

垂向电测深解释指南

A. M. 培拉耶夫 著

地质出版社

垂向电测深解释指南

A. M. 培拉耶夫 著

张 贺 译 许宝文 校

地质出版社

1960·北京

А. М. ПЫЛАЕВ

РУКОВОДСТВО
ПО
ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

ГОСТЕОЛИЗДАТ

1948

在本書中，作者根据工作經驗系統地整理了关于解釋基础方面的資料。所有的垂向电測深的理論曲綫圖都以便于解釋多層曲綫為原則整理成為量板附于本書之后。此外，整理了关于計算地形、傾斜界面等影响的資料。

本書可作为物探工作者在解釋和推断电測深資料时的工具書。

垂向电測深解釋指南

著者	A. M. 培拉耶夫
譯者	張賀
出版者	地質出版社

北京西四單市大街地質部內

北京市書刊出版業北許可證出字第050号

發行者	新華書店科技發行所
經售者	各地新華書店
印刷者	地質出版社印刷廠

北京安定門外六鋪炕40号

印數(京) 1—4300册	1960年5月北京第1版
開本85 × 168 ^{1/32}	1960年5月第1次印刷
字數165,000字	印張6 ^{1/8} 插頁2
定價(10)1.00元	

(另附“量板冊”一冊計33幅，隨書發行)

在这本工作指南里根据全苏地質研究所 (ВСЕРГИ) 及其他机关 (ГСГТ) 已有的經驗, 试图把實質上可作为解釋基础的許多問題的資料加以系統整理 (例如: 估計 ρ_z 的方法)。

全部垂向电測深的理論曲綫图表都以便于解釋多层曲綫的原則整理成量板。

此外, 整理并敘述了有关計算地表地形不平及傾斜界面及其他对測量能引起畸变影响的已有的零散資料。

本著作适合于普通的地球物理工程师, 为了使他們熟悉现代垂向电測深解釋方法的基础并帮助他們根据垂向电測深資料做出更可靠的及完整的結論。

这本著作是由全苏地質研究所地球物理室正研究員亚历山大·哈依洛維奇·培拉耶夫在1940年所完成并在1941年交到出版社的。

亚·米·培拉耶夫是促进电法勘探的发展并广泛地把电法勘探推广到实践中去的傑出的地球物理学家之一。偉大的卫国战争一开始, 亚历山大·米哈依洛維奇就就任駐在通向列宁格勒要冲处的砲兵部队的指揮官。他为了祖国, 为了我們建立自由和幸福生活的权利, 貢獻出了自己的生命。

战后在全苏地質研究所地球物理室基础上成立的全苏地球物理研究所失去了一位优秀的专家和热情而謙遜的同志——亚·米·培拉耶夫。

在战争时期, 在1943年, 研究所曾用石印出版了49份本书的单行本。专家們的大量需要肯定了这册著作的价值和以原样再行出版的必要性。

全苏地球物理勘探研究所 (ВИПГ) 办公室

序 言

目前，直流电法在解决各种各样的地質任务中应用得极为广泛。譬如，在很多地区就是应用直流电法卓有成效地解决了：构造地質（同普查和勘探石油、煤田、天然气、岩盐等有关的工作），工程地質（兴建水利工程、隧道、桥梁、铁路路基等勘探任务），水文地質（普查与勘探淡水和矿化水，調查滑坡和永久冻土带）及普查与勘探金属矿、建筑材料、耐火粘土等任务。

野外操作技术及所应用的仪器至少对于电极距 AB 在 10—15 公里以下的电法工作来说是已被探討和研究得极为完善了。相应的理論根据也已在一系列的著作中得到十分詳細的闡述。

多次的直流电法野外工作經驗指出：当有了正确进行的野外测量，就应当把解释推断工作看成是保証結論的可靠与完整的主要因素。然而，对野外操作所得数据的解释工作的理解，絕不應該单单看成是量板的运用方法，这里还包括同野外数据的地質解释有关的一系列問題。这里首先就要估計岩石的电阻率、电阻率的稳定性或其变化的規律，考虑各种因素对解释精度的影响及其他等等。

此外，还应该考虑到，是否能获得完整的野外資料同及时地进行可靠的初步解释有直接联系。在这个問題上應該指出：正是由于解释的路径不对，在个别情况下簡直是近于不学无术，才使許多直流电法的工作得到了不能令人滿意的結果。往往这是由于对应用直流电法的头几年里所用的近似解决法不加批判地应用，以及对近代的解释方法不够熟悉而发生。特别是后者更加可能，因为很多对解释很重要且很有意义的問題仅仅在零散的論文、杂志的短評以及报告手稿里闡述。

根据缺少一本把到目前为止所有一切同解释方法有关問題的

經驗加以整理和總結的工作指南的情況，迫使全蘇地質研究所（ВСЕСГЕИ）在1940年提出一項相應的研究項目，這工作指南就是這個項目的研究結果。不用說，象現在這樣的工作指南，是不能把野外工作者在解釋垂向電測深時所發生的一切問題的答案都包括在內的。這是由於對許多問題研究得還不充分，也是由於工作時間短促所致。由於同樣原因，在工作指南里還缺少，例如，舉例來闡述解釋方法的專門章節。只是在相應的章節里引述了個別的為了說明某一個原理所必需的例子。

這本垂向電測深解釋指南適用於熟悉野外工作基本技術和方法的普通地球物理工作者。

目 录

序 言	5
第一篇 垂向电测深解释方法基础	
§ 1. 概論, 量板目录	11
概論	11
图例說明	16
全苏岩質研究所量板册, 1940年	19
§ 2. 有关理論曲綫特征的一些說明, 等值原理	23
二层曲綫	23
H型曲綫及 S_2 等值原理	24
K型曲綫及 T_2 等值原理	34
Q型曲綫及 T_2 等值原理	40
A型曲綫及 S_2 等值原理	44
关于等值断面的一般概念	47
§ 3. 关于各向异性的基本知識	47
基本定义	47
各向异性层系举例	50
各向异性的反常現象	53
各向异性三角形	54
§ 4. 三层曲綫的图解作图法	56
概論	56
H型 ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$) 三层曲綫的繪制。H点	58
Q型 ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) 三层曲綫的繪制。Q点	63
A型 ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) 三层曲綫的繪制。A点	66
K型 ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) 三层曲綫的繪制。K点	69
§ 5. 四层及多层曲綫图解作图的方法	73
概論	73
HK型 ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$) 四层曲綫的作图	75
HA型 ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$) 四层曲綫的作图	77
QH型 ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$) 四层曲綫的作图	80
QQ型 ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$) 四层曲綫的作图	83

KH 型 ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$) 四层曲线的作图	85
KQ 型 ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$) 四层曲线的作图	87
AA 型 ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$) 四层曲线的作图	89
AK 型 ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$) 四层曲线的作图	90
各种类型的多层曲线的作图	92
§ 6. 岩石的电阻率	93
概論	93
矿物的电阻率	93
岩石的孔隙率	94
岩石的含水量及水饱和度	94
水的电阻率	95
温度对电阻率的影响	96
孔隙的形状和排列对电阻率的影响	97
岩石的电阻率	97
§ 7. 垂直及倾斜分界面对 ρ_k 测量结果的影响	101
概論	101
两种介质的垂直分界面	101
两种介质的倾斜分界面	106
不导电岩石的旁侧影响	110
导电岩石的旁侧影响 (繞流现象)	113
§ 8. 地表地形不平对 ρ_k 测量结果的影响	117
与放线方向相平行的山脊与沟谷	117
与放线方向相垂直的山脊与沟谷	120

第二篇 垂向电测深曲线的解释方法

§ 9. 应用“ρ_2”量板解释	123
二层曲线	123
三层曲线	125
§ 10. 三层量板及其在垂向电测深三层 曲线解释中的应用	135
H 型量板及其在 H 型曲线解释中的应用	135
K 型量板及其在 K 型曲线解释中的应用	140
Q 型量板及其在 Q 型曲线解释中的应用	142
A 型量板及其在 A 型曲线解释中的应用	144

§ 11. 应用三层量板解释四层及多层的电测深曲线	145
概論	145
HK 型 ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$) 及 HA 型 ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$) 曲线 ..	146
KH 型 ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$) 及 KQ 型 ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$) 曲线 ..	146
QH 型 ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$) 及 QQ 型 ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$) 曲线 ..	149
AK 型 ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$) 及 AA 型 ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$) 曲线	150
不同类型的多层曲线	151
关于解释的一些意見	152
§ 12. 根据测井资料测定电阻率及各向异性系数	153
三极法测井资料的应用	155
单极法测井资料的应用	162
§ 13. 根据井旁电测深资料测定岩层的电 阻率及各向异性系数	164
二层曲线	164
H 型曲线	166
K 型曲线	167
Q 型曲线	169
A 型曲线	170
不同类型的四层及多层曲线	170
§ 14. 获得参数资料的其他方法	172
§ 15. 解释电测深曲线的方法	174
电性剖面的估计	174
在解释时查明和估计岩石电阻率可能变化的问题	179
考虑岩层各向异性影响的必要性	182
野外的初步解释	184
附录 1. 利用电测井资料确定电阻率的精度问题	185
参考文献	194
附录 2. 量板册 (33 幅)	

第一篇

垂向电测深解释方法基础

§1. 概論, 量板目錄

概 論

由設在地表的点电极所引起的电位的計算問題, 对于任意多个平行于地平面, 位于不同深度具有不同导电率的均匀岩层來說理論上已經解决了[19], 因而計算电测深法中所测量的, 所謂視电阻率 ρ_s 和 $l = \frac{AB}{2}$ 值的关系問題对于具有各种电阻率比值和厚度比值的多层地层來說也得到了解决。

对于 n 层地层的上述問題的解可从下列无限級数的和来表示,

$$\frac{\rho_k}{\rho_1} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} q_n \cdot f_n(l),$$

其中 q_n ——仅为各层电阻率之比和厚度之比的函数,

$f_n(l)$ ——仅为电极距的大小(l)及和中各項的順序号(n)的函数。

二层量板相应于二层构造的存在(以下簡称为“ ρ_2 ”量板), 这在直流电法应用于勘探的初期就已經算出来了, 并且在解释电测深时被建議用来估計厚度。

为了解释时使用方便, 一开始这种量板就被建議用双对数比例尺来画。确实, 由点电极所引起的地面电位分布的一般解, 对于任意多个地层來說, 和这些地层电阻率及厚度的絕對值无关, 而与它們間的比例有关。因此無論电阻率及地层厚度的絕對值有多

大，这量板可很简便地用来和同样以双对数比例尺画成的电测深曲线对比。

运用“ ρ_2 ”量板来解释二层电测深曲线有可能迅速而且单值地确定电阻率（ ρ_1 及 ρ_2 ）和第一层的厚度。

运用二层量板来解释三层型的电测深曲线的尝试立刻显示出这种可能的局限性。只有在第二层的厚度比较厚的情况下，才能得到较满意的结果。

在1932年出版的卡斯托利（Кастоль）和梅利克扬（Меликян）的著作〔18〕中和1932—1935年出版的В.Н. 达赫诺夫（Дакнов）的著作〔10〕中曾引用了一些什鲁姆别尔热公司所计算的三层量板。

在每幅量板上都集中了 $\frac{h_2}{h_1}$ ， ρ_1 及 ρ_3 为常量， ρ_2 为变量的曲线 $\frac{h_2}{h_1}$ ， ρ_2 及 ρ_3 为常量， ρ_1 为变量的曲线。这些量板上仅有厚度为 $\frac{h_2}{h_1}=3, 1$ 及 $\frac{1}{3}$ 的三种比例。

研究这些量板的结果表明，三层电测深曲线的单一解释只有在第二层的厚度比较厚的情况下才可以得到。在第二层的厚度不够厚时用量板，对具有 ρ_k 极小的曲线只能确定 $\frac{h_2}{\rho_2}$ 的值，而对具有 ρ_k 极大的曲线只能确定 $h_2\rho_2$ 的值。

正是由于这个缘故，才引入了等值原理的概念。至于有关各向异性及有关运用为各向同性层而计算的量板进行解释时各向异性影响的计算方法的基本资料在那时我们就知道了〔32、33〕。

自然，随着等值原理的“发现”，为了要进行单一的解釋，提出的用量板来解释三层曲线的方法，要求有第二层电阻率的资料。但当时所知道的确定电阻率的方法常常不能提供这种不可缺少的资料。此外，当时计算出来的三层量板的数量也不够多，量板上曲线的系统化也不很成功，这些都使得所提出的运用三层量

板的解决方法在当时只得到了有限的推广。

此外还应指出在不同时期提出来的其他解决方法，据这些作者的意見，在某些場合下同量板比較起来曾得到过反演問題的“較单一”的解。

在这些方法中應該指出的有：A.A. 彼得罗夫斯基 教授提出的“变换法”塔克 (Tarr) 法[1]以及 ICD 量板[14]。但是当野外工作者利用这些方法去解释三层曲綫和多层曲綫时，却显得不太适用。只是有时在等值原理的作用范围較小的情况下，也就是在用相应的量板也会得到問題的近似单值解时，运用上面指出的方法才会得到滿意的結果。

B.H. 达赫諾夫所提出的运用“衍生量板”的解释方法也未获得推广。这方法本身仅是利用 ρ_k 图表的“特殊”点 (ρ_k 极大和极小)。

另一方面，各个机关已經着手計算包括不同的 $\frac{h_2}{h_1}$ ， $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ 和 $\frac{\rho_3}{\rho_1}$ 比的电测深的三层理論曲綫图。

應該指出，在确定某一标准层的埋藏深度时，常会遇到無論在地質构造上或是在物理参数的数值上都較为均匀的一些断面。这时候，由一点到另一点，特别是在研究不大的面积时，組成該断面的某些地层的厚度比例以及地表第一层的电阻率常常发生变化。在相反的情况下，如某些水平层的厚度比例始終不变，而由这一点到另一点，譬如仅仅第二层的电阻率发生了变化的情况是极少遇到的。这种情况为以电阻率比为常数而厚度比为变数的原則来系統地整理三层量板提供了依据[28]，这种量板上还画有同第二层底部深度 ($h_1 + h_2$) 相适应的綫。

为了这个目的，ХКВД 的白海-波罗的海联合企业 (ББК) 于 1934—1935 年曾計算了近 40 条理論曲綫，主要是 $\frac{h_2}{h_1} = 10$ 及

$\frac{1}{10}$ 的, 这部分曲线和当时文献中已有的曲线合起来已有可能组成一些量板集:

① 常量: $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$; $\rho_3 = \infty$ (或 $\rho_3 = \rho_1$) , 变量: $\frac{h_2}{h_1}$

② 常量: $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$; $\rho_3 = 0$ (或 $\rho_3 = \rho_1$) , 变量: $\frac{h_2}{h_1}$.

此外, 还计算了一些曲线以组成新的量板集:

③ 常量: $\rho_2 < \rho_3 < \rho_1$, 变量: $\frac{h_2}{h_1}$.

随后又加上中央地质勘探科学研究所的工作结果, 计算出来的量板数目有了某些增加。还计算了电阻率为顺次减少的 ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) 和顺次增加的 ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) 情况。

从1937年起, 基本上是在1935—1936年算出的什鲁姆别尔热三层量板册获得了广泛的传播, 它们有:

12种不同的 $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ 值 (其范围由1到39和由1到 $\frac{1}{39}$) ,

4种不同的 ρ_3 值 (∞ , $\frac{\rho_2}{\rho_1}$, ρ_1 及0) 及

10种不同的 $\frac{h_2}{h_1}$ 值 (由 $\frac{1}{9}$ 到24) 。

量板册中所包括的曲线总数计有 $12 \times 4 \times 10 = 480$ 条。

这些曲线中的每一条曲线都被编进什鲁姆别尔热下列的量板集中的某一集里:

① 常量: $\frac{h_2}{h_1}$, ρ_1 , ρ_3 ; 变量 ρ_2 ;

② 常量: $\frac{h_2}{h_1}$, ρ_2 , ρ_3 ; 变量 ρ_1 ;

③常量: ρ_1, ρ_2, ρ_3 ; 变量 $\frac{h_2}{h_1}$ 。

在这种量板集的量板上, 曲綫順着 l 軸排列, 并使每一 条曲綫上的 m_1 点或 m_2 点都在一条直綫上 (此处 $m_1 = h_1$, $m_2 = h_1 + h_2$)。

在1937年中央地質勘探科学研究所石印出版的量板册里, 曾利用了在当时所有的全部三层曲綫, 并且是按照前述原則系統整理的。

为在解释时实际运用曲綫方便起見, 几乎全部量板上的曲綫的下支都漸近地重合在一起, 并且在量板上还画出了两条直綫, 以便能立刻求得第一层的深度 (h_1) 和第二层的深度 ($h_1 + h_2$)。

这样的布置曲綫, 可使实测曲綫有可能較为迅速地 与量板上同它相适应的曲綫相重合, 并在許多情形下能明显地看出在解释时可能犯的一些錯誤。

什魯姆別尔热三层量板册的出現及全苏地球物理勘探研究所所做的某些四层量板的計算結果使我們可以研究用二层及三层量板, 用图解法繪制多层电测深曲綫的方法[15, 17, 20, 21]。

到目前为止所积累下的进行野外工作的丰富經驗、有关确定岩石电阻率以及确定电阻率与各种因素間关系的諸問題的系統研究[24, 25]、大量新量板的出現, 最后再加上作图法的研究——所有这一切大大地扩展了解释的可能性, 并能有足够把握地利用它們来解释以前被認為是难于解释的各种类型曲綫。

同时, 地質条件的多样性要求我們对傾斜接触面和垂直接触面以及地形不平緩所产生的影响, 对利用测井資料估計电阻率的精确程度, 对确定等值原理的作用范围諸問題做專門的研究。在这一方面應該指出 А. И. 博格丹諾夫所提倡的解释方法[7, 8, 9], 这一方法是利用某些函数之間的关系 (垂向电测深图表上的特殊点, 漸近綫的位置等) 来单值地确定 ρ_2 及 h_2 的。当然, 只有在肯定地知道等值原理的作用范围不大时, 相应的博格丹諾夫諾謨图才有可能用以确定接近真值的 h_2 和 ρ_2 值。

到目前为止的工作經驗表明，运用量板解释电测深較之运用其他方法会得到更有效的結果。这是因为在运用量板的时候是对比曲綫的全部，而不是曲綫的个别(特殊)点。运用量板易于发现中間层的出現和追縱断面的稳定性。在这里应着重指出，运用量板并不排斥确定岩石电阻率的必要性，在大多数場合下岩石电阻率的資料对解释是完全不可缺少的。

在这册指南里，除利用了全苏地質勘探科学研究所的工作經驗外，也利用了其他机关(主要是 ГСГТ)的丰富的工作經驗。譬如在書中引用了由 ГСГТ 計算出来的新的三层量板 ($\rho_3 = \sqrt{\rho_2}$ 及 $\rho_3 = \rho_2^{3/2}$) 及由 ГСГТ 和其他机关的工作人員所完成的大量的理論和实验工作。

到目前为止所有的三层理論曲綫都被重新整理而成新的系統，以便簡易地来利用它們去解释电测深多层曲綫，(直接确定 h_2 ; $m_2 = h_2 + h_1$; S_2 ; T_2 等)。除此而外，还明确了利用測井資料来确定电阻率(估計各向异性影响等)的問題，还給出了有关等值原理的作用范围等的概念。

最后，本書力图将現有的有关各种条件下的电場的理論和实验研究方面的資料(按其現有研究程度)概括起来，以便野外工作人員能够有效地將它們用于电测深的解释。

当然，有許多問題由于研究得不充分只能作一般的簡略的介紹，例如：繪制和解释多层曲綫时所用的插入法，根据測井資料确定平均电阻率时的精确度，計算側面影响等等。

图 例 說 明

在这册指南里，象在量板中所用的一样，采用下列各种記号：

ρ_1 ; ρ_2 ; ρ_3 ρ_n ——各层电阻率；

h_1 ; h_2 ; h_3 h_n ——厚度；

$m_1 = h_1$

$m_2 = h_1 + h_2$

$m_n = h_1 + h_2 + \dots + h_n$

} 相应岩层底部的埋藏深度；