

电子信息科技专著出版专项资金资助出版

电磁波传播与空间环境

熊 皓 编著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

任何无线电系统和自然电磁现象都包含电磁波在空间的传播,其基本问题是各频段的电磁波通过自然和某些人为环境媒质的传播效应及其在时、空、频域的变化规律。本书主要介绍了电磁波在地球环境各种媒质中的传播特性,重点阐述现代电子信息工程应用中的无线电波传播问题。

本书的主要读者对象是从事电波传播专业应用研究的工程技术人员,包括各种电子系统工程总体论证、设计与使用以及空间环境研究的非电波传播专业的科技人员和管理人员,也可作为大专院校相关专业教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁波传播与空间环境/熊皓著.—北京:电子工业出版社,2004.1

ISBN 7-5053-9399-5

I.电... II.熊... III.电磁传播 IV.0451

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第108402号

责任编辑:钟金

印 刷:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:20 字数:500千字

印 次:2004年 月第 次印刷

印 数: 册 定价: 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 bqj@phei.com.cn。

前 言

任何无线电系统和自然电磁现象都包含电磁波在空间的传播，其基本问题是各频段的电磁波通过自然和某些人为环境媒质的传播效应及其在时、空、频域的变化规律。电磁波在媒质空间的传播是波和媒质相互作用的过程。对于给定参数（频率、极化和功率）的电磁波，其传播特性主要取决于媒质的时-空变化特性；而电磁波在一定条件下又可能改变传播媒质的特性。电磁波传播信息要受到各种实际环境条件的影响，包括支撑（或凭借）和限制两种作用；同时，通过检测媒质对波的传播效应，在许多情况下电磁波又是用于空间环境探测的有效手段。因此，本书特别注重于对空间环境特性及其对电波传播影响的阐述。电磁波传播和通信、广播、数据传输、导航定位、雷达与遥感探测、空间环境监测以及空间信息对抗等研究应用领域密切相关，是各种无线电电子系统研制和运行的基础；同时，电磁波传播又是一门交叉学科，它与地球物理、大气物理、空间物理、电磁理论和应用数学以及天文和气象等领域，有着密切的联系。

本书主要介绍了电磁波在地球环境各种媒质中的传播特性，重点阐述在现代电子信息工程应用中的无线电波传播问题。我国的电磁波传播研究作为一门应用基础学科，已广泛应用于各种军、民用电子系统工程建设中，并已积累了丰富的资料、数据及研究测试经验。本书的写作目的在于促进本领域研究与应用的进一步联系，以及对过去工作更好的继承和发展。主要的读者对象是本专业从事应用研究的工程技术人员，包括各种电子系统工程总体论证、设计与使用以及空间环境研究的非电磁波传播专业的科技人员和管理人员，也可作为大专院校相关专业的教学参考用书。电磁波传播涉及电磁场理论和各种复杂媒质中的电动力学，其中起着关键作用的传播媒质（如地球大气与地形地物），往往具有随机不均匀的时空变化和复杂的边界条件，甚至具有各向异性和非线性特性（如电离层），因此，也常常涉及复杂的应用数学。为了满足广大非本专业读者对共性基础知识的需要和解决因学科交叉所带来的学习困难，本书以通俗易懂的语言着重阐述了电磁波传播的物理机制、概念和原理，为广大读者提供了一本全面理解电磁波传播特性及其变化规律的普及型书籍。

全书共为 12 章。第 1 章简明介绍电磁场的理论基础和有关电磁波的基本概念；第 2, 3 章分别阐述日-地空间环境的背景状况和扰动特性；第 4 章对电磁波传播的机制和基本模式及各种传播信道进行了概括性的论述；第 5~9 章结合工程应用分别阐述了地球空间环境主要信道的传播特性；第 10~12 章分别讨论了大气层人为变态、电磁遥感及地下电磁波传播等领域中的有关问题。电磁场量的时间因子，统一采用 $\exp(j\omega t)$ 表示。为了给读者展现出现代电磁波应用及其传播问题的全貌，书中涉及较多发展中的新领域，不少问题还处在探索研究阶段，因此，书中错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。本书参考并引用了最近出版的由作者主编的《无线电波传播》一书中的许多内容，特此对该书全体编著者表示衷心感谢。

在本书写作过程中，工程院院士、电子科学研究院童志鹏研究员，中国电波传播研究所所长董庆生研究员及副所长、“电波环境特性及模化技术国防科技重点实验室”主任吴健研究员等给予了热情的关心和支持，北京大学萧佐教授、中国科学院空间科学与应用研究中心郭兼善研究员和电子科学研究所李芳研究员认真审阅本书手稿，提出了具体文字修改意见，

特表示衷心的感谢！作者还要特别感谢 863 - 703 专家组和国家自然科学基金“九五”重大项目——日地空间灾害性扰动事件及其对人类活动的影响——项目组对本书写作的关心和资助。

中国电波传播研究所是我国从事本专业工作的主要研究机构，今年是她诞生四十周年大庆。作者在 1963 年曾直接参加过她的一部分筹建工作，并在她的领导和关怀下工作了四十年。现谨以此书庆贺中国电波传播研究所光荣的四十年历史，祝愿她更加繁荣昌盛，人才辈出，为我国电波传播事业和高新技术的发展，作出更大的贡献！

目 录

第 1 章 电磁波概述	(1)
1.1 电磁波的应用及其发展	(1)
1.2 电磁场的基本定律——麦克斯韦 (Maxwell) 方程	(3)
1.2.1 自由空间中的电磁场	(3)
1.2.2 物质中的宏观电磁场	(6)
1.2.3 麦克斯韦方程组与电磁波	(7)
1.2.4 边界条件	(8)
1.2.5 电磁场的位函数	(9)
1.2.6 电磁场的能量和动量	(9)
1.3 电磁波的时-空形态及其特征参量	(10)
1.3.1 电磁波的时-空形态	(10)
1.3.2 简谐平面波函数	(11)
1.3.3 脉冲波与波包函数	(12)
1.4 电磁波的辐射	(13)
1.4.1 辐射原理与电磁力线运动图像	(13)
1.4.2 辐射机制的主要类型	(14)
1.4.3 电磁波谱	(15)
1.4.4 无线电频段的发射天线	(16)
1.5 电磁波的传播	(18)
1.5.1 惠更斯 (Huggens) -菲涅尔 (Fresnel) 原理	(18)
1.5.2 波与媒质的相互作用	(20)
1.5.3 信息搭载	(21)
1.5.4 无线电频段的接收天线	(22)
第 2 章 日-地空间背景特性	(23)
2.1 引言	(23)
2.2 太阳能量辐射	(24)
2.2.1 组成结构	(24)
2.2.2 能量辐射	(24)
2.2.3 太阳活动性与活动区	(25)
2.2.4 日-地空间的太阳风与磁场	(27)
2.3 地球磁场与磁层	(27)
2.3.1 地球磁场	(27)
2.3.2 磁层的形成	(28)
2.3.3 太阳风能量、动量与质量向磁层的输入及磁层动力学过程	(28)
2.3.4 地磁微脉动与甚低频发射	(30)
2.4 地球中性大气	(30)
2.4.1 流体静力学平衡与扩散分离及大气的分层结构	(31)
2.4.2 大气层的加热过程与热层中的热平衡	(34)

2.4.3	大气动力学过程	(34)
2.5	电离层物理简述.....	(36)
2.5.1	引言	(36)
2.5.2	电离层中的基本物理过程.....	(37)
2.5.3	电离层中的电动力效应	(41)
2.5.4	电子浓度的连续性(或平衡)方程	(43)
2.6	电离层结构的平均形态.....	(44)
2.6.1	时-空变化	(44)
2.6.2	主要电离层区的基本特征.....	(46)
2.6.3	电离层平均特性的预测	(48)
2.7	等离子体层与辐射带.....	(49)
2.7.1	等离子体层	(49)
2.7.2	辐射带	(49)
2.8	中、低层大气.....	(50)
2.8.1	中、低层大气的能量转换	(50)
2.8.2	对流层的气象因素和折射指数	(51)
2.9	地表与地壳的电特性.....	(53)
2.9.1	地球表层及其等效电特性.....	(53)
2.9.2	地球的分层特性	(53)
2.9.3	地壳层的电特性与地壳波导	(53)
第3章	日-地空间扰动环境	(55)
3.1	引言.....	(55)
3.2	太阳活动及其爆发机制.....	(55)
3.2.1	太阳活动形态与爆发机制.....	(55)
3.2.2	太阳扰动特征参量	(56)
3.3	太阳爆发的地球物理扰动效应.....	(59)
3.3.1	太阳爆发的三大攻势	(59)
3.3.2	地球环境的两道屏障	(59)
3.3.3	四大地球物理效应	(60)
3.4	电离层的不规则扰动结构.....	(66)
3.4.1	Es (Sporadic-E)	(66)
3.4.2	扩展 F (Spread-F)	(66)
3.4.3	电离层行扰 (TIDs)	(67)
3.5	中、低层大气的扰动效应.....	(67)
3.5.1	中、低层大气的动力学扰动	(67)
3.5.2	雷暴活动.....	(68)
3.6	空间环境扰动对人类活动的影响和空间天气预测.....	(69)
3.6.1	日-地关系与空间天气	(69)
3.6.2	空间环境扰动对人类活动的影响	(70)
3.6.3	空间天气预测	(71)
3.7	背景无线电噪声.....	(74)
3.7.1	概述	(74)
3.7.2	背景噪声的统计参量	(75)

3.7.3	大气无线电噪声的测量及其统计预测	(76)
3.7.4	人为噪声的测量与预测	(77)
3.7.5	电离层及其以上空间的背景噪声	(77)
第4章 电波传播信道及其作用机制		(78)
4.1	引言	(78)
4.2	媒质信道与传播函数	(78)
4.2.1	传播函数	(78)
4.2.2	媒质信道类型	(79)
4.3	电磁波在均匀各向同性有耗媒质空间的传播	(80)
4.3.1	半导电媒质的传播特性	(80)
4.3.2	几种常见半导电媒质的导电特性和复介电常数	(82)
4.3.3	半导电媒质的频率色散	(83)
4.3.4	半导电媒质在模拟实验中的应用——电磁相似原理	(83)
4.4	非均匀媒质中电磁波传播的基本机制	(84)
4.4.1	二次源等效原理	(84)
4.4.2	折射传播	(85)
4.4.3	反射传播	(86)
4.4.4	波导传播	(91)
4.4.5	绕(衍)射传播	(91)
4.4.6	散射传播	(92)
4.4.7	波场的随机扰动	(97)
4.5	信道与目标的脉冲响应	(99)
4.5.1	引言	(99)
4.5.2	瞬态电磁场的特点与分析方法	(99)
4.5.3	导电媒质的脉冲响应	(100)
4.5.4	目标的脉冲响应	(101)
4.6	各种无线电系统的空间信道及其传播效应	(102)
4.6.1	与系统体制、性能有关的电波传播问题	(102)
4.6.2	各频段传播信道的主要模式与主要的传播效应	(104)
4.6.3	各种无线电系统传播信道参数的预测与传播误差修正	(105)
4.6.4	电磁兼容	(106)
第5章 地面电波传播		(107)
5.1	引言	(107)
5.2	地面和表层对电波辐射、接收及传播的影响	(107)
5.2.1	地波路径上各部分地表层介质的作用	(107)
5.2.2	地层对天线特性的影响	(108)
5.2.3	地面对雷达最大作用距离的影响	(108)
5.2.4	接收点地面的波场结构	(110)
5.3	均匀光滑地(海)面的地波传播	(111)
5.3.1	平地面地波的激发与传播	(111)
5.3.2	球地面的地波绕射传播	(112)
5.3.3	地下分层特性对与大气折射指数随高度变化对地波传播的影响	(113)
5.4	分段均匀路径的地波传播	(114)

5.4.1	Millington 经验公式	(114)
5.4.2	海岸折射效应	(115)
5.5	任意不均匀不规则地面的地波传播	(116)
5.5.1	积分方程法	(116)
5.5.2	山峰影响与障碍增益	(116)
5.6	地波传播在导航与雷达系统的应用	(117)
5.6.1	低频 (LF) 地波导航与授时	(117)
5.6.2	海态高频 (HF) 地波超视距雷达	(119)
5.7	地面移动通信的电波传播	(120)
5.7.1	引言	(120)
5.7.2	移动信道的传播效应	(120)
5.7.3	接收信号的统计特性	(121)
5.7.4	与电波传播有关的通信系统性能指标	(123)
5.7.5	大区移动通信网接收场强的统计预测	(124)
5.7.6	其他几种移动信道的传播特性	(125)
第 6 章	对流层电磁波传播	(130)
6.1	引言	(130)
6.2	对流层折射	(130)
6.2.1	概述	(130)
6.2.2	球面分层大气的折射效应与雷达误差公式	(131)
6.2.3	球面分层大气折射效应的预测修正	(136)
6.2.4	对流层折射指数异常结构与大气波导传播	(140)
6.2.5	折射误差修正的残差	(144)
6.3	超短波、微波视距传播	(144)
6.3.1	引言	(144)
6.3.2	无线电视距与障碍余隙	(144)
6.3.3	直射波与地面反射波的干涉	(145)
6.3.4	信号的衰落特性	(146)
6.3.5	去极化效应	(146)
6.4	超短波、微波超视距传播	(148)
6.4.1	平均接收功率与散射截面	(148)
6.4.2	对流层折射指数的不均匀特性	(150)
6.4.3	超视距传播信号的主要特性	(151)
6.5	毫米波大气传播	(152)
6.5.1	大气分子的吸收衰减	(152)
6.5.2	大气沉降物的衰减	(154)
6.5.3	去极化效应	(157)
6.6	光波大气传播	(157)
6.6.1	地球物理光学理论	(158)
6.6.2	大气分子吸收	(159)
6.6.3	大气粒子散射	(160)
6.6.4	大气折射	(161)
6.6.5	大气湍流所致的特性起伏	(162)

第 7 章 电离层电磁波传播.....	(164)
7.1 引言	(164)
7.2 磁活性等离子体中的电磁波	(164)
7.2.1 场与媒质相互作用的结构关系式	(164)
7.2.2 平面电磁波的极化与复折射指数	(165)
7.2.3 寻常波 (O 波) 与非寻常波 (X 波) 的主要特性.....	(167)
7.2.4 等离子体的谐振	(168)
7.3 电离层折射与传播模式	(168)
7.3.1 缓变分层媒质中平面波传播的 WKB 解	(168)
7.3.2 电离层折射传播模式	(169)
7.3.3 传播模式随电波初始仰角的 θ_0 变化	(171)
7.4 短波甚远距离 (VLD) 与环球 (RTW) 传播.....	(172)
7.4.1 概述	(172)
7.4.2 VLD 与 RTW 传播 HF 信号的实测特性	(173)
7.4.3 HF 甚远距离传播机制与模式的定性分析	(175)
7.5 短波多跳反射传播	(176)
7.5.1 最高与最低可用频率及其预测	(176)
7.5.2 吸收系数	(178)
7.5.3 短波场强计算	(179)
7.5.4 短波信号变化与衰落特性	(179)
7.6 短波天波超视距返回散射传播	(180)
7.6.1 概述	(180)
7.6.2 射线路径与距离-频率特性	(181)
7.6.3 寻常波与非寻常波	(182)
7.6.4 地面返回散射	(183)
7.6.5 返回散射回波形态与传播模式识别.....	(183)
7.7 中波天波传播	(184)
7.7.1 中波天波的传播特点	(184)
7.7.2 中波天波传播的变化特性	(186)
7.7.3 中波天波场强的计算和预测	(186)
7.7.4 天、地波干涉	(187)
7.8 超短波电离层散射传播	(188)
7.8.1 主要的电离层不均匀结构	(188)
7.8.2 D 区电子密度不均匀体散射及其通信应用	(189)
7.8.3 流星尾迹散射及其通信应用	(190)
7.9 磁层传播	(191)
7.9.1 电磁波沿地磁场线的引导传播	(191)
7.9.2 甚低频哨声模传播	(192)
7.9.3 HF 磁层波导传播	(194)
第 8 章 地-低电离层波导传播	(195)
8.1 概述	(195)
8.2 波跳传播与低频天波特性	(196)
8.2.1 波跳理论的几何光学级数表达式	(196)

8.2.2	场强、相位变化特性与天波应用	(197)
8.3	波导模传播与甚低频 (VLF) 波场特性	(198)
8.3.1	波导模场表达式	(198)
8.3.2	多模干涉	(200)
8.3.3	场强、相位的时-空变化与传播预测修正	(204)
8.4	超低频/极低频传播及空腔谐振	(205)
8.4.1	波场表达式	(205)
8.4.2	电离层结构特性的影响	(206)
8.4.3	空腔谐振	(207)
8.4.4	ELF 通信应用中与电波有关的关键问题	(209)
8.5	雷电脉冲与雷暴定位	(210)
8.5.1	雷电辐射	(211)
8.5.2	闪电定位	(213)
8.6	核爆电磁脉冲	(214)
8.6.1	核爆电磁脉冲的基本特性及其与雷电脉冲的比较	(215)
8.6.2	远区核爆侦察与核弹攻击效果检测	(215)
8.6.3	国土防御的核爆检测定位	(216)
第 9 章	宇宙空间电波传播	(217)
9.1	引言	(217)
9.2	地-空传播的大气效应	(217)
9.2.1	大气折射效应	(218)
9.2.2	电离层中的极化旋转与色散效应	(221)
9.2.3	衰减	(222)
9.2.4	闪烁	(223)
9.3	卫星通信、导航的电波传播	(225)
9.3.1	卫星轨道及其在地球上的可视区	(225)
9.3.2	地-空之间的通信	(226)
9.3.3	导航星全球定位系统	(227)
9.4	甚长基线干涉仪 (VLBI) 测量及其大气效应修正	(228)
9.4.1	VLBI 的测量原理	(228)
9.4.2	VLBI 的应用	(229)
9.4.3	VLBI 测量的大气效应修正	(230)
9.5	飞行体跟踪定位	(231)
9.5.1	Doppler 测速定位	(231)
9.5.2	深空飞船导航	(232)
9.6	行星大气的双站雷达掩星法探测	(233)
9.6.1	探测原理	(234)
9.6.2	进行中性大气探测时电离层效应的消除	(235)
9.6.3	误差因素与探测精度	(236)
第 10 章	人为大气变态效应及其应用	(237)
10.1	概述	(237)
10.2	射频加热电离层变态	(238)

10.2.1	电离层的非线性特性	(238)
10.2.2	交变电场中的电子碰撞加热	(239)
10.2.3	电离层等离子体不稳定性的激发	(243)
10.2.4	主要的电离层变态效应	(244)
10.3	化学物质施放电离层变态.....	(248)
10.3.1	两种主要机制	(248)
10.3.2	变态效应实例	(249)
10.4	核爆炸的电离层变态效应.....	(250)
10.4.1	核爆炸的电离辐射及其电离层变态效应	(250)
10.4.2	核爆电离效应对无线电系统的影响	(252)
10.5	强微波脉冲的大气电离与击穿效应.....	(252)
10.5.1	强电波大气电离与击穿——中性大气的人为电离区	(252)
10.5.2	太阳能卫星大功率微波传输的大气效应	(253)
10.6	人为大气变态效应的应用前景.....	(253)
10.6.1	人为电离层变态 HF/VHF/UHF 散射通信	(253)
10.6.2	借助于人为电离层变态散射的 HF 电离层波导超远程通信	(254)
10.6.3	利用 HF 电波电离层变态非线性检波效应的 ULF/SLF 对潜通信	(255)
10.6.4	强微波人造电离区对通信的应用	(256)
10.6.5	大气变态在空间对抗方面的应用	(257)
第 11 章	近地空间环境遥感探测	(259)
11.1	遥感与反演.....	(259)
11.1.1	正问题与逆问题	(259)
11.1.2	反演方法	(260)
11.1.3	遥感技术	(261)
11.2	地面与植被遥感.....	(262)
11.2.1	地面散射特性测量	(262)
11.2.2	地面辐射特性测量	(264)
11.2.3	卫星微波遥感	(264)
11.3	对流层遥感.....	(265)
11.3.1	大气辐射与被动式遥感	(265)
11.3.2	湍流与风场的 MST 雷达探测	(267)
11.3.3	声波和无线电声波 (RASS) 大气遥感	(268)
11.4	电离层无线电探测.....	(270)
11.4.1	电离层电子浓度随高度分布剖面探测	(270)
11.4.2	卫星信标 TEC 和闪烁测量	(274)
11.4.3	非相干散射雷达 (ISR) 探测	(274)
11.4.4	HF 相干散射雷达探测	(277)
11.4.5	HF 多普勒测量	(277)
11.4.6	低电离层探测与吸收测量.....	(278)
11.4.7	磁层观测	(279)
第 12 章	地(海)下电磁波传播	(281)
12.1	引言.....	(281)
12.2	地面波向下渗透传播及其通信与探测应用.....	(281)

12.2.1	地面电波激发的地下场	(281)
12.2.2	对潜通信与导航的海下电波传播	(282)
12.2.3	VLF /ELF 电磁波探测	(282)
12.2.4	地面上本地源激发场的地下探测	(286)
12.3	地下源激励的侧面波与波导传播	(288)
12.3.1	地下源激励的侧面波 (Lateral waves)	(288)
12.3.2	地下分层结构中的波导传播	(292)
12.4	矿 (油) 井随钻测量信息的电磁传输	(293)
12.4.1	概述	(293)
12.4.2	钻柱激励及其等效传输线模型	(294)
12.4.3	信道计算公式及理论与实测的比较	(296)
12.5	地震前的电磁效应	(297)
12.5.1	孕震区机电转换过程激发的地下电流场	(298)
12.5.2	孕震活动中地面与电离层的电磁效应及其检测	(299)
12.6	激光海水传播	(300)
	参考文献	(303)

第 1 章 电磁波概述

1.1 电磁波的应用及其发展

电磁波是一种物质存在的形态,与常见的物质弹性波(如水波、声波)一样,具有力学性质和能量关系。但它与一般物质波动形态的本质区别在于它不是物质质点的波动,而是由电场与磁场两个相互联系的波动矢量构成的力场运动,能在真空中以光速传播。电磁波最基本的激发机制是电荷的加速运动,不同的加速方式对应着不同特性的电磁场辐射。

在自然界中,所有温度高于热力学零度(即 -273°C)的物体,都是红外频段以上的辐射源。自 100 亿年前宇宙开始形成以来,各种射电星体和星系在其形成和发展过程中的电磁辐射,不断地充满着遥远无际的宇宙。地球形成人类的起源都是与电磁波紧密关联的。在自然界中,整个电磁波谱连续地覆盖了无线电、红外、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线及宇宙射线等各频段。我们最熟悉的太阳,以其强大的电磁辐射能流(太阳表面辐射功率密度约为 $76\ 000\ \text{kW}/\text{m}^2$),为地球上各种生物的生存与进化,连续地提供必不可少的光和热(向阳半球晴天地球表面平均功率密度约为 $340\ \text{W}/\text{m}^2$)。同时,在太阳物理过程扰动(如太阳耀斑爆发)期间,对地球大气影响最大而仅占稳定的可见光能流百万分之一的极紫外辐射和带电粒子发射,可能发生较大的变化,特别是 X 射线辐射强度可能变化几十倍。大耀斑区可在两小时内释放扰动(包括极紫外电磁辐射和高能带电粒子)能量约 $4 \times 10^{25}\ \text{J}$,相当于几十亿颗巨型氢弹或近百万次强大火山爆发的能量。因此太阳爆发有可能引起地磁暴和电离层暴等显著的地球物理异常效应,从而对大气环境和天气以及电子和高技术系统等产生恶劣影响。地球大气对电磁辐射的吸收(尤其是在平流层上,只有约 2 mm 厚的臭氧层,几乎全部吸收进入大气层的太阳紫外部分辐射),连同地球磁场对太阳风和高能粒子的盾牌作用,对人类生存与地球生命起到了极大的保护作用。地球低层大气中的一个中等雷暴,其闪电辐射功率约为 $2 \times 10^7\ \text{kW}$,全球任一时刻平均约有 1 500 个雷暴,总的闪电功率可达 3 GW;其频谱很宽,但主要在几十万赫以下。近区闪电的强大脉冲往往对人身安全、工业设施、森林资源以及高科技电子系统构成严重的威胁和干扰。通过对各种自然电磁波的观测,对发现遥远射电星与星系和监测太阳活动及跟踪定位低层大气雷暴等方面具有重要的作用。

人类开始真正认识和自觉地应用电磁波只有 100 年左右的历史。1864 年麦克斯韦(J.C. Maxwell)总结已有的电磁学实验定律,从数学上预言了电磁波的存在和光的电磁波本质;1888 年赫(H. Hertz)则用实验证实了电磁波的存在。紧接着在 19 世纪末,相继提出了电磁波应用两大方向的设想并开展了相应的实验。一个应用方向是无线电信息传输。1895 年马可尼(M. G. Marconi)和波波夫(A. C. Попов)分别进行了短距离的无线电报收发实验,1901 年马可尼实现了跨越大西洋的无线电信号传送。电磁波作为传输信息载体的应用又可分为两大方面:一为在广大空域传送通信、导航等各种模拟和数字的信息;二为获取电磁波经各种目标或媒质反射(或散射、折射等)及在传播过程中的相互作用而携带的有关目标与媒质特性的信息,或自然电磁波携带的有关辐射源特性的信息,用以探测研究无法直接采样测量对象的特性,即所谓遥感。随着空间科学、航天技术及无线电和激光技术的发展,人为的电磁波

频段不断地向高低两端扩展，并卓有成效地应用于大容量高速率通信(如卫星通信)、精密导航定位(如全球卫星定位系统 GPS、GLONASS 卫星)、移动通信、雷达遥感及地下探测等先进的电子系统。另一个应用方向是 1899 年特斯拉(N. Tesla)开始进行的高功率无线电电力传输的研究。为了易于形成窄波束的能源，并减小大气(对流层和电离层)的吸收，一般应使用微波功率传输(MPT)。二战期间日本曾秘密研究使用高功率微波束从地面射击轰炸机。20 世纪 70 年代末期美国制订的太阳能卫星(SPS)计划，频率为 2 450 MHz，一个太阳能卫星拟给地面传送的电功率为 50~100 GW，其中，微波传输功率是需要研究的最为关键的问题之一。此后，几个主要工业国家先后提出过多种设想和计划，包括从地面用微波功率给位于高空(平流层)用于通信转发的飞机提供电力，对分散的村落和岛屿采用微波功率供电，以及由太阳能卫星对地面和其他在轨道上运行的飞船和空间站供给电力。早期由于人们对能量传输的兴趣还不大，同时也由于技术难点较多(要等待可实现窄波束聚焦发射的高功率微波器件的发展，要研究大功率发射和接收的能量转换，以及传输中的能量耗损和环境变态与污染)，因此在过去 100 年中，这方面的研究与应用进展不大。

在人类进入航天时代和信息化社会的 21 世纪，电磁波将成为最好的无法取代的“侦察员”和“通信员”。随着人类进行月球开发、火星移民、太阳系考察与空间环境监测等空间研究与航天活动的显著增加，以及对地下与海洋资源开发利用、人类灾害性事件预测、文化生活、环境保护与医疗保健事业的更大关注，电磁波将担负起太阳系广大空间及广泛领域中信息资源获取与信息传送的使命。相距遥远的人们可应用各种通信手段，通过方便快捷的信息网络，把地球和各个空间站点协调地连接成一个整体，随时进行广泛的交流或科研、生产控制；并像目前气象服务系统一样，对广大空域实施空间天气和环境的监测和预报。同时，随着移动通信和个人通信的发展，无线电(包括半有线半无线的泄漏电缆)通信在矿井隧道、军事坑道、建筑群及楼层室内等社区的应用将日益广泛。在这种情况下，环境电磁污染的防护与各种电子设施的电磁兼容，将是需要解决的突出问题。对于人类居住的地球内部状况监测和资源勘探与开发是长期以来的艰巨任务。电磁波“入地”，因受高导电地壳表层沉积岩或海水的严重衰减以及岩层不均匀性和断层的严重影响，比“上天”难得多。20 世纪后期已先后开展的深地层(包括深水潜艇)通信、地壳结构与矿物资源勘探以及新揭示的震前电磁辐射应用于地震短期预报的探索，都将成为本世纪重点攻关并可望取得一定突破的电磁波高科技课题。此外，生物电磁波效应是近 20 年来兴起的新研究领域，对于电磁波的医疗应用和辐射防护的研究都将有重大进展。

在 21 世纪，电磁波应用还可能在无线电电力传输中取得重大进展。为了缓解地球上日益严重的能源危机及环境污染问题，利用取之不尽的太阳能，借助太阳能卫星和微波功率传输提供大量洁净的电力，必然是重要途径之一；当然，也会相应地增加电磁污染问题。在未来太空战的新概念武器中，高能电磁波的应用是不可缺少的。根据现有信息，太空武器主要有激光、带电粒子束、微波及动能武器。其中，高能激光武器就是利用光束输送巨大的能量，以光速直射目标，产生高热烧蚀、辐射及激波冲击等杀伤破坏效应。定向辐射的高功率微波波束，具有较强的全天候作战能力和较远的作用距离，可同时杀伤多个目标，并有可能与雷达兼容而进行探测、跟踪，从而获得最佳作战效能，它将成为现代电子战、电磁战和信息战的基本武器。

近 30 年来，利用地面大功率射频(目前主要是高频)电波加热电离层的变态效应对其应用进行的探索，已取得明显的进展。地球电离层是太阳电磁辐射与粒子辐射同地球上层大气原子和分子相互作用从而使大气电离而形成的，通常定义为其中自由电子和离子足以影响电

波传播的层区,一般指地面以上 50~2 000 km 的高度范围。在太阳辐射能流不断输入的同时,地球总是带着自己的磁场旋转,因而使电离层成为一种有源的强非线性等离子体介质,其中蕴藏着巨大的以背景电流体系和密度梯度等形式存在的自由能源。长期以来,人们希望将这种自由能源加以利用,为人类的科学技术发展服务。理论与实验表明,对电离层采取人为注入物质(包括水、氢与二氧化碳分子及钡、铯等元素)和注入能量(利用强电波和高能电子与离子束)及能量注入与化学施放相结合(包括核爆炸)等方法,通过改变其离解复合速率、碰撞频率、电子离子温度及电子速度与能级等状态,可激发多种电离层不规则结构与不稳定性等非线性变态效应。电离层及大气层的人工变态及其应用研究已成为空间物理和国防高科技的一个引人注目的前沿领域,对无线电信息传输、空间信息对抗及电离层与磁层物理研究等具有特别重要的应用前景。

总之,现代人类在驾驭和应用自然电磁波及排除其干扰的同时,在通信、广播、电视与医疗保健等日常生活和经济与国防高科技以及环境监测与改造等广泛的领域里,愈来愈多地享用着人为开发应用电磁波所带来的丰硕成果。整个频谱的电磁波,是人类生存和发展的强大物质和技术资源。

1.2 电磁场的基本定律——麦克斯韦(Maxwell)方程

电磁波是电磁场的运动。宏观电磁场的基本理论是 18 世纪以来从电磁现象观测中所得的一些实验定律概括而成的,并集中体现于麦克斯韦方程组。它阐明了电磁场与场源(电荷、电流)的联系及其与物质相互作用的规律,并揭示电磁波的存在。

1.2.1 自由空间中的电磁场

自由空间定义为无界真空。本小节在这种没有媒质参与的最简单情况下,从基本的实验定律与假设出发,阐明自由电荷与自由电流激发的电磁场。

1. 静止电荷的静电场——库伦(Coulomb)实验定律

库伦实验定律:真空中两个点电荷(两带电体间距离远大于其本身尺度)的相互作用力,与两点电荷电量(q_i, q_j)的乘积成正比,而与其间距 r_{ij} 的平方成反比,力的方向沿电荷间的连线按同性相斥与异性相吸引;同时,若干个电荷间的相互作用力符合力的叠加原理。作用力 F 的数学表达式(库伦定律)为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i q_j}{r_{ij}^3} \hat{r}_{ij} \quad (1.2.1)$$

其中 ϵ_0 称为真空的介电常数。

电荷间相互作用力的存在揭示了电场的存在。每个电荷在其周围空间中伴随着电场,当另一电荷处在该场中,即可感受其作用力;两个电荷间的相互作用实际上是各自电场间的相互作用,即不是直接的超距作用,而是通过电场来实现。场的概念就是在场源的作用下某种特征量(此处为电场)在一定空域中某种形态的分布。

如图 1-1 所示,定义 V' 中电荷 q_j 或其他若干电荷组合的电场强度矢量为 \mathbf{E} , P 处电荷 q_i 感受的库伦力为

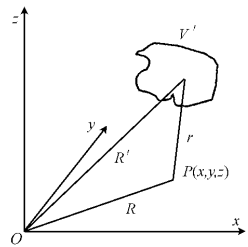


图 1-1 矢量图

$$\mathbf{F} = q_i \mathbf{E} \quad (1.2.2)$$

则 P 点电场强度矢量为

$$\mathbf{E}(R) = \lim_{q_i \rightarrow 0} \frac{\mathbf{F}}{q_i} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho(R')}{r^3} \hat{r} dV' \quad (1.2.3)$$

这里 ρ 为自由电荷的体密度, $r = [(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{1/2}$ 。

电场的基本特性由其(发)散度和旋度表征。某点电场的散度定义为电场沿包围该点闭合曲面的积分,当曲面中有源电荷 Q ,则散度等于 Q/ϵ_0 ;微分形式的散度方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0 \quad (1.2.4)$$

由微分方程的局域概念可知电荷是电场的源,空间某点电场的散度只与该点电荷密度有关,电力线从正电荷发出而终止于负电荷,电荷为零的点其电场散度为零,表示该点既无电力线发出,也无电力线终止,但可以有电力线通过,因而电场不一定为零。旋度反映场的环流特性,静电场力线的物理直观图像表明无旋涡状结构,即其旋度为零。在数学上,由库仑定律可知静止点电荷的电场强度沿闭合回路的环量(沿闭合路径切线分量的积分)为零,得微分形式的旋度方程为

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (1.2.5)$$

2. 恒定电流的静磁场——安培(Ampere)实验定律与比奥-沙伐(Biot-Savart)定律

具有一定规则的电荷运动形成宏观电流。恒定电流不随时间变化,但一般具有某种空间分布。定义电流密度矢量 \mathbf{J} 为单位时间通过单位横截面积的电荷,它是空间坐标的函数。通过曲面 S 的总电流强度为

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.2.6)$$

安培对分别载有恒定电流 I_1 与 I_2 的两个闭合电流回路 l_1 与 l_2 间的相互作用力 $\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$ 进行了实验。类似于电荷通过其电场相互作用的概念,电流间的相互作用也是通过场(称为磁场)来实现的。比奥-沙伐根据安培实验结果定义了电流 I_1 在电流 I_2 处产生的磁感应强度矢量 \mathbf{B}_{21} ,并推广到任意电流分布时的 $\mathbf{B}(R)$ 。即由

$$\mathbf{F}_{21} = \oint_2 I_2 d\mathbf{l}_2 \times \mathbf{B}_{21} \quad (1.2.7)$$

得

$$\mathbf{B}(R) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \nabla \times \left[\mathbf{J}(R') \frac{1}{r} \right] dV' \quad (1.2.8)$$

这里 μ_0 为真空的磁导率。

磁场的基本特性也类似地由其散度和旋度表征。根据实验观测,载电流导线周围磁场的力线总是围绕导线的闭合曲线,因而沿任何闭合曲面的磁通量为零,磁场散度方程的微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.2.9)$$

它说明电流产生的磁场力线是无源头(即闭合)的,不存在与电荷相对应的作为磁力线起止点的自由磁荷。磁场旋度反映其旋涡特性,由安培环路定理可知,磁感应强度 \mathbf{B} 沿闭合磁力线的线积分正比于所包围的电流强度,其微分形式的旋度方程为

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (1.2.10)$$

此式表明：空间某点磁场旋度只同该点电流密度有关，因而电流密度为零的空间，磁场总是无旋的。

3. 时变磁场激发的电场——法拉第(Faraday)电磁感应定律

法拉第由实验发现：当磁场随时间变化时，处于磁场中的闭合导线内有电流通过，即产生了感应电动势 ζ ，其大小与通过该线圈所包围面积的磁通量变化率成正比。

$$\zeta = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} dS \quad (1.2.11)$$

负号表明由 ζ 驱动的感应电流所产生的磁场，起着抵制磁通量变化的作用。同时，线圈中有电流表明有电荷运动，必然伴随某种空间分布的电场，感应电动势的大小即等于电场沿闭合导线的线积分，因而

$$\oint_l \mathbf{E} dl = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} dS \quad (1.2.12)$$

此式左边可应用矢量场的斯托克斯(Stokes)定理变为旋度的面积分，从而得到微分形式的电磁感应定律

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.2.13)$$

此式表明：由时变磁场激发的感应电场是有旋电场，由式(1.2.5)表示的无旋静电场为特例；同时此处的时变磁场 \mathbf{B} 仍然满足散度方程(1.2.9)。

4. 时变电场激发的磁场——麦克斯韦关于位移电流的假说

在时变电场的情况下，其场源(电荷、电流)必然随时间变化。由电荷守恒定律，在各种物理化学的反应变化中，物体的总电荷是严格保持不变的；流出某闭合曲面的电流，等于曲面所包围体积中电荷的减少。在数学上，可表示为电流连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1.2.14)$$

这种微分形式说明空间某点电流密度的散度等于该点电荷密度在时间上的减少。

上面所得静电场与静磁场的散度方程(1.2.4)和方程(1.2.9)，反映了其源头特性，在时变电磁场情况下也是成立的，即满足了磁场时变的电场旋度方程(1.2.11)，也具有普遍适用性。但是，磁场的旋度方程(1.2.10)没有考虑时变电场的影响，并与电流连续性方程(1.2.14)相矛盾，即由方程(1.2.10)得出 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ 。

现将电场散度方程(1.2.4)代入方程(1.2.14)，可得

$$\nabla \cdot \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (1.2.15)$$

将括号内具有电流密度特性的第二项记为

$$\mathbf{J}_D = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.2.16)$$

称为位移电流。麦克斯韦假设 \mathbf{J}_D 和 \mathbf{J} 一样产生磁场，即随时间变化的电场可以激发磁场，实验证明这是正确的。因此须在磁场旋度方程(1.2.10)的源项中加入 \mathbf{J}_D ，这样既考虑了时变电场的影响，又解决了与电流连续性方程(1.2.14)的矛盾。于是磁场旋度方程(1.2.7)变为