

电法勘探在铁路 工程地质勘测中的应用

(工程电探)

A·M·郭列里克 著
M·П·沙哈洛瓦

98113/16

人民铁道出版社

電法勘探在鐵路 工程地質勘測中的應用

(工程電探)

A·M·郭列里克 著
M·П·沙哈洛瓦
王 竹 亭 譯

人 民 鐵 道 出 版 社

一九五七年·北 京

本書詳述在鐵路工程地質勘測中採用電法勘探，
對降低開支、縮短時間、提高質量上，比目前所用的
鑽探勘測方法有顯著的效果。

本書分二部分共計十章，除了敘述電法勘探的原
理及在鐵路工程地質勘測中的應用外，還詳細地指出
工作中所必需的儀器及工作方法，可供我國鐵路遙綫
工程人員及一般地質工程人員作參考之用。

電法勘探在鐵路工程地質勘測中的應用 (工程電探)

Применение электроразведки при инженерно-геологических
изысканиях на железных дорогах
(Инженерная электроразведка)

苏联 А·М·Горолик, М·П·Сахарова 著
苏联國家鐵路運輸出版社 (一九五一年莫斯科俄文版)

Государственное транспортное
железнодорожное издательство
Москва 1951

王 竹 亭 譯

責任編輯 王 青 泉 責任校對 康 淑 靜

人民鐵道出版社出版 (北京市霞公府17號)

北京市書刊出版業營業許可証出字第010號

人民鐵道出版社印刷廠印

(北京市建國門外七聖街)

新 華 書 店 發 行

書號: 290 開本850×1168 1/32 印張4 1/2 字數152千

1955年3月第1版

1957年6月第1版第2次印刷

印數500册[累]2,300册 定價0.73元

緒 論

鐵路選綫的工作中，工程地質勘測的比重，可達50%。目前所用的工程地質勘測方法，費時甚多，並且需要很多工具。

爲了使鐵路選綫工作降低開支、縮短時間以及提高質量，迫切的需要採用新的和更爲經濟的工程地質工作方法。

蘇聯科學研究院（ЦНИИ）的鐵路建築及設計組（即現今的全蘇鐵路建築及設計科學研究所），水運工程局（Трансводстрой），鐵路設計局（Желездорпроект），蘇聯運輸設計局（Союзтранспроект）及其他機關等，很有效的把電法勘探利用到鐵路選綫工作中。這些工作曾指出：把電法勘探採用於鐵路選綫工作中的合理性和把電法勘探介紹於廣大的選綫工程師及地質工程師的必要性。

這個本子，是想把工程地質勘測中採用電法勘探的資料予以概念化並且製定關於這個問題的一種實際的指導。書中在描述電法勘探原理以外，還指出工作中所必需的儀器及工作方法的資料，此外還介紹出在鐵路選綫各種不同情況中使用電法勘探方法的說明。書中的理論，都用豐富的實際例證加以闡明。

所長

Т·Г·奧努夫利也夫

運輸設計局總工程師

И·Ф·何渥司其克

目 錄

緒 論

第 一 部 分

工程地質勘測中電法勘探的原理

第一章 直流電的電法勘探（簡稱電探）

§ 1. 述要	1
§ 2. 電阻法	3
§ 3. 電阻法的工作方式	8
§ 4. 物體充電法（簡稱充電法）	14
§ 5. 野外資料的分析研究	14

第二章 儀器及設備

§ 1. 電探的電位計	18
§ 2. 電阻繼電器	28
§ 3. 電流的電源	30
§ 4. 電綫和綫架	31
§ 5. 連接器、三通節及活動連接	33
§ 6. 電極	34
§ 7. 半自動記錄器	36
§ 8. 輔助設備及材料	38

第三章 野外調查的方法與技術，室內工作及編製報告

§ 1. 繪製電測剖面	39
§ 2. 電測深法	45
§ 3. 電測井法	49
§ 4. 測量的進行	50
§ 5. 工作中的障礙及其消除方法	51
§ 6. 野外技術文件	52
§ 7. 室內工作與報告的編製	53

第 二 部 分

電探在鐵路工程地質勘測中的應用

第四章	關於電探在鐵路工程地質勘測中的可用性	55
第五章	路線經行地區工程地質構造的確定及路基個別設計地點的調查	
§ 1.	初步設計中的工程地質勘測	57
§ 2.	定測中電探的應用	61
§ 3.	推定地區地質構造、地下水流向及流速工作的舉例	64
第六章	嘎斯特發育地區中的電探工作	
§ 1.	嘎斯特對工程的影響	71
§ 2.	電探工作的性質及範圍	71
§ 3.	工程地質工作在嘎斯特發育地區應用電探方法的舉例	76
第七章	橋位勘測中電探的應用	
§ 1.	橋位勘測中工程地質工作的任務及內容	97
§ 2.	橋位選綫中應用電探的前提	98
§ 3.	初步設計階段中工程地質工作（包括電探）的順序及數量	98
§ 4.	技術設計階段中電探的應用	100
§ 5.	電探工作的方法及技術	100
§ 6.	在勘測橋位中應用電探方法的舉例	107
第八章	尋探建築材料及道碴工作中電探的應用	
§ 1.	總論	113
§ 2.	工作的舉例	115
第九章	給水設計的工程地質調查中電探的應用	
§ 1.	促成匯水（地層）構造的研究所	118
§ 2.	尋水	119
§ 3.	鉆眼中（用旋轉鉆打成）地質斷面的繪製及含水層高度的調查	120

§ 4. 舉例.....	122
第十章 個別工程地質問題的解決中電探的應用	
§ 1. 建築物基礎埋藏深度的推求.....	129
§ 2. 地下坑道中的電探.....	131
§ 3. 用自然電流法以測定池底滲漏水的地點.....	135
附表.....	139

第 一 部 分

工程地質勘测中電法勘探的原理

第一章 直流電的電法勘探（簡稱電探）

§ 1. 述 要

電探屬於地球物理探查的一種方法。地球物理探查是在地球表面通過觀察鑑定出岩石作用的物理數量，以判斷地殼表層（譯者：不是表面）的地質構造。

爲了達到這個目的，電探是利用岩石的電學性質，具體的說，就是利用它們的電阻率。這個勘测方法的基礎，是一個事實：不同的岩石通過直流電流時，要顯示出不同的電阻率。岩石間的電阻率劃分越顯明微細，電探就越可能被利用的更有效。

在電探的實踐中規定了一個電阻率單位，即歐姆公尺（OM-METP）。茲將幾種岩石電阻率的概略數值列於下表（第1表）：

第1表

岩石或礦的名稱	狀 態	電阻率（歐姆公尺）
硬石膏（Ангипит）	—	1000~10000
玄武岩（Базальт）	—	10000
粘土（Глина）	—	3~50
粘沙土層	天然的濕度	16~500
片麻岩（Гнейс）	乾	100000~10000000
	濕	100~10000
花崗岩	乾	6000000
	濕	8000

石灰岩	乾	500000
	濕	600~7000
泥灰岩 (мергель)	——	1~100
砂	濕 (淡水, 無味水)	20~400
	濕 (礦水)	0.3~4
砂岩	天然濕度	35~4000
粘土質片岩	乾	450
	濕	45
砂質片岩	——	70~5000
石英硫磺片岩 (Сланцы кварц-серпичитовые)	——	5000~4000000
石鹽	乾	$10^7 \sim 10^{12}$
	濕	3000~300000
河水	——	20~120
海水	——	0.6
雨水	——	300~1000
礦水, 挖開水	——	0.01~0.1

由上表可以知道：岩石電阻率的變化範圍足夠使我們用電探方法判斷其種類。不過同時也必須知道，就是同一種的岩石，其電阻率的變化範圍也是極大的；尤其是工程地質所要研究的接近地層表面的岩石為然。

岩石電阻率變化範圍之所以如此之廣是這樣解釋，與其說是由於構成岩石的礦物的電阻來確定這種物理性質，不若說是由於別種因素所確定，首先是由於：空隙性，為水飽和性，尤其是岩石飽和水的電阻。就是不同的岩石，也可具有同樣電阻，只要上列這些因素的配合形成這種條件的話。

大部分岩石都屬於電解性導體（Электролитический проводник）。就是說這些岩石所傳導電流的數量，等於飽和着岩石的水漿所傳導電流的數量（這裏所說的傳導電流的數量是說導電性的程度）。

地下水位以下的岩石，完全為水所飽和，所具電阻甚小。地下水位以上的岩石，與此相反，具有很大的電阻。

受着形成喀斯特（Карст）作用的碳酸鹽岩石（Карстовые процессы），隨着形成的陷洞中被飽和鬆軟泥漿充滿的程度而具有不同的電阻。

未破壞的碳酸鹽岩石的特性，具有高的電阻率。

所有上述的因素，就必須使對於電探資料的解釋複雜化，而要求担任電探的工作人員詳細的研究所調查區域的地質及地下水情況，並且要在工作地區直接推求岩石的電阻。

§ 2. 電 阻 法

電探法中有的要用研究岩石電阻的方式以推求地質構造，這叫做電阻法。這是在下列理論的基礎上計算電阻。

假設在地表的兩個點上（兩點間有一個距離），通以直流電。地表下面的介質對電來說，是均質體，因而在它的任何點上都有相同的電阻率 ρ 。這是它的特點。介質中所成的電場的形狀，可用電流綫及等電位面表示。在圖

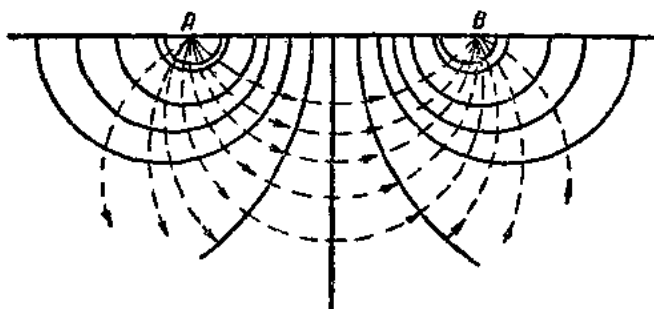


圖 1.

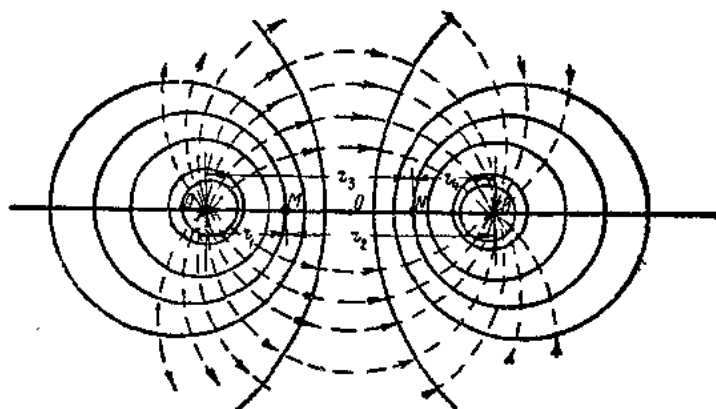


圖 2.

1及圖2上示出兩個電極在均勻介質中電場的垂直斷面及平面。實綫表示等電位面的斷面，虛綫表示電流綫。

在均勻的介質表面上的點電極電位要按下式計算：

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r}, \dots\dots\dots (1)$$

式中 I ——從電極流過的電流；

ρ ——介質電阻率；

r ——自電極至觀察點的距離。

計算的結果告訴我們：上邊的公式不僅可以應用於點電極而且可以應用於桿電極，這種桿電極就是實際上所使用的方式。這樣所得的誤差極不顯著而不具實際意義。利用公式（1）計算 M 及 N 兩極的電位差，這裏 M 及 N 是 AB 綫上的兩極（圖2）。茲用 r_1 及 r_2 表示電極 M 及電極 A 和 B 間的距離，用 r_3 及 r_4 表示電極 N 與上述電極 A 和 B 間的距離。把 A 看為陽極， B 為陰極。

電極 A 在 M 點發生電位

$$V_M^A = \frac{I\rho}{2\pi r_1}, \dots\dots\dots (2)$$

電極 B 在同一 M 點發生電位

$$V_M^B = \frac{I\rho}{2\pi r_2}, \dots\dots\dots (3)$$

利用物理學的磁場疊加原理（Наложение полей），可以得出 M 點的全部電位為：

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \dots\dots\dots (4)$$

用同一方式可以得出 N 點的全部電位為：

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right), \dots\dots\dots (5)$$

由（4）式減去（5）式，可以得出 M 及 N 兩點的電位差：

$$V_M - V_N = \Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right), \dots\dots (6)$$

並且

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)}, \dots\dots (7)$$

也就是

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}, \dots\dots (8)$$

式中

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}\right)}, \dots\dots\dots (9)$$

如果利用適當的儀器在地球表面上測量電路 AB 的電位差 ΔV ，電流 I ，並且計算出係數 K ，則可用公式 (8) 計算介質的電阻率。

用電阻法進行工作時，都是利用幾種特別的裝置，其中最普遍使用的是四極對稱式 (Четырёхэлектродная симметричная установка) 的裝置 (圖 3)。

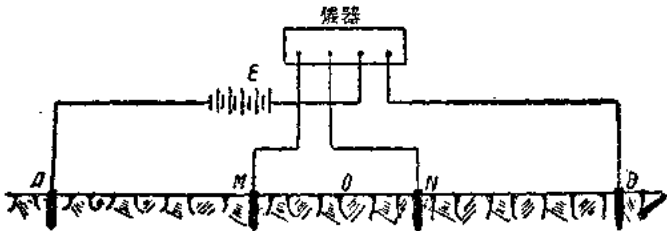


圖 3.

這種裝置的優良特點是：從乾電池 E 發出的電流所經過 (以入地的) 電極 A 及 B ，和測量電位差 ΔV 的電極 M 及 N ，對所謂裝置中心 O 而言是對稱裝設的。也像任何其他裝置一樣，這裏特別裝有一個電探電位計，用以測量電位之用；關於這個電位計的描述，見於下章。用絕緣電綫把儀器及電池連在電極上。

因為電極的排列是對稱的，所以公式 (9) 就可大大的簡化。實情是這樣：如果用 L 表示供電電路 AB 的長度，用 l 表示測量電路 MN 的長度，則上邊用 r_1, r_2, r_3 及 r_4 所表示的各距離就要等於：

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{L}{2} - \frac{l}{2} \\ r_2 &= \frac{L}{2} + \frac{l}{2} \\ r_3 &= \frac{L}{2} + \frac{l}{2} \\ r_4 &= \frac{L}{2} - \frac{l}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

把式 (10) 代入公式 (9) 即得:

$$K = \frac{\pi}{4l} (L^2 - l^2), \dots\dots\dots (11)$$

或

$$K = \frac{\pi}{4} \frac{(L+l)}{l} \frac{(L-l)}{l} \dots\dots\dots (12)$$

由上式可見: 係數 K 僅僅隨着裝置的距離而變。

在解決以後第二部中所述及的工程地質問題時, 除上述對稱式裝置以外, 有時使用其他裝置較為合理; 這裏邊包括: 兩極、三極及四極的裝置。

在兩極裝置中 (圖 4), 電極 N 及 B 相距甚遠, 並且距 A 及 M 達到一個程



圖 4.

度, 致使 N 點的電位和電極 B 對 M 點的影響可以忽略而不計及。這樣使點 M 及 N 的電位差實際上等於點 M 的電位, 就是

$$\Delta V = V_M = \frac{IP}{2\pi r_1},$$

由此而得

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot 2\pi r_1 = K \cdot \frac{\Delta V}{I}. \dots\dots\dots (13)$$

從式 (13) 可以得出: 在用兩極裝置進行工作時

$$K = 2\pi r_1$$

三極裝置中, A 、 M 及 N 三個電極的位置符合於一個條件: 使距離 AM 遠較距離 MN 為大; 而且電極 B 離開測量電極 M 及 N 達到可以不計較其影響程度。那時則電位差 ΔV 只決定於供電電極 A 。

茲用 R 表示由 A 至 MN 中點的距離, 用 l 表示 MN 的長度, 則三極裝置的情形中可以得出:

$$\Delta V = \frac{IP}{2\pi} \frac{l}{R^2 - \frac{l^2}{4}} = \frac{IP}{2\pi} \frac{l}{R^2 \left(1 - \frac{l^2}{4R^2}\right)}, \dots\dots (14)$$

由此可得：

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} = \frac{2\pi R^2}{l} \left(1 - \frac{l^2}{4R^2} \right) = K \frac{\Delta V}{I} \quad (15)$$

從式 (15) 可知

$$K = \frac{2\pi R^2}{l} \left(1 - \frac{l^2}{4R^2} \right) \quad (16)$$

如果選擇了 l 的數值對 R 來說相當小的數值，則可以忽略 $\left(1 - \frac{l^2}{4R^2} \right)$ 而不計，並且就認作：

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} = \frac{2\pi K^2}{l} \quad (17)$$

如此而得

$$K = \frac{2\pi R^2}{l} \quad (18)$$

四極裝置與對稱式裝置不同之點，是 AM 與 BN 彼此並不相等。

這種裝置下的 ΔV ，用下式計算：

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} l \left[\frac{1}{R^2 \left(1 - \frac{l^2}{4R^2} \right)} + \frac{1}{(L-R)^2 \left(1 - \frac{l^2}{4(L-R)^2} \right)} \right] \quad (19)$$

由此而得

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} = \frac{1}{l} \frac{2\pi}{\frac{1}{R^2 \left(1 - \frac{l^2}{4R^2} \right)} + \frac{1}{(L-R)^2 \left[1 - \frac{l^2}{4(L-R)^2} \right]}} \quad (20)$$

從式 (20) 可以得出：

$$K = \frac{2\pi}{l \left\{ \frac{1}{R^2 \left(1 - \frac{l^2}{4R^2} \right)} + \frac{1}{(L-R)^2 \left[1 - \frac{l^2}{4(L-R)^2} \right]} \right\}} \quad (21)$$

以上的論述，是假設了測量進行於均勻的介質中，在這樣假設之下，分析了各種裝置。這種假設，不論裝置的距離如何，總得出相同的數值 ρ ，它就是我們所研究均勻介質的真電阻率。

實際上則永遠不會在均勻的介質中進行這項工作：測量工作在地表上進行，地表以下不同深度中的岩石（介質）是不同的。

看一看最簡單的情況。假定我們進行工作的均勻介質的電阻為 ρ_1 ，其

內部（即介質的內部）包括具有電阻 ρ_2 的物體。當着在這個介質表面的兩點上施以一種電位差的時候，就發生電場，其形狀和均勻介質者不同，因為均質體中要有不同物體存在，就引起電場的變形。

如果夾入的物體，有低於介質的電阻，則電流綫將趨向於物體的內部，因而改變其形狀。因為等電位面垂直於電流綫，也就把它們在空間的分佈位置加以改變。因此等電位面變稀，也就是介質表面上等電位綫變稀。倘若在這個情形中用那一種電阻法的裝置來計量 ρ ，則所得的數值，其電阻率既不同於介質電阻率 ρ_1 ，又不同於夾入物體的電阻率 ρ_2 。

當若夾入物體的電阻比介質體為高的時候，電場的變形可以由等電位綫的密集來說明，等電位綫的密集就把在表面所量得的 ρ 數值改變，同時也像跟上邊情形中那樣，它的數值既不等於 ρ_1 ，也不等於 ρ_2 。

在不均勻介質的表面上測量時 ρ 的數值隨着該介質組成要素的電阻率而變動，並且不會具有該介質物理常數的意義。所以數值 ρ 稱為視電阻率而用 ρ_k 表示。這種視電阻率的計量單位也是歐姆公尺。我們既然利用為均勻介質所推演的公式來計算 ρ_k ，我們也可以認做：視電阻率在數字上就等於一種介質的真電阻率，在這種介質中用所採用的測量裝置測量，並且供電路在測量電極間用上邊所採用的電流時，所發生的電位差，和非均勻介質物測量者相同。視電阻不僅是電阻率的函數而且也是測量裝置的距離和組成該介質各地層厚度的函數。

如果在均勻介質中含有夾入物體，就可以說明了：這個夾入物體的範圍越大，越靠近地層表面，並且它的電阻越不同於周圍介質，則視電阻率的數值就越和介質的電阻率不同。

電阻法的實質是這樣：在地球表面不同的點上用固定的裝置或者在固定的一個點上用大小不同的裝置來測量視電阻率，再按視電阻率的改變來判斷介質的地質構造。下面我們會看得出，這些論據既具有質的性質也具有量的性質。

§ 3. 電阻法的工作方式

電阻法有兩種工作方式：電測剖面方式（Электропрофиллирование）及電測深方式（Электрондирование）。鉛眼中的調查使用了電阻法，就決定出計量的循環，這種循環叫做電測井法（Электрический кароттаж）。

1. 電測剖面方式是電阻法中最被廣泛採用的工作方法。電測剖面方式的實質是這樣的：用固定長度的 AB 及 MN 兩綫的裝置來量視電阻，這綫是

沿着規定的剖面移動的。觀察點間的間隔是固定不變的。這間隔叫做剖面測點距 (шаг)。

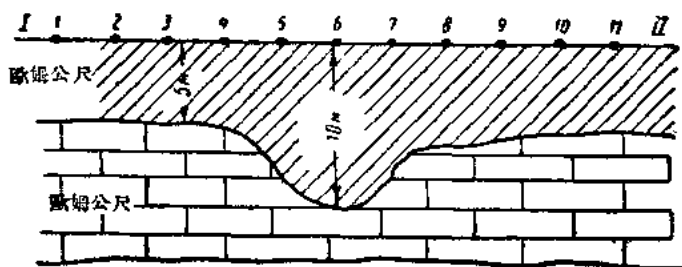


圖 5.

K 的數值按公式 (9) 計算；或者按公式 (12) 計算，如果工作是用對稱式裝置進行的。係數 K 永遠固定不變，只要數值 AB 及 MN 是規定不變的。

在座標紙上沿着水平軸用一定的比例尺畫出剖面的長度，而沿着垂直軸畫出所求得的視電阻率 ρ_k ，這就得出電測剖面曲線的各點。

我們試舉一簡單例子以說明電測剖面方式的原理。我們假設有一段路線，它的地質構造有如圖 5 所示。第四紀沉積層 (Четвертичные Отложения) 具有電阻率 ρ_1 約在 30 歐姆公尺左右，位於電阻率 ρ_2 約在 800 歐姆公尺左右的石灰岩層上，石灰岩層是由於嘔斯特而降低的，第四紀沉積層充滿其空隙。假設我們是沿着路線用對稱式的裝置在點 1, 2, 3 上量得 ρ_k 以畫製剖面。

在所有觀測點上我們得到 ρ_k 的相等數值 (觀測點距離嘔斯特區相當遠，致使供電電極對電場性質的影響可以忽略而不計)，因為在這些點上岩石的深度是不變的。但是在嘔斯特上邊 (高頭) 的各點上所得出的 ρ_k 的數值較低，這是由於第四紀沉積層加厚，而第四紀沉積層的電阻是微小的。電測剖面曲線 (圖 6) 的形狀，可以使我們發覺路線調查部分的地質構造。

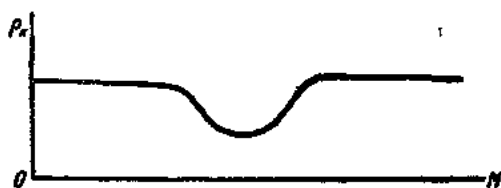


圖 6.

一般的說，研究一個面積時，是要做出幾條剖面來，然後按測量的結果畫出等視電阻率圖。做此圖時須在研究的面積圖上畫出橫剖面綫，把觀測點從實地移到這橫剖面上，這些觀測點是具有一定的 P_k 的。把等視電阻的各點

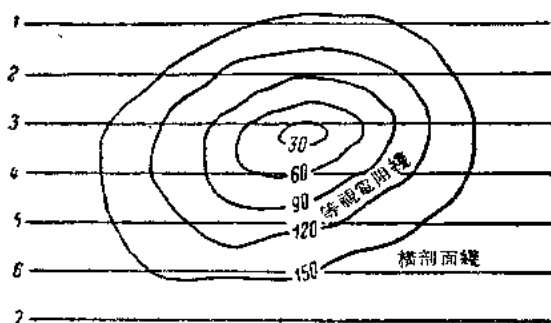


圖 7.

用圓順曲綫連起來，這些曲綫叫做等視電阻綫。圖 7 就是電阻圖的示例。低電阻的範圍是嘔斯特的表現，其斷面見於圖 5。

如此說來，當着電測剖面曲綫表示不均勻於剖面時，電阻

圖就把這種不均勻性表示在平面上。

電測剖面方式可使我們判別介質的不均勻性，但不能根據這些資料以斷定不同一物的深度和層厚。這方式適用於陡峻地層的垂直接觸、嘔斯特破壞層的局部不均勻性等等的判明。

2. 電測深方式是用以判明地質剖面各部分的量的情況。

假設我們要用對稱式裝置 $AMNB$ 在同一介質表而上進行測量，這種裝置的中心是固定而不變動內的，而電極 A 及 B 間的距離，則每測量一次以後，即增長一次。

距離 AB 一方面增加，則較深處的地層對所測量的電阻 P_k 的影響就漸漸增大。不過介質只要是均勻的，則在所有的測量中，所得的電阻率是固定不變的，而且等於介質的電阻率。如果作一電阻率隨着深度以變化的曲綫，縱軸劃出電阻率的數值，橫軸劃出 $\frac{AB}{2}$ ，則所得曲綫係一直綫，平行於 AB 軸。電測深曲綫畫在雙對數比例尺紙上，所用模數為 6.25 公分（圖 8）。

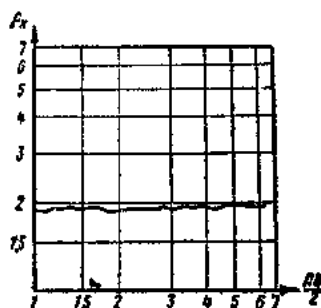


圖 8.

用反證法的眼光來看（即用電探資料判斷介質性質），這個曲綫可以證明介質在不同深度中的均勻性。