

电磁功能纺织材料

施楣梧 王 群◎著



科学出版社

电磁功能纺织材料

施楣梧 王 群 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从纺织材料结构特征、材料电磁学特性和电磁测量技术出发,阐述了电磁功能纺织材料的抗静电技术、电磁屏蔽、电磁波散射和频率选择表面等基础知识,提出了基于材料工程技术和纺织工程技术的电磁功能纺织材料制备方法,介绍了电磁辐射防护服的屏蔽效能测量系统与测量方法。对人工电磁媒质的研究、电磁功能纺织材料的开发、电磁功能纺织品的应用具有指导意义。

本书对从事化学纤维、纺织材料、电磁材料、电磁隐身、电磁辐射防护等行业的研发人员,及相关专业的师生都具有一定的参考和使用价值。

图书在版编目(CIP)数据

电磁功能纺织材料/施楣梧,王群著. —北京:科学出版社,2015. 2

ISBN 978-7-03-043459-3

I. ①电… II. ①施… ②王… III. ①电磁学-应用-金属纤维-纺织纤维-材料科学 IV. ①TS102

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 035007 号

责任编辑:周 涵 / 责任校对:钟 洋

责任印制:张 倩 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京信信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:352 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

纺织材料经过数千年的发展历史,至今已成为品种齐全、性能优良、应用广泛的一类重要的基础材料。通过物理、化学方法赋予纺织材料新的功能,将使这一传统材料焕发出新的活力。

电磁功能纺织材料是采用纺织纤维制造技术、纺织品面料织造技术、材料加工与制备新技术、新方法和新工艺,制造出具有特殊结构、优良电磁性能的新型功能材料。

纺织材料的电磁性能,以往侧重于研究纺织材料的电阻率及介电特性,其目的多在于解决纺织品加工与应用过程中的微波加热效率、水分检测及静电防护等技术问题。然而,随着科学技术的进步,开展纺织材料与电磁应用技术学科交叉研究的重要性日渐明显,一方面,纺织材料的发展需要向电磁功能领域拓展,而开发出具有优良电磁性能的新型纺织材料;另一方面,电磁材料需要借鉴纺织材料的轻质柔软的特性,而开发出具有“薄、轻、宽、高”的优良综合性能的电磁功能材料。

全书共分9章。第1章电磁功能纺织材料的电磁学基础,主要介绍电磁场分类、工程电磁学基础、材料的电磁参数和电磁功能材料的基本概念和基本原理,由王群、施楣梧、肖红编写。第2章电磁功能纺织材料的电磁测量基础,主要介绍介电常数、磁导率、电磁屏蔽效能和电磁波吸收效能测量的基本原理和方法,由王群、施楣梧编写。第3章电磁功能纺织材料的纺织材料学基础,主要介绍纺织材料的分类,纤维、纱线及织物的结构特征,由肖红编写。其中,第1、2章立足于使纺织科研人员了解和掌握电磁工程技术的基础知识,并能够利用这些知识开展纺织材料的电磁功能研究,第3章的编写目的则是使电磁工程领域和材料科学与工程领域的科研人员了解有关纺织学的基础知识。第4章电磁功能纺织材料的制备,介绍电磁功能纤维的制备、电磁功能纤维的织造技术、织物的电磁功能化技术,由肖红、瞿志学编写。第5章抗静电纺织材料,分别对抗静电理论基础、纺织材料抗静电技术和抗静电性能的测试评价进行了介绍说明,由施楣梧编写。第6章电磁屏蔽纺织材料,主要内容包括电磁屏蔽理论基础、电磁屏蔽织物的结构、屏蔽效能及屏蔽效能的各向异性,由肖红、唐章宏、王群编写。第7章电磁散射纺织材料,主要介绍电磁波散射理论基础、电磁功能纺织材料的散射特性,并简要介绍电磁功能纺织材料在雷达隐身中的应用,由唐章宏、王群、肖红编写。第8章频率选择表面纺织材料,主要内容包括频率选择表面基础、频率选择表面频响特性的影响因素与分析方法,同时还简要介绍了频率选择表面纺织材料的应用,由徐欣欣编写。第9章电磁

辐射防护服屏蔽效能测量,主要包括电磁辐射防护服屏蔽效能测量系统、测量系统分析和电磁辐射防护服屏蔽效能测试三部分内容,由施楣梧、王群编写,中国电子科技集团第41研究所的郭荣斌、杨华祥对本章工作中所使用的关键仪器系统提供了指导与帮助,并参加了部分编写工作。

本书是一部关于纺织材料与电磁功能材料的交叉学科的专著,编写组全体人员在多年科技工作的基础上,从理论和实践两方面对电磁功能纺织材料相关内容进行了全面的梳理和归纳总结,可供材料学、纺织学及电磁技术等相关学科领域的大学生、研究生、教师及工程技术人员参考使用。

对本书工作有贡献的人员还包括:曾就学于北京工业大学的研究生袁岩兴、聂士东、王翰林、韩井玉、吴禄军、郑晓静、李传友,就读于东华大学的研究生关福旺、程焕焕、梁然然,以及西安工程大学研究生南燕。本书出版过程中得到了科学出版社的大力支持和帮助,在此一并致以衷心的感谢。

由于本书涉及的是交叉学科领域,知识广泛、跨度较大,编著者的学识尚难自如驾驭整个领域的学术和技术内容,书中难免存在一些缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

编著者

2014年11月

目 录

前言

第 1 章 电磁功能纺织材料的电磁学基础	1
1.1 电磁场分类	1
1.1.1 电场	1
1.1.2 磁场	1
1.1.3 静态场和动态场	1
1.2 工程电磁学基础	2
1.2.1 电磁场的场区特性	2
1.2.2 电磁波频谱	3
1.2.3 电磁波的传播	5
1.2.4 电磁场表征与单位换算	8
1.3 材料的电磁参数	10
1.3.1 介电常数	10
1.3.2 磁导率	12
1.3.3 电导率	13
1.4 电磁功能材料基本概念	14
1.4.1 电子能带	14
1.4.2 导体	14
1.4.3 半导体	15
1.4.4 电介质	16
1.4.5 磁性材料	17
1.4.6 介电/导体复合材料	19
1.4.7 磁谱与介电谱	19
1.5 纺织材料的电磁学性能	20
1.5.1 导电性能	21
1.5.2 介电性能	22
1.5.3 静电性能	24
1.5.4 磁学性能	24

第 2 章 电磁功能纺织材料的电磁测量基础	26
2.1 测量系统	26
2.1.1 网络分析仪	26
2.1.2 阻抗分析仪	29
2.1.3 夹具	29
2.1.4 校准	30
2.2 电磁测量技术简述	30
2.2.1 同轴探头法	30
2.2.2 传输线法	31
2.2.3 自由空间法	32
2.2.4 谐振腔法	32
2.2.5 平行板法	34
2.2.6 电感测量法	34
2.2.7 电磁测量需要考虑的一些因素	34
2.3 介电常数平行板法测量	36
2.3.1 平行板法介电常数测量原理	36
2.3.2 介电常数测量系统的误差分析	37
2.4 复数磁导率与阻抗测量	40
2.4.1 复数磁导率的物理含义	40
2.4.2 测量设备	41
2.4.3 单圈电感模型建立	41
2.4.4 阻抗测量原理	42
2.4.5 磁导率测量原理	43
2.5 电磁屏蔽效能测量	45
2.5.1 远场法	45
2.5.2 近场法	47
2.6 电磁波吸收效能测量	48
2.6.1 测试系统搭建	49
2.6.2 测试原理	52
第 3 章 电磁功能纺织材料的纺织材料学基础	55
3.1 纺织材料的概念及基本分类	55
3.2 纤维及其结构特征	55
3.2.1 定义与分类	55
3.2.2 纤维的形态结构	57
3.2.3 纤维的细度及长度	60

3.3 纱线及其结构特征	62
3.3.1 定义与分类	62
3.3.2 纱线的结构	62
3.3.3 纱线的结构参数	65
3.4 织物及其结构特征	67
3.4.1 定义及分类	67
3.4.2 机织物	68
3.4.3 针织物	69
3.4.4 非织造布	72
3.4.5 编结物	72
3.4.6 织物的结构参数	72
3.5 纺织材料的吸湿性	76
第4章 电磁功能纺织材料的制备	78
4.1 纺织材料的电磁功能化思路	78
4.2 电磁功能纤维的制备	80
4.2.1 金属纤维	80
4.2.2 碳纤维及石墨纤维	82
4.2.3 有机复合电磁功能纤维	83
4.3 电磁功能纤维的织造技术	85
4.3.1 电磁功能纤维的成纱	85
4.3.2 电磁功能纱线的织造	87
4.4 织物的电磁功能整理	88
4.4.1 化学镀	89
4.4.2 电镀	92
4.4.3 真空蒸镀法	94
4.4.4 溅射法	95
4.4.5 涂敷法	97
4.4.6 本征导电高分子整理技术	98
4.5 电磁功能纺织材料制备技术的发展趋势	100
参考文献	101
第5章 抗静电纺织材料	104
5.1 抗静电的理论基础	104
5.1.1 静电现象	104
5.1.2 抗静电机理和途径	106
5.2 纺织材料抗静电技术	107

5.2.1	抗静电纤维的制备及应用	107
5.2.2	导电纤维的制备	109
5.2.3	有机导电纤维的结构与性能	112
5.2.4	有机导电纤维的应用	116
5.3	抗静电性能的测试评价	118
5.3.1	静电性的特征参数	119
5.3.2	静电性的测试方法	119
	参考文献	121
第6章	电磁屏蔽纺织材料	122
6.1	电磁屏蔽的理论基础	122
6.1.1	屏蔽的基本概念	122
6.1.2	电场屏蔽	124
6.1.3	磁场屏蔽	124
6.1.4	电磁屏蔽	128
6.1.5	金属材料电磁屏蔽效能的理论计算	130
6.2	电磁屏蔽织物及其网格结构	139
6.2.1	电磁屏蔽织物分类及特点	139
6.2.2	电磁屏蔽织物结构	142
6.2.3	网孔结构的屏蔽效能分析	145
6.3	织造电磁屏蔽织物的屏蔽效能	148
6.3.1	结构参数对屏蔽效能的影响	148
6.3.2	材料参数对屏蔽效能的影响	153
6.3.3	金属短纤维排列结构对屏蔽效能的影响	156
6.4	金属化电磁屏蔽织物的屏蔽效能	159
6.4.1	镀层金属材质对趋肤深度和屏蔽效能的影响	159
6.4.2	镀层厚度对屏蔽效能的影响	161
6.4.3	金属化织物上的孔缝对屏蔽效能的影响	162
6.5	电磁屏蔽织物屏蔽效能的各向异性	165
6.5.1	样品平面的电磁场分布	165
6.5.2	电磁屏蔽织物屏蔽效能的各向异性	166
6.6	电磁屏蔽织物屏蔽效能的研究现状	169
6.6.1	有孔金属板模型	169
6.6.2	金属丝网格结构模型	171
6.6.3	真实结构的三维模拟	172
6.6.4	其他数值计算	173

参考文献	174
第 7 章 电磁散射纺织材料	180
7.1 电磁波散射基础	180
7.1.1 电磁波的散射机理	180
7.1.2 无线电波的散射	181
7.1.3 雷达目标的散射特性	181
7.2 织物立体结构对电磁波散射性能的影响	182
7.2.1 线状单元结构的电磁波散射特性	182
7.2.2 凹凸面单元结构的电磁波散射特性	186
7.3 电磁功能纺织材料的散射特性	189
7.3.1 立绒结构织物	189
7.3.2 立体间隔织物	192
7.3.3 切花结构织物	194
7.3.4 凹凸面结构织物	197
7.3.5 四类立体结构织物的比较	200
7.4 电磁功能纺织材料在雷达隐身中的应用	201
7.4.1 雷达隐身原理及工作频率	201
7.4.2 雷达目标散射截面积 RCS	204
7.4.3 不锈钢凹凸结构织物及服装的 RCS 测试	209
参考文献	216
第 8 章 频率选择表面纺织材料	218
8.1 频率选择表面基础	218
8.1.1 频率选择表面的基本分类	219
8.1.2 频率选择表面的谐振机制	220
8.1.3 周期结构频响特性表征	222
8.2 频率选择表面频响特性的影响因素	223
8.2.1 单元形状的影响	223
8.2.2 单元尺寸的影响	226
8.2.3 多层频率选择表面混合结构的影响	229
8.2.4 栅瓣的影响	231
8.2.5 入射角度和极化方式的影响	233
8.3 频率选择表面的传输线建模与图解分析	234
8.3.1 多层吸波材料结构模型	234
8.3.2 自由空间中 FSS 的计算	236
8.3.3 频率选择表面吸波结构的设计与优化	237

8.4	频率选择表面纺织材料的制备技术	240
8.4.1	频率选择表面纺织材料图案织造	240
8.4.2	频率选择表面纺织材料图案整理	241
8.5	频率选择表面纺织材料的应用	243
8.5.1	频率选择表面纺织材料在雷达吸波材料上的应用	243
8.5.2	频率选择表面纺织材料在织物天线上的应用	246
8.5.3	频率选择表面纺织材料在频率选择性通信窗上的应用	248
	参考文献	249
第9章	电磁辐射防护服屏蔽效能测量	251
9.1	电磁辐射防护服研究背景	251
9.1.1	电磁辐射管理的基本思路	251
9.1.2	我国电磁辐射防护标准回顾	252
9.1.3	电磁辐射防护服的国内外标准情况	253
9.1.4	电磁辐射防护服标准的技术要素	254
9.2	电磁辐射防护服屏蔽效能测量系统	257
9.2.1	测量系统总体说明	257
9.2.2	测量系统的发射天线	260
9.2.3	测量系统的接收天线	262
9.2.4	测量方法	266
9.3	测量系统分析	269
9.3.1	系统预调	269
9.3.2	测量系统的动态范围	270
9.3.3	测量系统的多径影响	271
9.3.4	测量曲线的修正	272
9.4	电磁辐射防护服屏蔽效能测试	273
9.4.1	系统联调频率点的选定	273
9.4.2	一致性试验	273
9.4.3	稳定性试验	274
9.4.4	防护服屏蔽效能实际测量	277

第 1 章 电磁功能纺织材料的电磁学基础

1.1 电磁场分类

1.1.1 电场

电力、磁力和万有引力普遍存在于自然界中。电场力与带电物体的电荷相关联。物体所带的电荷可能为正电荷或负电荷。运动电荷在其周围能够形成电磁场,电磁场本身就是一种特殊形态的物质;同时,电磁场会对其他电荷产生作用力。

根据电场对电荷作用力的大小能够对电场做定量研究。人们把电场中的试验电荷 q_0 每单位电荷所受到的力 F 定义为电场强度,用符号 E 表示。在国际单位制中,电场强度的单位是牛/库(N/C),即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (1.1)$$

1.1.2 磁场

早在 19 世纪初以前,人们就已经发现天然磁铁以及磁性物质可以发生磁化并可被用作磁铁的自然现象。对这种朴素的磁学认识直到 1820 年才被改变,丹麦物理学家奥斯特在实验中发现载流导线可以使磁针偏转,这一伟大的实验发现终于将电学和磁学二者紧密联系起来,从此人们终于认识到磁场也能够由电流产生。此后,围绕导线的载流与其周围磁场的关系,科学家开展了长期且大量的研究,最终建立了定量关系式。

与上述用电场强度表征电场相类似,磁场的大小和方向通常用磁感应强度来定量描述,用符号 B 表示。磁感应强度也被称为磁通量密度或磁通密度。在国际单位制中,磁感应强度的单位是特斯拉,简称特(T)。 B 的大小规定为

$$B = \frac{dF_{\max}}{Idl} \quad (1.2)$$

式中, Idl 为电流元; dF_{\max} 表示电流元在磁场中某点所受的最大力。实验表明,该比值与电流元 Idl 无关。

1.1.3 静态场和动态场

动态电磁场是自然界中普遍存在的物理场,具有恒定电荷和稳定电流的静电场和静磁场只是电磁场中的特例。在静电场和静磁场中感应电场和感应磁场之间

没有耦合效应。然而,动态场中的电场和磁场之间将发生耦合作用。动态场的电磁场也被称为时变电磁场,时变的电场将产生时变的磁场,反之亦然。表 1.1 概括了电磁场的三种类型。

表 1.1 电磁场分类

分类	条件	场量(单位)
静电场	固定电荷($\partial q/\partial t=0$)	电场强度 E (V/m)
静磁场	稳定电流($\partial I/\partial t=0$)	磁通量密度 B (T)
动态(时变场)	时变电流($\partial I/\partial t \neq 0$)	E 和 B

1.2 工程电磁学基础

1.2.1 电磁场的场区特性

根据研究位置与场源的远近距离划分,电磁场分为近区场和远区场。

1.2.1.1 近区场

在靠近偶极子($r < \lambda/2\pi$)的区域,电场和磁场的相位相差 90° ,因此能量在电场和磁场之间相互交换而平均坡印亭矢量为零,这种区域的场也称为感应场。近区场有以下几个特点。

(1) 在近区场内,电场强度 E 与磁场强度 H 的大小没有确定的比例关系。

对于电压高、电流小的场源(如天线、馈线等),电场强度比磁场强度大得多,电场占主导,磁场分量可以忽略。场源属于高阻抗,阻抗大小与距离 r 成反比,如式(1.3)所示:

$$Z_w = 377 \frac{\lambda}{2\pi r} \quad (1.3)$$

对于电压低、电流大的场源(如电流线圈、环状天线),磁场强度又远大于电场强度,场源为低阻抗,在近场区波阻抗与距离 r 成正比,如式(1.4)所示:

$$Z_w = 377 \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (1.4)$$

(2) 近区场电磁场强度要比远区场电磁场强度大得多,但近区场电磁场强度衰减速度要比远区场快得多。

(3) 近区场电磁感应现象与场源密切相关,近区场不能脱离场源而独立存在。

1.2.1.2 远区场

在远离偶极子的区域($r \gg \lambda/2\pi$),电场和磁场成比例关系,彼此同相,且在空

间相互垂直,其比值为媒质的本征阻抗 η 。在远区场,坡印亭矢量的模为 $\eta \left(\frac{Idl}{2\lambda r} \right)^2 \sin^2 \theta$,这表示有能量向外辐射,因此远区场也称为辐射场。远区场有以下几个特点。

(1) 远区场以辐射形式存在,电场强度与磁场强度之间具有固定关系,且电场与磁场的运动方向互相垂直,并均与它们的传播方向垂直。

(2) 在远区电场和磁场的强度与距离 r 的一次方成反比。

(3) 电磁波在传播过程中,当遇到物体时,将发生绕射。随着频率的增加,电磁波就越来越和光相似,即沿直线传播,且具有反射与折射性质。

在近区场,由于电场和磁场的强度之比并不是一个常数,所以电场和磁场应当分别进行考虑;但是在远区场,电场和磁场形成平面波,电场和磁场的强度的比值为一个常数,即波阻抗为定值 377Ω 。所以,在讨论平面波时,都假定是在远场条件下。而如果是单独讨论电场或磁场,则必然是指在近场条件下。

1.2.1.3 场区波阻抗

电磁辐射源可归纳为两类:一类是电偶极子辐射;另一类是磁偶极子辐射。对于近区场,电偶极子为高阻抗源,电磁场以电场为主;磁偶极子为低阻抗源,电磁场以磁场为主。对于远区场,二者辐射场的性质相同,都可视为平面电磁波。因此,波阻抗的大小与辐射源的类型及远近场区类型有关,如图 1.1 所示。

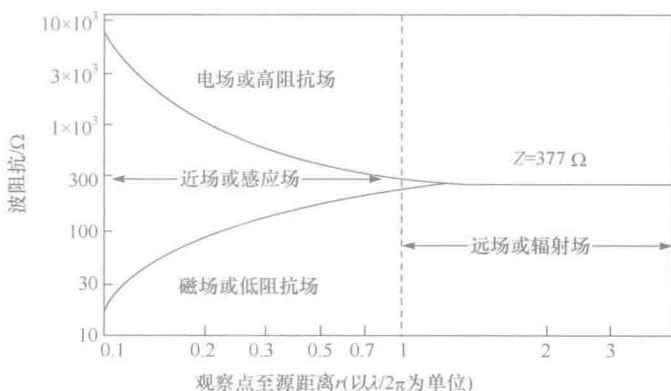


图 1.1 波阻抗与观察点的距离和场特性的关系

1.2.2 电磁波频谱

电磁波包括无线电波(含长波、中波、短波、超短波、微波等)、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线等。表 1.2 列出了电磁波的波段划分和各波段的波长(频

率)范围。

表 1.2 电磁波波段划分

波段		频率范围	波长范围	
无线电波	极长波(ELF,极低频)	3~30 Hz	$10^5 \sim 10^4$ km	
	特长波(SLF,特低频)	30~300 Hz	$10^4 \sim 10^3$ km	
	超长波(ULF,超低频)	300~3000 kHz	$10^3 \sim 10^2$ km	
	甚长波(VLF,甚低频)	3~30 kHz	$10^2 \sim 10$ km	
	长波(LF,低频)	30~300 kHz	10~1 km	
	中波(MF,中频)	300~3000 kHz	$10^3 \sim 10^2$ m	
	短波(HF,高频)	3~30 MHz	$10^2 \sim 10$ m	
	超短波(VHF,甚高频)	30~300 MHz	10~1 m	
	微波	分米波(UHF,超高频)	300~3000 MHz	$10^2 \sim 10$ cm
		厘米波(SHF,超高频)	3~30 GHz	10~1 cm
毫米波(EHF,超高频)		30~300 GHz	10~1 mm	
亚毫米波(超极高频)		300~3000 GHz	1~0.1 mm	
红外线		$300 \sim 3.84 \times 10^5$ GHz	$10^3 \sim 0.78$ μm	
可见光		$3.84 \times 10^5 \sim 7.7 \times 10^5$ GHz	$0.78 \sim 0.39$ μm	
紫外线		$7.7 \times 10^5 \sim 3 \times 10^7$ GHz	$0.39 \sim 0.01$ μm	
X射线		$3 \times 10^7 \sim 3 \times 10^{10}$ GHz	$0.01 \sim 10^{-5}$ μm	
γ 射线		$3 \times 10^{10} \sim 3 \times 10^{14}$ GHz	$10^{-5} \sim 10^{-9}$ μm	

在通信和雷达工程中,微波波段(频率 300 MHz~3000 GHz,即波长 1 m~0.1 mm)又常分为若干子波段,如表 1.3 所示。

表 1.3 微波波段的代号及对应的频率范围

波段	频率范围/GHz	波段	频率范围/GHz
UHF	0.3~1.12	K	18.0~26.5
L	1.12~1.7	Ka	26.5~40.0
LS	1.7~2.6	Q	33.0~50.0
S	2.6~3.95	U	40.0~60.0
C	3.95~5.85	M	50.0~75.0

续表

波段	频率范围/GHz	波段	频率范围/GHz
XC	5.85~8.2	E	60.0~90.0
X	8.2~12.4	F	90.0~140.0
Ku	12.4~18.0	G	140.0~220.0
		R	220.0~325.0

1.2.3 电磁波的传播

1.2.3.1 电磁场的波动方程

电磁场的基本方程是麦克斯韦方程,通常人们讨论的均质介质是指各向同性且均匀线性。麦克斯韦方程组既是空间的函数又是时间的函数,当我们只考虑函数的时间解形式时,麦克斯韦方程组可表示为

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1.5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} + k^2 \mathbf{B} = 0 \quad (1.6)$$

式中, $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon_0}$ 。

方程(1.5)和(1.6)称为亥姆霍兹(Helmholtz)方程,是电磁场的波动方程。

一般的电磁波总可用傅里叶分析方法展开成一系列单色平面波的叠加。所以,对单色平面波的研究具有重要的理论和实际意义。假定波动方程(1.5)和(1.6)的单色平面波的复数解为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (1.7)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})] \quad (1.8)$$

式中, $\mathbf{E}_0, \mathbf{B}_0$ 为常矢量, $|\mathbf{E}_0|, |\mathbf{B}_0|$ 分别为 \mathbf{E}, \mathbf{B} 的振幅; ω 为圆频率; \mathbf{k} 为波矢量(即电磁波的传播方向); $\exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]$ 代表波动的相位因子。

在无源区,麦克斯韦方程组中电场和磁场的散度满足以下方程组:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \end{cases}$$

将式(1.7)和(1.8)代入上面给出的方程组可得

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1.9)$$

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1.10)$$

由上述方程组可以看出,电磁波在介质中传播时,电场和磁场都与传播方向垂直,即 \mathbf{E}, \mathbf{B} 与 \mathbf{k} 三者相互垂直,且满足右手螺旋关系。

1.2.3.2 电磁波在自由空间中的传播

电磁波在真空中的传播称为自由空间传播,其中,自由空间的 $\epsilon = \epsilon_0, \mu = \mu_0$ 。发射天线辐射球面波在最大辐射方向、距天线 r 处的接收点场强的振幅值为

$$|E_m| = \frac{245 \sqrt{P_T G_T}}{r} \quad (1.11)$$

式中, $|E_m|$ 为接收点场强的振幅值(mV/m); P_T 为发射天线的输入功率(kW); G_T 为发射天线的增益; r 为到天线的距离(km)。

接收天线的输出功率为

$$P_R = |\bar{S}| A_e = \frac{P_T G_T \lambda^2}{4\pi r^2} \frac{G_R}{4\pi} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 P_T G_T G_R \quad (1.12)$$

式中, \bar{S} 为接收天线处的平均功率流密度, $|\bar{S}| = \frac{P_T G_T}{4\pi r^2}$; A_e 为接收天线的有效面积, $A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R$; G_R 为接收天线的增益; λ 为波长。

在自由空间中, 增益 $G_T=1$ 的发射天线的输入功率 P_T 与增益 $G_R=1$ 的接收天线的输出功率 P_R 之比为自由空间传输损耗 L_{bf} , 即

$$L_{bf} = \frac{P_T}{P_R} \quad (1.13)$$

将式(1.12)代入上式得

$$L_{bf} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 \quad (1.14)$$

用 dB 表示为

$$L_{bf}(\text{dB}) = \frac{P_T}{P_R}(\text{dB}) = 20 \lg\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)(\text{dB}) \quad (1.15)$$

自由空间传输损耗是球面波在传输过程中随着距离的增大, 能量扩散而引起的损耗。当电磁波频率增加 1 倍或距离增加 1 倍时, 则自由空间传输损耗增加 6 dB。

1.2.3.3 电磁波在材料介质中的传播

1. 电磁波在线性介质中的传播

电磁波在线性介质中的传播, 即电介质参数和磁导率都为实数的波传播情况。由平面波解式可知, 平面电磁波在线性介质中传播, 只有相位发生变化, 无幅值变化, 则介质中电磁波的波动方程可写为

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \eta \mathbf{H} \quad (1.16)$$

式中, η 称为波阻抗(Ω); $\eta = \frac{\omega \mu}{k} = \frac{\sqrt{\mu}}{\epsilon}$ 。其物理意义是垂直于传播方向平面上的电场和磁场的比值。在线性介质中, 波阻抗 η 为实数, 也就是纯电阻, 所以电场和磁场同相。