

中国  
工程  
院  
院  
士  
文  
库

[何继善 著]

# 广域电磁法和 伪随机信号电法

何  
继  
善



高等教育出版社

Guangyu Diancifa he Weisuiji Xinhao Dianfa

# 广域电磁法和 伪随机信号电法

[何继善 著]



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书全面介绍了著者发明的两种新的电法勘探方法——广域电磁法和伪随机信号电法,包括方法的基本原理、数理基础、仪器装备、理论计算成果和若干实例。广域电磁法突破了必须在远区测量的限制,能在非远区测量电场分量、磁场分量提取视电阻率,大大扩展了人工源频率域电磁法的探测深度和应用范围。伪随机信号电法一次同时发送和接收多个主频率的电磁信号,有力地提高了电法勘探的工作效率。二者结合,形成了伪随机信号-广域电磁法,其探测深度和工作效率都大为提高,为探测油、气、金属矿和工程勘测提供了一种全新和有效的物探方法。

本书可供地质矿产、油气、资源环境、工程、水文领域及相应的大学师生阅读,或作为地球物理学专业研究生的教材,也可供涉及上述领域的政府和企业高管人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

广域电磁法和伪随机信号电法/何继善著. —北京:高等教育出版社, 2010.7

ISBN 978-7-04-028704-2

I. ①广… II. ②何… III. ①电磁法勘探 IV. ①P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 098859 号

策划编辑 沈俐 责任编辑 张海雁 封面设计 刘晓翔 责任绘图 尹莉  
版式设计 张岚 责任校对 王超 责任印制 毛斯璐

---

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 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787 × 1092 1/16  
印 张 15  
字 数 270 000

购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landraco.com>  
<http://www.landraco.com.cn>  
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010年7月第1版  
印 次 2010年7月第1次印刷  
定 价 77.90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 28704-00

## 《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 李朋义 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 高中琪

张增顺 王国祥

编辑部：高中琪 刘静 王国祥 沈俐

# 总序

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

# 自序

新中国成立后，我国的地球物理勘探事业得到了迅速发展。特别是改革开放以来，经济建设持续快速地发展，对石油、煤炭、金属矿产和建筑材料、化工原料的需求与日俱增，工程探测的规模日益扩大，我国的地球物理勘探工作从规模到水平都趋于世界前列。在广大物探工作者的不懈努力下，从方法到仪器都有许多创新，并在应用中取得了良好的地质效果。电法勘探由于其适应性强，发展得更为迅速。

由于历史的原因，应用得最为广泛的电磁法和激发极化法都是从国外引进的，仪器也都是进口的。笔者从事电法工作半个多世纪以来，一直对此看在眼里，想在心里。知识没有国界，我们不必什么事情都从头自己来做，学习别国的先进经验用于我国的经济建设，也是很好的事情。然而，我国幅员辽阔，地质、地球物理条件与外国有许多差别，现在国家发展得如此之好，我们应该有一些适合我国国情、具有自己知识产权的电法勘探方法和仪器。

本书论述的“广域电磁法”和“2<sup>n</sup>序列伪随机信号电法”是笔者经长期理论和实践研究提出来的新方法。

广域电磁法的核心内容是提出了一种新的计算大地视电阻率——广域电阻率的方法，与可控源音频大地电磁法（CSAMT）相比，其最大优点是可以较小的发收距获得很大的探测深度，这在探测油气和寻找深部金属矿方面，具有明显的优势。

2<sup>n</sup>序列伪随机信号是频率域电法的一种理想场源信号，它既可以用于电磁法，也可以用于激发极化法。与国内外所有其他频率域电法相比，2<sup>n</sup>序列伪随机信号电法可以几倍、十几倍地提高测量速度，而且还可提高相邻各个频率信号的相对精度。

广域电磁法与2<sup>n</sup>序列伪随机信号电法都是新生事物，虽然它们已经基本成熟，但仍在成长之中，还有许多问题要进一步研究。笔者深知，任何新生事物的成长都不可能一帆风顺。但笔者深信，我国经济建设的迅速发展需要它们，全国的同行们会呵护它们，它们一定会发挥出更大的作用。

何继善

2010年2月28日

# 目 录

绪论	1
0.1 自然电场法、直流电阻率法	1
0.2 激发极化法	2
0.3 电磁法	3
0.4 广域电磁法	7
0.5 $a_k^p$ 序列伪随机信号电法	8
第 1 章 频率域电法导论	11
1.1 从物理实质看频率域激电法与时间域激电法的等效性与差异	11
1.2 从物理实质看时间域电磁法与频率域电磁法的等效性与差异	19
1.3 频率域电法与时间域电法的等效性与差异	22
1.4 变频方案与奇次谐波方案	27
1.5 广域电磁法和 $a_k^p$ 序列伪随机信号电(磁)法	31
第 2 章 广域电磁法导论与电流源广域电磁法	34
2.1 广域电磁法的基本原理	34
一、收发距大小的影响	34
二、广域电磁测深法基本原理	38
2.2 电磁场的基本方程和边界条件	40
2.3 均匀大地表面上电流源的电磁场	44
2.4 层状大地表面上电流源的电磁场	57
2.5 $E-E_x$ 广域电磁法	72
一、水平电流源发送, 测量电场水平分量 $E_x$ 的 $E-E_x$ 广域电磁测深	74
二、几种简单地电模型的 $E-E_x$ 广域电磁测深的正演曲线	77
三、内蒙古大杨树广域电磁测深的一个实例	87
2.6 水平电流源的其他装置形式	88
一、测量水平电流源产生的磁场垂直分量的 $E-H_z$ 形式	88
二、测量电流源产生的磁场水平分量 $H_x$ 或 $H_y$ 的 $E-H_x$ 或 $H-E_y$ 形式	89
2.7 GY-1 广域电磁仪	94
一、GY-1 广域电磁仪的设计思想	94
二、GY-1 广域电磁仪的系统组成	94

三、广域电磁仪发送机·····	95
四、广域电磁仪接收机·····	98
五、广域电磁通信系统·····	102
<b>第3章 垂直磁场源的广域电磁法</b> ·····	104
3.1 大地表面上垂直磁偶极源产生的电磁场·····	104
一、均匀全空间中磁偶极源产生的电磁场·····	104
二、均匀导电半空间表面上垂直磁偶极源产生的电磁场·····	107
三、层状大地上的垂直磁偶极源产生的电磁场·····	111
3.2 垂直磁偶极源的广域电磁法·····	115
一、测量磁偶极源产生的 $E_z$ 的 $H-E_z$ 形式的广域电磁测深·····	116
二、测量磁偶极源产生的 $H_z$ 的 $H-H_z$ 方式的广域电磁测深·····	118
三、测量磁偶极源产生的 $H_r$ 的 $H-H_r$ 方式的广域电磁测深·····	119
<b>第4章 电磁法中不同方案的比较</b> ·····	123
4.1 $E-E_x$ 广域电磁测深与其他电(磁)测深的比较·····	123
4.2 广域电磁法中不同场源和不同观测方式的比较·····	130
一、两种场源形式的比较·····	130
二、观测方式的比较·····	131
<b>第5章 近区的广域电磁法</b> ·····	135
5.1 大地表面回线源近区的电磁场·····	135
一、均匀大地的情形·····	135
二、层状大地的情形·····	141
三、近区场到远区场的转换·····	144
5.2 近区频率域电磁测深法·····	145
一、大回线电流环内外电磁场的频率域表达式·····	145
二、回线源近区广域电磁测深·····	146
5.3 电流源近区广域电磁测深·····	154
一、电场分量的近区表达式与视电阻率的提取·····	154
二、磁场分量的近区表达式与视电阻率的提取·····	160
<b>第6章 <math>a_k^p</math> 序列伪随机信号原理</b> ·····	169
6.1 伪随机信号概述·····	169
6.2 $-1, 0, 1$ 三元素集合中的自封闭加法·····	170
6.3 $2^n$ 序列伪随机信号编码原理·····	172
6.4 $2^n$ 序列伪随机编码的能量分布·····	177
6.5 $2^n$ 序列伪随机编码的频率分布·····	183



---

6.6	从 $2^n$ 序列伪随机信号到 $a_k^n$ 序列伪随机信号 .....	185
<b>第 7 章</b>	<b><math>2^n</math> 序列伪随机信号激电法 .....</b>	<b>190</b>
7.1	引言 .....	190
7.2	双频激电法 .....	192
7.3	激发极化的频率特性 .....	198
7.4	伪随机三频激电和五频激电 .....	203
7.5	WSJ-1 伪随机多频激电仪 .....	211
<b>参考文献</b>	.....	<b>215</b>

# 绪 论

我国经济持续快速发展和人民生活水平的不断提高，对资源和能源提出了新的更高的要求。对金属矿，要求增加找矿和开采深度，而对石油则要求寻找新的类型，同时煤田的采掘深度已达 1 km，所有这些都要求电法勘探加大探测深度，提高分辨率，提高效率，降低成本。广域电磁法和伪随机信号电磁法便是在这种形势下提出来的。

事实上，所有物探方法的产生和发展都是和社会经济的发展密切相关的，在这里不妨先回顾一下电法勘探方法的发展历史。

19 世纪初，产业革命由英国开始并逐渐席卷西方，随着工业的发展，对矿物原料的需求不断增长。电法勘探作为地球物理勘探以及地质勘探中一个不可或缺的组成部分应运而生。新中国成立后，对各种矿产资源的大量需求促进了我国各种电法勘探方法的迅速发展。

## 0.1 自然电场法、直流电阻率法

1830 年，R. W. Fox 第一个在 Cornish 铜矿上发现了自然电流场<sup>[198]</sup>。5 年之后，他在 Cornwall 铜矿上作自然电位法观测，开了电法勘探的先河。当时，尚不知道电极电位对自然电位观测的严重影响，观测到的并非“纯净”的自然电位，而是自然电位与电极电位的叠加。直到 1882 年，Carl Barus 在内华达州 Comstock 铜矿的试验中采用了不极化电极才克服了电极极化的影响<sup>[198]</sup>，首次观测到真正的自然电场。而且直到 1912 年，由于 C. Schlumberger 的努力<sup>[198]</sup>，该方法才较正规地投入找矿实践中。我国在 20 世纪 30 年代，由顾功叙先生率先在铜矿上进行了自然电场法的工作。新中国成立后，自然电场法作为一种轻便、快速而有效的电法勘探方法在全国大面积展开，自然电场法在发现甘肃白银厂铜矿等矿山的勘测中起到十分重要的作用。事实上，在 20 世纪 50—60 年代，自然电场法与地面垂直磁测被作为普查扫面的主要物探方法。自然电场法的优点是利用天然场，不需要人工场源，设备轻便，成本低，效率高。其主要不足是，金属矿上自然电场的产生必须有氧化—还原环境作为先决条件，最有利的是电子导体被潜水面所切割。这就大大限制了它的勘探深度和应用范围。

F. H. Brown 于 1883—1891 年，以及 Alfred Williams 和 Led Daft 于 1897 年

率先试图确定与矿床有关的地电阻率的差异,并获得专利<sup>[198]</sup>。1893年,James Fisher测量了美国密歇根州的一个含铜矿脉的电阻率<sup>[198]</sup>。但当时还不了解介质的真电阻率与大地的视电阻率含义上的区别。直到20世纪初,视电阻率这个重要概念才由美国标准局的F. Wenner和法国人C. Schlumberger(1915)<sup>[178]</sup>提出来。然后由O. H. Gish、W. J. Rooney、M. Schlumberger等人发展了视电阻率的野外方法;Stefanescu(1930)等发展了水平层状大地的正演理论<sup>[188]</sup>;Langer(1933)、Slichter(1933)进行了水平层状介质和球体的研究<sup>[166,186]</sup>;Tagg(1930)<sup>[192]</sup>、Lundberg和Zuschlag(1931)<sup>[170]</sup>、Skal'skaya(1948)<sup>[185]</sup>、Logn(1954)<sup>[169]</sup>解决了垂直的或倾斜的板状体的正演问题;Frank和Mises也给出了水平圆柱体上方点电源电位的精确解<sup>[141]</sup>,等等。这种通过两个(或更多)供电电极向地下供入直流电流,通过两个测量电极测量大地的电位差响应并计算视电阻率的方法,统称为直流电阻率法。按照采用的工作方法和测量装置的不同,又可进一步分为直流电剖面法,直流电测深法;剖面法中还可细分为偶极剖面法、中间梯度法……,测深法中也可以分为Wenner测深、Schlumberger测深、偶极测深,等等。新中国成立后,在前苏联专家的帮助下,我国物探工作者迅速、全面掌握和大量应用了电阻率法。常用的有联合剖面法和对称四极电测深法,并且对电阻率法的地形影响研究得非常深入。在云南个旧锡矿田,为了查明花岗岩的起伏,曾进行过大面积的,AB超过千米的大极距对称四极电测深,取得很好的地质效果。电阻率法在工程、水文物探中,至今仍然广泛应用。

客观地看,直流电阻率法不失为一种发展历史比较长,理论研究比较充分,工作方法比较完善,应用比较广泛的电法勘探方法。但是,其探测深度与效率之间存在着固有的矛盾。如采用极距小的电极排列(装置),则轻便灵活效率高,但探测深度浅;要获得大的探测深度,必然要用很大的极距。特别是像大深度的电测深,移动一次供电电极,只能获得一个深度的视电阻率,移动的距离比获得的探测深度大好多倍,不可避免地使得装备笨重,效率低,成本高。探测深度与效率之间存在的矛盾成了直流电测深难以逾越的障碍。

## 0.2 激发极化法

早在1920年,Schlumberger就发现了激发极化(induced polarization,简称为IP)现象<sup>[178]</sup>。受仪器精度的限制,当时测量不出微弱的IP信号,使得这一发现无人问津达15年之久。后来B. H. Дахнов(1941)进行了深入的研究,主要用在石油测井方面<sup>[135]</sup>。第二次世界大战以后,国际格局由军事对抗转为战后的经济恢复,对矿物资源的巨大需求刺激了电法勘探的发展。特别是

H. O. Seigel (1949) 发现, 浸染型硫化矿的 IP 效应相当可观, 激发极化不但可以找致密块状的金属矿, 还能够找浸染型硫化矿<sup>[181]</sup>。这使得 20 世纪 50—60 年代激发极化 (IP) 法得到了长足的发展。由于电子导体的 IP 效应比离子导体大很多, IP 法在一定程度上能够克服其他电法的多解性 (虽然尚不能完全克服), 大大拓展了电法勘探法的应用范围。所以 20 世纪 50—60 年代 IP 法发展很快, 成为最常用的地球物理方法之一。1958 年, 柯马洛夫作为年轻有为的苏联专家来中国讲学, 带来了时间域激电法。在我国激发极化法的研究和推广应用, 张赛珍先生、傅良魁先生等都是开拓者。

IP 法在发展中分为两大分支。一支是以 H. O. Seigel 和 B. A. Комаров<sup>[207]</sup> 等为代表的时间域激电, 另一支是 J. Wait 首创的变频激电<sup>[196]</sup>, 在双频激电发明以前, 频率域激电中主要是用变频激电法。

时间域激电法要求在断开激励电流之后, 单独测量激电效应产生的二次电位。二次电位微弱, 只有加大激励电流, 才能使二次电位达到可以准确测量的程度。故时间域激电存在需要供电的电流大, 装备笨重等先天不足。

变频激电法也存在固有的缺点。J. Wait 发明的、传统的变频激电法需要逐次改变频率, 一个一个频率地供电和测量, 精度和效率都很低, 抗干扰能力差。美国的 K. Zonge 提出了奇次谐波法, 并拥有专利, 比起变频法来有所进步<sup>[205]</sup>。虽然奇次谐波法能够一次供电进行多个频率谐波的测量, 但谐波强度随谐波次数成反比地衰减, 而且谐波频率分布也不均匀。奇次谐波法并未推广开来, 实际上在野外仍以采用变频法为主。

本书著者从实践中发现, 变频激电法的毛病, 根源在“变频”二字。因为要改变频率, 不得不分次观测, 降低了效率和精度; 由于要变频, 必然增加了发送—接收之间的联系; 为了保证两次观测的条件一致, 就必须进行电流的“归一化”; 也因为要变频, 两次观测受到的干扰不相同, 观测精度难以提高。要克服变频激电法的缺点, 必须抛弃“变频”二字。可不可以把两种频率的电流合成起来, 形成双频组合电流, 同时供入地下, 一次性地同时接收两种频率的信号呢? 查阅了大量的资料, 进行过很多次实验, 经过严格的计算和精心的设计, 双频激电法 (DFIP) 和与之配套的双频激电仪终于在 20 世纪 60—70 年代得以诞生<sup>[23]</sup>。双频激电法将两种不同频率的矩形电流巧妙地组成双频合成电流供入地下, 再加上其他一些技术措施, 成功地克服了变频激电、时间域激电的诸多不足, 成为当前频率域激电发展的方向之一, 在中国以及世界上不少国家得到了广泛的应用, 找到了一大批不同类型的金属矿。<sup>[20]</sup>

### 0.3 电 磁 法

1917 年, 美国工程师 Harry W. Conklin 提出了电磁感应法并获得专利。

1925年 Sundberg 用该法取得了找矿效果<sup>[191]</sup>。而 A. Lundberg 1919—1922 的著作奠定了交流电法的基础<sup>[170]</sup>。在发展中,电磁法又派生出许多分支,如感应法、强度法,等等。这些方法都曾经取得一定的效果,主要因为勘探深度不大以及异常多解性等,它们都没能成为电磁法的主流。

最早认识到大地电流存在的是格林尼治天文台的 Charls Mateucci (1867)<sup>[198]</sup>,但直到 1934 年才由 Conrad Schlumberger 实现了该法的商业应用<sup>[179]</sup>。实际上该方法的根源还可以上溯到 1908 年 Van Bemmelen 的工作<sup>[195]</sup>。

现代意义上的大地电磁法 (MT) 是建立在前苏联的 А. Тихонов (1950)<sup>[194]</sup> 和法国的 Carniard (1953)<sup>[134]</sup> 分别独立地提出来的原理基础之上。或许由于当年交流的不便 (东西两方处于冷战时期),西方地球物理学界对 А. Тихонов 的论文知之甚少,便把大地电磁法获得的视电阻率命名为“卡尼亚 (Carniard) 电阻率”。这一命名一直沿用至今。

其实,在 А. Тихонов 和 Carniard 的论文发表之前,人们已经在测量和利用天然电磁场,主要是测量天然电场,用来划分明显的构造,然而无法计算出视电阻率。直到 А. Тихонов 和 Carniard 的论文发表之后,才形成了大地电磁法视电阻率的概念。所以他二人是大地电磁法的奠基人,在他们的文章发表之后,很快发明了同时测量电场与磁场的大地电磁仪,理论研究获得很快发展,从正演到反演形成了大地电磁场的理论体系。由于大地电磁法的探测深度大,实际应用也发展很快。20 世纪 50—70 年代是大地电磁法发展的黄金时期,Keeva Vozoff 于 1986 年将大地电磁法的代表性文章编辑成 *Magnetotelluric Method* 一书出版<sup>[165]</sup>,可以说这是大地电磁法的里程碑之作。除了专门的大地电磁仪之外,Zonge 公司和凤凰公司都将大地电磁的功能加入了它们的仪器中。我国的刘国栋先生等最早研制成功大地电磁仪,并进行了推广应用。

大地电磁 (MT) 法具有利用天然场源、探测深度大、采用平面波理论阻抗形式简洁和解释简单等一系列特点,在大深度探测 (如地球深部构造和油气勘查) 方面具有独特的优势,这使得它在不长的时间便风靡全球。

然而,大地电磁法有两个固有的缺点,那就是信号微弱,而且是随机的。这就使得观测精度很低,为了提高精度,不得不在测量中对数据多次叠加。而这又使得测量的速度非常之慢。从而,不得不采用很稀的测点密度,频点也不能取得太密,其结果就是垂直分辨率和水平分辨率都很低。尽管如此,由于没有另外一种电磁法的探测深度能达到大地电磁法的深度,人们不得不姑息、容忍它上述的严重缺点,而仰仗它勘探深度大的优点,继续使用它。

多伦多大学的博士生 Myron Goldtein,在导师 D. W. Strangway 的指导下,于 1971 年写了一篇很好的博士论文<sup>[143,144]</sup>,对大地电磁法进行改进。他以人

工场源代替天然场源，在距离场源很远的地方（远区）电磁波接近平面波，他把均匀大地上电偶极子场源的电磁场表达式加以简化，取任意一组正交的电磁分量之比，从而也得到了卡尼亚电阻率表达式。

Goldstein 的成果在地球物理勘探界引起了极大的反响，很快就成为一种新的电法勘探方法，风行全世界，它被定名为“Control Source Audio Magnetotellurics”即“可控源音频大地电磁法”，缩写为 CSAMT。其特点有三：一是用人工场源；二是主要使用音频频率；三是仍用卡尼亚公式计算视电阻率。

与 MT 法相比，CSAMT 法使用人工场源，克服了 MT 法场源随机性的缺点，信号强度也比 MT 法大为提高。除了探测深度较小之外，它的工作效率、精度以及纵向和横向分辨率都有明显提高。30 多年来，该法在金属矿、地热以及水文、环境等领域得到了广泛的应用，成为受人欢迎的一种地球物理方法。

CSAMT 法也有它固有的缺点。首先是，它所沿用的 MT 法的卡尼亚公式要求在“远区”进行测量，达不到远区该公式便不成立。MT 法利用高空电离层中的电流以及赤道上空的雷电作为场源，在地面进行测量，场源与观测点的距离很容易满足“远区”的条件。CSAMT 法的人工场源布置在地面，在距离场源数千米到数十千米的地方进行测量。与 MT 法相比，其采用的收发距就小得多了。CSAMT 法仍然按照卡尼亚公式计算视电阻率，相当于人为地丢掉了许多代表非远区特点的高次项，引入了不小的人为误差，丧失了原本具有的信号强度大、观测精度高的优势。其次是，CSAMT 法发送的能量很难与天然场相比，探测深度比 MT 法相差很远。最后是，CSAMT 法因袭变频法的做法，依旧一个一个频率地逐次发送和接收，效率仍然受到很大限制，而且各频率之间的相对精度难以提高。

比 CSAMT 法提出略早，1969 年法国地质调查局的 J. Duroux 发表了名为 *PRINCIPE DE MISE EN CEUVRE DU SONDAGE ELECTROMAGNETIQUE MELOS TECHNO* 的论文<sup>[139]</sup>，提出了“磁偶源频率测深法”，又称为 MELOS 方法。MELOS 方法提出的初衷，也是为了克服大地电磁法场源的随机性和信号微弱的缺点。MELOS 方法也是对 MT 法的一种改进。但是 MELOS 方法选择的技术路线与 CSAMT 法不同。CSAMT 法除了采用人工场源以外，其他的做法，如远区测量、测一对正交的电分量、磁分量以及用卡尼亚公式提取视电阻率等一整套做法，基本上是沿用 MT 法的。MELOS 的做法与 CSAMT 法很不相同。首先，它突破了远区测量的限制，把观测的区域扩大到了中区，这一方面大大拓展了人工源电磁法的有效范围，一方面大大提高了观测到的信号强度，是一个不错的主意。其次，它打破了必须从一对正交的电分量、磁分量仿照 MT 法用卡尼亚公式提取视电阻率的做法，单测一个电分量或磁分量也能得到视电阻

率。在野外少测一个分量，本来是可以简化仪器装备，提高效率的。可惜的是，非远区（在频率测深中称为中远区）的电磁场表达式的级数展开中，存在一些含有超越函数甚至特殊函数的高次项，当时找不到一种简单的方式从测量结果中反算出地下的视电阻率。J. Duroux 只好采取校正的办法，通过校正系数把中远区的结果改正到远区去。这样一来最终没能摆脱远区测量的窠臼。而为了取得校正系数，又必须至少同时测量两个正交的磁分量。这样把只测一个分量的优势也丧失掉了。当年电子计算机尚未普及到现在的水平，J. Duroux 没有找到本书提出的电子计算机编程迭代反演的办法。从克服 MT 法信号微弱以及采用卡尼亚公式要求测量一对正交电、磁分量的缺点出发，最后又回到了远区测量多个分量的起点，MELOS 方法没能比 CSAMT 法获得更大的推广，不能不说是一件憾事。

除了 CSAMT 法和 MELOS 方法之外，还有一种称为“频率测深法”的人工场源频率域电磁测深方法。频率测深方法源自前苏联，煤炭科学研究总院西安分院率先在我国开展频率测深方法，在理论上进行了全面深入的研究，研制了仪器，开展了大量的野外工作，取得了良好的地质效果。它利用接地的水平电流源或者不接地回线形成的垂直磁偶源作为场源，测量电场分量或者磁场的分量。测量方式可以有多种不同的组合，而在实际工作中主要是采用接地的水平电流源（AB）和测量  $M$ 、 $N$  两点之间电位差的 AB - MN 方式。频率测深法要求在远区接收，此时  $|kr| \gg 1$ ，将偶极子场简化后，便可以得到视电阻率的表达式。频率测深法在野外是场源（AB）和接收机（MN）二者同时移动，在每个测点上测得不同频率的视电阻率进行测深，其工作效率低，也未能得到很好推广。

瞬变电磁法（transient electromagnetic method, TEM）是时间域电磁法，在俄罗斯称为电磁场建立法，简称“建场法”，是当前比较流行的人工源电磁法的另一个分支。与 CSAMT 法不同的是，它是在断电以后测量逐渐消失的二次磁场及其时间导数，以电磁信号传播历经的时间来评价地下的电性分布，避开了强大的一次场，因而不需要像 CSAMT 法那样在远区测量；也由于它是测二次磁场，信号很微弱，为了获得足够的信噪比，不得不加大供电电流，使得它的装置笨重，效率难以提高。

不难看出，现在的人工源电法勘探方法，不论是 CSAMT、MELOS、频率测深法还是 TEM，抑或是变频 IP，都存在某些不足。CSAMT 或者变频 IP，每次只能采集 1 个频率的信息；CSAMT 还需要在远区测量相互正交的电分量、磁分量，效率较低；用奇次谐波方案虽然一次能够获得多个频率的信息，但谐波次数越高，信号越微弱，观测越困难，误差大。TEM 虽然可以在近区测量，但二次场信号微弱，加大供电电流又与装备轻便化的要求相矛盾。

## 0.4 广域电磁法

广域电磁法是相对于传统的可控源音频大地电磁 (CSAMT) 法和 MELOS 方法提出来的。CSAMT 法采用人工场源, 克服了 MT 法场源的随机性和信号微弱的缺点。但是它沿用在远区测量一对正交电分量、磁分量, 按远区近似公式计算视电阻率的做法, 又限制了它的适用范围。远区测量的信号微弱, 背离了采用人工源使信号强大的初衷; 如果在近一些的地方测量, 确实能增大信号强度, 可是远区近似公式又难以成立 (略去了不可略去的高次项, 牺牲了精度), 出现了新的矛盾。

MELOS 方法突破了“远区”的限制, 大大拓展了频率域电磁法的观测范围。与 CSAMT 法相比, 它本来是可以取得一定优势的, 但是它把非远区的测量结果“校正”到远区去的做法, 付出了增加野外和室内工作量的代价, 又回到了远区的老路, 有点得不偿失。

笔者提出的广域电磁法, 继承了 CSAMT 法使用人工场源克服场源随机性的优点, 也继承了 MELOS 方法非远区测量的优势; 摒弃了 CSAMT 法远区信号微弱的劣势, 扩展了观测适用的范围, 也摒弃了 MELOS 方法的校正办法, 保留了计算公式中的高次项; 既不是沿用卡尼亚公式, 也不是把非远区校正到远区, 而是用适合于全域的公式计算视电阻率, 大大拓展了人工源电磁法的观测范围, 提高了观测速度、精度和野外效率。广域电磁法和伪随机信号电法结合起来, 形成了独具特色的一种新的电法勘探方法。

广域电磁法的出发点, 是突破 CSAMT 法远区测量的限制, 把提取视电阻率的观测范围扩展到更广的区域。而突破“远区”的束缚, 关键是要找到一种不同于卡尼亚公式的提取视电阻率的方法。因为不在远区, 卡尼亚公式是不成立的。

研究和分析电磁场的表达式不难发现, 电磁场的任何一个分量的解析表达式中, 都含有介质的电阻率因素。在场的任何地方测量场的任何一个分量都可以提取这些介质的视电阻率, 并不一定要测量两个相互正交的电、磁分量。只是不同分量采用的公式互不相同, 对电阻率变化的敏感程度也不一样。经过比较, 笔者认为测量水平电偶极源产生的电场  $E_x$  较为实用。

脱离远区之后, 卡尼亚公式不再适用, 必须采用适合非远区的精确公式。精确公式比卡尼亚公式复杂, 含有超越函数甚至特殊函数, 用一般的代数方法无法解出其中未知的视电阻率。对此, 笔者提出采用计算机迭代的方法提取视电阻率。

广域电磁法的要点是: ①定义了“广域视电阻率”, 广域视电阻率是不作



简化的视电阻率；②只测量电磁场的一个分量；③可以在广大的、不局限于远区的区域进行观测。该法形成了一整套与 CSAMT 法以及 MELOS 方法不同的、我国自主研发的、新的频率域电法勘探方法。

## 0.5 $a_k^p$ 序列伪随机信号电法

$a_k^p$  序列伪随机信号电法勘探，是笔者于 1982 年提出、21 世纪初进一步完善的一类电法勘探方法。这一方法是在双频激发极化法（dual frequency induced polarization method）（简称双频激电，DFIP）的基础上提出来的。双频激电问世以前，变频激电一次只能获得一个频率的地电信息，双频激电一次能够测量两个频率数据，从而提取到 IP 信息。就发现 IP 异常，寻找矿产资源和解决地质问题来说，双频激电法一直是一种特别轻便，观测速度快、精度高、抗干扰能力强的激电方法。虽然它的面世已经 30 多年，现在仍然是应用越来越广的一种激电方法。双频激电除了可以在工作区选定一对频率作为主频率外，还可以在发现的异常上，测量多组双频以获取 IP 的频谱信息，进行矿与非矿异常的区分。

然而如果能一次同时获得多个频率的信息，不但能更快地测量激电频谱，而且，同时测量多个频率电场/磁场的技术还可以使电磁测深的速度大大加快，各相邻频率的相对精度大大提高。因此，在发明双频激电之后，笔者就一直寻求同时发送多个频率的电流，同时接收多个频率的电位差（包括电位差的振幅、相位、实分量和虚分量，或者其中之一或二）的理论和方法。 $a_k^p$  序列伪随机信号电法便是在这种背景下提出来的。

从傅里叶理论得到启发，经过多年的探索和实践，笔者发现，通过一定的数学方法，能够构造出含有若干个主频率的电流波形。该波形中这些主频率的振幅彼此相近，分布合理（在频率为对数的坐标中各主频等距离分布），这种波形虽然貌似杂乱无章，实则具有内在规律，称之为伪随机信号电流波形。笔者提出了构造这种波形电流的数学方法，即三元素加法群中的自封闭加法，以及运用这种加法构造出的含有  $k$  个主频率成分的  $a_k^p$  序列伪随机信号编码。

$a_k^p$  序列伪随机信号电法勘探包含了两类不同的电法勘探方法，其一是“ $a_k^p$  序列伪随机信号激电法”，其二是“ $a_k^p$  序列伪随机信号电磁法”。 $a_k^p$  序列伪随机信号激电法以岩石、矿石的激发极化性质的差异为基础，以发现和评价地下极化体为目标，工作在低频段（0.01 ~ 10 Hz），激励和采集的主要是 IP 信息。 $a_k^p$  序列伪随机信号电磁法，以岩石、矿石的电阻率的差异为基础，以发现地下电阻率不均匀体（层）为目标，为了在不同的地电条件下，探测需