

WEIBO JIANCE JISHU

微波 检测技术

■ 周在杞 周克印 许会 编著



化学工业出版社

WEIBO JIANCE JISHU

微波

检测技术

■ 周在杞 周克印 许会 编著

TG115.28/12

2007



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书根据作者多年科研成果总结并参考国内外该领域的相关资料编写而成。

全书内容包括微波辐射基础、微波信号源、微波传感器、微波元件、介质特性微波测量、微波与物质相互作用、微波检测基本原理、微波检测主要方法、微波检测仪器设备、微波检测应用、微波成像及其在检测中的应用等。

全书取材先进,内容新颖,资料翔实,条理清晰,理论联系实际,既论及微波与物质相互作用机理,又重视微波检测方法及其应用实例。

本书的主要读者对象为化工、机械、电力、冶金、石油、地质、矿业、交通以及国防工业等从事无损检测、地球物理研究和复合材料工程质量安全控制的广大企事业工程技术人员。也可作为高等院校电子信息工程和测控与仪器仪表类的专业课程教材使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

微波检测技术/周在杞,周克印,许会编著. —北京:
化学工业出版社, 2007. 8

ISBN 978-7-122-00921-0

I. 微… II. ①周…②周…③许… III. 微波无损检验
IV. TG115. 28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 116822 号

责任编辑: 邢 涛

文字编辑: 杨欣欣

责任校对: 李 林

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市延风装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张 16¼ 字数 441 千字

2008 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

前 言

微波检测是以微波物理学、电子学和微波测量技术为基础的一门微波技术应用学科。这是信息科学与材料工程科学交叉结合的前沿和边缘学科,以微波作为信息载体,对各种适用材料构件或产品进行检测。微波检测作为质量和安全控制新技术,在非金属、复合材料、金属表面检验、测量,土木工程、高速公路、地下矿藏透视以及考古发掘等领域将越来越重要。在科学研究中,也越来越多地应用该技术手段。微波检测已成为一门新兴的独立的综合性技术。

本书是作者在长期科研和教学工作实践基础上编写完成的。自1986年《微波检测》一书出版20年来,微波检测技术有了迅猛发展。作者在微波技术应用科研生产实践中,深感至今国内外还没有一本比较全面叙述微波检测技术的专著,也缺乏适合于科技研发和工业企业人员、大学教师、研究生以及大学生使用的微波检测类书籍,涉及这方面的相关论著大多零星地发表在各种期刊杂志和外国文献资料中。

本书根据作者多年微波检测技术学科深入研究的成果,讲述理论、原理、方法、仪器及其应用等问题。突出重点在“微波与物质相互作用”机理的描述,及微波方法用于材料检验、产品及工艺性能测试等领域的实例。本书将对本学科的发展和推广起到促进作用。

在本书编著过程中,周在杞教授编写了第一、八、十、十一章,并负责全书的修改和统稿;周克印教授编写了第五、六、七章,许会教授编写了第二、三、四、九、十二章。南京航空航天大学陈达院士、苏州大学钱霖教授在百忙中认真仔细地审阅了全书,提出了宝贵意见,在此表示诚挚的谢意。同时,周宇先生为本书收集了大量的有关资料,并在书稿录入方面付出了辛勤劳动;还有很

多研究生帮助绘图，在此一并致谢！最后，作者还要特别感谢中国无损检测学会理事长沈建中博士和其他同仁的关心和指导。

由于作者水平有限，本书难免存在不妥之处，欢迎读者批评指正。

编著者

2007 年 5 月

目 录

符号表	1
第一章 绪论	4
第一节 概述	4
一、微波	4
二、微波的基本特点	4
三、微波的应用范围	6
第二节 微波检测的特点	8
第二章 微波辐射基础	12
第一节 微波辐射	12
一、微波辐射	12
二、微波天线	15
第二节 微波辐射方向图测量	17
一、天线辐射场区	17
二、天线方向图测量	19
第三章 微波信号源	23
第一节 微波振荡器分类	23
一、概述	23
二、分类	23
第二节 微波固态信号源	26
一、雪崩二极管振荡源	26
二、体效应二极管振荡源	29
三、负阻振荡器的频率调谐	37
第四章 微波传感器	42
第一节 微波传感器的分类	42
一、概述	42

二、分类	42
第二节 微波传感器	43
一、常用微波传感器	43
二、微带传感器	57
第五章 微波元件	67
第一节 概述	67
一、分类	67
二、用途	67
第二节 常用微波元件	68
一、连接元件	68
二、转换元件	71
三、短路活塞	73
四、微波电阻	73
五、相移器	76
六、微波桥路	76
七、阻抗变换器	84
八、检波器	92
九、定向耦合器	93
第六章 介质特性微波测量	102
第一节 概述	102
第二节 介质特性参数测量	103
一、波导法	103
二、终端短路法	104
三、终端短路法测量结果的近似计算	109
四、终端短路“开路”法	113
五、长试样法	116
六、网络法	117
七、介质试样的制备	123
八、按波导法测量介电常数时的误差	123
九、谐振空腔法测量技术	127
十、在 H_{01n} 谐振器中测量盘形介质试样	128

十一、在 H_{01n} 谐振器中测量杆形介质试样	132
十二、在 E_{01n} 谐振器中测量杆形介质试样	135
十三、在谐振器中测量小试样（微扰法）	136
第七章 微波与物质相互作用	141
第一节 介电常数与介质损耗角正切	141
一、介电常数与介质极化	141
二、介电常数与介质损耗角正切	141
第二节 地物、大气的微波特性	145
一、物体的电磁波谱特性	145
二、大气对微波传播的影响	146
三、地物对微波的作用	146
第三节 各向异性系统与微波的相互作用	147
一、均匀电子注中的电子波	147
二、磁化铁氧体中的均匀波	149
第四节 微波与等离子体的相互作用	153
一、微波在无磁场等离子体中的传播	153
二、磁场效应	158
三、离子运动、碰撞和温度效应	164
第八章 微波检测基本原理	168
第一节 谐变电磁场中的媒质特性	168
一、复介电常数的概念	168
二、媒质的介电频率特性	170
三、媒质的导电频率特性	175
四、媒质的分类	176
第二节 微波在无界均匀介质中的传播	178
一、理想介质中的均匀平面波	178
二、有耗介质中的均匀平面波	180
第三节 微波在半无界均匀介质平面上的反射与折射	183
一、对介质平面的垂直入射	183
二、对介质平面的斜入射	188
第四节 微波对单层介质板的反射与透射	191

一、反射系数与透射系数	191
二、垂直入射情况的讨论	197
第五节 微波对多层介质板的反射与透射	202
一、特征矩阵	202
二、反射系数与透射系数	205
三、对称三层介质板无反射公式	206
第六节 微波垂直入射到平面多层旋波媒质的反射	209
一、概述	209
二、平面多层旋波媒质的反射	209
三、数值计算及分析	210
第七节 复数折射角物理论析	213
一、从无耗介质入射到有耗介质	213
二、从有耗介质入射到无耗介质	214
三、全反射	215
四、入射角为复数, 介质 1、介质 2 均为有耗情况	216
第八节 微波在各向异性媒质中传播	218
第九节 脉冲波在色散媒质中传播	220
一、色散媒质差分迭代公式	220
二、色散媒质脉冲波传播	221
三、地下目标回波模拟计算	222
第十节 微波检测的物理特性	224
一、微波检测的物理基础	224
二、微波的似光性和近声性	235
三、各种检测原理比较	237
第九章 微波检测主要方法	239
第一节 微波检测方法分类	239
第二节 微波检测主要方法	241
一、微波穿透法	241
二、微波反射法	245
三、微波散射法	249
四、微波干涉法	250

五、微波涡流法	257
六、微波层析法	258
第十章 微波检测仪器设备	260
第一节 概述	260
一、系统组成	260
二、微波传感器	261
第二节 微波测湿仪	272
一、微波湿度传感器	272
二、微波测湿仪	273
第三节 微波测厚仪	278
一、金属测厚仪	278
二、非金属测厚仪	282
第四节 微波检测仪	286
一、微波探伤仪	286
二、微波检测仪	287
第五节 微波辐射计	297
第六节 微波干涉仪	300
一、概述	300
二、微波调制式条纹移动干涉仪	305
三、相位调制式条纹移动干涉仪	307
四、极图显示型干涉仪	307
五、直接读出相移的干涉仪	307
六、多道干涉仪	308
七、数字微波干涉仪	308
第七节 微波反射计	309
一、时域反射计	309
二、微波探地雷达	313
三、扫频反射计	315
第八节 微波测试仪	332
一、微波鉴频仪	332
二、微波测碳仪	337

三、微波煤粉流量计	342
四、微波火检监测装置	344
五、微波应答器-阅读器	348
六、微波介电常数测试仪	354
七、毫米波光谱仪	357
八、微波载流子寿命测定仪	359
九、其他	360
第十一章 微波检测应用	364
第一节 概述	364
第二节 微波检测应用实例	365
一、微波测湿	365
二、微波测厚	373
三、不连续性检测	384
四、评价材料结构的完整性	390
五、微波测温	408
六、微波测速	412
七、液位、料位和距离的检测	421
八、等离子体微波诊断	427
九、微波全息	436
十、其他应用	440
十一、新的 T 射线 (亚毫米波) 的应用	451
第十二章 微波成像及其在检测中的应用	453
第一节 微波成像技术	453
第二节 探地雷达成像技术	455
一、基本原理	455
二、探测方法	456
三、探地雷达图像的信息处理	458
四、探地雷达的应用条件及波形特征	459
五、研究热点	460
六、探地雷达产品及应用实例	460
第三节 微波断层成像技术	464

一、技术起源	464
二、发展现状与展望	464
第四节 微波断层成像机理	465
一、基本原理	465
二、电磁散射的数学模型	466
第五节 微波断层成像算法	471
一、谱域成像算法	471
二、非迭代空域成像算法	480
三、迭代空域成像算法	482
第六节 实验及仿真结果	491
一、谱域重建实验	491
二、DBIM、LSF 法成像实验结果	492
三、有限元共轭梯度法仿真试验结果	492
四、Levenberg-Marquardt 方法图像重建	493
五、ART 算法图像重建	496
六、GA 图像重建	497
附录	499
参考文献	504

符 号 表

量的符号	量的名称	法定计量单位	
		单位符号	单位名称
S	面积	m^2	平方米
s	驻波比(系数)		
n	面的法向单位矢量	m^2	平方米
V	体积、容积	m^3	立方米
m	质量	kg	千克(公斤)
t	时间	s	秒
	温度	$^{\circ}C$	摄氏度
θ	平面角	rad	弧度
Ω	立体角	sr	球面度
F	力	N	牛[顿]
f	力密度	N/m^3	牛[顿]每立方米
M, T	力矩	$N \cdot m$	牛[顿]米
L	角动量, 动量矩	$kg \cdot m^2/s$	千克二次方米每秒
v	速度	m/s	米每秒
Q	电荷[量], 电量 品质因数	C	库[仑]
ρ	电荷[体]密度 反射系数的模 [电压]驻波系数	C/m^3	库[仑]每立方米
φ	电势, 电位	V	伏[特]
U_m	磁势差	A	安[培]
U	电压	V	伏[特]
E	电动势	V	伏[特]
I, i	电流	A	安[培]
J	电流密度	A/m^2	安[培]每平方米
σ	电导率	S/m	西[门子]每米
E	电场强度	V/m	伏[特]每米

2 微波检测技术

续表

量的符号	量的名称	法定计量单位	
		单位符号	单位名称
Ψ	电通[量]	C	库[仑]
Φ	磁通[量]	Wb	韦[伯]
ψ	磁链	Wb	韦[伯]
D	电位移,电通[量]密度	C/m ²	库[仑]每平方米
ϵ	介电常数(电容率)	F/m	法[拉]每米
χ_e	电极化率	—	1
$\chi_m(\kappa)$	磁化率	—	1
p	电偶极矩	C·m	库[仑]米
P	电极化强度	C/m ²	库[仑]每平方米
p	动量	kg·m/s	千克米每秒
W	能[量],功,热量	J	焦[耳]
w	辐[射]能密度	J/m ³	焦[耳]每立方米
B	磁感应强度,磁通[量]密度	T	特[斯拉]
A	磁矢势,矢[量]势	Wb/m	韦[伯]每米
F_m	磁动势	A	安[培]
H	磁场强度	A/m	安[培]每米
μ	磁导率	H/m	亨[利]每米
m	磁[偶极]矩,[面]磁矩	A·m ²	安[培]平方米
M	磁化强度	A/m	安[培]每米
L	电感,自感	H	亨[利]
R_m	磁阻	H ⁻¹	每亨[利]
M	互感	H	亨[利]
C	电容	F	法[拉]
R	电阻	Ω	欧[姆]
X	电抗	Ω	欧[姆]
Z	阻抗	Ω	欧[姆]

符号表 3

续表

量的符号	量的名称	法定计量单位	
		单位符号	单位名称
G	电导	S	西[门子]
B	电纳	S	西[门子]
Y	导纳	S	西[门子]
f	频率	Hz	赫[兹]
ω	角频率,角速度	rad/s	弧度每秒
λ	波长	m	米
α	波数	m^{-1}	每米
α	波矢量	m^{-1}	每米
α	衰减系数	dB/m	分贝每米
β	相移系数,相位系数	rad/m	弧度每米
γ	传播系数	m^{-1}	每米
S	坡印廷矢量	W/m^2	瓦[特]每平方米
P	[有功]功率	W	瓦[特]
p	压力,压强	Pa	帕[斯卡]
η	效率	—	1
δ	损耗角	rad	弧度
	集肤深度	m	米
c	[真空中]光速	m/s	米每秒
n	折射率	—	1
Γ	反射系数	—	1
T	传输系数,透射系数		
	周期	s	秒
	热力学温度	K	开[尔文]
I	辐射强度	W/sr	瓦[特]每球面度
D	方向性系数	—	1
A	衰减[量]	dB	分贝
φ	相[位]差	rad	弧度

第一章 绪 论

第一节 概 述

一、微波

微波是一种波长很短，频率很高的电磁波。微波的电磁波谱，见表 1.1。

表 1.1 电磁波谱

电磁波的种类	频率/Hz	在真空中的波长/m
无线电波	$10^4 \sim 3 \times 10^6$	$3 \times 10^4 \sim 1$
微波	$3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{12}$	$1 \sim 10^{-4}$
红外线	$10^{12} \sim 3.9 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-4} \sim 7.7 \times 10^{-7}$
可见光	$3.9 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$	$7.7 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-7}$
紫外线	$7.5 \times 10^{14} \sim 5 \times 10^{16}$	$4 \times 10^{-7} \sim 6 \times 10^{-9}$
X 射线	$3 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{20}$	$10^{-8} \sim 10^{-12}$
γ 射线	$> 3 \times 10^{19}$	$< 10^{-11}$

微波也是频带很宽的电磁波。微波的频率通常从 300MHz 到 300GHz，相应波长从 1m 到 1mm。微波波段还可以进一步细分。表 1.2 列出了微波的几个主要波段。在微波检测中，为了达到应用的灵敏度，常用 X 波段和 K 波段，个别的（如对陶瓷的微波检测）已扩展到 W 波段。

二、微波的基本特点

（一）频率高

微波振荡频率每秒钟在 3 亿次以上，比低频无线电波频率高几个数量级。它既是频率很高的波段，也是频率极宽的波段。具有通

表 1.2 微波主要波段划分

波长代号	频率范围/GHz	在真空中波长/cm	标称波长/cm
L	0.390~1.550	76.9~19.3	50/23
S	1.550~5.200	19.3~5.77	10
C	5.200~8.200	5.77~3.66	5.5
X	8.200~10.900	3.66~2.75	3.2
Ku	10.900~18.000	2.75~1.67	2.0
K	18.000~36.000	1.67~0.834	1.25
Q	36.000~46.000	0.834~0.625	0.82
V	46.000~56.000	0.625~0.536	0.60
W	56.000~100.000	0.536~0.300	0.30

信容量高、抗干扰能力强及传递距离远等特点。受到调制的微波，其脉冲宽度可以做得极窄，能精确测量时间或距离。

1. 电子惯性

电子是有质量的，有质量就有惯性。电子在极间渡越时间约 10^{-9} s 数量级，比无线电振荡周期小得多。在电子渡越时间内，频率升高使得信号本身有可能由正变负或由负变正，甚至出现多次反射，从而使静电状态受到破坏。或因电子惯性使效率降低，甚至完全不能工作。

2. 时延效应

在低频电路中“时延”小于振荡周期，可忽略。但微波以光速传播，“时延”可与周期相比较，故不能忽略。在简谐振荡情况下，时延效应表现为电路中的各点具有不同的相位。

3. 集肤效应

高频电流仅仅沿着导线外表薄层通行。它流过的导线截面面积与低频相比大为减小，导线电阻大为增加，表现出很大的能量衰减。这种集肤效应促使空心管波导得到应用。

4. 辐射效应

当传输线长度可同工作波长相比时，它将显著地辐射电磁能量。在微波领域不用“路”的概念，而使用“场”的概念。器件线条与工作波长相比具有相同数量级。频率越高，辐射越强烈，损耗