

# 现代检测技术与系统

蔡 萍 赵 辉 主编



高等教育出版社

## 内容简介

本书为实施通才教育、培养复合型人才而编写,力图为读者建立现代检测技术和检测系统的整体概念。通过对本书的学习,读者可以全面了解检测系统的基本构成、检测系统的基本特性、检测方法、测量数据处理等基本概念和要点。从实用角度出发,本书介绍了各种典型传感器的工作原理及特性,常规工程量的检测方法和各种信号调理技术。书中模糊数学、人工神经网络、传感器融合等信号分析处理新技术以及仪器总线与虚拟仪器等部分的内容展现了新的理论和方法以及计算机技术对检测系统带来的新内容与进展。

本书的编写力求简而精,突出重点和要点,既保持了知识的系统性,又注重以浅显易懂的方式切入主题透析难点,使读者花不多的时间就能对现代检测技术与系统的知识要素有较全面的了解,适应现代快节奏的学习需要。

本书可作为电气工程与自动化、机电一体化和现代制造技术专业本科生的教材,也可供相关领域和生产管理人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代检测技术与系统 / 蔡萍, 赵辉主编. —北京: 高等教育出版社, 2002. 7

本科教材. 电气信息专业、仪器仪表专业用

ISBN 7-04-010812-7

I. 现... II. ①蔡...②赵... III. ①自动检测-技术-高等学校-教材②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(2002)第 045018 号

现代检测技术与系统  
蔡萍 赵辉 主编

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号  
邮政编码 100009  
传 真 010-64014048  
经 销 新华书店北京发行所  
印 刷 北京印刷三厂  
开 本 787×960 1/16  
印 张 12  
字 数 200 000

购书热线 010-64054588  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
版 次 2002 年 7 月第 1 版  
印 次 2002 年 7 月第 1 次印刷  
定 价 14.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

# 前 言

我国的高等教育事业正逐步进入国际竞争环境,为了培养适应 21 世纪人才市场需求的高素质人才,各高等院校都在进行课程体系和课程内容的改革。依据拓宽专业面、加强基础、增强适应力的总体思路,许多高等工科院校正在构建工科类本科教学平台。本书专为教学平台课程现代检测技术与系统而编写。

信息检测技术作为信息科学的一个分支与计算机技术、自动控制技术和通信技术 etc 一起构成了信息技术的完整学科。王大珩等院士认为,由检测技术支撑的现代检测系统、科学仪器和测量仪表其重要作用可比作信息产业的倍增器和先行官。检测技术已成为工科学子科学基础和工程基础的有机部分,工科院校的大部分专业都开设有检测技术类课程。本书编写目的是:使工科学生、工程技术及管理人员掌握检测技术与系统必要知识,了解现代检测技术与理论的新进展。

从素质教育 and 能力培养的教育观点出发,本书在内容编排上,既注重知识的结构性和完整性,又力求易学实用,还特别注意知识呈现给读者时知识体系的封闭性,即从最基本的概念切入,循序渐进,使读者不受先修专业课程的限制。读者只要有普通物理、高等数学和工程数学的基础就可以读懂本书。以适应现代快节奏的学习需要。入门基础知识与高技术前沿相结合,使本教材适应不同层次人才的需求。

通过本书,读者可以全面了解检测系统的基本构成、检测系统的基本特性、检测方法、测量数据处理等基本概念和要点。从实用角度出发,本书介绍了各种典型传感器的工作原理及特性,常规工程量的检测方法和各种信号调理技术。书中模糊数学、人工神经网络、传感器融合等信号分析处理新技术以及仪器总线与虚拟仪器等部分的内容展现了新的理论和方法以及计算机技术对检测系统带来的新内容与进展。

本书由上海交通大学蔡萍、赵辉主编,哈尔滨工业大学浦昭邦审稿。蔡萍教授编写了第一、二、四和第六章,赵辉副教授编写了第三章,上海交通大学毛义梅博士编写了第五章。浦昭邦教授对本书的总体结构和内容细节提出许多宝贵而富有价值的审阅意见。他认真细致的工作作风、严谨的治学态度和广博的知识积累给我们留下了深刻的印象。上海交通大学张鄂教授、施文康教授和林明邦教授为本书的编写提供了许多有价值的建议。编写过程中上海交通大学侯文永教授给予了许多支持。这里谨向他们以及对本书的编写给予帮助的人,表示衷

心的感谢。

本书在编写过程中参阅了许多文献(如书后所列),在此向有关作者深表谢意。

对于书中难免存在的不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2001年11月

# 目 录

<b>第一章 检测技术与检测系统概述</b> .....	1
1.1 检测的基本概念 .....	1
1.2 检测系统及其构成 .....	2
1.2.1 检出部分 .....	2
1.2.2 信号变换部分 .....	3
1.2.3 分析处理部分 .....	4
1.2.4 通信接口与总线部分 .....	4
1.3 静态测量系统及其技术指标 .....	5
1.4 动态测量系统及其技术指标 .....	7
1.5 检测系统的动态特性分析 .....	8
1.5.1 微分方程 .....	8
1.5.2 传递函数 .....	10
1.5.3 频率响应函数 .....	10
1.5.4 脉冲响应函数 .....	11
1.6 线性系统的性质 .....	11
1.7 零阶、一阶和二阶系统的频率特性分析与比较 .....	12
1.7.1 零阶系统 .....	12
1.7.2 一阶系统 .....	12
1.7.3 二阶系统 .....	13
1.8 测量方法及其基本概念 .....	14
1.8.1 直接测量与间接测量 .....	14
1.8.2 偏移法与零位法测量 .....	14
1.8.3 差分式测量 .....	16
1.8.4 随动跟踪测量 .....	16
1.8.5 主动探索与信息反馈型检测 .....	17
<b>第二章 信号描述与分析、误差分析与数据处理</b> .....	18
2.1 信号描述与分析 .....	18
2.1.1 信号的分类 .....	18
2.1.2 信号的时域、频域描述与分析 .....	19
2.2 误差分析与数据处理 .....	25

2.2.1 误差分析 .....	25
2.2.2 数据处理 .....	27
2.3 最小二乘原理及其在参数估计中的应用 .....	30
<b>第三章 信号检出技术 .....</b>	<b>34</b>
3.1 传感器概述 .....	34
3.1.1 传感器基本概念 .....	34
3.1.2 传感器的构成 .....	35
3.1.3 传感器的分类 .....	36
3.2 长度及线位移传感器 .....	37
3.2.1 电感传感器 .....	37
3.2.2 电容传感器 .....	41
3.2.3 光栅传感器 .....	44
3.2.4 感应同步器 .....	46
3.2.5 磁栅传感器 .....	48
3.2.6 激光干涉测量系统 .....	48
3.3 角度及角位移传感器 .....	50
3.3.1 圆光栅传感器 .....	50
3.3.2 旋转式编码器 .....	51
3.4 测距传感器 .....	54
3.4.1 电涡流测距传感器 .....	54
3.4.2 激光测距传感器 .....	56
3.4.3 超声波测距传感器 .....	57
3.5 力传感器 .....	58
3.5.1 电阻应变式力传感器 .....	58
3.5.2 压电式力传感器 .....	60
3.5.3 压磁式力传感器 .....	61
3.5.4 电容式力传感器 .....	63
3.6 压力传感器 .....	63
3.6.1 电阻应变式压力传感器 .....	63
3.6.2 压阻式压力传感器 .....	63
3.6.3 电感式压力传感器 .....	65
3.6.4 电容式压力传感器 .....	65
3.6.5 压电式压力传感器 .....	66
3.7 速度、转速及加速度传感器 .....	66
3.7.1 速度和转速传感器 .....	66

3.7.2 加速度传感器	68
3.8 温度传感器	71
3.8.1 热电偶温度传感器	71
3.8.2 热电阻温度传感器	73
3.8.3 辐射式温度传感器	75
3.9 流量传感器	76
3.9.1 差压式流量传感器	76
3.9.2 流阻式流量传感器	77
3.9.3 测速式流量传感器	78
3.9.4 振动式流量传感器	80
3.9.5 质量流量计	82
3.10 电磁量传感器	82
3.10.1 光纤电流传感器	83
3.10.2 霍耳式传感器	85
3.10.3 磁敏传感器	85
3.11 视觉传感器	86
3.11.1 视觉传感器的应用领域	86
3.11.2 视觉检测系统的一般构成	88
3.11.3 视觉传感器的图像处理	93
3.11.4 视觉传感器的应用实例	94
<b>第四章 电信号的变换与处理技术</b>	<b>95</b>
4.1 电压和电流放大变换电路	95
4.1.1 信号源及其等效电路	95
4.1.2 集成运算放大器	96
4.1.3 比例放大电路	97
4.1.4 仪用放大器	98
4.2 测量电桥及其放大电路	99
4.2.1 测量电桥	99
4.2.2 电桥放大器	100
4.3 噪声抑制技术	101
4.3.1 噪声的一般性质	101
4.3.2 相敏检波技术	101
4.3.3 模拟滤波技术	103
4.3.4 滤波器的电路组成方法	105
4.4 模数转换技术	107

4.4.1	采样与量化 .....	107
4.4.2	双积分式模数转换 .....	108
4.4.3	逐次逼近式模数转换 .....	110
4.4.4	增量调制型模数转换 .....	111
4.5	电压/电流/频率变换技术 .....	112
4.5.1	电压频率转换 .....	112
4.5.2	电压电流变换 .....	113
4.6	干扰抑制技术 .....	113
4.6.1	干扰的传播途径 .....	114
4.6.2	抗干扰措施 .....	115
<b>第五章</b>	<b>虚拟仪器及仪器总线技术</b> .....	<b>122</b>
5.1	虚拟仪器概论 .....	122
5.1.1	虚拟仪器的出现 .....	122
5.1.2	虚拟仪器的概念 .....	123
5.1.3	虚拟仪器的组成特点 .....	124
5.1.4	虚拟仪器的体系结构 .....	126
5.1.5	虚拟仪器与传统仪器的比较 .....	129
5.1.6	虚拟仪器技术的发展趋势 .....	130
5.2	仪器总线技术 .....	130
5.2.1	总线技术概述 .....	130
5.2.2	典型的虚拟仪器系统及仪器总线 .....	132
5.2.3	GPIB 总线技术概述 .....	134
5.2.4	VXI 总线系统 .....	136
5.3	图形化软件编程环境 LabVIEW .....	151
5.3.1	LabVIEW 的特点 .....	151
5.3.2	LabVIEW 的组成 .....	152
5.3.3	用 LabVIEW 创建虚拟仪器的方法 .....	155
5.3.4	程序调试技术 .....	158
5.3.5	虚拟仪器设计举例 .....	158
<b>第六章</b>	<b>现代检测理论与信息处理技术</b> .....	<b>163</b>
6.1	基于人工神经网络的检测方法 .....	163
6.1.1	神经网络信号处理简述 .....	163
6.1.2	神经网络 .....	164
6.1.3	BP 模型及其应用 .....	165
6.2	基于模糊数学的检测方法 .....	166



---

6.2.1 概述 .....	166
6.2.2 基本定义和定理 .....	167
6.2.3 模糊检测技术应用实例 .....	168
6.3 基于相关原理的检测方法 .....	171
6.3.1 信号的自相关处理 .....	171
6.3.2 信号的互相关处理 .....	172
6.3.3 相关检测应用举例 .....	172
6.4 多传感器信息融合技术 .....	174
6.4.1 概述 .....	174
6.4.2 信息融合的 Bayes 方法 .....	175
6.5 小波方法及其应用 .....	176
6.5.1 对数变换 .....	176
6.5.2 傅里叶变换 .....	176
6.5.3 小波变换 .....	177
6.5.4 应用举例 .....	178
<b>参考文献</b> .....	179

# 第一章 检测技术与检测系统概述

## 1.1 检测的基本概念

一个完整的检测过程一般包括信息的提取、信号的转换存储与传输、信号的显示记录和信号的分析处理。检测技术是涉及检测方法、检测结构以及检测信号处理的一门综合性技术。检测与测量含义基本相同,国家标准中对测量一词的定义为:测量是指以确定被测对象属性和量值为目的的全部操作。检测技术是科学地认知客观世界的手段,只有通过检测人们才能够定量地表述事物和事物的发展过程,才能进行比较和判断,进而对事物和过程进行有效的管理和控制。

检测在工农业生产、科学研究、医疗卫生、交通运输和经济贸易等方面起着重要作用。就是在日常生活中,检测也在不知不觉中发挥着作用。例如,电冰箱的温度调节离不开对温度的检测;家庭用电、用水和用气的多少则通过电表、水表和煤气表对电量、水流量和气流量进行检测;医生对病人进行诊断时,常常要测量病人的体温和血压等。这些都是通过检测获取信息的简单实例。

统计资料表明,在现代工程装备中,检测环节的成本已达到装备系统总成本的50%~70%。检测环节已成为保证装备实际性能指标和正常工作的重要手段,如钢铁厂的高炉冶炼过程中,为实施生产监督和保证产品质量,必须由称重测量系统对送进高炉的铁矿石及各种添加剂进行称量以保证配比,还要有温度、风速和湿度测量装置对送风温度、流量以及湿度进行测量并实施温度湿度控制,以保证钢锭质量;为保证火箭的正常发射和运行,需要得到火箭的飞行速度、加速度、航向等几百个状态数据;大规模集成电路的加工中,微米、亚微米线宽必须以亚微米或纳米级的高精度位置检测技术来保证。

检测的应用实例不胜枚举。检测技术应人类文明生活的需求而产生,检测技术的水平随着人类社会活动和经济活动的发展而提高。人们越来越清楚地认识到检测技术是信息技术的基础技术之一。

随着科学技术的发展,一方面是被测对象范围日益扩大,要求应用物理、化学和生物学等基础科学提出新的变换原理,另一方面对检测系统的准确性(Accuracy)、检测系统对被测参数微小变化的分辨能力(Resolution)、使用的可靠性(Reliability)、反映快速变化信号的实时性(Real time)、抵抗和抑制外界干扰

影响的抗干扰能力及在线提供数据分析判断的数据处理能力提出了越来越高的要求。

## 1.2 检测系统及其构成

检测系统规模的大小及其复杂程度与被测量的多少、被测量的性质以及具体的被测对象密切相关,不失一般性和完整性,图 1-1 给出了一个涵盖各功能模块的检测系统的构成框图。它包含将被测量转换成电量或电路元件参数的检出部分,进行阻抗匹配、信号变换和放大等处理的变换部分,对变换得到的数字信号进行去伪存真和特征提取的分析处理部分,表达检测结果和对结果进行存储的显示记录部分,以及将信号传送到控制器、其他检测系统或上位机系统的通信接口部分。

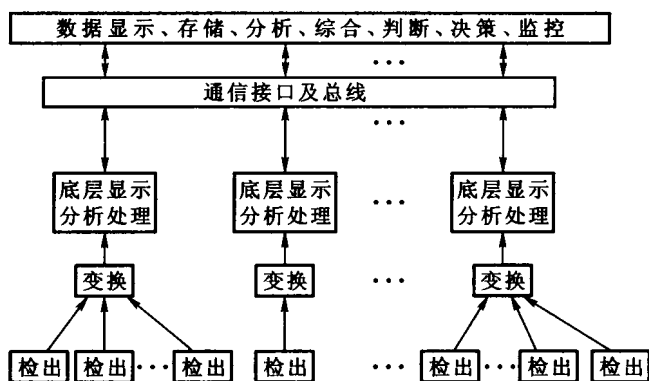


图 1-1 检测系统的一般构成

实际的检测任务不一定都要用到图 1-1 所示的各个部分。如用于测量体温的水银温度计就只有检出(玻璃管中的水银)和指示(有刻度的玻璃管)两部分。贸易用的计价秤则包括检出(应变电阻式荷重传感器)、变换(平衡电桥、放大、模数转换等电路)、分析处理(数据平均、重量折算、键盘管理和显示驱动等)和显示等部分。当系统有多个被测量时,多个检出器件可以通过多路选择器共用一套变换电路,以节约成本。

本节仅对组成检测系统各部分的作用及特点作一简单介绍,详细内容请参阅以后各章节。

### 1.2.1 检出部分

**检出**(detection)部分是检测系统中形式最多样、与被测对象关联最密切的

部分。担当检出功能的器件统称为传感器(Sensor)。传感器负责把被测量作为信号提取出来并传输到信号变换部分。许多情况下,检出和变换并没有明确的界限,因为传感器实质上完成的也是一种变换,即将被测量或被测对象的特征参数转化为有用信号的变换。

传感器的输出一般有以下一些特点:

1. 输出量为电压、电流或频率的变化,或者是通过电阻、电容、电感的改变转换为电压、电流、频率的变化。有模拟量和数字量两种形式。

2. 输出的电信号一般较微弱,如电压信号为毫伏级甚至微伏级,电流信号为毫安级甚至纳安级。

3. 由于传感器内部噪声的存在,输出信号与噪声混在一起。若传感器的信噪比较小而输出的信号又弱时,则信号淹没在噪声中。

4. 传感器的输出特性呈线性或非线性。

5. 外界环境如温度、湿度、电磁场等的变化会影响传感器的输出特性。

传感器根据被测量和被测对象的特点进行设计,它是充分运用物理学、化学、物性学、电子学、材料学、生物学和机械原理等一些基础学科知识的结果。同一被测量可以选用不同工作原理的传感器,而一种类型的传感器又可以用来对不同的被测量进行测量。传感器的合理选择建立在使用者对被测对象和各种传感器特性充分了解的基础上。选择时要充分考虑测量精度要求、被测量变化范围、被测对象所处的环境条件以及对传感器体积和整个检测系统的成本等的限制。

### 1.2.2 信号变换部分

信号变换(Signal conversion)是使检出的信号变换成适合于分析处理的信号的方法。进行变换时,重要的是考虑原始信号中哪些信息是希望了解的,以及如何不丢失和不歪曲有用信息。

信号变换部分的任务是针对传感器输出的特点及其非理想情况进行合理的变换及处理。这部分任务可以由电路、光路或气路来完成,但由电路来完成的情形较多。完成信号变换的电路有时又称为信号调理电路(Signal conditioning circuits)。信号变换部分的任务是多种多样的,例如,传感器的输出阻抗很高时,信号变换部分进行阻抗变换;传感器的输出信号微弱时,信号变换部分进行信号的放大;信号淹没在噪声中时,信号变换部分进行抑制噪声的处理;需要进行电流传输时,信号变换部分进行电压/电流变换;需要进行数字信号的传输时,变换部分进行模拟/数字转换(简称模数转换),等等,不一而足。就后续分析处理部分的需要来说,信号变换部分的目的主要是:

1. 对传感器的输出量变换成易于处理或放大的量;

2. 消除或抑制传感器输出量中的无用信号；
3. 提高测量、分析的准确度；
4. 简化后续系统的组成。

### 1.2.3 分析处理部分

**分析处理**(Data analysis and processing)是现代检测系统中不断被注入新内容的一部分,并越来越成为检测系统的研究中心。常规的检测只是将传感器获得的信号进行放大和变换,以进行显示或传送,而分析处理则需由人工完成。以计算机为基础的分析处理部分的加入,使得现代检测系统具有强大的问题解析能力,且使得复杂系统的实时控制成为可能。

对测量数据进行分析处理具有相当重要的意义。例如,医院对住院的重危病人和对正在接受手术的病人必须进行心电监护,早期的心电监护系统需要护理人员长时间地观察心电波形,往往会因为视力疲劳、注意力分散或经验不足造成漏检或错检。而具有自动分析功能的心电监护仪通过采用模板归类、分析推理和概率打分等方法可以进行心电波形异常的自动识别和参数提取,使得诊断的准确性、一致性和工作效率大大提高。

随着计算机技术和信号处理技术的发展,现代检测系统在科学研究和工业生产中的地位更趋重要。通过信息论、系统论、控制论、预测论、智能与模糊推理、相关理论、谱分析、随机过程、卡尔曼滤波、自适应滤波、模式识别、故障诊断、神经网络和小波变换(时域、频域联合分析)等现代理论的运用,分析处理功能使得现代检测系统能解决过去常规检测无法解决的问题,真正实现检测的自动化和智能化。

### 1.2.4 通信接口与总线部分

**通信接口与总线**(Communication interface and bus)的基本功能是管理两个不同系统之间的数据、状态和控制信息的传输和交换。一个大型检测系统中有许多测量分系统或测量节点,分系统向上位机传送数据信息和测量状态、上位机向下发布命令或各分系统之间交换信息都通过接口进行。为了使不同的系统尤其是不同生产厂家的产品能够互联,国际上规定了一些通用标准接口。

总线是从任意一个源点到任意一个终点的一组传送数字信号的公共通道,它是各种信号线的集合。总线结构也有多种国际标准。接口与总线是相辅相成的两个方面,总线更多的是指一种规范、一种结构形式,而接口多指完成通信的硬件系统。

## 1.3 静态测量系统及其技术指标

所谓静态测量,是指在测量过程中被测量保持恒定不变时的测量。对加工好的零件进行参数检验以及各种尺寸参数的测量等都属于静态测量。当被测量为缓慢变化量,但在一次测量的时间段内变动的幅度在测量精度范围之内,这时的测量也可以当作静态测量来处理。静态测量系统的技术指标包括示值误差与示值重复性、非线性误差、灵敏度、分辨力、量程、回程误差、稳定性与漂移等。

### 1. 示值误差与示值重复性

示值误差是指检测系统的指示值与被测量真值之差。示值重复性是指在外界条件不变的情况下,对同一量多次重复测量时检测系统的指示值之间的分散性。示值误差越小,表明检测系统的准确度越高;重复性误差越小,表明检测系统的精密度越高。

### 2. 非线性(Non-linearity)误差

对于理想的检测系统,其输出  $y(t)$  与输入  $x(t)$  之间是固定的比例关系:  $y(t) = kx(t)$ ,但实际检测装置的输出与输入之间往往不是理想的线性关系,非线性误差是表明偏离情况的量度。通常用实际测得的输出-输入特性曲线(称为标定曲线)与其拟合直线之间的最大偏差与检测装置满量程(Full Span)输出范围之比来表示。图 1-2 中,非线性误差  $e$  为

$$e = \frac{\Delta_m}{y_{FS}} \quad (1-1)$$

目前,有两种求解拟合直线的方法。一种是端点法,通过连接实测特性曲线的两个端点得到,所得直线称为端基直线,如图 1-2(b)所示。另一种称为最小二乘法,所得直线(称为最小二乘直线)与实测曲线相应点之间偏差的平方和为最小,如图 1-2(a)所示。

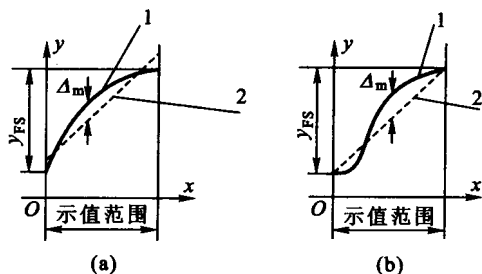


图 1-2 标定曲线与非线性误差

1. 标定曲线 2. 拟合直线

### 3. 灵敏度(Sensitivity)

灵敏度是指检测装置在稳态下

输出变化与引起该变化的输入变化的比值。线性检测装置的灵敏度是一个常数,而非线性检测装置的灵敏度是一个变量,可表示为  $k = dy/dx$ 。当输出量与输入量为同一量纲时灵敏度又称放大比或放大倍数。相应地,传感器的灵敏度定义为传感器在稳态下输出变化对输入变化的比值,它对后续变换电路的设计

有重要意义。

#### 4. 分辨力(Resolution)

分辨力表征的是检测装置可能检测出被测信号的最小变化的能力。分辨力可以用绝对值  $\Delta$  来表示,也可以用满刻度(Full Scale)的百分比  $\delta$ ,即相对值来表示。如某温度检测装置的分辨力为  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,某测力称重装置的分辨力为  $0.01\%$  等。对于带数字显示的检测装置,分辨力是数字显示器末位数字间隔所代表的被测量值。

#### 5. 量程(Range)和动态范围(Dynamic Range)

检测装置的量程是指在规定的误差内装置可测的被测量的变化范围,又称示值范围,即可测量的被测量最大值与最小值之差。动态范围则是量程与绝对分辨力之比,即

$$\text{动态范围} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta} \quad (1-2)$$

也常以分贝数表示动态范围,即

$$\text{动态范围} = 20 \lg \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta} \quad (1-3)$$

#### 6. 回程误差(Hysteresis)

回程误差又称迟滞或滞后误差,它表征了正向(输入量增大)和反向(输入量减小)行程期间,检测装置输出-输入特性曲线的不重合程度,如图 1-3 所示。也就是说,在外界条件不变的情况下,对应于同一大小的输入信号,检测装置在正、反行程时输出信号的数值不相等。检测装置中的弹性元件,机械传动中的间隙和内摩擦以及磁性材料的磁滞等都会引起回程误差。回程误差一般由实验确定,其值以满量程输出  $y_{\text{FS}}$  的百分比表示,即

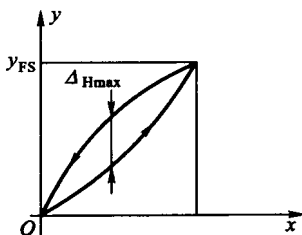


图 1-3 回程误差

$$\delta_h = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (1-4)$$

#### 7. 稳定性与漂移(Drift)

漂移是指在输入不变的情况下,检测装置的输出随时间变化的趋势。最常见的是由温度引起的漂移,称为温漂。输出的温漂又常以灵敏度的温漂和零位的温漂来定量表示。

## 1.4 动态测量系统及其技术指标

假如被测量本身随时间变化,而测量系统又能准确地跟随被测量的变化而变化,则称其为动态测量。动态测量与静态测量对检测装置的特性要求以及对测得数据的处理有着很大的差别。一台在静态测量中使用情况良好的仪器用于动态测量时,不一定能得到满意的结果,甚至无法使用。其原因是多方面的,动态测量与静态测量最主要的区别是前者对检测系统频率特性的要求。

这里利用图 1-4 所示的最简单的弹簧秤的力学模型,来说明静态称重与动态称重在原理上的区别。

图 1-4 中,质量为  $m$  的被测物体放在弹簧秤的托盘中,弹簧的弹性系数为  $k$ ,在平衡静止状态下,被测物的重量与弹簧秤的恢复力相等,设由刻度板读得弹簧的变形量为  $y$ ,则  $m = ky/g$ 。但实际上,换算式  $ky = mg$  仅在静止平衡状态下成立,即这是一个静止的物理模型,所以静态秤必须等待至托盘和被测物体的上下振动停止后才能进行读数。

有鉴于此,如果建立一个在托盘和被测物体上下振动停止以前、具有动态意义的“动态模型”,那么就有可能在停止振动以前进行重量的测量,其基本原理介绍如下。

设托盘和被测物体振动时,指针的位移为  $y$ ,托盘和被测物体的位移为  $x$ ,托盘的质量为  $M$ ,则托盘和被测物体上下振动可用微分方程(运动方程)表示为

$$y = x \quad (1-5)$$

$$(M + m)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = mg \quad (1-6)$$

将式(1-6)看作以  $m$  为未知数的代数方程,解得

$$m = \frac{My + c\dot{y} + ky}{g - \ddot{y}} \quad (1-7)$$

在分母不为零的情况下,上式恒成立。因而,只要被测物体在  $t$  时刻的位移  $y$ 、速度  $\dot{y}$  和加速度  $\ddot{y}$  能正确求出,从原理上讲,利用式(1-7)可求出该物体的质量,而不必等到静态测量。

可见,动态测量问题比静态测量要复杂得多。对于过程量检测来说,运动是绝对的,而静止只是相对的。如果某次测量被作为静态测量来处理,那是因为在不影响测量精度的前提下,一些动态因素被忽略掉了。

如前面所述,动态测量时被测量随着时间变化,测量系统应能准确地跟随被测量的变化而变化。但是,绝对准确是不可能的,都存在一定的“跟随”误差。而

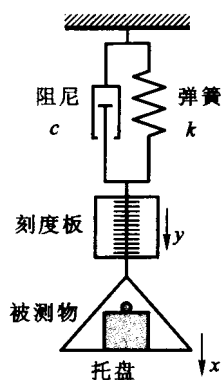


图 1-4 弹簧秤



且被测量变化的快慢不同,即频率不同,“跟随”误差也不同。为了考察检测系统完成动态测量的能力,必须对它的动态特性进行分析。表征系统动态特性的技术指标是带宽,亦称工作频率范围,定义如下:

**带宽(Band-width)**是指检测装置的适用频率范围,在该频率范围内,检测装置能够保证它的有关性能指标如灵敏度、非线性误差等。

实际的检测装置其输出-输入之间的关系(即传输特性)与输入信号的频率有关,超出某一频率范围,将会出现失真,这时输出不能真切反映输入的变化。在动态测量时,工作频率范围是检测装置极其重要的性能指标。决定和影响检测装置工作频率范围的重要参数是装置的固有频率和阻尼比(对于二阶系统)或时间常数(对于一阶系统)(详见 1.5 节)。

## 1.5 检测系统的动态特性分析

动态特性分析的任务是分析系统对输入响应的快慢程度、准确程度和抵抗外界扰动的能力。从频域角度来说就是分析和获得系统的频率响应范围、响应特性及特性随频率变化的程度。

系统的动态特性用它的传输特性来反映,所谓传输特性是指系统输出与输入之间的关系。它是抽象出来的输出量与输入变量之间的关系,与系统具体的物理性质和物理结构无关。本节介绍四种表达系统传输特性的方法:微分方程、传递函数、频率响应函数和脉冲响应函数。

### 1.5.1 微分方程

处于动态中的系统,其输出不仅与输入本身的量值大小有关,还可能与输入、输出的变化速度即一阶微分有关,也可能与速度的变化即二阶微分有关,等等,对于复杂的系统还可以继续追述下去。因此,表示系统输入-输出关系的数学表达式可用微分方程描述,如式(1-8)所示

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中,  $a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m$  称为系统的结构参数,均为常数。一般  $n > m$ ,  $n$  称为系统的阶数。微分方程根据相应的物理定律建立。下面以弹簧-质量-阻尼系统和 RLC 电路为例说明系统微分方程的建立过程。

图 1-5 所示为弹簧-质量-阻尼系统的力学模型,图中  $f(t)$  为作用力,  $k$  为弹簧的弹性系数,  $m$  为质量块的质量,  $c$  为弹簧秤系统的阻尼系数(阻尼系数