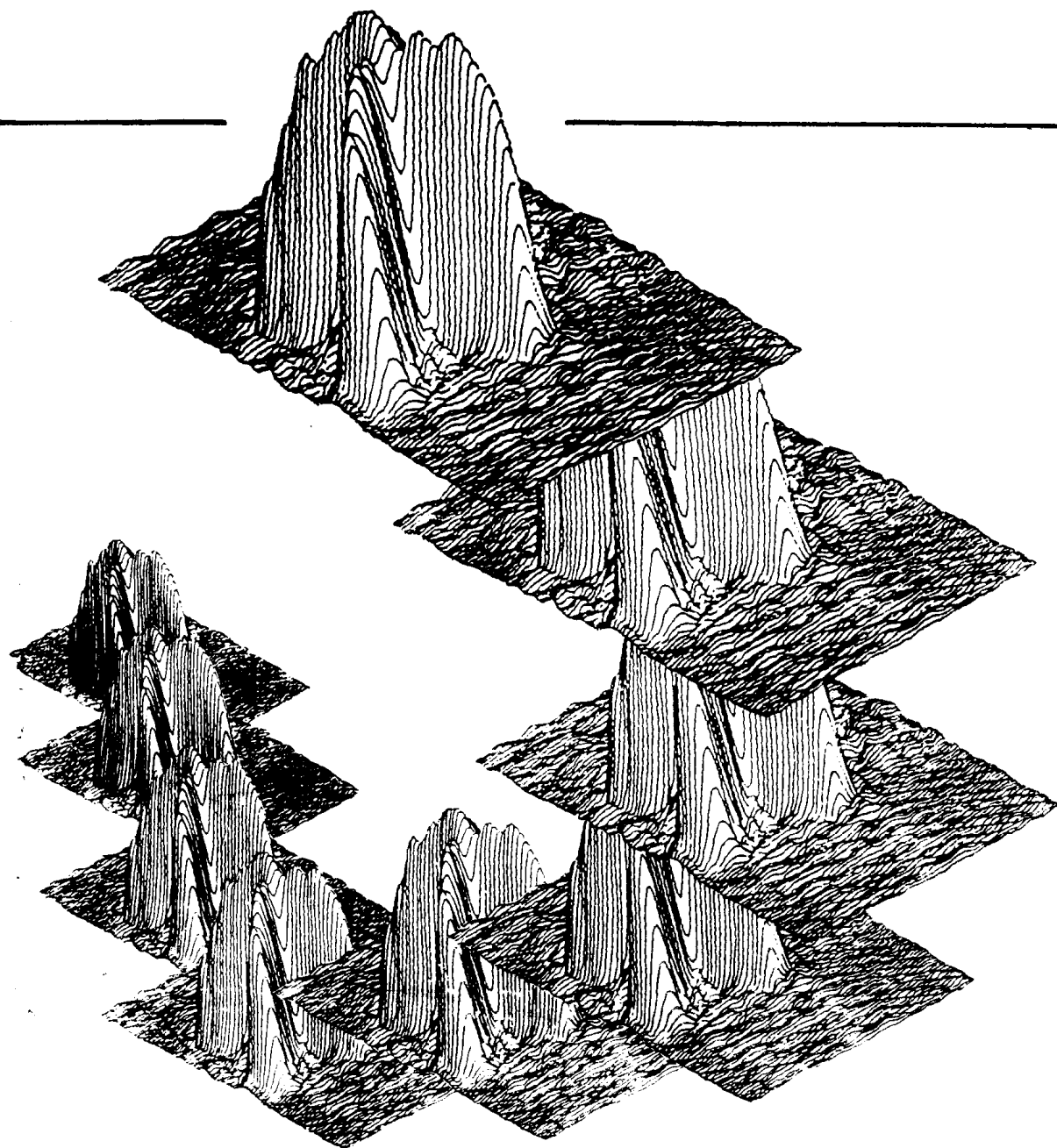


高等学校教学用书

微波、毫米波传感器 与非电量检测

李 英 编著



电子工业出版社

高等学校教学用书

微波、毫米波传感器与非电量检测

李 英 编著

电子工业出版社

内 容 简 介

本书全面、系统地论述了微波、毫米波传感器与非电量检测的理论、原理以及应用。全书共七章,内容包括物质的介电特性和电介参量,微波谐振传感器及相关的检测电路,导波传输传感器及其检测电路,反射传感器一样品盒与探头,非电量的时域检测法,微波、毫米波光学和准光传感器以及自由空间波检测法,椭圆偏振波的传感与检测(毫米、亚毫米波椭圆偏振检测法)等。

本书是反映当代该学科领域主要进展的学术专著,可供电磁场与微波、无线电物理、电子测量仪器、非电量检测、工业自动控制、物化、生化、生理、医学诊断、材料科学等方面的科技工作者、研究生和高年级大学生阅读。

高 等 学 校 教 学 用 书 微波、毫米波传感器与非电量检测

李 英 编 著
责任编辑 龚兰方

电子工业出版社出版(北京市万寿路)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国科学院印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 43 字数: 1040 千字
1991年4月第一版 1991年4月第一次印刷
印数: 1—1000 册 定价: 11.00元
ISBN 7-5053-1198-0/TN·355

序 言

微波、毫米波传感器是近年来迅速发展的传感器学科的一个新分支；而非电量的微波、毫米波检测技术则是无损检测技术中的一支新秀，它是一个涉及多学科的综合性学科。非电量的微波、毫米波检测在工业、农业、地质勘探、能源、材料、国防、公安、生物医学、环境保护、科学研究等方面有着广泛应用的前景。在学术上也有许多值得探索的新课题，如电磁逆问题、瞬态电磁场、时域电磁计量学、谱分析、高频电磁场与生物体的相互作用等。因此引起国内、外学术界的重视，我国科技工作者也在这方面展开了研究工作，并已取得许多可喜成果。但是，国内、外还缺少系统的专著，故本书的出版无疑是填补了一个空白。而本书系由上海科学技术大学李英教授根据他多年来的科研工作和为研究生开设的“微波、毫米波传感器与非电量检测”课程讲稿整理而成的。是一本较为系统，能够反映当代该学科领域主要进展的学术专著，可供有关电磁场与微波，无线电物理，电子测量仪器，非电检测，工业自动控制，物化，生化，生理，医学诊断，材料科学等方面的科技工作者、研究生和高年级大学生进修和学习。我将此向读者们推荐。

中国科学院学部委员

中国电子学会微波专业学会主任委员

成都电讯工程学院前副院长

林为干

前 言

本书将研究从微波到毫米波的广阔射电频谱内,通过传感器用射电信号来获取物质和物体非电信息的理论和相应的检测方法。通过传感器使被测量或目标的信息包含在电磁场或电磁波的参量中,通过对这些参量的测量,以提取所需的非电量信息。为了从被测样品或目标用射电方法获取非电信息,就必须将非电量转换成电磁场量或电磁波量。因此,首先要建立电磁场或电磁波量与被测非电量,以及物质的电磁特性与非电磁特性间的严格关系。这些关系将是解决和探索特定的检测方法和相应的传感器的关键。而为了建立这些关系,将涉及到电磁场和电磁波与物体或物质间的经典的(如反射、折射、散射、绕射、干涉、频散、频移、谐振、偏振态变化、压电效应、弹光效应、磁致伸缩以及热的和非热的生物效应等),或量子的相互作用(如气体和固体波谱,磁共振和磁波谱学,回旋共振,隧道效应,斯塔克和塞曼分裂,狄氏效应,约瑟夫逊效应等)。而要解决的电磁问题都是属于电磁逆问题,即根据目标的电磁响应来确定目标的非电特征。除一些较为简单和规则的情况外,严格的数学分析是困难的,常采用近似或数值方法,或采用实验校准的方法。

在非电量的射电检测中,引用并发展了通信、雷达、射电天文、空间技术、瞬态电磁场和超短脉冲技术、波谱学、光学和准光技术中,对射电信号的传感、提取、传递、变换和处理的方法,并且逐步形成其独特的风格,从而脱颖而出形成非电检测学科的新分支——微波、毫米波传感器与非电量的射电检测法。由于探测信号极其微弱,不致使被测对象造成损伤,并且可以做到非接触和不取样,因此也是一种无损检测技术(NDT),它是继超声波、电磁法、涡流法、红外、同位素、X线和 γ 线等方法之后新崛起的一支异军。在某些应用领域,它具有其它方法无能为力、无法替代的独特优点。

非电量的射电检测技术在下列一些领域有着广泛的应用:工业(化工、石油、煤炭、冶金、机械、轻纺、食品、动力、建材)、地质勘探、材料、交通运输、农林业、国防公安、环境保护监测、物理化学、生物化学、生物物理的科学研究和生物医学工程等方面。因此,它是一个涉及多学科的交叉和综合性学科,也是一个理论性和应用性都很强的学科。

微波、毫米波传感器和非电量的射电检测技术具有下列一些特点:

1. 有极宽的电磁频谱可供选用,以便获得最佳的目标/频率比:在射电频谱内已具有产生、变换、传输、传播、检测和处理相干电磁波信号的较有效的方法;微波毫米波固态集成电路的发展,可提供轻小、低压低功耗、低成本、可靠、长寿命的微波毫米波元器、组件,这些元器件的发展,为推广应用奠定了物质基础;而对高频电磁场与物质相互作用的深入研究为非电量射电检测提供了理论依据;

2. 云雾、烟尘、水汽、化学气氛以及高、低温环境对电波传播的影响很小,且电能能透入对可见光不透明的介质材料,故可探测被掩埋的目标,达到射电内窥的目的,可对介质材料进行射电探伤;

3. 时间常数很小,反应速度快,灵敏度高,可采用高频调制;测量的信号本身就是电

量,无需转换,有时还是数字的,简化了传感器-处理器间的接口;射电传感器能实时记录过程基本参数,能连续、在线 (on line)、在位 (in situ)、在体 (in Vivo) 和遥测;结合数字技术和用微机进行信号处理和数据处理,可大大提高测量精度、灵敏度、分辨率和速度,增强了提取非电信息的能力,扩充了检测功能;

4. 检测过程可以是非接触或无损的,无显著辐射危害。

根据被测的非电量,测量时所应用的电磁现象,以及所需测量的射电参数可归纳为下表(见表 01),并在相应的各章节中详细讨论。

本书系根据 1980 年以来作者为历届研究生所讲授的教材修改,充实整理而成,其中反映了我们所进行的部分科研工作。该教材曾被中国电子学会微波学会、中国通信学会微波通信委员会所组办的全国非电量检测学习班推荐试用过,后来又作为作者赴芬兰赫尔辛基理工大学讲学时的蓝本。

本书在写作过程中得到我国学术界前辈中国科学院学部委员,中国电子学会微波学会主任委员,原成都电讯工程学院前副院长林为干教授,中国电子学会微波学会前任副主任委员陈涵奎教授,中国计量测试学会常务理事汤世贤教授,以及我校荣誉校长、中国科学院学部委员、中国电子学会微波学会前任主任委员黄宏嘉教授,中国电子学会超导电子学会主任委员,我校学术委员会主任鲍家善教授的指导和支持。得到电子工业部教材办公室赵家鹏主任的指导和支持。陈晓霞同志为本书描绘了草图和整理参考文献,在此一并致谢!

上海科学技术大学无线电电子学系
上海毫米波和亚毫米波研究室

李 英

表 0.1

	被测的非电量	测量时所应用的电磁现象	所需测量的射电参数
机 械 量	距离 固态或液态物体的物位和液位小位移 振动、转动	电磁波在导波系统或自由空间中的传播时间	连续波载波或多频系统的相移 时域系统中的时间 调频波的频移
	速率、振动、转动 加速度 流量	电磁波的都卜勒效应 空间滤波	都卜勒频率 空间滤波的中心频率
几 何 量	介质片或介质膜厚度	空间波干涉, 导波传播, 反射波偏振态变化	反射系数或透射系数, 椭圆参数
	金属板或金属膜厚度	波反射, 腔微扰, 偏振态变化	反射波相位, 谐振频率, 椭圆参数
	金属板宽度	腔微扰	谐振频率
	外形轮廓, 圆杆直径, 细线直径	绕射, 腔微扰	谐振频率
物 理 特 性 、 化 学 成 分	固化度 凝结度 聚合度 密度 粒度 含水量(固态和液态样品) 组分混合比	介 电 特 性	腔微扰法中的复谐振频率, 复反射系数, 复传输系数; 空间波法中的复反射系数, 复传输系数; 导波系统中的复反射, 复传输系数; 时域法中的时域响应
诊 断	湿度(气态样品)	介电特性, 折射率	同 上
	金属表面探伤	涡流、模式变换、消逝模微扰, 电磁波散射	探头阻抗, 变换模式测量, 反射波测量
	介质材料探伤, 地下或掩埋目标的探测	反向散射和绕射, 对瞬变电磁波的响应	反向散射和绕射信号, 时域响应和谱分析
	各向异性检测, 构件的应力, 形变检测	多模腔微扰耦合偏振态变化、弹光电光效应	正交模的传输系数, 偏振参数
	生物医学	介电波谱	时域响应, 射电波谱
其 它	温度	物体本身的电磁辐射	噪声功率
	物质结构分析	原子或分子的能级跃迁	谱分析(射电波谱学)
	目标探测	自由空间波或导波从目标的反射, 时域响应	反射信号 时域测量
	目标识别, 相干应答器	调制散射体的散射, 编码无源天线的选择性反射	散射信号 反射信号
	射电内窥和成象	微波相干散射和绕射的干涉有源成象; 物体本身的辐射成象	微波全息和层析象, 微波热象

目 录

第一章 物质的介电特性和介电参量

.....	1
1.1 物质的组成关系.....	1
1.2 物质的高频特性.....	2
1.3 介质的极化.....	3
1. 相对介电常数和边界条件	4
2. 致密材料的极化	6
3. 固态和液态材料中 ϵ_r 与频率的典型关系	7
4. 电子极化	7
5. 原子极化	8
6. 气体中的取向极化	9
7. 液体和固体中的取向极化、Debye 关系式	10
8. 离子电导率和 Maxwell-Wagner 效应	13
1.4 水.....	15
1. 水分子	15
2. 液态水	16
3. 水汽	18
4. 冰	18
5. 结合水	19
1.5 混合介质公式和介电常数的结构相关性.....	22
1. 结构无关性混合介质公式	22
2. 结构相关性混合介质公式	22
1.6 生物组织的介电特性.....	30
1.7 复介电常数与复折射率的关系.....	34
1.8 多参数测量.....	35
1. 介电常数的测量	35
2. 独立测量数	36
3. 辅助测量	36
4. 微波多参数测量法	37
5. 简化法	39
6. 湿空气	41
7. 湿木材	42
1.9 材料介电特性的特点.....	43

1.10 介电常数的实验室测量方法	43
1. 集中电路法	43
2. 谐振法	45
3. 传输线法	47
4. 自由空间波法	48
1.11 不同材料的测量方法	49
1. 材料的不同状态	49
2. 测量参量的控制	50
3. 根据样品的 ϵ_r 范围选取测量方法...	50
1.12 测量方法示例	50
1. 短路同轴线的变频率法	50
2. 样品置于同轴线终端	51
3. 重入式同轴腔	52
4. 螺旋线同轴腔	52
5. 匹配负载波导	53
6. 矩形腔 $TE_{1,0}$ 模微扰法.....	53
7. 同轴线传输法	54
8. 自由空间传输法	54
9. 封闭腔与准光开放腔的比较	54

第二章 微波谐振传感器及相关的检测电路

2.1 微波谐振传感器的电磁特性及其等效电路.....	55
1. 微波谐振传感器的电磁特性	55
2. 谐振传感器接入电路的方式及其等效电路	67
3. 谐振传感器电路的频率响应	69
4. 谐振传感器电路的性能	73
2.2 集中参数裂环谐振器.....	74
2.3 圆柱腔中的 $TM_{0,10}(E_{0,10})$ 模.....	77
1. 位于 $TM_{0,10}$ 模圆柱腔中的圆柱样品	74
2. 用圆柱腔中 $TM_{0,1p}$ 单模或多模同时作为材料加热和特性检测	80
2.4 圆柱腔中的 $TE_{0,1p}(H_{0,1p})$ 模.....	86
1. 位于 $TE_{0,1p}$ 模圆柱腔中的圆柱样品...	86
2. 位于 $TE_{0,1p}$ 模圆柱腔中的圆盘样品...	87

3. 厚样品测量法	90	2.23 波导-介质谐振器	163
4. 测量介质损耗的传输法	94	1. TM_{010} 模波导-介质谐振器	163
2.5 TE_{011} 模螺旋谐振腔	97	2. 消逝模介质基片测试架	165
2.6 超导谐振腔	98	3. HE_{110} 模波导-介质谐振器(正交简并模)	166
1. 超导谐振腔的 Q_0 值	98	2.24 介质柱谐振器(DPR)和介质管谐振器(DTR)	168
2. 超导谐振腔谐振频率的温度漂移	100	1. 介质柱谐振器	168
3. 用超导谐振腔研究介质和半导体的特性	102	2. 介质管谐振器	172
2.7 矩形谐振腔	103	2.25 介质谐振器和铁磁谐振器传感器	173
2.8 同轴谐振腔	106	1. 介质谐振器传感器	173
2.9 全部填充被测材料的谐振腔	107	2. 铁磁谐振器传感器(YIG-FMR)	175
2.10 端接无限长样品法	108	2.26 谐振传感器谐振频率和 Q 值的测量	177
2.11 单端开口谐振腔	111	1. 基本测量方法	178
2.12 单端开口分层介质谐振腔	113	2. 谐振测量方法的分析	181
2.13 开孔谐振腔	116	3. 谐振测量法中的一些实际问题	187
2.14 两端开口谐振腔	120	2.27 谐振传感器无源(或被动式)谐振测量系统	187
1. 两端加分隔器的开口腔	120	1. 单通道无源谐振测量系统	187
2. 加介质套管的两端开口腔	121	2. 双通道无源谐振测量系统	192
2.15 空间偏振正交简并模谐振腔(偏振简并双模腔)	124	2.28 谐振传感器的谐振频率无源跟踪系统	194
1. 方截面矩形腔二重偏振正交简并模在各向异性检测中的应用	125	1. 利用谐振传感器对调频微波信号的传输和反射响应的谐振频率无源跟踪系统	194
2. 圆柱腔中二重偏振正交简并模 TE_{111} 的应用	132	2. 利用谐振传感器传输的相移特性的无源跟踪检测系统	197
2.16 圆球腔	136	2.29 谐振传感器有源(或主动式)检测系统	198
1. 各向同性介质分层填充圆球腔	137	1. 谐振传感器作为振荡器稳频腔的有源检测系统	198
2. 旋(电、磁)性样品使简并本征频率的分裂	140	2. 传感器作为反馈振荡器选频反馈元件的有源检测系统	200
2.17 简并模或非简并模双模谐振腔	142	第三章 导波传输传感器及其检测电路	207
1. 圆柱腔 TE_{111} 和 TM_{111} 简并模传感器	142	3.1 概论	207
2. 矩形开口谐振腔正交双模传感器(偏振正交非简并)	146	3.2 金属波导管传输传感器及其检测电路	208
3. 用于双通道测量的双模腔	148	1. 金属波导管反射式传输传感器	208
2.18 谐振腔谐振脉冲数传感器	149	2. 金属波导管传输式传输传感器	229
2.19 多模微扰金属管内形综合	154	3. 金属波导管传输式传感器用于半导	
2.20 带状谐振器	157		
1. 微带谐振器	158		
2. 带状线谐振器	158		
3. 双导体带状线谐振器	159		
2.21 双导线谐振器	161		
2.22 开槽线谐振器和共面波导谐振器	162		

体材料的电物理参数测量	236
3.3 慢波传输线传感器	250
1. 当 $\frac{L}{\lambda_g} < 1$ 时, 用螺旋线中的慢波来 测量材料的 ϵ' 和 $\tan\delta$	250
2. 当 $\frac{L}{\lambda_g} \geq 1$ 时, 用螺旋线中的慢波来测 量材料的 δ	255
3.4 带状传输线传感器及其检测电路	264
1. 微带反射式传感器及其检测电路	264
2. 微带传输式传感器	267
3. 耦合带状线正交 TEM 模传感器及其 检测电路	271
3.5 介质波导传感器	272
1. 无限长圆柱介质波导中的模式	272
2. 混合模 HE_{mn} 或 EH_{mn} 的基本性质	274
3. 用介质波导来测量材料的 ϵ_r	276
4. 样品横截面上复介电常数不均匀度 的测量	281
5. 旋(电、磁)性媒质的法拉第旋转的测 量	281
6. 半导体材料的螺旋波无损检测法	285
7. 平板介质波导和矩形介质波导传感 器及其检测电路	286
8. 位于输送管道中的介质波导传感器	293
9. 径向介质波导	293
10. 介质波导电磁场的液晶显示和探伤	295
11. 介质波导 HE_{11} 模木板节疤探测器	297
3.6 表面电磁导波传感器	298
1. 导电基片上介质膜的 ϵ_r 和厚度 d 的 测量	299
2. 表面电磁导波测湿传感器	303
3.7 传输传感器的测量电路和系统	304
1. 传输传感器传输幅度特性的测量电 路	304
2. 传输传感器传输相位特性的测量电 路	306
3. 传输传感器传输幅度相位特性的测 量	314
第四章 反射传感器-样品盒与探头	323
4.1 概论	323

4.2 集中电容样品盒	327
4.3 同轴线-截止圆波导样品盒	328
4.4 同轴线-圆波导样品盒	330
4.5 屏蔽开路同轴线样品盒	332
4.6 微同轴探针	333
4.7 开口波导微波探头概述	334
1. 开口波导的电磁场分析	335
2. 开口波导的模式	335
3. 开口波导的等效电路	335
4. 带法兰和不带法兰的开口	336
4.8 开口波导的普遍理论	336
1. 开口波导的内、外电磁场	336
2. 点匹配法	339
3. 矩量法	339
4. 变分法	339
5. 特征模式法	340
6. 多项式近似法	343
4.9 常用开口波导探头的分析	346
1. 开口同轴探头	346
2. 开口圆波导	347
3. TE_{10} 模开口矩形波导	351
4. 用开口波导检测分层材料	352
5. 有耗媒质中开口同轴线的等效电路	355
6. 电容探头	356
4.10 开口谐振腔探头	358
4.11 消逝模探头和检测系统	361
4.12 利用裂纹微波非线性的探伤仪	363
4.13 铁磁谐振探头	364
4.14 测量复反射系数 $\hat{\Gamma}$ 的微波电桥系 统	364
4.15 微波双通道反射计	366
4.16 有源探头	367
第五章 非电量的时域检测法	370
5.1 引言	370
5.2 时域波谱学	371
1. 时域波谱学的理论基础	371
2. 时域波谱的测量方法和系统	375
5.3 基带脉冲技术	394
1. 电磁导波时域反射计	394
2. 基带接收机	395
3. 自由空间基带脉冲雷达	397
5.4 探地基带脉冲雷达	399

1. 概述	399
2. 有耗媒质中电磁波的传播特性	400
3. 探地基带脉冲雷达系统	405
第六章 微波、毫米波光学和准光传感器以及自由空间波检测法	425
6.1 单色平面波在各种媒质中的传播特性	425
1. 均匀各向同性电离气体-气态等离子体	425
2. 固态等离子体	427
3. 均匀各向异性媒质	428
4. 旋(电、磁)性媒质	433
6.2 微波的聚焦, 微波光学传感器	440
1. 非聚焦微波波束辐射传感器	440
2. 聚焦微波波束辐射传感器	445
6.3 毫米波、亚毫米波准光传感器和准光元件的特点和分类	453
1. 毫米波、亚毫米波准光传感器和准光元件的特点	453
2. 毫米波、亚毫米波准光传感器和准光元件的分类	453
6.4 高斯波束和波束波导	454
1. 高斯波束	454
2. 高斯波束的聚焦和变换	457
3. 介质透镜波束波导	460
6.5 介质管波导和金属介质波导	463
1. 介质分界面、分层介质和金属介质层的反射	463
2. 圆柱介质管波导	465
3. 矩形金属介质波导	466
6.6 准光元件	469
1. 波束波导准光元件	469
2. 介质管波导准光元件	475
6.7 准光开放谐振腔	479
1. 平行平面镜开放谐振腔	480
2. 准光开放谐振腔	481
6.8 准光开放腔(和超导管)的 Q 值测量	489
1. 传输(或反射)幅度响应法	480
2. 传输(或反射)相位响应法	494
3. 自由振荡衰减时间法(缩减法或瞬态法)	498

4. Q 值微小变化的比较测量法	500
6.9 准光开放腔的检测电路与系统	501
1. 用准光开放腔测量均匀、各向同性介质片材料	501
2. 用准光开放腔测量各向异性薄膜的介电常数张量	504
3. 谐振准光波束偏振仪	507
4. 带有正交相位滤波样品盒的准光腔	513
5. 气体转动波谱仪	515
6. 准光腔毫米波磁共振谱仪	519
7. 用准光腔测量铁氧体材料的物理参数	526
8. 准光腔用于对介电、半导体和导电样品的检测	528
9. 准光腔用于超导材料和薄膜的测量	529
10. 准光腔在气体等离子体诊断方面的应用	529
11. 用近共焦腔测量小距离和金属板厚度	540
12. 用准光腔测超细导线直径	542
6.10 介质材料的空间波测量法	544
1. 介质材料空间波测量法的理论基础	544
2. 介质板或介质层厚度的测量	550
3. 介质材料中含水量的检测和湿度计	551
6.11 等离子体的空间波检测法、微波波导干涉计	552
1. 相位调制微波干涉计	553
2. 极坐标显示微波干涉计	553
6.12 准光波束波导毫米波、亚毫米波波谱仪及其它检测系统	553
1. 材料参数与可测得的电磁波参数间的关系	554
2. 波束波导波谱仪的特点	556
3. 波谱仪基本测量方法的分析	559
4. 准光波束波导波谱仪的各种测量电路	562
5. 半导体中自由载流子浓度和迁移率的准光波束波导测量系统	567
6. 测量幅度、相位和偏振态的介质管波	

导干涉计	570	6.21 微波有源成象	621
6.13 空间偏振波检测法	571	1.全息	621
1.用空间偏振波检测介质材料的各向异性	571	2.微波层析	626
2.压电陶瓷非均匀极化的偏振波检测法	578	附录	626
3.各向异性媒质中应力和形变的空间偏振波检测法	580	1.矩形和圆柱形金属波导中的电磁模式	626
4.介质材料中局部缺陷的空间偏振波检测法	588	2.金属谐振腔	629
6.14 介质材料和构件的微波、毫米波无损探伤	592	3.谐振腔反射响应的信号流图解法	630
1.介质材料和构件中缺陷的物理特性及其探伤法	592	第七章 椭圆偏振波的传感与检测 (毫米波、亚毫米波椭圆偏振检测法)	632
2.介质材料和构件的反射式探伤法	594	7.1 毫米波、亚毫米波椭圆偏振检测法的物理基础	632
3.透射式多参量探伤	595	1.椭偏参数和椭偏方程	632
4.微波内窥和成象	597	2.毫米波、亚毫米波段椭偏法的特点	633
6.15 金属表面开口裂纹的毫米波无损探伤	598	3.毫米波、亚毫米波段椭圆偏振仪的主要元件	634
1.金属表面裂纹的电磁散射	599	7.2 反射椭偏法	635
2.金属表面开口裂纹的毫米波无损探伤仪	605	1.样品的电磁模型	635
6.16 金属板厚度测量和目标的小位移测量	606	2.金属基片-介质薄膜系统的计算关系式	635
1.空间波法金属板测厚系统	606	3.介质基片-金属薄膜系统的计算关系式	645
2.小位移的空间波测量法	607	4. Drude 近似	649
6.17 调频连续波检测法	607	5.基片和薄膜性能对反射波偏振特性的影响	651
1.用调频电磁波探测地层剖面	607	6.介质基片-介质薄膜系统的计算关系式	657
2.调频连续波物位仪和高度表	609	7.3 椭偏参数的测量方法	658
6.18 微波多普勒传感器	610	1.实验装置	658
1.单个孤立运动目标的测量	610	2.测量方法	660
2.微波多普勒传感器流量计	611	3.检测金属薄膜的椭偏仪	661
3.流体中微粒的多普勒散射检测仪	611	7.4 透射式椭偏法	662
6.19 调制散射体检测技术	612	7.5 透射干涉椭偏法	664
6.20 物体热辐射探测-无源传感器	612	7.6 p 和 s 分量反射系数相对相位的测量法	666
1.微波辐射计理论基础	612	参考文献	668
2.测量表层下辐射的辐射计	616		
3.辐射计传感器的应用	618		

第一章 物质的介电特性和介电参量

非电量的射电检测是通过传感器与被测物质或物体间的电磁相互作用进行的,因此在研究微波传感器之前,首先要对物质和物体的电磁特性和电磁参量进行研究,尤其要找它们的电磁特性与非电磁特性间,电磁参量与非电参量(如密度、湿度和温度等)间的确切关系。物质可分为天然的、人造的和生物的三大类;而它们所处的物理状态则可分为固态、液态、气态、凝聚态、等离子态和快离子导体等,在科学技术应用中广泛使用金属、半导体、介质和铁氧体、铁电体等材料。在生物医学的诊断、治疗和研究中,则要检测在体(或体内, in vivo)和离体(或体外, in vitro)的生物组织和生物体。因此为了对这些物质进行无损或无损、接触或非接触、在位或非在位、在线或非在线、在体或非在体的检测、诊断和评价,都必须研究物质的介电特性。

1.1 物质的组成关系

任何物质在电磁场中所呈现的电磁特性均可由下列的组成关系式和参量 (Constitutive Relations and Parameters) 表示

$$\begin{cases} \mathcal{D} = \mathcal{D}(\mathcal{E}) \\ \mathcal{B} = \mathcal{B}(\mathcal{H}) \\ \mathcal{J} = \mathcal{J}(\mathcal{E}) \end{cases} \quad (1.1)$$

式中 $\mathcal{D}$ 、 $\mathcal{B}$ 、 $\mathcal{J}$ 、 $\mathcal{E}$ 和 $\mathcal{H}$ 是满足麦克斯韦方程的电磁场矢量瞬时值。它可从物质的微观结构导出,也可由宏观的实验求出。在自由空间(真空)中,式(1.1)简化为

$$\begin{cases} \mathcal{D} = \epsilon_0 \mathcal{E} \\ \mathcal{B} = \mu_0 \mathcal{H} \\ \mathcal{J} = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

式中 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 是真空的介电常数, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 是真空的导磁率。在某些条件下,许多物质的组成关系为简单的比例关系,称为简单物质,这时组成关系式为

$$\begin{cases} \mathcal{D} = \epsilon \mathcal{E} \\ \mathcal{B} = \mu \mathcal{H} \\ \mathcal{J} = \sigma \mathcal{E} \end{cases} \quad (1.3)$$

式中 ϵ 为该物质的介电常数(电容率), μ 为导磁率, σ 为电导率,这三者是物质的主要电磁参量。

通常,物质可按 ϵ 、 μ 和 σ 的大小分类, σ 大的称为良导体, σ 小的为绝缘体或电介质,介于两者之间的为半导体。理想的导体 $\sigma \rightarrow \infty$, 理想的介质 $\sigma = 0$, 而良导体的 ϵ 很难测量。

当组成关系式可用下列线性微分方程式表示时,称该物质是线性的,这时

$$\begin{cases} \mathcal{D} = \varepsilon \mathcal{E} + \varepsilon_1 \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \varepsilon_2 \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial t^2} + \dots \\ \mathcal{B} = \mu \mathcal{H} + \mu_1 \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial t} + \mu_2 \frac{\partial^2 \mathcal{H}}{\partial t^2} + \dots \\ \mathcal{J} = \sigma \mathcal{E} + \sigma_1 \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \sigma_2 \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial t^2} + \dots \end{cases} \quad (1.4)$$

从上式可见,当 $\mathcal{E}$ 和 $\mathcal{H}$ 的时间导数很小可略时,则式(1.4)变为式(1.3),故式(1.4)是一般形式。

对于时谐电磁场, $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$, $\frac{\partial^2}{\partial t^2} = -\omega^2$, $\frac{\partial^3}{\partial t^3} = -j\omega^3$, $\dots$ 故广义线性的物质组成关系,用电磁场的复振幅 $\mathbf{D}$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{H}$ 表示为

$$\mathbf{D} = (\varepsilon + j\omega\varepsilon_1 - \omega^2\varepsilon_2 - \dots)\mathbf{E} \quad (1.5)$$

若令

$$\hat{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon + j\omega\varepsilon_1 - \omega^2\varepsilon_2 - \dots \quad (1.6)$$

则有

$$\mathbf{D} = \hat{\varepsilon}(\omega)\mathbf{E} \quad (1.7)$$

上式在形式上类似于简单物质方程,另外两个方程也具有相似的形式,即

$$\mathbf{B} = \hat{\mu}(\omega)\mathbf{H} \quad (1.8)$$

$$\mathbf{J} = \hat{\sigma}(\omega)\mathbf{E} \quad (1.9)$$

式中 $\hat{\varepsilon}(\omega)$ 、 $\hat{\mu}(\omega)$ 、 $\hat{\sigma}(\omega)$ 分别为该物质的复介电常数、复导磁率、复电导率。

1.2 物质的高频特性

在无源区,麦克斯韦复数场方程为

$$\begin{cases} -\nabla \times \tilde{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{z}}(\omega)\tilde{\mathbf{H}} \\ \nabla \times \tilde{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{j}}(\omega)\tilde{\mathbf{E}} \end{cases} \quad (1.10)$$

对于自由空间, $\hat{\mathbf{z}}(\omega)$ 及 $\hat{\mathbf{j}}(\omega)$ 取最简单的形式,即

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{j}}(\omega) = j\omega\varepsilon_0 \\ \hat{\mathbf{z}}(\omega) = j\omega\mu_0 \end{cases} \quad (1.11)$$

在非磁性金属中有

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{j}}(\omega) = \sigma + j\omega\varepsilon_0 \\ \hat{\mathbf{z}}(\omega) = j\omega\mu_0 \end{cases} \quad (1.12)$$

在良好介质中, $\sigma \rightarrow 0$, 于是有

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{j}}(\omega) = j\omega\hat{\varepsilon} \\ \hat{\mathbf{z}}(\omega) = j\omega\mu_0 \end{cases} \quad (1.13)$$

式中

$$\hat{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon' - j\varepsilon'' = |\hat{\varepsilon}|e^{-j\delta}; \quad \text{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

其中 ε' 是高频介电常数或电容率, ε'' 是介质损耗因子, δ 是介质损耗角, $\text{tg}\delta$ 为损耗正切。

在铁磁物质中

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{j}}(\omega) = \sigma + j\omega\hat{\varepsilon} \\ \hat{\mathbf{z}}(\omega) = j\omega\hat{\mu} \end{cases} \quad (1.14)$$

式中

$$\hat{\mu}(\omega) = \mu' - j\mu'' = |\hat{\mu}|e^{-j\delta_m}; \quad \text{tg}\delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (1.15)$$

在上列各式中, ϵ' 表征物质中电场能量的储存作用, 而 ϵ'' 则表征物质中电场的能量耗散, 即

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V \epsilon' |\tilde{E}|^2 dV \quad (1.16)$$

$$W_d = \int_V \omega \epsilon'' |\tilde{E}|^2 dV \quad (1.17)$$

μ' 表征物质中磁能的储存作用, μ'' 表征物质中的磁能耗散, 即

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \mu' |\tilde{H}|^2 dV \quad (1.18)$$

$$W_{dm} = \int_V \mu'' |\tilde{H}|^2 dV \quad (1.19)$$

物质中的传导电流为 $\tilde{J} = \sigma \tilde{E}$, 对于非理想介质其 $\sigma \neq 0$, 故也有一定的传导电流, 但很小。在自由空间中, 不存在电荷, 故只有空间的位移电流, 即

$$\tilde{J} = j\omega \epsilon_0 \tilde{E} \quad (1.20)$$

在介质中, 除上述位移电流外, 还有因介质极化引起的电流, 即

$$\tilde{J} = j\omega(\epsilon - \epsilon_0)\tilde{E}$$

由于 $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, 因此

$$\tilde{J} = \hat{\sigma} + j\omega\epsilon = \sigma + j\omega(\epsilon' - j\epsilon'') = (\sigma + \omega\epsilon'') + j\omega\epsilon' \quad (1.21)$$

故与 $\tilde{E}$ 同相的电流为

$$\tilde{J} = (\sigma + \omega\epsilon'')\tilde{E} \quad (1.22)$$

而与 $\tilde{E}$ 正交的电流分量为

$$\tilde{J} = j\omega\epsilon'\tilde{E} \quad (1.23)$$

1.3 介质的极化

电介质可分为两大类, 即非极性介质和极性介质, 现分别讨论之

(1) 非极性电介质

物质的分子均由原子(原子团或离子)所组成, 每个原子均带有等量的正电荷和负电荷。当物体的体积足够大而又无外电场时, 物质呈中性, 即任何物质分子的电荷代数和为零。但是, 不同物质分子电荷在空间的分布是不同的。当无外加电场作用时, 分子的正电荷重心和负电荷重心相重合, 该分子称为非极性分子, 由非极性分子组成的电介质称为非极性电介质。

(2) 极性电介质

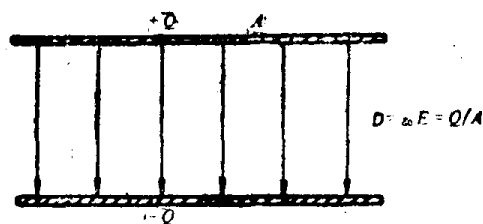
当无外加电场时, 分子的正、负重心不重合者, 即分子具有偶极矩, 这种分子称为极性分子, 极性分子组成的电介质称为极性电介质。

电介质分子极性的大小取决于分子的化学结构, 分子结构对称时为非极性的; 反之, 分子结构不对称时则为极性的。

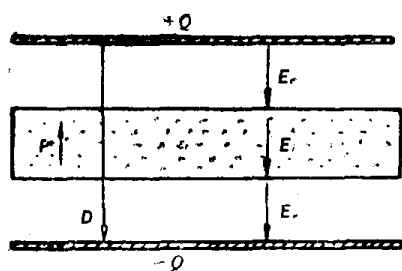
1. 相对介电常数和边界条件

由各种带电粒子构成的正常物质在宏观区域是呈现电中性的。当在该区域加上外加

电场 E_e 后,带电粒子在外场力作用下,使其略微偏离先前的平衡位置,正、负电荷向相反方向移动,使该区域极化。由于这种极化作用,部分抵消了外场的作用,使极化区域的内场 E_i 要比外场 E_e 小。物质的相对介电常数 ϵ_r 表示这种极化效应与场强的关系,也即表示物质易于极化的程度。



(a) 平板电容器



(b) 平行介质片部分加载电容器

图 1.1 平板电容和介质片部分加载电容的充电过程

在图 1.1 (a) 所示的表面积为 A 的平板电容上,用 $+Q$ 和 $-Q$ 电荷充电,则在极板间由电荷 Q 所产生的电感应强度为 D ,若不考虑平板电容边缘电场,则极板间的 D 值为

$$D = \frac{Q}{A} \quad (1.24)$$

可见电感应强度 D 与电荷有关,而电荷间的作用力则正比于电场强度 E ,据定义在真空中 E 和 $\bar{D}$ 间的关系为

$$E = \frac{1}{\epsilon_0} D \quad (1.25)$$

式中 ϵ_0 是真空的介电常数。

若将介质片平行插入电容极板之间,如图 1.1(b) 所示,则在电场力的作用下,将使介质板中的电荷沿电力线方向移动,这种电荷位移,使介质片内产生单位体积的电偶极矩为 p 。也称为极化强度,在各向同性介质内,其方向与 D 相反,故有相消的作用,使得介质内的平均内场减小,即

$$\begin{cases} E_i = \frac{1}{\epsilon_0} (D + p) & (\text{矢量形式}) \\ E_i = \frac{1}{\epsilon_0} (D - P) & (\text{标量形式}) \end{cases} \quad (1.26)$$

若单位容积内每种电荷 q 的数目为 N ,在外电场作用下,正、负电荷间的位移为 δ ,则由此形成的极化强度为

$$P = Nq\delta \quad (1.27)$$

位移 δ 正比于局部内电场 E_i ,而 E_i 不一定等于 E_e ,它与物质的内部结构有关,故极化强度通常可写成

$$P = N\alpha E_i \quad (1.28)$$

式中 α 为原子或分子的极化率。

极化效应可表示为介电常数的变化,因据式(1.26)可写成

$$E_i = \frac{1}{\epsilon_0} (D - P) = \frac{1}{\epsilon} D = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} D \quad (1.29)$$

式中 ϵ_r 为相对介电常数, 是物质相对于真空的介电常数之比

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.30)$$

在本书以下各章中为简明起见, ϵ_r 的下标常略去, 但仍表示相对介电常数。

从式 (1.28) 和 (1.29) 可得相对介电常数 ϵ_r 的关系式

$$\begin{cases} \epsilon_r \epsilon_0 E_i = D = \epsilon_0 E_i + P \\ \epsilon_r = 1 + \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{P}{E_i} \\ \epsilon_r = 1 + \frac{N\alpha}{\epsilon_0} \cdot \frac{E_i}{E_i} \end{cases} \quad (1.31)$$

从上式可见, ϵ_r 是物质极化率的量度, 而它又与物质的内部结构有关。

在图 1.1(b) 所示的极板与介质片之间的电场强度仍按式 (1.25) 计算, 故从式 (1.29) 可得介质片中的平均内场与外场的关系为

$$E_i = \frac{E_e}{\epsilon_r} \quad (1.32)$$

上列关系式只是对垂直于介质表面的电场法线分量才成立, 而不管该介质材料颗粒的大小或表面曲率的大小, 因此具有局部性。若该表面是不同介质的分界面, 则有下列关系式

$$\frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} \quad (1.33)$$

式中下标 n 为法线方向电场分量, 式 (1.33) 就是在介质分界面上的电场法线分量的边界条件。

利用图 1.2 的模型可导出电场切向分量的边界条件, 根据能量守恒原理和静电场方程 $\nabla \times \mathbf{E} = 0$, 从介质片外部和从介质片内部测得的两极板间的电压 V 是相等的, 故介质内的电场 E_i 和介质片外部的电场 E_e 是相等的。若无介质极化效应, 这一结论似乎与图 1.1(b) 所导出的结论有矛盾。实际上这时由于极板上电荷的重新分布, 使得处于介质片上方的极板部分产生的电荷的积累, 因此使该处 D 增加, 以抵消极化效应。结果可得到电场切向分量的边界条件

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (1.34)$$

以上分析皆基于静电场, 但若所研究的区域线度比波长小得多时, 对时谐电磁场仍然有效, 而边界条件通常也是局部性的。但时谐场与静电场的基本区别是用时变的复量表示, 因此, 时谐场中的介电常数将是一个复量

$$\hat{\epsilon}_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r = \epsilon'_r (1 - j\tan\delta) \quad (1.35)$$

在损耗媒质中, 其内部电荷在微波电场作用下位移摩擦, 使电磁能逐步转化为热能, 其转化的多少可用 ϵ''_r 或 $\tan\delta$ 来度量。这种转化损耗使传播波逐渐衰减, 使电磁振荡受到阻尼。 ϵ''_r 通常为正值, 且比 ϵ'_r 小得, $\epsilon''_r = 0$ 时为无耗情况。 ϵ'_r 影响传播波的电场, 从而使得电、磁场的比值改变, 也即使波阻抗改变。另外, ϵ'_r 还要使电磁波的传播速度减

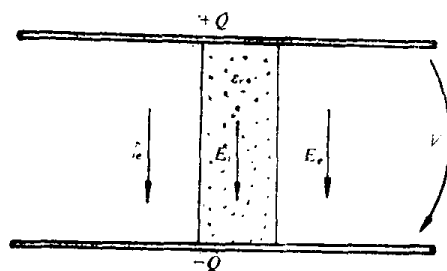


图 1.2 垂直介质片部分加载电容器