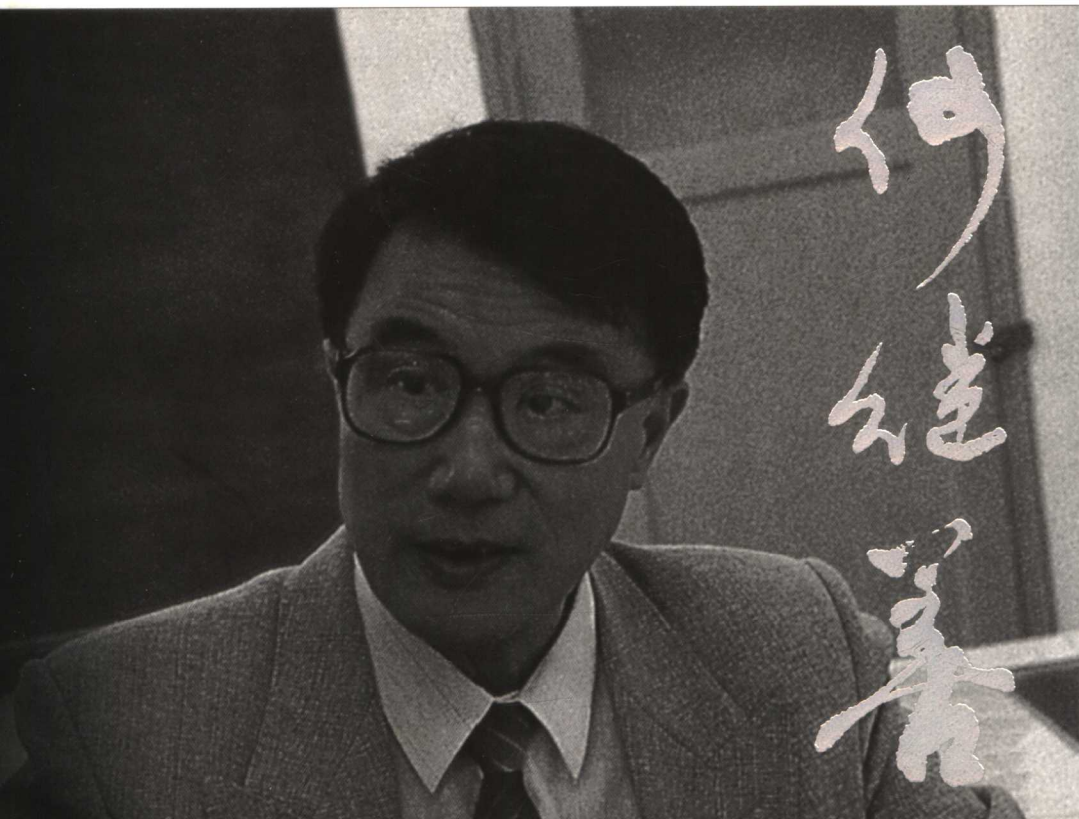


中国
工程
院
院
士
文
库

[何继善 著]

双频激电法



高等教育出版社

中国
工程
院
院
士
文
库

双频激电法

[何继善 著]

高等教育出版社

内 容 简 介

双频激电法(双频道激发极化法)是作者发明的一种地球物理勘查方法。本书全面论述这一发明的基本原理、方法、技术和应用效果,主要内容包括双频激电法的基本原理、数理基础、观测参数、仪器原理与使用要领,野外工作方法、技术、干扰因素及其克服方法,找矿和工程应用实例等。本书资料翔实,图文并茂,不少材料系首次发表。在撰写过程中,特别考虑到野外第一线工程技术人员的需要,在理论论述上力求深入浅出,并加入与野外工作技术有关的章节。

本书可供地矿、冶金、水文工程等领域与地球物理勘查有关的管理者、野外第一线工程技术人员、大专院校师生与科研人员阅读,也可作为地球探测与信息技术学科的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

双频激电法/何继善著. —北京:高等教育出版社,2005.11

ISBN 7-04-018300-5

I. 双... II. 何... III. 激发极化法 IV. P631.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第128965号

策划编辑 王国祥 张海辰 责任编辑 刘剑波 封面设计 刘晓翔
责任绘图 朱 静 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 涿州市星河印刷有限公司

开 本 800×1050 1/16
印 张 22.25
字 数 420 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2006年1月第1版
印 次 2006年1月第1次印刷
定 价 50.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 18300-00

《中国工程院院士文库》编辑委员会

主任：徐匡迪

副主任：刘德培 柳百成 刘志鹏 肖培根

委员：钟群鹏 梁骏吾 李正邦 陈毓川

梁应辰 李泽椿 何继善 董庆九

吴 向 王国祥 林金安

编辑部：董庆九 刘 静 王国祥 张海辰

序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用,是经济发展和社会进步的强大动力。自 20 世纪下半叶以来,工程科技以前所未有的速度和规模迅速发展,其重要作用日益突显,并越来越受到人们的重视。

中国工程院是中国工程科技界的最高荣誉性、咨询性学术机构。中国工程院院士是中国工程科技领域的最高荣誉性称号,授予对中国工程科技发展做出杰出贡献的工程科技工作者。院士们充分发挥群体优势,围绕国家、产业和地方经济社会发展迫切需要解决的重大科学技术问题,开展宏观性、战略性、前瞻性、综合性的咨询研究,为国家决策提供支持。他们的研究代表中国在该领域中的最高学术水平。院士们视发展工程科技、促进国家经济发展和社会进步为己任,勤奋工作在各自的专业领域,为祖国的繁荣富强、为国家和国防建设做出了重要的贡献。院士的学术著作,是院士多年刻苦钻研和辛勤劳动的成果,是他们智慧的结晶,也是整个社会的宝贵财富。这些学术著作,不仅对我国工程科技工作有重要的指导作用,而且具有极高的学习和参考价值,对于促进年轻工程科技人才成长,造就出类拔萃的青年科学家和工程师,推动我国工程科技事业不断发展具有重要作用。

感谢高等教育出版社设立中国工程院学术著作出版基金,资助出版《中国工程院院士文库》,把院士们的学术成果向全社会推广。此举不但有力地支持了我国优秀科学技术著作的出版,也对促进我国科技事业发展、繁荣科技出版事业具有重大意义。

徐匡迪

2005 年 8 月

谨以此书献给
中国工程院成立十周年
和
在崇山峻岭中艰苦跋涉
为祖国寻找宝藏的地质、
地球物理工作者

前 言

激发极化法, 简称为激电法 (induced polarization methods, 缩写为 IP), 是寻找矿产资源最为有效的一种地球物理勘探方法。与电阻率类方法相比, 其优越性表现为: 只有电子导体才能引起明显的激电异常, 地形或非极化岩石的不均匀性不会引起激电异常。研究激电效应随时间变化规律的称为时间域激电, 研究激电效应随频率变化规律的称为频率域激电。时间域激电的充放电时间特性表明, 激电现象必然存在频率依从关系, 因此, 就物理本质而言, 频率域激电法与时间域激电法是相同的。由于二者所用技术不同, 在实际应用中又有诸多差异。时间域激电法装备笨重, 野外工作成本高, 限制了它的大量应用; 频率域的本质优点是轻便和抗干扰能力强。然而, 由于历史的原因, 人们最早是以变频法开始进行频率域激电工作的, 它的精度低、速度慢, 妨碍了其推广应用。

早在 1934 年, S. Rose 在用交流电测量岩石电性时, 就发现岩石的等效电导率是一个复量。然而, 在 1950 年以前, 所有激电法都是采用时间域测量。20 世纪 50 年代, 我国从苏联引入时间域激电。到 60 年代, 引入变频激电法后, 将变频激电法又称为交流激电法, 而将前者称为直流激电法。后来的“直流”激电用了双向短脉冲电流, 明显是交流了, 再叫直流激电显得很不合适。因为它是研究激电的时间依从关系, 将它规范为“时间域激电”是必要的。而“变频激电法”、“相位激电法”、“复电阻率法”、“频谱激电法”和“双频激电法”等都是研究激电参数与频率的关系, 自然属于频率域激电法的范畴。

I. S. Collett 和 H. O. Seigel 于 1950 年分别提出用不同频率交流电测量激电的方法。同年秋, J. R. Wait 在亚利桑那州成功地进行了频率域激电法的第一次野外试验, 在《变频法》一文中, 他全面地论述了该方法的原理和野外试验结果, 使之成为奠基之作, 从此人们将改变频率测量激电响应的方法称为变频法, 并称他为变频法之父。20 世纪 60 年代起, 我国张赛珍等翻译文章, 介绍变频激电法, 随后多个单位纷纷研制变频激电仪。笔者于 1976 年以原中南矿冶学院物探教研室为基地, 邀请袁宏基、唐承智、李名宪、张磊等组成了当时国内力量最强的变频激电

仪研制中心,1977年研制成功“DBJ-1型变频激发电位仪”,1978年由地质总局组织鉴定,交上海地质仪器厂生产。这是我国由工厂正式生产的第一代频率域激电仪,它的主要性能超过了加拿大产的P-670变频仪。然而,它却是推而不广。为什么?因为它仍然是变频激电仪!与时间域激电相比,频率域激电的最主要优点应当是轻便和抗干扰能力强,然而,由于变频仪在观测中要改变频率,使其精度、抗干扰能力和工作效率都大受限制,无法发挥频率域激电的优势。

笔者痛感以模仿为主的研制是没有出路的。要发挥频率域激电轻便等优点,必须摆脱变频法!只有提出比别人更先进的思路,研制具有自主知识产权的仪器,才有可能超越。于是,笔者于1976年提出了“双频激电法”(dual frequency induced polarization method)。要研究方法,必须要有仪器。当时条件很差,只有靠自筹资金、自己动手。首先制成了一台包含0.3 Hz和3.9 Hz的双频电流发送机。接着用这台发送机发送双频电流,用自制的变频仪接收机分别接收高、低频电位差,进行了水槽和野外试验,都取得成功。随即设计了双频接收机,将仪器分为共同通道、高频通道、低频通道,逻辑控制电路和数字显示电路五部分。请王学慧、曹家驹、田成方老师参加电路试验,到1978年初研制成功。这是世界上第一台双频激电仪,由于测量的是双频振幅,故命名为双频道幅频仪。双频激电仪具有轻便、快速、精度高、抗干扰能力强等一系列本质性的优点,因而具有很强的生命力。

为了推广应用,1979年笔者除请鲍光淑、张友山二位老师参加外,还邀请了黑龙江冶金物探队的杜广德、瓮晶波,辽宁冶金物探队的王宗兰、金泽善,云南冶金物探队的余增祥、苏才万组成民间研究中心,后又请甘肃冶金地质综合队的白宜诚、浦慧如加入。由笔者讲双频激电原理和仪器线路,大家一边学习,一边组装,每个单位装成一套双频道幅频仪,带回各省去进行野外试验。所有的试验都取得了成功。1980年通过冶金部地质局组织鉴定,交福建三明无线电二厂生产。由于该仪器在原理上创新,性能优越,并在全国得到推广应用,找到了一大批矿产资源,1985年获得国家发明三等奖。

作为一个自选项目,获得了国家级奖励,已经是很高的荣誉,一些人认为不必再搞了。然而,笔者深知,双频激电法特别适合我国国情,可以为我国寻找出更多的矿产资源,但它的优点还没有被普遍认识,如果就此住手,将会半途而废,因此,继续自筹经费进行研究和推广。在仪器研

制方面取得下列成果:1983年发明抗耦双频激电仪,它以斩波自动去除感应耦合;1987年发明F-1频域(谱)激电仪,它可以从0.028 Hz到32 Hz供一系列双频波,测量双频振幅和相位或实分量和虚分量,既可以做双频激电,又可以做频谱激电;20世纪90年代又发明了伪随机信号激电仪。与此同时,还进行了一系列理论和技术的研究,主要有:双频激电的特殊非线性现象的研究;双频激电自动消除感应耦合的研究;双频激电的野外工作方法和技术的研究;双频激电的野外工作规范编制等。这样一来,不再是早期的限于一种仪器的发明,而是形成了比较完整的方法体系,定名为“双频道激发极化法”,简称“双频激电法”。双频激电法充分发挥了频率域激电的优点,因此,除台湾地区外,在全国各省、市得到了推广应用,发现了一大批矿产,包括金、银、铜、铅、锌、钼、锰、镍以及煤田、地下水,并在解决工程问题中得到成功应用。1995年“我国双频道激电法及其应用研究”项目获得国家科技进步二等奖。

1996年,国家科技部“九五”技术攻关项目“大功率深部激发极化勘查系统的研究”和“伪随机电磁法及多功能仪器研制”下达。我们研制了大、中功率发送机并研究了相应的方法技术,使双频激电的探测深度超过500 m;而伪随机信号激电则可以同时供多个频率,并进行多参数测量。前者被科技部评为“九五”攻关优秀项目,后者于2002年获有色系统科技进步一等奖。

2000年3—4月,中国地质调查总局组织了多个单位包括各种方法的十多种仪器在北京延庆县石槽铜矿的3条已知剖面上进行对比试验。试验结果表明,双频激电法发现的异常不但与地下情况对应很好,而且仪器轻便、快速、精度高、抗干扰能力强。根据对比试验结果,从2000—2004年,国家地质调查总局将双频激电法作为有效的找矿方法进行了示范试验。2000年指定在海拔4 000 m的祁连山南段的甘肃省石居里矿区开展“高山区的快速普查方法示范”;2001年选择云南丽江和云南中甸海拔3 800 m、相对高差达1 500 m的热带雨林开展“高山区的快速普查方法示范”;2002年又选择西藏驱龙矿区海拔5 000 m左右的无人区(部分为雪山)进行“特困地区快速普查方法示范”;此外,还选定安徽庐龙桥铁矿、甘肃金川4矿区18行、新疆土屋0号剖面作为深部探矿能力的试验区。这些示范和试验区均已按时、保质、保量完成任务,取得了非常好的地质效果,而且都比变频法精度高,节省时间1/2~2/3。

多年来,尽管西方国家商品激电仪都尽可能采用先进的元器件,且

更新很快,然而总体上仍然沿袭变频激电法的思路。也许有人会说,由于西方国家交通工具较为发达,不太看重轻便,其实并不尽然。1995年北京矿冶研究总院将双频激电仪带到玻利维亚一处海拔4 000多米的山区,西方国家多种仪器都因笨重,只能望而兴叹,惟有双频激电仪到上面成功地取得了数据。在伊朗、马来西亚、澳大利亚等国,双频激电都展示了其明显优势。

然而,有些认识误区妨碍了双频激电的推广。其一,认为“时间域激电才是正宗”。这完全是误解。无论是严格的理论证明,还是大量的实测对比,都证明了在地质效果上双频激电和时间域激电是等效的。其二,认为“时间域激电是在断电后测二次电位,测到的是反映矿体的纯异常”。其实,二次电位也是矿体与围岩的综合反映,而不是所谓的纯异常。其三,认为“时间域激电虽然设备笨重,但它的探测深度大”。这更是误解。事实是,在同样的野外条件下,为了达到同样的探测深度,双频激电所需电流只是时间域激电的 $1/50 \sim 1/20$ 。也就是说,一台看起来功率很小(例如,输出电压400 V,电流1 A,功率400 W)的双频激电发送机,至少与一台大功率(电压1 500 V,电流25 A,功率37.5 kW)的时间域激电发送机相当,这不是天方夜谭,而是事实,大量野外实例都证明了这一点。其四,认为“频率域激电感应耦合比时间域的严重,而且不容易校正”。这种误解产生于20世纪70年代,当时的频率域激电是变频法,对付感应耦合的确有些束手无策,而时间域将读数的延迟时间加大来避开感应耦合。注意到时间域是在断电后测二次电位,而感应耦合也是在断电之后最大,就可以想到用加大延迟时间来避开感应耦合的同时,也就损失了激电的主要信息,特别是遇到感应耦合的时间常数较大时,激电的衰减曲线与感应耦合的衰减曲线混在一起,这对时间域来说是致命的。而双频激电则可以利用感应耦合与激电在时间上的差别来将它们分开。笔者希望本书中的有关论述能有助于澄清这些误解。

我们会在目前基础上继续研究双频激电的一系列理论问题,然而,更重要的是将它更好地用于野外实践,为国家找到更多的优质矿产资源和解决更多的工程、水文地质问题。因此,在撰写本书的时候,特别注意到野外物探和地质科技人员的需要,在论述时一般从物理概念入手,尽量写得深入浅出,并对野外工作方法和技术问题给予了很多关注。

双频激电法是目前惟一由中国人提出原理,由中国人发明仪器,在辽阔的中国国土上取得成功应用的电法勘探方法。20多年来,双频激

电法走过了一条充满艰辛但又是不断前进的道路。在这个过程中,得到了全国广大地质、物探工作者,特别是广大野外科技人员的大力支持和各有关单位领导的关爱。借此机会向他们表示深深的谢意。

何继善

2004年9月1日于长沙

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

目 录

第一章 双频激电法的物理基础	(1)
1.1 双频激电法导论	(1)
1.2 激发极化现象的物理 - 化学解释	(7)
1.3 不同矿物岩石的激发极化特点	(12)
1.4 激发极化的频率特性与测试方法	(15)
1.5 岩(矿)石激电的频率域特性及其影响因素	(20)
第二章 激发极化的等效性原理与观测参数	(29)
2.1 研究激发极化的宏观方法与线性时不变系统	(29)
2.2 激发极化的等效性原理	(36)
2.3 频率域激发极化法的观测参数	(50)
第三章 双频道激电的观测方法及其特点	(66)
3.1 频率域激电的观测方案	(66)
3.2 双频激电的电流波形	(72)
3.3 双频激电法的观测异常	(80)
3.4 双频激电的抗干扰能力	(85)
3.5 双频激电法的特点	(89)
第四章 双频激电仪	(97)
4.1 双频激电仪的参数论证与主要性能	(97)
4.2 SQ-3C 双频道轻便型微机激电仪的工作原理	(101)
4.3 仪器结构	(105)
4.4 维护与保养	(108)
第五章 激发极化测量中的电磁感应耦合效应的消除和利用	(110)
5.1 电磁感应耦合的分类	(111)
5.2 电容耦合及其在激电测量中的表现	(112)
5.3 激电测量中的电磁耦合及其时间特点	(122)
5.4 斩波去耦原理与选择斩波宽度的原则	(135)
5.5 斩波方案对双频波本身的畸变和去耦效果	(139)
5.6 激电效应和电磁效应的直接、同时、分别提取	(153)
第六章 非线性效应在双频频谱激电的特殊表现	(167)
6.1 激发极化非线性效应的电化机理	(168)
6.2 矿物 - 溶液界面的等效电路	(171)

6.3	等效电路的过电位响应	(173)
6.4	阴、阳极极化频谱曲线的理论计算和实验结果	(177)
6.5	双频道频谱激电的非线性效应	(180)
第七章	频率域激电异常的空间分布特征	(189)
7.1	均匀交变电流场中的面极化球体	(189)
7.2	均匀电场中带有浸染球壳的球体的激电异常	(197)
7.3	均匀交变场中的脉状矿体	(204)
7.4	点电源场中的面极化球体	(206)
7.5	面极化无限长圆柱体的激电场	(216)
7.6	几种规则形状极化体的实验偶极剖面曲线	(224)
7.7	几种剖面排列的对比	(229)
7.8	激电测深的异常特征	(232)
第八章	野外工作方法和技术	(238)
8.1	电极排列形式	(239)
8.2	观测频率的选择	(249)
8.3	供电系统	(252)
8.4	测量回路	(258)
8.5	激电测量中的电极效应和电磁耦合效应	(259)
8.6	激电测量中的干扰及其克服	(265)
8.7	激电测量中观测精度的评价	(268)
8.8	岩石电性参数 F 和 ρ 的测量	(269)
8.9	观测结果的图示形式	(272)
8.10	野外观测中的一些经验	(276)
第九章	双频激电法的应用实例	(280)
9.1	双频激电法在金、银矿产勘查中的应用	(280)
9.2	双频激电法在勘查铜、铅、锌多金属矿中的应用	(289)
9.3	双频激电法在其他矿产上的应用	(310)
9.4	用双频激电法勘查地下水	(320)
9.5	双频(三频)相位测量的应用	(326)
参考文献	(330)

第一章 双频激电法的物理基础

1.1 双频激电法导论

1.1.1 从时间域激电谈起

激发极化(induced polarization, 缩写为IP)是发生在地质介质中因外电流激发而引起介质内部出现电荷分离,产生一个附加的“过电位”(over voltage)的一种物理化学现象。这个现象可用图 1.1 的装置来观察。经由供电电极 A 和 B 向地下供入直流电流 I , 观察测量电极 MN 间的电位差及其随时间的变化。如果地下介质是均匀非极化的, 并且保持供电电流不变, 那么在 MN 间测到的电位差 ΔV_1 将如图 1.2 中的水平虚线所示, 也不会随时间变化。如果地下存在可极化的介质, 比如像图 1.1 那样的金属矿体, 则供入的电流流过矿体时, 矿体将产生电化学反应而被“极化”成原电池。此原电池也将产生电流, 俗称“二次电流”。二次电流在空间也要产生电场, 在 MN 间形成电位差, 称为二次电位差 ΔV_2 。 ΔV_2 是随时间变化的, 常记为 $\Delta V_2(t)$ 。供电时在 MN 间所测到的电位差 $\Delta V(t)$ 是一次电位差 ΔV_1 和二次电位差 $\Delta V_2(t)$ 之和, 俗称总场电位差, 它的涵义是供电电场与极化电场二者在 MN 间产生的总电位差。由于 $\Delta V_2(t)$ 随时间而变, 是时间的函数, 故 $\Delta V(t)$ 也是时间的函数, 上述现象如图 1.2 所示。

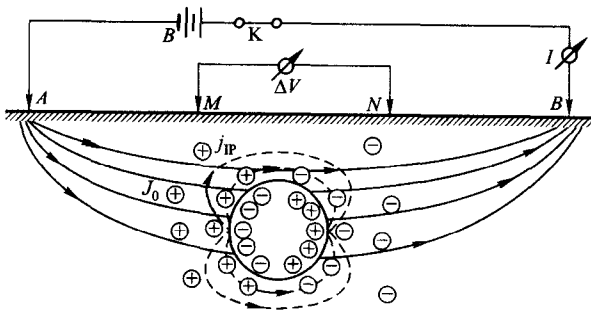


图 1.1 激发极化现象示意图

矿体(或其他可极化介质)被极化是一个过程。过程随时间变化的速率先快后慢,最后趋于饱和。饱和值的大小 ΔV_s (s 是 saturate 的缩写), 以及达到饱和和经历的时间 T_s 与介质的性质有密切的关系, 一般 T_s 为数秒到数分钟。

如果在图 1.1 中把供电回路的开关 K 断开, 便会看到, 虽然经由 AB 供入地下

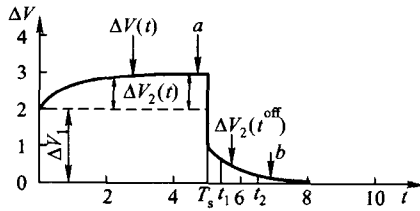


图 1.2 在时间域观察激发极化现象的示意图

的电流已不复存在,但矿体的极化依旧存在,它将继续放电。因切断了激发电流,随着放电的进行,矿体的极化也逐渐减小。相应地,断电后供电引起的电位差 ΔV_1 已不存在,但极化引起的电位差 $\Delta V_2(t)$ 并不立刻消失,仍然能观测到,并且先快后慢地逐渐减小,经过数秒甚至到数分钟,才最终归于消失,如图 1.2 中的曲线 b 所示。上面观察到的现象有点像电容器的充放电,故习惯上将供电时 MN 间测得的总场电位差 $\Delta V(t)$ 的曲线称为充电曲线,而把断电后测到的二次电位差 $\Delta V_2(t)$ 的曲线称为放电曲线。

上述电现象因外电流的激发而引起(外电流接通以前决不会发生),外电流切断后却并不立即消失,说明电流的激发导致了介质本身的极化,故称之为激发极化。

为了反映激发极化的全过程,本应当要求充电的时间 T 足够长(例如 2 min 以上),然后断电,并且应当测量充电时和断电后电位差变化的全过程,即完整的充电曲线与完整的放电曲线。这对于研究激发极化是十分必要的。但在以发现目标为宗旨的野外普查中,这样做未免费时费事,经济上不划算。所以除了专门研究以外,一般都只在若干个时间点测量电位差来组成某些参数,用以描述激发极化特性。我国最常用的参数是视极化率 η_s (这里的 s 是“视”的汉语拼音的第一个字母),定义为

$$\eta_s = \frac{\Delta V_2(t_i^{\text{off}})}{\Delta V(T - \Delta t)} \times 100\% \quad (1.1.1)$$

式中: (t_i^{off}) 表示断电后的某时刻 t_i , 此刻测得的二次电位差记为 $\Delta V_2(t_i^{\text{off}})$; Δt 是一很短的时间(例如 0.1 s 或更短); $\Delta V(T - \Delta t)$ 是在快断电之前测得的总场电位差,这时测得的 $\Delta V(T - \Delta t)$ 接近于饱和电位差 ΔV_s ; η_s 是一无量纲的相对物理量。

由于 $\Delta V_2(t_i^{\text{off}}) \ll \Delta V(T - \Delta t)$, η_s 的精度主要由测量 $\Delta V_2(t_i^{\text{off}})$ 的精度决定。为了提高 η_s 的精度,现代的激发极化仪已不是测二次电位的瞬时值 $\Delta V_2(t_i^{\text{off}})$, 而是测量一段时间内二次电位的积分 $\int_{t_1}^{t_2} \Delta V_2(t) dt$, 并定义

$$m_s = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \Delta V_2(t) dt}{\Delta V(T - \Delta t)} \quad (1.1.2)$$