

# 前 言

传感器技术是现代科技的前沿技术，是现代信息技术的重要支柱之一，近几十年来，微电子技术、计算机技术、通信技术的飞速发展，带动传感器技术发生着日新月异的变化。新型传感器不断地向着微型化、数字化、智能化、多功能化、系统化、网络化的方向发展，而传感器技术的发展又进一步推动了科学研究、工业技术和军事科技的发展。在实际应用中，通常把传感器和与之配套的信号变送、处理、转换、显示、存储、测量装置构成的整个系统称为“测量仪器”或“检测仪表”。

现代信息处理技术的不断发展,引起了仪器仪表结构的根本性变革。传统仪器仪表由于存在着功能单一、可靠性差、操作烦琐、维护量大、灵活性差、适用范围窄等不足，逐渐被更加先进的仪表构成方式取代，其中的虚拟仪器就是最有代表性的一种。虚拟仪器(virtual instrumentation)是基于计算机的仪器，计算机和仪器的密切结合是目前仪器发展的一个重要方向。这种结合主要有两种方式：一种是将计算机装入仪器，从而形成智能化的仪器；另一种是将仪器装入计算机，以通用的计算机硬件及操作系统为依托，实现各种仪器功能。虚拟仪器主要是指后一种方式。虚拟仪器采用通用的硬件系统，各种仪器的构成和功能差异主要由软件决定。用户可以根据自己的需要定义和制造各种仪器。虚拟仪器系统可充分发挥计算机强大的数据处理能力，可以创造出功能多样、性能优良的测量仪器系统。目前，在这一领域内使用较为广泛的设计工具是美国国家仪器有限公司(NI)的LabVIEW。

LabVIEW是一种图形化的编程语言，作为一个标准的数据采集和仪器控制软件，它被工业界、学术界和研究实验室广泛接受。LabVIEW通过多样化的通信协议与数据采集设备连接，用功能丰富的库函数支持应用系统的开发和软件复用，图形化的设计风格提高了系统集成、人机界面设计的工作效率，相对统一的硬件构成减少了系统构成的复杂性，提高了系统安全性、可靠性。

本书尝试从工程应用的角度将两方面的知识点结合在一起，重点介绍虚拟仪器技术在工业测控技术中的应用。目的是使读者能够从实际工程应用的角度，了解虚拟仪器系统的设计方法。本书密切结合作者在工作中的经验，介绍常用的工业测量传感器，通过一些范例详细讲述LabVIEW软件的基本设计方法。在内容介绍中不求涉及面广，而侧重于基本功能和信号采集部分的详尽，以便于读者自我学习。

本书共两部分：第一部分由董爱华执笔，包含本书的第1~5章，内容为常用的工程检测传感器的原理和非电信号电测转换技术；第二部分由左锋执笔，包含本书的第6~9章，内容为LabVIEW设计基础，以及利用LabVIEW设计传感器信号测控系统的基本方法和若干实例。

除本书出版内容外，本书还提供配套的电子文档，包含本书第6~9章中的范例VI程序和练习中的VI设计内容的参考程序。电子文档保存于百度云盘(链接：<http://pan.baidu.com/s/1jHNRHWU>，口令：p124)。本书编程采用的LabVIEW版本较低，主要是考虑便于安装有不同版本LabVIEW软件的读者均可使用。无论LabVIEW版本高低，其基本设计方法的形式是相同的，采用LabVIEW 8.5作为编程环境，对使用LabVIEW版本在8.5及以上作为编程环境的读者，在尝试编写范例时影响不大。

本书编写过程中得到许多老师、学生的帮助，在此向他们表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，本书内容及范例编写难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。作者联系方式：[zuofeng@dhu.edu.cn](mailto:zuofeng@dhu.edu.cn)。

作者

2018年1月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 传感器与检测技术的基本概念</b> .....	1
1.1 自动检测技术概述 .....	1
1.1.1 自动检测技术的重要性 .....	1
1.1.2 传感器与自动检测系统的组成 .....	2
1.1.3 测量方法及其分类 .....	4
1.1.4 测量系统或仪表的基本技术性能和术语 .....	6
1.2 测量误差概述 .....	11
1.2.1 测量误差的客观存在 .....	11
1.2.2 误差的分类 .....	13
1.2.3 随机误差的处理 .....	15
1.2.4 测量结果的置信度 .....	19
1.2.5 系统误差以及粗大误差的处理 .....	21
1.3 数字化测控中的信号处理 .....	25
1.3.1 A/D转换器 .....	25
1.3.2 D/A转换器 .....	27
1.3.3 信号的标准化及标度变换 .....	29
1.4 检测技术的新发展概述 .....	30
思考题与习题 .....	31
<b>第 2 章 能量控制型传感器</b> .....	32
2.1 电阻应变式传感器 .....	32
2.1.1 金属电阻应变片的工作原理 .....	32
2.1.2 电阻应变片的特性 .....	34
2.1.3 应变片的测量电路 .....	36
2.1.4 电阻应变式传感器的应用 .....	40
2.2 压阻式传感器 .....	42
2.2.1 半导体的压阻效应 .....	43
2.2.2 半导体应变片的结构及应用 .....	44
2.3 电感式传感器 .....	45

2.3.1	自感式传感器	46
2.3.2	互感式传感器	50
2.3.3	电感式传感器的应用	54
2.4	电容式传感器	55
2.4.1	电容式传感器的工作原理	55
2.4.2	电容式传感器的测量电路	58
2.4.3	电容式传感器的应用	60
2.5	电涡流式传感器	62
2.5.1	电涡流式传感器的工作原理	62
2.5.2	电涡流式传感器的结构及测量电路	64
2.5.3	电涡流式传感器的应用	65
	思考题与习题	67
<b>第3章</b>	<b>能量转换型传感器</b>	<b>68</b>
3.1	霍尔传感器	68
3.1.1	霍尔传感器的工作原理	68
3.1.2	霍尔元件的基本特性	69
3.1.3	霍尔元件的误差及补偿	70
3.1.4	霍尔集成传感器	72
3.1.5	霍尔传感器的应用	74
3.2	压电式传感器	75
3.2.1	压电特性的产生	76
3.2.2	压电元件的等效电路	78
3.2.3	压电式传感器的测量电路	79
3.2.4	压电式传感器的应用	80
3.3	光电式传感器	82
3.3.1	光电效应和光电器件	82
3.3.2	光电式传感器的应用	88
	思考题与习题	90
<b>第4章</b>	<b>温度测量</b>	<b>92</b>
4.1	概述	92
4.1.1	温度测量方法	92
4.1.2	温标	92
4.1.3	温度测量仪表的分类	94
4.2	热电偶温度计	95

---

4.2.1	测量原理	95
4.2.2	热电偶材料与结构	99
4.2.3	热电偶冷端温度的处理方法	103
4.2.4	热电偶测温线路及误差分析	106
4.3	热电阻温度计	108
4.3.1	测温原理	108
4.3.2	热电阻的材料与结构	110
4.4	半导体温度传感器	116
4.4.1	半导体硅PN结温度传感器测温技术	116
4.4.2	集成温度传感器	117
	思考题与习题	119
<b>第5章</b>	<b>流量测量</b>	<b>120</b>
5.1	流量的定义和流体流动状态	120
5.1.1	流量的定义	120
5.1.2	流动状态与流量测量	121
5.1.3	流体流动中的能量转化	122
5.2	节流式流量计	123
5.2.1	测量原理	124
5.2.2	标准节流装置	126
5.3	电磁流量计	128
5.3.1	测量原理	129
5.3.2	变送器的结构及特性	129
5.3.3	变送器的信号处理	131
5.4	涡街流量计	134
5.4.1	应用卡曼漩涡测量的原理	134
5.4.2	涡街流量计的结构及组成	136
5.4.3	涡街流量计的特点	138
	思考题与习题	139
<b>第6章</b>	<b>虚拟仪器技术概述</b>	<b>140</b>
6.1	虚拟仪器技术的产生和发展	140
6.2	虚拟仪器技术中的硬件和软件	141
6.2.1	虚拟仪器系统的硬件组成	141
6.2.2	虚拟仪器的软件组成	143
6.3	LabVIEW概述	143

---

6.4	虚拟仪器系统的设计方法	144
6.5	LabVIEW设计入门	145
6.5.1	LabVIEW的启动窗口	145
6.5.2	LabVIEW程序的开发环境组成	146
6.5.3	LabVIEW开发环境中的选板操作	149
6.5.4	窗口对象的编辑	152
6.5.5	LabVIEW的帮助系统	157
6.6	LabVIEW设计范例	159
6.7	LabVIEW的程序调试技术	165
	思考题与习题	167
<b>第7章</b>	<b>LabVIEW 程序设计基础</b>	<b>169</b>
7.1	LabVIEW的数值型数据及操作	169
7.1.1	数值数据类型	169
7.1.2	数值型数据的操作控件	170
7.1.3	布尔型数据及操作	173
7.1.4	字符串数据的操作	175
7.1.5	数组操作	177
7.1.6	簇及相关操作函数	181
7.1.7	时间数据及时间函数	183
7.2	LabVIEW程序结构	185
7.2.1	循环结构	185
7.2.2	条件结构	190
7.2.3	顺序结构	192
7.2.4	公式节点	195
7.2.5	局部变量	197
7.2.6	子VI设计	198
	思考题与习题	203
<b>第8章</b>	<b>数据的图形显示与存储</b>	<b>205</b>
8.1	图形显示	205
8.1.1	图形显示方式和图形数据处理	205
8.1.2	波形的建立和操作	212
8.2	文件I/O操作	214
8.2.1	文件I/O操作函数	215
8.2.2	电子表格文件I/O操作	216

---

8.2.3 文本文件I/O操作	219
思考题与习题	223
<b>第9章 LabVIEW 在测量和控制中的应用</b>	<b>224</b>
9.1 数据采集的相关概念	224
9.1.1 数据采集系统的输入/输出信号	224
9.1.2 数据采集的相关术语	226
9.2 采用NI公司的数据采集设备设计虚拟仪器系统	226
9.2.1 NI公司的数据采集设备的设置与测试	227
9.2.2 LabVIEW中的数据采集函数	231
9.2.3 模拟输入采样程序范例	234
9.3 采用其他公司的数据采集设备设计虚拟仪器系统	239
9.3.1 MC公司的数据采集设备	239
9.3.2 MC公司提供的支持LabVIEW的数据采集函数	241
9.3.3 模拟电压输入采样程序的设计	245
9.3.4 数字信号的输出	248
9.4 带控制功能的VI程序设计	250
9.4.1 控制算法的实现方式	250
9.4.2 利用PID工具包的函数实现控制功能的范例	252
9.5 LabVIEW程序的打包和发布	257
思考题与习题	260
<b>参考文献</b>	<b>263</b>
<b>附录 热电偶/热电阻分度表(部分)</b>	<b>264</b>





# 第 1 章 传感器与检测技术的基本概念

本章介绍自动检测技术和传感器的基本知识，以及误差分析和数据处理、数字化测控中的信号处理等。

## 1.1 自动检测技术概述

### 1.1.1 自动检测技术的重要性

当今世界各学科领域对测量的定义不胜枚举，许多学科都从各自的角度赋予测量不同的含义，从工程检测的角度出发，定义测量的概念如下：测量是按照某种规律，用数据来描述观察到的现象，即对事物做出量化描述。测量是对非量化事物的量化过程，是人类认识事物本质的不可缺少的过程，是人类对事物获得定量概念以及事物内在规律的过程。

检测和测量基本是同义语，是利用各种物理、化学效应，选择合适的方法与装置，将生产、科研、生活等各方面的有关信息通过检查与测量的方法赋予定性或定量结果的过程。能够自动地完成整个检测处理过程的技术称为自动检测技术。

微电子技术、计算机技术、通信技术及网络技术的迅速发展，使电量的测量技术相应得到提高，而且使电量的测量具有测量精度高、反应速度快、能自动连续地进行测量、可以进行遥测、便于自动记录、可以与计算机方便地连接进行数据处理、可以采用微处理器做成智能仪表、能实现自动检测与转换等一系列优点。可是，在工程上所要测量的参数大多数为非电量，如机械量(位移、尺寸、力、振动、速度等)、热工量(温度、压力、流量、物位等)、分量(化学成分、浓度等)和状态量(颜色、透明度、磨损量等)，因而促使人们用电测的方法研究非电量，即研究用电测的方法测量非电量的仪器仪表，研究如何能正确和快速地测得非电量的技术。

随着科学技术的飞速发展和工程技术的迫切需求，检测技术已越来越广泛地应用于工业、农业、国防、航空、航天、医疗卫生和生物工程等领域，在国民经济中起着极其重要的作用。在机械制造业中，需要测量位移、尺寸、力、振动、速度、加速度等机械量参数，利用非电量电测仪器，监视刀具的磨损和工件表面质量的变化，防止机床过载，控制加工过程的稳定性。此外，还可用

非电量电测单元部件作为自动控制系统中测量反馈量的敏感元件(如光栅尺、容栅尺等),控制机床的行程、启动、停止和换向。随着电力系统朝着高电压、大容量的方向发展,保证电力设备的安全运行越来越重要,停电事故给国民经济和人们生活带来的影响和损失越来越大,如果不对生产过程的温度、压力、流量、物位等参数进行自动检测,生产过程就不能进行有效控制,甚至会影响生产安全,导致事故发生。在现代物流行业,如在控制搬运机器人作业过程中,需要实时地检测工件安放的位置参数,以便准确地控制执行机构工作,可靠地安放货物。在科学研究和产品开发中,将非电量电测技术应用于逆向设计和逆向加工,可缩短产品设计和开发的周期。在农业生产过程中,对土壤、种子和作物的质量分析,都是通过现代化的检测仪器系统完成的。例如,植物生长监控系统既可以监测植物的实时生长过程,又可以分析植物的长期生理特性,从而预算植物的生长趋势,并以报警形式反映植物是否受到干旱、高温等环境的影响。

综上所述,自动检测技术与人们的生产生活密切相关,它是自动化领域的重要组成部分。近几十年来,自动控制理论和计算机技术迅速发展,为了改变传感器技术相对落后的局面,许多国家已投入大量的人力、物力,发展各类新型传感器,自动检测技术在国民经济中的地位也日益提高。

### 1.1.2 传感器与自动检测系统的组成

#### 1. 传感器的组成

在测量过程中一般都会用到传感器(transducer),或选用相应的变送器。国家标准是这样定义传感器的:能感受规定的被测物理量,并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。传感器通常由敏感元件、转换元件和基本转换电路组成。

一般传感器是指借助于敏感元件接受某一物理量形式的被测量,并按一定规律将它转换成电量形式的器件或装置。传感器的输入  $x$  和输出  $y$  之间应有确切的函数关系,即

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

图 1-1 中,敏感元件(sensor)对被测参数敏感,它的输出设为  $z$ ,  $z$  有可能是一种不易处理的物理量形式,不一定能被后继的信号处理环节直接利用,此时就必须在敏感元件后配一相应的转换元件,该转换元件的输出一定是易于处理的、能被后继的环节所利用的信号。

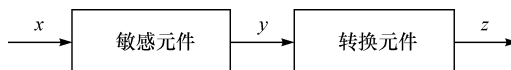


图 1-1 传感器的构成

易于处理的、能被后继环节所利用的信号形式有很多种类,其中电量信号(如电压、电流、电阻等)是最常用的信号形式。电量信号具有精度高、动态响应快、易于运算放大、易于远距离传输、易于和计算机接口等许多其他信号所没有的优点。所以人们往往有目的地选用或研发能输出电信号的转换元件来和敏感元件配合,从而使传感器输出信号  $y$  成为电信号。

当以测量为目的,以一定精度把被测量转换成与之有确定关系的、易于处理的电量信号输出时,常常称其为“非电量的电测量技术”。

如果进一步对此输出信号进行处理,转换成标准统一信号(如直流  $4\sim 20\text{mA}$  电流,或  $1\sim 5\text{V}$  电压,或其他国家标准规定的信号等)时,此时的传感器一般称为变送器。

随着当今信息处理技术取得的进展以及微处理器和计算机技术的高速发展,传感器的开发也日新月异。微处理器现在已经在测量和控制系统中得到了广泛的应用。随着这些测控系统能力的增强,作为信息系统的前端,传感器的作用越来越重要。传感器已成为自动化控制系统和机器人技术中的关键部件,其重要性正变得越来越明显。

## 2. 自动检测系统的组成

在自动检测系统中,各组成部分常以信息流的过程划分,一般可分为:信息的提取、转换处理和输出几部分。它先要获取被检测的信息,把它转换成电量,然后把已转换成电量的信息进行放大、整形等转换处理,再通过输出单元(如指示仪和记录仪)把信息显示出来,或者通过输出单元把已处理的信息送到控制系统其他单元使用,成为控制系统的一部分等,其组成框图如图 1-2 所示。

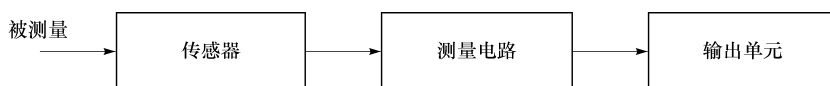


图 1-2 自动检测系统的组成

在检测系统中,传感器负责把被测非电量转换成与之有确定对应关系,且便于应用的某些物理量(通常为电量)的检测装置。传感器获得信息的正确与否,关系到整个检测系统的精度,如果传感器的误差很大,即使后续检测电路等环节精度很高,也难以提高检测系统的精度。

测量电路的作用是把传感器的输出信号转换成电压或电流信号,使之能在输出单元的指示仪上指示或记录仪上记录;或者能够作为控制系统的检测及反馈信号。测量电路的种类通常由传感器类型而定,如电阻式传感器需用一个电桥电路把电阻值转换成电流值或电压值输出,因为电桥输出信号一般比较微弱,常常要将电桥输出信号加以放大,所以在测量电路中一般还带有放大器。

输出单元可以是指示仪、记录仪、计数器、累加器、报警器、数据处理电路等。若输出单元是指示仪或记录仪,则该测试系统为自动检测系统;若输出单元是计数器或累加器,则该测试系统为自动计量系统;若输出单元是报警器,则该测试系统为自动保护系统或自动诊断系统;若输出单元是数据处理电路,则该测试系统为部分数据分析系统,或部分自动管理系统,或部分自动控制系统。

由图 1-2 可知,传感器是自动检测系统中的一部分,工程上往往称传感器、变送器为“一次仪表”,称输出单元的装置及仪表为“二次仪表”。各种检测仪表的用途、名称、型号、性能虽然各不相同,但差别仅在于仪表的前端,即传感器和测量线路有所不同,输出单元所用的仪器部分及其设计方法基本是相同的。

### 3. 传感器分类

传感器是一门知识密集型技术。传感器的原理各种各样,它与许多学科有关,种类繁多,分类方法也很多,目前广泛采用的分类方法有以下几种。

(1) 按传感器的工作机理,可分为物理型、化学型、生物型等。

(2) 按传感器的构成原理,可分为结构型和物性型两大类。

结构型传感器是根据物理学中有关场的定律构成的,包括力场的运动定律、电磁场的电磁定律等。这类传感器的特点是传感器的性能与其结构材料没有多大关系。

物性型传感器是利用物质定律构成的,如欧姆定律等。物性型传感器的性能随材料的不同而异,如光电管、半导体传感器等。

(3) 按传感器的能量转换情况,可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。

能量控制型传感器在信息变换过程中,其能量需外电源供给。例如,电阻、电感、电容等电路参量传感器都属于这一类传感器。

能量转换型传感器主要由能量变换元件构成,不需要外电源。例如,基于压电效应、热电效应、光电效应、霍尔效应等原理构成的传感器属于此类传感器。

(4) 按传感器的物理原理,可分为电参量式传感器(包括电阻式、电感式、电容式等基本形式)、磁电式传感器(包括磁电感应式、霍尔式、磁栅式等)、压电式传感器、光电式传感器、气电式传感器、波式传感器(包括超声波式、微波式等)、射线式传感器、半导体式传感器、其他原理的传感器(如振弦式和振筒式等)。

(5) 按传感器测量的对象分类,可分为位移传感器、压力传感器、振动传感器、温度传感器等。

#### 1.1.3 测量方法及其分类

一般所说的测量,其含义是用实验方法去确定一个参数的量值。量值包括“数

值”和“单位”两个含义，缺一不可。测量就是通过实验，把一个被测参数的量值(被测量)和作为比较单位的另一个量值(标准)进行比较，确定出被测量的大小和单位。所以测量是以确定量值为目的的一组操作。通过测量可以掌握被测对象的真实状态，测量是认识客观量值的唯一手段。

在测量中，把作为测量对象的特定量，也就是需要确定量值的量，称为被测量。由测量所得到的赋予被测量的值称为测量结果。如果测量结果是一次测量的量值，也称为测得值。

### 1. 按测量值获得的方法分类

按数据获得的形式，可将测量分为直接测量、测量和组合测量3种方法。

#### 1) 直接测量

把被测量与作为测量标准的量直接进行比较，得到被测量的大小和单位，并可以表示为

$$y = x \quad (1-2)$$

式中， $y$ 为被测量的量值； $x$ 为标准的器具所给出的量值。

直接测量的特点是简便，例如，用直尺或卷尺量出一根铜管的长度。

#### 2) 间接测量

被测量不直接测量出来，是通过与它有一定函数关系的其他量的测量来确定。设被测量为 $y$ ，影响测量结果 $y$ 的影响量为 $x_i$ ，则可写出测量模型为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-3)$$

例如，要确定功率 $P$ 值，则可按公式 $P=I^2R$ 求得。式中， $I$ 是电流， $R$ 是电阻，该电阻与温度 $t$ 有确切的函数关系 $R=R_0[1+\alpha(t-t_0)]$ 。显然在系数 $\alpha$ 是常数的情况下，只要通过对电流 $I$ 、电阻 $R_0$ 以及温度 $t$ 的测量，就能确定出功率 $P$ ，即

$$P = f(I, R_0, t)$$

#### 3) 组合测量

有时不少参数是无法用直接测量或间接测量来获取的，如金属材料的热膨胀系数 $\alpha$ 、 $\beta$ 。为此可以利用直接测量或间接测量这两种方法测量其他一些参数，然后用求解方程的方法求出 $\alpha$ 、 $\beta$ 。

金属材料的热膨胀公式为

$$L_x = L_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$$

当 $t=0^\circ\text{C}$ 时，测得 $L_0$ ；当 $t=t_1$ 时，测得 $L_{t1}$ ；同理，当 $t=t_2$ 时，测得 $L_{t2}$ 。可得下列联立方程组：

$$\begin{cases} L_{t1} = L_0(1 + \alpha t_1 + \beta t_1^2) \\ L_{t2} = L_0(1 + \alpha t_2 + \beta t_2^2) \end{cases}$$

建立联立方程组后再求解联立方程可得到系数  $\alpha$ 、 $\beta$  的量值，这就是组合测量方法。

## 2. 按测量工具来分类

按测量工具来分可分为 3 种。

### 1) 偏差法

在测量过程中，用仪表指针的位移(即偏差)来表示被测量的大小。这种测量方法是通过被测量对检测元件的作用，使仪表指针产生位移，再利用位移与仪表刻度标尺比较获得测量结果。仪表的刻度标尺是通过标准器具标定确定的。这种测量方法简单快速，但其测量精度受到标尺的精度影响，一般不是很高。偏差法是最基本的方法，指针式电压表、电流表、弹簧秤、游标卡尺等都是利用偏差法来获得测量值的。

### 2) 零位法

零位法也称补偿式或平衡式测量方法。在测量过程中，被测量与已知标准量进行比较。并调节标准量使之与被测量相等，通过达到平衡时指零仪表的指针回到零来确定被测量与已知的标准量相等。这种测量方法的精度一般比微差法要高许多，其误差主要受标准量误差的影响。一个典型的例子就是用天平称物，砝码就是标准量。它的缺点是每次测量要花很长时间。

### 3) 微差法

微差法综合了偏差法和零位法的优点，将被测量的标准量与已知的标准量进行比较，得到基准值，再用偏差式测量方法测出指针偏离零值的差值。因为此差值很小，即使差值测量的精度不高，但整体测量结果仍可以达到较高的精度。仍用天平称物为例，先增减砝码，在指针回零过程中，一旦指针已落在零值左右的刻度之内，就不再调节砝码(所花时间不会很多)。然后在获知砝码基准值的基础上再根据指针的偏差进行修正(加或减)，就能获得准确的数值。

## 1.1.4 测量系统或仪表的基本技术性能和术语

测量系统或仪表的性能指标包括静态性能、动态性能、可靠性和经济性等，本书主要讨论和介绍静态性能中常用的技术性能和术语，如准确度、稳定性和输入输出特性等。我国已根据国际上有关文件制定出国家计量技术规范《通用计量术语及定义》(JJF 1001—2011)，在自动化仪表方面对于一些常用术语也做了相应的规范，

在应用时要确切理解其含义，只有评价的指标和含义一致时才能进行相互比较。

### 1. 测量范围和量程

测量范围是指“测量仪器的误差处在规定极限内的一组被测量的值”，即最小被测量(下限)到最大被测量(上限)。也就是说，在这个测量范围内(从最小到最大)，测量仪表能保证达到规定的精密度和准确性。

量程是指测量范围的上限和下限值的代数差。例如，一台温度测量仪的测量范围为 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 时，量程为 $100^{\circ}\text{C}$ ；测量范围为 $20\sim 100^{\circ}\text{C}$ 时，量程为 $80^{\circ}\text{C}$ ；测量范围为 $-20\sim 100^{\circ}\text{C}$ 时，量程为 $120^{\circ}\text{C}$ 。

### 2. 测量仪表的误差

#### 1) 测量仪表的示值误差

测量仪表的示值就是测量仪表所给出的量值，测量仪表的示值误差定义为“测量仪表的示值与对应输入量的真值之差”。由于真值不能确定，实际上用的是约定真值或相对真值，即用更高精度级别的仪表的示值作为参考标准来代替真值。在不易与其他称呼混淆时，测量仪表的“示值误差”就直接简称为测量仪表的误差。

#### 2) 测量仪表的最大允许误差

测量代表的最大允许误差定义为“对给定的测量仪表，规范、规程等所允许的误差极限值”。有时也称为测量仪表的允许误差限，或简称允许误差。

#### 3) 测量仪表的固有误差

测量仪表的固有误差定义为“在参考条件下确定的测量仪器的误差”。固有误差通常也可称为基本误差，它是指测量仪器在参考条件(又叫标准条件)下确定的测量仪表本身所具有的误差。其主要来源于测量仪表自身的缺陷，如仪表的结构、原理、使用条件、安装位置、测量方法等造成的误差。固有误差的大小直接反映了该测量仪表的准确度，它与后面讲述的系统误差有关联。

#### 4) 附加误差

附加误差是指测量仪表在非标准条件时所增加的误差，非标准条件下工作的测量仪表的误差，必然会比标准条件下的固有误差要大一些，这个增加部分就是附加误差。它主要是由于影响量超出参考条件规定的范围，即由于外界因素的变化所造成的增加的误差。因此，测量仪表实际使用时若与检定、校准时的环境条件不同，必然会增加误差，如测量中经常出现的温度附加误差、压力附加误差等。测量仪表在静态条件下检定、校准，而在实际动态条件下使用，则也会带来附加误差。显而易见，固有误差这一术语是相对于附加误差而言的。

### 3. 稳定性

稳定性是指测量仪表在规定工作条件保持恒定时，其性能在规定时间内保持不变的能力，即“测量仪表保持其计量特性随时间恒定的能力”。稳定性可以用几种方式定量表示，例如，用测量特性变化某个规定的量所经过的时间；或用测量特性经规定的时间所发生的变化。

### 4. 重复性与再现性

在相同测量条件下，重复测量同一个被测量，测量仪表提供相近示值的能力称为测量仪表的重复性。这些条件应包括相同的测量程序、相同的观测者、在相同条件下使用相同的测量设备、相同的地点、在短时间内的重复。仪表的重复性是用全测量范围内各输入值所测得的最大重复性误差来确定，以量程的百分数表示。

再现性是指相同的测量条件下，在规定的时间内(一般为较长时间)，对同一输入值从两个相反方向上重复测量的输出值之间的相互一致程度。仪表的再现性由全测量范围内同一输入值重复测量的相应上升和下降的输出值之间的最大差值确定，并以量程的百分数表示。

### 5. 测量仪表的输入、输出特性

#### 1) 灵敏度

灵敏度(sensitivity)表示测量仪表对被测量变化的反应能力，定义是“测量仪表响应的变化除以对应的激励变化”：

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = K \quad (1-4)$$

式中， $\Delta y$  为测量仪表响应的变化； $\Delta x$  为对应激励的变化。也可理解为  $\Delta y$  为输出量的变化； $\Delta x$  为输入量的变化。对于线性测量仪表， $S$  为常数  $K$ ，对于非线性测量仪表， $S$  将随被测量的大小而变化，如图 1-3 所示。

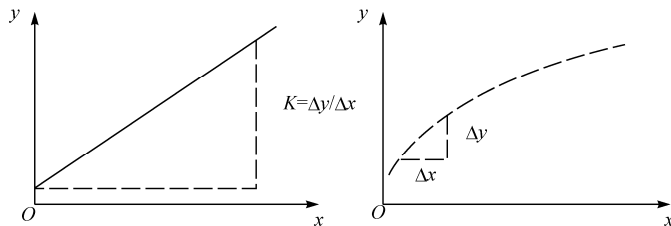


图 1-3 仪表灵敏度



## 2) 分辨力

显示装置的分辨力(resolution)的定义是“显示装置能有效辨别的最小的视值差”。就是能引起输出量发生变化时输入量的最小变化量 $\Delta x_{\min}$ 。它说明了测量系统响应与分辨输入量微小变化的能力。分辨力也称为灵敏阈或灵敏限。

一个测量系统的分辨力越高,表示它所能检测出的输入量的最小变化量越小。对于数字测量系统,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;对于模拟测量系统,是用其输出指示标尺最小刻度分度值的一半所代表的输入量来表示其分辨力。

## 3) 死区

死区(deadzone)也称仪表的不灵敏区。测量仪表在测量范围的起点处,输入量的变化不致引起该仪表输出量有任何可察觉的变化的有限区间称为死区。产生死区的原因主要是仪表内部元件间的摩擦和间隙。在仪表设计中,死区的存在,也有其积极的一面,它可以防止激励的极微小变化引起响应的变化。

## 4) 回差

回差(hysteresis error of instrument)也称仪表的变差。定义是“由于施加激励的方向不同(上行程或下行程,又称正行程或反行程),测量仪表对同一激励值给出不同响应值的特征”。即在仪表全部测量范围内,被测量值上行和下行所得到的两条特性曲线之间的最大偏差,见图 1-4。这种现象是由仪表元件吸收能量造成的,如机械部件的摩擦、磁性元件的磁滞损耗、弹性元件的弹性滞后等。回差包括滞环和死区的因素。

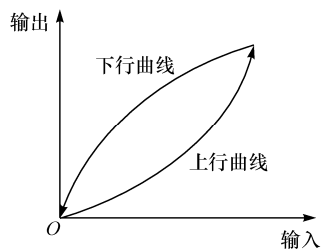


图 1-4 回差

## 6. 仪表测量的精度等级

任何测量过程都存在测量误差。进行测量时,不仅需要知道仪表的示值,还要知道测量结果的精确程度,这就涉及仪表的精度问题。有关测量仪表或测量系统的精度问题涉及许多概念,以下逐一进行说明。

### 1) 精密度

在等精度测量条件下多次测量所获得的结果不会完全相同,它们总是围绕在真值周围,呈一定的弥散性。测量值弥散程度小,即紧紧地围绕在真值周围,表明精密度高。精密度量表征测量过程中随机误差的影响程度。

### 2) 准确度

多次测量所获得的测量值有时会朝同一方向偏离真值。偏离程度大,测量仪表的准确度就低;反之,准确度就高。准确度表征了测量过程中系统误差的影响程度。

### 3) 精确度(也常简称为精度)

精确度综合了精密度和准确度的概念,即完整表征了上述两种误差。测量精确度高,指随机误差与系统误差都比较小,这时测量数据比较集中在真值附近。测量精确度的定义是“测量结果与被测量真值之间的一致程度”。显然该定义是一个定性的概念。仪表精确度如何定量来描述呢?

设  $J$  为最大引用误差,  $\Delta$  为绝对误差,即仪表示值和实际真值之差,显然绝对误差  $\Delta$  包含了随机误差、系统误差以及其他误差等对测量示值的共同影响。 $\Delta_{\max}$  为在整个测量范围内仪表最大的绝对误差,有

$$J = \frac{\Delta_{\max}}{\text{仪表的量程}} \times 100\% \quad (1-5)$$

显然  $J$  是一个定量概念,一旦最大引用误差  $J$  计算出来,这台仪表在整个测量范围内其相对误差一定小于等于  $J$ ,这台仪表的实际精确度也就有了定量的描述。

### 4) 仪表的精度等级

仪表精度的国家标准分为若干等级,定量反映测量仪表的精确度。我国的自动化仪表精度等级有下列几种:0.005、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0等。

一般工业仪表精度等级为0.5~4.0级。仪表的精度等级通常都用一定的形式标志在仪表的刻度标尺上,如一台仪表精度等级为1.0级,就在数字1.0外加一个圆圈或三角形,如标志  $\textcircled{1.0}$   $\triangle 1.0$  表明这台仪表的相对误差小于或等于1%。

### 5) 仪表的精度等级和精确度的关系

仪表的精度等级表示仪表精确度的上限,由精度等级和仪表量程可确定测量中的最大绝对误差。

例如,某压力表的量程为10MPa,在整个测量范围内仪表最大的绝对误差  $\Delta_{\max}$  的大小为 $\pm 0.03\text{MPa}$ ,则仪表的最大引用误差  $J = (\pm 0.03/10) \times 100\% = \pm 0.3\%$ 。因为国家规定的精度等级中没有0.3级仪表,所以该仪表的精度等级应定为0.5级。换言之,这台仪表若送有关计量部门校验的话,必定标定为国家精度等级0.5级。

又例如,一台量程为10MPa、国家精度等级为0.5级的压力表,在实际测量中,这台仪表的最大引用误差  $J$  必定小于等于0.5%,即不会大于0.5%。已知一台仪表的精度等级,该仪表的最大允许误差即允许误差限也就限定住了,最大的绝对误差也限定住了,本例  $\Delta_{\max}$  必定小于等于 $\pm 0.05\text{MPa}$ 。

### 6) 线性度

线性度(linearity)又叫非线性误差,用于反映仪表实际输入输出特性曲线与理