



高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

测试系统技术

■ 郭 军 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

内 容 简 介

测试系统技术是在微电子与计算机技术相结合的基础上产生的一门新型学科。本书全面系统地论述了以计算机为核心的测试系统的基本构成与理论基础。

书中主要包括构成测试系统基本硬件模块的选用原则以及组成测试系统通用硬件平台的集成设计方法,在通用软件开发平台下相关的应用程序、驱动程序、软件模块的设计方法,测试系统的抗干扰原理、数据处理以及维护方法。

本书重点介绍了智能测试系统及虚拟仪器的设计原则、组成方式,并结合实例给出了系统的软、硬件搭建过程,内容反映了近年来测试领域出现的新技术、新方法和新成果。

本书适合测控技术及仪器类、机电类等相关专业使用,也可供有关领域研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

测试系统技术/郭军编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2006. 10

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

ISBN 7 - 5606 - 1731 - X

I. 测… II. 郭… III. 自动检测系统—高等学校—教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 109165 号

策 划 臧延新

责任编辑 杨英 臧延新

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2006年10月第1版 2006年10月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 11.25

字 数 262千字

印 数 1~4000册

定 价 14.00元

ISBN 7 - 5606 - 1731 - X/TN · 0349

XDUP 2023001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前言

传统的测量大都集中于对物体单一性质的量测,所采用的测量设备结构简单,功能也非常单一。随着科学技术的发展,被测量的范围不断扩展,其复杂程度也不断加深,传统的人工操作单参数测量装置已无法满足科学技术发展的要求,测试系统技术正是伴随着这一需要而产生的。

测试系统是传统的测量技术与微电子技术和计算机技术密切结合的产物,是在微电子与计算机技术快速发展的基础上产生的一门新兴学科。像许多新技术发展的情况一样,测试系统首先是由于军事上的需要而发展起来的。20世纪50年代中期,美国在新发展起来的一代尖端武器(如含有大量电子设备的飞机和导弹系统)的维护检修方面,面临着许多棘手的问题,传统的测量仪器和手工操作方法已无法满足现实的需要。在这种背景下,提出了多用途“万能”测试系统的概念。其最终预期目标为:不依靠任何有关的技术文献,由非熟练人员上机进行几乎全自动的操作,并以电子计算机的速度完成测试,通过编程的灵活性还可以适应任何具体测试任务。在这个概念之下,美国国防部在1956年启动了SETE计划的研究项目,成为现代测试系统大规模研究的开端。

后来的事实表明,测试系统在军事应用上虽然取得了不少成就,却远未能达到上述终极目标。然而,测试系统并未因此而遭到摒弃,反而得到了巨大的发展,成为一门影响力日益扩大的新兴学科。

从20世纪60年代开始,测试系统就应用于工业,在吸取早期军事上的经验教训后,抛弃了“万能”思想,而致力于着重解决生产上关键测试所需的“专业”测试系统。20世纪60年代中、后期,就有民用的成套测试系统出现在电子仪器商品市场上。然而,这些系统针对性太强,难以适应复杂的应用变化需求。为了扩大测试系统的应用范围,降低总体成本,在20世纪60年代后期开始,测试系统采取组合式或积木式的组建概念,尽可能利用各种现成的通用(或略经改装)仪器设备,加上现成的电子计算机来“拼凑”出所需的测试系统。事实已经证明,这种模块化构件思想,为测试系统的发展奠定了坚实的基础。

测试系统大体上经历了由单片机测试系统、PC机测试系统到嵌入式测试系统、独立总线测试系统、虚拟仪器测试系统及分布式测试系统的发展历程,系统的规模不断提高,应用领域也不断扩大。随着测试系统应用范围的不断扩展、测试系统成本的降低及使用复杂性的降低,测试系统在不同领域取代传统测试技术的趋势已经越来越明显了。

测试系统技术现已普及到国防、军事、工业、航空航天、医疗、交通等领域,成为一个国家工业现代化的重要标志之一。测试系统技术属于测试计量学科的前沿的先进技术,是当前形势下培养现代测试高等级工程技术人才所必需的专业基础知识。

本书从实际应用的需求出发,全面、系统地阐述了测试系统的数学模型,系统组成及应用、维护方法。通过对各种类型传感器的应用原理及接口电路的分析,详细介绍了测试

系统信号获取的方法；通过阐述测量、变换及传送模块的设计原则和方法，介绍了测试系统中非常重要的前向通道的设计方法；通过滤波器选用原则及频谱分析的简单分析，介绍了测试系统中的数据处理模块。

本书重点介绍了目前应用范围最广的智能测试系统及虚拟仪器的设计原则、组成方式，结合实例给出了系统的软、硬件平台的设计和选用原则，演示了实际系统的搭建过程。为了提高本书的实用性及完整性，对测试系统的抗干扰技术及维护技术也进行了简单的介绍。本书的内容反映了测试系统技术的最新发展方向。

本书适合测控技术及仪器类、机电类等相关专业使用，也可供相关工程技术及研究人员参考。

作 者

2006 年 8 月

目 录

第一章 测试系统的基本特性	1
1.1 概述	1
1.2 测试系统的静态特性	5
1.2.1 测试系统的静态数学模型	5
1.2.2 静态特性的基本参数	6
1.2.3 静态特性的品质指标	9
1.3 测试系统的动态特性	10
1.3.1 测试系统的动态数学模型	10
1.3.2 测试系统的动态响应特性	12
1.3.3 测试系统的动态特性参数	17
习题与思考题	18
第二章 测试系统的信号获取	19
2.1 传感器	19
2.1.1 传感器的定义	19
2.1.2 传感器的分类	19
2.1.3 传感器的发展历史与趋势	21
2.2 常用传感器	23
2.2.1 电阻式传感器	23
2.2.2 电容式传感器	27
2.2.3 电感式传感器	31
2.2.4 电涡流传感器	39
2.2.5 压电式传感器	42
2.2.6 霍尔式传感器	47
2.2.7 光栅式传感器	50
2.2.8 光电传感器	54
2.2.9 化学反应式传感器	62
2.3 新型复合传感器	65
2.3.1 智能传感器	65
2.3.2 多功能传感器	67
习题与思考题	69
第三章 前向通道设计技术	70
3.1 前端信号处理模块	70
3.1.1 测量放大模块	70

3.1.2 信号变换模块	74
3.1.3 远程传送模块	75
3.2 数据采集设备	76
3.2.1 A/D 变换基本原理与类型	77
3.2.2 数据采集卡	80
3.2.3 独立总线采集设备	82
习题与思考题	82
第四章 智能测试系统设计	83
4.1 智能测试系统的组成	83
4.1.1 智能测试系统的硬件组成	83
4.1.2 智能测试系统的软件结构	84
4.2 智能测试系统的设计原则	85
4.3 单片机测试系统	86
4.3.1 数据采集系统的结构	86
4.3.2 应用范围及特点	88
4.3.3 单片机测试系统的设计方法	89
4.4 PC 机测试系统	91
4.4.1 系统构成	91
4.4.2 接口设备与软件开发平台的选用原则	91
4.5 通信总线	92
4.5.1 总线概述	92
4.5.2 串行总线	93
4.5.3 并行总线	99
4.5.4 USB 总线	105
4.5.5 其它类型总线	108
4.6 分布式测试系统	108
4.6.1 分布式系统的概念	108
4.6.2 分布式系统的构成	108
4.6.3 通信方式的选择	109
习题与思考题	109
第五章 虚拟仪器技术	110
5.1 概述	110
5.1.1 虚拟仪器的概念	110
5.1.2 虚拟仪器的发展历史及趋势	110
5.1.3 虚拟仪器的特点及优势	112
5.2 虚拟仪器的构成形式	113
5.2.1 基于 PC 的插卡式虚拟仪器	114
5.2.2 基于 VXI 总线的虚拟仪器	114
5.2.3 基于 PXI 总线的虚拟仪器	114
5.2.4 其它种类的虚拟仪器	114
5.3 虚拟仪器开发平台	115

5.3.1 虚拟仪器对开发平台的要求	116
5.3.2 通用虚拟仪器开发平台	116
5.3.3 虚拟仪器的开发思路	118
5.4 应用实例	118
5.4.1 虚拟齿轮切向综合误差评定系统	119
5.4.2 基于网络的虚拟测试系统	122
习题与思考题	128
第六章 测试系统的数据处理	129
6.1 测试系统进行数据处理的必要性	129
6.1.1 信号的分类与特点	129
6.1.2 软件测量的优势	132
6.2 滤波器的选用	132
6.2.1 滤波器分类	134
6.2.2 FIR 滤波器	136
6.2.3 IIR 滤波器	140
6.2.4 FIR 滤波器与 IIR 滤波器的比较	146
6.3 频谱分析	147
6.3.1 离散傅里叶变换(DFT)	147
6.3.2 FFT 变换	150
6.3.3 小波多尺度分析	151
习题与思考题	152
第七章 测试系统的抗干扰技术	154
7.1 干扰的定义	154
7.2 干扰进入系统的基本形式	155
7.2.1 静电耦合	155
7.2.2 电磁耦合	155
7.2.3 共阻抗耦合	156
7.2.4 漏电流耦合	156
7.2.5 传导耦合	157
7.2.6 辐射电磁场耦合	157
7.3 测试系统的抗干扰措施	157
7.3.1 接地技术	157
7.3.2 屏蔽技术	161
7.3.3 滤波技术	163
7.3.4 隔离技术	167
习题与思考题	168
第八章 测试系统的评价与维护	169
8.1 系统评价的原则与指标	169
8.2 系统生命周期的概念	170

8.3 系统维护	171
8.3.1 日常维护	171
8.3.2 改进性维护	171
习题与思考题	171
参考文献	172

第一章 测试系统的基本特性

1.1 概 述

1. 测试系统的概念

按照信息论的观点,系统是指任何能与外界进行信息交换的集合体。传统上,测试系统被定义为按某种规则组织起来的一套测试仪器(设备)。这种定义将测试系统限于实际的测量设备层面,按照现代的观点来看,不够全面、完整。一个测试系统功能的完成,必然与操作人员(测量者)及测试环境等有着密切的联系,由它们共同完成与被测对象的信息交换。因此,广义的测试系统应定义为由测试设备、测量者与测试环境构成的,与外界进行信息交换的集合体。

2. 测试系统的发展历史

俄罗斯著名科学家门捷列夫曾用以下的话来阐述测量对科学的意义:“科学自测量开始,没有测量,便没有精密的科学。”由此可见,测量是人类认识客观世界最重要的途径之一,通过对周围事物给出定量特征,揭示出自然规律。

传统的测量大都集中于对物体单一性质的量测,所采用的测量设备也都十分简单,功能也非常单一。随着科学技术的发展,被测量的范围不断扩展,其复杂程度也不断加深,传统的人工操作单参数测量装置已无法满足科学技术发展的要求,测试系统正是伴随着这一需要而产生的。

测试系统从系统的观点出发,将被测对象看做具有复杂内部组成的系统,通过构筑多方位的测量、处理、分析部件,完成对被测对象高速度、高精度度、多参数、多功能的测试任务。

测试系统是传统的测量技术与微电子技术和计算机技术密切结合的产物,是在微电子与计算机技术充分发展的基础上产生的一门新型学科。像许多新技术发展的情况一样,测试系统首先是由于军事上的需要而发展起来的。20世纪50年代中期,美国在新发展起来的一代尖端武器(如含有大量电子设备的飞机和导弹系统)的维护检修方面,面临着许多棘手的问题,传统的测量仪器和手工操作方法已无法满足现实的需要。在这种背景下,多用途的“万能”测试系统的概念被提出来了。其最终目标为:不依靠任何有关的技术文献,由非专业人员上机进行几乎全自动的操作,并以电子计算机完成测试,且通过编程的灵活性还可以适应任何具体测试任务。在这个概念之下,美国国防部从1956年启动了SETE计划的研究项目,成为现代测试系统的大规模研究的开端。

后来的事实表明,测试系统在军事应用上虽然取得了不少成就,却远未能达到最终目标。然而,测试系统并未因此而遭到摒弃,反而得到了巨大的发展,成为一门影响力日益扩大的新兴学科。同许多新技术一样,测试系统在发展到一定程度之后,很快就突破了原先军事应用的狭窄范围,在更为广阔的领域中获得了更大的发展。大约从 20 世纪 60 年代开始,测试系统就应用于工业领域,并且吸取了早期军事上的宝贵经验和惨痛教训,抛弃了“万能”思想,有的放矢地着重解决生产上测试关键所需的“专业”测试系统。到了 20 世纪 60 年代中、后期,就有应用于民用的成套测试系统出现在电子仪器商品市场上。

早期的测试系统大都是为某种测试目的而专门设计制造的专用系统,难以改作他用。20 世纪 60 年代后期,测试系统开始采用组合式或积木式的组建概念,尽可能利用各种现成的通用仪器设备(或略经改装的仪器设备),加上一台电子计算机,来“拼凑”出所需的测试系统。事实已经证明,这种模块化构件思想,为测试系统的发展奠定了坚实的基础。

由于近代各种科学技术迅猛发展,在科学研究和工业大生产中,各行各业对测试系统的需求日益增多。虽然各种测试仪器的种类不断增多,但不同厂家制造的仪器没有统一的接口标准,彼此不能很好地兼容,给不同测试系统之间的连接、通信带来了很多障碍。在这一情形下,广大用户迫切希望采取某些措施,比如制定出一种统一的标准作为设计接口的准绳,以此统一一个集团、一个国家乃至全世界的电子仪器的接口系统,使接口问题不再是组建测试系统的瓶颈。

基于以上原因,从 20 世纪 60 年代以来,世界各国争相研究,先后出现了多种接口标准,包括公司标准、集团标准、国家标准和国际标准。在测试领域得以广泛应用的接口有 GPIB、RS232C、CAMAC 和 VXIbus 等。20 世纪 80 年代以来,由于电子技术的飞速发展,使电子测量技术和仪器与计算机技术更紧密地结合起来。为满足测试与控制发展的需求,在 90 年代相继出现了模块化仪器系统及其 VXI 和 PXI 总线接口。

测试系统技术现已普及到国防、军事、工业、航空航天、医疗、交通等各个领域,成为一个国家工业现代化的重要标志之一。测试系统技术属于测试测量学科前沿的先进技术,是当前形势下培养现代测试高等级工程技术人才所必需的专业基础知识。

一个测试系统,由人工操作完成特定测试任务,称为手动测试系统;使用具有一定自动化能力的测量设备进行的测量和实验称为自动测试系统(Automatic Measurement System)。测试系统具有重要的意义,其高速性特点可以节约大量的人力和时间。此外,现代测试系统内部往往带有处理器,还可以做各种复杂的分析、统计、判断、处理,并且能进行自检查和自修复,从而可以获得很高的测量精确度。

3. 测试系统的构成

如图 1.1 所示,测试系统一般由测量者、激励装置(可选)、被测对象、传感器、信号调理、信号处理、显示记录、反馈控制等环节组成。测试系统的复杂程度取决于被测信息检测的难易程度以及所采用的实验方法。对测试系统的基本要求是可靠、实用、通用、经济,这也是考虑测试系统组成的前提条件。

一个被测对象的信息总是通过一定的物理量——信号表现出来的。有些信息可以在被测对象处于自然状态时所表现出的物理量中显现出来,而有些信息却无法显现或显现得不明显。在后一种情况下,需要通过激励装置作用于被测对象,使之产生有用信息并载于其中的一种新的信号。如对零件或设备激振测量其固有频率等。

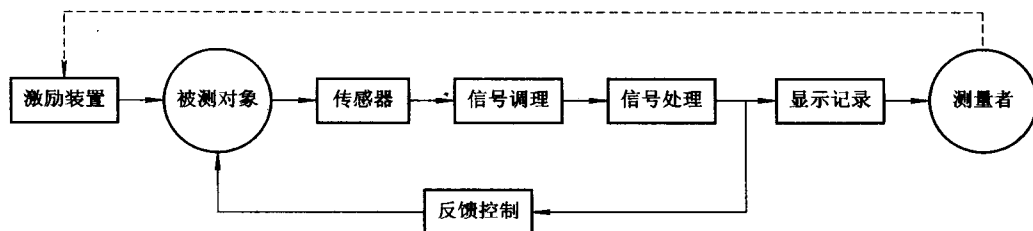


图 1.1 测试系统的组成

传感器是将被测信息转换成某种便于处理的信号的器件。它包括敏感器和转换器两部分。敏感器一般是将被测量如温度、压力、位移、振动、噪声、流量等转换成某种容易检测的信号，而转换器则是将这种信号变成某种易于传输、记录、处理的信号（通常为电信号）。

信号调理环节把来自传感器的信号转换成更适合于进一步传输和处理的形式。这种信号的转换，多数是电信号之间的转换，如幅值放大，将阻抗的变化转换成电压的变化或频率的变化等等。

信号处理环节对来自信号调理环节的信号进行各种运算和分析。

显示记录环节将来自信号处理环节的信号，以测量者易于观察和分析的形式显示出来或储存测试的结果。

而反馈控制环节主要用于闭环控制型测试系统。对于图 1.1 中信号的调理、处理、反馈控制、显示等环节，目前的发展趋势是经 A/D 转换后采用计算机等进行分析、处理，再经 D/A 转换来控制被测对象。

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一一对应关系，而且输出的变化能够准确地反映出其输入的变化，即实现不失真的测试。

4. 测试系统的主要性质

一般地，把外界对系统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响应，如图 1.2 所示。其中： $x(t)$ 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。理想的测试系统应该具有单值的、确定的输入—输出关系，即对应于每一输入量都应只有单一的输出量与之对应，以输出与输入成线性关系为最佳。知道其中的一个量就可以确定另外一个量。实际测试系统往往无法在较大范围内满足这种要求，而只能在较小的工作范围内和在一定误差允许范围内满足这种要求。

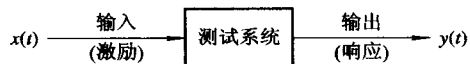


图 1.2 测试系统示意图

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式(1.1)来描述时，称该系统为线性时不变系统或时不变线性系统。

$$\begin{aligned}
 & a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\
 & = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t)
 \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中, t 为时间自变量; 系数 $a_i (i=1, \dots, n)$, $b_j (j=1, \dots, m)$ 均为不随时间而变化的常数。

对于确定的测试系统, 其结构及其所用元器件的参数决定了系数 a_i 和 b_j 的大小及其量纲。但是, 一个实际的物理系统由于其组成中的各元器件的物理参数并非能保持常数, 加上元件中的电阻、电容、半导体器件等的特性都会受温度的影响, 这些都会导致系统微分方程系数 a_i 和 b_j 的变化, 因此理想的线性时不变系统是不存在的。然而, 为了降低系统的处理难度, 在工程实际应用中, 只要可以满足系统准确度的要求, 在一定的条件下、特定的范围内, 将实际的非线性系统近似为线性系统, 即将系统的参数 a_i 和 b_j 当作时不变的常数。本书以下的讨论都只限于线性时不变系统。

若以 $x(t) \rightarrow y(t)$ 表示线性时不变系统输入与输出的对应关系, 则线性时不变系统具有以下主要性质。

1) 叠加性

当几个输入同时作用于一线性系统时, 其响应等于各个输入单独作用于该系统的响应之和。即

$$\begin{aligned} x_1(t) &\rightarrow y_1(t) \\ x_2(t) &\rightarrow y_2(t) \end{aligned}$$

则

$$ax_1(t) + bx_2(t) \rightarrow ay_1(t) + by_2(t)$$

叠加性表明, 对于线性系统, 一个输入的存在并不影响另一个输入的响应。各个输入产生的响应是互不影响的。因此, 对于一个复杂的输入, 就可以将其分解成一系列简单的输入之和, 系统对复杂激励的响应便等于这些简单输入的响应之和。

2) 比例特性

若线性系统的输入扩大 k 倍, 则其响应也将扩大 k 倍, 即对于任意常数 k , 必有

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

则

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

3) 微分性质

线性系统对输入导数的响应等于对该输入响应的导数:

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

4) 积分特性

若线性系统的初始状态为零(即当输入为零时, 其响应也为零), 则积分的响应等于对该输入响应的积分, 即

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

5) 频率保持性

若线性系统的输入为某一频率的简谐信号, 则其稳态响应必是同一频率的简谐信号。即若

$$x(t) = x_0 e^{j\omega t}$$

则

$$y(t) = y_0 e^{j(\omega t + \varphi_0)}$$

式中, x_0, y_0 为常数。

线性系统的频率保持性在测试工作中具有非常重要的作用。在实际测试中, 测试得到的信号常常会受到其它信号或噪声的干扰, 这时依据频率保持性可以认定测得的输出信号中只有与输入信号具有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, 依据频率保持特性, 输入信号也应包含该频率成分, 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。

【例 1.1】 已知 S 为线性时不变系统, 现对系统 S 施加 $x(t) = 3 \sin t + 2 \cos 2t + 7 \sin\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$ 的激励, 则以下不可能是系统输出成分的是()。

A. $1.2 \cos t$

B. $5\pi \sin\left(6t + \frac{\pi}{2}\right)$

C. $7 \cos(2t + 1.2)$

D. $0.09 \cos\left(12t + \frac{\pi}{6}\right)$

分析: 本题考查的是线性时不变系统的性质。根据线性时不变系统的频率保持性, 线性时不变系统对单一频率的输入只会产生同频率的输出。再由叠加性, 输入之和的作用结果与分别的作用结果之和相当。因此, 根据三角函数的性质, 线性时不变系统的输出频率只可能是由输入信号原频率成分或其和构成。分析备选答案, A 和 C 的频率成分是输入信号的组成频率, 有可能是系统输出的组成; B 的频率可由输入信号中 $\sin t$ 和 $\sin 5t$ 的和得到, 因此也可能是系统输出的组成; 只有 D 的频率既不是输入信号的组成频率, 也不能通过输入信号各分量的组合得到, 因此不可能是系统输出成分。

答案: D。

1.2 测试系统的静态特性

测试系统的静态特性就是在静态测量情况下描述实际测试装置与理想线性时不变系统接近程度的特性。下面用定量指标来研究实际测试系统的静态特性。

1.2.1 测试系统的静态数学模型

在式(1.1)描述的线性系统中, 当系统的输入 $x(t) = x_0$ (常数), 即输入信号的幅值不随时间变化或其随时间变化的周期远远大于测试时间时, 式(1.1)变成

$$y = \frac{b_0}{x_0} x = Sx \quad (1.2)$$

也就是说, 理想线性系统输出与输入的函数关系是一条理想的直线, 斜率 S 为常数。

但是实际测试系统并非理想线性时不变系统, 式(1.2)实际上成为

$$y = S_1 x + S_2 x^2 + S_3 x^3 + \cdots = (S_1 + S_2 x + S_3 x^2 + \cdots)x \quad (1.3)$$

输出曲线并不是理想的直线。

1.2.2 静态特性的基本参数

1. 非线性度

非线性度是指测试系统的输入、输出关系保持常值线性比例关系的程度。在静态测量中,通常用实验测定的办法求得系统的输入输出关系曲线,称之为定度(标定)曲线。定度曲线偏离其拟合直线的程度即为非线性度 S ,如图 1.3 所示。即在系统的标称输出范围(全量程) A 内,定度曲线与该拟合直线的最大偏差 B 与 A 的百分比,也即

$$S = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (1.4)$$

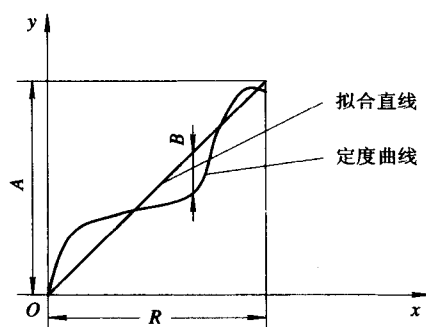


图 1.3 非线性度示意图

测试系统的非线性度是无量纲量,通常用百分数来表示,它是测试系统的一个非常重要的精度指标。至于拟合直线的确定,目前国内外还没有统一的标准。常用的主要有两种,即端基直线法和最小二乘直线法。

端基直线是指连接测量范围上下限点的直线,如图 1.4 所示。显然,用端基直线代替实际的输入、输出曲线,其求解过程比较简单。但通过这种方法得到的非线性度准确性较差。

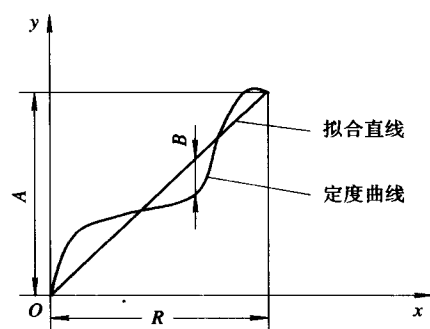


图 1.4 端基直线法

最小二乘直线法是指使输入与输出曲线上各点的线性误差 B_i 的平方和最小,即 $\sum B_i^2$ 最小的直线。这一定义符合最小包容原则,对端点的微小变化不敏感,是更可取的评定方法,但其计算比较复杂,不过,在计算机日益普及的今天,这已经不成问题。图 1.5 给出了最小二乘直线法的示意图。

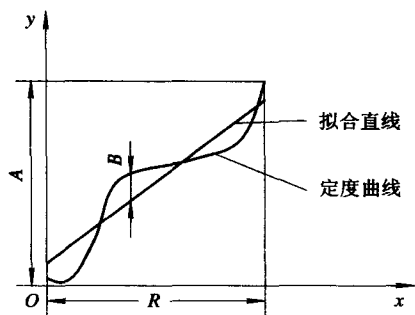


图 1.5 最小二乘直线法

【例 1.2】已知一测量系统的定度曲线数据如下表，求系统的非线性度。

x/mm	1	5	10	15	20	25	30	35	40
y/N	1.2	2.3	3.8	5.1	7.4	6.9	8.2	9.1	8.7

分析：本题考查的是线性系统非线性度的求解方法。

解一：采用端基直线法，根据系统的定度曲线可知，系统测量范围上下限的端点为 (1, 1.2) 和 (40, 8.7)，由此可得端基定标直线为

$$y = 0.19x + 1.01$$

分别将定度点坐标代入，求得系统非线性度为

$$S = 32.78\%$$

解二：采用最小二乘直线法，根据系统的定度曲线可得如下数据：

	x_i	x_i^2	y_i	y_i^2
1	1	1	1.2	1.44
2	5	25	2.3	5.29
3	10	100	3.8	14.44
4	15	225	5.1	26.01
5	20	400	7.4	54.76
6	25	625	6.9	47.61
7	30	900	8.2	67.24
8	35	1225	9.1	82.81
9	40	1600	8.7	75.69

由最小二乘法求得系统非线性度为

$$S = 15.75\%$$

2. 灵敏度

灵敏度表征的是测试系统对输入信号变化的一种反应能力，若系统的输入有一个增量 Δx ，引起输出产生相应增量 Δy ，则定义灵敏度 S 为

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.5)$$

对于线性时不变系统,其灵敏度恒为常数。但是,实际的测试系统并非是线性时不变系统,因此其灵敏度也不为常数。实际的灵敏度通常以工作频率范围内的幅频特性曲线最平坦的一段,对具有代表性的频率点进行标定。对于具有低通特性的测试系统,一般在静态下作标定。

灵敏度的量纲取决于输入输出的量纲。当输入与输出的量纲相同时,灵敏度是无量纲的数,常称之为“放大倍数”。

3. 分辨力

分辨力是指测试系统所能检测出来的输入量的最小变化量。分辨力与灵敏度有密切的关系,为灵敏度的倒数。

一个测试系统的分辨力越高,表示它所能检测出的输入量的最小变化量越小。对于数字测试系统,其输出显示系统的最后一位所代表的输入量即为该系统的分辨力;对于模拟测试系统,是用其输出指示标尺最小分度值的一半所代表的输入量来表示其分辨力的。分辨力也称为灵敏阈或灵敏限。

4. 回程误差

由于仪器仪表中磁性材料的磁滞、弹性材料的迟滞现象,以及机械结构中的摩擦和游隙等原因,反映在测试过程中输入量在递增过程中的定度曲线与输入量在递减过程中的定度曲线往往不重合,如图 1.6 所示。

对应于同一输入量的两条定度曲线之差的最大值 $|h_i|_{\max}$ 与标称的输出范围 A 之比称为回程误差,即

$$\text{回程误差} = \frac{|h_i|_{\max}}{A} \times 100\%$$

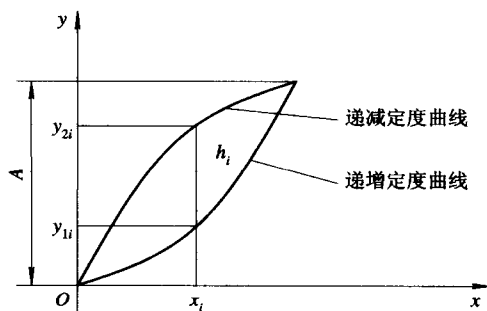


图 1.6 回程误差

5. 漂移

漂移是指测试系统在输入不变的条件下,输出随时间而变化的趋势。在规定的条件下,当输入不变时在规定时间内输出的变化,称为点漂。在测试系统测试范围最低值处的点漂,称为零点漂移,简称零漂。

产生漂移的原因有两个方面:一个是仪器自身结构参数的变化,另一个是周围环境的变化(如温度、湿度等)对输出的影响。最常见的漂移是温漂,即由于周围的温度变化而引

起输出的变化。温漂进一步引起测试系统的灵敏度和零位发生漂移,即灵敏度漂移和零点漂移。

以上是描述测试系统静态特性的常用参数。在选择或者设计一个测试系统时,要根据被测对象的情况、精度要求、测试环境等因素经济合理地选取各项指标。

1.2.3 静态特性的品质指标

1. 重复性

重复性是表征测量系统输入量在短时间内按同一方向做全量程连续多次变动时,静态特性不一致的程度,如图 1.7 所示,重复性用引用误差形式可表示为

$$\delta_R = \frac{\Delta R}{Y_{ES}} \times 100\% \quad (1.6)$$

式中, ΔR 为同一输入量对应多次循环的同向行程输出量的最大变动量, Y_{ES} 为输出全量程。

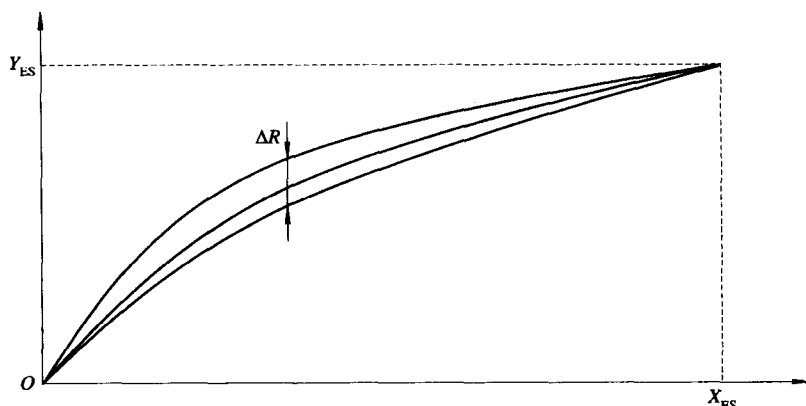


图 1.7 重复性示意图

重复性表征标定值的分散性,是由随机效应引入的不确定度分量,可以根据实验标准偏差计算

$$\Delta R = \frac{KS}{\sqrt{n}} \quad (1.7)$$

其中, S 为子样本的实验标准差, K 为置信因子。

2. 可靠性

测试系统的可靠性是指系统在规定时期内,在保持运行指标不超限的情况下执行其功能的性能。这一性能对生产过程监控非常重要。主要的可靠性指标有:

(1) 平均无故障时间 $MTBF$ (Mean Time Between Failure)。无故障时间指在标准工作条件下不间断工作,直至发生故障失去工作能力的时间。如果对若干次(或若干相同的系统)无故障时间取均值,则称为平均无故障时间。

(2) 可信任概率 P 。这一统计概率表征由于元件参数的渐变而使仪器误差在给定时间内仍然保持在技术条件规定限度内的概率。 P 一般与仪器成本成正比,而与维持费用成反比。实践经验表明,可信任概率 P 的最佳值为 $0.8 \sim 0.9$ 。