



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

大地电磁信号和强干扰的 数学形态学分析与应用

MATHEMATICAL MORPHOLOGY ANALYSIS AND APPLICATION
OF MAGNETOTELLURIC SIGNAL AND STRONG INTERFERENCE

李 晋 汤井田 著
Li Jin Tang Jingtian



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

大地电磁信号和强干扰的 数学形态学分析与应用

MATHEMATICAL MORPHOLOGY ANALYSIS AND APPLICATION
OF MAGNETOTELLURIC SIGNAL AND STRONG INTERFERENCE

李 晋 汤井田 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

大地电磁信号和强干扰的数学形态学分析与应用/李晋,汤井田著.
—长沙:中南大学出版社,2015.12

ISBN 978-7-5487-2068-3

I. 大... II. ①李... ②汤... III. 大地电磁测深-电磁干扰-信号
分析 IV. P631.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第295545号

大地电磁信号和强干扰的数学形态学分析与应用

李 晋 汤井田 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 长沙超峰印务有限公司

☐开 本 720×1000 1/16 ☐印张 11 ☐字数 212千字

☐版 次 2015年12月第1版 ☐印次 2015年12月第1次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2068-3

☐定 价 55.00元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

该书以大地电磁法的信噪分离为研究背景,以数学形态学理论为主要分析手段,着重阐述数学形态学在大地电磁信号和强干扰分离中的应用。作者深入分析了数学形态学的基本理论,探讨了传统形态滤波、广义形态滤波和多尺度形态滤波的大地电磁强干扰分离方法;同时在形态滤波的基础上,研究了 Top-hat 变换、中值滤波和信号子空间增强的大地电磁二次信噪分离方法。书中涵盖的内容为改善矿集区大地电磁测深数据质量提供了一条新的解决途径,对大地电磁法探测结果的处理和解释具有重要的参考价值 and 借鉴意义。

该书内容丰富、数据翔实、结构严谨、可读性强,可作为地球探测与信息技术相关专业参考用书,也可供从事大地电磁测深相关领域技术人员和研究人员参考。

作者简介

About the Author

李 晋，男，1981 年出生，中南大学博士、博士后，现为湖南师范大学物理与信息科学学院副教授，湖南省青年骨干教师培养对象。2012 年毕业于中南大学，获地球探测与信息技术工学博士学位。主要从事矿集区大地电磁强干扰压制及信噪辨识研究，发表 SCI、EI 论文 10 余篇，主持国家自然科学基金、湖南省自然科学基金、中国博士后科学基金等多项科研项目。

汤井田，男，1965 年出生，博士，中南大学教授，博士研究生导师。1992 年毕业于中南工业大学，获工学博士学位。1994 年晋升教授，1998 年被评为博士研究生导师，同年以高级访问学者留学美国劳伦兹(伯克利)国家实验室；中国地球物理学会会员，美国勘探地球物理学家协会(SEG)会员。主要从事电磁场理论、应用及信号处理方面的研究，已发表学术论文 200 余篇。主持国家科技专项、国家“863”高技术研究发展计划、国家自然科学基金、湖南省自然科学基金等科研项目近 30 项。

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的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^①

Foreword

大地电磁强干扰分离技术一直是大地电磁测深领域的研究热点和难点。迄今为止,它的研究工作已经取得了许多成果,但随着人类文明的不断发展,重工业密集等因素造成的环境噪声以及人类活动等造成的人文电磁噪声日益严重,导致大地电磁测深数据受到严重污染,大地电磁测深工作面临巨大困难。现有的大地电磁强干扰分离方法在矿集区实际应用和测试中表现出诸多不足,这一领域面临的困难和挑战也日益加剧。因此,为了提高大地电磁测深数据质量,抑制噪声干扰已成为当务之急。研究大地电磁强干扰的特征,提出有针对性的大地电磁强干扰分离方法,对改善大地电磁测深数据质量以及对大地电磁法探测结果的处理和解释具有重要意义。本书正是在这一背景下,在国家科技专项(SinoProbe-03)、国家自然科学基金(41404111、41104071)、国家高技术研究发展计划(863计划)(2014AA06A602)、湖南省自然科学基金(2015JJ3088)和中国博士后科学基金(2015M570687)的联合资助下,利用数学形态学理论对大地电磁强干扰分离方法进行了深入研究,具有重要的理论和实际意义。

本书基于数学形态学的思想,对大地电磁强干扰分离及应用展开了分析,重点研究了传统形态滤波、广义形态滤波和多尺度形态滤波的大地电磁强干扰分离方法,并引入数学形态谱和非线性动力学行为中的递归图对大地电磁信号和强干扰进行信噪辨识;同时,在形态滤波的基础上,研究了Top-hat变换、中值滤波

^① 本书得到国家科技专项(SinoProbe-03)、国家自然科学基金(41404111、41104071)、国家高技术研究发展计划(863计划)(2014AA06A602)、湖南省自然科学基金(2015JJ3088)和中国博士后科学基金(2015M570687)联合资助

和信号子空间增强的大地电磁二次信噪分离方法。全书通过理论分析、模拟仿真以及实际应用等手段,围绕数学形态学开展大地电磁强干扰分离的研究工作,其主要贡献和创新总结如下:

(1)研究了五种典型的大地电磁强干扰类型的特征规律,分析了矿集区主要的噪声来源。对一类点分别添加类方波干扰和类充放电三角波干扰,从时间域波形和卡尼亚电阻率测深曲线两方面研究了典型噪声干扰对大地电磁数据质量的影响情况。

(2)数值模拟了典型的单一噪声干扰,研究了不同类型结构元素及尺寸的去噪性能,讨论了结构元素长度及类型的选取规律。

(3)针对 V5-2000 不直接提供读取时间序列的软件,剖析了该仪器的数据采集格式,实现了大地电磁原始资料的读取及还原。提出了基于传统形态滤波的大地电磁信噪分离方法,分析了不同类型结构元素及同一类型、不同尺寸结构元素的去噪性能。

(4)构建了组合广义形态滤波器,提出了基于组合广义形态滤波的大地电磁强干扰分离方法。在青海柴达木盆地开展了相关试验研究,选取了具有一定代表性的试验点进行组合广义形态滤波处理。对比了时间域波形和卡尼亚电阻率-相位测深曲线的改善情况,分析了该方法对包含比较单一的噪声干扰测点的去噪效果。对矿集区强干扰测点进行了组合广义形态滤波处理,综合评价了该方法对包含复杂噪声干扰类型的强干扰测点的噪声抑制能力,并采用非线性共轭梯度法考查了形态滤波对提高大地电磁测深数据的改善情况。

(5)研究了多尺度形态学的基本原理,引入了数学形态谱和非线性动力学行为中的递归图法对大地电磁信号和强干扰进行信噪辨识研究。构建了加权多尺度形态滤波器对大地电磁信号进行全方位扫描,从时间域波形和卡尼亚电阻率曲线两方面对测试信号、实测大地电磁数据和矿集区实测点进行分析,对比了传统形态滤波的噪声压制效果,利用递归图定性评价了大地电磁信噪分离的去噪性能。

(6)在数学形态滤波的基础上,提出了基于 Top-hat 变换、中值滤波和信号子空间增强的大地电磁二次信噪分离方法。针对形态滤波提取的噪声轮廓或重构信号,进一步分离出包含大尺度低频细节成分的有用信号。对矿集区强干扰测点进行了二次信噪分

离处理,对比分析了组合广义形态滤波和二次信噪分离方法的卡尼亚电阻率-相位测深曲线的改善情况,综合评价了两种方法在保留低频缓变化信息方面的优势,以及对大地电磁测深数据质量的改善效果。

通过以上研究表明,基于数学形态学的大地电磁强干扰分离方法有效地剔除了大地电磁强干扰中的大尺度干扰和基线漂移,较好地还原了大地电磁原始信号特征,改善了大地电磁测深数据质量。由于数学形态学运算速度快,具有潜在优势,为矿集区海量大地电磁信号与强干扰的分离提供了一条新的解决途径,应用前景广阔。随后,总结了全书的主要内容和创新点,讨论了数学形态学在大地电磁强干扰分离中的不足之处,并对下一步研究工作的开展提出了一些建议。

本书是作者长期从事大地电磁信号和强干扰压制及信噪辨识研究的结晶,书中所引用的实例都是近年来作者科研成果的体现。本书在撰写过程中,广泛吸取了国内外相关文献的精华,并尽量反映了国内外在大地电磁噪声压制、数学形态学分析、数字信号处理等领域的最新研究成果和进展。本书的出版得益于中南大学出版社的大力支持,在此表示感谢!在撰写过程中,本书参考了大量相关领域的文献,已列示于书后的参考文献部分,但仍可能有遗漏。在此谨向已标注和未标注的参考文献的作者们表示诚挚的谢意和由衷的歉意!

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,衷心希望广大读者不吝赐教。

第1章 绪论	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 研究现状及面临的问题	3
1.2.1 国内外研究现状	3
1.2.2 面临的主要问题	6
1.3 本书主要研究内容	9
1.4 本书结构	11
第2章 大地电磁强干扰特征	13
2.1 大地电磁场信号与噪声	13
2.1.1 大地电磁场信号特征	13
2.1.2 大地电磁场噪声特征	16
2.2 矿集区实测大地电磁噪声类型及特点	17
2.2.1 类方波噪声	18
2.2.2 工频噪声	19
2.2.3 类阶跃噪声	19
2.2.4 类脉冲噪声	20
2.2.5 类充放电三角波噪声	21
2.3 矿集区实测大地电磁噪声源分析	21
2.4 强干扰类型对视电阻率曲线的影响	22
2.4.1 类方波噪声对视电阻率曲线的影响	23
2.4.2 类充放电三角波噪声对视电阻率曲线的影响	25
2.5 本章小结	28
第3章 数学形态学基本理论	29
3.1 形态学基本运算	30
3.1.1 腐蚀运算	30

3.1.2	膨胀运算	30
3.1.3	开、闭运算	32
3.2	形态滤波器的构建	33
3.3	结构元素的类型	34
3.4	结构元素的选取	35
3.4.1	长度选取	35
3.4.2	类型选取	36
3.5	本章小结	40

第4章 基于形态滤波的大地电磁信噪分离 41

4.1	实测大地电磁数据读取及还原	42
4.1.1	大地电磁数据读取	42
4.1.2	大地电磁数据还原	47
4.2	传统形态滤波信噪分离效果	49
4.2.1	不同类型结构元素滤波效果	49
4.2.2	同一类型不同尺寸结构元素滤波效果	49
4.3	广义形态滤波器的定义与构建	52
4.3.1	广义形态滤波器的定义	52
4.3.2	组合广义形态滤波器的构建	54
4.4	组合广义形态滤波去噪效果	55
4.4.1	基于组合广义形态滤波的大地电磁强干扰分离流程	55
4.4.2	时间域波形去噪效果	56
4.4.3	试验点数据分析	60
4.5	实际资料分析	72
4.6	非线性共轭梯度反演效果	76
4.7	本章小结	78

第5章 基于多尺度形态滤波的大地电磁信噪分离 81

5.1	多尺度形态学	81
5.1.1	多尺度形态学基本原理	81
5.1.2	加权多尺度形态滤波器构建	82
5.2	数学形态谱	83
5.2.1	数学形态谱定义	83
5.2.2	大地电磁信号和典型强干扰的数学形态谱	84
5.3	递归图	85
5.3.1	递归图基本原理	85

5.3.2 仿真信号分析	86
5.4 实际资料分析	89
5.4.1 多尺度形态滤波性能分析	89
5.4.2 时间域滤波效果	91
5.4.3 视电阻率曲线	93
5.5 本章小结	95
第6章 基于形态滤波的二次信噪分离	97
6.1 Top-hat 变换基本原理	97
6.2 Top-hat 变换信噪分离效果	98
6.2.1 类方波噪声压制	100
6.2.2 类充放电三角波噪声压制	101
6.2.3 类脉冲噪声压制	102
6.2.4 类阶跃噪声压制	103
6.3 中值滤波	104
6.3.1 一维中值滤波基本原理	104
6.3.2 形态 - 中值滤波仿真实验	105
6.4 信号子空间增强	108
6.4.1 信号子空间增强基本原理	108
6.4.2 形态 - 信号子空间增强仿真实验	110
6.4.3 信噪识别	112
6.5 实际资料分析	114
6.5.1 基于形态滤波的二次信噪分离流程	114
6.5.2 实测数据分析	115
6.6 本章小结	117
第7章 结论与建议	119
7.1 主要研究成果	119
7.2 主要创新点	123
7.3 进一步的研究方向和建议	124
附 录	126
附录一: 基本形态滤波单元构建	126
附录二: // V5 - 2000 TSL/TSH 格式转换成 dat 文件子程序	129
参考文献	144

第1章 绪论

1.1 研究目的和意义

地球不仅给人类提供生活必需的水、粮食及众多能源,同时也给人类带来地震、洪水、海啸、火山等自然灾害。通过对地球进行深部探测是人类不断探索大自然奥秘的追求,也是保障人类自身安全、开发地球资源的基本需求^[1]。20世纪70年代以来,各国的地球科学家开展了一系列的深部探测计划^[2]。这些深部探测计划的实施拓宽了人类对地球资源进一步探索的空间,增强了人类对生命演化过程的认识,是目前主要发达国家实现可持续发展的科技战略手段。

随着我国经济的高速发展,资源储备急剧下降,现有能源和重要矿产资源对社会经济可持续发展的保障程度日渐下滑,导致资源的供需矛盾日益突出。为了满足我国经济的高速发展对各种资源的需求,必须提高资源勘查水平、增大勘探深度,不断向地球深部获取资源。2008年,在我国财政部和科技部的支持下,国土资源部组织并实施了“地壳探测工程”的培育性启动计划——“深部探测技术与实验研究”专项(SinoProbe)。在科学发展观指导下,专项将引领地球深部探测,服务于资源环境领域,并围绕深部探测实验和示范,在全国部署“两网、两区、四带、多点”的深部探测技术与实验研究工作^[3]。专项的启动标志着我国地球科学在深部探测领域拉开了序幕,并突破我国深层资源的找矿“瓶颈”、开辟了“第二找矿空间”。

地球物理方法无疑是寻找深部隐伏矿产资源的有力手段,尤其是电磁法,在勘查深部结构和金属矿方面有着不可替代的作用。大地电磁测深法(Magnetotelluric, MT)自20世纪50年代初由苏联科学家Tikhonov和法国科学家Cagniard提出至今,以野外施工简便、成本低廉、探测深度大、垂向分辨能力和水平分辨能力高等优点,在探测地壳深部结构方面已得到广泛应用^[4,5]。近年来,随着数字信号处理技术和计算机技术的不断创新及突破,大地电磁测深法的应用范围得到了飞速拓展,已逐渐成为矿产资源勘查、地下水、地热资源勘探、油气普查、地震预报、岩石圈深部结构探测、固体矿产深部找矿、水文、海洋地质及环境地质调查等诸多领域中的一种重要手段,并取得了丰硕成果^[6-12]。

本课题的研究背景主要来源于国家科技专项“深部矿产资源立体探测及实验

研究”(SinoProbe-03),其目的是在长江中下游成矿带和典型矿集区开展立体探测工作,研究成矿带的区域构造演化历史、区域成矿规律和岩石地球化学,以揭示成矿带形成的深部构造背景、动力学工程及其对成矿系统形成和演化的制约机制等^[13, 14]。

该项目需要在铜陵、庐江—枞阳(庐枞)、于都—赣县等矿集区进行大地电磁探测工作。由于天然大地电磁场频带范围宽且本身信号极其微弱,实际观测到的大地电磁信号是典型的非线性、非平稳信号^[15, 16]。考虑到电磁场的激发机制不同,大地电磁信号所表现出来的频谱及形态特征亦各有差异。随着我国社会经济的高速发展,电网、电话网等已经在广大地区普及,各种大型工厂、矿山在各地建立,导致电磁噪声干扰日益严重,对大地电磁测深工作的开展带来了极大的挑战^[17]。特别是在矿集区,人烟稠密、现代通讯设备发达、交通发达及矿产资源丰富、矿山的开采、冶炼及与其配套的重工业密集等因素形成的电磁噪声和人文噪声非常复杂,导致开展大地电磁测深工作及数据处理都相当困难;同时,由于野外观测的数据不可避免地会受到各种噪声的干扰,采集的数据其重复性和一致性会变差,曲线参数的抗噪声干扰能力也会随之降低,从而引起大地电磁阻抗估算偏差严重及测量得到的视电阻率值过度失真等状况,导致不能客观地反映地下电性分布,甚至得到错误的解释结论,这些都给地球物理勘探工作带来了巨大困难,极大地影响了地下物性结构和电性分析的可解释性及采集数据本身的可靠性,而无论是研究深部地质构造还是寻找深部隐伏盲矿体,都不可能完全避开强干扰地区^[18]。如何应用现代数字信号处理技术剖析大地电磁强干扰特征、对大地电磁信号中的强干扰进行有效压制及分离是取得良好勘探结果的必要前提,从而得到无偏的阻抗估计^[19~22]。因此,分析大地电磁强噪声干扰的特征规律,研究大地电磁强干扰分离技术,将对改善大地电磁测深数据质量,以及对大地电磁法探测结果的处理和解释具有重要意义,同时对探测地壳精细结构、寻找深部控矿构造具有非常重要的实际应用价值^[23~27]。

数学形态学(Mathematical Morphology, MM)是1964年由法国数学家Matheron G和他的博士生Serra J提出的一种非线性信号分析方法^[28]。数学形态学最早是以图像的形态作为研究对象,现已成功应用于图像处理、图形分析、计算机视觉等工程实践领域。形态滤波器作为一种新型有效的非线性滤波技术随之产生,并已被逐步推广到一维信号处理领域,比如语音增强、电能扰动、振动信号处理等,很快得到了不同程度的研究及应用^[29~31]。

本书将数学形态学引入到矿集区大地电磁强干扰分离基于以下两个条件:

(1)鉴于时间域中大量出现的大地电磁强干扰其类型具有类周期性,选择不同长度及类型的结构元素可以将叠加在微弱大地电磁有用信号上的强噪声干扰轮廓进行提取,从而剔除强干扰、实现信噪分离。