

中煤科工集团西安研究院 为庆贺李毓茂研究员
陕西省地球物理学会

从事地球物理工作60周年及祝贺他80寿辰而出版

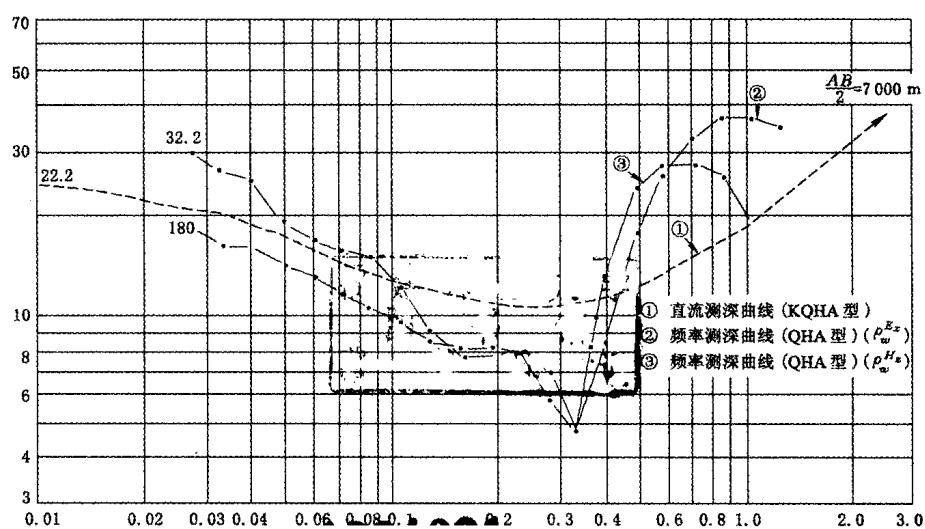
电磁频率测深方法与 电偶源电磁频率测深量板

李毓茂 等著

中国矿业大学出版社
China University of Mining and Technology Press

电磁频率测深方法与 电偶源电磁频率测深量板

李毓茂 等著



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书共分三篇:第一、二篇是作者 1981 年和 1982 年的原作;第三篇是新编的内容。第一篇“电磁频率测深法”系统论述了该方法的基本原理、工作方法和有关技术、资料处理和解释方法、变种应用、工作技术要求和实例等。第二篇“电偶源电磁频率测深量板”列出了电偶极源波区和不同极距比(全频域)的 ρ_{ω}^E 和 ρ_{ω}^H 二层和三层测深理论曲线 506 组 5 000 多条曲线,揭示出多种规律,可作量板对比定量解释及指导开展频率测深法实际工作的全过程。

据此书所述的理论、公式、技术方法和全频域量板计算的基础,及其后研发的智能自动定量解释方法,创立了全方位、任意极距和所需频段进行电磁频率测深工作的条件。

第三篇“附录”是作者单位近年电磁频率测深研究和应用工作的部分报道,包括某些算法、理论及应用实例。其中,《磁偶源频率测深法(MAXI-PROBE 系统)工作技术规定》是作者 1990 年的原稿,制定了应用此方法应遵守的技术条例。

本书可供从事地球物理工作的人员、研究生使用,亦可供地质工程师及从事电磁法勘探技术人员参考,或作为教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

电磁频率测深方法与电偶源电磁频率测深量板/李
毓茂等著. —徐州:中国矿业大学出版社,2012.7
ISBN 978 - 7 - 5646 - 1368 - 6

I. ①电… II. ①李… III. ①电磁法勘探—测深
IV. ①P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第274495号

书 名 电磁频率测深方法与电偶源电磁频率测深量板
著 者 李毓茂 等
责任编辑 王江涛
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏徐州新华印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 26.25 插页 8 字数 655 千字
版次印次 2012 年 7 月第 1 版 2012 年 7 月第 1 次印刷
定 价 168.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

感謝李毓
茂教授為
祖國地球
物理勘探
事業做出
的卓越貢
獻

董書寧

中国煤炭科工集团西安研究院院长、研究员、博导董书宁贺词

辛勤耕耘
貢獻卓越

賀終身榮譽理事長李毓才教授八壽辰

陝西省地球物理學會
二〇二二年十月

陝西省地球物理學會賀詞（陈志浩代書）



原毛泽东主席保健医生兼秘书，前核工业部安全防护卫生局局长
中国文化艺术协会翰墨名家、医学博士王鹤滨书

福慧齊臻

李毓茂先生
雅正 壬午金秋
陳志浩書

中国书法家协会、上海书法家协会会员，上海普陀区书法协会副会长陈志浩题词

李毓茂教授八十大寿

博学厚德

辛卯年秋北京

叶丹
鹤滨敬贺

电磁频率测深 二层及三层量板

(2)

煤炭工业部
地质研究所印制
1981年5月印制

电磁频率测深 二层及三层量板

(1)

煤炭工业部
煤炭科学研究院地质研究所印制
1981年5月印制

电磁频率测深 二层及三层量板

(3)

煤炭工业部
煤炭科学研究院地质研究所印制
1981年5月印制

频率电磁测深法

李毓茂 侯烈忠 陆俊良 陈桂英

煤炭科学院地质勘探研究所
物探方法研究室
一九八二年二月印制

附件(三)

磁偶源频率测深法

(MAXI-PROBE系统)

工作技术规定

拟定人: 李毓茂

李杰彬

曾明远

煤炭科学研究总院西安分院物探研究所 联合工程队
江西煤田地质局普查综合大队
1990年于江西九江岭背工区

附件3-1

李毓茂教授生平简介

李毓茂,男,1932年出生于云南省寻甸县。教授级高工,享受政府特殊津贴(1992年),陕西省地球物理学会终身荣誉理事长。1956年从东北地质学院物探系本科毕业,任教于北京地质学校。1965年调原煤炭部西安煤田地质勘探研究所(后为煤炭科学研究总院西安研究院、今中国煤炭科工集团西安研究院)工作至退休。主持的课题和成果获1973年陕西省燃料化学工业局先进集体奖、1978年全国科学大会奖、1979年陕西省科学大会个人优异成绩奖和课题项目奖。1978~1984年间,获原煤炭工业部科技进步二等奖、三等奖。参与项目获国家科技进步三等奖。

曾任原北京地质学校教师和学科主任,煤炭科学研究总院西安分院学术委员会委员、物探方法研究室主任兼电法组组长、电法研究室主任兼频率测深课题组负责人、物探研究所总工程师,中国地球物理学会仪器与观测系统专业委员会委员,中国煤炭学会物探分会理事兼电磁法专业委员会主任,中国仪器仪表学会地质仪器分会理事兼电磁法专业委员会主任,中国《地质仪器》编辑委员会委员,陕西省地质学会理事兼电磁法专业委员会副主任,陕西省地球物理学会副理事长、理事长兼科技咨询服务工作委员会主任等。

主要研究理论与技术:直流电法探测积水老窑的有效性评价,国内领先创立电磁频率测深方法研究,PC—1型等系列电磁频率测深仪及MAXI-PROBE仪研制的技术指标要求,电偶源频率电磁测深曲线的正演研究及量板研制,频率电磁测深法在煤田及其它地质与矿产勘探中的应用,华北型煤田奥灰岩溶水综合防治工业性试验中的电法技术研究,频率测深相位观测和相位曲线规律研究,静态偏移校正方法,磁偶源频率测深(MAXI-PROBE系统)探测技术与解释方法,MAXI-PROBE技术在勘探工程应用中的“技术规程”,旁侧中间梯度法(属于CSAMT之前身)及频率测深变种工作方法,PETRO-SONDE理论原理及技术方法可行性等。

此外,他曾提出新颖见解:“电磁层波形成及其在煤矿井下应用可能性”(1976);“电磁频率测深法特点”及“直接找油气可能性”(1981、1982);“频率测深法与其它电磁法统一合成研究可行性”(1982)。指导研究生期间,又获“渐变电阻率频率测深研究”、“电磁频率测深相位转换”、“频率测深地形影响及校正”等成果。其研究成果及论述曾编制成多种文册交流使用,部分收录于《煤田地质情报》、《煤田地质与勘探》、《中国煤田地质》、《石油物探》、《中国地球物理学会学术年会论文集》、《陕西地球物理文集》、煤炭科学院西安地质勘探分院论文集等出版物。

1986年,他参与创建陕西省地球物理学会,先后任副理事长、理事长各两届。1996年倡议并建立由煤炭科学研究总院西安研究院物探仪器所领衔、冯宏主持的“陕西省地球物理学会坑洞与隧道物探专业委员会”。2002年倡议并建立由第二炮兵学院领衔、刘代志主持的“陕西省地球物理学会军事地球物理专业委员会”。多次被评为陕西省科学技术协会年度先

进工作者、优秀学会工作者二等奖、中国地球物理学会先进工作者等。至今仍坚持工作在学会科技咨询服务工作委员会主任岗位和地球物理研究领域。由于其研究成果领先、见解独到、技术实用、应用广泛、影响深远,被誉为我国频率电磁测深创始人。个人简历收录于《世界著名华人社团领导人名典》、《中国当代地球科学家大辞典》、《世界名人录》、《中国矿业家大辞典》、《中国专家人名辞典》、《世界文化名人辞海(华人卷)》、《科学中国人中国专家人才库(世界珍藏版)》等多种辞书。

本书中的“频率测深方法”和“量板”部分内容,下列人员参与执笔,均系有关课题组成员:

陈桂英(女):教授,1940年出生,1964年毕业于北京矿业学院地球物理专业本科,同年于煤炭科学院地质勘探研究所参加工作,曾任课题组组长。1981年调马鞍山钢铁学院工作至退休。

侯烈忠(男):高级工程师,享受政府特殊津贴,1942年出生,1966年北京矿业学院地质系地球物理勘探专业本科毕业,同年于煤炭科学院西安分院参加工作至退休。

陆俊良(男):高级工程师,1935年出生,1956年毕业于原煤炭工业部阜新矿业工业学校物探专业,同年于煤炭科学院地质勘探研究所参加工作至退休。

张力光(男):工程师,1954年出生,1977年毕业于西安交通大学计算数学本科,同年于煤炭科学院西安分院参加工作,现任物探仪器所销售经理。

出版说明

本书为庆贺陕西省地球物理学会荣誉理事长、原煤炭科学研究总院西安分院(2010年更名为中国煤炭科工集团西安研究院)物探研究所总工程师兼电法研究室主任李毓茂先生从事地球物理工作60周年及祝贺他80寿辰而出版。

1967年,煤炭科学研究总院西安分院成立了“频率测深法”项目研究小组,李毓茂先生和他的同事们在条件非常艰苦的情况下开始了研究工作,当时没有网络,仅有部分零散的俄文文献作参考,没有先进的计算机、没有绘图设备,几乎所有的工作都是手工完成的。

1977年,项目组完成了“频率测深法”方法研究工作,他们编写了油印刻版教材,在全国有电磁法勘探基础的单位进行培训讲解,并初步开始应用。1981年完成了《电磁频率测深量板》讲稿,1982年完成了《频率电磁测深法》讲稿。

40余年过去了,频率测深法在石油、地质、冶金、煤炭、核工业等行业的发展十分迅速,理论研究水平不断深化提高,如今人们已经不再使用手绘量板对比实测曲线,也很少有人会记得这段历史。

2011年,李毓茂先生作为陕西省地球物理学会终身荣誉理事长,仍坚持工作在学会科技咨询委员会主任岗位和中国物探研究领域。适逢其80华诞,他在中国煤炭科工集团西安研究院的学生及同事们偕陕西省地球物理学会的其他同仁,共同把先生最有影响的《频率电磁测深法》(1982)、《电磁频率测深量板》(1981)等讲稿讲义整理出版,以此来表示我们的祝贺。

本书涉及的知识比较基础,内容比较全面,推导过程详细,是中国煤炭科工集团西安研究院电法研究所数十年在电磁法勘探方法研究的重大课题成果的部分总结性材料,内容分为三部分:第一部分是国内第一部该方法的系统论述;第二部分是国内第一部曲线量板册;附录部分是有关算法、应用实例和技术规程。

中煤科工集团西安研究院
电法研究所所长



2011年10月

序 言

电磁频率测深法是利用人工交变电磁场探测研究地下或海洋、湖泊下地质体电性结构的一种地球物理勘探方法,通过检测分析电磁波与地质体相互作用反映在地表的信息,可将不同电性结构的地质体推断解释出来。此方法是探测煤炭、石油、天然气、矿山水害、水资源以及金属、非金属等的重要而有效的方法。随着国民经济建设和社会的发展,这种方法的应用领域进一步扩展到建筑地基、公路桥梁、环境监测等领域,是勘探地球物理学中的重要组成部分。

新中国成立之初,百废待兴、能源紧缺、西方国家封锁,资源勘探主要依靠从前苏联引进的一些有限的方法和技术。其中电法勘探主要以直流电法为主。此时,国家开始组建自己的勘探科研队伍,李毓茂教授正是新中国培养起来的第一批勘探技术人才之一,他在多年从事教学和科研的基础上,深有远见地预测到将交流电磁方法应用于地质勘探的特长和前景。在资料匮乏、信息闭塞的情况下,他于1967年在国内率先开始了电磁频率测深方法和仪器的研究。在他主持下,1970年电磁频率测深理论原理和技术方法基本成熟;1971年研制出我国第一套(深、浅层)PC—1型频率测深仪;1972~1973年,多地区深、浅层地质探测有效性试验完成;1974年,他们的研究成果经煤炭科学院和中国煤田地质总局主持鉴定评审通过,正式宣告我国自主研发的“频率测深方法和频率测深仪”获得成功。1976~1982年,他和他的科研团队完成了原煤炭工业部重点项目“频率测深技术方法”、“频率测深地质效果综合研究”等课题。其间,1981年推出了我国第一套(迄今仍是我国唯一的一套)“电磁频率测深二层及三层量板”和解释方法,使我国成为世界上拥有全套频率测深方法和技术的国家。其科研成果不仅均为国内首创,而且其中三项达到国际先进水平。他主持的课题和项目曾获:原陕西省燃料化学工业局先进集体奖(1973年)、全国科学大会奖(1978年)、陕西省科学大会个人优异成绩奖和课题项目奖(1979年)、原煤炭工业部科技进步二等奖和三等奖(1978~1984年),参与项目获国家科技进步三等奖。

由于频率测深方法具有应用频率范围宽、研究参数多、水平层各向异性影响小、穿透高阻屏蔽层能力强、对低阻体反应灵敏、纵横向分辨率及野外作业强度和工作效率等均优于直流测深法的特点,很快在各大专区勘探工作中得到广泛学习和应用。其间,李毓茂教授多次在各种会议作专题报告和特邀讲座:1972年陕西省铁路、建材、煤炭、地质有关物探单位“频率电磁测深法”(陕西西安);1974年南方四省煤田物探测量队联合频率测深技术学习班“频率测深技术与方法”(江西向塘);1977年煤炭系统七省物探测量队联合频率测深法学习班“频率电磁测深法”(湖南株洲);1979年陕西省地质学会年会及该会物化探专业技术研讨会“频率测深法及其在金属矿上的应用和发展前景”(陕西西安);1980年原地质部水文物探技术研讨会“频率测深法及其在水文地质、工程地质勘探上的应用”(广西柳州);1981年中国地球物理学会学年会“频率电磁测深法及与其它电磁法综合研究”(云南昆明);1982年全国

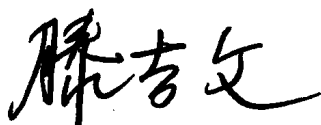
频率测深学习班“频率电磁测深法”和“电磁频率测深量板”(安徽宿州);1982年中国地质学会勘探地球物理全国学术年会“关于频率电磁测深探测深度的几个问题”(河北承德);1993、1995年陕西省地球物理学会学术会议“一种新型的电磁频率测深法(MAXI-PROBE系统)”(陕西西安);以及应邀到原北京水文工程兵部队及广东、江西、青海、湖南、辽宁、浙江、甘肃等煤田物测队做“频率测深方法研究进展”讲座;1988年主持中国仪器仪表学会地质仪器分会“频率电磁测深方法和仪器全国学术、技术研讨会”(北京)等。

此外,李毓茂教授先后提出新颖见解:“电磁层波形成及其在煤矿井下应用可能性”(1976年原煤炭部煤田物探会议)(江苏常州);“频率电磁测深法特点”及“直接找油气可能性”[(1981年中国石油学会非地震法找油会议)(河北涿州)、《石油物探》(1982)];“频率测深法及与其它电磁法统一合成研究可行性(即一次野外数据采集室内多种电磁法参数析出)”(1982年原地质部西北情报网络会议、江西省地质学会)(陕西西安、江西南昌)。其研究成果及论述曾编制成《频率测深法简介》(1972)、《频率测深方法、仪器及应用效果》(1976)、《频率测深法》(记录稿)(曾炳执笔)(1977)、《频率测深若干问题研究》(1980)、《电磁频率测深二层及三层量板》(1981)、《频率电磁测深法》(1982)、《电磁频率测深曲线正演计算》(1984)、《磁偶源频率测深解释方法》(1989)、《消除“静态偏移”的有效方法》(1990)、《磁偶源频率测深(MAXI-PROBE系统)工作技术规定》(1990)、《新型电磁频率测深(MAXI-PROBE系统)》(1995)等研究报告和论著,部分论文收录于《煤田地质情报》、《煤田地质与勘探》、《中国煤田地质》、《石油物探》、《中国地球物理学会年会论文集》、《陕西地球物理文集》等期刊。

1981~1982年,李毓茂教授等4人将他们多年的科研成果和教学材料汇集成《频率电磁测深法》、《电磁频率测深二层及三层量板》两部著作,用于国内有关地质勘探单位交流使用。1984年,应煤炭工业出版社约稿,对有关内容汇集整理成书。该著作在国内首次系统、完整地论述了频率电磁测深方法原理、工作方法、技术要求、多参数应用、测深曲线特点和规律、数据处理与多种解释方法、多变种方法等内容,并侧重指导实际应用,深入浅出,略去繁琐的推导和运算,给出电偶极源和磁偶极源多方位的 E_x 、 E_y 、 E_z 、 H_x 、 H_y 、 H_z 分量及其在波区(远区)、S区(近区)的各种视电阻率表达式,并详述它们的特点和相关性。据此书刊出的理论、公式和全频域技术方法,及其后研发的自动处理解释系统,1985年已创立了全方位、任意极距和所需频段进行电磁测深工作的条件。该书阐述理论深入、应用技术详尽、启示性方向准确,除指导现实应用外,也为频率电磁测深后续发展提供了基础,其中“电磁频率测深量板”是开展该方法研究和实际应用不可缺少的指导性文件。其后,他及他的科研团队继续深入探索,相继研发出“渐变电阻率频率测深”、“电磁频率测深相位转换”、“频率测深地形影响及校正”、“电磁频率测深现代解释方法”、“电磁频率测深视电阻率和相位多参数综合反演法”、“MAXI-PROBE探测方法研究和仪器研制”、“MAXI-PROBE勘探技术及地质效果验证”等科研成果。特别是书中所述的“旁侧中间梯度法”是目前国内外大量使用的CSAMT方法的雏形,“相位观测和相位曲线规律性研究”即发展为近年常用的静态效应校正方法之一。1990年,李教授带领课题组在江西武宁和瑞昌两地煤田使用自主研发的MAXI-PROBE仪,取得我国第一例大规模工业性生产的成功先例。他们的研究成果及其推广应用,不仅为我国电磁法勘探技术的发展以及煤田、油田、水文等地质勘探的应用做出积极贡献,而且其所展示的求实精神和探索智慧,仍能给我们带来启迪和借鉴。

我国频率电磁测深方法与技术经过 40 多年的发展壮大,特别是引入数字化和图形化技术,目前已形成数据采集与处理、综合解释与分析、方法理论与软件开发、仪器设计与开发制造等系列化科研与工程配套体系,为现代化建设中资源勘查、水文地质、工程地质、矿山矿井地质、灾害地质、城市地质、环境地质等方面发挥着重要作用。值此李毓茂教授 80 寿辰之际,为表彰他常年埋头实验室,风餐露宿蹲点于矿山、野外,潜心物探工作近 60 年,以及在科研、生产和学术上的贡献,在中国煤炭科工集团西安研究院的安排和电法研究所的筹划下,特将当年书稿原文和量板原型及近年电磁频率测深法团队部分科研人员的论文一并出版,以为纪念。

中国科学院院士
研究员 教授 博导



2011 年 10 月

目 录

第一篇 电磁频率测深法

第 1 章 绪论	3
1.1 基本概念	3
1.2 测深方法分类	5
1.3 施工种类及观测参数	5
1.3.1 场源	5
1.3.2 测量	6
1.3.3 深度控制	6
1.3.4 基本观测参数	6
1.3.5 研究参数	7
1.4 优缺点	8
1.4.1 优点	8
1.4.2 缺点	8
1.5 应用范围	8
第 2 章 工作原理	9
2.1 场的建立和传播	9
2.2 波场区的划分	10
2.2.1 远区	11
2.2.2 近区	12
2.2.3 中间高阻层和高阻基底存在的情况	12
2.2.4 关于垂直折射波(S^* 波)的证明及各向异性影响问题	14
2.2.5 有效勘探深度	15
2.2.6 记录点	16
第 3 章 场方程式	18
3.1 麦克斯韦方程组	18
3.2 地面偶极子场源的场方程	19
3.2.1 均匀半空间地面水平电偶极子源的电磁场	19
3.2.2 均匀半空间地面垂直磁偶极子源的电磁场	21

3.2.3 半空间均匀分层介质的场强	21
第4章 视电阻率和视相位差概念及其计算	24
4.1 视电阻率的概念	24
4.2 视电阻率的分类	24
4.3 视电阻率计算公式	25
4.3.1 单分量视电阻率 ρ_w 式	25
4.3.2 单分量电阻等效视电阻率 ρ_w^R 式	26
4.3.3 单分量 ρ_w^L (电抗等效视电阻率) 式	27
4.3.4 比值法视电阻率式	28
4.3.5 水平分层介质波区的 ρ_w 式	30
4.3.6 波区与 S 区之间 ρ_w 的关系	30
4.3.7 水平电偶极源 H_z 观测与垂直磁偶源 E_θ 观测的 $\rho_w^{H_z}$ 与 $\rho_w^{E_\theta}$ 间的关系	31
4.3.8 视相位(φ_w)的概念	31
第5章 电磁频率测深曲线类型及特征	32
5.1 均匀半空间	32
5.2 二层断面	32
5.2.1 理想波区曲线($r \rightarrow \infty$)特征	33
5.2.2 非理想波(全区或全频域)曲线(r 非无穷大)特征	35
5.3 三层断面	37
5.3.1 理想波区曲线($r \rightarrow \infty$)	37
5.3.2 非理想波区(全区或全频域)曲线(r 非无穷大)特征	42
5.4 四层断面及多层断面	45
第6章 野外工作方法及有关技术和技术要求	48
6.1 装置、极距选择和测线布置	48
6.2 野外观测结果的表示	49
6.3 接收线圈问题	50
6.4 供电偶极 AB 较长时的修正	52
6.5 某些技术要求	54
6.5.1 对仪器方面的要求	54
6.5.2 对质量方面的要求	55
第7章 解释方法	57
7.1 定性解释	57
7.1.1 曲线类型图	57
7.1.2 等视电阻率剖面和平面对	57