



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

基于神经网络的混合非线性 电阻率反演成像

HYBRID NONLINEAR INVERSION FOR ELECTRICAL RESISTIVITY
IMAGING BASED ON NEURAL NETWORKS

江沸波 戴前伟 冯德山 董莉 著
Jiang Feibo Dai Qianwei Feng Deshan Dong Li



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

基于神经网络的混合 非线性电阻率反演成像

HYBRID NONLINEAR INVERSION FOR ELECTRICAL
RESISTIVITY IMAGING BASED ON NEURAL NETWORKS

江沸波 戴前伟 冯德山 董 莉 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中国有色集团

图书在版编目(CIP)数据

基于神经网络的混合非线性电阻率反演成像/江沸波,戴前伟,冯德山,董莉著. —长沙:中南大学出版社,2015. 10

ISBN 978 - 7 - 5487 - 2067 - 6

I. 基... II. ①江... ②戴... ③冯... ④董... III. 神经网络 - 应用 - 电阻率法勘探 - 研究

IV. P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 290380 号

基于神经网络的混合非线性电阻率反演成像

江沸波 戴前伟 冯德山 董莉 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

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙超峰印刷有限公司

开 本 720 × 1000 1/16 印张 10 字数 197 千字

版 次 2015 年 10 月第 1 版 印次 2015 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 2067 - 6

定 价 50.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

本书在介绍神经网络基本概念和基本原理的基础上,对神经网络非线性反演在电阻率成像技术中的应用进行了理论研究。分析了 BP 神经网络和 RBF 神经网络在电阻率成像反演中的优化算法、建模方法和反演流程。通过将神经网络与粒子群优化算法、差分进化算法、混沌技术、信息准则等多种新技术相结合,优化了神经网络反演模型的结构和性能,对今后神经网络在电法反演中的深入研究提供了可借鉴的经验。

本书可供从事地球物理正反演以及人工智能等领域的相关研究人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的教师、研究生和高年级本科生的教学参考用书。

作者简介

About the Authors

江沸波，男，汉族，中南大学博士、博士后。1982年7月出生，出生于湖南省株洲市，湖南师范大学物理与信息科学学院讲师。2014年毕业于中南大学，获地球探测与信息技术工学博士学位，主要从事电磁法的非线性反演、人工智能技术的工程应用研究。目前已发表研究论文10余篇，其中SCI收录4篇，EI收录4篇，授权专利8项。

戴前伟，男，汉族，博士，教授，博士研究生导师。1968年7月出生，出生于湖南省涟源市，1987年—1991年就读于原中南工业大学地质系，获应用地球物理专业学士学位，1991年—1997年硕博连读获中南工业大学应用地球物理专业博士学位，日本东北大学高级访问学者。1997年参加工作，2005年晋升教授，2006年被评为博士生导师。先后担任中南大学地球物理勘察新技术研究所副所长、所长，中南大学信息物理工程学院党委副书记。现为中南大学地球科学与信息物理学院党委书记，国务院学位委员会地质资源与地质工程学科评议组成员、《工程勘察》编委、湖南省地球物理学会副理事长、中国地球物理学会理事。主要从事电磁法勘探理论与应用、工程与环境地球物理的教学科研工作。近年来主持国家863计划课题1项，国家“十一五”科技支撑计划课题1项，国家自然科学基金项目1项，省部级课题5项，校企横向科研合作项目20多项，参与以上各类项目30多项。参与撰写专著3部，获省部级奖4项，发表学术论文90多篇，其中EI、SCI检索30余篇。

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，产量连年来居世界首位，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有色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、全国优秀博士学位论文获得者、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、科研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

电阻率成像技术是一种重要的地球物理勘探方法,广泛应用于水文、环境、考古、矿产资源和油气勘探等领域,取得了较大的经济效益。近年来随着理论研究的深入和工程应用的发展,人们对勘探规模和资料解释精度的要求也在不断提高,传统的线性反演方法面临着新的挑战。

人工神经网络是以数学和物理方法从信息处理的角度对人脑生物神经网络进行抽象并建立起来的简化模型,是计算智能和机器学习研究最活跃的领域之一。将神经网络技术与地球物理学中的反演理论相结合,获得具有柔性信息处理特性的地球物理反演新方法,是目前地球物理学中非线性反演方法的一大研究热点。

本书主要针对神经网络非线性反演在电阻率成像中的应用进行理论研究,分析了BP神经网络和RBF神经网络在电阻率成像反演中的优化算法、建模方法和反演流程。

全书共分为9章:第1章绪论部分介绍了相关研究的背景和进展;第2章从电阻率法和神经网络反演两个方面入手,首先介绍了电阻率法和稳定电流场的基本理论、视电阻率的概念和正演数值模拟的方法;然后介绍了BP神经网络的基本概念、学习算法和反演建模的方法与流程,比较了不同BP学习算法在电阻率成像神经网络反演中的效率和效果;第3章和第4章分别通过混沌振荡粒子群优化算法和混沌约束微分进化算法对BP神经网络反演过程进行了优化,并通过模型反演验证了算法的有效性和鲁棒性;第5章和第6章引入RBF神经网络对电阻率成像进行反演,系统地研究了RBF神经网络反演电阻率资料的理论和方法,并引入统计学中的信息准则来自适应地确定RBF神经网络的隐含层结构,最后通过粒子群优化算法微调RBF神经网络参数以实现二阶段学习的神经网络反演;第7章对超高密度电阻率成像的神经网络反演进行了初步的理论研究,针对超高密度电法的高维勘探数据,

采用主成分分析法进行预处理,然后引入正则化极限学习机进行快速反演,提高了超高密度电法非线性反演的计算效率;第8章在一个简单的工程实测数据上对本书研究的反演算法进行了验证;第9章结论部分对上面的研究成果进行了总结,比较了BP神经网络和RBF神经网络反演的区别,对神经网络反演在电阻率成像领域中今后的研究方向进行了分析和展望。

本书是作者从事神经网络理论与应用研究和电磁法反演建模与优化的教学和科研工作的系统总结,并从国内外相关文献资料中提取了最主要的理论及成果,力图反映本研究领域的最新研究动态。中南大学的汤井田教授、柳建新教授、熊章强教授、朱自强教授等对本书提出了很多宝贵的意见,在此向对本书创作过程中给予作者大力支持的各位专家表示由衷的感谢,向本书引用的参考文献的众多作者一并致谢。

本书获湖南师范大学博士出版基金资助,并在国家自然科学基金项目(41374118)、教育部博士点基金项目(20120162110015)、中国博士后科学研究基金项目(153678)、湖南省教育厅科研优秀青年项目(15B138)、湖南省科技计划项目(2015JC3067)的联合资助下完成,在此对上述资助单位表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和不足之处,敬请广大读者给予批评指正。

作者
2015年10月

目录

Contents

| | |
|----------------------------|-----------|
| 第1章 绪论 | 1 |
| 1.1 电阻率成像 | 1 |
| 1.2 电阻率成像技术国内外研究进展及发展趋势 | 1 |
| 1.2.1 国外电阻率成像反演的研究进展 | 1 |
| 1.2.2 国内电阻率成像反演的研究进展 | 3 |
| 1.2.3 电阻率成像反演的发展趋势 | 4 |
| 1.3 神经网络的研究现状 | 5 |
| 1.3.1 神经网络的概念和研究历史 | 5 |
| 1.3.2 神经网络的基本模型 | 6 |
| 1.3.3 神经网络在电阻率法反演中的应用 | 7 |
| 1.4 粒子群优化算法 | 9 |
| 1.4.1 粒子群优化算法的研究现状 | 9 |
| 1.4.2 粒子群优化算法在地球物理资料反演中的应用 | 9 |
| 1.5 微分进化算法 | 10 |
| 1.5.1 微分进化算法的研究现状 | 10 |
| 1.5.2 微分进化算法在地球物理资料反演中的应用 | 12 |
| 1.6 主要研究工作和章节安排 | 12 |
| 1.6.1 课题研究的目的与意义 | 12 |
| 1.6.2 主要研究工作 | 14 |
| 1.6.3 章节安排 | 15 |
| 1.7 本章小结 | 16 |
| 第2章 基于神经网络的电阻率反演成像 | 17 |
| 2.1 电阻率法的基本理论 | 17 |

| | | |
|---|-----------------------|-----------|
| 2.1.1 | 稳定电流场的基础理论 | 17 |
| 2.1.2 | 视电阻率的概念和意义 | 18 |
| 2.1.3 | 常用电阻率方法 | 19 |
| 2.1.4 | 正演问题的数值模拟方法 | 21 |
| 2.2 | BP 神经网络的反演方法 | 24 |
| 2.2.1 | BP 神经网络的基本结构 | 24 |
| 2.2.2 | BP 神经网络的学习算法 | 26 |
| 2.2.3 | BP 神经网络的样本划分与建模 | 30 |
| 2.2.4 | BP 神经网络的反演流程 | 31 |
| 2.3 | 本章小结 | 32 |
| 第 3 章 基于混沌振荡 PSO - BP 算法的电阻率成像反演 | | 34 |
| 3.1 | 粒子群优化算法的基本原理 | 34 |
| 3.2 | 基于混沌惯性权重的 PSO 算法 | 37 |
| 3.2.1 | 基于振荡递减的 PSO 算法 | 37 |
| 3.2.2 | 混沌的基本理论 | 38 |
| 3.2.3 | 基于混沌振荡的 PSO 算法 | 42 |
| 3.3 | 混沌振荡 PSO - BP 算法反演建模 | 43 |
| 3.3.1 | BP 神经网络的样本划分与建模 | 43 |
| 3.3.2 | BP 神经网络的隐含层结构设计 | 43 |
| 3.3.3 | 混沌振荡 PSO - BP 算法的实现步骤 | 46 |
| 3.4 | 数值仿真与模型反演 | 47 |
| 3.4.1 | 混沌振荡 PSO - BP 算法的性能验证 | 47 |
| 3.4.2 | 理论模型反演结果评估 | 48 |
| 3.5 | 本章小结 | 51 |
| 第 4 章 基于混沌约束 DE - BP 算法的电阻率成像反演 | | 52 |
| 4.1 | 微分进化算法的基本原理 | 52 |
| 4.2 | 基于混沌约束的 DE 算法 | 55 |
| 4.3 | 混沌约束 DE - BP 算法反演建模 | 59 |
| 4.3.1 | BP 神经网络的样本划分与建模 | 59 |
| 4.3.2 | BP 神经网络的隐含层结构设计 | 61 |
| 4.3.3 | 混沌约束 DE - BP 算法的实现步骤 | 63 |

| | | |
|--------------|---------------------------------|-----------|
| 4.4 | 数值仿真与模型反演 | 64 |
| 4.4.1 | 混沌约束 DE - BP 算法的性能验证 | 64 |
| 4.4.2 | 理论模型反演结果评估 | 65 |
| 4.5 | 本章小结 | 67 |
| 第 5 章 | 基于信息准则的 RBF 神经网络电阻率成像反演 | 69 |
| 5.1 | RBF 神经网络结构 | 69 |
| 5.2 | RBF 神经网络学习算法 | 71 |
| 5.2.1 | 聚类算法 | 72 |
| 5.2.2 | 梯度算法 | 73 |
| 5.2.3 | 正交最小二乘法 | 74 |
| 5.3 | 基于汉南 - 奎因信息准则的 OLS 学习算法 | 75 |
| 5.3.1 | RBF 神经网络的泛化能力 | 75 |
| 5.3.2 | 信息准则 | 76 |
| 5.3.3 | HQOLS 算法的实现步骤 | 77 |
| 5.4 | HQOLS - RBF 电阻率成像反演建模 | 79 |
| 5.5 | 数值仿真与模型反演 | 81 |
| 5.5.1 | HQOLS - RBF 算法的性能验证 | 81 |
| 5.5.2 | 理论模型反演结果评估 | 83 |
| 5.6 | 本章小结 | 87 |
| 第 6 章 | 基于二阶段学习的 RBF 神经网络电阻率成像反演 | 89 |
| 6.1 | 基于二阶段学习的 RBF 神经网络基本理论 | 89 |
| 6.1.1 | OLS - RBFNN 的不足 | 89 |
| 6.1.2 | RBF 神经网络的样本规划与建模 | 90 |
| 6.1.3 | 第一阶段学习 | 90 |
| 6.1.4 | 第二阶段学习 | 92 |
| 6.2 | 基于二阶段学习的 RBF 神经网络实现步骤 | 93 |
| 6.3 | 数值仿真与模型反演 | 95 |
| 6.3.1 | 信息准则的选择 | 95 |
| 6.3.2 | 二阶段学习 RBF 神经网络的性能验证 | 96 |
| 6.3.3 | 理论模型反演结果评估 | 97 |
| 6.4 | 本章小结 | 100 |

| | |
|---|-----|
| 第7章 基于主成分 - 正则化极限学习机的超高密度电法非线性反演 | 102 |
| 7.1 超高密度电法的基本原理及正演方法 | 102 |
| 7.2 极限学习机理论 | 104 |
| 7.2.1 标准极限学习机 | 104 |
| 7.2.2 主成分 - 正则化极限学习机 | 105 |
| 7.3 主成分 - 正则化极限学习机反演建模 | 107 |
| 7.3.1 样本构造 | 107 |
| 7.3.2 PCA 降维 | 107 |
| 7.3.3 参数寻优 | 110 |
| 7.3.4 反演流程 | 112 |
| 7.4 模型反演 | 113 |
| 7.5 本章小结 | 118 |
| 第8章 非线性反演工程实例分析 | 119 |
| 8.1 工程概况 | 119 |
| 8.2 神经网络直接反演 | 119 |
| 8.3 基于最小二乘反演结果的反演 | 122 |
| 8.4 本章小结 | 125 |
| 第9章 总结与展望 | 127 |
| 9.1 总结 | 127 |
| 9.2 展望 | 129 |
| 附录 | 130 |
| 附录一:标准 BP 神经网络反演的 matlab 代码 | 130 |
| 附录二:标准 RBF 神经网络反演的 matlab 代码 | 132 |
| 参考文献 | 134 |

第1章 绪论

1.1 电阻率成像

电阻率法是以地壳中岩石和矿石的导电性差异为基础,通过观测与研究人工建立的地中电流场(稳定场或交变场)的分布规律达到找矿目的和解决其他地质问题的一组电法勘探分支方法^[1]。为了取得良好的地质效果,在电阻率法勘探中,常需根据不同地质任务和不同地电条件,采用不同的电阻率探测方法。目前最基本的电阻率探测方法包括电(阻率)剖面法、电(阻率)测深法和电(阻率)成像法^[2]。其中电(阻率)剖面法是在电极距固定的条件下,通过测点的水平移动研究地层的水平方向变化;电(阻率)测深法则是假定地层无水平方向变化,在测点固定的条件下,通过电极距的序列改变只研究该测点深度方向的一维地电结构;电成像(Electrical Imaging)又称电(阻率)成像(Electrical Resistivity Imaging),是在电剖面法和电测深法基础上发展起来的一种勘探方法。电(阻率)成像技术利用多通道阵列电极系测量系统,通过在地表或井-地布设阵列电极系获取关于地下电阻率信息的大量实测数据,并利用先进的正反演方法以重建精确的电阻率图像。该方法具有观测精度高、数据采集量大、地质信息丰富、生产效率高等特点,使电阻率成像技术在中度以上复杂的地质结构下可以更真实地揭示稳定电流场中的电阻率变化^[3]。目前该方法在金属与非金属矿产勘查,地质构造、水文地质、工程灾害地质、考古、岩溶洞穴景观资源勘察等各领域得到了广泛的推广应用,解决了诸多实际问题,产生了极大的社会效益及经济效益。

1.2 电阻率成像技术国内外研究进展及发展趋势

1.2.1 国外电阻率成像反演的研究进展

电阻率勘探的研究始于20世纪初期,早在1920年 Schlumberger 就开展了关于电阻率勘探的开拓性研究;大约在相同时期,美国 Wenner 也提出了电法勘探的思想^[4];1925年 Gish 等进行了垂直电测深(Vertical Electrical Sounding, VES)的理论和应用研究^[5],其同时期的电测深数据解释主要采用人工曲线拟合的方

式; 20 世纪 70 年代随着线性滤波理论和数字计算机的发展, 基于计算机的解释技术开始流行, 其中典型的代表是基于线性反演理论的模型拟合法。该方法的基本思想是在初始模型的基础上, 通过迭代来不断调整测层厚度和电阻率值(模型参数)以减小正演数据与测量数据之间的误差, 直到误差小于预设的标准; Inman 等^[6] (1973) 使用广义线性反演理论 (Generalized Linear Inverse Theory) 解释了电测深曲线; Peltno 等^[7] (1978) 采用快速峰岭回归反演方法 (Fast Ridge Regression Inversion) 对简单的二维的电阻率和极化率数据进行了反演, 并取得了初步的成果; Petrick 等^[8] (1981) 使用 α 中心法进行了三维电阻率的反演, 该方法速度较快, 但对初始模型要求较高, 其反演的结果适合作为其他反演方法的初始模型; Zohdy^[9] (1989) 提出了一种用于自动解释电测深曲线的快速迭代方法; Li^[10] (1992) 针对 E-SCAN 实验装置, 提出了多个电阻率成像的近似反演方法, 能较好地解决二维和三维的反演问题; Loke^[11] (1995) 提出了一种基于平滑约束的最小二乘反演方法, 该方法及其改进的方式直到目前仍然被广泛地使用; Zhang^[12] (1995) 提出了一种基于共轭梯度法的快速三维电阻率成像正反演方法; Chunduru^[13] (1996) 使用快速模拟退火算法 (VFSA) 对二维的偶极-偶极电阻率数据进行了反演, 给出了标准模拟退火算法和快速模拟退火算法的反演流程图, 其反演结果表明 VFSA 在反演中能够稳定地收敛, 得到较好的反演结果; Lesur^[14,15] (1999) 使用共轭梯度法对二维和三维电阻率成像数据进行了解释; Olayinka^[16] (2000) 比较了二维电阻率成像中块反演 (Block Inversion) 和平滑反演 (Smooth Inversion) 之间的区别; Torleif Dahlin^[17] (2001) 对直流电阻率成像技术的发展现状进行了综述, 系统地介绍了直流电法的勘探方式、正演技术和反演方法, 并给出了多个应用成功的实例; Jackson^[18] (2001) 提出了一种使用二维的测量数据来进行三维平滑约束反演的方法; Loke^[19] (2002) 针对平滑约束的最小二乘法中 Jacobian 矩阵的求解问题, 比较了高斯-牛顿法、拟牛顿法和两者的混合方法之间的性能差别, 理论数据和实测数据的反演结果表明, 在高电阻率对比的前提下, 混合方法与高斯-牛顿法的反演结果差别较小, 但混合方法的求解速度高于高斯-牛顿法, 在反演速度和精度上具有较好的均衡性; Schwarzbach^[20] (2005) 提出一种并行多目标遗传算法来实现二维电阻率数据反演, 在该方法中提出两种目标函数: 数据拟合误差 f_1 和模型约束范数 f_2 。遗传算法通过构建二者的柏拉图集来寻找反演的最优解。该方法不仅能找到反演的最优解, 还能够得到满足 f_1 和 f_2 的次优解集合, 但是反演时间较长; Günther^[21,22] (2006) 提出了一种新的三倍网格反演技术来实现起伏地面的三维电阻率成像, 该方法使用高斯-牛顿法进行搜索, 并使用正则化技术进行平滑约束, 具有较高的计算效率; Jha^[23] (2008) 采用遗传算法来反演垂直电测深数据, 以数据的拟合误差作为目标函数, 通过对层状模型参数进行编码来构建遗传算法的个体和种群。实验的结果表明该算法能