

相关辨识谱激电法

李 梅 魏文博 仇立山 郝凯学 罗维斌 著

地质出版社

相关辨识谱激电法

李 梅 魏文博 仇立山 郝凯学 罗维斌 著



地质出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

相关辨识谱激电法 / 李梅等著. —北京: 地质出版社, 2015. 11

ISBN 978 - 7 - 116 - 09465 - 9

I. ①相… II. ①李… III. ①相关辨识 - 激发极化法
IV. ①P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 254179 号

责任编辑: 孙亚芸

责任校对: 关风云

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010)66554528 (邮购部); (010)66554633 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010)66554686

印 刷: 北京地大天成印务有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 14.75

字 数: 360 千字

版 次: 2015 年 11 月北京第 1 版

印 次: 2015 年 11 月北京第 1 次印刷

定 价: 48.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 09465 - 9

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

我国是人口大国，人们的生活水平不断提高，对矿产资源尤其是金属矿产的需求日益增长，这也使得金属尤其是贵金属矿藏的勘探需求迅速增长。在寻找金属矿藏方面，谱激电法是常用的勘探方法。它是利用岩矿石的激发极化效应，通过测量大地的视电阻率或视复电阻率谱，依据获得的谱参数进行电性异常评价，以达到勘探的目的。由于金属矿石的激发极化效应明显，因此，激电法对金、银、铜、铅、锌、锡、硫铁、钼等矿化有比较好的找矿效果。

经过数十年的发展，谱激电法已经有了比较广泛的应用。常规的谱激电法是通过发送多种频率的正弦波，逐一观测激发极化效应。这种方法的一个最大问题就是多次测量导致生产效率低、勘探成本高。由于多次测量需要在不同时段进行，而不同时间的环境变化使多次测量的结果受到较大影响。此外，由于是宽频谱测量，噪声干扰也是一个束缚其发展的重要因素。常规的抑制噪声的方法是增大供电电流，以提高信噪比，但这势必大大增加能耗，增加勘探难度和成本。

当地下介质中的电流稳定且电流密度足够小时，该地电系统可以看成是线性时不变系统，因此地球物理勘探问题便转换为系统辨识问题。将地下介质看作待辨识的系统，通过电极向地下供入伪随机电流信号，同时在地表接收通过大地系统的响应信号，利用伪随机相关辨识技术可以得到地下介质的传递函数。因为输入为电流，测量结果为电压，因此该传递函数即为地下介质的复阻抗。这实质是通信系统中伪随机扩频技术与自动控制中系统辨识技术在地球物理勘探中的应用。鉴于伪随机相关辨识技术的高效率与强压制随机噪声能力，该方法将有效地解决目前谱激电法中存在的噪声干扰和效率问题，因而具有很好的发展前景。

相关辨识在地球物理中的应用在国内外已经有了一定的研究基础。从可查找的文献来看，最早提出将伪随机相关辨识技术应用于地球物理的是 P. M. Duncan，他在 1980 年的 *The Development and Applications of a Wide Band Electromagnetic Sounding System Using a Pseudo-noise Source* 一文中介绍了伪随机相关辨识电磁法，并成功地完成了对地下介质的勘探，达到了预期效果，但可能由于电子技术工艺及水

平限制了仪器的性能,导致该方法的应用受到影响。此后,国外的 MTEM 勘探小组进一步发展了伪随机电磁法,提出了使用反卷积获得时域冲激响应,并给出了时域冲激响应和视电阻率关系的理论公式 $\rho = \frac{\mu r^2}{10t_{\text{peak}}}$,采用最新的技术和工艺生产了先进的发送接收设备,其在法国实际勘探中获得了良好的勘探效果。这里需要说明的是,其核心是使用反卷积,虽然也是系统辨识技术,但不是本书介绍的相关辨识技术,而且相关辨识技术没有反卷积中的诸如病态问题等信号处理难题。总体来讲,国外的 P. M. Duncan 和 MTEM 成功地将伪随机序列和系统辨识方法应用到了电磁法中,并收到了良好的勘探效果。Rammohan Prasad 等于 2010 年公开了一项谱激电法专利“Process and device for measurement of spectral induced polarization response using pseudo random binary sequence current source”。从专利内容来看,其提出了相关辨识谱激电理论,但没有具体的应用方案及地球物理参数获取方法和反演方法。

国内的相关研究开展比较晚,从 2006 年以后才有了相关论文的出现。其中,赵壁如等在《PS100 型 IP 到端可控源高精度大地电测仪系统——CDMA 技术首次在地电阻率测量中的应用》一文中首次将伪随机信号引入地球物理勘探,并试制了样机。近期罗先中等在“KGR-1 抗干扰电法仪器研制成果”中展示了使用过采样技术的基于伪随机信号的抗干扰电法仪器。中国地质大学(武汉)刘义国等在《 m 序列在电法勘探上的应用初探》中提出了利用伪随机信号 m 序列进行直流电阻率法勘探的设想,并试制了直流电阻率接收机。赵壁如、罗先中等成功地将伪随机相关辨识应用到了地球物理电阻率法中,并试制了相关仪器,获得了良好的勘探效果。罗维斌、李飞等致力于研究相关辨识技术在地球物理勘探中的应用,其中李飞等在 WDD-1 型伪随机多功能发送机的基础上实现了逆重复 m 序列信号的产生,并验证了 GPS 能够满足相关辨识的相位观测要求。

需要说明的是,中南大学何继善院士等于 20 世纪 80 年代初期提出了双频激电法及伪随机多频观测方法,并试制了相关发送机和接收机。何继善院士展示了将数字信号处理的理论和方法应用到激电法中来提高抗噪声性能和工作效率的一种新思想。但双频激电法一次只有两个频率点信息,伪随机多频虽然一次可测得几个频率(如其场源是 2^n 系列信号,其频谱是 n 条高度接近的谱线,但一般的硬件技术目前只能产生 $n=13$ 的伪随机多频信号),但是频点数还是有限。何院士的伪随机多频信号和本书中提到的伪随机信号不同。

笔者从理论、仿真实验、水槽实验和仪器试制等方面,较为系统地研究论证了伪随机相关辨识谱激电法理论和方法。经过不断的坚持和努力,该理论越来越多地为地球物理学专家所接受,笔者也因此获国家自然科学基金资助。本书正是在国家自然科学基金“相关辨识技术在谱激电中的应用研究”(资助号:41374185)和中国地质大学(北京)中央高校基本科研业务费优秀教师基金“伪随机多功能电法接收机研制”(资助号:2652013112)的支持下出版的。

本书一共包含7章。第1至3章主要是一些相关理论及推导。第1章作为本书的相关背景,详细介绍了相关辨识的概况、研究意义、研究现状、研究方法与技术路线等。第2章详细阐述了相关辨识方法的理论。第3章详细介绍了相关辨识方法的仿真研究。第4章主要介绍相关辨识谱激电法及地电参数反演。第5章介绍了包括发送机和接收机的相关辨识电法仪器设计。第6章是使用电路模拟和水槽实验等方法对相关辨识谱激电法的验证,也积累了相关实验方法、仪器设计等方面的改进方案及经验。第7章主要总结了研究的结果及对未来的展望。

本书的写作完成,要感谢邓明老师、金胜老师、景建恩老师、谭捍东老师、叶高峰老师、王猛老师、陈凯老师的支持,感谢他们提出的宝贵意见。感谢地球物理仪器专家陈儒军老师在仪器研发方面的很多有益建议。另外,感谢邢玉川、陈驰、刘景贤、甄晓丹、李佳澳、高蓟伟、魏高荣、邢开颜、明舒晴等同学的工作,他们协助解决了一些课题研究过程中出现的问题。最后,感谢在没有项目支持时美国国家仪器公司侯涛、刘洋、田砾、厉伟以及很多没有记住姓名的技术支持工程师的技术支持及无偿提供的硬件,他们对研究工作提供了支持和帮助。

由于作者水平有限,相关辨识谱激电法也尚未成熟,书中难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

李 梅

2015年8月于北京

目 录

前 言

1 绪论	(1)
1.1 研究背景与研究意义	(1)
1.2 研究现状	(4)
1.2.1 伪随机多频激电法的研究现状	(5)
1.2.2 谱激电法的研究现状	(6)
1.2.3 相关辨识法在电法勘探中应用的研究现状	(9)
1.3 研究方法与技术路线	(13)
1.3.1 研究方法	(13)
1.3.2 技术路线	(14)
1.3.3 本书的主要创新点	(16)
2 相关辨识法	(17)
2.1 系统辨识	(18)
2.1.1 系统辨识的基本概念	(18)
2.1.2 系统辨识方法	(19)
2.1.3 系统辨识的典型信号源	(20)
2.1.4 系统辨识中常用的误差准则	(21)
2.2 相关辨识原理	(21)
2.2.1 相关辨识模型	(22)
2.2.2 伪随机序列	(23)
2.2.3 伪随机序列的应用领域	(24)
2.3 m 序列及其性质	(32)
2.3.1 m 序列的产生	(32)
2.3.2 m 序列的性质	(34)
2.3.3 m 序列的相关辨识	(37)
2.4 逆重复 m 序列及其性质	(38)
2.4.1 逆重复 m 序列的产生	(39)
2.4.2 逆重复 m 序列的性质	(39)
2.4.3 逆重复 m 序列的相关辨识	(41)
2.5 m 序列参数选择	(41)
2.5.1 码片宽度	(42)
2.5.2 周期长度 N	(46)

2.5.3	重复周期数 q 和信号幅度 $\pm a$	(48)
2.6	提高辨识精度的方法	(49)
2.6.1	计算自相关的模型对比	(49)
2.6.2	在线辨识的优化	(56)
2.7	提高抗噪声性能的方法	(59)
2.7.1	白噪声	(59)
2.7.2	有色噪声	(60)
2.7.3	直流干扰和趋势干扰	(67)
2.7.4	周期干扰	(67)
2.7.5	非线性干扰	(70)
3	相关辨识仿真	(72)
3.1	发送信号源	(72)
3.1.1	m 序列	(72)
3.1.2	逆重复 m 序列	(72)
3.1.3	m 序列和逆重复 m 序列的自相关函数和功率谱	(73)
3.2	待辨识系统	(76)
3.3	噪声源	(77)
3.4	待辨识系统相关辨识结果	(78)
3.4.1	直接辨识与相关辨识的对比	(78)
3.4.2	内插对辨识结果的影响	(80)
3.4.3	参数选择对辨识结果的影响	(81)
3.4.4	噪声对辨识结果的影响	(85)
3.4.5	提高辨识精度的方法仿真	(101)
3.4.6	提高计算效率的仿真	(116)
3.5	观测系统和观测系统辨识结果	(119)
3.6	综合系统和综合系统辨识结果	(120)
3.7	反卷积去除观测系统的影响	(121)
4	相关辨识谱激电法	(123)
4.1	Cole - Cole 模型	(125)
4.2	Cole - Cole 模型的相关辨识	(134)
4.2.1	单 Cole - Cole 模型的辨识结果	(135)
4.2.2	双 Cole - Cole 模型的辨识结果	(135)
4.3	Cole - Cole 模型辨识结果的参数拟合	(139)
4.3.1	阻尼最小二乘法	(139)
4.3.2	Cole - Cole 模型初值的选择	(143)
4.3.3	辨识结果的拟合	(144)
4.4	地电参数的反演	(146)
4.5	地电系统相关辨识方案	(150)
4.5.1	观测方案	(150)

4.5.2	辨识系统参数选择	(151)
4.5.3	由视参数获得真参数	(152)
5	仪器设计	(154)
5.1	电法仪器概述	(154)
5.1.1	电法传感器	(155)
5.1.2	常见电法仪器	(160)
5.1.3	电法仪器发展趋势	(170)
5.2	仪器的总体设计思路	(171)
5.3	发送机的设计方案	(172)
5.3.1	同步装置	(172)
5.3.2	信号生成器	(173)
5.3.3	高压输出模块	(173)
5.4	接收机的设计方案	(182)
5.4.1	$\Sigma - \Delta$ 型 ADC 及过采样技术	(182)
5.4.2	抗混叠技术	(188)
5.4.3	数据采集系统的阻抗匹配	(191)
5.4.4	仪器的架构和原理	(197)
6	室内实验	(205)
6.1	阻容网络实验	(205)
6.1.1	一阶系统	(205)
6.1.2	二阶系统	(209)
6.1.3	Cole - Cole 模型	(211)
6.2	水槽实验	(214)
6.2.1	实验条件与装置	(215)
6.2.2	中间梯度法水槽实验	(215)
6.2.3	偶极 - 偶极阵列水槽实验	(217)
7	研究结论与展望	(221)
	参考文献及资料	(223)

1 绪 论

1.1 研究背景与研究意义

随着国民经济的高速发展,我国对矿产资源的消耗量迅速增长,过去探明的矿床资源储量满足不了日益增长的需求。《全国危机矿山接替资源找矿规划纲要(2004~2010年)》提出要开展危机矿山接替资源找矿工作,决定在有资源潜力和市场需求的矿山周边或深部开展找矿工作,以延长矿山服务年限,强调以矿山外围和深部找矿为主,扩大危机矿山保有储量。

在寻找金属矿产方面,电法勘探(特别是激电法)的应用非常广泛,特别是对金、银、铜、铅、锌、锡、硫铁、钼等矿产有较好的找矿效果。但是由于生产矿山及其附近存在大量的高压输电线和各种用电设施,会产生极其强烈的电磁干扰信号;地下开采坑道内大量的金属管道、车辆轨道和废石渣也都给电法的供电和电场接收造成很大的困难。所有这一切,都影响了电法勘探方法的应用效果,因此电法勘探在解决危机矿山问题时存在严重的噪声干扰(嵇艳鞠等,2005)。

提高探测精度和信噪比的常用举措之一是增加供电电流强度,但这样会增大能耗,也势必使供电设备趋于笨重,在山区甚至无法工作。而传统的探测手段对于解决强噪声问题显得无能为力,通常的滤波算法对于电法中的强噪声达不到需要的去噪效果,因此利用先进的信号与信息处理技术,寻找一种能有效压制噪声的探测方法和手段,成为一个迫在眉睫的问题。

生产矿山附近电磁干扰尽管可能比信号大数倍,但一般是随机性的干扰,干扰出现的时间是随机性的,其强度和持续时间也具有随机性,而相关辨识法是一种可以有效地去除随机噪声干扰的系统辨识方法,在机械、自动化、仪器仪表、认知科学、生物信息学等领域都已经得到广泛的应用,但是在地球物理探测方面却没有得到足够的重视和应用。

其实地球物理问题在某种意义上说也可以看作是一种系统辨识问题:把待勘查的地下介质看成一个待辨识的系统,把伪随机序列(比如 m 序列和逆重复 m 序列)作为激励信号输入系统(可以是电性源或者磁性源),把接收到的电场或磁场时间信号作为系统输出。将系统输出与输入做互相关运算。伪随机序列的自相关函数具有类似冲激函数的形状和性质,因此互相关运算的结果近似为系统的冲激响应。系统叠加的随机噪声由于与输入信号不相关,相关运算后被消减,而系统特性因为与输入信号相关则被保留。因此利用相关运算,在压制随机噪声的同时,辨识得到了系统响应。

辨识出来的冲激响应是系统的时间域响应,变换到频率域即为频率响应。对于一个系统来说,它的特性可以由它的冲激响应或者频率响应完全表征。冲激响应和频率响应不是

传统电法勘探中的概念，但是目前国内外已经有在电法勘探中的成功应用。

因此，怎样把系统辨识的相关理论和方法应用于电法勘探，研究一种具有强抗干扰能力的电法勘探新方法，对于解决矿山危机问题具有重要意义。

本书的研究目标是：针对激发极化法中强噪声问题，采用相关辨识技术，对用单个和两个 Cole - Cole 模型表示的地下简单激电异常体，利用理论推导和仿真方法验证相关辨识技术在激发极化法中应用的可行性和勘探效果，为后续的激发极化相关辨识探测方法的建立、仪器的研发奠定理论基础。

激发极化相关辨识探测方法的基本思路是：采用常规传导类电阻率法的技术装置，将伪随机电流信号作为地下被探测系统的输入，在地面测量通过地下介质后的电压随时间的变化，通过相关辨识算法，压制叠加的随机噪声，得到地下被探测系统的时域冲激响应，把冲激响应变换到频域就是被探测系统的频谱特性（复阻抗谱）。可以利用谱激电法（复电阻率法）的理论反演 Cole - Cole 模型的 4 个参数：零频电阻率 ρ_0 ，极限极化率（充电率） m ，频率相关系数 c ，时间常数 τ 。如果考虑利用电磁耦合响应，用两个 Cole - Cole 模型的乘积分别表示地下介质的激电效应和电磁效应，那么反演就可以得到更多的参数。

由于只需一次输入就可以得到一条复电阻率曲线，因此这是一种时间域谱激电方法。而通常所说的时域谱激电法是在正负相间的脉冲串激发条件下，将实测衰减曲线与理论衰减曲线拟合，所以本书所述的方法是一种新的时间域谱激电法。

本方法的主要工作是：首先，通过正演，得到简单地质体模型的冲激响应和频率响应；其次，利用基于虚拟仪器技术的仿真，利用相关辨识法辨识得到该模型的冲激响应和频率响应；最后，将频率响应也就是复电阻率谱反演得到该地质体的 Cole - Cole 参数。

本书主要完成以下内容：

1) 理论研究：①选择最佳的伪随机序列，包括选择适用于电法勘探的伪随机序列码型，以及选择序列的周期长度、发送周期数以及脉冲片宽度；②抗噪性能的研究，相关辨识法具有良好的抗随机噪声的能力，但是对于工频噪声以及与我们选择的伪随机信号具有一定相关性的噪声，怎样进行相应的处理以提高信噪比，仍然是需要研究的内容；③相关辨识算法研究。

2) 仿真实现：①仿真实现相关辨识算法；②最佳伪随机序列参数的选择用仿真的方法进行验证；③验证不同噪声的去噪性能；④Cole - Cole 模型的正反演。

3) 设计和实现发送机的信号发生模块和接收机。接收机采用 ARM 作为主控单元，DSP + 24 位 AD 实现信号的测量与处理，大规模可编程逻辑器件 FPGA 完成本地伪随机信号的发生和 GPS 同步。

4) 阻容电路实验和水槽实验。通过电路模拟实验，验证仪器的性能。用隔离系数 $n = 1、2、3、4、5、6、7、8、9$ 的偶极装置进行水槽实验，初步验证方法的可行性。

激发极化法，简称激电法（Induced Polarization Methods, IP），是寻找金属矿的重要方法之一。时间域激电法设备笨重，野外工作成本高，应用不方便。频率域激电法轻便、抗干扰能力相对较强，但是其中变频法每次只能测量一个频率，工作效率低，精度不高，信息量少，电磁耦合效应的影响大（何继善，2006）；双频激电法只是测量两个频率的电位差，不能提供地下介质的时间常数等信息；相位激电法装置简单、效率高、成本低，但是提供的信息量少（刘春明，2006）；伪随机多频激电法一次同时发送和接收多个主频率

的信号,大大提高了工作效率,但是每次发送和接收的频率仍然较少;复电阻率法(也称 CR 法)或者频谱激电法(简称 SIP)能较好地分离、提取激电效应和电磁效应,克服了一般激电法信息量少以及不能满足电磁耦合校正和评价激电异常要求的缺点,但是生产效率低,限制了它的推广应用。通常的时间域谱激电法只需测量一次衰减过程,因此效率高、成本低,但是操作和计算反演却是不易,在理论上也还有很多亟待解决的问题(刘崧,1998)。

本书采用的相关辨识技术,只需发送一次伪随机序列就可以得到一条比较完整的谱线,与逐个频率进行频谱测量的方法相比,这种时间域测量可以极大地提高生产效率和降低成本。而由于采用伪随机信号进行相关辨识,抗随机噪声能力强,精度高。最后对得到的复电阻率谱采用与频率域谱激电法一样的反演和解释方法,反演方法简单、成熟,可以得到多个的激电参数和电磁参数,所以这是一个广频谱的时间域多参数精细激电探测方法。

本书将对相关辨识技术在谱激电中应用的理论和方法展开研究,形成一个体系化的观测方案和数据处理方法,为方法的实用化奠定基础,为研制抗干扰能力强、轻便、高效的多功能电法仪器提供方案,对研发具有我国自主知识产权的电法勘探仪器,改变我国电法勘探大量依赖进口仪器的现状具有重要意义。该方法具有以下特点:

(1) 生产效率高

采用相关辨识技术,只需发送一次伪随机序列就可以得到一条复电阻率谱,通过改变伪随机序列周期和时钟周期得到需要有效谱线数和有效频谱宽度,而在有效频带内谱线的强度是基本均匀的。与逐个频点的变频法甚至多频激电法相比,这种方法可以提高生产效率并降低成本。

(2) 抗噪声能力强

由于相关运算可以压制随机噪声,所以抗噪声能力强,对发送机功率要求低,发送机可以做得更轻便。

(3) 信息量丰富

相关辨识得到的频率响应经过简单的推导就是复电阻率谱,因此采用频率域谱激电法的反演和解释方法。利用双 Cole - Cole 模型可以得到多个激电参数和电磁参数。由于参数多、信息量丰富,可以较好地解决激电法存在的两个主要问题——激电异常区分和电磁感应耦合问题。

因此,该方法既具有时间域方法的高效率、低成本、操作方便的优点,又具有谱激电法信息丰富、数据处理简单的优点,可以同时满足普查和详查的需要,有望成为固体矿产、油气、地热、地下水、天然气水合物等能源及资源勘查的一种关键技术和方法。

目前,激电法存在的主要问题是容易区分激电异常源性质(刘春明,2006)。在野外勘探时,比较容易发现激电异常,却不能准确判断是矿体还是矿化体引起的异常。实际上,极化率、充电率、激电相位、时间常数等激电参数是介质的各种影响因素的综合反映,不同的参数可能反映某种或某几种影响因素,比如极化率或充电率的大小可以反映极化体的激发极化效应程度,影响它的因素有许多,如电子导电矿物的含量、颗粒大小、形状、孔隙水多少、岩矿石裂隙情况、离子浓度等;影响激电相位大小的因素有电子导电矿

物的含量、颗粒大小、形状、致密程度、连通情况、矿物成分等；时间常数则反映岩石的激发极化效应的时间特性，即充电、放电速度快慢，其影响因素也是多种多样。因此，单靠某一参数来区分激电异常源的性质是不可能的，需要对多种参数（激电参数、电阻率参数等）进行综合分析，这就需要进行多参数精细探测，从而达到对激电异常源的情况更全面、具体地了解。

激电法存在的另一个问题是激电法中的电磁感应耦合问题。谱激电法是在相当宽的频段范围内测量复电阻率幅度谱和相位谱。它的低频段主要反映激电效应，高频段主要反映电磁耦合效应，所以，能较好地分离、提取激电效应和电磁效应（曹中林等，2005）。

本书的研究是为最终实现激发极化相关辨识探测方法奠定理论基础。该方法采用相关辨识技术，只需发送一次伪随机序列就可以得到一条比较完整的频谱响应曲线，与逐个频率进行频谱测量相比，这种时间域测量可以较大地提高生产效率和降低成本。而由于采用伪随机信号进行相关辨识，抗随机噪声能力强，精度高。对得到的复电阻率谱可以采用与频率域谱激电法一样的反演和解释方法，得到多个反映激发极化异常体激电特性的参数；因此，这种采用相关辨识技术的激发极化相关辨识探测方法可以较好地克服目前激电法存在的问题，解决一直困扰电法勘探的噪声问题，提高探测精度和探测效率，对于金属矿勘查具有重要的实用性，有广阔的应用前景，尤其对于解决危机矿山深部及外围找矿问题具有重要意义。

激电法是寻找金属矿的重要方法，而谱激电法由于在去除电磁耦合和提取深埋极化体信息方面取得了较大的进展，本该成为激电法中的主流方法（刘崧，1998），但是由于需要在一个广频范围内一个个频点地进行测量，生产效率低，无法成为普查找矿的手段，因此人们开展了时间域谱激电法的研究。

时间域谱激电法最主要的优势在于可以在单次测量中完成二次场电位差衰减曲线，因此生产效率高、成本低。时间域谱激电法能常规地获得 Cole - Cole 参数，能在激电效应明显的低频进行测量，能使用各种电极装置进行测量，省时又省钱（乔宝强，2009）。但是专家认为时间域谱激电法尚缺乏有说服力的研究成果，尤其在方法的可行性、改进时间域谱激电反演技术、在复杂地电环境里与频率域测量结果进行对比方面还有很多需要研究的问题（刘崧，1988）。

基于相关辨识技术的电法勘探，既具有时间域激电法的高效率和低成本，又具有谱激电信息丰富的特点，而且操作简单、反演方法简便，可以同时满足普查和详查的需要。同时，相关辨识技术带来的最大优势是可以压制随机噪声的影响，解决长期困扰电法勘探的噪声问题。因此，这种基于相关辨识技术的时域谱激电法有望成为解决危机矿山问题的一种关键技术和方法。

1.2 研究现状

本书的创新之处在于将系统辨识中的成熟技术——相关辨识法运用于电法勘探中，并用频谱激电法的方法对所得数据进行处理。目前，虽然已经有一些采用伪随机序列作为发送机信号源的电法勘探方法，它们实际上是把伪随机序列作为一种扩频的方法去除随机噪

声，是对原方法（比如直流电阻率法）的一种改进（如赵璧如的方法和 MTEM 方法），而不是如本书所述得到的是宽频谱的复电阻率曲线。另外，中南大学何继善院士的研究团队研究的伪随机激电法实际上是双频激电法的推广，本质上来说他的伪随机信号只包含少数的几个频率，是一个多频激电法。下面分别介绍伪随机多频激电法和谱激电法的研究现状以及相关辨识法在电法勘探中的应用研究现状。

1.2.1 伪随机多频激电法的研究现状

伪随机多频激电法以 2^n 系列伪随机信号为激励场源信号。该系列信号主要是由 n 个频率不同、幅度基本相同的正弦信号组成，这些频率分布在 2 的等倍频上，这些频率的功率占了信号总平均功率的大部分，其余谐波功率只占信号总平均功率的小部分。根据 n 的取值不同命名为伪随机 n 频波。例如，当 n 取值为 3、5、9、13 时，将所对应的伪随机信号命名为伪随机三频波、伪随机五频波、伪随机九频波和伪随机十三频波， 2^n 系列伪随机信号的名称也因此得来。这个方法是由双频激电法（何继善，2006）发展而来的。

双频激电法是奇次谐波法的一种改进。它是将两个幅度相同、频率不同（一高一低）的电流按一定的相位关系合成为双频电流作为激励源（图 1.1），因此一次可以获取两个频率的电位差。



图 1.1 双频合成电流波形
(据何继善，2006)

双频激电法一次可以获取两个频率的电位差，因此与变频法相比具有装备轻便、工效高、观测精度高、抗干扰能力强等优点；与奇次谐波法相比，它的两个频率成分的强度完全相等（图 1.2），克服了谐波次数越高信号越小的缺点，而且这两个频率的频差可按工作需要人为选取，而奇次谐波法的各谐波频差固定为 $2\omega_0$ 。

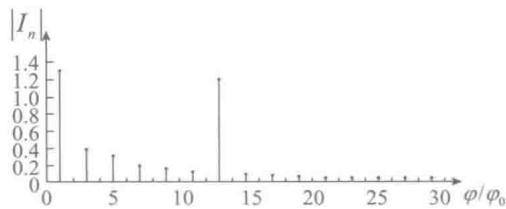


图 1.2 双频电流各成分的振幅谱
(据何继善，2006)

双频法每次供两个频率的电流，测量两个频率的 IP 响应，比起变频法和奇次谐波法而言有了明显的进步。但是一次测量仅能得到两个频点的信息，仍然难以获得较为完整的激电频谱或地电断面激电信息。以双频法为基础的伪随机多频激电法，一次测量能够获得多个频点激电信息，比双频法在测量效率上有了明显的提高和完善（何继善，1994，1998，2007）。

这里所谓的伪随机序列是指 a^n 系列伪随机信号（通常取 $a=2$, n 为整数, 即 2^n 系列伪随机信号）。由于一次观测可以提取 n 个不同频率点的激电响应, 所以 a^n 序列伪随机激电法, 一次能够测量 n 个频点的振幅和相位（或者实分量和虚分量）, 构成较为完整的振幅谱和相位谱（或实谱和虚谱）, 分辨率相比一般方法有明显改善。而且由于频率分布在对数坐标上是均匀的, 因此勘探深度的分布非常合理。

这些伪随机信号的要求是：①包含多个频率的正弦波, 且不同频率正弦波的振幅基本相同；②各个频率的电流正弦波的幅度尽可能大；③各个频率正弦波间的相位关系要尽可能简单, 这样既能同时提供多种频率电流又能有最高的电源利用率, 使供电设备不致太笨重；④各种频率电流正弦波间的频差不能太小, 否则在观测异常幅度时各种频率间的相互干扰较大；⑤各种频率间的频差也不能太大, 这是因为电磁感应耦合效应随频率增加而加强, 若频差太大, 必然使高次谐波的频率较高, 从而使电磁耦合效应增加, 影响激电效应的测量。也不能以降低基频频率（保持频差不变）, 来降低高次谐波频率, 因为频率降低会大大降低测量速度, 从而增加工作成本。因此, 对伪随机信号的各种要求是相互矛盾的, 必须做出最佳设计。双频道和三频道激电法是两种常用且较简单的伪随机激电法。

在双频激电法和伪随机多频激电法的基础上, 何继善的研究团队开发了多种激电仪, 比如双频道数字激电仪（何继善, 1987）、三频激电仪（张友山等, 1995）、伪随机多频激电仪（白宜诚等, 2004；陈儒军, 2003；陈儒军等, 2003a, 2003b）, 并在仪器的研发中与时俱进地采用了先进的电子设计技术, 比如 DSP 技术（汤井田等, 2003）、CPLD 技术（罗维斌等, 2005）等。

由于伪随机多频激电法可以得到多个频率的振幅响应和相位响应（或者实分量和虚分量）, 构成较为完整的振幅谱和相位谱（或实谱和虚谱）, 因此, 何继善的研究团队也在积极开发多参数激电法, 以尽量得到更多有价值的地下介质的信息。比如, 开发了相位法（刘春明, 2006）、多频相位法（何继善等, 2002；柳建新等, 2001）、相对相位法（陈儒军等, 2004；张友山等, 1994）, 以及多参数观测方法和系统（刘春明, 2006；何继善, 1995；鲍光淑等, 1995；崔燕丽, 2002）, 通过振幅、相位（或虚、实分量）的测量, 可计算视电阻率、视幅频率、绝对相位、相对相位等多种参数。

但是伪随机多频激电法得到的谱还是由有限的几个频点构成的, 要得到一个较密集的谱, 也是需要几次测量才能完成的。而利用相关辨识法, 只需一次测量就能得到一个较完整的复电阻率频谱响应, 效率比伪随机多频激电法又高了很多。

1.2.2 谱激电法的研究现状

谱激电法（SIP）又称为复电阻率法（CR）, 是 20 世纪 70 年代发展起来的一种激电法。它利用直流电阻率法的电极装置, 在超低频段上（ $n \times 10^{-2} \sim n \times 10^2$ Hz）做多频视复电阻率测量, 通过视复电阻率谱或激电场的时域衰减曲线, 根据描述岩、矿石的谱参数, 评价电性异常体, 从而解决找矿、找水等地质问题。

20 世纪 40 年代初期, K. S. Cole 和 R. H. Cole 用公式 (1.1) 来描述介电极化效应, 并得到大家的普遍认可, 故人们称这一数学模型为 Cole - Cole 模型。

$$\rho(j\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{1 + (j\omega \tau)^c} \right] \right\} \quad (1.1)$$

式中： ρ_0 为频率为 0 时的电阻率； m 称为极限极化率，也称为充电率，是表征激电异常强度的参数； τ 是时间常数，是表征激电效应频率特性或充放电快慢的时间参数，可以直接用来按结构区分极化体，对于激电强度参数（例如视极化率、视频率散率、视充电率、视激电相位等）没有明显异常的深部矿，利用时间常数却可能找到； c 表征复电阻率随频率变化程度的参数，称为频率相关系数； ω 为角频率。频率相关系数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，频率相关系数也是复电阻率法研究的重要参数（罗延钟等，1992）。

Pelton 等认为，除激电效应外，电磁感应频谱的低频部分也可用 Cole - Cole 模型来描述。因此，当同时存在激电和电磁效应时，实测的视复电阻率谱可表示成两个、三个或多个 Cole - Cole 模型的组合，可以是加法组合或者乘法组合，一般认为乘法组合拟合效果更好。公式（1.2）为乘法组合形式：

$$\rho(j\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m_1 \left[1 - \frac{1}{1 + (j\omega \tau_1)^{c_1}} \right] \right\} \left\{ 1 - m_2 \left[1 - \frac{1}{1 + (j\omega \tau_2)^{c_2}} \right] \right\} \quad (1.2)$$

式中： m_1 、 c_1 、 τ_1 表示激电效应参数； m_2 、 c_2 、 τ_2 表示电磁感应效应的频谱参数。 c_1 的取值范围在 0.1 ~ 0.6 之间， c_2 的取值范围在 0.9 ~ 1.0 之间，根据它们取值范围的不同，可分离激电效应和电磁感应效应。

继 Pelton 和 Zonge 等的论文和报告之后，Brown 以更严格的推导，证明关于电磁感应的模型，即使在均匀大地的情况下也不总是正确的，电磁感应的模型中还应附加项。Dias 对复电阻率频谱的基本数学模型进行了总结，认为除基本 Cole - Cole 模型外，多 Cole - Cole 模型和他提出的 Dias 模型能更好地刻画岩、矿石标本和露头的复电阻率频谱的特点。

关于复电阻率法的物理化学基础，中国地质大学（北京）和中国科学院地质与地球物理研究所的研究取得了不少有意义的成果。他们通过大量的岩、矿石物性测定，印证了 Pelton 等的结果，而且提出了很多新的见解（张赛珍，1984）。从电子导体激发极化的电化学机理出发，研究了各种过电位充、放电特性和频谱特性；建立了面极化和体极化的等效电路和数学模型；在理论上证明了采用 Cole - Cole 模型描述激电复电阻率频谱的合理性（罗延钟等，1988）。在此基础之上对均匀岩、矿石的真时间常数和真频率相关系数的数值做了分析，并且结合实测数据强调指出，不仅可以利用时间常数 τ 而且也能利用频率相关系数 c 按结构区分极化体（罗延钟等，1992）。

对于同时存在激电和电磁感应效应的正演问题，1986 年熊宗厚和罗延钟等利用体积分方法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，并利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做了研究（张辉，2006；徐凯军，2007；彭森，2009）；Flis 讨论了激电效应对于瞬变电磁场的影响。另外，人们也研究了从电磁信号中提取激电信息的方法。曹中林等（2006）研究了激电效应对 MT 电阻率曲线的影响并应用于油气检测。岳安平等（2007）和黄磊（2009）研究了从 CSAMT 信号中提取 IP 信息的方法，苏朱刘等（2009）将两种效应的分离用于油气藏上方的野外观测实验。在所有正演方法中，除基于麦克斯韦方程的

方法,都没有包括电磁感应效应,而电磁感应效应是实际存在的,因此野外频谱激电的测量数据包括电磁感应效应,特别是在频率较高时,电磁感应效应更显著。

Cole - Cole 参数反演方面的研究,都是利用基于 Cole - Cole 模型建立的视谱和真谱参数之间的近似关系式,通过拟合视复电阻率谱来实现的,其存在的问题主要有:

1) 视谱与真谱之间的近似关系还没有一个统一的被大家所公认的复电阻率数学模型。目前已有包括基本 Cole - Cole 模型在内的多个数学模型。模型不同,参数的个数不同,参数的物理意义也不同。例如基本 Cole - Cole 模型有 4 个参数,多 Cole - Cole 模型组合有 7 个参数,Dias 模型有 5 个参数。多 Cole - Cole 模型组合、Dias 模型表现出较基本 Cole - Cole 模型更好的性质,特别是它的高频相位谱。

2) 对电磁感应效应的假设不是非常准确。Brown 等试验认为电磁感应效应等效一个 Cole - Cole 模型和一个附加项,而电磁感应现象不仅与地下异常体性质有关,而且与发射源及接收、发射装置等因素都有关系,因此在复电阻率法中,如果将电磁感应效应应用一个基于 Cole - Cole 模型的简单数学表达式来描述时,很可能造成解释上的偏差。

3) 只能解释一些规则异常体,如层状或椭球体,而且大多都不能反演得到复电阻率参数的几何分布情况,用联合频谱反演的方法虽然可以得到真频谱参数的几何分布情况,但因为其正演时没有考虑电磁感应效应,所以这些反演方法对于解释多维复杂异常体以及异常体复电阻率参数的空间分布情况存在局限性。

Cole - Cole 模型视谱参数的反演方法中,采用最多的是最经典的阻尼最小二乘法,但是由于它存在初值敏感问题,人们也想了很多其他的方法。童茂松研究了模拟退火算法(2006)和遗传算法(2007)在岩石复电阻率频谱模型参数反演中的应用,曹中林等(2005)研究了郭涛算法的应用。非常值得一提的是,阮百尧和罗润林的递推算法(2003)对于基本 Cole - Cole 模型的反演具有很大的优势,它只用 4 个频率的数据,而且与初值无关。复电阻率反演的维数也从一维、二维(蔡军涛,2007)、2.5 维(徐凯军,2007)到三维(张辉,2006)。

谱激电法可以得到很多有意义的参数,效果很好,但是因为需要逐个频率进行频谱测量,生产效率低,成本高,所以没有在生产中得到推广使用并成为常规的方法。理论上讲,供长直流脉冲期间进行总场电压测量的时间域方法和频率域复电阻率测量是等价的,它们之间通过傅氏变换相联系,但是时间域方法可以成倍地提高生产效率和降低成本。因此,人们采用与复电阻率法相同的电极装置,观测稳定的激发电流断开后电磁场分量的瞬变响应(时间谱),从中分别提取和利用激电效应和电磁效应,解决地质找矿问题,从而建立一个新的高效的电法分支方法,称为时间域谱激电法,并在频谱激电法问世不久就开始了时间域谱激电的研究。刘崧(1988)关于时间域谱激电的研究认为时间域谱激电法在其可行性、分辨能力等方面尚缺乏有说服力的研究成果。周安昌等(1992)从如何利用在正负相间脉冲串激发条件下进行激电时间谱分析的可行性入手,探讨了时间谱参数的求取方法和通过对衰减曲线求导等求取参数的技术,提出一套由视谱直接求真参数的反演方法。王绵龄等(1987)研究了时间域激电法在寻找石墨矿中的应用效果。耿雪杰(2006)研究了基于 Powell 算法的时间域激电法反演方法。乔宝强(2009)研究和开发了时间域谱激电仪。但是,这些传统的时间域方法不可避免的问题就是容易受噪声的影响,以及随之而来的装置笨重的问题。