

中国地质勘查技术院 主办

勘查地球物理 勘查地球化学文集

第 20 集

电法专辑

罗延钟 史保连 朴化荣 主编

地质出版社

中国地质勘查技术院 主办

勘查地球物理
勘查地球化学文集

第20集

电法专辑

罗延钟 史保连 朴化荣 主编

地质出版社

· 北京 ·

第三届地质矿产部《勘查地球物理 勘查地球化学专报文集》编委会

顾 问：邹光华、孙文珂、孙焕振

主任委员：刘士毅

副主任委员：方迎尧、伍宗华 张 雍

委 员：(按姓氏笔划排列)

王守坦	王毓芳	牛一雄	方松耕	方迎尧
申宁华	史保连	伍宗华	刘士毅	孙星和
牟绪赞	吴海成	张 雍	张文斌	张世洪
陈玉玺	周庆来	周国藩	罗延钟	唐大荣
唐文榜	高仁载	崔霖沛	曹洛华	黄智辉
蒋邦远	曾朝铭	雷振英	管志宁	籍同冰

图书在版编目(CIP)数据

勘查地球物理勘查地球化学文集·第20集：电法专辑 罗延钟等主编。北京：地质出版社，1996.7

ISBN 7-116-02167-1

I. 勘… II. 罗… III. ①地球物理勘探-文集②地球化学勘探-文集③电法勘探-文集 IV .P624-53

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第09341号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路29号)

责任编辑：徐 才 王式铭

*

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：14 字数：344000

1996年7月北京第一版·1996年7月北京第一次印刷

印数：1—500册 定价：25.00元

ISBN 7-116-02167-1
P·1626

前 言

近 10 年来,我国电法勘探在理论、方法技术、仪器装备和应用研究方面,取得了一系列重要成果,对促进我国地质-找矿工作的发展起到了积极作用。为了总结和交流这些成果,地矿部物化探成果编委会决定编辑出版一本电法勘探文集。电法勘探是一大类方法,其本身又包括许多分支方法,一本文集不可能全面和深入地反映所有分支方法的成果。好在近几年国内已出版了几本分别反映某些电法分支方法成果的专题论文集。例如,中国地质大学学报《地球科学》先后出版了大地电磁法和探地雷达的专辑;地震出版社出版了有关地下管线探测的会议论文集等。为了避免重复,也为了更集中,编委会决定本文集重点反映近几年国内外发展较快、方法技术较新和成果比较突出的频谱激电法(SIP)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、甚低频法(VLF)和瞬变电磁法(TEM)。

本文集的任务是总结和交流近年来上述分支方法国内的主要研究成果,促进这些成果更快和更好地投入应用,推动电法学科和生产的发展。文集的读者对象,既包括地学科研工作者和大专院校师生,更包括工作在生产第一线的广大地质-地球物理技术人员。为适应上述任务和读者对象的需要,本文集在选材和编排上作了如下考虑:

在内容上求“新”。这表现在所涉及的分支方法较新和尽量收集具有较大学术意义或较大应用价值的新成果。

在编排上求“顺”。全部论文分别划入所属的 4 个分支方法中。分支方法按先频率域,后时间域;先低频,后高频排序。具体顺序为 SIP, CSAMT, VLF 和 TEM。每一分支方法内的论文,按物理-化学基础,数据处理,正、反演理论,仪器和实际应用排序。考虑到文集内的 4 种分支方法都比较新,为便于读者阅读,特意对每一分支方法写了一篇方法介绍和近年研究进展的评述文章,放在该分支方法论文的第一篇。

应该指出,尽管我们力求全面和深入地反映 4 种分支方法在国内的主要成果,但由于文集的篇幅所限,也由于受部门的限制,某些很有价值的成果并未收入本文集。这十分遗憾,但也是不能不接受的现实。

张赛珍,李金铭,蒋邦远,王守坦和励宝恒等同志审阅了本文集的稿件;地矿部物化探成果编委会专门为本文集召开了审稿会,对提高本文集质量作出了重要贡献。地质科学院的张中民同志为本文集翻译了英文摘要及图名和图注;地矿部物化探成果编辑部的同志清绘了全部插图。在此一并致谢!

尽管我们作了很大努力,但由于水平所限,文集中可能仍包含错误和不足,敬请读者不吝赐教。

罗延钟

1995.8.

目 录

1 频谱激电法及其在近年的发展	罗延钟 (1)
2 频谱激电法的物理-化学基础	罗延钟 (8)
3 频谱激电法的模拟相似准则	罗延钟、孟永良、熊宗厚 (15)
4 频谱激电法的异常规律	罗延钟、熊宗厚、吴之训、崔先文 (23)
5 真谱参数的反演方法	张桂青、罗延钟、崔先文 (35)
6 频谱激电法在金属矿和油气藏勘查中的应用	吴之训、崔先文、罗延钟 (43)
7 可控源音频大地电磁法及其在近年的发展	罗延钟 (52)
8 一种新的 CSAMT 资料近场校正方法——全频域视电阻率法	罗延钟、周玉冰、万乐 (57)
9 CSAMT 法的静态效应校正方法	罗延钟、万乐、何展翔 (69)
10 双极源 CSAMT 法一维正演的等效偶极源近似算法	罗延钟、万乐、杨麟峰 (78)
11 双极源 CSAMT 法的一维反演算法	万乐、罗延钟 (91)
12 电偶源 CSAMT 法二维正演的有限单元算法	孟永良、罗延钟 (103)
13 CSAMT 法在山西沁水盆地的应用效果	何展翔、罗延钟 (115)
14 可控源音频大地电磁法和瞬变电磁法在新疆阿舍勒铜矿区的应用	马瑞伍、罗延钟 (121)
15 甚低频电磁法在我国的应用和进展	史保连 (128)
16 我国甚低频电磁场场强分析与计算	郭勇 (132)
17 甚低频磁场倾角的线性滤波法及其应用	辜彬 (138)
18 地表测量甚低频电场水平分量的不接地偶极天线	郭勇 (145)
19 甚低频电磁法在金属矿勘查中的应用效果	及炳祥 (149)
20 甚低频电磁法在金矿勘查过程中的应用与效果	吕桂玉、李永年 (154)
21 瞬变电磁法现状及展望	朴化荣 (161)
22 瞬变电磁测深法全区视电阻率定义研究	殷长春 (165)
23 利用正(余)弦变换实现频率域正演到时间域的转换	李吉松 (174)
24 瞬变电磁测深正演理论及数值计算方法	殷长春 (183)
25 瞬变电磁测深曲线视纵向电导解释法	朴化荣 (194)
26 WDC-1 瞬变电磁观测系统	何朝明 (208)

COLLECTED WORKS OF ELECTRICAL METHOD

CONTENTS

1. The Frequency Spectrum Induced Polarization Method and Its Development in Recent Years
..... *Luo Yanzhong* (1)
2. The Physical-Chemical Basis of the Frequency Spectrum Induced Polarization Method
..... *Luo Yanzhong* (8)
3. Simulation Criteria of the Frequency Spectrum Induced Polarization Method
..... *Luo Yanzhong, Meng Yongliang, Xiong Zhonghou* (15)
4. The Regularity of Frequency Spectrum IP Anomaly
..... *Luo Yanzhong, Xiong Zhonghou, Wu Zhirun, Cui Xianwen* (23)
5. Inversion Method of Real Spectrum Parameters
..... *Zhang Guiqing, Luo Yanzhong, Cui Xianwen* (35)
6. The Application of the Frequency Spectrum Induced Polarization (SIP) Method to the Prospecting for Metallic Deposits and Oil and Gas Accumulations
..... *Wu Zhirun, Cui Xianwen, Luo Yanzhong* (43)
7. The Controlled-source Audio-Magnetotelluric Method and Its Development in Recent Years
..... *Luo Yanzhong* (52)
8. A New Near-field Correction Method for CSAMT Data-The Full Frequency Domain Apparent Resistivity Method
..... *Luo Yanzhong, Zhou Yubing, Wan Le* (57)
9. The Method for Correcting Static Effect in the CSAMT Method
..... *Luo Yanzhong, Wan Le, He Zhanxiang* (69)
10. Equivalent Dipolar Source Approximate Calculation for One-Dimensional Direct Problem of Bipolar Source CSAMT Method
..... *Luo Yanzhong, Wan Le, Yang Linfeng* (78)
11. One-Dimensional Inverse Algorithm of Bipolar Source CSAMT Method
..... *Wan Le, Luo Yanzhong* (91)
12. Two-Dimensional Direct Finite-Element Algorithm of Electrical Dipolar Source CSAMT Method
..... *Meng Yongliang, Luo Yanzhong* (103)
13. The Application of the CSAMT Method in Qinshui Basin, Shanxi Province
..... *He Zhanxiang, Luo Yanzhong* (115)

14. The Application of the Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method (CSAMT) and Transient Electro-magnetic Method (TEM) to the Ashele Copper Ore District, Xinjiang
..... *Ma Ruiwu, Luo Yanzhong* (121)
15. The Application and Advances of the Very Low Frequency Electromagnetic Method in China
..... *Shi Baolian* (128)
16. The Distribution of Very Low Frequency Electromagnetic Fields in China
..... *Guo Yong* (132)
17. The Linear Filtering Method for Dip Angle of Very Low Frequency Magnetic Field and Its Application
..... *Gu Bin* (138)
18. Ungrounded Dipole Antenna for Measuring Horizontal Component of Very Low Frequency Electric Field at Surface
..... *Guo Yong* (145)
19. The Effectiveness of Very Low Frequency Electromagnetic Method in the Exploration of Metallic Deposit
..... *Jin Bingxiang* (149)
20. The Application and Effects of the Very Low Frequency Electromagnetic Method in the Exploration of Gold Deposits
..... *Lu Guiyu, Li Yongnian* (154)
21. The Present State and Prospects of the Transient Electromagnetic Method
..... *Piao Huarong* (161)
22. A Study on the Definition of the Full-Region Apparent Resistivity in the Transient Electromagnetic Sounding Method
..... *Yin Changchun* (165)
23. The Conversion of the Forward Result of Frequency Domain to Time Domain by Means of Sine (Cosine) Transform
..... *Li Jisong* (174)
24. The Transient Electromagnetic Sounding Forward Theory and the Numerical Calculation Method
..... *Yin Changchun* (183)
25. The Longitudinal Conductance Interpretation Method of Transient Electromagnetic Sounding Curve
..... *Piao Huarong* (194)
26. The WDC-1 Transient Electromagnetic Observation System
..... *He Chaoming* (208)

频谱激电法及其在近年来的发展

罗 延 钟

(中国地质大学, 武汉 430074)

频谱激电法 (SIP) 是 70 年代国际上发展起来的一种新的激电分支方法, 它利用常规电阻率法的电极装置, 在超低频段上 ($n \times 10^{-2} - n \times 10^2 \text{Hz}$) 作多频视复电阻率 $\rho_s(i\omega)$ 测量, 根据 $\rho_s(i\omega)$ 的频谱特性及其空间分布, 推断地下地质情况, 达到地质找矿的目的。因为此法是观测视复电阻率, 故又称为复电阻率法 (CR)。1978 年 W. H. Pelton 等发表的著名论文“利用多频激电测量作矿物区分和去除电磁耦合”^[1] 奠定了 SIP 法的基础。这篇论文指出了利用 SIP 资料消除电磁耦合干扰和按结构区分别极化体的可能性, 为金属矿激电法的发展开辟了新的途径。1981 年 K. L. Zonge 等提出了他们在油气田上开展复电阻率法和利用剩余电磁效应 (REM) 找油气获得很高成功率的报告。将 SIP (或 CR) 法的应用扩展到新的领域, 从而使这种方法在国际上获得越来越广泛的重视。

利用常规电阻率法的电极装置, 通过供电极 A、B 向地下供入一定频率 f 的超低频交流电流 \tilde{I} , 并观测两个测量电极 M、N 之间同一频率的交流电位差 $\Delta\tilde{U}$ 。然后, 按传统公式计算视电阻率

$$\rho_s(i\omega) = K \frac{\Delta\tilde{U}}{\tilde{I}} \quad (1)$$

式中, K 是装置系数, $\omega = 2\pi f$ 为角频率。由于存在激电和电磁效应, $\Delta\tilde{U}$ 随频率 f 或 ω 而变化, 并且它相对于电流 \tilde{I} 有相位移。所以, 按 (1) 式算出的视电阻率是频率的复变函数, 故称为视复电阻率, 记为 $\rho_s(i\omega)$ 。

W. H. Pelton 等^[1] 基于对岩、矿石标本和露头的大量测量结果认为, 对均匀岩、矿石, 由激电效应引起的复电阻率随频率的变化 (即复电阻率频谱) 可由下式表示:

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\} \quad (2)$$

本世纪 40 年代初, K. S. Cole 和 R. H. Cole^[3] 曾用类似的公式来描述介电极化效应, 故称这一数学模型为柯尔-柯尔模型。其中, ρ_0 ——频率为零时的电阻率; m ——极限极化率, 亦称充电率; c ——频率相关系数; τ ——时间常数。这些参数统称为柯尔-柯尔模型参数或 (频) 谱参数。

Pelton 等^[1] 还认为, 除激电效应外, 电磁耦合频谱的低频部分也可用柯尔-柯尔模型来描述。因此, 当同时存在激电和电磁效应时, 实测的视复电阻率频谱可表示成两个、三

个以至多个柯尔-柯尔模型之和。例如:

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m_1 \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_1)^{c_1}} \right] - m_2 \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_2)^{c_2}} \right] \right\} \quad (3)$$

式中, m_1 , c_1 , τ_1 和 m_2 , c_2 , τ_2 分别表示激电效应和电磁效应的频谱参数。Pelton 等^[1]根据他们在多处岩、矿石露头上用小极距装置的实测资料归纳出激电效应的频率相关系数, c_1 一般在 0.1—0.6 之间, 常见值为 0.25; 而电磁效应则具有较大和较稳定的频率相关系数, $c_2 = 0.95—1$ 。此外, 激电效应的时间常数 τ_1 通常比电磁效应的时间常数 τ_2 大几个数量级。所以, 根据谱参数 c 和 τ 的相对大小, 通常可以成功地区分激电和电磁效应的频谱。

激电效应的时间常数 τ_1 可有几个数量级的变化范围; 电子导电矿物颗粒之间连通程度差的稀疏浸染状或细脉状矿石 (或矿化岩石), τ_1 值较小 (往往小于 $n \cdot 10^{-1}$ s); 而导电矿物连通较好的稠密浸染状、片状、网脉状和致密块状岩、矿石的 τ_1 值则较大 (大于 1s, 乃至 $n \cdot 10^2$ s)。因此, 可根据 τ_1 的大小, 按结构区分引起激电异常的极化体。

由于频谱激电法获得的谱参数可为解决激电法的两大难题 (识别和分离激电与电磁效应及评价激电异常) 提供宝贵的信息, 因而这一方法在国际地球物理界受到广泛的重视。继 Pelton 和 Zonge 等的论文^[1]和报告^[2]之后, 国外学者 J. Wong^[4], D. Guptasama^[5,6], H. Soininen^[7,8]及 R. J. Brown^[9]等, 先后对 SIP 法的物性基础, 正演问题和电磁耦合模型等作了研究。加拿大凤凰公司和美国 Zonge 工程和研究公司先后研制出 IPS-3、V-4、V-5 和 GDP-12 及 GDP-13 等可用于频谱激电法的仪器系统; 加拿大先得利公司, 则先后推出了 IPR-11 和 IPR-12 等时间域谱激电仪器系统。上述公司也承包野外工作任务, 开展谱激电法地质找矿工作。

我国从 80 年代初期开始谱激电法的理论研究^[10]。1983 年地矿部花费 30 多万美元引进了加拿大凤凰公司的 IPS-3 型频谱激电仪器系统, 开展 SIP 法试验和生产工作。随后, 中国科学院地球物理研究所、新疆地矿局、新疆有色金属地质勘探公司、中南工业大学、地矿部地球物理和地球化学勘查技术研究所和非金属地质公司等单位, 相继引入了凤凰公司新一代仪器 (V-4 和 V-5) 系统、美国 Zonge 公司的 GDP-12 和 GDP-16 及加拿大先得利公司的 IPR-11 仪器系统。此外, 中南工业大学、中科院地球物理所与无锡电子技术应用研究所、长春地质学院和地矿部地质矿产经济技术研究院等单位, 还研制了国产的谱激电仪器系统。目前, 我国已具备了开展、乃至推广使用 SIP 法的技术条件。

在引进和研制仪器系统的同时, 中国地质大学、中科院地球物理研究所、中南工业大学、北京有色金属矿产地质研究所及地矿部地质勘查技术院等单位, 对 SIP 法的理论和应用开展了系统和深入的研究, 取得了一系列重要的成果。

首先, 在 SIP 法的物理-化学基础方面, 中国地质大学和中科院地球物理研究所作了很有意义的研究工作。他们不仅通过大量的岩、矿石物性测定, 印证了 Pelton 等^[1]的结果, 而且提出了若干新的见解^[11]。特别是从电子导体激发极化的电化学机理出发, 研究各种过电位的充、放电特性和频谱特性, 进而建立了面极化和体极化的等效电路和数学模型, 从而在理论上证明了采用柯尔-柯尔模型描述激电复电阻率频谱的合理性^[12]。

在此基础上对均匀岩、矿石的真时间常数 (τ) 和真频率相关系数 (c) 的数值作了

分析, 并且结合实测数据强调指出了, 不仅利用 τ 而且利用 c 按结构区分极化体的可能性^[13]。这是对前人, 特别是对 SIP 法创始人 Pelton 等工作^[1] 的一大发展。

其次, 在 SIP 法的正演方面我国学者也取得了一系列重要研究成果。模拟相似准则是正演研究首先要解决的一个问题。激电法的模拟相似准则比较复杂, 前人只是结合个别形体(如球体)的正演解析解, 作过一些讨论^[14, 15], 没有从普遍意义解决问题, 更没有研究过同时包括激电和电磁效应的谱激电法的模拟相似准则问题, 以致对某些物理模拟实验结果感到茫然^[5]。中国地质大学^[16, 17] 从同时存在激电和电磁效应时谐变电磁场的微分方程边值问题出发, 分别导出了体极化和面极化频谱激电模拟的相似准则。进而讨论了它的实现问题, 指出由于难以满足相似准则, 实际上不可能对同时存在激电和电磁效应的频谱激电异常, 进行完全“保真”的物理模拟, 只能根据模拟的具体任务, 忽视某个或某些模拟相似条件, 着重研究(体极化)激电效应或电磁效应的异常。至于面极化效应, 即使只研究激电异常, 也不能用物理模拟方法作保真的模拟。

基于对面极化模拟相似准则的研究得出, 埋藏很深(数百米)的面极化体, 既使其体积很大, 异常也很小。实际上, 在埋深很大的大型致密矿体上, 通常能观测到明显的激电异常。为解决上述理论和实践的矛盾, 引入了“分区面极化”的概念^[12]。进而得出结论: 研究理想面极化体的激电异常, 对找矿没有什么实际意义。

对于非均匀大地上视复电阻率的频谱和空间分布特性的正演研究, 国外只作过一些零星的工作^[5-9]; 我国学者在这方面的研究比较深入和系统^[10, 12, 15, 16, 18-24]。这些研究结果表明, 在非均匀大地上激电效应引起的视复电阻率频谱一般也可用一个柯尔-柯尔模型来拟合, 由此可反演确定激电视谱参数(零频视电阻率 ρ_{s0} 、视充电率 m_s 、视时间常数 τ_s 和视频率相关系数 c_s)。其中, τ_s 和 c_s 是 SIP 法特有的参数。系统的正演计算结果表明: 1) 在许多情况下, 就定性而言, 视时间常数 τ_s 可以直接用来按结构区分极化体; 利用 τ_s 异常可能找到激电强度参数(视极化率 η_s 、视频散率 p_s 、视充电率 m_s 和视激电相位 φ_s^{IP} 等)没有明显异常的深部矿。因此, τ_s 应是 SIP 法研究的主要参数; 2) 视频率相关系数 c_s 可用来从矿化围岩中划分出局部富集矿(化)体及按结构区分极化体。所以, c_s 也应作为 SIP 法研究的重要参数。这些由我国学者研究获得的重要成果, 显著扩大了 SIP 法实际应用的可能性和提供了有效手段, 为 SIP 法走向实用作出了重要贡献。

在谱激电正演研究方面的又一重要贡献是, 我国学者成功地解决了复杂围岩条件下(非各向同性二层大地基岩中)三维极化体的激电和电磁效应的数值模拟问题^[16]。用这一数值模拟方法对同时存在激电和电磁效应时的频谱激电异常作了研究, 得出了一系列有意义的认识^[12, 22, 25]。其中, 特别对剩余电磁效应(REM)异常作了分析, 得出了研究 REM 的理想参数, 为扩大 SIP 法的应用起了重要作用。

在 SIP 法正演研究中还有一个重要问题, 就是建立非均匀大地条件下, 视复电阻率频谱与各种介质的真复电阻率频谱之间的近似关系式。最早提出这种关系式的是 Pelton 等^[1], 他们在稀释系数为常数和地下只存在一种极化介质的假设条件下, 给出了视谱与真谱之间的近似关系式。后来, 罗延钟等^[26] 将其推广到地下存在多种极化体的情况。由于稀释系数实际上是频率的复变函数, 所以上述关系式的近似程度较差, 只适用于极化很弱的情况。Guptasarma^[6] 首先发表了频变稀释系数条件下, 视复电阻率相位谱与真复电阻

率相位谱之间的高级近似关系式。一年以后,刘崧等^[9]发表了类似的关系式,并将其扩大到振幅谱。后来,刘崧又对振幅谱的近似关系式进一步作了改进^[27]。这些关系式奠定了真谱参数反演的基础。

谱激电法的第三个方面理论问题是极化介质真谱参数的反演问题。前已述及,对非均匀大地上的视复电阻率频谱用柯尔-柯尔模型与之拟合,可确定视谱参数 ρ_{s0} 、 m_s 、 τ_s 和 c_s 。视谱参数受多种因素的影响,不能直接代表被研究的地质对象(目标极化体)的性质。为了利用SIP法评价激电异常,需要确定目标极化体的真谱参数,特别是真时间常数 τ 和真频率相关系数 c 。

Pelton等^[1]基于稀释系数 β 为常数和围岩不极化的假设条件,提出用图解法由视谱参数近似确定目标极化体的真谱参数。刘崧等^[9]为这一解释方法补绘了比较精细的列线图。但这种方法用起来很不方便;此外,在列线图上插值取数的误差较大。为克服此两缺点,罗延钟等^[26]建立了由视谱参数计算真谱参数的解析法。

张桂青等提出了由视复电阻率频谱直接反演极化体真谱参数的思想,并建立了相应的反演算法和实用程序^[28,30,12,31,32]。1984年,张桂青等首先研究了稀释系数 β 为常数(只适用于弱极化)的简单情况下,由视谱直接反演真谱参数的反演方法^[28]。这一研究成果于1985年通过国家攻关项目办公室组织的专家评审。基于 β 为常数的反演方法研究中发现的问题,张桂青提出了开展稀释系数随频率变化的反演方法研究的建议;刘崧对此作了补充,认为联系极化体的几何因素作反演可能更好。这些意见都反映在刘崧执笔的一篇调研报告^[29]。

1988年,张桂青等首次发表了按频变的稀释系数由视谱反演直接获取极化体真谱参数的算法和初步成果^[12]。这一研究成果的核心是通过系统的正演计算,肯定了稀释系数 β 是近似按柯尔-柯尔模型频变的;从而利用Guptasarma^[6]关于频变稀释系数条件下视相位谱与各极化介质真相位谱之间高级近似关系式,建立了由视相位谱直接反演计算极化体真谱参数的算法;对理论频谱的试算结果表明,反演效果十分理想。在研究过程中,也曾利用刘崧等^[9]的振幅关系式作了反演试算,结果表明,单独反演振幅谱的稳定性差,误差较大;联合反演振幅谱和相位谱的结果与单独反演相位谱的结果几乎相同,效果都较好。所以,起决定性作用的是相位谱,从实用观点看,单独反演视相位谱就足够了。基于对理论频谱的扩大试算和对野外实测频谱的实际应用,利用SIP法正演研究的成果和视谱参数反演的经验,逐步形成了由视相位谱直接反演计算极化体真谱参数的实用方法和软件,并在实际应用中取得了好的效果^{[30]①②}。

张赛珍等也研究成功一种由视谱直接反演计算极化体真谱参数的算法^[31],其对理论视谱的反演结果十分理想。此外,刘崧也于1990年提出了一个直接反演极化体真谱参数的方案^{[34]③}。

① 张桂青、崔先文、罗延钟,确定隐伏极化体固有频谱参数的方法,国际勘探地球物理学学术讨论会(西安,1986)报告。

② 张桂青、罗延钟、崔先文,由谱激电法视谱直接反演真谱参数,国际勘探地球物理讨论会(北京,1989)报告。

③ 刘崧、官善友、高鹏飞,一种频谱激电资料反演新方案,中国地球物理学会第六届年会(武汉,1990)报告。

确定目标极化体的真谱参数，是利用 SIP 法评价激电异常的关键性问题。我国学者在这方面取得的研究成果，特别是开创性地提出由视谱直接反演计算真谱参数的思想，建立起相应的算法和实用程序，为 SIP 法走向实用迈出了关键的一步。

在理论研究的基础上，我国物探工作者开展较大工作量的 SIP 法野外试验研究和生产工作，在 SIP 法的实际应用方面取得了瞩目的成果^[32,33]。首先是建立了一整套合理和实用的野外工作方法技术，制定了规范性的工作条例；在国外软件的基础上，纳入我国的理论研究成果，研制成了 SIP 法正演计算、数据处理、反演解释和成果绘图应用软件系统；总结了在各种炭质岩层、有色和黑色金属矿产及油气田上，SIP 法的异常特点和规律。其次，在正确理论和方法的指导下，找到两处有工业价值的铜多金属矿，开拓了 SIP 法在油气勘查的应用领域，取得了突出的地质效果^[13,25]。

本论文集的部分文章将分别介绍我国在 SIP 法的物理-化学基础、正演理论、反演算法和实际应用方面的主要成果、考虑到此前已公开出版和发表了两本专著和数十篇论文，分别对各方面的研究成果作了比较详细的论述，所以本文集的文章仅简要概括主要研究成果。详细的论述和公式推导可参考相应的论著。

参 考 文 献

- [1] Pelton W. H., et al: Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP, *Geophysics*, 43, 588—609, 1978.
- [2] Zonge K. L., Hughes L. J. and Carlson N. R.: Hydrocarbon exploration using induced polarization, apparent resistivity and electromagnetic scattering, Presented at the fifty-first annual international meeting and exposition SEG, 1981.
- [3] Cole K. S. and Cole R. H.: Dispersion and absorption in dielectrics, I. Alternating current field, *J. Chem. Phys.*, 9, 341, 1941.
- [4] Wong J.: An electrochemical model of the IP phenomenon in disseminated sulfide ores, *Geophysics*, 44, 1245—1265, 1979.
- [5] Guptasarma D.: Effect of surface polarization on resistivity modeling, *Geophysics*, 48, 98—106, 1983.
- [6] Guptasarma D.: True and apparent spectra of buried polarizable targets, *Geophysics*, 49, 171—176, 1984.
- [7] Soinenen H.: The behavior of the apparent resistivity phase spectrum in the case of a polarizable prism in an unpolarizable half-space, *Geophysics*, 49, 1534—1540, 1984.
- [8] Soinenen H.: The behavior of the apparent resistivity phase spectrum in the case of two polarizable media, *Geophysics*, 50, 810—819, 1985.
- [9] Liu-Song and Vozoff K.: The complex resistivity spectra of models consisting of two polarizable media of two different intrinsic properties, *Geophysical Prospecting*, 33, 1029—1062, 1985.
- [10] 傅良魁, 复电阻率法异常的频谱及空间分布规律, *地质与勘探*, No.3, 1981.
- [11] 张赛珍等, 我国几个金属矿区岩、矿石的低频相位频率特性及影响因素, *地球物理学报*, 176—189, 科学出版社, 1984.
- [12] 罗延钟、张桂青, 频率域激电法原理, 地质出版社, 1988.
- [13] 罗延钟、吴之训, 谱激电法中频率相关系数的应用, *地球物理学报*, 490—500, 科学出版社, 1992.
- [14] 柯马洛夫 B. A., 激发极化法电法勘探, 地质出版社 (1983年翻译出版), 1980.
- [15] 罗延钟、许妙立、吴之训, 面极化球体上视复电阻率的频谱特征和模拟相似性准则, *桂林冶金地质学院学报*, 145—155, 1986.
- [16] Xiong Zonghou, Luo Yanzhong, Wang Shoutan and Wu Guangyao.: Induced polarization and electromagnetic modeling of a three-dimensional body buried in a two-layer anisotropic earth, *Geophysics*, 51, 2235—2246, 1986.
- [17] Meng Yongliang and Luo Yanzhong.: Calculation of harmonic electromagnetic field and scale modeling laws for surface polarizable bodies, *Chinese Journal of Geophysics*, 32, 145—158, 1989.
- [18] 傅良魁、张虎豹, 频谱激电法若干理论研究, *物探与化探*, 410—419, 1985.
- [19] 傅良魁、李金铭、陈兆洪, 埋藏极化体激电时间谱视参数的实验研究结果, *地质与勘探*, 38—43, 1985.
- [20] 李金铭、陈兆洪, 埋藏极化体上时间域激电谱的理论研究, *桂林冶金地质学院学报*, 295—305, 1987.
- [21] 罗延钟、方胜, 极化椭球体上频谱激电法的异常性态, *桂林冶金地质学院学报*, 49—63, 1985.
- [22] 罗延钟、熊宗厚、崔先文, 同时存在激电和电磁效应的频谱激电异常性质, *物探与化探*, 106—114, 地质出版社, 1987.
- [23] 罗延钟、姚建阳、何展翔、陈绪诚, 球形极化体上点源装置频谱激电异常的高级近似算法, *物化探计算技术*, 113—122, 1987.
- [24] Luo Yanzhong and Wu Zhixun.: SIP anomalies obtained with D-D array over a polarizable sphere in a homogeneous half-space, *An Overview of Exploration Geophysics in China—1988*, SEG Publication, *Geophysical References Series* No3, 1989.
- [25] 罗延钟、吴之训, 研究剩余电磁效应的理想参数, *物探与化探*, 370—375, 1992.
- [26] 罗延钟、方胜, 视复电阻率频谱的一种近似反演方法, *地球科学*, 93—102, 1986.
- [27] 刘崧, 计算视复电阻率的新的近似公式, *地球物理学报*, 687—694, 科学出版社, 1988.

- [28] 张桂青、崔先文、罗延钟, 一种反演频谱激电法视谱直接求真参数的方法, *地质与勘探*, No.4, 1985。
- [29] 刘崧, 激电法在寻找深埋金属矿中的应用前景及方法理论中值得研究的一些问题, *地质科技情报*, No.1, 1985。
- [30] 张桂青、罗延钟、崔先文, 由视谱直接反演真谱参数的实用方法, *地球科学*, 229—239, 1990。
- [31] 王自力、张赛珍, 一种真复电阻率谱参数的求解方法, *地球物理学报*。
- [32] 罗延钟主编, IPS-3 频谱激电系统, *国外地质勘探技术专辑* (10), 1987。
- [33] Wu Zhixun and Luo YanZhong, Application of the SIP method over some mining districts, An overview of exploration Geophysics in China—1988, SEG publication, *Geophysical References Series No.3*, 333—354, 1989.

THE FREQUENCY SPECTRUM INDUCED POLARIZATION METHOD AND ITS DEVELOPMENT IN RECENT YEARS

Luo Yanzhong

(*China University of Geosciences, Wuhan 430074*)

Abstract

This paper briefly describes the essence and main characteristics of the frequency spectrum induced polarization method (SIP) and makes a concise review on the development of this method and its main advances in recent years.

频谱激电法的物理-化学基础

罗 延 钟

(中国地质大学, 武汉 430074)

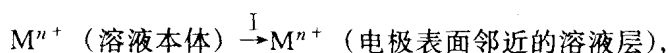
谱激电法 (SIP) 是以激电效应频率特性或时间特性为基本研究内容的一种激电分支方法。所以它的物理-化学基础, 自然和激电法是一致的, 不过这里我们将重点研究激电效应的频率 (或时间) 特性。

一、面极化体表面的面阻抗

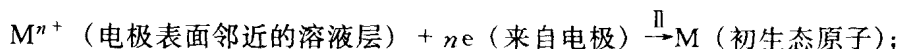
在激电法理论和实践中, 为使问题简化, 将岩矿石的激发极化分为理想的两大类, 即面极化和体极化。实际上, 两种极化的划分只具有相对意义。微观地看, 所有激发极化都是面极化的, 因为作为典型体极化体的浸染状矿化岩 (矿) 石的激电效应, 乃是其中各矿化颗粒的面极化效应的总和。所以我们首先来讨论作为激发极化基本单元的面极化效应。

表征电子导体面极化程度的参数是过电位 $\Delta\varphi$ 。电化学理论^[3,4]表明, 过电位是由于电流流过电子导体-溶液分界面时电极过程的迟缓性引起的。以阳离子 M^{n+} 在阴极上的放电为例, 放电的连续过程可以有条件地分为三个主要阶段

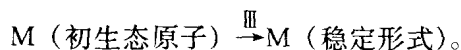
1. 借助于扩散、电迁移和对流, 使离子 M^{n+} 由溶液本体中迁移到电极邻近的溶液层内,



2. 离子在电极上放电形成原子,



3. 原子转变为沉积物质的通常的稳定形式,



上述三个阶段中任何一个都可能是缓慢的阶段, 即决定电极过程速度的阶段。这种影响电极过程速度的某一阶段的迟缓性, 便是引起和决定过电位的因素。若离子扩散是电极过程的迟缓阶段, 则形成浓差过电位; 若离子放电是电极过程的缓慢阶段, 则产生迁越过电位; 有时, 原子转变为沉积物质通常的稳定形式的过程是缓慢阶段, 于是产生反应过电位。实验表明, 当流过极化体表面的电流密度法向分量 $j_n \leq 1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 时, 过电位 $\Delta\varphi$ 与 j_n 成线性关系, 即

$$\Delta\varphi = -k \cdot j_n \quad (1)$$

式中, k 是与电流大小无关的正常数, 是表征面极化能力或面极化性质的参数, 称为面极化系数。将 (1) 式与欧姆定律相对比可看出, k 等效于电流流过电子导体-溶液界面时, 在单位面积上遇到的阻抗。故从电学观点看, 面极化系数又可理解为由于激电效应在电子导体-溶液界面上形成的面阻抗, 其单位为 Ω/cm^2 。

在阶跃电流激发下, 过电位有一个充电和放电过程。因此, 面极化系数也是充电时间 T 和放电时间 t 的函数。我们先前的研究^[5]表明:

1. 浓差过电位的面阻抗之充电过程可表示为

$$k(T) = A \cdot \sqrt{T} \quad (2)$$

而放电过程

$$k(T, t) = A(\sqrt{T+t} - \sqrt{t}) \quad (3)$$

式中 A 为常数。

2. 迁越过电位面阻抗之充电过程

$$k(T) = k_0 (1 - e^{-\frac{T}{k_0 \cdot x}}) \quad (4)$$

放电过程

$$k(T, t) = k_0 (1 - e^{-\frac{T}{k_0 \cdot x}}) e^{-\frac{t}{k_0 \cdot x}} \quad (5)$$

式中, k_0 是充电达饱和 ($T \rightarrow \infty$) 时界面的面电阻; x 是界面的面电容。

3. 反应过电位面阻抗的充、放电过程之表示式比较复杂, 但可足够近似地用 (4) 和 (5) 式表示。

在线性、时不变条件下, 可以由上述阶跃电流激发下的时间特性得到谐变电流场中激电面阻抗的频率响应

$$k(i\omega) = i\omega \int_0^{\infty} k(T) e^{-i\omega T} dT \quad (6)$$

式中, $i = \sqrt{-1}$ 为虚数单位, ω 是谐变电流场的角频率。

1. 对于浓差过电位, 将 (2) 式代入 (6) 式得

$$k(i\omega) = i\omega \int_0^{\infty} A\sqrt{T} e^{-i\omega T} dT = \frac{A\sqrt{\pi}}{2\sqrt{i\omega}}$$

稍加变形可写成

$$k(i\omega) = \frac{1}{\sqrt{i\omega x}} = (i\omega x)^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

这便是著名的瓦尔堡阻抗。即浓差极化可用瓦尔堡阻抗来等效。

2. 对于迁越过电位和反应过电位, 将 (4) 式代入 (6) 式得

$$k(i\omega) = i\omega \int_0^{\infty} k_0(1 - e^{-\frac{T}{k_0 \cdot x}}) e^{-i\omega T} dT = i\omega k_0 \left(\frac{1}{i\omega} - \frac{1}{i\omega + \frac{1}{k_0 x}} \right)$$

稍加整理后得

$$k(i\omega) = \left(\frac{1}{k_0} + i\omega x \right)^{-1} \quad (8)$$

上式表明, 面阻抗 $k(i\omega)$ 乃是一个面电阻 k_0 和面电容 x 的并联。因此, 迁越过电位和反应过电位可以或近似可以用一个具有漏电阻的电容 (即德拜阻抗) 来等效, 其等效电路如图 1 (a)。

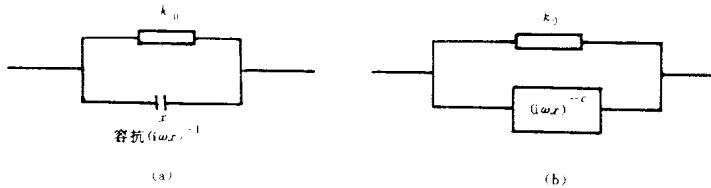


图 1 等效电路图

Fig.1 Diagram of equivalent circuit.

综合 (7) 和 (8) 式, 一般可用面阻抗

$$k(i\omega) = \left[\frac{1}{k_0} + (i\omega x)^c \right]^{-1} \quad (9)$$

即用一个面电阻 k_0 与面电抗 $(i\omega x)^c$ 的并联来和面极化效应等效。由此, 可绘出一般面极化效应的等效电路 (图 1-b)。当取 $c=1$ 时, (9) 式简化为 (8) 式, 图 (b) 简化为图 (a), 即为迁越过电位或反应过电位的情况; 当 $k_0 \rightarrow \infty$ 和 $c=1/2$ 时, (9) 式简化为 (7) 式, 这是浓差极化的情况。通常, 激发极化可能是几种过电位的综合效应, 甚至还可能包含其它物理-化学过程, 故 k_0 、 x 和 c 可以在相当大范围内变化。不过一般 c 应在 0.5 和 1 之间取值, 即

$$c = 0.5 - 1 \quad (10)$$

二、体极化体的等效电路

仿照 W. H. Pelton 等^[1] 的作法, 考察矿化岩石 (体极化体) 内一个小单元 (图 2-a)。其中脉石矿物①实际上为绝缘体; 离子导电 (裂隙水) 通道②概括为两条: a 是未被电子导电颗粒③堵塞的通道, b 是被电子导电矿物颗粒堵塞的通道。 a 通道只有纯电阻 R_a ; 而 b 通道除离子导体和电子导体内部的纯电阻 R_b 之外, 还串联有电子导电颗粒表面极化的等效阻抗 Z_{IP} 。根据 (9) 式, 后者可表示为一个纯电阻 R_0 和电抗 $(i\omega X)^c$ 的