

# 电磁法探测技术在 涉水防灾领域中的应用

汪滨 臧德记 孙林 陆俊 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

国家重点研发项目 (2017YFC0405005)

南京水利科学研究院出版基金资助

# 电磁法探测技术在 涉水防灾领域中的应用

汪滨 臧德记 孙林 陆俊 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

## 内 容 提 要

本书结合具体工程实践,剖析了23个不同工况、不同方法典型工程探测案例。主要内容分为三部分:第1~2章为第一部分,介绍了水、岩土与混凝土的电磁特性;第3~9章为第二部分,介绍了电磁法探测方法与技术;第10~15章为第三部分,介绍了涉水灾害探测与分析。

该书可供土木工程灾害防护科技工作者、研究生阅读,也可供水资源、地热资源探测、工程无损检测、地下水污染环境调查等相关专业人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电磁法探测技术在涉水防灾领域中的应用 / 汪滨等  
编著. — 北京:中国水利水电出版社, 2020. 12  
ISBN 978-7-5170-9190-5

I. ①电… II. ①汪… III. ①电磁法勘探—应用—水利  
工程—地质灾害—灾害防治 IV. ①P694

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第218168号

书 名	电磁法探测技术在涉水防灾领域中的应用 DIANCIFA TANCE JISHU ZAI SHESHUI FANGZAI LINGYU ZHONG DE YINGYONG
作 者	汪滨 臧德记 孙林 陆俊 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	清淞永业(天津)印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13印张 316千字
版 次	2020年12月第1版 2020年12月第1次印刷
定 价	<b>88.00元</b>

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



水资源是人类社会赖以生存和发展最基本、最重要的自然资源。人类在与水的相依相伴中繁衍，同时，也在与涉水灾害的抗争中历经磨难。现代社会，旱灾、洪灾仍是人类社会面临的主要自然灾害。在水利、交通、采矿等工程中，常有滑坡、渗漏、坍塌、开裂等灾变现象，在这些灾变中，水往往是其中的重要诱因。此外，随着社会的发展，水污染问题也日趋凸显。

在防灾减灾的工程实践中，探测技术发挥着重要作用，而大部分技术源自地球物理勘探领域。电磁法探测是其中最为常用的一类。虽然，许多科技工作者、工程技术人员从各自领域研究、开发与应用它，但至今尚缺少其在涉水防灾领域应用的系统论述与总结。本书试图建立水、涉水灾害、水利工程等与电磁法探测的联系，分析工程涉水灾害中孕灾过程与灾变机理，研究工程内部隐患与病害的电磁响应规律。通过一个个的探测方法介绍与涉水灾害工程案例的剖析，较为系统地反映电磁法在涉水灾害中应用历程、探测原理与方法，以及适用条件与特点，从而使读者更好地了解此技术的概貌，为应用与进一步研究提供较为全面的基础。

该书主要分三部分。第1~2章为第一部分，为概论与水、岩土与混凝土的电磁特性。第3~9章为第二部分，介绍各种电磁法探测方法与技术。第10~15章为第三部分，论述不同涉水灾害以及探测与分析。全书第1、2、8、15章由汪滨教授级高级工程师编写；第4、7、9、11、14章由孙林高级工程师编写；第3、6、10、13章由臧德记高级工程师、汪滨、孙林共同编写，第5、8章由陆俊教授级高级工程师编写。

在编著过程中，参阅了南京水利科学研究院的科研报告、国内外相关研

究成果及工程探测成果。本书的编著和出版，得到国家重点研发项目(2017YFC0405005)与南京水利科学研究院出版基金的资助。在此，一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限，书中难免有错误与不当之处，敬请读者批评指正。

**作者**

2020年12月



## 前言

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 水资源与涉水灾害 .....	1
1.2 电磁法探测 .....	3
1.3 电磁法探测在防灾领域的应用 .....	5
参考文献.....	6
<b>第 2 章 水、岩土与混凝土的电磁特性</b> .....	7
2.1 电磁特性及其表征物理量 .....	7
2.2 水及其电磁特性 .....	9
2.3 岩石的电阻率.....	11
2.4 岩石的介电常数.....	16
2.5 岩石、矿石的磁性.....	18
2.6 岩石的极化特性.....	19
2.7 混凝土的电磁特性.....	19
参考文献 .....	25
<b>第 3 章 直流电阻率法</b> .....	26
3.1 电阻率测深法.....	26
3.2 电阻率剖面法.....	27
3.3 高密度电阻率法.....	29
参考文献 .....	36
<b>第 4 章 激发极化法</b> .....	37
4.1 激发极化法基本原理.....	37
4.2 激发极化法野外工作技术.....	42
4.3 激发极化法资料解释.....	45

参考文献 .....	47
<b>第 5 章 探地雷达法 .....</b>	<b>48</b>
5.1 探地雷达技术的发展现状 .....	48
5.2 探地雷达工作原理 .....	49
5.3 典型仪器设备 .....	52
5.4 探地雷达探测工作方法 .....	54
5.5 数据分析与处理 .....	56
参考文献 .....	58
<b>第 6 章 瞬变电磁法 .....</b>	<b>60</b>
6.1 瞬变电磁法概况 .....	60
6.2 瞬变电磁法原理 .....	61
6.3 瞬变电磁法装置形式 .....	62
6.4 瞬变电磁法野外工作技术 .....	63
6.5 瞬变电磁法数据处理和资料解释 .....	65
参考文献 .....	66
<b>第 7 章 音频大地电磁法 .....</b>	<b>67</b>
7.1 天然源音频大地电磁测深法 .....	67
7.2 可控源音频大地电磁法 .....	71
7.3 EH-4 电导率成像系统 .....	75
参考文献 .....	77
<b>第 8 章 核磁共振 .....</b>	<b>79</b>
8.1 核磁共振探测技术的发展与应用 .....	79
8.2 核磁共振基本原理 .....	80
8.3 地面核磁共振探测及其信号响应规律 .....	82
8.4 核磁共振找水仪 .....	88
8.5 核磁共振信号的采集 .....	89
8.6 地层水文参数的估算 .....	93
参考文献 .....	94
<b>第 9 章 其他电磁法简介 .....</b>	<b>95</b>
9.1 自然电场法 .....	95
9.2 拟流场法 .....	97
9.3 航空电磁法 .....	99
9.4 磁电阻率法渗漏探测技术 .....	100
参考文献 .....	102
<b>第 10 章 堤坝隐患探测 .....</b>	<b>103</b>
10.1 土坝隐患的分类 .....	103

10.2	土坝空洞、裂隙等隐患探测	105
10.3	土坝渗漏隐患探测	111
	参考文献	120
<b>第 11 章</b>	<b>滑坡勘查</b>	<b>121</b>
11.1	滑坡及其分类	121
11.2	水对边坡稳定的影响	122
11.3	滑坡勘查中解决的主要地质问题	123
11.4	滑坡勘查的电磁类方法	123
11.5	滑坡勘查应用实例	125
	参考文献	128
<b>第 12 章</b>	<b>水工混凝土结构病害探测</b>	<b>130</b>
12.1	混凝土缺陷与病害	130
12.2	混凝土质量与病害检测方法	131
12.3	混凝土坝内部裂缝探测	133
12.4	输水隧洞衬砌探测	138
12.5	地下防渗墙质量检测	142
	参考文献	145
<b>第 13 章</b>	<b>干旱缺水地区探寻地下水源</b>	<b>146</b>
13.1	地下水及其富集的地质环境	146
13.2	不同电磁找水探测方法及其适用条件	151
13.3	瞬变电磁法在勘查地下水工程中的应用	153
13.4	可控源音频大地电磁法应用于地热	156
13.5	核磁共振探寻地下水应用	160
13.6	航空电磁方法及其在找水中的应用	161
	参考文献	162
<b>第 14 章</b>	<b>矿山及隧洞水害探测</b>	<b>164</b>
14.1	常见矿山及隧洞水害的形成	164
14.2	井巷与隧洞内探测	166
14.3	电磁法在矿山水害探测中的应用	169
	参考文献	180
<b>第 15 章</b>	<b>地下水污染探测</b>	<b>182</b>
15.1	地下水污染及其电磁法探测基础	182
15.2	海水入侵的监测	186
15.3	油污染地下水探测	188
15.4	垃圾堆物渗液检测	193
	参考文献	198

# 第 1 章 概 论

## 1.1 水资源与涉水灾害

水是生命的源泉，是人类社会生产之基、生活之要，也是人类文明的摇篮。

人类文明的发祥和发展与水密不可分。世界四大文明古国都是发源于大江大河。尼罗河孕育了古埃及文明，幼发拉底河、底格里斯河诞生了古巴比伦文明，印度河催生了古印度文明，黄河与长江哺育了华夏文明，因此说，水造就了人类文明的摇篮。

水是人类生命的第一要素。从人的体重来看，人体大部分是由水组成的，水占成人体总重量的 70%，婴儿体内含水达 80%。水是细胞和体液的重要组成部分之一，它参与人体内新陈代谢的全过程，承担着运输营养、调节体温、湿润润滑等功能。

生物发源于水，大约在 6 亿年前的古生代，生物都是水栖的，至古生代中期才出现陆上生物。动物进化起初只有生存在水中的鱼形动物，之后出现鱼类和两栖类，最后才有爬行类、鸟类和哺乳类。因此，早在春秋战国时，《管子·水地》中就认为：“水者，何也？万物之本原也，诸生之宗室也。”

水是农业的命脉，林、牧、渔与人们生活等均离不开水。现代工业中，电力、石油、化工、运输等行业中，水都是不可缺少的东西，而且工业越发展，对水的需求量也越大。

正因为水对于人类社会如此重要、息息相关，与水相关的微小消极变化，往往对人类社会产生不良影响，甚至酿成灾害。水多，易造成洪灾；水少，易造成旱灾；有害物质侵入水体，危及饮水安全。此外，像滑坡与溃坝、矿山透水等灾害形式都与水息息相关，预防这些涉水灾害，减少灾害造成的损失，在现代社会具有十分重要的意义。

我国是世界上自然灾害最为严重的国家之一，尤其与水相关的灾害呈现种类多、分布广、频率高、损失重等特点。

(1) 旱灾。地球的总储水量是很丰富的，共有 14.5 亿  $\text{km}^3$  之多，但是能直接被人们生产和生活利用的，却少得可怜。淡水资源仅占有水资源的 0.75%，有近 70% 的淡水资源固定在南极和格陵兰的冰层中，其余多为土壤水或深层地下水，不能被人类直接利用。地球上只有不到 1% 的淡水或约 0.007% 的水可被人类直接利用。全球淡水资源不仅短缺而且地区分布极不平衡。按地区分布，巴西、俄罗斯、加拿大、中国、美国、印度尼西亚、印度、哥伦比亚和刚果 9 个国家的淡水资源占了世界淡水资源的 60%。约占世界人口总数 40% 的 80 个国家和地区约 15 亿人淡水不足，其中 26 个国家约 3 亿人极度缺水。

与之相反，据联合国统计，全球淡水消耗量自 20 世纪初以来增加了 6~7 倍，比人口增长速度高 2 倍。更可怕的是，预计到 2025 年，由于世界人口不断增加，世界上将会有 30 亿人面临缺水，40 个国家和地区淡水严重不足，主要为非洲、中东地区、印度、秘鲁、

英国、波兰及中国部分地区。

在我国，历史上旱灾的记载始于公元前 206 年，从那时起到 1948 年的 2154 年间，我国发生较大旱灾 1056 次，平均每两年发生一次。据近 500 年（1490—1990 年）的统计，我国黄河、淮河、海河地区大旱以上等级的干旱灾害重现频率较高，黄河流域重现率为 26.9%，海河流域为 30.3%，淮河流域为 33.6%。新中国成立以来至 2002 年的 53 年间，全国或部分地区旱情较严重的有 36 年，出现频率接近 70%。

我国也是一个人均淡水资源严重短缺的国家，水资源总量为 2.8 万  $\text{m}^3$ ，但可利用量只有 40%~50%。全国人均拥有的水资源量只有 2200 $\text{m}^3$ ，只占世界人均淡水资源的 1/4，被列为世界上 13 个贫水国家之一。在全国 600 多个建制市中有近 400 个城市缺水，其中缺水严重的城市高达 130 多个。全国城市每年缺水 60 亿  $\text{m}^3$ ，日缺水量已超过 1600 万  $\text{m}^3$ 。缺水严重制约一些地区的经济发展，而且随着经济增长的提速，形势更为严峻，在未来相当长的时间内，高度重视水资源短缺问题，成为一个地区经济发展首要重任。

(2) 洪灾。由于降雨在时空上相差悬殊，洪涝灾害具有明显的季节性、地域性和突发性等特点。世界上多数国家的洪涝灾害以夏半年为多，我国洪涝灾害主要发生在 4—9 月，集中发生在江河两岸及沿海地区。

据史书记载，从公元前 206 年至 1949 年中华人民共和国成立的 2155 年间，大水灾就发生了 1029 次，几乎每两年就有一次。历史上，黄河地区的洪灾泛滥，对中华民族造成的伤害很大。从西汉文帝十二年（公元前 168 年）到清朝道光二十年（1840 年）的 2000 年间，共有 316 年发生黄河洪水，1887 年中国黄河大水灾，死亡数百万人。

我国目前的洪涝灾害一般是东部多、西部少；沿海地区多、内陆地区少；平原地区多、高原和山地少。此外，由于其自身的周期变化、天文因素、厄尔尼诺和拉尼娜现象以及高原积雪的影响，洪涝灾害还有明显的年际变化特点。

受全球气候变暖影响，海平面上升使全球沿海城市面临洪灾的危险，大洪水发生概率会在全世界范围内逐渐增加。

洪涝灾害造成的损失十分严重。据有关部门测算，目前，我国每年因洪涝灾害造成的经济损失超过 1500 亿元，其中，仅 1998 年损失就高达 2500 亿元。报告预测，考虑到人口增长、资产升值等因素，今后几十年里，洪灾造成的损失将成倍增长。预计到 2050 年，洪灾造成的平均损失将从 2005 年的每个城市 60 亿美元上升至 520 亿美元。

(3) 地下水污染与海水入侵。目前，全世界每年有 4200 多亿  $\text{m}^3$  的污水排入江河湖海，污染了近 5.5 万亿  $\text{m}^3$  的淡水，相当于全球径流总量的 14% 以上。

这种情况在我国尤为严重。据环境部门监测，全国仅城镇每天便至少有 1 亿 t 污水未经处理直接排入水体。由于地下水占到全国水资源总量的 1/3，全国有近 70% 的人口饮用地下水。但水污染正加剧中国的地下水危机，全国有 90% 的地下水都遭受了不同程度的污染，其中 60% 污染严重。据有关部门对 118 个城市 2~7 年的连续监测资料显示，约有 64% 的城市地下水遭受了严重污染，33% 的城市地下水受到轻度污染，基本清洁的城市地下水只有 3%。

海水入侵是一种特殊的污染。国家海洋局 2007 年启动了海水入侵、盐渍化监测工作，几年来的监测结果表明，我国滨海地区海水入侵和土壤盐渍化呈加重趋势。

(4) 滑坡。我国是一个多山国家，山区面积占国土陆地面积的 69%，而我国大部分地区属于季风气候，多山与降雨量集中使得我国滑坡灾害较为突出。全国受滑坡威胁区占陆地面积  $1/5 \sim 1/4$ 。据粗略统计，全国共有较大型崩塌、滑坡、泥石流灾害点 7000 余处。近十多年来，每年造成的死亡人数近千人，经济损失 200 亿元。国内部分市县调查资料表明，暴雨诱发的滑坡比重占总数的 90%。

(5) 矿山水害。矿山水害是矿山建设与生产过程中的主要安全灾害之一，长期以来，给国家和人民带来的人身伤亡和经济损失极为惨重。据不完全统计，在 20 世纪末的 20 多年里，因为煤矿水害有 250 多个矿井被水淹没，死亡 1700 多人，经济损失高达 350 多亿元人民币。其中 20 世纪 80 年代中期，是我国煤矿水害最为严重的时期，当时在开滦、肥城、焦作等矿区连续发生了多期灾难性突水淹井事故。据我国 2001—2009 年矿山所发生透水事故与死亡人数的统计，共发生透水事故 511 起，死亡 3245 人。平均每年发生透水事故 57 起，死亡 361 人；平均每月发生透水事故 5 起，死亡 30 人。

战胜自然灾害是人类的历史使命之一。在全球气候变化加剧和我国经济社会快速发展的背景下，我国面临的自然灾害形势严峻复杂，涉水灾害所造成的损失也大幅增加。虽然近年来防灾减灾能力有了很大提高，但任务依然艰巨。

目前，在国内外具有影响的灾害研究理论主要有四种：致灾因子论、孕灾环境论、承灾体论和区域灾害系统论。致灾因子论认为，灾害的形成是致灾因子对承灾体作用的结果，没有致灾因子就没有灾害。致灾因子论的主要内容是对致灾因子的分类，以及在此基础上，着重研究致灾因子产生的机制及其风险评估。孕灾环境论认为，灾害发生其原因与区域及全球环境变化有密切关系。其主要内容包括区域环境演变时空分异规律的重建，建立环境变化与各种致灾因子时空分异规律的关系，即建立渐变过程与突变过程的相互联系，对未来灾情进行评估。承灾体论侧重于各种致灾因子作用的对象，即承灾体。主要内容包括承灾体的分类，以及在此基础上，进行承灾体的脆弱性（易损性）评价与动态变化监测。区域灾害系统论认为，灾害是地球表层演变过程的产物，是致灾因子、孕灾环境与承灾体综合作用的结果。

涉水灾害中，水既可以是致灾因子（如滑坡等），又可以是承灾体（如水污染）；既与孕灾环境密切相关（如洪灾），又可缓解如旱灾的发展；既可以是独立、局部的灾变，又可以形成区域灾害。因此，借助新的探测技术，可以准确地发现隐患、查明灾害诱因，探寻地下水源，更为科学而高效地防灾减灾。

## 1.2 电磁法探测

最初，人们为了勘探矿藏、油气资源，通过研究和观测各种地球物理场的变化来探测地层岩性、构造等，即物探技术。后来物探技术逐渐应用于工程勘察、隐患探测、地质灾害预报、环境监测等领域。

水是资源与环境的重要因素，水利工程是调控配水资源、兴利除害的工程，因而，是物探技术应用的重要领域。其中，应用最多的方法是利用仪器获得被探测对象的电、磁性质，进一步解译为工程需要的探测成果，泛称为电磁法探测。当被测单元含有地下水时，

其电磁响应与含水饱和度、矿化度、地层孔隙度、渗透率等诸多因素相关，因此，可以作为分析地下水及其涉水灾变特性的重要数据。

一般而言，其分类方法有以下几种：

(1) 按场源性质分类。电磁法中所有各分支方法可划分两大类：①人工场法（或主动源法）；②天然场法（或被动源法）。这两类方法各有特点，人工场法中场源的频率和功率可以人为地控制或改变，比较灵活。天然场法则不需要人工场源，一般用于地质普查，比较经济、效率高。

(2) 按工作场合可分地面、航空、井中、海洋。

(3) 按时间特性可以分为三类：①直流电法或时间域电法，观测或利用稳态电场。②过程法或脉冲瞬变场法，观测或利用电磁场的瞬态过程。③交流电法或频率域电法，观测或利用似稳态电磁场和电磁波，按其电磁场随频率和时间的变化规律可分为频率域电磁法和时间域电磁法。

本书以介绍交流电法或频率域电法（即电磁法）为主，也适量介绍直流电法与过程法。

直流电法主要介绍高密度电阻率法、激发极化法。电阻率法是通过接地电极在地下建立电场，以电测仪器观测因不同导电地质体存在时地表电场的变化，从而推断和解释地下地质体的特征。最常用的方法主要包括电阻率测深法、电阻率剖面法和高密度电阻率法。激发极化法，是通过观测和研究地下介质的激电效应的分布规律，实现探测的目的。按照供电电流性质的不同，有直流（时间域）激电法和交流（频率域）激电法之分。

交流电法主要介绍瞬变电磁法、地质雷达、音频大地电磁法、核磁共振法等。

瞬变电磁法探测深度与所使用的磁矩（即发射框面积乘以发射电流大小）大小成正比，一般有效探测深度为600m以内。突出优点是观测纯二次场，不受静态、近场效应、地形、接地条件影响，且有较强的抗电磁干扰能力，是很好的地质探测方法。

地质雷达又称探地雷达（ground penetrating radar）。它是利用高频电磁波（1MHz~1GHz），以脉冲形式向地下发送，根据所接收反射的雷达波波形的变化，从而达到对地下地层目标体的探测，地质雷达探测精度高，探测深度较浅。

音频大地电磁法是大地电磁（MT）法的一个分支。它是利用音频大地电磁场作为场源来测定地下岩石的电性参数，并通过研究地电断面的变化来达到了解地质构造、找矿、找水等地质目的的一种地球物理勘探方法。其测量的频率范围为 $10\sim 10^4$  Hz。

核磁共振法是利用水中的氢核在一定频率的外场作用下产生核磁共振现象实现对地下水的探测，是一种能直接查找地下水的物探方法，具有较大的发展空间，但该方法受电磁噪声干扰较大，导致信噪比较低，需要多参数联合反演分析，且目前探测深度在100m以内。

电磁法同其他物探方法一样，是一种间接的观测方法。电磁法探测的数据分析时，一般是根据观测到的电磁响应（视电阻率等）进行整理，得到被测对象某位置的地电信息，形成剖面图或平面图。根据观测电磁参数的异常变化，分析、确定被测对象的某些性态信息，如位置、孔隙度、水的赋含程度等信息。这种分析方法称为反演。不同的被测对象也可能具有相同或相似的电磁性质，因此，存在多解性的可能。正演则相反，假定被测对象

已知的情况下，研究分析对应电磁参数空间、时间分布与变化规律。

电磁法探测及其分析的基础理论，即研究电磁场中各物理量之间的关系及其空间分布和时间变化的理论。电磁场的基本理论可以归结为三大定律和一组方程，其中三大定律包括：①库仑定律；②安培定律；③法拉第电磁感应定律。J. C. 麦克斯韦，采用严格的数学形式，将电磁场的基本定律归结为 4 个微分方程，即麦克斯韦方程组。

与电磁法探测相关的电磁场理论，以及正演与反演的数学方法，已有许多相关书籍与文献进行了充分的论述，本书仅就电磁法探测在涉水防灾领域的应用等问题展开探讨。

### 1.3 电磁法探测在防灾领域的应用

我国的电磁法勘探始于 20 世纪 30 年代，发展与应用主要在新中国成立后。20 世纪 50 年代初，科技工作者开始研究将物探方法引入到水利工程探测领域，分别引入电阻率法、激发极化用于勘查地下水。早期是以直流激电法为主，20 世纪 70 年代初开始研究交流激电法，80 年代初又开始对频谱激电法进行研究，并取得较好的效果。

20 世纪 70 年代中期，煤炭科学研究总院重庆分院针对煤矿生产特点研制开发了地质雷达产品。20 世纪 80 年代末到 90 年代初，随着国内地质雷达仪器研制水平的提高及国外先进仪器的引进，地质雷达广泛用于工程隐患探测，如堤坝的裂缝、空洞、软弱区及渗漏区等。

中南大学等单位于 20 世纪 80 年代着手对瞬变电磁法进行了研究，除了广泛应用于矿产地质勘查外，90 年代以来也用于地下水资源勘查，矿区断层及顶板砂岩的导水性和富水性、查明采空区与矿井涌水通道，评价防渗帷幕有效性、探测堤防工程隐患、隧道工程中的不良地质构造。

可控源音频大地电磁法于 20 世纪 80 年代商业化后，1987 年，中国科学院地球物理研究所首次将加拿大凤凰地球物理有限公司的 V4 系统引进中国，开展了大量的实验研究，90 年代在地下水资源探寻方面做了很多尝试，可用于寻找深部的基岩裂隙水、寻找地下水资源以及探测隐伏构造等。

20 世纪 90 年代中国地质大学（武汉）引进了法国 IRIS 公司研制的 NUMIS 系统，开始了我国核磁共振实际应用。在国内多地探测地下水源，并利用该系统对三峡滑坡进行监测，以查明地下水的活动情况，防止滑坡灾害的发生。21 世纪初，吉林大学开始国产核磁共振探测仪器的研制，研制出 JLMRS 型找水仪。用于地下浅部直接寻找地下水，最深可达 150m。近几年，进一步开展用于巷道内探测隐患技术的研究。

针对特殊的汛期工况，20 世纪 90 年代，何继善院士等发明的“流场法”用于堤防的管涌隐患检测，并在抗洪抢险的实践中取得良好的效果。

在众多物探技术得到应用的基础上，水利部于 2005 年颁布了《水利水电工程物探规程》（SL 326—2005）替代早期的规程，其中部分内容涉及脆弱地质结构、滑坡体、水利工程缺陷与隐患、地下水的探测。水利部又于 2008 年颁布了《堤防隐患探测规程》（SL 436—2008），为堤防隐患提供了较为详细、规范的探测方法。

在航空电磁方面，1965—1975 年，我国开始研制单频航电系统，先后成功研制了单

频、双频、三频航电系统，分别与航磁系统组成航空物探综合站，在水资源普查、海水入侵调查等应用领域均取得了很好的地质效果。

在 21 世纪里，人们越来越重视环境问题，采用各种方法监测水污染的范围与程度，电磁法由于成本低、速度快、原位无损测试等特点，在我国逐渐被采用，并有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 于琪洋. 对我国干旱及早灾问题的思考 [J]. 中国水利, 2003 (7): 67 - 69.
- [2] 李金铭. 电法勘探方法发展概况 [J]. 物探与化探, 1996, 20 (4): 250 - 255.
- [3] 赵国泽, 陈小斌, 汤吉. 中国地球电磁法新进展和发展趋势 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22 (4): 1171 - 1180.
- [4] 刘昌东, 万金红, 马建明, 等. 洪涝灾害人口损失研究进展 [J]. 南水北调与水利科技, 2012, 4: 97 - 100.
- [5] 董书宁. 对中国煤矿水害频发的几个关键科学问题的探讨 [J]. 煤炭学报, 2010, 35 (1): 66 - 71.
- [6] 邢冬梅, 叶义成, 赵雯雯. 我国矿山透水事故的统计分析及其安全管理对策 [J]. 金属矿山, 2010, 6: 178 - 181.

## 第 2 章 水、岩土与混凝土的电磁特性

### 2.1 电磁特性及其表征物理量

#### 2.1.1 导电性与电阻率

物体传导电流的能力称为导电性。

根据物理学定义，均匀介质中直流电路的电阻  $R$  与介质的长度  $L$  成正比，与电流通过的横截面积  $S$  成反比，其中比例系数  $\rho$  称为介质的电阻率。

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (2.1)$$

式中： $\rho$  为电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ 。

电阻率的倒数称为电导率。

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.2)$$

式中： $\sigma$  电导率， $\text{S}/\text{m}$ 。

显然，介质的电阻率越低或电导率越大，其导电性则越好；反之，其导电性越差。

电阻率小于  $10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$  的介质称为导体，如金属材料等。电阻率大于  $10^8 \Omega \cdot \text{m}$  的介质称为绝缘体，如陶瓷、橡胶、塑料等材料。介于两者之间的介质称为半绝缘体或半导体。

#### 2.1.2 介电性与相对介电常数

在外电场作用下，不导电的物体，即为电介质。有些电介质的电阻率并不很高，但由于能发生极化过程，也归入电介质。

在电磁学里，当给电介质施加一个电场时，由于电介质内部正负电荷的相对位移，会产生电偶极子，这现象称为电极化。电介质因响应施加的外电场而极化的程度，可以用电极化率来衡量。

由于在外电场上就叠加上一个极化电荷的电场。这个电场方向与外电场方向相反，因此介质内部的介电场减弱。

介质在有外加电场时会产生感应电荷而削弱电场，原外加电场（真空中）与介质中电场的比值即为相对介电常数，恒定电场作用下介质电流与电压相位相同，介电常数为一定值。

介电常数是相对介电常数与真空中绝对介电常数的乘积。

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad (2.3)$$

式中： $\epsilon_0$  为真空介电常数； $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数，为无量纲物理量。

$\epsilon$  与物质成分、结构、湿度有关。对于时变电磁场，物质的介电常数和频率相关，通常称为介电系数，它在高频电磁法勘探中有重要作用。

### 2.1.3 磁性与表征磁性的物理量

电流或移动的电荷，会在周围产生磁场。任何物质的磁性都是带电粒子运动的结果。原子由带正电的原子核及其核外电子壳层组成。电子绕核沿轨道运动，产生轨道磁矩。电子还有自旋运动，具有自旋磁矩。这些磁矩的大小，与各自的动量矩成正比。原子核带正电，呈自旋转动，亦具有磁矩，但数值很小。因此，原子总磁矩是电子轨道磁矩、自旋磁矩及原子核自旋磁矩三者的矢量和。

核子的核子磁矩显得很微弱，强度是电子磁矩的几千分之一。当作一般运算时，可以忽略核子磁矩。但是，核子磁矩在某些领域很有用途，例如核磁共振。

#### 2.1.3.1 磁化强度和磁化率

磁化强度  $M$  是衡量物体磁性的一个物理量，定义为单位体积的磁偶极矩。均匀无限磁介质，受到外部磁场  $H$  的作用，磁化场强度与外磁场之间的关系为

$$M = \chi H \quad (2.4)$$

式中： $\chi$  为物质的磁化率，它表征物质受磁化的难易程度，是一个无量纲的物理量。

实际工作中，磁化率仍注以单位。在 CGS 单位系统下的磁化率值是 SI 下的  $\frac{1}{4\pi}$  倍，即  $1 \text{ CGSM} = 4\pi \text{ SI}$ ，数值上  $\chi(\text{CGS}) = \chi(\text{SI}) / 4\pi$ 。

#### 2.1.3.2 磁感应强度和磁导率

在各向同性磁介质内部任意点上，磁化场  $H$  在该点产生的磁感应强度（磁通密度）为

$$B = \mu H \quad (2.5)$$

式中： $B$  为磁感应强度（磁通密度），T； $\mu$  为介质的磁导率，H/m。

真空时的磁导率为  $\mu_0 = 12.56 \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ，相对磁导率  $\mu_r$  为  $\mu / \mu_0$ 。

各类物质，由于原子结构不同，它们在外磁场作用下，呈现不同的宏观磁性。

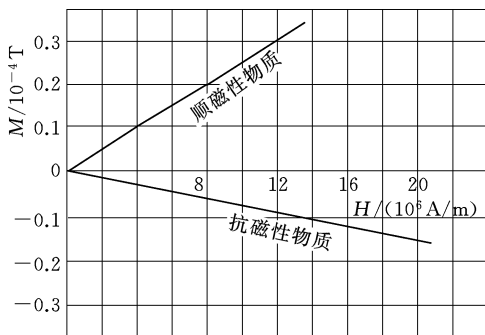


图 2.1 抗磁性与顺磁性物质的磁化

(1) 抗磁性。抗磁性是在外磁场的外作用下，原子系统获得与外磁场方向反向的磁矩的现象。它是种微弱磁性，相应的物质被称为抗磁性物质。其磁化率为负值且很小，一般在  $10^{-5}$  数量级。

(2) 顺磁性。如图 2.1 所示，顺磁性物质受外磁场作用，感生出与外磁场同向的磁化强度，其磁化率为不大的正值，仅为  $10^{-6} \sim 10^{-3}$  数量级，这种现象称为顺磁性。

(3) 铁磁性。在弱外磁场的作用下，铁

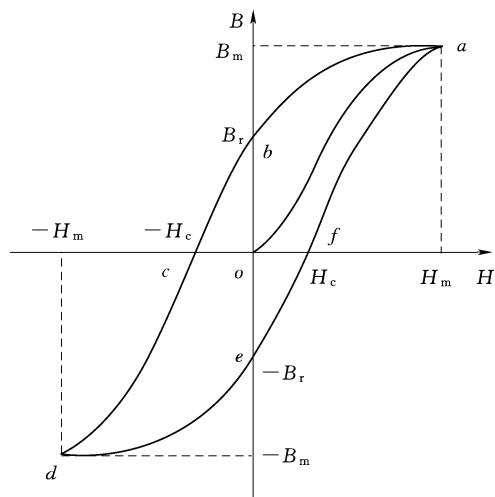


图 2.2 磁性材料的磁化曲线与磁滞回线

磁性物质即可达到磁化饱和，其磁化率要比抗磁性、顺磁性物质的磁化率大很多。

它具有以下磁性特征：①磁化强度与磁化场呈非线性关系，如图 2.2 所示；②磁化率与温度的关系： $K = \frac{C}{T - T_c}$ ；③试验结果说明，铁磁物质的基本磁矩为电子自旋磁矩，而轨道磁矩基本无贡献。

铁磁物质内，包含着很多个自发磁化区域，它叫作磁畴。在无外磁场作用时，各磁畴的磁化强度矢量取向混乱，不呈磁性。当施加外磁场时，磁畴结构将发生变化，随外磁场增加，通过磁畴移动和磁畴转动的过程，显示出宏观磁性。

由于磁畴内原子间相互作用的不同，原子磁矩排列情况有别，铁磁性又分为 3 种类型：

- (1) 磁性。磁畴内原子磁矩排列在同一方向，例如铁、镍、钴即属于此。
- (2) 反铁磁性。磁畴内原子磁矩排列相反，故磁化率很小，但具有很大的矫顽力。
- (3) 亚铁磁性。磁畴内原子磁矩反平行排列，磁矩互不相等，故仍具有自发磁矩。此类物质具有较大的磁化率和剩余磁化强度。

## 2.2 水及其电磁特性

### 2.2.1 水的一般物理性质

水分子式： $H_2O$ ，分子量：18.016，水分子是一非线性分子， $H-O-H$  的键角是  $104^\circ 45'$ ， $O-H$  的键长为  $0.95\text{\AA}$ ，水分子结构如图 2.3 所示。

在常温、常压下，纯净的水是无色、无味、无形的透明液体，1 个大气压（即  $101.3\text{kPa}$ ）下，水的沸点是  $100^\circ\text{C}$ ，冰点是  $0^\circ\text{C}$ 。冰的相对密度为  $916.8\text{kg/m}^3$ ，纯水在  $0^\circ\text{C}$  时密度为  $999.87\text{kg/m}^3$ ，在沸点时水的密度为  $958.38\text{kg/m}^3$ 。热胀冷缩是物质的一般特性，但水在  $0\sim 4^\circ\text{C}$  范围内却不服从这一规律，而是相反的，随着温度升高，体积缩小，密度增大，因而水在  $3.98^\circ\text{C}$  时，具有最大的密度为  $1000\text{kg/m}^3$ 。

水是自然界热容量最大的物质，它可以吸收和放出大量的热，比热为  $2.1351\text{J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$  ( $-20\sim 0^\circ\text{C}$ )。另外，在所有液体中，它还具有最大的蒸发热，而且冰的融化热也很高，为  $333687.9\text{J/kg}$  ( $0^\circ\text{C}$ )。这些特性对地球的气候，特别是季节交替时空气温度的均匀化有明显的影

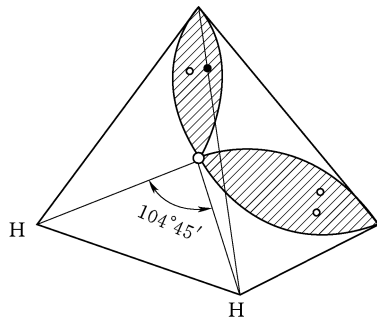


图 2.3 水分子结构