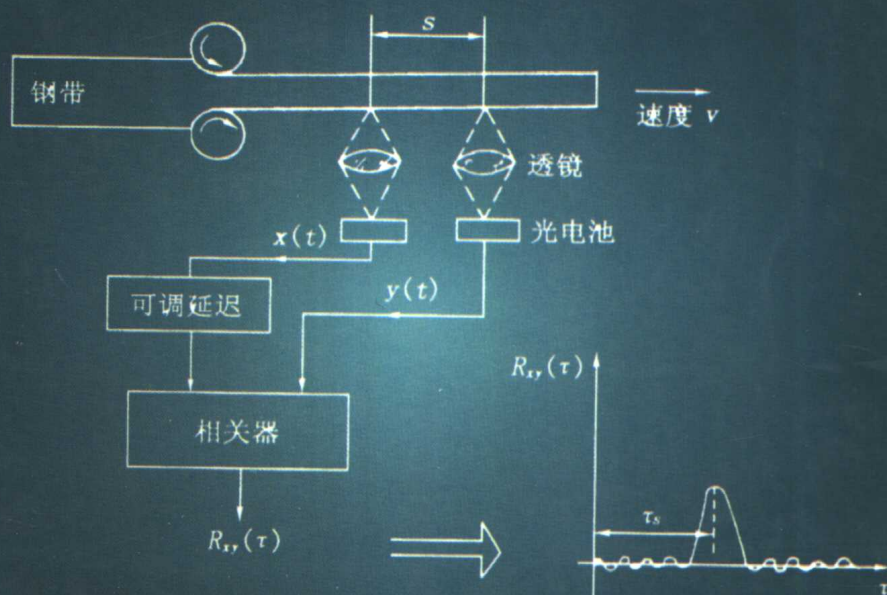


XIAN DAI CE SHI JI SHU

# 现代测试技术

李成华 栗震霄 赵朝会 主编



中国农业大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

现代测试技术/李成华等主编. —北京:中国农业大学出版社,2001. 11

ISBN 7-81066-306-2/S · 244

I. 现… II. 李… III. 测试技术-高等学校-教材 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 065799 号

责任编辑:宋俊果

封面设计:郑 川

出版 中国农业大学出版社  
发行  
经销 新华书店  
印刷 涿州市星河印刷厂  
版次 2001 年 11 月第 1 版  
印次 2001 年 11 月第 1 次印刷  
开本 16 印张 15.75 千字 305  
规格 787×980  
印数 1~4050  
定价 22.00 元

---

图书如有质量问题本社负责调换

社址 北京市海淀区圆明园西路 2 号 邮政编码 100094

电话 010-62892633 网址 [www.cau.edu.cn](http://www.cau.edu.cn)

## 编委名单

|        |        |     |     |
|--------|--------|-----|-----|
| 主    编 | 李成华    | 栗震霄 | 赵朝会 |
| 副 主 编  | 刘立意    | 童淑敏 | 张本华 |
| 参编人员   | 黄操军    | 周修理 | 郑德聪 |
|        | 彭桂兰    | 马德贵 | 蔡雨付 |
| 主    审 | 杨    方 |     |     |

## 前 言

《现代测试技术》是根据面向 21 世纪农业工程类本科专业教学内容和课程体系改革的精神和 2000 年 11 月 3 日召开的全国部分农业院校农业工程类本科专业教材建设研讨会上提出的关于《现代测试技术》教材的编写大纲要求,由沈阳农业大学、甘肃农业大学、河南农业大学、东北农业大学、内蒙古农业大学、黑龙江八一农垦大学、山西农业大学、塔里木农垦大学、安徽农业大学共同组织编写的。

现代测试技术是农业工程类本科专业的一门应用技术基础课程,它所涉及的内容和知识非常广泛。为适应科学技术的发展,本书强调基础理论与基本知识的讲授,注重基础理论与实际应用的结合,重点介绍现代检测手段的原理和仪器设备的构成特点以及应用技术,为解决工程实际应用中测试技术问题奠定基础。在教材内容的安排上,首先注重测试技术的基础性,突出强调技术基础在人才培养过程中的重要性,同时以测试技术的基本原理以及仪器设备的构成原理为主导,培养学生具备工程技术领域测试技术应用的基本能力;其次是强调实践性和测试技术领域各种技术相互的渗透和综合,即在切实加强基础理论和基本技能训练的同时,特别强调培养学生综合运用测试技术基础知识和技能来分析和解决工程实际问题的能力。为此,必须加强实践性的教学环节以及重视自学能力的培养,使学生具备应用测试技术原理和仪器设备组成实际测试系统的能力。

本教材的编写人员有:李成华、张本华、蔡雨付(沈阳农业大学),栗震霄(甘肃农业大学),赵朝会(河南农业大学),刘立意、周修理(东北农业大学),童淑敏(内蒙古农业大学),黄操军(黑龙江八一农垦大学),郑德聪(山西农业大学),彭桂兰(塔里木农垦大学),马德贵(安徽农业大学)。全书由李成华教授负责统稿,杨方教授(东北农业大学)担任主审。

本书在编写过程中参考了已有测试技术方面的教材和资料,并在书后的参考文献中列出。这些宝贵的资料对完成本书的编写起到了非常重要的作用,本书作者对所有参考资料的作者表示衷心的感谢。

本书可供高等农业院校农业工程类本科专业的教学之用,也可作为从事机械工程领域测试技术工作的工程技术人员参考资料。

编者

2001 年 7 月

# 目 录

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| <b>1 绪 论</b> .....          | (1)   |
| 1.1 测试技术的地位和作用 .....        | (1)   |
| 1.2 测试系统的组成及特点 .....        | (2)   |
| 1.3 现代测试技术的发展趋势 .....       | (3)   |
| 1.4 课程的研究内容和性质 .....        | (5)   |
| <b>2 测试系统分析</b> .....       | (6)   |
| 2.1 信号概述 .....              | (6)   |
| 2.2 测试系统的组成及基本特性 .....      | (9)   |
| 思考与习题 .....                 | (27)  |
| <b>3 传感器原理</b> .....        | (28)  |
| 3.1 传感器的基本概念 .....          | (28)  |
| 3.2 常用传感器 .....             | (31)  |
| 3.3 新型传感器 .....             | (53)  |
| 3.4 传感器应用中的技术问题 .....       | (65)  |
| 思考与习题 .....                 | (69)  |
| <b>4 非电量基本参数的测试方法</b> ..... | (71)  |
| 4.1 力和转矩的测量 .....           | (71)  |
| 4.2 位移和厚度测量 .....           | (77)  |
| 4.3 速度和加速度的测量 .....         | (88)  |
| 4.4 振动的测量 .....             | (95)  |
| 4.5 转速的测量 .....             | (99)  |
| 4.6 噪声的测量 .....             | (105) |
| 4.7 压力的测量 .....             | (114) |
| 4.8 温度的测量 .....             | (119) |
| 4.9 湿度的测量 .....             | (127) |
| 4.10 流量的测量 .....            | (131) |
| 思考与习题 .....                 | (136) |

---

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| <b>5 测试信号的处理</b> .....    | (138) |
| 5.1 传感器变换电路 .....         | (138) |
| 5.2 调制与解调 .....           | (144) |
| 5.3 滤波原理 .....            | (152) |
| 5.4 模拟和数字转换 .....         | (161) |
| 思考与习题 .....               | (167) |
| <b>6 测试信号的记录</b> .....    | (169) |
| 6.1 常用记录仪器 .....          | (169) |
| 6.2 新型记录仪 .....           | (184) |
| 6.3 计算机在数据记录中的应用 .....    | (190) |
| 思考与习题 .....               | (201) |
| <b>7 测试中干扰的控制</b> .....   | (202) |
| 7.1 干扰的类型及产生 .....        | (202) |
| 7.2 干扰信号的基本输入方式 .....     | (203) |
| 7.3 常用抗干扰技术 .....         | (206) |
| 思考与习题 .....               | (209) |
| <b>8 测试结果的处理与分析</b> ..... | (210) |
| 8.1 测量误差理论与分析 .....       | (210) |
| 8.2 确定性信号的处理与分析 .....     | (223) |
| 8.3 随机信号的处理与分析 .....      | (231) |
| 思考与习题 .....               | (240) |
| 参考文献 .....                | (242) |

# 1 绪 论

## 1.1 测试技术的地位和作用

在科学研究中,任何科学理论的建立和科学研究成果的提出都必须通过大量的试验与测量,并对通过测量所获得的数据进行分析和计算,以验证科学理论以及研究成果的正确性和可靠性。在工农业生产过程中,为了保证生产的正常进行,必须对生产过程中的各种参数进行测量,并在分析测量结果的基础上,对生产过程进行监视和控制,以保证产品的质量。在这些测量过程中所应用的测量手段就是测量仪器或仪表,而应用测量仪器或仪表来实现测量目的的技术工艺则称为测试技术。现代化的测试仪器是科学研究和生产实践的必要手段,它的水平高低是科学技术发展的重要标志,同时也是科学研究和生产技术发展的一个重要技术基础。

测试技术的发展是随着科学技术和生产实践的发展而前进的,因为随着科学技术和生产实践的向前发展,就要求提供新的测试手段以满足需要,这样又促进了测试仪器以及测试技术的发展,而科学技术的发展又为研制新型的测试仪器提供了条件。近 30 年来,随着电子技术和计算机应用技术的飞速发展,传统的测试技术得到了较大的改进和提高,如测试准确度和灵敏度得到了提高,测试速度变得更快,测试结果能连续实时自动记录,并可用计算机对测试结果进行分析计算以及实时完成生产过程的自动控制等。

在科学研究和工程技术上所要测量的参数大多为非电量,如机械量的位移、速度和加速度,热工量的温度、压力和流量,成分量的化学成分和浓度以及状态量的颜色、磨损量和裂纹等。这些参数的物理特性或化学特性千差万别,在测量过程中,测量结果的传输和保存以及显示非常不方便,因而促使人们研究用电量测试的手段来进行这些非电量的测试。这是由于电测技术具有测量精度高、反应速度快、数据传输方便并且能够连续自动记录等优点。这样就形成了非电量的电测技术。非电量电测技术具有两个方面的内容:一方面是研究用电测手段测量非电量的仪器和仪表;另一方面是研究如何能正确和快速地进行非电量的测试。

在工程技术领域,测试技术的作用有如下几个方面:

①通过测量生产过程中的有关工艺参数,对生产过程的运行情况进行监视,使之保持在最佳的工作状况;或者对生产设备在运转过程中的有关技术参数进行测量,并对测试结果进行分析,判断设备的工作状态。

②将生产过程中各种工艺参数的测量结果与要求的数值相比较,并且根据偏差的大小范围要求进行反馈,以对工艺参数进行调整和控制,保证生产过程的要求。

③根据对工艺过程参数和设备性能参数测试结果的分析评价,找出存在的问题,并提出改进工艺过程和设备性能的措施。在改进措施实施以后,是否达到了改进的效果,仍需进行测试来分析和评定。这些测试结果是工艺过程参数以及设备性能参数进一步改进设计的基础。

④通过测试技术手段研究机械系统的响应特性和系统参数以及进行载荷识别,为机械系统的动态设计提供依据。

在机械制造工业、电力工业、石油工业、化学工业、轻工食品和国防工业中,都需要采用非电量的电测手段来对有关的参数进行测量,并且这种测量随着科技和生产的发展越来越多地从静态物理量测量向动态物理量测量方向发展。这就对测试仪器和测试手段提出了更高的要求。

## 1.2 测试系统的组成及特点

一个测试系统要完成对被测量的测试,首先必须要获得被测量的信息,并且根据被测量信息的物理学特性,将其转换成容易处理和传输的电量信号,然后将电量信号所表示的信息进行变换或放大,再用指示仪或记录仪将信息显示或记录下来。有的测试系统还需要对信息进行处理,以获得反映实际被测量数值大小的测试结果。一般的测试系统包括传感器(信息的获得)、测量电路、放大器(信息的变换和调理)、数据处理装置(信息的处理)、显示与记录装置(信息的显示)。这些组成部分之间的关系如图 1-1 所示。

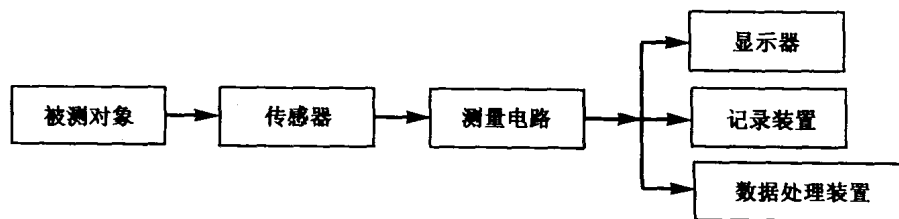


图 1-1 测试系统组成

传感器处于被测对象与测试系统的接口位置,它是将被测量的非电信息转换成电信号的装置,因此是一个获得测试系统信号输入的重要元件。传感器直接从被测对象中提取被测量的信息,感受其变化并将其变换成便于测量的其他电量信号,例如将速度变换成电压,将应变变换成电阻,将流量变换成压力等。因此,传感器获得信息的正确与否直接影响着整个测试系统的精度。

测量电路又称中间转换器,它的作用是将传感器输出的电信号进行传输、放大和转换等。测量电路的种类根据传感器的类型而定,如电阻式传感器需采用一个电桥电路把电阻值的变化变换成电流或电压的变化输出,所以它属于测试信号的转换电路。由于测量电路的输出信号一般都比较小,不能直接驱动显示或记录装置工作,故常常需将信号加以放大,因此在测量电路中通常具有放大器。为了使被测量信号易于传输和处理,测量电路中有时还具有调制与解调器、模数转换器等。

测试结果的显示目前通常有三种方式,即模拟显示、数字显示和图像显示。模拟显示是利用指针相对标尺的位置来读数;数字显示是用数字形式来显示测试结果的数值大小;图像显示是用屏幕显示读数或者被测参数的变化曲线。在实际测试过程中,有时不仅要读出被测量的具体数值,而且还要了解它的变化过程,特别是在动态测试过程中,测试结果随时变化,无法用显示仪器指示,在这种情况下,就必须将测量信号送入记录装置中自动记录下来。目前常用的自动记录装置有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪以及阵列式记录仪等。

以计算机为基础,配备部分外设装置组成测试信号的记录和处理系统,是近年来测试系统的发展趋势。测试系统中的计算机既可以完成测试结果的记录或显示,同时又能对测试结果进行计算处理,并且对测试结果分析处理方式可根据测试者的要求编写不同的程序,使得测试系统的功能大大加强。

### 1.3 现代测试技术的发展趋势

科学技术的快速发展和生产实践领域的不断扩大,对测试技术提出了越来越高的要求,因此也促进了测试技术的迅速发展。现代测试技术除了进一步提高测试的精度和可靠性外,总的发展趋势是测试系统的小型化、智能化、多功能化以及无接触化,其特点主要表现在下述几个方面。

(1)测试仪器应用范围的扩大 随着科学技术的不断发展,对测试仪器的性能要求也在不断提高,特别是对生产实际和科学研究过程中极端参数的测量,要求原有测试仪器的技术指标得以提高,以扩大其应用范围。例如连续测量液态金

属的温度、连续长时间测量超高温介质的温度(2 500~3 000℃),超低温温度的连续测量,超高压的测量以及超精度质量测量等。这些极端参数的测试要求测试仪器具有较大的测量范围,并且具有足够高的精度和可靠性。

(2)新型传感器的研究 测试技术应用的领域随着生产和科学研究的发展在不断扩大,需要测量的参数种类也在不断增加,如颜色、味觉、化学成分、超高温、超低温等。因此,促使人们不断地探讨新型的测量机理,研制新型的传感器以及测量系统。这方面研究除了采用新的物理效应、化学反应以及生物功能外,还不断地研究具有仿生功能的新型传感器。在新型传感器的开发研究过程中,新型传感器敏感元件材料的开发与应用具有十分重要的意义。目前,半导体材料、陶瓷材料以及高分子聚合材料作为传感器敏感元件材料的研究正在不断深入,开发出了仿生化、智能化以及生物化的传感器。

(3)多功能测试仪器的开发 传统的传感器大多是进行一个点的单参数测试,这已不能满足生产实际和科学研究发展的需要。在有些场合,希望在某一测量点测得多个参数,因此需要具有多种参数同时变换的传感器,并且测量电路能够将不同参数的电信号同时处理和记录,也就是要求测试系统的多参数测量和多功能化。例如要同时测量一点的温度和湿度,就必须寻求一种能同时感受温度和湿度的敏感元件材料,并将其制造成同时将温度和湿度变换成不同电量的传感器,并且互不影响。由钛酸钡和钛酸锶组成的多孔陶瓷的电容量与温度有关,而其电阻值与湿度呈函数关系,这样就可以通过测量电容和电阻值间接获得温度和湿度的数值。

多功能化测试系统的另一层含义是指除传感器之外的其他测试部分具有普遍的通用性,即测量电路对电信号的转换和放大以及测试系统的显示和记录可应用于多种场合下不同种类参数的测量。对于不同参数的测量,只是对测试系统联接相应的合适传感器。这样,就使得测试系统的功能和应用范围得到了扩大。

(4)测试系统的智能化 随着微电子技术和计算机技术在测试领域的应用,微处理器与传感器的相互结合以及与测试信号处理过程的结合使得测试系统具有一定的智能化功能。微电子处理器的信号调节与微机接口电路和信号处理电路可与传感器封装成一体,使得传感器不仅仅具有信号的检测能力,同时还可以对信号进行判断和处理,并且根据测试信号的变化自动调节信号处理电路的信号放大和传递方式。这样,可以使测量精度得到较大的提高,并且可以消除测试过程中的随机因素干扰,以得到精确的测试结果。

## 1.4 课程的研究内容和性质

现代测试技术课程所研究的对象是科学研究和工程技术领域测试过程中常用的传感器、中间变换电路以及显示和记录装置的结构和工作原理,测试系统的静态和动态特性以及评价方法,测试信号的分析以及测量误差和数据处理方法,常见物理量的测试过程以及测试方法。

现代测试技术是一门技术基础课,与本课程直接相关的基础知识包括数学、物理学、工程力学、电工学、电子学以及计算机技术等。通过本课程的学习,使学生掌握测试系统的组成特点和组成方法,具备静态和动态测试所需要的基本知识和技能,为进行工程实际测试打下坚实的基础。学生在学完本课程之后,应具备下述 5 方面的知识和能力。

①掌握常用传感器的种类、结构特点和工作原理,并具备根据实际测试要求选择合适传感器的能力。

②熟悉传感器输出信号的常用处理方法以及中间变换电路的结构、工作原理、适用特点,具备根据不同种类传感器选用适宜中间变换电路,进而设计中间变换电路的能力。

③了解和掌握各种信号显示与记录装置的结构、工作原理以及适用特点,并能根据实际需要选用合理的显示与记录装置。

④在掌握测试系统特性的基础上,具备根据实际被测量的特点,将传感器、中间变换电路和显示记录装置正确地组成测试系统的能力。

⑤掌握测试信号的时域和频域描述以及分析方法,具备根据测试结果正确解决实际问题的工作能力。

本课程具有较强的实践性,因此要求在学习过程中,加强理论与实践的结合,注重实验课对理论知识理解和掌握的功用,使学生通过课程的学习具备实际的测试工作能力。

## 2 测试系统分析

### 2.1 信号概述

#### 2.1.1 信息与信号

在科学研究和生产实际中,经常要对客观存在的物体或物理过程进行观察和测量,以了解和掌握表征这些物体或物理过程本质特性的信息。为了达到观测事物某一本质问题的目的,人们采用各种技术手段来表达所需要的信息,以提供人们观测和分析,这种对信息的表达形式称为信号。测试系统根据被测试对象的信息特征,要接收和处理不同种类的信号。机械工程信号如力、速度、加速度、位移和温度等都是非电量信号,这类信号需要通过测试系统的传感器元件转换成电信号,才能被测试系统处理和记录。工程测试技术是从客观现象中获取有关信息的技术过程,而信号就是有关信息的载体。因此测试系统的功用就是通过测试信号的检测来获取工程信息。使用测试系统进行某一参量测试的整个过程都是信号的流程,它包括信号的获取、信号加工和处理、信号显示或记录。所以,深入了解信号的各种特性对于明确测试系统及其各环节的要求以及提高测试质量具有重要意义。

工程上在线记录下来的表征系统物理现象的信号包含反映被测对象状态及特性的有用信息,它是我们认识被测对象内在规律、研究其相互关系以及预测未来发展的依据。但是通常从机械系统上直接测试所记录的信号比较复杂,直观上不易识别,因此必须对原动信号进行分析,以对机械系统的动态变化和动态特征具有更加深入的认识。

来自工程上的动态信号类型多样,为了使测试信号能正确地反映被测对象特性,必须对不同工况以及不同时间的信号具有深入的了解,以便正确判断信号的类型和采取相应的测试方法和分析方法。信号可以描述范围极为广泛的物理现象,它所蕴含的信息总是寄寓在某种形式的波形之中。例如人类的声道系统所产生的语音信号就是一种声压高低起伏变形的声波。

## 2.1.2 信号的分类与描述

在数学上,信号可以表示为一个或多个变量的函数,称信号函数。根据信号的特性,信号可分为连续信号和离散信号两大类。连续信号是指信号函数的变量为连续的信号,离散信号是指信号函数的变量为离散变化的信号。连续性信号又可以分为两类:一类是可以数学关系式描述其确定变化规律的确定性信号,另一类是其变化规律无法用数学关系式确定描述的随机信号。确定性信号分为周期信号和非周期信号,随机信号分为平稳随机信号和非平稳随机信号。上述信号的分类和种类如图 2-1 所示。

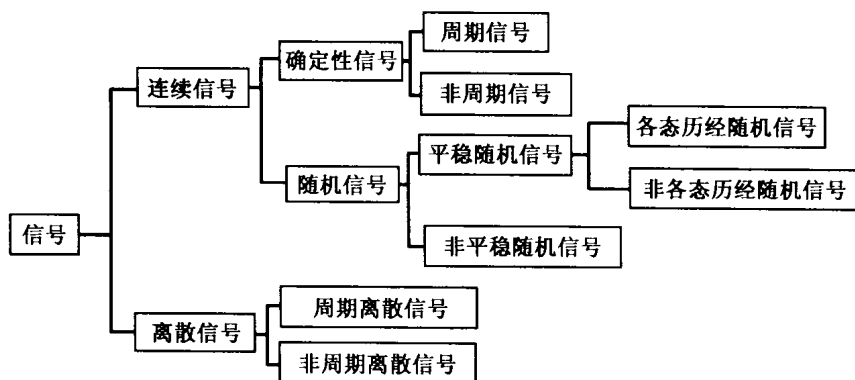
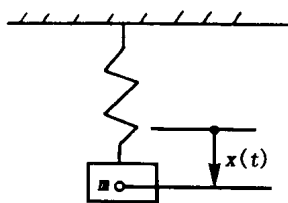


图 2-1 信号分类

(1) 周期信号 周期信号的幅值是呈周期性重复变化的,并且这种变化的规律可以用精确的数学关系式来进行描述。例如,单自由度振动系统作无阻尼自由振动时(图 2-2),其位移  $x(t)$  即是一个确定性的周期信号,可用数学表达式来描述振动质量  $m$  在任意时刻  $t$  的精确位置为



$$x(t) = x_0 \cos[t(K/m)^{1/2} + \varphi_0] \quad (2-1)$$

式中:  $x_0$  为初始幅值;  $m$  为质量;  $\varphi_0$  为初始相位角;  $t$  为时间;  $K$  为弹簧刚度。

分析式(2-1)可知,当  $t = t + nT$  时,下述关系式成立:

图 2-2 单自由度振动系统

$$x(t) = x(t + nT)$$

$T = 2\pi(m/K)^{1/2}$ ,  $n$  为任意整数。即  $x(t)$  是一个周期重复的信号,  $T$  为周

期,  $f=1/T$  为频率。周期信号常用均方值、均方根值、平均功率和相关函数来表示。

(2)非周期信号 非周期信号是一种信号取值时间有限的信号,其信号波形可以用确切的数学表达式描述。在机械工程测试和物理测试上,很多现象都可以看做是非周期信号。常见的非周期信号包括单位阶跃信号、单位脉冲信号和矩形脉冲信号等。

单位阶跃信号的数学表达式为

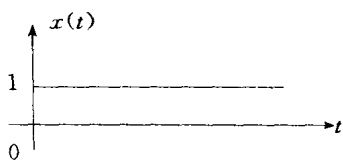


图 2-3 单位阶跃信号

$$x(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2-2)$$

其信号波形如图 2-3 所示。在工程上,对某一系统在某时刻的加载或卸载所反映出的信号即是阶跃信号。利用单位阶跃信号可分

析测试系统的动态特性。

单位脉冲信号的数学表达式为

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

在物理学和控制工程中,单位脉冲信号简称为  $\delta(t)$  函数,其信号波形如图 2-4 所示。在工程测试中,常用单位脉冲响应来表达系统的动态特性。

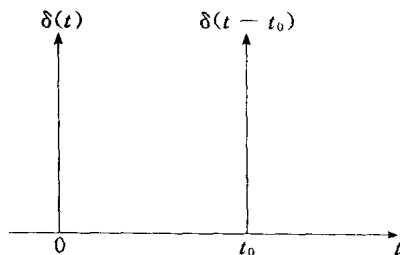


图 2-4 单位脉冲信号

矩形脉冲信号的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 1 & |t| < \tau/2 \\ 0 & |t| > \tau/2 \end{cases} \quad (2-4)$$

其信号波形如图 2-5 所示。在实际应用中,矩形脉冲信号常用来对其他信号进行加权处理。

(3)随机信号 在现代测试技术领域,存在大量非确定性的随机信号,其特点是信号在各瞬时的取值(幅值、相位、频率)无法预先确定,并且不存在取值的重复性,如图 2-6 所示。随机信号不可能用严格的数学公式来描述,只能用统计学方法中的统计特征参数来描述。

根据统计特征参数是否为时间的函数,随机信号分为特征参数不随时间变化的平稳随机函数和特征参数随时间变化的非平稳随机函数。在平稳随机过程

中,若任一单个样本函数的时间平均统计特征参数等于该过程的集合平均统计特征参数,这样的平稳随机过程称为各态历经随机过程。各态历经过程中的随机信号称为各态历经随机信号,否则称为非各态历经随机信号。在平稳随机过程中,各态历经随机信号的一个样本能够表现出整个随机过程各种状态都经历的特征,具有充分的代表性。因此,只要测试了一个样本函数就可以代表整个随机过程,在工程实际测试中,通常把随机信号按各态历经过程来处理。

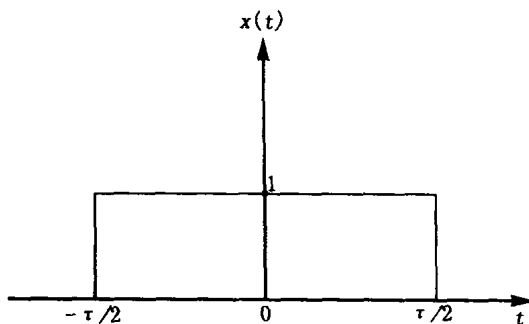


图 2-5 矩形脉冲信号

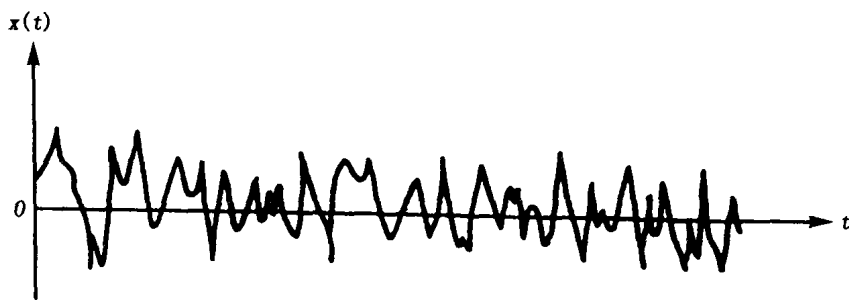


图 2-6 随机信号

随机过程常用均值、方差、相关函数等来描述其基本统计特征。描述各态历经随机信号的主要统计参数有均方值、概率密度函数、自相关函数和功率谱密度函数。

## 2.2 测试系统的组成及基本特性

### 2.2.1 测试系统的组成特点

测试系统在组成特点上具有广义性。所谓“测试系统”,通常是指由数个环节

按一定数量关系组成能够完成人们指定测试任务的整体。有关测试系统的组成在本书绪论中已经涉及。这里应该注意的是,由于测试的目的和要求不同,其含义的伸缩性是很大的,有时测试系统可能是由庞杂的多个环节组成,有时它又可能仅由功能单一的测试装置组成。因此,本章中所称的“测试系统”即包含各复杂装置构成的系统,也包含系统的各组成环节,例如传感器、放大器、中间变换电路、记录器,甚至一个很简单的 RC 滤波单元等等。

这样,一个典型的测试系统可由图 1-1 所示。通常把测试系统的输入信号称为激励,测试系统对这一作用的反应即输出信号或测量结果称为响应。测试系统实际上可认为是一个信息通道,理想的信息通道应不失真地传输测量的信号,以获得准确的测量结果。从研究测试系统的角度来看,可把图 1-1 简化为只有输入量  $x(t)$ 、系统的传输特性  $h(t)$  和输出量  $y(t)$  三者之间数学关系的模型,如图 2-7 所示。显然,当系统的特性已知时,通过对输出信号的观察与分析,就可以推断出输入信号或被测量;同样已知系统特性和输入,就可以推断和估计系统的输出量;当输入信号已知时,通过对输出信号的观察与分析,也可以推断出测试系统的特性。

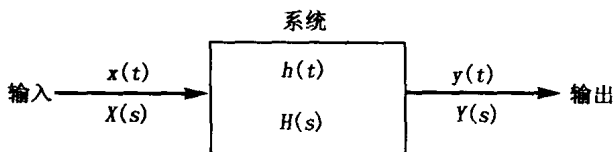


图 2-7 系统、输入和输出

## 2.2.2 测试系统的数学模型

理想的测试系统应该具有单值的、确定的输入与输出关系。显然,两者之间呈线性关系为最佳。一些实际测量装置无法在较大工作范围内满足这种要求,只能在较小工作范围内和一定误差范围内有条件地满足这项要求。

当系统的输入  $x(t)$  和输出  $y(t)$  之间的关系可用常系数线性微分方程

$$\begin{aligned}
 a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\
 b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t)
 \end{aligned} \quad (2-5)$$

来描述时,则称该系统为时不变线性系统,也称定常线性系统,式中  $t$  为时间自

变量。从数学上来看,这种系统的系数  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$  和  $b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$  均为常数,它们既不随时间变化,也不是自变量  $x$ 、因变量  $y$  及它们各阶导数的函数。式(2-5)就是动态测试系统及其功能组件的数学模型。

如果以  $x(t) \rightarrow y(t)$  表示上述系统的输入、输出的对应关系,则时不变线性系统具有以下一些主要性质:

#### ① 叠加性

若

$$x_1(t) \rightarrow y_1(t), x_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

则

$$[x_1(t) \pm x_2(t)] \rightarrow [y_1(t) \pm y_2(t)]$$

#### ② 比例特性

若

$$x(t) \rightarrow y(t)$$

则对于任意常数,都有

$$ax(t) \rightarrow ay(t)$$

#### ③ 微分特性

即系统对输入导数的响应等同于对原输入响应的导数。

若

$$x(t) \rightarrow y(t)$$

则

$$\frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \frac{dy(t)}{dt}$$

#### ④ 积分特性

即如果系统的初始状态为零,则系统对输入积分的响应等同于对原输入响应的积分。

若

$$x(t) \rightarrow y(t)$$

则

$$\int_0^t x(t) dt \rightarrow \int_0^t y(t) dt$$

#### ⑤ 频率保持性

若

$$x(t) \rightarrow y(t)$$

则

$$x_i(t) = X_i \sin(\omega_i t + \theta_x) \rightarrow y_i(t) = Y_i \sin(\omega_i t + \theta_y)$$

线性系统的这些特性,特别是叠加性和频率保持性在动态测试中是十分重要的。根据叠加性质,当一个测试系统有  $n$  个激励同时作用时,它的响应等于这  $n$  个激励单独作用的响应之和,即各个输入所引起的输出是互不影响的。这样,在分析定常线性系统时,可将一个复杂的激励信号分解成若干个简单的信号,譬如利用傅里叶变换,将复杂信号分解成一系列谐波信号,或者分解成若干个小的脉冲激励,然后求出这些分量激励的响应之和。根据频率保持特性,若已知系统是线性的,其输入信号的频率也已知,那么,在所测得的输出信号中,只有与激励频率相同的频率才可能是由该激励所引起的响应。这一特性在动不平衡的检测