

高等学校教材試用本

# 电 法 勘 探

下 册

E. M. 克維亚特柯夫斯基著



中国工业出版社

高等学校教材試用本



# 电 法 勘 探

下 册

E. M. 克維亚特柯夫斯基著

周 祥 标 譯

中国工业出版社

本書為蘇聯專家——E. M. 克維亞特柯夫斯基 (Квятковский)  
副教授在中國為北京地質學院地球物理探礦教研室教師及研究生講課  
用的金屬電法勘探講義。

本講義分兩冊出版，上冊專述直流電法；下冊中介紹了交流電法  
中的等位綫法、強度法、長導綫法、電位差比法、感應法、四影法  
等。整個講義中總結了現有金屬電法勘探的全面成就，是目前在這  
方面的最完整的教材，並且理論聯系實際，可以直接用來指導生產。

本書由北京地質學院翻譯室周祥標同志譯出，物探教研室閔毅輝  
同志校閱。

## 電 法 勘 探

### 下 冊

E. M. 克維亞特柯夫斯基著

周 祥 標 譯

(根據地質出版社紙型重印)

\*

中國工業出版社出版 (北京修門路四號)

(北京市書刊出版事業許可證出字第103號)

地質印刷廠印刷

新華書店科技發行所發行，各地新華書店經售

\*

大32開本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印張 $4^{13/16}$ ·字數130,000

1959年11月北京第一版

1961年10月北京新二版，1961年10月北京第一次印刷

印數0001—1313·定價(10 6)0.71元

統一書號：15165·1029 地質—54

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 緒 論 .....                   | 5   |
| 第一章 交变电磁场中矿物、岩石和矿石的电性 ..... | 12  |
| § 1. 矿物的电阻率和介电常数 .....      | 14  |
| § 2. 岩石和矿石的电阻率和介电常数 .....   | 17  |
| 第二章 交流电的等位綫法 .....          | 27  |
| § 3. 方法的数理基础 .....          | 27  |
| § 4. 交流电等位綫法工作方法和技術 .....   | 35  |
| 第三章 强度法 .....               | 37  |
| § 5. 方法的数理基础 .....          | 37  |
| § 6. 强度法的仪器和设备 .....        | 50  |
| § 7. 强度法野外工作的方法和技术 .....    | 53  |
| § 8. 强度法观测結果的解释 .....       | 58  |
| 第四章 低頻交流电法勘探的其他变种 .....     | 69  |
| § 9. 无限长导綫法 .....           | 69  |
| § 10. 电位差比法 .....           | 76  |
| 第五章 感应法 .....               | 86  |
| § 11. 感应法的数理基础 .....        | 86  |
| § 12. 感应法的野外工作方法和技術 .....   | 105 |
| § 13. 感应法的观测結果的解释 .....     | 119 |
| 第六章 高频交流电法勘探的其他变种 .....     | 140 |
| § 14. 阴影法 .....             | 140 |
| § 15. 干涉法、回波法和无綫电波法 .....   | 149 |



## 緒 論

電法勘探下冊中將描述交流電法。象在上冊那樣，開始探討的是岩石礦石和礦物在交變電磁場中的物理性質，而後，按照一定的順序探討一下目前已知的交流電法，其中綫圈法和大地電流法除外。這兩種方法現在用來普查含油構造，並且在B.H. 達赫諾夫<sup>①</sup>的教科書中描述得相當詳細。探討方法的順序象表1中排列出的那樣，並且，主要的將討論現在在實踐中廣泛應用的三種方法：等位綫法，強度法和感應法。

我們現在簡短地講一下表1中所列出的每一種方法的物理實質。

交流等位綫法從其工作方法上看，和第一篇探討的直流等位綫法沒有多大區別。不過，利用交流電就要求採用特種的儀器和裝備，此外，方法的理論要複雜一些。

普查和勘探金屬礦所用的交流電法分類表

表 1

| 低 頻 率 法<br>(小於1000赫茲) | 高 頻 率 法<br>(大於10000赫茲) |
|-----------------------|------------------------|
| 等 位 綫 法               | 感 應 法                  |
| 強 度 法                 | 陰 影 法                  |
| 無限長導綫法                | 干 涉 法                  |
| 電位差比法                 | 射 綫 法                  |
|                       | 回 波 法                  |

強度法：低頻交流電通過兩個點電極輸入地下，用絕緣導綫將這兩個點電極和發電機聯結起來，導綫布置在正方形的邊上，象圖1上指出的那樣。在正方形 $ADCBC'D'$ 範圍內的地面上測量地下和聯結導

<sup>①</sup>B.H. 達赫諾夫石油與天然氣產地電法勘探，上下冊，地質出版社翻譯出版，1956年。

綫中流过的电流所造成的磁场的各个分量(矢量)。测量是用框形天綫和真空管伏特計組成的装置来进行。当在所探测正方形范围内存在有任一目的物(例如,良导性金属矿体),它使得地下的电流重新分布,于是,根据地面上磁场畸变就可能将其发现出来。

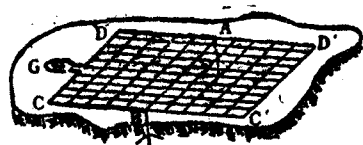


图 1. 强度法的供电装置和测网布置草图

无限长导綫法: 低頻交流电流过地面上布置的长直导綫。在导綫的中部, 沿着垂直于导綫的测綫上(图2), 用类似于强度法的装置测量磁场的水平分量。如果平行导綫在地下某一深度埋藏有良导性的脉状金属矿体, 则在流过导綫电流的磁场作用下, 在金属矿体中感应生出二次电流。这一电流的磁场使一次磁场发生畸变, 因此矿体有可能被发现。

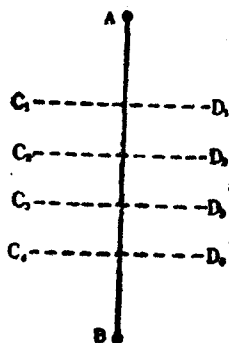


图 2. 无限长导綫法测量草图

电位差比法: 此法的实质如下。低頻交流电通过两个点或綫电极輸入地下。在地面上, 在电极間

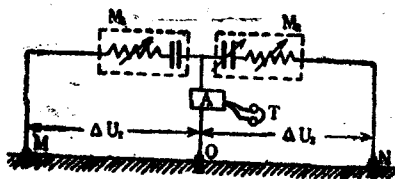


图 3. 电位差比法测量草图

用图3上表出的装置进行电位差比值的测量。在均匀电场中电位差之比等于1。当电场的性质发生异常的畸变时, 电位差比值在一定程度上不等于1。原则上, 电位差比法可以用直流电来进行, 在许多情况下, 在实践中也是这样做的。

为了对异常有一比较全面的了解, 在应用交流电时, 最好在测量电位差比的同时, 还进行M和N点上磁场强度矢量間相位移的测量。

电位差比法的一种变种就是所谓双框法。这种方法的不同点就在于此时在 $M$ 和 $N$ 点放着两个接收线圈，在磁场的作用下框中感生电动势。于是，在该情况下可比较 $M$ 和 $N$ 点上磁场的要素的振幅和相位。

**感应法：**感应法用的装置原理图于图4上。在借助于特种的振盪器在振盪框 $A$ 四周造成的高频（约几万赫兹）交变磁场作用下，在良导性金属矿体 $C$ 中激发出电流。于是，在矿体周围造成相同频率的二次磁场，此磁场和一次磁场迭加在一起。在离开振盪框的某一距离上用框型天线和真空管伏特计（或简单的放大器）组成的装置进行总磁场的测量。用一些特殊法可在观测过程中或在整理过程中消除一次磁场的影响，从而区分出为地质体所产生的异常来。

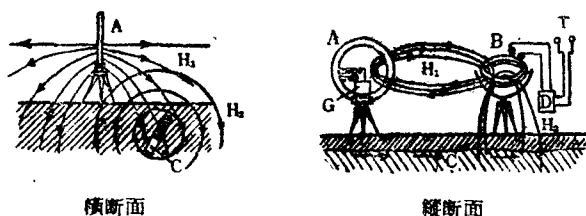


图4. 感应法探测草图

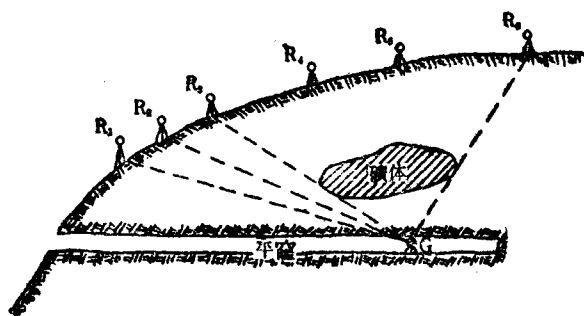


图5. 阴影法草图

**阴影法：**这一方法是基于高导电率地质体吸收电磁能的原理。阴影法装置的原理图如图5上所示。从图上可以看出，阴影法的应用只



有当金属矿体位于发射器和接收器之间时才有可能。这一情况只在有地下坑道或鑽井的勘探地段中才可能有，所以，此方法应用于矿床勘探阶段以发现漏掉矿体或其他良导电性物体。应用频率为几兆赫兹（波长为50—200米）的电磁振荡时阴影法得到最明显的结果。

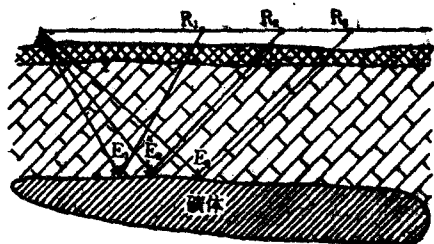


图 6. 干涉法草图

由于直射波和反射波干涉可观测到接收强度的加大或减弱，知道了最大接收强度和最小强度点接收器的位置和波长，用比较简单的计算就可确定良导电反射层的埋藏深度。

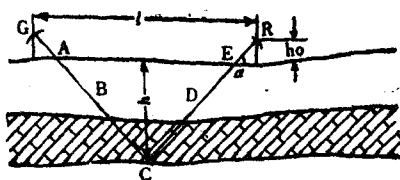


图 7. 射线法草图

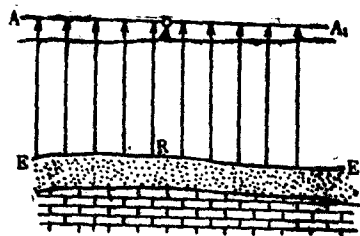


图 8. 回波法草图

射线法，也基于电磁能从良导电性物体表面的反射现象。射线法的装置如图 7 所示。和干涉法不同的是此法送入地里定向的电磁波。反射波的出射位置用特制的接收仪器来测定。

知道振荡器和接收器的距离，以及电磁波的入射角和出射角，就很容易计算出反射面埋藏的深度。

回波法也基于反射的现象，但它和上述干涉法和射线法不同，这里

反射波由自己的发射机接收(图8)。为着测定反射面的埋藏的深度,或者改变地上天线位置的高度,或者改变波长。知道和天线辐射强度的减弱或增大时相应的波长,就可以容易地确定反射界面的埋藏深度。

除了以上列举的一些交流电法以外,还有好多方法及变种,而它们的实用价值到现在还没有弄清楚。以后我们将简略地叙述这些方法及变种。然而这里应该指出:交流电法方法的繁多是由于在这种情况下它比应用直流电有更多的激励矿体的方法和更多的研究电磁场的方法。

在結語时,要討論一下交流电法比直流电法的一些优缺点。应该指出:所指出的一些优点目前还只有理論的性質,因为在实践中它們还没有获得充分的証明。

首先,应该指出感应激励矿体的可能性,也就是无需通过接地电极把电流通到地里(某些低頻率的交流电法和所有高頻率方法)。当表面层有着十分大的电阻率时(岩石露头,粗屑的山麓堆积,干沙,雪,冻土等),这一优点有很大意义。在这种条件下,要装置良好的接地,将碰到很大的困难。大多数的交流电方法在接收綫路上也不需要接地装置,这就使得测量装置更灵便,并使我們能在上述的条件里进行测量。

第二,在理論上应用不同頻率的交流电法应该可以扩大电法勘探范围,因为,可以假定:异常的特点在某种程度上决定于激励場內頻率。目前对这一問題研究得还很少,但是一些地球物理学家都趋向于承認这一优点为最主要优点之一。例如,根据 А.Г. 塔尔霍夫<sup>①</sup>的意見,在金屬矿体上采用高頻率的电法勘探方法使我們可以发现浸染和斑状矿体,而它們却是直流电法所不能探到的。据 А.Г. 塔尔霍夫的意見,在利用高频电場时,在好些场合是由于出現电容的位移电流,

● А.Г. 塔尔霍夫感应法地球物理勘探 Госгеолтехиздат.

使浸染矿体和斑状矿体的导电率大大增加。根据 Д.Н. 沙赫苏罗夫<sup>●</sup>的意见, 在进行电测深时采用低频交流电代替直流电时可以大大缩小等值原理的影响, 因而提高测定所研究构造的电性剖面的可靠程度。研究低频率交流垂向电测深的方法已超出本课程的范围, 这里, 列举这一实例, 仅在于说明在利用不同频率的交流电时可以扩大电法勘探方法的可能性。

第三, 在利用交流电法时, 不仅可以研究电磁场强度向量的振幅值, 而且可以研究它的相位。这自然扩大电法勘探的可能性, 因为在好些场合里场的相位特点可以清楚地反映出一些地质体的位置。应该指出, 直到最近对电法勘探中相位测量都注意得不够。不论在理论或在实践上, 这一问题都还研究得很少。

最后, 可以指出能够制出灵敏度极高的接收仪器也是交流法的一个优点, 这样, 在好些场合里就可以大大缩小供电装置的功率。

和直流电法相比, 交流电法最主要的缺点如下:

第一, 絕大多数情况下, 交流电法勘探的深度要比直流电法小。特别在有良导电的浮土时更显著, 因为这时集肤效应和电磁能量吸收特别强烈。自然, 随着频率的增大勘探深度将逐渐减小, 所以甚至在最有利的条件下高频率法(例如感应法)只适用于作深度不超过 100 米的探测, 甚至它们的勘探深度常常不超过 20—30 米。

第二, 交流电法的理论比直流电法的要复杂得多。这一情况使解释野外勘探所得的结果显得十分困难。在絕大多数场合里或者限于純粹的定性解释、或者利用基于分析直流电的电场和磁场的一些方法。

比較次要的, 但是在好些场合里成为交流电法的十分严重缺点的是相当复杂的仪器和野外观测方法。这就要求野外地球物理工作队的

● Д.Н. 沙赫苏罗夫 在偶极测深时电磁场观测结果的解释方法。 Известия АН СССР. Серия гф № 5. 1956

成員要有十分高的技術水平。

值得指出的是近幾年來在加拿大在倫特別爾格（Лундберг）領導下擬定用交流電的航空電法勘探方法。根據雜誌的記載<sup>①</sup>，在加拿大已經制出了一種用以同時進行航空磁測、航空伽馬測量和航空電測的聯合裝置。在其他一些文章<sup>②</sup>里，指出用航空電法勘探儀器在普查硫化物礦床時得到的巨大成績，以及這一方法的遠大前景。可惜的是幾乎所有刊載文章都帶有誇大事實的性質，所以根據這些文章來估計這一方法的真正的優點和缺點是十分困難的。在蘇聯目前也進行航空電法勘探法的實驗工作，但是還沒有得到實際結果。根據大面積地面電法勘探工作的經驗來看，我們覺得，航空電法勘探方法用於礦區的地質填圖比用於直接普查金屬礦床更有利。航空電法勘探方法所依據的原理將在本課程結束時簡單地加以敘述。

① Fling geophysical laboratory Engineering. 1955 V 179. N 4660. P 619.

② H. M. Mooney Geophysics and geochemistry wave ahead in 1954. Mining Engineering. 1955 V 7. N 3. P 251--253.

L. W. Moorley Airborne geophysics in Canada. Canadian Mining. Janural 1955. V. 76. N. 12 P 43--46.

## 第一章 交变电磁场中矿物、 岩石和矿石的电性

众所周知，电磁场在导电介质中分布的性质决定于电阻率（ $\rho$ ）、介电常数（ $\epsilon$ ）和导磁系数（ $\mu$ ）三个参数，后两个只在利用高频率电流才起着显著的作用。不仅如此，因为对絕大多数的岩石和矿石（磁铁矿除外）来说，导磁系数和一相差无几，所以在交流的电法勘探中可以忽略不计这个参数的影响。至于介电常数的影响可以这样来谈一下。从场论<sup>①</sup>可以知道，半导体和介电体中总电流是由传导电流和位移电流两部分所组成的。总电流的密度和传导电流及位移电流的密度间有着以下的关系式：

$$\vec{j} = \vec{j}_{\text{传导}} + \vec{j}_{\text{位移}} = \sigma \cdot \vec{E} + \frac{\epsilon}{4\pi} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1)$$

电流如果按正弦曲线来变化则公式（1）具有下面的形式：

$$\vec{j} = j_{\text{传导}} + j_{\text{位移}} = \sigma E_0 \sin \omega t + \frac{\epsilon \omega}{4\pi} E_0 \cos \omega t \quad (2)$$

由此可得出，第一，位移电流和传导电流的相位差为  $\frac{\pi}{2}$ ，第二，这些电流最大的幅值分别等于：

$$j_{\text{传导}} = \sigma \cdot E_0, \quad j_{\text{位移}} = \frac{\epsilon \omega}{4\pi} E_0. \quad (3)$$

式中  $\sigma$  是绝对静电单位制（CGSE）中介质的导电率。

$\omega$  是圆频率。

① Н.Е. 森姆——电学原理，国立技术理论书籍出版社，1954年。

$\epsilon$  是绝对静电单位制 (CGSE) 中介質的介电常数。

为了从介質中交流电分布的观点来说明介質的特性, 可利用  $i_{\text{传导}}$  和  $i_{\text{位移}}$  幅值之比。这个比值叫做介質的电磁系数, 并有着以下的形式:

$$K = \frac{i_{\text{传导}}}{i_{\text{位移}}} = \frac{\sigma \cdot 4\pi}{\epsilon \omega} \quad (4)$$

换成实用单位制, 以振动频率代替圆频率, 即将下式 (5)

$$\sigma = \frac{9 \cdot 10^9}{\rho}, \quad \omega = 2\pi f \quad (5)$$

代入公式 (4)。上式中  $\rho$  是电阻率 (以欧姆米計),  $f$  是一秒鐘內周期的频率。于是, 我們得到:

$$K = \frac{1.8 \cdot 10^{10}}{f \cdot \epsilon \cdot \rho} \quad (6)$$

当  $K \gg 1$  (即  $i_{\text{传导}} \gg i_{\text{位移}}$ ) 时, 可将所研究的介質当成导体一样, 即不考虑其有介电性。当  $K \ll 1$  (即  $i_{\text{传导}} \ll i_{\text{位移}}$ ) 时, 則相反, 即当做  $\sigma = 0$  (或  $\rho = \infty$ ), 亦即認為介質是一种典型的介电質。我們稍为超前一些, 先指出, 在大多数情况下岩石和矿石的介电常数値不超出  $50 > \epsilon > 5$  的范围。利用这些値, 我們可以算出, 在  $\rho$  和  $f$  为何値时介質是一个导体 ( $K > 10$ ), 以及当  $\rho$  和  $f$  为何値时, 介質又是一个介电質 ( $K < 0.1$ )。計算的結果示于图 9 上。从图上可以知道, 当用低频率 ( $f < 10^3$  赫茲) 电流时, 在  $\rho < 10^5$  欧姆米的条件下我們可以忽略不計介电常数的影响。因此在自然界的条件下岩石的电阻率决不会超过这个値, 所以, 由此可以知道, 在利用低频率的交流电法 (等綫法和强度法等), 可以不考虑位移电流的影响, 即認為  $\epsilon = 0$ 。在感应法中, 当围岩电阻率  $\rho$  小于 1000 欧姆米时可以不考虑  $\epsilon$  的影响, 这在自然条件下是經常遇見的。

由此可見, 位移电流的影响只是在用频率超过  $10^5$  赫茲的交流电法, 如阴影法, 干涉法和射綫法等时才有必要加以考虑。但必須指

出，以上的全部討論只有当岩石的电阻率及介电常数和电磁场的频率无关的条件下才是正确的。场的频率对这些参数的影响将在以后討論。

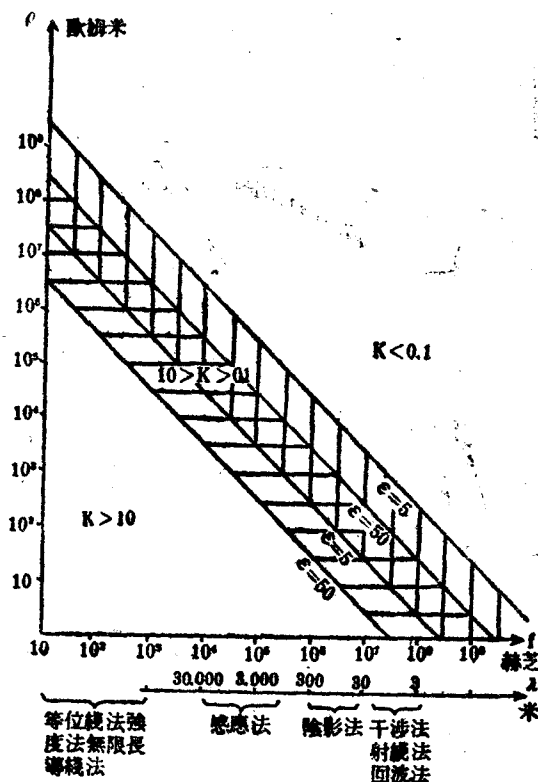


图 9

### §1. 礦物的电阻率和介电常数

当通过直流电时，矿物和水的电阻率曾在上册中詳細討論过，所以重講这个问题沒有必要。仅提一下，絕大多数造岩矿物具有极高的

电阻率（約达  $10^6$  欧姆米和更高），大多数良导性的硫化矿物  $\rho < 1$  欧姆米。而水的电阻率基本上决定于水中溶解盐分的含量，并可从十分之几欧姆米变化到 1000 欧姆米。

矿物的介电性質研究得相当完美，因为这个問題对无綫电技术有着很大的意义。在表 2 中举出某些矿物的  $\epsilon$  值<sup>①</sup>。

表 2

| 順<br>号 | 序<br>碼 | 矿<br>物  | $\epsilon$ | 順<br>号 | 序<br>碼 | 矿<br>物 | $\epsilon$ |
|--------|--------|---------|------------|--------|--------|--------|------------|
| 1      |        | 普 通 輝 石 | 6.9—10.3   | 16     |        | 白 云 母  | 6.2—8.0    |
| 2      |        | 硬 石 膏   | 5.7—6.3    | 17     |        | 黑 云 母  | 6.2—9.3    |
| 3      |        | 鋁 矽 矾   | 50—74      | 18     |        | 金 紅 石  | 31—170(?)  |
| 4      |        | 磷 灰 石   | 7.4—10.5   | 19     |        | 长 石 盐  | 4.5—6.2    |
| 5      |        | 重 晶 石   | 7.0—12.2   | 20     |        | 鉀 盐    | 4.8        |
| 6      |        | 綠 柱 石   | 5.5—7.8    | 21     |        | 菱 鉄 矿  | 7.4        |
| 7      |        | 方 鉛 矿   | 17.9       | 22     |        | 閃 鋅 矿  | 7.8        |
| 8      |        | 赤 鉄 矿   | 25.0       | 23     |        | 电 气 石  | 5.6—7.1    |
| 9      |        | 石 膏     | 5.0—11.6   | 24     |        | 金 云 母  | 5.9—6.5    |
| 10     |        | 白 云 岩   | 6.8—8.5    | 25     |        | 螢 石    | 6.8        |
| 11     |        | 方 解 石   | 7.8—9.5    | 26     |        | 白 鉛 矿  | 19.6—25.4  |
| 12     |        | 岩 盐     |            | 27     |        | 鎔 石    | 8.6—12.0   |
| 13     |        | 錫 石     | 5.7—6.2    | 28     |        | 石 油    | 2.0—2.7    |
| 14     |        | 石 英     | 4.2—5.0    | 29     |        | 水      | 80         |
| 15     |        | 刚 玉     | 11.0—13.2  |        |        |        |            |

表中列出的个别矿物  $\epsilon$  值的变化既决定于晶体中不同混入物的参与，又决定于晶体中有否各向异性。在各向异性的晶体中沿不同軸的  $\epsilon$  值之間有显著的差别。尽管这样，但大多数造石矿物  $\epsilon$  值的級次保持得相当好。几乎全部非金屬矿物的  $\epsilon$  值皆在 4—13 之間。特別的是金屬矿物的介电常数通常較高，在 17 到 74 (?) 的范围内变化着。

現在我們簡短地討論一下电流頻率对矿物和水的导电率和介电常

①表的編成根据以下的資料：

1. Берг Фр Шерер Дж. — 地質学家用物理常数手册 Изданил. 1949年.
2. 物探工作者手册 第一卷 ОНТИ. 1934年.



数的影响問題。对造岩矿物和金属矿物来说，这个问题研究得不十分完全，可是根据现有的资料可以认为，絕大多数矿物的  $\rho$  和  $\epsilon$  的分散性一直当频率达  $10^7$  赫兹时（波长达个十米）还是微乎其微。至于水，这个问题已经研究得十分全面，大家知道，有非常严整的电解质的理论，其中说明了溶液的  $\rho$  和  $\epsilon$  的分散性与电流频率的关系，并且还导出了用来计算的相应公式。在聶斯捷洛夫等著的“电法勘探教程”

（1938年）或其他专门的论文<sup>①</sup>中可找到对此理论的简短描述。我们不详细地来叙述这一理论，只指出其中主要的结论。根据这一理论，溶液电阻率应随着电场频率的增加而减小，并且这种减小对浓度較小的溶液较为明显。例如，聶斯捷洛夫<sup>②</sup>算出，浓度为  $0.0001N$  硫酸镁 ( $MgSO_4$ ) 溶液的电阻率的减小与直流电的相比为：

当波长  $\lambda = 10$  米时，1.47%，

当波长  $\lambda = 100$  米时，0.74%

当波长  $\lambda = 1000$  米时，0.02%

至于电阻率约为 100 欧姆米，相当于浓度  $0.001N$  食盐溶液的河水，其电阻率在波长  $\lambda = 100$  米时减小 0.1%。由此十分明显，水  $\rho$  的频率分散现象只当用很短的波 ( $\lambda \ll 10$  米) 工作时才有意义。

至于电解质  $\epsilon$  的频率分散性，也可观察到类似的情况：

1. 随着频率增加可观测到电解质介电常数减小；

2. 随着电解质浓度的减小， $\epsilon$  的分散现象在更低的频率时就开始

了；

3. 在波长  $\lambda = 100$  米时电解质  $\epsilon$  的变化不超过 1%。

换句话说，水  $\epsilon$  的频率分散性也是只有当用  $\lambda \ll 10$  米的十分短的波工作时才有意义。

讨论电解质的  $\epsilon$  与溶解盐浓度及温度之间的关系也同样有趣味

① Фальенгагенг — Электролиты. ОНТИ 1935年。

② Л. Я. 涅斯捷洛夫 等 — Курс электроразведки 1938年。