



中南大学地球科学学术文库

Academic Library of Geosciences
in Central South University

地球物理勘探 新方法新技术

朱德兵◎著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



中南大学地球科学学术文库

Academic Library of Geosciences
in Central South University

地球物理勘探 新方法新技术



朱德兵◎著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目 (C I P) 数据

地球物理勘探新方法新技术 / 朱德兵著. --长沙:
中南大学出版社, 2019.4
ISBN 978 - 7 - 5487 - 3612 - 7

I. ①地… II. ①朱… III. ①地球物理勘探 IV.
①P631

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 064676 号

地球物理勘探新方法新技术

DIQIU WULI KANTAN XINFANGFA XINJISHU

朱德兵 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 长沙鸿和印务有限公司

☐开 本 710 × 1000 1/16 ☐印张 17.5 ☐字数 350 千字 ☐插页 2

☐版 次 2019 年 4 月第 1 版 ☐印次 2019 年 4 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 3612 - 7

☐定 价 105.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

中南大學
地球科學
學術文庫

丙申何繼善



内容简介

Introduction

本书以“通过观测数据‘质’和‘量’的提升来增强地球物理勘探深度和分辨能力”为指导思想,分四篇共30章论述了传导类电法、瞬变电磁法、弹性波勘探以及物探信号处理等新方法和新技术,介绍了相关技术方法的原理、模拟试验结果、应用实施参考和技术拓展等方面的内容。

第一篇基于大定源或线阵列观测系统,采用近目标激励或径向基阵列观测模式,利用传导类电场和激发极化场的观测数据,形成了掘进巷道隐患超前探测与预警、生产矿山井巷接替资源勘探、基坑及水利工程止水帷幕渗漏隐患探测、随钻超前探测、水底隐伏目标探测以及锚杆或桩基长度检定等多项实用技术。

第二篇介绍了与瞬变电磁法相关的五项新技术,包括基于径向线阵列观测系统的定向探测技术、瞬变电磁响应信号空间梯度测量技术、瞬变电磁响应水平分量高精度测量方法、巷道瞬变电磁法发射和接收辅助装置以及一种瞬变电磁法收发线圈用编织方法。

第三篇内容与弹性波勘探或地震勘探相关,包括地震勘探双能量双通道采集技术、地震信号分频采集方法以及与震源、传感器辅助装置相关的激励与测量装置,同时介绍了一种井巷弹性波超前探测的采集技术、一种高精度桩基检测技术、在运动中实施路基质量检测的横、纵波传感器耦合技术、一种增大动圈式检波器静磁场的方法及检波器。

第四篇介绍了一种铁路路基探地雷达检测中的轨枕干扰信号去除算法、脏污道砟介电常数标定方法、一种BP人工神经网络残差级联算法及评估方法、一种泛CT几何成像算法。

本书可供地球物理、勘查技术与工程、地质工程高年级学生选作教材或参考书;可供地球探测与信息技术或者地质工程研究生选作教材。

作者简介

About the Author

朱德兵 汉族, 1968 年 12 月出生于湖北省仙桃市。1991 年毕业于桂林冶金地质学院物探系, 获工学学士学位; 1998 年毕业于中国地质大学(武汉), 获地球探测与信息技术专业工学硕士学位, 2002 年毕业于中南大学, 获博士学位; 2002 年 6 月至 2004 年 6 月在河海大学土木工程学院从事水工结构方向博士后研究工作。2004 年 6 月至今就职于中南大学应用地球物理系, 历任副系主任、系主任, 曾担任湖南省地球物理学会秘书长, 现为中南大学地球科学与信息物理学院副教授, 湖南省地球物理学会副理事长。

研究方向为复杂工况环境下矿产资源以及工程灾害地球物理勘探与预报, 在新技术研究、整体方案设计、装备研制、信号分析处理及资料综合解释方面也有所涉猎。

主持国家 863 专项子课题和湖南省科技计划专项子课题各一项, 主持湖南省自然科学基金 1 项, 主持水利水电、交通、找矿、城市及采矿区地质灾害探查等工程技术开发或服务项目数十项; 发表科研论文 30 余篇; 获国家发明专利 30 余项。

参与的项目“水陆两栖工程物探新方法技术研究”于 1994 年获广西壮族自治区科技成果二等奖; “电阻率测量正演模拟和反演成像”于 1999 年获广西壮族自治区科技进步二等奖; “高速铁路过渡段路基关键技术研究与应用”于 2014 年获湖南省科技进步一等奖; “重载铁路桥梁和路基检测与加固技术”于 2015 年获湖南省科技进步一等奖及铁道部科技成果一等奖; “金属矿山复杂多灾源超前预警与防控关键技术”于 2016 年获有色金属工业科学技术二等奖。

编辑出版委员会

Editorial and Publishing Committee

中南大学地球科学学术文库

主 任

何继善(中国工程院院士)

副主任

鲁安怀(教授,国家“973”项目首席科学家,中南大学地球科学与信息物理学院院长)

戴前伟(教授,中南大学地球科学与信息物理学院党委书记)

委 员

彭省临	戴塔根	刘石年	奚小双	彭振斌
赵崇斌	柳建新	汤井田	朱建军	刘兴权
吴湘滨	隆 威	邹峥嵘	邵拥军	戴吾蛟
赖健清	朱自强	吴堃虹	张术根	刘继顺
曾永年	毛先成	张可能	谷湘平	刘亮明
周晓光	李建中	席振铎	李志伟	冯德山
杨 牧	张绍和	邓 敏		

总序

Preface

中南大学地球科学与信息物理学院具有辉煌的历史、优良的传统与鲜明的特色，在有色金属资源勘查领域享誉海内外。陈国达院士提出的地洼学说(陆内活化)成矿学理论，影响了半个多世纪的大地构造与成矿学研究及找矿勘探实践。何继善院士发明电磁法系统探测方法与装备，获得了巨大的找矿勘探效益。所倡导与实践的地质学与地球物理学、地质方法与物探技术、大比例尺找矿预测与高精度深部探测的密切结合，形成了品牌效应的“中南找矿模式”。

有色金属属于国家重要的战略资源。有色金属成矿地质作用最为复杂，找矿勘查难度最大。正是有色金属资源宝贵性、成矿特殊性与找矿挑战性，铸就了中南大学地球科学发展的辉煌历史，赋予了找矿勘查工作的鲜明特色。六十多年来，中南大学地球科学研究在地质、物探、测绘、探矿工程、地质灾害和地理信息等领域，在陆内活化成矿作用与找矿勘查、地球物理探测技术与装备制造、深部成矿过程模拟与三维预测、复杂地质工程理论与新技术以及地质灾害监测等研究方向，取得了丰硕的研究成果，做出了巨大的科技贡献，产生了广泛的社会影响。当前，中南大学地球科学研究，瞄准国际发展方向和国家重大需求，立足于我国复杂地质背景下资源勘查与环境地质的理论与方法创新研究，致力于多学科联合开展有色金属资源前沿探索与应用研究，保持与提升在中南大学“地、采、选、冶、材”特色与优势学科链中的地位和作用，已发展成为基础坚实、实力雄厚、特色鲜明、国际知名、国内一流的以有色金属资源为主兼顾油气、岩土、地灾、环境领域的人才培养基地和科学研究中心。

中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室、有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室，联合资助出版“中南大学地球科学学术文库”，旨在集中反映中南大学地球科学

与信息物理学院近年来取得的系列研究成果。所依托的主要研究机构包括：中南大学地质调查研究院、中南大学资源勘查与环境地质研究院和中南大学长沙大地构造研究所。

本书库内容主要涵盖：继承和发展地洼学说与陆内活化成矿学理论所取得的重要研究进展，开发和应用双频激电仪、伪随机和广域电磁法系统所取得的重要研究成果，开拓和利用多元信息找矿预测与隐伏矿大比例尺定位预测所取得的重要找矿成果，探明和研发深部“第二勘查空间”成矿过程模拟与三维定量预测方法所取得的重要研究成果，预警和防治复杂地质工程与矿山地质灾害所取得的重要技术成果。本书库中提出了有色金属资源勘查理论、方法、技术和装备一体化的系统研究成果，展示了多项突破性、范例式、可推广的找矿勘查实例。本书库对于有色金属资源预测、地质矿产勘探、地质环境监测、地质灾害探查以及地质工程预防，特别对于有色金属深部资源从形成规律到分布规律理论与应用研究，具有重要的借鉴作用和参考价值。

感谢中南大学出版社为策划和出版该文库所给予的大力支持。感谢何继善先生热情指导和题词。希望广大读者对本书库专著中存在的不足和错误提出宝贵的意见，使“中南大学地球科学学术文库”更加完善。

是为序。



2016年10月

前言

Foreword

能够在不接触或部分接触隐蔽对象的前提下获知对象的物理性质和存在的几何状态是地球物理勘探的专业所长和优势。地球物理勘探技术应用在国民经济乃至国防建设的众多领域，在陆地、海洋、深地、深空都能够或有潜力探测各种各样的目标物，解决其定性或定量的难题，早已成为一种必不可少的生产或科研支撑手段。

相比钻探取样等直接揭露对象的技术手段，地球物理勘探（以下简称物探）具有全面、遥测、经济、快速的优点，但总体来说，大部分勘探成果的准确性和分辨能力尚不能尽如人意，提高探测结果的可靠性和分辨能力是物探科研和生产工作者努力求索的目标。

准确性和分辨能力的提高可以通过提升采集信号的“质”和“量”两种改进方式解决。即一是提高信号的测量精度，归为质的提升；二是增加测量信号的密度和类别品种，归为量的提升。前者关联测量系统的灵敏度和操作过程，后者则与观测数据的信息量相关，包括不同物理属性或参数的信息。两种方式的改进或者协同发展可以大幅提高物探成果的可靠性和分辨能力，从根本上为后期的物性、状态反演以及推断解释提供数据保障。

提高信号的测量精度，从理论上说，不论是在主动源还是天然场激励下，被探测目标都会产生激励响应，只不过响应的信号微弱，甚至远远低于干扰噪声背景，或不能为仪器仪表或作业人员所分辨，因此需要提高仪器系统的灵敏度。干扰噪声背景可能来自非探测目标响应，也可能来自作业环境的自然场信号或者是与测量系统相关的噪声信号。从物探工作者的角度来说，测量精度可以分为两个层次，第一个层次来自于信号采集记录层面，即

仪器系统是否能够记录来自目标对象的最小响应,即使是低于背景噪声或在表象上掩埋在噪声之中的响应信号;第二个层次是数据分析处理和信号提取水平,看工作者能否从有干扰噪声的复合信号中提取出目标对象的响应信息。

基于信号的测量密度和类别量,是着眼于目标几何和物性参数的定解要求,这些需要定性或量化的参数需要有足够的非线性相关勘探数据信息作为前提。因此地球物理勘探在现场作业过程中需要从物理参数、时间、空间、频率等多维度获取来自目标的响应信号,以尽可能接近或满足多参数定解时对已知数据量的需要。

在电子信息等基础软硬件和地球物理勘探基础理论发展的任何阶段,方法技术的突破在提升物探信号“质”和“量”的进程中都起着关键作用,自然也推动着专业基础理论和电子技术、信息处理理论的进步。在地球物理勘探基础理论尚未能形成根本突破的某个发展时期,从生产实际出发,解决物探工程中的各种技术难题是提高物探成果可靠性和分辨能力的一个重要途径。对重、磁、电、震等常规物探方法以及放射性、温度场、流体动力场等非常规观测手段,除了提高综合作业效率之外,在技术层面上也有许多可以提升的细节或辅助装备。通过技术革新和发明创造,以生产力的提升为目标,各界同行相互配合,不懈努力,一定能够将地球物理勘探推向更广阔深远的应用领域。

全书以传导类直流电法和激发极化法、瞬变电磁法类、弹性波勘探类、地球物理勘探信号处理等四篇分列了地球物理勘探领域多项新技术或发明,内容涉及近介质体表面作业时的超前探测、定向探测和工程无损检测方法及其辅助装置,通过对物探数据信息“质”和“量”的改进来提高地球物理勘探的分辨能力和解释精度,从而提高物探解释结果的可靠性。本书可以作为地球探测与信息技术专业研究生的课程参考用书,也可作为勘查技术与工程等相关专业高年级本科生的选修课指导用书。

目录

Contents

第一篇 传导类直流电法和激发极化法	(1)
第1章 大定源建场条件下掘进工程隐患电法超前预报方法	(3)
1.1 概述	(3)
1.2 方法原理与关键技术	(4)
1.3 实验及试验	(10)
1.4 应用实施	(13)
1.5 技术拓展	(14)
第2章 止水帷幕渗漏通道隐患的传导类电法探测方法	(16)
2.1 概述	(16)
2.2 方法原理与关键技术	(17)
2.3 实验及试验	(20)
2.4 应用实施	(21)
2.5 技术拓展	(21)
第3章 钻孔注浆帷幕质量检测方法	(23)
3.1 概述	(23)
3.2 实验及试验	(25)
3.3 应用实施	(31)
3.4 技术拓展	(34)
第4章 前向点电源激励下线阵列观测系统与异常征候	(35)
4.1 概述	(35)
4.2 地球物理响应征候	(35)
4.3 基于断层构造的电阻率异常模型	(36)
4.4 电激励征候解译与隐患监测预警系统	(42)
4.5 技术拓展	(43)
第5章 前向点电源激励下线阵列观测征候及综合预警	(44)
5.1 概述	(44)
5.2 地电激励响应中的电场征候优势与电位测量	(44)
5.3 电激励响应激电征候	(46)

5.4	隐患电激励征候综合预警	(48)
5.5	技术拓展	(49)
第6章	一种水底隐伏目标走航式电法探测系统	(51)
6.1	概述	(51)
6.2	探测方法与关键技术	(52)
6.3	实验及试验	(53)
6.4	应用实施	(54)
6.5	技术拓展	(57)
第7章	电法随钻超前预报观测系统	(58)
7.1	概述	(58)
7.2	探测方法与关键技术	(59)
7.3	实验及试验	(60)
7.4	应用实施	(62)
7.5	技术拓展	(62)
第8章	一种检定良导体杆件材料埋设长度的方法	(64)
8.1	概述	(64)
8.2	一维良导体充电电场数值模拟	(65)
8.3	实验及试验	(68)
8.4	野外工作方法设计	(71)
8.5	技术拓展	(72)
第二篇	瞬变电磁法类	(73)
第9章	线阵列多路同步瞬变电磁定向探测方法及其装置	(76)
9.1	概述	(76)
9.2	方法原理与关键技术	(78)
9.3	实验及试验	(79)
9.4	应用实施	(81)
9.5	技术拓展	(82)
第10章	瞬变电磁响应信号空间梯度测量方法及观测装置	(84)
10.1	概述	(84)
10.2	方法原理与关键技术	(85)
10.3	实验及试验	(88)
10.4	应用实施	(90)
10.5	技术拓展	(90)
第11章	瞬变电磁响应信号水平分量测量方法及其观测装置	(92)
11.1	概述	(92)

11.2	方法原理与关键技术	(93)
11.3	实验及试验	(94)
11.4	应用实施	(96)
11.5	技术拓展	(99)
第 12 章	瞬变电磁勘探用线圈充气支架及其使用方法	(100)
12.1	概述	(100)
12.2	应用实施	(101)
12.3	技术拓展	(103)
第 13 章	瞬变电磁勘探用发射或接收线圈	(105)
13.1	概述	(105)
13.2	基本原理	(106)
13.3	应用实施	(107)
13.4	发射线圈对比模拟试验	(108)
13.5	技术拓展	(109)
第三篇	弹性波勘探类	(111)
第 14 章	地震勘探双能量双通道采集技术	(113)
14.1	概述	(113)
14.2	方法技术原理	(114)
14.3	双能量双通道数据采集技术与薄层分辨能力	(119)
14.4	两种相关新技术	(122)
14.5	技术拓展	(126)
第 15 章	压电加速度传感器响应特性与新技术	(128)
15.1	概述	(128)
15.2	方法原理与关键技术	(129)
15.3	实验结果及分析	(133)
15.4	原位测试实验分析	(135)
15.5	技术拓展	(136)
第 16 章	磁电式速度传感器响应特性与新技术	(137)
16.1	概述	(137)
16.2	理论模型分析	(137)
16.3	实验分析	(140)
16.4	拓展技术	(145)
第 17 章	浅层地震勘探数据拟同步采集技术	(148)
17.1	概述	(148)
17.2	同步采集与分频采集理论误差	(149)

17.3	采集系统误差对比分析	(150)
17.4	实践验证	(154)
17.5	技术拓展	(155)
第18章	井巷定向探测地震勘探数据采集方法	(156)
18.1	概述	(156)
18.2	方法原理与关键技术	(158)
18.3	应用实施	(160)
18.4	技术拓展	(162)
第19章	超前探测用传感器送放装置	(163)
19.1	概述	(163)
19.2	方法原理与关键技术	(164)
19.3	应用实施	(166)
19.4	技术拓展	(167)
第20章	土类场地浅层地震勘探用震源垫板	(168)
20.1	概述	(168)
20.2	方法原理与关键技术	(169)
20.3	应用实施	(170)
20.4	技术拓展	(172)
第21章	地震勘探或振动测试用岩壁附着垫板	(173)
21.1	概述	(173)
21.2	方法原理与关键技术	(174)
21.3	应用实施	(175)
第22章	小应变桩基质量检测技术	(177)
22.1	概述	(177)
22.2	方法原理与关键技术	(178)
22.3	应用实施	(180)
第23章	路基路面工程横波检测系统与方法	(183)
23.1	概述	(183)
23.2	方法原理与关键技术	(184)
23.3	应用实施	(192)
23.4	技术拓展	(193)
第24章	公路路基隐患连续探测传感器装置及探测方法	(195)
24.1	概述	(195)
24.2	方法原理与关键技术	(196)
24.3	应用实施	(197)
24.4	技术拓展	(199)

第 25 章 一种增大动圈式检波器静磁场的方法及检波器	(202)
25.1 概述	(202)
25.2 方法原理与关键技术	(203)
25.3 应用实施	(204)
25.4 技术拓展	(205)

第四篇 地球物理勘探信号处理

(207)

第 26 章 一种铁路路基雷达探测信号中的干扰去除方法	(210)
26.1 概述	(210)
26.2 方法原理与关键技术	(211)
26.3 实验及试验	(214)
26.4 应用实施	(215)
26.5 技术拓展	(216)

第 27 章 止水帷幕渗漏通道快速探测的温度场测量技术	(217)
27.1 概述	(217)
27.2 方法原理与关键技术	(218)
27.3 应用实施	(219)
27.4 技术拓展	(221)

第 28 章 BP 神经网络残差级联与稳定性评估	(223)
28.1 概述	(223)
28.2 残差级联 BP 网络模型	(223)
28.3 BP 神经网络稳定性评估	(225)
28.4 残差级联 BP 神经网络应用	(227)

第 29 章 一种泛 CT 成像算法	(238)
29.1 概述	(238)
29.2 算法原理及计算流程	(239)
29.3 计算案例	(241)
29.4 技术拓展	(242)

第 30 章 脏污道床介电常数的标定与实验模拟	(244)
30.1 概述	(244)
30.2 道砟介电常数标定方法	(246)
30.3 级配脏污道砟介电常数测量及结果分析	(248)
30.4 技术拓展	(252)

参考文献	(253)
------------	-------

彩图	(259)
----------	-------

后记	(262)
----------	-------

第一篇

传导类直流电法和激发极化法

供电电极产生的电场，在特定介质空间有基本固定的分布规律，现场实际测量的激励响应信号为电位或电场强度，其中携带着隐伏探测目标的响应，需要从背景中提取。如表 A 和表 B 所示，理论及物理模拟试验研究表明，传导类直流电法和激发极化法的分辨能力或勘探深度有限。提高探测能力最好的改进方式是提高测量信号的精度，比如对于理想良导球体，当测量精度从传统的 5% 提高到 1% 时，以深径比(h/D)为标示的相对勘探深度从约 1.2 提高到约 2.4，探测能力提高了一倍，对于理想无限长圆柱导电体，探测能力则提升得更高。

表 A 理想球体相对异常精度与最大探测深度的关系*

异常精度/%	10	5	4	3	2	1	0.5	0.1
良导体探测深径比 (h/D)	0.857	1.210	1.342	1.527	1.821	2.424	3.184	5.800
高阻体探测深径比 (h/D)	0.577	0.857	0.962	1.110	1.342	1.821	2.424	4.500

表 B 低阻水平圆柱体异常相对探测精度与最大探测深度的关系*

异常精度/%	10	5	4	3	2	1	0.5	0.1
低阻探测深径比 (h/D)	1.736	2.662	3.036	3.582	4.500	6.571	9.500	21.860

提高信号测量精度有两个途径，一是提高观测系统或仪器的灵敏度，二是提

* 温佩琳. 湖南省地球物理理论丛(2001)[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2001.