

52173

基本館藏

油井的電阻 測井法

蘇聯 斯·格·科馬洛夫著
石油管理總局地質局編譯室譯



燃料工業出版社

12
73

油 井 的 電 阻 測 井 法

蘇聯 斯·格·科馬洛夫著

石油管理總局地質局編譯室譯

燃 料 工 業 出 版 社

本書講述用電測中的電阻測井法所得曲綫資料在地球物理上的解釋法，特別着重於橫向測井（即所謂離差測井法）的地球物理解釋法，並包括離差曲綫的形狀，測井資料的整理以及此種測井法在實際上的應用等問題。

本書專供從事井下電測曲綫解釋工作人員以及研究石油井下地質人員閱讀之用。

本書在翻譯過程中承石油學院張更驥同志的親切幫助，在審校過程中承石油管理總局鑽探局電測室同志的幫助，使本書能儘快的出版，譯者在此一併致謝。

* *

*

油井的電阻測井法

КАРОТТАЖ ПО МЕТОДУ СОПРОТИВЛЕНИЙ

根據蘇聯國立燃料科技書籍出版社(ГОСТОПТЕХИЗДАТ)

1950年列寧格勒俄文第一版翻譯

蘇聯 С. Г. КОМАРОВ 著

石油管理總局地質局編譯室譯

燃料工業出版社出版

地址：北京東長安街燃料工業部

北京市書刊出版業營業許可證出字第012號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：楊憶美 校對：王承祐

書號349 * 油53 * 850×1092 1/16 開本 * 7 1/2 印張 * 137 千字 * 定價 19,400 元

一九五五年一月北京第一版第一次印刷(1—3,000冊)

序 言

隨着深度變化的視電阻率 (KC) 的曲線是電阻測井法直接的結果。我們稱這種曲線為視電阻率曲線或電阻曲線。

電阻曲線的類型決定於用來獲得電阻曲線的電極。為了便於對比測井資料，在同一區域井中，必須採用適合於所有井的同樣標準的電極進行測量，但通常在最普通的情況下，則用一個標準電極進行測量。為了用標準電極獲得最好的電阻曲線，應當選擇標準電極。

1. 在用標準電極獲得的電阻曲線上(標準電阻曲線)，應當盡可能明顯地表現出與圍岩電阻率有很大區別的所有岩層；這些岩層的分界面，必須精確地找出。

2. 標準電極的電阻曲線，應當提供關於岩層電阻率方面的或多或少的正確概念；井眼和泥漿浸入對視電阻率的影響不應當過大。

通常標準電極對所有這些條件並不完全適合。根據標準電極測出的電阻曲線，不能永遠成功的提出關於岩層電阻率的概念，特別是當泥漿浸入到岩層或者井徑增大時。甚至根據用一個電極進行測量是不可能預期發現這些因素的存在。

用標準電極通常發現不出岩層某一部分(特別是岩層厚度接近於標準電極距的高電阻岩層，和在許多情況下岩層厚度小於電極距的高電阻岩層)，或者沒有像應用其他電極容易把岩層某一部分區別出來。

除標準電極測出的曲線外，為了獲得岩層電阻率更正確的概念，還必須用輔助電極進行測量。當標準電極的讀數和岩層的電阻率間差別很大時，這些測量就更重要了。在下列情況下，必須用輔助電極進行測量：

a. 當泥漿有浸入的可能性時，特別當用質量不好的泥漿鑽井時，當鑽穿岩層壓力低的滲透良好層時(例如：強烈的排水岩層)，以及當有泥漿消耗的徵候時，須要用輔助電極來進行測量。

b. 當岩層水和泥漿的礦化作用有顯著區別時，須要用輔助電極來進行測量。

a. 當用標準電極測出的電阻曲線與標準曲線有顯著區別時(劇烈展平的曲線或者劇烈降低的電阻率的曲線)，須要用輔助電極進行測量。

r. 當標準電極距和有關的岩層厚度間的比例不適合時，必須採用輔

助電極進行測量。

某些井（在地質井和探井內）的資料非常重要，通常用輔助電極測量是適合的。

在泥漿往岩層浸入的情況下，受井眼影響大時（例如：如果泥漿礦化的很厲害），應當採用長電極距作為輔助電極；為此，通常使用梯度電極，因為長的電位電極不能發現許多薄岩層。

為了明顯地分開高電阻薄層，應該採用長的梯度電極（例如4公尺，8公尺），或者採用長度小的電極（約1公尺長的梯度電極或者約0.25公尺的電位電極）來作為輔助電極；在緻密間互層和屏障現象影響很厲害的情況下，最好採用短的電極。

如果，由於岩層的厚度與電極距間的比例不好的結果，在用標準電極測出的電阻曲線上，任何岩層都不能明顯地區別出時，則應該採用長度等於岩層厚度的0.5至0.7的輔助梯度電極，或者採用長度等於岩層厚度的0.3至0.5的輔助電極。

為了精確地找出岩層的分界面，應當採用短電極作為輔助電極；為此，採用其他類型的輔助電極比採用標準電極更適合。

採用輔助電極大多是用來解決不太肯定的問題——求得關於整個剖面或者剖面某部分岩層電阻率的更正確的資料，同時（特別是在探井內）預先很難確定在怎樣的程度上，以及根據什麼原因，用標準電極所獲得的視電阻率與真電阻率不同。在這種情況下，通常採用以下各種形式的輔助電極。

一般規定用的輔助電極如下：

1. 由標準形式中電極作用的改變而得到的電極。
2. 幾個長的和短的梯度電極。
3. 橫向測井用的一套電極。

第一種變形：如果採用電位電極作為標準電極，那麼由它們中間電極作用的改變來獲得長的梯度電極（例如：由B7.5 A0 75M電極變為M7.5 A0.75B）。我們把一種電極改變為另一種電極不須要升到地面上來這是很簡單的，同時也是很方便的。通常採用兩個電極（電位電極和由電位電極變得的長的梯度電極）為標準電極。

在這種情況下，電阻曲線可有以下幾種作用：

- a. 可以明顯地區別出大多數的岩層（多半是根據短電極測出的電阻曲線）；

6. 可以獲得厚岩層電阻率的精確概念(根據長電極測出的電阻曲線);

a. 可以區別出增阻泥漿浸入。

要發現增阻泥漿浸入, 電位電極的讀數就要大大地超過梯度電極的讀數。但是, 在某些情況下, 例如, 在岩層內(岩層厚度小於梯度電極距)常沒有增阻泥漿浸入時, 就可以發現電位電極的讀數超過梯度電極的讀數(在高電阻岩層內); 同時, 當泥漿浸入時, 梯度電極的讀數可能小於電位電極的讀數。這個在確定增阻泥漿浸入的情況時, 可能引起錯誤。

第二種變形: 用幾個梯度電極測量, 可以解決第一種變形中的同樣問題。電極的數量越大和電極長度變化範圍越寬, 根據梯度電極測量的結果, 岩層電阻率的資料也就得到更完全。為了準確地找到岩層的分界面, 通常採用尺寸小的頂部梯度電極和底部梯度電極。

第三種變形: 當進行橫向測井(BK3)時, 井中所研究的地段, 應該用經過選擇便於將理論資料整理它所測到的結果的一些電極進行測量。通常用來進行橫向測井的電極, 包括有實際用於測量視電阻率的梯度電極長度的整個範圍。

根據橫向測井的結果, 特別在這些測量結果與理論材料對比後, 可以求出被井鑽穿的岩層電阻率最完滿的概念。此外, 由於橫向測井材料整理的結果, 可以求出泥漿浸入岩層中的某些資料, 無論增阻或減阻對於測井的地質解釋都非常重要; 由於橫向測井這個緣故, 雖然用數量多的電極測量困難, 但是在需要油井的精確資料的地方仍得到廣泛的應用。

目 錄

序 言

第一章 橫向測井曲線族	6
§ 1. 基本概念	6
§ 2. 橫向測井曲線	11
§ 3. 有減阻泥漿浸入發生時的等值關係	14
§ 4. 等值曲線圖 SK-2	17
§ 5. 梯階形橫向測井曲線的構成法	20
§ 6. U-等值性	25
§ 7. 橫向測井曲線族 SK3-U 的製圖法	28
§ 8. 在增阻泥漿浸入情況下的近似的等值性	31
§ 9. 鐘形橫向測井曲線之繪製	35
第二章 電阻曲線的形狀	36
§ 10. 主要的電阻曲線	36
§ 11. 高電阻的均勻地層	38
§ 12. 低電阻的均勻地層	42
§ 13. 間互層	45
§ 14. 岩層組	53
§ 15. 實際電阻曲線	57
第三章 有限厚岩層的視電阻率梯度電極高電阻率岩層	60
§ 16. 視電阻率的基本數值	60
§ 17. 岩層有限度的影響	61
§ 18. 薄層曲線族 TII-1	63
§ 19. 圍岩電阻率的影響	68
§ 20. 傾斜岩層	75
§ 21. 薄層曲線族 TII-2	76
§ 22. 井的影響	78
§ 23. 非常薄的岩層	80
§ 24. 較近二電極間距離的影響	82
§ 25. 薄層層面位置的確定	84

§ 26. 視電阻率的基本值	84
§ 27. 高電阻率岩層	86
§ 28. 低電阻率岩層	88
第四章 橫向測井資料的整理	88
§ 29. 電極	88
§ 30. 測量結果的預先整理	92
§ 31. 橫向測井曲線的構成	98
§ 32. 實際橫向測井曲線同理論曲線的比較	99
§ 33. 實際橫向測井曲線同二層曲線的比較	101
§ 34. 在減阻浸入情況下實際橫向測井曲線同理論曲線的對比	103
§ 35. 在增阻泥漿浸入情況下實際橫向測井曲線 同理論曲線的比較	103
§ 36. 在沒有用井徑規測量時實際橫向測井曲線 同理論曲線的比較	109
§ 37. 泥漿浸入區電阻率	114
§ 38. 測井曲線的右部	117
§ 39. 根據測井曲線右部同根據橫向測井曲線 作出的解釋結果的比較	121
§ 40. 增阻泥漿浸入的特徵	123
§ 41. 橫向測井法應用的某些限制	126
§ 42. 實際橫向測井曲線同理論曲線的差別	128
§ 43. 泥漿電阻率	129
§ 44. 整理橫向測井材料的手續	131
§ 45. 電位電極橫向測井	134
§ 46. 不完全的橫向測井	135
第五章 橫向測井法的應用	138
§ 47. 由於橫向測井所求得的材料	138
§ 48. 砂質泥質剖面	141
§ 49. 碳酸鹽岩剖面	144
§ 50. 使用橫向測井的各種情況	145
第六章 實際電阻曲線	145
§ 51. 實際電阻曲線形狀	145
§ 52. 橫向測井示例	158
圖 72—105 的說明	170

第一章 橫向測井曲線^①族

§1. 基 本 概 念

橫向測井法的材料是根據 Л. М. 阿利平 (Л. М. Альпин) 研究出的無窮厚岩層的電阻測井理論，以及根據這理論求得的許多計算結果來加以整理的。

無窮厚岩層視電阻率的計算結果，通常都劃成理論曲線的形式，這些曲線可表示出視電阻率與各個相關的參數之間的關係。這些參數就是：岩層、泥漿及泥漿浸入區的電阻率，井徑，泥漿滲透區直徑以及電極距。許多這樣的曲線就構成所謂的「橫向測井曲線族」。

在構成橫向測井曲線時必須採取若干假定，特別是下列諸假定，以簡化我們所研究的問題。

甲、電極沿井軸分佈；

乙、梯度電極的兩個較近電極間的距離無限小，而電位電極的兩個同

符 號 表 1

名 稱	現用符號	以前常用的符號	以前用過的其他符號
視電阻率	ρ	ρ	$\rho_k; \rho_E$
泥漿電阻率	ρ_0	ρ_1	ρ_0
被泥漿滲透的岩層的電阻率(泥漿浸入地帶電阻率)	ρ_Δ	ρ_2	ρ_2
(未被浸入的)岩層真電阻率	ρ_π	ρ_3	ρ_3
梯度電極距	$\overline{AO}; L$	$\overline{AO}$	—
電位電極距	$\overline{AM}; L$	$\overline{AM}$	—
名義上的井徑(即鑽頭直徑)	d_0	d	—
實際的井徑(用井徑規量出者)	d	d	—
虛井井徑(製作曲線時採用假想井徑)	d_ϕ	—	—
虛井泥漿電阻率(製作曲線時採用假想泥漿電阻率)	ρ_ϕ	—	—
有效井徑(泥漿浸入區的直徑加實際井徑)	d_s	—	—
泥漿滲透區直徑	D	D	—

① 橫向測井曲線即離差曲線。——譯者

種電極間的距離無限大；

丙，泥漿滲透區是一個與井同軸的空心柱，其電阻率各處是一樣的。

表 1 中列入了現在所採用的符號，同時也列入了以前採用過的各種符號。

在普通的橫向測井曲線族裏收集了一些曲線，它們表示出在岩層無限厚情況下 ρ/ρ_c 與 L/d 的相互關係。

把下列諸情況，以及與它們相應的諸橫向測井曲線區分開來。

1. 基本的情況——沒有泥漿浸入，井徑等於鑽頭直徑。這種情況下的橫向測井曲線——兩層橫向測井曲線——收集在所謂「二層」橫向測井曲線族 BK3-1 上。為了使用方便起見，這個曲線族又分為兩部——相當於 $\rho_n > \rho_c$ 情況的橫向測井曲線 BK3 1a 及相當於 $\rho_n < \rho_c$ 情況的橫向測井曲線 BK3 16。梯度電極的曲線族 BK3 1a 及 BK3-16 如圖 1 及圖 2 所示。

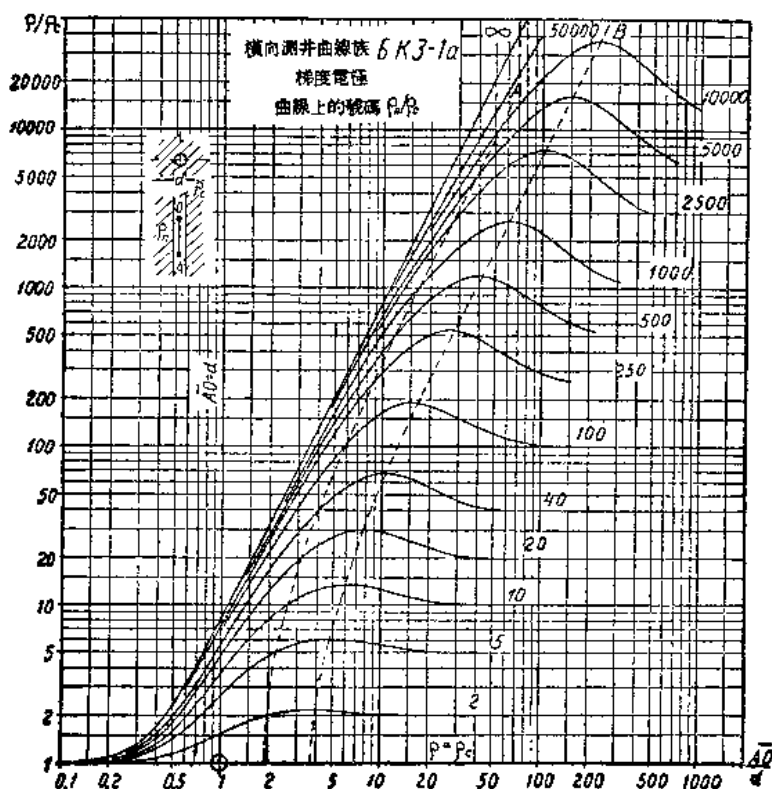


圖 1

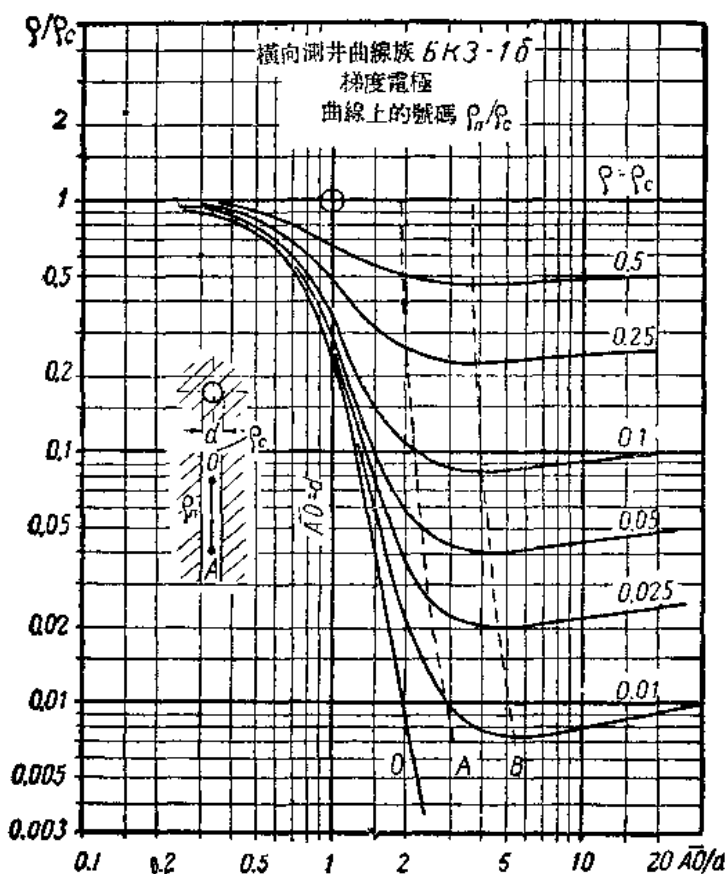


圖 2

如果井的實際直徑大於它名義上的直徑，而在作圖時以它的名義井徑為井徑，那末這時的二層橫向測井曲線，只是座標紙上的電阻軸相對的向右移動一些。

2. 減阻泥漿浸入——泥漿滲入岩層的結果^①，在井的週圍造成一個柱形層，其電阻率為泥漿電阻率及未被浸入的岩層的電阻率之間的某一數值。

這種情況下的橫向測井曲線，由於它的形狀我們稱它為梯階形橫向測井曲線。

① 其實由於泥餅的過濾作用，井中滲入岩石的液體可能不是泥漿。但是因為這液體的電阻率與泥漿電阻率相差無幾，我們在這裏以及以後就稱這個由井中滲入岩層的液體為泥漿。

3. 增阻泥漿浸入——泥漿滲入岩層的結果，在井的週圍造成一個柱形層，其電阻率大於泥漿電阻率，並大於未被滲入的岩層的電阻率。

這種情況下的橫向測井曲線，我們稱之為鐘形橫向測井曲線。

泥漿滲入岩層情況下的橫向測井曲線，我們將稱之為三層曲線，以區別於二層曲線。

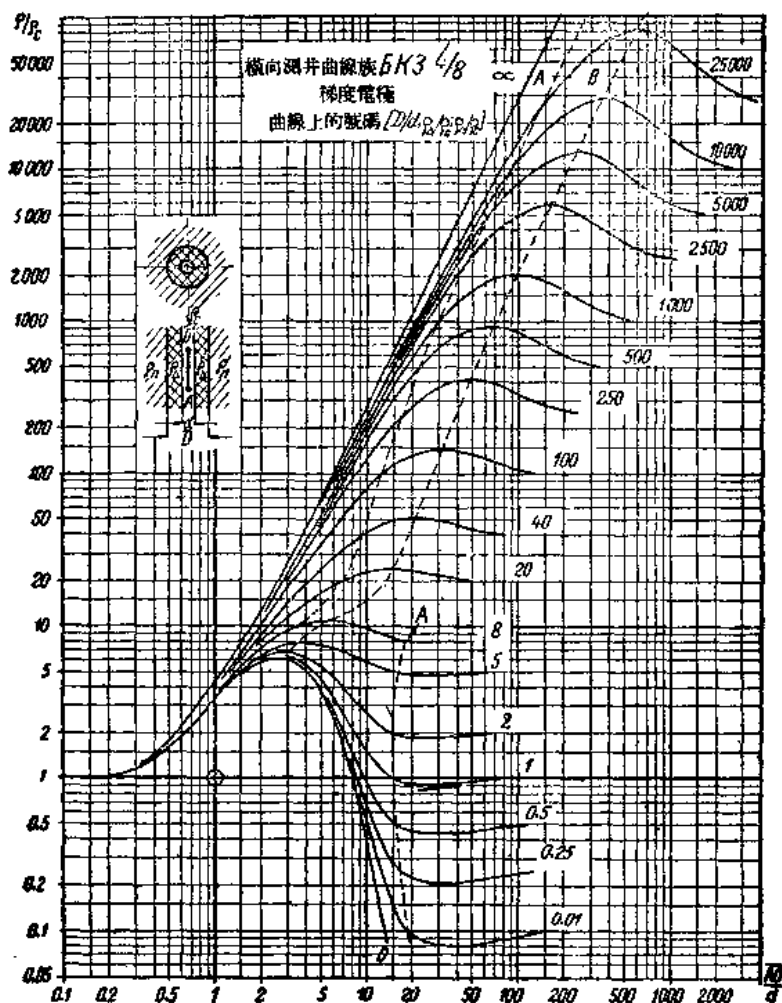


圖 3

三層曲線通常決定於五個參數： ρ_n 、 ρ_A 、 ρ_c 、 D 及 d ，但是由於曲線是畫在雙對數方格紙上的，它們的形狀及位置就只與三個比值有關： ρ_A/ρ_c 、

D/d 及 ρ_n/ρ_c

因此二層橫向測井曲線可由一個比值： ρ_n/ρ_c 來決定，參數 ρ_n/ρ_c 被稱為橫向測井曲線的模數。

通常都把 D/d 與 ρ_A/ρ_c 相同的三層曲線畫在一張紙上，形成一個曲線族。在同一個這樣的曲線族上， ρ_n/ρ_A 有的大於 1，有的小於 1，前者相當於增阻泥漿浸入，後者相當於減阻泥漿浸入（請看圖 3 所示的梯度電極三層曲線族）。

通常的三層曲線族都用兩個數字來標誌出來：其中一個是 D/d ，另一個是 ρ_A/ρ_c 。例如曲線族上寫着橫向測井曲線 -4/8，這就是說，在這張曲線族上畫着橫向測井曲線 $D/d=4, \rho_A/\rho_c=8$ 。

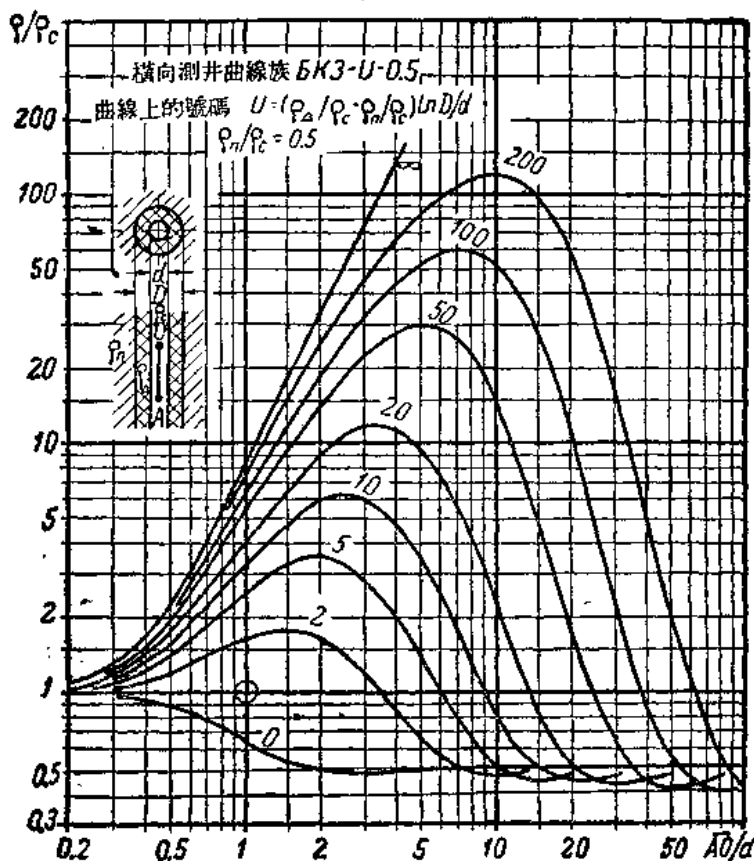


圖 4

在增阻泥漿浸入情況下，我們採用一種特別的曲線族，即所謂橫向測井曲線族-U（請看圖4中梯度電極的曲線族U）；在這個曲線族中各個曲線是以一個與所有上述參數有關的導出因數U來互相區別的。

除上述各種普通形式的曲線之外，我們還應用一些輔助的曲線族，它們在分類方法上或者在形式上不同於普通的橫向測井曲線。比如說在輔助曲線族上可以畫一些視電阻率與岩層電阻率、與滲透區電阻率以及與滲透區直徑的關係曲線。

因為通常只用梯度電極作橫向測井，所以我們以後只研究梯度電極的曲線族。

§ 2. 橫向測井曲線

我們來研究一下橫向測井曲線的一些性質。

從圖1及圖2可以看出，每個二層曲線都有兩個平行於橫軸的漸近線：右面一個相當於岩層電阻率 ρ_n ，左面一個相當於泥漿電阻率 ρ_c 。後者是所有曲線公用的漸近線。隨着 $\overline{AO}/d$ 的逐漸增加，每一個曲線都離開左面一個漸近線，與右面一個漸近線相交，然後再趨近於它。

橫向測井曲線與其右面一個漸近線相交的交點形成一條曲線，我們稱之為曲線A，諸曲線的極大或極小點形成曲線B。

在電極距大時曲線A和B平行於曲線族的邊界曲線——模數為無窮大或無窮小的橫向測井曲線。二層曲線最顯著的特點就是它的極大（如果 $\rho_n/\rho_c > 1$ ）較右面的漸近線高，或極小（如果 $\rho_n/\rho_c < 1$ ）比右面的漸近線低。隨着模數的增加，曲線的極大值（ $\epsilon_{\text{макс}}$ ）與岩層電阻率的比值就隨之增加，而極小值（ $\epsilon_{\text{мин}}$ ）與岩層電阻率的比值隨之減少。圖5中的虛線示出 $\epsilon_{\text{макс}}/\rho_n$ 與 ρ_n/ρ_c 的關係曲線（超值曲線）及 $\epsilon_{\text{мин}}/\rho_n$ 與 ρ_c/ρ_n 的關係曲線（差值曲線）。這個圖是根據許多計算結果在大於 $\frac{\rho_n}{\rho_c}$ 及 $\frac{\rho_c}{\rho_n}$ 下歸納出來的。

在減阻泥漿浸入（ $\rho_n > \rho_d$ ）情況下，橫向測井曲線與當 $\rho_n/\rho_c > 1$ 時的二層橫向測井曲線相似而有不同之處。

甲、隨着 $\overline{AO}/d$ 的增加曲線上升得較緩；

乙、 $\epsilon_{\text{макс}}/\rho_n$ 較小；

丙、極大點的位置較右。

為了互相比較起見，圖6中畫出二層橫向測井曲線和同一模數的減阻泥漿滲透的三層曲線。

當泥漿浸入很深時隨着 D/d 的增加，曲線的右面一段就趨近於以 ρ_n/ρ_d

為模數的二層曲線，而左面一段趨近於以 e_d/e_c 為模數的二層曲線，後者

是在 e_d/e_c 假定的情況下
梯階形曲線的下限。

對梯階形橫向測井曲線來說，也可以畫曲線 A 及 B 。它們的上部幾乎平行於模數為無窮大的二層曲線的直線一段。

在增阻泥漿浸入情況下的橫向測井曲線與二層曲線不同之點在於：
 e_{max}/e_n 較大，極大點位置較左(圖 6)。在增阻泥漿浸入情況下的橫向測井曲線，其中間一部分較與之相應的二層曲線隆起一些。

相當於泥漿浸入無限深的，即以 e_d/e_c 為模數的二層曲線是所有以假定的 e_d/e_c 為參數的，相當於增阻泥漿浸入的三層曲線的上限。鐘形曲線的曲線 A 及 B ，其下部幾乎平行於模數 $e_n/e_c=0$ 的二層曲線。

在研究和應用橫向測井法的過程中，特別是在把橫向測井法應用於砂層及碳酸鹽岩鹽剖面——這裏岩層電阻率與泥漿電阻率的比值達到很大的數

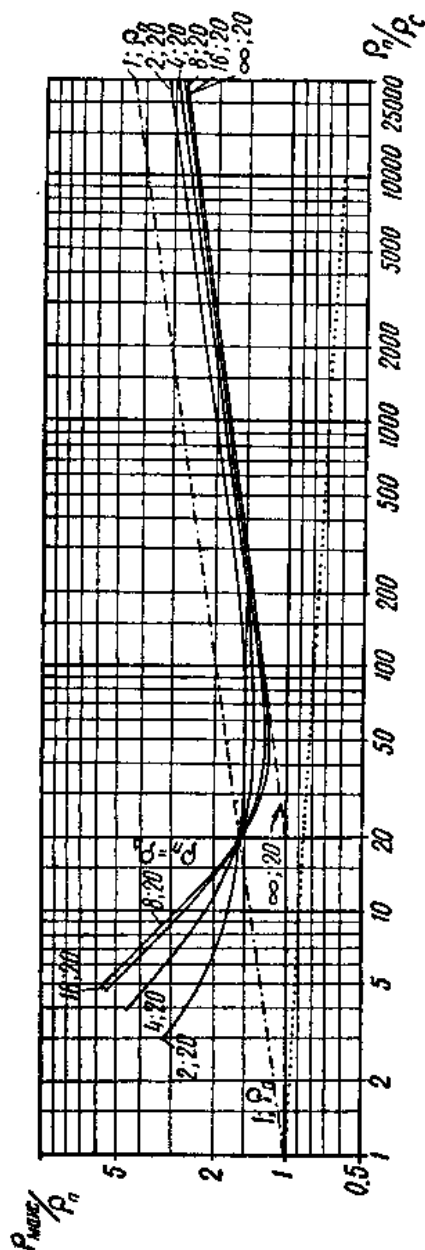


圖 5 上升橫向測井曲線的阻值曲線 (e_{max}/e_n 與 e_n/e_c 的關係曲線), $e_d/e_c=20$, 每條曲線相當於 D/d 的一個固定值。曲線上的字碼: D/d ; e_d/e_c 段點線 (——) 和細點線 (.....) 表示出二層曲線的阻值曲線 (e_{max}/e_n 對 e_n/e_c 的關係曲線) 及差值曲線 ((ρ_{max}/e_n) 對 e_n/e_c 的關係曲線)。

值，而滲透區的電阻率在某些情況下超過泥漿電阻率達 100 倍——的過程中，我們有必要擴展我們的計算材料。

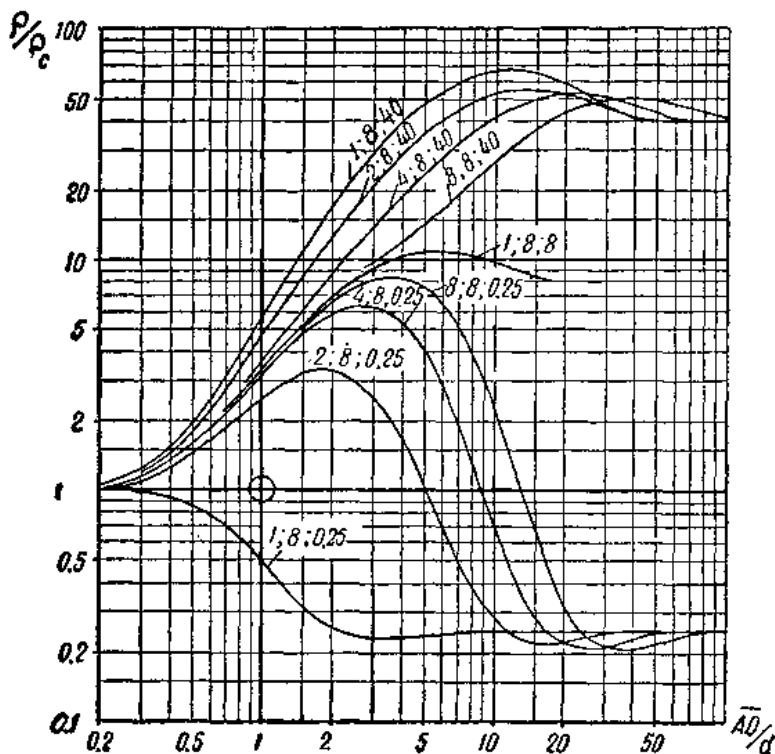


圖 6 二層曲線及三層曲線的對比 $\rho_n=40$ 及 $\rho_n=0.25$ 曲線上的號碼: $D/d; \rho_{\Delta}/\rho_c$ 及 ρ_n/ρ_c 。

爲了在各種情況下整理橫向測井的材料，就必須具有在下列參數值範圍內的橫向測井曲線。

- 甲、岩層電阻率用泥漿電阻率的比值由 0.1 到 25 000；
- 乙、泥漿浸入區電阻率與泥漿電阻率的比值由 5 到 200；
- 丙、滲透區直徑達到 16 倍井徑。

下面將要研究如何構成必要的橫向測井曲線，這些圖根據現有計算資料的歸納與插入根據「等值條件」而構成的。

所謂的「等值條件」就是這樣的一些條件，當它們得到滿足時相當於某一參數的橫向測井曲線就與相當於另一參數的曲線相合。特別有趣的是這樣一些等值條件，它們使三層橫向測井曲線與二層曲線相合。曲線間的

等值性大大地簡化了近似地求得橫向測井曲線的方法；第四章所述的橫向測井材料的整理方法與曲線的等值性有着緊密的關係。

下面就要研究梯階形橫向測井曲線的等值條件。

§ 3. 有減阻泥漿浸入發生時的等值關係

梯階形橫向測井曲線，如果不考慮它左面的一部分的話，可以由一個相當於同一岩層電阻率，而相當於另一虛井直徑 d_ϕ 和泥漿電阻率 ρ_ϕ 的二層曲線所代表。

等值條件：把計算出的二層曲線和梯階形橫向測井曲線相互比較一下，我們可以發現，當下列條件（等值條件）得到滿足時，二層曲線的形狀最接近於梯階形曲線（不考慮它左面的一部分）。

甲、兩個曲線的 $\rho_{\text{макс}}/\rho_n$ 相等；

乙、三層介質以及與之等值的二層介質沿軸向的導電率一樣。

頭一個條件是因為曲線極大點高出右面漸近線的高度是曲線形式的最顯著的特點。

第二個條件是在把電阻率無限大的岩層的等值條件推廣後得出的。

如所週知，如果 $\rho_n \rightarrow \infty$ ，則當 $z \gg 1$ 時

$$\frac{\rho}{\rho_c z^2} \rightarrow 2 \frac{1 + \alpha_{12}}{k^2 + \alpha_{12}}, \quad (1)$$

式中

$$z = 2 \frac{\overline{AO}}{d}; \quad \alpha_{12} = \frac{\rho_A - \rho_c}{\rho_c}; \quad k = \frac{D}{d}.$$

因此，對三層介質來說，當 $\overline{AO} \gg d$ 及 $\rho_n = \infty$ 時，我們有

$$\rho = 8\rho_c \left(\frac{\overline{AO}}{d} \right)^2 \times \frac{\rho_A d^3}{D^2 \rho_c + d^2 (\rho_A - \rho_c)}. \quad (2)$$

當 $D = d$ 時，就是說，當介質為二層時，

$$\rho = 8\rho_c \left(\frac{\overline{AO}}{d} \right)^2; \quad (3)$$

因此對虛井來說

$$\rho = 8\rho_\phi \left(\frac{\overline{AO}}{d_\phi} \right)^2. \quad (4)$$

三層介質用與它等值的二層介質代替時，視電阻率應當不變。使(2)