

高等学校规划教材

# 矿井地球物理勘探

刘天放 李志聃 编

煤炭工业出版社

015  
L-77

高等学校规划教材

# 矿井地球物理勘探

刘天放 李志聃 编

煤炭工业出版社

772809

(京)新登字042号

### 内 容 简 介

《矿井地球物理勘探》共分两篇，全书系统地阐述了当前常用的矿井物探方法。第一、二、三、四、五章为交、直流电法勘探，包括地下电磁波理论基础、无线电波透射法、矿井地质雷达、矿井直流电法及非地震的其它物探方法。第六、七、八、九、十章为矿井地震及声波探测，包括地震波理论基础、槽波地震勘探、瑞利波勘探及岩体声波探测。

本书是煤炭高等院校勘查地球物理专业、煤田地质勘查专业的教学用书，也可供煤田地质、煤田物探、矿井地质与采矿工程技术人员参考。

### 高 等 学 校 规 划 教 材 矿 井 地 球 物 理 勘 探

刘天放 李志聘 编  
责任编辑：宋德淑

\*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

\*

开本787×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张14

字数325千字 印数1—1,565

1993年10月第1版 1993年10月第1次印刷

ISBN7-5020-0802-0/TD·741

书号 3570 A0241 定价 6.50元

# 前 言

为了高产、高效和安全地进行综合机械化采煤，必须预测采区内和工作面前方煤层的不连续性、各种小构造及地质异常体。矿井地球物理勘探就是解决这一地质问题的重要技术手段。为适应这一形势，煤炭各院校先后为本科生开设了“矿井地球物理勘探”课程。《矿井地球物理勘探》是按照煤炭高等院校勘查地球物理勘探专业及煤田地质勘查专业本科生四年制教学大纲编写的教材。编写过程中，参照了煤炭各高校有关讲义，并考虑到目前国内外的应用情况及科研成果，同时也吸收了编者从1984年以来历届教学的部分内容与科研成果。

“矿井地球物理勘探”应包括适用于各种矿产开发的井下物探方法，而本书仅限于煤矿井下物探。因此，只系统地介绍了煤矿井下常用的几种主要方法：无线电波透射法、槽波地震勘探、矿井地质雷达法、矿井直流电法等；根据矿井物探技术的发展，增加了瑞利波勘探和井巷重力勘探等内容；同时，将电磁波地下传播及地震波有关衰减、非均匀平面波及全反射等作为理论基础列为独立章节。在使用本教材时，可根据学时多少有选择地进行教学。

由于矿井地球物理勘探是煤田地球物理勘探、煤田电法勘探、地震勘探等专业课的后续课程，因而在内容安排上，既考虑到与前修课程互相衔接，又要力戒重复，重点突出煤矿井下地球物理方法的特点，使学生在学习了本书之后，对煤矿井下地球物理勘探的原理与方法能有一个清晰的理解，为将来从事矿井物探工作打下基础。

本书由中国矿业大学地球物理勘探教研室刘天放（绪论、第六、七、八、九、十章）、李志鹏（第一、二、三、四、五章）编写。刘天放为本书主编。

在编写过程中，煤炭科学研究总院西安分院、重庆分院提供了不少的科学技术报告，中国科学院地球物理所严寿民副研究员提供了他在德国鲁尔大学学习期间L.Dresen教授的讲稿，H.Rueter博士供给了不少参考材料及研究成果，李小平博士提供了他在德国所写的最新且尚未发表的论文，淮北矿务局许孝庭高级工程师提供了研究资料和实验数据，岳建华及李红艳分别参与了第一篇及第二篇的校对工作，在此一并表示感谢。

矿井物探是近几十年发展起来的一门新学科，很多理论和技术问题尚需进一步研究和发展的，编者虽尽力广收各方面的资料和科研成果，但水平有限，编写仓促，会存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者

1992年8月

## 本书使用的缩写字符号

VES	垂向电测深
ISS	槽波地震勘探
AE/MS	声发射/微震
$P$	纵波
$S(SV, SH)$	横波(垂直极化横波、水平极化横波)
$R$	瑞利(面)波、瑞利型槽波
$L$	洛夫(面)波、洛夫型槽波
CDP(CMP)	共深度点或共反射点(共中心点)
LS(RLS, ELS, MCLS)	延迟求和(径向延迟求和、椭圆延迟求和、波型转换延迟求和)
ALS	自适应延迟求和
CT	计算层析成像技术
ART	代数重建技术
FT, IFT	傅氏变换、傅氏逆变换
grad	梯度运算符
div	散度运算符
rot	旋度运算符
$\nabla^2$	拉普拉斯算子
$\rho$	电阻率, 密度
$\rho_s$	视电阻率
$R, R_s$	电阻、视电阻
$\epsilon$	介电常数
$j$	电流密度
$E$	电场强度
$H$	磁场强度
$V_{zz}$	重力垂直梯度
$\Delta g$	重力异常
$\mu$	磁导率、剪切模量
$\lambda$	各向异性系数、波长、拉梅常数
$E$	杨氏模量
$\sigma$	密度、泊松比
$v(v_p, v_s)$	波速(纵波速度、横波速度)
$\theta_i, \theta_r, \theta_t$	纵波入射角、反射角与折射角
$\beta_i, \beta_r, \beta_t$	横波入射角、反射角与折射角

$c$	光速、相速度
$U$	电位, 群速度
$\alpha, \beta$	介质吸收系数
$\eta$	衰减系数
$\theta$	介质的频率因子
$f, \omega$	频率、圆频率
$T$	周期
$h, k$	波数

# 目 录

绪 论

## 第一篇 矿井电法与巷道重力勘探

<b>第一章 地下电磁波法勘探理论基础</b> .....	5
第一节 均匀无限介质中电磁场 .....	5
第二节 电磁波在地下的反射和透射 .....	13
<b>第二章 无线电波透视法</b> .....	17
第一节 无线电波透视法的地质地球物理基础 .....	17
第二节 无线电波透视仪及井下工作方法 .....	21
第三节 无线电波透视资料整理与解释 .....	25
第四节 井下干扰因素的影响 .....	29
第五节 无线电波透视在煤矿中的应用及实例 .....	30
<b>第三章 矿山地质雷达</b> .....	38
第一节 矿山地质雷达探测原理 .....	38
第二节 煤的电磁学性质 .....	40
第三节 地质雷达仪与井下工作方法 .....	41
第四节 地质雷达的应用 .....	43
<b>第四章 矿井直流电法勘探</b> .....	45
第一节 矿井直流电法方法与全空间场理论 .....	45
第二节 巷道顶、底板垂向电测深法 .....	47
第三节 巷道层测深法 .....	53
第四节 矿井电剖面法 .....	59
第五节 矿井高密度电阻率法 .....	62
第六节 直流电透视法 .....	66
第七节 矿井电法确定含水构造实例 .....	67
<b>第五章 巷道重力勘探及其它矿井物探方法</b> .....	71
第一节 矿井微重力测量 .....	71
第二节 红外遥感技术 .....	76
第三节 氡气测量 .....	78

## 第二篇 矿井地震及声波探测

<b>第六章 地震波动理论基础</b> .....	81
第一节 地震波的激发 .....	81
第二节 波动方程 .....	81
第三节 纵波与横波 .....	83
第四节 傅里叶变换与频谱分析 .....	84

第五节	均匀与非均匀平面谐波 .....	88
第六节	地震波的能量与衰减 .....	91
第七节	地震波在平界面上的反射与透射 .....	95
第八节	平面波的全反射 .....	105
第九节	瑞利面波与洛夫面波 .....	107
第十节	低速夹层中的导波 .....	112
<b>第七章</b>	<b>槽波地震勘探 .....</b>	<b>115</b>
第一节	概述 .....	115
第二节	槽波的形成与分类 .....	116
第三节	槽波的频散 .....	124
第四节	槽波的波形图像 .....	130
第五节	槽波的衰减 .....	133
第六节	ISS数据采集及测量方法 .....	139
第七节	ISS应用中的若干问题 .....	144
<b>第八章</b>	<b>槽波地震勘探数据的分析与处理 .....</b>	<b>147</b>
第一节	概述 .....	147
第二节	包络计算与速度分析 .....	150
第三节	频散分析 .....	154
第四节	极化分析与极化滤波 .....	158
第五节	包络叠加与动态道集(DTG)叠加 .....	163
第六节	槽波的再压缩 .....	166
第七节	槽波的偏移 .....	168
第八节	槽波层析成像技术 .....	174
<b>第九章</b>	<b>瑞利波地震勘探 .....</b>	<b>177</b>
第一节	概述 .....	177
第二节	瑞利波地震勘探的基本原理 .....	177
第三节	瑞利波勘探方法及仪器 .....	179
第四节	数据处理及计算 .....	181
第五节	瑞利波地震勘探的应用 .....	184
<b>第十章</b>	<b>矿井岩体声波探测 .....</b>	<b>188</b>
第一节	概述 .....	188
第二节	岩体特点对声波传播的影响 .....	188
第三节	声波探测仪器 .....	193
第四节	岩体声波探测的工作方法 .....	196
第五节	岩体声波探测技术在矿井中的应用 .....	198
第六节	声发射与微震技术 .....	202
附录 1	多层介质中洛夫型槽波频散的计算 .....	208
参考文献	.....	211



# 绪 论

## 一、矿井地球物理勘探的研究对象

矿井地球物理勘探,简称矿井物探,是用于矿井地质勘查的各种地球物理勘探方法的总称。它是在煤巷内以煤层本身作为主要研究对象,探查未被开采煤层的不连续性,以及有关的地质构造破坏与地质异常体。与地面物探比较,矿井物探具有探测目标近、方法多样,以及在多数情况下从数据采集到处理和解释必须考虑全空间问题等特点。

## 二、矿井物探在煤炭生产中的作用

煤炭是当今中国的主要能源及化工原料。随着国民经济的发展,各个行业对煤炭的需求量不断增加。于是一批批高产、高效的综采工作面陆续投产,其产量在总产量中的比重逐渐上升,它们的作用举足轻重。综合机械化采煤投资大,每个工作面上装备了上千吨的大型设备,不便随意装拆转移,要求及时、准确预测预报采区内和工作面前方各种地质破坏与异常,诸如:小断层与褶曲、陷落柱、煤层的冲刷与风化、煤层的分叉与合并、煤层厚度的变化、岩浆岩体,还有溶洞、老空的情况、可能的涌水点及通道、顶板与围岩的稳定性等……。所有这些地质破坏与异常,即使规模不大,如果未能超前预测,除了造成采掘系统布局不合理、资源浪费外,还将直接影响综采高产、高效优势的发挥和矿井水患的有效防治,并危及矿工与矿井的安全。一旦发生问题,其损失惊人。一个落差仅2~3m约等于煤厚的小断层,就足以阻止一个综采工作面的正常推进,导致它推进中止,被迫搬家,其直接经济损失,少则数百万元,多则上千万元。例如,联邦德国的煤矿中,约有16%~20%综采工作面都遇到没有预料的地质破坏;英国有40%的工作面,因有不可克服的地质干扰,而不得不提前结束开采;前苏联有1/3的综采工作面,因意外地质变化而被迫搬迁;我国开滦范各庄煤矿2171综采工作面于1984年6月2日发生了世界采矿史上罕见的充水陷落柱的特大透水灾害,最大涌水量达2053t/min,仅21小时淹没了年产300万t的整个大型矿井,8天后又淹没了年产200万t的吕家坨矿,同时严重威胁着附近其它矿,仅这次突水事故直接经济损失高达4亿元。

矿井地质工作所面临的形势是严峻的。为了适应这种形势,仅仅依靠已有的传统地质学方法、数学地质统计预测方法、钻探及巷探的手段还不够。即使使用地面高分辨率地震勘探,要查明距地表数百甚至千米深范围内其落差仅相当于煤层厚度数量级的小断层与其它地质干扰,目前仍十分困难。因此,矿井地质工作越来越迫切要求将各种物探手段在井下煤层附近用于探测,以解决所面临的有关的地质和采矿工程等问题。虽然,所有的物探手段都仅是一些间接的方法,存在着多解性和发展中的不完备性,然而矿井物探方法有其独特之处,它具有如下优点:

- (1) 方法多样,运用灵活。可根据地质任务与具体条件,挑选合适的方法配合,使之因地制宜地发挥各种方法的优势,解决特定的地质问题。
- (2) 探测范围大。按目前技术水平,探测范围可达1km以上。
- (3) 探测目标距观测平面近,因此各种物探异常明显而突出,分辨率高,为地下各种

地质问题的解决提供了与地面物探无法相比的优越条件。

(4) 成本低、效率高,可快速的提供有关矿井的地质信息。

因此,近几年来矿井物探倍受各产煤国的重视,得到了飞速的发展,其方法和技术逐渐完善,应用范围不断扩大,解决的问题日益增多。可以预料,随着采煤机械化程度的提高,矿井物探在矿井地质工作中的地位将愈来愈重要。

### 三、矿井地球物理勘探方法

煤矿井下物探方法是以研究煤层及其围岩的某种物性(如电性、弹性、密度、磁性及放射性等)为基础的,由于所研究的物性不同,因而形成了不同方法。目前,使用的矿井物探方法多种多样,主要有以下几种方法:

#### 1. 电法类

它包括:无线电波透射法;矿井地质雷达法;矿井直流电法勘探(包括顶底板电测深、电剖面法、煤层层测深法)。

#### 2. 地震及声波探测类

它包括:槽波地震勘探;矿井高分辨率地震勘探;矿井瑞利波勘探;矿井岩体声波探测。

#### 3. 其它物探方法

它包括:巷道重力测量;放射性勘探;红外线遥测等。

虽然方法繁多,但较为有效和常用的方法主要是无线电波透射法、槽波地震勘探、矿井直流电法、地质雷达与声波探测等。

矿井物探研究工作,早已开始,但它真正崛起是始于60年代初。30年来,各个产煤国家都根据自己的特点侧重发展了不同的方法。矿井物探在我国起步较晚,然而近十几年来发展迅速、门类齐全。

地质雷达(又称矿山雷达)最初由美国J.C.柯克从飞机上发射雷达脉冲,探测冰层厚度开始。1960年起,M.A.麦耶尔等人进一步研究,将它用来探测地下构造、洞穴、地下水位及河床等,几年前美国XADAR公司研制出商品化的矿井地质雷达——XADAR-IV(非防爆的),用电脑控制,边测量边自动成图,如实地反映了地下浅部地质剖面。该公司目前正在研制新型的矿井地质雷达,预计探测深度可达50m。我国煤炭科学研究总院重庆分院(以下简称重庆煤分院)从70年代开始了矿井地质雷达探测方法及仪器的研究,1987年研制出了KDL-2型防爆矿井地质雷达,井下探测距离可达到30~40m。在我国开滦等矿区探测陷落柱、小断层与老空中效果良好,目前正在改进成象系统,并进一步研究回波识别与解释方法。

电磁波法,国外从20年代开始研究,首先在磁化矿床上进行实验。我国在50年代末,由地质矿产部物化探研究所及上海地质仪器厂等单位开始研究,1965年推出了DKJ-1、DKJ-2型透视仪,也首先在金属硫化矿床上进行了试验,并用于金属矿体探测;70年代末重庆煤分院等单位将电磁波法用于井下煤层的透视,探测煤层的不连续性、陷落柱及其它地质异常。1987年,重庆煤分院与河北煤研所先后推出了三代商品化的坑透仪:WKT-J<sub>1</sub>(不防爆)、WKT-J<sub>2</sub>(防爆)及新型的WKT-F<sub>3</sub>。其中,WKT-F<sub>3</sub>由微机控制、数字显示,数据可重复处理,穿透距离可增大到150~250m以上。这种仪器简单、轻便、施工容易、效果较好,因此在国内得到广泛应用。

1955年, F.F.埃维逊在新西兰煤矿一个煤层内首先激发与接收到煤层波(即槽波), 并预言将用于煤炭工业; 1963年, Th.克雷及其合作者的工作奠定了槽波地震勘探的理论基础, 然而槽波勘探技术取得突破性的进展是在70年代末提取与利用槽波的埃里震相之后, 于1980年前后, 以德国、英国为首, 澳、匈、捷、苏、美等国都先后发展起来。1977年我国重庆煤分院、焦作矿业学院、渭南煤矿专用设备仪器厂(简称渭南仪器厂)与徐州、焦作等几个矿务局合作, 首先在国内开展试验, 并于1980年前后研制了TYKD-1型非防爆的9道模拟磁带矿井地震仪及防爆的TZKC-9型模拟磁带矿井地震仪。它们的工作为后来的研究打下了基础。1985年, 德国WBK地球物理所在SEAMEX80基础上推出了最新式的分布式数字槽波地震仪SEAMEX85及软件ISS, 将槽波地震勘探向实用化推进了一大步。之后, 煤炭科学研究总院西安分院(简称西安煤分院)引进了SEAMEX85及软件系统ISS。从此, 国内开始了系统的生产性试验。1983年开始, 中国矿业大学开展槽波在煤层中传播规律的模拟研究, 并在微机上针对TZKC-9型仪器记录数据, 开发了槽波处理软件, 功能类似ISS, 但可独立运行。煤炭科学研究总院西安分院也开始了槽波勘探方法有限元法正演模拟及CT技术的研究, 在小断层、冲刷带、陷落柱及瓦斯聚集区的探测中取得了可喜的进展。

1988~1989年, 我国西安煤分院还从日本引进了VIC株式会社1985年才开发成功的瑞利波勘探技术及专用设备GR-810。1991年将该法应用于井下煤层残厚及独头超前探测, 同时研制了瑞利波瞬态激震法的设备MRD-1型仪器, 该仪器十分轻便且有利于井下应用。

矿井直流电法, 前苏联及匈牙利在理论和井下方法方面开展了广泛的研究, 并处于领先地位。我国80年代起煤炭科学研究总院唐山分院、河北煤研所等单位开始从事这方面的工作, 并取得了一定的效果; 1990年开始, 中国矿业大学与淮北矿务局合作开展了多种矿井直流电法方法有效性的研究工作, 并和矿井高分辨率地震勘探配合, 探测该矿下煤组隔水层厚度, 取得了较理想的地质效果。

80年代前期, 我国渭南仪器厂开发生产模拟磁带测煤厚仪, 供矿区使用; 80年代后期, 淮南矿业学院与长沙旭华无线电厂合作开发了KDY-1型数字式的测煤厚仪, 该仪器轻便、直观、易于操作, 在不少矿区得到应用。

回顾历史, 不难看出促进矿井物探发展的原因有: 煤炭生产的急需; 基本理论和数据处理方法的突破性进展; 探测仪器的开发与更新; 计算技术发展及计算机的广泛应用等。展望未来, 矿井物探的研究方向应有以下几个方面:

(1) 基础理论和方法研究。近年来, 国内外学者关注的问题有: 各种地质异常体引起的各种物理场的特征; 非理想的地质介质对各种物理场的影响; 电磁波、地震波的衰减; 正演模拟及其它方法; 目标识别及定量解释反演方法等。

(2) 观测方法。包括防爆、轻便、低廉的探测设备的研制与革新、观测技术的改进、观测方法的完善及各种干扰的压制等。

(3) 数据的分析与处理。除分析处理方法本身外, 还包括计算机, 尤其是微机的应用, CT技术的应用等。

(4) 物理模型研究。



# 第一篇 矿井电法与巷道重力勘探

矿井电法包括无线电波透视法、地质雷达和各种直流电法技术。它是探测井下小构造及解决涌水通道等地质问题的有效手段之一。因此，矿井电法目前应用较普遍。如何进一步提高其地质效果和解决问题的能力，是需要今后进行研究的课题。

矿井微重力勘探在国外已用于井下解决各种小构造问题，在国内除由中国矿业大学和长春地质学院协作，在淮北杨庄矿进行过试验性研究工作外，目前尚未用于井下。鉴于方法本身的特点，矿井重力测量优越于其它矿井物探方法，是一种很有前途的方法，这里仅对矿井重力测量的基本原理和方法作一简单的介绍，以反映巷道重力勘探当前的进展。

## 第一章 地下电磁波法勘探理论基础

### 第一节 均匀无限介质中电磁场

在电磁场理论中，讨论的是理想电介质或真空中的电磁场，而地下电磁波法研究的是地下电磁波在具有有限电导率的损耗介质中的传播特性。

#### 一、电磁场的激发和传播

电磁波的产生(发射)，采用电偶极子(天线)为发射源，电磁波的产生和传播可用一个较直观但不严格的极板由近而远逐渐张开的电容器充、放电过程来讨论(图1-1)。当电源为简谐变化时，电力线的变化如图1-2所示，图中表示了六个不同时刻的电力线分布。当 $t = T/2$  ( $T$ 为周期)时，天线偶极子电荷 $q$ 为零，形成第一个电力闭合圈；之后，天线反向充电，至 $t = T$ 时，电力线又缩成第二个闭合圈，同时第一个闭合圈向外推移。随着时间的继续变化，如此反复就形成一系列电力闭合圈。在均匀空间中，电力闭合圈是上下对称，磁力线是一系列以天线为轴心的同心圆，随时间推移依次离开天线向外扩展，图1-3展示了电力线和磁力线的传播情况。

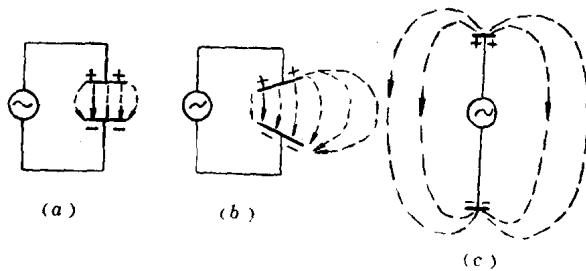


图 1-1 电磁波电场辐射示意图

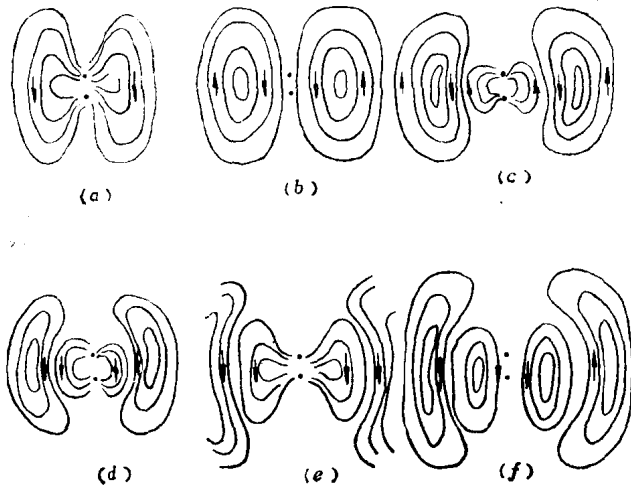


图 1-2 电磁场电力线空间分布图

$a-t > T/4$ ;  $b-t = T/2$ ;  $c-t > T/2$ ;  $d-t = 3T/4$ ;  $e-t > 3T/4$ ;  $f-t = T$

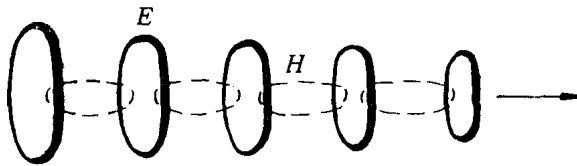


图 1-3 电磁波传播示意图

交变偶极子天线周围存在变化的电场和变化的磁场，且电场和磁场相互激发。即电场的存在产生相应的磁场，而磁场又激发出电场，电场和磁场不断的运动，离开场源向外辐射，以波的形式向外传播，形成了辐射电磁波。

## 二、电磁场方程

电磁场的数理基础是麦克斯威尔方程。麦克斯威尔方程全面描述了电磁场在介质中传播的基本规律。

在无源介质中，描述电磁场的麦克斯威尔方程为

$$\begin{cases} \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t \\ \text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \\ \text{div } \mathbf{B} = 0 \\ \text{div } \mathbf{D} = 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

式中 rot、div——分别为旋度和散度算符；

$\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ ——分别表示电场强度和磁场强度；

$\mathbf{B}$ ——磁感应强度， $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 关系由电介质特性决定，即 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  ( $\mu$ 为介质磁导率)；

$\mathbf{D}$ ——电感应强度，即 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$  ( $\epsilon$ 为介质的介电常数)；

$\mathbf{J}$ ——电流密度。

麦克斯威尔方程实质上反映了电荷、电流、电场和磁场随时间和空间变化的规律，它综合了电磁现象的一切相互作用。其中，第一式称磁感应定律，把磁场与传导电流和位移电流联系起来，即传导和位移电流产生涡旋磁场，也就是说空间存在变化的电场便激发出随时间变化的磁场；第二式为电磁感应定律，说明变化的磁场激发出涡旋状电场；第三、第四两式称为高斯定律，表示磁感强度和电感强度为无源的，磁力线和电力线为闭合的。

为了描述电磁波的传播规律，从麦克斯威尔方程出发，在谐波情况下，可求出  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$  满足的波动方程

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \epsilon \left(1 - i \frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right) \mathbf{E} = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + \omega^2 \mu \epsilon \left(1 - i \frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right) \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

或简写作

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} + K^2 \mathbf{E} = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + K^2 \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

式中  $K$ ——波动方程系数，简称波数，即

$$K^2 = \omega^2 \mu \epsilon \left(1 - i \frac{\sigma}{\omega \epsilon}\right) \quad (1-4)$$

在真空或理想介质中，可得

$$K = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \omega / (1 / \sqrt{\mu \epsilon}) = \omega / v \quad (1-5)$$

式中  $v$ ——电磁波在介质中的传播速度，在真空或空气中  $v = v_0$ ，它等于  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，即光速。

由式 (1-5) 可看出

$$K = \omega / v = 2\pi f / v = 2\pi / \lambda \quad (1-6)$$

所以，波数实质是单位长度波振动次数的  $2\pi$  倍。

### 三、电磁参数

地下电磁波法是研究电磁波在地下岩石介质中的传播，因此岩、矿石的电磁参数 ( $\sigma$ 、 $\epsilon$  和  $\mu$ ) 直接影响电磁波在地下介质中的传播特性，即电磁波的损耗、振幅和相位的变化。

#### 1. 电阻率 $\rho$ (电导率 $\sigma$ )

电阻率是决定电磁波在地下导电介质中传播特性的主要电性参数。其值决定于岩石的组成成分和结构特性等，多种影响因素决定了岩石电阻率在一个较大的范围内变化，但同一岩石在相同地质条件下，电阻率变化范围一般并不很大。影响岩石电阻率大小的主要因素是：良导矿物的存在和含量、岩石孔隙度的大小和孔隙中溶液的矿化度高低，以及含泥质颗粒的多少等。

#### 2. 介电常数 $\epsilon$

高频电磁波在高电阻率介质中传播，介电常数  $\epsilon$  将对电磁场的振幅和相位产生明显的影响，因此在电法勘探中，只有在采用高频电磁波工作时，才考虑它的影响。介电常数  $\epsilon$  是表示介质在电磁场中极化程度的一个物理量。电荷  $q$  在距  $r$  处产生的电场为

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2}$$

在国际单位制中电场强度单位是伏/米 (V/m)，则其介电常数纲为

$$\frac{\text{库}}{\text{伏} \cdot \text{米}} = \text{法/米 (F/m)}$$

在真空 (或空气) 中介电常数为

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{法/米 (F/m)}$$

对于其它介质的介电常数为

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

式中  $\epsilon_r$  —— 相对介电常数。

上式说明，均匀无限介质中的电场比空气中的电场小  $\epsilon_r$  倍，这是在场的作用下介质极化的结果。

大部分岩、矿石相对介电常数在 4 ~ 15 间变化，唯独水的相对介电常数高达 81。

### 3. 磁导率 $\mu$

在外磁场作用下，介质的分子、原子结构中的电子旋转轨道将发生变化，造成微型磁场重新排列，产生附加磁场，改变外磁场的大小，这种现象称磁化。描述介质磁化强度的量，称磁导率  $\mu$ ，可定义为

$$\mu = B/H$$

式中  $B$  —— 磁感应强度。

在真空中， $B = \mu_0 H$ 。一般无磁性或弱磁性岩、矿石，磁导率  $\mu \approx \mu_0$ ，即磁损耗为零。对磁性岩、矿石，其磁导率变化范围为： $\mu_0 \leq \mu \leq (2\mu_0 \sim 12\mu_0)$ 。

岩、矿石电磁参数除与成分、结构等因素有关外，还随频率的改变而变化。

### 四、偶极子电磁场

在交流电法勘探中，一般采用偶极子发射装置，偶极子又分为电偶极子 (电偶源) (图1-4) 和磁偶极子 (磁偶源) (图1-5)。为增大电偶距，和增大发射天线上的电流强度，将极板平放过来增加其对地电容 (图1-4b)。当极板无限靠近地面时，电容将变得无限大，对于交流就等于接地。

磁偶极子发射时，一般采用垂直磁偶极子，即磁偶矩与发射面垂直，因此发射线圈是平放在发射面上 (图1-5)，垂直磁偶极子发射的是横电磁型波。

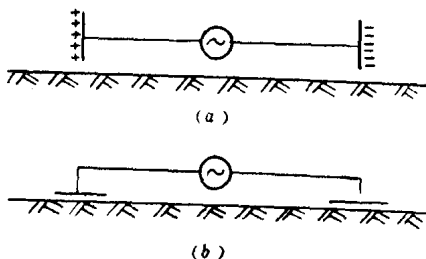


图 1-4 水平电偶源示意图



图 1-5 垂直磁偶源示意图



### 1. 偶极子的自有场和辐射场

稳定电偶极子或磁偶极子产生的场分布在偶极子周围，其场强将以 $1/r^2$ 的关系随距离 $r$ 衰减。这种场好像偶极子自己所携带的场，当偶极子位置变化时，场的分布也随之而改动；如果偶极子消失，场也随之消失。因此，把这种场称为偶极子的自有场。

对于交变偶极子，像稳定偶极子的场一样，场的分布受控于偶极子。其不同点是：场随时间变化；由于交互感应，电场和磁场将同时存在，且和波源交换能量。所以，偶极子附近的场仍可称自有场或称感应场。

交变偶极子除了感应场部分外，尚有一部分场远离偶极子向外辐射出去，脱离场源并以波的形式向外传播，这部分场称为辐射场或自由场。一经辐射出去的辐射场，将按自己的规律传播，而与场源以后的状态无关；即便偶极子消失，辐射电磁波仍继续存在并向外传播。随着距离的增加，辐射场强度也随之衰减，但辐射场强度的衰减比自有场慢，以 $1/r$ 的关系随距离而衰减。

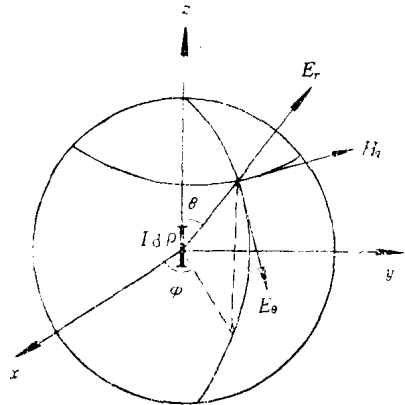


图 1-6 偶极子电磁场分量示意图

### 2. 偶极子电磁场数学表达式

根据波动方程和给定的边界条件，可以导出在球坐标系中远区电磁场分量（图1-6）的数学表达式

$$\text{垂直电偶极子时} \quad \begin{cases} E_{\theta} = \frac{I l \omega \mu}{4\pi r} \sin \theta \cos(\omega t - Kr) \\ H_{\phi} = \frac{I l \omega \sqrt{\epsilon \mu}}{4\pi r} \sin \theta \cos(\omega t - Kr) \\ E_r = 0 \end{cases} \quad (1-7a)$$

表示成指数形式为

$$\begin{cases} E_{\theta} = \frac{I l \omega \mu}{4\pi r} e^{-\sigma r} \sin \theta = E_0 \frac{e^{-\sigma r}}{r} \sin \theta \\ H_{\phi} = \frac{I l \omega \sqrt{\mu \epsilon}}{4\pi r} e^{-\sigma r} \sin \theta = H_0 \frac{e^{-\sigma r}}{r} \sin \theta \\ E_r = 0 \end{cases} \quad (1-7b)$$

式中  $E_0 = \frac{I l \omega \mu}{4\pi}$  —— 初始电场强度；

$H_0 = \frac{I l \omega \sqrt{\epsilon \mu}}{4\pi}$  —— 初始磁场强度；

$\theta$  —— 方位角；

$b$  —— 吸收系数；

$I l$  —— 偶极子电矩。