

“八五”国家重点科技攻关项目
“黄河治理与水资源开发利用”系列专著

堤防工程技术

陈效国 李丕武 谢向文 曹常胜 赵 乐 等编著



黄河水利出版社

“八五”国家重点科技攻关项目
“黄河治理与水资源开发利用”系列专著

堤防工程新技术

陈效国 李丕武 谢向文 曹常胜 赵 乐 等编著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书系“八五”国家重点科技攻关项目“黄河治理与水资源开发利用”的第一课题(85-92-6-01)第四专题“堤防工程新技术研究”的成果。主要包括:堤防隐患探测新技术、减少抢险的丁坝结构设计与施工新技术、黄河下游防洪工程数据库等。

本书可供地球物理勘探、黄河防洪、河道治理等专业技术工程者、高等院校的师生及有关部门的技术人员参考。

“八五”国家重点科技攻关项目

“黄河治理与水资源开发利用”系列专著

堤防工程新技术

陈效国 李丕武 谢向文 曹常胜 赵 乐 等编著

责任编辑:张思敬

责任校对:何新华

责任印制:常红昕

出版发行:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合大楼 12 层

邮编:450003

印 刷:黄河水利委员会印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

版 别:1998 年 4 月 第 1 版

印 次:1998 年 4 月郑州第 1 次印刷

印 张:11.25

印 数:1—1000

字 数:259 千字

ISBN 7-80621-147-0/TV·107

定 价:36.00 元

“八五”国家重点科技攻关项目
“黄河治理与水资源开发利用”系列专著
编 审 委 员 会

主 任 严克强

副主任 董哲仁 陈效国 庄景林

顾 问 徐乾清 龚时旻 吴致尧

委 员 (以姓氏笔画为序)

龙毓骞 朱兰琴 许红波 祁建华

华绍祖 庄景林 严克强 李文学

李春敏 沈国衣 陆亚洲 陈志恺

陈效国 陈霁巍 张启舜 张良弼

府仁寿 姚传江 徐明权 席家治

董保华 董哲仁 潘贤娣 戴定忠

序

黄河流域是中华民族的发祥地,黄河哺育了中国灿烂的古代文明。黄河流域自然资源十分丰富,是我国最大的能源和重化工基地,宁、蒙、汾渭河和黄淮海平原是我国主要的粮棉基地,流域经济发展前景广阔。但是,黄河流域水资源匮乏,人均水资源占有量仅为全国人均的四分之一,单位耕地面积水资源量不足全国的五分之一。近几年来,黄河下游在枯水季节常常出现断流,且断流时间逐年加长,断流河段逐年延伸,给下游沿黄地区的工农业生产和生态环境造成了不良影响。据有关部门的调查统计,1991年~1996年年均造成工农业产值损失30多亿元,其中1995年达70多亿元。

黄河流域降雨时空分布极不均匀,全年降雨量的60%~70%集中在6月~9月份,极易产生洪水。黄河又是世界上泥沙含量最高的大河,河道泥沙淤积形成了下游“地上悬河”,洪水灾害十分频繁。据统计,从先秦时期到民国年间的2500多年中,黄河下游决口1600多次,改道26次,基本上是三年两决口,百年一改道,每次决口和改道都给中华民族带来了极其深重的灾难。

新中国成立以来,人民治黄事业取得了举世瞩目的成就,确保了黄河的岁岁安澜,但是由于黄河流域自然地理环境脆弱,黄河的洪水仍是国家的心腹之患,治理开发任务仍十分艰巨。全国人大七届四次会议通过的《国民经济和社会发展“八五”计划和十年规划纲要》,把黄河治理开发和防洪列为重点,体现了中共中央和国务院对治黄的重视。

当前我国改革开放和社会主义现代化建设已进入一个新的发展阶段。黄河的治理开发,事关我国经济发展的大局。为使我国经济发展实现三步走的目标,治黄作为水利工作的重要组成部分,就必须贯彻落实好“科教兴国”、“科教兴水”和可持续发展战略。黄河的出路在于科技进步。

“黄河治理与水资源开发利用”被列为“八五”国家重点科技攻关项目,既表明了国家对治黄工作的高度重视,也显示出黄河问题的高难度和复杂性。这次科技攻关中广大科研人员深入黄河两岸调查研究,收集了大量的实测资料,在认真汲取以往成果和经验的基础上开展科研试验工作,取得了新的进展和突破,科研成果为黄河的治理与开发提供了大量的科学依据和决策支持。应该说这些成果是集此次科技攻关之大成,是治黄几十年经验总结的集中体现,是广大治黄科技工作者智慧的结晶。

这次出版的项目和专题的系列专著,其目的就是把这些成果推荐给读者,并期望得以推广应用,以提高治黄工作的整体水平,加速流域治理和经济发展的步伐,取得更大的经济、社会和环境效益。

毋庸置疑,黄河问题是很复杂的。黄河自身因水沙的变化而处于不断的变化之中,在其发展过程中还会不断出现新情况和新问题,现已取得的成果只是人们现阶段的认识,要彻底解决黄河问题,还有一段很长的路要走,可以说是任重而道远。我们应当继续加强现场观测、试验和研究工作,探索黄河的规律,不断提高科技水平,充分推广应用新的科技成果,使黄河的治理开发工作不断取得新成就。

严 克 强

1997年7月17日

总 前 言

新中国成立以来,对黄河治理开发进行了大量的科学研究工作。50年代,曾组织各方面力量对全流域进行了大规模综合考察和科学试验研究,在此基础上编制了“黄河综合利用规划技术经济报告”,为黄河的全面治理开发做出了贡献。60年代,围绕三门峡水利枢纽工程改建和改变运用方式,开展了水库淤积、河道演变规律、河道整治工程和防洪等方面的试验研究。70年代,开展了三门峡水库运用泥沙问题基本经验总结、高含沙水流特性研究和水坠坝技术试验推广。80年代,开展了黄土高原地区综合治理、黄河流域环境变迁和水沙变化、水资源利用、引黄灌区泥沙处理和黄河防洪工程技术等方面的试验研究工作。几十年来的治黄研究工作,取得了一大批具有国际先进水平的成果,形成了一支多学科、高水平的科研队伍,并广泛开展了国际合作交流。

“七五”后期,水利部和中国科学院提出的关于加强黄河综合治理与开发研究工作的建议,得到国务院主要领导的高度重视,在各方面专家充分论证的基础上,国家科委把“黄河治理与水资源开发利用”列为“八五”国家重点科技攻关项目,由水利部、中国科学院和地质矿产部作为项目主持部门,组织有关科技人员进行跨部门、多学科联合攻关。经过充分论证,项目分解为7个课题、22个专题和92个子专题分别开展工作。经过近4年的卓越工作,取得了辉煌的成绩,经专家鉴定委员会对成果的全面鉴定,22个专题中有2个专题成果总体达到国际领先水平,8个专题成果总体达到国际先进水平、部分达到国际领先水平,9个专题成果总体达到国际先进水平,3个专题成果总体达到国内领先水平、部分达到国际先进水平,项目通过了国家科委组织的验收。攻关成果应用所创造的经济、社会和环境效益是长期的和巨大的,其影响也将是深远的。

为了使已取得的成果在黄河治理和开发中发挥更大的作用,并在实践中不断深化,给后人留下一份宝贵的科学财富,水利部有关部门决定编辑出版这套系列专著,其中包括20册专题专著和1册项目综合专著。专题专著由原专题负责人组织编写,对原专题报告进行提炼和深化,其主要编写人员与专题研究人员不尽相同。综合专著由“黄河治理与水资源开发利用”系列专著编审委员会组织专人编写。本丛书因篇幅较大,编审委员会难以逐篇审定,故责成专著主要编写人分别请部分顾问和委员审稿。

由于编辑出版整个过程时间仓促,加之水平有限,难免有不足和错误之处,敬请批评指正。

“黄河治理与水资源开发利用”

系列专著编审委员会

1997年9月

前 言

“堤防工程新技术研究”历经三年,完成了“八五”国家重点科技攻关合同规定的研究任务,达到了“八五”攻关的技术经济指标。其中,“堤防隐患探测技术研究”采用的工程物探技术取得了突破性成果,首次将瞬变电磁法、瞬态瑞雷面波勘探技术和高密度电阻率法应用于堤防隐患探测,从野外观测系统设计、仪器设备的优化配置到数据信号采集、处理与解释判断,研究总结了一套全新的堤防隐患探测模式,达到或超过了攻关合同要求的技术经济指标;“减少抢险的丁坝结构设计及施工技术研究”分析论证了丁坝出险的主要原因和丁坝布置准则,提出了减少丁坝出险的主要措施,推荐出两类对黄河下游有推广价值的坝型结构,并在郑州马渡险工 26 号坝下护岸设计建造了铰链式模袋混凝土沉排试验工程,此种新型坝岸结构首次在黄河下游堤防工程中试用,而且在我国是第一个成功范例;“黄河下游防洪工程数据库(YRFCEDB)系统”收集汇编了堤防工程、河道整治工程、分滞洪工程、水库工程等基本信息,采用了与水利部“全国防汛信息系统”和黄河水利委员会“黄河防洪减灾系统”相一致的 SYBASE 关系型数据库管理系统和与之配套的软件开发工具,使所开发的软件系统具有较强的存贮、管理、检索、统计、绘图、制表等功能,并具有较强的实用性、可移植性、可扩展性、易维护性,建成如此规模宏大的防洪工程数据库,在我国大江大河的防洪工作中尚属首例。

本书在编写、审定、编辑、出版过程中得到了有关部门和专家的大力支持,在此一并致谢。本书涉及专业较多,由于编写时间紧,水平有限,难免有误漏、差错之处,敬请批评指正。

编者

1997 年 10 月

本研究专题承担单位及人员

专 题 名 称	堤防工程新技术研究				
承 担 单 位	黄河水利委员会勘测规划设计研究院				
专题负责人	陈效国	李丕武			
主要完成人	陈效国	李丕武	郭玉松	宋玉杰	胡一三
	张秀鹤	毋光荣	王震宇	谢向文	曹常胜
	赵 乐	王运生	符建铭	刘新华	赵 阳
	杨家训	岳岫峰			
参 加 人 员	陈树荣	赵仁荣	张希芳	王旭明	王银山
	周建波	周月鲁	田德本	廖义伟	马继业
	刘瑞虹	李念平	牛大庆	何平安	
报告执笔人	谢向文	毋光荣	曹常胜	张秀鹤	郭玉松

本书编著人员

陈效国	李丕武	谢向文	曹常胜	赵 乐
郭玉松	张秀鹤	王运生	符建铭	

目 录

第一章 堤防隐患探测新技术.....	(1)
第一节 堤防工程软弱层探测技术.....	(1)
第二节 堤防工程裂缝探测技术	(29)
第三节 堤防工程洞穴探测技术	(58)
第二章 减少抢险的丁坝结构及施工技术研究	(75)
第一节 黄河下游坝岸工程概况	(75)
第二节 传统丁坝结构特点	(76)
第三节 丁坝出险成因分析	(79)
第四节 减少丁坝出险的基本途径	(88)
第五节 土工织物沉排坝的试验研究	(92)
第六节 混凝土桩坝的试验研究.....	(109)
第七节 不同丁坝结构实用性分析.....	(115)
第三章 黄河下游防洪工程数据库(YRFCEDB)系统	(126)
第一节 黄河下游防洪工程.....	(126)
第二节 YRFCEDB 系统的建设	(130)
第三节 系统运行环境的配置.....	(137)
第四节 数据库设计.....	(139)
第五节 软件系统设计.....	(156)

第一章 堤防隐患探测新技术

黄河下游堤防隐患探测问题，是黄河防洪工程中的老大难问题，历代治河机构均十分关注，并投入一定力量，探索解决问题的办法。

清代河务机构，为消除堤身隐患，曾用过“签堤”的办法，即用细铁棍制成“铁签”，凭人的触觉及进土的快慢判断有无隐患。人民治黄以来，50年代就采用锥探灌浆的办法，进行堤防隐患探测和加固，取得了较好效果，得到广泛应用。50年代末到60年代初，山东黄河河务局与山东大学协作，曾用放射性钴60作过堤防隐患探测试验。70年代，武陟修防段研制了电动打锥机，鞍山电子研究所研制了YB-1型暗缝探测仪，将黄河堤防隐患探测又推进了一步。80年代，山东省水科所在YB-1型仪器基础上进行了改进，研制出了ED-80型堤坝探伤仪，在黄河大堤上做过试验，对裂缝探测取得了一定效果，但对洞穴探测反映不明显。1982年，黄河水利委员会（以下简称黄委会）与中国科学院声学所协作，研究利用声纳探测根石的技术，历经5年时间，耗资99万元，没有解决问题。1982年，黄委会设计院物探队引进日本SP-3浅地层剖面仪（声纳原理），经试验，对根石没有明显反映。1985年，黄委会引进美国SIR-8型地质雷达，耗资30万元（包括仪器试验费），经过反复试验，探测效果不明显（属正演性测试），对闸涵及根石未探到结果。

总之，从1950年到1991年的41年间，治黄机构及有关单位对堤防隐患探测问题的酝酿、考查、试验、研究工作，基本上没有间断过，历经诸多曲折、反复，耗去许多人力、物力，取得了一定成果，但没有重大突破。

黄河下游堤防隐患探测问题屡攻不破，分析原因有四条：其一，难度大。主要表现在探测目标小，目标与周围介质物性差异小；其二，当时的理论研究、方法技术、仪器探测能力、电子计算机水平比较落后；其三，受场地条件限制，诸多方法的效能不能正常发挥；其四，承担研究任务的部门与人员专业不对口，基本不具备专业优势。

鉴于以上情况，1992年初黄委会设计院再度申请立项，得到了黄委会有关部门及一些专家的同意，1992年底纳入“八五”国家科技攻关项目。

根据子专题合同的具体条款要求，经过三年的努力，完成了合同规定的堤防工程隐患探测理论及方法技术的研究任务，达到了“八五”攻关的技术经济指标。

第一节 堤防工程软弱层探测技术

一、软弱层地质成因及物性分析

黄河历史上曾多次决口泛滥，当时多用秸秆等杂物与土混和堵填，随着岁月推移，大堤不断被加高增宽，埋没了口门位置，而其下部杂物腐烂变质，使其地层产生裂隙变

得松软，由此形成大堤隐患——软弱层。另一方面，由于历史条件的限制，当时施工方法和选料不十分科学，加之其他自然因素的影响，同样会形成大堤隐患——软弱层。

软弱层硬度小、易液化，在汛期洪峰季节可能会出现较大渗漏，严重时会导致决口，故而探测其分布位置及强度，进行加固处理，意义十分重大。

岩土物性资料和实测结果表明，大堤土抗剪强度及抗液化能力与其弹性波速有相关关系，由此以弹性波为基础的物探方法探测堤身波速，即可确定各层相对强度，圈定软弱层分布范围。

老口门软弱层孔隙度大，含水量高，一般表现为相对低阻，由此以电阻率为基础的物探方法测试堤身各层视电阻率，同样可圈定其分布范围。

根据软弱层这些物性特点，结合国内外先进物探技术，选择探测软弱层最佳方法。首先选用地质雷达进行多次试验，由于电磁波能量衰减快，穿透能力差，无法探测出老口门软弱层的分布范围；选用纵、横波浅层反射技术进行探测，由于地层界面波阻抗差异小，目标层太浅，纵波无法提取有效信号，而横波由于激发装置能量有限，探测深度浅，不能满足勘探要求；用电测深勘探，因大堤地形影响，所测曲线尾支畸变，解释困难，无法划分底界面。经过多种方法仪器反复试验，最后确定用瞬变电磁法快速普查软弱层分布范围；用瞬态瑞雷波对堤身相对强度、软弱层分布位置进行探测。

二、瞬变电磁法

(一) 方法简介及发展概况

瞬变电磁法属于时间域电磁感应法，英文缩写为 TEM。它是利用不接地回线或接地线源向下发送一次脉冲磁场，在一次脉冲磁场的间歇期间，利用线圈或接地电极观测二次涡流场的方法。该二次磁场是由地下良导地质体受激励引起的涡流产生的非稳定磁场。TEM 是在没有一次场背景的情况下观测研究二次场（纯异常），大大地简化了对地质对象所产生异常场的研究，对于提高方法的探测能力更具有前景。

将瞬变电磁信号应用于地质构造的测深，原苏联早在 30 年代末由 А.П.Краев 提出。50 年代以后，В.А.Сипоров、В.В.Тикшаев 等人建立近区建场测深方法（ЗСВ）。在同时期内，由 Ю.В.Якябовский、В.Х.Коваленк 及 Ф.М.Каменецкий 等人创立了应用于勘查金属矿产过渡过程法（МПП）。60 年代以后近区建场测深法和过渡过程法得到更广泛及成功的应用和发展。仪器方面，用于勘查金属矿的主要仪器有：МПП-3、МППУ-2、МПП-4 及 НМПУЛЪС-Ц；用于勘查油气田的主要仪器有：ЦИКЛ-2 和 ЦЗС-1、2 数字站。

在西方，1951 年首先由 J.R.Wait 提出了利用瞬变电磁场寻找导电矿体的概念。1958 年加拿大 Barringer 公司开始研制应用于航空的 INPUT 系统，于 1962 年投入使用，经过多次改进，至今已成为世界范围内应用的主要航电系统。地面仪器系统于 70 年代出现商品仪器，近些年不断涌现出智能化的仪器，具有代表性的有：EM-37、47、57、42，DEPEM，UTEM，SIROTEM-II、III。此外，多功能电测站 GDP-16、12、32 及 V-5 等配置了用来 TEM 测量的功能。

在我国，于 70 年代初期开始研究 TEM，投入研究的单位有：长春地质学院、西安

地质学院、地矿部物化探研究所、中国有色金属工业总公司矿产地质研究院以及中南工业大学等，这些单位各自都研制了仪器系统，进行了理论及方法技术研究，并在金属和煤田等矿床勘探中取得了一批效果较好的应用实例。目前国内研制的仪器系统有 DCM-I，DMD-II，M-1、WDC-1、2，DCS-1、LC 及 SD-1 等。

TEM 近年来在国内外得到迅速发展。在金属、油气田和煤田等矿床勘探得到广泛应用。尤其值得注意的是它正开始步入工程勘察、地下水和地热勘查以及环境灾害勘察的行列中，成为国内外引人注目的地球物理勘探方法之一。

(二) 基础理论

1. 激发场波形及观测信号波形的特征

瞬变电磁法中，激发场的波形可以采用多种具有周期性的脉冲序列。例如：矩形、梯形、半正弦形、三角形、伪随机等波形。

(1) 双极性矩形脉冲 它是 SIROTEM、EM-37、SD-1 等地面系统使用的激励场波形（见图 1-1），其傅里叶级数表达式为：

$$H_1(t) = 4H_0 \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\pi\delta/2)}{n\pi} \cos n\omega_0 t \quad (1-1)$$

式中： H_0 为脉冲磁场的幅值； $\delta = 2d/T$ ； T 为脉冲系列的重复周期； d 为单个脉冲持续时间； $\omega_0 = 2\pi/T$ 。

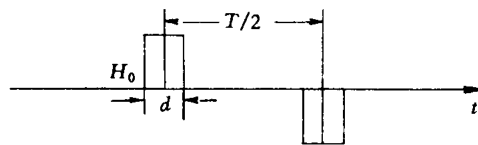


图 1-1 双极性矩形脉冲激励场的波形

应该指出，实际的波形要受到发送回线感性负荷的影响，不可能是图 1-1 所示的理想波形。它将退化为如图 1-2a 所示的波形，也就是说，前沿为类似于按指数规律上升的曲线，而后沿为斜阶跃形。

(2) 观测信号波形的特征 大多数 TEM 系统是使用接收线圈观测感应电压 $V(t)$ ，它与作用磁场的关系为：

$$V(t) = - \frac{d\Phi}{dt} = -q \frac{dB(t)}{dt} = -S_R N \frac{dB(t)}{dt} \quad (1-2)$$

式中： Φ 为接收线圈切割的磁通； q 为接收线圈的有效面积； S_R 为接收线圈面积； N 为接收线圈匝数。

根据已知的 $V(t)$ 值，可以计算出磁感应强度：

$$B(t) = \int_t^{\infty} (V(t)/q) dt \quad (1-3)$$

可见，观测信号 $V(t)$ 正比于 $dB(t)/dt$ ，由此，可以得到接收线圈所观测到的一次场信号 $V_1(t)$ 、二次场信号 $V_2(t)$ ， $V_2(t)$ 的取样波形如图 1-2 所示。由于 TEM 一般只记录发送电流脉冲间歇期间的二次场信号，故采样记录到的信号如图 1-2d 所示，不同的响应特征反映了矿体的电性差异，这类响应曲线通常称为“脉冲响应”。

2. 均匀半空间表面上磁偶源形成的瞬变场及视电阻率定义

(1) 均匀半空间的瞬变场 垂直磁偶源发射情况下，瞬变电磁场各个分量的表达式为：

$$E_{\varphi}^z = \frac{3M\rho}{2\pi r^4} e_{\varphi} \quad (1-4)$$

$$B_z^z = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} b_z \quad (1-5)$$

$$V_z^z = \frac{9M\rho q}{2\pi r^5} b_z \quad (1-6)$$

$$V_{\text{中心回线}} = \frac{3MI\pi^{3/2}\rho}{L^3} Y_1(X) \quad (1-7)$$

$$V_{\text{重量回线}} = \frac{4L\mu_0 X^2}{t} Y_2(X) \quad (1-8)$$

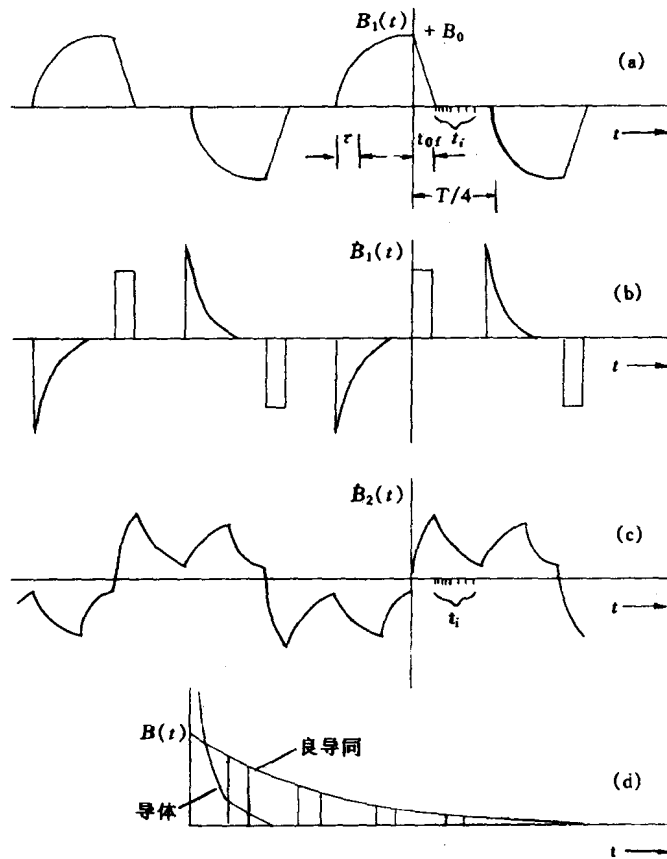


图 1-2 接收线圈观测到的信号波形示意

(a) 一激励磁场 (b) 一次场信号 (c) 一二次场信号 (d) 一二次场的取样信号

式中: M 为发送回线的磁距; $M = IS_T$; S_T 为发送回线面积; q 为接收线圈的有效面积; $q = S_R N$; S_R 为接收线圈面积; N 为接收线圈匝数; r 为偶极距; L 为发送回线的边长; ρ 为均匀大地的电阻率。

$e_\varphi, b_z, \dot{b}_z, \Phi(u)$ 为 u 的函数, 其表达式为:

$$e_\varphi = \left[\Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} u \left(1 + \frac{u^2}{3} \right) \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \right] \quad (1-9)$$

$$b_z = \left[1 - \left(1 - \frac{9}{u^2} \right) \Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \left(\frac{9}{u} + 2u \right) \right] \quad (1-10)$$

$$\dot{b}_z = - \left[\Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) u \left(1 + \frac{u^2}{3} + \frac{u^4}{9} \right) \right] \quad (1-11)$$

$$Y_1(X) = \Phi(X^{1/2}) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-X) X^{1/2} \left(1 + \frac{2}{3} X \right) \quad (1-12)$$

$$Y_2(X) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m (2m+2)! X^{m+1}}{m! (m+1)! (m+2)! 2(2m+5)} \quad (1-13)$$

$$X = \frac{\mu_0 L^2}{4\pi \rho t} \quad (1-14)$$

$$\Phi(u) = \int_0^u \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-t^2) dt \quad \text{为概率积分} \quad (1-15)$$

由上述的公式可见, 瞬变场与 ρ 、 t 等之间有很复杂的函数关系, 计算也相当繁琐。

1979 年美国地球物理学家 M.N.Nabighian 提出了利用等效代换法计算均匀大地的晚期瞬变电磁响应的概念及计算方法。这种概念使人们能够从物理意义上去理解瞬变电磁场的扩散规律, 在满足晚期的条件下, 其计算的精度也令人满意。

在电导率为 σ 和磁导率为 μ_0 的均匀大地上, 敷设输入阶跃电流的回线 T_x , 图 1-3 表示出了该回线中电流所产生磁场的磁力线。

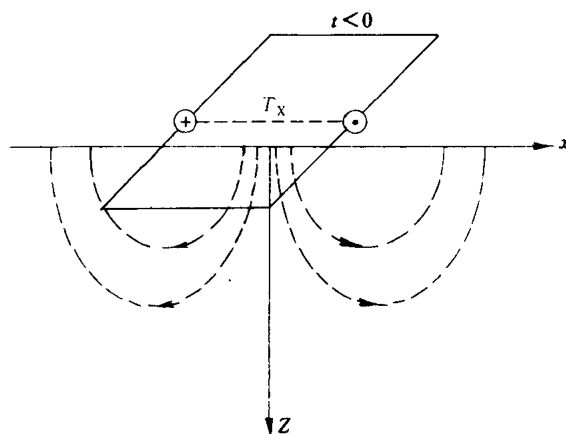


图 1-3 矩形回线中输入阶跃电流产生的磁力线

当发送回流中电流突然断开时, 在下半空间中就要被激励起感应涡流场以维持在断开电流以前存在的磁场, 此瞬间的电流集中于 T_x 附近的地表, 并按 r^{-4} 规律衰减 (r 为 T_x 中心至观测点的距离)。随后, 面电流开始扩散到下半空间中, 在切断电流后的任一晚期时间里, 感应涡流呈多个层壳的“环带”形。M.N.Nabighian 指出, 感应涡流场在地表引起的磁场为整个“环带”各个涡流层的总效应。这种效应可以用一个简单的电流环等效。图 1-4 表示了发送电流切断以后三个时刻的地下等效电流环分布略图, 它为一列与发送回线同形状并且向下及向外扩散的电流环, 通常称之为“烟圈”, 它的等效电流为:

$$i = \frac{1}{4\pi c_2 \sqrt{t/\sigma\mu_0}} \quad (1-16)$$

它的半径 a 及所在深度 d 的表达式为:

$$a = \sqrt{8c_2} \sqrt{t/\sigma\mu_0} \quad (1-17)$$

$$d = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t/\sigma\mu_0} \quad (1-18)$$

式中 $c_2 = 8/\pi - 2 = 0.546479$ 。

由于 $\tan\theta = d/a = 1.07$, $\theta = 47^\circ$, 故“烟圈”将沿 47° 倾斜锥面扩展, 向下传播的速度为

$$V_z = \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma\mu_0 t}} \quad (1-19)$$

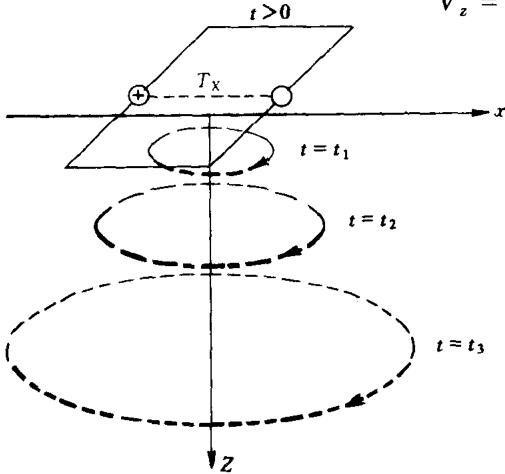


图 1-4 半空间中的等效涡流环

计算均匀半空间的瞬变电磁响应时, 可以把“烟圈”看作一系列的二次发送线圈, 由于它在某时刻的半径、深度及电流可以据 (1-17)、(1-18) 及 (1-16) 计算出, 很容易地计算出在某时刻沿地面测线的响应值以及在某个测点的响应值随时间变化的规律。

(2) 视电阻率定义 与直流电阻率法相类似, TEM 中计算视电阻率 (以 ρ_r 表示) 的转换公式需要依据均匀半空间上的瞬变电场的表达式。但是, TEM 场与大地电阻率之间的关系复杂, 不可能给出简单的关系式子, 只好利用极限条件下的瞬变电磁场表达式,

推导确定 ρ_r 简化公式。所谓极限条件是指 $\frac{\tau}{r} \rightarrow 0$ 和 $\frac{\tau}{r} \rightarrow \infty$ 的条件, 前者称为早期 (或远区) 条件, 后者称为晚期 (或近区) 条件。

a. 磁偶源早期 ρ_r 定义式 在早期条件下, 根据均匀半空间垂直磁偶源形成的场的各分量表达式推导得出适用于早期的视电阻率定义式为:

$$\rho_{rE早} = \frac{2\pi r^4}{3M} E_\varphi^z \quad (1-20)$$

$$\rho_{rM早} = \frac{2\pi r^5}{9Mq} V_z^z \quad (1-21)$$

b. 磁偶源晚期 ρ_r 定义式 在晚期条件下, 根据均匀半空间垂直磁偶源产生的场的各分量表达式推导得出适用于晚期条件的视电阻率定义式为:

$$\rho_{rE晚} = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left(\frac{\mu_0 m r}{5 t E_\varphi^z} \right)^{2/3} \quad (1-22)$$

$$\rho_{rM晚} = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left(\frac{2\mu_0 M q}{5 t V_z^z} \right)^{2/3} \quad (1-23)$$

c. 同点回线装置的 ρ_r 定义式 同点装置是指发送、接收回线中心点在同一个位置

的装置，中心回线、共圈回线及重叠回线等属这类装置。它仍然用与晚期极限条件相对应的视电阻率公式计算 ρ_r 值，在使用重叠回线或共圈回线的情况下， $M = L^2 I$ ， $q = L^2$ ，则有：

$$\rho_r = 6.32 \times 10^{-3} L^{8/3} [V(t)/I]^{-2/3} t^{-5/3} \quad (1-24)$$

式中： L 为回线边长，m； t 为测道的时间，ms； $V(t)/I$ 为观测值， $\mu V/A$ 。

3. 水平层状介质表面上磁偶源形成的电磁场

研究水平层状介质上磁偶源形成的电磁场，对于老口门软弱层很有必要。瞬变磁响应场可以用简单的初等函数表达。所谓薄层是指层厚远小于瞬变场的扩散参数 τ 时，且瞬变场在时间 t 足够长时的情况。

假设纵向电导为 S 的水平薄层位于磁矩为 M 的垂直磁偶源以下 h 深度的位置，那么，离磁偶源中心点水平距离为 r 的电流密度 J_φ 的表达式为：

$$J_\varphi(r, t) = \frac{3My}{\pi} \frac{h + t/S\mu_0}{[r^2 + 4(h + t/S\mu_0)^2]^{5/2}} \quad (1-25)$$

J_φ 起初也是随时间 t 的增大而上升，达到极大值后以单调地下降至零，其晚期是以 t^{-4} 的规律下降。

与均匀半空间的情况相比，区别在于半空间的情况下，从关断电流的瞬间起，地面 J_φ 即以 r^{-4} 规律下降，涡流扩散到地下以前的起始值为某个定值，随后才随时间而衰减， J_φ 极大值是以 $\sqrt{t}$ 的规律向外扩散。

水平导电薄层的瞬变电磁场表达式为：

$$E_\varphi^z = \frac{3M_r m}{\pi S (r^2 + 4m^2)^{5/2}} \frac{3M\bar{m}}{\pi r^3 S (1 + 4\bar{m}^2)^{5/2}} \quad (1-26)$$

$$B_z^z = \frac{\mu_0 M}{4\pi} \frac{r^2 - 8m^2}{(r^2 + 4m^2)^{5/2}} \quad (1-27)$$

$$V_z^z = \frac{M_q m [-9r^2 + 24m^2]}{\pi S [r^2 + 4m^2]^{7/2}} \quad (1-28)$$

式中 $m = h + t/\mu_0 S$ ， $\bar{m} = m/r$ 。

在晚期（或近区）条件下（ $r^2 \ll m^2$ ），式（1-26）～（1-28）可简化为：

$$E_\varphi^z \approx \frac{3My}{32\pi S m^4} \quad (1-29)$$

$$B_z^z \approx \frac{M\mu_0}{16\pi} \frac{1}{M^3} \quad (1-30)$$

$$V_z^z \approx \frac{3Mq}{16\pi S} \frac{1}{m^4} \quad (1-31)$$

在早期（或远区）条件下（ $r^2 \gg m^2$ ），得

$$E_\varphi^z \approx \frac{3Mm}{\pi S r^4} \quad (1-32)$$

在 $t \gg Sh\mu_0$ 情况下，上述公式可进一步简化为：

在近区（晚期）