

测试技术与 虚拟仪器

CESHI JISHU YU XUNI YIQI

杨运强 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



研究生教材

中国地质大学(北京)研究生教材基金资助(No. 2009001)

测试技术与虚拟仪器

杨运强 编著



机械工业出版社

本书介绍了传感与测试系统和基本测试电路,详细讲述了电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器及其他常用传感器工作原理、测试信号基本处理手段及各种工程信号的测试,还介绍了测试技术最新发展——虚拟仪器测试技术,常用的虚拟仪器集成环境和 LabVIEW 语言,并结合作者自己的科研实例进行了介绍。本书从基本测试技术角度进行讲述,不仅仅是针对某一具体专业的测试技术,内容系统新颖、讲述透彻、适用面广。

本书可作为高等学校非测控专业本科生和研究生“测试技术”课程的教材,也可供从事测控工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

测试技术与虚拟仪器/杨运强编著. —北京:机械工业出版社,2010.4
ISBN 978-7-111-30043-4

I. ①测… II. ①杨… III. ①传感器—测试技术—高等学校—教材
IV. ①TP212.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 039759 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 阎洪庆 责任编辑: 阎洪庆 责任校对: 陈延翔

封面设计: 路恩中 责任印制: 杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2010 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20 印张·493 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-30043-4

定价: 45.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

凡从事自然科学的研究人员，除了纯理论研究外，一般都需要进行实验研究，实验的基本手段是对实验对象（被测系统）进行测试，测试技术的重要性自不必说。计算机数据采集和分析是实验测试研究非常得手的手段，虚拟仪器技术又是这一技术发展的最新成果。测试技术与虚拟仪器技术的结合是今后测试技术发展的趋势。目前，除了测控专业外，其他很多专业（如机械工程）已经把“测试技术”列为专业主干课或选修课。

本书作者从事了多年的测试技术教学工作，涉及专业有机械、勘察、土木、安全等，所教学生的层次包括本科生、硕士生，选修本课程主要是为了提高他们的实验动手能力，同时也为了拓展其知识面。由于专业原因，“测试技术”大多是选修课程，课时少，学生基础不一，为了讲述该课程，很多教材都把测试技术集中在大量信号与系统的复杂数学分析上，大量的数学公式使学生产生畏惧感，学习兴趣降低，使教学效果大打折扣。这种测试技术讲解方式也有悖于开设本课程的初衷。为此，本书本着内容系统新颖、知识讲述透彻实用的原则，在如下方面进行了一些工作：

1. 系统性和全面性

建立全局观念，不拘泥于信号处理或者传感器等某一方面，从基本的信号获取，到测试系统的组建，再到信号分析和计算机数据采集全面介绍，避免由于某一方面讲述过多，忽略其他方面的类似盲人摸象的讲法，而造成读者对测试技术的误解。作者认为，测试技术只是一种手段，它不属于某一专业或某些专业，拘泥于具体专业的角度讲述，反而达不到理想的效果。

2. 新颖性

本书在介绍基本测试方法的同时，穿插介绍最新的传感和信号处理手段。新颖传感器讲述也许不很全面，但读者只有知道有这种传感器今后才有可能选用，如位移测量中的感应同步器，一般测试技术都很少涉及，这种传感器准确度高、性能好，在新型机电一体化设备中（如数控机床）大量使用，本书则对其基本原理也进行了介绍。在测试手段上更是花了较多篇幅讲述先进的计算机数据采集与虚拟仪器技术。目的是对新型传感器的开发、测试和信号处理手段的改进也起到启发、引导的效果，虚拟仪器技术本身就是建立在计算机数据采集与处理基础上的先进测试技术。

3. 透彻性

测试技术知识面广、内容多，是各学科渗透交融的成果。很多知识很难掌握，一旦被卡住将直接影响读者的学习兴趣和后续知识的学习，因此本书对较难理解的部分都配有例题讲解，理顺和疏通有难度的环节。

4. 启迪性

本书在最后部分根据作者自己的部分科研工作给出了测试实例，使读者知道真正要建立一个测试系统和真正进行测试，还有许多工作要做，读者在此可以得到一些启迪。

5. 实用性

各非测控专业学生学习测试技术，最主要的目的是要让他们多接触各种传感器，学习各

种测试手段，以期加强他们的实验动手技能，培养他们的科研能力。在学习各种测试手段的基础上，通过实验获取信号数据，借助专业分析软件进行分析和处理，得到所需的测试结果。针对上述情况，本书把讲述的重点放在测试系统和传感器上，系统地介绍了各种传感器工作原理和各种工程参量测试方法，有一定的理论性且非常实用，考虑到很多测试其实不需要进行复杂的信号处理，本书把信号处理内容放在较为靠后的章节。在虚拟仪器技术的介绍上，则主要讲解 LabVIEW 语言在入门时遇到的难点，只追求实用、高效率，不追求全面系统。

如果读者以前没有接触过传感器与测试系统，但是想很快建立自己的测试装置获取和分析测试信息，本书给出了常用的工程参量测试方法和计算机数据处理手段，读者可以挑选阅读某些章节，很快就能实现自己的目标。对于复杂的信号处理，在较短时间内很难透彻讲解，对于大多数工程技术人员也没有必要掌握，本书采用只讲述基本原理和用途，具体实现交由虚拟仪器部分专门的测试技术分析处理软件实现。但这些内容的讲授是必需的，否则在处理此类问题时，会感到束手无策。

采用这种方式学习信号处理变得很简单，只要使读者明白进行什么处理能得到什么结果，他们就能根据需要选择分析手段。本书通过虚拟仪器技术的讲解使现在的测试人员进行信号处理时变得相对容易，不必深入掌握信号处理理论就能进行复杂的信号处理，本书这部分的讲授可以为读者指明一条路。

6. 注重实践

本书在讲述传感器之后，附有传感与测试系统实验，有条件的读者可以仿照本书内容进行实际体验，将会得到更好的效果。

古人云：“师者，传道、授业、解惑也”，作为专业书籍也应该是如此，传道是方向问题，这点非常重要，要把最好最新的技术思路传授给人。解惑是授业的必要补充，要把事情讲透，不模棱两可。把这两者做好了，授业自然能取得很好的效果。这就是本书编写的初衷。

本书参阅了大量的相关文献，在此对这些文献的作者表示感谢。本书在编写过程中得到了中国地质大学（北京）研究生院领导大力支持，在此表示特别感谢。

由于时间仓促，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

目 录

前言

绪论 1

- 一、测试的基本概念 1
- 二、测试技术基本任务 1
- 三、测量方法与测量误差 2

第一章 传感与测试技术基础 5

- 一、测试系统的基本组成及主要性质 5
- 二、传感器的分类 7
- 三、传感器的基本特性 8
- 四、测试系统实现不失真测试的条件 15
- 五、传感器的选用原则 18
- 六、测试系统的标定 20

第二章 测试系统基本电路 29

- 一、电桥 29
- 二、放大电路 36
- 三、信号的调制与解调 39
- 四、滤波电路 42
- 五、计算机数据采集相关单元电路 47

第三章 电阻式传感器 50

- 一、电位器式传感器 50
- 二、金属应变式传感器 54
- 三、压阻式传感器 65
- 四、应力、应变的测量 68
- 五、亲自体验应变式传感器 72

第四章 电感式传感器 75

- 一、自感式传感器 75
- 二、互感式传感器 81
- 三、电涡流式传感器 85
- 四、亲自体验电感式传感器 87

第五章 电容式传感器 91

- 一、电容式传感器工作原理 91
- 二、电容式传感器的测量电路 96
- 三、电容式传感器的特点 99
- 四、亲自体验电容式传感器 100

第六章 其他传感器 102

- 一、霍尔式传感器 102
- 二、压电式传感器 107
- 三、电动式传感器 111

四、光敏传感器 114

第七章 测试系统信号处理基础 120

- 一、信号的分类与描述 120
- 二、几种典型信号的频谱 128
- 三、信号的时域分析 132
- 四、信号的频域分析 139
- 五、信号的数字处理 142

第八章 工程参量的传感与测试 149

- 一、温度测量 149
- 二、位移测量 157
- 三、力的测量 175
- 四、扭矩的测量 190
- 五、速度的测量 195
- 六、加速度的测量 204
- 七、流量测量 212

第九章 计算机数据采集与虚拟仪器

技术基础 221

- 一、概述 221
- 二、计算机数据采集技术 224
- 三、虚拟仪器的由来 226
- 四、虚拟仪器语言——LabVIEW 简介 229

第十章 虚拟仪器语言——LabVIEW

程序设计基础 234

- 一、LabVIEW 数据类型 234
- 二、LabVIEW 相关函数 242
- 三、数据分析与处理模板 263
- 四、LabVIEW 的程序设计基础 264
- 五、NI 测量和自动化浏览器介绍 279
- 六、DAQ 助手 283
- 七、一步一步教您创建虚拟仪器 VI 程序 285
- 八、LabVIEW 与其他计算机语言的接口
技术 291

第十一章 虚拟仪器应用实例 294

- 一、LabVIEW 辅助测试技术信号 294
- 二、基于虚拟仪器技术的焊接参数测试
系统 300
- 三、基于虚拟仪器技术的电焊机集成
测试系统 308

参考文献 313

绪 论

获取信息是人类最基本的活动之一，信息的获取往往从测量开始。今天，测量已渗透到人类活动的每个领域。在工程实际中，无论是工程研究、产品开发，还是质量监控、性能试验等，都离不开测试技术。

测试技术属于信息科学的范畴，与计算机技术、自动控制技术、通信技术构成完整的信息技术学科。现代信息技术的三大基础是信号采集、传输和处理技术，即传感技术、通信技术和计算机技术分别构成信息技术的器官、神经和大脑。

一、测试的基本概念

测试（Measurement and Test）是测量与试验的概括，是人们借助于一定的装置，获取被测对象有关信息的过程。

测试是为了获得有用信息，而信息是以信号形式表现出来的。从广义的角度讲，测试工作涉及试验设计、模型试验、传感器、信号加工与处理（传输、加工和分析、处理）、误差理论、控制工程、系统辨识和参数估计等内容。因此，测试工作者应具有这方面相关的知识。从狭义的角度讲，测试工作是指在选定的激励方式下所进行的信号检测、变换、处理、显示、记录及电量输出和数据处理。从本质上讲，测量过程一方面是采集和表达被测量物理量，另一方面是与标准进行比较。

在满足以下两个基本条件下才能实施测量。1) 测量标准必须通过协议事先确定，精确已知；2) 被测量必须有明确的定义，工作稳定，经得起检验。

测试是指确定被测对象属性量值为目的的全部操作，测试是依靠一定的科学技术手段定量地获取某种研究对象原始信息的过程。它是按一定的目的和要求，获取感兴趣的、有限的某些特定信息，而不是全部信息。测试是具有试验性质的测量，或者可以理解为测量和试验的综合。测试技术是测量技术和实验技术的总称。

工程测试信息总是通过某些物理量的形式表现出来，这些物理量就是信号。信号是信息的载体，信息则是信号所载的内容，信息与信号是互相联系的两个概念，但是信号不等于信息。

测试技术内容包括四个方面内容：被测量的测量原理、测量方法、测量系统、数据处理。

二、测试技术基本任务

- 1) 分析被测信号类别、构成及特征参数，使工程测试人员了解被测对象的特征参数，

以便深入了解被测对象的内在的物理本质，为正确选用和设计测试系统提供依据。

2) 为产品质量和性能提供客观评价、分析故障根源、监测设备运行，为新定律、新理论提出和论证提供实验依据。

通过测试手段，对研究对象中的有关信号做出比较客观、准确的描述，使人们对其有一个恰当的全面的认识，并达到进一步改造和控制研究对象的目的。

三、测量方法与测量误差

1. 测量方法

测量方法是测量原理和测量方式的组合。测量方法根据不同的分类手段有不同的分类方式。

1) 按照信号获取的手段分，测量方法可分为直接测量和间接测量。

直接测量：无需通过函数关系的计算，直接通过测量仪器得到被测量。它又可分为直接比较和间接比较。直接比较：直接将被测量和标准量进行比较，如长度测量、电桥测电阻等。间接比较：利用仪器仪表把原始形态的待测物理量的变化变换成为与之保持已知函数关系的另一种物理量的变化，并以人的感官所能接受的形式，在测量系统的输出端显示出来。如水银温度计测量温度、用弹簧测力、用直流电流表测电流等。

间接测量：是在直接测量的基础上，根据已知的函数关系，计算出所要测量的物理量的大小，如速度测量。间接测量准确度往往不如直接测量高，一般尽可能地不采用间接测量。

2) 按照测量度分，测量方法可分为等准确度测量和不等准确度测量。

等准确度测量：用相同仪表与测量方法对同一被测量进行多次重复测量，称为等准确度测量。

不等准确度测量：用不同准确度的仪表或不同的测量方法，或在环境条件相差很大时对同一被测量进行多次重复测量称为非等准确度测量。

3) 按照测量信号来源分，测量方法可分为偏差测量、零位测量和微差测量。

偏差测量：用仪表指针位移（即偏差）确定被测量的测量方法。它是根据仪表指针的指示值来决定被测量的数值。偏差式测量特点：简单、快捷、直观，但测量准确度不高。

零位测量：将已知标准量直接与被测量相比较，用零位指示仪表来检测测量系统的平衡状态，测量系统达到平衡时，被测量的数值可以直接由已知的标准量数值获得。零位测量在如下方面得到广泛应用：如天平、电位差计等。零位测量特点：可以获得较高的测量准确度，但测量过程比较复杂、费时，不适应于测量迅速变化的信号。

微差测量：将被测量与已知标准量先进行比较并取得差值，再用偏差测得该差值（微差）。被测量数值 = 已知标准量值 + 微差。微差测量特点：综合了偏差测量和零位测量的优点：测量准确度高，测量过程较零位测量简便，费时少，适用于在线控制参数的测量。微差测量在自控系统中应用较多。

2. 与测量有关的一些名词

真值：在一定条件下，被测物理量客观存在的实际值。有理论真值、规定真值、相对真

值三种。理论真值即绝对真值,如三角形内角之和为 180° 。规定真值是国际公认的某些基准量值,如“米”,也叫约定真值。相对真值是上一等级准确度的计量器的指示值可作为下一等级准确度的计量器的真值。

实际值:由于测量次数总是有限的,并且系统误差不能完全排除,因此通常只能把更高一级的标准器具所测得的值作为真值,为了强调它并非真值,故把它称为实际值。

标称值:测量器具所标出来的数值。

示值:由测量器具读数装置所指示出来的被测量的数值。

误差:测量误差是测量值与真实值之间的差值或不一致程度,它反映了测量质量的好坏。

残余误差:测量结果与被测量的最佳估计值之差,也叫残差。被测量的最佳估计值也叫约定真值,通常用其平均值表示。

准确度:反映测量结果与被测量的真值之间的一致程度。

测量的目的是希望通过测量获取被测量的真实值,但由于种种原因,例如传感器本身性能不十分优良、测量方法不十分完善、外界干扰的影响等,都会造成被测参数的测量值与真实值不一致,两者不一致程度用测量误差表示。测量误差就是测量值与真实值之间的差值。它反映了测量质量的好坏。测量的可靠性至关重要,不同场合对测量结果可靠性的要求也不同。

测量结果的准确度应与测量的目的和要求相联系、相适应。那种不惜工本、不顾场合,一味追求越准越好的做法是不可取的,要有技术与经济兼顾的意识。

3. 各种误差的表示方式

测量误差的表示方法有多种,含义各异。

(1) 绝对误差

绝对误差可用下式定义:

$$\Delta = x - L$$

式中, Δ 为绝对误差; x 为测量值; L 为真实值。

对测量值进行修正时要用到绝对误差。修正值是与绝对误差大小相等、符号相反的值,实际值等于测量值加上修正值。

采用绝对误差表示测量误差,不能很好地说明测量质量的好坏。例如,在温度测量时,绝对误差 $\Delta = 1^\circ\text{C}$,对体温测量来说是不允许的,而对测量钢水温度来说,却是一个极好的测量结果。

(2) 相对误差

相对误差的定义由下式给出:

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\%$$

式中, δ 为相对误差,一般用百分数给出; Δ 为绝对误差; L 为真实值。

由于被测量的真实值 L 无法知道,实际测量时用测量值 x 代替真实值 L 进行计算,这个相对误差称为标称相对误差,即

$$\xi = \frac{\Delta}{x} \times 100\%$$

(3) 引用误差

引用误差是仪表中通用的一种误差表示方法。它是相对仪表满量程的一种误差，一般也用百分数表示，即

$$\gamma = \frac{\Delta}{\text{测量范围上限} - \text{测量范围下限}} \times 100\%$$

式中， γ 为引用误差； Δ 为绝对误差。

在使用仪表和传感器时，经常也会遇到基本误差和附加误差两个概念。

(4) 基本误差

基本误差是指仪表在规定的标准条件下所具有的误差。例如，仪表是在电源电压 $(220 \pm 5)\text{V}$ 、电网频率 $(50 \pm 2)\text{Hz}$ 、环境温度 $(20 \pm 5)\text{℃}$ 、湿度 $(65\% \pm 5\%)$ 的条件下标定的。

如果这台仪表在这个条件下工作，则仪表所具有的误差为基本误差。测量仪表的准确度等级就是由基本误差决定的。

(5) 附加误差

附加误差是指当仪表的使用条件偏离额定条件下出现的误差。例如，温度附加误差、频率附加误差、电源电压波动附加误差等。

根据测量数据中的误差所呈现的规律，将误差分为三种，即系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差

对同一被测量进行多次重复测量时，如果误差按照一定的规律出现，则把这种误差称为系统误差。例如，标准量值的不准确及仪表刻度的不准确而引起的误差。

(2) 随机误差

对同一被测量进行多次重复测量时，绝对值和符号不可预知地随机变化，但就误差的总体而言，具有一定的统计规律性的误差称为随机误差。引起随机误差的原因很多，难以掌握或暂时未能掌握的微小因素，一般无法控制。对于随机误差不能用简单的修正值来修正，只能用概率和数理统计的方法去计算它出现的可能性大小。

(3) 粗大误差

明显偏离测量结果的误差称为粗大误差，又称疏忽误差。这类误差是由于测量者疏忽大意或环境条件的突然变化而引起的。对于粗大误差，首先应设法判断是否存在，然后将其剔除。

从工程测量实践可知，测量数据中含有系统误差和随机误差，有时还会含有粗大误差。它们的性质不同，对测量结果的影响及处理方法也不同。在测量中，对测量数据进行处理时，首先判断测量数据中是否含有粗大误差，如有，则必须加以剔除。再看数据中是否存在系统误差，对系统误差可设法消除或加以修正。对排除了系统误差和粗大误差的测量数据，则利用随机误差性质进行处理。总之，对于不同情况的测量数据，首先要加以分析研究，判断情况，分别处理，再经综合整理，以得出合乎科学性的结果。

传感与测试技术属于信息技术采集范畴，由传感与测试、信号调理、信息传输、数据分析与处理、过程控制一起构成一个完整的信息技术链。要进行传感与测试，首先必须了解信息的获取技术，以及相应的测试电路，信号的传输与处理则贯穿于始终。

本章将先简单介绍测试的基础知识，接着介绍测试系统的组成，传感器的基本特性，测试系统基本电路，最后介绍测试系统实现不失真测试的条件以及测试系统的标定。

一、测试系统的基本组成及主要性质

1. 测试系统的基本组成

测试系统由传感器、信号调理电路、显示记录装置等组成。系统的复杂程度取决于信息被检测的难易程度以及所采用的实验方法，对测试系统的要求是：通用、实用、经济。

测试系统的组成如图 1-1 所示。

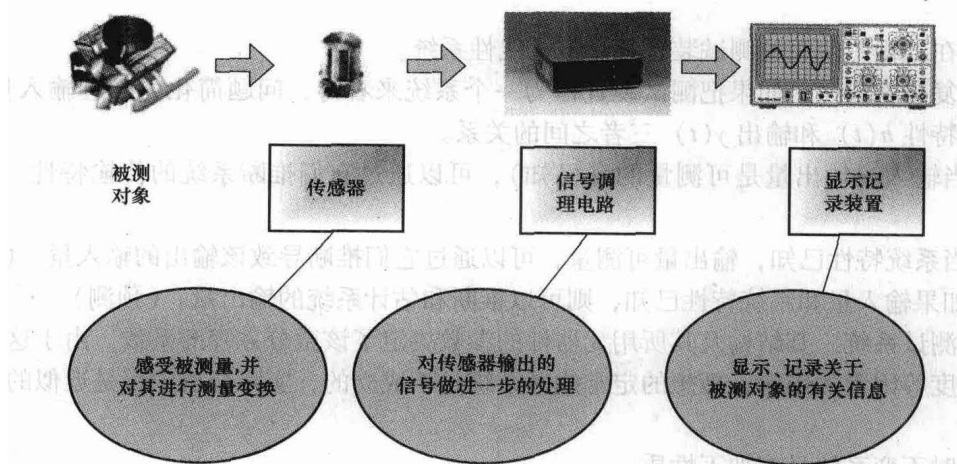


图 1-1 测试系统的组成

(1) 传感器部分

国家标准 GB/T 7665—2005《传感器通用术语》对传感器下的定义是：“能感受被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成”。传感

器是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并将其按一定规律变换成为电信号或其他形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要装置。

传感器技术的作用与地位:①传感器技术能替代、补充、延伸人类感觉器官。②传感器技术处于自动检测与控制技术之首,是感知、获取和检测信息之首。③传感器技术也是各国相互竞争的核心技术之一。

(2) 信号调理部分

信号调理部分对从传感器输出的信息作进一步的加工和处理(包括转换、放大、调制与解调、滤波、非线性校正、储存、重放等),通过调理,最终获得便于传输、显示和记录以及可做进一步后续处理的信号。

(3) 显示和记录部分

显示和记录部分便于人们观察和分析、记录或显示处理过的信号。

2. 测试系统的主要性质

从狭义上讲,测试系统实际上是能够完成一定功能变换的装置,同时测试系统也是一个信息通道,它是由若干相互作用、相互依赖的事物组合而成的具有特定功能的整体。理想的测试系统应该准确真实地反映和传送所需要的信号,而将那些无关的、虚假的信号(干扰)抑制掉。

测试系统的特性是指系统的输入和输出的关系。当系统的输入和输出之间的关系可用常系数微分方程来描述时,则称该系统为定常线性系统或线性时不变系统。

理想的测试系统应该具有单值、确定的输入输出关系。对于每一输入量都应该只有单一的输出量与之对应,知道一个量就可以确定另一个量,其中以输出和输入呈线性关系最佳。

一般在工程中使用的测试装置都是定常线性系统。

无论复杂度如何,如果把测试装置作为一个系统来看待,问题简化为处理输入量 $x(t)$ 系统传输特性 $h(t)$ 和输出 $y(t)$ 三者之间的关系。

1) 当输入、输出量是可测量的(已知),可以通过它们推断系统的传输特性。(系统辨识)

2) 当系统特性已知,输出量可测量,可以通过它们推断导致该输出的输入量。(反求)

3) 如果输入量和系统特性已知,则可以推断和估计系统的输出量。(预测)

对于测试系统,其结构及其所用元器件的参数决定了该微分方程的系数,由于这些参数都会受温度等因素的影响,理想的定常线性系统是不成立的,实际分析中都是近似的定常线性系统。

线性时不变系统具有如下性质:

1) 叠加性

系统对各输入之和的输出等于各单个输入的输出之和,即

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) 比例性

常数倍输入所得的输出等于原输入所得输出的常数倍, 即

若

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

则

$$kx(t) \rightarrow ky(t)$$

3) 微分性

系统对原输入信号的微分等于原输出信号的微分, 即

若

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

则

$$x'(t) \rightarrow y'(t)$$

4) 积分性

当初始条件为零时, 系统对原输入信号的积分等于原输出信号的积分, 即

若

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

则

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

5) 频率保持性

若系统的输入为某一频率 ω 的谐波信号, 则系统的稳态输出将为同一频率 ω 的谐波信号, 即

若

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi_x)$$

则

$$y(t) = B \cos(\omega t + \phi_y)$$

二、传感器的分类

传感器有不同的分类方法, 下面简单介绍 5 种分类方法:

1) 按传感器的工作原理分为机械式传感器、电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、光电式传感器、气电式传感器、热电式传感器、射线式传感器、波式传感器、半导体式传感器、其他原理传感器。

2) 按传感器用途分为位移传感器、力传感器、温度传感器、加速度传感器、湿度传感器等。

3) 按传感器的构成原理分为结构型传感器、物性型传感器、复合型传感器。

结构型传感器: 依靠传感器结构参数的变化来实现信号的转换。通过传感器元件几何尺寸或形状的变化, 转换成电阻、电容、电感等量的变化, 从而获得被测信号。

物性型传感器: 依靠敏感元件材料本身物理性质的变化来实现信号的变换。

4) 按敏感元件与被测量之间的能量关系分能量转换型传感器和能量控制型传感器。

能量转换型传感器也称为无源传感器, 直接由被测对象输入能量使其工作。

能量控制型传感器也称为有源传感器, 从外部供给辅助能量并由被测量控制外部供给能量的变化。

5) 按传感器的工作机理分为物理量传感器、化学量传感器和生物量传感器。

物理量传感器基于物理效应(光、电、声、磁、热效应)而工作的。

化学量传感器基于化学效应(化学吸附、选择性化学反应)而工作的。

生物量传感器基于生物效应(基于酶、抗体、激素等分子识别功能和生物传感功能)而工作的。

三、传感器的基本特性

1. 传感器静态特性

传感器的静态特性是指对静态的输入信号,传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。由于这时输入量和输出量都和时间无关,所以传感器的静态特性可用一个以输入量作为横坐标、对应的输出量作为纵坐标的特性曲线来描述,此特性曲线与时间无关。表征传感器静态特性的主要参数有:灵敏度、线性度、分辨力等。

(1) 传感器的灵敏度

传感器的灵敏度 (Sensitivity) 是传感器在稳态工作情况下输出变化量 Δy 与引起此变化的输入变化量 Δx 之比,通常用 S 或 k 表示,换句话说,灵敏度是输入-输出特性曲线的斜率。如果传感器的输出和输入之间呈线性关系,则灵敏度 S 是一个常数。否则,它将随输入量的变化而变化。

静态灵敏度 S 是单位输入变化量所引起的输出变化量,即

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$

测试装置的灵敏度并不是恒定不变的,不同的工作点上灵敏度会略有不同。

测试装置的灵敏度一般都有量纲。灵敏度的量纲是输出、输入量的量纲之比。例如,某位移传感器,在位移变化 1mm 时,输出电压变化为 200mV,则其灵敏度应表示为 200mV/mm。因此,灵敏度的量纲取决于输入、输出的量纲。非线性传感器的灵敏度为变量,是拟合曲线的斜率。当传感器的输出、输入量的量纲相同时,灵敏度可理解为放大倍数。

传感器的灵敏度表征传感器对输入变化量的响应能力。提高灵敏度,可得到较高的测量准确度。但灵敏度愈高,测量范围愈窄,稳定性也往往愈差。

例 1-1 一压电式压力传感器的灵敏度为 10pC/MPa,后接灵敏度为 0.008V/pC 的电荷放大器,最后用灵敏度为 25mm/V 的笔式记录仪记录信号。试求系统总的灵敏度,并求当被测压力变化 $\Delta p = 8\text{MPa}$ 时记录笔在记录纸上的偏移量 Δy 。

解: 系统为压电式压力传感器、电荷放大器和笔式记录仪三个环节的串联,因此总的灵敏度等于三个环节灵敏度的乘积 (注意总灵敏度的量纲)。

总灵敏度

$$S = S_1 S_2 S_3 = (10\text{pC/MPa}) \times (0.008\text{V/pC}) \times (25\text{mm/V}) = 2\text{mm/MPa}$$

根据灵敏度的定义,当被测压力变化 $\Delta p = 8\text{MPa}$ 时记录笔在记录纸上的偏移量 Δy 为

$$\Delta y = S \Delta p = (8\text{MPa}) \times (2\text{mm/MPa}) = 16\text{mm}$$

(2) 传感器的线性度

通常情况下,传感器的实际静态特性输出是条曲线而非直线。在实际工作中,为使仪表具有均匀刻度的读数,常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线,线性度就是该直线近似程度的性能指标。

线性度用来表征实际特性曲线接近拟合直线的程度,其定义如下:

$$\text{线性度} = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\text{FS}}} \times 100\% = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\%$$

式中各变量的定义如图 1-2 所示。

线性度是测试装置的准确度指标之一,其值越小越好。为保证测试的准确度,实际的测试装置应工作在线性度较好的区域,同时可以采取各种软、硬件措施最大限度地减小非线性。

拟合直线的选取有多种方法。如将零输入和满量程输出点相连的理论直线作为拟合直线;或将与特性曲线上各点偏差的二次方和为最小的理论直线作为拟合直线,此拟合直线称为最小二乘法拟合直线。

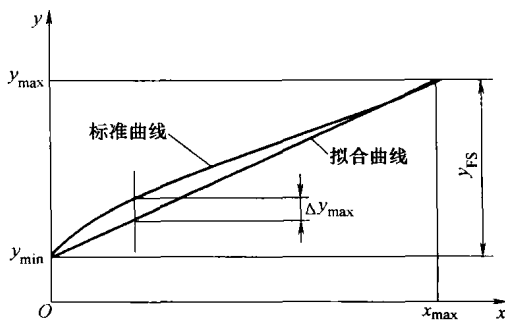


图 1-2 线性度的定义

(3) 传感器的分辨力

分辨力是指传感器在规定测量范围内可能检测出的被测量的最小变化量。如果输入量从某一非零值缓慢地变化,只要输入变化值未超过某一幅值时,传感器的输出就不会发生变化;只有当输入量的变化超过一定幅值时,其输出才会发生变化。这一幅值就是传感器的分辨力。

由于传感器在满量程范围内各点的分辨力并不完全相同,因此常用满量程中能使输出量产生阶跃变化的输入量中的最大变化值作为衡量分辨力的指标。上述指标若用满量程的百分比表示,则称为分辨率。

2. 传感器动态特性

传感器的动态特性是指传感器对随时间变化的输入量的响应特性。当被测量是时间的函数时,则传感器的输出量也是时间的函数,其间的关系要用动态特性来表示。

一个动态特性好的传感器,其输出将再现输入量的变化规律,即具有相同的时间函数。实际上除了具有理想的比例特性外,输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。研究传感器的动态特性目的在于分析传感器的动态误差。

在实际工作中,传感器的动态特性常用它对某些标准输入信号的响应来表示。因为传感器对标准输入信号的响应容易用实验方法求得,并且传感器对标准输入信号的响应与其对任意输入信号的响应之间存在一定的关系,往往知道了前者就能推定后者。最常用的标准输入信号有阶跃信号和正弦信号两种,所以传感器的动态特性也常用阶跃响应和频率响应来表示。

(1) 动态特性的复频域描述——传递函数

利用拉普拉斯变换(LT),可以将时域中由系统微分方程隐含的动态特性转换到复频域进行描述。传递函数 $H(s)$ 是输出信号的拉普拉斯变换 $Y(s)$ 与输入信号的拉普拉斯变换 $X(s)$ 之比,即

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

关于传递函数的几点说明:

1) 传递函数 $H(s)$ 虽然由输入、输出信号定义,但其反映的是测试装置的特性,与输

入、输出信号无关。

2) 传递函数 $H(s)$ 是一种反映测试装置动态特性的数学模型, 因此不同的测试装置可能具有相同形式的传递函数。

3) 传递函数 $H(s)$ 的分母和分子均为关于算子 s 的多项式, 分母多项式的系数取决于系统的物理结构, 而分子多项式的系数则取决于输入、输出点的位置。称传递函数分母多项式中 s 的幂次 n 为系统的阶次。

4) 由传递函数的定义可知: $Y(s) = H(s)X(s)$ 。因此, 只要已知其中的两个要素就可确定出另一个。

(2) 动态特性的时域描述——微分方程 (脉冲响应函数)

在时域内, 测试装置的动态特性可以用线性微分方程来描述, 也可以用其中隐含的脉冲响应函数 $h(t)$ 来描述。

脉冲响应函数 $h(t)$ = 系统在输入单位脉冲函数 $\delta(t)$ 时所产生的响应。

在时域内, 当 $x(t) = \delta(t)$ 时, $X(f) = 1$, 设系统的输入为 $x(t)$, 输出为 $y(t)$, 传递函数为 $H(s)$, 则

在频域内 $Y(f) = H(f)X(f) = H(f)$ 。

在时域内 $y(t) = h(t)*x(t) = h(t)*\delta(t) = h(t)$ 。 $h(t)$ 称为脉冲响应函数。

测试装置在任意输入下所产生的响应等于系统的脉冲响应函数 $h(f)$ 与输入信号 $x(f)$ 的卷积分。

(3) 动态特性的频域描述——频率响应函数

对于线性定常系统, 利用傅里叶变换, 可以将时域中由系统微分方程隐含的动态特性转换到频域进行描述——频率响应函数。频率响应函数也可直接将传递函数中的 s 替换成 $j\omega$ 得到。

频率响应函数 $H(j\omega)$ 是指初始条件为零时输出信号的单边傅里叶变换与输入信号的单边傅里叶变换之比。即

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

一般情况下, $H(j\omega)$ 为复数, 因此可表示为

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = P(\omega) + jQ(\omega)$$

$$\text{显然有} \begin{cases} A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} \\ \varphi(\omega) = \angle H(j\omega) = \arctan \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \end{cases} \begin{cases} \text{幅频特性曲线: } A(\omega) - \omega \text{ 曲线} \\ \text{相频特性曲线: } \phi(\omega) - \omega \text{ 曲线} \end{cases}$$

博德图 $\begin{cases} \text{对数幅频特性曲线: } 20\lg A(\omega) - \lg \omega \text{ 曲线} \\ \text{对数相频特性曲线: } 20\lg \varphi(\omega) - \lg \omega \text{ 曲线} \end{cases}$

$\begin{cases} \text{实频特性曲线: } P(\omega) - \omega \text{ 曲线} & P(\omega) = \operatorname{Re}[H(j\omega)] \\ \text{虚频特性曲线: } Q(\omega) - \omega \text{ 曲线} & Q(\omega) = \operatorname{Im}[H(j\omega)] \end{cases}$

$Q(\omega) - P(\omega)$ 曲线称为奈奎斯特图 (Nyquist 图)

频率响应函数反映了测试装置对正弦输入的稳态正弦响应特性。幅频特性 $A(\omega)$ 反映了测试装置在传输角频率为 ω 的正弦信号时幅值的放大或衰减倍数, 相频特性反映了测试装置在传输角频率为 ω 的正弦信号时相位的移动量。

频率特性曲线 (博德图): $A(\omega) - \omega$ 曲线称为幅频特性曲线, $\varphi(\omega) - \omega$ 曲线称为相频特性曲线。

(4) 各种测试装置的动态特性

1) 零阶系统——比例环节

微分方程 $y(t) = Sx(t)$ 传递函数 $H(s) = S$

频率响应函数 $H(j\omega) = S$

幅频特性 $A(\omega) = S$ 相频特性 $\varphi(\omega) = 0$

常见的零阶系统有变阻器、齿轮传动装置等。

2) 一阶系统——惯性环节

微分方程 $a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$ 传递函数 $H(s) = S \cdot \frac{1}{\tau s + 1}$

式中, S 为一阶系统的静态灵敏度, $S = b_0/a_0$; τ 为一阶系统的时间常数, $\tau = a_1/a_0$ 。归一化处理 (设 $S=1$) 后:

传递函数 $H(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$ 频率响应函数 $H(j\omega) = \frac{1}{j\omega\tau + 1}$

幅频特性 $A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$ 相频特性 $\varphi(\omega) = \arctan(\omega\tau)$

一阶系统的频率特性曲线如图 1-3 所示。

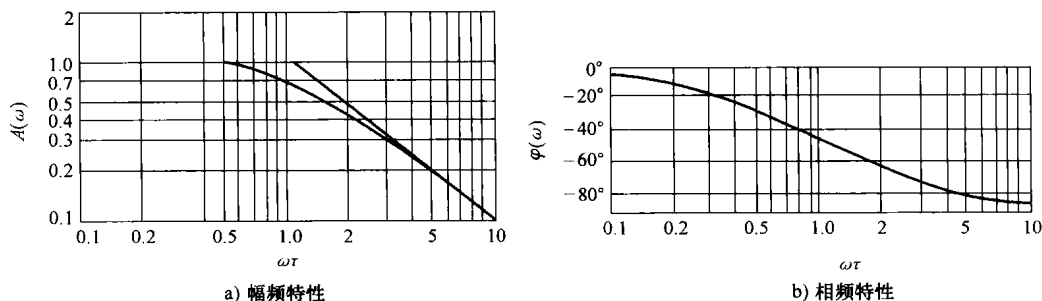


图 1-3 一阶系统的频率特性曲线

一阶系统的动态特性只与时间常数 τ 有关。当 $\omega = 1/\tau$ 时, $A(\omega) = 1/\sqrt{2}$, $\varphi(\omega) = -45^\circ$; 当 $\omega \ll 1/\tau$ 时, $A(\omega) \approx 1$, $\varphi(\omega) \approx -\omega\tau$; 当 $\omega \gg 1/\tau$ 时, $\varphi(\omega) \rightarrow -90^\circ$, $A(\omega)$ 以 $-20\text{dB}/\text{十倍频程}$ 的速率衰减。因此, 上述一阶系统具有“低通”的特性。

常见的一阶系统有液体温度计、忽略质量的单自由度振动系统、RC 低通滤波器等。

3) 二阶系统——振荡环节

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

传递函数

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{s\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{s}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1}$$