



浙江省重点建设教材

普通高等院校机电工程类规划教材

测试技术 及其工程应用

主 编 钱苏翔

副主编 焦卫东 顾小军

主 审 杨世锡

普通高等院校机电工程类规划教材
浙江省重点建设教材

测试技术及其工程应用

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是浙江省重点建设教材。

本书主要讲述测试技术的基本理论、非电量测量方法及其工程应用。全书共 8 章:第 1 章测试技术概论;第 2 章常用传感器;第 3 章信号调理与记录;第 4 章信号分析与处理;第 5 章位移测量;第 6 章振动测试;第 7 章复合板材在线测厚;第 8 章旋转机械典型故障诊断。

本书可作为高等学校机械设计制造及其自动化专业的教材,也可作为测控、仪器及自动化等相关专业的教材,还可作为相关工程技术人员的参考用书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

测试技术及其工程应用/钱苏翔主编. —北京:清华大学出版社, 2010. 12
(普通高等院校机电工程类规划教材)

ISBN 978-7-302-23985-7

I. ①测… II. ①钱… III. ①测试技术—高等学校—教材 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 207133 号

责任编辑:庄红权

责任校对:王淑云

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:12.75

字 数:307 千字

版 次:2010 年 12 月第 1 版

印 次:2010 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:22.00 元

产品编号:038014-01

序 言

近十年来正是国家高等教育从精英教育向大众化教育发展的过程,全国教育事业成绩斐然。教材建设是搞好教学的重要工具,也是前提。一本适合教学的好教材是保证与提高人才培养质量的重要环节。

本教材是在浙江省高校教学名师钱苏翔教授主持下编写的,参编者也都有多年从事测试技术教学工作和相关课题研究工作的经验,并具有较深厚的相关理论与实践积淀。该教学团队承担的测试技术课程已进入浙江省精品建设课程。因此,这本教材既包含了他们多年从事机械工程测试技术教学工作的宝贵经验和相关科研工作的丰硕成果,也反映了国内外相关的科技发展的新成就等。

本教材的特色是特别突出了产、学、研合作在办学上的贡献以及如何促进高质量技术人才的培养。例如,综观已出版的国内外测试技术教材,其编写结构多是前有基础篇、后接应用篇,但本教材结构上增加了后两章专题篇,这种做法不多见,即与位移测量相关的复合板材在线测厚系统,与振动测试相关的旋转机械典型故障诊断。最后这两章也正是编写者在教学之余积极从事科学研究工作的结晶。本教材的这种编写结构,一定更能促进理论与实践相结合,使读者掌握的知识更加融会贯通并产生质的飞跃。

应编写者之邀,写了这个序言,作为一点心意,祝愿他们在未来的教学与科研工作中取得更大的成就。并欢迎读者与同行对本教材提出更多的批评与建设,以帮助他们进一步做好工作。

严拱标

2010年9月10日教师节

于浙江大学求是园

前 言

测试技术是工程技术领域中一个重要的技术,科学研究、产品开发、质量控制和性能试验等都离不开测试技术。测试技术的先进性已经成为一个国家经济高度发展和科学技术现代化的重要标志之一。

测试技术是机械类专业本科生必修的一门专业基础课。随着高等教育的快速发展和人才培养模式创新性的要求,各高校在课程建设上也力求特色。本教材编写人员已从事多年测试技术教学工作,在理论教学及工程实践上有一定的经验积累。本教材被列为浙江省精品建设课程和重点建设教材,编写过程中力求突出体系上的层次性、理论上的基础性、应用上的递进性。

全书共分8章,大体可分为基础篇、应用篇和专题篇三部分。基础篇包括第1~4章,包含测试技术概论、常用传感器、信号调理与记录、信号分析与处理等内容,其中第1章测试技术概论是最基础的内容;第2章常用传感器和第3章信号调理与记录是测试系统的基本构成,形成测试技术的一条线——“系统”;第4章信号分析与处理则形成测试技术的另一条线——“信号”。应用篇包括第5章和第6章,限于课时,仅选择工程中较具代表性的位移测量和振动测试讲解。专题篇包括第7章和第8章,复合板材在线测厚是位移测量在工程上的具体应用实例,而旋转机械典型故障诊断则可以认为是振动测试在工程上的实际应用,建议专题篇内容由浅入深贯穿在教学过程中。

本书由浙江大学杨世锡教授主审,嘉兴学院钱苏翔教授任主编并统稿,各章具体分工为:第1、3、7章由钱苏翔教授编写;第5、6、8章由焦卫东教授编写;第2、4章由顾小军副教授编写。此外,李竹平、杜琦、朱定坤、袁清平等也参与了图书的部分编辑工作。

本书在编写过程中参考了大量的文献资料,在此向文献资料中的作者致以诚挚的谢意!由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请同行及读者批评指正。

作 者

2010年11月

目 录

第 1 章 测试技术概论	1
1.1 测试技术的基本概念	1
1.1.1 测试的基本含义	1
1.1.2 测试系统的一般组成	1
1.1.3 测量方法	2
1.1.4 测量误差与测试系统不确定度	3
1.2 测试系统的基本特性	5
1.2.1 测试系统的数学描述	5
1.2.2 测试系统的静态特性	8
1.2.3 测试系统的动态特性	10
1.3 测试系统组成中应考虑的因素	16
1.3.1 测试系统的组成步骤	16
1.3.2 测试系统的负载效应及其减轻措施	17
1.3.3 测试系统的干扰和抗干扰	17
1.4 测试技术的发展	19
1.4.1 传感器技术的发展	19
1.4.2 计算机测试技术的发展	20
思考题与习题	22
第 2 章 常用传感器	24
2.1 传感器分类	24
2.2 参数型传感器	24
2.2.1 电阻式传感器	24
2.2.2 电容式传感器	27
2.2.3 电感式传感器	29
2.3 发电型传感器	32
2.3.1 压电式传感器	32
2.3.2 磁电式传感器	41
2.3.3 热电式传感器	44
2.4 其他传感器	52
2.4.1 光电式传感器	52
2.4.2 光纤式传感器	63
2.4.3 激光式传感器	64
2.4.4 智能传感器	66
2.5 传感器的选用原则	71

思考题与习题	72
第3章 信号调理与记录	73
3.1 电桥	73
3.1.1 直流电桥	73
3.1.2 交流电桥	76
3.2 调制与解调	78
3.2.1 概述	78
3.2.2 调幅与解调	78
3.2.3 调频与解调	82
3.3 滤波器	85
3.3.1 滤波器的分类	85
3.3.2 滤波器的性能	86
3.3.3 RC 滤波器的基本特性	87
3.3.4 实际带通滤波器的形式	89
3.4 信号的显示、记录与存储	90
3.4.1 信号显示、记录与存储装置的分类	90
3.4.2 信号显示装置	90
3.4.3 信号记录装置	92
3.4.4 信号存储装置	93
思考题与习题	93
第4章 信号分析与处理	95
4.1 信号分类	95
4.1.1 确定性信号与非确定性信号	95
4.1.2 连续信号与离散信号	96
4.1.3 能量信号与功率信号	97
4.2 周期信号与离散频谱	97
4.2.1 傅里叶级数的三角函数展开	97
4.2.2 周期函数的奇偶特性	99
4.2.3 傅里叶级数的复指数函数展开	100
4.2.4 周期信号的强度表述	102
4.3 瞬变非周期信号与连续频谱	104
4.3.1 傅里叶变换	104
4.3.2 傅里叶变换的主要性质	106
4.3.3 典型信号的傅里叶变换	110
4.4 随机信号与特征分析	114
4.4.1 概述	114
4.4.2 随机信号的主要特性参数	115
4.4.3 信号的相关分析	118

4.4.4 信号的功率谱分析	123
4.5 数字信号处理基础	127
4.5.1 数字信号处理的基本步骤	128
4.5.2 信号数字化出现的问题	128
思考题与习题	132
第5章 位移测量	134
5.1 概述	134
5.2 位移测量方法分类	134
5.3 常用位移测量传感器的主要技术指标	135
5.4 电阻式、电感式及电容式位移传感器	136
5.4.1 电阻式位移传感器	136
5.4.2 电感式位移传感器	136
5.4.3 电容式位移传感器	139
5.5 位移测量的应用	139
5.5.1 回转轴轴向运动误差的测量	140
5.5.2 回转轴径向运动误差的测量	141
5.5.3 轴承工作状态监测	144
思考题与习题	144
第6章 振动测试	146
6.1 概述	146
6.2 振动测试方法与测试系统	147
6.2.1 振动测试方法分类	147
6.2.2 振动测试系统	148
6.3 惯性式拾振器的工作原理	149
6.4 振动信号分析方法与仪器	151
6.4.1 振动信号分析方法	151
6.4.2 振动信号分析仪器	152
6.5 机械阻抗试验方法	153
6.5.1 机械阻抗的概念和试验原理	153
6.5.2 激振信号和激振器	154
6.5.3 典型机械阻抗试验	157
6.6 机械系统振动参数的估计	158
6.6.1 自由振动法	158
6.6.2 共振法	159
6.7 测振装置的校准	160
6.7.1 绝对法	160
6.7.2 相对法	161
思考题与习题	161

第 7 章 复合板材在线测厚	163
7.1 概述	163
7.2 虚拟仪器软件开发平台	163
7.2.1 虚拟仪器设计方法	163
7.2.2 LabVIEW 简介	164
7.3 复合板材在线测厚系统	166
7.3.1 复合板材生产工艺	166
7.3.2 复合板材在线测厚系统的总体结构	167
7.4 粗糙面复合板材在线测厚	168
7.4.1 软粗糙面复合板材的厚度测量	168
7.4.2 硬粗糙面复合板材的厚度测量	168
7.5 光洁面复合板材在线测厚	170
7.5.1 CCD 激光测厚系统	170
7.5.2 误差动态修正方法的工作原理	171
7.6 计算机监测与管理	172
7.6.1 软件系统模块	172
7.6.2 数据管理与查询	174
思考题与习题	175
第 8 章 旋转机械典型故障诊断	176
8.1 概述	176
8.2 故障诊断的本质与基本流程	177
8.3 机械故障诊断方法分类	178
8.4 转子故障诊断	179
8.4.1 转子故障的振动特征与信号检测	179
8.4.2 模拟转子系统的状态监测与故障诊断	181
8.5 齿轮(箱)故障诊断	185
8.5.1 齿轮(箱)故障机理	185
8.5.2 齿轮(箱)振动信号分析	187
8.5.3 电机-齿轮箱系统故障诊断	189
8.6 滚动轴承故障诊断	190
8.6.1 滚动轴承的故障机理	190
8.6.2 滚动轴承振动信号分析方法	191
8.6.3 电动机滚动轴承故障诊断	191
思考题与习题	193
参考文献	194

第 1 章 测试技术概论

测试技术属于信息科学的范畴,其与自动控制技术、计算机技术、通信技术构成完整的信息技术学科。测试技术是人类认识客观世界的手段之一,是科学研究的基本方法。科学探索需要测试技术,用定量关系和数学语言表达科学规律和理论需要测试技术,验证科学理论和规律的正确性同样也需要测试技术。测试技术是工程技术领域中一个重要的技术,科学研究、产品开发、质量控制和性能试验等都离不开测试技术。同样,在日常生活中,如汽车、家用电器等方面也离不开测试技术。使用先进的测试技术已经成为一个国家经济高度发展和科技现代化的重要标志之一。

本章是测试技术的最基础知识,旨在对测试技术的内容、组成、特性及发展有基本的认识,为后续内容奠定基础。

1.1 测试技术的基本概念

1.1.1 测试的基本含义

测试是具有试验性质的测量,或是测量和试验的综合。测量是对被测量进行定性和定量的操作过程,而试验则是对未知事物进行探索性认识的实验过程。

测试的基本任务是获取有用信息,信息总是蕴涵在某些物理量中,并依靠物理量来传递,这些物理量就是信号。因此,信号是信息的载体,而信息蕴涵于信号之中。例如,单自由度质量-弹簧系统的动态特性可以通过质量块的位移-时间关系来描述,质量块位移的时间历经就是信号,它包含了该系统的固有频率和阻尼比等特征参数,这些特征参数就是所需要的信息。通过分析信号中的有用信息,就掌握了这一系统的动态特性。显然,测试与信号密切相关,获取信息是测试的目的,信号是信息的载体,测试是获取被测参数信息的技术手段。

1.1.2 测试系统的一般组成

测试的过程就是获得信号并提取有用信息的过程。测试总是需要一定的测试设备,测试系统是指由相关的器件、仪器和测试装置有机组合而成的具有获取某些信息之功能的整体。测试系统的一般组成如图 1.1 所示。

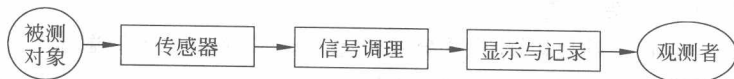


图 1.1 测试系统的一般组成

传感器是直接感受被测量并将其转换成电信号的器件,例如,将位移转换成电压量的变化,将应变转换成电阻量的变化等。传感器位于测试系统的最前端,其性能直接影响到测试

系统的质量,是测试系统中的关键部件。

信号调理环节的作用是将传感器的输出信号进行传输、放大和转换,使其适合于显示、记录 and 数据处理。如幅值放大、将阻抗变化转换成电压的变化或频率的变化等。信号调理环节的形式很多,典型的信号调理电路包括电桥、调制解调、滤波、放大等。

显示与记录环节以观察者易于观察和分析的形式来显示或存储测试的结果。显示与记录装置有两种类型:一种用于显示记录模拟电信号,如笔录仪、磁带机记录仪、示波器等;另一种显示记录数字信号,如显示器、打印机、绘图仪等计算机输出设备。

随着测试相关理论与相关技术的发展,特别是计算机技术的发展,信号的分析与处理成为测试系统的有机组成部分,形成如图 1.2 所示的以计算机为核心的测试系统。在图 1.2 中,被测量经传感器转换成某种形式的电信号,经信号调理后,通过模/数转换变成数字信号送入计算机,计算机按设定的程序完成信号的采集与存储、数据的运算、分析与处理,并以友好的界面输出显示结果。数字信号分析与处理,能便于观察者更深入地认识被测对象的状态和特性。以计算机为核心的测试系统具有抗干扰能力强、测试速度快、精度高、实现功能多等特点。

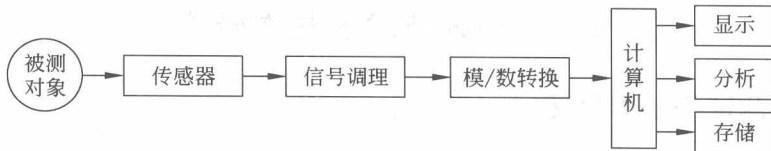


图 1.2 以计算机为核心的测试系统组成

需要指出的是,为了准确地获得被测对象的信息,要求测试系统中每一个环节的输出量与输入量之间必须具有——对应的关系,而且输出的变化能够准确地反映其输入的变化,即实现不失真的测试。

1.1.3 测量方法

测试技术以测量学的理论作指导,符合测量原理。测量方法是指按测量原理获得测量结果的方法。在构成测试系统之前首先要确定采用何种测量方法。从不同的角度来看,测量方法可分为多种。

1. 直接测量和间接测量

直接测量指无须经过函数关系的计算,直接通过测量仪器得到被测值的测量。间接测量指在直接测量值的基础上,根据已知函数关系,经计算而得到被测值的测量。如测量发动机的功率往往采用间接测量方法,即分别直接测量发动机的扭矩、转速,经计算得到功率。

2. 接触测量和非接触测量

接触测量和非接触测量是以测试系统或传感器与被测物是否接触来区分的。测试系统的部件接触被测物都会给被测物的运动带来影响。在不能忽略影响的情况下就要采用非接触测量。

3. 动态测量和静态测量

动态测量和静态测量是以被测信号的变化速度来区分的。如果测量系统测量的信号变化缓慢,这种测量过程称作静态测量;测量变化较快的信号称作动态测量。

测量方法对测量形式和测量精确性有直接的影响,测量方法的确定是测试工作关键的第一步。

1.1.4 测量误差与测试系统不确定度

测量结果总是有误差的,误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程中。

1. 测量误差定义

测量结果与被测量真值之差称为测量误差。设被测量真值为 A_0 , 测量结果为 A_x , 则测量误差 ΔA 为

$$\Delta A = A_x - A_0 \quad (1.1)$$

式(1.1)中真值 A_0 是不能确切知晓的,因为不存在无误差的测量。但是真值可以用约定真值来代替,约定真值是指用一定的方法,使其充分接近真值的量。被测量的实际值和经过修正的多次测量的算术平均值都可以作为真值。实际值是指高一等级的计量标准器具所复现的量值,或测量实际表明它满足规定准确度要求、可用来代替真值使用的量值。

2. 误差分类

根据误差的统计特征,可以将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差 在对同一被测量进行多次测量的过程中,出现某种保持恒定或按确定的方式变化着的误差,它是由系统本身的缺陷导致的。

通常按系统误差的正负号和绝对值是否已经确定,将系统误差分为确定性和不确定性系统误差。确定性系统误差可以通过修正进行消除。

(2) 随机误差 在对同一被测量进行多次测量的过程中,误差的正负号和绝对值随机变化,则此类误差称为随机误差。随机误差主要是由环境因素、干扰信号和内部热噪声等引起的。

随机误差不可能被修正。随机误差就其个体而言是不确定的,但其总体可用统计规律来定量,在了解其统计规律性之后,可以控制和减少它们对测量结果的影响。

(3) 粗大误差 一种明显超出规定条件下预期误差范围的误差。粗大误差是由于某种不正常的原因造成的,在数据处理时可去除。

实际工作中常根据产生误差的原因把误差分为器具误差、方法误差、调整误差、观测误差和环境误差。

3. 误差表示方法

常用的误差表示方法有以下几种。

(1) 绝对误差 由式(1.1)所表示的误差,其具有被测量的量纲。

(2) 相对误差 由误差与真值的比值表示。相对误差是无量纲量,通常百分数来表示,若相对误差为 γ , 则

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \quad (1.2)$$

(3) 引用误差 在相对误差表示方法中,用于计量器具的误差表示方法。若引用误差用 K 表示,则

$$\pm K\% = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (1.3)$$

式中的 A_m 为引用值, 引用值是计量器具的标称测量范围的最高值, 如一个电压表, 其标称范围为 $0 \sim 150 \text{ V}$, 其引用值为 150 V 。

引用误差表示方法只用于表示计量器具特性的情况中, 其实际上就是计量器具最大读数时的相对误差。

最大引用误差为计量器具划分准确度等级提供了方便。电工仪表就是按最大引用误差值来分级的, 我国的电工仪表共分 7 级, 即 0.1 、 0.2 、 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.5 和 5.0 。如果仪表准确度为 K 级, 则表示该仪表的最大引用误差不会超过 $K\%$ 。

例 1.1 用 1.5 级量限 20 A 的电流表甲, 0.5 级量限 150 A 的电流表乙, 分别测量 10 A 电流, 试比较两次测量结果的准确度。

解 甲表的最大绝对误差

$$\Delta I_{\text{甲}} = \pm K\% \times I_{\text{m甲}} = \pm 1.5\% \times 20 = \pm 0.3 \text{ A}$$

甲表测量的最大相对误差

$$\gamma_{\text{甲}} = \frac{\Delta I_{\text{甲}}}{I_0} \times 100\% = \frac{\pm 0.3}{10} \times 100\% = \pm 3\%$$

乙表的最大绝对误差

$$\Delta I_{\text{乙}} = \pm K\% \times I_{\text{m乙}} = \pm 0.5\% \times 150 = \pm 0.75 \text{ A}$$

乙表测量的最大相对误差

$$\gamma_{\text{乙}} = \frac{\Delta I_{\text{乙}}}{I_0} \times 100\% = \frac{\pm 0.75}{10} \times 100\% = \pm 7.5\%$$

由上例可以看出, 仪表的准确度虽然高, 但是测量结果的误差反而增大了。这是因为仪表准确度一定时, 量限越大的仪表最大绝对误差越大。所以, 在选择仪表量程时, 应根据被测量的大小, 兼顾仪表的准确度等级和量程, 不可片面地追求高准确度仪表。一般要使其工作在满度值 $2/3$ 以上的区域。

4. 测试系统不确定度

不确定度是测量误差量值分散性的指标, 它表示对测量值不能肯定的程度。完整的测量结果不仅应包括被测量的量值, 还应包括它的不确定度。用测量不确定度来表明测量结果的可信赖程度。不确定度越小, 测量结果可信度越高, 其使用价值越高。只有知道测量结果的不确定度时, 此测量结果才有意义和用处。

减少系统不确定度主要从三个方面采取措施:

(1) 提高系统的可测性, 即建立正确的测量方法和高品质的测试系统, 以达到减小系统误差的目的。

(2) 减小环境因素(如干扰信号、温度等)对系统的影响。以达到减小随机误差的目的。

(3) 适时对系统进行定标或定度。系统使用一段时间后会因元件的老化、结构磨损等因素而加大系统的不确定度, 应对系统进行重新定标。定标的过程称作标定。将一组标准输入量输入测试系统, 用更高精度等级的测试手段测出相应的输出值。

标定按给定输入信号形式分为两种类型:

(1) 静态标定 标准输入值为静态值。一般采用静态标定获得测试系统定度曲线。

(2) 动态标定 标准输入值为动态值。动态测量时, 系统由于自身的频率特性、干扰等其他因素使测量定度产生偏差, 因此在要求高的情况下, 应对系统进行动态标定。动态标定

要由动态标准信号发生器输出标准脉冲信号或其他形式的动态信号。如测力系统的动态标定用的力发生装置是一个标准信号发生器,能输出幅值精确的瞬态力。动态标定过程和所用设备较为复杂,在要求不高的场合一般由静态标定替代。

1.2 测试系统的基本特性

1.2.1 测试系统的数学描述

一般地,把外界对测试系统(或测量装置)的作用称为系统的输入或激励,而将系统对输入的反映称为系统的输出或相应。如图 1.3 所示, $x(t)$ 表示测试系统随时间而变化的输入, $y(t)$ 表示测试系统随时间而变化的输出。

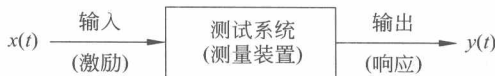


图 1.3 测试系统方框图

对于观测者而言,关心的只是测试系统的输入量与输出量之间的数学关系,而不是其内部具体的物理结构。为了研究测试系统的特性,就要对测试系统进行数学描述,即建立数学模型,在此基础上研究输入信号经过系统后转换成何种输出信号,进而研究测试系统应具有什么样的特性,输出信号才能复现输入信号,即实现不失真测量;或者研究对于给定的测试系统,在给定的测量误差内的适用范围。

1. 时域描述

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(1.4)来描述时,称该系统为定常线性系统或时不变线性系统,测试系统时域数学模型的形式就是常系数线性微分方程。

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ & = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中, t 为时间自变量; $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$ 均为不随时间而变化的常数。

对于测试系统,其结构及其所用元器件的参数决定了系数 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$ 的大小及其量纲。由于一个实际的物理系统其组成中的各元器件的物理参数并非能保持常数,如电子元件中的电阻、电容、半导体器件的特性等都会受温度的影响,这些都会导致系统微分方程参数的时变性,所以理想的线性定常系统是不存在的。在工程实际中,常以足够的精确度认为多数常见物理系统的参数 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$ 是时不变的常数,而把一些时变线性系统当作线性定常系统来处理。

式(1.4)中, $n=1$ 时,系统称为一阶系统,由下式表示:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1.5)$$

$n=2$ 时,系统称为二阶系统,由下式表示:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1.6)$$

$n \geq 3$ 的系统称作高阶系统。理论分析表明,任何高阶系统都可以是若干一阶或二阶系统通过一定的方式(串联或并联)组合而成。因此,分析并了解一阶或二阶系统的传输特性是分析并了解复杂测试系统传输特性的基础。

线性定常系统具有以下几个主要性质。

(1) 叠加性 当几个输入同时作用于系统时,其响应等于各个输入单独作用于该系统的响应之和。假设系统输入信号分别是 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$, 其对应的响应分别是 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$, 记作 $x_1(t) \rightarrow y_1(t)$, $x_2(t) \rightarrow y_2(t)$, 则有

$$x_1(t) \pm x_2(t) \rightarrow y_1(t) \pm y_2(t) \quad (1.7)$$

此式对于有限多项输入和响应也是成立的。

(2) 比例性 若系统的输入扩大 K 倍, 则其响应也将扩大 K 倍。设有 $x(t) \rightarrow y(t)$, 对于任意常数 K , 则有

$$Kx(t) \rightarrow Ky(t) \quad (1.8)$$

(3) 可微性 系统对输入导数的响应等于对该输入响应的导数。设有 $x(t) \rightarrow y(t)$, 则

$$\frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \frac{dy(t)}{dt} \quad (1.9)$$

(4) 可积性 当系统的初始状态为零, 则系统对输入积分的响应等于原输入响应的积分。设有 $x(t) \rightarrow y(t)$, 则

$$\int_0^t x(t) dt \rightarrow \int_0^t y(t) dt \quad (1.10)$$

(5) 同频性 若系统的输入是某一频率为 ω 的简谐信号, 则其稳态响应也必是频率为 ω 的简谐信号。即, 若输入为 $x(t) = x_0 e^{j\omega t}$, 则输出必为 $y(t) = y_0 e^{j(\omega t + \phi)}$ 。

线性定常系统的这些主要性质, 特别是叠加性和同频性, 在测试工作中具有主要意义。例如, 当测试系统的输入信号为由多种频率成分叠加而成的复杂信号时, 对应的输入就等于组成输入信号的各项频率成分分别输入到此测试系统时所引起的输入的叠加, 这样就可以把一个复杂信号的作用看成为若干个简单信号作用的和, 从而使问题简化。又如, 在实际测试中, 测试得到的信号常常会受到其他信号或噪声的干扰, 依据同频性, 可以认定测得信号中只有与输入信号相同的频率成分才是真正由输入引起的输出。同样, 在故障诊断中, 根据测试信号的主要频率成分, 在排除干扰的基础上, 依据同频性推出输入信号也应包含该主要频率成分, 通过寻找产生该频率成分的原因, 就可以诊断出故障的原因。

2. 复数域描述

系统的传递函数就是系统的复数域模型。当系统的初始状态为零时, 系统输出的拉氏变换 $Y(s)$ 和系统输入的拉氏变换 $X(s)$ 的比值被定义为系统的传递函数 $H(s)$, 即

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1.11)$$

式中, s 是复变量, $s = \sigma + j\omega$ 。

传递函数是一种对系统特性的解析描述, 它包含了瞬态、稳态时间响应和频率响应的全部信息。传递函数有以下几个特点:

(1) $H(s)$ 描述了系统本身的动态特性, 与输入量 $x(t)$ 及系统的初始状态无关。

(2) $H(s)$ 是对物理系统特性的一种数学描述, 与系统的具体物理结构无关, 同一传递函数可以表征具有相同传输特性的不同物理系统。

(3) $H(s)$ 中的分母取决于系统的结构,而分子则表示系统同外界之间的联系,如输入点的位置、输入方式、被测量以及测点布置情况等。分母中 s 的幂次 n 代表系统微分方程的阶数,当 $n=1$ 或 $n=2$ 时,分别称为一阶系统或二阶系统。

一阶系统的传递函数表达式为

$$H(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (1.12)$$

式中, τ 称为时间常数。

二阶系统的传递函数表达式为

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + 1} \quad (1.13)$$

式中, ω_n 称为系统的固有频率, ζ 称为系统的阻尼比。

3. 频域描述

系统的频率响应函数就是测试系统的频率数学模型。在频域中定义输出信号与输入信号的幅值比、输出信号与输入信号的相位差为测试系统的幅频特性和相频特性,总称为测试系统的频率响应函数。

频率响应函数描述系统的特性随信号频率变化的规律,与传递函数相比,频率响应函数易通过实验来建立,且其物理概念清楚。

利用传递函数极易求出频率响应函数。在已知系统传递函数 $H(s)$ 的情况下,令 $s=j\omega$, 使得该系统的频率响应函数 $H(j\omega)$, 即

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1(j\omega) + a_0} \quad (1.14)$$

一阶系统的频率响应函数为

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad (1.15)$$

其幅频、相频特性表达式为

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (1.16)$$

$$\phi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \quad (1.17)$$

二阶系统的频率响应函数为

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2\zeta j \frac{\omega}{\omega_n}} \quad (1.18)$$

其幅频、相频特性表达式为

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (1.19)$$

$$\phi(\omega) = -\arctan \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (1.20)$$

幅频特性反映测试系统的输出信号幅值与输入信号幅值的比值随信号频率变化的规

律,相频特性则反映系统输出信号和输入信号之间相位差随信号频率变化的规律。

测试系统的数学描述除以上介绍的常系数线性微分方程、传递函数和频率响应函数外,也可将脉冲响应函数作为系统特性的时域描述。

若系统输入为单位脉冲函数,即 $x(t) = \delta(t)$,则 $X(s) = 1$,系统的传递函数 $H(s) = Y(s)$,经拉氏逆变换可得

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1}[H(s)] = \mathcal{L}^{-1}[Y(s)] = y(t) \quad (1.21)$$

$h(t)$ 称为该系统的脉冲响应函数。

至此,测试系统特性在时域中可用微分方程或脉冲响应函数来描述,在复数域中可用传递函数来描述,在频域中可用频率响应函数来描述。其相互关系可用图 1.4 简要概括。

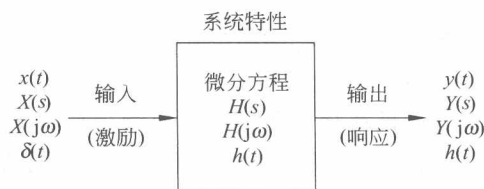


图 1.4 输入、输出与系统特性在不同域中的关系

1.2.2 测试系统的静态特性

静态特性是指测试系统对于不随时间变化的输入量的响应特性。即当输入为一静态量时,系统的输出也是静态量,则系统输入输出之间的关系称为系统的静态特性。在静态测量时,由于输入量和输出量都不随时间变化,因而输入和输出的各阶导数均为零,故由式(1.14)给出的线性定常系统的微分方程将变成代数方程

$$y = \frac{b_0}{a_0} x \quad (1.22)$$

也就是说,理想测试系统其输出与输入之间是单调、线性比例关系,即输入与输出关系是一条理想的直线。但是,实际测试系统并非是理想的线性定常系统,输入与输出并不是理想的直线,测试系统的静态特性也就是在静态测量情况下,实际测试系统与理想线性定常系统的接近程度。

工程上通常用实验的方法获得系统的输入—输出关系曲线,称为静态标定曲线或定度曲线。由于静态标定曲线并不是直线,因此,通常将静态标定曲线拟合成直线,用拟合直线来近似地表示测试系统的静态特性。常用的确定拟合直线的方法有下面两种。

(1) 最小二乘法 拟合直线通过坐标原点,并且使它与静态标定曲线上各输出量偏差的平方和为最小。这一方法较为精确,但计算复杂。

(2) 端点连线法 将静态标定曲线上对应于量程上、下限的两点连线作为拟合直线。此方法较为简单,但不够精确。

为了全面而方便地描述测试系统的静态特性,通常采用静态特性参数来对系统的静态特性进行评价。下面讨论一些常用的静态特性参数。

1. 灵敏度

灵敏度是指测试系统在静态测量时,输出量的增量与输入量的增量之比的极限值,用