

高等学校试用教材

金属矿钻孔地球 物理勘探

武汉地质学院地下物探教研室 编著

地质出版社

一九八二年三月廿九日

21
4

高等学校试用教材

金属矿钻孔地球物理勘探

武汉地质学院地下物探教研室 编著

地质出版社

金属矿钻孔地球物理勘探
武汉地质学院地下物探教研室 编著

*

地质部教育司教材室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

沧州地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本: $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张: $16^{5/8}$ · 字数: 407,000

1980年7月北京第一版·1981年11月第二次印刷

印数3,421—5,230册·定价2.30元

统一书号: 15038·教78

前 言

金属矿钻孔地球物理勘探是地质院校金属物探专业在学习地面电法和磁法勘探基础上的后续课程。这本教材是根据我们历年来对该课程的讲授大纲，并尽可能吸取国内外生产成果编著的。共分六章，其中对金属矿床已实际应用或尚处于发展试验阶段的各种方法的原理、基础理论、仪器工作方法技术和成果解释都作了介绍。按研究空间范围，这些方法又可分井中物探和综合测井方法二部分。井中物探方法中则以叙述井中三分量磁测，井中激发极化法，井中电磁波法为主，综合测井方法包括视电阻率，自然电位，激发极化法，磁化率测井和核技术测井等。考虑到是金属物探专业的后续课程，因此教材内容侧重于井中物探方法，其中与地面电法和磁法共同的基本理论就从简叙述，另外，由于井中三分量磁测，国内已出版有较系统的专著，所以，其内容也相应有所精简。

本教材除供各地质院校金属物探专业师生使用外，也可供金属矿井中物探工作者参考。教材由蔡柏林、王惠濂、黄南晖、黄智辉、古端龙集体编写，并经地质部物探局曾繁超同志、计算技术研究所吴以仁同志、长春地质学院物探系金属测井教研组审阅，都提出了宝贵意见。内蒙古物探队九分队对教材编写工作给予大力协助，在此一并感谢。由于我们水平有限，其中缺点和错误之处，请读者批评指正。

武汉地质学院地下物探教研室

《金属矿钻孔地球物理勘探》勘误表

页	行	误	正
14	2	3—5	2—4
14	倒 6	对称, 的正对	对称的, 正对
18	图1—2注	$3 - \frac{AN}{H} \approx 0.5;$	$3 - \frac{AN}{H} = 0.5;$
19	倒11	应为二到三倍井孔直径	应大于2—3倍井孔直径
19	倒11	应为三到五倍	应大于3—5倍
28	6	对应渗透性	对著渗透性
37	1	形成“阴极”	形成“阳极”
63	公式(2,17)	$\operatorname{tg}^{-1} \frac{2b(h-H_1)}{(h-H)^2 + d_1(d_1+2b)}$	$\operatorname{tg}^{-1} \frac{2b(h-H_1)}{(h-H_1)^2 + d_1(d_1+2b)}$
130	7	水平分量模数	水平分量模值
131	1	ΔT_r	$\Delta T_{\perp}$
133	10	介质 π	介质2
134	倒 5	ΔT_{ep}	ΔT_{CD}
152	2	ΔZ_{max} max	ΔZ_{max}
159	倒 6	$\Delta L = \frac{K}{I^2} \int_{V'} H^2 b V$	$\Delta L = \frac{K'}{I^2} \int_{V'} H^2 dV$
169	3	$= K\sigma$	$= K\sigma$
169	图4—17	纵座标参数 σ	应为 g ,
171	倒 1	按双曲线比例增加	呈非线性增加
176	1	$\frac{ReH_2}{H} =$	$\frac{R_e H_2}{H_1} =$
176	表4—1 1行	$LM(\text{米})$	$L(\text{米})$
178	图 4—26	纵座标参数 x, y	X, Y
192	倒12	$E = E_0 e^{-j\omega t}, H = H_0 e^{-j\omega t}$	$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-j\omega t}, \vec{H} = \vec{H}_0 e^{-j\omega t}$
192	倒 9	$\Delta \times E = j\omega \mu H$	$\nabla \times E = j\omega \mu H$
193	10	系数	常数
193	倒16	$H = \Delta \times A$	$H = \nabla \times A$
194	3, 7	i	$-i$
196	倒10	电磁法	电磁波法
203	3	频率较低	频率较高
219	5	$C_{11} - d_{11}$	$C_{11} - b_{11}$
219	12	…及 $a'_2, b'_2, c'_2, c'_2, d'_2$ …	…及 $a_2 b'_2, b'_2 c'_2, c'_2 d'_2$ …
221	5	……测点处	测点处……
227	8	加数平均	加权平均
232	12	高阻异常	高值异常
242	15	E^2	E_2
247	倒12	KO_2	K_2O
256	倒 7	块中子	快中子

目 录

绪言	1
第一章 电测井	3
第一节 视电阻率测井	3
一、视电阻率测井的基本原理	3
二、电极系	4
三、视电阻率测井的理论曲线	7
四、视电阻率测井曲线的应用	19
第二节 电流测井	23
一、单电极电流测井	23
二、滑动接触电流测井	25
第三节 自然极化测井	26
一、自然电位测井	26
二、电极电位测井	31
第四节 激发极化测井	35
一、岩矿石的激发极化机理	35
二、视极化率及视极化率测井理论曲线	37
三、交流激发极化测井	43
四、激发极化测井曲线的应用	44
第五节 电测井的主要仪器	47
一、JBC 型轻便自动测井仪	47
二、JDC 型电子自动测井仪	50
三、数字测井仪	51
参考文献	53
第二章 井中电法	54
第一节 井中激发极化法	54
一、地表—井中工作方式	54
二、井中—地表工作方式	81
三、井中—井中工作方式	92
四、交流井中激发极化法	97
五、井中激发极化法的应用	99
第二节 其他井中电法	105
一、井中充电法	105
二、井中电对比法	110
三、井中自然电场法	114
参考文献	117
第三章 井中三分量磁测	118
第一节 井中磁场测量原理	118

一、测量系统的定向问题	118
二、磁饱和测磁原理	119
第二节 JSZ-I 型井中三分量磁力仪	122
第三节 井中三分量磁测的野外工作方法	125
一、工区选择的基本条件	125
二、基点选择和正常场的确定	125
三、井场工作	126
第四节 资料整理和图示	127
一、斜孔原始资料计算步骤	127
二、直孔原始资料计算步骤	129
三、成果图示	130
第五节 井中三分量磁测成果的解释	131
一、两种磁性介质分界面处和有限厚磁性层上的磁场	132
二、若干规则形态磁性体的正反演问题	135
三、钻孔穿过磁性体时内磁场的研究和利用	154
参考文献	156
第四章 井中低频电磁法	157
第一节 磁化率测井	157
一、方法原理	157
二、JCL-1 型磁化率测井仪	162
三、磁化率测井的应用	163
第二节 感应测井	167
第三节 井中低频电磁法	172
一、方法的理论基础	172
二、模型实验	181
三、井场测量的仪器	186
四、井中低频电磁法在金属矿床上的应用	187
参考文献	190
第五章 井中电磁波法	191
第一节 有关的基本知识	191
一、波动方程	191
二、波的辐射	194
三、波在均匀有耗介质中的传播	197
四、非均匀介质中的波	203
第二节 方法原理	213
一、正常场	214
二、异常场	215
三、异常场的物理分析	218
第三节 现场工作方法	221
一、仪器	221
二、工作方法技术	223

三、解释方法	225
第四节 实例	229
参考文献	235
第六章 核测井方法技术	236
第一节 基本知识	236
一、原子和原子核的结构	236
二、放射性同位素的核衰变	237
三、射线的能量	237
第二节 核测井仪器	238
一、 γ 射线探测器	238
二、测量线路	241
三、时间常数和测速的选择	242
第三节 自然伽玛测井	244
一、 γ 测井曲线的解释和应用	244
二、自然伽玛能谱测井	246
第四节 伽玛-伽玛测井	248
一、散射 γ - γ 测井	249
二、选择 γ - γ 测井	251
第五节 中子- γ 测井	252
一、岩石的中子性质	252
二、中子- γ 测井与含氢量的关系	253
三、中子- γ 测井的应用	253
第六节 中子活化测井	256
一、元素的中子活化性质	256
二、中子活化测井的各种影响因素	257
三、技术条件的选择	259
四、成果解释	259
第七节 X射线荧光测井	260
参考文献	262

绪 言

金属矿钻孔地球物理勘探, 属普查勘探固体矿产的地下物探方法, 按其研究空间的范围可分二类:

一、井中地球物理方法 (简称井中物探), 用来研究井周围空间, 以扩大钻孔的有效作用半径。如发现井周及井底深部盲矿; 确定矿体相对于钻孔的位置、形状、大小、产状; 追索和圈定矿体范围; 在井间确定矿体的连续性等。用于评价地面物化探异常, 指导钻进提高其见矿率, 合理布置钻孔网提高普查勘探速度。原则上所有地面物探方法都可应用于井中, 但近二十年来, 国内外实际应用于井中的, 主要是电法和磁法, 以及采用高频的井中电磁波法。其中井中电法有, 视电阻率法、自然极化法、井中激发极化法及井中低频电磁法三组。井中磁法主要是测量磁场分量的井中三分量磁测。至于井中重力测量, 由于已制成的井中重力仪外径较大 (十厘米以上), 仅应用于油田, 在金属矿区尚未实际应用。对于井中地震波方法则还需进行大量的研究工作, 才能确定适合于金属矿钻孔中的方法和仪器设备。

二、综合测井方法。由于其探测范围远较井中物探方法要小, 因此用来研究井壁地质情况, 它又可分为:

1. 地球物理测井, 它是研究被钻孔穿过的岩矿层各种物理性质为基础的各种测井方法的通称, 如电测井, 磁测井, 低频电磁测井, 电磁波测井, 声波测井, 核技术测井等。其主要任务是,

1) 划分和校验钻孔地质剖面, 查明矿层, 确定其深度厚度, 提供地面或井中物探解释所需的各种物性参数。

2) 研究和确定矿石成分和品位 (含量), 即以物理分析方法替代钻探取芯劈样的化学分析方法, 以实现无岩芯 (或局部不取芯) 钻探, 提高金属矿钻探工程效率。目前国内已试用的有: 用磁化率测井确定钒钛磁铁矿含量。用核技术测井方法, 如中子活化测井, 确定某些多金属矿含量及成分; 用自然伽玛测井确定石膏、磷矿石含量。

应该指出, 由于金属矿测井方法技术还不够成熟完善, 加之金属矿钻探的取芯率一般较高, 因此单独完成上述第一个任务往往不十分迫切, 后者则是金属矿地球物理测井的主要研究发展方向, 只有解决了确定矿石成分、品位问题, 实现无岩芯钻探, 上述两个任务才完全统一起来, 才能克服目前金属矿综合测井方法的被动局面。

2. 井中机械观测仪器, 是近年来为实现无岩芯钻探发展起来的一套直接观测工具, 其目的是为了验证地球物理测井成果, 或直接观测井壁地质情况, 其中包括钻孔电视, 井内照相, 井壁切割器等。

再就是钻孔技术状况测量, 如井斜方位和井径测量等。

其实研究井壁和井周空间两者是紧密相关的, 前者是后者的基础工作, 但两者又各有其不同的地质任务。

考虑到这本教材为金属物探专业所用,因此其内容偏重于井中物探方法。井中物探方法的提出和发展,是普查勘探金属矿向深度和广度进军的要求,由于地表浅部矿逐渐减少,某些老矿山矿源日益缺乏,要求挖潜向深部开发,这样,寻找深部矿的任务已提到日程。再则,在覆盖地区,地质钻探主要依赖航空和地面物化探异常找矿,由于低阻厚覆盖的影响,目前所使用的地面物化探方法其勘探深度受到限制,寻找深部矿较难,而井中物探方法突出的优点是可以把场源或测量装置放入地下深部,使其接近矿体,从而增大异常。井中观测又可降低地表种种干扰的影响,并可从不同高度和方位,对探测对象所引起的地下全空间的地球物理场进行研究,显著地提高了有用信息份量。信息和干扰相对比的增大,最终是增加勘探深度。因此,它发现深部矿的能力比地面物探要大。正是这个原因,井中物探方法近年来已成为验证地面物化探异常,普查评价矿区远景进行深部探测的一种有效手段,并逐步与航空物探和地面物探方法实现纵向综合。尽管井中物探方法还比较年轻,但已取得显著成效,十几年来我国在普查勘探磁铁矿中,广泛应用井中三分量磁测并取得了良好的地质效果。井中激发极化法,井中电磁波法在普查勘探多金属矿、弱磁铁矿、铬矿、和解决水文工程地质问题中查明岩溶方面也有很多成功的实例。井中物探方法的地质效果和经济效益,正逐渐被有关部门重视,但与国外相比还有一定差距。表现在一些有效方法(如井中低频电磁法,井中重力测量)国内尚未开展研究,技术装备还很落后,至于综合测井方法的应用就显得更薄弱。解决的办法则应通过克服研究力量分散缺乏统一规划和组织领导薄弱等。摆在我们面前的任务是,在党的十一大路线指引下,赶超世界先进水平,为迅速发展和完善适合于我国实际情况的一套金属矿钻孔地球物理方法而努力。可以预计,随着方法的发展日趋成熟,金属矿普查勘探的程序将发生变革。

第一章 电测井

电测井以研究被钻孔所穿过的岩层的电学性质为基础，它主要包括视电阻率测井、电流测井、自然极化测井和激发极化测井，等等。电测井的探测范围一般仅为几厘米到几米，因此，它的探测对象主要是井壁及井壁附近的岩石。根据电测井资料可以划分钻孔地质剖面，确定矿层的深度、厚度和结构，以及为各种井中物探及地面物探工作提供岩矿层的电性参数。

第一节 视电阻率测井

一、视电阻率测井的基本原理

视电阻率测井是基于测量为钻孔所穿过的岩层的电阻率，来解决钻孔地质问题的。图1—1是其测量原理线路。该线路由 MN 测量电路和 AB 供电电路组成。在放入井中的电缆末端，连接着由三个电极 NMA 组成的电极系。第四个电极 B 置于井口附近的地面上。电源 E 通过供电回路由 AB 电极向地下供电，在地下介质中建立电场。并用电位差计（或记录仪）测量该电场在 MN 电极间的电位差。

假设电极系是置于电阻率为 ρ 的均匀无限大介质中，从 A 极流出的电流强度为 I 。由于电极的尺寸相对它们之间的距离来说要小得多，故可将电极视为点电极。这样，根据均匀无限大介质中点源场电位的公式，可求得介质的电阻率为：

$$\rho = 4\pi \frac{\overline{AM} \overline{AN}}{\overline{MN}} \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1.1)$$

式中 ΔV 为 A 极电场在 MN 两点间产生的电位差； K 称为电极系系数，它仅与电极系上各电极之间的距离有关，

$$K = 4\pi \frac{\overline{AM} \overline{AN}}{\overline{MN}} \quad (1.2)$$

显然，如果根据所使用的电极系预先算出 K 值，然后由观测结果读得 ΔV 和 I 值，将这些数值代入公式(1.1)就可以求得介质的电阻率 ρ 。

实际工作中，电极系周围的介质是不均匀的，譬如不同岩层常具有不同的电阻率，而岩石与井液在电阻率方面的差别也十分悬殊。但是，在非均匀介质中，我们总还是可以使用一定的电极系（其系数为 K ）并测得一定的 ΔV 和 I 值，将它们代入公式(1.1)后，也

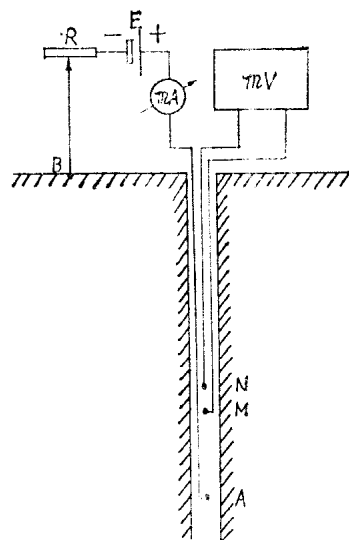


图 1—1

可以算出一个“电阻率”值。为与岩层的真电阻率区别，称它为视电阻率，并以 ρ_s 表示，即

$$\rho_s = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1.3)$$

$$K = 4\pi \frac{\overline{AM} \overline{AN}}{\overline{MN}}$$

在视电阻率测井中，电流的单位是毫安，电位差的单位是毫伏，电极之间的距离的单位是米，则视电阻率的单位为欧姆·米。

视电阻率与电极系周围各介质的电阻率（如岩层电阻率、围岩电阻率、井液电阻率）以及这些介质的分布状况有关，同时也与所使用的电极排列有关。可以认为，视电阻率是电极系探测范围内各介质电阻率的某一加权平均值。一般说来，岩层至电极系的距离越近它对视电阻率的影响也就越大。

视电阻率测井就是沿井身测量视电阻率的变化。它主要是由电极系周围岩层的改变而引起。因此，只要预先掌握了岩层与视电阻率曲线之间的变化规律，就可应用它来解释实际中测得的视电阻率曲线，从而划分钻孔地质剖面，确定矿层的位置等。

二、电 极 系

前已指出，视电阻率值与所使用的电极排列有关，因此，有必要对电极系作进一步的讨论。

通常把电极系上连接在同一电路（测量电路或供电电路）中的两个电极，叫做成对电极。余下的那个电极（它与地面电极连接在同一电路中）则叫做不成对电极。以成对电极作为供电电极的电极系，称为双极电极系，而以不成对电极作为供电电极的电极系，则称为单极电极系。

在视电阻率测井中，常用两类本质不同的电极系，即梯度电极系和电位电极系。

1. 梯度电极系

电极系中，成对电极之间的距离比任一成对电极至不成对电极的距离要小很多的电极系，称为梯度电极系（图 1—2）。

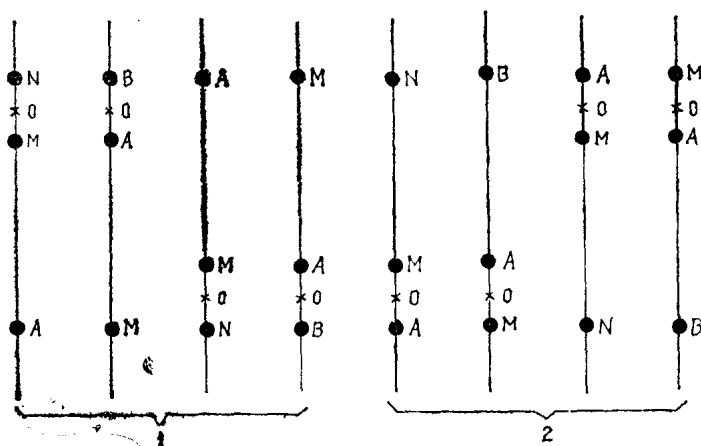


图 1—2

1—梯度电极系；2—电位电极系；×—记录点。

称为梯度电极系（图 1—2）。

在梯度电极系中，成对电极在上部者称为顶部梯度电极系；反之，成对电极在下部者则称为底部梯度电极系。

成对电极之间的距离为无限小 ($\overline{MN} \rightarrow 0$) 的梯度电极系称为理想梯度电极系。对于理想梯度电极系，其视电阻率公式推导如下：

将 (1.3) 式变换成

$$\rho_s = 4\pi \overline{AM} \overline{AN} \frac{\frac{\Delta V}{\overline{MN}}}{I}$$

其中 $\frac{\Delta V}{\overline{MN}}$ 为电场在 MN 方向上的电位梯度, 当 $\overline{MN} \rightarrow 0$ 时, 它的数值即等于 MN 中点 (O 点) 的电场强度 E 。

又因 $\overline{MN} \rightarrow 0$, 故有 $\overline{AM} = \overline{AN} = \overline{AO} = L$, 由此得出

$$\rho_s = 4\pi L^2 \frac{E}{I} \quad (1.4)$$

式中 L 称为梯度电极系的电极距。

由此可见, 如果在测量过程中保持供电电流 I 不变, 则所测得的视电阻率与成对电极中点 (O 点) 的电位梯度 (或电场强度) 成正比。梯度电极系正是由此而得名。

实际工作中, 成对电极之间的距离并非无限小, 而是有限大的。在均匀无限大介质中, 对理想梯度电极系和实际三极梯度电极系的计算结果表明^[1], 若取成对电极之间的距离为电极距 L 的 0.4 倍或更小, 则实际三极梯度电极系与理想梯度电极系的测量结果相对误差不超过 5%。实际工作中常取 $\frac{\overline{MN}}{L} = 0.2 \sim 0.4$ 。

用电极系在某一位置所测得的视电阻率必需标记在一定的深度上。在电极系上这种深度的标记点叫做记录点。梯度电极系的记录点选定在成对电极的中点 (O 点)。显然, 在电极系上选定的记录点位置不同时, 并不影响视电阻率曲线的形状, 而仅使曲线沿深度方向发生一定的相对位移。

2. 电位电极系

电极系中, 成对电极之间的距离大大超过中间电极至不成对电极的距离的电极系, 称为电位电极系 (参看图 1-2)。

成对电极之间的距离为无限大的电位电极系, 称为理想电位电极系。对于理想电位电极系, 其视电阻率公式推导如下:

将 (1.3) 式改写成

$$\rho_s = 4\pi \frac{\overline{AM} \overline{AN}}{\overline{MN}} \frac{V_M - V_N}{I}$$

由于 $\overline{MN} \rightarrow \infty$, 则有 $\overline{AN} \rightarrow \infty$, $V_N \rightarrow 0$, 则得

$$\rho_s = 4\pi \overline{AM} \frac{V_M}{I} = 4\pi L \frac{V_M}{I} \quad (1.5)$$

式中 $\overline{AM} = L$ 称为电位电极系的电极距。

由 (1.5) 式可见, 如果在测量过程中保持供电电流 I 不变, 则所测得的视电阻率与 M 点的电位成正比。正是由于这一特点, 称此类电极系为电位电极系。

实际工作中, 成对电极之间的距离是有限的。在均匀无限大介质中, 对理想电位电极系和实际三极电位电极系的计算结果表明^[1], 若取 $\frac{\overline{MN}}{\overline{AM}} \geq 19$, 则使用三极电位电极系与理想电位电极系的测量相对误差将不超过 5%。

电位电极系的记录点选定在 AM 的中点。

在金属矿视电阻率测井中, 常用电极距为 $0.5 \sim 2$ 米的梯度电极系或电极距为 $0.1 \sim 0.5$ 米电位电极系。

在测井曲线图上, 常用文字符号来表示所采用的电极系。其表示的方法是, 按电极自上而下的顺序, 从左到右地写出各电极的文字符号, 并在电极文字符号间以米为单位标出相邻两电极之间的距离。例如, $N0.2M0.9A$, 即表示一个顶部梯度电极系, 其电极距 $L = 1$ 米。

3. 梯度电极系和电位电极系的探测范围

任何电极系都有一定的探测范围 (或探测半径)。电极系的探测范围与电极系的类型和电极距的大小有关。同时还与电极系周围介质的电阻率及其分布有关。由此可见, 想要得到某种电极系探测范围的严格解答, 是不可能的。我们仅能在较简单的条件下, 给出电极系探测范围的近似值, 尽管如此, 这对分析视电阻率测井资料也是有用的。

梯度电极系的探测范围:

设有两种均匀介质相接触, 上层介质的电阻率为 ρ_1 , 下层介质的电阻率为 ρ_2 。在上部介质中有一电极距为 L 的底部梯度电极系, 其移动方向垂直于分界面 (参看图 1—3)。

在上述条件下, 当电极系位于上层介质中且 A 极距分界面的距离为 d 时, 由电像法可得 O 点的电位梯度为:

$$E = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left[\frac{1}{L^2} - \frac{K_{12}}{(2d-L)^2} \right] \quad (1.6)$$

式中 $K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ 。

当 $d \rightarrow \infty$, 即电极系置于电阻率为 ρ_1 的均匀无限大介质中时, O 点的电位梯度为:

$$E_\infty = \frac{I\rho_1}{4\pi} \frac{1}{L^2} \quad (1.7)$$

让我们来研究比值 $\frac{E}{E_\infty}$ 与 $\frac{d}{L}$ 之间的关系。由 (1.6) 式和 (1.7) 式可得:

$$\frac{E}{E_\infty} = 1 - \frac{K_{12}}{\left(\frac{2d}{L} - 1\right)^2} \quad (1.8)$$

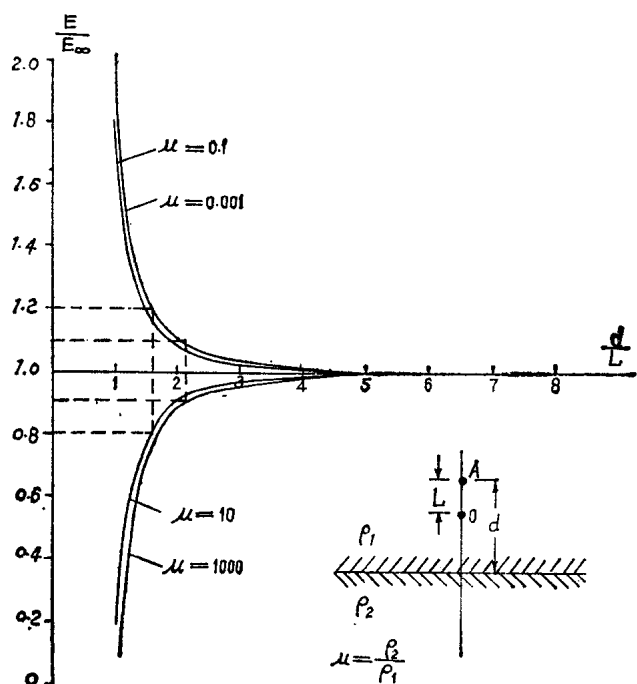


图 1—3

令 $\mu = \frac{\rho_2}{\rho_1} = 0.1, 0.001, 10, 1000$, 由 (1.8) 式计算得到 $\frac{E}{E_\infty}$ 与 $\frac{d}{L}$ 之间的关系曲线如图 1—3 所示。如果认为, 由于下层介质的影响而使 ρ_2 比 ρ_1 变化 20% (当 $\mu < 1$ 时即 $\frac{E}{E_\infty} = 1.2$, 当 $\mu > 1$ 时即 $\frac{E}{E_\infty} = 0.8$) 时, A 极至分界面的距离就是梯度电极系测量 ρ_1 的探

测半径, 则由图 1—3 得, $\frac{d}{L}=1.5$ 。如果取 ρ_2 比 ρ_1 变化 10% 时, A 极至分界面的距离为梯度电极系测量 ρ_2 的探测半径, 则得 $\frac{d}{L}=2.1$ 。由此可得梯度电极系测量 ρ_2 的探测半径大约为 1.5~2 倍电极距。

电位电极系的探测范围:

在与上述介质条件相同的情况下, 由电像法可得 M 点的电位为 (参看图 1—4):

当 A 极距分界面的距离为 d 时

$$V_M = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{L} + \frac{K_{12}}{2d-L} \right) \quad (1.9)$$

当 $d \rightarrow \infty$ 时

$$V_\infty = \frac{I\rho_1}{4\pi} \frac{1}{L} \quad (1.10)$$

将 (1.9) 式与 (1.10) 式相比, 得到

$$\frac{V_M}{V_\infty} = 1 + \frac{K_{12}}{2\frac{d}{L}-1} \quad (1.11)$$

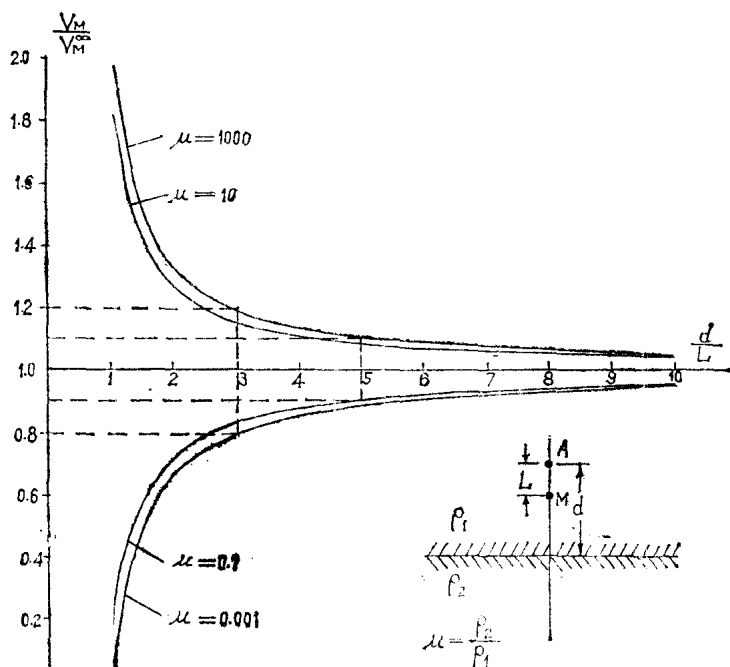


图 1—4

令 $\mu = \frac{\rho_2}{\rho_1} = 0.1, 0.001, 10, 1000$, 由 (1.11) 式计算得到 $\frac{V_M}{V_\infty}$ 与 $\frac{d}{L}$ 之间的关系曲线如图 1—4 所示。如果认为, 由于下层介质的影响使 ρ_2 比 ρ_1 变化 20% (当 $\mu < 1$ 时即 $\frac{V_M}{V_\infty} = 1.2$, 当 $\mu > 1$ 时即 $\frac{V_M}{V_\infty} = 0.8$) 时, A 极至分界面的距离就是电位电极系的探测半径,

则由图 1—4 所示关系曲线得 $\frac{d}{L} = 3$ 。如果取 ρ_2 比 ρ_1 变化 10% 时, A 极至分界面的距离为电位电极系的探测半径, 则得 $\frac{d}{L} = 5$ 。由此得出, 电位电极系测量 ρ_2 的探测半径大约为 3~5 倍电极距。

三、视电阻率测井的理论曲线

讨论视电阻率测井的理论曲线, 可归结为在给定岩层厚度、岩层电阻率、围岩电阻率、井孔直径、井液电阻率等具体条件下, 来研究井轴上点电源所产生的电位或电场沿井轴的分布问题。对于某些较简单的情况, 如电阻率有限的单一岩层, 忽略井孔影响或电阻率无限大的单一岩层, 有井孔影响等, 可以通过解拉普拉斯方程式得到视电阻率的解析式, 从而算出视电阻率曲线。但是, 对于较接近实际的情况, 如电阻率有限、有井孔影响的单一岩层

或多层岩层, 想要导出其解析式却是十分困难的。对这些情况可以用物理模拟(如电模拟, 水槽模型实验) 和数值模拟(即计算机模拟, 如用有限差分法或有限元素法) 求解。在这里, 我们不去讲述解析公式的具体推导过程, 仅直接引出其结果并着重用物理概念对视电阻率测井曲线进行定性分析。

1. 梯度电极系的视电阻率理论曲线

设厚度为 H 、电阻率为 ρ_2 的均匀水平岩层, 其下部围岩的电阻率为 ρ_1 , 上部围岩的电阻率为 ρ_3 。井轴垂直岩层层面, 忽略井孔的影响。电极距一定的理想梯度电极系沿井轴移动(参看图 1—5)。

在上述情况下, 根据给定的边界条件求解拉普拉斯方程式(或用电像法) 可得到视电阻率的解析式〔2〕如下:

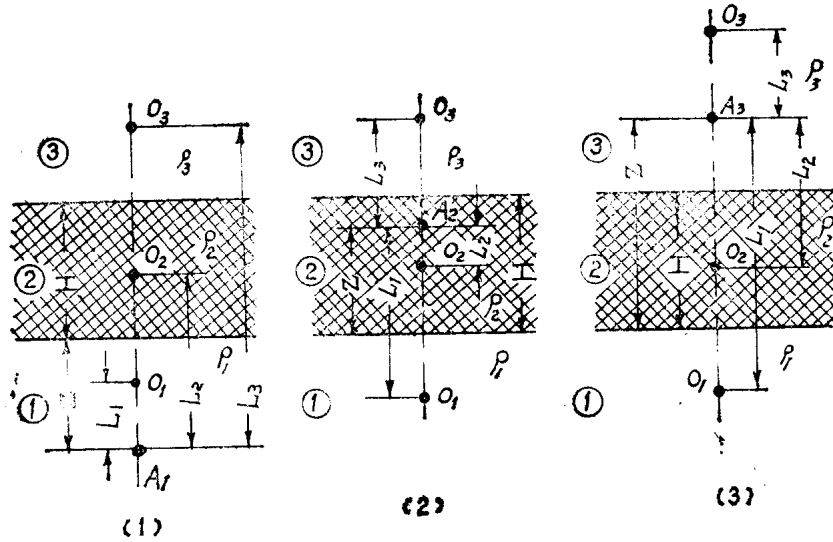


图 1—5

当 A 极位于 ρ_1 介质中(图 1—5(1))

$$\begin{aligned}\rho_{r1}^{(1)} &= \rho_1 L_1^2 \left\{ \frac{1}{L_1^2} - \frac{K_{12}}{(2Z - L_1)^2} - (1 - K_{12}^2) K_{23} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(K_{21} K_{23})^n}{[2(n+1)H + 2Z - L_1]^2} \right\} \\ \rho_{r2}^{(1)} &= \rho_2 L_2^2 (1 - K_{12}) \sum_{n=0}^{\infty} (K_{21} K_{23})^n \left\{ \frac{1}{(2nH + L_2)^2} - \frac{K_{12}}{[2(n+1)H + 2Z - L_2]^2} \right\} \\ \rho_{r3}^{(1)} &= \rho_3 L_3^2 (1 - K_{12}) (1 - K_{23}) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(K_{21} K_{23})^n}{(2nH + L_3)^2}\end{aligned}$$

式中 ρ_r 的右上角标码表示 A 极所在的介质, 右下角标码表示 O 点所在的介质,

$$K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}, \quad K_{21} = -K_{12}, \quad K_{23} = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2}$$

当 A 极位于 ρ_2 介质中(图 1—5(2))

$$\begin{aligned}\rho_{r1}^{(2)} &= \rho_1 L_1^2 (1 + K_{12}) \sum_{n=0}^{\infty} (K_{21} K_{23})^n \left\{ \frac{1}{(2nH + L_1)^2} + \frac{K_{23}}{[2(n+1)H - 2Z + L_1]^2} \right\} \\ \rho_{r2}^{(2)} &= \rho_2 \left\{ 1 + L_2^2 \sum_{n=0}^{\infty} (K_{21} K_{23})^n \left[\frac{K_{21} K_{23}}{[2(n+1)H + L_2]^2} - \frac{K_{21}}{(2nH + 2Z - L_2)^2} \right] \right\}\end{aligned}$$

$$+ \frac{K_{23}}{[2(n+1)H-2Z+L_2]^2} - \frac{K_{21}K_{23}}{[2(n+1)H-L_2]^2} \Big] \Big\}$$

$$\rho_{s3}^{(3)} = \rho_3 L_3^2 (1-K_{23}) \sum_{n=0}^{\infty} (K_{21}K_{23})^n \left[\frac{1}{(2nH+L_3)^2} + \frac{K_{21}}{(2nH+2Z+L_3)^2} \right]$$

当A极位于 ρ_3 介质中 (图 1—5(3))

$$\rho_{s1}^{(3)} = \rho_1 L_1^2 (1+K_{12})(1+K_{23}) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(K_{21}K_{23})^n}{(2nH+L_1)^2}$$

$$\rho_{s2}^{(3)} = \rho_2 L_2^2 (1+K_{23}) \sum_{n=0}^{\infty} (K_{21}K_{23})^n \left[\frac{1}{(2nH+L_2)^2} - \frac{K_{21}}{(2nH+2Z-L_2)^2} \right]$$

$$\rho_{s3}^{(3)} = \rho_3 L_3^2 \left[\frac{1}{L_3^2} - \frac{K_{23}}{[2(Z-H)+L_3]^2} + (1-K_{23}) K_{21} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(K_{21}K_{23})^n}{(2nH+2Z+L_3)^2} \right]$$

根据以上公式, 在假设 $\rho_1 = \rho_3$ 情况下, 对厚层 ($H=5L$) 和薄层 ($H < L$), 高阻层 ($\rho_2 > \rho_1$) 和低阻层 ($\rho_2 < \rho_1$) 等不同条件所计算出的视电阻率曲线如图 1—6 所示。

为了对梯度电极系的视电阻率曲线进行定性分析, 可将欧姆定律的微分形式应用于梯度电极系的视电阻率公式 (1.4) 得

$$\rho_s = 4\pi L^2 \frac{E}{I} = \frac{j_{MN} \rho_{MN}}{\frac{I}{4\pi L^2}}$$

即

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN} \quad (1.12)$$

式中 $j_0 = \frac{I}{4\pi L^2}$, 它是一个常数, 其值就是在均匀无限大介质中O点的电流密度; j_{MN} 和

ρ_{MN} 分别为O点的实际电流密度和电阻率。

(1.12) 式是定性分析梯度电极系的重要根据。公式说明, 用梯度电极系在某一位置所测得的视电阻率, 取决于O点(MN中点)的实际电流密度 j_{MN} 与实际电阻率 ρ_{MN} 的乘积, 这两个因素中无论那一个改变, 都会引起视电阻率的变化。一般说来, ρ_{MN} 是突变性的因素, 只是当O点由一种电阻率介质进入另一种电阻率介质时才发生改变。而 j_{MN} 则是渐变性的因素, 它与电极系探测半径内各种介质的电阻率及其分布情况有关。下面, 以图 1—6(1) 中高阻厚层理想底部梯度电极系的视电阻率曲线为例, 应用公式 (1.12) 对其变化规律进行定性分析。

当电极系位于下部围岩中且距岩层底界面足够远时 (实际上只要A极至底界面的距离大于2倍电极距就行了), 电极系就好像处于电阻率为 ρ_1 的均匀无限大介质中一样, 则公式 (1.12) 中, $j_{MN} = j_0$, $\rho_{MN} = \rho_1$, 故 $\rho_s = \rho_1$ 。随着电极系向上移动接近底界面, 虽然在此过程中 ρ_{MN} 不变, 总等于 ρ_1 , 但高阻岩层对A极电流的排斥作用越来越强, O点的电流密度 j_{MN} 即随之逐渐增大 ($j_{MN} > j_0$), 结果形成视电阻率逐渐上升。这种上升直到A极到达底界面为止 (图 1—6(1) 中ab段)。

从A极穿过底界面起, 至O点到达分界面 (但还在 ρ_1 介质一侧) 为止, 视电阻率保持常数不变 (图 1—6(1) 中bc段)。这是电极系跨在分界面上的情况。由于高阻岩层的厚度