

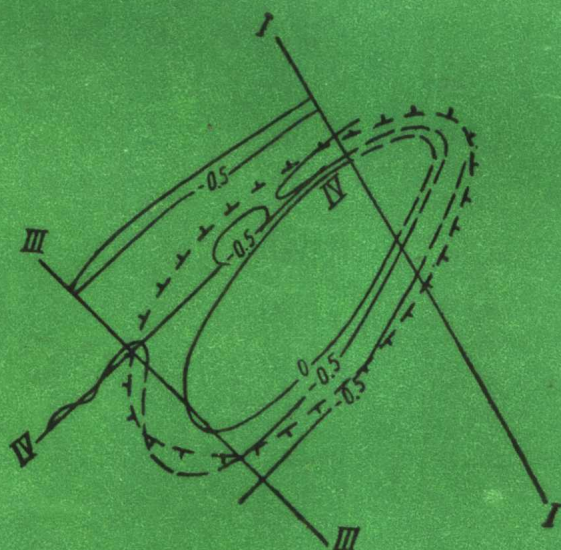
相位激发极化法

[苏]

A. B. 库利科夫

E. A. 舍米亚金

著



地质出版社

相位激发极化法

〔苏〕 A.B.库利科夫 E.A.舍米亚金 著

税蔚梅 孙克昌 译

张赛珍 吴功建 校

地质出版社

内 容 提 要

本书叙述次音频相位激发极化法 (ПлФАЗ ВП) 的理论。该方法以研究极化介质中的电磁场为基础。书中列举了均匀半空间、水平层状介质, 以及局部不均匀体等极化剖面的典型相位频率特性; 提出了划分极化场和感应场的各种方法。书中还介绍了次音频相位激发极化法的整套仪器装备和测量方法, 详细叙述了野外工作方法技术问题、野外观测结果的整理及推断解释。书中列举了许多使用该方法的实例, 说明此方法对普查金属矿床及油气田的可能性。

本书对象为使用和研究ВП法的生产和科研单位的工程师和科研人员, 以及高等院校地球物理专业的大学生及研究生。

全书有附表1张, 插图51幅, 参考文献目录58条。

本书由税蔚梅、孙克昌同志译出, 张赛珍、吴功建同志校。

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА ФАЗОВЫМ МЕТОДОМ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

А. В. Куликов Е. А. Шемякин
Издательство «Недра», Москва, 1978

相位激发极化法

〔苏〕 А. В. 库利科夫 Е. А. 舍米亚金 著

税蔚梅 孙克昌 译

张赛珍 吴功建 校

地质矿产部书刊编辑室编辑

责任编辑: 袁方 张怀素

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张: $4 \frac{15}{16}$ · 字数: 126,000

1984年2月北京第一版·1984年2月北京第一次印刷

印数: 1—2,140册 定价: 0.95元

统一书号: 15038·新1002

引 言

激发极化 (BII)法广泛用于旨在解决各种地质任务的电法勘探工作中[18]。它的基础是研究电流通过岩石时,由于物理化学作用结果而产生的电磁场。研究这种场有三种方法。其中两种方法是研究人工造成的电磁场之时间特性或频率特性。第三种方法是利用天然电磁场的统计学特性。

研究最多、应用较广的是 BII 法的时间法或称脉冲法,该方法所研究的是在接地供电线路中直流电断开以后的电场时间特性[18, 31]。BII 法的频率法则是在接地电路供次音频电流时,研究电场的振幅[1, 20, 33, 55等]或相位[20, 25, 30, 41等]频率特性。这一方法成功地发展起来并得到了好评。统计法试图利用的是0.1—10赫芝频带内的归一化自相关函数[4]以及磁大地电流法电法勘探中所用的场的振幅-相位频率特性[8]。

本书研究 BII 法的相位频率法,我们就其地质可能性在原则上把该方法与时间法进行了对比,其优点如下:1.测量仪器具有很强的抗干扰能力,使我们能够在强干扰区使用这种仪器;2.有可靠的方法可从测量结果中消除感应影响,因而能够研究良导电性剖面;3.简化 BII 法测量技术和提高野外工作效率。野外工作表明,根据相位测量结果可以估算感应影响。因此,相位测量可在研究低电阻剖面并在装置的电极距很大时使用。

苏联测量 BII 场相位移的初次尝试始于 1958 年。测量是在 Б.С. 斯维托夫和 Г. В. 普里斯领导下由中央地球物理托拉斯的电法队进行的。莫斯科地质勘探学院 (МГРИ) 完成的研究指出了 BII 法相位测量在实践上的合理性;这些研究是在 Ю. В. 雅库波夫斯基的倡议和指导下由 В. П. 麦尔尼柯夫进行的[30]。以后这方面的工作由以下单位进行,即:全苏物探方法研究所 (ВНИИ Геофизика)[23, 25—29, 34, 35, 41]、全苏勘探地球物理研究所哈萨克分所 (Казфилнал ВИРТ)[38, 41, 46]、“哈萨克地球

物理仪器”厂专业设计局〔13, 16, 41〕、莫斯科地质勘探学院〔33〕、苏联科学院乌拉尔科学中心地球物理所〔12, 20, 21〕。

近年来国外对 BII 相位法的兴趣也日渐增长。如果说从五十年代开始,美国、加拿大、瑞典、德意志民主共和国和其它国家加紧发展了 BII 频率法的振幅法,而文献中见到的只是指出了将 BII 场的相位测量变为现实的可能性〔49, 54〕,那么现在对这方面的兴趣大大提高了。有关许多国家研制专门的相位测量仪器的报道便是例证。例如,瑞典的《Болиден》公司〔53〕制造并使用了 Z-Lab-70 型高频相位仪,该仪器测量岩石标本的频带为 0.01—10000 赫芝;该公司还制造、使用了 Rx-72-2 型野外测量仪,测量频率为 1 赫芝。1972 年,加拿大《Mc-Phar》公司〔57〕研制出 BII 法野外测量仪器,该仪器既可用于频率法,也可用于时间法。在频率法中,在对频段为 0.1—5 赫芝的频率效应进行振幅测量的同时,也用 0.25 赫芝的频率测量相位,其精确度为 $\pm 0.03^\circ$ 。仪器的基准时间讯号用两个同步石英钟保持。美国的《Kennecott》公司小批量生产了 BII 场相位测量双道仪,频段为 0.03—4 赫芝,野外测量精度为 $\pm 0.06^\circ$ 。

在用途和技术性能方面最接近于苏联成套相位仪的是加拿大《Scintrex》公司制造的 IPRF-2 型仪器〔56〕。使用这种仪器,可以用有效讯号的一次谐波和三次谐波对 BII 参数同时进行两种频率的相位测量,这种有效讯号是由频率为 0.1—10 赫芝的直角形电流产生的。经过该公司的实践,仪器的野外测量精确度为 $\pm 0.15^\circ$ 。

现在,苏联在发展 BII 法的相位频率变种方面进行了大量研究,建立了该方法的理论基础,研究了极化岩石标本的相位频率特性,制定了测量未被电动效应畸变的极化相位移的方法,还制定了野外测量方法,并在苏联许多地区进行了试验。

所有这一切就是“哈萨克地球物理仪器”厂专业设计局试制 BII 相位法工业仪器的依据。从 1972 年开始,该厂与全苏物探方法研究所以及全苏勘探地球物理所哈萨克分所合作,制造并成

批生产了ИНФАЗ ВП站和ВП-Ф轻便仪〔13, 16, 41〕。现在正准备生产现代化的ИНФАЗ ВП-М站, 它有很宽的工作频带, 灵敏度高, 抗测量干扰的性能强。苏联成批生产的ВП相位法仪器在主要参数方面都超过了我们所知道的国外同类仪器的样品。

本书叙述了ВП法的理论基础、野外测量方法、观测结果的整理方法和解释方法、仪器结构原理及操作技术。书中还探讨了在其它电法中利用次音频场以及在综合物探工作中使用次音频相位激发极化法(ИНФАЗ ВП法)的一些问题。

作者在全苏物探方法研究所进行的旨在寻找金属矿和油气田的研究, 是撰写本书的基础。许多问题是根据与该所的同事А. С. 果柳诺夫、С. С. 布申娜、Н. А. 捷涅霍夫斯卡娅、В. Н. 奥洛夫斯卡娅合作得到的资料进行叙述的。本书引用了“哈萨克地球物理仪器”厂专业设计局电法勘探处处长В. Д. 日尔尼柯夫和全苏勘探地球物理研究所哈萨克分所研究人员В. Ф. 沙尔巴什, В. И. 列梅茨、Г. В. 奥尔洛夫的研究结果; 作者从1969年起就与他们进行合作。作者认为也有必要指出以下研究人员参加了本方法的研究工作, 他们是: 全苏物探方法研究所的Г. В. 布洛夫, А. И. 日洛夫, Н. В. 辛金娜, В. П. 舒尔盖, С. М. 舒尔盖, З. А. 列日涅娃, 全苏勘探地球物理研究所哈萨克分所的Р. А. 克沃尔柯夫, Ю. Н. 米申, Ю. С. 纳波科夫, “哈萨克地球物理仪器”厂的Л. В. 日加连诺克, П. Ф. 费多谢耶夫。

以下同志对本方法的研究给予了很大的帮助, 他们是: А. В. 维舍夫(列宁格勒地质勘探学院), 全苏物探方法研究所的И. А. 别兹鲁克、В. Н. 克柳契金、З. Д. 克鲁格洛娃, 前专业地球物理托拉斯的А. К. 波古斯拉夫斯基、Е. П. 罗曼年科以及苏联地质部地球物理工作局的Ю. Н. 格拉契夫、В. В. 布洛多夫、А. С. 巴仁诺夫和В. И. 费久克。

如有批评意见, 请按以下地址投递: 莫斯科101808, ул. Чернышевского, д. 22, ВНИИ Геофизика, 或莫斯科103633, Третьяковский пр., д. 1/19, издательство «Недра»。

目 录

引言

第一章 岩石和矿石的激发极化的物理基础及其数学

描述方法..... 1

§ 1 有关激发极化性质和机制的现代概念及岩石 和矿石频率特性的实验资料..... 1

§ 2 极化岩石和矿石的形式模型..... 7

§ 3 极化参数及其联系..... 12

第二章 极化介质上的交变电磁场..... 19

§ 1 考虑介质极化率时解电动力学正演问题的方法..... 19

§ 2 极化介质上各种源的电磁场..... 22

§ 3 激发极化法中选择场源和所测分量的作用..... 36

第三章 相位激发极化法的理论基础..... 39

§ 1 极化半空间上的电偶极场和电缆场及区分 极化现象和感应现象的原则..... 39

§ 2 层状极化剖面上有限长度接地电缆的电磁场..... 47

§ 3 水平非均匀极化剖面上接地电源的异常场..... 58

第四章 仪器及野外测量技术..... 70

§ 1 对仪器的一般要求及其结构原理..... 70

§ 2 ИИФАЗ ВП 站和 ВП-Ф 站及其测量技术..... 77

第五章 野外工作方法..... 85

§ 1 使用范围及方法特点..... 85

§ 2 装置的选择..... 87

§ 3 装置大小和最佳工作频率的选择..... 91

第六章 野外资料的整理及解释..... 98

§ 1 整理..... 98

§ 2	剖面法结果的解释	100
§ 3	测深结果的解释	103
第七章	方法应用实例	107
§ 1	本方法在金属矿地区的应用	107
§ 2	本方法在含油气地区的应用	119
第八章	在其它电法勘探方法中次音频场应用的特 点及 ИНФАЗ ВП 法在一般综合物探工 作中的地位	127
§ 1	作电阻率法测量时低频场的应用	127
§ 2	用正交装置的电磁测深	131
§ 3	感应次音频相位法 (ИНФАЗ)	136
§ 4	ИНФАЗ ВП 法在一般综合物探工作中的 地位	141
结束语		146
参考文献		147

第一章 岩石和矿石的激发极化的 物理基础及其数学描述方法

§ 1 有关激发极化性质和机制的现代概念 及岩石和矿石频率特性的实验资料

“激发极化”这个名词用来表示在电流作用下，地下发生的产生二次场源的物理化学作用。以利用这些现象为依据的 BII 电法勘探在实践中得到了广泛的应用。与此同时，源源不断发表这方面学术论文的趋势并未减弱，论文中研究了越来越多的物理化学现象，试图进一步加深和扩大 BII 法的物理基础。BII 法测量方法的发展也受到了重视，虽然在 BII 法产生的初期确定了该方法与电阻率法形式上的联系，因而利用了电阻率法的测量方法。BII 法理论上的明显空白点是电动力学（感应现象）影响的研究，这些现象总是与电化成因的二次场相伴随。由于对提高 BII 法测量深度的要求不断增长，利用阶梯状及正弦状极化电流的该方法变种的发展，以及为了提高方法的分类能力而扩大了时间和频率范围等原因，这个问题只在近几年才成为人们注意的焦点。

BII 法的频率相位法的物理基础与传统的脉冲法相同。其特点是必须计算电动力学效应的影响。因此，在描述 BII 相位法的物理基础和理论基础时，对产生电化成因的二次场机制的基本原理只进行简要的论述，不作详细分析。重点放在根据地表所测的电磁场分量发现这些场的问题上。

对于引起激发极化的某些个别机制，苏联和外国许多研究人员已经作了深刻而详细的分析，其中首先是 A. Ф. 波斯捷尔尼柯夫，Б. И. 根纳金尼克，B. B. 柯尔米尔采夫，P. B. 乌里金，

Г. В. 阿拉特拉汉采夫, В. В. 扎沃隆科娃, Л. А. 弗里德里赫斯别尔格, М. П. 西多罗娃, Л. Л. 马尔沙尔, Т. Р. 马坚, X. K. 甘格, Г. 贾费等。现在最系统, 最完整的理论是 C. M. 舍因曼[42]研究的激发极化理论。因此, 以下对引起岩石激发极化机制的定性论述主要根据他的著作。

当不考虑激发极化现象时, 电法勘探理论依据的是象致密单相介质这样的岩石模型。这种介质有三个整块恒定的电磁参数值, 即: 电导率 γ 、磁导率 μ 和电容率 ϵ 。在这种岩石模型中(以下简称 $\gamma\mu\epsilon$ 模型)不产生激发极化现象(当电磁场频率不超过 10^5 赫芝时)。实际的岩石是由三种相——固态相、液态相和气态相组成的。由于气态相在岩石的构成中不起主要作用(个别情况除外, 如天然气矿床), 因此固态-液态两相介质(C. M. 舍因曼[42]称为 $\mu\Phi$ 介质)模型就成了激发极化的理论依据。岩石中的固态相常常成为电介质。电子(孔穴)导电型局部包裹体对激发极化有重要的意义。液态相是被溶解物质的分子完全分解了的弱电解溶液。

对于产生激发极化起主要作用的 $\mu\Phi$ 介质, 它的突出特性是电流通过固态相和液态相时其电载体和机械载体的差异。在具有有限电导率的固态相中, 电流是电子的有序运动。因为电载体量微不足道, 这种电流不伴随物质的任何位移。在电解质中, 电流的流动与离子的运动有关, 因而与电解质物质的位移有关。当电流流过相间界面电载体发生更替时, 应该有某些特殊的现象发生。此外, 当电流在液态相中流过时, 在一定条件下, 会出现电解质浓度梯度和不同符号的离子按空间分开并形成体电荷或面电荷的局部地段, 这些电荷的场在很远的地方都能观测到。这时所研究的介质在整体上仍然是电中性介质。上述两相介质中的这些情况常会在相的界面上遇到。这里产生了结构复杂的界面带, 它们是双电层。其中靠近固态相方面的一层, 如果固态相为相应的导电型时, 是由自由电子(孔穴)所组成; 如果固态相为电介质时, 是由有关的电荷所组成。靠近固态相方面的一层可以看成是电荷仅在切线方向移动的无限薄充电表面。位于液态相方面的一层结

构比较复杂。这一层为被溶解物质的离子组成，而且在两相的界面附近有稠密的离子层存在，称为赫姆霍兹 (Helmholtz) 层，与它相邻的是扩散层——古依 (Гуи) 层。在双层的液态层带中及距它很近的自由溶液中，电解质的某些特性发生了变化，特别是离子的迁移率。在离子迁移率改变的部份能够出现电荷。

电流通过两相介质时，介质的形态有一定的改变。被溶解物质在不改变其总平均定性成分和定量成分的情况下，在自由溶液中重新分布，出现了与这种过程有关的体电荷。补充的离子数深入到界面带中或离开界面带。位于双层稠密区的部分离子或将电子给固态相，或由固态相吸收电子；这类氧化还原反应就是电流流过不同相间的机制之一。某部分离子由双层的这一层转到另一层，同样也进行着电通过不同相的界面的直接转移。在溶液中以及溶液与固体的界面上形成新的化合物。介质的热状态就改变了。

上述过程只有某些是线性的和可逆的。同时 BII 法电法勘探的生产经验却证实了野外条件下所测参数的重现程度。这种表面上的矛盾之所以产生，是因为当地下造成的电流密度很小，因而上述所有作用的强度很小时，实际上可以把它看成线性的和可逆的，即不会使介质的性质发生重要的变化^①。

对于本书中探讨的那些问题，重要的不是对每一个问题进行详细研究，而是揭示 $\Pi\Phi$ 介质整体的物理特性，这些特性会在介质存在时在电磁场的分量中表现出来。岩石中出现不同符号电荷分隔的局部地段，相当于二次电动势的产生。形式上，它们的作用可以看作介质电导率的变化，因为在有二次电动势和没有二次电动势的情况下，同样一个一次场，通过介质的电流是不同的。由于形成二次源的作用与扩散现象紧密相关，因此它们是惯性作用， $\Pi\Phi$ 介质的电导率将取决于一次场随时间的变化速度，即在按照正弦规律改变的电流场中， $\Pi\Phi$ 介质的电导率具有复数的性质。

① 现在正在研究激发极化非线性效应法[19]。这些方法非常独特，在实践中尚未广泛应用，对它们的研究不在本书范围之内。

电流通过相间界面是由于离子置换介质或化学反应的结果，这个作用也是惯性作用，其速度决定于扩散作用和化学反应的速度。此外，在两相介质中总有一定的相间电容存在，电流通过相间电容时，可以按位移电流形式由一种相流入另一种相。

因此，对于外部观测者来说， $\Pi\Phi$ 介质在现象上表现出来的特性是介质的电导率与一次场随时间变化速度的关系。假如一次场按正弦规律变化，那么这种性质就表现为 $\Pi\Phi$ 介质的复导电特性。

电法勘探野外方法所研究对象的大小为几十—几百米，很少有几厘米的。而 $\Pi\Phi$ 介质特有的一切现象（界面带）所局限的范围大小却不超微米单位。因此，在研究界面带性质均匀的 $\Pi\Phi$ 介质的宏观体积时，可以将这些性质按整个体积均匀地平均，并可认为它们是体积的最小（在野外电法勘探工作比例尺中）部分的性质。 $\Pi\Phi$ 介质的性质在于微观体积也具有复导电性，这使得 $\Pi\Phi$ 介质与 γ/ϵ 介质有重要的区别，后者的复导电性（考虑到已经指出的所用电磁场的频率范围）只表现在宏观体积中。而这种性质也就使我们能够在实验室条件下，用较小的标本来研究极化岩石和矿石的频率特性。关于这种测量的相似性标准问题现在实际上尚未研究出来，因此实验室研究的资料对于定性解释野外结果要比定量解释用得更多。

为了阐明极化岩石和矿石频率特性的基本规律，我们举几个实例。

实验室测量已有相当长的历史，其测量技术也颇多样化[13, 18, 51]。这里引用的结果是全苏物探方法研究所电法勘探实验室 B. H. 奥洛芬斯卡娅和 З. А. 列日涅娃测得的。测量所用装置为带有 ИИФАЗ ВП站测量器的四极装置，该测量器将在下面叙述。图 1 所示为矿石和岩石标本的几种典型振幅相位频率特性曲线。在绘制振幅特性曲线时，由各种频率测得的电位差 $\Delta U(f)$ 用最高工作频率 312 赫芝时的电位差归一。振幅频率特性曲线表明标本的复电阻的模随频率的变化情况，而相位频率特性曲线则表示其

度数随频率的变化情况。

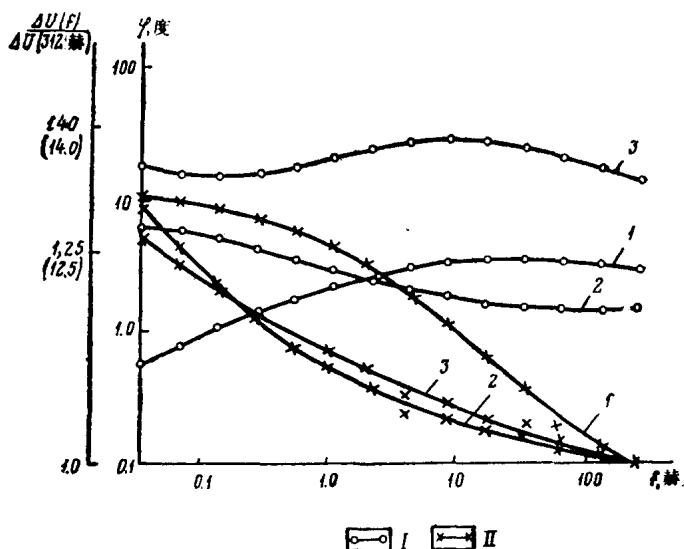


图 1 极化岩石和矿石的相位 (I) 和振幅 (II) 频率特性曲线
1—带有细粒分散黄铁矿浸染的亚粘土, 卡美什特 (Камышит) 石油矿区, 西哈萨克; 2—重晶石-细脉浸染型多金属矿石, 奥尔洛夫斯克 (Орловск) 矿区, 金属阿尔泰; 3—细脉型含铜黄铁矿类矿石, 阿克巴斯套 (Ақбас-тау) 矿区, 中哈萨克 (振幅值的纵比例尺见括弧中数字)

虽然有某些个别特性, 但在曲线中 (图 1) 仍能看出总的规律。振幅频率特性的基本特点是, 频率降低时, $\Delta U(f)$ 增大, 相应于标本的电阻随着频率的降低而增大。由于频带有限, 在单个频率特性曲线上看到的或者是低频侧的渐近线, 或者是高频侧的渐近线。在这些渐近线上, 实际上已经感觉不出标本的电阻与频率的关系。值得注意的是, 随着标本中金属矿物的增加, 振幅特性曲线的左侧渐近线向较低频段移动。图 1 所示的振幅特性曲线中, 只有带有细粒分散黄铁矿浸染的亚粘土振幅特性曲线从 0.1 赫芝的频率开始趋向渐近线值。用含铜黄铁矿类矿石标本测得的特性曲线, 根据所得的资料判断, 趋向工作频率范围之外的左侧渐近线。

相位频率特性曲线呈缓倾斜极值曲线状，其高频渐近线支与低频渐近线支均下垂。相位角值在曲线渐近线部分随频率的变化相应地与低频和高频的 $\sqrt{f}$ 和 $1/\sqrt{f}$ 大致成比例。相位角极大值区与标本电阻随频率变化最强烈的区相对应。当浸染矿化过渡为细脉浸染矿化和细脉矿化时，相位频率特性曲线的极大值和振幅特性曲线的拐点向频率较低的方向移动。

极化岩石和矿石标本振幅相位频率特性曲线的上述规律也为其他研究人员的资料所证实[12, 21, 51]。BII 相位法的最大兴趣是相位特性曲线。根据标本的测量已经可以看出，这种特性曲线的极大值是不明显的，它占有很宽的频段。常常在相位特性曲线上出现几个极大值，这就更使曲线变平。相位特性曲线的单个极大值与金属矿包裹体的构造特性（包裹体的形状、大小）的关系，比与产生极化率的各种机制的关系更为密切。各种形状和大小的金属包裹体的增加使极大值大量出现，它们汇合并形成顶部平缓的、频带很宽的总相位特性曲线。国外一个矿床[58]和哈萨克许多矿床上[38]的参数测量结果（图2）便是例证。显然，在比

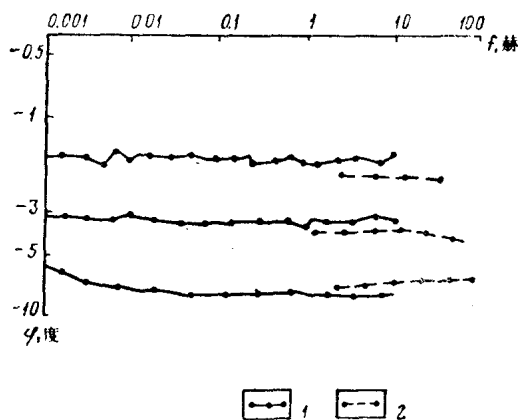


图2 电导率不同的岩石上参数测量结果得到的相位频率特性曲线

1—国外斑状铜矿床上测得的曲线；2—哈萨克呈矿现象上所得的曲线（据根全苏勘探地球物理研究所哈萨克分所的资料）

较一般的情况下，相位特性曲线应该有某些表现相当明显的极值，根据极值在频率轴上的位置及其大小，可以对极化率异常进行分类。但这已经属于 BII 法的特殊问题。只有实验确定的相位角值与频率的微弱关系这一事实，才对发现极化体有重大意义。在较窄的频段（2—3 倍频段）一般可以对这种关系忽略不计。下面我们将清楚地看出，极化现象相位特性曲线的这种性质使我们能够在地表观察到的电场中区分电化效应和电动力学效应。

§ 2 极化岩石和矿石的形式模型

为了解析描述极化物质的频率特性曲线，必须使用其形式化物理模型。形式化和进行简化的程度，取决于对 $\Pi\Phi$ 介质中具体物理化学现象的了解水平，以及以后用求出的关系式所要解决的问题。

获得频率特性曲线解析式的方法（该方法不需要任何具体的 $\Pi\Phi$ 介质的物理模型），是凭经验选择与参数测量或实验室测量结果最一致的适当公式。用这种方法得出了已知 [21] 公式

$$\rho(\omega) = \rho(\omega_0) \left(1 - m \lg \frac{\omega}{\omega_0}\right) e^{-i\varphi_{\text{BII}}}, \quad (1.1)$$

式中 ρ ——介质的电阻率； m ——频带分散系数； φ_{BII} ——极化产生的与频率无关的相位移； ω 和 ω_0 ——分别为变动的和固定的圆频率（ $\omega = 2\pi f$ ）。

(1.1) 式的缺点是：与物理上可以实现的系统的条件不符合，以及频率趋于零或无穷大时无渐近线。这就增加了在理论计算中使用它的困难。

数学描述极化介质的简单物理模型见文献 [55]。这里极化现象是用按体积分布的偶极二次电源来估算的，它们与极化电流反向平行并成比例。得此种介质的电导率 γ 的表达式如下

$$\gamma = \gamma_0 (1 - \eta), \quad (1.2)$$

式中系数 η 表示极化介质的体偶极矩或极化强度。

如果认为不仅二次电流偶极矩，而且其时间的一次以上的微商都与极化电流成比例，就可一级近似地估算极化过程的惯性〔23〕。这时经过不复杂的计算得出结果如下

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{\gamma}{1 + i\omega\tau} \right), \quad (1.3)$$

系数 τ 具有“秒”因次，并起极化过程的时间常数的作用。

根据公式 (1.3) 得出：当频率由 0 变到 ∞ 时，电导率的幅值由 $\gamma_0 = (1 - \gamma)$ 增加到 γ_0 ，这与实验结果相符合。而实验得出的相位特性曲线却差别很大。其极值当 $\omega = 1/\tau$ 时很窄，而低频和高频渐近线很陡——分别与 ω 和 $1/\omega$ 成比例。因此 (1.3) 式只能用于粗略估算。

许多研究人员在研究极化物质的频率特性时用集中的 R_r, C_r 无抗和有抗元件电路代替体积模型。单元等效电路是阻抗及其分路电容器。阻抗指示传导电流通过 $\Pi\Phi$ 介质中界面带的可能性，电容器指示位移电流通过该界面带的可能性。为了估算与岩石相间界面毗邻的地段的电阻，还要用一个 R 阻抗〔12, 42〕。这时等效电路的形状便如图 3a 所示。这种线路的阻抗

$$Z = R + \frac{R_r}{1 + i\omega C_r R_r} \quad (1.4)$$

对比 (1.3) 和 (1.4) 式，可以看出作为频率的函数，它们完全等效。因此对 (1.3) 式的一切限制也适用于图 3a 的等效电路。

对 $\Pi\Phi$ 介质中的极化过程作模型试验的等效电路的设想，在 K. A. 季阿斯的著作中〔11〕逐渐成熟。作者得出的线路最终方案见图 3b。

绘制电路图的根据是研究电流通过金属-电解液和粘土-电解质界面的作用的理论。注意了离子的扩散、转移、复合和放电以及体电荷的形成这些现象。电容 C_r 和电阻 R_r 查明界面带的特性。电阻 R 指示电流通过未被界面带隔断的道路的可能性。电阻 R 计算双层范围外电解质的影响。从图 3b 可以看出，只用电阻和电容

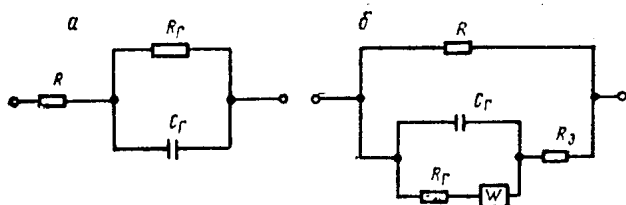


图 3 极化介质的等效电路图

器还不能组成等效电路，其中必须加一个用 W 表示的专用元件〔经过变形处理的瓦尔堡 (Warburg) 阻抗〕：

$$W = R\beta f^{-1/2} \left(1 - \frac{i}{1 - 2\beta f^{-1/2}} \right), \quad (1.5)$$

式中 f —— 循环频率，用赫芝表示； β —— 具有 $C^{1/2}$ 因次的系数。

从 (1.5) 式得出，瓦尔堡阻抗不能用有限数目的集中的无抗和有抗元件来代替。

根据等效电路 (图 3b)，得出 $\Pi\Phi$ 介质的电导率与频率的关系式

$$\gamma = \gamma_1 + \frac{AF(1+i)f^{1/2}}{1 + BF_1(1+i)f^{1/2}}, \quad (1.6)$$

$$\text{式中 } F = 1 + \frac{C}{A}(1+i)f^{1/2} + i\frac{D}{A}f,$$

$$F_1 = F - \frac{D}{2AB}f^{1/2} \left(i + 1 + \frac{D}{C}if^{1/2} \right)$$

系数 γ_1 、 A 、 B 、 C 、 D —— 为了全面鉴定 $\Pi\Phi$ 介质电导率而应该给定 (或实验测定) 的正的有效参数。

在较低的频段，电容 C_p 的影响可以忽略不计，于是 $F_1 = F = 1$ ，(1.6) 式便具有如下形式

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{\eta}{1 + \sqrt{i\omega\tau}} \right), \quad (1.7)$$

或

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{1 + \sqrt{i\omega\tau}}{1 - \eta + \sqrt{i\omega\tau}} \right) \quad (1.7a)$$