

“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖南省教育厅资助科研项目 (16K031)

有色金属文库

NON-FERROUS METALS LIBRARY

天然电场选频法理论 研究与应用

杨天春 夏代林 著
王齐仁 付国红



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

“十二五”国家图书出版规划项目
湖南省教育厅资助科研项目(16K01)

天然电场选频法理论 研究与应用

杨天春 夏代林 王齐仁 付国红 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

天然电场选频法理论研究与应用/杨天春,夏代林,王齐仁,
付国红著. —长沙:中南大学出版社,2017.3

ISBN 978-7-5487-2756-9

I. ①天... II. ①杨... ②夏... ③王... ④付... III. ①自然电场
法-选频-研究 IV. ①P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 065183 号

天然电场选频法理论研究与应用

TIANRAN DIANCHANG XUANPINFA LILUN YANJIU YU YINGYONG

杨天春 夏代林 王齐仁 付国红 著

☐责任编辑 刘石年 胡业民

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

发行科电话:0731-88876770

邮编:410083

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙鸿和印务有限公司



☐开 本 720×1000 1/16 ☐印张 10.5 ☐字数 207 千字 ☐插页

☐版 次 2017 年 3 月第 1 版 ☐印次 2017 年 3 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2756-9

☐定 价 36.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

天然电场选频法(简称选频法)是以天然电磁场为工作场源,以地下岩矿石电性差异为基础,通过测量天然电磁场在地表产生的电场水平分量,来研究地下地电断面的电性变化,解决有关水文地质、工程地质问题的一种交流电勘探方法。自 20 世纪 80 年代以来,该方法在地下水资源勘探、矿山水害调查、岩土工程勘察等方面取得了较好的地质效果。本书在前人研究成果及作者多年实践的基础上,根据天然电磁场在大地中的传播规律,在理论上对该方法开展了相关研究工作。包括:对天然场场源特性进行分析,并对天然交变电磁场日变规律开展试验观测;从麦克斯韦方程组出发,对地下交变电磁场中的简单规则地质体的电场分布进行理论推导,求解模型的解析解并开展模拟计算,从而研究天然电场选频法异常的形成机理;在已知的地质模型上开展试验性实测工作,研究天然交变电场的动态特征;在地下饮用水勘探、煤矿老窑水探测以及岩土注浆堵水工程中开展大量的应用研究工作,并将实测结果与理论模拟计算结果进行对比分析,归纳并解释异常的形成原因,为今后天然电场选频法的反演研究和实践应用提供科学指导。

本书数据翔实、内容丰富,可供地球物理、水文地质、工程地质等专业领域的科技人员、高等院校相关专业师生以及从事工程勘察、地下水勘查的现场人员参考。

作者简介

About the Author

杨天春, 汉族, 1968 年 3 月出生于湖南省津市市, 中共党员, 教授, 博士后; 主要从事勘探地球物理、工程物探、土木工程方面的教学和科研工作; 在瑞利面波、电磁波、工程检测等理论和应用方面有深入的研究。

1991 年毕业于桂林冶金地质学院勘探地球物理专业, 获工学学士学位; 1991 年 7 月—1998 年 8 月于湖南有色地质勘查局二四七队从事有色金属资源勘探工作, 主持和参与国家重点成矿区带湘南、湘东北和粤北地区的电法、高精度磁测和重力测量等勘探项目; 1998 年 9 月—2004 年 5 月就读于中南大学, 先后获得地球探测与信息技术专业的工学硕士学位和博士学位; 2004 年 5 月—2006 年 3 月于湖南大学土木工程博士后流动站从事博士后研究工作; 2006 年 3 月至今于湖南科技大学地质系从事教学和科研工作。现为湖南省地球物理学会常务理事, 硕士生导师。

主持和参与国家自然科学基金、湖南省自然科学基金、湖南省科技计划项目、湖南省教育厅优秀青年基金、湖南省高校创新平台开放基金项目等纵向科研项目十余项, 主持重大横向科研项目十余项。科技成果方面曾获湖南省自然科学三等奖 1 项, 已获授权国家发明专利 1 项、实用新型专利 2 项。先后在《煤炭学报》《振动工程学报》《应用力学学报》《中南大学学报(自然科学版)》《湖南大学学报(自然科学版)》《岩土力学》《水文地质工程地质》《计算物理》等国内外期刊上以第一作者发表论文 60 余篇, 其中 SCI、EI 收录 11 篇; 出版专著《层状介质中瑞利波频散特性》1 部。

序

Introduction

我国改革开放以来,经济建设速度突飞猛进,我国的地球物理勘探事业也得到了快速的发展。随着物探技术在资源勘查、工程探测等领域的应用范围日益扩大,我国地球物理勘探工作的规模、水平都赶上了世界前列。在广大物探工作者坚持不懈的努力下,方法理论研究、探测设备研制都取得了许多创新性的成果,并在实践中取得了良好的效果。由于电法勘探适应性强,其发展更为迅速。

苏联的 A. THXOHOB(1950)和法国的 Carniard(1953)分别独立地提出了大地电磁法(MT)理论。由于该方法利用天然场源,探测深度大属于天然电磁法,它采用平面波理论,具有阻抗形式简洁、解释简单和探测深度大等一系列特点,在地球深部构造和油气探测方面具有独特的优势,这使得它一直得到广泛的应用,而且已经发展得非常成熟。然而,随着我国基础建设的进一步加大、人们生活水平的逐步提高,城市化进程的加快,浅部地质灾害勘查、地下水资源勘探和岩土工程勘察等问题为地球物理方法的应用提供了更广阔的舞台。因此,国民经济建设的需求和科学技术的进步刺激和促进了天然电磁法的进一步发展。

天然电场选频法是由音频大地电磁法(AMT)演化而来的,工作频率为 15 Hz 至 1.5 kHz,是我国学者于 20 世纪 80 年代提出的。由于天然电磁法的场源十分复杂,学者们一直更多地注重天然电场选频法仪器的研制和实际应用,对该方法相关理论研究的文献甚少。本书详细、全面地介绍了天然电场选频法的基础理论和实际应用,并对该方法的起源和发展概况作了较详细的阐述,进行了从理论到实践的总结,将给从事天然电场选频法的工作者提供参考,并一起推动该方法的进一步应用和发展。

对于现代科学技术而言,我认为一本好的专著必定是理论与实践的紧密结合。本书作者在多年来大量实践的基础上,探索地

球物理科学问题,开展选频正演理论推导以及野外试验和仪器研制工作,从理论探究天然电场选频异常的形成原因,探讨选频法的场源问题,采用天然电场选频仪开展日变观测试验,总结了日变场的变化规律,理论与试验成果对今后的实践工作具有指导作用。从实践中来,到实践中去!本书是天然电场选频法的第一部系统性专著,其研究成果必将为后续科研工作者在继续探索中提供重要的参考。

目前,地球物理勘探的各种技术方法都发展很快,服务的领域也非常广泛。我相信本书对国内外的同行一定会有一些助益,同时我希望年轻的地球物理学后辈们更加广泛地参与到工程实践中,加强理论研究,站在地球物理学术前沿阵地,多出高水平的成果,为我国地球物理勘探事业的发展作出更多更大的贡献。

何继善

2016年9月28日

前言

Foreword

天然电场选频法(简称选频法)是以天然电磁场为工作场源,以地下岩矿石电性差异为基础,通过测量大地电磁场在地表产生的电场水平分量,来研究地下地电断面的电性变化,解决水文地质工程地质问题的一种交流电勘探方法。自20世纪80年代以来,该方法在地下水资源勘探、矿山水害调查、岩土工程勘察等方面取得了较好的地质效果。一直以来人们对该方法的研究主要集中于仪器研制和实际应用,缺乏系统的理论研究,目前反演解释主要是凭借实践经验作定性解释,缺少合理有效的定量计算和解释方法。因此,作者结合自己近几年的科研实践和理论研究成果,对该方法进行总结归纳。编写本书是为了进一步推动天然电场选频法的应用与发展,书中论述的绝大部分内容均是近年来作者的最新研究成果,供读者参考。

相对于常规电法而言,天然电场选频法仪器轻便,工作效率高,特别适用于地形复杂、植被发育的山区或建筑密布的城镇开展水文地质工作。同时,探测成果直观,特别是地下含水体的低电位异常明显,解释成果准确可靠,目前在南方浅部地下水勘探的成功率可达70%以上,在今后的工程地质勘察和地下水灾害勘查方面也具有很好的推广应用价值。正演理论是反演工作的理论基础,只有将方法的异常成因机理弄清楚后,才能开展正确的反演研究工作。本书在实践应用成果的基础上进一步开展理论研究工作,从理论上说明实测异常的成因机理;同时,将该方法推广应用于煤矿老窖水勘探、岩土的注浆堵水工程勘察中,实践与理论研究成果均具有重大的理论和现实意义。

本书以地下异常体与围岩的导电、导磁性差异为基础,根据天然电磁场在大地中的传播规律,研究天然电场选频法实测异常

的形成机理。对于规则形状的低阻或高阻地质目标体,推导其在天然电磁场作用下地表天然电场的理论计算式,再通过计算机模拟计算,获得各种简单规则形状、不同电磁场源作用下的理论异常曲线,由此分析实测异常曲线的成因;同时,研究目标体埋深、形态、大小等参数与天然电场选频法异常曲线的关系。通过对三维天然电磁场中低阻导电磁球体的研究可知,尽管天然电场选频法与大家熟知的大地电磁法(MT)在场源上有很大的相似性,但天然电场选频法的异常主要是由自然因素、人文因素所产生的“天然”水平交变磁场和水平交变电场共同作用的结果。在理论研究的基础上,作者进一步开展野外现场模拟试验和应用研究工作,研究选频法异常的动态和静态响应特征,探讨天然电场选频测深法的应用效果。使用天然电场选频仪开展了天然交变电磁场的日变规律观测,总结了日变场的变化规律,为野外实测工作提供指导;将实测记录的处理结果与理论模拟计算结果进行对比分析,验证理论研究成果的正确性。

本书的研究内容和出版得到了湖南省教育厅高校创新平台开放基金项目“基于浅层复杂介质的天然电场选频法正演模拟与应用研究”(16K031)和湖南省自然科学基金“天然电场选频法探测地下水的机理与应用研究”(12JJ3035)、“基于天然电磁场动态信息的地下水探测方法研究”(06JJ2077)等项目的资助。此外,本书的出版也得到武汉天宸伟业物探科技有限公司的大力赞助,在此致以衷心的感谢!

本书的总体框架、研究思路和撰写主要由杨天春完成,其中7.2节由王齐仁撰写;夏代林、付国红研制了TS-DT01型智能天然电场分析仪和MFE-1型天然电场选频仪,并参与了野外试验工作和7.3节、7.4节的撰写工作;7.5节选频测深法的原始资料主要由广西有色地质勘查局二七三队的梁竞高级工程师提供,由杨天春撰写;本书全文最终由王齐仁进行校核。另外,本书中的一些研究成果也有研究生团队的贡献,李好、冯建新、王士党、夏祥青、张辉、张启、许德根、张正发、杜良、邓国文、唐志成、化得钧、朱云峰、吴秋霜等人在攻读硕士学位期间,参与了实践应用、野外试验或理论研究工作。

本书的研究工作及编写得到了湖南科技大学社会科学处、科

技处和湖南科技大学资源环境与安全工程学院、土木工程学院,以及湖南省高校土木工程施工过程与质量安全控制重点实验室、岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室、页岩气资源利用湖南省重点实验室的支持。研究工作还得到了湖南省化工地质勘查院鲍力知教授、广西有色地质勘查局二七三队梁竞高级工程师等专家的帮助和指导。在此作者对上述单位及专家表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免有欠妥之处,热忱地希望广大读者批评指正。

杨天春
2016年9月

目录

Contents

第1章 绪论	(1)
1.1 选频法的起源与方法技术	(1)
1.2 选频法的应用发展概况	(3)
1.3 选频法理论研究现状	(9)
第2章 天然电场选频法的理论基础	(12)
2.1 交变电磁场在导电介质中的传播规律	(12)
2.1.1 麦克斯韦方程组	(12)
2.1.2 电磁波波动方程及边界条件	(13)
2.1.3 传播系数	(17)
2.1.4 波阻抗	(18)
2.2 大地电磁场	(20)
2.2.1 大地电磁场场源	(20)
2.2.2 大地电磁场的分类	(22)
2.2.3 大地电磁场的特征	(25)
2.3 天然电磁场日变规律观测	(25)
2.3.1 不同仪器同点同时观测	(26)
2.3.2 不同仪器异点同时观测	(28)
2.3.3 单点日变观测	(29)
第3章 断层接触带上选频法异常特征	(34)
3.1 实践应用	(34)
3.2 在垂直断层上选频法异常特征	(36)
3.2.1 高阻基底TE极化	(36)

3.2.2	高阻基底 TM 极化	(40)
3.2.3	基底为理想导体的情况	(44)
3.2.4	模拟计算	(46)
3.3	在岩脉上的选频法异常特征	(47)
3.3.1	TE 极化	(47)
3.3.2	TM 极化	(52)
3.3.3	数值计算	(53)
第 4 章	选频法异常的有限单元法研究	(58)
4.1	二维有限元正演	(58)
4.1.1	基本方程式	(58)
4.1.2	边界条件	(60)
4.2	二维有限元解法	(61)
4.2.1	网格剖分	(61)
4.2.2	单元分析	(61)
4.2.3	总体合成	(63)
4.2.4	程序实现	(64)
4.3	数值算法的选择	(65)
4.4	模型计算与分析	(68)
4.4.1	垂直接触面	(68)
4.4.2	单个异常体模型	(70)
4.4.3	岩脉模型	(77)
第 5 章	均匀交变磁场中的圆柱体模型与选频法场源	(83)
5.1	均匀交变磁场中水平圆柱体的电磁异常	(83)
5.1.1	理论基础	(83)
5.1.2	正演计算与分析	(90)
5.2	天然电场选频法场源问题探讨	(90)
第 6 章	三维天然电磁场激励下球体的选频法异常	(98)
6.1	均匀交变磁场中的球体	(98)
6.2	地下天然交变磁场中的球体	(106)
6.2.1	野外磁场分量大小的测定	(106)

6.2.2 均匀半空间中的导电导磁球体	(107)
6.3 半空间交变电流场中的导电球体	(111)
6.4 天然电磁场作用下的模拟计算	(115)
第7章 天然电场选频法的实践应用	(123)
7.1 实践应用中的干扰因素	(123)
7.2 选频法勘探中的动态信息	(127)
7.3 地下热水资源勘探	(131)
7.3.1 工作区概况	(131)
7.3.2 物探成果与分析	(132)
7.3.3 钻孔验证情况	(135)
7.4 煤矿水灾害勘查	(136)
7.4.1 工作区概况	(136)
7.4.2 探测成果及分析	(137)
7.5 选频测深法的应用	(139)
7.5.1 无水孔的测深曲线特征	(140)
7.5.2 有水孔的测深曲线特征	(142)
参考文献	(146)

第1章 绪论

天然电场选频法简称选频法。一般认为它与大地电磁测深法完全相同,是以大地电磁场作为工作场源,以地下岩(矿)石之间的导电性差异为基础,通过在地面上测量天然交变电磁场产生的几个不同频率的电场水平分量的变化规律,来研究地下地电断面的电性变化,达到解决地质问题的一种交流电勘探方法。该方法是由音频大地电磁法(AMT)演化而来,所采用的工作频率为 $n\text{Hz} \sim 1.5\text{kHz}$ 。它是由我国学者提出来的,到目前为止未见到国外相关研究文献。由于该方法的场源很复杂,所以天然电场选频法一直缺乏系统的理论研究,但与其他物探方法相比,该方法在实践应用中具有快速简便、易于操作、成果直观等优点。因此,自20世纪80年代以来,选频法在国内地下水勘探、灾害地质体勘查等方面取得了显著效果^[1-3],并逐渐得到了广泛的应用和发展。

1.1 选频法的起源与方法技术

从天然电场选频法的发展历史来看,最早可追溯至20世纪40年代发展起来的大地电流法^[4-5]。大地电流法主要是利用地壳中天然流动的超低频大地电流为场源,其工作频率为 $0.01 \sim 0.1\text{Hz}$;在实际工作中,它采用 $1 \sim n\text{km}$ 的极距接收讯号,适于解决一些特大型构造问题,所以该方法当初主要运用于含油构造勘探、地震带的预测预报等^[6]。

20世纪80年代,我国学者先后提出了游散电流法(或称为音频大地电位法)^[7]、声频大地电场法(简称声电法)^[8]、天然低频电场法(简称天电场法)^[9]、天然电场选频法(简称选频法)^[10]。20世纪90年代,又有少数学者在文献中提到地电选频法^[11]、音频大地电场法^[12]、天然交变电场法^[13]等。根据这些学者所研制或使用仪器的原理、方法特点来看,这些方法实质上都是相同的。在这些方法概念中,“天然电场选频法”在实践和文献中使用频率最高。2009年黄采伦等提出了地下磁流体探测法^[14-15],就该方法仪器的勘探原理而言,其实质也是天然电场选频法。

天然大地电磁场属交变电磁场,在距离场源较远的地方,可将其看作为平面电磁波,它的分布方向垂直于地面,场的变化规律服从麦克斯韦方程组。平面电磁波在均匀各向同性介质中的趋肤深度(δ)与介质电阻率(ρ)和信号频率(f)之间

的关系为:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (1-1)$$

由上式可知,当电阻率一定时,频率越低反映的探测深度越深。因此,选择不同的接收频率即可反映不同的勘探深度;若频率为定值时,电阻率值越大,电磁波穿透深度也越大,因此在高电阻率地区能获得较大的勘探深度。

对于平面电磁波而言,如果不考虑磁场强度与电场强度之间的相位差,那么可按下式得出交流视电阻率 $\rho_s(\Omega \cdot m)$,即

$$\rho_s = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (1-2)$$

由于视电阻率 ρ_s 与频率 f 、电场分量 E_x 和磁场分量 H_y 有关,所以大地电磁测深法是同时观测一组正交的电场和磁场分量^[16-19];而天然电场选频法只测量水平电分量,无法计算卡尼亚电阻率,但根据式(1-2)中电分量与视电阻率的关系,用电分量的大小可定性地说明异常体的电阻率高低,定性解释异常。也就是说,测量电场强度大小能反映地下介质的地电信息^[20]。

天然电场选频法在野外实测中一般采用如下3种方法^[21],分别为:①平行移动法——电极 M 、 N 沿测线移动, MN 的中点 O 为记录点[见图1-1(a)];②垂直观测法——电极 M 、 N 两点的连线垂直于测线移动[见图1-1(b)];③正交观测法——就是前两种方法的组合, M 、 N 沿测线方向测出 $\Delta V_s^{\parallel}$,然后 MN 垂直于测线测出 $\Delta V_s^{\perp}$,最后取 $\Delta V_s^{\parallel}$ 与 $\Delta V_s^{\perp}$ 的平均值作为 MN 中点 O 的勘探结果[见图1-1(c)]。

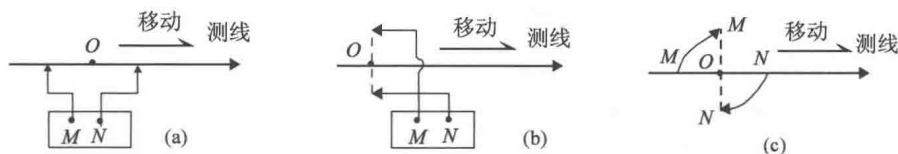


图 1-1 天然电场选频法实测方法示意图

采用何种方法和装置,要根据任务、地质条件、地形和干扰因素等实际情况来确定;但在实际工作中,大多采用与常规电法类似的平行移动法,且 MN 的距离一般取10 m或20 m,点距也取10 m或20 m进行快速扫面,确定异常具体位置时再将点距加密。这样施工较方便,工作效率高,特别是在植被较发育的我国南方地区,图1-1(b)、图1-1(c)中的垂直观测法和正交观测法是不适用的。

图1-1(a)的施工方法就是常规电法勘探中的剖面法。近年来,梁竞等人在实践应用中,开展了天然电场选频法测深装置研究,具体做法类似于电阻率法测深,

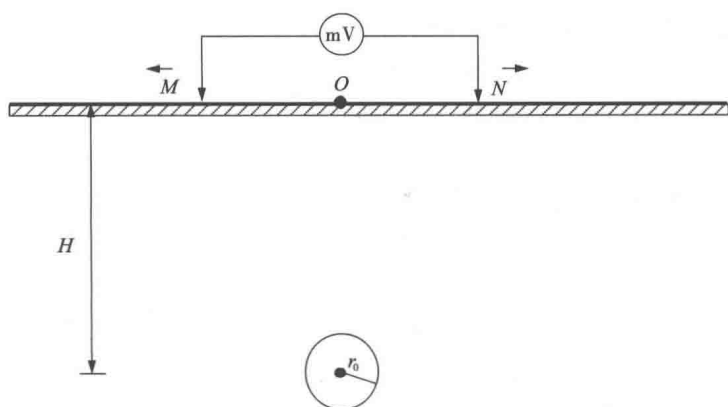


图 1-2 天然电场选频法测深装置示意图

以已测剖面定出的物探异常点 O 为中心, 电极 M 、 N 同步地分别向外跑极(点距常取 5 m, 特殊情况下采用 1 m), 通过 MN 极距的逐渐增大, 从而达到增大勘探深度的目的, 见图 1-2 所示。通过对广西壮族自治区武宣县、平乐县、恭城县、藤县、容县等地 100 多口钻井资料的对比分析, 发现当勘探深度在 150 m 之内时, 天然电场选频法的极距 MN 大小与勘探深度 H 之间有一个经验性的对应关系, 即 $MN/H \approx 1$ 。也就是说, 当 $MN = 50$ m 时, 天然电场选频法所测电位差即代表 O 点以下 50 m 深度处的地质情况。梁竞等认为, 该结论不仅可应用于岩溶地区的灰岩地层, 而且在巨厚的纯炭质岩、泥质粉砂岩等岩性地层中也符合此规律^[22]。

由此可见, 天然电场选频法与大地电磁法之间既有相同之处, 又有区别。在原理上两者是相同的, 但在采集数据方法、探测过程、探测结果的可靠性上是不同的。天然电场选频法是靠硬件设置不同频率的测量通道、选定有限固定的探测频率, 来实现对地下深度层的具有相应频率的电性数据进行采集的; 大地电磁法是通过探测仪的 CPU 控制, 一次性由高频到低频、由浅入深地采集地下各深度层的电性数据的, 根据处理方法不同, 可以获取成千上万个频率对应深度的电性数据。

1.2 选频法的应用发展概况

天然电场选频法的应用研究主要体现在两个方面, 即仪器装置的研制与野外生产实践。

20 世纪 80 年代初, 我国科技工作者梁柄和首次通过观测大地中游散电流的分布特征来探测岩溶地下水^[7]。在梁柄和的研究成果基础上, 杨杰于 1982 年提

出了“游散电流法”的概念,并指出了该方法与 M. H. 别尔季契夫斯基所提出的“大地电流法”的区别:①大地电流法主要是以地壳中天然流动的超低频大地电流为场源,其频率为 0.01 ~ 0.1 Hz;游散大地电流法是利用地壳中天然流动的音频电流为场源,其频率一般为 20 Hz ~ 2 kHz,主要成分为 50 Hz 工业游散电流;②超低频天然大地电流的信号强度很弱,平均为 0.5 ~ 1 mV/km,所以在实际工作中一般采用 1 ~ n km 的极距接收信号,只适合于解决一些特大型构造问题;相对于大地电流法所观测的超低频天然大地电流而言,地壳中音频游散大地电流的强度却大得多,只需 20 m 的极距即可观测到 0.5 ~ 10 mV 的较稳定信号。杨杰等用其单位自制的 JDD 音频大地电位计在已知岩溶区开展实验探测,对游散电流法的干扰因素进行了总结归纳,同时从地下稳定电流场的电位分布规律出发,探讨了游散电流场中球形地质体存在下的电位分布,以此来说明野外异常的成因^[7]。

1982 年,信永水、张钦朋等提出“声频大地电场法”的概念,简称“声电法”(用“CD”表示),该方法是利用频率 0.01 Hz ~ 30 kHz(即亚声频到声频)的天然大地电场为场源,并认为场源为工业游散电流、雷雨放电、无线电台发射信号、宇宙射线以及地磁场的微变等诸多因素组成的在自然条件下存在的电源。他们利用该方法勘察瀑河水库渗漏通道^[23]、寻找地下水^[24],并对声频大地电场法异常特征展开了初步探讨^[8]。山东省泰安地区水利局自 1980 年起就开始推广应用声频大地电场法找水,成井率不断提高,在平原地区提高了 5%,山区提高了 15% ~ 20%^[24]。1982 年《水文地质工程地质》第 5 期中报道:地质部于 1981 年 11 月召开了声频大地电场法技术评议会,指出该方法适合在山区和浅覆盖层地区进行地质填图、探测研究基岩裂隙和储水构造;并采用曲线图的形式说明了采用 SDD-1 声频大地电场仪在北戴河“地疗”区的找水效果。

1983 年,乔夫、邓培元等采用 SDD-1 声频大地电场仪在岩溶地下水、基岩裂隙水探测方面取得了较好的效果^[25-26]。同时,他们认为声频大地电场法具有仪器设备轻便、操作简单、测量迅速、资料解释直观、受地形限制性较小等优点,适合在水文地质勘探中应用。

1983 年,林君琴、雷长声、董启山等人提出了“天然低频电场法”,将其简称为“天电场法”^[9]。他们指出:该方法类似于音频大地电流法^[27],所不同的是采用的工作频率为 n Hz ~ 2 kHz,野外工作中只测量单方向的大地电场的水平分量,在场源上除了利用因天然电磁场变化而在大地中感应的大地电流场之外,还利用了工业游散电流场。他们研制了 DCR-A 型天然场电测仪,观测天然电场随时间的变化规律,并在赣西北地质大队、安徽冶金 803 队、山东物探队、广东省 719 队、地质部第一物探大队试验队、地科院岩溶地质研究所等单位协助下,在安徽铜陵新桥硫铁矿、广东肇庆兰矿矿区对多金属硫化物、地下水、岩溶和接触带勘探方面做了许多有意义的实践工作。同时,根据大地电磁场的传播规律,从麦克