

第 1 章 煤层气储层地质特征分析

根据国内外大量的煤田与油气勘探开发工作可知，地球上的煤层中蕴藏着丰富的煤层气资源。据估算，世界上主要产煤国的煤层气资源约为 $(85 \sim 262) \times 10^{12} \text{m}^3$ 其中，俄罗斯、中国和美国等国的煤层气资源潜力最大（见表 1-1）。

表 1-1 世界上几个主要产煤国煤炭与煤层气资源数据表

国 家	煤炭资源量/t	煤层气资源量/ m^3
俄罗斯	6500×10^9	$(17 \sim 113) \times 10^{12}$
加拿大	7000×10^9	$(6 \sim 76) \times 10^{12}$
中 国	4000×10^9	$(30 \sim 35) \times 10^{12}$
美 国	3970×10^9	11×10^{12}
澳大利亚	1700×10^9	14×10^{12}
德 国	320×10^9	3×10^{12}
英 国	190×10^9	2×10^{12}
哈萨克斯坦	170×10^9	1×10^{12}
总 计	23850×10^9	$(84 \sim 255) \times 10^{12}$

（据 Kuuskraa 等修改，1992）

自 20 世纪 70 年代以来，人们深刻认识到合理开发与利用煤层气，不仅能够解决煤矿开采中瓦斯爆炸问题，而且还可以为人类提供一种洁净能源。因此，对煤层气的勘探开发已经引起国内外的广泛重视，而且相继开展了相关的勘探开发研究工作。目前美国等西方国家已开始商业性开发，我国也已进行了相关的勘探开发工作。因此，关于煤层气储层地质和储集特征等方面已取得了许多可喜成果，下面就介绍有关这方面的研究成果。

1.1 煤层气储集特征和产出机理

煤层气就是指在煤层内产生和赋存的天然气；其主要成分是

甲烷(CH_4)约占 70% 以上, 又称煤层甲烷 (Coalbed Methane)、煤层吸附气或煤层瓦斯, 它是煤层气的一种, 是一种非常规天然气。煤层气与常规天然气最大不同点就在于煤岩既是它的储集岩又是生气原岩, 它是煤层煤化作用的结果。煤的储集性和煤中天然气的储集是整个成煤作用过程的结果。因此, 在研究煤层气储集和产出机理时应首先简述一下成煤作用过程; 其次, 讨论煤化作用与煤层气形成的关系; 最后, 讨论煤层气的储集和产出机理。

1.1.1 煤化作用与煤层气的形成

高等植物经化学作用和热演化作用形成煤一般要经历 3 个阶段, 即泥炭化、成岩和变质 (煤化) 阶段。植物遗体在有水存在和微生物参与下经分解化合等复杂生化过程形成泥炭, 然后被覆盖, 在温、压影响下 经过压实、脱水、胶结成岩 逐渐固结成褐煤 随着温度和压力的继续增高, 煤内部分子结构和物化性质作有规律的变化, 褐煤就变成烟煤、无烟煤。

煤化作用的结果除形成煤之外, 还形成了甲烷、二氧化碳、氮气和水等产物。由此可见, 煤既是生气原岩, 又是煤层气的储集岩。甲烷的产生有两种机制: 生物成因和热成因。早期阶段 (成岩作用) 煤层埋藏浅, 在温度低于 50 时, 腐植型干酪根受厌氧微生物的降解作用生成气体, 称为降解型煤层气 (仅占煤层气的 10%); 埋深增加或地温增加而使温度达到 50 以上时, 开始热降解的生气过程, 随着煤的变质加深, 在温度达到 100 ~ 150 左右, 气体大量生成, 与常规天然气和石油生成门限温度基本相似, 此时的镜煤反射率在 1.0% ~ 2.0% 之间 (肥煤到焦煤阶段) 生成的气量约占从以上褐煤到无烟煤总产量的 70%。之后气体仍在继续生成 至无烟煤 2 号 镜煤反射率 $R_0 > 4.0\%$, 逐步停止生气。

1.1.2 煤层气的储集方式

煤化过程中每吨成熟煤大约可生产 198m^3 天然气。这些气体一部分扩散进入大气层, 另一部分运移到煤层附近的其他岩层, 形成常规天然气藏, 剩余的则残留在煤层中称为煤层气。常规天然气主要是呈游离和溶解状态存在于储层中 (例如, 砂岩和灰岩), 而

煤层气除少量以游离态和溶解态存在外，95% 以上是以分子状态呈单分子层吸附在煤的表面上。也就是说，储集在煤层中的煤层气，绝大部分以单分子层的形式在压力作用下吸附在微孔隙的内表面。是吸附在煤颗粒的表面上。一般认为，微孔隙中不为水所充填。在未降压解吸前，微孔隙中也几乎无游离气体。即在微孔隙中只有吸附气体。煤层通过吸附作用，比常规砂岩具有更高的储气能力。

在生成甲烷的同时，凝胶化作用使煤以芳香核为基本单元的聚合物，致使煤成为具有大量内表面积的多微孔物体（每 1g 煤比表面积可达 $10 \sim 100\text{m}^2$ ）。其表面有大量过剩自由能。固体表面分子的剩余力场能对碰到固体表面上来的气体分子产生吸引力，使得气体分子在固体表面上发生相对聚集，以减少剩余力场，降低固体表面能，使具有较大面积的固体变得较为稳定。因此，煤与同体积常规储集岩相比，其储集天然气的能力是它们的 2~3 倍。

1.1.3 煤层气的产出特点

由于煤层气是在压力作用下吸附的，所以当煤层的压力降低到一定程度时（对应的压力称为“临界解吸压力”）煤层中吸附的气体就与微孔隙内表面分离，称为“解吸”。由于割理中的压力降低，解吸作用也可在煤的割理-基质界面上发生。解吸的气体通过煤基质和微孔隙扩散进入裂缝网络中，再经网络流向井筒。

煤对甲烷吸附依靠的是范德华力。属物理吸附，是 100% 的可逆过程，即在一定条件下，吸附的甲烷会与煤的内表面脱离进入游离相，这叫做煤层气的解吸。煤层甲烷气的解吸主要受压力控制，降低煤层内的压力，则可使吸附气解吸释放。煤层中维系甲烷吸附的压力是静水压力和气体压力。静水压力下的煤层气产出大致要经历 3 个阶段（见图 1-1）。

(1) 单相流动阶段。水从割理系统中进入井筒被排出，储层压力开始逐渐下降。(2) 非饱和单相流动阶段。储层压力逐渐下降，甲烷已开始解吸，形成气泡，阻碍水的流动，水相相对渗透率下降，但由于气泡是孤立的，尚未出现气体流动。(3) 两相流动阶段。

着压力下降到一定程度和气体不断解吸，气饱和度提高，气泡互相连接，形成连续气流，气水同时进入井筒。

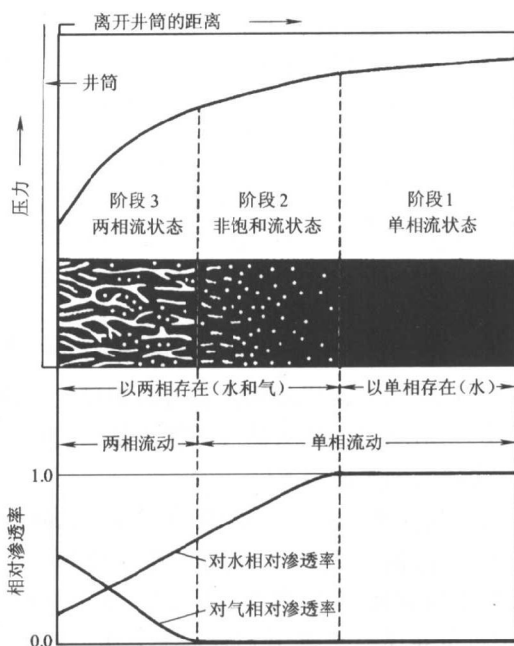


图 1-1 煤层甲烷产出的三个阶段 (据杨建业等, 1995)

一旦两相流动开始，似乎有两种气体运移机理控制煤层甲烷气的运移。其一机理指游离气穿过裂缝和微孔隙体系的流动；其二机理指气体穿过固体煤的微孔隙空间的扩散流动。从根本上讲，是压差，即井眼与地层之间的压差值直接控制气的解吸与扩散。美国两个主要煤层气田圣胡安气田和黑勇士气田目前均是通过排水降压达到产气目的。

1.2 控制煤层气富集的主要因素

煤层气为自生自储式非常规天然气。因此，控制煤层储集性

能的主要因素是煤岩性质、煤岩储集空间发育程度、煤层埋藏深度、煤层厚度及地质构造和圈闭条件的优劣等等。

1.2.1 煤岩性质对煤层气富集的影响

煤岩性质对煤层气富集的影响主要表现在煤岩三大组分，即镜质组、壳质组、惰性组的产气能力的差别。研究表明，壳质组产气能力 > 镜质组 > 惰性组。产烃气的比率在焦煤 ~ 无烟煤阶段，大致为 1.5:1.0:0.7。也有人研究认为镜质组产气略大于壳质组，原因是镜质组分气态烃产率较高，而壳质组所有成分产气能力各有不同。另外，从对甲烷的吸附能力看，一般认为煤的吸附能力随煤阶的增高而增加，在烟煤阶段（长焰煤 ~ 瘦煤）不同组分的吸附能力变化是：惰性组（具有胞腔结构而无充填物的丝质体）> 镜质组 > 惰性组（无结构丝质体）；在无烟煤 2、3 号变质阶段，显微组分的吸附能力是镜质组 > 惰性组。壳质组在三个组分中吸附能力最低。

以煤阶来分析，美国的研究与实践表明，煤化过程生气量较大的煤阶，一般储气量也较大（表 1-2）中低挥发分烟煤 镜煤反射率

表 1-2 不同煤层的气体生成量数据表

煤 级	温度 /℃	CH ₄ /cm ³ ·g ⁻¹	CO ₂ /cm ³ ·g ⁻¹	N ₂ /cm ³ ·g ⁻¹	R ₀ /%
褐煤		—	4(120)		
亚烟煤	50	—	6(200)		- 0.50 ±
高挥发分烟煤	70	20(640)	34(1080)	5(169)	0.60 ±
中挥发分烟煤	120	84(2680)	11(360)	5(160)	0.75 ±
低挥发分烟煤	150	68(2160)	8(240)	3(80)	1.20
半无烟煤	180	24(760)	4(120)	3(80)	1.63
无烟煤	200	28(880)	7(216)	10(320)	2.10
总 计		223(7120)	73(2336)	25(800)	2.40

(Karwei, 1969)

$R_0 = 0.75\% \sim 2.10\%$) 的生气量最大，分别为 $75.89\text{m}^3/\text{t}$ 和 $61.16\text{m}^3/\text{t}$ 。从脱气试验结果看，中低挥发分烟煤的解吸量最高，分别是 $7.96\text{m}^3/\text{t}$ 和 $13.43\text{m}^3/\text{t}$ 。我国煤炭系统通过分析矿井瓦斯分布和实际的研究认为从长焰煤到无烟煤，总趋势是煤层甲烷含量随煤

化程度增高而增加，其中焦煤到无烟煤 ($R_0 = 1.2\% \sim 4.0\%$) 的生产量最大，实测长焰煤到无烟煤的解吸量为 $9.06 \sim 27.18\text{m}^3/\text{t}$ 这与国外的研究结果基本一致。

1.2.2 煤岩储集空间对煤层气储集的影响

煤岩中孔隙分为两种，一种是基岩孔隙，第二种是裂缝孔隙。因此煤层是具有双重孔隙结构的储集层，见图 1-2。裂缝孔隙的主

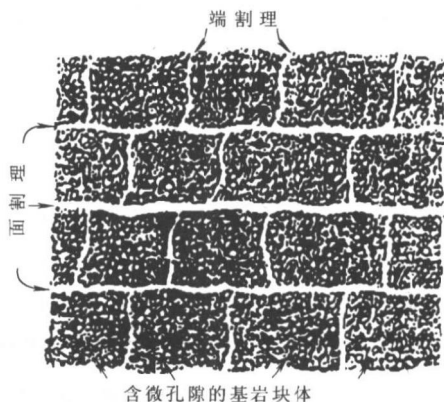


图 1-2 煤层双重孔隙结构示意图

要部分是指其内生裂隙，特称为割理。它是煤化作用过程中，由于煤层脱水，干化收缩，而产生的大致互相垂直的两组微裂隙。主要的一组可以延伸较远(可达几百米)称为“面割理”次要的一组只发育于两条面割理之间，称为“端割理”。这两组割理与煤层层面正交或陡角相交。割理是很细微的裂缝，其张开度一般以微米计。裂缝孔隙将煤分为许多块，称基岩块。基岩孔隙和割理在煤层气的储集和产出中起的作用不同。割理在储集气方面作用不大，它主要作用在于提高煤层气的采收率。割理密度与煤阶的变化有关，从长焰煤到中低级挥发分烟煤，割理密度不断增加，到无烟煤有减少的趋势。割理在富含镜质组的煤岩中相对较发育，垂直层理小裂缝发育是镜质组煤的特点。割理主要是煤化作用中产生的内部收缩裂缝，此外局部构造应力也可引起裂缝，前者叫内生割

理，后者叫外生割理。以煤阶而论，焦煤的内生割理最发育，5cm 内有 30 ~ 40 条割理，长焰煤只有几条，无烟煤少于 10 条 此外密度低于 1.75g/cm^3 （取决于灰分含量）的煤有利于割理发育。另外，煤层中还有构造形成的较大的裂隙，如断裂、褶皱、压实等引起的。

一般认为，未开采前的原地裂缝中，不含有气体，因此与含气量无关。这些裂隙、孔隙只是流体流动的通道，只与渗透率有关。

基质孔隙是指煤层被大致互相垂直的面割理和端割理划分成小块体中的孔隙。在这些基质块体中发育着孔洞孔隙，按直径大小划分为大孔（50nm）、中孔（50 ~ 2nm）和微孔（小于 2nm）对煤的孔隙喉道大小研究表明，孔隙容积主要与中孔无关，而孔隙的内表面积主要与微孔有关。基质孔隙是吸附气体的主要场所，与含气量有关，基质块体可认为是供给裂隙系统的气源。这样，煤层的全部介质就以三个相互作用的系统为特征：煤颗粒、孔隙和割理。

基岩孔隙是煤层气储集的主要空间。前苏联学者 N.B 维索茨基认为煤吸附甲烷最有效的孔隙半径在 $(15 \sim 1000) \times 10^{-10}\text{m}$ 之间 压汞试验表明 煤半径在 $(8 \sim 500) \times 10^{-10}\text{m}$ 间的孔隙体积占总体积的 60% ~ 85%，若再加上 $(500 \sim 1000) \times 10^{-10}\text{m}$ 的那部分孔隙，则比例就更大。但是并非所有不同变质程度（煤阶）、不同显微组分的煤对甲烷都具有同等程度的吸附能力，实验证明，从褐煤到无烟煤，基岩的有效孔隙不断增加，到无烟煤 2 号（ $R_0 = 4.0\%$ ）以后，有效吸附孔隙有所降低。

从煤的显微组分看，惰质组和镜质组的有效吸附孔隙都比较发育，而壳质组的有效吸附孔隙相比之下显得不太发育。此外，实验证明煤中无机矿物（粘土矿物和黄铁矿等）含量增高，灰分增高，有效吸附孔隙则减少，不利于煤层气的储集。

1.2.3 煤层埋深、圈闭类型与煤层气的储集

随着煤层埋深加大，地层温度增加，一方面煤的变质程度增加，生气量加大，另一方面封闭条件变好，煤层中甲烷气体分压增加，煤的吸附能力变大，煤层对甲烷的保存量在一定压力范围内显著增加。全煤脱气实验结果表明，埋深在 914m 以上，煤层甲烷的

平均含量为 $5.664\text{m}^3/\text{t}$ 埋深在 $914 \sim 1829\text{m}$ 的煤层甲烷平均含气量为 $13.59\text{m}^3/\text{t}$ 。但是当达到一定深度以后，煤层甲烷含量不再为煤层埋深的函数，因为地温升高，导致煤层对甲烷的吸附能力下降。就我国情况而言，煤层含气量除受埋深影响外，煤阶的变化是其主导因素。一般 200m 以上为瓦斯风化带， $200 \sim 1000\text{m}$ 深度内的煤的演化程度好，有煤层吸附气的大量聚集。

煤层气藏与常规天然气藏不同，它是一种特殊的压力圈闭气藏，可以分为水压圈闭和气压圈闭两种类型。水压圈闭是目前形成大型煤层气田的主要圈闭形式。水填充在煤层的割理中，并有足够的静水压力，使吸附气不能解吸而得以保存。因为一般情况下受重力影响水向低处流，先聚集在构造低部位，向斜、单斜低部位是形成这类气藏的有利地区，也是勘探的主要方向。美国两大含煤盆地都在向斜、单斜低部位形成大的煤层气田就是很好的证明。气压圈闭气藏，填充在煤层割理空间的若为气体，则气体达到足够压力时，同样使煤层中的吸附气不能解吸，无法向割理运移，因而得以保存。因此，气压圈闭必须在煤层之上有比较好的不渗透层。其形成机理同一般气藏相似，不同的是其储层为煤层，储集空间为微孔隙。从地质构造总体分析上看，在构造相对稳定的沉积盆地才能容易形成以上两种煤层气藏的圈闭形式。因此，大地构造稳定区是煤层气的主要保存地区。为此，美国在评价煤层气资源时，使用聚煤气系数，稳定区用 20% 而活动区仅用 1% 。

1.3 煤层气储层参数及评价概论

为了经济合理地开采煤层气资源，必须了解煤层气储层的一些评价参数。这些评价参数主要包括如下几类：

(1) 煤层含气量。煤层总含气量应为解吸气量、逸散气量和残余气量之和。在井场用普通取芯工具钻取煤芯，当煤芯提出井口后，立即用密封罐采取煤样，利用解吸仪测定煤样中甲烷气随时间变化规律，求出解吸气量，根据提钻到采样过程中煤样暴露时间计算采样过程中的逸散气量，然后在实验室将煤样粉碎并测定残余

气量,上述 3 种气量的总和除以煤样可燃质质量即得出气量 (cm^3/g)。这相当于实际含气量的下限值。目前美国采用密闭等压取芯测解吸量,比较接近实际含气量。此外通过吸附等温线可间接求得最大饱和含气量,通过含气量与煤阶、温度的关系以及用测井方法也可粗略估计出含气量。准确的含气量数据是煤层气评价中优先考虑的因素。如果含气量测定结果有误,就不能提供可靠的煤层气资源依据。

(2) 吸附特性实验参数。它是在实验室用静态容量法通过煤芯的等温吸附试验,用传统的兰氏 (Langmuir) 吸附理论描述甲烷的吸附规律,记录不同压力下的吸附量,以求得煤的吸附等温线,同时得出解吸曲线以分析含气量和解吸压力。

储层评价中往往通过吸附等温线求得的最大含气量 (理论含气量) 与井场解吸求得的实际含气量比较,以确定煤层是否被气饱和。因为在许多情况下,由于地壳上升剥蚀等原因,气体自然解吸或煤的组成变化不同,产生不同的重烃类,使得煤层没有饱和气,这对于确定开发方案是非常重要的。见图 1-3,煤样 A 含气量为 $18.2\text{cm}^3/\text{g}$, 储层压力为 13.8MPa , 因为煤被甲烷饱和,当煤被钻穿后,钻孔压力开始下降,甲烷很快从基质中解吸出来。相反,煤样 B 没有达到饱和含气量,含气量为 $15.0\text{cm}^3/\text{g}$, 则在现有储层压力下 (13.8MPa) 甲烷不会解吸,只有降低储层压力到 $6.8 \sim 7.0\text{MPa}$

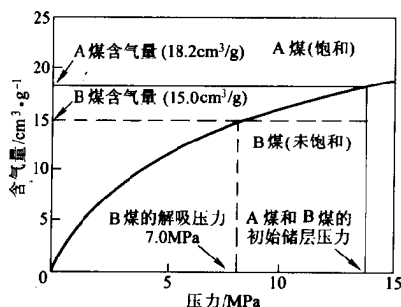


图 1-3 饱和气煤的含气量与储层压力在吸附等温线上的关系 (据杨建业等, 1995)

后,大量的气体才开始解吸。由此可见,吸附特性好的较低煤阶比低饱和度和兰氏压力高的煤阶更好。此外,就吸附等温线的形态分析,接近线性较陡的吸附等温线,对于提高甲烷产量更有利。

(3)煤层物性参数。煤层物性参数通常指煤层的渗透率(包括绝对渗透率和相对渗透率)和孔隙度。煤岩渗透率主要是指煤岩裂隙的渗透率,它是决定储层气水流动的主要因素,也是煤层中最重要而难以测定的参数。除了通过岩芯测试外,还常常采用不稳定试井、测井和通过油藏模拟生产史谐配等方法求得。

实验证明,煤层的渗透率只有大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,煤层气的开采才能成功。具有较高渗透性的条件是:1)煤层埋深小于约1500m;2)煤阶 $R_0 > 0.7\%$,富含镜煤的煤层;3)煤层的密度小于 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$,密度低的煤有利于割理发育;4)构造条件:褶皱轴的最大曲率点最有利于裂隙的发育;5)裂隙或断裂发育部位。

(4)煤储集岩石学方面的参数 主要指煤阶、煤的显微组分、煤的显微硬度。煤阶通过测定煤中镜质组反射率(R_0)来确定。其余则用反光显微镜区分,同时亦可以求得割理宽度和密度。

(5)煤岩工业分析参数,该类评价参数是指煤的固定碳、挥发分、灰分、水分,目的是对煤岩性能质量作出评价以及在储层评价中校正含气量。

(6)其他储层评价参数 诸如煤层埋深、煤层厚度(有效厚度)储层压力、温度、机械特性、水文特性及煤的资源量等参数亦是储层评价不可缺的资料。其中煤层厚度较为重要。一般认为煤层厚度必须大于0.5m,若太薄不利于甲烷保存及压裂构造。对于厚煤层可用空腔完井的方法以降低生产成本。例如美国圣胡安盆地,煤的单层厚度达到几十米,除阿莫克(AMOCO)公司采用清水加砂压设计外,其他公司均采用了空腔完井这一完井方法。

为了确定上述煤层特性评价参数,目前所使用的非测井方法主要包括岩芯、试井和定向取芯等。对于现行确定煤层特性的非测井方法及相关事项见表1-3(据内部交流资料,1998)。这几种方法可取得较准确的煤储层评价参数,但是它们只能得到局部数值,

而且具有方法费用高等不足。测井方法与非测井方法相比，不仅可以获得井及其周围各处的煤储层评价参数，而且是一类较为经济和快速的方法，因此，测井方法在煤储层评价中可发挥重要作用。

表 1-3 确定煤层气储层评价参数的非测井方法

储层参数	方法	可靠性	费 用
等温线	岩芯	± 10% 可重复性	2000 ~ 2500 美元/样
含气量	岩芯	0 ~ 30% 非压力取芯	250 美元/样
渗透率	试井	$(1 \sim 2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时, 为 ± 100% $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时为 25 %	5000 ~ 15000 美元/次
工业分析	岩芯	± 5 %	60 美元/样
煤层厚度	岩芯	± 3.048cm	视地区而定
机械特性	试井	好	25000 美元三测站
割理方位	定向取芯	极好	视地区而定
孔隙度	岩芯	± 100 %	

1.4 煤层气储层与常规天然气砂岩储层的比较

通过上面的讨论可以看出，煤层气储层是一种非常规天然气储层，它与常规天然气砂岩储层有明显的差异。例如，在储层岩石成分、生气能力、气源、储气方式、储气能力、储层物性、力学性质、以及开发等方面都有明显的差异，现将其不同的详细情况汇总，见表 1-4 因此为了有效评价煤层气储层，必须结合煤层气储层地质地球物理特点开展有关煤层气储层的评价研究工作。

表 1-4 常规天然气砂岩储层与煤层气储层的比较

比较项目	常规天然气砂岩储层	煤层气储层
储层岩石成分	矿物质	有机质为主
生气能力	无	有
气源	外源	本层
储气方式	圈闭	吸附为主
储气能力(相对)	较低	较高

续表 1-4

比较项目	常规天然气砂岩储层	煤层气储层
孔隙度	好和很好: 15% ~ 25%; 中等: 10% ~ 15%; 较低: 5% ~ 10%;	除最低煤阶的煤以外, 一般小于 10%
孔隙大小	大小不等	多为中孔和微孔, 多属毛细管孔范围
孔隙结构	单孔隙结构或双重孔隙结构	双重孔隙结构
裂隙	发育或不发育	独特的割理系统
渗透性	高低不等, 对应力不敏感, 开采稳定	一般低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 对应力敏感, 强烈的不均匀性
毛管压力	可成为油气排出的动力或阻力	微毛细管发育, 使水的相对渗透率急剧下降
比面	一般砂岩约为 $5.8 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{g}$	一克煤的内表面积可达 $100 \sim 400 \text{m}^2$
储量估算	可用孔隙体积法	孔隙体积法不适用
开采范围	圈闭以内	较大面积连片开采
井距	大	小
断裂	可起圈闭作用	可起连通作用, 提高渗透率
层中的水	推进气的排出, 不需先排水	阻碍气的产生, 要先排水
开采深度	不等	小于 (200 ~ 1500) m 为宜
产气量	高(相对)	低
气的输送	增压输送或不必增压	需加压后输入管线
储层压力	产气的动力, 同样的压降采出量大	储层降压才能产气, 同样的降压采出量小
生产曲线	下降曲线	产气量先上升, 达到高峰后缓慢下降, 持续很长开采期
机械性质	胶结好, 较致密, 杨氏模数比煤高, 泊松比比煤低	易碎, 易受压, 杨氏模数比砂页岩低
压裂	低渗透储层才需压裂, 容易产生新的裂缝, 处理压力相对低	压裂后使原有裂缝变宽, 处理压力高
井间干扰	通过邻井注水, 保持压力达到稳定	通过邻井排水压力均衡下降, 产出更多的气
井孔稳定性	好	差, 易坍塌, 易堵塞
泥浆水对储层侵害	相对较弱	严重, 需尽力避免

(据钱凯等修改, 1996)

参 考 文 献

- 1 杨建业 杜美利 苏小鹏等 .煤层气藏的储集特征及储层评价西安地质学院学报 1995;17(3):77~82
- 2 地矿部华北石油地质局编 .煤层气译文集 .郑州:河南科技出版社, 1990; 593
- 3 钱凯 赵庆波 汪泽成等编著 .煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术, 北京:石油工业出版社,1996:188
- 4 赵庆波, 刘兵, 姚超等编世界煤层气工业发展现状 .北京:地质出版社, 1998:153
- 5 谭廷栋 .裂缝性油气藏测井解释模型与评价方法 .北京:石油工业出版社, 1987:206
- 6 Kuuskraa, Vol. A., Boyer, C. M., and Kelafant, J. A., 1992, Hunt for quality basins goes abroad, *Oil & Gas Journal*, Vol. 90, No. 40

第 2 章 煤层气测井技术与储层测井评价概论

2.1 引言

由于煤层气工业的发展，煤层气资源的勘探开发已经引起国内外的广泛重视，并且相继开展了有关的勘探开发研究工作。我国目前已把煤层气资源的勘探开发作为能源发展的战略重点之一，并且地矿、煤炭和石油三系统将联合开发煤层气资源，这预示着我国煤层气的勘探开发将进入一个新的发展时期。

理论研究和实际应用表明，地球物理测井技术具有方法种类多和较高的异常分辨率等特点，因此，它在煤层气资源的勘探开发中可发挥重要作用。由第 1 章的讨论可知，煤层气储层与常规油气储层相比有明显的差异，其最大特点就是前者既是煤层气的储集层，又是它的生气源岩，并且煤层气储层包含了极为发育的自然裂隙。因此，煤层气储层具有包括基质孔隙和裂缝孔隙的双重孔隙结构。基于上述特点，必然导致其物性结构的非均质性和各向异性等特征，而且造成储层地质特征与测井响应之间的关系进一步复杂化，表现出更加明显的非线性特征以及给测井资料解释造成更大的困难和给解释结果带来更强的多解性、模糊性和不确定性。因此，国内外地球物理测井工作者紧密结合煤层气储层的特点，相继开展了有关的研究和探索，其研究范围包括了煤层气储层评价的地球物理测井数据采集技术和煤层气储层地球物理测井资料处理及解释技术（评价技术）两个方面。本章就煤层气储层评价的地球物理测井数据采集技术和煤层气储层地球物理测井评价技术等方面进行较详细地综合分析。并指出煤层气常用的测井系列和测井评价的基本内容。

2.2 煤层气地球物理测井技术

为了进行煤层气储层性质、产能评价以及指导设计经济有效的煤层气完井和压裂措施等问题，地球物理测井技术可为其提供一些重要的储层性质信息（见表 2-1）因此测井技术在煤层气勘探开发中占有重要地位。尽管到目前为止，还没有一种测井方法是

表 2-1 利用测井方法提供的一些重要的储层性质信息

储层信息类别	裸眼井测井方法	套管井测井方法	备 注
煤层识别	密度 自然伽马 井径	脉冲或补偿中子	煤层识别和确定 煤层厚度
有效厚度	高分辨率密度	脉冲或补偿中子	煤层有效厚度
煤质分析 (煤的工业分析)	高分辨率密度 密度 补偿中子 自然伽马 岩性密度 声波	高分辨率密度 密度 补偿中子 自然伽马	煤层的含碳量、灰分、水分等
渗透率(定性)	双侧向 微电阻率 电阻率、SP		裂缝渗透率等
割理分布	FMS		割理方位和密度
岩石力学性质	密度 声波全波	密度	各种弹性模量等

专门为探测煤层气储集层而设计的，但是，经过近 20 多年的发展应用，基于石油测井数据采集技术和煤田测井数据采集技术，已经逐步形成了一门相对独立的测井技术——煤层气地球物理测井技术（简称煤层气测井技术）。煤层气测井技术的测井系列类似于其他测井技术，可以分为如下 3 种类型：

(1)裸眼井煤层气测井系列；(2)套管井煤层气测井系列；(3)煤层气生产测井系列。

2.2.1 裸眼井煤层气测井系列

选择合理的裸眼井煤层气测井系列对于整个煤层气勘探开发过程是至关重要的。根据国内外的大量生产实践和有关的理论研究都表明，为了进行煤层气储层识别和确定煤层厚度，可采用如

下测井技术：

- (1)密度测井、高分辨率密度测井与岩性密度测井；
- (2)井径测量；
- (3)自然伽马测井；
- (4)双侧向、双感应、浅感应测井；
- (5)高分辨率感应测井（例如，相量感应测井、阵列感应测井等）。

为了进行煤岩工业分析、计算煤层气储层的基质和裂缝孔隙度、含气量（基质和裂缝）渗透率和岩石力学参数等，除了使用密度测井、井径测量、自然伽马测井之外，可增加使用如下测井技术：

- (1)微电阻率测井；
- (2)双侧向测井、微球型聚焦测井；
- (3)自然电位测井（SP）；
- (4)补偿中子测井、中子-超热中子测井；
- (5)微电阻率扫描测井（FMS）；
- (6)声波全波列测井、阵列声波测井；
- (7)地球化学测井（自然伽马能谱测井、铝测井等）；碳氧比（C/O）能谱测井；
- (8)井下电视（BHTV）；
- (9)温度测井。

其中最常用的测井系列是密度测井、声波时差测井、自然伽马测井、电阻率测井和井径测量。例如，我国华北石油地质局数字测井站在其煤层气试验区，标定煤层所使用的最佳测井系列即为密度测井、声波时差测井、自然伽马测井、电阻率测井（LLD、LLS）和井径测量（CAL1、CAL2）四种测井方法，其他辅助性测井包括自然电位测井和温度测井（见图 2-1 和图 2-2）；辽河油田除使用上述基本测井方法，还使用了补偿中子测井等；根据美国黑勇士煤层气田的测井实践，为了获得有关的煤储层信息，可以采用表 2-2 和表 2-3 所示的测井系列。对比我国与美国的煤层气测井系列可以看出两者使用的主要测井方法是基本类似的。

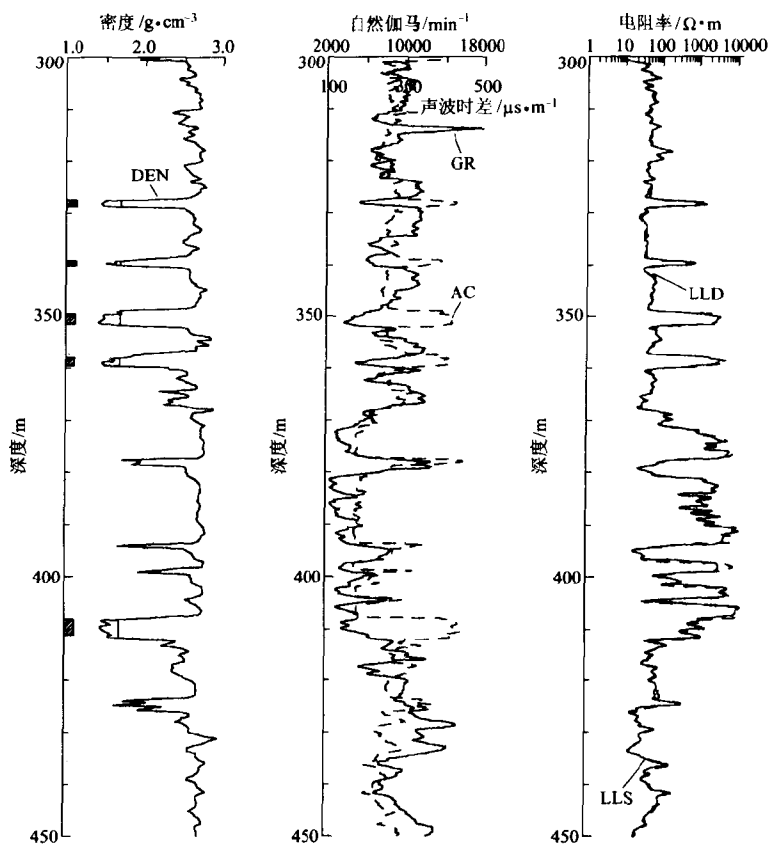


图 2-1 华北柳林煤层气试验区 ML1 井煤层气测井曲线 (A)

表 2-2 美国黑勇士煤层气田所使用的裸眼勘探井测井系列

煤层气测井方法	煤层气储层信息
高分辨率密度、岩性密度、自然伽马	煤层识别、煤层厚度
井径测量	井孔大小和井孔条件
双侧向、微电极、电阻率、SP	渗透率
中子测井	含气量
FMS	裂隙方位
密度、声波全波列测井	岩石力学参数

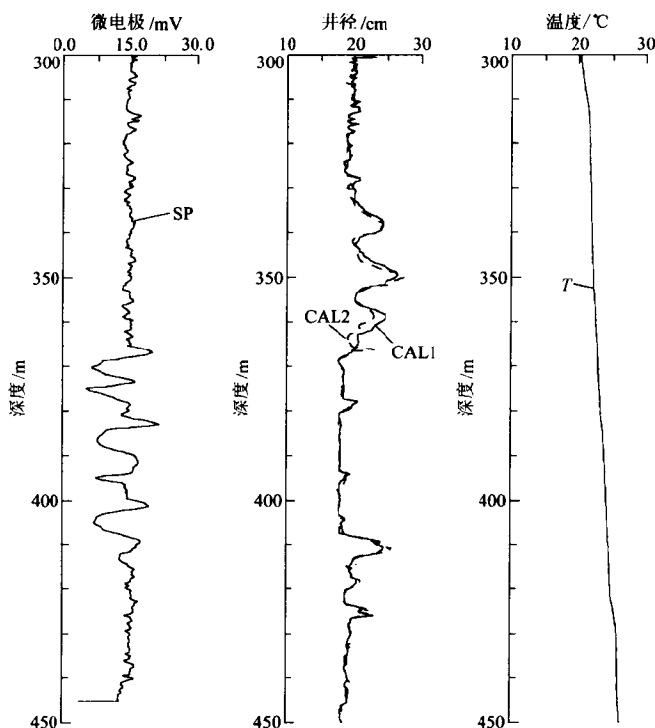


图 2-2 华北柳林煤层气试验区 ML1 井煤层气测井曲线 (B)

表 2-3 美国黑勇士煤层气田所使用的裸眼开发井测井系列

煤层气测井方法	煤层气储层信息
高分辨率密度、岩性密度、自然伽马	煤层识别、煤层厚度
井径测量	井孔大小和井孔条件

2.2.2 套管井煤层气测井系列

从原则上讲,为了获得准确的煤系地层信息测量结果,应该尽可能进行裸眼井测井。如果条件不允许或者其他客观条件不能进行裸眼井测井,我们仍可以进行套管井测井,以便解决套管井煤层气储层评价以及井筒动态监测等问题。根据美国煤层气测井的实

践，为了解决套管井煤层气储层的识别，确定储层厚度以及检查水泥胶结情况等，可以采用如下测井技术：

- (1) 密度测井、补偿中子测井、脉冲中子测井；
- (2) 自然伽马测井、自然伽马能谱测井；
- (3) 水泥胶结测井、声波变密度测井。

2.2.3 煤层气生产测井系列

煤层气生产测井是在煤层气井进入生产开发阶段之后，人们为了解该阶段井筒流体的动态参数和井内环境故障情况等的一种测井组合。它是以测量流体动态参数为主，综合了工程测井和借鉴了勘探井中常用的一些测井方法组成的。目前，煤层气井最常用的生产测井技术包括如下几个方面：

- (1) 流量测井（例如使用连续流量计）；
- (2) 流体识别测井（例如使用压差密度计）；
- (3) 温度测量；
- (4) 井下照相 (DOWNHOLE CAMERA)；
- (5) 其他。

2.3 煤和岩石的地球物理性质

煤层是煤层气产出和储存的场所，煤及其围岩的地球物理性质既是选择最佳煤层气综合测井方法的依据，也是正确进行煤层气储层地球物理测井资料处理与解释的基础。目前，在煤层气储层测井技术中常使用的煤岩地球物理性质主要有：密度、光电吸收指数、电阻率（电导率）、自然放射性（伽马总强度和伽马能谱）、中子孔隙度以及弹性波传播速度（声波时差）等。常见岩石和煤的地球物理性质见表 2-4。

煤岩的密度是一个极为重要的物性参数。相对于一般岩石来说，煤具有明显的低密度特性（见表 2-4）。煤层的密度在 $0.70 \sim 1.80 \text{g/cm}^3$ 之间，而一般岩石的密度却在 $2.5 \sim 3.0 \text{g/cm}^3$ 之间，因此，煤与它的周围岩石相比有明显的密度差异。不仅如此，不同煤阶的煤也有不同的密度，并且煤的密度与它的灰分之间还存在着

相当密切的线性关系，这就为利用密度测井信息确定煤阶和计算煤岩的灰分奠定了物性基础。

由表 2-4 可知，煤的电阻率在 $10^{-3} \sim 5 \times 10^3 \Omega \cdot m$ 之间，其中无烟煤的电阻率最低。经研究表明，煤及其围岩的电性特征与煤化作用程度有着十分密切的关系。根据前苏联的研究结果，煤化作用（即由褐煤向烟煤、无烟煤的转化过程。）包括煤的成岩作用阶段和变质作用阶段。

表 2-4 常见煤和岩石的地球物理性质

煤和岩石	ρ_b / $g \cdot cm^{-3}$	P_e / $10^{-24} \cdot cm^2 \cdot 电子^{-1}$	N_{GR} /API	φ_N /%	Δt / $\mu s \cdot m^{-1}$	ρ_T / $\Omega \cdot m$	备注
砂岩	2.65 ~ 2.70	1.810	10 ~ 30	-2	250 ~ 380	低到中等	
泥岩	2.20 ~ 2.65	3.420	80 ~ 140	25 ~ 75	> 300	低值	
石灰岩	2.71	5.08	比砂岩低	低值	165 ~ 250	高值	
白云岩	2.83 ~ 2.89	3.14	比砂岩低	低值	155 ~ 250	高值	
硬石膏	2.94 ~ 3.00	5.05	最低	0	约 164	高值	
岩盐	2.03	4.17	最低	0	约 220	高值	钾盐较高
甲烷煤	0.0007168	0.180	< 70	> 50	626 350 ~ 450	$10^4 \sim 10^9$	无烟煤最
无烟煤	1.40 ~ 1.80	0.161				$10^{-3} \sim 10^0$	
烟煤	1.20 ~ 1.50	0.180				$5 \times 10^2 \sim 10^3$	低
褐煤	0.70 ~ 1.50					$10 \sim 2 \times 10^3$	

在成岩作用阶段，煤的电阻率随煤化作用的加深而显著上升。在变质过程阶段，各种岩石的孔隙度均随埋深的增加而进一步减小，但不同粒度岩石的压实速度亦不相同。因此，在孔隙度曲线上显示出砂岩的孔隙度最小，泥岩的孔隙度最大，而粉砂岩介于其间。在密度曲线和弹性波传播速度曲线上，也有相应的关系。随埋深的增大，煤的围岩的电阻率进一步增高，且砂岩、粉砂岩、泥岩在电阻率上的差别越来越大。岩石，特别是砂岩的电阻率明显增

加，是由于胶结作用使岩石的孔隙度进一步减小的缘故。

随着变质作用的加深，内在水分的减小，烟煤的电阻率越来越高。瘦煤 1(T₁) 的电阻率是所有牌号的煤中电阻率最高的。从瘦煤 2(T₂) 开始，变质作用使煤中自由电子数量明显增多，故煤的电阻率急剧下降。无烟煤含有大量的自由电子，它的电子导电性良好，因此无烟煤的电阻率极低。

在通常情况下，矿物杂质的电阻率低于褐煤和烟煤有机质的电阻率，而高于无烟煤有机质的电阻率。因此，褐煤和烟煤的电阻率随灰分的增高而降低，无烟煤的电阻率则随灰分的增高而增大。

岩石和煤的自然放射性基本上不受成岩作用和变质作用的影响。在一般情况下，煤的自然放射性很低，而围岩的自然放射性则主要取决于地层中泥质含量的多少。

一般情况下，煤的自然放射性是很弱的。但是，由于矿物杂质的主要成分是粘土矿物，所以煤的自然放射性随灰分的增高而增强，表现出较好的线性关系。某些高灰分煤层甚至具有比围岩还要高的自然放射性。

煤层的声波时差明显高于围岩的声波时差，反映在测井曲线上十分清楚，因此，声波时差是煤层识别的重要的地球物理测井信息。

煤的性质除与煤化作用程度有关，还与煤岩成分，挥发分，特别是矿物杂质（灰分）的含量等因素有关。

根据煤层及甲烷的地球物理性质可知，煤层具有低密度、高声波时差、高中子孔隙度、高电阻率、低自然放射性等特征，但是直接利用地球物理测井信息识别煤层甲烷有一定难度。

2.4 煤层气储层测井评价的基本内容

2.4.1 煤层气储层测井评价概述

煤层气储层地球物理测井评价技术总体上可以分为煤层气储层定性识别技术、煤层气储层参数定量解释技术以及煤层气储层综合评价分析技术。其中煤层气储层参数定量解释技术是测井评价研究的核心。关于煤层气储层参数，目前利用测井方法可以确定的储层参数

包括如下几个方面:(1)煤层气储层的含气量、孔隙度 基质孔隙度和裂缝孔隙度 和渗透率 基质渗透率和裂缝渗透率);(2)煤岩工业分析参数指煤的挥发分、固定碳、灰分、水分和煤阶等 (3)煤层气的吸附 / 解吸特性参数 ;(4)煤层厚度、深度、产能、储层压力、温度等。

综合分析已有的研究工作不难看出, 前人已提出的煤层气储层地球物理测井评价技术可以大致分为如下几类:(1)基于常规天然气储层评价思想的定性识别方法;(2)基于体积模型的储层评价方法;(3)基于概率统计模型的储层评价方法;(4)基于现代非线性信息处理方法的储层评价方法。

2.4.1.1 基于常规天然气储层评价思想的定性识别方法

该类方法基于已知煤层气储层上单条或几条测井曲线及其变换信息的变化规律, 类似于常规天然气储层的测井响应模式(例如, 高阻、声波时差增大、低密度和高中子孔隙度等), 通过对大量已知煤层气储层上测井曲线及其变换信息变化规律的分析总结, 提出其定性识别准则。例如, 潘和平等(1994)基于常规天然气储层评价思想, 提出了煤成气储层的定性识别方法, 其方法包括孔隙差异法、声波差值法、空间模量差比法和电阻率比值法; 柳孟文等(1995, 1990)提出了煤层气储层孔隙度背景值的新概念, 进而提出基于孔隙度测井信息的煤层气储层的定性识别方法。

2.4.1.2 基于体积模型的储层评价方法

该类方法的研究思想类似于传统的体积模型, 同时也适当考虑了煤层气储层的若干特点。它首先建立煤层气储层的地球物理测井体积模型 进而建立测井响应 例如 声波、密度和电阻率等 与储层参数(例如, 孔隙度和含气饱和度等)之间的线性或非线性关系。根据所建立的关系式, 即可求取有关的储层参数。例如, 潘和平等(1996)根据煤层气储层的密度和电阻率等的测井响应方程, 提出了计算煤层气储层孔隙度(基质孔隙度和裂缝孔隙度)的密度-电阻率方法和计算煤层气储层孔隙度和含气饱和度的弹性模量法。

2.4.1.3 基于概率统计模型的储层评价方法

该类方法就是把储层参数、定性识别结果和测井响应信息等

都当作是随机变量，从概率统计理论的角度出发，对这些变量进行统计分析，从大量已知的实际资料统计分析中得到有关的储层评价数学表达式，从而实现储层评价的目的。它包括多元（线性与非线性）回归分析、逐步线性回归分析、判别分析和模糊模式识别等。例如，法塞特 Fassett)等(1971)提出应用多元线性回归分析方法进行煤质工业分析，随后，穆伦 Mullen)等(1988)又对该方法提出了修正，以便适应不同地区的实际应用。此外，潘和平和黄智辉(1993)提出应用模糊模式识别方法进行煤层气储层的定性识别。

2.4.1.4 基于现代非线性处理技术的储层评价方法

目前在物探中得到应用的现代非线性方法有神经网络、地球物理反演理论等。基于现代非线性方法的储层评价方法（简称现代非线性储层评价方法）可用于储层评价的全过程，即储层定性识别、储层参数的定量计算、储层的综合评价分析。例如神经网络煤储层评价方法，它有别与上述几种评价方法，即不用考虑具体的数学模型，神经网络就能所谓“隐式”表达出煤层气储层评价结果与测井响应信息之间的复杂关系，从而达到储层评价的目的（例如，煤层气储层的定性识别，储层参数的定量计算和储层的综合评价分析）。目前，人们已提出了近百种神经网络模型，但是，普遍认为，以 BP（误差反向传播）神经网络和自组织神经网络（无教师指导网络）方法理论较为完善以及应用较为成熟。例如，侯俊胜等(1995、1996、1998)提出应用自组织神经网络方法进行煤层的自动识别以及应用 BP 神经网络进行煤层气储层参数（例如，煤层气储层的含气量、基质孔隙度和裂缝孔隙度等）的定量计算。并且，通过若干实际测井资料的试算都已取得了较满意的应用效果。

2.4.2 煤层识别和确定煤层厚度

对于出露地表的煤层，可以通过野外实地考察，观测煤层厚度、观察煤层的赋存状态、煤层的连续性等等，利用地质方法即可进行煤储层描述。对于被地层覆盖的煤层来说，必须利用地球物理方法，尤其是地球物理测井方法进行煤储层描述等。

根据煤层和岩石的测井响应特征可知，煤层一般具有“低密

度、低自然伽马、高声波时差、高中子孔隙度和高电阻率（低阻无烟煤除外）”等特点，因此综合利用上述测井信息，即可从钻井剖面中识别煤层。例如图 2-3 和图 2-4 根据 DEN、GR、AC、LLD 和 LLS 测井信息并参考 CNL、SWN、MLP、MLG、CAL(CAL1, CAL2)、SP 和 T ，即可从钻井剖面中识别出 5 个煤层。又如图 2-5 所示根据 DEN、AC 和 GR 等曲线，即可确定煤层分布。

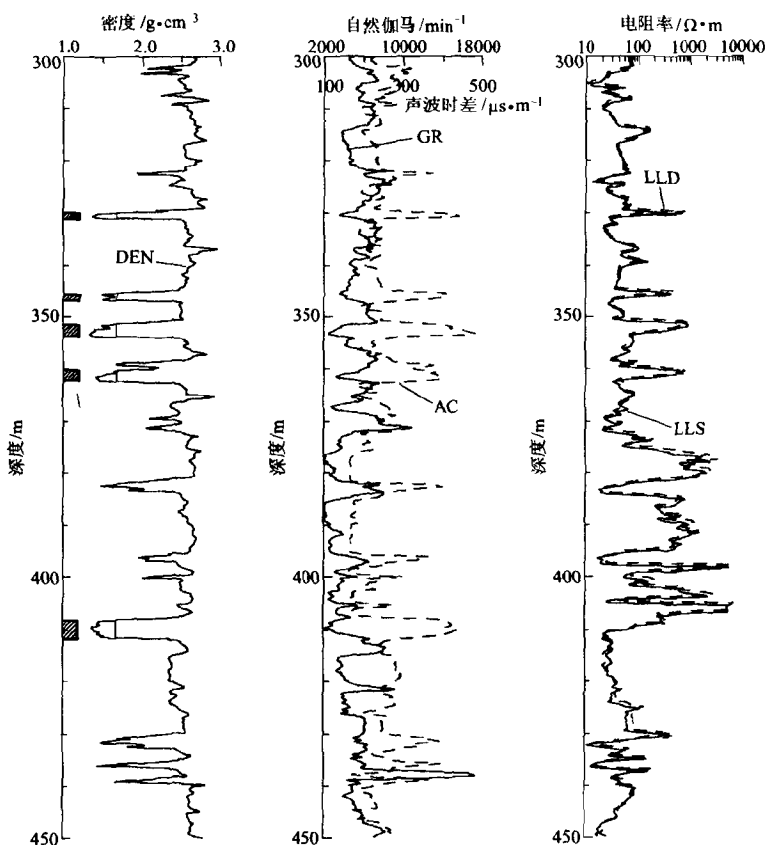


图 2-3 华北柳林煤层气试验区 LU2 井煤层气测井曲线 (A)

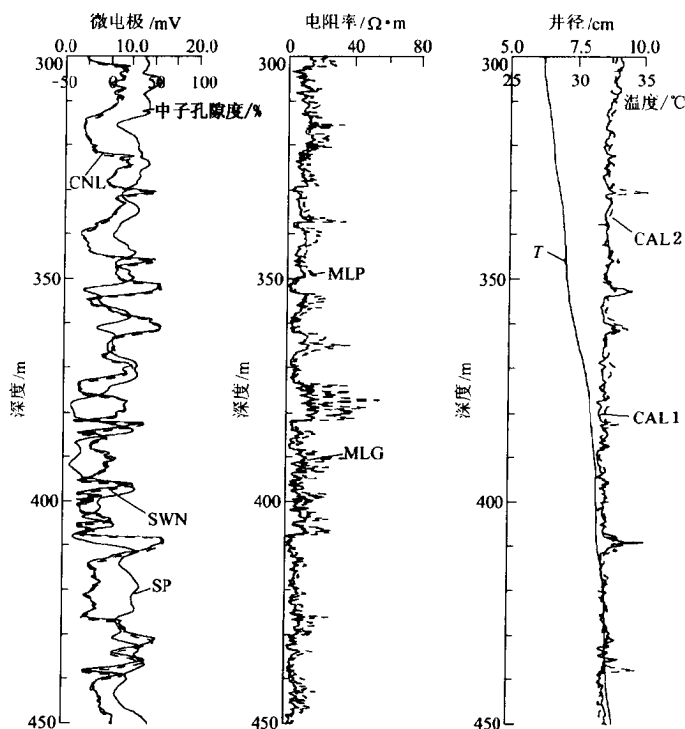


图 2-4 华北柳林煤层气试验区 LU2 井煤层气测井曲线 (B)

关于煤层厚度的确定，可利用煤层密度测井的截止值，确定出煤层的边界，进而确定出煤层的深度和厚度。例如，美国设定煤层密度测井的截止值为 1.75g/cm^3 ，确定煤层的边界，进而确定出煤层的深度和厚度。

确定煤层厚度的精度与所使用的测井仪器分辨率密切相关，不同的测井仪器具有不同的分辨率（见表 2-5）。因此，为了提高煤层分层解释的精度，必须使用高分辨率测井仪器数据采集，或者采用高分辨率计算机处理技术提高测井曲线的分辨率。例如，美国的矿产密度测井仪其分层解释的精度可高达 $\pm 3.048\text{cm}$ 对于常用

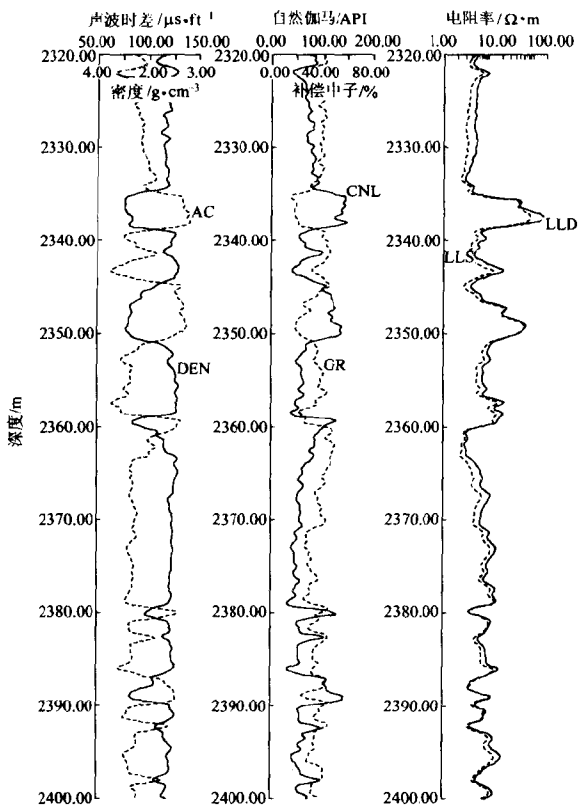


图 2-5 辽河东部凹陷莱 37 号煤层气储层综合测井曲线

测井信息通过采用高分辨率计算机处理技术可有效提高测井曲线的分辨率（例如，石油密度测井仪通过提高采样率和高分辨率计算机处理，其垂向分辨率由原来的 0.6096m (2ft) 提高到 0.1514m (0.5ft)）。

2.4.3 煤岩的工业分析和确定煤阶

煤岩的工业分析就是要确定煤的固定碳、挥发分、灰分、水分。目前，主要采用两大类方法：岩芯测试和测井评价。关于测

井评价方法又有两种途径，即根据密度测井与灰分、挥发分、固定碳和水分作相关分析，以及根据体积模型利用多种测井信息综合确定。

表 2-5 常用测井仪器垂向分辨率数据

测井仪器 名称	垂向分辨率 /m	测井仪器 名称	垂向分辨率 /m
自然电位	0.3048	密度测井	0.4572
深感应测井	1.016	声波时差	0.3048、0.6096 或是 0.9144
中感应测井	1.016	中子测井	0.381
8 侧向测井	0.4572	井壁中子	0.381
球形聚焦	0.4572	补偿中子	0.4572
侧向测井	0.4572	自然伽马	0.4572(变化)
深侧向测井	1.016	自然伽马能谱	0.4572
浅侧向测井	1.016	岩性密度	0.381
微球形聚焦	0.0762	井径测井	0.4572

(据李能根等修改,1999)

因为煤阶与煤层气关系密切，因此确定煤阶是煤层气测井评价的一项重要内容。所谓煤阶是指在煤化作用过程中，煤的组成和结构所发生的物理化学特性改变的程度。煤阶与煤级、煤类型不同，煤级和煤类型在煤岩沉积时即已确定，而煤阶却是在煤岩埋藏后，随着煤化作用的加深，物理化学特性不断改变而定。一般使用镜煤反射率、固定碳含量和热值等来划分煤阶，其中最常用的就是镜煤反射率。

各国划分煤阶时，标准并不一致。美国亚拉巴马大学教授解富瑞 Jeffrey R. Levine 建议根据煤层湿度、含水分能力、热值、镜煤反射率和含氢量来划分煤阶，提出了一个国际通用的划分煤阶标准。我国也提出了自己的煤阶划分标准，其具体划分煤阶标准见表 2-6。

表 2-6 我国划分煤阶标准

煤阶	挥发分 /%	含碳量 /%	镜煤反射率 /%	其他
褐煤			< 0.5	
长焰煤	> 45	76	0.5 ~ 0.7	
气煤	45 ~ 40	82	0.7 ~ 0.9	
肥煤	40 ~ 35	84	0.9 ~ 1.2	
焦煤	35 ~ 30	86	1.2 ~ 1.7	
瘦煤	30 ~ 20	90	1.7 ~ 1.9	
贫煤	20 ~ 10	91	1.9 ~ 2.5	
无烟煤Ⅲ	< 10		2.5 ~ 4	
无烟煤Ⅱ			4 ~ 6	
无烟煤Ⅰ			> 6	

(据赵庆波等, 1998)

根据地球物理测井划分煤阶主要有两条途径, 一是直接利用不同煤阶的煤层具有不同的测井信息特征划分煤阶, 由表 2-4 可知, 该途径有一定困难, 因为不同煤阶之间物性差异不确定; 二是利用测井信息计算出含碳量、挥发分、镜煤反射率、热值等, 然后依据上述煤阶划分标准最后确定煤阶。但是, 如何建立适应能力较强的利用测井信息计算挥发分、含碳量、镜煤反射率、热值等测井解释模型有一定困难。目前主要有两种解释模型, 即体积模型和概率统计模型。

2.4.4 煤储层裂缝孔隙度计算和渗透性评价

2.4.4.1 裂缝孔隙度的计算

在煤层气评价中, 定量计算孔隙度主要是指裂缝孔隙度, 其原因是裂缝的发育程度将直接影响到煤层气的渗透性和产气率, 因此, 裂缝孔隙度的计算是非常重要的。目前主要用双侧向测井资料评价煤层的裂缝孔隙度 (其详细的方法原理见后续章节), 虽然

浅探测电阻率测井 例如 高分辨率成像测井 地层倾角测井等 资料也用来评价煤层的裂缝孔隙度，但是在定量评价煤层的裂缝孔隙度中的应用不如双侧向测井资料广泛。

(1)用双侧向测井资料计算裂缝孔隙度。目前人们已对利用双侧向测井资料评价煤层裂缝孔隙度的方法进行了一些研究。研究表明，只要在测井时井眼中有高导电性泥浆存在，则浅侧向电阻率值应低于深侧向电阻率值，而且两条电阻率曲线的分离可为计算裂缝孔隙度提供可靠的依据。国内外的一些应用实例已证实了用双侧向测井资料计算裂缝孔隙度的效果。

(2)用浅探测电阻率测井资料计算裂缝孔隙度。由于浅探测电阻率测井比深侧向电阻率测井具有更好的垂向分辨率，因此在薄煤层中，最好使用浅探测电阻率测井资料计算裂缝孔隙度。用于计算裂缝孔隙度比较理想的浅探测电阻率测井有电阻率成像测井与地层倾角测井。由于探测深度浅，因此计算时假设裂缝系统中水的电阻率为泥浆电阻率。

2.4.4.2 煤储层渗透性评价

煤储层渗透性评价常用的测井方法有微电阻率测井、自然电位测井、地层微电阻率扫描测井、声波测井等。但是利用测井方法进行煤层的渗透性评价目前主要是定性分析。关于煤储层渗透性的定量评价方法见第 10 章的讨论。

2.4.5 煤层气含量的评价

目前确定煤层气含量的方法主要有两类，即直接法和间接法，不同方法对比情况见表 2-7。其中直接法包括 7 种方法，间接法包括 3 种方法，相比起来直接法确定精度相对较高，间接法经济和效率高。

2.4.6 煤层气地质储量计算方法

由前面的讨论可知，煤层气主要为吸附气（约占 70% 以上），其次为游离气。由于这两种气体赋存条件和物理状态不同，因此，其地质储量计算公式也不同（岳晓燕，1999）。

(1) 吸附气储量计算公式

表 2-7 煤层气含量主要确定方法

类别	序号	方法	要求及条件	备 注
直接法	1	USBM 直接法	取芯测试	损失气量小于 20% 比较准确
	2	改进的直接法	取芯测试	每次均需测定解吸气体成分,如测定含气量较低的样品,泥岩中含气量
	3	史密斯-威廉斯法	煤芯或煤屑	损失气量小于 50% 时比较准确
	4	压力取芯解吸法	密闭取芯	测定含气量最准确的方法,特别是对于未饱和煤层及深煤层
	5	直接钻孔法	煤矿矿井取芯	可获得解吸量及估算地层压力
	6	艾瑞法	取芯	比改进的直接法预测含气量偏大
	7	重量法	矿井取芯	用于矿井通风需要,未用于煤层气开采
间接法	8	吸附等温线	煤样分析资料	适用于饱和煤层含气量的估算
	9	开姆法	要求有工业分析资料	对烟煤和中低挥发分烟煤偏高,对高挥发分烟煤偏低
	10	测井法	测井与工业分析资料交会求出吸附等温线,再根据等温线估算含气量	方法具有一定地区性限制,不能无限推广

注:USBM 直接法——由美国矿物局 (USBM) 提出的直接法;

艾瑞法——由艾瑞 (Airey, 1968) 提出的直接法; (据钱凯等, 1996)

开姆法——由开姆 (Kim, 1977) 提出的间接法。

$$G_1 = SH(1 - \varphi)\rho V_g/100 \quad (2-1)$$

式中 G_1 ——吸附气储量, 10^8 m^3 ;

S ——煤层气藏面积, km^2 ;

H ——煤层有效厚度, m ;

φ ——煤层总孔隙度;

ρ ——煤岩密度, g/cm^3 ;

V_g ——煤层气含量, m^3/t 。

若 $1 - \varphi \approx 1$ 则式 2-1 可简化为

$$G_1 = SH\rho V_g/100$$

(2) 游离气储量计算公式

$$G_2 = \frac{T_{sc} p_i}{T p_{sc} Z} SH\varphi_B/100 \quad (2-2)$$

式中 G_2 ——游离气储量, 10^8 m^3 ;

T_{sc} ——标准温度, $^\circ\text{R}$, $1^\circ\text{R} = 5/9^\circ\text{K}$;

p_i ——原始地层压力, psi , $1 \text{ psi} = 6.894757 \text{ kPa}$;

T ——地层温度, $^\circ\text{R}$;

p_{sc} ——标准压力, psi ;

Z ——气体偏差系数;

φ_B ——煤层基质孔隙度。

基于式 2-1 和式 2-2 两式, 即可计算吸附气储量和游离气储量, 总储量即为它们两者之和。

2.4.7 其他

煤层气储层测井评价的其他评价内容, 包括确定煤储层的岩石力学性质参数以及煤储层的综合评价等内容。关于岩石力学主要指煤层的弹性模量等, 煤层综合评价方法见第 10 章的讨论。

参 考 文 献

- 1 钱凯 赵庆波 汪泽成等编著. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术. 北京: 石油工业出版社, 1996: 188
- 2 赵庆波, 刘兵, 姚超等编世界煤层气工业发展现状. 北京: 地质出版社, 1998: 153
- 3 中国矿业学院, 西安矿业学院, 江苏煤田地质勘探公司等. 煤田地球物理测井. 北京: 煤炭工业出版社, 1979: 473
- 4 丁次乾主编. 矿场地球物理. 东营: 石油大学出版社, 1992: 377
- 5 潘和平, 黄智辉. 测井资料解释煤成气方法研究. 现代地质, 1994, 8(1): 119 ~ 125
- 6 柳孟文, 赵文光, 靳晓杰等. 煤层气识别方法. 中国地球物理学会年刊,

1995,323

- 7 侯俊胜.基于神经网络与随机优化的物探数据解释方法研究.1995,中国地质大学博士后.研究报告
- 8 侯俊胜 尉中良.自组织神经网络在测井资料解释中的应用.测井技术,1996,20(3):197~200
- 9 侯俊胜.煤层气储层评价的地球物理测井技术现代地质,1998,12(1):60~65
- 10 侯俊胜 王颖.神经网络方法在煤层气测井资料解释中的应用.地质与勘探,1999,35(3):41~45
- 11 岳晓燕.利用测井资料计算煤层气单井控制地质储量.测井技术,1999,23(5):393~395
- 12 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释.东营:石油大学出版社,1996.590
- 13 潘和平 黄智辉.利用模糊模式识别煤成气层.地球科学,1993,18(1):84~94
- 14 李能根,陆大卫,刘月亮等编著.实用英汉石油测井技术词汇.北京:地质出版社,1999.305
- 15 Mullen, M. J., Log Evaluation in Wells Drilled for Coalbed Methane, Geology and Coalbed Methane Resources of the Northern San Juan Basin, Colorado and New Mexico, Rocky Mountain Association of Geologists, Denver, 1988
- 16 Vicki A. Hollub *et al*, 1992, A Guide to Coalbed Methane Operations, Gas Research Institute of USA
- 17 Jerrald L. Saulsberry *et al*, 1996, A Guide to Coalbed Methane Reservoir Engineering, Gas Research Institute of USA
- 18 Kowalski, J. J., 1975, Coal analysis from well logs, SPE5503, SPE50th Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, TX, September 28-October 1
- 19 Airey, E. M., 1968, Gas emission from broken coal, an experimental and theoretical investigation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 5
- 20 Kim, A. G., 1977, Estimating the methane content of bituminous coalbeds from adsorption data. U.S. Bureau of Mines Report of Investigation 8245
- 21 Pan Heping and Liu Guoqing, 1996, Evaluation porosity and gas content of coalbeds from well logging data, 30th International geological congress, Abstracts, Volume 3 of 3, Beijing, China, 4-14 August 1996, 147

第 3 章 煤层气测井数据的预处理方法

一般来说,煤层气地球物理测井曲线在进行资料解释等应用之前必须进行一定的预处理。这是因为在测井数据采集过程中常常要受到一些复杂的非岩性、非物理特征的环境影响,这些影响通常来说是很复杂的,它们主要包括井径、泥浆、泥饼、侵入带、地层水矿化度、地层厚度及围岩等等的影晌。为了提高煤层气地球物理测井资料解释的精度及准确性,在应用之前对各种地球物理测井曲线分别进行相应的处理是非常必要的。它们主要包括测井曲线的数字滤波、环境影响校正和测井曲线的高分辨率处理等。测井资料数字滤波处理和环境影响校正是测井资料处理解释的重要一环,为此本章将主要讨论如下几个方面的问题:(1)测井资料数据处理所常用的数据格式即为磁盘 LA716 测井数据格式;(2)测井资料的空间域和频率域数字滤波,方法主要为空间域的滑动平均法;(3)常用煤层气测井资料的环境影响校正方法,方法有自然伽马测井、密度测井、中子测井、声波测井和电阻率测井等环境影响校正问题。

3.1 测井数据处理格式

在我国,目前所常用的测井数据格式有 LA716、LIS、LAS 等(其中比较常用的测井数据格式为 LA716 测井分析数据格式)。这种数据格式源于原美国西方-阿特拉斯测井公司 3600 系列数字测井数字处理系统中的 LA716 磁带数据格式。为实现数据交换,本书所讨论的测井数据处理解释方法的计算机程序统一使用 LA716 数据格式。因为数据交换磁介质主要为磁盘,所以我们沿用中国新星石油公司的叫法即磁盘 LA716 数据格式。为此我们编制了测井数据格式转换程序,其中包括 LA716 和 ASCII 之间的互相转换。关于磁盘 LA716 数据格式与磁带 LA716 数据格式相比两者基本相似,它也是由一标

题块和若干数据块组成，其中标题块基本内容见表 3

表 3-1 磁盘 LA716 数据格式标题块基本内容

序号	名称	内容	相对地址	字节长度	数据类型
1	ECC	成果号	1 ~ 4	4	实型数
2	ICD	公司名 (油田名)	5 ~ 84	80	字符型
3	IWELL	井名	85 ~ 164	80	字符型
4	NUMLOG	测井曲线条数	165 ~ 166	2	整型数
5	IZ	填充数	167 ~ 168	2	整型数
6	LOG	测井曲线名	169 ~ 424	256	字符型
7	STDEP	起始深度	425 ~ 428	4	实型数
8	ENDEP	终止深度	429 ~ 432	4	实型数
9	RLEV	采样间隔	433 ~ 436	4	实型数
10	IDC	深度列	437 ~ 438	2	实型数
11	IZZ	填充数	439 ~ 440	2	整型数
12	FEET	填充数	441 ~ 444	4	实型数
13	DUM	填充数	445 ~ 512	68	实型数

通过对比磁盘 LA716 数据格式与磁带 LA716 数据格式可以看出，磁盘 LA716 数据格式是在磁带 LA716 数据格式的基础上，结合磁盘介质的特点提出的，它们有如下主要不同点：

- (1) 文件类型不同。前者为随机文件，后者为顺序文件。
- (2) 标题块长度不同。前者标题块长度为 512B，后者为 276B。
- (3) 记录的测井曲线条数不同。前者最大可记录的测井曲线条数为 64 条，后者为 20 条。

3.2 测井数据的数字滤波方法

实际测井数据都可能包括一些与地层性质无关的高频干扰。例如，放射性测井数据常出现一些与地层性质无关的统计起伏变化；对于声波测井，由于声波探头与井壁的随机碰撞干扰，或在缝洞孔隙和裂缝发育的地层中声波经过多次反射和折射，使测出的声波曲线上出现许多毛刺干扰等。

为了压制实际测井数据中的高频干扰，根据数字滤波理论，应对实际测井数据进行低通数字滤波。实现低通数字滤波可在空间

域实现，也可在频率域实现。本节主要讨论应用空间域加权滑动平均法进行测井数据数字滤波。

3.2.1 加权滑动平均法

对于离散测井数据，加权滑动平均法可使用如下公式实现数字滤波

$$\overline{T}_i = \sum_{r=-m}^m g(r) T_{i+r} \quad (3-1)$$

式中 \overline{T}_i ——加权滑动平均法数字滤波计算结果；

T_{i+r} ——离散测井数据；

$g(r)$ ——加权系数，在数字滤波中， $g(r)$ 又称滤波因子。

根据式 3-1 若令 $g(r) = \frac{1}{2m+1}$ ，式 3-1 即为最小二乘滑动平均法的 $(2m+1)$ 点线性平滑公式；若令 $g(-2) = -3/35, g(-1) = 12/35, g(0) = 17/35, g(1) = 12/35, g(2) = 3/35$ 式 3-1 即为最小二乘滑动平均法的五点平滑公式。 $(2m+1)$ 为滑动窗口内离散测井数据点数。

分析式 3-1 不难看出，加权滑动平均法数字滤波效果如何关键是选取合理的加权系数 $g(r)$ 。一般要求 $\sum_{r=-m}^m g(r) = 1, g(r) = g(-r)$ ，并且当前采样点处的加权系数 $g(0)$ 应稍大些。可用加权函数 $w(r)$ 来计算 $g(r)$ ，即：

$$g(r) = \frac{w(r)}{\sum_{r=-m}^m w(r)} \quad (3-2)$$

根据实际测井数据中的统计起伏变化或毛刺干扰情况，可选用钟形函数和汉明函数等作为 $w(r)$ 来计算 $g(r)$ 得出相应的平滑公式。

(1) 基于钟形函数的平滑公式。

已知钟形函数为

$$w(r) = \exp\left\{-a\left(\frac{r}{m}\right)^2\right\} \quad (3-3)$$

其中 $a > 0, |r| \leq m$ 。

如果令 $a = 1, m = 1$ 根据式 3-2 和式 3-3 即可计算出 $g(r)$ 和

$w(r)$ 故可得三点钟形函数平滑公式 即

$$\begin{aligned}\bar{T}_i &= \sum_{r=-1}^1 g(r) T_{i+r} = g(-1) T_{i-1} + g(0) T_i + g(1) T_{i+1} \\ &= 0.212 T_{i-1} + 0.576 T_i + 0.212 T_{i+1}\end{aligned}$$

同理, 可得五点钟形函数平滑公式

$$\begin{aligned}\bar{T}_i &= \sum_{r=-2}^2 g(r) T_{i+r} = 0.11(T_{i-2} + T_{i+2}) + 0.30 T_i + \\ &\quad 0.24(T_{i-1} + T_{i+1})\end{aligned}$$

(2) 基于汉明函数的平滑公式。

已知汉明函数为

$$w(r) = 0.54 + 0.46 \cos \frac{r\pi}{m} \quad (3-4)$$

其中 $|r| \leq m$

如果令 $m = 1$ 根据式 3-2 和式 3-4 即可计算出 $g(r)$ 和 $w(r)$ 故可得三点汉明函数平滑公式

$$\begin{aligned}\bar{T}_i &= \sum_{r=-1}^1 g(r) T_{i+r} = g(-1) T_{i-1} + g(0) T_i + g(1) T_{i+1} \\ &= 0.07 T_{i-1} + 0.86 T_i + 0.07 T_{i+1}\end{aligned}$$

同理, 可得五点汉明函数平滑公式

$$\begin{aligned}\bar{T}_i &= \sum_{r=-2}^2 g(r) T_{i+r} = 0.04(T_{i-2} + T_{i+2}) + 0.44 T_i + \\ &\quad 0.24(T_{i-1} + T_{i+1})\end{aligned}$$

3.2.2 频率域数字滤波

目前, 在频率域内进行测井资料的数字滤波, 可利用的方法有最佳线性数字滤波、正则化数字滤波、维纳数字滤波等方法 但是实际应用的基本步骤是类似的。它们的应用包括如下几个基本步骤:

(1) 测井资料的数字化;

(2) 在频率域内对测井资料进行傅氏变换;

(3) 在频率域内将测井资料与数字滤波因子相乘, 并对测井资料进行傅氏反变换;

(4) 在空间域内输出数字滤波结果。

3.2.3 数字滤波的应用效果

为了说明上述数字滤波方法的应用效果，利用华北柳林地区 ML1 井煤层气测井资料，分别采用三点平滑公式和五点平滑公式，对其中的 ρ_b （密度）、 N_{GR} （自然伽马总强度）、 Δt （声波时差）测井资料，进行了空间域数字滤波，其数字滤波结果见图 3-1 和图 3-2。分析图 3-1 和图 3-2 可以看出（其中实线为原始 ρ_b 、 N_{GR} 、 Δt 测井数据），三点平滑公式和五点平滑公式可以有效压制高频干扰，并

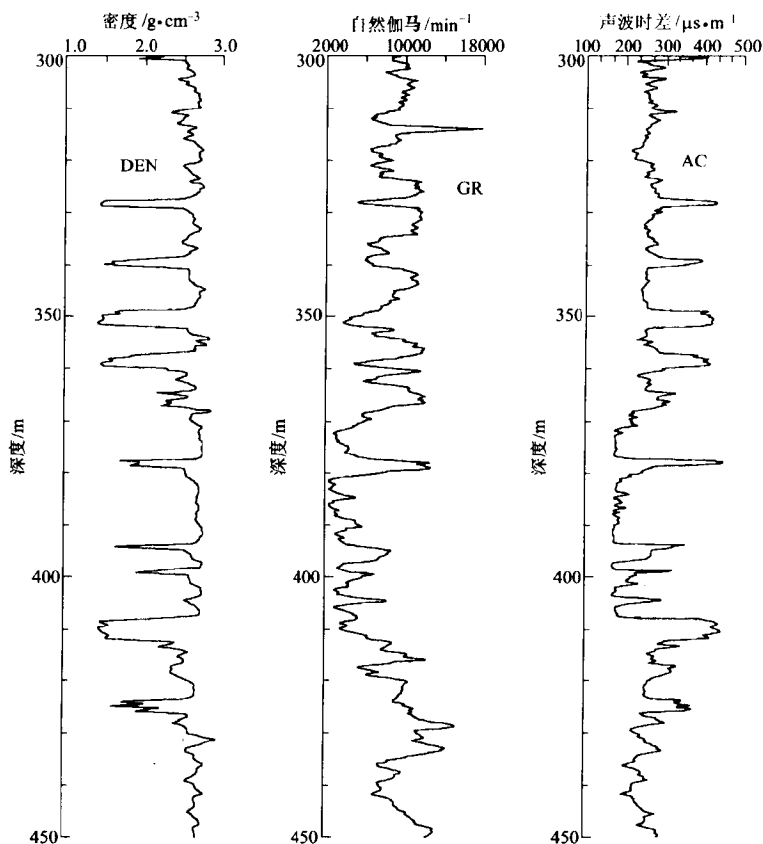


图 3-1 华北柳林煤层气试验区 ML1 井三点平滑公式数字滤波应用效果

且五点平滑公式压制高频干扰效果比三点平滑公式明显。通过大量的实际测井资料处理计算表明随着点数增多，压制高频干扰作用增强，反之减弱。

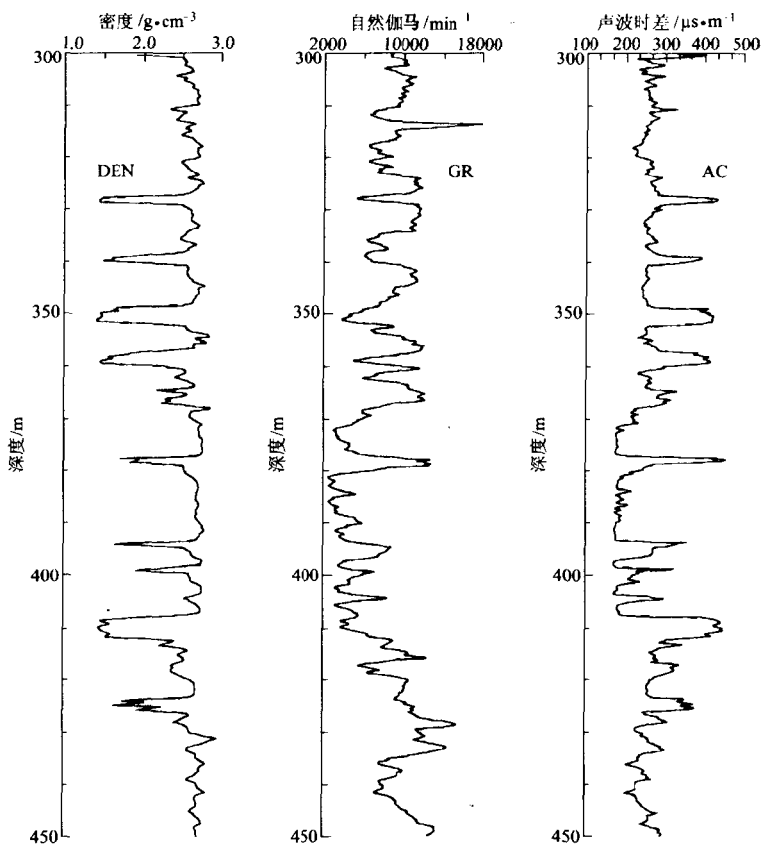


图 3-2 华北柳林煤层气试验区 ML1 井五点平滑公式数字滤波应用效果

3.3 测井数据的环境影响校正方法

测井环境如井径、泥浆密度、泥浆矿化度、泥饼、井壁粗糙度、

泥浆侵入带、地层温度、地层压力、围岩、测井仪器外径以及仪器外径与井壁之间的间隙等非地质因素，不可避免地要对各种测井曲线产生重要影响；特别是在井眼及泥浆质量不好等情况下，这些非地质因素的影响会使测井曲线发生严重的歪曲，致使直接使用这些测井曲线难以取得合理的测井数据解释结果。

为了降低和消除测井环境对测井曲线产生的重要影响，人们已提出许多方法进行测井数据的环境影响校正。目前，对测井曲线进行环境影响校正的方法主要有解释图版法和计算机自动校正法。解释图版是根据理论计算或实验结果作出的，人们先用解释图版对测井曲线进行各种环境影响校正，求出尽可能少受环境影响的、更能真实反映地层和流体性质的测井值，再进行测井数据解释。显然，这种人工用解释图版作校正的方法只能对少数地层的某些测井曲线进行个别环境影响因素的校正。由于解释图版法存在许多不足，因此计算机自动校正法在测井数据的环境影响校正中得到了广泛应用。

用计算机对测井曲线进行环境影响自动校正的方法主要是根据理论研究或解释图版得出的校正公式，编制出测井曲线环境影响自动校正的计算机程序来实现的。这种环境影响校正方法能对全井段所有地层的测井曲线进行各种影响因素的校正，通过大量的实际测井资料处理表明 计算机自动校正方法具有简单、迅速和有效等优点。

3.3.1 自然伽马测井环境校正公式

(1) 德莱赛-阿特拉斯校正公式。

根据德莱赛-阿特拉斯校正图版，有

$$N_{\text{GRC}} = AN_{\text{GR}} \exp \{0.026 B \rho_m (d_h - d_i) - 0.3958\} \quad (3-5)$$

其中 N_{GR} 和 N_{GRC} 分别为校正前后的自然伽马测井值； d_h 和 d_i 分别为井径和仪器外径； ρ_m 为泥浆密度； A 和 B 分别为

$$A = \begin{cases} 0.92 \\ 0.95 \\ 1.00 \\ 1.05 \end{cases} \text{ 和 } B = \begin{cases} 1.000 \\ 0.697 \end{cases} \begin{matrix} \text{仪器居中} \\ \text{仪器偏心} \end{matrix}$$

(2)斯仑贝谢校正公式。

根据斯仑贝谢校正图版, 当 $d_i = 0.92$ 仪器居中时, 有

$$N_{\text{GRC}} = 0.6046 N_{\text{GR}} \exp\{0.002235 \rho_m d_h\} \quad (3-6)$$

当仪器偏心时, 有

$$N_{\text{GRC}} = 0.7327 N_{\text{GR}} \exp\{0.001177 \rho_m d_h\} \quad (3-7)$$

3.3.2 补偿密度测井环境校正公式

首先 利用如下公式 (3-8) 计算出解释层段密度的下限值 ρ_{\min} 。

$$\rho_{\min} = V_{\text{sh}} \rho_{\text{sh}} + (1 - V_{\text{sh}}) \rho_p \quad (3-8)$$

其中 V_{sh} 为解释层段的泥质含量, 它可利用公式 $V_{\text{sh}} = \frac{2^{S_H} \cdot G_{\text{CUR}}}{2^{G_{\text{CUR}}}}$ 来

计算, $S_H = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$, S_{Ht} 为计算的测井相对值, X 可为 N_{GR} , V_{SP} , R_T 或 C_{NL} 等, X_{\min} 和 X_{\max} 分别为 X 的最小和最大值, ρ_{sh} 为泥质密度, ρ_p 为解释层段中孔隙度最大的纯地层密度值。

其次 进行逐点检验和校正 由于井眼扩大或井壁不规则 仪器极板贴井壁不好, 导致测得的密度 $\rho_b < \rho_{\min}$ 此时 令 $\rho_b = \rho_{\min}$ 作为该层密度的近似值 反之 若 $\rho_b \geq \rho_{\min}$ 仍取 ρ_b 作为该层密度值。

3.3.3 补偿中子测井环境校正公式

补偿中子测井受井径、泥浆密度、泥饼厚度、泥浆矿化度、地层水矿化度、地层温度和仪器间隙等影响, 下面给出它们各自的环境影响校正公式。

(1) 井径影响校正。

$$A_N = 0.01 \{0.263436(19.6 - d_h)^{1.36} - 7.4932\} \quad (3-9)$$

$$B_N = A_N(C_{\text{NL}} + A_N) + A_N$$

其中, C_{NL} 为校正前补偿中子测井值, d_h 为井径测井值。

(2) 泥浆密度影响校正。

$$C_{\text{NN}} = 0.15 \{C_{\text{NL}}(0.12503(R_{\text{MUD}} - 8) + 1)^{0.1592} - C_{\text{NL}}\}^{0.2/C_{\text{NL}}} \quad (3-10)$$

其中, R_{MUD} 为泥浆密度, $C_{\text{NL}} > 20$ 。

(3) 泥饼厚度影响校正。

$$H_N = 25 T_{MC}^{0.735} 0.825^{0.25/C_{NL}} (C_{NL} - 0.225) \quad (3-11)$$

其中, T_{MC} 为泥饼厚度, $T_{MC} > 0$ 和 $C_{NL} > 0$ 。

(4) 泥浆矿化度影响校正。

$$E_N = -0.2857 C_{NL} M_{PPM} \times 10^{-6} (C_{NL}^{0.1}/0.9) \quad (3-12)$$

其中, M_{PPM} 为泥浆矿化度。

(5) 地层水矿化度影响校正。

$$D_N = C_{NL} (0.42 \times 10^{-6} W_{PPM} + 1) - C_{NL} \quad (3-13)$$

其中, W_{PPM} 为水矿化度。

(6) 地层温度影响校正。

$$F_N = C_{NL} \{ 155.842 \times 10^{-6} (T_{EMP} - 68) + 1 \} - C_{NL} \quad (3-14)$$

其中, T_{EMP} 为地层温度。

(7) 仪器间隙影响校正。

$$G_N = -S_{OFF}^{0.8} (1 - C_{NL}) \times 0.38 \quad (3-15)$$

其中, $S_{OFF} = (d_h - 3.626)/2$ 。

则有补偿中子测井环境校正公式

$$C_{NLC} = B_N + C_{NN} + H_N + E_N + D_N + F_N + G_N + C_{NL} \quad (3-16)$$

其中, C_{NLC} 为补偿中子测井环境校正后的测井值。

3.3.4 利用双侧向测井和冲洗带电阻率计算地层真电阻率和侵入带直径

若 $\rho_{LLD}/\rho_{XO} > 1$ 和 $\rho_{LLD}/\rho_{LLS} > 1.1$ 则

$$\rho_T = \frac{2.18 C \rho_{LLD}}{1.78 C - 1} \quad (3-17)$$

其中, ρ_{LLD} 和 ρ_{LLS} 分别为双侧向测井深浅侧向视电阻率, ρ_{XO} 为冲

洗带电阻率, ρ_T 为地层真电阻率, $C = \frac{\rho_{LLS}}{\rho_{XO}} \cdot \frac{\rho_{LLD} - \rho_{XO}}{\rho_{LLD} - \rho_{LLS}}$ 。

若 $\rho_{LLD}/\rho_{XO} \leq 1$, 则地层真电阻率计算公式为

$$\rho_T = 1.7 \rho_{LLD} - 0.7 \rho_{LLS} \quad (3-18)$$

若 $\rho_{LLD}/\rho_{LLS} \leq 1$ 则地层真电阻率计算公式为

$$\rho_T = 1.1 \rho_{LLD} \quad (3-19)$$

若 $\frac{\rho_T}{\rho_{LLD}} > 1$ 则侵入带直径 D_1 计算公式为

$$D_1 = 107 \left(\frac{\rho_T}{\rho_{LLD}} - 1 \right) \quad (3-20)$$

若 $\frac{\rho_T}{\rho_{LLD}} < 1$, 则侵入带直径 D_1 计算公式为

$$D_1 = 160 \left(1 - \frac{\rho_T}{\rho_{LLD}} \right) \quad (3-21)$$

3.3.5 利用双感应测井和八侧向测井计算地层真电阻率和侵入带直径

(1) 地层真电阻率的计算。

$$\text{令 } A_1 = \frac{\rho_{LLS}}{\rho_{ILD}} - 1, B_1 = \frac{\rho_{ILM}}{\rho_{ILD}} - 1, C_1 = \frac{A_1}{B_1}$$

其中 ρ_{LLS} 为八侧向测井视电阻率, ρ_{ILD} 和 ρ_{ILM} 为双感应测井深中感应视电阻率。

地层真电阻率的计算公式为

$$\rho_T = \begin{cases} \rho_{ILD} & B_B \leq 0 \text{ 或 } \rho_{TRD} > 1 \\ \frac{\rho_{LLS}}{\rho_{ILD}} < 2.5 \text{ 或 } \frac{\rho_{ILM}}{\rho_{ILD}} \leq 1 & \\ 0.4 \rho_{ILD} & \rho_{TRD} < 0.4 \\ \rho_{TRD} \rho_{ILD} & \text{其他} \end{cases} \quad (3-22)$$

其中 $\rho_{TRD} = - \left(\frac{\sqrt{B_B} + B}{2} \right)$, $B = 0.59 A_1 - 2.21 C + 1.35$, $C = - (5.76 A_1 - 9.88 C_1 + 11.04)$, $B_B = B * B - C$ 。

(2) 侵入带直径的计算。

侵入带直径的计算公式为

$$D_1 = 33(A + 1) - 10^{(0.5A - 0.04)} \quad (3-23)$$

其中, $A = \frac{\rho_{ILM} \rho_{ILD} - \rho_T}{\rho_T \rho_{ILM} - \rho_{ILD}}$ 。

3.3.6 声波时差测井环境校正公式

声波(时差)测井是煤层气勘探开发中普遍采用的一种重要测

井方法。该测井方法测量的是有发射器反射的到达不同距离的两个或多个接收器的沿井壁传播的滑行纵波的时间差。为了提高应用效果，一般需做井孔校正（包括井壁不规则和井孔扩大校正）。

(1)类似补偿密度测井的声波测井环境校正公式。

详细校正方法见 3.3.2 节。

(2)井壁不规则影响的校正方法。

井壁不规则影响主要是指由于井壁参差不齐，使得两个接收器所在深度相应的井径值不一样而对时差测量所造成的影响。其校正方法为

$$\Delta t_c = \Delta t_L - 0.01 \Delta d \Delta t_{mf} \quad (3-24)$$

式中 Δt_c 为经井壁不规则影响校正后的声波时差值， Δt_L 为声波仪器测量的时差值， Δd 为两个接收探头所在深度的井径之差除以 2 其计算公式为

$$\Delta d = |d_1 - d_2| / 2$$

其中， d_1 和 d_2 分别为记录点之上和之下几个采样点的井径值的平均值。 Δt_{mf} 为泥浆滤液的声波时差。

(3)井眼扩大的影响及其校正方法。

在正常情况下， Δt 是两个接收器所接收到的首波时差，但由于扩径使首波衰减过大，致使两个接收器不一定是首波触发，即使 Δt 增大。假设声波测井的发射频率为 20kHz，波形周期 $T = \frac{1}{f} = \frac{1s}{20kHz} = 50\mu s$ ，所以扩径影响时差变大的量值应该是 $50\mu s$ 的倍数，即校正量以 $50\mu s$ 为单位 其校正方法为 李宝同 (1990)

$$\Delta t_c = \Delta t_L - \Delta$$

$$\Delta = \begin{cases} 0\mu s & d_s \leq 5cm \\ 50 \times \frac{d_s - 5}{5} \mu s & 5cm < d_s \leq 10cm \\ (50 + 50 \times \frac{d_s - 10}{5}) \mu s & 10cm < d_s \leq 30cm \\ 250\mu s & d_s > 30cm \end{cases} \quad (3-25)$$

其中 $\Delta t_c, \Delta t_1$ 分别为井径校正后的声波时差值和校正前的声波时差值 d_s 为实测井径与钻头井径之差, 当 d_s 为负值时, 不作井径校正。

参 考 文 献

- 1 雍世和, 洪有密. 测井资料综合解释与数字处理. 北京: 石油工业出版社, 1982:442
- 2 雍世和 张超谟. 测井数据处理与综合解释. 东营: 石油大学出版社, 1996: 590
- 3 雍世和. 最优化测井解释. 东营: 石油大学出版社, 1995:268
- 4 李宝同. 声波测井资料校正方法. 地球物理测井, 1990, 14(5):305 ~ 310
- 5 丁次乾主编. 矿场地球物理. 东营: 石油大学出版社, 1992:377
- 6 中国矿业学院, 西安矿业学院, 江苏煤田地质勘探公司. 煤田地球物理测井. 北京: 煤炭工业出版社, 1979:473
- 7 董敏煜编. 地震勘探信号分析. 东营: 石油大学出版社, 1989:468
- 8 申宁华, 管志宁主编. 磁法勘探问题. 北京: 地质出版社, 1985:357

第 4 章 利用常规测井资料 识别煤层和煤层气层

利用测井信息识别煤层气层，首先利用测井信息识别煤层。目前，利用测井信息识别煤层的方法主要有两种：(1)利用密度截止值直接划分出煤层；(2)通过综合分析各曲线特征，然后确定煤层。第一种方法由于单纯利用密度一条曲线，有时误差较大。第二种方法由于有人为因素的影响，在层的厚度上可能有偏差。为克服两者的缺陷，在综合分析前两种方法的识别思想基础上，我们提出采用模式识别的方法进行煤层识别。

关于煤层气层识别问题，我们知道，孔隙差异法、声波差值法、空间模量差比法和电阻率比值法等是当今较有效的解释常规气层（例如，油成气层和煤成气层等）的测井解释方法（谭廷栋，1992；潘和平等，1994）。本章将它们作适当变化之后，用于煤层气储层的测井解释，并探讨与之应用有关的几个问题。

4.1 利用模式识别方法识别煤层

根据模式识别的基本理论，在数学上把那些没有适当数学描述的信息结构（或信号结构）称为模式。而所谓模式识别方法就是用计算机模拟人的各种识别能力。一个模式识别系统通常由两个连贯的阶段：分析阶段和实现阶段所组成，其中，实现阶段将分析阶段的结果来构成系统。待识别的模式先要经过预处理环节，从预处理的模式中挑选一批样本以进行分析，分析阶段的第一步是进行特征选择，选取对完成分类要求来说可能达到目的的特征集。特征选择环节决定了实现阶段中应该提取的特征集，于是特征提取环节按此要求对模式提取特征。在实现阶段上，设在论域 U 上有 n 个模糊子集

$$A_1, A_2, \dots, A_n$$

它们分别代表分析阶段所选取的 n 个特征集。对于 U 上的任一元素 u_0 要判别 u_0 属于哪一种模式可采取下面的加权平均的方法 即

$$\mu(u_0) = \sum_{i=1}^n x_i * \mu_{A_i}(u_0)$$

其中 x_i 为每个模式对应的加权系数； $\mu_{A_i}(u_0)$ 为 u_0 对每个模式的隶属度。通过 $\mu(u_0)$ 值判断其从属模式。

利用这种方法我们可以识别煤层。把一口井的数据文件作为一个论域，其中每条测井曲线作为其子集，并把所有地层分为煤层和非煤层两种模式。因为通常识别煤层用密度、补偿中子、声波时差、自然伽马、电阻率五种曲线，所以把这五种曲线作为识别煤层的特征曲线，并根据其在煤层识别中所起的作用分别赋以不同的权系数，然后通过加权平均计算隶属度，从而判别是否是煤层。

我们在测井曲线上识别出煤层以后，可以根据曲线确定出截止值，一般用密度曲线，给定截止值后，就可确定煤层边界，煤层厚度也就自然确定了。

另外，通过模式识别的方法确定煤层后，计算深度差，从而就确定了煤层的厚度。

在辽河东部凹陷地区我们利用这种方法识别煤层，经过大量的实际资料处理表明，在该区我们认为隶属度 $\mu(u_0)$ 大于 0.7 的地层为煤层。取得了很好的效果。以荣 37 井、欧 13 井、界 10 井、桃 14 井为例说明对比效果，具体对比效果见表 4-1 ~ 表 4-4。

表 4-1 荣 37 井模式识别与人工识别煤层结果对比表

序号	人工识别煤层深度段	模式识别煤层深度段	备注
1	2062.7 ~ 2063.8	2062.500 ~ 2063.750	
2	2066.8 ~ 2068.0	2066.750 ~ 2067.500	
3	2072.5 ~ 2073.5	2073.125 ~ 2073.500	
4	2075.2 ~ 2076.3	2074.875 ~ 2076.000	
5	2087.2 ~ 2090.6	2088.125 ~ 2089.375	
6	2093.6 ~ 2095.0	2093.750 ~ 2094.625	

续表 4-1

序号	人工识别煤层深度段	模式识别煤层深度段	备注
7	2102.8 ~ 2105.2	2103.375 ~ 2105.000	
8	2116.8 ~ 2118.0	2116.875 ~ 2117.500	
9	2119.0 ~ 2120.2	2119.000 ~ 2120.125	
10	2124.8 ~ 2127.8	2126.250 ~ 2128.000	
11	2128.5 ~ 2131.2	2128.500 ~ 2131.000	
12	2254.0 ~ 2259.8	2255.375 ~ 2260.375	2256.6m 取芯为煤
13	2263.3 ~ 2265.3	2264.125 ~ 2265.250	
14	2275.3 ~ 2277.4	2275.750 ~ 2277.125	
15	2283.6 ~ 2284.8	2282.750 ~ 2284.625	
16	2335.0 ~ 2340.2	2234.750 ~ 2338.875	
17	2345.8 ~ 2351.0	2345.375 ~ 2350.875	
18	2358.7 ~ 2360.0	2359.000 ~ 2360.250	
19	2388.7 ~ 2389.5	2388.250 ~ 2389.625	

表 4-2 欧 13 井模式识别与人工识别煤层结果对比表

序号	人工识别煤层深度段	模式识别煤层深度段
1	2193.5 ~ 2197.8	2193.250 ~ 2197.625
2	2201.2 ~ 2202.3	2201.000 ~ 2202.000
3	2206.7 ~ 2208.0	2207.000 ~ 2207.875
4	2214.0 ~ 2218.0	2213.750 ~ 2218.125
5	2230.8 ~ 2234.6	2232.750 ~ 2234.625
6	2240.4 ~ 2242.8	2240.250 ~ 2242.625
7	2247.5 ~ 2250.7	2247.250 ~ 2250.750
8	2253.4 ~ 2255.0	2253.250 ~ 2255.000
9	2258.0 ~ 2259.4	2258.250 ~ 2259.125

表 4-3 界 10 井模式识别与人工识别煤层结果对比表

序号	人工识别煤层深度段	模式识别煤层深度段
1	1182.2 ~ 1185.5	1183.250 ~ 1185.375
2	1186.6 ~ 1188.3	1186.750 ~ 1187.875
3	1202.7 ~ 1205.3	1203.125 ~ 1205.000
4	1254.3 ~ 1264.7	1254.250 ~ 1264.875
5	1286.7 ~ 1290.0	1287.500 ~ 1289.875
6	1310.0 ~ 1311.2	1310.375 ~ 1310.500
7	1317.0 ~ 1328.0	1317.250 ~ 1327.625
8	1364.0 ~ 1366.3	1364.625 ~ 1365.875

表 4-4 桃 14 井模式识别与人工识别煤层结果对比表

序号	人工识别煤层深度段	模式识别煤层深度段
1	2642.3 ~ 2644.0	2642.250 ~ 2643.875
2	2653.0 ~ 2655.2	2653.250 ~ 2655.250
3	2657.3 ~ 2659.0	2657.000 ~ 2660.125
4	2667.0 ~ 2668.6	2667.125 ~ 2668.375
5	2669.8 ~ 2673.8	2671.500 ~ 2673.375
6	2674.5 ~ 2679.3	2674.250 ~ 2679.500
7	2687.4 ~ 2689.8	2687.500 ~ 2689.500
8	2700.2 ~ 2705.2	2700.000 ~ 2705.250
9	2706.4 ~ 2712.0	2707.125 ~ 2711.750
10	2850.3 ~ 2855.3	2851.375 ~ 2855.500
11	2879.7 ~ 2882.0	2879.750 ~ 2882.250
12	2892.3 ~ 2894.0	2892.500 ~ 2893.750
13	2958.3 ~ 2960.0	2958.625 ~ 2959.250
14	2967.2 ~ 2968.8	2967.750 ~ 2968.750

从上面四个对比表可看出，用模式识别的方法判断煤层和人工划分的煤层基本上吻合，这说明这种方法是可行的，同时使用这种方法还可避免人工分层中个人因素的影响以及提高解释效率。

4.2 三孔隙度曲线分析法

由于煤层气储层上测得的声波时差测井值偏高、密度测井值偏低与中子测井值偏高等特征，因此可以直接利用声波时差、密度测井与中子测井上述变化特征进行煤层气储层的识别。

其次，可利用测井体积模型计算出声波时差孔隙度、密度测井孔隙度和中子测井孔隙度，并利用下面的方法（柳孟文等，1995，1999），计算出煤层气储层孔隙度背景值，即

$$\Delta t = \varphi_s \Delta t_f + (1 - \varphi_s) \Delta t_{ma} \quad (4-1A)$$

或

$$\varphi_s = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad (4-1B)$$

其中 φ_s 为声波时差孔隙度， Δt_{ma} 和 Δt_f 分别为煤层和流体的声波时差。

$$\rho_b = \varphi_D \rho_f + (1 - \varphi_D) \rho_{ma} \quad (4-2A)$$

$$\text{或} \quad \varphi_D = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (4-2B)$$

其中 φ_D 为密度测井孔隙度, ρ_{ma} 和 ρ_f 分别为煤层和流体的密度测井值。

$$H_1 = \varphi_N H_f + (1 - \varphi_N) H_{ma} \quad (4-3A)$$

$$\text{或} \quad \varphi_N = \frac{H_1 - H_{ma}}{H_f - H_{ma}} \quad (4-3B)$$

其中 φ_N 为中子测井孔隙度, H_{ma} 和 H_f 分别为煤层和流体的中子测井值。

$$\varphi_a = A \cdot \frac{\varphi_D + \varphi_N}{4} - B \sqrt{\frac{\varphi_D^2 + \varphi_N^2}{8}} + C\varphi_f \quad (4-4)$$

其中 φ_a 为煤层气储层孔隙度背景值。所谓煤层气储层孔隙度背景值就是假设在煤系地层中在某一地层压力、温度作用下煤层中无孔隙和无自由水, 在这种条件下测得的声波时差测井、密度测井与中子测井孔隙度值就称为在这种条件下的煤层气储层孔隙度背景值。由于煤系地层的埋藏深度不同, 地层压力、温度也就不同, 其孔隙度背景值也就不同, 在实际情况下, 是很难直接测量到煤层气储层孔隙度背景值, 一般来说是利用经验公式或统计分析确定。A, B, C 为系数项, 可根据煤层气储层的埋藏深度和煤级确定其范围在 1.0 ~ 1.5 之间; φ_f 为裂缝孔隙度, 可根据阿桂乐 (R. Aguilera) 等人提出的方法确定。

因此, 通过对比声波时差测井孔隙度值、密度测井孔隙度值和中子测井孔隙度值和煤层气储层孔隙度背景值即可识别煤层气储层, 若声波时差测井孔隙度值、密度测井孔隙度值和中子测井孔隙度值大于煤层气储层孔隙度背景值, 该层即为煤层气储层, 否则即为非煤层气储层; 或者将声波时差测井孔隙度值、密度测井孔隙度值和中子测井孔隙度值和煤层气储层孔隙度背景值进行交会, 综合分析, 进而确定煤层气储层。

4.3 空间模量差比法

空间模量差比 ΔM 定义为

$$\Delta M = \frac{M_1 - M_2}{M_1} = 1 - \frac{M_2}{M_1} \quad (4-5)$$

其中式 4-5 中 M_1 是目的层为非煤层气储层岩石的空间模量， M_2 是目的层为煤层气储层岩石的空间模量。

根据弹性力学理论，纵波在岩石中的传播速度与岩石的空间模量之间的关系为

$$v = \sqrt{\frac{M}{\rho_b}} \times 10^{-2} \quad (4-6)$$

其中 v 为纵波在岩石中的传播速度， M 为空间模量， ρ_b 为密度测井值。

已知声波纵波时差 Δt 等于纵波在岩石中的传播速度 v 的倒数 即

$$\Delta t = \frac{1}{v} \times 10^{-6} \quad (4-7)$$

将式 4-7 代入式 4-6，经整理可得岩石的空间模量 M 和密度测井值、声波纵波时差的关系式为

$$M = \frac{\rho_b}{\Delta t^2} \times 10^{16} \quad (4-8)$$

由式 4-5 和式 4-8，可得利用密度测井值、声波纵波时差确定空间模量差比 ΔM 的计算公式为

$$\begin{aligned} \Delta M &= \frac{\frac{\rho_{b1}}{\Delta t_1^2} \times 10^{16} - \frac{\rho_{b2}}{\Delta t_2^2} \times 10^{16}}{\frac{\rho_{b1}}{\Delta t_1^2} \times 10^{16}} \\ &= \frac{\frac{\rho_{b1}}{\Delta t_1^2} - \frac{\rho_{b2}}{\Delta t_2^2}}{\frac{\rho_{b1}}{\Delta t_1^2}} \end{aligned} \quad (4-9)$$

其中 $\rho_{b1}, \Delta t_1$ 分别为目的层非煤层气储层岩石的密度测井值和声波纵波时差， $\rho_{b2}, \Delta t_2$ 分别为目的层煤层气储层岩石的密度测井值和声波纵波时差。

根据式 4-9 可知,当 $\Delta M > 0$, 指示目的层为煤层气储层;当 $\Delta M \leq 0$, 指示目的层为非煤层气储层。

4.4 电阻率比值法

根据电阻率测井理论, 地层电阻率比值 I 等于测量的原状地层电阻率 ρ_T 与计算的水层电阻率 ρ_0 之比, 即

$$I = \frac{\rho_T}{\rho_0} \quad (4-10)$$

而地层临界电阻率比值 I_c 等于计算的煤层气储层临界电阻率 ρ_{Tc} 与计算的水层电阻率 ρ_0 之比, 即

$$I_c = \frac{\rho_{Tc}}{\rho_0} \quad (4-11)$$

根据煤层气储层上的电阻率一般表现为高阻特征, 因此可利用 I 和 I_c 直观指示煤层气储层, 当 $I > I_c$ 时, 指示目的层为煤层气储层; 当 $I \leq I_c$ 时, 指示目的层为非煤层气储层。

4.5 方法对比和综合分析

分析上述不同煤层气层识别方法的实质不难看出, 三孔隙度曲线法主要是利用煤层气储层上表现为声波时差测井值偏高、密度测井值偏低与中子测井值偏高等特征, 但是煤层气储层孔隙度背景值不易确定; 空间模量差比法是利用煤层气储层与常规储层相比, 其空间模量较小的特征, 而反映在测井曲线上一般表现为声波时差测井值偏高、密度测井值偏低的特征, 因此该方法是三孔隙度曲线法的变种, 其实质是一样的; 电阻率比值法是利用煤层气储层上表现为高阻特征进行储层识别, 煤层气储层临界电阻率 ρ_{Tc} 与水层电阻率 ρ_0 不易确定。因此, 为了有效识别煤层气储层, 可综合利用上述不同方法进行煤层气储层识别, 以克服不同方法各自的缺点, 提高煤层气储层测井解释的精度。

参 考 文 献

- 1 谭廷栋, 几种有效的测井找气方法, 地球物理学报, 1992, 35(1): 111 ~ 120

- 2 潘和平,黄智辉.测井资料解释煤成气方法研究.现代地质,1994,8(1): 119 ~ 125
- 3 柳孟文,赵文光.靳晓杰等.煤层气识别方法中国地球物理学会年刊, 1995,323
- 4 柳孟文,李能根,赵文光等.煤层气综合评价技术初探.测井技术,1999, 23(2):99 ~ 102
- 5 李纪森.煤层气测井技术与解释分析.测井技术,1999,23(2):103 ~ 107
- 6 侯俊胜.煤层气储层评价的地球物理测井技术.现代地质,1998,12(1): 60 ~ 65
- 7 侯俊胜,王颖.神经网络方法在煤层气测井资料解释中的应用.地质与勘 探,1999,35(3):41 ~ 45
- 8 王颖.煤层气储层测井资料评价方法的应用研究.1997,中国地质大学 (北京) 学士学位毕业论文
- 9 丁次乾主编.矿场地球物理.东营:石油大学出版社,1992,377
- 10 中国矿业学院,西安矿业学院,江苏煤田地质勘探公司等.煤田地球物 理测井.北京:煤炭工业出版社,1979,473
- 11 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释.东营:石油大学出版社, 1996:590
- 12 潘和平,黄智辉.利用模糊模式识别煤成气层.地球科学,1993,18(1): 84 ~ 94
- 13 侯俊胜,尉中良.煤层气储层评价的地球物理测井方法.中国地球物理 学会年刊,1997:5
- 14 李庆谋,段旭,杜爱民等.煤层气地球物理测井评价研究.中国地球物 理学会年刊,1996,133
- 15 谭廷栋.测井解释煤层气藏.测井技术,23(2):83 ~ 88
- 16 Aguilera R., Formation evaluation of coalbed methane reservoirs. Petroleum Soci- ety CIM, Paper No. CIM 93 ~ 08

第 5 章 煤层气储层测井评价的 模糊综合评判方法

关于利用测井多参数信息进行储层识别,人们已提出了基于常规天然气评价思想的测井评价(见第 4 章)模糊综合评判、灰色综合评判、神经网络和多元统计等方法(潘和平, 1993; 侯俊胜, 1999, 2000)。通过与常规油气储层的识别问题对比发现,模糊综合评判方法可以用于煤层气储层的定性识别,为此我们将模糊综合评判方法应用在煤层气储层的识别,并针对该方法存在的问题,提出了改进的途径,所以,下面将分别讨论模糊综合评判方法基本原理及应用等有关问题。

5.1 模糊综合评判方法原理

5.1.1 方法的基本原理

我们知道,在现实生活中,同一事物或现象往往具有多种属性,因此在对事物进行评价(评判)时,就要兼顾事物的各个方面。所谓模糊综合评判,就是应用模糊变换原理和最大隶属度原则,在考虑与被评价相关多种因素的影响下,对某事物作出综合决断(评判)。

设有两个有限论域,即

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} = \{u_i\} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} = \{v_j\} \quad j = 1, 2, \dots, m$$

其中论域 U 代表模糊综合评判因素所组成的集合,称为因素集, u_i 为被考虑的第 i 因素,论域 V 代表模糊综合评判评语所组成集合,称为评判集或评语集, v_j 为第 j 种评判结果。

设 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 是因素集 U 上的一个模糊向量, $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ 是评判集 V 上的一个模糊向量, R 是从 U 到 V 的

一个模糊映射，如果用矩阵表示，有

$$R = (r_{ij})_{n \times m}$$

其中 R 称为模糊矩阵， r_{ij} 为模糊矩阵元素。分析 r_{ij} 可以看出，它实际上可看作仅从单一因素 u_i 考虑，确定该事物对评判结果 v_j 的隶属度。所以 R 又可称为隶属度矩阵。那么从 W 到 B 的变换为

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_m) = W \cdot R \quad (5-1)$$

根据最大隶属原则

$$b_j = \max_{i=1}^m \{b_j\} \quad (5-2)$$

则所考虑的评判对象属于第 j 类。

5.1.2 模糊综合评判算法

模糊综合评判算法包括乘积法、取小取大法、乘积-取大法等，可根据情况选用适当的评判计算方法。下面提供如下几种算法。

(1) 乘积法。

$$b_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot r_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5-3)$$

其中 w_i 是刻画评价因素 u_i 重要性的系数，故 w_i 可称为模糊权系数， W 又可称为模糊权向量。

(2) 取小取大法。

$$b_j = \bigcup_{i=1}^n (w_i \cap r_{ij}) \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5-4A)$$

其中 \cup, \cap 分别为取大和取小运算符， w_i 是在考虑多因素时 r_{ij} 的调整系数。

(3) 乘积-取大法。

$$b_j = \bigcup_{i=1}^n (w_i \cdot r_{ij}) \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5-4B)$$

分析上述三种评判计算方法可知，乘积法为加权平均型的模糊综合评判，依模糊权系数的大小对所有因素均衡兼顾，适用于要求总和最大的情形；取小取大法为主因素决定型的模糊综合评判，其评判结果只取决于在总评价中起主要作用的那个因素，而忽略了其他因素。乘积-取大法为主因素突出型模糊综合评判，它与取

小取大法很相似，但是要精细些，不仅突出了主要因素，而且也兼顾了其他因素。

5.1.3 模糊综合评判数学模型的推广

分析式 5-1 不难看出，将 W 看做权重分配的模糊向量 (w_1, w_2, \dots, w_n) 则意味着因素集 U 中的第 i 种参量在模糊综合评判中对评判集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 的各元素反映灵敏度是相同的，均用 w_i 表示。实际上，对于因素集 U 中的第 i 种参量，在模糊综合评判中对评判集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 的各元素反映灵敏度是不尽相同的。据此，将模糊向量 W 进一步推广，看做权重分配的模糊矩阵 w_{ij} ，则式 5-1 变为

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_m) = W \cdot R = (w_{ji})_{m \times n} \cdot (r_{ij})_{n \times m} \quad (5-5)$$

同理，关于模糊综合评判算法，根据情况可选用适当的算法。例如，若采用乘法法，有

$$b_j = \sum_{i=1}^n w_{ji} \cdot r_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5-6A)$$

若采用取小取大法，有

$$b_j = \bigcup_{i=1}^n (w_{ji} \cap r_{ij}) \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5-6B)$$

由上面讨论可以看出，在模糊综合评判中，确定权系数向量（矩阵）和隶属度矩阵是其两个关键环节。目前关于权系数向量（矩阵）和隶属度矩阵的确定，主要有两类方法，即经验法和计算机自动确定方法。例如，根据解释者的经验，采用权系数矩阵人为给定，隶属度人为假设服从正态分布，或用频数统计方法由计算机自动计算权系数向量（矩阵）和隶属度矩阵。我们提出利用频数统计法，最优化法和人为给定的经验法综合确定权系数向量（矩阵）和隶属度矩阵。

5.1.4 用频数统计法、最优化法和经验法综合确定权系数向量、矩阵和隶属度矩阵

(1) 用频数统计法计算权系数向量和隶属度矩阵。

根据已知学习样本，设参与评判的测井曲线条数为 n ($i = 1, 2, \dots, n$)，要识别的含流体地层种类数为 m ($j = 1, 2, \dots, m$)，测井参

数划分的区间个数为 $K(k = 1, 2, \dots, K)$ 。

设对于给定的第 j 种流体地层, 第 i 种测井参数在第 k 区间上的频数为 n_{ijk} , 那么对于所有含流体地层, 第 i 种测井参数落在第 k 区间上的样本数为 n_{ik} 根据已知学习样本统计得

$$n_{ik} = \sum_{j=1}^m n_{ijk} \quad (5-7)$$

第 i 条测井曲线的频数为

$$n_i = \sum_{k=1}^K n_{ik} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^m n_{ijk} \quad (5-8)$$

定义第 i 种测井参数在第 k 区间第 j 类含流体地层上的隶属度为

$$r_{ijk} = \begin{cases} 0 & n_{ik} = 0 \\ \frac{n_{ijk}}{n_{ik}} & n_{ik} \neq 0 \end{cases} \quad (5-9)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, K$ 。

定义第 i 种测井参数在第 k 区间上的权系数为

$$w_{ik} = \begin{cases} 0 & n_i = 0 \\ \frac{n_{ik}}{n_i} & n_i \neq 0 \end{cases} \quad \begin{cases} k = 1, 2, \dots, K \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5-10)$$

利用式 5-9 和式 5-10 就可分别得到 R 和 W 。

(2) 用最优化方法计算权系数向量 (矩阵)。

由模糊综合评判模型式 5-5 若采用乘积法, 有 $b_j = \sum_{i=1}^n w_{ji} \cdot r_{ij}$ ($j = 1, 2, \dots, m$)。

设已知学习样本有 L 个, 令第 1 个样本在第 j 类含流体地层上的隶属度分别为 $r_{1j1}, r_{2j1}, \dots, r_{nj1}$ 对应 b_j 的期望值记为 y_{j1} 根据 $b_j = \sum_{i=1}^n w_{ji} \cdot r_{ij}$ 计算出的 b_j 记为 b_{j1} 。若第 1 个样本属于第 j 类含流体地层, 则令 $y_{j1} = 1$ 否则令 $y_{j1} = 0$ 。

$$\text{令} \quad w_{ji} = \frac{a_{ji}^2}{\sum_{i=1}^n a_{ji}^2}, \text{ 且 } \sum_{i=1}^n a_{ji}^2 \neq 0 \quad (5-11)$$

$$\text{根据上式 有 } b_j = \frac{\sum_{i=1}^n a_{ji}^2 \cdot r_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ji}^2}$$

为了求取 w_{ji} 或者 a_{ji} , 可将问题归结为求解如下无约束最优化问题 即

$$\min E_j = \min \sum_{i=1}^L (b_{ji} - y_{ji})^2 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5-12)$$

根据最优化方法中的最速下降法的迭代计算公式, 可得计算 a_{ji} 的迭代计算公式 (周志勇, 1996)

$$a_{ji}(t+1) = a_{ji}(t) - \eta(t) \frac{\partial E_j}{\partial a_{ji}(t)} \quad (5-13)$$

$$\text{其中 } \frac{\partial E_j}{\partial a_{ji}(t)} = 2 \sum_{i=1}^L (b_{ji} - y_{ji}) \frac{\partial b_{ji}}{\partial a_{ji}(t)}, \frac{\partial b_{ji}}{\partial a_{ji}(t)} = \frac{2a_{ji}}{\sum_{j=1}^n a_{ji}^2} (r_{ijl} - b_{ji}),$$

$\eta(t)$ 为步长因子, t 为迭代次数。

为了改善 a_{ji} 迭代计算公式的收敛特性, 采用 BP 神经网络所谓的“惯性”调整算法 式 5-13 修正迭代计算公式为

$$a_{ji}(t+1) = a_{ji}(t) - \eta(t) \frac{\partial E_j}{\partial a_{ji}(t)} + \alpha(t)(a_{ji}(t) - a_{ji}(t-1)) \quad (5-14)$$

其中 $\alpha(t)$ 为惯性因子。

给定 a_{ji} 初值和迭代计算的终止误差, 例如令 $a_{ji} = 1$ 利用式 5-14 进行迭代计算 当 $|a_{ji}(t) - a_{ji}(t-1)| < \epsilon$ 终止计算, ϵ 为终止误差, $a_{ji}(t)$ 即为计算的 a_{ji} 再根据 w_{ji} 和 a_{ji} 的关系, 即可求得 w_{ji} 。

(3) 根据经验调整权系数 W 和隶属度矩阵 R 。

根据频数统计方法和最优化方法的计算结果, 并结合煤层气储层评价因素集 U 各参量对储层反映的特点, 采用人为给定的经验法最后确定权系数向量 (矩阵) W 和隶属度矩阵 R 。例如若选择评价因素集 $U = (N_{GR}, V_{SP}, \rho_{LLD}, \Delta t, \rho_b, \rho_{LLD} - \rho_{LLS})$ 其中 $\rho_b, \Delta t, N_{GR}$ 三参量一般来说权系数应相对较大。

5.2 模糊综合评判方法应用

5.2.1 煤层气储层识别的基本步骤

根据上述模糊综合评判方法的基本原理,以及煤层气储层识别问题的特点,利用模糊综合评判方法进行煤层气储层识别,应包括如下六个基本步骤。

(1)确定因素集 U 和评价集 V 。对于煤层气测井,一般来说所使用的测井方法有密度测井、声波时差测井、自然伽马测井、微梯度测井、微电位测井、深侧向测井、浅侧向测井、井径测井和自然电位测井等。根据不同测井方法的特点,选择其中若干种测井参数构成煤层气储层识别的因素集 U ,根据需求和可能,选择若干种参数构成其评语集 V 。例如可选择因素集 $U = (\rho_b, N_{GR}, V_{SP}, \rho_{LLD}, \Delta t, \rho_{LLD} - \rho_{LLS}, \rho_{MLP} - \rho_{MLG})$ 选择 3 种参数构成其评语集 $V = (I \text{ 类储层}, II \text{ 类储层}, III \text{ 类储层})$ 或简记为 $V = (I, II, III)$ 。

(2)选择学习样本。所谓学习样本是指有已知测井参数和对应评价结果所组成的数据集。其主要作用是用来建立煤层气评价的模糊综合评判的数学模型。根据煤层气评价的要求,为了选择方法所必需的学习样本,一般是从研究区有试气数据或岩芯测试数据的井段选择学习样本。并且学习样本类型应包含评语集中所含的全部类型。对测井参数学习样本一定要去伪存真,以便使其有很好的代表性和适应能力。

(3)测井曲线的自动分层和取值。基于密度测井曲线具有纵向上可以较好的反应煤层分布的特点,所以,利用密度测井曲线,并采用活度法实现测井曲线的自动分层(胡克珍等,1996)。分层以后,以层内各采样点测井曲线值的算术平均值作为该层的测井曲线值。

(4)煤层识别。根据 DEN 、 GR 、 AC 、 CNL 、 $RLLD(RT)$ 、 $RLLS(RXO)$ 等测井曲线在煤层和非煤层上的一般变化规律,可知, DEN 和 GR 在煤层上表现为低值; AC 、 CNL 、 $RLLD(RT)$ 、 $RLLS(RXO)$ 在煤层上一般来说表现为绝对值高值;据此选择 $\rho_b, N_{GR}, \Delta t, C_{NL}$,

$\rho_{LLD}(\rho_T), \rho_{LLS}(\rho_{XO})$ 共 8 种参数来识别煤层, 其中 DEN 对煤层反应最好。第 4 章已给出了模式识别方法识别煤层, 在这里再提出两种具体的煤层识别方法。

一是直接利用密度测井曲线识别煤层。具体做法是, 给定煤层密度上限值 (例如, 美国选定煤层密度上限值为 1.75g/cm^3) 若测井密度小于该值为煤层, 反之为非煤层。

二是综合利用多种测井曲线识别煤层。具体做法有两个, 第一种具体做法是, 给定煤层的 DEN、GR、AC、CNL、RLLD(RT)、RLLS(RXO) 等测井曲线的门限值, 若测井值小于 (或大于) 该值为煤层, 反之为非煤层; 第二种具体做法是, 对 $\rho_b, N_{GR}, \Delta t, C_{NL}, \rho_{LLD}(\rho_T), \rho_{LLS}(\rho_{XO})$ 等测井参数进行如下变换, 并记为

$$V_i = \frac{X^{(i)} - X_{\min}^{(i)}}{X_{\max}^{(i)} - X_{\min}^{(i)}} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (5-15)$$

并令 $V'_i = 1 - V_i, i = 1, 2, V'_i = V_i, i = 3, 4, 5, 6$ 。定义如下煤层识别单因素量 A

$$A = \sum_{i=1}^6 K_i V_i \quad (5-16)$$

其中 $X_{\max}^{(i)}$ 和 $X_{\min}^{(i)}$ 分别为第 i 条测井参数的最大值和最小值, $K_i (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 分别为 $\rho_b, N_{GR}, \Delta t, C_{NL}, \rho_{LLD}(\rho_T), \rho_{LLS}(\rho_{XO})$ 测井参数的加权系数并要求 $\sum_{i=1}^6 K_i = 1, 0 \leq K_i \leq 1$ 。分析式 5-16 不难看出, 因为 $0 \leq V'_i \leq 1, 0 \leq V_i \leq 1$ 所以有 $0 \leq A \leq 1$ 。并且 A 越大, 是煤层的可能性就越大; 反之, A 越小, 是煤层的可能性越小。因此根据单因素量值 A 的大小即可识别煤层。假若给定 A 的煤层识别阈值和 K_i 根据测井曲线用公式 5-16 计算单因素量 A 逐层进行识别。若 A 大于煤层识别阈值, 该层即为煤层, 否则该层即为非煤层。

(5) 测井参数的归一化处理。因为不同的地球物理测井参数往往具有不同的量纲 (例如, ρ_b 为 g/cm^3 ; N_{GR} 为记数率 $1/\text{min}$; Δt 为 $\mu\text{s/m}$; $\rho_{LLD}(\rho_{LLS})$ 为 $\Omega \cdot \text{m}$; C_{NL} (含氢指数或中子孔隙度) 为百分数或小数), 所以在综合识别之前, 应首先对测井参数进行归一化

处理。

(6)煤层气层识别。设待识别层的测井曲线值为 $Y = (Y_i, i = 1, 2, \dots, n)$ 若 $X_{i(k-1)} < Y_i < X_{ik}$ 则记 $M(i) = k, M(i)$ 为待识别层的第 i 条曲线值落在的区间序号, 其中 $X_{i(k-1)} - X_{ik}$ 为第 i 种测井参数第 k 区间的数值范围, 则有

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_m) = W \cdot \rho$$

其中 $W = (W_{1M(1)}, W_{2M(2)}, \dots, W_{nM(n)})$, 或 $W = (w_{ji})_{m \times n}$, $R = (r_{ijM(i)})_{n \times m}$ 。

根据最大隶属原则, 有

若 $b_j = \max_{j=1}^m \{b_j\}$, 则待识别层属于第 j 类煤层气储层。

5.2.2 应用效果分析

为了检验模糊综合评判方法在煤层气储层评价中的应用效果, 我们利用已收集到的我国华北柳林地区四口煤层气测井数据 (井名: ML1、LU2、ML4、ML6) 及其有关的煤岩测试资料等, 对这四口煤层气测井数据进行了煤层气储层定性识别的初步应用研究。

通过分析这四口井煤层气测井数据可知, 该区所使用的测井方法有 DEN、GR、AC、CNL、RLLD(RT)、RLLS(RXO)、井径测井等, 所以选择它们中的密度等构成煤层气储层识别因素集 U 即 $U = (\rho_b, N_{GR}, \Delta t, C_{NL}, \rho_{LLD}(\rho_T), \rho_{LLS}(\rho_{XO}))$; 根据已收集到的煤岩测试资料 (见表 5-1 和表 5-2), 将煤层气储层分为三类 I 类煤储层: 代号 11; II 类煤储层: 代号 12; III 类煤储层: 代号 13, 因此评语集 $V = (I \text{ 类煤储层}, II \text{ 类煤储层}, III \text{ 类煤储层})$ 。其中 I 类煤储层含气量大于 $13\text{m}^3/\text{t}$, $10\text{m}^3/\text{t} < II$ 类煤储层含气量 $< 13\text{m}^3/\text{t}$, III 类煤储层 $< 10\text{m}^3/\text{t}$ 。

根据本区 ML1 井和 LU2 井的煤岩成分测试数据, 共选择其中 59 个数据作为煤层气层类型识别的学习样本, 其中 I 类储层样本 34 个, II 类储层样本 6 个, III 类储层样本 19 个 详细情况见表 5-3。

根据经验和大量试算, 选取密度测井进行煤层识别 (非煤层代号 0), 模糊算子选取乘积算子, 选取测井参数划分的区间个数为

$K = 10$ 。为了说明模糊综合评判方法的有效性，这里给出应用模糊综合评判方法对这四口测井资料进行的煤层气层识别，其结果见表 5-4 ~ 表 5-7。可以看出其分层结果和层识别结果是合理的；其中 7 个测试层段煤层气测井识别结果与测试结果基本吻合，吻合率约为 80% 以上，由此可以看出该模糊综合评判方法的可靠性。但是应该指出，对于一些测试层段，测井识别结果与测试结果有一定差异。这主要是一些测井参数对储层反映不好以及学习样本选择不当等原因。

表 5-1 华北柳林地区 ML1 井三井段实验室煤岩成分测试结果数据表

深度 /m	密度 /g·cm ⁻³	含碳量 /%	灰分 /%	挥发分 /%	水分 /%	含气量 /m ³ ·t ⁻¹	储层类型	备注
351.60	1.46	76.21	6.88	15.92	0.99	14.41	I (11)	
358.4 ~ 358.5	1.54	60.25	23.47	15.47	0.83	11.10	II (12)	
410.9	1.48	76.09	10.54	12.70	0.67	12.45	II (12)	

表 5-2 华北柳林地区 LU2 井四井段实验室煤岩成分测试结果数据表

深度 /m	密度 /g·cm ⁻³	含碳量 /%	灰分 /%	挥发分 /%	水分 /%	含气量 /m ³ ·t ⁻¹	储层类型	备注
353.0 ~ 354.0	1.41	64.84	14.18	19.30	1.66	13.40	I (11)	
362.0 ~ 364.0	1.72	65.41	18.18	15.40	1.01	6.42	III (13)	
410.0 ~ 411.0	1.41	77.26	6.65	15.09	1.00	13.24	I (11)	
411.0 ~ 412.0	1.47	76.38	8.46	14.00	0.98	13.62	I (11)	

表 5-3 煤层气储层识别的学习样本数据表

深度 /m	N_{GR} /(min) ⁻¹	V_{SP} /mV	ρ_{UD} /Ω·m	ρ_T /Ω·m	Δt /μs·m ⁻¹	ρ_b /g·cm ⁻³	储层类型
351.375	4162.34	13.91	1989.56	2485.28	420.24	1.45	11
351.500	4438.02	13.9	1733.54	851.38	417.45	1.64	11
351.625	4765.78	13.9	667.32	98.57	403.67	1.81	11
358.375	7568.64	14.09	3365.36	3278.08	408.56	1.61	12
358.500	6638.63	14.07	3968.81	3280.32	403.64	1.61	12

续表 5-3

深度 /m	N_{GR} /(min) ⁻¹	V_{SP} /mV	ρ_{LD} / $\Omega \cdot m$	ρ_T / $\Omega \cdot m$	Δt / $\mu s \cdot m^{-1}$	ρ_b /g·cm ⁻³	储层类型
358.625	6185.89	13.91	5180.56	3309.56	397.67	1.59	12
410.750	5063.45	16.16	408.83	405.63	447.79	1.51	12
410.875	5350.84	15.92	389.66	453.29	449.49	1.54	12
411.000	5620.72	15.68	465.76	549.99	438.53	1.55	12
352.875	3435.62	-22.37	337.27	339.21	463.78	1.37	11
353.000	3083.63	-20.54	304.35	310.66	470.39	1.36	11
353.125	2820.98	-18.64	270.39	285.25	476.74	1.35	11
353.250	2807.51	-16.62	235.97	237.64	482.7	1.34	11
353.375	2947.18	-14.84	194.8	157.59	484.84	1.34	11
353.500	3472.43	-12.92	129.51	121.7	479.16	1.35	11
353.625	4101.03	-11.26	104.64	91.5	462.22	1.37	11
353.750	4665.29	-10.07	95.6	80.76	436.09	1.55	11
353.875	5170.83	-8.89	89.07	74.1	318.98	1.86	11
354.000	5970.88	-8.03	81.68	72.56	275.26	2.17	11
354.125	6756.9	-7.88	75.65	75.69	262.86	2.48	11
361.875	4904.13	-0.8	334.25	254.05	396.71	1.44	13
362.000	5499.52	1.88	292.05	232.13	401.46	1.45	13
362.125	6238.38	3.83	237.23	190.94	401.89	1.46	13
362.250	7088.35	5.62	156.97	87.75	396.77	1.46	13
362.375	8436.88	6.85	102.43	55.74	368.11	1.62	13
362.500	9918.48	7.81	74.36	41.24	349.31	1.82	13
362.625	12130.48	8.0	49.13	37.03	303.77	2.03	13
362.750	12936.4	8.0	42.3	34.49	227.16	2.23	13
362.875	13110.06	8.0	40.06	35.8	198.77	2.43	13
363.000	12395.83	8.0	46.31	39.12	193.62	2.48	13
363.125	11898.99	7.79	50.45	42.65	184.27	2.5	13
363.250	11681.24	7.41	52.32	44.61	178.52	2.52	13
363.375	11595.86	6.89	53.85	45.46	178.39	2.53	13
363.500	11693.93	6.28	54.34	46.23	181.37	2.54	13
363.625	11594.98	5.43	54.95	46.23	189.19	2.55	13
363.750	11571.36	4.51	54.95	46.55	199.34	2.57	13

续表 5-3

深度 /m	N_{GR} $/(\text{min})^{-1}$	V_{SP} /mV	ρ_{LLD} / $\Omega \cdot \text{m}$	ρ_T / $\Omega \cdot \text{m}$	Δt / $\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	ρ_b / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	储层类型
363.875	11254.44	3.42	54.89	47.87	214.01	2.58	13
364.000	10917.79	2.77	54.85	49.53	230.57	2.58	13
364.125	10737.73	1.94	54.75	51.11	239.42	2.57	13
409.750	2622.2	1.51	125.24	97.93	413.5	1.37	11
409.875	2540.85	5.13	97.9	80.82	417.53	1.38	11
410.000	2852.8	9.5	93.06	80.87	425.14	1.40	11
410.125	3167.43	14.01	96.82	84.41	430.29	1.40	11
410.250	3545.91	17.75	103.69	89.09	434.82	1.41	11
410.375	3724.75	21.6	101.55	79.22	438.15	1.42	11
410.500	3930.14	24.49	85.97	65.21	441.02	1.47	11
410.625	4168.1	27.08	75.7	50.61	439.68	1.47	11
410.750	4391.52	28.75	56.3	38.31	432.63	1.46	11
410.875	4630.45	30.77	44.07	30.63	425.38	1.44	11
411.000	5052.41	32.01	32.84	27.25	419.52	1.45	11
411.125	5532.34	33.22	26.6	24.94	414.12	1.48	11
411.250	6194.02	33.33	24.84	23.4	409.07	1.53	11
411.375	7039.61	33.33	25.03	23.96	403.16	1.52	11
411.500	7588.02	32.91	26.39	25.39	395.13	1.49	11
411.625	8094.5	32.32	28.57	27.59	375.23	1.58	11
411.750	9534.89	31.47	29.51	29.25	355.24	1.60	11
411.875	10489.99	30.4	29.52	27.5	336.31	2.15	11
412.000	11147.63	28.93	28.08	24.98	310.6	2.36	11
412.125	11422.37	27.08	25.03	23.21	285.88	2.35	11

表 5-4 华北柳林地区 ML1 井煤层气层识别结果数据表

序号	顶深 /m	底深 /m	分层厚度 /m	识别结果	备注
1	0.000	327.500	327.500	0	
2	327.500	328.875	1.375	11	煤层
3	328.875	339.000	10.125	0	
4	339.000	340.125	1.125	13	煤层
5	340.125	348.625	8.500	0	
6	348.625	351.625	3.000	11	煤层
7	351.625	357.750	6.125	0	

续表 5-4

序号	顶深 /m	底深 /m	分层厚度 /m	识别结果	备注
8	357.750	359.750	2.000	12	煤层
9	359.750	408.125	48.375	0	
10	408.125	412.125	4.000	12	煤层
11	412.125	453.250	41.125	0	
12	453.250	460.000	6.750	13	煤层

表 5-5 华北柳林地区 LU2井煤层气层识别结果数据表

序号	顶深 /m	底深 /m	分层厚度 /m	识别结果	备注
1	26.000	330.000	304.000	0	
2	330.000	331.250	1.250	11	煤层
3	331.250	345.375	14.125	0	
4	345.375	346.875	1.500	13	煤层
5	346.875	351.125	4.250	0	
6	351.125	353.875	2.750	11	煤层
7	353.875	360.250	6.375	0	
8	360.250	362.500	2.250	13	煤层
9	362.500	408.125	45.625	0	
10	408.125	411.875	3.750	11	煤层
11	411.875	475.000	63.125	0	

表 5-6 华北柳林地区 ML4 井煤层气层识别结果数据表

序号	顶深 /m	底深 /m	分层厚度 /m	识别结果	备注
1	16.000	339.875	323.875	0	
2	339.875	341.375	1.500	13	煤层
3	341.375	347.625	6.250	0	
4	347.625	349.250	1.625	13	煤层
5	349.250	394.375	45.125	0	
6	394.375	398.250	3.875	13	煤层
7	398.250	410.000	11.750	0	

表 5-7 华北柳林地区 ML6 井煤层气层识别结果数据表

序号	顶深 /m	底深 /m	分层厚度 /m	识别结果	备注
1	15.000	327.250	312.250	0	
2	327.250	328.750	1.500	11	煤层
3	328.750	338.375	9.625	0	
4	338.375	339.500	1.125	11	煤层
5	339.500	349.625	10.125	0	
6	349.625	352.125	2.500	11	煤层
7	352.125	358.250	6.125	0	
8	358.250	360.625	2.375	11	煤层
9	360.625	376.875	16.250	0	
10	376.875	378.000	1.125	11	煤层
11	378.000	404.125	26.125	0	
12	404.125	408.000	3.875	11	煤层
13	408.000	446.500	38.500	0	
14	446.500	454.000	7.500	11	煤层

5.3 有关问题讨论

由前面几节的讨论不难看出，综合利用各种测井信息和其他有关信息（例如，试气和煤岩测试资料）识别煤层气层受如下一些因素影响：

(1) 不同测井信息的选择。

目前，利用多参数测井信息评价储集层主要选择两方面测井信息，即直接利用测井曲线（例如， ρ_b , N_{GR} , Δt , C_{NL} , $\rho_{LLD}(\rho_T)$, ρ_{LLS} (ρ_{XO}) 等) 或储集参数（例如煤质成分、含气量、孔隙度和渗透率等）或综合利用测井曲线和储集参数两方面信息。本次研究利用测井曲线和它们的组合参数（例如 $\rho_{LLD} - \rho_{LLS}$, $\rho_{MLF} - \rho_{MLG}$ ）这样一来可克服评价结果过分依赖于测井解释模型选择的不足。此外，不同测井信息的选择还包括选择多少个测井参数参与识别的问题。

(2) 不同学习样本的选择。

利用学习样本确定评价模式，因此学习样本种类应包括评语集所有种类。例如，评语集包括Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ，学习样本集必须包括对应种类的学习样本，即Ⅰ类样本、Ⅱ类样本和Ⅲ类样本，并且可以随着问题研究的深入，学习样本种类可进一步细分。并且要分析不同学习样本种类多参数测井信息的变化，去掉其中的奇变点。

(3) 煤层识别。

利用测井多参数信息综合识别煤层和非煤层主要依赖于测井曲线、识别阈值和加权系数。对于给定测井曲线和加权系数，识别阈值太小，可能会漏掉煤层，反之，识别阈值太大，可能会把非煤层误判为煤层。目前确定识别阈值大小还只能根据经验确定。

(4) 其他方面。

其他方面的影响包括测井参数的归一化方法、测井曲线分层和取值方法、不同评判方法和不同的 W 和 R 计算方法等。

参 考 文 献

- 1 张俊福 邓本让 朱玉仙等，应用模糊数学北京：地质出版社，1988
- 2 邓聚龙，灰色系统理论教程，武汉：华中理工大学出版社，1990
- 3 侯俊胜 黄智辉 刘德顺，吉林大老爷庙油田高台子低阻储层油水识别方法及应用，石油地球物理勘探，2000,35(1):119~128
- 4 潘和平，黄智辉，利用模糊模式识别煤成气层，地球科学，1993,18(1):84~94
- 5 周志勇，测井资料岩性识别方法研究，中国地质大学（北京）硕士学位论文，1996
- 6 胡克珍 张超谟，测井资料计算机辅助地层对比，北京：石油工业出版社，1996
- 7 南京大学数学系编，最优化方法，北京：科学出版社，1978:185
- 8 雍世和，张超谟，测井数据处理与综合解释，东营：石油大学出版社，1996:590
- 9 李纪森，煤层气测井技术与解释分析，测井技术，1999,23(2):103~107
- 10 侯俊胜 王颖，神经网络方法在煤层气测井资料解释中的应用，地质与勘探，1999,35(3):41~45

第 6 章 煤层气储层识别的模糊 综合评判与灰色综合评判的对比分析

6.1 前 言

我们知道，在当前煤层气勘探开发过程中，关于煤层识别、煤层气储层类型识别和裂缝识别等问题是地球物理测井方法的重要应用领域。随着国内外煤层气勘探开发研究问题的不断深入，人们所面临的这类煤层气储集层识别问题变得更加复杂。通过大量研究表明，为了更有效地利用地球物理测井信息来解决这类识别问题，重要途径之一就是利用测井多参数信息进行综合识别（评判）。为此，人们为了解决测井煤层识别、煤层气层类型识别和裂缝识别等识别问题已广泛应用了模糊综合评判、灰色综合评判、多元统计（例如，线性或非线性回归分析）和神经网络等现代模式识别技术（例如，见第 5 章、第 8 章和第 9 章的讨论），并且都已经取得较好的地质应用效果。为了进一步深入了解模糊综合评判和灰色综合评判（灰色关联度法和灰色聚类法的总称）的方法实质，本章从模糊数学理论和灰色系统理论出发，提出了它们三者统一的评判数学模型，对比分析了这两类不同方法的相同和不同点以及它们在应用过程中的影响因素和存在的困难。因此，这对今后正确地选择不同的综合评判方法与进一步提高它们在煤层气勘探开发过程中的应用效果不仅具有重要的理论意义而且具有重要的实际意义。

6.2 测井多参数识别方法的数学模型

6.2.1 模糊综合评判的数学模型

根据第 5 章已讨论的模糊综合评判方法的基本原理，利用模糊综合评判方法进行测井多参数煤层气综合评判（识别）可归结为

如下数学问题 即

$$\mathbf{B}^{(1)} = (b_j^{(1)})_{1 \times m} = (b_1^{(1)}, b_2^{(1)}, \dots, b_m^{(1)}) = \mathbf{W}^{(1)} \cdot \mathbf{R}^{(1)} \quad (6-1)$$

式中 $\mathbf{B}^{(1)} = (b_j^{(1)})_{1 \times m} = (b_1^{(1)}, b_2^{(1)}, \dots, b_m^{(1)})$ 为模糊综合评判向量, $b_j^{(1)}$ 为模糊综合评判向量元素;

$\mathbf{W}^{(1)} = (w_i^{(1)})_{1 \times n} = (w_1^{(1)}, w_2^{(1)}, \dots, w_n^{(1)})$ 或 $\mathbf{W}^{(1)} = (W_{ji}^{(1)})_{m \times n}$ 为权系数向量(矩阵), $w_i^{(1)}$ 或 $W_{ji}^{(1)}$ 为权系数向量(矩阵)元素;

$\mathbf{R}^{(1)} = (r_{ij}^{(1)})_{n \times m}$ 为隶属度矩阵, $r_{ij}^{(1)}$ 为隶属度矩阵元素。

关于模糊综合评判算法, 可采用乘积算法和取小取大算法等。

例如 若采用乘积算法 有

$$b_j^{(1)} = \sum_{i=1}^n w_i^{(1)} \cdot r_{ij}^{(1)} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6-2)$$

$$\text{或 } b_j^{(1)} = \sum_{i=1}^n w_{ji}^{(1)} \cdot r_{ij}^{(1)} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6-3)$$

若采用取小取大算法, 有

$$b_j^{(1)} = \bigcup_{i=1}^n (w_i^{(1)} \cap r_{ij}^{(1)}) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6-4)$$

$$\text{或 } b_j^{(1)} = \bigcup_{i=1}^n (w_{ji}^{(1)} \cap r_{ij}^{(1)}) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6-5)$$

根据最大隶属原则, 若

$$b_L^{(1)} = \max_{j=1}^m \{ b_j^{(1)} \}$$

则待识别对象属于第 L 类储层。

6.2.2 灰色综合评判的数学模型

灰色综合评判这里包括灰色关联度法和灰色聚类法两种方法。

6.2.2.1 灰色关联度方法

灰色关联度方法(灰关联度法)又称灰关联聚类法。根据灰色关联度法的基本原理, 利用灰色关联度法进行测井多参数综合识别可归结为如下数学问题, 即

$$\mathbf{B}^{(2)} = (b_j^{(2)})_{1 \times m} = (b_1^{(2)}, b_2^{(2)}, \dots, b_m^{(2)}) = \mathbf{W}^{(2)} \cdot \mathbf{R}^{(2)} \quad (6-6)$$

式中 $\mathbf{B}^{(2)} = (b_j^{(2)})_{1 \times m} = (b_1^{(2)}, b_2^{(2)}, \dots, b_m^{(2)})$ 称为关联度序列, $b_j^{(2)}$ 称为关联度;

$\mathbf{W}^{(2)} = (w_i^{(2)})_{1 \times n} = (w_1^{(2)}, w_2^{(2)}, \dots, w_n^{(2)})$ 称为灰关联权系数向量或 $\mathbf{W}^{(2)} = (w_{ji}^{(2)})_{m \times n}$ 称为灰关联权系数矩阵；

$\mathbf{R}^{(2)} = (r_{ij}^{(2)})_{n \times m}$ 称为关联系数矩阵， $r_{ij}^{(2)}$ 称为关联系数，其计算公式为

$$r_{ij}^{(2)} = \frac{\min_j \min_i \Delta_{ij} + A \max_j \max_i \Delta_{ij}}{\Delta_{ij} + A \max_j \max_i \Delta_{ij}} \quad (6-7)$$

$$\Delta_{ij} = |X_0^{(1)}(i) - X_j^{(1)}(i)|$$

$X_0^{(1)} = \{X_0^{(1)}(i)\}, i = 1, 2, \dots, n$ ，为子序列或待评价序列；

$X_j^{(1)} = \{X_j^{(1)}(i)\}, j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n$ 为母序列或评价标准序列； A 为灰色分辨率（系数）。

若采用平均值法计算关联度 $b_j^{(2)}$ 则有

$$b_i^{(2)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ij}^{(2)} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6-8)$$

式中 $w_i^{(2)} = w_{ji}^{(2)} = \frac{1}{n}$ 。

根据最大隶属原则，若

$$b_L^{(2)} = \max_{j=1}^m \{b_j^{(2)}\}$$

则待识别对象属于第 L 类储层。

6.2.2.2 灰色聚类法

根据灰色聚类方法的基本原理，利用灰色聚类法进行测井多参数综合识别可归结为如下数学问题，即

$$\mathbf{B}^{(3)} = (b_j^{(3)})_{1 \times m} = (b_1^{(3)}, b_2^{(3)}, \dots, b_m^{(3)}) = \mathbf{W}^{(3)} \cdot \mathbf{R}^{(3)} \quad (6-9)$$

式中 $\mathbf{B}^{(3)} = (b_j^{(3)})_{1 \times m} = (b_1^{(3)}, b_2^{(3)}, \dots, b_m^{(3)})$ 为灰色聚类向量， $b_j^{(3)}$ 为灰色聚类系数，并且

$$b_j^{(3)} = \sum_{i=1}^n w_{ji}^{(3)} \cdot r_{ij}^{(3)} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6-10)$$

$\mathbf{W}^{(3)} = (w_{ji}^{(3)})_{m \times n}$ 为标定聚类权系数矩阵，其中 $w_{ji}^{(3)} = \frac{\lambda_{ji}}{\sum_{i=1}^n \lambda_{ji}}$

为标定聚类权系数， λ_{ji} 为 $\lambda = (\lambda_{ji})_{m \times n}$ 的矩阵元素。确定 λ_{ji} 可利

用公式

$$\lambda_{ji} = \frac{\Theta_{ji}^{(\max)} + \Theta_{ji}^{(\min)}}{2}$$

其中 $\Theta_{ji}^{(\max)}$ 和 $\Theta_{ji}^{(\min)}$ 分别为灰色决策矩阵 $\Theta = (\Theta_{ji})_{m \times n}$ 元素 Θ_{ji} 的最大值和最小值；

$R^{(3)} = (r_{ij}^{(3)})_{n \times m}$ 为偏爱（白化）函数矩阵，其中 $r_{ij}^{(3)}$ 为偏爱（白化）函数矩阵元素。

根据最大隶属原则，若

$$b_L^{(3)} = \max_{j=1}^m \{ b_j^{(3)} \}$$

则待识别对象属于第 L 类储层。

6.3 不同识别方法的理论对比分析

由本章 6.2 节的讨论可知，模糊综合评判方法、灰色关联度方法、灰色聚类方法三种不同识别方法有一定的相似性，对比分析这三种不同识别方法是非常必要的。为了进行模糊综合评判方法、灰色关联度方法、灰色聚类方法三种不同识别方法的理论对比分析，下面主要从三个方面进行讨论，即数学模型的相似性、 $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$ 的确定方法和 $B^{(k)}$ 的计算方法。

6.3.1 数学模型的相似性

根据前面的分析讨论可以看出，上述三种不同识别方法可归结为如下统一的数学模型，即

$$B^{(k)} = (b_i^{(k)})_{1 \times m} = (b_1^{(k)}, b_2^{(k)}, \dots, b_m^{(k)}) = W^{(k)} \cdot R^{(k)} \\ k = 1, 2, 3 \quad (6-11)$$

其中 $k = 1$ 式 6-11 即为模糊综合评判的数学模型，式 6-1；

$k = 2$ 式 6-11 即为灰色关联度法的数学模型，式 6-6；

$k = 3$ 式 6-11 即为灰色聚类法的数学模型，式 6-9。

为了后面讨论方便，称 $B^{(k)}$ 为（广义）评判向量， $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$ 分别称为（广义）权向量（矩阵）和（广义）映射矩阵。

根据式 6-11 如果令 $W^{(1)} = W^{(2)} = W^{(3)}, R^{(1)} = R^{(2)} = R^{(3)}$

并且采用相同的计算 $b_j^{(k)}$ 的算法 (计算公式) 则应有

$$b_j^{(1)} = b_j^{(2)} = b_j^{(3)} \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$B^{(1)} = B^{(2)} = B^{(3)}$$

因此, 这三种不同的识别方法应得出相同的综合评判结果。

6.3.2 权向量 $W^{(k)}$ 和映射矩阵 $R^{(k)}$ 的确定方法

由上面的方法讨论可以看出, 确定权向量 $W^{(k)}$ 和映射矩阵 $R^{(k)}$ 是这三种不同综合评判方法的两个重要环节。不难理解, 不同的 $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$ 由式 6-11 可知, 必然会造成它们综合评判结果的不同。

目前, 模糊综合评判方法权向量 $W^{(k)}$ 和映射矩阵 $R^{(k)}$ 的确定可采用人为给定的经验法和频数统计法以及最优化法等, 我们通过研究提出综合采用人为给定的经验法、频数统计法和最优化法来确定 $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$, 通过后面的应用表明, 如果能合理选择一定数量的学习样本, 即可得到合理的 $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$; 灰色聚类法是根据 $\lambda = (\lambda_{ji})_{m \times n}$ 矩阵和偏爱函数 (白化函数) 确定权向量 $W^{(k)}$ 和映射矩阵 $R^{(k)}$, 其主要困难是目前无实用的确定 $\lambda = (\lambda_{ji})_{m \times n}$ 矩阵和偏爱函数的方法; 灰色关联度法给出了较明确的 $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$ 计算公式 (例如, 采用平均值法计算关联度的计算公式 6-8 等), 但对学习样本依赖性太强。从权向量 $W^{(k)}$ 和映射矩阵 $R^{(k)}$ 的确定这方面上讲, 灰色关联度法的计算相对简单些, 便于实际应用。

总之, 权向量 $W^{(k)}$ 和映射矩阵 $R^{(k)}$ 的确定方法主要有两类: 经验公式法和根据已知学习样本来确定。但最好是综合应用这两类方法来确定 $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$ 。

6.3.3 评判向量 $B^{(k)}$ 的计算方法

模糊综合评判方法为综合评判向量 $B^{(1)} = W^{(1)} \cdot R^{(1)}$ 的计算提供了多种算法, 例如可采用乘积算法、取小取大算法、乘积-取大算法等, 而后两种方法 $B^{(k)}$ 的计算仅采用了乘积算法。因此, 模糊综合评判与后两种综合评判方法相比较, 关于 $B^{(k)}$ 的计算提供了相对多种算法, 给使用者提供了更大的灵活性, 因此具有一定的

普遍性和较好的适应性。例如，如果令 $W^{(1)} = W^{(2)} = (\frac{1}{n})$, $R^{(1)} = R^{(2)}$ 并且 $B^{(k)}$ 的计算采用乘积算法，则有 $b_j^{(1)} = b_j^{(2)}$ $j = 1, 2, \dots, m$ $B^{(1)} = B^{(2)}$ ，模糊综合评判可与灰色关联度法等价；如果令 $W^{(1)} = W^{(3)}$, $R^{(1)} = R^{(3)}$ 并且 $B^{(k)}$ 的计算采用乘积算法，则有 $b_j^{(1)} = b_j^{(3)}$ $j = 1, 2, \dots, m$ $B^{(1)} = B^{(3)}$ ，模糊综合评判可与灰色聚类法等价。从这方面上讲，灰色关联度法和灰色聚类法应是模糊综合评判的两种特殊情况。

6.4 应用效果综合分析

为了说明上述模糊综合评判法、灰色关联度法和灰色聚类法三种综合评判方法的实际应用效果，本节仍以前面介绍过的我国华北柳林煤层气试验区 4 口井 (ML1、LU2、ML4、ML6) 的测井多参数煤层气识别应用为例进行讨论。其测井曲线见第 2 章图 2-1 ~ 图 2-4 第 9 章图 9-6 和图 9-7 所示。其中方法应用条件为，选择表 5-3 为综合评判的学习样本；用于识别的测井参数分别为 $\rho_b, N_{GR}, V_{SP}, \rho_{LLD}(\rho_T), \rho_{LLS}(\rho_{XO}), \Delta t$ ，在煤层识别的基础上（使用密度测井识别煤层，煤层代号 :0），所选三种识别类型为：Ⅰ（代号 :11）、Ⅱ（代号 :12）和 Ⅲ（代号 :13）；确定 $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$ 的方法，模糊综合评判采用人为给定的经验法、频数统计法和最优化法综合确定 $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$ ；灰色关联度法利用计算公式 6-8 计算；灰色聚类法首先利用已知学习样本和经验公式确定灰色决策矩阵 Θ 和偏爱函数，再根据灰色决策矩阵和标定聚类权系数的关系，确定标定聚类权系数矩阵。三种综合评判方法的实际应用效果见表 6-1、表 6-2、表 6-3 和表 6-4 通过与已知测试结果（见第 5 章表 5-1 和表 5-2）对比发现，模糊综合评判法和灰色关联度法应用效果相对较好（误判率较小）。

总之，基于前面的理论对比分析和我国华北地区柳林煤层气试验区 4 口井的测井多参数煤层气识别应用效果表明，模糊综合评判方法在已知一定量学习样本条件下（对于勘探后期或开发期

表 6-1 华北柳林煤层气试验区 ML1 井煤层气层识别结果数据表

层序号	顶深 /m	底深 /m	模糊综合评判 识别结果	灰色关联度 识别结果	灰色聚类 识别结果
1	0.000	327.500	0	0	0
2	327.500	328.875	11	11	11
3	328.875	339.000	0	0	0
4	339.000	340.125	13	13	13
5	340.125	348.625	0	0	0
6	348.625	351.625	11	11	12
7	351.625	357.750	0	0	0
8	357.750	359.750	12	12	12
9	359.750	408.125	0	0	0
10	408.125	412.125	12	12	12
11	412.125	453.250	0	0	0
12	453.250	460.000	13	13	13

表 6-2 华北柳林煤层气试验区 LU2 井煤层气层识别结果数据表

层序号	顶深 /m	底深 /m	模糊综合评判 识别结果	灰色关联度 识别结果	灰色聚类 识别结果
1	26.000	330.000	0	0	0
2	330.000	331.250	11	11	11
3	331.250	345.375	0	0	0
4	345.375	346.875	13	13	13
5	346.875	351.125	0	0	0
6	351.125	353.875	11	11	11
7	353.875	360.250	0	0	0
8	360.250	362.500	13	13	12
9	362.500	408.125	0	0	0
10	408.125	411.875	11	11	11
11	411.875	475.000	0	0	0

表 6-3 华北柳林煤层气试验区 ML4 井煤层气层识别结果数据表

层序号	顶深 /m	底深 /m	模糊综合评判 识别结果	灰色关联度 识别结果	灰色聚类 识别结果
1	16.000	339.875	0	0	0
2	339.875	341.375	13	13	13
3	341.375	347.625	0	0	0
4	347.625	349.250	13	12	13
5	349.250	394.375	0	0	0
6	394.375	398.250	13	13	12
7	398.250	410.000	0	0	0

表 6-4 华北柳林煤层气试验区 ML6 井煤层气层识别结果数据表

层序号	顶深 /m	底深 /m	模糊综合评判 识别结果	灰色关联度 识别结果	灰色聚类 识别结果
1	15.000	327.250	0	0	0
2	327.250	328.750	11	11	11
3	328.750	338.375	0	0	0
4	338.375	339.500	11	11	12
5	339.500	349.625	0	0	0
6	349.625	352.125	11	11	11
7	352.125	358.250	0	0	0
8	358.250	360.625	11	11	12
9	360.625	376.875	0	0	0
10	376.875	378.000	11	11	11
11	378.000	404.125	0	0	0
12	404.125	408.000	11	12	11
13	408.000	446.500	0	0	0
14	446.500	454.000	11	11	11

煤层气田，一般可满足此条件），并且采用合理的确定 $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$ 方法，一般可取得较好应用效果，反之（例如，对于勘探早期的煤层气识别，有时难以满足此条件），最好采用其他综合评判方法；灰色关联度法在正确选择母序列（评价标准序列）条件下，一般可取得较好应用效果，并且可应用于不具备已知大量学习样本的条件，反之，如果没有正确选择母序列（评价标准序列），一般难于取得较好应用效果；关于灰色聚类法，由于确定 $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$ 取决于灰色决策矩阵 $\Theta = (\theta_{ji})_{m \times n}$ 和偏爱（白化）函数矩阵 $R^{(3)} = (r_{ij}^{(3)})_{n \times m}$ 的确定而确定 $\Theta = (\theta_{ji})_{m \times n}$ 和 $R^{(3)} = (r_{ij}^{(3)})_{n \times m}$ 目前还没有较实用有效的方法，因此给实际应用此方法造成很大困难。总之，应根据具体情况，正确选择综合评判方法，才能取得较好的综合评判应用效果。

模糊综合评判方法和灰色综合评判方法是两类重要的测井多参数综合评判方法，理论和实践都证明，它们可以有效地解决煤层气储层综合评判等识别问题，关键是能够正确合理地应用它们。通过上面的讨论分析，我们可以得出如下几点结论：

(1)根据模式识别方法理论可知,模糊综合评判方法和灰色综合评判方法是两类有教师指导的模式识别方法,其评判数学模型的建立主要依据已知学习样本,因此其评判结果很大程度上依赖于已知学习样本的选择,利用特定地区的学习样本所建立的评判模型不能无限定的推广应用。由此看来,学习样本的选择是成功应用方法的关键。此外还有权向量 $W^{(k)}$ 和映射矩阵 $R^{(k)}$ 的确定和 $B^{(k)}$ 的计算,这些也是方法应用的困难所在。

(2)通过对比它们的数学模型可以看出,模糊综合评判方法和灰色综合评判方法有很大的相似性,如果采用相同的权向量 $W^{(k)}$ 和映射矩阵 $R^{(k)}$ 的确定方法,其评判结果应相同;但是由于它们采用了不同的权向量 $W^{(k)}$ 和映射矩阵 $R^{(k)}$ 的确定方法,必然会造成它们综合评判结果的不同。

(3)关于权向量 $W^{(k)}$ 和映射矩阵 $R^{(k)}$ 的确定方法,我们认为主要有两类:经验公式法和根据已知学习样本来确定,两者各有千秋,因此一般是综合利用这两种方法来确定 $W^{(k)}$ 和 $R^{(k)}$ 。

(4)将模糊综合评判方法和灰色综合评判方法与后面讨论的回归分析和BP神经网络方法对比不难看出,它们之间也有某些相似性,即都可用于解决有教师指导的模式识别问题。

(5)通过我国华北地区柳林煤层气试验区4口井(ML1、LU2、ML4、ML6)的测井多参数煤层气识别应用表明,模糊综合评判方法和灰色关联度方法在煤层气储层识别中取得了相对较好的应用效果。

参 考 文 献

- 1 张俊福,邓本让,朱玉仙等.应用模糊数学.北京:地质出版社,1988
- 2 邓聚龙.灰色系统理论教程.武汉:华中理工大学出版社,1990
- 3 侯俊胜,黄智辉,汪嘉联关于测井多参数模糊综合评判和灰色综合评判的对比分析.测井技术,2000,24(1):31~35
- 4 肖慈旬,姜建立,谭世君神经网络技术用于测井解释的评述测井技术,1999,23(5):389~392

- 5 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释.东营:石油大学出版社,1996,590
- 6 潘和平,黄智辉利用模糊模式识别煤成气层.地球科学,1993,18(1):84~94
- 7 周志勇.测井资料岩性识别方法研究.中国地质大学(北京)硕士学位论文.1996
- 8 丁次乾主编.矿场地球物理.东营:石油大学出版社,1992.377
- 9 潘和平,黄智辉.灰关联聚类法及其在测井中的应用.物探与化探,1998,22(1):34~42
- 10 宋子齐 谭成仟著.灰色理论油气储层评价.北京:石油工业出版社,1995.166

第7章 基于自组织神经网络的煤层气储层测井评价方法

7.1 引言

神经网络系统的主要特点之一就是它具有学习能力。BP神经网络（后面第9章将讨论）是一种典型的有教师（监督）学习前向多层神经网络模型，该网络在一定条件下，可以取得较好的识别应用效果。有关在识别方面BP神经网络及其他各种前向多层神经网络还存在如下一些问题：

(1)这种网络模型只适用于平稳的环境。这就是说，在以此环境为模型的世界中，各种客体、客体间的关系，以及相应的观察矢量具有统计平稳性，它们的各项统计特征不会随时间而变化，但是，真实的世界不是或者不完全是这样的。

(2)这种网络的学习是在教师指导下的有监督学习，它不能“自学”。另一方面，神经网络的学习状态与工作状态是截然分开的，它不能边学习边工作。

(3)学习过程中神经网络的所有权系数都要调整，而且为了防止振荡现象出现，学习步长必须取为较小的数值，尤其是在接近于最优解时步长必须相当小，这就必然造成学习速度非常缓慢。当采用计算机进行实际资料处理时，计算开销与计算时间都存在严重问题，尤其是对于大数据量问题更为严重。

(4)在完成分类功能时如果被区分的客体类别数超出了神经网络可区分的最大极限，而学习仍按原来方式进行，那么根本不可能给出正确的学习结果。如果因避免这种情况出现而大量压缩客体的类别数，又会使神经网络的容量不能得到充分利用。

(5)BP神经网络由于采用的是最优化方法的最速下降法，因而极有可能陷入均方误差的局部极小点，从而造成错误的分类

结果。

(6)误差准则是固定的，不能随着环境的变化而进行相应的调整或改变。

为了克服上述 BP 网络模型存在的不足，人们提出了自组织神经网络模型。所谓自组织神经网络的识别（分类），就是在没有已知样本的情况下直接对未知样本进行分析，根据样本的分布或者它们之间的相互关系自动完成分类，有时也称为异常聚类分析，即无教师指导学习的无监督模式识别。由于神经网络具有较好的识别能力，为此将它们应用于煤层气储层测井评价。

目前，人们已提出了许多自组织神经网络模型，它主要包括如下一些神经网络：

- (1) 自适应共振理论 Adaptive Resonance Theory 简称 ART)；
- (2) 自组织特征映射 Self-Organizing Maps 简称 SOM)；
- (3) CPN 模型 (Counter Propagation Network 简称 CPN)；
- (4) 认识机 (包括神经认识机)

其中 ART 模型及其改进的有关模型应用较为广泛。为此，我们下面仅讨论 ART 模型。首先，讨论 ART 模型及其存在的问题，然后讨论基于 ART 改进的自组织神经网络及其煤层气储层测井评价应用等有关问题。

7.2 自组织神经网络

7.2.1 ART 模型及其存在的问题

ART 模型是由美国波士顿 (Boston) 大学的格如史博阁 (Grossberg) 等提出的。格如史博阁等一直潜心于研究用数学描述人的心理和认识活动，试图为人类的心理和认识活动建立一个统一的数学理论。ART 就是由这一理论的核心部分经过不断发展而形成的。ART 其实质是以竞争学习和自稳机制为原则建立的。这一理论包括了 ART1、ART2 和 ART3 3 种模型，可以对任意多和任意复杂的二维模式进行自组织、自稳定和大规模并行处理。前者用于二进制输入，后两者可用于连续信号输入。目前主要应用于模式

识别，如雷达和声纳的信号识别等。

本节以 ART1 模型为例，讨论该网络的拓扑结构，学习算法及其存在的问题。ART1 网络模型是一种无教师指导的学习模型，即不需要人去告诉机器每个样本属于哪一类，它便可以把类似样本归为一类。其基本的网络结构如图 7-1 所示。这是一个两层网络，下层为输入层，其神经元个数就等于输入样本的特征个数；上层为输出层，其输出层神经元个数呈动态变化，开始时设置为 1 个，网络运行结束时，神经元个数就等于分类总数。例如，假若样本数据最终被分成七类，那么输出层就有 7 个神经元。其中下层神经元之间的连线有两条，从上至下的为 t_{ij} ，反之，从下至上的为 b_{ij} 。并且输出层神经元之间也有连线，这就是所谓神经元的“侧抑制”作用，即神经元总是使自己有最大输出，而使周围输出层神经元输出达到最小。

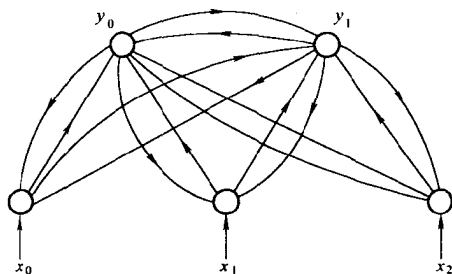


图 7-1 ART1 自组织神经网络结构

ART1 网络的基本学习算法可归纳如下：

(1) 连结权的初始化。

$$t_{ij}(0) = 1, \quad b_{ij}(0) = \frac{1}{N+1} \quad (7-1)$$

$$i = 0, 1, \dots, N-1; j = 0, 1, \dots, M-1.$$

其中 M 与 N 分别为输出层与输入层神经元的个数， $b_{ij}(t)$ 和 $t_{ij}(t)$ 分别为输入节点（神经元） i 和输出节点（神经元） j 之间（时间 t ）的由底向上和由上向下的连结权系数。

(2) 给定一个新输入样本 $x = |x_i|$ 。其中 x_i 只能取 0 或 1。

(3) 计算匹配度。即由下往上计算上层节点的输出值：

$$\mu_j = \sum_{i=0}^{N-1} b_{ij} \cdot x_i \quad (7-2)$$

$$j = 0, 1, \dots, M-1$$

其中 μ_j 是输出节点 j 的输出, x_i 是输入节点 i 的输入 取值为 0 或者 1。

(4) 选择一个最佳匹配样本, 即找出上层节点中具有最大输入值的节点 j

$$\mu_j^* = \max_{0 \leq j \leq M-1} \{ \mu_j \}$$

这可以通过输出节点的扩展抑制权达到。

(5) 警戒线检验 即验证 x 是否属于第 j 类。

$$\|x\| = \sum_{i=0}^{N-1} |x_i| \quad (7-3)$$

$$\|T \cdot x\| = \sum_{i=0}^{N-1} t_{ij} \cdot x_i \quad (7-4)$$

$$\|T \cdot x\| / \|x\| \geq \delta?$$

如果大于等于 δ 转向 (7), 否则 转向 (6)。其中 δ 为警戒线 (或称阈值 $0 \leq \delta \leq 1$) , 它表示两个样本相距多大才被认为是匹配的, 常称 δ 为警戒参数。

(6) 重新匹配, 把最佳匹配暂置为零, 不参加比较, 转向 (3) 去开始做另一个聚类中心。

(7) 调整网络的权系数

$$t_{ij}^*(t+1) = t_{ij}^* \cdot x_i \quad (7-5)$$

$$b_{ij}^*(t+1) = t_{ij}^*(t) \cdot x_i / (0.5 + \sum_{i=0}^{N-1} t_{ij}^*(t) \cdot x_i) \quad (7-6)$$

其中 t_{ij}^* 与 b_{ij}^* 为第 j 个输出节点所对应的从上到下和从下到上的连结权系数。

(8) 转向 (2) (首先把 (6) 中节点置为零的限制去掉)。

分析上述迭代算法不难看出, 该算法可以实现对输入为二值化特征向量 x (例如取 0 与 1 或者 ± 1) 的快速自动分类。并且是

边学习边工作，输出节点中每次最多有一个 1，且仅对该节点对应的连结权值进行调整，其他点所对应的权不变化。每个输出节点可以看成一类相近样本的代表或者概念。

连结权值 $\{b_{ij}\}$ 与 $\{t_{ij}\}$ 本质上都相当于 j 类的典型样本，但它们在网络中的功能不同。在所有各聚类的学习完毕之后， $\{b_{ij}\}$ 的功能是判断与输入 x 最相似的典型样本，但这一点并不能保证该输入一定属于这个典型样本所代表的类别，还需要验证，这就是从上而下的权值 $\{t_{ij}\}$ 的功能。

$\sum_{i=0}^{N-1} t_{ij} \cdot x_i$ 本质上是 x 与第 j 类典型样本间特征元素匹配的个数，而 $\sum_{i=0}^{N-1} |x_i|$ 是输入样本的特征元素总数。因此， $\sum_{i=0}^{N-1} t_{ij} \cdot x_i / \sum_{i=0}^{N-1} |x_i|$ 总是小于或者等于 1 它度量了 x 与期望值的相似程度。

由上面的讨论可知，一个输入节点从上到下的所有权对应于一个模式，当输入样本距一个这样的模式较近时，代表它的输出节点才响应。通过调节警戒参数 δ 的大小即可调整模式的类别总数。如果 δ 取值较大，这就是说，要求输入模式与典型样本间的相似程度较高，该网络分类器将使输入模式分成较多的类别。反之如果 δ 取值较小，则允许每一类中的散度较大，同样的输入模式就会被分成较少的类别。

此外，这种网络还可以给我们这样的启示，模式的概念用神经网络是怎样表达的，是怎样通过自组织方法产生的。这些过程对应于心理学中从表象到概念和从概念到表象的相互作用过程。

该网络虽然可以实现输入模式快速自动分类，但要求输入模式为二值化向量。ART2 与 ART3 虽然可以对任意形式输入模式进行自动分类，但是由于网络结构相对复杂化，其计算速度很难与 ART1 相媲美。为此有人基于 ART1 模型提出了一种可用于连续变量自动分类的神经网络，即包氏神经网络模型，下一节就讨论该网络模型。

7.2.2 包氏神经网络

该类神经网络是美国学者包约翰 (Yoh-Han Pao) 等人提出的。

其网络的基本结构与 ART1 模型基本相同。由于输入模式的各分量为连续量, 则相似性计算 (例如式 7-2、式 7-3 和式 7-4) 就应有所不同。也就是说, 如果 $\{b_{ij}\}$ 仍然表示第 j 类典型样本 (聚类中心), 则 $\sum_{i=0}^{N-1} b_{ij} \cdot x_i$ 不再一定是 x 与该典型样本的相似性的最佳度量。同样, 这时的 $\{b_{ij}\}$ 的初值选择与修正算法也需要作相应的修改。根据 ART1, 我们不难总结出包氏网络的学习算法。其基本学习算法可归纳如下:

(1) 连结权系数的初始化。

令样本集的第一个输入模式 x_0 等于连结权系数 b_{ij} 即

$$b_{ij}(0) = x_{0i} \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

其中 b_{ij} 为上下层连结权系数, $x_0 = (x_{00}, x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0N-1})^T$ 。

(2) 给定一个新输入样本, $x_p = \{x_{pi}\} \quad i = 0, 1, \dots, N-1; p = 1, 2, \dots, M_2-1, x_{pi}$ 为连续变量, M_2-1 为输入样本 (模式) 总数。

(3) 计算相似度, 即计算输入模式与连结权系数 b_{ij} 之间的欧氏距离 即

$$D_{ji} = \sum (b_{ij} - x_{pi})^2$$

$$j = 1, 2, \dots, J; i = 1, 2, \dots, N$$

其中 D_{ji} 为欧氏距离, 它表示权值与输入向量的接近程度, 确定了模式与典型样本 (聚类中心) 之间的距离。 J 为输出节点个数; N 为输入向量的维数, 即输入层神经元的个数 (节点数)。

(4) 选择一个最佳匹配样本, 即找出上层节点中具有最小输出值的节点 j 即

$$D_{ji}^* = \min_{1 \leq j \leq J} \{D_{ji}\} \quad (7-7)$$

(5) 警戒线检查, 即验证该输入模式是否属于第 j 类。

如果 $D_{ji}^* \leq \delta$ 转向 (7) 否则, $D_{ji}^* > \delta$ 转向 (6)。其中 $\delta \geq 0$ 。

(6) 重新匹配, 即将该输入模式作为一个新的聚类中心, 并转向 (3)。

(7) 调整网络的权系数

$$b_{ij}^*(t+1) = \frac{n}{n+1} \cdot b_{ij}^*(t) + \frac{1}{n+1} \cdot x_{pi} \quad (7-8)$$

其中 b_j 为第 j 个输出节点所对应的连结权系数, n 个为当前输出层神经元个数。

(8) 转向(2)。

分析上述迭代算法不难看出, 该算法即可实现对输入模式为连续变量的快速自动分类, 并且也是边学习边工作。连结权 $\{b_{ij}\}$ 即相当于第 j 类的聚类中心。此外, 我们可以将模式样本看做是 N 维特征空间中的点。因此, 有理由认为, 类别相同或者某些特征相似的模式在 N 维空间中也比较靠近。例如, 同属 j 类的模式就应该靠得较近。因此, 我们就可以用 N 维空间的距离 (例如, 欧氏距离) 来衡量它们之间的近似程度。同属 j 类的样本与其中心之间距离应该小于与另一聚类中心之间距离。因此用上述欧氏距离代替前面的相似性变量是合适的。此外, 分析权系数修正公式不难看出, 权系数的变化, 实质上就是对应聚类中心坐标的变化。

根据上述迭代算法, 利用 C 程序语言已编制了计算机程序, 并且在 PC 微机上调试通过, 下面我们就讨论利用该网络进行合成数据与实际资料数据分类的结果。

7.3 自组织神经网络的应用

7.3.1 方法应用的基本计算步骤

根据自组织神经网络方法的基本原理, 该方法的应用应包括如下几个基本步骤:

(1) 输入用于分类的有关参数。例如, (从键盘或文件中) 输入样本总数 M , 每一个样本所包含的特征个数 N 警戒参数 δ 等。

(2) 输入用于分类的测井数据, 并对原始测井数据作必要的预处理 (例如数据归一化处理, 消除误差干扰处理等)。

(3) 利用包氏网络的迭代算法进行数据的自动分类。

(4) 输出并打印 (例如用图或表表示) 分类结果。

7.3.2 合成数据的自动分类

为了检验该网络用于数据自动分类的有效性, 我们对表 7-1 所示的合成数据样本进行了分类计算。其中输入样本总数 $M =$

8 每一个输入样本的特征个数 $N = 7$, 警戒参数 $\delta = 3.0$ 分类结果见表 7-2 所示(注:表中 Node 代表分类编号, Count 代表每一类所包含的样本总数;PN 代表每一类所包含的样本, 没有特殊说明, 以下各表意义与此相同), 该数据样本共分为三个类别, 其中第 0 类有 3 个样本 分别为 0,1,2 第 1 类有 3 个样本 包含 3,4,5;第 2 类有 2 个样本 包含 6,7。通过分析表 7-1 数据分布特征不难看出, 上述分类是合理的。

表 7-1 合成数据样本集

样本 编号	样本数据						
	第 1 个特征	第 2 个特征	第 3 个特征	第 4 个特征	第 5 个特征	第 6 个特征	第 7 个特征
0	0	1	2	3	4	5	6
1	0	1	2	3	4	5	5
2	0	1	2	3	4	4	4
3	6	5	4	3	2	1	0
4	6	5	4	3	2	1	0
5	6	5	4	3	2	2	2
6	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0

表 7-2 合成数据的自动分类结果

Node	Count	PN		
0	3	0	1	2
1	3	3	4	5
2	2	6	7	

7.3.3 实际测井资料的自动分类

为了检验包氏神经网络用于实际测井资料自动分类的能力, 我们利用表 7-3 的煤田测井数据进行煤储层分类(蔡煜东等, 1994)。其中输入样本总数 $M = 8$ (即输出层神经元最大个数等于 8), 每一个测井样本数据包括视电阻率 $\rho_a, \Omega \cdot m$ 、自然伽马 N_{GR} 和煤层厚度 (D, m) 即特征个数 $N = 3$ (输入层神经元个数为 3 个)警戒参数 $\delta = 50$ 分类结果见表 7-3 所示(为了便于对比, 我们在此也将 BP 网络分类结果一同给出)。将样本共分为两类(即 0

类与 1 类)，除极个别(3 号、11 号样本)之外，两个分类结果基本一致，两者吻合率为 90%。

表 7-3 测井数据及煤层分类结果

煤层 层号	D /m	ρ_a / $\Omega \cdot m$	N_{GR} /API	BP 网络 分类结果	包氏网络 分类结果	备注
0	1.39	137.5	10.0	0	0	
1	1.14	90.5	9.5	0	0	
2	0.70	63.9	10.4	1	1	
3	1.02	98.4	14.8	1	0	不一致
4	0.67	86.9	21.6	1	1	
5	1.34	105.6	10.0	0	0	
6	1.92	123.5	9.6	0	0	
7	1.65	126.5	9.5	0	0	
8	0.77	100.5	12.6	1	1	
9	0.68	88.0	15.0	1	1	
10	1.33	155.5	10.5	0	0	
11	0.80	101.0	11.2	1	0	不一致
12	0.79	67.0	18.6	1	1	
13	1.02	125.5	9.3	0	0	
14	1.58	143.0	10.8	0	0	
15	1.66	156.2	10.9	0	0	
16	0.61	94.0	16.2	1	1	
17	0.72	93.0	12.3	1	1	
18	0.84	72.0	12.3	1	1	
19	1.27	139.0	9.3	0	0	

7.4 问题讨论

7.4.1 警戒参数大小对网络分类结果的影响

通过分析上述算法不难看出，警戒参数 δ 的不同，必然要导致网络分类结果的不同。为了探讨 δ 对网络分类的影响。以表 7-1 为例分别选取 $\delta = 0.5, 2.0, 8.0$ 和 10.0 ，其他计算条件与上面相同，进行了网络分类计算，其计算结果见表 7-4 ~ 表 7-7 所示。分析分类结果可以看出，随着 δ 值的不断增大，分类数不断降低，即分类结果变粗。并且当 $\delta \leq 0.5$ 之后，分类数等于 8 保持不变，即最大分类数等于输入样本总数 M ；当 $\delta \geq 10$ 之后，分类数保持

为 1 不变, 即网络的最粗分类数就是将所有输入样本归为一类。因此, 在实际应用时, 假若我们希望得到较详细的分类, 可以取较小的 δ 值; 反之, 假若我们希望得到粗略的分类, 可以取较大的 δ 值, 在具体计算时, 可以先取较大的 δ 值, 得到较粗的分类, 然后再逐渐降低 δ 值, 得到最后较理想的分类结果。

表 7-4 警戒参数 $\delta = 0.5$ 的分类结果

Node	Count	PN
0	1	0
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	1	4
5	1	5
6	1	6
7	1	7

表 7-5 警戒参数 $\delta = 2.0$ 的分类结果

Node	Count	PN
0	3	0 1 2
1	3	3 4 5
2	1	6
3	1	7

表 7-6 警戒参数 $\delta = 8.0$ 的分类结果

Node	Count	PN
0	5	0 1 2 6 7
1	3	3 4 5

表 7-7 警戒参数 $\delta = 10.0$ 的分类结果

Node	Count	PN
0	8	0 1 2 3 4 5 6 7

7.4.2 原始数据的归一化

由于每一样本所包含的每一特征量的单位、量级和数值变化

范围的差异可能很大，计算中往往会突出绝对值较大的特征量。因此，在分类之前先将原始数据的各个特征量变换为量度一致的相对数据，通常有两种方法，一种叫标准化，一种叫正规化。

标准化即将数据变为均值为零及标准差为 1 的变量，其计算公式为

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7-9)$$

其中 $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_{ij}$, $\sigma_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$, m 是样本特征总数, n 是样本总数。

正规化即是将数据变为 0 到 1 区间的数据。其计算公式为

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}^{(j)}}{x_{\max}^{(j)} - x_{\min}^{(j)}} \quad (7-10)$$

其中 $x_{\max}^{(j)}$ 与 $x_{\min}^{(j)}$ 分别为第 j 个特征量的最大值与最小值。

由此可以看出，无论是标准化或者是正规化，每个特征量内部的相对关系并未变化，只是使特征量处于同一数量级。

7.4.3 相似度计算方法的选择

除上述已给出的用欧氏距离来衡量样本与典型样本（即聚类中心）之间的相似程度之外，还可采用如下一些方法来计算：马氏距离 Mahalanobi 距离）相似系数 相关系数。

7.4.4 模糊自组织神经网络

对于实际资料的分类，有时很难简单地将某一样本划分为某一类或不属于某一类。例如，对于某些样本刚好位于两类边界线的边缘附近，假若我们能用某一样本属于某一类的概率表示，似乎更为合理，即用模糊神经网络来分类，可能更为接近实际情况。

7.4.5 其他问题

自组织神经网络与 BP 神经网络相比，在定性识别方面，克服了 BP 神经网络存在的不足，因而前者具有如下一些特点：

(1) 它能对任何输入观测矢量进行实时学习，这就是说，学习与工作是分不开的。这种学习保证能够达到稳定、可靠的结果，直

至记忆容量全部用完为止。

(2)学习是自治和自组织的,学习过程无需教师指导,因此它能用于无已知样本或者具有较少已知样本难以构成训练样本集情况下的异常分类。

(3)由于加权系数的调整只涉及少量系数,因而较 BP 网络具有更高的学习效率(后者需要调整所有加权系数)。

(4)此网络可以完全避免陷入局部极小点的问题。

此外,该网络方法与传统的聚类分析方法中的 K-均值方法以及迭代自组织与分析算法(ISODATA)等(动态)聚类方法相比也有很大的优越性。传统的方法大都是基于一定的对数据分布情况的假设来设计的。当假设不满足时便难以取得较好的效果。而且,当对数据分布情况经验知识比较少时,聚类结果具有一定的随意性。然而神经网络方法并没有这些限制,因此,非常适合分析实际物探异常的变化规律和解释。

参 考 文 献

- 1 包约翰著.自适应模式识别与神经网络.马颂德等译.北京:科学出版社,1992
- 2 焦李成著.神经网络系统理论.西安:西安电子科技大学出版社,1992.284
- 3 侯俊胜,尉中良.自组织神经网络在测井资料解释中的应用.测井技术,1996,20(3):197~200
- 4 侯俊胜,王颖.神经网络方法在煤层气测井资料解释中的应用.地质与勘探,1999,35(3):41~45
- 5 侯俊胜.基于神经网络与随机优化的物探数据解释方法研究.中国地质大学博士后研究报告,1995
- 6 王颖.煤层气储层测井资料评价方法的应用研究.中国地质大学(北京)学士学位毕业论文,1997
- 7 蔡煜东等.人工神经网络在煤层对比判别中的应用.煤田地质与勘探,1994,22(1):22~24
- 8 雍世和,张超谟.测井数据处理与综合解释.东营:石油大学出版社,1996.

- 9 潘和平, 黄智辉. 利用模糊模式识别煤成气层. 地球科学, 1993, 18(1): 84 ~ 94
- 10 侯俊胜 尉中良. 煤层气储层评价的地球物理测井方法. 中国地球物理学学会年刊, 1997: 5
- 11 肖慈旬 姜建立 谭世君. 神经网络技术用于测井解释的评述测井技术, 1999, 23(5): 389 ~ 392
- 12 杨行峻 郑君里. 人工神经网络. 北京: 高等教育出版社, 1992. 404 页
- 13 杨文采等. 神经网络技术及其在物化探上的应用. 物探化探计算技术, 1994, 16(4): 303 ~ 307

第 8 章 利用测井信息和兰氏方程计算煤层气储层评价参数

8.1 前 言

由前面几章的讨论可知，利用测井资料进行煤层气储层评价可以分为煤层气储层的定性识别、煤层气储层参数的定量解释以及煤层气储层的综合评价分析等。其中煤层气储层参数定量解释是目前测井应用研究的核心。关于煤层气储层参数的定量解释（计算），目前利用测井资料可以确定的煤层气储层参数内容主要包括如下几个方面：

- (1) 煤层厚度和深度等。
- (2) 煤质成分参数指煤的固定碳、挥发分、灰分、水分等；
- (3) 煤层气储层的含气量、孔隙度和渗透率以及岩石力学参数；
- (4) 煤层气的吸附 / 解吸特性参数；
- (5) 其他 例如煤阶等。

其中，煤层气储层的含气量和煤质成分参数计算是当前利用测井信息进行煤层气储层参数定量解释的重要研究内容。利用测井信息计算储层的含气量和煤质成分参数主要采用的方法包括回归分析和测井体积模型以及神经网络方法（见第 9 章）等。本章将讨论综合利用这两种办法来计算煤层气储层的含气量和煤质成分参数等。

8.2 利用测井资料与兰氏方程计算煤质和煤层气含量

8.2.1 煤储层体积模型

为了利用地球物理测井信息计算煤质成分，必须建立计算煤质成分的测井解释模型。下面就利用煤储层（煤层）的体积模型来

建立煤质成分计算的解释模型。根据地球物理测井体积模型的基本思想，为了建立煤层体积模型，就必须将复杂的煤储层的组成成分予以简化，认为它是由几种主要的物性差异较大的均匀成分组成，并按各部分的相对体积大小组成模型。

在建立体积模型时，总是沿着井轴方向截取一个边长为 $L = 1$ 体积为 $V = 1$ 的单位岩石立方体来作等效分析。对于煤层来说，其组成成分是复杂的，如果忽略相对体积小于 1% 的成分（如二氧化矽、硝酸盐、菱铁矿、硫以及一些稀散元素等），那么可以把煤层粗略地看成是由碳、灰和水三部分所组成。灰分包括泥质和矿物杂质，碳包括固定碳和挥发分，水分包括内在水分和外在水分 这样 即可得如图 8-1 所示的煤储层体积模型。如果要使煤的体积模型更加接近原生状态下的煤层，也可以把煤看成是有纯煤、湿灰分和水分组成。纯煤包括固定碳和煤的挥发分，湿灰分包括泥质、矿物杂质以及它们在原生状态下所包含的水分和非煤的挥发物，水分是指充满颗粒间隙中的水。这样的体积模型可简化成如图 8-2 所示。

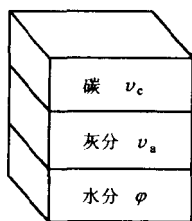


图 8-1 煤储层体积模型(A)

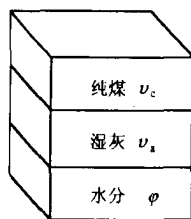


图 8-2 煤储层体积模型(B)

由图 8-1和图 8-2 可得如下关系式

$$v_c + v_a + \varphi = 1 \quad (8-1)$$

$$l_c + l_a + l_\varphi = 1 \quad (8-2)$$

其中 v_c 、 v_a 和 φ 分别为碳、灰、水的体积百分含量。

利用上述煤层体积模型，即可确定密度 ρ_b 、声波时差 Δt 、中子 (C_{NL}) 等测井参数与碳、灰、水的体积百分含量的响应方程。为了求解 v_c 、 v_a 和 φ ，可归结为解如下线性方程：

$$\begin{aligned}x_{\log} &= v_c x_c + v_a x_a + \varphi x_\varphi \\v_c + v_a + \varphi &= 1\end{aligned}\quad (8-3A)$$

其中 x_{\log} 为测井参数， x_c 、 x_a 、 x_φ 分别为碳、灰、水的测井参数。

如果令 x_{\log} 分别为声波时差、密度、中子、自然伽马 (N_{GR})、电阻率 (R_T) 或电导率 C_i 等测井参数，则由式 8-3A 可得如下响应方程，即

$$\begin{aligned}\Delta t &= v_c \Delta t_c + v_a \Delta t_a + \varphi \Delta t_\varphi \\ \rho_b &= v_c \rho_c + v_a \rho_a + \varphi \rho_\varphi \\ C_{NL} &= v_c C_{NLc} + v_a C_{NL a} + \varphi C_{NL \varphi} \\ N_{GR} &= v_c N_{GRc} + v_a N_{GR a} + \varphi N_{GR \varphi} \\ \frac{1}{R_T} &= \frac{v_c}{R_c} + \frac{v_a}{R_a} + \frac{\varphi}{R_\varphi}, \text{ 或 } C_i = v_c C_c + v_a C_a + \varphi C_\varphi\end{aligned}$$

其中 $\Delta t_c, \Delta t_a, \Delta t_\varphi$ 分别为碳、灰、水的声波测井参数； $\rho_c, \rho_a, \rho_\varphi$ 分别为碳、灰、水的密度测井参数； $C_{NLc}, C_{NL a}, C_{NL \varphi}$ 分别为碳、灰、水的中子测井参数； $N_{GRc}, N_{GR a}, N_{GR \varphi}$ 分别为碳、灰、水的自然伽马测井参数； R_c, R_a, R_φ 分别为碳、灰、水的电阻率测井参数， C_c, C_a, C_φ 分别为碳、灰、水的电导率测井参数。

因为需要求 v_c 、 v_a 和 φ ，考虑到物质平衡方程，所以只要任意两种测井资料即可。例如，一般常用声波、密度、中子任意两种，或者采用电阻率与自然伽马曲线。

如果我们用密度、声波两种测井曲线可得到三个方程组成的线性方程组。解这个方程组，可得

$$\begin{aligned}v_c &= A_1 \Delta t + B_1 \rho_b + C_1 \\ v_a &= A_2 \Delta t + B_2 \rho_b + C_2 \\ \varphi &= 1 - v_a - v_c\end{aligned}$$

式中 $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ 是与骨架参数有关的系数。利用碳分、

灰分、水分的密度、声波值，即可求得其值为：

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{\rho_a - \rho_\varphi}{(\Delta t_c - \Delta t_\varphi)(\rho_a - \rho_\varphi) - (\Delta t_a - \Delta t_\varphi)(\rho_c - \rho_\varphi)} \\
 B_1 &= \frac{\Delta t_\varphi - \Delta t_a}{(\Delta t_c - \Delta t_\varphi)(\rho_a - \rho_\varphi) - (\Delta t_a - \Delta t_\varphi)(\rho_c - \rho_\varphi)} \\
 C_1 &= \frac{\Delta t_a \rho_\varphi - \rho_a \Delta t_\varphi}{(\Delta t_c - \Delta t_\varphi)(\rho_a - \rho_\varphi) - (\Delta t_a - \Delta t_\varphi)(\rho_c - \rho_\varphi)} \\
 A_2 &= \frac{\rho_c - \rho_\varphi}{(\Delta t_a - \Delta t_\varphi)(\rho_c - \rho_\varphi) - (\Delta t_c - \Delta t_\varphi)(\rho_a - \rho_\varphi)} \\
 B_2 &= \frac{\Delta t_\varphi - \Delta t_c}{(\Delta t_a - \Delta t_\varphi)(\rho_c - \rho_\varphi) - (\Delta t_c - \Delta t_\varphi)(\rho_a - \rho_\varphi)} \\
 C_2 &= \frac{\Delta t_c \rho_\varphi - \Delta t_\varphi \rho_c}{(\Delta t_a - \Delta t_\varphi)(\rho_c - \rho_\varphi) - (\Delta t_c - \Delta t_\varphi)(\rho_a - \rho_\varphi)}
 \end{aligned}$$

如果将碳细分成固定碳和挥发分，所求参量为四个，则式 8-3A 变为

$$x_{\log} = v_{fc} x_{fc} + v_{vm} x_{vm} + v_a x_a + \varphi x_\varphi \quad (8-3B)$$

$$v_{fc} + v_{vm} + v_a + \varphi = 1$$

其中 v_{fc} , v_{vm} 分别为固定碳和挥发分的体积百分含量， x_{fc} , x_{vm} 分别为固定碳和挥发分的测井参数。这时就至少需用三种测井曲线计算煤质成分。

由前面所求出的 v_c , v_a 和 φ 分别是碳、灰、水的体积百分含量，而煤层气研究中通常还要求用重量百分比来表示这三个参数，因此需要将体积百分比换算成重量百分比。设 w_c , w_a , w_w 分别表示碳、灰、水的重量百分比，则换算公式为

$$w_c = v_c \frac{\rho_c}{\rho_b}, w_a = v_a \frac{\rho_a}{\rho_b}, w_w = \varphi \frac{\rho_\varphi}{\rho_b} \quad (8-4)$$

8.2.2 应用密度测井和回归分析方法计算煤质

根据煤层体积模型，假设煤层是由灰分、水分、固定碳和挥发性物质四部分组成，由 (8-3B) 可得密度测井响应方程为 $\rho_b = v_{fc} \rho_{fc} + v_{vm} \rho_{vm} + v_a \rho_a + \varphi \rho_\varphi$, v_{fc} , v_a , v_{vm} 和 φ 分别是单位体积内固定碳、

灰分、挥发性物质和水分的相对体积 ρ_{fc} 、 ρ_a 、 ρ_{vm} 和 ρ_{φ} 是固定碳、灰分、挥发性物质和水分的密度。

实验研究表明，实验室测试密度与煤岩测井所得密度之间并非一致，而是存在着一定的线性相关关系。例如中国新星石油公司华北石油地质局通过对实验室实测的煤岩密度值与测井的密度值进行交会和线性回归分析，其规律为：

$$\rho_b = A\rho_t + B = 0.531\rho_t + 0.708$$

其中 相关系数 $R = 0.969$ 相对误差 $S = 0.09$ 点数 $n = 26$ 式中 ρ_t 为实验室实测煤岩密度值。

此外，依据辽河盆地东部凹煤芯分析资料得 ρ_b 与 ρ_t 的关系式为

$$\rho_b = 0.349\rho_t + 0.805$$

其次，通过系统的岩芯分析测试研究表明，煤芯的体积密度与含灰量存在线性相关关系，而含灰量又与挥发分、固定碳含量存在线性相关关系，因此，可建立煤芯密度与煤芯各组分（固定碳、挥发分、含灰量）的线性相关关系。因为煤芯密度与测井密度线性相关，因此，测井密度应与煤岩组分存在线性相关关系。例如，华北柳林地区测井密度与固定碳、挥发分、灰分和水分的关系式分别为（李纪森，1999）

(1) 固定碳 v_{fc} ——测井密度 ρ_b 之间关系式。

$$v_{fc} = -76.362\rho_b + 189.481$$

其中，相关系数 $R = -0.8915$ 相对误差 $S = 0.0785$ 。

(2) 挥发分 v_{vm} ——测井密度 ρ_b 之间关系式。

$$v_{vm} = -103.062\rho_b + 167.503$$

其中 相关系数 $R = -0.735$ 相对误差 $S = 0.126$ 。

(3) 灰分 v_a ——测井密度 ρ_b 之间关系式。

$$v_a = 71.900\rho_b - 98.337$$

其中, 相关系数 $R = 0.9457$ 相对误差 $S = 0.118$ 。

(4) 冰分 φ 计算公式。

$$\varphi = 100 - v_{fc} - v_{vm} - v_a$$

由 v_{fc} 、 v_{vm} 计算公式, 得碳含量计算公式为

$$v_c = v_{fc} + v_{vm} = -179.424\rho_b + 356.924$$

分析测井密度与煤岩各组分(固定碳、挥发分、含灰量、含水量)存在的线性相关关系式可知, 测井密度与固定碳、挥发分存在负相关关系 即随着测井密度增大 固定碳、挥发分降低 而测井密度与含灰量存在正相关关系, 即随着测井密度增大, 含灰量也增大。

8.2.3 利用兰氏方程求煤层气含量

将煤质分析结果(含灰量和含水量)和含气量联系起来的方程最常用就是兰氏吸附等温线方程(简称兰氏方程), 即

$$V_s = v_l[1 - (w_a + w_w)] \cdot \left[\frac{bp}{1 + bp} \right] \quad (8-5)$$

式中 V_s ——含气量, m^3/t ;

v_l ——干煤无灰兰氏含气量, m^3/t ;

w_a ——含灰量(重量百分比);

w_w ——含水量(重量百分比);

b ——兰氏常数, m^2/N ;

p ——压力, N/m^2 。

如果假设煤岩芯初始压力和纯煤储层是均匀的, 根据上述兰氏吸附等温线方程, 可将式 8-5 变换成如下方程

$$V_g = G_{cp}[1 - (w_a + w_w)] = G_{cp} \cdot W_c \quad (8-6)$$

式中 V_g ——煤储层原始含气量, 单位同 V_s ;

G_{cp} ——纯煤含气量(干燥无灰分), m^3/t 。

根据上述方程式 8-6 如果已知 G_{cp} 、 w_a 和 w_w 即可计算煤储层含气量 V_g , w_o 和 w_w 可依测井信息求出, G_{cp} 一般应依据研究

区岩芯测试的含气量 V_g 与非煤含量（灰分 + 水分）数据作交会图求取，若无上述煤岩芯测试数据，可取邻区的 G_{cp} 数据或者取 G_{cp} 的经验值。例如，我国辽河油田东部凹陷煤储层的 $G_{cp} = 14.027 \text{ m}^3/\text{t}$ ；又如美国在几个煤层气田的岩芯测试所解出的含气量 V_g 与非煤含量（灰分 + 水分）的交会图可推出 $G_{cp} = (518.70 \pm 30.70) \text{ scf/t} = (14.70 \pm 0.90) \text{ m}^3/\text{t}$ 。并且美国天然气研究所（GRI）已利用该数据对许多不同类型的煤层气储层进行了研究，证明了该数据具有较大的适应范围。因此，假若我们根据体积模型和密度测井的回归分析能够求出煤岩各组分的重量百分含量（ w_s 和 w_w ）；代入上述方程式 8-6，即可连续求出沿钻井剖面各采样点的含气量。

8.2.4 应用实例分析

为了检验上述计算方法的有效性，应用华北柳林地区 4 口煤层气井（ML1、LU2、ML4、ML6）测井数据进行了煤质和含气量的计算。其中该区 ML1 井的煤层气测井曲线见图 8-3 所示。综合应用体积模型和兰氏方程计算出含气量和煤质（含气量（ V_g ）单位： m^3/t ；含碳量 = 固定碳含量（ w_{fc} ）+ 挥发分含量（ w_{vm} ）、含灰量（ w_a ）和含水量（ w_w ）；见图 8-4，应用密度测井的回归分析与兰氏方程计算出的含气量和煤质（固定碳量、挥发分、含灰量和含水量）见图 8-5。对于非煤层段（密度测井值小于 1.75）采用美国西方-阿特拉斯测井服务公司单孔隙度测井泥质砂岩分析程序（POR）的计算方法计算该层段的泥质含量（ V_{sh} 和孔隙度 φ ）。

通过分析图 8-3、图 8-4 和图 8-5 可知，在可疑的煤层段（例如，349 ~ 352m、358 ~ 360m 和 408 ~ 412m），表现为低密度、高声波、低自然伽马、高电阻率等特征，计算出的含气量和含碳量为高值，并且二者极大与用 BP 神经网络方法计算出的含气量和含碳量比较吻合。通过对比分析应用体积模型和兰氏方程计算结果和应用密度测井和回归分析与兰氏方程计算结果可知，后者与 BP 神经网络方法计算结果误差较小。由此可以看出利用上述方法进行非取芯井煤质和含气量的计算是可行的。

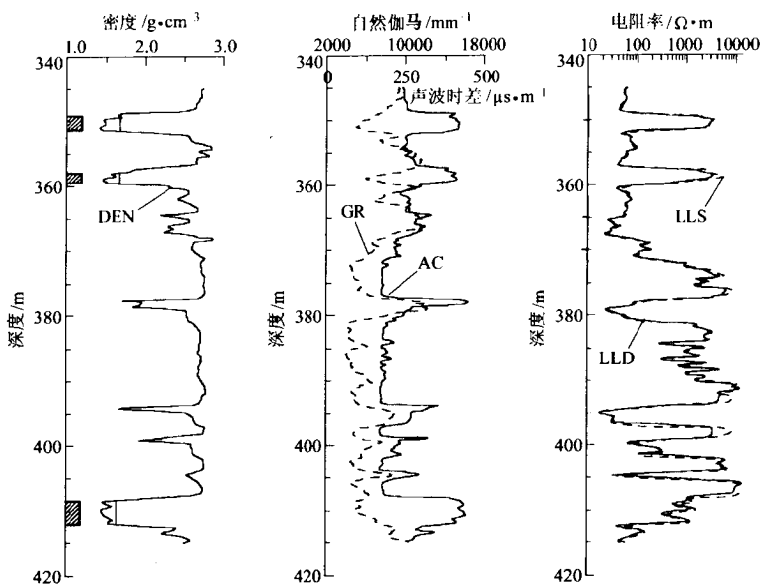


图 8-3 华北柳林煤层气实验区 ML1 煤层气井综合测井曲线图 (部分井段)

根据地球物理测井理论和兰氏方程, 提出的利用地球物理测井信息、煤层体积模型和密度测井的回归分析方法, 可计算煤层的含碳量 (固定碳、挥发分) 灰分和水分以及兰氏方程计算煤层气含量。通过华北柳林地区煤层井实际测井数据的处理证明了上述方法的有效性。对比应用体积模型和兰氏方程计算结果和应用密度测井和回归分析与兰氏方程计算结果, 后者与 BP 神经网络方法计算结果误差较小。因此, 在有密度测井条件下, 可应用密度测井和回归分析与兰氏方程计算含气量和煤质, 对于无密度测井情况, 可应用体积模型和兰氏方程计算含气量和煤质。

应该指出, 上述煤层体积模型没有考虑煤层裂缝 (割理) 的影响, 严格来讲煤储层应为裂缝性储层, 应用裂缝性储层的体积模型, 这必定会造成计算结果误差。此外, 本方法采用了回归分析方法, 要用到煤芯测试数据, 因此上述计算方法有地区应用的局限性。

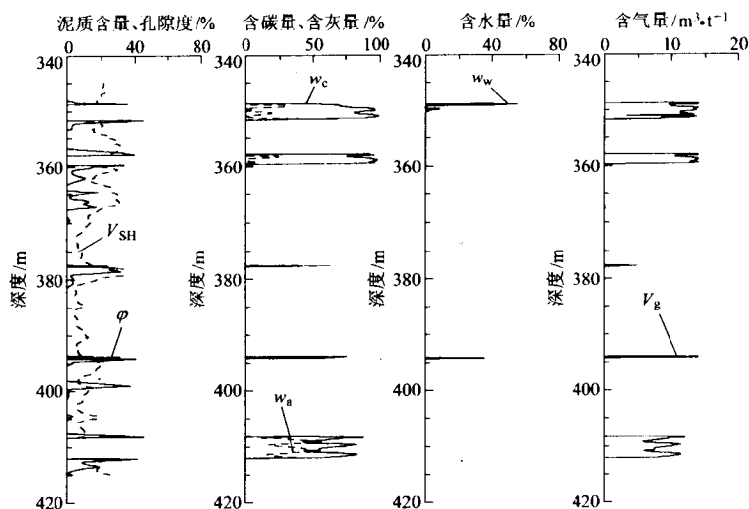


图 8-4 ML1 井应用体积模型和兰氏方程计算出的煤质和含气量

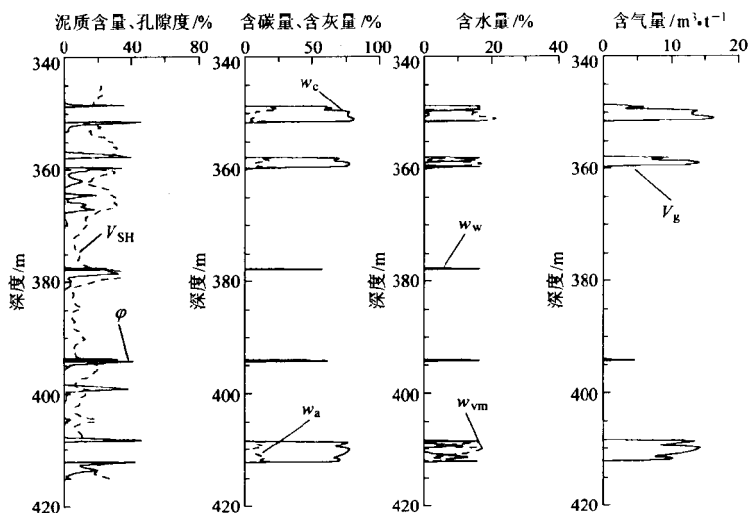


图 8-5 ML1 井应用密度测井、回归分析与兰氏方程计算出的煤质和含气量

8.3 利用吸附等温线求煤层含气量

吸附等温线是指一定温度下，煤对甲烷的吸附量和压力的关系曲线图。它一般通过实验室做吸附实验获得。一般认为，煤层的吸附等温线符合兰氏吸附等温式，因此又称兰氏吸附等温线，其数学表达式可表示成如下形式

$$V_g = v_L p / (p + p_L) \quad (8-7)$$

式中 V_g ——煤层含气量, m^3/t ;

v_L ——吸附达到饱和时所吸附的气量，又称兰氏体积， m^3/t ;

p_L ——吸附量达到饱和吸附量一半时的压力，又称兰氏压力, MPa ;

p ——压力 MPa 。

从式 8-7 可知 只要知道 v_L 和 p_L 值即可求出煤样的吸附等温线，从而可利用吸附等温线求不同压力下的含气量。

目前利用测井资料解决上述问题的基本思路为，将等温线的两个常数与工业分析资料进行相关分析，从而确定 v_L 和 p_L 值 进而求出煤样的吸附等温线和不同压力下的含气量。

例如，我们利用收集到的辽河东部凹陷四个煤样的吸附等温线 温度为 60° 和对应的工业分析数据 将这些等温线的两个常数与工业分析资料进行相关分析。通过分析表明， $\lg v_L$ 与 $\lg(v_{fc}/v_m)$ 呈线性相关趋势， $\lg p_L$ 与可燃质 $(v_m + v_{fc})$ 也呈线性相关趋势。具体相关关系式如下：

$$\lg v_L = -0.3137 \lg(v_{fc}/v_m) + 1.0399 \quad (8-8)$$

$$\lg p_L = 0.0874(v_m + v_{fc}) + 1.6817 \quad (8-9)$$

由式 8-8 和式 8-9 可知，只要知道工业分析的 v_{fc} 和 v_m 就能求得 v_L 和 p_L ，进而按兰氏方程就能计算出吸附等温线，而工业分析值由前面所述方法可求出，因此利用测井方法可以计算吸附等温线，进而计算含气量。

为了说明利用吸附等温线计算含气量方法的有效性，利用辽河东部凹陷测井资料和煤芯分析资料进行了对比分析，具体对比分析结果见表 8-1。由表 8-1 可以看出，计算结果与煤芯分析基本一致。

表 8-1 利用吸附等温线方法计算分析的煤层含气量

井号	深度/m	分析含气量	计算结果
欧 24	2325.31	5.939	9.90
欧 24	2353.60	11.077	9.80
欧 24	2356.360	7.886	9.71
荣 37	2256.60	8.136	9.80
欧 15	1768.00	5.426	10.19

8.4 利用煤层气层背景值求煤层含气量

所谓煤层气层背景值是指煤层气储层不含天然气时的测井读数。以常用的密度、中子、声波测井曲线为例，利用煤层体积模型，可得计算煤层气层密度、中子、声波背景值的响应方程为：

$$\begin{aligned}\rho_b^* &= v_c \rho_c + v_a \rho_a + v_w \rho_w \\ CN_b^* &= v_c CN_c + v_a CN_a + v_w CN_w \\ \Delta t_b^* &= v_c \Delta t_c + v_a \Delta t_a + v_w \Delta t_w\end{aligned}$$

其中 $v_c + v_a + v_w = 1$

式中 ρ_b^* ——煤层气层密度背景值；

CN_b^* ——煤层气层中子背景值；

Δt_b^* ——煤层气层声波背景值。

煤层气层测量值是从测井中实际测得的煤层气层的数值，仍以密度、中子、声波测井为例 其响应方程为

$$\begin{aligned}\rho_b &= V_g \rho_g + v_c \rho_c + v_a \rho_a + v'_w \rho_w \\ CN_b &= V_g CN_g + v_c CN_c + v_a CN_a + v'_w CN_w \\ \Delta t_b &= V_g \Delta t_g + v_c \Delta t_c + v_a \Delta t_a + v'_w \Delta t_w\end{aligned}$$

其中 $V_g + v_c + v_a + v'_w = 1$

式中 ρ_b ——煤层气层密度测量值；

CN_b ——煤层气层中子测量值；

Δt_b ——煤层气层声波测量值。

根据上面的式子，可得如下求解煤层气含量的计算公式

$$V_g = \frac{\rho_b^* - \rho_b}{\rho_w - \rho_g} \quad (8-10)$$

$$V_g = \frac{CN_b^* - CN_b}{CN_w - CN_g} \quad (8-11)$$

$$V_g = \frac{\Delta t_b^* - \Delta t_b}{\Delta t_w - \Delta t_g} \quad (8-12)$$

因此，根据上述公式即可求煤层含气量。

8.5 煤层裂缝孔隙度的测井计算方法

煤层孔隙度、渗透率与含气量是煤储层评价的三个重要参数，本章前面几节已讨论了煤层含气量的计算方法，煤层渗透率将在第 10 章讨论，本节利用煤层双孔隙体积模型将讨论煤储层裂缝孔隙度的测井计算方法。

煤层的孔隙按其结构可分为裂缝和基质孔隙。其中，基质孔隙中一般不含可动水（除可作为流体流动通道的相互连通的大孔外）割理中则在原始状态下含 100% 的可动水，因此，在研究煤层孔隙度时，主要研究裂缝孔隙度。

在煤系地层中，煤层的裂缝发育情况与其他岩性的情况不同，煤层的裂缝发育情况可分为两种，一是与井眼垂直的水平裂缝，称之为层面裂缝；另一种是与层面裂缝正交或斜交的层间裂缝。这里我们采用双侧向测井资料和煤层双孔隙体积模型计算煤层裂缝孔隙度。

由煤层体积模型（见图 8-1），煤层可近似看做由碳、灰和孔隙三部分组成，其中孔隙又可分为基质孔隙和裂缝孔隙，则有煤层双孔隙体积模型。图中 v_c 、 v_a 分别为碳、灰的相对体积； v_b 、 v_f 分别为基质和裂缝孔隙度。

对于电阻率测井，我们可以把所测的电阻率看成是由碳、灰、基质孔隙和裂缝孔隙四部分电阻率并联的结果，可写为

$$\frac{1}{R} = \frac{v_c}{R_c} + \frac{v_a}{R_a} + \frac{v_b}{R_b} + \frac{v_f}{R_f}$$

式中 R ——煤层电阻率测量值；

R_c ——碳的电阻率值；

R_a ——灰的电阻率值；

R_b ——基质孔隙的电阻率值；

R_f ——裂缝孔隙的电阻率值。

若采用双侧向测井资料，可以得到以下两个式子：

$$\frac{1}{R_t} = \frac{v_c}{R_c} + \frac{v_a}{R_a} + \frac{v_b}{R_b} + \frac{v_f}{R_f}$$

$$\frac{1}{R_s} = \frac{v_c}{R_c} + \frac{v_a}{R_a} + \frac{v_b}{R_b} + \frac{v_f}{R_f}$$

其中 R_t 、 R_s 分别为深、浅侧向电阻率值。

由于煤在原生状态下，一般含气饱和度较低，而且大部分处于吸附状态，因此我们认为孔隙中较大程度被水充填，并假设其含水饱和度约为 100%，这样对于裂缝孔隙的电阻率，由于深侧向探测的主要是地层的电阻率，所以认为其裂缝电阻率等效于地层水电阻率，而浅侧向探测的主要是侵入带的电阻率，由于裂缝中几乎被泥浆滤液充满，因此认为其裂缝电阻率应等效于泥浆滤液的电阻率，而基质孔隙，由于其中一般不含可动水，因此认为其不受泥浆侵入的影响，又根据阿尔奇公式，上面两式又可变换为如下形式：

$$\frac{1}{R_t} = \frac{v_c}{R_c} + \frac{v_a}{R_a} + \frac{\varphi_f^{mf}}{R_w} + \frac{v_b}{R_b}$$

$$\frac{1}{R_s} = \frac{v_c}{R_c} + \frac{v_a}{R_a} + \frac{\varphi_f^{mf}}{R_{mf}} + \frac{v_b}{R_b}$$

式中 φ_f 为裂缝孔隙度； v_c 、 v_a 、 v_b 为碳、灰和基质孔隙的相对体积 mf 为裂缝孔隙的胶结指数。

将上面两式相减得：

$$\frac{1}{R_t} - \frac{1}{R_s} = \frac{\varphi_t^{mf}}{R_w} - \frac{\varphi_t^{mf}}{R_{mf}}$$

整理得：

$$\varphi_t = \left(\frac{1/R_t - 1/R_s}{1/R_w - 1/R_{mf}} \right)^{1/mf} = \left(\frac{C_t - C_s}{C_w - C_{mf}} \right)^{1/mf} \quad (8-13)$$

其中, C_t 、 C_s 分别为深、浅侧向电导率, C_w 、 C_{mf} 分别为地层水和泥浆滤液的电导率。

当地层水电阻率与泥浆滤液电阻率相比较大时, 式 8-13 又可写为：

$$\varphi_t = [R_{mf}(1/R_s - 1/R_t)]^{1/mf} \quad (8-14)$$

当地层水电阻率与泥浆滤液电阻率相比较小时, (8-13) 式又可写为：

$$\varphi_t = [R_w(1/R_t - 1/R_s)]^{1/mf} \quad (8-15)$$

这样 利用式 8-13、式 8-14 和式 8-15 即可求裂缝孔隙度 φ_{f0} 。

8.6 煤阶的评价方法

目前, 评价煤岩变质程度最常用的参数是镜煤反射率 (R_0)。按照我国煤阶划分标准 (见表 2-6), 各煤阶对应的镜煤反射率分别为, 褐煤: 小于 0.5%, 长焰煤: 0.5% ~ 0.65% (0.70%); 气煤: 0.65% (0.70%) ~ 0.90%。

基于测井资料划分煤阶的基本可行的思路是, 利用回归分析方法建立镜煤反射率的相关关系式, 从而计算镜煤反射率和划分煤阶。

例如, 辽河油田东部凹陷沙三上段煤层, 前人研究表明, 其煤阶主要由埋深控制, 由镜煤反射率分析, 最小 0.37%, 最大仅 0.67%, 最高煤阶才到气煤阶段。故发育变质程度很低的褐煤、长焰煤和气煤是东部凹陷煤层变质程度的一大特点。因煤阶主要受深度控制, 我们把从实验室获得的煤芯的镜煤反射率 R_0 与测井深度 D 进行回归分析。镜煤反射率 R_0 与深度及深度的对数都呈比较好的线性相关关系, 即

$$R_{\infty} = 0.0001489 D + 0.185755 \quad (8-16)$$

$$R_0 = 0.365119 \ln(D) - 2.28767 \quad (8-17)$$

但通过具体实际计算我们发现，对数式更符合实际，因此我们采用对数线性关系式，计算镜煤反射率，从而划分煤阶。

为了说明利用式 8-17 计算镜煤反射率 R_0 方法的有效性，利用辽河东部凹陷测井资料和煤芯分析资料进行了对比分析，具体对比分析结果见表 8-2。由表 8-2 可以看出，计算结果与煤芯分析基本一致。

表 8-2 镜煤反射率实验分析与计算结果对比表

井 名	深度/m	R_0 的实验室分析值	R_0 的实际计算值
桃 10	3408.0	0.72	0.68
桃 14	2961.8	0.60	0.63
桃 17	2694.0	0.53	0.60
大 17	2598.0	0.71	0.58
小 5	2773.0	0.59	0.61
欧 18	2769.0	0.55	0.61
荣 56	2959.0	0.67	0.63
桃 11	3229.0	0.58	0.66
桃 7	3016.0	0.65	0.64
荣 56	3117.0	0.66	0.65
界 10	1374.0	0.39	0.35
欧 24	2055.0	0.48	0.50
欧 15	2022.0	0.50	0.49
欧 6	2169.0	0.47	0.52
小 8	2246.0	0.47	0.53
欧 24	2325.0	0.52	0.54
欧 24	2356.0	0.53	0.55
欧 24	2442.0	0.52	0.56
小 5	2621.0	0.58	0.59

参 考 文 献

- 1 丁次乾主编. 矿场地球物理. 东营: 石油大学出版社, 1992. 377
- 2 中国矿业学院, 西安矿业学院, 江苏煤田地质勘探公司等. 煤田地球物理测井. 北京: 煤炭工业出版社, 1979. 473

- 3 地矿部华北石油地质局编 .煤层气译文集 .郑州：河南科技出版社 ,1990.
593
- 4 钱凯 ,赵庆波 ,汪泽成等编著 .煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术 .
北京：石油工业出版社 , 1996.188
- 5 赵庆波 ,刘兵 ,姚超等编 .世界煤层气工业发展现状 .北京：地质出版社 ,
1998.153
- 6 侯俊胜 ,尉中良 .煤层气储层评价的地球物理测井方法 .中国地球物理学
会年刊 ,1997;5
- 7 侯俊胜 ,董红 .综合利用测井和兰氏方程计算煤层气储层煤质和含气量 .
现代地质 ,1999,13:82 ~ 86
- 8 李纪森 .煤层气测井技术与解释分析 .测井技术 ,1999,23(2):103 ~ 107
- 9 高绪晨 张炳 姜法 .煤层工业分析、吸附等温线和含气量的测井解释 .测
井技术 ,1999,23(2):108 ~ 111
- 10 J. M. Hawkins, R. A. Schraufnagel, A. J. Olszewski, 1992, Estimating coalbed
gas content and sorption isotherm using well log data, SPE24905, 491 ~ 500

第9章 BP神经网络及其在煤层气储层测井评价中的应用

9.1 引言

美国著名的神经网络研究学者鲁姆哈德 (Rumelhart) 等人针对前向型 (又称前馈型) 多层神经网络模型, 于 1986 年提出了多层网络的误差反向传播学习算法 (又称 BP 学习算法), 实现了明斯基 (Minsky) 等人的多层网络设想, 从而使许多人重新对神经网络的研究充满了信心, 并且许多学者对该算法又进一步开展了大量的研究工作, 提出了一些改进的 BP 学习算法等。我们这里称谓的 BP 神经网络 (简称 BP 网络) 是基于基本的 BP 算法的前向多层神经网络。目前, 人们虽然已经提出近百种神经网络模型, 但是, 普遍认为, BP 神经网络仍然是方法比较完善, 并且是应用最广的神经网络模型之一。目前神经网络已在地球物理测井领域得到广泛应用。

煤层气由于自身的特点, 使其测井资料往往受多种因素控制, 采用单一测井信息或某一储层参数 (例如: 孔隙度或其他参量), 进行煤层气评价解释研究, 除了在一些特殊情况下可以取得满意效果外, 很难普遍推广应用。当前的最佳选择是利用综合测井资料进行煤层气评价。由于事先难以确定煤层气储层参数与综合测井相应之间的定量关系, 因而只能提出若干假设条件, 从而建立一个简化的数学模型。例如, 假设它们之间存在某种线性或非线性关系。然而, 这些假设条件的提出没有严格理论上的指导, 可能仅是一种经验推测。由于上述原因, 也必然会给解释结果带来一定误差。

已知煤层气储层属于双重孔隙储层, 测井信息与储层参数表现出较强的非线性特征, 因此目前还没有有效的储层参数计算方

法，在此提出应用神经网络进行煤层气测井资料的定量分析。其优点是它不用考虑具体的数学模型，就能用“隐式”表达出煤层气储层参数与测井响应之间的非线性关系，从而实现煤层气储层的定量分析。目前人工智能的进展已建立了近百种神经网络模型和算法，并通过计算机实现了部分人类智能活动。但是普遍认为，BP神经网络方法是较为完善和应用较广的神经网络模型。因此，下面就详细讨论该网络方法的基本原理及其在煤层气储层参数计算中的应用等问题。

9.2 BP神经网络方法

9.2.1 BP神经网络的基本特征

BP神经网络是一前向多层神经网络，该神经网络的基本拓扑结构如图 9-1 所示。它由三层构成，包括输入层、隐含层（简称隐层，或称隐蔽层或中间层等）和输出层。其中每一层都包括若干个神经元，同一层中的神经元之间没有相互联系，各层神经元个数以及隐含层的层数应视具体问题而定。

BP神经网络是一个有教师学习（训练）的神经网络模型，即在

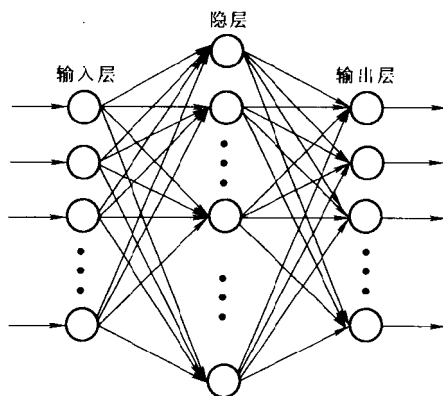


图 9-1 BP神经网络的基本结构

提供输入层信息的同时，还应提供训练输出的期望值。BP神经网络包括两个过程，即学习过程和工作过程。所谓学习过程，就是向网络提出一定数量的训练样本（训练样本就是提供输入层信息的同时，还应该提供输出层的期望值），将网络的实际响应和期望响应进行比较，通过修改各层神经元之间的连结权系数，以便使期望输出与实际输出之间误差达到最小，最后即可求得一组连结权系数。权系数确定以后，整个网络系统也就随之确定。所谓工作过程就是将待识别的信息送入输入层，对应输出层的输出即为网络的工作结果。例如，对于煤层气储层评价参数计算问题，假设输入层为密度、自然伽马、电阻率和声波时差等测井响应，其输出层可为煤质成分、煤层气含量等储层评价参数。

9.2.2 BP神经网络的基本计算公式

根据BP神经网络的BP学习算法可知BP神经网络的神元输入 $I_{pi}^{(l)}$ 和输出 $O_{pi}^{(l)}$ 计算公式分别为

$$I_{pi}^{(l)} = \sum_{j=0}^L W_{ij}^{(l)} \cdot O_{pi}^{(l-1)} \quad (9-1)$$

$$O_{pi}^{(l)} = f_s[I_{pi}^{(l)}] = \frac{1}{1 + e^{-I_{pi}^{(l)}/T_0}} \quad (9-2)$$

其中

$p = 0, 1, 2, 3, \dots, P_G, P_G$ 为训练样本总数； $l = 0, 1, 2, 3, \dots, l_G, l_G$ 为网络层数；

$i = 0, 1, 2, 3, \dots, i_G, i_G$ 为 l 层的神经元个数； $W_{ij}^{(l)}$ 为网络连结权系数， T_0 是温度调节系数， L 为第 $(l-1)$ 层神经元个数； $f_s[I_{pi}^{(l)}]$

$= \frac{1}{1 + e^{-I_{pi}^{(l)}/T_0}}$ 为 S 型函数。

对某一给定的输入样本，以输出层实际输出 y_{pi} 与其期望输出 d_{pi} 的误差平方和为

$$\epsilon = \sum (d_{pi} - y_{pi})^2 / 2 \quad (9-3)$$

作为目标函数，采用最速下降法即可导出网络连结权系数 $W_{ij}^{(l)}$ (l) 的迭代计算公式即

$$W_{ij}^{(l)}(t+1) = W_{ij}^{(l)}(t) + \Delta_p W_{ij}^{(l)}(t) \quad (9-4)$$

$$\Delta_p W_{ij}^{(l)}(t) = \eta \delta_{pi}^{(l)}(t) O_{pj}^{(l+1)}(t) + \alpha \Delta_p W_{ij}^{(l)}(t-1) \quad (9-5)$$

其中

(1) 当 l 为输出层时

$$\delta_{pi}^{(l)} = 2(d_{pi} - O_{pi}^{(l)})f'_s[I_{pi}^{(l)}]$$

(2) 当 l 为隐含层时

$$\delta_{pi}^{(l)} = \sum_{k=0}^{Q-1} [\delta_{pk}^{(l+1)} W_{ki}^{(l+1)}] f'_s[I_{pi}^{(l)}]$$

t 为迭代学习次数, η 为学习步长 (速率), α 为动量因子 (惯性系数), Q 为第 $(l+1)$ 层的神经元个数, $f'_s[I_{pi}^{(l)}]$ 为函数 $f_s[I_{pi}^{(l)}]$ 对 $I_{pi}^{(l)}$ 的一阶偏导数。

9.2.3 BP网络学习步骤与软件模拟

根据前面的讨论, 我们不难总结出 BP 神经网络的学习步骤, 即:

(1) 确定网络结构。即给定输入层与输出层的神经元数目, 隐含层数及各层的神经元数目以及学习步长、动量因子和终止误差等网络参数。

(2) 网络状态初始化。即将所有权系数都设置成较小的随机数。例如可采用移位法、同余法的计算方法。

(3) 输入学习样本。

(4) 计算隐含层与输出层的输出。

(5) 计算输出层误差。

(6) 判断输出层误差 E_p 是否小于给定的误差极限 ϵ_{\max} 若满足要求 结束学习 否则转向 (7)。

(7) 判断学习次数 I_t 是否小于最大学习次数 I_{\max} 若满足要求 转向 (8), 否则结束学习。

(8) 调整连结权系数。

(9) 转向 (3)。

因此 根据上面 BP 神经网络的学习步骤和其计算公式, 不难编写 BP 神经网络数字模拟软件 (C 或 FORTRAN 程序语言) 其程

序设计流程图如图 9-2 所示。

9.3 实际测井资料应用 及其分析

9.3.1 煤层气测井资料解释的基本步骤

根据 BP 神经网络方法原理以及基于煤层气测井资料的煤层气储层参数计算的自身特点，我们不难总结出如下煤层气测井资料解释的基本步骤：

(1) 选择输入输出特征量（分别对应网络输入层和输出层的神经元个数）以及中间层层数和每层的神经元个数，进而确定 BP 神经网络的基本结构。

(2) 选择学习样本。

(3) 测井数据的预处理。例如，数字滤波和环境校正处理等。

(4) 数据归一化。其计算公式为 $X'_k = \frac{X_k - X_{\min}^*}{X_{\max}^* - X_{\min}^*}$ ，其中 X'_k 为归一化值， X_k 为输入层矢量的第 k 个特征参数， X_{\max}^* 和 X_{\min}^* 分别为第 k 个特征参数的最大与最小值。注意学习样本数据与工作样本数据应统一归一化。

(5) 将测井学习样本数据输入 BP 网络进行学习，求出一组连接权系数。

(6) 输入测井的工作样本数据进行煤层气储层参数计算。

(7) 输出煤层气储层参数计算结果（用表格或图示）。

9.3.2 BP 网络数字模拟软件的使用方法

该软件的使用主要包括数据的准备、程序的运行以及最后结

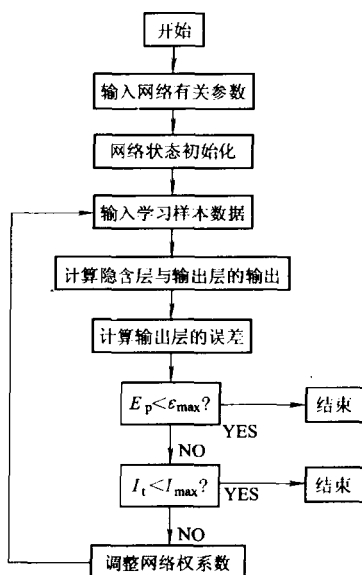


图 9-2 BP 神经网络程序设计流程图

果的输出三个步骤，即

(1)输入数据的准备。

1)输入数据从文件输入，包括学习样本数据文件和工作样本数据文件。

2)键盘输入有关参数，包括网络结构参数（例如，输入层单元数、隐含层个数、动量因子、学习速率等）和数据文件名等。

(2)运行程序。

(3)计算结果的输出。

9.3.3 应用实例分析

为了检验 BP 神经网络在煤层气测井资料储层参数解释中的应用效果，本节利用前面已介绍的我国华北柳林煤层气试验区的实际综合测井资料进行了裂隙孔隙度 (φ_f)、基质孔隙度 (φ_B) 以及煤层含碳量 (w_c)、含灰量 (w_a) 和煤层气含量 (V_g) 等储层参数的计算。已知该区煤系地层的地球物理测井特征（视电阻率、密度、时差、中子孔隙度、自然伽马、井径）见表 9-1。分析表 9-1 可知，不管是柳林或者安阳地区，密度、时差对煤层反应较稳定，因此可用它们来识别煤层。

根据煤层气测井解释的基本步骤，选择深度 $D(m)$ 、深侧向电阻率 $\rho_{LLD}(\Omega \cdot m)$ 、浅侧向电阻率 $\rho_{LLS}(\Omega \cdot m)$ 、声波时差 $\Delta t(\mu s \cdot m^{-1})$ 、密度 $\rho_b(g \cdot cm^{-3})$ 和自然伽马 $N_{GR}(min^{-1})$ 共 6 个测井信息特征量作为输入层的特征参数，即 BP 神经网络输入层共有 6 个神经元；所要计算的煤层气储层参数分别为裂隙孔隙度 φ_f 、基质孔隙度 φ_B 以及煤层含碳量 w_c 、含灰量 w_a 和煤层气含量 $V_g(m^3/t)$ ，因此当仅计算 φ_f, φ_B 时，网络输出层共有 2 个神经元，当仅计算 w_c, w_a, V_g 时网络输出层共有 3 个神经元，当同时计算 5 个特征量 ($\varphi_f, \varphi_B, w_c, w_a, V_g$) 时输出层共有 5 个神经元。根据神经网络的连续函数映射定理，一个具有 3 层（一个输入层、一个隐含层、一个输出层）的网络结构，即可实现任意连续函数从输入空间向输出空间的映射，因此选择一个隐含层，根据经验选择该层有 6 个神经元这就确定了 BP 网络的拓扑结构。

表 9-1 华北柳林与安阳地区煤系地层的地球物理测井特征

地区	组段	煤系 地层	ρ_a / $\Omega \cdot m$	ρ_b / $g \cdot cm^{-3}$	Δt / $\mu s \cdot m^{-1}$	φ_N /%	N_{GR} / min^{-1}	井径 d_b (钻头直径)	岩性 特征	备注
安 阳	二叠系山西组	围岩	150 ~ 400	2.60	220 ~ 280	5 ~ 9	10000 ~ 16000	$\approx d_0$	砂泥岩	
		煤层	1000 ~ 10000	1.50	360	10 ~ 15	7000 ~ 9000	$> d_0$	煤	煤层取芯
柳 林	二叠系山西组	围岩	10 ~ 100	2.60	190 ~ 230	5 ~ 15	8000 ~ 12000	$\approx d_0$	砂泥岩	
		煤层	300 ~ 1000	1.38 ~ 1.50	390	20	3000 ~ 5000	略 $> d_0$	煤	煤层取芯
	二叠系太原组	围岩	600 ~ 7000	2.60 ~ 2.70	190	4.5 ~ 9	2500 ~ 5000	$\approx d_0$	灰岩	
		煤层	30 ~ 300	1.40 ~ 1.56	420	20	2800 ~ 6000	$> d_0$	煤	下伏地层为砂泥岩

选择 64 个样本 (包括 6 个输入特征量 $D, \rho_{LLD}, \rho_{LLS}, \rho_b, \Delta t, N_{GR}$ 和 5 个输出特征量 $\varphi_f, \varphi_B, w_c, w_a, V_g$) 作为网络的学习样本。其中动量因子 $\alpha = 0.9$ 学习速率 $\eta = 0.7$, 温度因子 $T = 1.0$, 最大误差 $E_{max} = 0.01$ 最大迭代次数 $I_{max} = 10000$ 。再从 64 个样本中每隔 2, 3, 4 个样本进行抽样, 分别又得到 32, 22, 16 个样本分别学习, 计算出联结权系数, 使计算值和期望值之间的误差达到精度要求。用 64 个工作样本 (见图 9-3) 所形成的对 3 种不同的学习样本进行工作 得出了 3 种不同的计算结果; 其次把输出层 5 个特征量分为 φ_f, φ_B 和 w_c, w_a, V_g 两组分别计算, 同时还采用 32, 22, 16 个学习样本分别学习, 得出的 3 组不同输出层特征量计算结果与期望值的平均误差见表 9-2。其中用 32 个学习样本同时计算 5 个特征量 $\varphi_f, \varphi_B, w_c, w_a, V_g$ 和用 22 个学习样本分别计算 φ_f, φ_B 和 w_c, w_a, V_g 两组特征量计算结果 ($\varphi_{f1}, \varphi_{B1}, w_{c1}, w_{a1}, V_{g1}$ 和 $\varphi_{f2}, \varphi_{B2}, w_{c2},$

w_{a2} , V_{R2} 和期望值 φ_i , φ_B , w_c , w_a , V_g 的对比结果见图 9-4 和图 9-5 所示。

从表 9-2、图 9-4、图 9-5 中可清晰地看出,煤层气储层参数的计算结果与期望值基本吻合,平均计算误差是可以接受的。在此基础上,我们又对同区域内的其他四口井 (ML1, LU2, ML4, ML6) 的测井资料进行了计算。以上述的 64 个样本作为学习样本,隐含层神经元数为 3,各输入层参数同上。把学习样本和工作样本进行统一规一化,其中 ML4 和 ML6 井 (原始测井曲线图见图 9-6、图 9-7; ML1、LU2 原始测井曲线图见图 2-1 ~ 图 2-4 的计算结果见图 9-8 和图 9-9。

由表 9-1 可知,该区煤层的地球物理特征一般为:低密度、高电阻率、高时差、低自然伽马、高中子孔隙度。分析图 9-6 和图 9-7 可知,ML4 井可以划分出三个煤层段,ML6 井可以划分出四个煤层段。对比图 9-8 和图 9-9 可知,ML6 井所计算的含气量较高。综合分析所计算的结果与该区煤层的地球物理特征和前面第五章的计算结果基本符合 (例如 ML6 井为 I 类储层,ML4 井为 III 类储层)。其他井的计算也基本与已知情况符合,因此 BP 神经网络的应用在该区内是较为成功的。

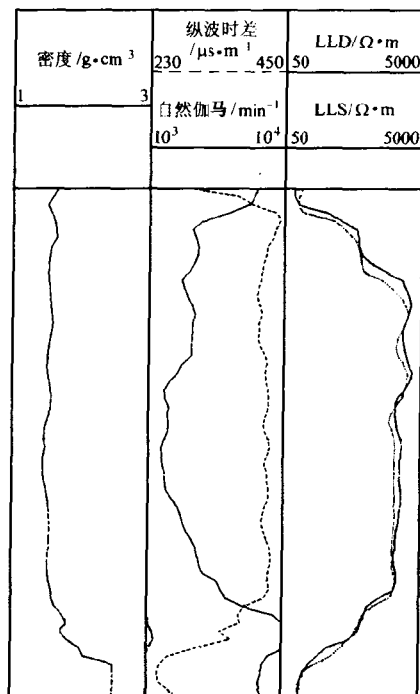


图 9-3 BP 神经网络的学习样本数据

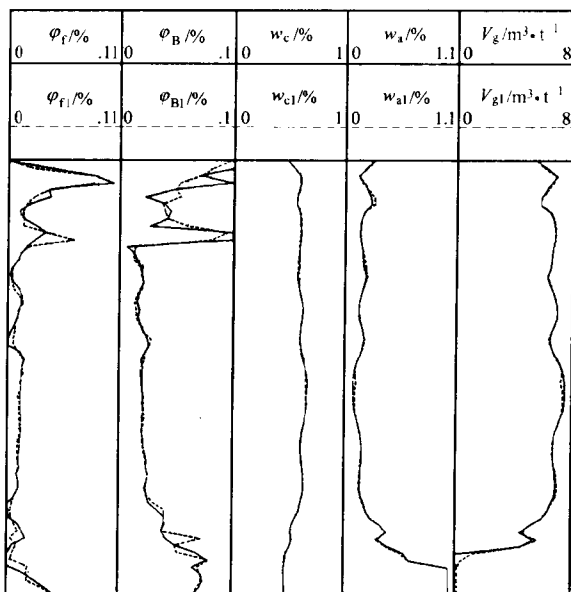


图 9-4 用 32 个学习样本同时计算 5 个特征量

$$\varphi_f, \varphi_B, w_c, w_a, V_g$$

表 9-2 3 组不同输出层特征量计算结果与期望值的平均误差计算表

输出量学习样		误 差				
个数	本总数	φ_f	φ_B	w_c	w_a	V_g
5	16	6.545×10^{-3}	5.968×10^{-3}	5.969×10^{-3}	2.829×10^{-2}	1.382×10^{-1}
	22	5.548×10^{-3}	6.772×10^{-3}	3.998×10^{-3}	3.178×10^{-2}	1.108×10^{-1}
	32	3.993×10^{-3}	4.692×10^{-3}	4.185×10^{-3}	2.191×10^{-2}	8.467×10^{-2}
2	16	1.843×10^{-2}	1.277×10^{-2}			
	22	1.275×10^{-2}	1.450×10^{-2}			
	32	2.203×10^{-2}	1.833×10^{-2}			
3	16			5.309×10^{-3}	2.367×10^{-2}	8.452×10^{-2}
	22			2.761×10^{-3}	2.522×10^{-2}	6.564×10^{-2}
	32			2.702×10^{-3}	1.853×10^{-2}	6.226×10^{-2}

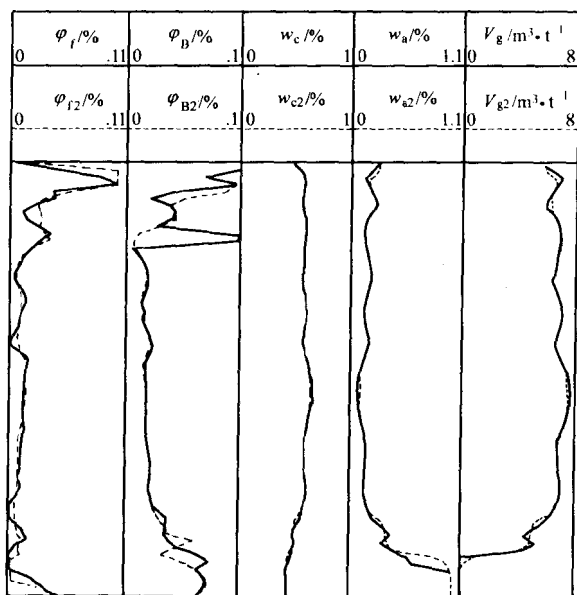


图 9-5 用 22 个学习样本分别计算
 φ_f 、 φ_B 和 w_c 、 w_a 、 V_g 两组特征量

9.4 问题讨论

在应用 BP 神经网络进行实际计算过程中，许多计算参数的选取、学习样本数的选择、以及一些计算方面的技巧值得很好的讨论，下面我们将分别论述。

9.4.1 学习参数 η 和 α 的选择问题

神经网络学习参数的步长因子 η 的大小决定了网络的学习速度快慢，而动量因子 α 的大小则决定了网络的平滑性能。对这两个参数的确定目前一般是取经验值，即均在 $[0,1]$ 内取值 例如，一般取 $\eta = 0.2 \sim 0.8$ ， $\alpha = 0.2 \sim 0.8$ 。

(1) 从理论上讲， η 应取无限小才能保证网络的收敛性，但是，

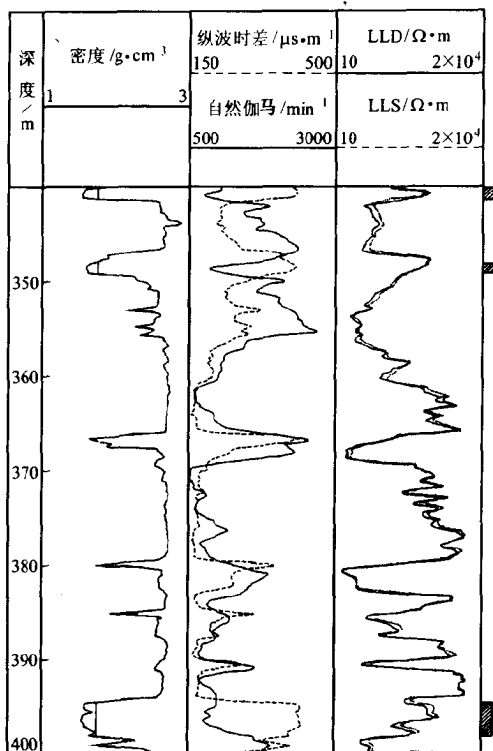


图 9-6 华北柳林煤层气试验区

ML4 井煤层气测井资料

较小的 η 将降低学习速度，而过大的 η 又将增加迭代次数，从而引起网络振荡以致不能收敛。因此， η 应随迭代状态的变化而变化，即采用变步长策略。

学习速率 η 的选择 η 必须设置成一个适当小的值，避免使网络在最速下降过程中产生振荡，但较小的值会使网络学习过程需要更多的迭代次数，大的 η 值对应一个快速的学习过程，但结果可能产生振荡。

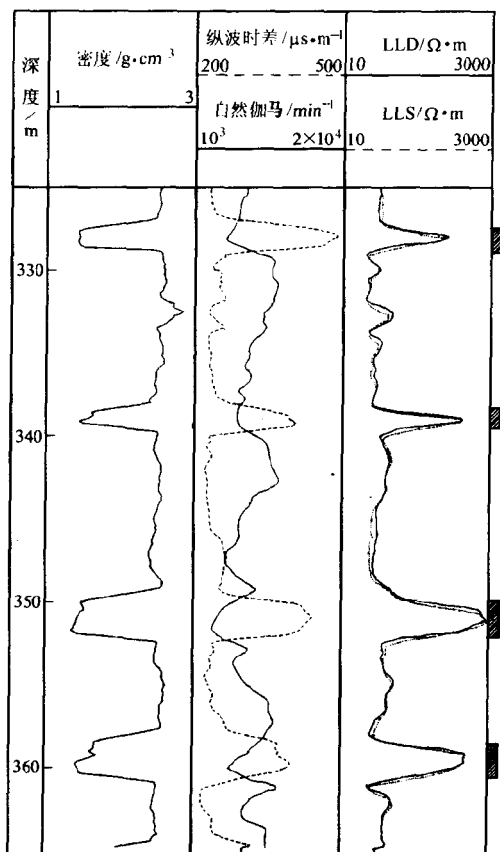


图 9-7 华北柳林煤层气试验区 ML6
井煤层气测井资料

(2) 动量因子 α 的目的是将上一次部分权变化量加到当前权变化量上，动量项是常数 α 乘以新旧权向量之差。而且变化率的动量项应保持在某个量级上，才能经过大量迭代步骤逼近于解，所以非无限小的 α 将能抑制振荡的发生，但可能使学习过程变慢。使权系数平滑地改变，即抑制振荡的发生。动量因子 α 的选择不

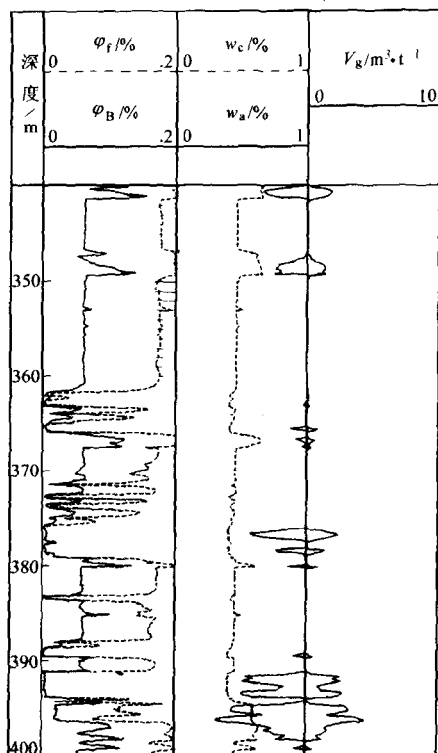


图 9-8 华北柳林煤层气试验区 M14

井煤层气储层参数计算结果

仅要考虑神经网络系统误差的变化，而且应同时考虑 η 的变化，即两者应协调选取。

9.4.2 BP 算法误差函数的修正

在前文推导 BP 算法过程中采用的网络误差函数为

$$E_n = \sum_k (y_k - d_k)^2 / 2 \quad (9-6)$$

其中 y_k 为实际输出， d_k 为期望输出。

E_n 是误差的绝对量，不能有效地表征样本学习的误差程度。

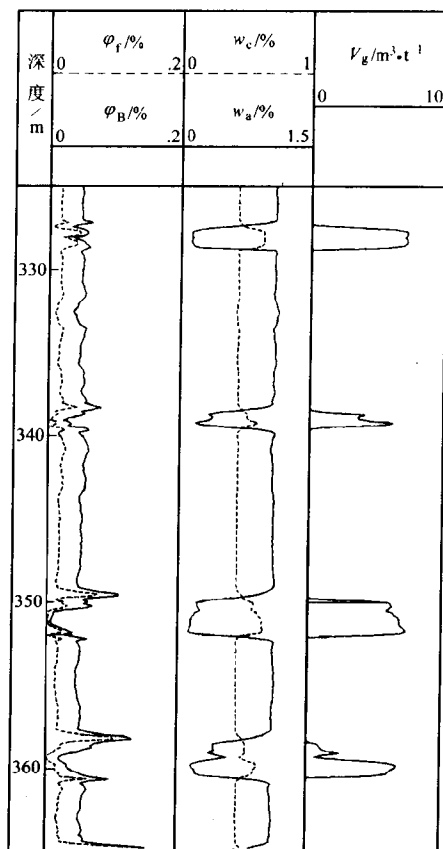


图 9-9 华北柳林煤层气试验区 ML6

井煤层气储层参数计算结果

这是因为对不同的样本点，即使其绝对误差量相同，但样本点的实际输出和期望输出之间误差程度也不等。

例如，有两个样本点，其期望输出分别为 $d_1 = 0.9, d_2 = 0.001$ ，学习后样本点的实际输出分别为 $y_1 = 0.81, y_2 = 0.091$ 两个样本点的实际输出和期望输出间的绝对误差 $E_a^{(1)} = E_a^{(2)} = 0.00405$ 。

但第一个样本点的实际输出和期望输出间误差为 10% 而第二个样本点误差为期望输出的 90 倍。

因此，采用相对量形式的误差函数

$$E_R = \sum_k 1 - d_k / y_k)^2 / 2 \quad (9-7)$$

代替原先的绝对量的误差函数较为合适。对于上面的例子，我们用 E_R 可计算出其相对误差分别为 $E_R^{(1)} = 0.005$, $E_R^{(2)} = 4050$ 因此用 E_R 代替 E_a 可以有效地表征样本学习的误差程度。

9.4.3 同伦 BP 神经网络

对于 BP 神经网络 设 y' 为希望输出, y 为实际输出, j 为输出节点序号, l 为输入样本序号, 则网络的误差函数定义为

$$E = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j [y_j(l) - y'_j(l)]^2 \quad (9-8)$$

学习的目标就是调节网络权值 w_{ij} 使误差函数最小化, BP 算法表示为 $w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \mu \nabla E$, 即利用梯度下降法调整权值, 因此 BP 网络的学习算法具有区域极小以及学习速度慢和收敛时间长的致命弱点。为此, 提出用同伦 BP 网络代表 BP 网络以克服上述不足。同伦 BP 网络的基本结构与 BP 网络完全相同, 主要不同就是用同伦算法代替前面的 BP 算法。

为了使误差函数 E 的最小化, 其输出节点 j 同时满足如下必要条件:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \sum_i \sum_j [y_j(l) - y'_j(l)] \frac{\partial y_j}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial x_j}{\partial w_{ij}} = 0$$

其中第 i 神经元的非线性特性为 S 型函数, 即

$$y_j = \frac{1}{1 + \exp(-x_j)}$$

$$x_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} y_i$$

对网络的隐节点 K 则有

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ik}} = \sum_j \sum_l [y_j(l) - y'_j(l)] \frac{\partial y_j}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial x_j}{\partial y_i} \cdot \frac{\partial y_i}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial w_{ik}} = 0$$

将以上各式合写成矢量形式, 有

$$f(x, W) = 0$$

这样就把 BP 网络中 E 最小化的问题映射为非线性方程的求解问题。因为同伦算法与传统的 BP 算法相比, 具有全局收敛和收敛速度快等优点, 因此, 可用同伦算法求解上述非线性方程, 从而求得使 E 最小化的权矢量 W 。

9.4.4 关于隐含层数和隐含层单元数的选择

在实例中我们选择了一个隐含层, 计算结果达到一定精度要求, 且计算时间较为节省。当取隐含层数较大时, 我们发现计算精度并没有很大提高, 计算时间反而明显增加。同时若隐含层太大, 它将使网络记忆输入模式而不是归纳输入特性, 使学习了的网络降低了处理非样本输入信息的能力。所以取一个隐含层完全可以达到测井资料解释的要求, 增加隐含层数没有实际意义。

在实例中我们选择隐含层单元数为 6, 即有 6 个神经元, 同时我们用 22 个样本计算 w_c, w_a, V_g 三个特征量时取 3 个神经元进行计算, 做误差对比, 见表 9-3。由表 9-3 可见, 存在一定精度差异, 但并不很大, 而且较少的神经元数可以减少计算时间。所以在不同情况下, 可根据精度要求自由选择, 但不宜太大。

表 9-3 隐含层选择不同神经元数计算误差对比表

神经元数	误 差		
	w_c	w_a	V_g
6	2.671×10^{-3}	2.522×10^{-2}	6.564×10^{-2}
3	2.093×10^{-3}	2.647×10^{-2}	7.671×10^{-2}

9.4.5 其他网络参数的选择

(1) 关于学习样本个数的选择。

学习样本个数的选择对计算结果有较大的影响 (见表 9-3)。当然学习样本越多, 计算精度越高。但在实际工作中, 出于工作时间、经济效益等方面的考虑, 不宜取很多样本进行学习。在达到精度要求的情况下, 选取尽量少的学习样本为宜。

(2) 关于输出层特征参量数的选择。

从表 9-2 可见, 在单独计算 3 个特征量 (w_c, w_a, V_g) 时, 比同时

计算 5 个特征量 $(\varphi_f, \varphi_B, w_c, w_a, V_g)$ 的误差明显要小。这是因为 BP 网络使用了最优化中最普遍的一种沿负梯度下降算法, 这种算法从某一点 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 出发, 沿梯度方向求目标函数 $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的极小点 $X^* = (X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*)$ 即求出 $f(X_1, X_2, \dots, X_n) = \min f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 。参数越多 (n 值越大), 找到的 X^* 就可能不是我们所需的极小值, 而是局部极小值。这样计算误差就会增大, 所以输出层特征量不宜太多。

(3) 关于学习样本数据和工作样本数据的归一化。

当学习样本不是从工作样本中抽样得到的时候, 分别对两个样本进行归一化, 不同的极值使归一化结果不统一, 在反归一时就造成了不可避免的误差。这样, 我们对学习样本和工作样本进行统一归一化, 人为设定极值, 在反归一时确保计算结果的正确性。

9.4.6 BP 神经网络存在的问题

BP 神经网络通过大量的应用表明, 虽然在目前它明显优于多元线性回归与逐步线性回归, 但是它自身还存在着许多问题。

(1) 从数学观点看, 它是一个非线性优化问题, 这就不可避免地遇到最常见的局部极小, 致使问题得不到很好的解决。

(2) 学习过程中神经网络的所有权系数都要调整, 而且为了防止振荡现象的出现, 学习步长必须取为较小的数值, 尤其是在接近最优时步长必须相当小, 这就会降低学习速度。

(3) 神经网络中每一隐含层中节点个数 (神经元数) 的选取尚无理论上的指导, 而是根据经验选取。

(4) BP 神经网络煤层气测井解释模型的建立依赖于所选择的学习样本, 因此 BP 神经网络的应用具有地区性, 不能无限地推广。

参 考 文 献

- 1 焦李成著. 神经网络系统理论. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992. 284
- 2 侯俊胜. 基于神经网络与随机优化的物探数据解释方法研究中国地质大学博士后研究报告, 1995

- 3 杨行峻,郑君里.人工神经网络.北京:高等教育出版社,1992.404
- 4 程方道.神经网络在地球物理反演中的应用.地球物理学进展,1994,9(3):51~59
- 5 杨文采等.神经网络技术及其在物化探上的应用.物探化探计算技术,1994,16(4):303~307
- 6 张鸿宾.训练多层网络的样本数问题.自动化学报,1993,19(1):71~77
- 7 杨大力等.多层前向神经网络中BP算法的误调分析及其改进的算法.电子学报,1995,17(1):42~48
- 8 李松银等.前向多层神经网络模糊自适应算法.电子学报,1995,23(2):1~6
- 9 南京大学数学系编.最优化方法.北京:科学出版社,1978.185
- 10 薛嘉庆编.最优化原理与方法.北京:冶金工业出版社,1983.352
- 11 万耀青等编.最优化计算方法常用程序汇编.北京:工人出版社,1983
- 12 罗发龙,李衍达著.神经网络信号处理.北京:电子工业出版社,1993.184
- 13 谭廷栋.裂缝性油气藏测井解释模型与评价方法.北京:石油工业出版社,1987.206
- 14 赵良孝,补勇编著.碳酸盐岩储层测井评价方法.北京:石油工业出版社,1994.144
- 15 侯俊胜,王颖.神经网络方法在煤层气测井资料解释中的应用.地质与勘探,1999,35(3):41~45
- 16 雍世和.最优化测井解释.东营:石油大学出版社,1995.268
- 17 侯俊胜.煤层气储层评价的地球物理测井技术.现代地质,1998,12(1):60~65
- 18 丁次乾主编.矿场地球物理.东营:石油大学出版社,1992.377
- 19 中国矿业学院,西安矿业学院,江苏煤田地质勘探公司等.煤田地球物理测井.北京:煤炭工业出版社,1979.473

第 10 章 煤层气储层渗透性评价与储层综合评价方法探讨

10.1 煤层气储层渗透性评价方法探讨

10.1.1 煤层气储层渗透性评价方法现状分析

煤层气储层的渗透性是煤储层的重要性质之一，它是勘探开发工作过程中进行评价储层产气能力和编制煤层气田开发方案等方面的重要信息，因此，关于煤层气储层渗透性评价问题引起了国内外的广泛关注，并且开展了许多研究工作。我们知道，煤层气储层是具有基质孔隙和裂缝孔隙的双重孔隙结构的非常规储层，它的渗透性主要由裂隙（割理或裂缝）发育程度决定，因此，煤层气储层渗透性评价的核心应是确定储层岩石的渗透率和裂隙分布。

关于煤层气储层渗透率的确定方法目前基本上是套用常规油气储层渗透率的确定方法。它们包括岩芯实验室测定、试井、电缆式地层测试器（RFT）测试、油藏模拟、以及各种井中地球物理方法（测井和井中物探）等。其中前几种方法虽然可取得较准确的渗透率，但是它们只能得到局部数值，而且有的方法费用较高，效率低。然而，井中地球物理方法与其他方法相比，不仅可以获得井及其周围各处的渗透率，而且是较为经济和快速的方法。为此，国内外井中地球物理工作者相继开展了有关的研究和探索，其研究范围包括煤层气储层渗透率地球物理测井的直接测量技术、煤层气储层测井（定性和定量）评价解释技术以及利用井间地球物理的评价技术等三个主要方面。由于储层渗透率与井中地球物理测量信息之间关系复杂，因而测井的直接测量技术研究进展缓慢，关于后两者目前已经取得若干研究成果。例如，依据渗透率与电阻率、渗透率与束缚水饱和度和孔隙度、渗透率与粒度中值和孔隙度、渗透率与孔隙

度和含水饱和度以及毛细管压力等之间的经验关系的测井定量解释技术 潘和平等 (1993)提出的煤层气储层渗透性测井的模糊模式定性识别方法 黄 Huang 等 (1996)提出应用 BP神经网络进行天然气储层测井渗透率参数的定量计算;唐 Tang 等 (1991,1996)提出了基于声波测井的 B-R (Biot-Rosenbaum) 模型的地层渗透率参数反演计算方法;伍先运等 (1993,1994) 也对利用声波测井信息计算渗透率参数进行了理论与应用研究;易玛莫通 (Yamamoto) 等 (1995)提出利用井间声波层析成像进行介质渗透率参数预测。

综合分析上述研究工作可以看出,前人已提出的一些储层渗透性评价方法可以大致分为如下几类:(1)基于常规油气储层测井的经验公式法(图版法);(2)基于概率统计理论的概率统计评价方法;(3)基于非线性信息处理技术的神经网络评价方法;(4)基于声测井理论的计算方法;(5)井间介质渗透率参数预测方法。应该指出,上述方法虽然在一定条件下可以取得较好的应用效果,但是仍然存在许多问题有待解决。经验公式法的应用,对不同地区可能采取不同的形式,其中的经验系数也要取不同的值。这种人为因素的加入,难以保证其计算精度,因此,目前经验公式法仅能提供一种宏观的数量级估算值;关于概率统计评价方法的计算主要取决于概率统计模型的选择;关于神经网络方法仍然存在如何合理的选择学习样本,其学习算法(BP算法)存在局部极小点等不足;关于基于声测井理论的计算方法和井间层析成像方法大都处于理论研究阶段,由于公式繁琐和采用高度近似,其计算速度慢,计算精度低,反演算法存在局部极小等不足。

根据我们所掌握的有关资料,关于直接利用测井和井中物探方法来研究煤层气储层的裂隙(裂缝或割理)分布还没有看到有公开发表的文献资料,但是,有关裂缝性油气藏储层测井评价解释技术,以及利用井中物探方法(单井和井间物探方法)进行金属矿和油气藏的裂隙评价解释,国内外都已开展了有关的研究工作,并且取得了若干可喜的研究成果和实例(例如,蔡柏林等,1994(内部交流资料),吉姆思(James)等,1995)。但是,目前利用测井资料仍然

没有一套较普遍适用的定量计算裂隙参数的计算方法。由于井中物探方法与地面物探方法相比具有较高的异常分辨率，与常规测井方法相比具有较大的径向探测范围（几米～几百米）并且与层析成像技术相结合，因此在裂隙评价方面得到了应用。但是，该方法仍然存在图像重建过程中过分依赖于初值选择，假图像干扰，成像结果具有多解性以及缺乏裂隙成像研究等问题。

总之，虽然已有常规油气储层渗透性评价方法可以近似套用，但是，应该指出，煤层气储层与常规油气储层相比有明显差异，其最大特点就是它既是煤层气的储集层，又是它的生气源岩，并且是双重孔隙结构。由于煤层气储层所具有的上述特点，必然导致其物性结构的强烈不均质性和各向异性等特征，造成储层参数与井中地球物理响应之间的关系进一步复杂化，表现出更加明显的非线性特征以及给储层评价带来更强的多解性、模糊性和不确定性等。因此，完全套用常规油气储层的评价方法难于满足当前高精度煤层气储层评价的要求，必须开展紧密结合煤层气储层特点的渗透性评价方法研究。

综上所述，煤储层渗透性评价是当前国内外煤层气勘探开发工作中亟待解决的重要理论问题。其研究成果可以广泛地应用到煤层气储层渗透性评价的各个阶段，具有良好的应用前景，而且还将进一步丰富煤层气测井的方法理论。因此，研究探索煤层气储层渗透性评价从理论和实际上都具有重要意义。为此本章将讨论基于常规测井参数的煤层气储层渗透性定性分析的基本方法和基于最优化技术的渗透率反演方法。

10.1.2 煤层气储层渗透性定性评价

我们知道，如果地层的岩性和孔渗性不同，在测井曲线上反映特征也一般不同，所以，可以利用测井曲线反映特征的变化，进行煤储层渗透性定性评价。例如，根据微电极之差（ $\rho_{MLP} - \rho_{MLG}$ ）、 N_{GR} 、 V_{SP} 侧向测井（ ρ_{LLD} 、 ρ_{LLS} ）以及井径测井等测井曲线在渗透层和非渗透层上的一般变化规律，可知： $(\rho_{MLP} - \rho_{MLG})$ 曲线在渗透层上为正幅度差； N_{GR} 在渗透层上表现为低值； V_{SP} 在渗透层上表现

为绝对值高值； $(\rho_{LLD} - \rho_{LLS})$ 曲线在渗透层上为有幅度差；井径测井表现为缩径；据此可选择 N_{GR} , V_{SP} , $(\rho_{MLP} - \rho_{MLG})$, $(\rho_{LLD} - \rho_{LLS})$, $(d_h - d_0)$ 测井参数来识别渗透层 其中 d_0 为钻头直径。因此可以利用 ML、SP、GR、CAL 等常规测井曲线进行煤层气储层渗透性定性评价。

通过分析大量的煤层气储层上测井曲线变化规律和前人工作表明，定性判断煤储层的渗透性，目前比较有效和常用的常规测井曲线是微电阻率测井曲线。例如，微电极测井，该测井一般来说包括微梯度和微电位两个电极系，由于两个电极系的电极距不同，因此它们的径向探测深度也不同。实验证明，由于微电极测井电极距较短，其探测范围较小，因此一般来说微电极测井曲线不包括围岩的影响。在渗透层处，微梯度主要受泥饼影响，微电位主要受泥饼和冲洗带影响，因此两条测井曲线就会出现幅度差，并且幅度差越大，说明地层的渗透性越好，所以，可以利用微电极测井曲线定性评价煤层气储层的渗透性。

例如图 10-1 图中 663 ~ 670m 为煤层段。实验室对该煤层煤芯的测试结果为 664.53 ~ 664.68m, 渗透率为 $36.744 \times 10^{-3} \mu m^2$; 667.97 ~ 668.12m, 渗透率为 $0.293 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。从该图上可以看出, 664.53 ~ 664.68m, 微电极两条测井曲线的幅度差约为 $13 \Omega \cdot m$; 667.97 ~ 668.12m, 微电极两条测井曲线的幅度差约为 $5 \Omega \cdot m$ 前者的幅度差明显高于后者，也说明前者的渗透性要好于后者，实际渗透率的化验结果也与此基本一致。

图 10-2 为煤安 2 井测井曲线图，图中 592 ~ 599m 为煤层段。实验室对该煤层煤芯的测试结果为：597.00 ~ 597.22m 渗透率为 $0.187 \times 10^{-3} \mu m^2$; 598.10 ~ 598.20m 渗透率为 $0.706 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。图 10-3 为煤安 3 井测井曲线图，图中 569.0 ~ 575.5m 为煤层段。实验室对该煤层段煤芯的测试结果为：570.96 ~ 573.08m 渗透率为 $1.787 \times 10^{-3} \mu m^2$ 。通过比较可以看出，煤安 2 井和煤安 3 井的煤芯的测试结果均低于煤安 1 井煤岩的渗透率 相应地 煤安 1 井煤岩微电极两条测井曲线的幅度差明显高于煤安 2 井和煤安 3 井

煤岩微电极两条测井曲线的幅度差。因此，可以利用微电极测井曲线定性评价煤层气储层的渗透性。

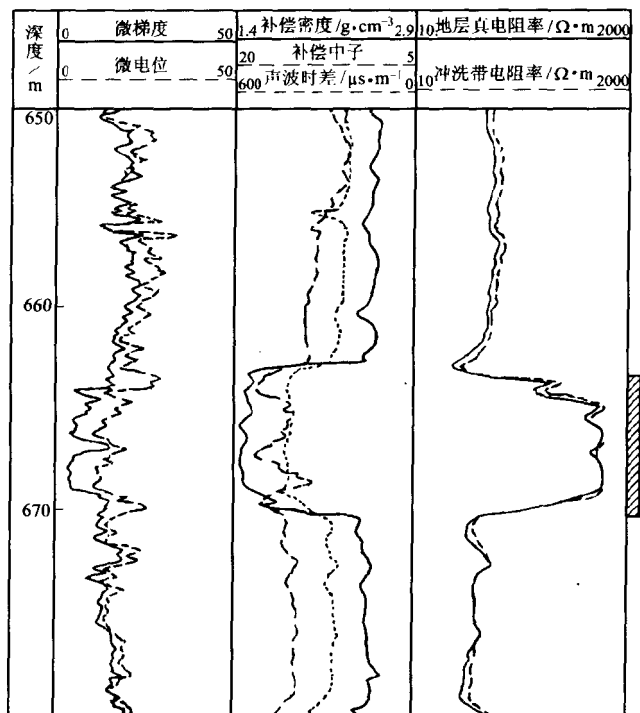


图 10-1 华北地区煤安 1 井综合测井曲线图

评价煤层气储层渗透性其他测井方法有地层微电阻率扫描、声波全波测井和阵列声波测井等。关于利用测井多参数自动综合评判煤储层渗透性方法见第 5 章的讨论。

10.1.3 煤层气储层渗透率参数的定量分析

10.1.3.1 利用双侧向测井计算煤层气储层裂缝渗透率

由第一章的讨论可知，煤层基质孔隙主要储集煤层气，煤层割理则作为煤层气的流动通道。因此，研究煤层渗透率主要是指裂

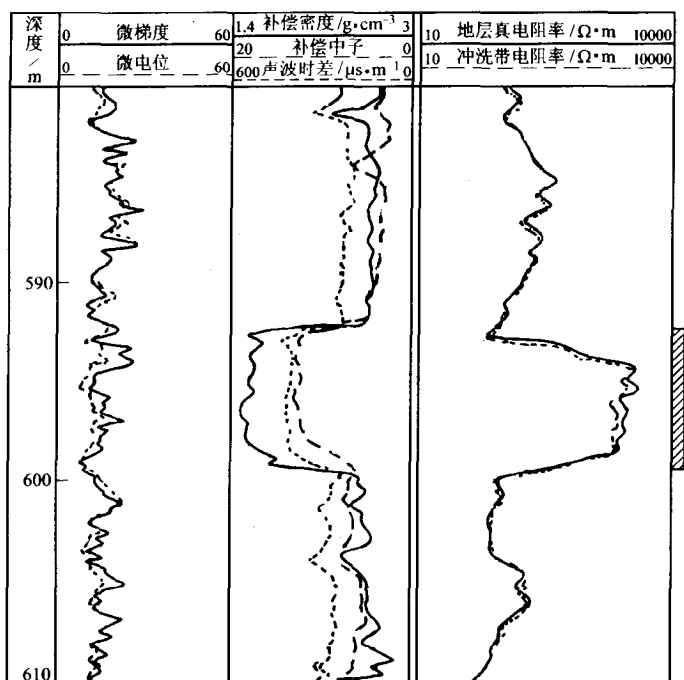


图 10-2 华北地区煤安 2 井综合测井曲线图

缝渗透率。

利用双侧向计算煤层渗透率我们主要采用三种方法：一种是利用伐富端 (Faivre) 和斯比特 (Sibbit) 两位学者研究方法 (这里简称 F-S 计算方法)；另一种是利用达西定律推导得出的渗透率公式；第三种是上述方法的变形。

(1) F-S 计算方法。

煤层裂缝是由层面裂缝与层间裂缝组成，而层间裂缝渗透率评价方法已经由伐富瑞和斯比特等学者作了深入的研究，提出了计算煤层气储层裂缝渗透率的具体计算方法，即

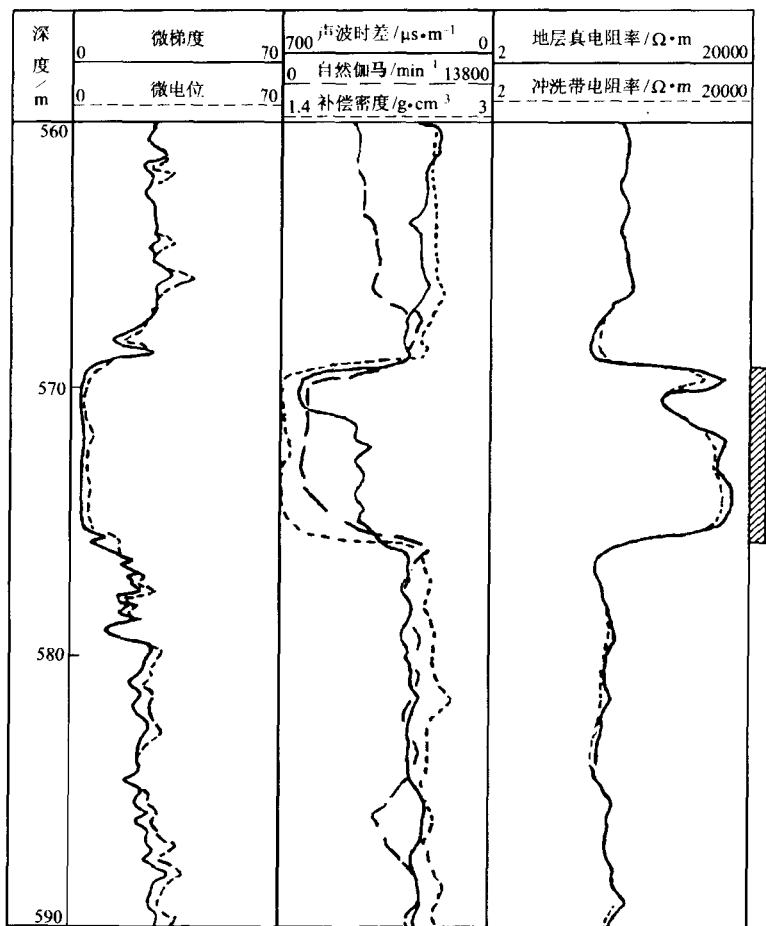


图 10-3 华北地区煤安 3 井综合测井曲线图

$$k_f = \frac{8.33 \times 10^6 h_f c_f}{h_m} \quad (10-1A)$$

式 10-1A 即称为 F-S 计算公式。

其中 k_f 为储层裂缝渗透率； c_f 为比例因子，可以根据各地区统计

数据求得，或由地区经验求得，也可由实验测得； $h_f = \frac{\Delta\rho}{4\rho_{mf}}$ ； $h_m = \frac{h_f}{\varphi_f}$ ； ρ_{mf} 为泥浆水电导率。 $\Delta r = \rho_{LLS} - \rho_{LLD} = \frac{1}{\rho_{LLS}} - \frac{1}{\rho_{LLD}}$ ； $\varphi_f = \frac{1}{m_f} \sqrt{\frac{\rho_{LLS} - \rho_{LLD}}{\rho_{mf} - \rho_w}}$ ； h_f 为横井眼的垂直裂缝宽度； ρ_{LLS} 和 ρ_{LLD} 为浅侧向和深侧向电导率； ρ_{LLS} 和 ρ_{LLD} 为浅侧向和深侧向电阻率； φ_f 为储层裂缝孔隙度； m_f 为储层裂缝孔隙度指数。

已知估算裂缝空间由式 $h_m = h_f / \varphi_f$ 计算，则式 10-1A 可变换为

$$k_f = 8.33 \times 10^6 c_f \varphi_f$$

例如，在辽河油田东部凹陷地区，通过分析煤芯实验数据取 $c_f = 0.338 \times 10^{-6}$ 。则裂缝渗透率计算公式为

$$k_f = 0.338 \times 8.33 \varphi_f$$

上式称为经验公式。

(2) 基于达西定律的渗透率计算方法。

一般认为气-水在煤层裂缝中的流动为层状流动，满足达西定律。由达西定律知，煤岩流量的计算公式是

$$q = \frac{kA(p_1 - p_2)}{\mu L}$$

式中 k ——煤岩渗透率 μm^2 ；

q ——流量 cm^3/s ；

μ ——流体的粘度 $Pa \cdot s$ ；

L ——煤岩长度 cm ；

A ——煤岩的截面积 cm^2 ；

p_1, p_2 ——流体进口与出口处的压力 Pa 。

设煤岩有一条裂缝宽度为 b ，长度为 L ，高度为 h 的水平裂缝，裂缝中的流体在压力差 $(p_1 - p_2)$ 驱动下流动。对于裂缝中截面积等于 $b'h$ 的地方，压力差 $(p_1 - p_2)$ 作用在该截面上的驱动力

为

$$F_1 = (p_1 - p_2) b' h$$

流体在裂缝中流动的同时，还受到裂缝壁对流体的粘性力，流体受到的粘性力可以由下式表示：

$$F_2 = \mu A \cdot \frac{dv}{db'}$$

式中 F_2 ——粘性力，N；

A ——粘性力作用的截面积 $A = hL, \text{cm}^2$ ；

v ——裂缝中流体的流速， cm/s 。

如果假设煤岩中流体以匀速流动，那么它所受的驱动力（ F_1 ）与粘性力 F_2 相加必然等于零 即： $F_1 + F_2 = 0$
将 F_1 和 F_2 的计算式代入上式可得

$$\mu hL \frac{dv}{db'} + (p_1 - p_2) b' h = 0$$

把上式中的第一项移到右边，两边再同乘以 db' 并对两边同时积分得

$$(p_1 - p_2) \int b' db' = -\mu L \int dv$$

$$(p_1 - p_2) \frac{b'^2}{2} = -\mu L v + c$$

在裂缝的两边，流体的流速 $v = 0$ ，此时 $b' = \frac{b}{2}$ 则可确定积分常数 c 有

$$= (p_1 - p_2) \frac{\left(\frac{b}{2}\right)^2}{2} = (p_1 - p_2) \frac{b^2}{8}$$

将 c 代入上面的积分式，可以解出裂缝中流体的流速

$$= \left(\frac{p_1 - p_2}{\mu L} \right) \left(\frac{b^2}{8} - \frac{b'^2}{2} \right)$$

由于流过单元截面积 dA_f 的流量 dq 等于 $v dA_f$ 其中 $dA_f = h db'$ 则有裂缝的流体流量

$$q = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} v h d b' = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{(p_1 - p_2)}{\mu L} \left(\frac{b^2}{8} - \frac{b'^2}{2} \right) h d b'$$

积分后可得

$$q = \frac{b^3 h (p_1 - p_2)}{12 \mu L} \text{ 或 } q = \frac{b^2 A_f (p_1 - p_2)}{12 \mu L}$$

式中, A_f 为裂缝的截面积 ($A_f = b h$) 单位 cm^2 .

上式计算的流量为裂缝的理想流量, 而裂缝的实际流量应等于该流量与裂缝孔隙度的乘积, 即: $q = \frac{b^2 A_f (p_1 - p_2) \varphi_f}{12 \mu L}$

由达西定理 流量 q 的表达式还可写为

$$q = \frac{k_f A_f (p_1 - p_2)}{\mu L}$$

式中, k_f 为煤岩裂缝渗透率。

由上面两式可以解出煤岩的裂缝渗透率计算公式为

$$k_f = \varphi_f \frac{b^2}{12} \quad (10-1B)$$

式 10-1B 称为达西公式。由此可见, 只要已知煤岩的裂缝宽度和裂缝孔隙度, 即可求出煤岩裂缝渗透率。煤岩裂缝孔隙度和裂缝宽度可用双侧向测井资料求得。

为了说明公式 10-1A 和 10-1B 的应用效果, 利用辽河东部凹陷测井资料计算了煤岩裂缝渗透率, 我们已知的实验室分析资料非常少 这里仅有荣 37 井的高压孔渗分析报告, 见表 10-1。

表 10-1 荣 37 井煤岩高压孔渗分析报告

压力/MPa	1.5	6.5	11.5	16.5	21.5	26.5	31.5
连通孔隙度/%	4.40	2.70	2.00	1.70	1.60	1.60	1.60
气体渗透率/ μm^2	12.560	1.014	0.238	0.097	0.031	0.007	0.005
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$

由表 10-1 可知: 在压力为 21.5MPa 时, 实验测得孔隙度为 1.60% 渗透率为 $0.031 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 而实际计算相应压力深度处的孔隙度为 1.51% 渗透率为 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 可以看出计算结果与

实验结果比较符合。

此外 利用 F-S 方法并结合地区性质得到的经验公式和利用达西定律推导得出的达西公式的计算结果进行了对比,表 10-2 是欧 24 井利用这两种方法计算的煤岩裂缝渗透率结果,对比可看出这两种方法的计算结果基本相符,由此可以看出这两种方法的实用性。

表 10-2 欧 24 井煤岩裂缝渗透率计算结果对比表

井深/m	式 10-1A 计算结果	式 10-1B 计算结果
2230.0	0.274	0.481
2230.625	0.192	0.165
2231.250	0.046	0.002
2231.875	0.092	0.018
2232.50	0.220	0.249
2233.750	0.106	0.028

(3)其他计算方法。

如果考虑裂缝的产状和组合状态的不同对渗透率大小的影响,裂缝渗透率计算公式也应随之而变化。根据目前对裂缝型储层的描述,可将裂缝型储层的裂缝产状和组合状态归纳成三类模型。

第一类,单组系裂缝模型。单一的水平裂缝或只有一个走向的垂直裂缝都属于此类。其形状类似于板状,所以又称之为板状模型 如图 10-4 所示。

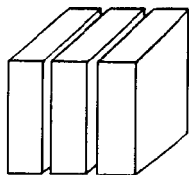


图 10-4 单组系板状裂缝模型

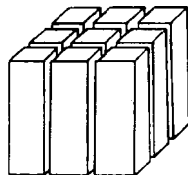


图 10-5 多组系垂直裂缝模型

第二类,多组系垂直裂缝模型。其形状类似于火柴棍,所以又称之为火柴棍模型,如图 10-5 所示。

第三类，网状裂缝模型。又称之为立方体模型 如图 10-6 所示。

这三类模型的渗透率计算公式分别为
单组系裂缝模型

$$k_f = 8.50 \times 10^{-4} b^2 \varphi_f \quad (10-2)$$

多组系垂直裂缝模型

$$k_f = 4.24 \times 10^{-4} b^2 \varphi_f \quad (10-3)$$

网状裂缝模型

$$k_f = 5.66 \times 10^{-4} b^2 \varphi_f \quad (10-4)$$

其中 k_f 单位为 μm^2 ; b 为裂缝宽度 单位为 μm ; φ_f 单位为小数。

当煤基质岩石具有一定的孔隙度时，对整个储层的渗透率仍有一定的影响，影响的方式是基质岩石的渗透率与裂缝渗透率简单相加 即

$$k_t = k_b + k_f$$

式中 k_t 为煤储层的渗透率; k_b 为煤储层基质的渗透率; k_b 例如可用常规储层的渗透率计算公式计算。

10.1.3.2 基于斯通利波信息的储层渗透率反演方法

利用现代声波测井技术（例如，声波全波测井技术、阵列声波测井技术等），目前已可以清楚地记录到斯通利波信息。我们知道，斯通利波是以井壁扩张和压缩的形式沿着井筒传播的，它促使孔隙流体在岩石骨架间运动，从而带走一部分能量，导致斯通利波能量的衰减。随着声波的传播，能量损耗与粘性流体和岩石骨架之间的相对运动成比例，能量损耗还与孔隙让流体通过的能力有关。因此，斯通利波能量的衰减与储层的渗透率、流体粘度、流体压缩率等因素有关。这就使得我们能够根据斯通利波信息进行储层渗透率定量分析。

根据声波测井理论，假设斯通利波能量的衰减记为 $F(r, k)$ ， $f(r)$ 为斯通利波能量的实测信息，则基于斯通利波信息的储层渗透率反演可归结为如下约束最优化问题

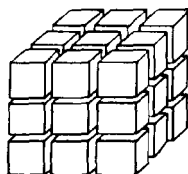


图 10-6 网状裂缝模型

$$\begin{aligned} \min \phi(k) &= \min \| W[f(r) - F(r, k)] \| \\ \text{s.t. } &h_i(r, k) = 0, i = 1, 2, \dots, I \\ &g_j(r, k) \geq 0, j = 1, 2, \dots, J \end{aligned} \quad (10-5)$$

其中 $\phi(k)$ 为渗透率反演最优化问题的目标函数, W 为权系数向量, r 和 k 为位置向量和包含渗透率在内的待求向量, $h_i(r, k)$ 为等式约束函数, I 为等式约束函数个数, $g_j(r, k)$ 为不等式约束函数, J 为不等式约束函数个数。

为了求解约束最优化问题 (式 10-5), 提出采用复合形法和遗传算法进行求解。下面 10.2 和 10.3 两节就讨论它们的基本原理与迭代计算方法。

10.2 煤层气储层渗透率反演的复合形方法

10.2.1 引言

复合形方法是一种最优化方法, 目前该方法已在地球物理领域得到应用。例如, 侯俊胜等 (1995) 讨论了复合形方法在重磁物性约束反演中的应用问题。

根据最优化理论可知, 复合形方法可用于求解具有下面不等式约束的非线性规划问题:

$$\begin{cases} \min f(x) & x \in E^n \\ \text{s.t. } g_k(x) \geq 0 & k = 1, 2, \dots, p; a_i \leq x_i \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (10-6)$$

其中 $f(x)$ 为最优化问题的目标函数, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, x 为解向量, 它属于 n 维欧氏空间 E^n , $g_k(x) \geq 0$ 为隐式约束, $a_i \leq x_i \leq b_i$ 为显式约束 (a_i 与 b_i 分别为 x_i 的上下限)。由约束条件所确定的子空间 $R^n \in E^n$ 我们称 R^n 为约束解的可行区域 (或称为可行集), x 为一个可行点。将式 10-6 与式 10-5 对比可知, 用复合形方法可以求解煤储层渗透率的约束优化问题。应该指出, 上面仅指出复合形方法可用于求解具有下面不等式约束的非线性规划问题, 实际上它可用于包括等式和不等式约束的非线性规划问题, 这是

因为等式约束可化为不等式约束问题。为此，我们下文就要讨论复合形方法的基本原理及其应用的基本途径等问题。

10.2.2 复合形方法的基本思想

在 n 维欧氏空间中，由不处于同一个超平面上的 $(n+1)$ 个顶点所构成的凸多面体是该空间中最简单的几何图形，我们称它为单纯形 (simplex)。例如，在二维空间中，单纯形为三角形，在三维空间中，单纯形为四面体等。然而，由 $k > n+1$ 个顶点构成的几何图形称之为复合形 (Complex)。复合形方法是常规单纯形方法（包括其改进的单纯形方法）应用于约束问题的推广，它是用于不等式约束条件下直接搜索的一种最优化方法。我们知道，单纯形方法用于求解最优化问题不必计算目标函数 $f(x)$ 的梯度，而是对 n 维空间中的 $n+1$ 个点（它们构成一个单纯形的各顶点）上的函数值进行比较，通过反射、映射、扩张、延伸以及收缩、压缩等策略，丢掉其中最差的点，代之以新的顶点，从而构成一个新的单纯形，重复上述过程，达到逐步逼近最优值的目的。

通过分析单纯形方法的迭代过程不难看出，它的新旧点更新，仅利用了各顶点目标函数值大小，因此单纯形方法是一种求解无约束的最优化方法。并且，单纯形是由 $n+1$ 个顶点组成，因而容易产生退化，即落在一个低维空间中。为了克服单纯形方法的上述缺点，复合形方法各顶点的新旧变化，不仅要使目标函数值下降，而且要求各顶点在约束条件所确定的可行区域中变化，并且，复合形的顶点个数 k 大于 $n+1$ 个，即 $k \geq n+2$ （一般是令 $k = 2n$ ），这也就是我们称该方法为复合形方法原因所在。

复合形方法要求给出 k 个初始可行点，构成初始复合形（一般是随机产生 k 个初始可行点），然后对复合形各顶点的目标函数值逐一比较，不断丢弃最坏点，代之以既能使目标函数值有所改进，又满足约束条件的新顶点，重复上述过程，直至找到目标函数的最优优点。

10.2.3 复合形方法的迭代算法

(1) 产生初始复合形的 k 个顶点。

初始复合形顶点的产生有三种方法：

1) 复合形的全部顶点用随机方法产生；2) 在可行域内人为地选定一个顶点，其余顶点利用随机方法产生；3) 复合形的全部顶点人为选定。

这三种方法比较起来，第三种方法收敛最快，但要在可行域 R^n 内选出全部顶点比较麻烦一点；第二种方法次之；第一种方法收敛较慢，但是，不必人为地在可行域内选点，最为方便。究竟采用哪一种方法，要视具体问题而定。

当采用第一种方法时，利用计算机产生的随机数 $Q_i^{(1)}$ 产生初始复合形的第一个顶点

$$\begin{cases} x_i^{(1)} = a_i + Q_i^{(1)}(b_i - a_i) \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (10-7)$$

显然，用随机方法产生的顶点，必定满足显式约束条件，但不一定满足隐式约束条件，因此必须检查是否在可行域 R^n 内，如果不在 R^n 内，则重新产生随机数再选点。直到第一个顶点在 R^n 内为止。然后，再随机产生复合形的其他 $k-1$ 个顶点。即

$$\begin{cases} x_i^{(j)} = a_i + Q_i^{(j)}(b_i - a_i) \\ i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (10-8)$$

同样，这些顶点也都满足显式约束条件，但是，不一定都满足隐式约束条件。因此，在产生过程中，必须逐个检查是否在 R^n 内，并且使之成为可行点。

假设已经有 S 个点 ($S \geq 1$) 满足约束条件，这些点是 $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(S-1)}, x^{(S)}$ ，则可以先求出这些点构成的点集中心

$$\bar{x}^{(S)} = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S x^{(j)} \quad (10-9)$$

如果现在遇到第 $(S+1)$ 个顶点不满足隐式约束条件，则将 $x^{(S+1)}$ 沿 $x^{(S+1)}$ 与 $\bar{x}^{(S)}$ 的连线向中心点 $\bar{x}^{(S)}$ 缩小，即

$$x^{(S+1)} = \bar{x}^{(S)} + \alpha_1 (x^{(S+1)} - \bar{x}^{(S)}) \quad (10-10)$$

其中 α_1 为压缩系数，一般取 $\alpha_1 = 0.5$ 。

然后,再次检查新点 $x^{(s+1)}$ 是否满足隐式约束条件,如果仍不满足,则再沿原方向朝 $\bar{x}^{(s)}$ 点再缩小一半距离。如此重复该过程一直到 $x^{(s+1)}$ 点成为可行点为止,即 $x^{(s+1)} \in R^n$ 。按同样的方法,对剩下的点逐个进行调整,使全部 k 个顶点都成为可行点为止。

(2) 构成复合形。

以 $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(k-1)}, x^{(k)}$ 为顶点构成复合形,计算各顶点的目标函数 $f(x^{(j)})$, $(j = 1, 2, \dots, k)$ 。

比较各顶点的目标函数值,找出最坏点 $x^{(h)}$ 和最好点 $x^{(l)}$ 即

$$f(x^{(h)}) = \max_{1 \leq j \leq k} f(x^{(j)}) \quad (10-11)$$

$$f(x^{(l)}) = \min_{1 \leq j \leq k} f(x^{(j)}) \quad (10-12)$$

转入第 (6) 步。

(3) 寻求映像点。

计算 $k-1$ 个顶点 ($x^{(h)}$ 除外) 的中心点 $\bar{x}^{(o)}$ 即

$$\bar{x}^{(o)} = \frac{1}{k-1} \left(\sum_{j=1}^k x^{(j)} - x^{(h)} \right) \quad (10-13)$$

同时检查 $\bar{x}^{(o)}$ 是否为可行点 如果 $\bar{x}^{(o)} \in R^n$ 则选择一个反射系数 α_2 ($\alpha_2 \geq 1$) 例如可取 $\alpha_2 = 1.3$ 由最坏点 $x^{(h)}$ 通过 $\bar{x}^{(o)}$ 作 α_2 倍的映射 便得映像点 $x^{(a)}, x^{(a)}$ 由下式求出

$$x^{(a)} = \bar{x}^{(o)} + \alpha_2 (\bar{x}^{(o)} - x^{(h)}) \quad (10-14)$$

然后转向第 (4) 步。

如果 $\bar{x}^{(o)}$ 不是可行点,即 $\bar{x}^{(o)} \notin R^n$, 可按两种方法进行调查。第一种以 $x^{(l)}$ 为起点, $\bar{x}^{(o)}$ 为端点的超立方体中,重新利用伪随机数产生新复合形的各个顶点。即令

$$a_i = x_i^{(l)}, b_i = x_i^{(o)}, i = 1, 2, \dots, n$$

其中 $x_i^{(l)} = (x_1^{(l)}, x_2^{(l)}, \dots, x_n^{(l)})^T$; $\bar{x}^{(o)} = (x_1^{(o)}, x_2^{(o)}, \dots, x_n^{(o)})^T$ 。

然后,转回第 (1) 步。第二种方法就是直接选出最好点作为最优解输出。

(4) 检查映像点的可行性。

如果 $x^{(a)} \in R^n$ 则转向第 5 步。

如果 $x^{(a)} \notin R^n$ 将反射系数 α_2 缩小 (例如 取 $\alpha_2 = 0.5\alpha_2$) , - 直到 $x^{(a)}$ 成为可行点为止, 然后转向第 5) 步。

(5) 计算 $f(x^{(a)})$ 并与 $f(x^{(h)})$ 作比较。

如果 $f(x^{(a)}) < f(x^{(h)})$ 则以 $x^{(a)}$ 代替 $x^{(h)}$ 构成新的复合形, 转回第 2) 步。否则, 将步长压缩, 即以 $\lambda\alpha_2$ 其中 λ 为压缩因子, 一般取 $\lambda = 0.5$ 代替原来的 α_2 , 得一新点。并计算新点的目标函数值 如果新点比 $x^{(h)}$ 点好, 即新点的目标函数值小于 $f(x^{(h)})$, 则用新点代替 $x^{(h)}$ 转回第 2) 步。如果仍无改进, 则将 α_2 应进一步缩小 直到 α_2 小于一个预先给定的很小的正数 ϵ' (例如可取 $\epsilon' = 10^{-6}$)。如果这时目标函数仍无改善, 可按两种方法进行。第一种方法, 找出复合形各顶点中的次坏点 $x^{(sh)}$ 即

$$f(x^{(sh)}) = \max_{\substack{1 \leq j \leq k \\ j \neq h}} f(x^{(j)}) \quad (10-15)$$

并以 $x^{(sh)}$ 代替最坏点 $x^{(h)}$ 。然后寻求新的映像点, 即转回第 (3) 步。也可以用第二种方法, 即以最好点作为最优解输出。

(6) 收敛终止准则。

如果复合形诸顶点的目标函数值满足如下条件:

$$\left\{ \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [f(x^{(i)}) - f(x^{(j)})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} < \epsilon \quad (10-16)$$

则迭代终止, 此时 $x^{(i)}$ 就是满足精度要求的最优解, 否则就转向第 (3) 步。其中 ϵ 是预先给定的一个小正数, 例如可取 $\epsilon = 10^{-8}$ 。因此, 根据上述该方法的迭代计算步骤, 不难写出其程序流程, 用 Fortran 高级程序语言编制了该方法的计算机程序, 并且已在 PC 机上调试通过。

10.2.4 有关问题讨论

(1) 假如渗透率反演问题可以修改为如下约束最优化问题:

$$\begin{cases} \min \phi(k) = \min \| W[f(r) - F(r, k)] \| \\ \text{s.t. } k_{\min} \leq k \leq k_{\max} \end{cases} \quad (10-17)$$

分析式 10-12 问题的显示约束条件不难看出, 该显示约束所确定

的解可行区域为一凸集，因此，用随机方法产生的初始复合形各顶点以及用式 10-13 和式 10-14 计算出的中心点 $\bar{x}^{(0)}$ 和反射点 $x^{(a)}$ 必定是可行点，即 $\bar{x}^{(0)} \in R^n, x^{(a)} \in R^n$ 。因此程序中就不必对它们进行显示约束条件的检验，这样就可以大大加快收敛速度，降低计算时间。对于地球物理反演问题，往往我们仅能给出约束条件的显示约束，即解的可行区域为一凸集，从这一点上讲，对复合形反演是有利的。

(2) 对迭代过程可作如下一些修改，将复合形的 k 个顶点，按目标函数值的大小来排列，即

$$f(x^{(1)}) \leq f(x^{(2)}) \leq \dots \leq f(x^{(k)}) \quad (10-18)$$

并令
$$\Delta f_j = \frac{f(x^{(k)}) - f(x^{(j)})}{f(x^{(k)}) - f(x^{(1)})}, j = 2, 3, \dots, k, \quad (10-19)$$

这样，中心点的计算公式 10-8 可以修改为

$$\bar{x}^{(0)} = \sum_{j=2}^k (\Delta f_j)^\beta \cdot x^{(j)} / \sum_{j=2}^k (\Delta f_j)^\beta, \beta \geq 0 \quad (10-20)$$

也就是说，可用加权的中心（又称质心）点代替上述的等权权重系数等于 1 的中心点。假如令 $\beta = 0$ ，式 10-20 即转化为式 10-13，因此，式 10-13 只不过是式 10-20 $\beta = 0$ 的情形。

(3) 关于迭代收敛终止准则，还可以选用如下一些计算公式。

1) 根据式 10-13 的函数排序，收敛终止准则公式可选用

$$|f(x^{(k)}) - f(x^{(1)})| < \varepsilon \quad (10-21)$$

$$\left| \frac{f(x^{(k)}) - f(x^{(1)})}{f(x^{(k)})} \right| < \varepsilon' \quad (10-22)$$

2) 选用 k 个顶点的目标函数值广义绝对值之和作为终止准则，即

$$\left\{ \sum_{j=1}^k |f(x^{(j)})|^p \right\}^{1/p} < \varepsilon'', p > 0 \quad (10-23)$$

3) 利用李氏 (Liapunov) 指数（简称 L 指数）作为收敛准则。

非线性地球物理反演的迭代过程可以和非线性动力学系统的混沌 (Chaos) 运动相比，这一点不难从输出序列走向无序， L 指数的变化反映出迭代状态的阶段性和相空间吸子存在这三方面看出

来(杨文采,1993)。前人通过对地震道非线性反演问题的研究表明,利用最佳拟合准则并不能给出令人满意的解估计,然而,由于采用 L 指数却能很好地反映出迭代的阶段性。因此,可利用 L 指数作为迭代反演的实质性指标,根据 L 指数的大小,来判定它是否终止迭代反演计算。

(4) 模拟退火——复合形反演联合算法。

作为对上述复合形反演方法的一种改进,提出采用模拟退火方法产生初始复合形的 k 个顶点,然后,以这 k 个顶点为基础,继续使用复合形方法寻求最优点。因此,该修改算法可以分为如下两个步骤:

1) 模拟退火产生初始复合形的 k 个顶点。

第一步,随机产生复合形的第一个顶点 $x^{(1)}$, 给定初始温度 T_0 令 $p = 1$;

第二步,随机产生复合形一个新顶点 $x^{(i)}$ 并计算

$$\Delta f = f(x^{(i)}) - f(x^{(i-1)})$$

如果 $\Delta f < 0$, $x^{(i)}$ 作为一个新的顶点 $p = p + 1$ 如果 $\Delta f \geq 0$ 按概率 $\exp(-\Delta f/T)$ 接受 $x^{(i)}$ 。

第三步 检查 p 是否等于 k 。如果 $p = k$ 转向第五步 如果 $p < k$ 转向第四步;

第四步,按一定方式降温 $T_i = \lambda T_{i-1} (0 < \lambda < 1)$ 转向第二步;

第五步 以当前 k 个顶点作为初始复合形的顶点;

2) 利用上述复合形方法进行寻求最优解。

(5) 作为求解不等式约束最优化问题的复合形方法,通过对比分析,它具有如下一些特点:

1) 由于本方法是一种约束最优化方法,因此与过去传统的无约束最优化方法(例如,最速下降法、共轭梯度法、阻尼最小二乘法以及单纯形方法等)相比,本方法所求出的解既能保证数学上最优,同时又符合地球物理场的物理意义。

2) 本方法是一种约束最优化的直接方法,与基于梯度的约束最优化方法(例如,罚函数法,简约梯度法等)相比较,不需要计算

目标函数的梯度，因而就不要求目标函数可微，因此，该方法可以很容易地推广到难以给出正演解析公式的其他物探方法的反演计算（例如，重磁法、地下物探和地震勘探等），并且避开了基于梯度的约束最优化方法出现的算法不稳定问题。

3) 根据有关的最优化理论，本方法仅适用于求解向量小于 20 的最优设计问题。根据我们的研究结果表明，只要能给出快速的正演方法，本方法同样可以用于求解高维的最优化问题。

10.3 煤层气储层渗透率反演的遗传算法

10.3.1 引言

遗传算法 (Genetic Algorithm, 简称 GA 算法) 是由美国密执根 (Michigan) 大学著名学者侯兰 (J. H. Holland) 于 20 世纪 60 年代中期到末期提出并创立的。自 60 年代以来，许多其他学者（例如佛格 (Fogel)、瑞臣博格 (Rechenberg) 等）对遗传算法的发展和应用也都做出了重要贡献。尤其是自 80 年代中期以来，遗传算法得到了迅速的发展，掀起了一股研究和应用遗传算法的热潮。目前，遗传算法已经在生物学、遗传学、信息处理以及社会学等方面得到了应用。在地球物理学科中，自 90 年代以来，人们已经将遗传算法应用于地震波场、重磁、电阻率以及地球物理测井的反演等问题。例如，斯通法 (Stoffa) 等 (1991) 用遗传算法解决平面波地震图反演这一非线性多参量最优化问题；山幕瑞桔 (Sambridge) (1991, 1992) 讨论了遗传算法在波形反演中的应用问题；侯俊胜等 (1996) 讨论了遗传算法在重磁约束反演中的应用问题。关于遗传算法在测井中的应用研究目前则刚刚起步。根据我们所掌握的资料，还没有见到有关应用 GA 进行渗透率反演方面公开发表的文献。为此，本节结合测井煤层气渗透率约束反演问题，对该方法的基本思想，迭代算法及其应用步骤等问题进行了研究。不难理解，这必将对今后进一步提高渗透率反演效果有较大的推动作用。

10.3.2 GA 算法的基本思想

大家知道，生物往往具有一些奇特的功能，与其生活环境高度

适应，然而，生物界的种群究竟是如何演化和发展使它们具备了这些奇特功能的呢？生物学中的达尔文进化论和孟德尔—摩根遗传学说给予了较详细地解释。根据生物进化论和遗传学说，生物界的种群按照物竞天择、适者生存的原则，并通过遗传、变异以及优胜劣汰规律，使其不断进化，以适应环境的变化。最后，与环境较好适应的种群个体可能生存下来，反之，就可能消亡。并且，生存下来的种群个体继承了父代的优良特征。遗传算法的基本思想正是基于模仿生物界的遗传过程。它把问题的参数用基因代表。把地球物理反问题的解用染色体代表（在计算机即为字符串），从而得到一个具有不同染色体个体组成的群体，这个群体在问题特定的环境里生存竞争，适者有最好的机会生存和产生后代。后代并随机地继承了父代的最好特征。并且在生存环境的控制支配下继续这一过程。这样群体的染色体都将逐渐适应环境，不断进化，最后收敛到一族最适应环境的类似个体，该族的算术平均值即为所求问题的最优解。

10.3.3 GA 的迭代算法

根据上述遗传算法的基本解题思路以及渗透率约束反演优化问题式 10-5 的特点，应用遗传算法进行渗透率反演可以归纳为如下三个过程：

(1) 选择目标函数和对渗透率编码。

根据式 10-5 渗透率约束优化问题，选择 $\phi(k)$ 作为遗传算法反演的目标函数，以便评价迭代结果的优劣。由于遗传算法的反演计算是以基因码（在计算机中即为二进制的“0”与“1”）进行的，所以，应将渗透率变量 k 按二进制来编码，并将 k 的每一个参量编码后再依次连接在一起形成一个位串，这个位串就是遗传的染色体。染色体的长度取决于参数的约束范围和模型分辨率，即

$$2^N = \frac{k_{\max}^{(j)} - k_{\min}^{(j)}}{\Delta k_j}, j = 1, 2, \dots, N$$

其中 N 为染色体长度， Δk_j 为模型分辨率。

在进行参数编码时，可以将 N 个参数分别单独编码，也可以

将全部参数编入一条染色体上，各参数只占染色体的一段，下面介绍后一种编码方法在 GA 中的应用。

(2) 确定种群数 Q 和随机产生初始种群。

所谓种群数 Q 即是用来遗传计算的一组模型 $k^{(1)}, k^{(2)}, \dots, k^{(Q)}$ 的数目。 Q 的大小要综合考虑收敛速度和计算量等因素。目前，还只能结合具体问题特点，依靠试验选定。根据给定的磁化强度显式约束条件，应用随机方法产生种群的初始模型。然后，从随机形成的一组初始模型开始，即可进行下面的繁殖、交配和变异。

(3) 遗传迭代反演。

1) 繁殖 (选择) 繁殖是根据现有各个体目标函数值的大小模拟生物界择优去劣的原则进行的。首先根据各个体目标函数，求出它们的生存概率，比较优秀的个体具有较大的生存概率，即具有较小的目标函数值；然而，比较差的个体具有较小的生存概率，即具有较大的目标函数值。因而，根据生物界优胜劣汰、适者生存的原则，优秀个体可能被选择，较差的个体被淘汰。所以，这样产生的下一代个体都具有较大的生存概率。并且，在遗传算法中人为地保持种群总数 Q 不变。这样，经过繁殖之后，就选出了 Q 个新模型作为父母一代。

2) 交配 (交叉)：交配就是从父母一代种群中随机地选择两两一组的双亲，即随机地配成 $Q/2$ 对模型，然后，按预先给定的交配概率 P_c ，决定某一种模型的二进制位串上的某一部分是否进行交换而最后各自产生两个新染色体 (即有新参数的模型) 即获得孩子一代模型。参加交配的个体数目由 P_c 大小决定，当 $P_c = 1$ 时，全部个体都参与交配。

3) 变异：变异就是孩子一代种群上的某一模型，按预先给定的变异概率 P_m ，随机地选取一位或者多位进行 0 到 1 或者 1 到 0 的变化 (或称奇偶变化)，二进制数码的变化也就代表了模型参数的变化，从而产生了新一代模型。变异概率 P_m 一般很小 当 $P_m = 1$ 时就退化为了蒙特卡罗方法。

(4) 遗传计算终止原则

上述三步遗传计算不断重复地进行，搜索的渗透率模型所对应的目标函数 $\phi(J)$ 将不断地下降，直到 $\phi(J) \leq \epsilon$ (ϵ 为给定的迭代反演终止限)，并且种群里的所有 J 几乎取相同值，迭代即可终止，此时 Q 个模型的平均值（或者质心）即为所求的渗透率最佳估算值。

应该指出，遗传计算的繁殖、交配与变异都有其各自的独特作用。繁殖可以淘汰不好的模型保留较优秀的模型，总体上决定反演模型向目标函数值下降的方向前进；交配可以产生新的子模型，尽管有的模型可能继承了父母的缺点而更差，但也可能产生比父母都更优的子模型，因而反映了不同的种群模型之间的信息共享程度；变异可以产生父母原来都不具备的新基因，因而有可能产生仅由交配无法创造的良好基因，保证了一定程度上的种群多样性。没有变异，模型就很有可能陷入局部极小状态。

应用上述 GA 的迭代算法，不难编制其计算程序，应用计算程序即可进行渗透率的反演。

10.3.4 几点结论

通过综合分析和对比，可以得出如下几点结论：

(1) 根据最优化理论，遗传算法实质上是一种求解不等式约束最优化问题的随机优化方法。但是，它与传统的基于梯度的确定性约束优化方法相比较，克服了传统方法因线性化引起的不稳定性以及依赖于初始模型选择而易于陷入局部极小点等缺点。并且，它本身是一种全局寻优方法，不需要计算目标函数的梯度。它与传统的随机优化方法相比较，由于遗传算法的每一步搜索，都要充分利用已有知识来指导解空间的搜索，如果搜索到了一个优秀模型，其有关信息就会遗传给下一代。然而，传统的蒙特卡罗等方法在搜索完一下模型之后，不管这个模型好坏，没有保留任何关于这个模型的信息。因而，降低了搜索效率。此外，遗传算法自始至终保留了 Q ($Q \geq 1$) 个当前解，这样不仅使近似解的优化程度有所提高，同时使得并行化易行且可获得近似线性加速效果。

(2) 由于遗传算法优劣评判仅利用了目标函数 $\phi(k)$ 而 $\phi(k)$

只要有正演公式就可以计算（但要求正演计算方法速度快），因此该方法可以很方便推广到其他地球物理（重磁、电法和地震）的反演计算，并且，也可以很方便地进行地球物理数据的联合反演。例如，测井与地面物探、重磁、地震联合反演等。

(3) 将遗传算法具有全局寻优的优点与传统的专门问题反演方法有高效率优点结合起来，可能是一种既效率高、又避免陷入局部极小而遗漏全局极小的较好选择。

(4) 与前面几章讨论过的 BP 神经网络方法，复合形反演方法类同，假若能够综合利用测井和地面物探资料，不但可以提高反演结果的精度，而且还可以进一步缩小反演多解性问题以及进行井间渗透率预测。

10.4 煤层气储层综合评价方法探讨

煤层气储层综合评价是煤层气整个储层评价的重要组成部分。当完成煤层气储层定性分析和储层参数评价之后，紧接着就是煤层气储层综合评价分析。我们知道，当煤层气储层确定之后，下面的问题就是需不需要对煤储层采取进一步的工程措施？采取什么样的工程措施最好？按什么样顺序来进行这些措施？如像对待某一煤储层是裸眼完井好呢？还是射孔完井好呢？还需不需要进行压裂、酸化？用什么样的压裂、酸化施工方案？等等诸如此类问题的回答，仅用前面的煤层气储层定性分析和储层参数评价结果是远远不够的，因为这些评价结果对储层好坏并不都存在着一致的影响关系。大的孔隙度并不一定对应着高的渗透率，发育的裂缝并不一定有大的孔隙度，很好的孔隙性、渗透性，并不一定有高的含气量，很好的储集物性并不一定有足够的有效厚度。凡此种种现象都表明，上述问题的回答必须依赖于对煤储层各种性质的综合考察，进而对煤储层作出一个完整的、确切的总体评价，这就是本节所要讨论的综合评价。

10.4.1 煤层气储层综合评价指标

煤层气储层综合评价方法是从储层的多种参数出发，包括储

层定性的和定量的性质，找出它们与储层煤层气储量和产能的内在关系，并用一个相对的概念来估计其贡献的大小，从而对储层好坏作出等级的分类和产能的估计。因此在综合评价中，应采用足够多的信息，包括测井的、地质的、钻井的和测试的资料，也应尽可能把影响储层好坏的各种因素都考虑到，例如，煤岩性质、结构、构造、裂缝状态、储集类型、孔隙度、流体性质、含气量、渗透率和有效厚度等等。然后对反映这些因素的信息，根据它们对地质因素反映的可信度和地质因素对储层好坏贡献的大小，赋予相应的权值，并用一定的计算式计算这种权值大小的各种储层评价指标，最后用一定的数学方法将这些指标综合起来作为最终评价储层的指标。

通过综合分析前人已提出的裂缝性储层评价指标（赵良孝等，1994），并结合煤层气储层综合评价的特点，拟提出以下评价指标：

(1) 煤岩性质和结构指标 L_x 。

对于煤层气储层剖面，通常认为不含杂质的纯煤层岩性和结构较好，故令其岩性和结构指标 $L_x = 1$ ；其他煤层岩性和结构次之。当煤层含有泥质时，储集物性明显变差，因此必须将泥质含量考虑进去，于是岩性和结构指标 L_x 可用下式表示

$$L_x = L_x(1 - V_{sh}) \quad (10-24)$$

其中， V_{sh} 为泥质含量，用小数表示。

(2) 裂缝类型指标 T 。

实际资料表明，网状裂缝的储渗性能最好，故令其 T 值为 1；高角度裂缝次之，令其 T 值为 0.8，但由于高角度裂缝的径向延伸情况，直接影响到它的储渗价值，因此应乘上一个径向延伸系数 R 。当裂缝的径向延伸为深延伸时 $R = 1$ ，为浅延伸时 $R = 0.5$ ，为极浅延伸时 $R = 0$ 。这样高角度裂缝的 T 值为 $0.8R$ ，低角度裂缝较差，可令其 T 值为 0.6，无裂缝发育的 T 值为 0。

(3) 裂缝发育程度指标 I 。

利用岩石破裂系数作为裂缝发育程度指标，即

$$I = \frac{E_{ma} - E}{E_{ma}} \quad (10-25)$$

其中, E 为煤岩体的动弹性模量, 可利用测井资料求得; E_{ma} 为煤岩石骨架的动弹性模量, 由理论值得。

(4) 裂缝孔隙度指标 F 。

裂缝孔隙度指标 F 定义为

$$F = \frac{\varphi_f}{\varphi_T} \quad (10-26)$$

其中, φ_f 为裂缝孔隙度, φ_T 为煤岩的总孔隙度。

(5) 渗透率指标 P 。

渗透率指标 P 定义为

$$P = \left(\frac{k_t - k_e}{k_t} \right) \quad (10-27)$$

其中, k_t 为利用测井资料计算出的煤储层总渗透率; k_e 为有效渗透率的下限值。

(6) 煤层气含量指标 G 。

煤层气含量指标 G 定义为

$$G = \left(\frac{V_g - G_e}{V_g} \right) \quad (10-28)$$

其中, V_g 为利用测井资料计算出的煤层气储层含气量; G_e 为煤层气储层有效含气量的下限值。

(7) 有效厚度指标。

有效厚度指标 H 定义为

$$H = \left(\frac{h_t - h_e}{h_t} \right) \quad (10-29)$$

其中, h_t 为利用测井资料计算出的煤层有效厚度; h_e 为有效厚度的下限值。

10.4.2 煤层气储层综合评价方法

根据上述综合评价指标, 进行煤层气储层综合评价可采用如下几种综合评价方法:

(1)简单的定性对比方法;(2)加权因子分析法;(3)模糊综合评价法与灰色综合评价法;(4)神经网络综合评价法;(5)其他。

参 考 文 献

- 1 侯俊胜. 基于神经网络与随机优化的物探数据解释方法研究. 中国地质大学博士后研究报告, 1995
- 2 赵良孝, 补勇编著. 碳酸盐岩储层测井评价方法. 北京: 石油工业出版社, 1994. 144
- 3 钱凯, 赵庆波, 汪泽成等编著. 煤层甲烷气勘探开发理论与实验测试技术. 北京: 石油工业出版社, 1996. 188
- 4 潘和平, 黄智辉. 利用模糊模式识别煤成气层. 地球科学, 1993, 18(1): 84 ~ 94
- 5 雍世和. 最优化测井解释. 东营: 石油大学出版社, 1995. 268
- 6 丁次乾主编. 矿场地球物理. 东营: 石油大学出版社, 1992. 377
- 7 杨文采. 非线性地震道的混沌反演—II 关于 Lyapunov 指数和吸引子. 地球物理学报, 1993, 36(3): 376 ~ 387
- 8 侯俊胜, 管志宁, 姚长利. 地球物理反演的复合形方法及其应用. 中国地球物理学会年刊, 1995, 368
- 9 侯俊胜, 管志宁. 遗传算法在磁异常反演中的应用. 物探与化探, 1996, 20(3): 40 ~ 45
- 10 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释. 东营: 石油大学出版社, 1996. 590
- 11 南京大学数学系编. 最优化方法. 北京: 科学出版社, 1978. 185
- 12 薛嘉庆编. 最优化原理与方法. 北京: 冶金工业出版社, 1983. 352
- 13 万耀青等编. 最优化计算方法常用程序汇编. 北京: 工人出版社, 1983
- 14 伍先运, 郭立, 王克协. 利用斯通利波求取储层渗透率的方法与应用研究. 中国地球物理学会年刊, 1993, 45
- 15 黄宝华, 王克协, 常明澈等. 利用横波衰减求取储层渗透率的理论与方法研究. 中国地球物理学会年刊, 1994, 72
- 16 Zehui Huang *et al.*. 1996, Permeability prediction with artificial neural network modeling in the Venture gas field, offshore eastern Canada: Geophysics, 61, 422 ~ 436

- 17 James, W. Rector III (Editor), 1995, Crosswell methods – Special issue: Geophysics, 60(3), 627 ~ 920
- 18 Xiaoming Tang and C. H. Cheng, 1996, Fast inversion of formation permeability from Stoneley wave logs using a simplified Biot-Rosenbaum model: Geophysics, 61, 639 ~ 645
- 19 Stoffa, P. L. *et al.*, 1991, Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms: inversion of plane wave seismogram: Geophysics, 56(11) 1794 ~ 1810
- 20 Berg E., Simple convergent genetic algorithm for multiparameter data, 60th SEG Mtg Expanded Abstracts, 1990, 1120 ~ 1128
- 21 Tokuo Yamamoto *et al.*, 1995, Imaging the permeability structure of a limestone aquifer by crosswell acoustic tomography. Geophysics, 60, 1634 ~ 1645

附录 A 本书常用符号及其意义

符号	意 义	符号	意 义
ML	微电极测井		
MLP	微电位测井	ρ_{MLP}	微电位测井视电阻率
MLG	微梯度测井	ρ_{MLG}	微梯度测井视电阻率
LLD	深侧向测井	ρ_{LLD}	深侧向测井视电阻率
LIS	浅侧向测井	ρ_{LIS}	浅侧向测井视电阻率
LL8	8 侧向测井	ρ_{LL8}	8 侧向测井视电阻率
IL	感应测井	ρ_{IL}	感应测井视电阻率
ILD	深感应测井	ρ_{ILD}	深感应测井视电阻率
ILM	中感应测井	ρ_{ILM}	中感应测井视电阻率
ρ_s	视电阻率	$\rho_T(\gamma_t)$	地层真电阻率(电导率)
ρ_{10}	冲洗带电阻率	ρ_i	侵入带电阻率
SP	自然电位测井	V_{SP}	自然电位
FMS	微电阻率扫描测井	ρ_{FMS}	微电阻率扫描测井视电阻率
AC	声波时差测井	Δt	声波测井纵波时差
DEN	密度测井	ρ_b	测井密度
FDC	补偿密度测井	ρ_{FDC}	补偿密度测井密度
		P_e	光电吸收指数
CNL	补偿中子测井	C_{NL}	中子测井孔隙度或含氢指数
GR	自然伽马测井	N_{GR}	自然伽马总强度
SWN	井壁中子测井	φ_{SWN}	井壁中子测井孔隙度
C/O	碳氧比能谱测井	C_O	碳氧比能谱测井值
CAL	井径测井	d_h	井径
T	温度测井	T	测井温度
BHTV	井下电视		
v_c	碳的体积分数	w_c	碳的质量百分数
v_{fc}	固定碳的体积分数	w_{fc}	固定碳的质量百分数
v_{vm}	挥发分的体积分数	w_{vm}	挥发分的质量百分数
v_a	灰的体积分数	w_a	灰的质量百分数
φ	水的体积分数或孔隙度	w_w	水的质量百分数
φ_s	基质孔隙度	φ_f	裂缝孔隙度
V_f	煤层气含量	k_f	裂缝渗出率
R_0	镜煤反射率	k_b	基质渗透率

附录 B COALBG 软件的使用说明

B.1 软件功能

COALBG 软件是依据煤层体积模型和概率统计模型等方法的煤层气测井资料处理解释程序。它首先读入输入数据,依据测井信息和模式识别方法判别煤层,如果是煤层,则对其进行解释处理,具体计算有煤质含量、煤层含气量、镜煤反射率、煤层裂缝孔隙度、裂缝渗透率等参数;如果不是煤层,则采用常规储层的处理解释方法,计算储层的孔、渗、饱等参数。

B.2 软件输入参数

COALBG 软件的测井输入数据采用磁盘 LA716 格式。COALBG 软件在运行过程中使用的参数从当前目录下的 COALBG.PAR 参数文件中读取,因此在运行 COALBG 软件之前必须用写字板或其他文本编辑软件在当前目录下建立一个 COALBG.PAR 文件或在已有的 COALBG.PAR 参数文件中修改或增加所需的参数。

COALBG 软件采用测井资料微机处理系统标准参数文件格式建立 COALBG.PAR 参数文件,每一组参数由参数组鉴别块开始,在程序运行过程中,通过参数组鉴别号引用指定的一组参数,具体格式如下:

COALBG	DATE:10/09/2000	数据修改日期
3		井编号
#	# PARAMETER ID:HJS	鉴别号
*	* PROGRAM:COALBG	程序名称
*	* OPERATOR:HJS	操作者
*	* DATE & TIME:2000-09-10	时间与日期
*	* INPUT FILENAME:ou13.DLA	输入文件名
*	* OUTPUT FILENAME:Ou13-1.DLA	输出文件名
*	* PARAMETER CARDS	参数卡
2180	2330	处理井段

5	修改参数数
CARX CARY ASHX ASHY RMF	修改参数名
115 1.45 152 2.69 0.6	修改参数值
0	单井处理结束标志
0	多井处理结束标志

其中，鉴别号由 1 ~ 10 个字符、数字序列组成，用于在 COALBG.PAR 文件中惟一的标识一组参数，当在一个参数文件中有多个参数组使用同一个鉴别号，则在程序运行中只使用第一个该鉴别号的参数组；操作者由 1 ~ 20 个字符组成，用来说明该组参数的编制者；DATE & TIME 由 1 ~ 16 个数字及分隔符“ - ”组成，用来说明编制本组参数的日期和时间，格式为：年一月一日；修改参数数必须与修改参数名的个数一致，修改参数值的顺序必须与修改参数名的顺序一致；输入、输出文件名可由 1 ~ 64 个字符组成。

B.3 软件输出参数

COALBG 软件在运行过程中输出三种信息：

(1) 首先，把从参数文件中读入的解释参数和 COALBG 软件中 DATA 中赋值的解释参数存入 COALBG.PRN 文件中，该文件格式为文本格式。

(2) 把处理好的测井曲线存入指定的输出文件中，该文件格式也为磁盘 LA716 数据格式。

(3) 当软件运行中出现错误时，则显示出错信息。

B.4 软件运行过程

(1) 在写字板格式下建立或修改 COALBG.PAR 参数文件。

(2) 运行 COALBG 软件，则会出现如下提示信息：

```
*****
```

```
Coal and coalbed gas evaluation method select:
```

```
(1)Volumetric model
```

```
(2)Regression analysis
```

```
*****
```

```
Please input select number:
```

输入选择数，例如输入 1 则用体积模型法计算煤质 输入 2，
则用回归分析法计算煤质。当程序正常运行结束时，显示：

Stop—Program terminated

按任意键则返回原状态。

如果运行中出现错误，则显示出错信息，如：被零除等。