

576

地球物理勘探专辑

第 5 辑

电 法 勘 探

(交流电法)

傅良魁译

中国工业出版社

地球物理勘探专輯

第 5 輯

电 法 勘 探

(交流电法)

傅良魁譯

中国工业出版社

本輯主要是將1956—1960年間國外(主要是蘇聯)一些公開期刊上的有關交流電法勘探的文章擇其參考價值較大者收錄譯出。共有論文二十余篇，內容大致可分：電磁測深法、航空電測法、大地電流法等。可供地球物理工作者和有關院校物探專業師生參考。

地球物理勘探專輯

第5輯

電法勘探

(交流電法)

傅良魁譯

地質部地質書刊編輯部編輯 (北京西四學市大柵欄地質部院內)

中國工業出版社出版 (北京修羅門路10號)

(北京市書刊出版事業許可證出字第110號)

中國工業出版社第四印刷廠印刷

新華書店北京發行所發行·各地新華書店經售

開本 $787 \times 1092^{1/25}$ ·印張 $11^{21/25}$ ·字數254,000

1962年1月北京第一版·1962年1月北京第一次印刷

印數0001—2,170·定價(10—8)1.65元

統一書號：15165.1072(地質-63)

目 录

- 电磁测深曲线的解释方法……………(苏联) B. C. 爱宁什坦(5)
- 水平层频率测深的几个理论问题……………(苏联) Л. Л. 万尼安(13)
- 勘查地质构造的电磁测深法……………(苏联) B. C. 爱宁什坦等(65)
- 电磁测深的几个地质构造结果……………(苏联) B. C. 爱宁什坦等(75)
- 论利用交变电磁场区分等值断面的可能性(苏联) A. H. 吉洪诺夫等(79)
- 有中间不导电层存在时电磁测深法的分辨能力……………
(苏联) A. H. 吉洪诺夫等(85)
- 论在地壳勘探中天然大地电磁场利用的可能性……………
(苏联) H. II. 烏拉基米罗夫(91)
- 用建立地中电流方法测深的某些结果…(苏联) B. C. 爱宁什坦等(95)
- 航空电磁勘探在瑞典的几个实际结果……………(瑞典) G. 托恩奎斯特(104)
- 论在地质填图中感应式航空电测法应用的可能性……………
(苏联) A. H. 吉洪诺夫等(117)
- 关于在感应式航空电测法中干扰的影响问题(苏联) A. H. 吉洪诺夫等(124)
- 无限长电缆法航空电测的应用……………(苏联) Г. С. 弗兰托夫等(129)
- 用大地电流法勘探时野外资料整理的解析法(苏联) A. П. 邦达连柯(139)
- 周期从5到20分钟的大地电流变化的某些特点……………
(苏联) O. M. 巴尔苏柯夫(144)
- 在北高加索普查硫化矿时低频感应勘探法的应用经验……………
(苏联) И. A. 别兹鲁克等(153)
- 感应式电法勘探最佳频率的选择……………(苏联) A. A. 考夫曼等(160)

- 感应法模型研究的几个结果…………… (苏联) В. С. 斯维托夫 (175)
- 地壳的不均匀性对直线式无限长导线场的影响……………
(苏联) В. И. 德米特里耶夫 (193)
- 在群查电法勘探中频率的研究…………… (苏联) А. Г. 伊万诺夫 (198)
- 给电场的振幅和相位与椭圆极化磁要素的变化关系……………
(苏联) О. М. 巴尔苏柯夫 (217)
- 在脉上计算交变磁场的近似公式…………… (苏联) А. Г. 伊万诺夫 (222)
- 在均匀半空间中圆柱体上电磁场的畸变(苏联) В. П. 吉雅柯诺夫 (231)
- 在勘查埋伏构造时线圈(迴线)法的应用… (苏联) И. И. 克罗速柯 (247)
- 在多金属矿床勘探中游散电流法的应用经验……………
(苏联) Р. М. 卡梅涅茨卡娅等 (277)
- 在地质填图中广播站无线电场强度的测量……………
(苏联) В. К. 赫梅列夫斯基等 (282)
- 使用交变电流时岩石的电阻率…………… (苏联) В. С. 爱宁什坦 (292)

电磁测深曲线的解释方法

(苏联) Б. С. 爱宁什坦

1. 在А. Н. 吉洪諾夫指导下, 苏联科学院 (АН СССР) 大地物理研究所創立了以地質勘探为目的的电磁测深方法[1]。目前已經得到了一些要求进行地質解释的試驗資料^①。直到目前为止, 所計算的量板为数不多, 但可以用来对試驗研究結果作地質解释。

在Д. Н. 沙哈苏瓦洛夫的論文中[2], 在电磁测深野外資料解释方面曾作了第一次嘗試, 这种解释是以本文作者所得到的理論曲线为基础的。

电磁测深的野外研究和理論曲线的分析証实了从以供电偶极 AB 和接收偶极 MN 之間的不同距离 r 所进行的輻射测深过渡到只用一个极距进行工作的頻率测深的合理性[3]。在技术上和經濟上, 这种过渡的合理性是很明显的。

2. 頻率测深的試驗曲线可以用各种不同方法繪制成成果图, 把它們繪制在沿横座标为对数比例尺的 $1/\sqrt{f}$ (f ——以赫芝为单位的电流頻率), 而沿縱軸(也是对数比例尺)——电磁場相对应的(振幅的)特殊坐标系是合理的。例如, 对于根据电场分量 (\vec{E}_x) 幅值特征的測量結果所构成的曲线來說, 沿縱軸便为 $\vec{\rho}_k$ ——使用交流电时的視电阻率, 也是象用直流电一样, 是用公式

$$\vec{\rho}_k = K \frac{A \vec{V}}{I}$$

^①Б. С. Эненштейн, Е. М. Ушаков и пр. по теме "Разработка методики зондирования на переменном токе и изучение разрешающей способности этого вида разведки" (Институт физики Земли АН СССР, 1956г.).

計算的。式中 $\Delta\bar{V}$ ——取自MN电极上的电位差的有效值； \bar{I} ——AB綫路中电流强度的有效值；K——按公式

$$K = \frac{2\pi r^3}{AB \cdot MN}.$$

計算的赤道裝置的裝置系数。

对于根据垂直磁感应分量 (B_z) 幅值特征的測量結果所繪制的曲綫來說，沿縱軸为 $0.1r^2 \bar{B}_z f$ 。

按公式

$$\bar{B}_z = K_n \frac{\Delta\bar{V}}{\bar{I}} \cdot \frac{r^2}{ABf},$$

計算 \bar{B}_z 。式中 $\Delta\bar{V}$ ——取自接收綫圈的电位差的有效值； K_n ——按公式

$$K_n = \frac{10^7}{2\pi nS}$$

計算的綫圈系数。式中S——綫框的平均面积；n——圈数(我們使用MKSQ单位系統)。

3. 图1是 $r=8$ 千米^①的頻率赤道电磁測深試驗曲綫。該測深工作是在具有以下地电断面特征的地段上进行的，在结晶岩上面埋藏着一組砂、頁岩层和白堊紀地层，厚度为500—550米，电阻率为3—6欧姆米。断面最上部为厚度約100米及电阻率为60—100欧姆米的砂、頁岩层系。我們发现地段的地电特征是以一般的地質根据及直流电的測

①以后我們对用不同分量和不同測量裝置所得到的使用交流电的測深曲綫引入一种簡單的表示。例如： E_x 分量曲綫就是当对規定距离 r 和不同的頻率时采用赤道裝置所得到的，我們将其表以 $\bar{E}_x(4\text{ЭЭМЗ})$ (頻率赤道电磁測深 \bar{E}_x 曲綫)。根据其他分量($B_z, \varphi_{E_x}, \varphi_{B_z}$,等等)所得到的測深类型曲綫也引入类似的表示，如曲綫 $\bar{B}_z(4\text{ЭЭМЗ})$ 及其他等等。对于得自軸式裝置的場的各种分量的頻率曲綫來說，便表以 $\bar{E}_y(4\text{ЭЭМЗ})$ 及其他等等。对于用一种頻率，但采用不同 r 值的赤道裝置所构成的分量 \bar{E}_x, \bar{B}_z 等曲綫，便表以 $\bar{E}_x(3\text{ЭЭМЗ})$ 和其他等等。对于軸式裝置的曲綫便以 $\bar{E}_y(0\text{ЭЭМЗ})$ 等等。因为在我們的文章中只討論曲綫 $\bar{E}_x(4\text{ЭЭМЗ})$ 和 $\bar{B}_z(4\text{ЭЭМЗ})$ ，所以我們就簡称其为 \bar{E}_x 和 \bar{B}_z 。

深結果为大概的基础的。为了进行比较，在图 2 上画出了在同一测点上用直流电所得到的偶极测深曲线 (ДЭЭ)。E_x 曲线的解释原则以图

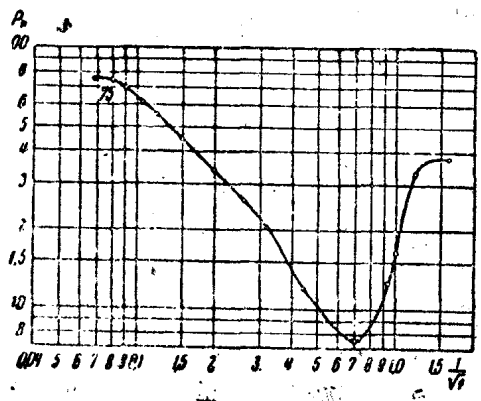


图 1

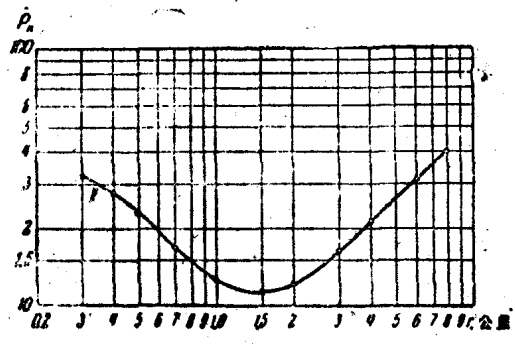


图 2

1 的测深曲线为例来说明。为了进行解释，在 $\rho_2 = \infty$ 情况下我们已有的 E_x (ЧЭЭМС) 二层理论量板 (图 3)。

所引出的量板是基于辐射测深的相应的计算曲线并且由文献 [2] 中所阐述的转换法获得的。然而正由于这个原因，辐射测深的计算曲线直到目前为止，数量是不多的，当构造频率测深量板时，在必要的范围内是用外推法进行的。因此，引于图 3 上的曲线不能以为是足够的和精确的；我们研究它的时候，应当认为将来可以逐渐精确。

4. 沿着量板的横轴为 λ/r ，这里 λ ——在上部层中的波长，等于 $\sqrt{10\rho_1/f}$ (千米)。沿纵轴(也是用对数比例尺)为 ρ_k/ρ_1 (ρ ——以欧姆米为单位的上部岩层的电阻率)。量值 r/h_1 (h ——上部层的厚度)为曲线的参数。量板中包括了比值从 1.4 到 32 的十条曲线。具有零值的曲线相当于均匀半空间情况。由量板可看出，当上部层为任意的厚度时(认为 r 是规定了的)，曲线起始段均具有 $2\rho_1$ 的数值，这相应于在相对高的频率时进行测量。随着频率的降低 (λ/r 增加)，曲线表现出极小值，然而没有达到 ρ_1 值，而后急剧地上升，大约与横轴成 70° 角。在低频部分中曲线有不大的极大值。在这个极大值以后，当继续降低频率时， ρ_k 值平缓地接近相当于用直流电时对规定 r 的 ρ_k 值。

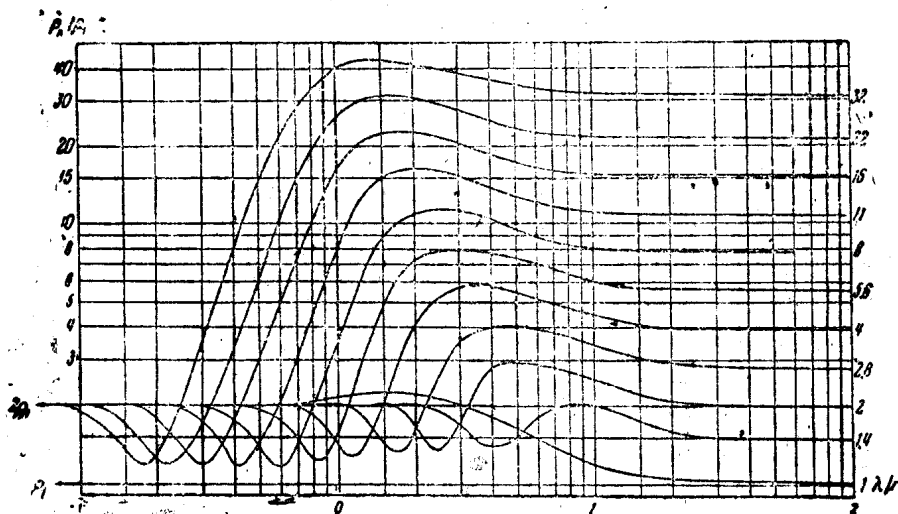


图 3

5. 首先我们来作定性的分析。对直流电曲线而言，根据曲线的外形(图 2)可以看出，它相当于基岩具有无限大电阻的三层地电断面。对交流电的曲线而言，在外形上(图 1)也相当于三层地电断面。事实上，因为 r 的量值比起在地电断面中流出交流电的上部地层的厚度大好几倍，所以曲线的开始(水平的)部分，即相当于频率为 300 赫芝和 240 赫芝的一段。给出了该层的两倍电阻率值 ($2\rho_1$)。随着频率

的降低，第二层开始起影响，因为第二层的电阻率(ρ_2)比 ρ_1 小很多，于是曲线就下降。例如频率从10赫芝开始，具有无限大(实际上)电阻的第三层便发生影响。曲线继续下降到最低的过程与理论曲线相吻合(图3)，但是倾斜角小了些。在频率为2赫芝时， \bar{E}_x 曲线有极小值。在极小值以后，第三层开始起主要作用，并且曲线转向上升。在给定条件下，对于接近直流电的频率(0.66和0.38赫芝)而言， \bar{E}_x 曲线的 ρ_k 值便上升到右枝的水平渐近值，此值相当于对规定的电极距 r 情况下使用直流电的 ρ_k 值。

6. 现在我们来对 \bar{E}_x 曲线的定量解释，目的是确定在测深点下部所有地层的厚度。我们这样来处理，即为了确定所有沉积层的厚度而对 ρ_k 曲线(图2)作解释，仅仅用 $\rho_2 = \infty$ 情况下的直流电二层理论曲线的处置方法。

如果我们已经知道了沉积层的纵向电阻 ρ_1 ，那么，在M33量板上沿着 ρ_1 值移动理论曲线的水平轴直到两条曲线的右枝渐近重合为止，我们便找到了沉积层的厚度(H)。在给定情况下，在以前本区所进行的研究基础上，已经知道 $\rho_1 = 4$ 欧姆。根据 ρ_k 曲线(图2)求得 $S = 185$ ，再根据表示式 $H/\rho_1 = H/4 = 185$ ，我们便确定出沉积层系的厚度为 $H = 740$ 米。

7. 我们看出，当借助于量板(图3)时，利用了量值 $\rho_1 = 4$ 欧姆米便可根据 \bar{E}_x (图1)曲线确定出 H 的量值。为此，我们使量板的水平轴与具有测深曲线的图纸上相当于4欧姆米的直线重合。我们来沿着水平轴移动量板，这时 \bar{E}_x 曲线的右枝将与量板上任一曲线的左枝相重合。然而为了实现正确的解释，必须使量板上 $\lambda/r = 1$ 的点与 \bar{E}_x 试验曲线的这种点 $1/\sqrt{f}$ 重合，当以表示式

$$\lambda/r = \frac{\sqrt{10\rho}}{\sqrt{f}} \cdot \frac{1}{r}$$

代换横坐标时，便由这个表示式求得重合点的 $\rho = 4$ 欧姆米。因为 $r = 8$ 千米，则由上列的 λ/r 表示式求得 $1/\sqrt{f} = 1.26$ 。将量板的 $\lambda/r = 1$ 的点与 \bar{E}_x 曲线的被找到的点重合，我们就看到 \bar{E}_x 曲线的右枝与具有记号 $r/H = 11$ 的量板曲线的右枝相重合。因此，得到沉积层的厚度 H 等于

730米。由于缺乏必需的理论曲线，目前我们就不能够根据 \vec{E}_x 和 \vec{B}_z 曲线确定地电断面的参数以及在作电磁测深时研究等值原则的作用。应当相信，当借助于相应的理论曲线时，对 \vec{E}_x 和 \vec{B}_z 所有曲线的解释就会得到比起单用直流电测深法所获得的资料更多些的关于地电断面的辅助资料。

8. 作为例子，我们来讨论在相同测深点上也是用 $r=8$ 千米所得到的 \vec{B}_z 曲线的解释方法，在这一点上曾经得到过 \vec{E}_x 曲线（图1）。 \vec{B}_z 曲线到于图4。为了对 \vec{B}_z 曲线作解释，我们利用列于图5的量板。沿着量板的横坐标为量值 λ/r ，用的是对数比例尺，沿着纵轴（也是对数比例尺）为 $\vec{B}_z r^2 / \lambda^2$ 。在这里曲线的参数就是 r/h_1 。具有零值的

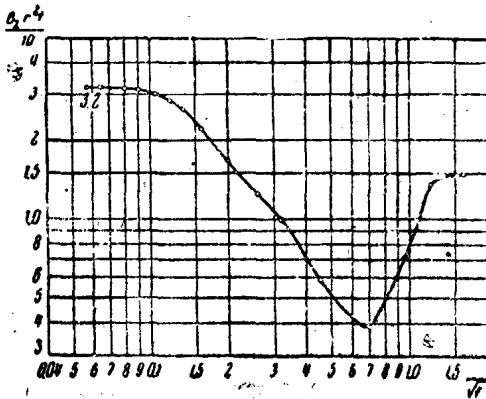


图 4

曲线仍然相当于均匀半空间情况。在这条曲线的下部分布着相当于 $\rho_2=0$ 情况下的二层曲线，而在这条曲线的上部则为 $\rho_2=\infty$ 的情况。由于所选择的比例尺的结果，所有曲线（当上部层为任何厚度时）都有等于0.075的左部渐近线。向右边，所有曲线都有一个共同的与横轴大

约成 70° 倾斜角的渐近线。当选定了 r 值时（或 r 越比 h_1 大），上部岩层的厚度越小，所得到的曲线就更具有明显的特征，并且频率越高，曲线就更明显地出现渐近线。

当采用相当高的频率时，在 \vec{B}_z 的野外测量结果中可以确定上部岩层的 ρ_1 。根据表示式 $\vec{B}_z r^2 f \frac{1}{10\rho_1} = 0.075$ ，得到 $\rho_1 = \vec{B}_z r^2 f 1.33$ 。

上述确定 ρ_1 量值的方法可以扩展到更为复杂的地电结构上去。这时可以认为每个 \vec{B}_z 值均与按上述公式计算所确定的 ρ_1 相对应。

9. 为了确定所有沉积层的厚度 H ，在对 \vec{B}_z 的试验曲线进行解释

时，只根据它的右枝就够了。

\overline{B}_z 曲线的解释原则与 \overline{E} 曲线的解释原则是一致的。其特点在于必须根据选定的解释条件预先确定在直角坐标系中与 \overline{B}_z 的试验曲线相对应的直线，它应该与量板的水平轴重合。根据对 \overline{B}_z 的理论曲线和试验曲线的坐标系的对比，应当得到试验曲线的纵坐标较理论曲线的纵坐标大了量值 ρ_1 或 ρ_1 。因此，为了对 $\rho_1 = 4$ 欧姆米的情况作解释，必须选择量板的轴 $\overline{B}_z r^2 / \lambda^2 = 0.075$ 与在试验曲线图板上相应于量值 $0.075 \times 4 \times 0.3$ 的直线相重合。

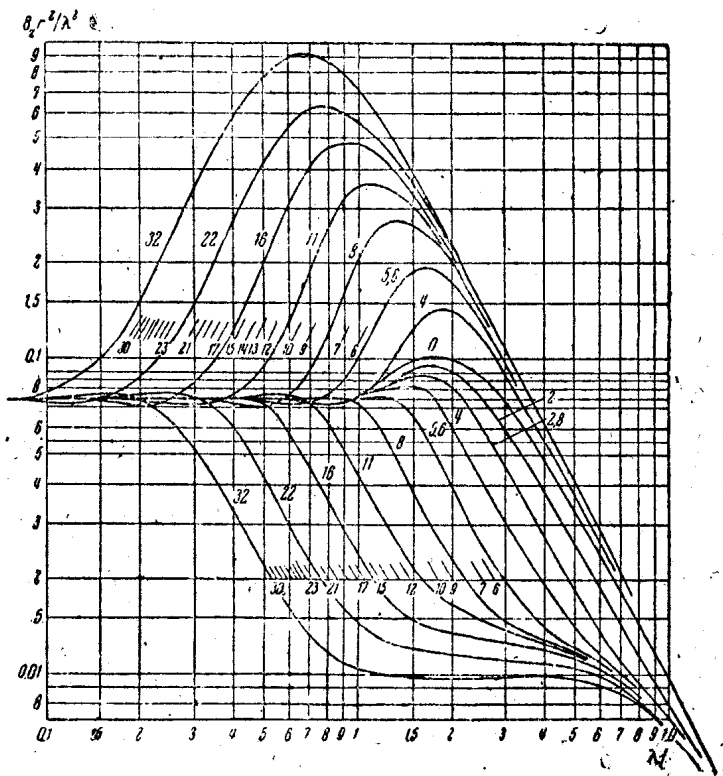


图 5.

我们进而使量板上 $\lambda/r=1$ 的点与其横坐标等于 1.26 的 \overline{B}_z 试验曲线的点相重合。这时 \overline{B}_z 曲线的右枝与具有数值 $r/h=11$ 的量板曲线的

右枝重合。因为 \bar{B}_z 曲线是用 $r=8$ 千米得到的，则象根据 \bar{E}_x 曲线那样，我们由此得到量值 $H=730$ 米。

10. 在频率测深及其解释的特征方面，必须作出以下的见解。曲线的左枝（高频的）反映断面上部的构造，曲线的右枝由更低的频率所确定，它所反映的地电断面与直流电相类似。频率的中间范围确定了曲线的中间部分，其中包括极小，这是与直流电有最明显区别的特点。如用直流电的测深（图2）得到 $\rho_{\text{极小}}$ 达到11.5欧姆米，这里根据频率测深所得到的 $\rho_{\text{极小}}$ 只有7欧姆米（图1）。

根据上面对 \bar{E}_x 和 \bar{B}_z 曲线所进行的分析可以作出以下结论：

(1) 用一组测量偶极（ AB 和 MN ）间的极距 r 所进行的直流电的测深能够用仅采用一个极距所进行的频率测深代替；

(2) 仅仅运用频率测深 \bar{E}_x 和 \bar{B}_z 曲线的右枝，并且知道了 ρ_1 量值之后，象根据ДЭЗ曲线那样，就可以确定沉积岩层的总厚度。

参 考 文 献

1. Тихонов А. П. и Шахсуваров Д. Н., Метод расчета электромагнитных полей, возбуждаемых переменным током в слоистых средах, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 3, 1956.
2. Шахсуваров Д. Н., Методика интерпретации результатов наблюдений электромагнитного поля при дипольном зондировании, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 5, 1956.
3. Красв А. П. и Зацепин В. Р., Принципы и аппаратура метода глубинного Электромагнитного зондирования слоистой структуры массива, Геофизика, сб. 12, материалы ВОЕГЕН, 1948.
4. Muller M., Eine Inductions-impulsmethode zur den Nachweis des Erdöls, Geophysica pura e appl., 17, № 1-2, 1950.

本文译自 Известия АН СССР. Серия Геофизическая
1957. № 12.

水平层频率测深的几个理论问题

(苏联) И. И. 万尼安

緒 論

在作者从前所发表的论文中曾研究了当断面中无绝缘层存在时频率测深的理论，此频率测深工作是在离场源足够远的观测点上进行的〔3〕。

然而在苏联的许多区域上，电法勘探的对象是具有非常高电阻率的基岩。此外，在俄罗斯和西伯利亚的陆台沉积区上，广泛地分布着卤性岩石，这种岩石实际上也是绝缘的。

考虑到严格计算的复杂性，我们现在来研究频率测深的近似理论，此频率测深是在十分远的距离 r 上进行的。在这里各分量场的表示就大为简化了。现在我们用 h_1, h_2, h_3 来表示岩层厚度，用 ω 表示圆频率，用 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4 (\rho_4 = \infty)$ 表示电阻率，用 k_1, k_2, k_3, k_4 ($k_n = \sqrt{\frac{-i\omega\mu_0}{\rho_n}}$) 表示波常数，并且令所有各层的导磁系数均等于真空的导磁系数 ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ 实用单位制)。对于上面半空间的磁量值我们用脚注 0 表示，忽略位移电流，我们令 $k_0 = k_4 = 0$ 。

我们首先来叙述所求解答的物理意义。

电磁能量可以用三种方法进入观测点周围：

- (1) 以无衰减的交变电磁场形式经过上面的不导电的半空间；
- (2) 沿着导电层方向以 $e^{-k_1 r}$ 级次衰减，这里 k_1 ——这些岩层的某个平均的波常数；
- (3) 以无衰减的交变电磁场形式经过底下的导电半空间。

如果量值 $|kr|$ (或者 $|k_1 r|, |k_2 r|, |k_3 r|$) 足够大的话(比较高的频率)，则沿着导电层传播的能量部分比起在空气中和在绝缘基底中传播着的电磁波所具有的能量消耗很少。至于后面这种电磁波，则在地

表面的有限地段上研究它的时候，就好像是平面波。于是可以写出入射角 i_0 与折射角 i_1 的比：

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_0} = \frac{v_1}{v_0},$$

式中 v_0 —— 电磁振盪在空气中的传播速度，而 v_1 —— 在岩层中的传播速度。

已經知道 [2]， $v_1 = \sqrt{10\rho_1 f}$ 千米/秒， $v_0 = 3 \cdot 10^8$ 千米/秒。因此当 i_0 为任意值， $\rho_1 = 10^3$ 欧姆米和 $f = 10^3$ 赫芝时， $i_1 < 0.6^\circ$ 。因此，远离場源时，电磁波在有限地区上向地中穿透时是以具有垂直綫束的平面电磁波的形式进行的。

正象 B. A. 佛克所指出的那样 [10]，对于均匀地壳的情况来说，当 $|kr| \rightarrow \infty$ 时，在地面上有

$$E_z^{\circ} = \frac{I\rho_1}{2\pi r^3} (3 \cos^2 \theta - 2), \quad (1)$$

$$B_z^{\circ} = -\frac{3I\rho_1 \sin \theta}{2\pi r^4 i\omega}, \quad (2)$$

式中 I —— 供电偶极矩， θ —— 偶极矩与輻射向量 r 間的夹角。

相反，如果頻率选得十分低，则在岩层中的衰减是很小的，并且电流密度从地表面到絕緣基底的頂板实际上沒有减小。

在这种情况下，当比值 $\frac{h_1 + h_2 + h_3}{r}$ 充分小时，所有的电流綫都平行于地表面，即断面的导电部分与具有纵向电导 $S = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2 + h_3/\rho_3$ 的范围是等值的。

于是，当使用高頻率和低頻率时，場的物理性質实质上是不同的。因此下面来討論两个渐近的解答：

(1) 当 $|k_1| \rightarrow \infty$ ， $|k_2| \rightarrow \infty$ ， $|k_3| \rightarrow \infty$ 时，

$$h_1 \rightarrow 0, \quad h_2 \rightarrow 0, \quad h_3 \rightarrow 0;$$

(2) 当 $|k_1 h_1| \rightarrow 0$ ， $|k_2 h_2| \rightarrow 0$ ， $|k_3 h_3| \rightarrow 0$ 时，

$$h_1 \rightarrow 0, \quad h_2 \rightarrow 0, \quad h_3 \rightarrow 0. \quad (3)$$

在多层断面情况下，为了分析积分解答，预先引出向量位分量是方便的。

向量位分量方程的积分解答

方程式，边界条件与激发条件

现在我们来研究具有电矩为 $Ie^{-i\omega t}$ 的准稳定水平电偶极的场。电偶极分布在圆柱坐标系 r, φ, z 的极轴 x 上， z 轴方向指向下。以后我们放过乘数 $e^{-i\omega t}$ 不讨论。

通常用具有分量为 A_x 和 A_z 的向量位 \vec{A} 来描写场 [2, 9, 11]。在岩层中准稳定电场和准稳定磁场带有 p 号，并用实用单位制的向量位表示如下：

$$\vec{E}_p = i\omega \vec{A}_p + \frac{\rho_p}{\mu_0} \text{grad div } \vec{A}_p,$$

$$\vec{B}_p = \text{rot } \vec{A}_p \quad (p=0, 1, 2, 3, 4).$$

现在我们来研究水平场分量 E_x 和垂直磁感应分量 B_z 。

$$E_x = i\omega A_{xp} + \frac{\rho_p}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_{xp}}{\partial x} + \frac{\partial A_{zp}}{\partial z} \right), \quad (4)$$

$$B_z = -\frac{\partial A_{xp}}{\partial y} \quad (p=0, 1, 2, 3, 4). \quad (5)$$

在每层中的向量位分量满足方程式

$$\nabla^2 A_{xp} = k_p^2 A_{xp}, \quad (6)$$

$$\nabla^2 A_{zp} = k_p^2 A_{zp}, \quad (p=0, 1, 2, 3, 4) [2]. \quad (7)$$

当在岩层间存在着具有各种 ρ_p 的水平分界面时，根据电磁场切向量分量连续性的要求，导出连续量值的已知条件

$$A_x, A_z, \frac{\partial A_x}{\partial z} \text{ 和 } \rho \text{ div } A = \rho \left(\frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \right).$$

对全部边界计算了这些条件后，我们便得到：

(1) 当 $z=0$ 时, 因为 $\rho_0=\infty$, 则

$$A_{r_0} = A_{x_1}, \quad A_{z_0} = A_{z_1},$$

$$\frac{\partial A_{r_0}}{\partial z} = \frac{\partial A_{x_1}}{\partial z}, \quad \frac{\partial A_{r_0}}{\partial x} + \frac{\partial A_{z_0}}{\partial z} = 0,$$

(2) 当 $z=h_1$ 时,

$$A_{x_1} = A_{x_2}, \quad A_{z_1} = A_{z_2},$$

$$\frac{\partial A_{x_1}}{\partial z} = \frac{\partial A_{x_2}}{\partial z}, \quad \rho_1 \frac{\partial A_{z_1}}{\partial x} - \rho_2 \frac{\partial A_{z_2}}{\partial x} = (\rho_2 - \rho_1) \frac{\partial A_{x_1}}{\partial x}; \quad (8)$$

(3) 当 $z=h_1+h_2$ 时,

$$A_{x_2} = A_{x_3}, \quad A_{z_2} = A_{z_3},$$

$$\frac{\partial A_{x_2}}{\partial z} = \frac{\partial A_{x_3}}{\partial z}, \quad \rho_2 \frac{\partial A_{z_2}}{\partial x} - \rho_3 \frac{\partial A_{z_3}}{\partial x} = (\rho_3 - \rho_2) \frac{\partial A_{x_2}}{\partial x};$$

(4) 当 $z=h_1+h_2+h_3$ 时, 因为 $\rho_4=\infty$, 则

$$A_{x_3} = A_{x_4}, \quad A_{z_3} = A_{z_4},$$

$$\frac{\partial A_{x_3}}{\partial z} = \frac{\partial A_{x_4}}{\partial z}, \quad \frac{\partial A_{x_3}}{\partial x} + \frac{\partial A_{z_3}}{\partial z} = 0,$$

当无限接近场源时向量位应当趋于分布均匀介质中的电偶极的向量位, 即应该满足恒等式

$$A_z = 0,$$

$$A_x = \frac{I\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{e^{-k_1\sqrt{r^2+z^2}}}{\sqrt{r^2+z^2}}. \quad (9)$$

运用佐密尔费立德 (Зоммерфельд) 积分可将上面的表示式写出以下形式

$$A_x = \frac{I\mu_0}{4\pi} \int_0^\infty \frac{m}{\sqrt{m^2+k_1^2}} e^{-\sqrt{m^2+k_1^2}|z|} J_0(mr) dm.$$

最后, 当 $r \rightarrow \infty$ 或当 $z \rightarrow \infty$ 时,

$$A_x \rightarrow 0, \quad A_z \rightarrow 0. \quad (10)$$