

〔苏〕Б. К. 马特维耶夫

电磁测深曲线的 图解构制

煤炭部地质勘探研究所情报室译 煤炭工业出版社

〔苏〕B.K.马特维耶夫

电磁测深曲线的 图解构造

煤炭部地质勘探研究所情报室 译

煤炭工业出版社

Б.К. Мамвеев
ГРАФИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА» Москва 1966

电磁测深曲线的图解构制
煤炭部地质勘探研究所情报室 译

★
煤炭工业出版社 出版
(北京安定门外和平北路16号)
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

★
开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $3^{1/16}$ 插图53幅
字数 63 千字 印数 1—3,100
1980年 2 月第 1 版 1980年 2 月第 1 次印刷
书号15035·2262 定价0.95元

绪 言

根据自然的和人工建立的直流和交流电磁场研究地中层状岩层的地球物理方法叫做电磁测深法。已知有五种主要的测深法：垂向电测深（ВЭЗ）、偶极电测深（ДЭЗ）、大地电磁测深（МТЗ）、频率测深（ЧЗ）和形成场法测深（ЗС）。前两种利用的是直流电流。构制ВЭЗ和ДЭЗ曲线的理论和方法，作者在以前的著作中详细地叙述过（Матвеев, 1964），本书研究交流电磁测深。

五十年代的中期，利用交流电的电法勘探有了显著的进展。由于莫斯科和列宁格勒地球物理工作者（Л.Л.万尼安，Л.Б.嘎沙年柯，А.Н.扎波洛夫斯基，А.П.克拉耶夫，Г.В.马洛赤诺夫，О.А.斯古戈列夫斯卡娅，А.Н.吉洪诺夫，Л.Н.契塔也夫，Л.Н.沙赫苏娃洛夫，С.М.谢英曼，等）以及国外学者（Л.坎亚拉等）的杰出工作，电磁测深走出了实验室阶段，广泛用于生产，解决许多地质问题。成批的生产国产仪器（ЭУЛ-60；МТЛ-62），也促进了这方面的发展。特别有价值的是，在进行区域性的构造研究时，根据电磁测深观测的结果，能够确定，对直流而言具有屏蔽作用的高阻层所覆盖的标志层位的深度。标志层一般是指具有很高或相当低电阻率的厚岩层的顶板。

各种形式的电磁测深一般是根据在多层介质的表面（地面）对场的观测结果，建立视电阻率（或相位）与场的频率（ЧЗ，МТЗ）或建场的时间（ЗС）之间的关系曲线。把这

些曲线叫做MT343, 3C曲线。有时在末尾加写字母M或Э, 这表示测量的是场的磁分量或电分量的变种(例如43M, 3CЭ)。把观测曲线与事先计算好的理论曲线相比较就可以作出关于不同电性岩层分界面的埋深、各分层的厚度, 以及其总厚度的结论。

可见为了正确解释获得的结果, 必须具备一套理论曲线(量板册), 也就是预先解决电法勘探的正演问题。这些任务已由下列学者解决: 对于MT3法是由A. H. 吉洪诺夫(1950)和Л. 卡尼亚尔(1953)解决; 43和3C法是由A. H. 吉洪诺夫和Л. H. 沙赫苏瓦洛夫(1956) C. M. 谢英曼(1948) Л. Л. 万尼安(1959)和其他研究人员解决。Л. Л. 万尼安和Л. З. 波布洛夫尼柯夫(1963)一起拟定和提出了远区形成场测深法, 目前已广泛用于生产中。地中交流电磁场的分布理论基础, 已早在苏联地球物理工作者B. A. 福克(1933) B. P. 布尔希安(1938) A. И. 扎波洛夫斯基(1943)和A. П. 克拉耶夫(1965)的经典著作中做过叙述。

视电阻率值和相位值与断面地电参数有着密切的关系; 岩层的厚度和电阻率是采用电磁法研究的前提。但是, 它们之间的关系是很复杂的。因此, 在制定电磁测深理论时要作一系列简化, 通常是使介质的模型和场源理想化。

第一, 应假设在观测点附近的地面是平面的, 其下面是由均质的(各向同性或各向异性)厚度为 h , 电阻率为 ρ , 分界面是水平的岩层组成; 第二, 在低频电磁场中与传导电流相比地中的位移电流实际上可以忽略不计(谢英曼, 1948); 第三, 根据目前的见解地中大地电磁场是利用在电离层范围内无限远的外场源建立的。因此, 起初的自然场可以认为是平面电磁波形式, 并沿法线到分界面自上而下分布。第四,

研究远区电磁场时（ η_3 和 3C法）场的高频和低频部分是分别研究的。在这种情况下，广泛利用近似的渐近公式就大大简化了正演解算。

超过标志层埋深很多倍的大极距范围叫作远区。在这个范围内，可划分出波区和 S 区，S 表示标志层之上所有岩层的总的纵向电导。在形成场的主要是比较短的其波长大大小于电极距的那部分场区（或不稳定过程阶段）叫做波区（在 3C 法中叫波段）。在波区，在有限范围内，场在地中产生平面非均匀的电磁波。因此，场的计算有了显著的简化，计算是利用近似的渐近公式。计算波区的曲线叫波曲线，不同于有限极距的测深曲线。实际上可以认为波曲线是在无限大极距时计算的。

场的低频部分（形成过程晚期阶段）叫做 S 区，该场在建立过程中长度大大超过标志层埋深的电磁波起主要作用。在 S 区电流线平行于层理分布，对场分布特点的主要影响是总的纵向电导。在波长相对于导电层厚度为无限大时，所计算的测深曲线叫做 S 曲线。

在电法勘探中，已知有几种方法可以得到电磁测深曲线，其中最精确的是利用快速电子计算机计算曲线座标的方法，在苏联科学院地球物理研究所利用这种方法得到了大量的 η_3 ，3C 和 MT3 的二层和三层曲线，可惜这些曲线还没有分图册出版，而保存在该所内。1956~1960 年，全苏地球物理科学研究所计算和提出了 η_3 法振幅和相位波曲线的照相图册。1960 年出版了形成场三层波曲线图册，和有限极距的二层量板与 S 量板共同做为形成场法工作的附件。

同年，苏联科学院地球物理研究所出版了《大地磁测深曲线的振幅和相位表》（吉洪诺夫等 1962）；1963 年出版了

《形成磁场的三层曲线坐标表》（吉洪诺夫等1963）；1963年苏联科学院西伯利亚分院和全苏地球物理研究所出版了《计算有限极距的3C和43法三层和四层曲线的图册》（万尼安等1963）。计算是用电子数字计算机完成的。

除了用精确的计算方法外，还拟定了构制电磁测深曲线的近似图解作图方法，它是以利用现有的理论量板图册为依据的。由于这种图解方法在获取任意已知介质所必须的理论曲线时，易懂、简单和经济，因而引起电法勘探人员的注意。作图方法构制曲线，既可在设计电法勘探工作时做为预先研究地电剖面用，又可以在讨论野外观测结果时，为详细分析已得资料并结合具体条件制定有效解释方法用。这些方法还可用在为电子计算机准备必要的曲线计算资料和测深结果的计算机解释。

制图方法的编制是从1957年开始的。第一次试验是由全苏地球物理研究所进行的。三层曲线的构制是利用了二层量板和辅助的诺模图 BAH 、 BAA 、 BAK 、 BAQ ，根据这些图可以求出 $h_{\Theta KB}$ 和 $\rho_{\Theta KB}$ 的座标点。

在一般情况下，编制过程如下：根据给定值 h_1 和 ρ_1 求出曲线的起始座标，并在模数为6.25cm透明的双对数坐标纸上标出（如B93）。已知 $\mu_2 = \rho_2 / \rho_1$ 的比值时，根据二层量板标出所求曲线的左支。而后前两层用一个当量参数值 $h_{\Theta KB}$ 和 $\rho_{\Theta KB}$ 来表示，实际上这些参数是用计算的方法或根据辅助的诺模图求出。进一步根据二层量板编制模数为 $\mu_3' = \rho_3 / \rho_{\Theta KB}$ 的三层曲线的右支，在这之前需把量板座标起始点和特殊点（ $h_{\Theta KB}$ 和 $\rho_{\Theta KB}$ ）重合。曲线的中间部分需在二个量板曲线之间用内插法求出，这两条量板曲线必须分别选择在所求曲线的上下方。此外，还提出了其他的构制方法。

$h_{\Theta_{KB}}$ 和 $\rho_{\Theta_{KB}}$ 的座标点可以做为模数为 $\nu_3' = h_3/h_{\Theta_{KB}}$, $\mu_3' = \rho_3/\rho_{\Theta_{KB}}$ 的下一个三层曲线的起始座标, 利用这种方法又可以构制出四层的波曲线。而后用一个等效值标出前三层, 再用一个三层曲线补充右支, 取得五层曲线等等。多层曲线可看作是三层曲线的综合形式, 但需从事分段构制。曲线最后部分的完成是按有限极距计算的量板求出。主要的困难产生在构制每个三层曲线的中间部分和它们之间的互相联接。在这些地方允许有最大的误差。为了克服这些困难和缩短构制曲线的过程, 拟定了基于利用综合量板的新方法。

所提出方法的主要优点是速度快和获得多层曲线的精度较高。误差的缩小是由于在综合量板中, 三层和二层波曲线彼此连接具有共用轴和 S 线(或 H 线)。所有具有 $h_{\Theta_{KB}}$ 和 $\rho_{\Theta_{KB}}$ 座标的主要点都集中在量板的主要轴线所穿过的地方。这样分布的量板曲线缩小了内插范围, 可以更可靠地构制每条三层曲线的右支并便于彼此间的连接, 误差变小。利用由 S 和 H 线组成的基准网也可使误差缩小。

在本著作中分别叙述了构制大地磁测深曲线, 频率测深曲线以及形成电磁场振幅和相位曲线的综合量板册和诺模图。大量的综合量板和诺模图是作者邀请苏联科学院西伯利亚分院计算中心, Л.Л.万尼安和Г.М.莫洛佐娃计算结果编制的。此外, 利用了《振幅和相位表》(吉洪诺夫等1962年), 《形成电磁场表》(吉洪诺夫等1963年)和保存在全苏地球物理科学研究所的《电磁测深曲线计算表》。

作者深切感谢 Л.Л.万尼安、М.Н.别尔基切夫斯基、Е.Н.卡连诺娃、Е.И.捷列辛娜和 А.И.波格丹诺娃的关心, 他们提供了计算资料和许多指导。同样, 在量板编制时, Р.А.布什沃耶娃也给以很大帮助。

目 录

绪 言

第一章 水平层状介质电磁测深的理论基础	1
1. 原始公式	1
2. 电磁测深曲线的渐近线	5
3. MT3和 η 3曲线的对称性 ($\mu_r \neq \infty$)	17
4. 电磁测深曲线的等值性	19
第二章 多层测深曲线图解构制的主要规则	29
1. MT3曲线和 η 3、3C波曲线的构制	29
2. 构制综合量板的原理	38
3. 有限极距 η 3和3C曲线右支的构制	41
第三章 根据综合量板构制大地磁测深曲线	49
1. 三层曲线的构制	49
2. 四层和多层曲线的构制	55
第四章 根据综合量板构制频率测深曲线	63
1. 三层曲线的构制	64
2. 四层和多层曲线的构制	70
第五章 根据综合量板构制电磁场形成曲线	77
1. 三层曲线的构制	78
2. 四层和多层曲线的构制	83
结束语	89

第一章 水平层状介质电磁

测深的理论基础

在远区获得的频率测深或形成场的多层曲线可视为二部分的综合:左面的波支部分和反映在有限相对极距 r/H 条件 S 区场特点的右支部分,式中 H —标志层埋深。当 $r/H \rightarrow \infty$ 时,右支的大部分与波曲线重合,测深曲线的形状,仅取决于地电剖面的参数。从理论的观点来看这种情况是由于在视电阻率(或相位)和介质参数之间的关系没有受到干扰。

在大地磁测深中,不采用“波区”“ S 区”这个名词,因为推测场源处于无限远,因之所有的观测曲线都是波曲线。

1. 原始公式

我们研究了多层水平层状介质,并用下列符号:

ρ_p ——电阻率;

k_p ——波数;

h_p ——岩层厚度。

这里符号 p 代表层序 ($p = 1, 2, 3 \dots$)。

在MKC单位系统中 $k_p = \sqrt{-\varepsilon\mu_0\omega^2 - i\frac{\omega\mu_0}{\rho_p}}$,

而在忽略位移电流时,

$$k_p = \sqrt{-i\frac{\omega\mu_0}{\rho_p}}, \quad (1)$$

式中 $i = \sqrt{-1}$ —— 虚数单位 ($\pm i = e^{\pm i\pi/2}$);

$\omega = 2\pi/T$ —— 场的圆频率;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ —— 导磁常数。

在介质中波数和波长之间有密切的关系:

$$k_p = \sqrt{-i \frac{2\pi \cdot 4\pi}{T \cdot 10^7 \rho_p}} = \frac{2\pi \sqrt{2 \sqrt{-i}}}{\sqrt{10^7 T \rho_p}} = \frac{2\pi \sqrt{2} e^{-i\pi/4}}{\sqrt{10^7 T \rho_p}}$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda_p} (1 - i). \quad (2)$$

式中 $\lambda_p = \sqrt{10^7 T \rho_p}$ —— 在 p 层中的波长单位为米;

ρ_p —— 岩层的电阻率, 欧姆米;

T —— 振荡周期, 秒。

综合 k_p 公式表明在作用介质中场的分量产生相位移动。

MT3法, ЧЗ和3C法 n 层介质的视电阻 (波区) 是按下式计算 (1959Ваньян):

$$\rho_T / \rho_1 = R_{1,n}^2, \quad (3)$$

$$\rho_\omega / \rho_1 = R_{1,n}^2 \quad (\text{当 } \rho_n \neq \infty \text{ 时}); \quad (4)$$

$$\frac{\rho_\omega}{\rho_1} = R_{1,n}^2 + (R_{1,n}^2 - 1) \times$$

$$\times \frac{(R_{2,n}^2 - 1)(R_{3,n}^2 - 1) \cdots (R_{n-1,n}^2 - 1)}{\left(R_{2,n}^2 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \left(R_{3,n}^2 - \frac{\rho_2}{\rho_3}\right) \cdots \left(R_{n-1,n}^2 - \frac{\rho_{n-2}}{\rho_{n-1}}\right)}$$

$$(\text{当 } \rho_n = \infty \text{ 时}); \quad (5)$$

$$\frac{\rho_T}{\rho_1} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\rho_\omega}{\rho_1} \cdot \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} \cdot d\omega. \quad (6)$$

在 (3) ~ (5) 公式中视电阻是复数。它比较方便地表达是用符号程式:

$$\frac{\rho_T}{\rho_1} = \frac{|\rho_T|}{\rho_1} \cdot e^{i\varphi}, \quad \frac{\rho_\omega}{\rho_1} = \frac{|\rho_\omega|}{\rho_1} \cdot e^{i\varphi},$$

式中 $|\rho_T|$ 和 $|\rho_\omega|$ ——振幅值； φ ——振荡相位。

在这些公式中， $R_{1,n}$ ——阻抗的换算值；第一个脚码表示层序，第二个脚码表示剖面中的总层数；在 (6) 式中， t ——场形成的时间。

对于 n 层水平均匀介质：

$$\begin{aligned} R_{1,n} = & \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 + \operatorname{arch} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \operatorname{cth} \left(k_2 h_2 + \dots + \right. \right. \\ & \left. \left. + \operatorname{arch} \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_{n-1}}} \right) \right] = \operatorname{th} \left[k_1 h_1 + \operatorname{arth} \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \operatorname{th} \times \right. \\ & \left. \times \left(k_2 h_2 + \dots + \operatorname{arth} \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_{n-1}}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 式的两边完全相等，它们便于分析场和视电阻率曲线特性，因为，在这里能够清楚的看到 ρ_T 、 ρ_ω 、 ρ_r 和地电剖面参数 h_p 和 ρ_p 之间的关系。在 (5) 式中

$$\begin{aligned} R_{2,n} = & \operatorname{cth} \left[k_2 h_2 + \operatorname{arch} \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}} \operatorname{cth} \left(k_3 h_3 + \dots + \right. \right. \\ & \left. \left. + \operatorname{arch} \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_{n-1}}} \right) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} R_{3,n} = & \operatorname{cth} \left[k_3 h_3 + \operatorname{arch} \sqrt{\frac{\rho_4}{\rho_3}} \operatorname{cth} \left(k_4 h_4 + \dots + \right. \right. \\ & \left. \left. + \operatorname{arch} \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_{n-1}}} \right) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$R_{p,n} = \operatorname{cth} \left[k_p h_p + \operatorname{arch} \sqrt{\frac{\rho_{p+1}}{\rho_p}} \operatorname{cth} \left(k_{p+1} h_{p+1} + \dots + \right. \right.$$

$$+ \cdots + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_{n-1}}}) \Big], \quad (10)$$

$$R_{n-1,n} = \operatorname{cth} \left(k_{n-1} h_{n-1} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_{n-1}}} \right). \quad (11)$$

现在将岩层厚度和电阻率用相对单位来表示:

$$v_2 = \frac{h_2}{h_1}, \quad v_3 = \frac{h_3}{h_1}, \quad \dots, \quad v_p = \frac{h_p}{h_1};$$

$$\mu_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad \mu_3 = \frac{\rho_3}{\rho_1}, \quad \dots, \quad \mu_p = \frac{\rho_p}{\rho_1}.$$

那么 (7) ~ (11) 式也可以写作:

$$R_{1,n} = \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 + \operatorname{arcth} \sqrt{\mu_2} \operatorname{cth} \left(k_1 h_1 \frac{v_2}{\sqrt{\mu_2}} + \cdots + \right. \right. \\ \left. \left. + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_{n-1}}} \right) \right], \quad (12)$$

$$R_{2,n} = \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 \frac{v_2}{\sqrt{\mu_2}} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_3}{\mu_2}} \operatorname{cth} \left(k_1 h_1 \frac{v_3}{\sqrt{\mu_3}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \cdots + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_{n-1}}} \right) \right], \quad (13)$$

$$R_{3,n} = \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 \frac{v_3}{\sqrt{\mu_3}} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_4}{\mu_3}} \operatorname{cth} \left(k_1 h_1 \frac{v_4}{\sqrt{\mu_4}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \cdots + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_{n-1}}} \right) \right], \quad (14)$$

$$R_{p,n} = \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 \frac{v_p}{\sqrt{\mu_p}} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_{p+1}}{\mu_p}} \operatorname{cth} \left(k_1 h_1 \frac{v_{p+1}}{\sqrt{\mu_{p+1}}} + \right. \right.$$

$$+ \dots + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_{n-1}}} \Big] \Big] ; \quad (15)$$

.....

$$R_{n-1,n} = \operatorname{cth} \left(k_1 h_1 \frac{v_{n-1}}{\sqrt{\mu_{n-1}}} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_n}{\mu_{n-1}}} \right). \quad (16)$$

根据(12)~(16)式可容易地求得任意介质和指定层位的换算阻抗的公式。例如,对于均匀半空间($h_1 \rightarrow \infty$)

$$R_{1,1} = 1; \quad (17)$$

对于两层介质:

$$R_{1,2} = \operatorname{cth} (k_1 h_1 + \operatorname{arcth} \sqrt{\mu_2}); \quad (18)$$

对于三层介质:

$$R_{1,3} = \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 + \operatorname{arcth} \sqrt{\mu_2} \operatorname{cth} \left(k_1 h_1 \frac{v_2}{\sqrt{\mu_2}} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_3}{\mu_2}} \right) \right]; \quad (19)$$

对于四层介质:

$$R_{1,4} = \operatorname{cth} \left\{ k_1 h_1 + \operatorname{arcth} \sqrt{\mu_2} \operatorname{cth} \left[k_1 h_1 \frac{v_2}{\sqrt{\mu_2}} + \dots + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_3}{\mu_2}} \operatorname{cth} \left(k_1 h_1 \frac{v_3}{\sqrt{\mu_3}} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_4}{\mu_3}} \right) \right] \right\}; \quad (20)$$

$$R_{2,4} = \operatorname{cth} \left(k_1 h_1 \frac{v_2}{\sqrt{\mu_2}} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_3}{\mu_2}} R_{3,4} \right);$$

$$R_{3,4} = \operatorname{cth} \left(k_1 h_1 \frac{v_3}{\sqrt{\mu_3}} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_4}{\mu_3}} \right).$$

2. 电磁测深曲线的渐近线

电磁测深曲线如同BЭ3和ДЭ3曲线一样是在模数为

6.25cm的双对数坐标纸上构制。在理论量板上,垂直轴是以相对单位, $|\rho_T|/\rho_1$, $|\rho_0|/\rho_1$, ρ_T/ρ_1 , (或相位) 表示视电阻率的振幅值或相位值, 横坐标轴则是以第一层的波长相对于其厚度 λ_1/h_1 (MT3和Q3法) 或者是形成参数 τ_1/h_1 (3C法) 来表示。在相位量板上, 垂直轴是用算术座标: $1\text{cm} \sim 10^\circ$ (MT3和Q3)。在 MKC 单位系统中 $\lambda_1 = \sqrt{10^7 T \rho_1}$; $\tau_1 = \sqrt{10^7 2\pi t \rho_1}$ 。

它们具有长度量纲(米), 并且象BЭ3和ДЭ3法中的极距一样控制探测深度。当 λ_1/h_1 (或 τ_1/h_1) 小时, 电磁场主要分布在剖面的上部, 其特点表现在测深曲线的左支。显然, 当 $\lambda_1/h_1 < 1$ ($\tau_1/h_1 < 1$) 时, 视电阻率接近于第一层的真电阻率。

当 $\lambda_1/h_1 \gg 1$ ($\tau_1/h_1 \gg 1$) 相当大时, 场穿透越深, 测深曲线的右支反映了深部岩层的构造。在 $\lambda_1/h_1 \rightarrow \infty$ ($\tau_1/h_1 \rightarrow \infty$) 的范围内, 曲线的右支接近于曲线右渐近线。

利用上述公式, 求出测深振幅曲线和相位曲线的左、右渐近线。为了简便, 预先假设以H、A、K和Q型支线结尾的多层曲线相应地称之为H、A、K和Q型曲线。我们对取得这样曲线的剖面给以同样的命名。做为多层介质的例子, 我们研究了四层剖面所取得的结果对任意情况都容易概括。

曲线的左渐近线

我们研究 MT3 的 H 型四层曲线。根据 (2)、(3) 和 (20) 式可写为:

$$\frac{\rho_T}{\rho_1} = \text{cth}^2 \left\{ \frac{2\pi \sqrt{2} e^{-i\pi/4}}{\lambda_1/h_1} + \text{arch} \sqrt{\mu_2} \times \right.$$

$$\times \operatorname{cth}\left\{\frac{2\pi}{\frac{\lambda_1}{h_1} \cdot \frac{\sqrt{\mu_2}}{v_2}} e^{-i\pi/4} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_3}{\mu_2}} \times \right. \\ \left. \times \operatorname{cth}\left(\frac{2\pi}{\frac{\lambda_1}{h_1} \cdot \frac{\sqrt{\mu_3}}{v_3}} e^{-i\pi/4} + \operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\mu_4}{\mu_3}}\right)\right\} \quad (21)$$

显然, $\lim_{\substack{\lambda_1 \rightarrow 0 \\ h_1}} \rho_T / \rho_1 = 1$ (因为 $\operatorname{cth} \infty = 1$); $\varphi_T = 0$ 。不难看出

出, 利用 (4) 和 (5) 式对于频率测深曲线, 也能得到同样的结果。因此, MT3 和 43 振幅曲线和相位曲线的左渐近线是一个水平直线, 其标记是:

$$|\rho_T| = \rho_1; \quad |\rho_\infty| = \rho_1; \quad \varphi_T = 0; \quad \varphi_\infty = 0.$$

左支线不是平滑地接近于本身的渐近线, 而是在其周围摆动并很快地衰减。实际上在具有下降左支线的曲线上出现假(补充的)极大值, 而在具有上升支线的曲线上出现假极小值。

对于形成场的曲线, 根据 (6) 式求出:

$$\lim_{\substack{\tau_1 \rightarrow 0 \\ h_1}} \frac{\rho_\tau}{\rho_1} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{\lambda_1/h_1 \rightarrow 0} \frac{\rho_\omega}{\rho_1} \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega = 1 \quad (\text{当 } t > 0 \text{ 时}). \quad (22)$$

由此, 形成场曲线的左渐近线同样是具有纵座标 $\rho_\tau = \rho_1$ 的水平直线, 其曲线平滑地接近它没有假极值。

MT3 和 43 曲线的右渐近线 (在 $\mu_4 = \infty$ 时)

找出三种情况 ($\mu_4 = \infty, \mu_4 = 0, 0 < \mu_4 < \infty$) 的右渐近线。

1. $\mu_4 = \infty$ 时根据 (21) 式求出:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_T}{\rho_1} = & \operatorname{cth}^2 \left[\frac{2\pi\sqrt{2} e^{-i\pi/4}}{\lambda_1/h_1} + \operatorname{arch} \sqrt{\mu_2} \times \right. \\ & \times \operatorname{cth} \left(\frac{2\pi\sqrt{2} e^{-i\pi/4}}{\lambda_1/h_1 \cdot \sqrt{\mu_2}/v_2} + \operatorname{arch} \sqrt{\frac{\mu_3}{\mu_2}} \times \right. \\ & \left. \left. \times \operatorname{cth} \frac{2\pi\sqrt{2} e^{-i\pi/4}}{\lambda_1/h_1 \cdot \frac{\sqrt{\mu_3}}{v_3}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

在 $\lambda_1/h_1 \rightarrow \infty$ 时, 求出:

$$R_{3,4} = \operatorname{cth} \frac{2\pi\sqrt{2} e^{-i\pi/4}}{\lambda_1/h_1 \cdot \sqrt{\mu_3}/v_3} \approx \lambda_1/h_1 \cdot \sqrt{\mu_3}/v_3 \cdot e^{i\pi/4} / 2\pi\sqrt{2}; \quad (24)$$

$$\operatorname{arch} \frac{\lambda_1}{h_1} \frac{\mu_3 e^{i\pi/4}}{v_3 \cdot \sqrt{\mu_2} 2\pi\sqrt{2}} \approx \frac{2\pi\sqrt{2} e^{-i\pi/4}}{\lambda_1/h_1 \cdot \frac{\mu_3}{v_3\sqrt{\mu_2}}},$$

$$\begin{aligned} R_{2,4} &= \operatorname{cth} \frac{2\pi\sqrt{2} e^{-i\pi/4}}{\lambda_1/h_1} \left(\frac{v_2}{\sqrt{\mu_2}} + \frac{v_3\sqrt{\mu_3}}{\mu_3} \right) \\ &= \operatorname{cth} \frac{2\pi\sqrt{2} e^{-i\pi/4}}{\lambda_1/h_1} \frac{v_2\mu_3 + v_3\mu_2}{\mu_3\sqrt{\mu_2}} \\ &\approx \lambda_1/h_1 \frac{\mu_3\sqrt{\mu_2} e^{i\pi/4}}{(v_2\mu_3 + v_3\mu_2)2\pi\sqrt{2}}, \end{aligned}$$

$$\operatorname{arch} \sqrt{\mu_2} R_{2,4} \approx \frac{2\pi\sqrt{2} e^{-i\pi/4}}{\lambda_1/h_1} \left(\frac{v_2}{\mu_2} + \frac{v_3}{\mu_3} \right). \quad (25)$$

(25) 式代入 (23) 式后, 在 $\lambda_1/h_1 \rightarrow \infty$ 时, 右渐近线的方程式具有下列形式:

$$\frac{\rho_T}{\rho_1} = \operatorname{cth}^2 \frac{2\pi\sqrt{2} e^{-i\pi/4}}{\lambda_1/h_1} \left(1 + v_2/\mu_2 + v_3/\mu_3 \right)$$