

无损检测技术丛书

微波检测

国防工业出版社

无损检测技术丛书

微波检测

周在杞 编著

内 容 简 介

微波检测是六十年代发展起来的新的无损检测技术,具有快速、连续、非接触、不需要耦合剂进行检测的优点,特别适用于生产流水线自动监控,在国民经济中有着广泛的用途。

本书简要地介绍了微波检测的主要内容,包括基础知识、检测原理和方法、检测仪器及其应用实例。

本书文字通俗易懂,深入浅出,适合于从事无损检测专业工作的工人和技术人员阅读,也可以供有关专业技术人员参考。

无损检测技术丛书

微 波 检 测

周 在 杞 编 著

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张4¹/₄ 91千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷 印数: 0,001—2,450册

统一书号: 15034·3127 定价: 0.91元

前 言

无损检测是一门新兴的综合性科学技术。它以不损坏被检对象的使用性能为前提，应用物理和化学知识，对各种工程材料，零部件和产品进行有效的检验和测试，借以评价它们的完整性、连续性和其它物理性能。无损检测是实现质量控制、保证产品安全可靠、节约原材料、改进工艺、提高劳动生产率的重要手段，目前已成为产品制造和使用中不可缺少的组成部分。

现代科学技术的发展，为无损检测提供了新的理论和物质基础。目前能够在生产中应用的已有五十多种检测方法，在一些领域中还实现了由电子计算机控制的自动化。在我国实现四个现代化的进程中，无损检测技术的应用已日益受到重视，并有着广阔的发展前景。

为普及、推广无损检测技术，我们编写了一套《无损检测技术丛书》。这套丛书有如下十一个分册：

- 超声检测；
- 射线检验；
- 磁粉检验；
- 涡流检测；
- 渗透检验；
- 声发射检测；
- 激光全息检验；
- 微波检测；

红外检测；

胶接结构与复合材料的无损检测；

无损检测自动化与信息处理。

编写这套丛书的资料一部分来自生产、科研实践，一部分是参阅了国内外有关的技术书刊。在编写过程中曾得到编写组各成员所在单位的大力支持。本分册在编写过程中曾得到王登娣、吴忠、杨明纬、汤文才等同志的大力支持，徐得名、陈正发同志提供了许多资料，高级工程师陈明义、陈积懋同志以及冯树文工程师审阅了原稿，特别是洪友亭同志仔细校核和审查了全书，并在许多具体问题上给予指导和帮助，在此谨表深切的谢忱。

由于水平有限，书中缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

《无损检测技术丛书》编写组

目 录

微波检测的基础知识	1
一、什么是微波检测	1
二、微波检测基本设备	6
微波检测的原理和方法	28
一、微波检测基本原理	28
二、微波检测的主要方法及其分类	51
微波检测的主要仪器	66
一、微波检测仪	67
二、微波厚度计	70
三、微波湿度计	77
四、微波辐射计	81
五、网络分析仪	83
六、时域反射计	89
微波检测应用实例	99
一、评价材料和结构的完整性	99
二、微波测厚	111
三、微波测湿	115
四、微波测温	120
五、微波测速	123
六、其他应用	125

微波检测的基础知识

一、什么是微波检测

1. 微波及其应用

当大家兴致勃勃地坐在电视机荧光屏前观赏各种电视文艺节目的时候,可曾想过电视节目是怎样送到千家万户的呢?电视台是用微波装置,通过发射塔把电视节目的微波信号播发出去的。现在全国各地看到的北京电视节目,也是用微波通信机传送的。那么,微波是什么东西呢?微波是一种波长很短、频率很高的电磁波,它比无线电波的波长短得多。所谓“微”字,就是指波长很微小的意思。微波在电磁波频谱中的位置,见图1。

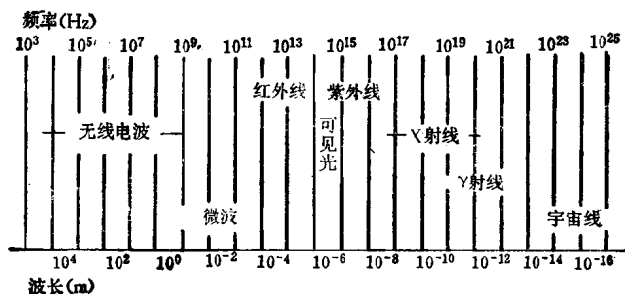


图1 电磁波频谱

微波也是频带很宽的电磁波,微波的频率通常从300兆赫到300吉赫,相应波长从1米到1毫米。微波波段可以进

一步细分为：分米波、厘米波和毫米波。它的频带相当于无线电波频带宽度的 299 倍。表 1 列出了微波的几个主要波段。为了保证各种业务顺利进行而不相互干扰，人们对频谱进行了划分，各种业务必须使用指定的频率范围。微波功率在加热、理疗方面应用所使用的频率范围为： 915 ± 25 兆赫、 2450 ± 50 兆赫、 5800 ± 75 兆赫和 2215 ± 125 兆赫。在微波检测中，为了达到应有的灵敏度，常用 X 波段和 K 波段，个别的（如对陶瓷的微波检测）已发展到 W 波段。

表 1 微波主要波段的划分

波 段	频率范围 (吉赫)	在真空中波长 (厘米)
L	0.390~1.550	76.9~19.3
S	1.550~5.200	19.3~5.77
X	5.200~10.900	5.77~2.75
K	10.900~36.000	2.75~0.834
Q	36.000~46.000	0.834~0.625
V	46.000~56.000	0.625~0.536
W	56.000~100.000	0.536~0.300

微波技术开始于1897年瑞利关于空心管中传播电磁波的理论工作，1938年维利安兄弟制造了第一只速调管。由于在第二次世界大战期间对于雷达的需要，微波技术得到迅速发展。为了对付德寇的潜水艇，英国科学家加紧研究微波电子管和雷达。1940年2月，伯明翰大学的布特和兰德尔两人开始研制出谐振腔磁控管，工作波长为9.8厘米，到1940年5月第一台10厘米波长的雷达问世，它能探测到11公里远处露出水面的潜望镜。微波雷达的迅速发展，使希特勒的潜水艇受到沉重打击。战后，微波技术在雷达、导弹制导、导航、通讯、电视广播、电子对抗、天文、气象、遥感遥测、工农业

以及科学研究等方面的应用，更加广泛，见表 2。

2. 微波检测的特点

第二次世界大战以来，由于雷达的进步，微波技术发展很快，并渗透到工业检测领域中来，五十年代微波湿度计问世，揭开了微波检测技术历史的第一页。随着复合材料在航空和宇航工业中大量使用，六十年代初期在微波技术广泛用于测湿的同时也开始了无损检测领域的应用。1963年在美国首先使用微波法成功地检测“北极星”A₃导弹固体火箭发动机玻璃钢壳体内部缺陷。从此，微波检测技术引起了工程界的广泛兴趣，并发展了厚度等其他非电量的测量，显示了它作为质量检验和非电量测量工具的生命力。

微波检测技术是以微波物理学、电子学和微波测量技术等原理为基础的一门微波技术应用学科。它的研究内容以微波非通讯应用为主，包括微波检测方法和装置的基本原理、结构、类型、特点和适用范围（不包括微波能在加热干燥方面的应用）。也就是，将微波作为传递信息的媒介，对各种可适用的材料、构件和产品进行非破坏性检测和故障诊断；对所需物理性能及技术工艺参数等非电量进行接触或非接触的快速测量。因此，微波检测技术涉及到工业检测中应用微波技术进行非破坏性检验和测量的许多领域。

微波检测具有能穿透声衰减很大的非金属材料的 特点，它适用于检测增强塑料、陶瓷、树脂、玻璃、橡胶、木材、固体推进剂、聚氨酯泡沫、化学制品、粮食、原油、纤维织物、纸张和各种复合材料；还可检测固体火箭发动机玻璃钢壳体、药柱、液体火箭发动机燃料箱等航天飞行器的零部件、玻璃钢船体、导流罩、化工容器和夹层结构件等。微波检测项目包括增强塑料和各种金属、非金属复合胶接结构与蜂窝

表 2 微波技术应用简介

领 域	应 用	原 理 及 特 点
雷达	航天雷达、炮瞄雷达、 导弹制导雷达、机载雷 达、低空雷达、远程预警 雷达、相控阵雷达、合成 孔径雷达以及气象雷达、 导航雷达、汽车防撞雷 达、盲人雷达、防盗雷 达、微波全息雷达、冰层 测厚雷达等	利用微波对目标进行探 测 和 定 位。雷达种类多、性能好、作用距 离远，有的还可对多个目标自动跟 踪和测定目标特性
通讯	微波多路通讯 微波中继通讯 散射通讯 卫星通讯	利用埋地圆波导传送 30~120 吉 赫微波信息、频带宽、损耗低、容 量大、距离远、保密性强 利用相距 40~60 公里设立中继站 按接力方式传递信息，可传送宽频 带信号，受外界干扰的影响小，成 本低 利用空中介质对微波散射进行超 视距离通讯，距离长达几百公里至 上千公里 利用卫星作中继站进行通讯，距 离远（上万公里），通讯容量大， 不受大气扰动影响
遥感	微波侧视成像雷达，微 波辐射计、散射计、高度 计等	利用微波作为信息传递媒介，根 据各种物质的微波波谱特性，对远 距离目标进行非接触检测、成像和 识别。可以全天候工作，不分昼 夜，不受云层和人为掩体的阻挡， 探测效率高

(续)

领 域	应 用	原 理 及 特 点
微波能的 工业应用	微波加热、干燥、解 冻、杀菌、去湿烘干、快 速粘合、烘干涂漆、合成 橡胶和大型轮胎微波硫 化、泡沫塑料的微波固 化；微波炉食品加热、食 品消毒；疏通煤气管道、 破碎混凝土建筑及开采矿 石等 无损检验和故障诊断， 非电量测量等	利用微波对介质的热效应，加热 均匀、速度快、质量好、安全可 靠、便于自动化连续生产 利用介质的电磁特性及微波的物 理性质，进行快速、自动的、非破 坏、非接触检测
医疗	微波理疗（加热）治 病：某些癌症、风湿症、 关节炎等。输血（血液加 温），创伤愈合等	利用微波对生物的热效应，选择 性加热
农业	谷物烘干、种子处理、 除草杀虫等	利用微波对生物的热效应，促进 作物早熟，增加产量
科学研究	射电天文学 加热等离子及等离子体 诊断 电子直线加速器 微波化学 微波生物学 微波波谱学 （如“原子钟”时间标 准）	利用微波观测天体 利用等离子体的高频损耗特性及 微波与等离子体的相互作用，非接 触测量，响应快 利用行波能量加速电子 利用微波等离子体促进化学反应 利用微波非热效应 利用波谱的频率与原子和分子的 能级直接有关，通过研究各种物质 的电磁场辐射与吸收谱来认识物质 结构

构件中的分层、脱粘，固体推进剂和飞机轮胎内部气孔、裂缝，金属加工表面光洁度、裂纹、划痕及其深度；非金属材料湿度、密度、混合物组份比、固化度；金属板与介质板材的厚度，以及各种线径、微小位移、微小振动、微小体积和等离子体温度等。

微波检测设备简单，而且操作方便，不需要耦合剂，探头至试件间可以通过空气来实现有效的耦合，不存在耦合剂污染问题。微波检测最显著特点是“无损”的、“非接触”的测试，便于实现自动化，尤其适宜于生产流水线上的连续、快速测量和自动控制。近年来，微波检测除了继续完善原来检测设备和方法，使之更加灵敏、可靠外，还研制了新的通用仪器和专用设备，正朝着高精度、高分辨力、多功能、小型化，计算机快速处理数据方向发展。

微波检测也有不足之处就是它的灵敏度受工作频率限制；微波虽然能探测确定金属表面2微米裂纹的位置，但不能穿透金属或导电性能较好的复合材料如碳纤维增强塑料等，由于集肤效应，它不适于检测这类材料和构件的内部缺陷；微波检测还需要参考标准，并要求操作人员有较熟练的技能。

二、微波检测基本设备

微波检测基本设备包括微波传感器、微波信号源和收发装置所需的各种微波元件与器件。

1. 微波传感器

在微波检测中，一般通过微波传感器（俗称探头），也叫变换器，将非电量变换为电参量，然后再经过微波电路转为幅度、相位、频率或其他变化量。因此有的传感器可看作是微波能量辐射的镜孔和信息接收的窗口，起着微波雷达中天

线的重要作用。微波传感器按结构不同大致分为空间波式、波导式、微带线、带状线和表面波式以及谐振腔式几种，用得较多的是空间波式传感器，有时如测湿、测厚，也用到表面波式传感器和谐振腔式传感器。

(1) 空间波式传感器 在微波检测中空间波式传感器就是面天线。有喇叭天线、抛物面天线、卡塞格伦天线、透镜天线、介质天线等。它的基本功能是将原来波导中传输的电磁波变为自由空间及介电材料中传播的电磁波，或将自由空间(介质)中的电磁波转换为接收系统波导内传输的电磁波。根据不同检测对象选用近场区工作(如检验、测湿)或远场区工作(如测距、测速)。其基本参量为①方向性：用方向性图、主瓣宽度、主瓣零点角、副瓣电平、方向性系数等几种方法来表示。方向性图说明电磁辐射在空间距天线相同距离各点的分布情况，它是一个立体图形。方向性图越尖锐，表示能量辐射越集中。最大辐射方向的叶瓣称主瓣，其余均称为副瓣(或旁瓣)，反向的副瓣称后瓣。对功率方向性图，主瓣宽度是指功率下降为最大辐射方向功率一半之点之间的夹角，用 $2\theta_{0.5}$ 表示，见图2(a)；对场强方向性图，则指电场强度下降到最大值的0.707倍处两点与零点连线的夹角，用 $2\theta_{0.707}$ 表示，见图2(b)。方向性系数定量描述天线集中辐射的程度，沿不同的辐射方向有不同的方向性系数，显然，在辐射电场最强的方向，方向性系数也最大。②效率：即天线辐射功率与天线输入功率之比，它表示天线损耗的大小。天线的效率越高，损耗就越小，反之亦然。③增益系数：在相同输入功率的条件下，天线在某点所建立的电场的强度的平方与无损耗无方向性天线在同一点所建立的电场强度的平方的比值称为天线在指向该点方向上的增益系数。④天线的极化：电磁波电场强度的取向随时

间变化的方式叫做极化。习惯上把电场强度的取向叫做电磁波的极化方向。一般用电场强度矢量端点在空间所描绘的轨迹来表示电磁波的极化。天线的极化是指天线最大辐射方向上电场矢量的取向，分为线极化，圆极化和椭圆极化三种。

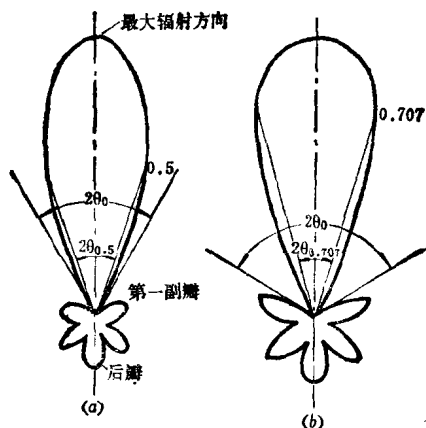


图2 天线方向性图的主瓣宽度和主瓣零点角 $2\theta_0$

最常用的空间波式传感器是**标准增益喇叭**，可看成是将波导末端扩展而成，有扇形、角锥形和圆锥形喇叭天线等。喇叭天线因为口径是扩展的，易于与自由空间匹配，驻波很小。喇叭各个参数（长度 R 、孔径 D 与孔面角 d ）之间有一个简单的几何关系 $\tan d = D/2R$ 。设计传感器，主要是计算喇叭的几何尺寸和方向图。喇叭所产生的波束，宽度与波长成正比。角锥喇叭（图3（a））对取向极为敏感，有效面积较大，结构简单，增益一般在15~25分贝。喇叭的辐射方向性图与喇叭的张角及长度有关。对于一定长度的喇叭，张角越小，方向性图就越宽，方向性系数就越低。反之，张角越大，方向性图就越窄。图3（b）为角锥喇叭最佳设计曲线：

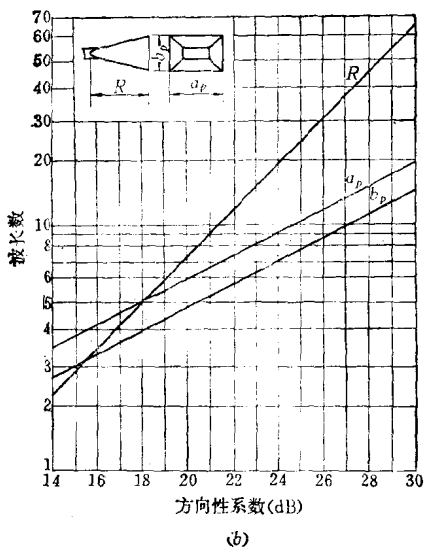
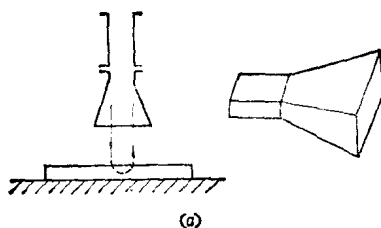


图3 角锥喇叭及其最佳设计曲线

根据互易原理,同一天线在用于发射或接收时,具有相同的特性。由于天线所具有的可逆性,因此它可同时起收发的作用。有时喇叭不作天线用,在有限空间内,只作过渡器使用,象物料测湿那样。

卡塞格伦天线是一种具有双反射器的天线系统。微波辐射计就采用这种天线,它由照射器、旋转双曲面副反射器及

旋转抛物面主反射器三部分组成。

波纹喇叭用刻槽波纹面构成内壁，只要控制好槽深及喇叭锥角就可获得轴向对称的等幅同相辐射特性方向图，在很宽的频带范围内基本保持常数。图4给出了用于9~11千兆赫频段的波纹喇叭实例。

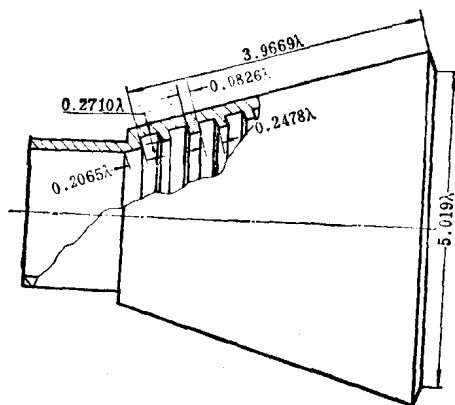


图4 波纹喇叭实例

介质透镜传感器应用于厘米波段，用聚苯乙烯（或聚四氟乙烯）等低耗材料制成。这种透镜中心厚，边缘薄。波在介质中的传播速度等于自由空间波速的 $1/n$ ，故又称减速透镜。为获得平面波，透镜在向着辐射器一面应是凸面，平面透镜孔面是矩形的，以便获得狭窄的方向图，如图5所示。平面镜孔面也可以是圆形的。其中焦点到凸面上任一点距离

$$r = (n - 1)F / (n \cos \theta - 1)$$

式中 F ——焦距；
 n ——折射率；
 θ ——张角。

通常 $F/D = 1$ ，图中 D 为孔面矩形的长边， d 为宽边，

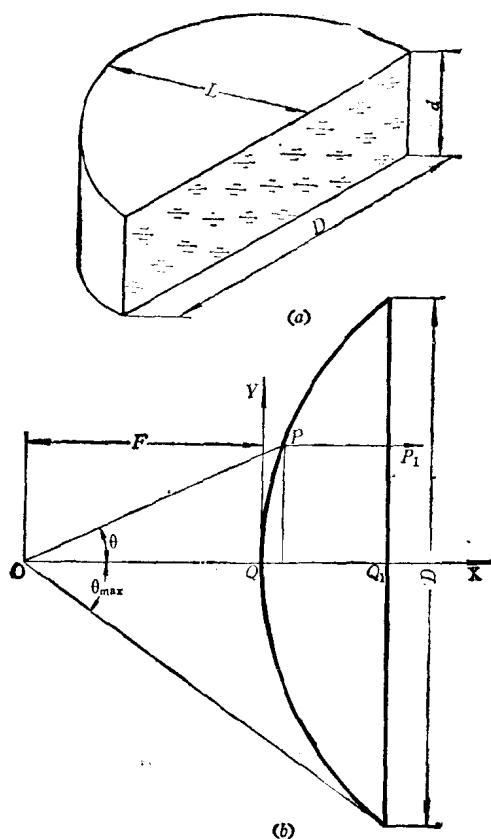


图5 介质透镜传感器

(a) 内表面为双曲面的平面透镜；(b) 透镜的主要计算尺寸。

$L = aa_1$ 为凸面高度， P 为凸面上任意一点， PP_1 为 P 点至平面的距离。这类传感器旁瓣和后瓣比较小，具有很高的方向性，制造也方便，而且还可以用它直接地在图象底板上进行微波成象。