



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

便携式近地表频率域电磁法 仪器及其信号检测

THE PORTABLE NEAR-SURFACE FREQUENCY DOMAIN ELECTROMAGNETIC
INSTRUMENT AND ITS SIGNAL DETECTION

严发宝 柳建新 苏艳蕊 曹创华 著

Yan Fabao Liu Jianxin Su Yanrui Cao Chuanghua



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

便携式近地表频率域电磁法仪器 及其信号检测

THE PORTABLE NEAR - SURFACE FREQUENCY DOMAIN
ELECTROMAGNETIC INSTRUMENT AND ITS SIGNAL DETECTION

严发宝 柳建新 苏艳蕊 曹创华 著

Yan Fabao Liu Jianxin Su Yanrui Cao Chuanghua



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

便携式近地表频率域电磁法仪器及其信号检测/严发宝等著.
—长沙:中南大学出版社,2017.2
ISBN 978-7-5487-2720-0

I. 便... II. 严... III. ①便携仪表-近地面层-频率域综合-电磁法勘探-研究 IV. P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 035756 号

便携式近地表频率域电磁法仪器及其信号检测

BIANXIESHI JINDEBIAO PINLVYU DIANCIFA YIQI JIQI XINHAO JIANCE

严发宝 柳建新 苏艳蕊 曹创华 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 长沙超峰印刷有限公司

☐开 本 720×1000 1/16 ☐印张 11.5 ☐字数 227 千字

☐版 次 2017 年 2 月第 1 版 ☐印次 2017 年 2 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-2720-0

☐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

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,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其应用》《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问题》和《青藏高原岩石圈力学强度与深部结构特征》共8本专著,集中反映团队最新的相关理论与应用研究成果。

本书在阐述和分析便携式近地表频率域电磁法仪器的原理及结构的基础上,对便携式近地表频率域电磁法仪器的信号检测技术和数据实时预处理性能的提升做了系统研究和深入探讨,并提出了相应改进方法。首先,根据便携式近地表频率域电磁法仪器的特点,进行了信号检测技术研究:对信号检测关键通路、仪器自检、降低时钟不确定度保证ADC的信噪比、高速信号的完整性以及异常特征提取做了深入研究,并提出了行之有效的方法。其次,针对便携式近地表频率域电磁法仪器信号检测的数据预处理实时性要求,在基于 $\Sigma-\Delta$ 型ADC芯片与FPGA为核心的跨时钟域数据实时传输、基于FPGA的特性对数据实时加权实现等提出了创新性的解决方案,并论证了这些方法的优越性。最后,结合信号检测技术及改进的数据实时预处理方案,以AM3354 + XC6SLX150作为中心处理平台进行了三线圈共面模式便携式近地表频率域电磁法仪器原理样机的设计与实现。

本书可供物探仪器、电子测量、信号处理、嵌入式系统等领域的相关人员或高等院校相关专业师生使用,也可供相关领域专业技术人员参考。

作者简介

About the Author

严发宝 男, 1985 年生, 博士, 山东大学计算机科学与技术博士后, 山东大学(威海)控制系讲师, 九三学社社员, 中国电子学会高级会员。2008 年毕业于哈尔滨工业大学测控技术与仪器专业, 2011 年获得中国兵器科学研究院计算机应用技术硕士学位, 2016 年 6 月获得中南大学地球探测与信息技术专业博士学位, 同年进入山东大学威海校区工作。曾先后在中国兵器工业第五八研究所、湖南强军科技有限公司、中国科学院光电技术研究所专职从事信号获取与嵌入式实时并行处理技术、高精度专用仪器与观测技术、光电跟踪技术、产品可靠性等方面的研究工作, 在特种军用计算机与嵌入式测试系统、地球物理仪器方面进行了深入研究, 参与或主持了 XXX 型号项目、国家自然科学基金、十二五科技攻关计划、条件保障与技改等在内的纵、横向项目近 20 项, 获部委级科技进步奖 2 项, 绵阳市二等奖 1 项, 研究所级一、三等奖各 1 项, 研制的两项产品经成果鉴定达到国内领先水平, 申请普通专利与国防专利多项, 其中授权发明专利 10 项, 发表学术论文 10 余篇, 其中被 SCI、EI 收录多篇。

柳建新 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师。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,其中被SCI、EI收录112篇。

苏艳蕊 女,博士,1988年生,山东大学控制科学与工程博士后,山东大学(威海)控制系讲师。2011年毕业于哈尔滨工业大学电子信息工程专业,同年进入中国科学院光电技术研究所攻读研究生,2016年7月获得中国科学院大学信号与信息处理专业博士学位并进入山东大学威海校区工作。主要研究方向为量子光通信望远镜跟踪控制、嵌入式系统及信号检测等,参与国家自然科学基金重点项目、中国科学院重点项目多项,针对望远镜平稳跟踪控制提出多项技术创新并成功用于国家天文台望远镜控制系统、中国星地量子通信地基平台等项目,申请发明专利多项,其中授权发明专利3项,发表学术SCI、EI检索学术论文多篇。

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

人类活动与近地表息息相关,因此近地表探测技术备受重视。与探地雷达、时间域电磁法仪器等在近地表的勘探相比,近地表频率域电磁法仪器在施工操作、数据处理等方面具有独特优势,如勘测效率高、使用便捷、抗干扰能力强、测量一次即可以获取浅层不同深度的地质信息,因此被广泛应用于浅层的地质灾害、地下管线、地下水及溶洞、未爆物探测等勘查领域。本书在阐述和分析便携式近地表频率域电磁法仪器的基础上,对便携式近地表频率域电磁法仪器信号检测技术和数据实时预处理性能提升做了系统研究和深入探讨,提出了相应改进方法,设计并研制了水平共面模式的便携式近地表频率域电磁法仪器样机。

首先,根据便携式近地表频率域电磁法仪器的特点,进行了信号检测技术研究。针对便携式近地表频率域电磁法仪器的特征,提出了前端微弱信号获取、开机自检、确定时钟抖动不确定度的方案及具体实现方法,引入 SI 到硬件设计中,并采用 Goertzel 算法来获取便携式近地表频率域电磁法仪器的目标频域参数,实现异常提取的快速计算。

其次,针对便携式近地表频率域电磁法仪器信号检测的数据预处理实时性要求,提出了一系列改进方案,使近地表频率域电磁法仪器节省了生产成本,降低了功耗,减小了体积,规避了风险,缩短了设计周期,提升了噪声抑制能力、探测精度、数据实时预处理性能及仪器可靠性。

最后,结合信号检测技术及改进的数据实时预处理方案,以 AM3354 + XC6SLX150 作为中心处理平台进行了三线圈共面模式便携式近地表频率域电磁法仪器原理样机的设计与实现。同时为使原理样机软件升级更加便利,结合便携式近地表频率域电磁法原理样机的特点,提出了适合于观测系统中 FPGA 固化程序更新的办法,为提升系统可靠性提供了有效方案。对仪器样机进行的

一系列野外试验证明了便携式近地表频率域电磁法仪器的有效性。

在该研究过程中, 特别感谢中南大学陈儒军副教授、刘海飞副教授、肖建平副教授及柳门兄弟姐妹等给予的指导与支持, 感谢湖南强军科技有限公司的工程师给予的技术上与工程实现上的帮助及为书中样机试验付出的辛苦劳动, 感谢董海、谭胜龙、姚红春等为本研究提供技术上的支持, 在此向诸位专家表示衷心的感谢。

本书得到了国家科技基础性工作专项(2013FY110800)、国家“863”项目(2014AA06A615)、国家自然科学基金(41674080、41574123)、中国博士后科学基金(2016M600538)等项目的资助, 在此一并致谢。

由于作者水平有限, 书中难免存在不足之处, 敬请广大读者批评指正。

2016 年 9 月

目录

Contents

第1章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 频率域电磁法仪器分类与特点	(2)
1.3 国内外近地表探测技术进展	(3)
1.3.1 国外近地表探测技术发展现状	(3)
1.3.2 国内近地表探测技术发展现状	(6)
1.4 新技术在电磁法仪器中的应用及其促进作用	(7)
1.4.1 嵌入式技术	(7)
1.4.2 模拟技术	(8)
1.4.3 并行处理技术	(8)
1.4.4 无线通信技术	(9)
1.4.5 分布式近地表频率域电磁法仪器的发展趋势	(9)
1.5 研究的内容与目标	(9)
1.5.1 研究内容	(9)
1.5.2 研究目标	(10)
第2章 便携式近地表频率域电磁法仪器基本原理	(12)
2.1 便携式近地表频率域电磁法仪器感应原理	(12)
2.2 接收线圈中一次场的消除	(15)
2.3 便携式近地表频率域电磁法仪器观测参数	(18)
2.4 便携式近地表频率域电磁法仪器线圈感应特性	(19)
2.5 本章小结	(27)
第3章 观测系统信号检测技术研究	(28)
3.1 RFI滤波及小信号大动态范围放大技术	(28)

3.1.1	RFI 滤波去除高频噪声	(28)
3.1.2	前端放大关键器件选型	(31)
3.1.3	仪表运放实现大动态范围差分输出	(33)
3.1.4	二级放大的换挡设计	(35)
3.2	中心处理平台的信号完整性研究与实现	(39)
3.2.1	关键信号 SI 设计	(39)
3.2.2	PI 分析与采取的措施	(41)
3.2.3	关键信号仿真	(42)
3.2.4	关键信号测试	(48)
3.3	开机自检技术	(51)
3.3.1	自检原理	(51)
3.3.2	自检模型	(52)
3.3.3	电路实现和参数分析	(54)
3.4	采样时钟频率稳定技术	(58)
3.4.1	时钟孔径不确定度误差分析	(58)
3.4.2	时钟孔径不确定度误差要求	(60)
3.4.3	压控恒温晶振跟踪 PPS 技术	(60)
3.5	噪声抑制技术	(65)
3.5.1	模拟低通滤波技术	(65)
3.5.2	偶周期叠加技术	(70)
3.5.3	$\sum -\Delta$ 平均算法	(71)
3.6	异常提取	(73)
3.6.1	FFT 算法获取幅相特性	(74)
3.6.2	Goertzel 算法获取幅相特性	(76)
3.6.3	卷积获取幅相特性	(79)
3.6.4	异常数据获取方法	(79)
3.7	本章小结	(80)
第 4 章	观测系统数据实时预处理性能提升研究	(81)
4.1	跨时钟域串行时钟数据实时传输实现方法	(81)
4.1.1	数据采集的跨时钟域串行总线实时传输问题	(82)
4.1.2	跨时钟域串行总线数据实时传输实现方法	(85)
4.1.3	测试结果与分析	(88)
4.2	FPGA 实时加权实现方法	(90)

4.2.1	数据加权问题	(91)
4.2.2	实时加权运算实现方法	(91)
4.2.3	测试结果与性能比较	(94)
4.3	分段实时抽取	(96)
4.4	本章小结	(97)
第5章	便携式近地表频率域电磁法仪器样机设计与实现	(98)
5.1	总体方案	(98)
5.1.1	便携式近地表频率域电磁法仪器基本技术参数	(98)
5.1.2	系统架构设计	(99)
5.2	中心处理平台设计	(102)
5.2.1	常用嵌入式处理器	(103)
5.2.2	中心处理平台实现	(105)
5.2.3	FPGA 选型	(106)
5.2.4	ARM 选型	(108)
5.3	线圈详细化设计	(111)
5.3.1	发射线圈设计	(112)
5.3.2	感应线圈设计	(112)
5.3.3	空心线圈在仪器中的接法	(113)
5.4	接收模块实现	(114)
5.4.1	接收模块设计	(114)
5.4.2	ADC 芯片选型	(115)
5.5	发射模块实现	(117)
5.5.1	发送模块设计	(119)
5.5.2	主要器件选型	(120)
5.6	其他模块实现	(121)
5.6.1	北斗/GPS 模块设计	(121)
5.6.2	存储模块设计	(122)
5.6.3	无线模块设计	(122)
5.6.4	通用接口模块设计	(123)
5.7	软件设计	(124)
5.7.1	底层软件设计	(124)
5.7.2	通用上层软件设计	(124)
5.8	仪器样机软件升级方法的改进	(128)

5.8.1	FPGA 固化程序更新对产品的可靠性影响	(129)
5.8.2	FPGA 固化程序下载设计与实现	(130)
5.9	电源优化设计	(132)
5.10	本章小结	(134)
第 6 章	观测系统样机的野外试验与验证	(135)
6.1	仪器样机电路可靠性测试	(135)
6.2	野外试验环境	(136)
6.3	仪器样机一致性试验	(137)
6.3.1	一致性测试模型	(138)
6.3.2	单点测深一致性实验	(138)
6.4	单点多频异常探测试验	(140)
6.4.1	单点多频异常探测模型	(140)
6.4.2	单点测试试验	(140)
6.5	异常探测试验	(142)
6.5.1	填埋金属箱测试试验	(142)
6.5.2	埋藏钢钎测试试验	(143)
6.6	试验总结	(145)
6.7	本章小结	(145)
第 7 章	结论和建议	(146)
7.1	结论	(146)
7.2	下一步工作建议	(147)
参考文献		(149)

第1章 绪论

1.1 引言

我国幅员辽阔,地形地貌多样化,且广泛分布着不同时代的地层和岩石,这决定了我国的矿产资源不仅储量丰富,而且呈多样化特征,很多有色金属矿床在电磁场的作用下呈现不同的感应特性^[1,2]。对于浅层矿藏,利用一种有效工具探测并快速找到异常对促进矿山开发具有重要的现实意义。作为一种常见的自然灾害,泥石流在我国西南部地区时有发生,而近地表岩性层、人类工程活动堆积的松散层与泥石流的成因有很大的关系^[3-6];当一些软硬相间的岩性层、胶结成岩作用差的岩性层与软弱岩性层遭到破坏时,会在地表留下一些松散物质,形成大厚度的风化残积层,在水源等条件具备时就会形成泥石流;当堆积的松散层如采矿弃渣、基本建设开挖弃土等达到一定程度时也会促使泥石流的产生^[5,6]。2011年的中国城市地下管线发展报告引言中写到“截至2011年,仅城市供水、排水、燃气、供热四类市政地下管线长度就已超过148万千米,为1990年的8.16倍。但长期以来,由于种种原因,致使城市的地下管线建设和管理滞后于城市建设的总体水平,地下管线施工、运营和维护过程中各类事故时有发生,造成了严重的经济损失。2008—2010年,仅媒体报道的地下管线事故每年就数以千计,平均每天约有5.6起”^[7]。地下水作为水资源的重要部分,是城镇与工农业用水的主要来源,但目前城市地下水均存在不同程度的污染问题^[8-10]。甚至有媒体报道,有一些重工业企业或者化工厂,为了达到国家的环境指标,将工业废水排放至地下,对地下水和土壤造成了极大的污染^[11]。在中国某些边境,由于战争原因,某个小区域还有残留雷区,有报道称有农民因为踩中地雷而受伤^[12]。无独有偶,克罗地亚仍有750平方公里土地遗留着20世纪90年代巴尔干战争中埋下的约7.3万颗地雷^[13]。地下未爆炸地雷对当地人类活动造成很大的影响和损害。浅层矿藏、泥石流、地下管线、地下水及污染、地下未爆炸地雷等与近地表层有很重要的关系。近地表层与人类活动息息相关,所以近地表探测备受关注,鉴于近地表的复杂性,对近地表的探测和异常定位会面临地质、背景干扰、空间等各种因素的制约和挑战^[14]。因此设计一种用于探测近地表层的地球物理仪器,利用该仪器进行近地表层矿藏、泥石流、地下管线、地下水及污染、地下未爆炸地雷、地质灾害常发