mg）和六号固体镭源（1mg）。把伽马源悬挂或放置在一根细的垂直支杆上，使其产生均匀角度分布的伽马辐射，计算距点源不同距离 R（m）处的伽马射线照射量率 I（C/kg·s），从而标定出计数率（cpm）与照射量率的关系。此外，确定能谱峰位也常用伽马点源^{137}Cs（662keV）和^{60}Co（1173keV 和 1333keV）。

(2)通常使用的射气源为氡室和液体镭源($n \cdot 10^{-8}$—$n \cdot 10^{-9}$ g)，可采用循环法，真空法或累积法，把标准源中的氡引入探测器，从而求得仪器读数与射气浓度的关系（换算系数）。射气源在核工业北京地质研究院、核工业衡阳第六研究所、上海二六三厂等均有生产。

(3)天然标定场地。为岩石露头或地面平坦的地段，其钾、铀或钍的含量偏高，且放射性均匀。航空γ能谱测量以此作标定源（大体积源）来测定能谱窗灵敏度及其随测量高度增大的指数衰减值。核工业航测遥感中心在石家庄郊区有一条标准的动态测试带。

(4) 标定模型。为一块含有已知钾、铀或钍含量且分布均匀的大体积混凝土板，作为一种物理特性近似的理想地质面源体，用来确定就地的当量放射性元素含量。主要用于地质勘探和填图领域，但对环境监测仪器也极有价值。核工业放射性勘探计量中心根据国际原子能机构建议的标准，建立了一套适合国情的标准系列模型。按用途分为四类。

第一类：航空伽马测量标准模型，具有铀、钍、钾、混合和零值模型五个，主要用于标定航空伽马能谱仪和汽车辐射仪。

第二类：地面伽马测量饱和与非饱和模型，分别具有铀、钍、钾、混合零值模型五种九个，和铀、钍、钾、混合模型四种四个，主要用于标定地面伽马总量仪器、能谱仪器和调试检查仪器。

第三类：伽马测井，辐射取样饱和与非饱和模型，分别具有铀、钍、钾、混合、零值模型五种十五个，和铀、钍、钾、混合、零值模型四种六个，主要用于标定伽马测井总量仪，能谱仪和辐射取样仪。

第四类：叠层式参数模型，具有铀、钍、零值三种模型1039块，可根据需要组合成不同矿层厚度、不同钻孔直径、不同倾角的模型，主要用于参数研究，测定钻孔中铁、水吸收系数，测定不同孔径、倾角、厚度条件下的矿层标准曲线，为测井定量解释提供参数。模型种类见下表。

标准模型种类及数量表

模型种类	规格		饱和度	密度	数量（个）					备注
	形状	几何尺寸	（%）	（g/cm³）	铀	钍	钾	混合	零位	
航空	正六边形	边长 7m 厚 0.5m	≥84（米高）	≥2.2	1	1	1	1	1	2π 测量
地面	圆柱形	φ2.2m×0.6m	≥94（0.05m 高）	≥2.0	2	2	2	2	1	2π 测量
		φ0.2m×0.1m	≥15	≥2.0	1	1	1	1		
测井	立方体	$(1.2m)^3$	≥99	≥2.0	6	4	3	3	1	中心有 φ89mm 钻孔 2π、4π 测量
		$(0.4m)^3$	≥75	≥2.1	2	2		1	1	
叠层	长方体	$(1.5m)^3$	≥99	≥2.0	2	1			1	由 $0.5\times0.5\times0.1m^3$ 和 $0.5\times0.5\times0.5m^3$ 模块组成 4π、2π 测量

十一、其他放射性测量仪器

人们为了能够观察放射性射线的行踪、断定某范围内有无射线及其性质、强弱等一系列问题，广泛开拓应用领域，设计出了许许多多的仪器，进行示踪原子测量，探知物体内部缺陷，检查成品质量，在不损伤、无接触的条件下检测厚度、密度，实现生产过程和产品质量的自动控制。核工业北京二六一厂和西安二六二厂等，除生产核工业专用仪器设备外，还生产了一系列的放射性测量仪器，有工业用的测厚仪、料位控制仪、液面测量仪、流速流向仪、密度测定仪、钙铁分析仪、火灾探测器；医疗卫生用的肾图仪、甲状腺功能仪、放免测量仪、骨密度仪、心脏功能仪及辐射防护、环保监测用的各种剂量仪、检查仪、污染测量仪等，这里就不赘述了。

第三章　放射性测量仪器的应用和社会、经济效益分析

第一节　放射性测量仪器的应用和范例

一、勘查放射性矿产

借助射线探测器和测量仪器可直接有效地勘查地下放射性矿藏。可在地表、空中探测，估计某地区域内放射性矿藏的分布情况；也可把测井仪置入钻孔内，根据射线强度随地层深度而变化的曲线，判断不同地层内放射性物质聚集的情况。

1. 高灵敏度多道航空γ能谱测量系统在澳大利亚航放测量中，发现了一系列大型铀矿床——兰杰、库恩加拉、纳巴勒克和贾比卢卡等。我国的航空伽马能谱测量业已完成全国可查面积的47.7%，取得了明显的找矿效果，直接找到了一批铀矿床和铀矿点，以及大量航空放射性异常。航测直接发现的铀矿床约占全国铀矿床的四分之一，我国最大的铀矿田就是航空放射性测量发现的。

2. 汽车γ测量和γ能谱测量，探矿效果较好的是巴西、尼日尔和日本；1955年秋，利用汽车γ测量发现了日本第一个铀矿床，1962年12月和1966年11月又相继发现了东浓铀矿床和丰田铀矿床。汽车γ测量机动性好，灵活、效率高。我国的汽车γ能谱测量也取得了很好的地质效果。例如，核工业北京地质研究院在冀北地区确定了一条北东向的远景铀成矿带，并在带内发现了若干铀异常点，该区的一个铀钼矿床就分布在北东向成矿带中。

二、勘查非放射性矿产

放射性测量方法和仪器可有效地应用于勘查多种非放射性矿产。其基本原理是利用非放射性矿产所伴生的天然放射性元素，非

放射性矿产含矿构造所造成的特征放射性异常，成矿过程或作用所造成的铀、钍、钾三种放射性元素之间比值的变化。在不发生成矿过程的正常条件下，U：Th：K 的比值在正常范围内变化，一旦发生导致三种元素相对富集或贫化的成矿作用，三者之间的比值会发生异常变化。用相应的放射性测量仪器可探测这种变化，确定某一非放射性矿产的特征比值。如 U/Th、U/K、Th/K 或 Th/U、K/U 和 K/Th 比值。天然放射性的比值参数(U：Th：K)，不管对放射性矿产还是对非放射性矿产的勘查和评价，都是十分有用的。有些非放射性矿产见有明显可测的放射性特征异常，便可直接用放射性方法和仪器探测和圈定。

1. 勘查石油和天然气

油气田上往往析出一些碳氢化合物，由于氧化还原环境改变和岩石颗粒吸附能力的降低，致使多数油气田放射性测量值相对围岩来说要低 10%－30%，边缘出现环状放射性增高带造成放射性特征异常，低场等值线形状相当于油气田的平面轮廓，这就是放射性测量勘探石油和天然气的物理基础。采用 γ 能谱仪和测氡仪进行 γ 能谱、氡及其子体的 α 测量，就能圈定可能存在的油气田。

(1) 美国森马克公司资料表明，1958—1978 年间钻探验证放射性测量结果钻孔 724 口，在预测远景区内所钻油气井的准确率达 85.7%，在预测不利区内所钻干井的准确率达 68.1%，综合正确率为 79.7%。

(2) 1973 年美国在怀俄明州泡德河盆地 4465km^2 范围内，对深部碳酸盐地层圈闭油气进行放射性测量，布置验证钻孔 282 个，在异常范围内钻探井的成功率为 61%，在异常范围外钻干井的准确率达 89%，其综合成功率为 80%。

(3) 1986 年地矿部物化探所在南疆塔里木盆地沙雅隆起地区实施测^{222}Rn 找石油天然气的科研—生产—开发一体性计划，位于^{222}Rn 异常中心的沙参七号钻井，在 5430m 深处见油层，日产油 46—200m^3，日产气十几万方。测 Rn 可以快速、有效、低成本地

完成油气的普查和勘探工作中的一部工作。

2. 普查金矿

金铀共生，金矿及周围往往伴生有铀、钍、钾等放射性元素，与 Cu、Ag、As、Sb、Hg 等也有共生组合关系。故可采用 γ 能谱仪和 X 射线荧光测量仪能普查金矿。

（1）世界闻名的穆隆套超大型金矿床，是用航空 γ 能谱测量根据放射性元素含量的增高发现的。该矿位于原苏联乌兹别克斯坦西部天山地区，与中亚砂岩型铀矿床同产于东西向构造 岩浆活动带中，主要金矿体位于交代角砾岩内。采用轻便 γ 能谱仪和车载能谱测量清晰地确定了矿化带和围岩的界线。在氧化带以下基岩中的热液蚀变带范围内，发现铀、钾异常，在空间上钾、铀异常都靠近金矿体，富集金、钾和铀的地质体位于同一个岩相带内。

（2）1987 年，核工业航测遥感中心在华北地台东北缘，内蒙地轴和燕辽台褶带的接壤部位进行航空 γ 能谱测量，在承德—平泉地区一钾异常高值区发现金矿。该矿产于混合花岗岩、花岗细晶岩脉和石英脉中、受南北向和北东向断裂控制，破碎越强烈，矿化越好，金矿为构造蚀变岩型。四个矿化段共 29m 长，平均品位为 2.6g/t，最高品位金为 8.1g/t（拣块为 15.7g/t），银为 26.8g/t（拣块为 51.8g/t）。

（3）核工业北京地质研究院在内蒙喀喇沁旗以南的花岗岩体和变质岩系中进行 γ 能谱测量，根据铀、钍和钾元素的分布规律圈定了两条蚀变带。该区内与脉岩有关的金矿体均分布在该蚀变带内。使用 γ 能谱测量快速圈定了金矿体的分布范围，并在蚀变带内又进一步圈出了金矿体的位置，取得了良好的找矿效果。

（4）我国某省在三叠系中统新苑组地层底部见有金矿化，并发现金矿体上砷的荧光强度是围岩的七倍，物性差异明显。由于本区金与砷的相关性密切，随即布置 X 射线荧光现场面积测量，在土壤 B 层上测量砷的荧光强度，以强度 250 脉冲/秒（砷含量为 300×10^{-6}）为界，圈出了两个金矿化异常带。

3. 发现罕见的大锗矿

铀和锗的地球化学性质不存在必然的联系，但两者在沉积环境和富集条件上都有某些共同要求，这使得我们可用放射性测量发现铀锗共生的大锗矿。301、302 矿床位于滇西成矿带的澜沧江亚带，一个以印支期花岗岩为基底的新第三系断陷盆地的褐煤层中，铀和锗为复合矿体，锗矿化比铀矿化层位高、范围大，此外还伴有铍、镓、锆、锶、钒、钛矿化。综合研究表明，锗矿化较均匀，平均品位 0.03%—0.05%，最高品位可达 0.375%。目前已探明该矿床为以锗为主，以铀为次，伴有铍、镓矿化的综合性矿床，其中锗的储量已逾千吨。

4. 发现大型钼矿

放射性普查发现的位于华北地台北缘内蒙地轴以内沽源中生代火山盆地西部的铀、钍异常矿化点，已发展成大型铀矿床。矿床且伴生的有益组分较多，Mo、Cu、Pb、Zn、As、S、Hg、Au、Ag 等，其中 Mo 以胶硫钼矿形式存在，品位富、厚度大，已构成工业矿体。

5. 发现钾矿床

^{40}K 是放射性同位素，其在天然钾中的丰度为 0.012%，能量为 1461keV。采用 γ 能谱测量，选择适当能窗，可发现富钾岩石一类的潜在钾资源，解决我国钾资源短缺问题。1986 年，核工业航测遥感中心在新疆进行 γ 能谱测量，根据航空钾异常，直接发现现代盐湖-盐滩蒸发型钾盐矿，已提交硝酸钾储量 XX 万吨，同时，尚有一批待验证的钾盐异常。

6. 寻找地下水资源

地下水中溶解有较多的铀盐、镭盐等放射性物质，经断层、破碎带和裂隙处上升渗透到地表层，且不断地析出、扩散、吸附和沉淀，致使有地下水的地表放射性比无水区增强 1.3—2 倍。利用含水构造所造成的特征性放射性异常，进行放射性测量（γ、Rn），均能勘察地下水和地热水。

（1）成都地质学院在河北柳江盆地应用 α 卡仪在野外现场和

室内测定土壤中的氡，配合其他物探工作，为勘察秦皇岛大型供水基地提供了宝贵的资料。获得了日产十万吨的丰富地下水资源，其中仅上花野地区一孔就有 5000t/d 的出水量。

（2）成都地质学院在西藏拉曲，根据α卡仪测氡资料确定钻孔，打出水温 116℃，日出水量为 1500t 的热水井。

三、进行地质研究和填图

每种岩石都含有一定量的放射性元素，可根据地质任务和应用条件，因地制宜地选用各种放射性测量仪器进行测量，利用不同岩石类型中放射性元素正常分布值的差异来划分地层、圈定岩体（脉）、追索构造，进行地质填图和地质研究。近十余年来，利用铀矿勘查中的伽马能谱测量数据，进行计算机数据处理，编绘 U、Th、K 三元素彩色图和 U/Th、U/K 等比值单参数彩色图，不仅可勘查和评价放射性矿产及非放射性矿产，而且能明显地反映出某些矿产的特征性，有的与已知矿床直接对应，在多金属矿区尤为突出，这是铀矿物探新的技术进展。铀、钍、钾单元素分布彩色图和铀、钍、钾总量分布彩色图对找矿和地质研究都十分有用，放射性元素的分布特征，能反映出许多的地质规律。

（1）英国用地面γ能谱测量对面积 130km^2 的多恩湖花岗岩体进行了研究。仪器采用 DISA-400 型能谱仪，NaI 晶体的尺寸为 ϕ7.5cm×7.5cm。分别记录 K、U、Th 的 1.46MeV、1.76MeV 和 2.62MeV 的峰值和 0.1MeV 以上的总计数率。测得该区放射性元素 Th 的平均值为 16×10^{-5}，铀的平均值为 4.6×10^{-6}，钾的平均值为 2.8%。钍的分布形态（铀类似）与岩矿成分的变化、地球化学变化的趋势相当吻合。圈出的两个钍高含量中心，反映了岩浆的分异，用此研究了浆岩分异史。以放射性元素产出的形式和丰度，计算地表岩石及整个花岗岩的热产生率。这些情况表明地表γ能谱测量可用于条件有利区的较小比例尺的地质填图。

（2）在浙江莫干山地区地质填图过程中，地面γ测量测得英安岩的γ背景值比细粒似斑状黑云母花岗岩的γ背景值小 3.87×10^{-9}C/（kg·h），在γ剖面上能明显地圈出英安岩与细粒似斑

状黑云母花岗岩的边界。在吉林延边地区应用γ测量在海西期细粒花岗岩中（背景为5.16×10^{-9}C/（kg·h））圈出了穿插在其中的闪长岩脉（背景值2.58×10^{-9}C/（kg·h）），闪长岩脉的部位呈现明显的负异常。

四、预报地震

地壳岩石中都含有一定数量的放射性元素，当岩石受力破裂时，束缚在其中的气态放射性元素（Rn）易被释放出来向地表聚集，形成很高的氡异常，尤其在活动断裂带及其交汇部位，能观察到地震孕育过程中上壤和水中氡浓度的异常变化，可利用来预报地震的发生。

1. 1966年苏联塔什干发生了5.3级地震。震前几年及震前震后观测水氡数据表明，氡的变化与地震有明显关系。自1956年始氡值逐年增高，1966年增高到本底值3倍多时，发生了5.3级地震；次年发生四级余震，氡值为本底2.5倍，其氡异常幅度与震级有明显的正比关系。

2. 我国四川省某地，1972—1976年间发生5.2—7.9级地震九次。该地地震观测站采用自流温泉水测氡，有八次地震在震前6—13天出现临震征兆——尖峰状氡异常，氡异常的幅度高于背景值36%--120%。

3. 1969年7月18日渤海发生7.4级地震；1975年2月4日海城发生7.3级地震；1976年5月29日龙陵发生7.3级地震；1976年7月28日唐山发生7.8级地震，大震前都观测到了水氡前兆异常。氡异常的出现时间和连续时间各有一定的特点，有的时间短暂，有的延续时间较长，后者对预报地震更有利。

五、环境和核设施放射性监测

空气、土壤、水等各种介质中，都含有放射性核素的成分，其含量超过一定界限时，就会危害人的身体健康。为了控制放射性污染的扩散，保护环境，必须对环境进行监测。测量空气中氡浓度可采用射气仪，活性炭吸附测量仪等；分析水中放射性核素，可用激光荧光测铀仪测铀，用射气仪加脱气系统测定氡和镭含量；其

他可采用γ辐射测量仪。

1.1988年，核工业航测遥感中心开展航空γ能谱测量，对石家庄市进行了城市辐射剂量和放射性污染源调查，认为该市的放射性本底水平在全国系中等偏低，基本确认为是清洁城市。

2.1986年。核工业北京地质研究院和北京环境保护科学研究所采用GP-106汽车γ能谱测量系统，对北京市区（三环以内），海淀区和延庆县进行城市环境监测，对田野和道路开展环境放射性水平调查和环境质量评价。测量结果表明，北京市区为一低放射性水平地区，平均辐射剂量约为1.032×10^{-9}C/(kg·h)；当量铀含量1.5×10^{-6}；当量钍含量5.0×10^{-6}；钾1.5%；镭5×10^{-13}。同时，还反映了通过市区的NE向断裂构造。这一工作的室外工作时间只用了七天，而用常规的人工测量方法，则需一年多。效率高，且数据一致性优于常规方法。

3.1986年4月苏联切尔诺贝利核电站发生事故，瑞典地质公司采用航空γ测量，确定其污染范围和性质，国际原子能机构曾要求尽快公布瑞典的经验，以便应付将来可能发生的类似核事故。

4.1978年1月24日，苏联带有核反应堆的人造卫星“宇宙”954号进入大气层中烧毁，其残存的放射性碎片散落在加拿大西北地区，可能构成放射性危害。加拿大地调局用高灵敏度航空γ能谱仪在大奴湖东部冰面上发现了人工放射性辐射源——^{140}La及其他衰变产物，圈定了散落区的范围，并继续监测其随时间的衰减情况。

5.1971年美国发射一枚带有两个钴-57放射源的导弹坠毁在发射场650km外的某地，采用机载能谱测量仪器，能窗对准^{57}Co的122keV伽马峰，三天内找到了导弹坠毁地点。

六、其他

放射性测量方法和仪器的应用潜力很大，在国民经济的其他许多部门都得到了不同程度的应用。

1. 测量密度

在一定条件下，由于放射源发出γ射线的吸收和散射，仅从

属于介质的密度（要控制和消除各种影响因素）。因而，测量放射源减弱的γ射线，即可测出介质的密度。确定岩石和矿石密度用于计算矿床储量；油煤田中用于确定岩层含油气性质和划分煤层；在采矿、勘测、建筑工程中有效地解决一些技术问题；尤其在化工生产中，可应用射线密度计对密封设备中的高温、高压、高粘度、强腐蚀等各种流体的密度和浓度进行连续自动检测。

2. 测量厚度

(1) 用透射式放射性同位素测厚计测量热轧钢板的厚度。以往要轧机停车，工人冒着高温和被烫伤的危险用卡尺去量，现在可在轧钢生产过程中，在钢板不断从轧辊下通过时，射线探测器随时测出经过钢板吸收后透射过来的射线强度，厚钢板射线吸收的多，测到的射线强度弱，否则相反。仪表指示厚度，把测量信号送到自动控制系统，能自动调节轧辊间的距离，实现轧机自动控制，生产自动化。

(2)用反射式放射性同位素测厚计测量镀层和涂层的厚度。以往只能采用破坏性分析测量平均厚度，现在可利用β射线被物体散射的性质。β放射源上方被铅屏蔽，下方靠近测量层，反散射回来的β射线被电离室测量。β强度越小测量层越薄。用其检测和控制电影胶片感光层厚度，既提高了质量，又节约了银，带来很好的经济效益。

3. 物位检测

在工作环境较恶劣的场合，尤其检测特殊物料，适于采用物质吸收射线原理制成的各种射线物位计。像高温、高压容器中物位测量；有毒，有腐蚀性气体、流体及易燃易爆环境下物位的测量；便于生产自动控制的非接触式自动连续的物位检测。钢铁厂往往采用γ物位计检测炉料的位置。炉内温度一般在200℃，有时可高达700℃，采用机械探尺测料位常被烧坏，且需复杂的提升设备，而γ物位计安装在炉膛外面，没有这些弊端，维护检修方便。

4. 无损探伤

过去检验金属制品（件）有否细微裂缝、气孔或砂眼等缺陷，

都是破坏性的试验抽查其中的一部分，难保未受检部分的质量。γ射线无损探伤，则检验整个金属部件。当今应用相当广泛。正像医用X光为病人检查身体一样，我们可以用X射线仪和γ射线仪检查船体、管道、堤坝、桥梁和机器零件中的裂陷等缺陷，海关边防可以用射线检查箱中的武器弹药等危险品。

5. 选择使用的建筑材料

建筑材料均含有一定数量的放射性元素，含量高的材料，会对人的健康造成危害。因此，要用放射性测量来选择可使用的建筑材料。建材中所含放射性元素衰变过程中产生的放射性气体(Rn)向外部空间扩散，扩散量的大小决定于建材的扩散系数和墙壁覆盖层的厚度和密度。室内取空气样品，可用射气仪的闪烁室测量、径迹、活性炭吸附、采用过滤和测氡子体的方法，测出氡浓度。在氡浓度过大时，采取改进通风条件，加密封覆盖层，减少氡的扩散量等防护措施，减少对人体的危害。

6. 辐照保藏食品，治癌、治虫和培育良种射线能够杀死食品中的微生物和害虫及虫卵、抑制微生物腐败现象，起到对食品消毒、灭菌、杀虫、防霉和腐烂变质等作用，从而延长了食品的保藏时间，提高了食品的保藏质量，有的还能改进食品的质量。辐射保藏技术不但能解决食品保藏、保鲜的难题，而且能为宇航员和无菌特护病人提供特殊的无菌食物。

射线可击中癌细胞的要害部分——脱氧核糖核酸分子，能使其发生电离，使分子断裂，癌细胞便不能再分裂，繁殖而死亡；也可击中肿瘤的水分子，使其电离、分解，从而产生引起细胞内大分子改变的毒性物质，导致癌细胞中毒身亡，使病人能控制病情，缓解症状，减轻痛苦，延长寿命，有的还恢复了健康。

奚大顺等，“放射性物探仪器”，原子能出版社，1987。

北京第三研究所著，“野外伽马能谱测量”，原子能出版社，1977。

石玉春等，“放射性物探”，原子能出版社，1986。

章畔等，“X射线荧光探矿技术”，地质出版社，1984。

梅周蕾等，“射线及其应用”，原子能出版社，1985。

[苏] A·H 苏尔坦霍贾耶夫等，“放射性气体在研究地质过程中的应用”，地震出版社，1983。

第十九篇

测绘仪器

柳志斌　编著

前　言

测绘仪器包括测量与测（制）图所使用的多种仪器。目前，地矿测绘单位广泛使用的具有代表性的传统测绘仪器有：测量距离的仪器 —光电、激光等电磁波测距仪等；测量地面高程的仪器——水准仪；测量角度的仪器——经纬仪；测图仪器——各种精密测图仪及平板仪等。现代科学技术的发展，促进了测绘仪器的发展，电子速测仪、激光及数字水准仪、解析测图仪、正射投影仪、计算机辅助制图系统，数据库技术，GPS 卫星定位技术等，均已用于测绘生产作业中。

通常完成一项测绘任务，往往需要几种测绘仪器配合使用，采取不同的技术方法，经过多道工序、取得不同的测绘数据信息和图件资料，为用户提供单项的或综合的信息和图件。鉴于此，我们在介绍测绘仪器的应用时，不便于每种仪器分别介绍，只能综合地介绍测绘技术的应用范围及能为国民经济建设各部门提供的服务。

地矿部门测绘技术力量雄厚，各省（区）都有专业测绘队。随着科学技术的发展，我部测绘技术的总体水平有了很大的提高，生产方式发生了根本性的变化，电子测距、测角，电磁波测距三角高程测量，航测与遥感，近景摄影测量，微机用于数据采集、处理及建立数据库，GPS 等技术设备已开发应用。在改革开放的新形势下，地矿测绘单位在完成测绘生产任务的同时，已向社会开放，为各界用户提供广泛的测绘服务，取得了良好的社会效益和经济效益成效。

本书在编写过程中得到段毅、王相钧高级工程师的热情帮助，特表谢意。

作　者

1994 年 5 月

目　录

第一章　测绘技术的服务范围 …… (141)

第一节　测绘技术 …… (141)

第二节　测绘技术的应用 …… (142)

例 1. 在城市规划建设中的应用 …… (142)

例 2. 在村镇规划中的应用 …… (143)

例 3. 在地籍测量中的应用 …… (143)

例 4. 在滑坡等灾害观测中的应用 …… (143)

例 5. 在地面沉降测量中的应用 …… (144)

例 6. 大型建筑物的变形观测 …… (144)

例 7. 桥梁的变形观测 …… (145)

例 8. 井架变形监测 …… (146)

例 9. 在坑道地面控制测量中的应用 …… (147)

例 10. 南极考察中的工程测量 …… (147)

例 11. 少陵塬改土工程测量 …… (148)

例 12. 精密工程测量 …… (148)

例 13. 地下管线（道）探测 …… (149)

例 14. 工程测量在工厂建设中的作用 …… (150)

例 15. 塔尔寺古建筑维修工程测量 …… (150)

例 16. 近景摄影测量的应用 …… (150)

例 17. 大型屋架结构的变形观测 …… (151)

例 18. 大雁塔变形测量 …… (151)

例 19. 韩城发电厂变形工程测量 …… (152)

第二章　测绘仪器 …… (154)

第一节　电磁波测距仪 …… (154)

一、光电测距仪的测距原理 …… (155)

二、光电测距仪的结构及主要技术指标 …… (156)

第二节　经纬仪 …… (157)

一、经纬仪的测角原理 …… (158)
二、经纬仪的基本结构 …… (159)
三、经纬仪的特点与要求 …… (160)
第三节　水准仪 …… (161)
一、水准仪的用途 …… (161)
二、地面的高程系统和水准测量原理 …… (162)
三、水准仪的基本结构 …… (164)
第四节　摄影测量仪器 …… (165)
一、全能法测图的基本原理 …… (166)
二、全能型立体测图仪的结构和分类 …… (167)
第三章　测绘科技发展的现状及趋势 …… (170)
第一节　大地测量 …… (170)
一、长基线干涉测量（VLBI） …… (170)
二、全球定位系统（GPS） …… (170)
第二节　摄影测量与遥感 …… (172)
一、影像信息的获取 …… (172)
二、影像信息处理 …… (173)
第三节　工程测量 …… (173)
一、地面测量仪器和方法向自动化方向发展 …… (174)
二、工程测量数据处理向自动化方向发展 …… (175)
三、工程测量的优化设计 …… (175)
四、建立工程测量微机数据库 …… (175)
主要参考文献 …… (176)

第一章　测绘技术的服务范围

第一节　测 绘 技 术

测绘是一个行业，是一个专业技术性很强，具有先行性、基础性和超前期服务的行业，是经济建设、国防建设的开路先锋，是社会主义现代化建设不可缺少的行业。

按传统的认识，测绘是研究地球的形状和大小并确定地球表面点位关系的一门科学。测绘工作者则使用各种测量方法和仪器设备，主要以地球表面作为研究对象，以提供各种测绘数据和图纸作为服务方式。社会的进步和科学的发展，使测绘工作发生着重大的转变，这种转变一方面体现在本学科的基础理论和技术手段上的变化，另一方面则是其研究对象和服务方式、领域产生了变化和拓宽，使测绘工作的使命和意义有了全新的含义。国际测绘联合会（IUSM）1990年在章程中对测绘作了如下的定义："测绘是采集、量测、处理、分析、解释、描述、分发、利用和评价与地理和空间分布有关的数据的一门科学、工艺技术和经济实体"。由此，不难看出，测绘科学属于信息科学，测绘技术是一种信息技术，测绘事业是一种信息事业。测绘工作的全过程就是信息获取、信息处理，信息表达和信息应用。从现代产业结构的变化和商品经济的观点看，测绘部门则是一个信息产业的经济实体，它生产带有商品性质的信息产品，并用这种信息产品为社会各界服务。

测绘科学作为一门应用广泛的信息科学，在现代社会中，任何行业、部门都离不开它，离不开测绘工作为之服务。事实上，国民经济各部门对测绘工作的需求是多方面的和多层次的。通常都把测绘工作誉为建设的尖兵，基础的基础。在改革开放的新形势

下，测绘工作为国民经济发展服务的潜力是很大的。地矿部门的测绘单位，早在建国初期就已成立，是国内一支重要的测绘力量，技术素质高，设备较齐全，40年来已经为国民经济各部门做出了重大的贡献。现代科学技术的发展，使测绘仪器设备、理论方法和技术手段等，都得到了发展和更新。航天技术、激光技术、微电子技术、计算机技术和遥感等高新技术的应用，使测绘工作的服务领域更加广阔。包括城乡规划建设、国土整治，农业区划、环境监测、资源调查、大型工程项目建设、建筑变形监测、灾害调查等，都是测绘工作的服务范围。

第二节　测绘技术的应用

例1　在城市规划建设中的应用

测绘是城市规划建设中的一项重要的基础工作。要建设一个城市，必须先有规划，不管是新建或改建一座城市，都应该有一个预期的设想，否则就会七零八落，杂乱无章，不能适应经济发展和人民生活的需要。城市测绘则是城市各项建设的先行，是超前工程。在城市建设中，如果没有测绘工作者提供各种不同比例尺的地形图，各种不同类别的专题图等信息资料，城市规划这项决策就无从做起。比如，城市总体规划是城市建设的总蓝图，是城市建设的纲领性文件。城市规划按其工作程序，方法和深度的不同，可分为三个不同的层次：即城市总体规划，城市分区规划和城市详细规划。其中每一个层次工作的开展，都要以地形图作依据，都要以城市测绘的成果成图为基础，而且不同的层次对地形图的测绘有不同的精度要求。可以说城市测绘贯穿在城市规划制定和实施的全过程中，一步也离不开它。如果再深一步评价测绘工作在城市规划建设中的作用，则不难看出，在城市建设中，国家机关、大专院校、科研机构、工厂企业，要依据地形图进行布设；市政设施，包括道路、交通、供水、供电、煤气、供热、排水、电讯等，也要依靠地形图进行合理分布；生活服务网点，如

住宅、商店、医院、学校、旅馆等，也要按照规划要求进行安排。当这些规划在图纸上规划之后，靠什么放到实地上去呢？唯一的手段还是测绘。为了保证城市规划的正确贯彻和实施，必须通过测量手段将图纸上的规划设计通过工程放样移到实地上去。竣工以后，还要通过测绘工作来检查各种城市建筑和设施是否符合规划设计要求，并施测出各种竣工图才能保证城市规划的完全实现。

例 2　在村镇规划中的应用

村镇规划，同样离不开测绘工作的支持。要弄清当地的自然地理情况，以及自然资源和社会资源情况，就离不开比例尺适当的地形图，特别是县乡区域地形图，也离不开适合需要的各种专题图　　土地利用图、村镇分布图、人口分布图以及工程地质图和水文地质图等。可以说没有科学合理的测绘，就没有科学合理的规划，也就没有科学合理的建设。

例 3　在地籍测量中的应用

地籍是土地的户口，是记录种种土地信息的、完整的、具有法律效力的信息库。地籍测量的主要内容包括土地的权属关系，土地范围界线、土地使用情况，土地估价和土地上现有建、构筑物的情况等多方面的要素。这样就决定了地籍测量的基本内容是调查土地及其附着物的权属、位置、界线、质量、数量和利用现状等基本情况的测绘工作。它为土地和房产管理、城乡规划、税收以及土地整治等方面提供重要的基础资料。

例 4　在滑坡等灾害观测中的应用

滑坡、泥石流等是一种危害严重的地质灾害，往往会给人民的生命财产带来重大损失。在这类地质灾害的监测和防治中，变形观测是重要的监测手段。通常滑坡的勘察是通过工程地质野外测绘及物探、钻探等手段所获取的资料对滑坡进行定性分析，而靠变形观测获得滑体上监测点的水平和垂直方向上的位移量，对滑坡作定量分析，具体了解滑坡的动态情况。所以，用测量学的理论和方法，建立滑坡的监测体系，再结合地质工作的开展，就可以预测滑坡的临界激发时域、变化速率及其机理分析等。因此，

变形观测是一种有效的监测手段。在实践中，用常规的测量技术，便可以完成上述监测任务。例如，滑坡在其形成初期，滑体的空间位置变动量通常很小。由于滑体的这一特点，监测中需要建立平面和高程中误差为毫米级的小型监测控制网，才能观测出滑体上各观测点空间位置的微小变动量，即水平和垂直位移量及扭曲形式。就我国目前工程测量的技术水平而言，建立这样的观测控制网并不困难。观测网的形式可以多种多样，主要是根据滑体的地形和通视条件而定。无论那种形式的监测网，都要因地致宜地布设动态与静态的点位，还须根据需要建立适当数量的监测站和观测点，这样便可以达到预期的目的。

例 5　在地面沉降测量中的应用

我国许多大、中城市已经出现了程度不同的地面沉降。尽管地面沉降是缓慢的，但其危害极大，尤其是对现代化的大城市。西安是地面沉降明显的城市之一，由此造成许多高大建筑物，名胜古迹倾斜变形、地下管道破坏，地面排水不畅，给城市建设带来很大威胁。因此，研究控制地面沉降的对策，是一项迫切的任务。为此，必须针对不同情况，首先了解地面沉降的大小及其速率，是匀速下沉，还是非匀速下沉；是周期性下沉，还是非周期性下沉；是大面积整体下沉，还是小面积局部下沉等一系列问题，以便为控制地面沉降提供依据。这些问题的解决，要依赖于地面沉降测量，仍然是测绘工作者的任务。

上海、西安等城市都先后开展了地面沉降测量，为地面沉降的控制和治理，提供了可靠的数据。实践证明，就目前的技术条件而言，地面沉降测量最可靠的方法是精密水准测量，即按照一定的周期，重复进行精密水准测量是监测地面沉降最基本最有效的方法。

例 6　大型建筑物的变形观测

大型建筑物包括高层建筑、水库大坝等各种建筑物。一般来说，对于大型建筑物而言，变形观测是一项施工之时开始，不容间断，无法返工，而又需持之以恒的工作。它要求观测方法简便、

迅速、完整、正确，因而使用的工具和仪器设备应能满足这一要求。常规的技术方法和仪器设备一般能满足这一要求，有些则需要使用先进的仪器设备和技术方法，尤其是对于动态观测。对大型建筑物如大坝的变形观测，一般分为施工期和运行期两大部分。施工开挖期的变形观测是验证、补充、修改原来地质勘察成果的良好时机，也是验证和补充基础资料的良好时机。通过该阶段的变形观测还可以对建筑材料和建筑方法提出验证意见。而这些信息在设计阶段是无法得到的。水坝运行期的变形观测，则是为了达到了解坝体瞬间动态、监视水坝安全、验证设计性能和实验数据的目的，具有防患于未然的实用意义。

我国水利水电建设事业的发展，使筑坝数量已跃居世界之首，随着时间的推移，大坝的老化是不可避免的。加之限于建坝时的经验与运行中的管理，以及设计或地质结构处理等方面存在的问题，不可避免地存在着某些缺陷或隐患。许多大坝的库区容量很大，下游人口密集，大坝安全监测任务很重。

在总体变形观测中，主要是用大地测量方法进行观测，因为这种观测最能充分说明大坝的状态，其中包括水平位移和垂直位移。借助于测绘技术和设备进行变形观测，以保证大坝在施工和运行期安全的例子很多。例如，松花江上的丰满重力坝系日伪时期修建，工程质量低劣。解放初期坝的渗漏和变形都很大，根据对大坝原型观测的实测资料推算，在遭到百年一遇的洪水时，坝就有失去稳定的危险。因此进行了加固，有效地提高了坝的稳定性，保障了安全运行。另外，我国梅山连拱坝高 88m，于 1962 年 11 月发现右岸大面积漏水。在此以前，通过原型观测发现 13 号垛锤线读数向下游增大 19.6mm，向左增大 14.5mm，一天以后向左突然增至 39.5mm，过了两天又增大到 43.6mm，情况异常，当即放空水库，加固大坝。1965 年再次蓄水至今，运行情况良好。

例 7　桥梁的变形观测

由于国民经济发展的需要，我国高速公路的发展速度加快，同时在车速和吨位方面都有很大的提高，因此对各种桥梁的承载能

力的要求也相应的有所提高。限于我国的国情，不可能弃掉所有的旧桥重建新桥，而必须充分利用现有的旧桥，使之能安全地为公路运输服务。为此对原有的旧桥进行承载能力的鉴定，根据承载力鉴定的结果，确定该桥可否继续使用，还是需要养护加固。桥梁的变形观测是桥梁承载力鉴定中不可缺少的内容。现以增涉河大桥变形观测为例加以说明。增涉河大桥是广州到佛山高速公路上进出口要道上的桥梁之一，该桥为 35m＋50m＋35m 三孔桁架拱桥，东、西两引桥均为多跨 13m 的钢筋混凝土简支梁桥，于 1980 年建成通车。随着广东经济的发展，通过该桥的车流量剧增，且重车多。为保证运输的安全，于 1990 年 8 月，对该桥目前的承载能力进行了全面检测。内容包括，桥面纵坡测量，河床断面测量，墩、台水平位移测量，墩、台纵向位移和拱轴线的变形观测，荷载作用下的挠度观测等。从该桥的变形观测结果判断，西孔的桥台水平位移值为 4.1cm，其相对水平位移为$\frac{1}{850}$，拱顶下垂度达 10.2cm，其相对下垂度为$\frac{1}{343}$，均已超过有关规定值及经验值。中孔情况虽然较西孔好些，但由于西孔的变形，在连拱作用下必将影响到中孔，且该桥在运营中的重车和超车多，势必导致拱顶和拱脚处的裂缝增多，结合承载力鉴定中的静、动载试验结果，表明增涉河大桥必须进行加固。

例 8　井架变形监测

井架是石油钻探设备的重要组成部分。在施工过程中，由于钻具的多次提升，处理井内事故时的强力提拔以及井架长时间不恰当放置等原因，都将导致井架变形，其结果会影响钻井质量，甚至导致井架倒塌，造成人身伤亡事故。为了安全生产，就必须随时掌握井架变形情况，以便及早采取措施，方能防患于未然。通常用大地测量仪器（经纬仪，水准仪，基线尺，测距仪等）和常规的测量方法，在井架周围一定距离的地面上埋设基准点并定期进行观测，就可以获得有效的变形数据。另外，在条件允许的情况下，也可以采用近景摄影测量的方法进行监测。该方法效率高，

并能连续记录井架在各种受力情况下的形态，对确定井架所受荷载与变形的关系更为直观。

例 9　在坑道地面控制测量中的应用

坑道是利用自然地形作为保护层的一种地下建筑物，广泛用于国防建设和国民经济建设中。对于大型坑道，坑口一般较多，为加快施工进度，施工时往往几个坑口同时开挖。那么，要保证相向掘进的坑道按设计要求准确贯通，就必须根据需要进行坑道地区整体测量工作。坑道测量工作可分为地面测量和地下测量两部分。地面控制测量就是精确测定坑口的平面位置和高程，以及坑道轴线的长度、转角和自然保护层的厚度等，为地下控制测量和施工放样提供可靠数据。

例 10　南极考察中的工程测量

1984 年，我国南极考察队到达南极之后，开展的第一项工作是选择考察站站址。在实地踏勘，了解地形，地质及水文情况等工作中，测绘工作者被人们誉为“风水先生”。他们在最短的时间内，从建立平面坐标系统和高程系统开始，通过野外实测，完成了我国在南极洲测绘的第一张地图——长城站区 1∶2000 地形图。

地形图又是进行各种野外科学考察的基础，测绘人员利用航片，在野外布设并测量了一定数量的控制点，进行调绘后，经内业加密，在精密立体测图仪上绘出了菲尔德斯半岛地区 1∶100000 地形图一幅，从而满足了我国南极长城站地区周围几十平方公里范围内各学科考察的急需用图。

南极的特种房屋，是由国内预制好的钢架组合式构件，运至南极现场安装而成的。一栋房屋几十个水泥基墩与房屋的钢架底盘用螺丝连接固定，在房屋的装配过程中，必须首先进行施工放样测量，其精度一般要求±2mm。虽然施工现场极不利于施测，但测绘人员采用了一些特殊方法，保证了精度，使得长城站所有房屋的装配工作能够顺利完成。工程测量为我国南极长城站的高速建成提供了可靠的保障。

随着南极科学考察的发展，工程测量在冰川、地质、地貌、生态环境等项目的考察研究中，在未来的物产资源的调查与开发中，都将发挥越来越大的作用。

例 11　少陵塬改土工程测量

国务院利用农业发展基金，对我国一些成片的增产潜力较大的农用土地资源，有计划有步骤地进行综合开发，以扩大耕地面积，提高单位面积产量，增加农产品总量，增强农业发展的后劲。

根据这一精神，西安市长安县东部少陵塬地区被国家列为综合开发地区。该地区包括引镇、鸣犊两个区的七个乡 60 多个自然村，面积约 65km^2，耕地面积约七万亩。根据要求，以乡镇为单位统一规划，集中连片，优先考虑方田、渠道、路边、渠系配套，实行村、水、田、林、路综合治理。该地区处于少陵塬上，地势高低起伏，沟沟坎坎，要治理达到上述要求，必须首先进行大面积改土工程测量。西安地质学院测量系，根据工程要求，配合长安县大峪灌区农业综合开发指挥部，利用格网法，配合小型微机计算程序，完成了改土测量和计算任务，为万亩改土会战提供了施工依据。

例 12　精密工程测量

精密工程测量是工程测量学的扩展和延伸，它是为现代大型精密工程及其设备的规划设计、放样安装和安全运行服务的。为了保证各种大型特种工程所提出的特殊要求，精密工程测量把现代大地测量学与计量学结合起来，使用精密的测量和计量仪器，获得 10^{-6} 以上的相对精度。

属于大型精密工程的有研究核物理中基本粒子结构和性质的高能粒子加速器工程，探索宇宙奥秘的大型射电天文望远镜工程，大型核电站和水利发电工程，超高层建筑以及长距离高精度导轨或传送装置，及其它大型建筑工程等。

许多大型精密工程从规划设计到施工安装，乃至运行管理整个过程都要做反复的大量的测量工作。比如欧洲原子研究中心（CERN）在五十年代末期修建的质子同步环形加速器（PS）工程

的测量工作就相当于整个法国的一等天文大地网的测量工作。然而这只是CERN的第一期工程，环形半径为100m，加速器的能量仅28×10^8eV。80年代开始修建的大型正负电子对撞机工程，其地下环形半径达4.3km，能量达200×10^8eV，整个工程的测量工作之浩大就可想而知了。

我国北京正负电子对撞机工程是国家重点建设工程，这是我国自行设计、自行建造的第一台高能加速器。对撞机主要由直线加速器，正负电子运输线，储存环探测器及一些实验厅组成。这些设备的安装必须依靠精密工程测量的支持。例如，高速、高能电子束的获得是靠在束流线上的电磁铁（共370余块）产生强大磁场来完成的。磁铁的位置要按其设计的三维空间坐标准确安装。为此要在其路线上建立一系列平面及高程控制点，以作为安装磁铁的控制基础。据估算，控制点相邻两点点位中误差要求为±0.3mm。磁铁的安装精度要求就更高了。因此，其工程测量具有精度高，难度大，项目多等特点。某测绘单位接受对撞机设备安装的工程测量任务后，经过反复论证，制定了切实可行的测量方案，使用较先进的技术和设备，采用多种测量手段，圆满地完成了测量任务，使得用户单位非常满意。

例13　地下管线（道）探测

随着现代化建设的发展，各种地下管线（道）的布设越来越多，同时，地下管线的探测工作也就逐渐提到议事日程上来。其任务是不仅要弄清地下管线的展布，以便满足进一步建设的需要，一般大、中型企业也必须进行地下管线探测，为建立和完善企业档案提供资料。事实证明，如果没有完善的地下管线资料，弄不清城市或企业地下管线的展布，就会给进一步建设带来很大困难和问题。如上海外滩扩路，由于地下管线很多，有些搞不清是什么管线和它们的展布，扩路工程就难以施工。又如江苏某市，建筑施工单位在地下管线展布情况不明就拉线打桩，一下子就打断了600对电缆，使大面积电话中断，造成了严重的后果。可见地下管线探测是一项重要的基础性工作。

地下管线探测的任务是查明埋在地下管线的展布情况和它的埋深，以及测出一些重要的管道（线）拐点、端点、阀门、接口的坐标。在一些山区和丘陵地带，还要测出管线地段的地形图。这样，地下管线的探测与地形图的测量就结合在一起了。

例 14　工程测量在工厂建设中的作用

工程测量在工厂建设中的主要任务是为工厂建设的选址、设计、施工、竣工、改扩建和运营管理等提供测绘保障。它的主要内容包括：控制网的建立，地形测绘，施工放样测量，设备安装测量，变形测量，工厂现状图测绘，非地形摄影测量，精密工程测量和地籍测量等工作。它的地位和作用主要体现在工厂建设的勘察设计，施工与竣工，营运等阶段的各项工程测量工作中。

例 15　塔尔寺古建筑维修工程测量

青海塔尔寺是我国藏传佛教格鲁派的六大寺院之一，始建于1379 年，是国家重点文物保护单位。由于建筑物出现了明显的沉降，裂缝与倾斜，如不及时维修将危及其正常使用与安全。1992 年国家拨款 2 千万元对七幢问题较严重的建筑物进行加固维修。在加固维修前，有的建筑物需要揭顶卸荷，而加固维修之后必须恢复该建设物的原貌。设计上为了提出可靠的加固维修方案，要求测绘部门及时提供建筑物的平面，部分立面，墙厚，柱子的沉降倾斜值，梁的挠度，飞檐的形状等多种数据。某勘测单位利用现有的仪器设备，灵活运用测绘技术，提出合理的施测方案，经过一个多月的努力，顺利地完成。

例 16　近景摄影测量的应用

近景摄影测量或非地形摄影测量是摄影测量的一个重要分支，已广泛用于文物、考古、园林及古建筑的测绘。同时在物体运动过程、建筑物变形观测、物体外壳及模型试验、地壳沉降、滑坡、泥石流监测，甚至在医疗、生物、农业、公安侦破、交通事故现场调查等方面都得到广泛应用。

如北京市园林局借助北京地区有关测绘单位的近景摄影测量设备和技术力量测制了大量园林古建筑图。建筑学家和文物工作

者都公认，采用近景摄影测量技术进行文物古迹和古建筑测绘是一种高效、高质量的方法。

上海复旦大学则利用近景摄影测量方法在交通事故现场调查方面进行了有意义的工作。用由普通照相机组装成的立体摄影机，对交通事故现场进行摄影，然后进行内业处理（量测、微机计算和绘图），就可以获得交通事故现场中所需要的有关数据。

这种方法在上海市徐汇、静安地区进行了实地实测。摄影距离 3m　30m，摄影基线分别用 40cm、100cm 和 120cm 拍摄了几十个像对，所求得的任意事故评价点的距离和实测值相比，均小于 2cm。实践证明，这种方法完全能满足交通事故现场评价点的精度要求，并使在现场评价事故的时间大为缩短。

例 17　大型屋架结构的变形观测

建筑大跨度的文化、体育设施，为了观察和掌握屋架结构的变化规律，确保安全使用，具有重大意义。如某测绘单位对北京人民大会堂观众厅和宴会厅的屋架进行了多年观测，对其安全使用起了重要作用。施测方法是在每榀梁的横梁和竖梁结点附近的下横梁上设置测量标志，标志为铜或不锈钢制的圆帽钉，用环氧树脂或螺丝固定在钢梁上。用精密水准仪和铟瓦标尺测出相邻点高差。一般作一次往返测，高差互差不超过 0.3mm。由于条件所限，观测姿势要用立、坐、跪、趴、躺地下等各种姿态。经过多年的努力，完整地拿出了合乎要求的所需成果，经过对多年的观测资料进行分析，查明了冬夏变化规律，地震受影响情况。

例 18　大雁塔变形测量

大雁塔是国家级重点文物保护单位之一，座落在西安市和平门外 4km 的大慈恩寺内。

这座古塔自建成后，随着年代的变化逐渐向西北方向倾斜。为弄清此塔倾斜的原因、程度、发展趋势和所需加固方法等，1983 年西安市科学技术委员会将此问题列为重点科研项目，由西安冶金建筑学院和西安市文物管理局组成《大雁塔倾斜问题及其加固》课题组进行研究，并由陕西省第一测绘大队承担变形测量工

作。1985 年 6 月到 1987 年 12 月，布设了一百多个观测点和观测标志，进行了十个周期的监测，记录了七万多个数据。从十期观测资料分析：64.517m 高的大雁塔，向西北方向倾斜，塔顶偏离塔底层几何中心垂线的距离为 0.998 米。塔身倾斜，三年内（1985 年—1987 年）向北增加了 4mm。年倾斜率为 1.3mm。塔身、塔座，随同塔周围地面在逐年下降，沉降率为 11mm/月。塔身、塔座基底平面有微量不均匀沉降，北侧较南侧沉降得快，三年内塔体北侧较南侧多沉了 1.5mm，塔座底面平面北侧较南侧多沉了 3.4mm。结论：塔的倾斜，主要是由于该地区地面不均匀下沉所引起。同时数据资料还表明，此座高层古塔的本身结构很稳定，日照变形和挠曲均很小。

此次测量精度：水平位移，内部符合优于±0.1mm，外部符合优于±1.0mm，垂直位移优于±0.15mm。

例 19　韩城发电厂变形工程测量

该厂在韩城市郊，装机容量 40 万 kW，1976 年开始运营，是陕西省的主力火力发电厂之一。

陕西省综合勘察院测绘队受电厂委托，1982 年 11 月开始，对主要建构筑物进行变形观测，沉降和倾斜观测精度为±1.0mm 和±14.0mm。1983 年 3 月发现厂区地表有微小升降异常，后经几次观测，渐趋明显。绘制的升降等值线图表明，有一片起自 4 号水塔，经主厂房向北偏西约 20 度的隆起带。与此同时，埋设在横山半坡的 5 号控制点位置西移，烟囱顶部向东倾斜。据分析，这是受到来自山体的侧向压力所致，为滑坡的前兆。随后，地表、建筑物出现了裂缝、倾斜、错位、扭曲、断裂和上鼓等现象。经水电部派员和各方面有关专家共同到现场考察，并听取了变形观测情况汇报后，决定抗滑抢险，加固主要设施，保住电厂。

在应急防治期间，对 411 个垂直和 170 个水平等变形观测点进行定期观测。开始每月一期。经山体卸荷，打抗滑桩等防治措施后，变形监测所得结果趋于稳定，观测周期延为每季度一期。1983 年—1989 年统计，共施变形测量 26 期。

根据地质调查和测区实地情况，主要是监测厂房、鉴于电厂设施纵横交错，障碍物多，水平位移主要采用前方交会或极坐标法施测；沉降点的水准由部分间视法改为全部闭合路线法，提高了数据的可信程度。观测用威特 T_3 经纬仪、蔡司 Ni002 自动安平水准仪和克恩 DM503 红外测距仪。垂直测量精度为±1mm，水平测量精度开始为±14mm，1985 年后提高到±5mm。观测数据用袖珍电子计算机记录。内业计算采用秩亏平差检验等新技术。

此项变形测量工程，为韩厂火力发电厂治理滑坡提供了可靠的依据。

第二章　测 绘 仪 器

第一节　电磁波测距仪

精密测距是大地测量、工程测量等测量工作中最基本的任务之一。没有一定数量的精确边长，测量控制就无法实现。

传统测距方法是使用基线尺（钢钢尺）或光学视距法来测量距离。使用基线尺测距，精度很高，但工作繁重、效率低，在复杂的地形条件下甚至无法工作；用光学视距法测距，工作简便，但精度较低，这两种测距方法都不能满足测量工作发展的需要。

电磁波测距仪则是当前广泛应用的比较理想的测距仪器。所谓电磁波测距就是直接或间接测出电磁波在被测距离上的传播时间来计算出距离的。无线电波和光波都是一种电磁波，故电磁波测距仪按其载波的不同可分为两大类。其一是光电测距仪，它是以光波作为载波的测距仪。早期的光电测距仪是采用白炽灯或高压水银灯作光源的，仪器笨重，操作不便，且只能夜间作业。60年代以来，电子学和激光技术的迅速发展，出现了氦氖激光器和半导体砷化镓发光二极管等新型光源，为光电测距仪的发展创造了极为有利的条件。相继出现了以激光或红外萤光为光源的光电测距仪。尤其是红外测距仪，体积型、轻便、速度快、精度高、一般一次测距时间小于10s，而精度一般为5mm—10mm，自动化程度高，可白天作业等，因而广泛应用于各种距离测量作业中。以微波波段的无线电波作为载波的微波测距仪，特点是主、副台可以互换，都可以实施测量、可以通话，测程远；但因波束较宽，受地面反射影响带来的多路径误差影响较大，精度较低，工程测量中很少采用。

电磁波测距仪按其测程可分为短程（几公里）、中程（几公里

至 10km）和远程（10km 以上）三种。按其波测方式的不同，还可分为相位式和脉冲式两种。脉冲式测距仪是直接测定光脉冲在测线上往返传播的时间来求得距离的。相位式测距仪则是通过测定调制光波在测线上往返传播所产生的相位移，间接测定时间来求得距离的。由于脉冲式测距仪的精度低，目前常用的短程红外光电测距仪，都是相位式的。

一、光电测距仪的测距原理

各种电磁波测距仪的测距原理都是相同的。由于工程测距中导线测量或控制测量所用的光电测距仪多是相位式的，故本节以相位式光电测距仪为例，介绍测距仪的基本原理。

相位式光电测距仪是通过测量调制光在测线上往返传播所产生的相位移，间接测定所需的时间 t，按下式求得距离 D：

$$D=\frac{1}{2}ct$$

式中 c 为光波或电磁波传播的速度，t 为调制光波在测线上往返传播的时间。

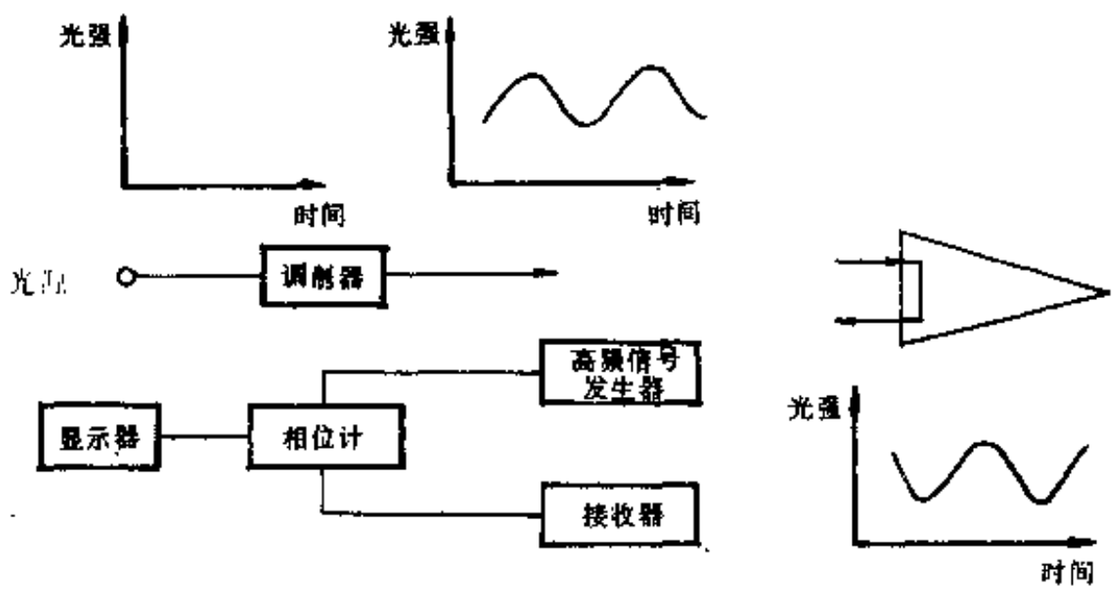


图 2.1　光电测距工作原理图

由光源发出的光通过调制器后，成为光强随高频信号变化的调制光射向测线另一端的反射镜，经反射镜反射后被接收器接收，

然后由相位计将发射信号（又称参考信号）与接收信号（又称测距信号）进行相位比较，并由测相计测出调制光在被测距离上往返传播所引起的相位移 ϕ，再经过自动运算得出距离 D 由显示器显示出来，这就是一般光电测距仪的工作原理。

二、光电测距仪的结构及主要技术指标

光电测距仪的类型较多，现以 DI3S 测距仪为例说明其结构和主要技术指标。DI 系列红外测距仪是瑞士威特厂较有影响的产品，在我国测量界及地矿测绘单位多装备此类仪器。

（一）仪器结构

仪器结构见图 2.2，其主要部件功能如下：1. GST20 三脚架；2. 三角架基座；3. 控制器固定螺旋；4. 控制器工作面板；5. 照准头电缆；6. 照准头；7. 键盘；8. 电池电缆；9. 电池盒。

照准头：照准头用连接器装在 T_2 经纬仪上，该连接器已装于望远镜上正面位置。照准头包括两个物镜，两个二极管和二极伺服系统。伺服系统开关用来控制内外光路的转换，并用来控制滤光片的动作，控制回光的强弱，在照准头的右边是供粗瞄准的光学瞄准器。

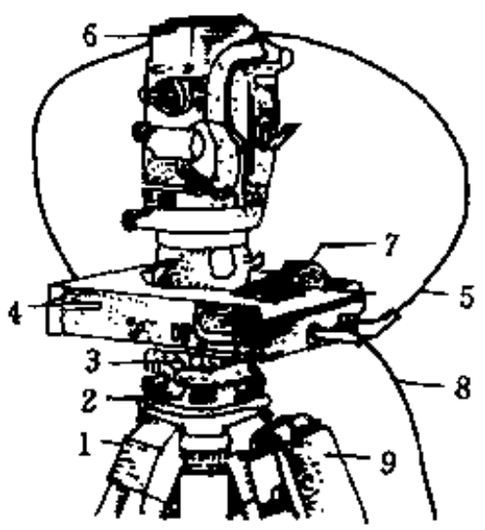


图 2.2　光电测距仪结构示意图

控制器：控制器包括相位计，计算器，显示器和各种控制开关。控制器可以围绕它的竖轴旋转，在轴的顶部中心盘上装一架经纬仪，若经纬仪和控制器的制动螺旋都松开，则两者就可以一起旋转，这意味着连接照准头和控制器的电缆总是保持着原来的形状和位置，因而经纬仪的测角精度不受影响。

反射器：反射器是由装在金属框内的玻璃棱镜构成的，反射回来的红外光经全反射后是与其本身平行的。由于平行反射之故，

反射器与DI3S的准直性并不要求很严格。根据测距长短，信号强弱，可分别选用单棱镜（可测1000m）、三棱镜（可测1600m）及九棱镜（可测2000m），三种反射器。

（二）主要技术指标

测程：单块棱镜 1000m；

三块棱镜 1600m；

九块棱镜 2000m；

精度：±（5mm+5×10^{-6}·D）

测量周期：正常情况下为10s，光线被挡可自动停测，待光线恢复后即可继续测量。

测距频率：精测频率 f_1=7.492700MHz

粗测频率 f_2=74.927kHz

显示单位：米或英尺，由开关选择，显示到毫米或0.01英尺。

运算功能：平距，高差，坐标增量。

发射管：砷化镓发光二极管。

发射功率：0.02mW。

载波波长：0.885μm。

接收管：光敏雪崩二极管。

功　　耗：测距时17W，显示时5W

工作温度：－25℃～＋50℃

电磁波测距仪的进一步发展是集红外测距、电子测角、测量数据的自动存储与处理为一体的电子速测仪。电子速测仪在测量界的应用，目前已达到相当普遍的程度，其有关内容将在第三章中介绍。

第二节　经　纬　仪

经纬仪是一种精密测量角度的测量仪器。测量角度是大地测量及工程测量的一项主要工作。一般在野外进行角度测量的仪器叫做经纬仪。

一、经纬仪的测角原理

我们知道，两条直线相交就形成角度。但经纬仪是用来测量水平角和垂直角的。工程测量中所测定的水平角和垂直角与一般的任意二方向之间的所夹的角度不同，水平角和垂直角是在特定的平面——水平面与垂直面内测量的。

什么是水平面和垂直面？现举例说明。三个盛有液体（如水）的玻璃杯，当三个杯处于不同的倾斜位置时，液体表面总是水平的，因此我们把这个不随物体放置位置而变化的平面叫做水平面。与这个水平面相垂直的平面就是垂直面，它是包含地球重力线的平面，习惯上也叫做铅垂面或竖直面。与地球重力线相垂直的平面，就叫做水平面或水准面。由于地球是个椭球体，重力都指向地球中心，严格的水平面应是椭球面，但就测量的局部范围而言，仍可认为水平面是平的。这样，地面上的任一点就可以在水平面及垂直面上来测量。土地的面积，路途的里程可以用水平面上的距离来表示，山高和水深可以用垂直面上的距离来表示，这就是大地测量的基本原理

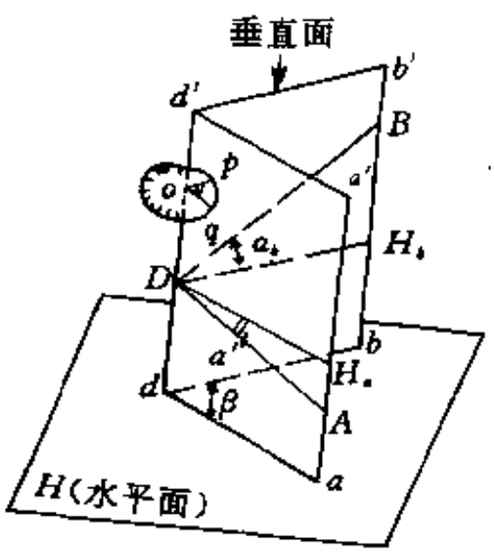


图 2.3　水平角及垂直角

图 2.3 是经纬仪测量水平角和垂直角的原理图，图中 A、B、D 为野外地面上三个不同高度的被测量点。测量时通过 DA、DB 分别作一个垂直面，这两个垂直面与水平面 H 的交线 da 和 db，它们分别为 DA 和 DB 在水平面上的投影。这样，夹角 $\angle adb$ 就称为 A、B 两点对 D 点的水平角。因此，水平角是两个目标方向线在水平面上投影的夹角。

水平角是在水平面上度量的。由图 2.3 可知，$\angle adb$ 是通过方向线 DA 和 DB 的两个垂直面形成的二面角，这两面角在两垂直面交线上任意一点都可度量，并且

角值都等于 β。

即 $\angle adb=\beta$

我们在二个垂直面的交线 dd' 上任意一点 o 放置一个水平的度盘，目标 A、B 对 D 点的方向线 DA 和 DB 在度盘上投影所夹的弧长 $\overset{\frown}{pq}$ 对应的圆心角 $\angle poq$ 即为水平角 $\angle adb$ 的角值，即

$$\angle poq=\angle adb=\beta$$

这就是经纬仪测量水平角的基本原理。

垂直角是垂直面内目标方向线与水平线之间的夹角，因此，垂直角是在垂直面内度量的。图中，如果在垂直面 $dd'b'b$ 中放置一个垂直度盘（图中未画出），并使度盘的中心 o' 与 D 点重合，则方向线 DA 和水平线 DH_a 在度盘上的夹角即是 A 点的垂直角。同样，方向线 DB 和水平线 DH_b 的夹角就是 B 点的垂直角。这就是经纬仪测量垂直角的基本原理。

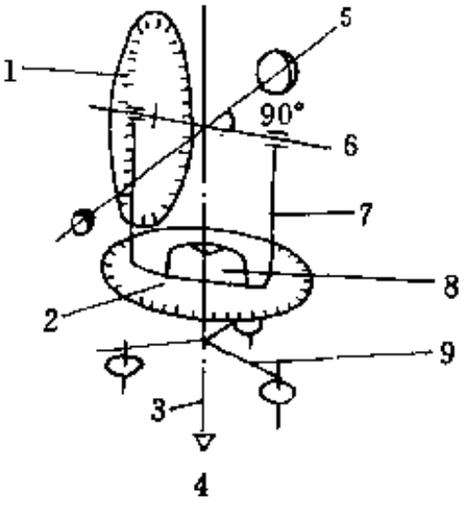


图 2.4　经纬仪的基本结构

1—垂直度盘；2—水平度盘；3—竖轴；4—铅垂线；5—望远镜；6—横轴；7—照准架；8—水准器；9　安放系统

二、经纬仪的基本结构

根据上述测角原理，经纬仪要进行角度测量必须有下例基本结构（见图 2.4）：

1. 望远镜

望远镜主要形成视轴，用视轴来照准远方的 A 点和 B 点形成方向线 DA 和 DB（见图 2.4），得到水平角，同时望远镜还应在垂直面内旋转得到垂直角。

2. 度盘

度盘是测量角度的，因此也叫角度比较器。测量水平角时用水平度盘比较，测量垂直角时用垂直度盘比较。

3. 水准器

经纬仪上的水准器是保证仪器安置到正确的测量位置上的，即水平度盘放置到水平面上，垂直度盘放置到垂直面上。实现仪器水平的部分叫安平系统或脚螺旋。

4. 旋转轴

分竖轴和横轴，竖轴使经纬仪的望远镜在水平面内旋转，因其旋转轴的位置在垂直线上故称竖轴。横轴是望远镜本身的旋转轴，用于照准不同高低位置的目标，测量垂直角。联接竖轴，横轴的部分称为照准架。

5. 读数系统

读数系统的作用主要是对度盘作精确读数，以获得角度值。

6. 对点器

使经纬仪的转动中心（水平度盘的中心）与野外的测站点重合的部分，也就说对点器的作用是使经纬仪安放到测点上。

根据水平角和垂直角的概念，经纬仪的上述结构应保持如下基本关系：

1）竖轴应处于垂直线的位置上，这样、水平度盘才能水平，读取的角值才是水平面的水平角。

2）望远镜的视准轴应与横轴正交（即垂直），而且横轴与竖轴也应正交，这样望远镜上下转动时扫描出的才是垂直面。

3）垂直度盘应与横轴垂直面且同心，这样，才能正确获得垂直角。

4）水平度盘的中心应与竖轴中心重合，竖轴中心应落在测站点上。

综合上述关系，就是要求三轴（视准轴、竖轴、横轴）与二盘（水平度盘，垂直度盘）互成正确关系，它们相互联系，相互约制，从而构成了经纬仪的整体。如果上述基本关系破坏，就会影响测角精度。

三、经纬仪的特点与要求

经纬仪的第一个特点是高精度。因为工程建设与国防建设对测量提出了高精度的要求，必须有相应的经纬仪来保证测量结果

的精确。这就对经纬仪的一些零件提出了很高的精度要求。以度盘为例，当要求测角误差小于1″，度盘半径 $R=50\text{mm}$ 时，在圆周上对应于 $\delta=1$ 的偏差 Δ 的大小为：

$$\Delta=\frac{R\times\delta}{\rho''}$$

ρ''为角度转化为弧度的系数，即 $\rho=206265\approx2\times10^5$ 代入上式，则：

$$\Delta=0.00025\text{mm}$$

即度盘上的刻线位置若有 $0.25\mu\text{m}$ 的偏差时将造成1″的差错。这个1″的误差对20km远的目标将造成100mm的偏差。因此，经纬仪上关键零件的加工精度要求是很高的。

我国地域辽阔，气温可以在+50℃——40℃的范围内变化，一天之内的温差也可达±10℃，在野外仪器还必须经受风砂、湿气的侵蚀，也可能在沼泽、草原、高山、深谷、矿井等各种条件下工作，仪器需可靠。

由于上述特点，对经纬仪提出了四个基本要求。

1）仪器必须达到规定的精度。

2）在变化的外界条件下经久耐用。

3）仪器结构稳定可靠，操作、维修简单方便。

4）体积小，重量轻。

根据这四个基本要求就出现了结构十分紧凑、复杂的光学经纬仪。光学经纬仪仍然是当前广泛使用的高精度测角仪器。

第三节　水　准　仪

水准仪是借助光学方法测量地面上两点之间高差的精密测绘仪器，广泛应用于国民经济建设和国防等各个领域中。

一、水准仪的用途

为了测绘和编制全国各种比例尺的地形图，并为了给国防、各项经济建设和科学技术活动提供有关的地面点精确位置和高程资

料，必须在全国领土上布设整体的、具有均匀密度的精密的国家大地控制网，其中包括平面控制网和高程控制网。水准仪在国家经济建设中的一项主要用途就是建立国家的高程控制网。

在地震预报方面，水准仪也可以发挥重要作用。比如，在横跨地层断裂层两边布设短水准线路，每天用精密水准仪进行精密水准测量，可以监视地形倾斜的速度和幅度突变现象，为地震预报提供可靠资料。

在修建铁路、公路，城市建设、开矿和国防上都需要了解地面的高低起伏，便于选线设计，组织施工。每一项工作除了使用其他测量仪器外，也都需要用水准仪进行测量。几乎从事任何一项基本建设都离不开水准仪。

二、地面的高程系统和水准测量原理

地面点的高度是用高程表示的。所谓地面点的高程是指该点到平均海水面的铅垂距离。面平均海水面即海平面是指海水水位的平均位置。如图 2.5 所示，取海平面的高度为零，地面上 A 点和 B 点的高程相对它说来为 H_A 和 H_B，而 A、B 两点间的高程差数 h 称为 A、B 两点间的高差。从海平面起算的高程称为绝对高程，或称海拔。如果以地面上某一点作为高程的起算点，并由此推算出其他各点的高程，称为相对高程或假定高程。H_B' 就是以 A 点作高程起算点时，B 点的相对高程或假定高程。



图 2.5　高程示意图

利用水准仪所给出的一条水平视线进行地面上两点之间高差

的测量方法称为水准测量法。

下面以图 2.6 为例，说明水准测量原理。设欲测 A、B 两点间的高差为 h。在 A、B 两点分别竖立有分划的水准标尺，中间安放水准仪。沿水准仪给出的一条水平视线，在 A 点标尺上读得读数 a，在 B 点标尺上读取读数 b，则 A、B 两点的高差 h 为：

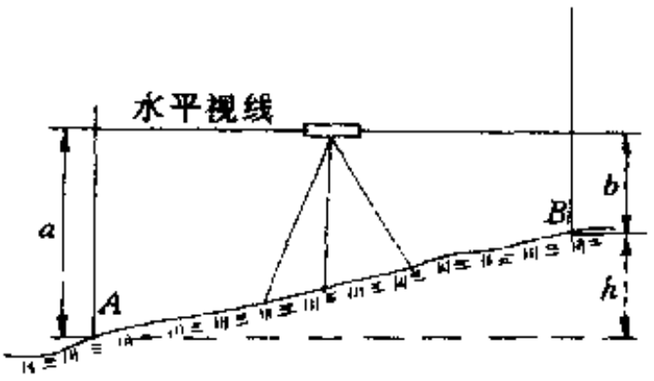


图 2.6　水准测量示意图

$$h=a-b$$

若已知 A 点的高程，则 B 点的高程为：

$$H_b=H_a+h$$

当水准测量路线的方向是从 A 点到 B 点，则 a 称为后视读数，简称后视；b 为前视读数，简称前视，因此高差等于后视减前视。正号高差表示由 A 到 B 的地面是上升的。

上面是安置一次仪器来测量地面上两点间高差的方法。如果欲测高差的两点相距过远或高差太大时，就不可能通过一次测量而获得高差。这时可将高差分为许多段，依次将仪器及标尺（图 2.7）安置在每一段上，按图 2.6 的方法求出每一段的高差，取各段高差的总和则为欲测两点间的总高差，即：

$$\Sigma h=h_1+h_2+h_3=\Sigma\ (a-b)$$

每安置一次仪器称为一个测站，测站之间竖标尺的点称为转点。转点是进行水准测量临时安设的点，是专为传递高程用的。通常使用尺垫作为转点，使用完毕即由扶尺者带走。

如要测得 C、D 间高差 Σh 后，则可根据 C 点高程 H_C 求出 D 点的高程 H_D：

$$H_D=H_C+\Sigma h$$

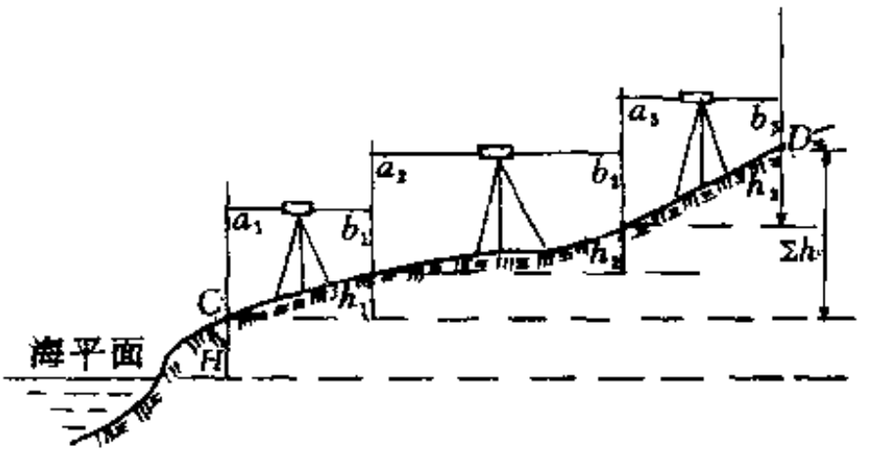


图 2.7　分段计算高差示意图

三、水准仪的基本结构

水准仪由以下三部分构成（见图 2.8）。

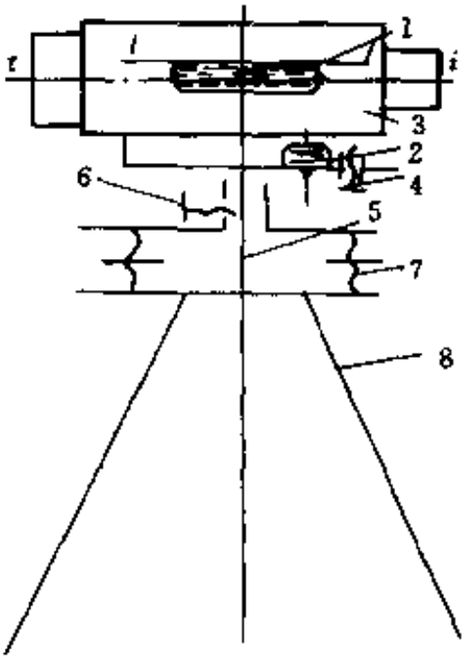


图 2.8　水准仪结构示意图

1- 长水准器；2—圆水准器；3—望远镜；4—微倾机构；5—竖轴；6—制微动机构；7—脚螺旋；8—脚架

工作标准器：长水准器 1，圆水准器 2；

瞄准读数机构：望远镜 3；

安放系统：微倾机构 4、竖轴 5、制微动机构 6、脚螺旋 7、脚架 8。

水准器的作用是保证视线水平，望远镜是为了在照准时读取水准尺上的读数。

水准仪上有圆水准器和长水准器各一，圆水准器供粗略整平用。长水准器与望远镜固连在一起，供精确整平用。在水准仪制造时，要求望远镜的视准轴（读数时的视线方向）和水准器轴平行。由于这两者平行，因此当水准器气泡居中时，视准轴也就平行了，即形成了水平视线。

为了使长水准器的气泡严格居中，大多数水准仪备有棱镜装置的水准器（称为符合水准器）。当仪器粗略整平后，再转动水准仪上的微倾螺旋，在观察窗中可以看到两个半边气泡一个向上，一个向下作相对移动。若两端的象符合时，表示气泡居中。在气泡未居中时，则气泡两端的象就不符合。

如前所述，水准测量就是利用水平视线来测量两点之间的高差。供水准仪读数用的尺子叫水准尺。

水准尺又称标尺，是水准测量不可缺少的工具。水准尺的质量直接影响到水准测量的成果，所以必须给以足够的重视。对它的基本要求是，尺身正直、分划准确、注记清晰，携带轻便、构造坚固。

第四节　摄影测量仪器

摄影测量仪器种类多，结构也复杂，故只能简单地介绍。为了了解摄影测量仪器的应用，首先对航空摄影测量的有关内容加以说明。

航空摄影测量简称“航测”。它是利用摄取的航空像片，依据影像与地面物体之间的几何关系，经过一系列判译、量测、处理等步骤，得出地形图。它可将大量外业测量工作在室内完成，具有成图速度快、精度高、成本低、不受气候和季节限制等优点，所

以发展很快。现已成为测制各种比例尺地形图的主要方法。过去主要用于测制 1：10000—1：100000 中，小比例尺地形图；由于计算机的发展，高精度测绘仪器的出现和先进作业方法的采用，已能用于 1：500—1：2000 大比例尺测图。大比例尺测图精度要求高，所采用作业方法、技术指标等方面和中、小比例尺有所不同。

航空摄影是航测成图的第一道工序。它是用航空摄影机在飞机上对地面进行摄影，用所摄得的航空像片作为测图的基本资料。航摄像片资料质量的好坏，直接影响到航测内外业的工作量、测图精度、成图成本等方面。

航测成图根据测区情况，可采用三种方法：即综合法、分工法和全能法。通常多采用全能法。全能法成图是在全能型立体测图仪上，建立与地面相似的立体模型，在立体模型上测图，同时解决地物，地貌的平面位置和高程，适用于各种地区测图。下面简要介绍全能法测图的基本原理和全能型立体测图仪的结构和分类。

一、全能法测图的基本原理

所谓全能法测图是指在各种全能型立体测图仪上测制地形图的总称。它的基本原理是摄影过程的几何反转原理，即利用光学几何条件，使同名光线对对相交，使摄影所得的两张像片恢复到摄影时的光束形状及空间位置，从而建立起与地面相似的几何模型。

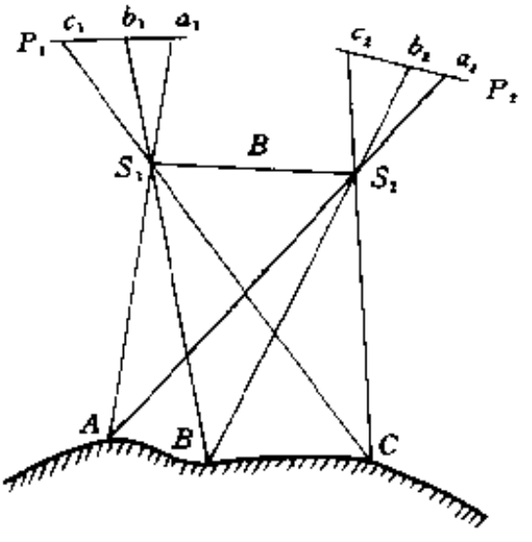


图 2.9　摄站点示意图

如图 2.9 所示，航空摄影时，在相邻摄影站 S_1 和 S_2 摄得两张像片 P_1 和 P_2。现在地面有 A、B、C 三个点，则它在左像片 P_1 上的成像为 a_1、b_1、c_1，在右像片上的成像为 a_2、b_2、c_2。如果将摄影的这两张像片重新放在原来摄影时的空间位置上，则通过摄影机镜头 S_1 和 S_2，其投影下来的同名光

线 a_1S_1 和 a_2S_2 也能相交于地面 A 点，同样同名光线 b_1S_1 和 b_2S_2 以及 c_1S_1 和 c_2S_2 也会准确地相交于 B、C 两点，这样两张像片当然就恢复到原来摄影时的位置。这时不仅 A、B、C 三个同名像点相交于地面相应点，而且所有两张像片上的重叠影像都相交于地面相应点上，形成地面立体模型。这个地面模型的大小和形状就与摄影时地面相同。这样用摄影得到的相邻两张像片，经过同名光线，对对相交的投影过程得到与原来摄影时同样的模型，称为摄影过程的几何反转原理。当然实现“摄影过程几何反转”时，不可能把像片放在空中原来摄影的位置上，而是按比例缩小两投影器（像片）的距离，得到缩小的地面模型。

全能型立体测图仪器，就是根据以上“摄影过程的几何反转”原理设计的。把航摄相邻两张像片放在全能仪的左右两个投影器中，使像点投影下来的同名光线对对相交，重新得到地面立体模型。但这两个投影器的位置不是原来摄影时的空间位置，而是缩短了距离的。由于在全能型立体测图仪上能模拟摄影时的情况，建立地面立体模型，并进行立体测图，因此全能型立体测图仪亦称为模拟型立体测图仪。它由于是恢复摄影时的状态进行测图，所以全能法测图理论上是严密的。

二、全能型立体测图仪的结构和分类

（一）结构

全能型立体测图仪的类型很多，具体结构也不尽相同，但总的设计要求都是根据上述“摄影过程几何反转”原理，模拟摄影状态设计的。类型不同的全能仪是在于实现设计原理时采用了不同的方式，总的结构应包括以下几点，图 2.10 为全能仪结构示意图。

1. 全能仪的投影器应有左右两个，其大小应和航摄资料相适应（如像幅为 $18\times18cm^2$ 或 $23\times23cm^2$；投影器主距和航空摄影机主距 f 相符），即可恢复内方位元素。

2. 全能仪投影器支架应使投影器能独立进行左右（φ）倾斜，前后（ω）倾斜和圆周（k）旋转的各种动作，以便两投影器恢复

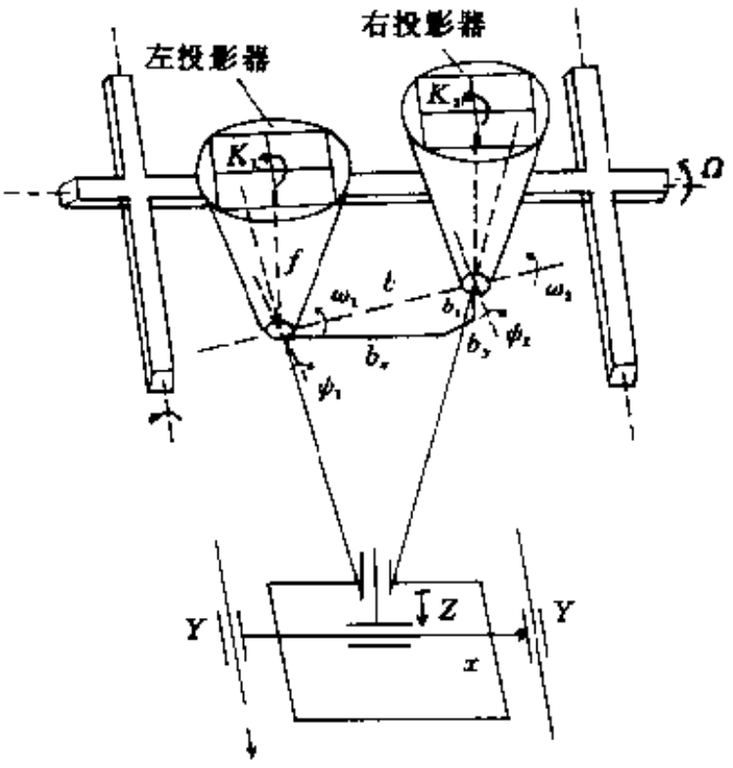


图 2.10　全能仪结构示意图

到摄影时的相对位置，供进行相对定向用。

3. 两投影器之间的距离可作相对直线移动，即可作左右（b_x）、前后（b_y）、上下（b_z）相对移动的装置。以供模型基线（b）的安置，确定模型比例尺的需要。

4. 全能仪的两个投影器，能一起作左右（公共 ϕ）倾斜和前后（公共 Ω）倾斜，以便两个投影器（即整个模型）恢复到摄影时相对地面的方位，供进行绝对定向用。

5. 仪器的量测标志一般为点测标，可借助 X、Y、Z 手轮运动，即量测像对内任意点的模型坐标。因此要求光学系统良好，以达到影像清晰不变形，便于人眼观测。

实现上述五项总体要求，在设计上和结构上有各种不同形式。如两个投影器间的基线安置，有的仪器设计两个投影器距离固定不动，而在基线架上安置基线长度。有的仪器不设公共的转角设备，而用等量转动左右投影器的转角 ϕ、ω 来代替公共的 Ψ 和 Ω 运

运动。有的用一个试测台来代替 X、Y 手轮作平面运动。两个投影器的放置上，防止基线短而投影器碰撞，在结构上一般不是直接用三角形交会，而是用“三角形加平行四边形交会”或称“蔡司平行四边形交会”。

（二）全能仪的分类

从投影方式来分有：

1. 光学投影类仪器：它的投影光线是以实际光线来体现的，如 C_5 型立体测图仪。

2. 机械投影类仪器：它的投影光线是以两根金属导杆来代替同名光线交会。目前我国及地矿系统测绘单位使用的立体测图仪绝大部分都属于这一类。如 A_8、A_{10}、B_{8S}、D_2、Topocart、F 型等。

3. 还有光学机械类仪器：其投影光线在投影器内由实际光线体现，而射出镜头后的光线为金属导杆代替。此类仪器很少，如威特 A_2 等。

从仪器外型来分有：

1. 空间型立体测图仪：如 A_{10}、B_{8S}等外观和摄影时状态相似，明显看出是呈空间交会形式。

2. 平面型立体测图仪：把交会导杆设计成平面形式，外观看不出交会状态，优点是仪器占空间位置少，如 Topocart 型等。

第三章　测绘科技发展的现状及趋势

世界新技术革命已经对测绘科学产生了深刻的影响，传统测绘科技的各个领域都在迅速利用新技术成果发展相应的技术体系。例如，大地测量中卫星多普勒定位，全球定位系统（GPS），甚长基线干涉（VLBI）等新技术的出现和应用，使得传统大地测量开始进入空间（三维）大地测量和整体大地测量的新领域；摄影测量技术在信息技术和航天技术的推动下，已经开始由模拟法摄影测量体系逐步过渡到解析法和数字化摄影测量体系，并通过航天摄影测量，与遥感技术溶为一体；在地图制图技术方面，传统的手工作业和静态模拟产品出图体系逐步得到改造，正在发展机助制图、地图数据库和地理信息系统；工程测量中，电磁波测距仪已经得到广泛应用，袖珍和微型电子计算机已在生产中逐渐普及，正在发展室内外工作一体化的数字化大比例尺成图技术。应该指出的是全球定位系统（GPS）的出现，不仅对大地测量，而且对航空摄影测量和工程测量都将产生深刻的影响。

第一节　大地测量

大地测量学科是一门理论与实用并举的学科。随着现代科学技术的迅猛发展，各种先进的测绘技术和仪器设备不涌现。

一、长基线干涉测量（VLBI）

它是60年代发展起来的一门新技术，它主要是利用射电天文望远镜对银河外射电源类星体观测的数据，用来求定基线向量、坐标分量、极移等参数。VLBI用途很广，用于大地测量仅仅是它的一个方面，目前在数千里的距离上其精度可达厘米级精度。由于设备较笨重所以尚未能普及应用。

二、全球定位系统（GPS）

它是集空间技术、微电子技术、计算机技术等为一体的高新技术，是美国军方耗巨资开发的第二代卫星导航系统，用以代替子午仪卫星导航系统。

预计由 21 颗（近期报道为 24 颗）卫星组成的 GPS 星座将于 1993 年发射完毕。届时，在六个轨道面上将均匀分布 18 颗卫星，另有三颗备用卫星。卫星高度约 20000km，轨道倾角 55°。通常用户在地面上用 GPS 接收机同时接收四颗卫星发射的信号，测定接收机天线至卫星的距离，卫星的瞬间坐标是已知的，用距离后方交会方法，经过适当的处理，即可得到待测点的三维坐标。目前单点定位精度，C/A 码伪距定位可达 10～20m。

GPS 定位具有以下优点：(1) 测点间无需通视，可以直接测定实际需要的点位，不必造标，不必为求多方向通视而选点于山顶上，这样就给测量工作带来很大方便。控制点位置可以根据需要设置，在建立工程控制网时，可以省略对工程无用的控制点。(2) 应用范围广，定位精度高。由于 GPS 具有全天候的特点，因此，在任何时间，世界上任何地方，不同的气象条件下，都可以实施导航定位和精密测量。就精密测地而言，测量范围极广，在实用条件下，测程下限可以是几十米，而上限可达数百公里甚至更远。(3) 各个被测点的精度，在保证良好的空间交会图形的前提下，其精度都是均匀的，没有传统控制网那种离起始点越远精度越低的弱点。(4) 点的三维坐标可以同时测定，虽然 GPS 测得的是 WGS-84 世界坐标系的坐标，但可以精确地转换成北京-54 坐标系的坐标；对于运动的测点来说，还能精确测出它的速度。(5) 费用低，作业时免去了一些常规测量方法所需的造标等费用，加之时间短，速度快，效率高，因此用 GPS 测量是十分经济的。(6) GPS 可用多台接收机联合工作，可以快速联测和周期性复测大规模的控制网。

正是由于 GPS 所特有的上述特点，近几年来，我国在引进、消化、开发、应用 GPS 定位技术方面发展很快，石油、煤炭、测绘、地震等许多部门引进各种不同型号的 GPS 接收机已超过百台，并

在开发应用中取得了成效。国内许多城市工测部门也很关心GPS在工程控制网或城市控制网的应用问题，深圳、海口、天津、抚顺、绵阳等城市，采用GPS建立城市控制网，提供了高精度的信息。更值得一提的是，由三峡工程开发总公司、武汉测绘科技大学、华中理工大学共同合作，于92年5月成功的采用GPS技术建立了三峡工程试验控制网，这是中国大型水利水电工程测量上的一个创举。

第二节　摄影测量与遥感

一、影像信息的获取

传统的摄影测量影像获取手段是用框幅式相机从航摄飞机上摄取黑白或彩色摄影资料，用于测制不同比例尺的地形图。

当前，国内外空中摄影与遥感向两个方向发展。其一是以航天飞机和人造卫星为平台的高空遥感摄影，以获取大覆盖率和小比例尺的航天遥感资料；其二是以轻型飞机和其他飞行器为平台的低空或超低空摄影，以获取中、小面积，大比例尺影像信息。分辨率从80m可提高到30m。通过各种处理立体重叠影像，可求得±5—10m地面高程精度。

在国外，许多发达国家的有关部门都有自己用于大比例尺航空摄影飞机，进行定期摄影飞行，以便及时地获取动态的地表信息。日本的低空摄影就十分活跃，全国共有50多个单位都有自己的摄影飞机，相当机动灵活。一般情况下，可进行1：5000—1：6000比例尺的空中摄影，能满足各类用户的不同要求。

国内各有关部门对低空大比例尺航空遥感摄影亦十分重视

航空遥感技术的发展，其应用范围越来越广，也为工程测量和城市规划设计等提供了新的手段和方法。80年代以来，遥感技术在我国工程测量中发展很快，服务面也很广，已经显示出良好的发展前景。如天津市利用航空遥感影像资料进行城市综合调查，编制了包括社会、自然环境等二十多个图种；北京、广州等城市利用航空遥感信息资料编制地质、植被、交通、污染、地形、土地利用等几十个图种，取得了大量社会与自然环境资料，为城市规划建设和国土资源开发利用提供了宝贵的资料。

二、影像信息处理

我们知道，传统的摄影测量影像处理技术是对航摄像片和像对进行模拟法几何处理。1957年，海拉瓦提出了解析测图仪的设计思想，经过近20年的研制过程，电子计算机技术发展，1976年解析测图仪开始进入市场。世界上各主要测绘仪器厂家，先后推出了多种型号的解析测图仪。它们除能替代模拟仪器完成各种摄影测量作业外，还具有机助测图的功能。

解析测图仪的优点：

①相对定向和大地定向比较方便，灵活性强，特别是在超高倍放大作业中，不受图板和绘图桌大小的制约；

②在工程大比例尺测图中，除可以按某一基本比例尺绘制图件外，还可以根据需要放大和缩小，重复绘制不同比例尺的图件；

③除能按常规图解方法在绘图桌上测制线画图外，还可以按网格或断面采集数据建立数字地面模型，然后用数字地面模型插绘等高线并同时获得正射投影的数据；

④可以利用计算机外围设备将测制的成果建立图幅文件存放在磁盘或磁带上，然后利用数控制图桌进行脱机绘图。

第三节　工程测量

工程测量是各种专业测绘的综合学科，是工程勘测、设计的基础。其发展方向简介如下。

一、地面测量仪器和方法向自动化方向发展

1. 电子测距仪的发展和广泛应用给工程测量带来巨大的变化。各种国产的、进口的电子测距仪用于工程测量的各个部门，使距离测量基本上摆脱了全靠钢钢尺和钢尺机械法测定的落后方式，从而使传统的三角网逐步地被测边网、边角网和导线网所代替；用高精度的电子测距仪，如ME5000，可代替传统的基线测量和基线扩大边的观测，为精密工程控制网的建立，大型建筑物的变形观测，地壳形变监测等精密工程测量提供了可靠的工具。同时电子测距仪的使用大大地提高了功效，降低了成本，减轻了劳动强度，使工程测量的手段和方法产生了深刻的变化。其发展方向是向轻便化、自动化和功能多样化。

2. 电子经纬仪的出现是地面测量技术进步的又一个标志。如威特厂的T2000和科恩厂的E_2以及Leica全能自动经纬仪测量系统等。水平和垂直方向的测量精度都可达到0.5″，它与常规光学经纬相比具有以下优点：

①野外测量结果自动记录在“电子手簿”上，减少了读数误差和记簿粗差，为实现室内数据处理自动化打下了基础；

②利用电子经纬中的微处理机，通过传感器可以自动地改正轴系误差，提高测量精度；

③角度测量时自动扫描整个度盘，并取其平均值作为测量结果，从而消除了度盘的分划误差和偏心差；

④距离的归化、高差和坐标计算均可在仪器上直接完成，减轻了内业计算工作量；

当前在地面测量仪器中引人注目的是全站型电子速测仪。所谓电子速测仪就是电子测距仪和电子经纬仪相结合加上数据处理终端而构成的组合型仪器，通常也称之为全站仪。其主要功能有：利用传感器，通过微机自动改正轴系误差；能自动进行距离改平，高差和坐标计算；度盘偏心误差和分划误差可由软件确定并消除。它的最突出的优点是实现了外业记录的自动化，消除读数误差和记录粗差。通过数据接口将外业数据传输到计算机，并用数据处

理软件进行处理、就可实现从外业观测到数据处理的自动化。为测图向数字化、自动化方向发展开辟了道路。

二、工程测量数据处理向自动化方向发展

1. 电子计算机技术的发展促进了测量数据处理的自动化。例如，城市或工程控制网的平差计算，对大型控制网的整体平差计算，人工方法更是无能为力的。应用电子计算机进行自动平差计算，则是一项简便的工作。同时，在进行大量数据处理的平差过程中，还包括成果的质量评定和进行质量控制。

2. 大比例尺工程测图数据处理自动化。

利用全站式或半全站式电子速测仪（亦可用电子测距仪、经纬仪、PC-1500 机代替）在野外快速采集有关地物、地貌等各种信息，记录在电子手簿上，并用该手簿作为离线的数据终端，经过电缆把数据传输给计算机存于磁盘或其它存储介质上，由计算机对数据进行编辑处理形成各种数据文件，再把它送入绘图仪就可以自动绘制出所需的地形图或其它专题图件。

三、工程测量的优化设计

优化设计分四类：零类设计，是解决参考系数或控制网的定位问题；一类设计，是图形设计，控制点的布设及观测量的安排；二类设计，是观测精度的估算；三类设计，是解决已有网的改进，包括一类和二类设计中要解决的问题。

优化设计的目标函数包括精度指标，可靠性指标和经济指标。工程测量形式多种多样，优化设计的内容也越来越多，根据不同的优化对象，三个指标相互配合，有的是主要的目标函数，有的则成为约束条件。

优化设计的方法基本上有两种，一种是“计算机模拟法”或叫“尝试法”，另一种是解析法，两种方法各有优缺点。当前已广泛应用微机进行最优化设计，通过优化设计，使各种城市或工程控制网在满足点位密度和精度的条件下，达到费用最省、工作量最小，效益最高。

四、建立工程测量微机数据库

091213

随着测量数据采集和数据处理的逐步自动化，工程测量工作者如何更好地使用和管理好长期积累或收集的大量数据，使其更好的为国民经济建设和国防建设服务，最好的方法就是建立测量数据库。测量数据库伴随着计算机科学的发展和制图应用领域的客观要求而迅速发展起来，已完成从理论探索走向实际应用的阶段，并且不断向许多其它领域扩展和渗透。

机助制图的主要任务就是使地图制图过程计算机化，地理信息数据库化，地图应用和产品多样化。所谓制图过程计算机化，就是使地图从设计、生产都逐步实现计算机化、仪器化，信息数据库是机助制图的核心和关键基础工程。

应该看到，下一代的计算机是智能型计算机，机助制图也必然向智能化方向发展，产生各种智能型机助制图系统。数据库技术也将与人工智能相结合，产生各种各样的知识库、制图专家系统等。

主要参考文献

王能武编，短程光电测距仪的应用，中国铁道出版社，1983。

杨国光、沈涵芬编，光学经纬仪，机械工业出版社，1982。

《水准仪》编写组编著，水准仪，机械工业出版社，1982。

侯心农，城乡大比例尺航测成图（讲座），《城乡测绘》，1988。

洪立波，现代工程测量科技发现现状及其动态，《城乡测绘》，1991.2。

陕西省地方志编委会，测绘志，西安地图出版社，1992。

魏子卿，GPS大地测量的进展及在我国的发展前景，测绘科技，1989.1。

沈镜祥等编著，空间大地测量学，中国地质大学出版社。

0081 9404

[General Information]
书名=第四卷地球物理探测及测绘仪器（下）
作者=
页数=176
SS号=0
出版日期=

封面
书名
版权
前言
正文