



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属

理论与技术前沿丛书
SERIES OF THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL FRONTIERS OF
NONFERROUS METALS

直流激电反演成像理论与 方法应用

INVERSE THEORY AND METHODOLOGY FOR DIRECT
CURRENT INDUCED POLARIZATION METHOD

刘海飞 柳建新 麻昌英 著

Liu Haifei Liu Jianxin Ma Changying



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

有色金属理论与技术前沿丛书

直流激电反演成像理论与方法应用

INVERSE THEORY AND METHODOLOGY FOR DIRECT CURRENT
INDUCED POLARIZATION METHOD

刘海飞 柳建新 麻昌英 著

Liu Haifei Liu Jianxin Ma Changying



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目 (C I P) 数据

直流激电反演成像理论与方法应用 / 刘海飞, 柳建新, 麻昌英著. --长沙: 中南大学出版社, 2017. 12
ISBN 978 - 7 - 5487 - 3119 - 1

I. ①直… II. ①刘… ②柳… ③麻… III. ①直流—
激发极化法—图像处理—研究 IV. ①P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 327542 号

直流激电反演成像理论与方法应用

ZHILIU JIDIAN FANYAN CHENGXIANG LILUN YU FANGFA YINGYONG

刘海飞 柳建新 麻昌英 著

☐责任编辑 刘小沛

☐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

邮编: 410083

发行科电话: 0731 - 88876770

传真: 0731 - 88710482

☐印 装 湖南众鑫印务有限公司

☐开 本 720 × 1000 1/16 ☐印张 17.75 ☐字数 353 千字

☐版 次 2017 年 12 月第 1 版 ☐2017 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 3119 - 1

☐定 价 95.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

内容简介

Introduction

为了及时总结“资源与灾害探查”湖南省高校创新团队的研究成果，团队负责人柳建新教授组织团队中部分从事电(磁)法和深部地球物理研究的骨干人员，撰写了《地球物理计算中的迭代解法及应用》《直流激电反演成像理论与方法应用》《大地电磁贝叶斯反演方法与理论》《频率域可控源电磁法三维有限元正演》《便携式近地表频率域电磁法仪器及其信号检测》《东昆仑成矿带典型矿床电(磁)响应特征及成矿模式识别》《青藏高原东南缘地面隆升机制的地震学研究》和《青藏高原岩石圈力学强度与深部结构特征》共8本专著，集中反映了团队最新的相关理论与应用研究成果。

目前，直流激电法的应用领域在逐步拓宽，观测空间由地面向井中、坑道及水下等复杂情况发展，致使数据解释难度大、精度低。反演作为直流激电数据处理中的一项核心技术，在直流激电定量解释中起着关键性作用。本书首先综述近些年直流激电反演成像的发展与研究现状，在此基础上系统介绍直流激电法的阵列观测方法、直流激电反演成像的正则化技术、直流激电1D/2D/3D正演模拟和反演成像方法、混合范数下的最优化反演方法以及基于模拟退火和遗传算法的全局混合反演方法。最后介绍直流激电反演软件的设计与研发，以及直流激电反演在矿产资源和工程勘查中的一些应用实例。本书可以为从事地球物理专业的本科生、研究生和科技人员提供参考和借鉴。

作者简介

About the Author

刘海飞 男，汉族，副教授，硕士生导师。1975年9月出生于内蒙古自治区赤峰市，2007年获中南大学地球探测与信息技术专业博士学位，2007年至今在中南大学地球科学与信息物理学院工作，2014年至2015年在挪威科技大学信息技术、数学与电气工程学院访学。目前主要从事电磁法正演模拟与反演成像方面的教学和研究工作，主持国家自然科学基金面上项目2项，教育部博士点基金项目1项，参与国家自然科学基金8项、“863”科技项目1项、中国地质调查局地调专项项目2项。获省部级成果奖3项，软件著作权6项，发表学术论文40余篇，其中SCI、EI、ISTP检索17篇。

柳建新 男，汉族，教授，博士生导师。1962年5月出生于湖南省岳阳市，1979年考入中南矿冶学院应用地球物理专业。现为中南大学地球科学与信息物理学院副院长、新世纪百千万人才工程国家级人选、教育部新世纪优秀人才支撑计划获得者、湖南省“121”人才、“地球探测与信息技术”学科带头人、有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室主任、湖南省第十一届政协常委，兼任国家自然科学基金委员会评审组成员、湖南省地球物理学会第六、第七届理事长、中国地球物理学会第九届理事会常务理事、中国有色金属学会第七届理事会理事、中国有色金属工业协会专家委员会委员、“全国找矿突破战略行动”专家技术指导组专家，中南大学第二届知识分子联谊会理事长。长期从事矿产资源勘探、工程勘察领域的理论与应用研究，在深部隐伏矿产资源精确探测与定位、生产矿山深部地球物理立体填图、地球物理数据高分辨处理与综合解释、工程地球物理勘察等方面具有深入研究并取得了大量研究成果。获国家发明二等奖1项、国家科技进步二等奖1项、国家科技进步三等奖1项，省部级科技进步一等

奖7项、二等奖4项、三等奖2项。申报专利8项,其中4项获得授权。出版专著14本,发表论文240余篇,其中SCI、EI收录112篇。

麻昌英 男,汉族,在读博士。1988年9月出生于广西壮族自治区横县,2012年获长安大学地球物理学专业学士学位,2015年获中南大学地质工程专业硕士学位,2015年至今在中南大学地球科学与信息物理学院地球探测与信息技术专业攻读博士学位。目前主要从事电磁法正演模拟方面研究和电磁法勘查应用工作,主持完成中南大学博士研究生创新性项目1项,参与完成国家自然科学基金2项、中国地质调查局地调专项项目2项。获软件著作权1项,已发表学术论文10余篇,其中SCI、EI、ISTP检索5篇。

学术委员会

Academic Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士

委 员 (按姓氏笔画排序)

于润沧	中国工程院院士	古德生	中国工程院院士
左铁镛	中国工程院院士	刘业翔	中国工程院院士
刘宝琛	中国工程院院士	孙传尧	中国工程院院士
李东英	中国工程院院士	邱定蕃	中国工程院院士
何季麟	中国工程院院士	何继善	中国工程院院士
余永富	中国工程院院士	汪旭光	中国工程院院士
张文海	中国工程院院士	张国成	中国工程院院士
张 懿	中国工程院院士	陈 景	中国工程院院士
金展鹏	中国科学院院士	周克崧	中国工程院院士
周 廉	中国工程院院士	钟 掘	中国工程院院士
黄伯云	中国工程院院士	黄培云	中国工程院院士
屠海令	中国工程院院士	曾苏民	中国工程院院士
戴永年	中国工程院院士		

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

国家出版基金项目
有色金属理论与技术前沿丛书

主 任

罗 涛(教授级高工 中国有色矿业集团有限公司总经理)

副主任

邱冠周(教授 国家“973”项目首席科学家)

陈春阳(教授 中南大学党委常委、副校长)

田红旗(教授 中南大学副校长)

尹飞舟(编审 湖南省新闻出版局副局长)

张 麟(教授级高工 大冶有色金属集团控股有限公司董事长)

执行副主任

王海东 王飞跃

委 员

苏仁进 文援朝 李昌佳 彭超群 谭晓萍

陈灿华 胡业民 史海燕 刘 辉 谭 平

张 曦 周 颖 汪宜晔 易建国 唐立红

李海亮

总序

Preface

当今有色金属已成为决定一个国家经济、科学技术、国防建设等发展的重要物质基础，是提升国家综合实力和保障国家安全的关键性战略资源。作为有色金属生产第一大国，我国在有色金属研究领域，特别是在复杂低品位有色金属资源的开发与利用上取得了长足进展。

我国有色金属工业近 30 年来发展迅速，产量连年居世界首位，有色金属科技在国民经济建设和现代化国防建设中发挥着越来越重要的作用。与此同时，有色金属资源短缺与国民经济发展需求之间的矛盾也日益突出，对国外资源的依赖程度逐年增加，严重影响我国国民经济的健康发展。

随着经济的发展，已探明的优质矿产资源接近枯竭，不仅使我国面临有色金属材料总量供应严重短缺的危机，而且因为“难探、难采、难选、难冶”的复杂低品位矿石资源或二次资源逐步成为主体原料后，对传统的地质、采矿、选矿、冶金、材料、加工、环境等科学技术提出了巨大挑战。资源的低质化将会使我国有色金属工业及相关产业面临生存竞争的危机。我国有色金属工业的发展迫切需要适应我国资源特点的新理论、新技术。系统完整、水平领先和相互融合的金属科技图书的出版，对于提高我国有色金属工业的自主创新能力，促进高效、低耗、无污染、综合利用有色金属资源的新理论与新技术的应用，确保我国有色金属产业的可持续发展，具有重大的推动作用。

作为国家出版基金资助的国家重大出版项目，“有色金属理论与技术前沿丛书”计划出版 100 种图书，涵盖材料、冶金、矿业、地学和机电等学科。丛书的作者荟萃了有色金属研究领域的院士、国家重大科研计划项目的首席科学家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、全国优秀博士论文奖获得者、国家重大人才计划入选者、有色金属大型研究院所及骨干企

业的顶尖专家。

国家出版基金由国家设立，用于鼓励和支持优秀公益性出版项目，代表我国学术出版的最高水平。“有色金属理论与技术前沿丛书”瞄准有色金属研究发展前沿，把握国内外有色金属学科的最新动态，全面、及时、准确地反映有色金属科学与工程技术方面的新理论、新技术和新应用，发掘与采集极富价值的研究成果，具有很高的学术价值。

中南大学出版社长期倾力服务有色金属的图书出版，在“有色金属理论与技术前沿丛书”的策划与出版过程中做了大量极富成效的工作，大力推动了我国有色金属行业优秀科技著作的出版，对高等院校、研究院所及大中型企业的有色金属学科人才培养具有直接而重大的促进作用。

王淀佐

2010年12月

前言

Foreword

直流激电法作为电法勘探的主要分支方法,具有观测装置多、勘探成本低、灵活性强、观测空间广等特点,在金属和非金属矿产、地下水资源、工程与环境等领域被广泛应用,取得了良好的应用效果。近些年,高精度、智能化、多通道、分布式直流激电法仪器得到快速发展,在观测空间、观测形式、布极特点上不再拘泥于常规观测方式,使得数据采集量几倍、几十倍地增加,显然数据中所包含的地下介质结构信息也将成倍增加,这对减少多解性、提高解释精度大有裨益。当然,复杂的观测方式所带来的缺点也是不可回避的,由于无法确定合理的记录点,难于绘制视电阻率和视极化率拟断面图,即使能够绘制拟断面图,但异常埋深、形态畸变严重,定性或半定量解释分析难度增大,只有借助高性能的计算机和高效、可靠的反演处理软件,才能在解释精度和处理速度上达到预期的目的。与此同时,人们对直流激电法的勘探深度和解释精度的要求也在不断提高,解决地质问题时的观测方法、数值模拟和反演成像等环节都缺一不可且具有同等重要的地位。本书将介绍直流激电测深阵列观测方法、高效正演模拟及反演成像理论与方法,旨在进一步推动直流激电法的应用与发展。

常规直流激电测深法采用人工跑极、逐点观测方式,勘探深度由几米至几百米,但观测效率低、采集数据量少。而高密度电阻率法的电极排列一次性布设好后,即可完成自动化数据采集和记录,工作效率高、信息丰富,但勘探深度较浅。本书设计的直流激电测深阵列观测方法是人工跑极和阵列式观测相结合的产物,即供电采用人工跑极、测量采用多通道阵列式观测方式,使勘探深度、数据信息量和工作效率得到兼顾。希望书中介绍的阵列观测方法能起到抛砖引玉的作用,实际应用时现场人员可根据已知地质情况和野外施工条件对观测方法酌情改动和拓展,但目的只有一个,就是尽可能地获取更多的有用异常信息。

直流激电数值模拟主要采用有限差分法和有限元法。为更好地适应野外较为复杂的情况,本书基于电性分块连续模型,系统推演了水平地形和起伏地形条件下的直流激电二维、三维有限元数值模拟方法,并结合算法编写了相关 C++ 程序代码。直流激电测深一维正演模拟采用快速汉克尔变换方法,可以模拟任意供电电极距序列的对称四极激电测深曲线,与数字滤波法[如 $(\lg 10)/6$ 采样间隔]相比,其更适合野外实际情况。通过一些地电模型的模拟算例,检验了书中所介绍的各数值方法的模拟精度和计算效率。

不适定性是反问题的固有特征,它并非仅局限于地球物理反问题,还存在于其他学科的反问题中,如医学、气象学、天文学等。解决此类问题的办法就是将不适定问题转化为适定可解的问题或者说将病态问题转化成良态问题,这种数学实现过程通常称为正则化,目前主要采用 Tikhonov 正则化方法和 Miller 正则化方法,直流激电反演大都采用前者。本书从构建正则化因子、施加约束和改善修正步长等角度探讨了正则化理论与方法,并且将其应用于直流激电一维、二维和三维反问题中。

由于直流激电的数据采集常常受突变噪声的影响,使得数据不再服从高斯分布,如果仍采用常规的最小二乘法反演,容易导致反演不收敛或反演假象。鉴于这种情况,作者提出了混合范数下的最优化反演方法,即根据观测数据品质的优劣,对数据空间和模型空间分别采用不同的范数(L_1 和 L_2 范数)作为测度,以达到压制干扰、突出有用异常的目的。通过对模型反演发现,当数据噪声服从高斯分布或近似服从高斯分布时,数据空间和模型空间基于 L_2 范数的反演效果均较好;当数据噪声服从拉普拉斯分布时,数据空间基于 L_1 范数,模型空间基于 L_2 或 L_1 范数的反演结果较好。所以,选择哪种范数作为数据空间和模型空间测度,需要事先了解数据噪声所满足的分布特征,否则可能得不到满意的反演结果。反演成像是直流激电数据处理和解释的重要技术手段,本书针对直流激电法中一些特定的观测技术,介绍了包括 1D/2D/3D 的直流激电广义线性反演的理论与方法。在此基础上设计并开发了直流激电反演解释软件 IPIInv,最后给出了其在工程和资源勘查中的一些应用实例,以供读者参考和借鉴。

研究完全非线性全局优化反演方法,主要考虑到绝大多数地球物理问题都是多元、非线性函数的极值问题,采用广义线性反演方法容易使反演过程陷入局部极值,这主要由于线性化反演方

法对初始模型的依赖性较强,初始模型的好坏直接影响着反演结果的优劣。幸运的是,对于许多地球物理问题,我们已经有了不少先验知识或信息,这也就是线性化反演方法能够解决许多非线性地球物理问题的重要原因。完全非线性反演方法目前仍属于一门新兴学科,特别是在直流激电反演方面的研究和应用更是少之又少。本书介绍了模拟退火算法和遗传算法的基本理论与方法,在此基础上将它们与单纯形法和鲍尔方向法相结合,给出了四种全局混合优化反演方法,并编制了直流激电测深一维非线性反演程序。通过对几例模型反演发现,完全非线性反演方法需要的正演计算量相当大(几千至几万次正演),并且随模型参数的增加,正演的次数近似呈指数增加,可以想象在直流激电二维、三维反问题上的研究和应用方面还有很多工作要做。书中提供的直流激电测深一维非线性反演程序代码,希望能够为初学者提供有益的参考,为进一步完善和优化算法以及向高维反问题方向拓展奠定基础。

本书主要围绕直流激电的阵列观测方法、数值模拟及反演成像的相关理论与方法展开。全书共分为8章,第1章概述地球物理反演的发展概况和直流激电反演的研究现状;第2章介绍几种适合中深部勘探的直流激电测深二维、三维阵列观测方法;第3章介绍直流激电一维、二维和三维数值模拟的理论算法,并给出相关C++程序代码;第4章从正则化参数的选择、稳定化泛函的构造、施加先验约束及修正迭代步长等方面介绍直流激电广义线性反演的正则化技术;第5章介绍混合范数下的最优化反演方法;第6章介绍几种特定观测方式的直流激电广义线性反演方法,主要包括垂直激电测深一维、二维反演、电阻率二维延时反演及直流激电三维反演。第7章介绍模拟退火和遗传算法的基本理论,在此基础上介绍单纯形法和鲍尔方向法与其相结合的全局混合优化反演方法,并编写了相关C++程序代码;第8章基于直流激电反演成像的基本理论与方法,介绍直流激电反演解释软件IPIInv的设计与研发,并给出直流激电反演在资源与工程勘查方面的几个应用实例。

本书中的主要研究项目得到了国家自然科学基金项目(编号:41174102, 41774149)、高等学校博士学科点专项科研基金项目(编号:200805331083)的资助。本书的研究工作和编写得到了中南大学地球科学与信息物理学院地球物理系和“有色资源与地质灾害探查”湖南省重点实验室的支持。在此致以衷心的感谢。

书中有关直流激电正演模拟和反演成像理论与方法的学术思想主要源于我的博士论文指导老师阮百尧教授,谨以本书表达我对导师的深切怀念和无限追思,阮老师已走7年了,但他的音容笑貌依然历历在目,他的言传身教让我永远铭记于心,他对科研求新、求真、求实的精神一直激励着我前行,使我在专业上不敢有丝毫懈怠。借此机会我还要衷心地感谢中南大学地球科学与信息物理学院戴前伟教授对我生活和工作的一贯支持和帮助。诚挚地感谢课题组肖建平副教授、崔益安副教授、佟铁钢副教授、童孝忠老师、郭荣文副教授、孙娅老师、陈波老师多年来对我科研工作的支持、鼓励和帮助。我由衷地感谢湖南省地质工程勘察院吴述来高工、叶明金高工和卞兆金高工对本书的指导和帮助,并提供了相关实测资料。感谢桂林理工大学吕玉增副教授、徐志锋副教授和李长伟副教授的有益讨论。感谢研究生李盼、胥凯雄帮助完成初稿的校稿工作。特别感谢中南大学出版社给予的支持和帮助。

由于作者学识有限,书中疏漏之处恐亦难免,热诚欢迎读者批评指正。

刘海飞

2017年9月

目录

Contents

第1章 绪论	(1)
1.1 地球物理反演的发展概况	(1)
1.2 直流激电反演的研究现状	(2)
第2章 直流激电测深阵列观测方法	(5)
2.1 地表阵列观测方法	(5)
2.1.1 单边供电三极阵列观测方法	(5)
2.1.2 双边供电三极阵列观测方法	(6)
2.1.3 单边供电四极阵列观测方法	(7)
2.1.4 双边供电四极阵列观测方法	(9)
2.2 单孔井地阵列观测方法	(10)
2.2.1 单孔井中阵列观测方法	(10)
2.2.2 单孔地-井阵列观测方法	(11)
2.2.3 单孔井-地阵列观测方法	(12)
第3章 直流激电1D/2D/3D数值模拟方法	(14)
3.1 直流激电三维有限元正演模拟	(14)
3.1.1 三维稳定电流场的边值问题	(14)
3.1.2 三维稳定电流场的边值问题对应的变分问题	(16)
3.1.3 水平地形异常电位三维有限元正演模拟	(17)
3.1.4 起伏地形总电位三维有限元正演模拟	(23)
3.1.5 大型对称稀疏线性方程组的求解方法	(27)
3.1.6 起伏地表网格节点的高程插值	(40)
3.1.7 直流激电三维正演模拟算例	(43)
3.2 直流激电二维有限元正演模拟	(48)
3.2.1 二维稳定电流场的边值问题	(48)

3.2.2	二维稳定电流场的边值问题对应的变分问题	(51)
3.2.3	水平地形异常电位二维有限元正演模拟	(53)
3.2.4	起伏地形总电位二维有限元正演模拟	(58)
3.2.5	傅氏逆变换的最优化方法	(61)
3.2.6	直流激电二维正演模拟算例	(68)
3.3	直流激电测深一维正演模拟	(69)
3.3.1	水平地层地面点源场的边值问题	(69)
3.3.2	水平地层对称四极测深的视电阻率表达式	(71)
3.3.3	电阻率转换函数的递推公式	(72)
3.3.4	基于快速汉克尔变换的正演算法	(73)
3.3.5	直流激电一维正演模拟算例	(75)
第4章	最小二乘广义线性反演及正则化技术	(78)
4.1	最小二乘广义线性反演	(78)
4.1.1	最小二乘法的应用条件	(78)
4.1.2	最小二乘意义下的线性反演方程	(79)
4.2	不适定问题的正则化	(80)
4.2.1	正则化的基本概念	(80)
4.2.2	正则化技术的重要思想	(80)
4.3	广义线性反演的正则化技术	(81)
4.3.1	基于目标函数拟合差的正则化参数选择方法	(81)
4.3.2	基于线性方程求解的正则化参数选择方法	(82)
4.3.3	基于Tikhonov 稳定化泛函的正则化方法	(97)
4.3.4	基于先验约束的正则化方法	(98)
4.3.5	基于修正迭代步长的正则化方法	(100)
第5章	混合范数下的最优化反演方法	(103)
5.1	L_p 范数的误差分布特性	(103)
5.2	混合范数下的线性反演方程	(104)
5.3	加权矩阵的规范化	(106)
5.4	混合范数下线性反演方程的共轭梯度解法	(107)
5.5	拉格朗日乘子 λ 的优化选取	(109)
5.6	混合范数下的电阻率反演结果对比分析	(110)
5.6.1	不含突变噪声模型	(110)
5.6.2	含有突变噪声模型	(111)

第6章 直流激电广义线性反演方法	(113)
6.1 直流激电数据的广义线性反演方法	(113)
6.1.1 电阻率反演方法	(113)
6.1.2 极化率反演方法	(114)
6.2 偏导数矩阵的快速计算方法	(117)
6.2.1 基于互换原理的偏导数矩阵计算方法	(117)
6.2.2 基于拟牛顿法的偏导数矩阵计算方法	(119)
6.2.3 偏导数矩阵的混合计算方法	(119)
6.3 垂直激电测深一维全自动迭代反演	(124)
6.3.1 基本原理	(125)
6.3.2 构建多层等效模型	(126)
6.3.3 偏导数矩阵的差分计算方法	(126)
6.3.4 自动迭代反演方程与实现过程	(127)
6.3.5 反演算例	(128)
6.4 垂直激电测深二维反演	(129)
6.4.1 基本原理	(130)
6.4.2 双重网格参数化方案	(130)
6.4.3 构建初始反演模型	(131)
6.4.4 反演算例	(132)
6.5 电阻率二维延时反演	(136)
6.5.1 基本原理	(136)
6.5.2 延时反演过程	(138)
6.5.3 反演算例	(139)
6.6 起伏地形直流激电三维快速反演	(143)
6.6.1 基本原理	(143)
6.6.2 三维模型参数化	(144)
6.6.3 三维反演的加速技术	(145)
6.6.4 反演算例	(146)
第7章 非线性全局优化反演方法	(152)
7.1 模拟退火算法	(152)
7.1.1 模拟退火算法的发展概况	(152)
7.1.2 模拟退火算法的基本理论	(153)
7.1.3 模拟退火算法的实现步骤	(159)
7.1.4 基于模拟退火的全局混合反演方法	(160)