



全国辐射环境监测培训系列教材

电磁环境测量技术

DIANCI HUANJING CELIANG JISHU

帅震清 © 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



全国辐射环境监测培训系列教材

电磁环境测量技术

DIANCI HUANJING CELIANG JISHU

帅震清 © 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书为全国辐射环境监测培训系列教材之一,重点介绍电磁环境管理与监测的技术与方法,是长期从事电磁环境监测的工作人员的经验总结,是解决实际仪器操作问题的经验反馈,所用素材包括大量案例,内容客观真实,具有较强的指导性和实用性。本书全面系统地介绍了电磁辐射的理论基础和监测技术专业知
识,内容涉及电磁波产生与传播、电磁辐射污染源、电磁环境监测仪器原理及使用方法、现场监测操作、监测质量保证五个主要方面。

本书主要面向电磁环境监测一线技术人员,既满足“零基础”电磁环境监测人员培训需求,又适用于已经具备一定实践经验人员的培训,同时适合关注电磁环境对人体健康影响的公众阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电磁环境测量技术 / 帅震清主编. —北京:人民
交通出版社股份有限公司, 2014. 12

ISBN 978-7-114-11996-5

I. ①电… II. ①帅… III. ①电磁环境—环境测量
IV. ①X21②X839.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 013733 号

书 名: 电磁环境测量技术

著 者: 帅震清

责任编辑: 陈力维

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.cpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 7

字 数: 158 千

版 次: 2014 年 12 月 第 1 版

印 次: 2014 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11996-5

定 价: 25.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

全国辐射环境监测培训系列教材

编审委员会

主任 刘 华

副主任 郭承站 赵永康

委员 (以姓氏笔画为序)

马 磊 戈立新 帅震清 李君利 杨朝文 杨 斌 宋福祥
张起虹 张家利 陈志东 岳会国 赵顺平 曾 志 潘 苏

《电磁环境测量技术》编写组

主 编 帅震清

编 委 缪尔康 胡 林 杨 敏 刘宝华 王 琳 高 鹏 王 纲

汤泽平 李占优 尚致楠 倪雪松

总体审核 岳会国 李宏宇

总 序

我国的核工业自创建发展到今天即将走过六十年的历程,辐射环境监测工作开始于20世纪50年代核工业建立初期,当时监测能力和范围非常有限。随着核能开发与核技术利用事业的迅速发展,我国辐射环境监测技术有了长足的进步,尤其是近十年来,辐射环境监测工作取得了显著的成绩,初步建立起适应我国国情的辐射环境监测体系,监测能力逐步提高。

党中央、国务院高度重视环境保护工作,十分关心环境监测事业发展。为适应新形势的发展要求,环境监测在环境管理中的作用更加突出。辐射环境监测是环境监测的重要组成部分,也是核与辐射安全监管的基础性工作,是核与辐射应急决策强有力的支撑,对环境监测起非常重要和突出的作用。目前,我国辐射环境监测工作面临新的机遇和挑战。一方面,我国核能与核技术利用事业将持续高速发展;另一方面,日本福岛核事故发生后,舆论和公众对辐射环境质量的关注度越来越高,对辐射环境质量监测、核与辐射监督性监测、应急监测与应急响应和监测结果评价与公开等工作提出了更高的要求。

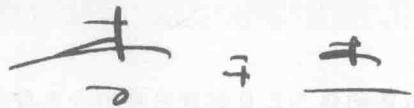
近年来,环境保护部组织建立了全国辐射环境监测组织体系,包括环境保护部辐射环境监测技术中心、环境保护部核与辐射安全中心、环境保护部6个地区核与辐射安全监管站等8个国家级辐射环境监测监管机构,31个省级辐射环境监测机构,106个地市级辐射环境监测机构,初步形成了由国家、省和部分地市组成的三级辐射监测组织体系。截至2011年底,全国辐射监测网络共有1092人,其中技术人员788人,占总人数的72.2%,持证上岗人员736人,占技术人员的93.4%。经过国家、省、市各级环境保护部门的共同努力,全国31个省级辐射环境监测机构和青岛市辐射环境监测机构现共有辐射环境监测设备2472台(套),监测业务用房面积52689m²,全国106个地市级辐射环境监督(监测)机构现共有辐射环境监测设备1384台(套)。

但还应清醒地认识到,我国在辐射环境监测领域还存在着较为突出的问题,包括监测机构职能定位不清,法规、标准体系有待完善,国家级监测能力存在不足,区域监测能力发展不平衡,辐射环境预警体系建设滞后,监测信息发布能力不足,难以满足公众需求,特别是队伍建设滞后、人员培训不足。目前,我国的辐射监测队伍建设不能适应核与辐射环境监管事业快速发展的形势,队伍专业化基础薄弱、技术水平停滞不前、高水平人才匮乏、缺少科学的培训体系、没有建立全国性的常态化职业培训机制。

为进一步加强我国核与辐射安全监管能力,全面提升辐射环境监测技术能力,环境保护部、国家核安全局组织清华大学、北京大学、四川大学、环境保护部核与辐射安全中心、环境保护部辐射环境监测技术中心、江苏省辐射环境监测管理站和四川省辐射环境监测管理站等国内多家辐射环境监测的权威机构共同编写全国辐射环境监测培训系列教材。该教材共分为10册,涵盖了辐射监测基础知识和基本操作等内容。培训对象覆盖了我国辐射监测体系内各类人员,包括辐射监测机构主要负责人、技术负责人、专业监测领域负责人和监测分析人员。

本系列培训教材的出版,在我国辐射环境监测领域尚属首次,希望本系列教材能成为我国

辐射环境监测人员的必备之书。本系列教材的针对性非常强,突出体现了实用性原则,相信在培养我国辐射环境监测人才方面将发挥巨大的作用。



2014年12月

前 言

电磁环境监测工作是加强辐射安全监管,严格执行环保法规的“眼睛”和“尺子”,是安全监管工作的重要基础和支撑力量。电磁环境监测作为辐射环境保护工作的重要组成部分,在监管工作中起着技术支持、技术监督和技术服务作用。电磁环境污染具有特殊性,其污染的程度和范围是人的器官无法感知的,不像常规污染,通过眼看、鼻闻、耳听,能够有一个初步的判断,而辐射剂量的大小、种类必须使用监测仪器进行测量。所以,电磁环境监测工作是辐射安全监管的基础,是手段,是支撑力量。辐射监管的立法、执法、规划、环评、竣工验收管理等都要依靠监测数据来说话,电磁环境监测水平的高低直接关系到电磁环境监管的科学化程度,关系到环保部门依法行政的水平,关系到人民群众的切身利益。辐射安全监管事业的发展需要我们做好电磁环境监测工作。

《电磁环境测量技术》是全国辐射环境监测培训系列教材中的一个重要分册。由四川省辐射环境管理监测中心、广东省环境辐射监测中心、北京市辐射安全技术中心负责组织编写。本分册主要面向的是电磁环境测量一线技术人员,既要满足“零基础”人员培训需求,又要满足已经具有一定实践经验的人员的培训需求。本书内容由浅入深,包括电磁环境基础知识、原理、典型案例及监测原始记录表格,满足不同层次人员培训需求。

本册共分5章,分别从电磁波产生与传播、电磁辐射污染源、仪器原理及使用方法、现场监测操作、监测质量保证五个主要方面,对电磁环境测量作了全面介绍与说明。其中,第1章由帅震清编写;第2章由帅震清、缪尔康、杨敏编写;第3章由帅震清、缪尔康编写;第4章由帅震清、缪尔康、胡林、杨敏、倪雪松、刘宝华、汤泽平、李占优、王琳、尚致楠、高鹏、王纲编写;第5章由缪尔康、胡林、高鹏、王纲、王琳、帅震清、刘宝华编写。全书由帅震清统稿。

环境保护部核与辐射安全监管一司及所有参加培训教材编写的单位领导及专家为本册编写提供了许多帮助,环境保护部核与辐射安全中心负责本教材的组织出版工作,谨此表示衷心的感谢。

由于时间仓促,加之编者水平有限,书中错漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

《电磁环境测量技术》编写组

2014年1月15日

目 录

第1章 电磁环境基础知识	1
1.1 概述	1
1.2 静态电磁场	4
1.3 时变电磁场	6
1.4 电磁波的产生及传播特性	8
1.5 天线基础知识	17
1.6 天线的辐射场	21
第2章 电磁辐射设施分类	28
2.1 广播电视系统发射设备	28
2.2 通信、雷达及导航发射设备	31
2.3 移动通信基站发射设备	33
2.4 工业、科学、医疗射频设备	40
2.5 交通系统电磁辐射设备	41
2.6 电力设备	41
第3章 电磁环境标准及监测方法简介	45
3.1 电磁环境标准	45
3.2 监测方法	50
第4章 电磁环境现场监测仪器	56
4.1 电场强度、磁场测量原理	56
4.2 工频(低频)电场、磁场监测仪器	61
4.3 射频电磁场监测仪器	62
4.4 直流输变电项目监测仪器	64
4.5 辅助监测仪器	65
第5章 电磁环境现场监测操作	67
5.1 电磁环境监测概述	67
5.2 工频电场、磁场监测	69
5.3 射频电磁环境综合场强监测	78
5.4 射频电磁辐射选频场强监测	86
5.5 无线电干扰现场监测	87
5.6 合成场和离子流密度现场监测	93
5.7 区域电磁环境质量监测	97
5.8 电磁环境监测的质量保证	99
参考文献	101

第1章

电磁环境基础知识

本章主要介绍电磁环境监测相关基础知识。

1.1 概 述

1.1.1 电磁环境保护

1.1.1.1 电磁环境成为重要环境要素

现代科技特别是电子科技在近 100 年的历史里发展突飞猛进,广播电视、移动通信、微波通信及雷达、工业科研医疗用电磁设备、电力设施等电磁设备和设施应运而生。随着城市用电负荷的不断攀升,新建变电站进入居民区成为趋势;而广播电视发射塔、移动通信基站等电磁辐射设施在城市区域的建设也成为必然。因为辐射看不见、摸不着,涉及的相关专业知识专业性强、普及不够,广大市民容易产生误解,谈“辐”色变。群众对其了解不多,更加重了对电磁波辐射的恐慌。

经济、社会发展的同时,人民生活水平也逐步提高,城镇居民对工作及生活环境日益关注。以前,人们仅仅关注的是水、气、声、渣等环境要素的污染问题,现在,电磁环境作为环境的一大要素,受到越来越多的关注。

环境电磁场是不以人的意志为转移的客观事物。在我们赖以生存的环境中,电磁辐射无处不在。电磁辐射具有无色、无味,肉眼难以辨别的特性,因此,电磁辐射项目建设过程中的环境监督管理与信息公开、环境监测就显得非常重要,非常迫切。它既是电磁辐射环境管理工作的基础,也是项目能顺利推进的关键。长期以来,人类是在低电磁辐射水平的环境中生活,而且随着信息科学技术的发展,人们受到的环境电磁场照射水平还会增高。环境电磁场水平对人类健康会有什么影响?如何防止有害效应的发生?在什么样的电磁辐射水平上人们的生活可以不受影响?这些都是电磁辐射环境保护需要回答的问题,这些问题已成为当前环境保护中的重要议题。

1.1.1.2 电磁辐射设施建设项目的环评程序

根据《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国环境影响评价法》《建设项目环境保护管理条例》《建设项目环境保护分类管理名录》的规定,电磁辐射项目环境影响评价报告的编制有两种格式,一种是编制环境影响报告书,另一种是只编制环境影响报告表。从事电磁辐射活动的单位或个人,必须在项目立项前,对电磁辐射活动可能造成的环境影响进行评价,编

制环境影响报告书(表),并按规定的程序报相应环境保护行政主管部门审批,环保行政主管部门批复后方可开工建设。项目建成后,要进行电磁辐射项目竣工环境保护验收。在电磁辐射建设项目和设备正式投入生产和使用前,建设单位应当向该项目的原审批部门申请对项目进行竣工环境保护验收,如果出现未建设环境影响中报告规定的环境保护措施,导致污染物排放超标,环境保护行政主管部门将要求建设单位进行整改,整改合格后方可通过竣工环境保护验收,之后才可正式投入运行。

1.1.2 基本术语

环境

人类的环境分为自然环境和社会环境。自然环境分大气环境、水环境、生物环境、地质和土壤环境及其他自然环境;社会环境包括居住环境、生产环境(也有称工作环境)、交通环境、文化环境和其他社会环境。所谓环境,简单地讲,就是我们每个人在日常生活中所面对的一切。生活环境是指与人类生活密切相关的各种自然条件和社会条件的总和。它由自然环境和

电磁环境

电磁环境的定义:存在于给定场所的所有电磁现象的总和。给定场所即空间,所有电磁现象包括全部时间与全部频谱,所以电磁环境的三个要素是空间、时间与频谱。

电磁发射

电磁发射是指“从源向外发出电磁能的现象”。电磁发射分为辐射发射和传导发射。辐射发射是“通过空间传播的、有用的或不希望有的电磁能量”。传导发射是指“沿传达线或信号线传播的电磁发射”。

电磁辐射

电磁发射通常称为电磁辐射,其定义为:能量以电磁波形式由源发射到空间的现象;能量以电磁波形式在空间传播。《电工术语 电磁兼容》(GB/T 4365—2003)标准中特别注释,“电磁辐射”一词的含义有时也可引申,将电磁感应现象也包括在内。《电磁辐射环境保护管理办法》(国家环境保护局令第18号,1997年3月)中所称电磁辐射,是指以电磁波形式通过空间传播的能量流,且限于非电离辐射,包括信息传递中的电磁波发射,工业、科学、医疗应用中的电磁辐射,高压送变电设施中产生的电磁辐射。

电磁骚扰

任何可能引起装置、设备或系统性能降低或对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。

注:电磁骚扰可能是电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化。

电磁干扰

由电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。

电磁噪声

明显不传送信息的时变电磁现象,它可能与有用信号叠加或组合。

环境电磁场分类

环境电磁场包括自然界电磁场、生产及生活环境中的的人为产生的电磁场两类。自然界的

静电放电、地磁、大气层中的闪电放电、电离层的变化、太阳磁暴与太阳黑子、银河系的电磁变动等现象属于自然环境存在的电磁场。生活环境中的电磁场包括办公环境中的信息技术设备,家用电器设备产生的电磁场,属低频电磁场,近似为静态场。环境保护所关注的生产活动产生的电磁场包括以下6个方面:广播电视塔;通信、雷达;移动通信基站;工业、科学、医疗射频设备;交通系统电磁辐射干扰;输变电设施等。

工频

指工业上用的交流电源的频率。中国电力工业的标准频率定为50Hz,有些国家或地区(如美国等)则定为60Hz。

射频

可以辐射到空间的电磁频率称为射频。根据涉及的专业不同,射频的频率范围不尽相同。通信专业常指300kHz~30GHz。

电场

由电场强度与电通密度表征的电磁场的组成部分。

磁场

由磁场强度与磁感应强度表征的电磁场的组成部分。

电磁场

由电场强度、电通密度、磁场强度、磁感应强度等四个相互有关矢量确定的,与电流密度和体电荷密度一起表征介质或真空中的电和磁状态的场。

电场强度

矢量场量 E ,其作用在静止的带电粒子上的力等于 E 与粒子电荷的乘积,其单位为伏特/米(V/m)。

磁场强度

矢量场量 H ,在给定点,等于磁感应强度除以磁导率,并减去磁化强度,其单位为安培/米(A/m)。

磁感应强度

矢量场量 B ,其作用在具有一定速度的带电粒子上的力等于速度与 B 矢量积,再与粒子电荷的乘积,其单位为特斯拉(T)。在空气中,磁感应强度等于磁场强度乘以磁导率 μ_0 ,即 $B = \mu_0 H$ 。

功率密度

标量场量 S ,是指穿过与电磁波的能量传播方向垂直的面元的功率除以该面元的面积的值,单位为瓦特/平方米(W/m²)。

职业曝露

个人在从事的工作过程中所受到的所有电场、磁场和电磁场(EMF)照射。

公众曝露

普通公众日常生活中所受的所有电场、磁场和电磁场照射,不包括所从事工作中和医疗过程中所受到的照射。

吸收

在电磁波传播的过程中,无线电波由于能量消耗而引起的衰减,即无线电波的能量转变为

另一种形式。

比吸收能(SA)

每个生物组织质量单位吸收的能量,用焦耳/千克(J/kg)表示,比吸收能是比吸收能率的时间积分。

比吸收率(SAR)

身体组织吸收能量的速度,用瓦/千克(W/kg)来表示,是一个广泛应用于高于100kHz的频率中的测定指标。

电磁污染

是指天然的和人为的各种电磁波的干扰及有害的电磁辐射。

基本限值

基本限值是指直接根据已确定的健康效应而制定的暴露在时变电场、磁场和电磁场的限值。根据场的频率的不同,用来表示此类限值的物理量有电流密度(J),比吸收率(SAR)和功率密度(S)。只有被暴露者体外空气中的功率密度可以被迅速轻易地测量。

导出限值

导出限值用来评估实际暴露条件下基本限值是否可能被超过。某些导出限值是根据相关的基本限值用测量和计算导出的,而某些导出限值是基于暴露在电磁场下的感觉和不利的间接影响提出来的。导出的物理量是电场强度(E)、磁场强度(H)、磁通量密度(B)、功率密度(S)和流过肢体的电流(I_c)。反映感觉和其他的间接效应物理量是接触电流(I_c)和用于脉冲场的比吸收能(SA)。

1.2 静态电磁场

静态电磁场是不随时间变化,是时变电磁场的简单特例,分为静电场和静磁场。

1.2.1 静电场

1.2.1.1 库仑定律

根据静电场的观点,我们所观察到的两个电荷之间的相互作用力实质上是电场的作用力,我们用电场力来称呼电荷在电场中所受的力。静电场理论以库仑定律及其推论(高斯定律、静电场环路定律)为基础。

库仑定律表述为:真空中电荷 q_1 和 q_2 之间的相互作用力

$$F_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r} \quad (1-1)$$

式中: ϵ_0 ——真空介电常数;

r ——两个电荷之间的距离。

1.2.1.2 静电场

如果电荷是静止的,则空间就只有电荷产生的电场,称为静电场。静电场是由电荷产生或激发的一种物质,静电场对处于其中的其他电荷有作用力。静电场具有物质性。

根据静电场的观点,我们所观察到的两个电荷之间的相互作用力实质上是电场的作用力,

库仑力不再是一个恰当反映实际的概念,因此,我们用电场力来称呼电荷在电场中所受的力。

1.2.1.3 电场强度

如果电荷是静止的,则空间就只有电荷产生的电场,电场作为一种物质充满带电体周围的空间,电量不随时间变化的、相对于观察者静止的电荷在周围空间产生的电场称为静电场。电场的大小、方向用电场强度矢量来表示。电场中 r 点处的单位正电荷受到的电场力定义为该处的电场强度 E 其可表述为:

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} r \quad (1-2)$$

电场强度是单位电荷受到的电场力,电场强度形成矢量场分布,各点相同时,称为均匀电场。

1.2.1.4 高斯定律

在真空中,通过任一闭合曲面的电场强度通量,等于该曲面所包围的所有电荷的代数和 $q_{\text{内}}$ 除以真空中的介电常数(ϵ_0)。

当电场中有介质时,高斯定律表示为:

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (1-3)$$

式中: ϵ_0 、 ϵ_r ——分别为真空中的介电常数、介质中的介电常数;

D ——电场强度通量。

1.2.1.5 安培环路定律

在静电场中,电场强度在任意环路上的环量均等于零,即真空中静磁场的磁感应强度在任意闭曲线 L 上的环量等于与 L 相链的净电流强度与 μ_0 的乘积。安培环路定律适用于时变电场产生(感应)磁场。可以理解为电流产生磁场,磁场绕任意封闭路径的积分正比于此路径所围的电流强度(磁力线的数量正比于电流强度)。

1.2.1.6 电荷守恒定理

电荷既不能被创造也不能被消灭,这一重要结论的数学表达式为:

$$\oint_V \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = - \frac{d}{dt} \int_V \rho_v dV \quad (1-4)$$

对于这一结论更通俗的说法是,任何从一闭合面流出的电流都意味着该闭合面内的电荷的减少。在式(1-4)中运用散度定理可得到其微分形式,如式(1-5)所示。

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = - \frac{\partial \rho_v}{\partial t} \quad (1-5)$$

展开此式,可得:

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = - \frac{\partial \rho_v}{\partial t} \quad (1-6)$$

1.2.2 恒定电流场

1.2.2.1 电流强度

运动的电荷形成电流,电流的大小可用电流强度来表述。定义为单位时间内通过某横截

面的电量为该横截面的电流强度 I , 单位为安培。当电荷速度不随时间变化时, 电流也不随时间变化, 此时称为恒定(稳恒)电流(直流电)。

1.2.2.2 电流密度

在导体中任意一点, 电流密度 J 的方向为该点电流的流向, J 的大小等于通过该点垂直于电流方向的单位面积的电流强度。空间各点电荷的流动除快慢不同外, 方向可能不同, 通常用电流密度 J 来描述电流的分布情况。

根据定义, 导体中每一点都有一个确定的电流密度矢量 J , 因此, 整个导体存在一个 J 场, 称为电流场。

1.2.3 静磁场

1.2.3.1 磁现象和磁场

电流或运动电荷在空间产生磁场, 不随时间变化的磁场称为恒定磁场。它是恒定电流周围空间中存在的一种特殊形态的物质。磁场的基本特征是对置于其中的电流有力的作用。无论是电流与电流之间还是电流与磁铁之间的相互作用都可归结为运动电荷之间的相互作用, 即运动电荷产生磁现象。

1.2.3.2 磁场强度和磁感应强度

磁感应强度表示磁场源在特定环境下的效果。其定义是: 与磁力线方向垂直的单位面积上所通过的磁力线数目, 也称为磁通量密度, 用 B 表示, 单位为特斯拉(T)。实验表明, 一个试验电荷 q 以速度 v 垂直于磁感应强度 B 通过考察点 P 时, 所受的磁力 F_m 最大, 记为 F_{\max} , 此时, q 、 B 、 F_{\max} 三个矢量相互垂直。磁场用磁场强度和磁感应强度来表示, 在真空中两者的关系为:

$$B = \frac{F_{\max}}{qv} = B\mu_0 H \quad (1-7)$$

1.2.3.3 长直导线的磁场

长直导线产生的磁场(沿导线圆周方向):

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (1-8)$$

式中: μ_0 ——真空磁导率;

r ——参考点与导线之间的距离。

静磁场的性质: 静磁场由恒定电流产生; 磁力线无头无尾且不相交, 并且围绕电流形成闭合回路。

1.3 时变电磁场

1.3.1 法拉第电磁感应定律

当穿过导体回路所界定的面积中的磁通发生变化时, 在回路中就产生感应电势和感应电流。导体中产生的感应电流与导体的导电能力成正比。根据欧姆定律, 法拉第认为, 导体中产

生感应电流的直接原因是闭合回路中存在感应电动势,而感应电动势与导体的性质无关,只要磁场发生变化,即使回路没有闭合和感应电流,感应电动势依然存在。

电磁感应定律推广到非导体回路甚至是任意回路,包括介质或真空中:只要穿过它所界定面积中的磁通发生变化,沿着该回线将产生感应电势,尽管这时不一定会有感应电流,但这意味着电场的存在。电磁感应定律应用的推广:变动的磁场产生电场。

1.3.2 位移电流与全电流定律

(1)位移电流:随时间变化的电场构成位移电流,此电流与传导电流一样会激发磁场。

(2)全电流定律:根据位移电流的假设,麦克斯韦将安培环路定律推广到时变场,引入位移电流之后的修正的安培环路电流称为全电流定律。从理论上论证了变化的电场也能产生磁场,并预见了电磁波的存在。

1.3.3 磁通连续性定律

媒质情况下的静磁场 B 是自由电流和束缚电流产生的叠加静磁场,满足磁通连续性原理。

应该指出的是,法拉第电磁感应定律、磁通连续性定律、高斯定律和全电流定律,共同构成了麦克斯韦方程组。

1.3.4 麦克斯韦方程组

麦克斯韦假设在电容器两极板间由于电场随时间的变化而存在位移电流,位移电流具有与传导电流同样的磁效应。这就是对电流概念的扩充,电场的变化产生磁场。

根据电荷守恒原理,麦克斯韦将电流概念加以扩充并应用到电磁感应定律和安培环路定律中,将静电场和恒定磁场的基本方程加以扩展,得出的全电流定律,解释了变动的电场产生磁场,变动的磁场产生电场,这就是麦克斯韦方程组。

$$\left. \begin{aligned} \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} &= \int_V \rho dV \\ \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} &= - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S} \\ \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} &= 0 \\ \oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} &= \int_S \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\mathbf{S} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

麦克斯韦方程组表现为静电场和稳恒磁场遵循的规律,即时变电磁场的基本方程。

麦克斯韦方程组的三个辅助方程:

$$\left. \begin{aligned} \text{电位移矢量} & \quad (D): \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \\ \text{磁感应强度} & \quad (B): \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \text{电流密度} & \quad (J): \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式中： ε 、 μ 、 σ ——分别为媒质的介电常数、磁导率和电导率。

1.3.5 时变电磁场

由感生电场假设和定移电流假设可以知道,变化的磁场要产生感生电场,变化的电场也要产生磁场。即在一般情况下,电场和磁场都是变化的,它们将相互激发,因而它们是不可分割的、统一的整体,被称为电磁场。变化的电磁场在空间的传播形成了电磁波。单独的静电场所和单独的稳恒磁场都只是电磁场的特殊情况,在一般情况下,电场和磁场只是电磁场的分量。麦克斯韦电磁场统一的思想 and 理论后来被赫兹发现的电磁波完全证实。

1.4 电磁波的产生及传播特性

1.4.1 电磁波的产生

麦克斯韦建立了关于电磁场的方程组,首次从理论上预言了电磁波的存在。变化的电磁场在空间以一定的速度传播形成电磁波。电磁波的运动规律可用麦克斯韦方程组描述。

交替变化与交替产生的电场和磁场,由近而远的传播,即形成电磁波。它是物质存在的一种特殊形式,在空间定向移动。交变的电场产生交变的磁场,交变的磁场产生交变的电场,两者互为前提,互为结果,相互依存。在空间上两者相互垂直,同相位变化。

用一个极为相似的例子来说,将池中一小体积的水人为地扰动(垂直振动),这一小体积的水被扰动后,一上一下地振动起来,但是这一小体积的水不可能单独振动而与其四周的水无关。它做周期性增大和减小的压力被传递给周围的水,周围的水获得能量之后也开始振动,如此产生的波动又不断地将能量传送给外围的水。一个波便在池中产生,并向外传播。

水波存在的基本理由是:一定体积的水被扰动后,并非与周围的水无关,而是将能量传送到外围的水里。这与电磁波存在的基本原理是很相像的。一个变化的电场产生一个变化的磁场,此磁场不但存在于变化电场的原范围里,还存在于邻近的范围之内。在原范围里变化的场也在它附近的范围里产生新的场。新的场在更大范围的空间产生场,于是能量便被传播到远处,即有一含电磁能量的波向外传播。这种波源释放能量,而能量被电磁波传送的过程就称为电磁波的传播过程(图 1-1)。

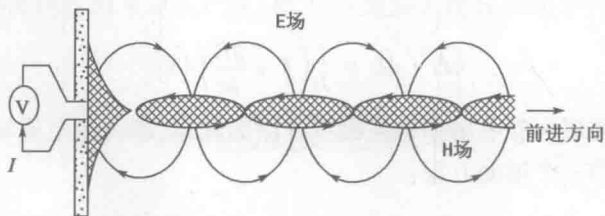


图 1-1 电磁波传播

1.4.2 电磁波的传播

电磁波在理想、均匀、各向同性的媒质内传播时(自由空间),不出现反射、折射、绕射、散射和吸收等现象为直线传播,仅需考虑由于电磁波的扩散引起的传播损耗。但电磁波在实际的非理想的媒质内传播时,会出现反射、折射、绕射、散射和吸收等现象。

遇障碍时发生反射:入射角等于反射角,表示反射大小的反射系数一般小于1,与障碍性质有关(金属反射最大,反射系数为1,通常可用来进行电磁波屏蔽)。

遇障碍时发生透射(折射):透射角、透射系数(一般小于1)与障碍物性质有关(金属透射最小,透射系数为0)。

遇障碍时发生绕射:影响绕射大小的绕射系数小于1,与障碍物性质有关,绕射似乎形成“非直线传播”。

反射、透射和绕射都会使电磁波的强度减弱,反射、透射和绕射可以引起极化状态变化。

根据电磁波的频率特性,还可以分为地波传播、天波传播、空间波(直射波)传播以及散射传播等几种情况。

1.4.2.1 地波传播

地波传播(中波)是指电磁波沿地球表面的绕射传播。其具有以下特点:地的导电性能越好,吸收越小,电磁波的传播损耗越小;电波的频率越低,吸收越小,电波损耗越小;垂直极化波衰减大,水平极化波衰减小;有绕射能力;地波传播较稳定。

1.4.2.2 天波传播

天波传播(短波)是指向天空的电磁波,被电离层反射后达到接收点的传播方式。其具有以下特点:随时间和空间变化而变化;传播距离远;有电离层的吸收。

电离层是指地面高度60~1000km的大气电离区域。电离层中的大气处于部分电离状态,有大量的自由电子,能引起电波的折射、反射、衰减等效应,造成电波的振幅、相位、极化状态及传播模式的变化。

1.4.2.3 空间波(直射波)传播

空间波(直射波)是指电磁波通过空间直射波和地面反射波的途径到达接收点,也称视距传播。它是超短波和微波传播的主要方式(频率范围30MHz~300GHz)。其具有以下特点:要求天线高度大于工作波长;通信距离通常在视线距离以内;接收点场强起伏变化,并随距离呈波动变化;传播方式与天波传播相比较稳定;穿透电离层(微波工作频段能穿透电离层,形成空中卫星与地面地球站的电磁波联系)。

1.4.2.4 散射传播

散射传播是利用对流层大气的不均匀气团、电离层的不均匀性以及流星坠落大气层所形成的电离余迹对电磁波产生散射作用。它主要用于建立散射通信电路,实现超短波的远距离通信。它具有以下特点:散射传播的传播损耗很大,一般在180dB以上,需要用强定向天线;散射传播还和收发场地的地形、地面物体有关;散射传播有严重的衰落,它受大气条件的影响,有日、时、季节的变化。

1.4.3 电磁波的分类

电磁波分为平面波、球面波和柱面波。