

其
277318

中等专业学校教学用书

矿场地球物理技术

上册



石油工业出版社

中 等 專 業 学 校 教 学 用 書

礦場地球物理技术

上 册

苏联 С.Г.柯馬洛夫著

王曰才 黃作華譯

石油工业出版社

内 容 提 要

本書系統地敘述了各種礦場地球物理方法以及所用的儀器和設備，包括電測井、放射性測井、地球化學測井、油井技術狀況的探測等。對於目前蘇聯各礦場應用的新的測井法，和各種全自動及半自動測井儀如自動記錄電位差計、單芯電纜電測站、側向測井、綜合測井站等，都有詳細的敘述和優點和缺點的分析。

本書採石油技術學校的教材，也可供從事礦場地球物理測井工作人員的參考。

С. Г. КОМАРОВ

ТЕХНИКА

ПРОМЫСЛОВОЙ ГЕОФИЗИКИ

根據蘇聯國立石油燃料科技書籍出版社（ГОСТОПТЕХИЗДАТ）

1957年莫斯科版翻譯

統一書號：15037-869

礦場地球物理技術

上 册

王白才 黃作華譯

*

石油工業出版社出版（地址：北京大柵欄百油工業部內）

北京市書刊出版業營業許可證出字第088號

石油工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

*

850×1168毫米開本 * 印張12 1/2，241千字 * 印1~3,000册

1960年6月北京第1版第1次印刷

定價（10）1.90元

序 言

以研究鑽井所鑽穿的地層的性質和檢查井的技术情况为目的而进行的地球物理測井工作，就叫作矿場地球物理。矿場地球物理也包括套管射孔及井壁取心。

每一口鑽完的井必須确定它的地質剖面，岩層的層位，地層的深度，地層的含油、含水飽和率。根据这些資料，可以查明油田的構造并对它进行研究。

利用鑽井时取出的岩样(岩心)可以繪制井的地質剖面，但是在井內取岩心，会使鑽井速度大大減慢。在井內取岩心，使鑽井进尺受到鑽具的一个鑽程的限制，因此必須使在井內取岩心工作減到最少的程度。同时，在最有意义的深度处取岩心并不总是能成功的；此外，岩心常常会被破坏，被冲洗和不能被帶到地面上来，因此，根据取心并不能得出井的地質剖面的完整概念。由于根据岩心确定井所鑽穿的地層有困难，所以就創造了研究地質剖面的地球物理方法，这种方法是在井內沿着井身測定某一种物理参数。这就叫作測井^①。

根据在确定井中地層性質时所用的岩石的不同物理性質，可以采用許多种的測井法：电法測井，放射性測井，油、气測井等等。电法測井应用最为广泛。但是，在某一些情况下，根据电法測井不能得到井所鑽穿的地層的完整概念。因此必須使用其他測井方法。

在鑽井、采油过程中，必須檢查井的技术情况。檢查井的技术情况，是矿場地球物理工作中相当大的一部分，其中包括井內

① 这个名称是由法文 Carottage 变来的，Carottage 的意思就是从井內取岩

溫度測量，確定井徑，確定漏水的地層，以及確定套管的破裂等。另外也有相當大的部分的工作是檢查井身發生偏斜的情況（測量井斜）。

為了在井鑽完之後正確地確定井所鑽穿的地層的地質特性，必須從井壁上另外採取一些岩心。用井壁取心器進行的井壁取心，以及為了打開油、氣層而進行的套管射孔工作都是由地球物理測井隊擔任的。這是因為它們進行工作時所使用的設備及方法，是有共同性的。因此，射孔及井壁取心也是礦場地球物理的工作①。

在本書內敘述了礦場地球物理測井中所用的儀器和設備，以及進行這些工作的方法②。

Д. В. 戈盧比亞特尼科夫在1906—1913年在比比埃依巴特油田以及以後在蘇拉汗(巴庫)所進行的井內溫度測量，可以認為是礦場地球物理測井中最初的工作。

自從電法測井(在井內測量視電阻率 KC 及自然電位 $ПIC$)問世後，礦場地球物理才開始廣泛地被應用。

電法測井(最初是用電阻法，以後也採用自然電位法)是由K. 及M. 史倫貝爾(法國人)提出的，最初在1928年在彼舍勃郎進行了試驗[158]。

運用电法測井，就能够在一些地區進行不取心的鑽井，並能在其他一些地區把取心的工作減少到最低限度，同時還大大地提高了研究井內地質剖面和油田構造的效率。

最近，運用电法測井的範圍擴大了，目前在金屬礦床和煤田中，也運用电法測井並獲有成績；在這些地方，除普通的方法外，還利用蘇聯所研究出來的新的滑動接觸法(A. C. 謝苗諾夫和

① 用井壁取心器進行井壁取心、套管射孔以及油井爆炸的儀器及工作技術，在本書內將不加以敘述。

② 解釋的理論及方法，以及應用礦場地球物理的資料，參看[31, 57, 72]。

О. К. 符拉基米罗夫)和电解测井法。

最近(1948—1953年)在Г. Г. 道尔的指导下,已研究出了許多有效的新的电测方法(微电极系,侧面测井,微侧面测井,感应测井)。

除电法测井外,为了研究油井所鑽穿的岩石的特性,以后还出现了其他許多种地球物理测井法:伽偶测井法(В. А. 施巴克等, 1934年),中子测井法(Б. 彭捷科尔沃, 1941年),气测井法(М. И. 巴里札莫夫, М. В. 阿布拉莫維奇, 1933年),机械测井(Р. М. 米宁宗等 1935年)等,目前在这些方法中,伽偶测井、中子测井及气测井最为重要。

与电法测井發展的同时,开始广泛采用檢查井內技术情况的物理方法,如测定漏失点和井溫度測量法;井斜和井徑測量等。

目 录

序言

第一篇 电 测 井

第一章 视电阻率和自然电位	1
§ 1 视电阻率	1
§ 2 电阻测井法用的各种电极系	9
§ 3 侧面测井(屏障电位电极系)	20
§ 4 感应测井	28
§ 5 自然极化	31
§ 6 三芯电缆电测的原理线路	35
第二章 半自动记录	37
§ 7 电位差计	38
§ 8 半自动记录仪	46
§ 9 换向器	49
§ 10 半自动记录的线路联结	52
§ 11 视电阻率和自然电位曲线的半自动记录	54
第三章 三芯电缆测井曲线自动照像记录仪器车	61
§ 12 AKC/П-51 型仪器车的测量原理线路	62
§ 13 检流计	68
§ 14 照像记录仪	75
§ 15 检流计电路的调节	86
§ 16 AKC/П-51 型仪器车的测量线路	89
§ 17 测量的进行	103
第四章 利用电子自动记录电位差计记录测井曲线	113
§ 18 电子自动记录电位差计的操作原理	114
§ 19 ПАСК-5М 型电位差计线路	116

§ 20	ПАСК-5М 型电位差計	181
§ 21	АЭКС-52 型仪器車	186
§ 22	其他类型的电子自动记录电位差計	139
§ 23	电测井用的其他类型仪器及綫路	144
第五章	各种測量工作	149
§ 24	單电極电測	149
§ 25	側面測井(屏蔽电位电極系)	154
§ 26	微电極系測量	157
§ 27	液体电阻率的測量	163
§ 28	橫向測井	174
第六章	單芯电纜电測	187
§ 29	原理綫路	187
§ 30	大型井下仪器	195
§ 31	小型井下仪器	209
§ 32	地面上 OKC-52 型仪器車的測量綫路	214
§ 33	測量綫路的供电电源	226
§ 34	測量的进行	237
第七章	綜合測井	248
§ 35	七芯电纜綜合自动測井站	248
§ 36	單芯电纜綜合測井	258
第八章	測量的进行及干扰	264
§ 37	測量的进行	264
§ 38	漏电	273
§ 39	感应干扰	283
§ 40	克服漏电及感应干扰的方法	294
§ 41	用單芯电纜的綫路測量視电阻率时發生的誤差	300
§ 42	測量自然电位时的干扰	305
§ 43	记录裝置的顫动	312
§ 44	金屬的影响	319

第一篇

电测井

第一章 视电阻率和自然电位

§ 1. 视电阻率

井中的电法探测，即电测井，专为研究岩层的电阻率以及在井内和井周围所发生的自然电场。

实际上，电测井就是确定岩层的视电阻率(KC)和自然电场的电位(ΠC)，并获得这两个参数沿井身的变化曲线。

大家都知道，电流强度 I 与导体两端的电位 U_1 和 U_2 之差成正比，与其电阻 R 成反比(欧姆定律)。即：

$$I = \frac{U_1 - U_2}{R} \quad (1)$$

由有一定截面的均匀物质所构成的导体，其电阻 R 与截面 S 成反比，与长度 l 及某一系数 e 成正比，即：

$$R = e \frac{l}{S} \quad (2)$$

系数 e 称为电阻率，它表示物质导电的能力。

在电测井的实际应用中，长度 l 和截面 S 分别以米和平方米

来表示，而岩層的电阻率則以欧姆米(Ом·м)表示。

这样，岩層的电阻率，就是每边長 1 米的立方岩塊的兩对面之間的电阻(以欧姆表示)。

确定了各种岩層的电阻率后，就可以根据电阻率判断被井鑽穿的地層，确定它們的成層次序和地質特性。根据电阻率就能分出含油層及含气層，因为这些含油、气層的电阻率，較之孔隙中只含有水的岩層要大一些。

均匀介質电阻率的确定

为了确定岩層的电阻率，应將由一直綫上的三个电極^①所構成的測井电極系放入井中

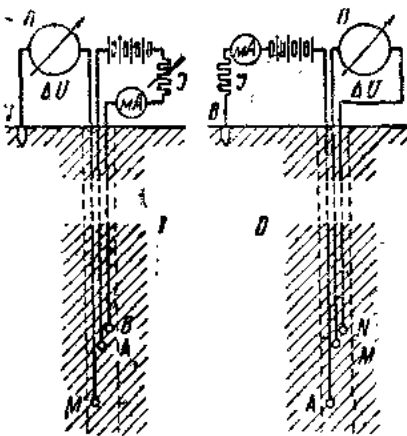


圖 1 測定視电阻率的綫路
 I—双極电極系；II—單極电極系；A、B—供电电極；M、N—測量电極；II—測量仪器；MA—測量电流的仪器。

此外，在測量时，在地面还要用一个电極(圖 1)。將电流 I 通入以 A、B 标示的、称为供电电極或电流电極的兩個电極中，以便在岩層中造成一个电場，并借助另外兩個以 M、N 标示的測量电極，測出电場在此兩点間所形成的电位差 ΔU 。

假設介質是均匀的(岩層为無限厚，且無井的影响)，根据圖 1 左边所示的电極系測量 I 和 ΔU 所得的結

① 用来实现电路与地或与泥浆相接触的金属导体(接地裝置)，在地球物理中称之为电極。

② 在測量視电阻率时，借助三芯电纜使电極直接和纜芯相連，以便將电極系下放到井中去。

果，来确定此介质的电阻率 e_n 。

大家都知道，距离电极 A 为 AP 的 P 点，由于电极 A 所产生的电位 U_{AP} 等于：

$$U_{AP} = \frac{e_n I}{4\pi} \cdot \frac{1}{AP}. \quad (3)$$

把电极 A 、 B 的尺寸看成很小(点状)，就得到电极 M 的电位为：

$$U_M = \frac{e_n I}{4\pi} \left(\frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} \right) = \frac{e_n I}{4\pi} \cdot \frac{\overline{AB}}{MA \cdot MB}.$$

电极 N 距离电极 A 、 B 很远，因此，可将其电位视为零：

$$U_N = \frac{e_n I}{4\pi} \left(\frac{1}{NA} - \frac{1}{NB} \right) \approx 0.$$

电极 M 、 N 间的电位差

$$\Delta U = U_M - U_N = \frac{e_n I}{4\pi} \frac{\overline{AB}}{MA \cdot MB}. \quad (4)$$

由此，岩层的电阻率

$$e_n = 4\pi \frac{MA \cdot MB}{\overline{AB}} \cdot \frac{\Delta U}{I} = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (5)$$

式中 K 为电极系的系数，与电极间的距离 MA 、 MB 和 \overline{AB} 有关并等于：

$$K = 4\pi \frac{MA \cdot MB}{\overline{AB}}. \quad (6)$$

将(5)式和确定线状导体电阻率的(2)式加以比较，可以看出它们的不同之处，在于 $\frac{\Delta U}{I}$ 的系数，即在无限介质中，系数 K 代替了线状导体的 $\frac{s}{l}$ 。

利用图 1 右边所示的电极系，我们可以得到相同的结果，只是在这情况下，电极系的系数 K 是用

$$K = \frac{4\pi AMAN}{MN} \quad (6')$$

来表示，即以 A 、 M 和 N 代替了 M 、 A 和 B 。

視电阻率

假定是在不均匀的介質中，例如在有限厚的岩層中进行測量，而且電極系所在的井內的泥漿电阻率与岩層的电阻率不一样，这时，電場的电位也將与均匀介質中不一样。因此，利用公式(5)就不能由測量的結果来确定岩層的电阻率。

但是，实际上在任何介質中，測定 I 和 ΔU 后，都可应用适用于均匀介質的公式来确定电阻率

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I} \quad (7)$$

由此結果所得到的 ρ 值，称为視电阻率或簡称 KU 。

这样，用在均匀介質中确定岩層电阻率的裝置进行測量，就可得到岩層的視电阻率。在一定的電極系尺寸和位置下，所測得的某一种不均匀介質的視电阻率，乃是某一假想均匀各向同性介質的电阻率，如用同一電極系測量时，它所得的結果將与此不均匀介質情况下得到的相同。

通常，以毫伏来測量电位差 ΔU ，以毫安測量电流强度 I ，以米測量電極系的 K ，以欧姆米来求視电阻率。

在进行电測时，我們常会碰到不均匀的介質。因此，視电阻率与電極系周圍岩層的电阻率有所不同。視电阻率的大小与電極系附近地層的电阻率及其厚度、傾斜程度有关，与井徑和充滿井內的泥漿的电阻率有关，还与電極系的電極排列以及別的一些原因有关。

介質愈不均匀，視电阻率与岩層电阻率的差別就愈大；只有在均匀介質中，視电阻率才与真电阻率相同 ($\rho = \rho_n$)。

电阻曲线

视电阻率测量的结果，可以由表示这种数值随深度变化的曲线——即电阻曲线（KC曲线）来表示。要得到电阻曲线，只要保持通过电极A和B的电流强度不变，在电极系沿井身移动时，记录由电流所造成的电场在电极M及N间的电位差 ΔU 就行了。

由于 ΔU 在这种情况下正比于 ρ ，因此，所得到的曲线将是以前某种比例尺表示出来的电阻曲线。如果用电压常数（即相当于1厘米刻度的毫伏数）等于 m 的仪器进行记录，那么，电阻曲线的比例尺 n （即每一厘米所代表的欧姆米数）将由（7）式而得，

$$n = \frac{Km}{I} \quad (8)$$

通常所求的电阻曲线，其比例尺是预先给定的，选择记录视电阻率所用的仪器的适当测量范围（电压常数），和确定必要的电流强度 I ，就可以做到这一点。如果要求得比例尺为 n 欧姆米/厘米的电阻曲线，并选用电压常数等于 m 毫伏/厘米的测量范围，那么，由（8）式得出的电流应为：

$$I = \frac{m}{n} K \quad (9)$$

由一条电阻曲线或由各种电极系（即在各种电极不同排列的情况下）所得到的所有电阻曲线，可以对井所钻穿的岩层电阻率得到一个概念。

单极电极系和双极电极系 任一介质中所取的任意两点 P_1 和 P_2 ，具有下列特性：当电流通过 P_2 点时， P_1 点的电位，就和同样大小的电流通过 P_1 点时 P_2 点所具有的电位一样（互换原理）。

对于均匀介质，这种情况的正确性从（3）式即可明显的看出，对于任一介质，其正确性也已被证明[5]。

由互換原理得知：電測時所用的裝置，其供電電極和測量電極是可以互換的。這就是說，如果在電流通過電極 A 及 B 時，測出電極 M 及 N 間的电位差，並得到了某一視電阻率值，那麼，將電極的用途改變一下，就是說將電流通過原先作為測量用的電極，並將原來供電電極間的电位差測量一下，我們就可以得到同一個視電阻率數值。

這樣，根據圖 1 所示的 I 和 II 綫路所作的測量，就會得到相同的結果，並且具有一個供電電極的電極系（即單極電極系，以前稱為直接供電電極系），在原理上說來，與具有兩個供電電極系（即雙極電極系，以前稱為互換供電電極系）沒有什麼差別；這兩種電極系是等值的。

在實際工作中，既用單極電極系，也用雙極電極系，所採用的電極系應使干擾的影響較小，並保證能滿足其他要求，例如保證可以進行綜合測量。因此，最常用的是雙極電極系，因為在這種情況下，它便於同時記錄視電阻率曲綫和自然电位曲綫。

电位電極系和梯度電極系 我們把電極系中接到同一電路——供電電路或測量電路——的兩個電極叫做成對的電極或同名的電極，而把電極系中與不在電極系中的電極（在地面）構成同一電路的電極叫做不成對的電極。

電極系有兩種，

1) 电位電極系 ——成對電極分開得較遠的電極系；成對電極間的距离大於由不成對電極到最近一個成對電極之間的距离。

2) 梯度電極系 ——成對電極比較靠近的電極系；成對電極間的距离小於不同名稱的電極之間的距离。

在第一種情況下，最理想的一種電極系是電極系中有一個成對電極離得很遠（無窮遠），結果就成了二電極電極系。

在這種情況下，假定電極系是單極的， $NB = \infty$ ；這時，對

于均匀介质可求得:

$$U_M = \frac{e_n I}{4\pi} \cdot \frac{1}{AM}, \quad U_N = 0$$

及

$$e = 4\pi AM \frac{\Delta U}{I} = 4\pi AM \frac{U_M}{I}. \quad (10)$$

当用这类理想的电极系时, 视电阻率可以由测量电场中 M 点的电位来求出, M 点与形成电场的电极 A 有一定的距离 (AM)。这种以成对电极分开得较远为基础的电极系, 即称为电位电极系。

在第二种情况下, 最理想的一种电极系是相邻电极间的距离很小的电极系。

这时, 假定电极系是单极的, 而且 $AM \approx AN$, 则得

$$e = \frac{4\pi AMAN}{MN} \cdot \frac{\Delta U}{I} = \frac{4\pi AM^2}{I} \cdot \frac{\Delta U}{MN}. \quad (11)$$

但是, $\frac{\Delta U}{MN}$ 是 M 点沿着 Z 方向(电极系电极排列的方向)的

电位梯度。

这样, 当用这类理想的电极系时, 视电阻率可以由测量电场中 M 点的电位梯度来求出, M 点与形成电场的电极 A 有一定的距离 (AM)。这种以成对电极相离很近为基础的电极系, 即称为梯度电极系。

电极系的代表符号 为了标明电极系, 我们按照电极在井内自上而下排列的次序, 写出电极的符号, 并在各电极符号间写上以米计算的相应距离(图 2 上的 x 和 y)。

但要分开: 成对电极在上面者(在不成对电极之上), 称为倒装电极系; 成对电极在下面者(在不成对电极之下), 称为正装电极系。由于成对电极在上面的梯度电极系能划分高电阻厚地层的顶界, 故称为顶部电极系; 而成对电极在下面的梯度电极系, 由

于能划分高电阻厚地層的底界，故称为底部电极系。

同一类型的电极系，可以其长度加以区别。

从不成对电极到成对电极間的中点 O 的距离，称为梯度电极系的电极距。

$$L = \frac{\overline{MA} + \overline{AB}}{2} \text{ 或 } L = \overline{AO} = \frac{\overline{AM} + \overline{AN}}{2} \quad (12)$$

当电极系的相鄰电极間的距离 \overline{MN} 或 \overline{AB} 相当大时，則不用 \overline{AM} 和 \overline{AN} (或 \overline{MA} 和 \overline{MB}) 的算术平均值，而是用几何平均值来计算电极距 L [3, 106];

$$L = \sqrt{\overline{AM} \overline{AN}} = \sqrt{\overline{MA} \overline{MB}} \quad (13)$$

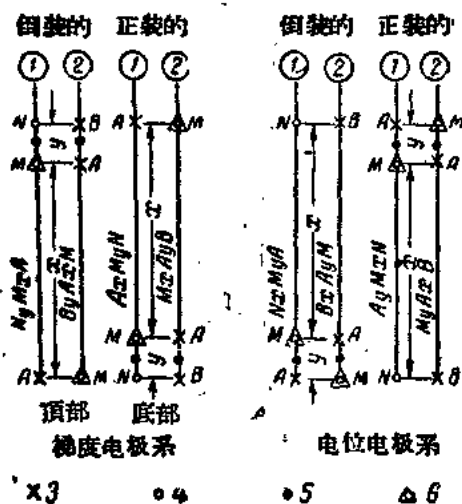


圖 2 电极系的代表符号

1—單極电极系；2—双極电极系；3—供电电极 (A, B)；4—測量电极 (M, N)；5—电阻记录点 (O 点)；6—自然电位记录点。

电位电极系的电极距用相鄰兩电极間的距离来计算：

$$L = \overline{AM}$$

研究视电阻率与电极系各电极間距离的关系証明，只有这样的距离才是最有用的。

把測得的视电阻率记录在相鄰电极間的中点，此点即称为电阻记录点。这样选择的记录点，其视电阻率曲线和地質剖面的关系是最明显的。

每一地区的视电阻率，都应当用对该地区来说是标准的，并且是由实际工作经验中所选定的最合适的一种电极系 (或两种电

極系)来进行測量。

除标准電極系外，还常用能够划分岩層，分出其界面和估計其电阻率的輔助電極系来进行測量。如要获得关于岩層电阻率的最真实概念，則用專門的電極系組来进行測量——即橫向測井(見§28)。

表1列出了根据(6)式和(14)式計算出来的最常用的電極系的 K 值。这些公式只适用于当電極間距远大于電極本身的大小和電纜(或絕緣裝置及重錘，如果電極系裝配在他們上面的話)的直徑时；電極間的距離至少应大于電極大小的五倍和電纜直徑的三倍。如沒有上述条件，則電極系的系数应该在已知电阻率的液体中，用实验求出。

在美国，电測井时常采用三种電極系，即小的电位電極系($\overline{AM} = 0.40 - 0.50$ 公分)、大的电位電極系(\overline{AM} 約为1.5公尺)或電極距为2米的梯度電極系，以及大的梯度電極系(通常電極距为5.6公尺)。

§ 2. 电阻測井法用的各种電極系

以上所述的三个電極的電極系，已被广泛应用，但是，用帶有其他数目電極的電極系，也可用来測量視电阻率。

理想电位電極系 如果在三電極电位電極系中，把靠边上的成对電極 N (或双極電極系中的 B)移到了地面，那就得到了两个電極的電極系(圖3a)。这时， $\overline{MB} = \infty$ ，根据(10)式：

$$K = 4\pi\overline{AM} \quad (14)$$

供电位電極系用的理論曲綫，通常就是根据这种“理想的”电位電極系，但是，实际应用它时却不大方便，因为使用这种電極系时，勿論供电电路或測量电路都不是成双的，因此在測量时，它們之間的相互感应干扰会急剧地增加(見§39)。

四電極電極系 通常分佈在地面上的電極 B (在單極電極系中)，可以併入電極系中，其結果就形成了四電極電極系。我們