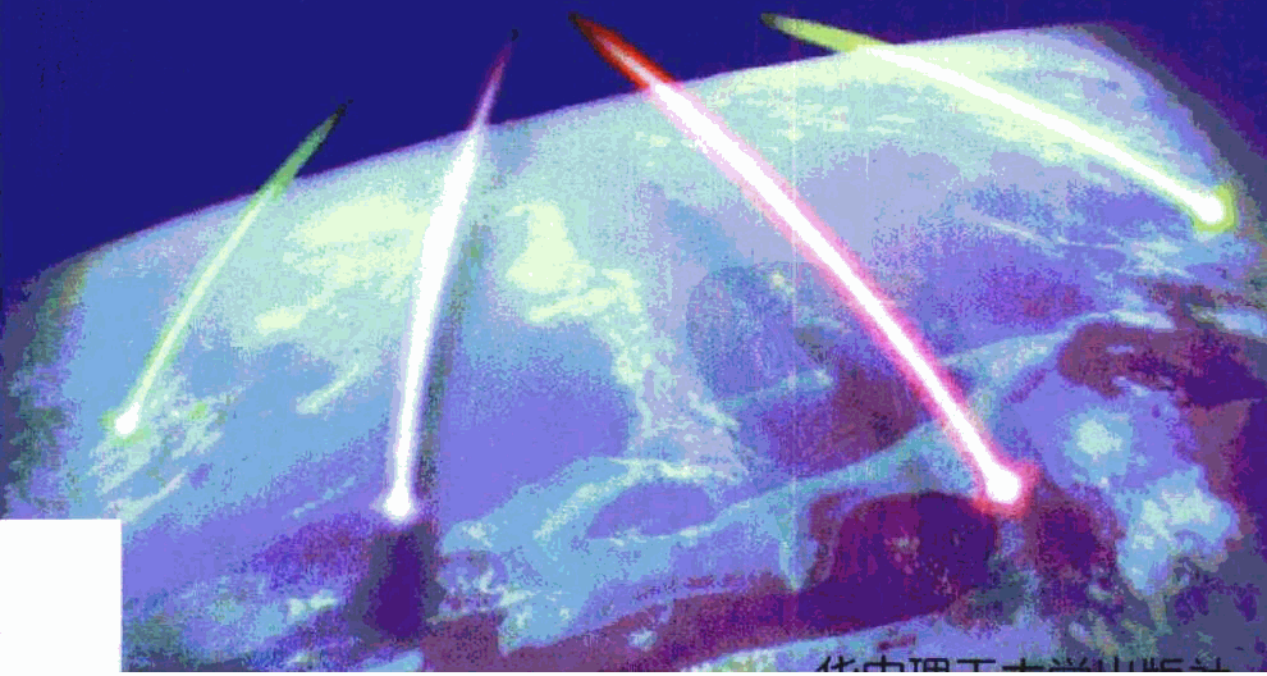


# 现代物理 测试技术

XIANDAI WULI CESHI JISHU

唐超群 主编



# 前 言

人类的各种活动都可以归入认识世界和改造世界这两大活动。人直接认识世界的办法是:看(目测),听(耳闻),嗅(鼻嗅),尝(舌尝),摸(手感)。显然,这种完全依靠人自身的感官直接去认识世界的办法是原始的,其能力是非常有限的,认识的广度和深度是远远不够的。为了提高人认识世界的能力和认识世界的广度和深度,人们发明了许多工具和技术,像望远镜、放大镜、显微镜、电子显微镜、收音机、电话机、电视机、照相机、摄像机、各种传感器、X光衍射术、X光透视、B超、CT、核磁共振、STM等各种各样的测试仪器及相应的技术,这些测试工具和技术延伸了人的感官功能,大大加强了人们认识世界的深度和广度。广义地说,测试技术就是这些延伸人的感官功能的技术,包括实现这些延伸的原理、方法和工具(仪器)。在现代社会,测试技术对于人们的活动起着非常重要的作用,科学研究、工农业生产、商品质量检验、产品质量评估、监测环境污染、检查安全防护、刑事侦破、国防军事的雷达侦察、红外成像、激光定位、声纳探测、医疗诊断,乃至日常生活中到处都使用着测试技术。可以预言:随着信息处理技术(计算机)、信息传输技术(网络)的逐步成熟,接着最需要发展的就是信息获取技术(即测试技术);一个以研究测试技术,提高信息获取速度、获取量、获取质量的时代就要到来。

测试技术使用越来越广,对现代社会越来越重要,这对高等学校中有关测试技术的教学提出了更高更新的要求。过去,高等学校的一些工科专业开设了不少有关测试技术的课程,但大多是有关某一专门领域的测试技术,这对于培养某一专门领域的测试技术人才是非常必要的。但是,现在的情况是,每一个从事科技工作的人(包括理科)都可能随时面对测试问题,而从事测试技术工作的人员又可能面对各种不同的测试技术。因此,开设一门能适应非测试专业的理、工科大学生的测试技术课程,编出一本包含较广泛内容,且有助于启发创新开发思维的教材是非常必要的。现代物理测试技术课程及本教材就是在这种形势要求下产生的。

《现代物理测试技术》这本教材的编写基于以下考虑:第一,它要求学习者广泛而深刻地了解现代测试技术的物理基础,为此,书中比较详细地论述了各种测试技术的物理原理及相关知识。第二,它以非接触测试技术为主要内容,因为非接触测试是现代测试技术的主要方式,它覆盖了微波、红外线、光和激光、X射线、 $\gamma$ 射线和其他放射线、声波与超声波和微弱信号测试这些最主要的现代测试手段。第三,现代物理测试技术是从各种不同的领域中提炼出来的,它也以各种不同的领域为应用对象,为此,书中有关测试技术的例子,涉及到不同科学技术领域和工业、农业、医疗、商业、国防、安全、环保等各行各业。第四,学习书本知识的目的不仅是为了解前人积累的已有知识并加以利用,而且更重要的是要在已有知识的基础上,发现新的现象,创立新的理论,发明新的技术和方法,就是说,要创新!基于这种考虑,本教材中有关测试技术,特别是有关仪器的细节讲得不多,而比较侧重于测试技术原理的分析和开发思维的启发。

本教材是在华中理工大学教改基金项目资助下出版的。全书由几位同志共同编写,第一、

二、三、七章由唐超群编写,第四、五章由喻力华编写,第六章由夏正才编写,第八章由龙长才编写,第九章由赵维义编写。

由于编者水平所限和时间仓促,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

1999年7月

# 第一章 绪 论

## § 1.1 现代测试技术及其作用

什么是测试技术？要回答这个问题，我们先来看看人们是如何认识世界的。

人直接认识世界的办法是：看(目测)，听(耳闻)，嗅(鼻嗅)，尝(舌尝)，摸(手感)。显然，这种完全依靠人自身的感官直接去认识世界的办法是原始的，其能力是非常有限的，认识的广度和深度是远远不够的。如何提高人认识世界的能力和认识世界的广度和深度？我们知道，人区别于动物的最重要的标志是人会发明和使用工具。这些工具大致可以分为两大类：一类主要用于延伸人的感官功能，像望远镜、放大镜、显微镜、电子显微镜、收音机、电话机、电视机、照相机、摄像机、各种传感器、X光衍射术、X光透视、B超、CT、核磁共振、STM等各种各样的测试仪器，人类依靠这些测试仪器大大加强了认识世界的深度和广度；另一类主要用于延伸人的肢体功能，像各种各样的机器，人类依靠这些机器大大提高了改造世界的能力和速度。

广义地说，测试技术就是延伸人的感官功能的技术，包括实现这种延伸的原理、方法和工具(仪器)。

在现代社会，测试技术对人们的活动起着非常重要的作用，测试技术、计算机和机器可以说是人们提高认识世界和改造世界能力的强有力工具。从图 1-1 就可以清楚地看到这一点。

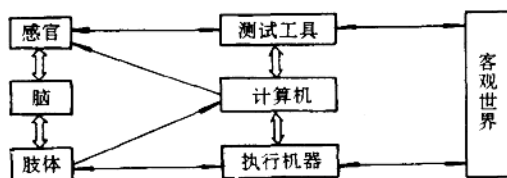


图 1-1 现代社会中人与客观世界的关系

实际上，测试技术不但在人们认识世界、改造世界中起着十分重要的作用，而且在新兴的信息技术中占有举足轻重的作用。有人预言：随着信息处理技术(计算机)、信息传输技术(网络)的逐步成熟，接着最需解决的就是信息获取技术。一个以研究测试技术、传感技术，提高信息获取速度、获取量、获取质量的时代在 21 世纪初就要到来。测试技术的重要作用从表 1-1 中可以清楚地看到。

表 1-1 人的信息器官与对应的信息技术

| 人的信息器官 | 器官功能 | 对应的信息技术    |
|--------|------|------------|
| 感觉器官   | 获取信息 | 信息获取技术(测试) |
| 传导神经   | 传递信息 | 信息传输技术(网络) |
| 思维器官   | 处理信息 | 信息处理技术(电脑) |
| 执行器官   | 执行信息 | 信息应用技术(机器) |

在现代社会中,测试技术几乎涉及到人类各种活动和需求,这是因为认识世界已成为人们在生产和生活活动中有意识的和自然的普遍要求,这可以从测试技术在以下许多领域的应用得到证明。

#### 1. 科学研究(科学实验)

科学技术上的重大成就和科学研究新领域的开辟,往往是以测试方法和仪器的突破为先导,“在诺贝尔物理和化学奖中,大约有四分之一是属于测试方法和仪器创新的”(双院士王大珩)。例如,电子显微术、X光物质结构分析仪、质谱仪、CT断层扫描术及扫描隧道显微镜等。

#### 2. 工业生产

测试技术是保证生产正常进行、提高产品质量、降低生产成本、实现生产自动化的首要环节。如工业生产中的温度、压力、流量等参数的检测,又如机械工业中广泛使用的无损检测技术。

#### 3. 农业生产

农业现代化完全离不开测试技术,如原子吸收光谱技术可用于测量土壤、植物、水和生物的元素含量,也可对化肥、食品、饲料等进行分析;又如利用遥测、遥感技术可以大面积快速调查地形、地质、土壤、生态情况,可以对农作物产量进行估计,可以预报病虫害、监测水灾和森林火灾等;又如核探测技术在农业上也得到了广泛的应用,放射性同位素示踪法在土壤肥料、作物营养生理、农业环境保护、作物育种、畜牧兽医中已有了广泛应用, $\gamma$ 射线已用于测试土壤的含水量,中子探测技术用于探测地下水分布等。

#### 4. 商业贸易

测试技术是国家实施商品质量检验,开展产品质量评估的重要手段。

#### 5. 环境保护

测试技术是监测环境污染,检查安全防护的重要技术。

#### 6. 刑事侦破

测试技术是侦破刑事案件的重要手段,如海关已使用先进的 $\gamma$ 射线集装箱扫描检测技术快速侦破集装箱走私。

#### 7. 国防军事

国防军事领域是测试技术发展和使用最快最先进的领域,如(微波)雷达侦察、红外成像、激光定位、声纳技术等。

#### 8. 医疗诊断

人的生命是最宝贵的,用于医疗保健的测试技术既多又先进,X射线发现不久就用于人体透视,心电图、B超等已是一般医院的检测手段,超声多普勒、核磁共振成像、X射线计算机断层扫描(CT)、正电子发射断层扫描(PET)等现代最新的物理测试技术也已成功地用于医疗诊断。

#### 9. 日常生活

测试技术应用于千家万户,各种现代家用电器中都不同程度地使用了测试技术。

## § 1.2 测试系统的组成和测试技术的开发

### 1.2.1 测试系统的组成

测试就是使用仪器,通过一定的方式获取对象的状态、特性等方面的信息,再经过信号处理,以人们能接受的方式提供出来的过程。因此,一般说来,测试系统可以由以下三部分组成:

信息获取部分、信息处理部分、结果显示部分,各组成部分的作用各不相同,大致的情况如下。

测试中最重要的是信息的获取。信息获取主要由传感器来完成。传感器在获取信息时一般可以采取两种方式:被动(Passive)方式和主动(Active)方式。所谓被动方式,就是被测对象能向外发送相关信息,测试的任务就是用合适的仪器和方法接受这些信息并加以处理。这种方式往往在信息获取的同时有能量从被测对象向测试工具传递。所谓主动方式,就是当被测对象不能向外发送相关信息时,测试往往采取对被测对象施加某种激励信号,然后观测对象对激励的响应。这种方式总是要向对象提供能量的。

信息处理包括信号放大、模数变换、数值计算等加工。现在,大部分由传感器输出的信号都已变换成了电信号,所以,信号处理越来越趋向标准化、规范化,从而变得简单起来。

结果显示是人们了解测试结果的依据。现在,可以用多种方式显示测试结果,模拟的、数字的、图表的、曲线的,还可以用纸、磁带、磁盘等多种介质将测试结果保存起来。

现在,测试系统又出现了一种新的形式,那就是虚拟仪器。这种虚拟仪器是在计算机中用软件来完成测试系统大部分功能的一种测试系统,是很有发展前途的。

### 1.2.2 测试技术的开发

学习书本知识的目的不仅是为了了解前人积累的已有知识并加以利用,而且更重要的是要在已有知识的基础上,发现新的现象,创立新的理论,发明新的技术和方法,就是说,要创新!测试技术的开发就是这种创新工作。下面提出的有关测试技术的开发模式,测试技术开发思路,测试技术开发原则,测试技术开发步骤是作者给学生的参考意见,意在促进大家通过这门课程的学习,树立起创新开发的意识。

#### 1.2.2.1 测试技术的开发模式

测试技术的开发大致可以遵循以下几种模式。

(1) **需求模式** 测试技术的开发完全出于某种客观需要。这是一种目的非常明确的开发模式,也是采用得最多的一种开发模式。对这种开发往往是从已有原理和技术开始考虑。

(2) **转移模式** 将一个领域已成功使用的测试技术转移到另一新的领域(根据情况可能还要进行某些改进),扩大了这一测试技术的应用范围。

(3) **创新模式** 根据新发现的物理现象、效应、规律,或依靠某种新出现的技术来开发测试技术。

#### 1.2.2.2 测试技术开发思路

由于信号处理和结果显示方法越来越趋向标准化、规范化,从而变得简单起来,所以测试技术开发的主要工作将集中在传感器部分。从本质上说,无论何种开发模式,测试技术的开发都是一种创新工作。这里提出一些仅供参考的开发思路。

(1) 从分析现有测试技术开始,看是否可以改进?是否可以借鉴?是否可以组合?是否可以转移?

(2) 从分析现有物理现象、物理效应、物理规律开始,首先从原理上确定测试技术开发的可能性。这里要注意两种情况:一是对同一测试对象,可能有多种物理原理可以利用;二是一种物理原理可能用于多种不同的测试对象。对这两种情况,开发时一定要做比较分析。

(3) 从分析新发现的物理现象、效应、规律或新技术的特点开始,寻找它们可以应用的领域。例如,利用量子隧道效应开发了 STM;借助激光技术开发了激光雷达、激光全息、激光成像

等。

(4) 从分析生物体的特殊感觉机能出发,寻找仿生测试技术开发的可能性。

### 1.2.2.3 测试技术开发原则

测试技术的开发大致要遵循以下原则:

- (1) **科学性** 即性能好,如灵敏,精度高,稳定性好。
- (2) **适用性** 环境适应性(温度、湿度、振动等)强。
- (3) **先进性** 小型化,集成化,智能化。
- (4) **方便性** 使用、维护方便。
- (5) **经济性** 价格低。

### 1.2.2.4 测试技术开发步骤

测试技术开发的一般步骤是:

- (1) 分析测试对象的状态、特征,看是否向外发射信息。如发射信息,看发射的信息是否与待测量有关;如不发射信息,看其是否对外来激励作出响应。如作出响应,弄清对何种激励作出响应。通过分析,最后确定测试应该是一种什么样的物理过程。
- (2) 进一步分析测试所属的物理过程的规律,建立测试过程的物理模型。
- (3) 如果需要,进一步建立数学模型。
- (4) 根据物理模型和数学模型进行技术设计。
- (5) 研制测试仪器。
- (6) 调试测试仪器,试运行。
- (7) 现场进行试运行实验,检验性能、可靠性。
- (8) 根据运行实验结果,对测试技术从原理、方法、仪器制造等不同方面进行全面评价,对开发的成败得出结论或提出改进意见。

## § 1.3 现代物理测试技术及其物理基础概述

### 1.3.1 现代物理测试技术

正如前面谈到的,测试对现代社会来说是十分广泛的,因此有关测试技术的课程也名目繁多,但大多是有关某一专门领域的测试技术。对于培养某一专门领域的测试技术人才,这样的课程和教材是非常必要的。但是,现在的情况是,每一个从事科技工作的人都可能随时面对测试问题,而从事测试技术工作的人员又可能面对各种不同的测试技术,因此,开设一门能适应不同对象的测试技术课程,编出一本包含广泛内容,且有助于启发创新开发意思的教材是非常必要的。现代物理测试技术就是在这种情况下产生的。《现代物理测试技术》这本教材不同于以往某些专门测试技术领域的书,它具有以下特点:第一,他要求学习者广泛而深刻了解现代测试技术的物理基础。为此,书中比较详细地论述了各种测试技术的物理原理及相关知识。第二,他以非接触测试技术为主要内容。因为非接触测试是现代测试技术的主要方式,它覆盖了微波、红外线、光和激光、X射线、 $\gamma$ 射线和其他放射线、声波和超声波这些最主要的现代非接触测试手段。第三,现代物理测试技术是从各种不同的领域中提炼出来的,他也以各种不同的领域为应用对象。为此,书中有关测试技术的例子,涉及到科学技术的各种领域和工业、农

业、医疗、商业、国防、安全、环保等各行各业。

### 1.3.2 现代物理测试技术物理基础概述

微波、红外线、光和激光、X射线、 $\gamma$ 射线和其他放射线、声波和超声波作为信息载体的测试技术是现代测试技术的发展方向,也是应用面十分广泛的测试技术,它们的主要物理基础可以概括为两点:一是波、射线本身的特性,二是波、射线和物质相互作用所出现的效应。由于波及波与物质相互作用具有很多共同的特性,这些特性可以在不同的测试技术中被利用,为了让大家纵观全局,在此先对各种测试技术共同的物理基础予以概述。

#### 1.3.2.1 波的特性

波是现代物理测试技术中所使用的一类非常重要的信息载体。机械波和电磁波是目前使用得最多的两种波。波的大部分特性都可以用于测试技术,下面我们来进行分析。

##### 1. 波的分类特性

无论是机械波还是电磁波,常常根据波长或频率的不同又划分为不同的小类。

在测试技术中常用的机械波是声波和超声波。声波是人可以听到的机械波,频率在20Hz~20kHz。超声波是一般人听不到的、频率大于20kHz的机械波。低于20Hz的机械波叫次声波,也是一般人听不到的,有些特殊的测试(如地震测试)是以次声波为信息载体的。声波、超声波和次声波都只能在弹性媒质中传播。

电磁波是现代测试技术使用非常广泛的一大类波,整个电磁波谱(图1-2)习惯上根据波长不同又被分成以下波段:无线电波( $\lambda > 1\text{m}$ ),微波( $\lambda: 1\text{mm} \sim 1\text{m}$ ),红外线( $\lambda: 760\text{nm} \sim 1\text{mm}$ ),可见光( $\lambda: 390 \sim 760\text{nm}$ ),紫外线( $\lambda: 10 \sim 390\text{nm}$ ),X射线( $\lambda: 10^{-3} \sim$ 几十纳米), $\gamma$ 射线( $\lambda: 10^{-5} \sim 10^{-1}\text{nm}$ ),宇宙射线( $\lambda < 10^{-5}\text{nm}$ )。电磁波可以在介质中传播,也可以在真空中传播。各波段电磁波根据其与物质间的相互作用表现出波动性和粒子性的程度可以划分成三个组成部分:

(1) 高频区:包括X射线, $\gamma$ 射线和宇宙射线。这些辐射的特点是它们的量子能量高,当它们与物质相互作用时,波动性弱而粒子性强。

(2) 长波区:包括无线电波和微波等低频率的辐射。它们与物质间的相互作用更多的表现为波动性。

(3) 中间区:包括红外辐射、可见光与紫外辐射。这些辐射在与物质的相互作用中,显示出波动和粒子双重性。

由于波的很多特性都和波长或频率有关,不同波长或频率的波往往用于不同的测试技术

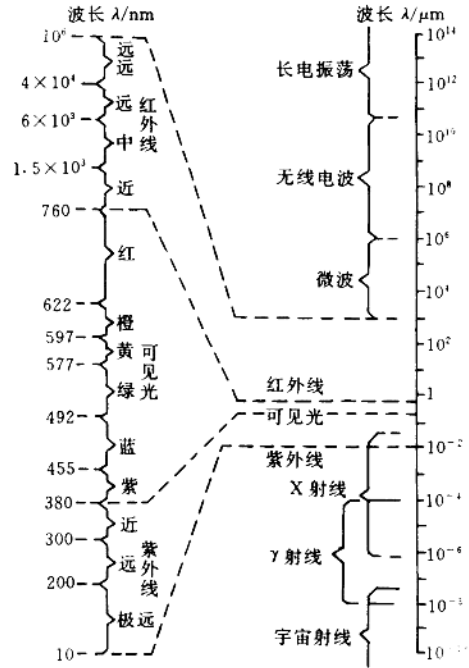


图 1-2 电磁波谱



中,所以清楚了解波的分类是必要的。在下面各章中,我们将依次介绍微波、红外辐射、可见光、X射线、 $\gamma$ 射线这些波段的电磁波在现代测试技术中的应用。

## 2. 波的自然源和人工源

要掌握以波为信息载体的测试技术,清楚了解波的来源是重要的。在被动方式测试技术中,一定要熟悉波的自然源,在主动方式测试技术中,则要了解波的人工源。

●声波:自然源:各种自然的机械振动,地震,雷声,人与动物的发声等。

人工源:声波发生器。

●超声波:自然源:各种自然的高频机械振动,地震,雷声,某些动物的超声发射等。

人工源:超声波发生器。

●次声波:自然源:地震,海啸。

人工源:较少。

●无线电波:自然源:较少。

人工源:无线电发射台。

●微波:自然源:各种物质的热辐射。

人工源:雷达,电视发射台,微波发生器。

●红外线:自然源:各种物质的热辐射,天体辐射。

人工源:红外线发生器,激光。

●可见光:自然源:太阳,各种燃烧发光。

人工源:各种灯光,激光。

●紫外线:自然源:太阳。

人工源:紫外光发生器。

●X射线:自然源:放射性元素衰变,宇宙星球和天体变化。

人工源:X射线发生器。

● $\gamma$ 射线:自然源:放射性元素衰变,宇宙星球和天体变化。

人工源:无。

●宇宙射线:自然源:宇宙星球和天体变化。

人工源:无。

## 3. 波的传播速度

波的传播速度在测试技术中是可以直接利用的,如在波速一定的情况下,可以把距离测量转换为时间测量。对于波的传播速度,重要的是弄清波在不同媒质中的速度大小和决定速度大小的因素。下面列出一般的规律。

弹性波(声波、超声波、次声波都是弹性波)的传播速度决定于媒质的惯性(密度)和弹性(弹性模量),具体情况如下:

在液体和气体中,弹性波一般是以纵波形式传播的,其速度  $u = (B/\rho)^{1/2}$ , 其中  $B$  是媒质的容变弹性模量,  $\rho$  是媒质的密度。对理想气体,  $u = (B/\rho)^{1/2} = (\gamma p/\rho)^{1/2} = (\gamma RT/M)^{1/2}$ , 其中  $\gamma = C_p/C_v$ ,  $p$  是压强,  $T$  是热力学温度,  $R$  是气体常数,  $M$  是气体的摩尔质量,  $C_p$  是定压摩尔热容量,  $C_v$  是定容摩尔热容量。

在固体中,弹性波大多也是以纵波形式传播的,其速度  $u = (Y/\rho)^{1/2}$ , 有时也可以以横波方式传播,此时  $u = (G/\rho)^{1/2}$ , 这里的  $Y$  是杨氏弹性模量,  $G$  是切变弹性模量。

根据各种弹性模量的定义:  $B = p/(\Delta V/V)$ ,  $Y = (f/s)/(\Delta l/l)$ ,  $G = (f/s)/\phi$ , 我们可以大

致估计出,对于同一种弹性波,在气体中的传播速度是最小的,在固体中的传播速度是最大的,在液体中的传播速度居中。如声速在标准状态的气体中是 331m/s,在水中是 1500m/s,在铁中是 5100m/s。

电磁波的传播速度在真空中是常数,在介质中则取决于介质的介电常数和磁导率,即

$$u = 1/(\epsilon\mu)^{1/2}$$

其中  $\epsilon$  是介质的介电常数, $\mu$  是介质的磁导率。如果用真空的介电常数  $\epsilon_0$ 、磁导率  $\mu_0$  代替  $\epsilon$  和  $\mu$ ,则电磁波在真空中的传播速度也可以用相同的公式表示,即

$$u = 1/(\epsilon_0\mu_0)^{1/2}$$

由于一般情况下  $\epsilon > \epsilon_0$ ,  $\mu > \mu_0$ ,所以电磁波在介质中的传播速度一般小于在真空中的传播速度。要注意的是, $\epsilon$  和  $\mu$  的值除了和介质有关外,一般还和所传播的电磁波的频率有关:在不同的介质中, $\epsilon$ 、 $\mu$  与波的频率的关系是不相同的,但总的趋势是频率越高, $\epsilon$ 、 $\mu$  的值越小。对于 X 射线、 $\gamma$  射线、宇宙射线这样频率非常高的电磁波,大多介质的  $\epsilon$ 、 $\mu$  的值都很接近  $\epsilon_0$ 、 $\mu_0$  的值,因此这些射线在大多介质中都可以以接近于真空中的速度传播。在有些情况下  $\epsilon$ 、 $\mu$  还是复数。

#### 4. 波速 $u$ 、频率 $\nu$ 、波长 $\lambda$ 之间的关系

对于行波,三者的关系是

$$u = \nu\lambda$$

值得注意的是这三个量的地位是不相同的。 $u$  的值是由媒质决定的(对电磁波来说还和波的频率有关);在有多普勒效应的情况下, $\nu$  由波源的频率决定; $\lambda$  则是由  $u$  和  $\nu$  共同决定的。

在测试技术中,要遵循这样的思路去利用这三个量的关系。当我们用一种固定的波( $\nu$  一定)去测试不同的介质时,需要考虑的是不同的媒质中波的速度不同,从而波长也不同对测试带来的影响。当我们用不同的波源发出的波( $\nu$  不同)去测试同一种介质时,需要考虑的是不同的波源的频率不同,从而波长也不同对测试带来的影响。这一点对弹性波来说特别重要,因为弹性波是依靠媒质分子振动状态的传递实现波传播的,当媒质分子间的距离大于波长时,媒质就不能传播弹性波了。月球上为什么是寂静的?原因就是月球上的大气非常稀薄,接近真空,不能传播声波。从这些分析我们得到一个基本结论,那就是,对每种媒质来说,可以在其中传播的弹性波的频率都存在一个上限。由于气体媒质分子间的距离比较大,而弹性波在其中的传播速度又比较低,所以对气体媒质来说,可以在其中传播的弹性波的频率上限比较低;固体媒质分子(原子)间的距离非常小,而弹性波在其中的传播速度又比较高,所以在固体媒质中传播的弹性波的频率上限比较高;液体媒质分子间的距离也比较小,而弹性波在其中的传播速度介于气体和固体,所以一般说来,在液体中传播的弹性波的频率上限比气体中的高而比固体中的低。

#### 5. 波的多普勒效应

机械波和电磁波中都存在多普勒效应。在测试技术中多普勒效应是非常有用的效应,它可以使我们在很多情况下把难于实现的对目标物的速度的测量转换为对探测目标物的波的频率变化的测量,这里的波既可以是运动着的目标物发出来的,也可以是测试仪器发出再经运动着的目标物反射回来的。由于机械波的速度一般不高,不需要考虑相对论效应,而用电磁波时,则需要考虑相对论效应,所以,两种情况下的多普勒频率变化表达式有所不同。下面我们分开来分析。

●机械波:由于在实际测试中,观察者一般不会相对媒质运动,所以这里只考虑波源(可以是目标物直接发射波或目标物反射波)相对于媒质(实际上也是相对于观察者)有相对运动的情况。设波和媒质相对静止时波在媒质中的速度为  $u$ ,波在媒质中传播时的频率为  $\nu$ ,则当波源相对于观察者以速度  $v$ (两者相互远离  $v$  取正,两者相互靠近  $v$  取负)运动时,观察者测得波的频率  $\nu'$  为

$$\nu' = u\nu/(u + v)$$

在实际测试中,考虑到周围噪声影响和方向性等因素,多普勒效应使用的都是超声波,且都是采取主动测试方式,即用超声波发生器向运动着的目标物发射某种频率的超声波,再测试从目标物反射回来的超声波频率,这样就可以计算出目标物的运动速度了。

●电磁波(含光波):电磁波在真空中的速度用  $c$  表示,在测试精度要求不是十分高时,电磁波在空气中的速度也可以用  $c$  表示。与机械波不一样的是,计算电磁波的多普勒频率变化时必须考虑相对论效应。根据爱因斯坦狭义相对论,当电磁波源相对于探测器以速度  $v$  运动时,探测器接收到的电磁波的频率为

$$\nu = \frac{\nu_0}{\left(1 - \frac{v}{c} \cos\theta\right)} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1-1)$$

式中  $\nu_0$  为电磁波源相对于静止观察者所辐射的波的频率, $\theta$  为电磁波源的运动方向与光波辐射方向的夹角。

波的多普勒效应在测试技术中的应用的例子很多。例如,当宇宙起源的大爆炸理论提出后,怎么从实验上证实是非常重要的。科学家分析,如果大爆炸理论是对的,遥远星球相对我们应该存在相互远离的速度,那么,由波的多普勒效应,这样的星球向我们发来的电磁波的频率应该变低。科学家探测了很多遥远星球向我们发射来的光谱,分析发现,同种元素原子发出的光谱,遥远星球向我们发射来的谱线相对地球上测得的谱线都有向红光方向移动的现象(通常称为红移),即波长变长,频率变低。正是这种探测到的谱线红移事实有力地支持了大爆炸理论。又如工业上广泛使用超声波、激光的多普勒效应测量管道中的液体流速,医疗中广泛使用超声波多普勒效应测量心脏和血管中的血流速度以对疾病做出诊断。又如卫星地面跟踪站对卫星的跟踪探测技术之一就是利用多普勒效应,卫星在运行过程中不断向地面发出固定频率的电磁波,地面站则不断分析接收到的电磁波的频率,根据测得的频率变化就可以确定卫星相对地面的速度,进一步就可以确定卫星的位置。又如在先进的交通管理中多普勒效应也被用上了,交警为了判断汽车是否超速,用仪器向汽车发射某种频率的电磁波,再接收从汽车反射回来的电磁波,比较发射波和反射波的频率差别(当然比较是由仪器自动完成的),就可以确定汽车的速度了。

## 6. 波的反射和折射

波的反射和折射现象在测试技术中是经常要利用的,两种现象所遵循的物理规律是大家熟悉的。反射定律是这样叙述的:

入射线、反射线和分界面的法线均在同一平面内,且反射角等于入射角。

折射定律可以用下面的公式来表示(当波由介质 1 向介质 2 传播时):

$$\sin\alpha/\sin\beta = u_1/u_2$$

式中的  $\alpha$  是入射角, $\beta$  是折射角, $u_1$ 、 $u_2$  分别是波在介质 1、介质 2 中的速度。

## 7. 波的叠加、干涉、驻波

线性波服从叠加原理,非线性波不服从叠加原理。干涉是一种特殊的叠加,驻波是一种特殊的干涉,所以也只能在线性波中出现。波的叠加、干涉、驻波在测试技术中都有广泛的应用。

在应用干涉特性时,首先要得到相干波源(目前大量使用相干性很强的激光做相干波源),然后分析波的空间相干条件:

$$\delta = \pm k\lambda \quad \text{极大(加强)条件}$$

$$\delta = \pm (k + 1/2)\lambda \quad \text{极小(减弱)条件}$$

式中  $\delta$  是波程差或光程差,  $k=0,1,2,\dots$ 。在实际测试中,干涉条件常常用来将小的距离、长度或它们的变化测量转换为干涉条纹数目的测量。这时,上面公式中的  $\delta$  就和需要测试的距离、长度直接有关了。

驻波的相邻波腹(或波节)之间的距离等于半波长这一特性常常用来测试波的波长。

## 8. 波的衍射

衍射是波在传播过程中遇到障碍物时能绕过障碍物边缘偏离原来方向继续传播的现象。

### ●单缝衍射:

$$a \sin \phi_k = \pm k\lambda \quad \text{极小(暗条纹)条件}$$

$$a \sin \phi_k = \pm (k + 1/2)\lambda \quad \text{极大(明条纹)条件}$$

式中  $a$  是单缝的宽度,  $\phi_k$  是  $k$  级条纹的衍射角,  $k=1,2,\dots$ 。注意在两条一级暗条纹中间是中央明条纹,中央明条纹的强度比其它各级明条纹的强度大得多。在实际测试中,缝宽  $a$ 、衍射角  $\phi_k$ 、波长  $\lambda$  之间的关系往往通过若干条条纹来加以确定,如果只有中央明条纹,或明条纹的数目太多,都不利于我们作出判断。

●圆孔衍射:在测试技术中大量遇到的是与圆孔衍射相关的圆透镜的最小分辨角  $\delta\phi$ 。公式  $\delta\phi = 1.22(\lambda/d)$  表明,最小分辨角完全由波长  $\lambda$  与透镜直径的比值决定。显然,要想获得尽可能小的分辨角,就需要选用波长尽可能短的波和直径尽可能大的透镜。最小分辨角越小,越能分辨靠近的图像或物体。人眼瞳孔的直径大约是 3mm,以波长 550nm 的黄绿光来说,人眼的最小分辨角为  $0.0126^\circ$ 。

### 1.3.2.2 波与物质的相互作用

在测试技术中,当以波作为测试手段时,波与物质的相互作用是最重要的物理基础。下面列举一些重要的相互作用过程。

#### 1. 波的吸收

任何波在介质中传播都会由于介质对波的吸收而出现强度逐渐减弱的现象,对均匀介质而言,强度为  $I_0$  的平面波穿过厚  $x$  的介质后,强度为

$$I = I_0 \exp(-\alpha x)$$

式中  $\alpha$  是介质对波的线吸收系数。波的这一吸收规律常常被用来对某些介质的厚度或组成进行测试分析。在实际测试中,如果已知某种介质的  $\alpha$ ,则可以将介质厚度的测量转换为对波的强度的测量;而如果要了解某种介质是什么材料组成的,则可以先测出介质的厚度,再通过测量某种波穿过这一介质时的强度变化,利用公式计算出介质的  $\alpha$ ,然后查找有关资料就可以对介质的组成做出判断。利用波的吸收特性作测量时,往往选用那些对介质具有较强穿透能力的波,如超声波、X 射线、 $\gamma$  射线等。

在利用上述规律时,要注意的是,  $\alpha$  不但和介质有关,常常还与波的频率有关。例如声波在空气中的线吸收系数  $\alpha = 2 \times 10^{-11} \nu^2/\text{m}$ ,而声波在钢中的线吸收系数  $\alpha = 4 \times 10^{-7} \nu/\text{m}$ 。

## 2. 波的散射

在测试技术中用得最多的是声散射和光(激光)散射。

波的散射大量用于颗粒特性的测试分析,如颗粒度及其分布,颗粒形状与柔性,颗粒与颗粒的相互作用(气体),颗粒与溶剂的相互作用(液体),颗粒的表面特性(电荷、表面积、表面孔)等。

## 3. 与声波有关的效应

声在不同的条件下或与不同的物质相互作用时,往往会出不同的效应,很多测试技术就是以这些效应为基础的。

●声电效应:当声波作用于硅、锗等半导体时,在声波作用方向上的半导体晶体两端将产生电压的现象。

●声光效应:声波或超声波作用于某些物质时,该物质的某些光学特性发生改变的现象。如超声波可使某些物质内部密度发生周期性疏密变化,从而在该物质中传输的光改变行进方向,产生衍射光,当声源再做往复运动时,可使衍射光产生有规律的多普勒频移,从而实现光的调制。能产生声光效应的材料(声光材料)有许多,如  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{GaAs}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Te}$  等。

●磁声效应:处在磁场中的金属对超声波的吸收系数较无磁场时有一定的增加的现象。

## 4. 与光有关的效应

光在不同的条件下或与不同的物质相互作用时,也往往会出现很多可用于测试技术的不同效应。

●电光效应:在外加电场作用下,某些各向同性光学介质将出现双折射现象,而对于一些双折射晶体,外加电场将使其各向异性发生改变,这些现象被统称为电光效应。由于介质光学特性的改变与所加电场之间有非常好的对应关系,利用偏振光干涉方法,通过测量光波穿过介质后偏振态的变化,可以得到外加电场的大小。

●光弹效应:某些各向同性光学介质,当外加力的作用,或内部出现残余应力时,将表现出明显的双折射特性,通过偏振光干涉方法可以对介质进行应力分布分析。

●旋光效应:包括天然旋光和磁致旋光两种。某些物质可以使通过其中的线偏振光的偏振面发生旋转,这被称为天然旋光。对于一部分天然旋光物质,偏振面旋转角度的大小与其浓度含量具有一定比例关系,因此利用这一特性可以测量物质浓度。磁场旋光由于为法拉第首先发现,通常也被称为法拉第效应。它是指当在光传播方向加上外磁场,本来没有旋光性的物质,在磁场作用下表现出旋光特性,并且偏振面旋转的角度与外加磁场的磁感应强度成正比,因此利用这一特性可以实现磁场测量。

●磁光效应:某些物质的光学特性受磁场影响而发生变化的现象。

●拉曼效应:单色光入射到透明物质中总会发生部分散射,散射光中除有入射光频率外,往往还包含其它频率成分,这些频率成分的频率与入射光频率之差(称拉曼频移)等于物质分子或原子吸收(或发射)谱线的频率。拉曼频移主要与物质分子振动有关,因此拉曼光谱成为研究分子振动及分子结构的重要工具。拉曼效应本质上是入射光与物质内光子作用的结果。

●布里渊效应:用非干涉光照某些物质时,从该物质中散射出与入射光波长偏离极大的非干涉光,散射光的偏光波长仅仅在微波与射频波小范围内,这种效应是物质中声子与入射光作用的结果。

●光电效应:可见光、紫外线、X射线、 $\gamma$ 射线等与物质相互作用都可能发生光电效应。光电效应分外光电效应和内光电效应,在作用过程中有光电子从物质中发射出来的称外光电效应,

没有电子发射出来的称内光电效应。内光电效应又分光电导效应和光伏效应。

●康普顿效应:用波长单一的 X 射线、 $\gamma$  射线入射物质后,可观察到两种波长处出现强度峰,其一与原入射线波长相同,方向也相同,另一峰对应之波长较长,两者之差为

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h(1 - \cos\phi)}{mc}$$

式中  $\lambda'$  是散射射线波长,  $\lambda$  是入射射线波长,  $h$  是普朗克常数,  $\phi$  是散射角,  $m$  是电子质量,  $c$  是光速。康普顿效应是射线与电子一次碰撞的结果。

●电子对效应: $\gamma$  射线与物质相互作用时发生  $\gamma$  光子转化为正负电子对的现象,这种效应是  $\gamma$  光子与原子核库仑场相互作用的结果,只有当光子的能量大于  $2mc^2$  时才有可能出现电子对效应。

## 第二章 微波测试技术

微波是电磁波的一部分,其波长介于一般无线电波与红外光波的波长之间,通常划定范围为1mm至1m。微波技术的发展和电磁波理论及实验研究的发展紧密相关的。

1864年麦克斯韦预言存在电磁波,1887—1888年赫兹最先用实验证实了电磁波的存在。从那以后,电磁波的研究和应用逐渐开展起来,其中有关微波的研究发展得很快。1897年J.W.瑞利建立了金属波导管传播电磁波理论,1904年,J.A.弗莱明制造出世界上第一只真空电子二极管,并作为检波器使用。接着美国发明家L. De 福雷斯特在1906年制成了真空三极管,1916年他用真空三极管为美国海军制造了一台大功率无线电台。1920年,人们发现电离层对无线电短波有较强的反射作用,这一发现促进了短波通信的发展,并导致了微波器件被研制出来和微波技术的发展。微波技术在第二次世界大战期间得到了迅速的发展,一个重要的进展是雷达的发明和使用。1935年海尔(Heil)发明了振荡器,1939年维里安(Varian)兄弟发明了速调管放大器。在此基础上,线性束管被研制出来。1944年,康佛纳尔(R. Kompfner)发明了螺旋线行波管。这些发明和技术进步使短波通信和雷达探测技术得到了很大的发展,并在实际应用中,特别是军事中得到了广泛的应用。

二次世界大战结束后,一些科学家开始考虑如何把大战期间研制出来的微波设备用于科学研究。当时科学研究的主要领域物理学、原子物理学、分子物理学、光谱学以及量子力学已经有了相当的发展,人们对物质结构有了相当深刻的认识,但对于有些实验结果与理论的差异,如对用光谱学得到的许多精细结构等,却仍然迷惑不解。于是,一些科学家探索性地用微波来研究这些迷惑不解的问题。由于微波波长的特点,它本质上和物质结构的精细部分相联系,所以很快发现了一系列新的物理现象:1944年,电子自旋共振(顺磁共振)被发现,1945年,核磁共振被发现,1946年,铁磁共振被发现,1950年,核四极矩共振被发现。随后,光泵磁共振被发现。一系列磁共振现象的发现,开创了微波量子物理学研究的新领域。人们对物质微波量子现象的深入研究又促进了微波激射器(1955年)和激光器(1960年)的发明。

从20世纪60年代至今的几十年内,随着微波所具有的特点和微波与物质相互作用所出现的种种效应不断被人们深刻认识和广泛接受,微波技术得到了更快的发展,它的应用领域越来越广。基于微波具有波长短(相对于飞机、舰船、火箭、导弹等物体的尺寸来说)、衍射弱、直线传播等特点而发展起来的雷达技术已从传统的军事应用扩展到民用中测向、测距(如工业中的液位测量);由于微波的频率比一般无线电波的频率高,可以搭载更高密度的信息,微波通信正在得到飞速的发展;物体的热辐射中都含有微波成分,而不同的物体或不同状态的物体所辐射出的微波谱不同,根据这一特点发展了微波遥测遥感技术,目前,机载和星载微波遥感系统正广泛地用于大地资源、环境、生态、灾害调查;基于微波与物质相互作用的量子效应而发展的一系列磁共振技术已成为人们探测物质微观结构、研究新材料的重要方法和手段,新近发展起来的磁共振成像技术正在医疗诊断中发挥着重要作用;基于微波与物质相互作用的热效应,微波作为一种热源正在人们的日常生活(如微波炉)、医疗(微波理疗)、工业(如粮食、木材烘干)、科研(如微波烧结炉)等各方面得到发展;基于不同材

料对微波反射、吸收、透射特性的差异,作为反雷达探测的微波隐身技术正受到军事领域的高度重视;微波技术在军事上的另一个重要应用是正在研制的大功率脉冲式发射微波炮(电磁炮)。

在这种微波应用技术中,有相当部分是与测试技术相联系的,它们是本课程关心的内容。

## § 2.1 微波在空间的传播特性

在微波测试技术中,无论测试采用主动方式还是被动方式,核心是微波特性。对微波特性产生影响的几种主要因素是:微波在空间或波导中的传播特性、微波与物质(包括被测对象)相互作用的特性以及物体辐射微波的特性。实际上,这些特性正是微波测试技术的基础。从这一节开始,将用几节分别介绍这些基础,本节讨论微波在空间的传播特性。

### 2.1.1 时域和频域中的波动方程

微波是电磁波,其传播特性可由麦克斯韦电磁理论描述。由时域中的麦克斯韦方程组的微分形式可以很容易得到电磁波的电场分量和磁场分量的波动方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \quad (2-1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}, \quad (2-2)$$

式中  $\mathbf{E}$  是电场强度矢量,  $\mathbf{H}$  是磁场强度矢量,  $\sigma$  是媒质的电导率,  $\mu$  是媒质的磁导率,  $\epsilon$  是媒质的介电常数。真空的磁导率  $\mu_0$  和介电常数  $\epsilon_0$  都是常数,

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}, \quad \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

通常将媒质的磁导率、介电常数表示成真空磁导率和介电常数的倍数,即

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2-3)$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2-4)$$

式中  $\mu_r$  称相对磁导率,  $\epsilon_r$  称相对介电常数,两者都无量纲。

为了得到频域中的波动方程,通常考虑信号取指数  $e^{j\omega t}$  的正弦时间函数,因此时间偏导  $\partial/\partial t$  等效于  $j\omega$ ,如果用  $j\omega$  代替时域麦克斯韦方程组(微分形式)中的  $\partial/\partial t$ ,就可以得到频域中的麦克斯韦方程组:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (2-5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E} \quad (2-6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2-7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2-8)$$

对方程(2-5)两边取旋度得到

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu \nabla \times \mathbf{H} \quad (2-9)$$

由于  $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E})$ ,在自由空间中,空间电荷密度  $\rho$  为零,因此  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ ,所以

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} \quad (2-10)$$

将式(2-10)和式(2-6)分别代入式(2-9)的左、右,得到



$$\nabla^2 \mathbf{E} = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E} \quad (2-11)$$

通常令  $\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$ , 则式(2-11)可写成

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma^2 \mathbf{E} \quad (2-12)$$

这就是频域中的电波方程。用同样的方法对方程(2-6)进行变换可得到频域中的磁波方程

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma^2 \mathbf{H} \quad (2-13)$$

方程(2-12)和(2-13)中的  $\gamma$  通常是复数, 因此常写成

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

式中  $\gamma$  称特征传播常数,  $\alpha$  称衰减常数,  $\beta$  称相位常数。

### 2.1.2 均匀平面波在无损介质中的传播特性

均匀平面电磁波是横电磁(TEM)波, 其电场和磁场彼此垂直且都垂直于波的传播方向, 两种场在时间关系中总是同相位的, 其幅值总是常数。如设波沿正  $z$  方向传播, 则有

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} = 0$$

对于沿正  $z$  方向传播的均匀平面波, 设  $\mathbf{E}$  沿  $x$  方向, 则  $\mathbf{H}$  沿  $y$  方向。如波随时间的变化取指数形式  $e^{j\omega t}$  的正弦时间函数, 则一般情况下波的电场和磁场变化为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}E_0 e^{j\omega t - \gamma z} \quad (2-14)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{j\omega t - \gamma z} \quad (2-15)$$

对于无损介质,  $\sigma = 0$ , 于是,  $\gamma = j\omega\sqrt{\epsilon\mu}$ 。即  $\alpha = 0$  表明波沿  $z$  方向传播无衰减;  $\beta = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$  表明波在  $z$  方向有相位变化。因此, 在无损介质中沿  $z$  方向传播的均匀平面波的电场和磁场变化可写成

$$E_x = E_0 e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2-16)$$

$$H_y = H_0 e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (2-17)$$

在此时的假设下,  $E_y = E_z = 0, H_x = H_z = 0$ , 于是  $E_x = |\mathbf{E}|, H_y = |\mathbf{H}|$ , 应用方程(2-5)可得

$$\frac{\partial}{\partial z} E_x = -j\omega\mu H_y \quad (2-18)$$

而 
$$\frac{\partial}{\partial z} E_x = \frac{\partial}{\partial z} [E_0 e^{j(\omega t - \beta z)}] = -j\omega\sqrt{\epsilon\mu} E_x$$

所以 
$$\eta = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2-19)$$

$\eta$  称为媒质的特性阻抗(即电场强度与磁场强度的比率)。对于真空情况

$$\eta = \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377(\Omega) \quad (2-20)$$

$\eta_0$  又称为自由空间的特性阻抗。

归纳起来, 在无损介质( $\sigma = 0$ )中均匀平面波的传播特性有: 沿  $z$  方向无衰减( $\alpha = 0$ ), 沿  $z$  方向的相位有变化( $\beta = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$ ), 波的阻抗  $\eta$  和相位速度  $v_p$  都由媒质的磁导率和介电常数决定( $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}, v_p = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ )。