



高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

# 自动检测技术

■ 主编 何金田



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

IP274

109

2006

# 自动检测技术

主 编 何金田

副主编 张全法 范福玲

西安电子科技大学出版社

2006

## 内 容 简 介

本书共 8 章。第 1 章介绍检测技术的基础知识；第 2 章介绍检测信号的传输与采集；第 3 章介绍检测信号的干扰及其抑制技术；第 4 章介绍检测信号的线性化与温度补偿；第 5 章介绍特种测量技术；第 6 章介绍常用的和新的无损检测方法；第 7 章介绍软测量技术；第 8 章介绍智能测试系统的设计与虚拟仪器。

本书内容丰富，概念阐述准确，讲解深入浅出，便于阅读。本书既可作为测控技术及仪器、工业自动化等专业或相近专业的检测技术课程的教材，也可供有关专业的本科生和研究生选用，还可作为有关工程技术人员的参考书。

★ 本书配有电子教案，有需要的老师可与出版社联系，免费提供。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术/何金田主编.

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

—西安：西安电子科技大学出版社，2006.12

ISBN 7-5606-1751-4

I. 自… II. 何… III. 自动检测—高等学校—教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 139050 号

策 划 云立实 臧延新

责任编辑 雷鸿俊 云立实

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](mailto:xdupfxb@pub.xaonline.com)

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 21.5

字 数 508 千字

印 数 1~4000 册

定 价 26.00 元

ISBN 7-5606-1751-4/TN·0352

**XDUP 2043001-1**

\*\*\* 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

“检测技术”是我国高等院校许多专业的必修课程，目前国内多数“检测技术”的教材中传感器原理与应用是其中很大一部分内容，但是，又有不少专业传感器原理与应用是单独开课，因此内容重复较多。鉴此，结合我们多年的教学和科研实践经验，借鉴了国内外相关的教材、资料和文献，本着既注重检测技术的基础理论知识，同时充分考虑检测技术的发展状况的原则，我们编写了本书。

全书共 8 章。第 1 章介绍检测技术的基础知识；第 2 章介绍检测信号的传输与采集；第 3 章介绍检测信号的干扰及其抑制技术；第 4 章介绍检测信号的线性化与温度补偿；第 5 章介绍特种测量技术；第 6 章介绍常用的和新的无损检测方法；第 7 章介绍软测量技术；第 8 章介绍智能测试系统的设计与虚拟仪器。

作为高等学校的教材，我们在编写时充分考虑了本学科的基础理论知识和发展状况、本学科和其他相关学科知识的衔接以及理论和实践的结合。对非常实用的无损检测技术和近几年发展较快的软测量技术及智能测试系统的设计与虚拟仪器也作了详细的介绍，这是本书的特色。

本书由郑州大学何金田(第 1 章)、郑州大学张全法(第 4、5 章)、中原工学院范福玲(第 2、8 章)、郑州大学赵红梅(第 3 章)、中原工学院贺焕林(第 7 章)、郑州大学田增国和杨海彬(第 6 章)编写，全书由何金田教授负责统稿。

本书由郑州大学赵书俊教授主审，他提出了很多宝贵意见；本书在编写过程中参考了有关教材和文献，在此向赵老师及教材、文献的作者一并表示感谢。

检测技术涉及的学科众多，由于作者学识水平有限，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者  
2006 年 8 月

# 目 录

<b>第 1 章 检测技术基础知识</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.1.1 检测技术的含义、作用和地位 .....	1
1.1.2 自动检测系统的组成及结构形式 .....	1
1.1.3 非电学量电测法的特点 .....	3
1.1.4 自动检测技术的发展方向 .....	4
1.2 测量方法 .....	5
1.2.1 测量的基本概念 .....	5
1.2.2 测量的分类 .....	5
1.3 自动检测系统的基本特性 .....	7
1.3.1 静态特性 .....	7
1.3.2 动态特性 .....	10
1.4 误差 .....	13
1.4.1 误差的概念 .....	13
1.4.2 误差的处理方法 .....	14
1.4.3 减小和消除误差的方法 .....	17
1.4.4 粗大误差 .....	18
1.5 量程自动切换及标度变换 .....	19
1.5.1 量程自动切换 .....	19
1.5.2 标度变换 .....	21
思考与练习题 .....	24
<b>第 2 章 检测信号的传输与采集</b> .....	25
2.1 检测信号的传输 .....	25
2.1.1 模拟信号的传输方法 .....	25
2.1.2 U/I 变换器集成器件 .....	26
2.1.3 U/I 变换器的应用 .....	27
2.1.4 数据通信基础 .....	28
2.1.5 现场总线 .....	31
2.2 检测信号的数据采集 .....	34
2.2.1 数据采集系统的基本组成单元 .....	34
2.2.2 数据采集系统的结构形式 .....	35
2.2.3 数据采集系统的主要构件 .....	36
2.2.4 数据采集系统的电气隔离 .....	45
2.2.5 AD $\mu$ C8XX 集成数据采集系统 .....	48
思考与练习题 .....	56

<b>第3章 检测信号的干扰及其抑制技术</b> .....	57
3.1 电子测量系统的干扰与抑制 .....	57
3.1.1 干扰与防护的概念 .....	57
3.1.2 各种常见干扰及其抑制方法 .....	57
3.2 噪声源与噪声耦合方式 .....	58
3.2.1 噪声与信噪比 .....	58
3.2.2 噪声源 .....	59
3.2.3 噪声的叠加 .....	60
3.2.4 噪声耦合方式 .....	61
3.3 形成干扰的三要素及抑制干扰的措施 .....	62
3.3.1 形成干扰的三要素 .....	62
3.3.2 消除干扰源 .....	62
3.3.3 割断干扰耦合途径 .....	63
3.3.4 提高抗干扰能力 .....	63
3.4 差模干扰与共模干扰 .....	63
3.4.1 差模干扰 .....	63
3.4.2 共模干扰 .....	64
3.4.3 共模干扰抑制比 .....	65
3.5 屏蔽、接地、浮置与其他干扰抑制技术 .....	66
3.5.1 屏蔽技术 .....	66
3.5.2 接地技术 .....	69
3.5.3 浮置技术 .....	72
3.5.4 平衡电路 .....	73
3.5.5 滤波器 .....	73
3.5.6 光电耦合器 .....	75
3.5.7 脉冲电路的噪声抑制技术 .....	75
3.6 电源变压器与工频干扰 .....	78
3.6.1 电源变压器的屏蔽措施 .....	78
3.6.2 电源滤波器的构造及抗干扰特性 .....	80
3.6.3 铁氧体磁珠滤波器及浪涌吸收器 .....	81
3.7 软件抗干扰技术 .....	82
3.7.1 数字滤波技术 .....	83
3.7.2 指令冗余技术 .....	85
3.7.3 软件陷阱技术 .....	85
思考与练习题 .....	85
<b>第4章 检测信号的线性化及温度补偿</b> .....	87
4.1 非线性特性的线性化 .....	87
4.1.1 非线性特性的处理方法 .....	87
4.1.2 非线性特性的硬件补偿 .....	90
4.1.3 非线性特性的软件补偿 .....	107
4.2 温度补偿技术 .....	112
4.2.1 温度补偿方法 .....	112

4.2.2	利用温度补偿环节进行自动补偿的原理 .....	114
4.2.3	温度补偿的实现 .....	117
	思考与练习题 .....	122
<b>第5章</b>	<b>特种测量技术 .....</b>	<b>124</b>
5.1	数据采样与保持 .....	124
5.1.1	采样过程与采样定理 .....	124
5.1.2	采样—保持器的工作原理 .....	126
5.1.3	采样—保持器的工作过程分析 .....	127
5.1.4	采样—保持器的构成原理 .....	129
5.2	峰值测量 .....	132
5.2.1	峰值测量的意义 .....	132
5.2.2	峰值保持器的工作原理 .....	133
5.2.3	峰值保持器举例 .....	134
5.3	有效值测量 .....	136
5.3.1	有效值测量的意义 .....	136
5.3.2	有效值检测电路的工作原理 .....	136
5.4	微弱信号检测 .....	138
5.4.1	元器件固有噪声及其规律 .....	139
5.4.2	低噪声放大器 .....	142
5.4.3	频域微弱信号检测 .....	146
5.4.4	时域微弱信号检测 .....	150
5.5	利用噪声进行信号检测 .....	154
5.5.1	概述 .....	154
5.5.2	相关测速 .....	154
5.5.3	噪声温度计 .....	158
5.6	反馈测量技术 .....	160
5.6.1	反馈测量系统 .....	160
5.6.2	逆传感器 .....	161
5.6.3	力平衡式测量系统 .....	163
5.6.4	温度平衡式测量系统 .....	164
5.6.5	热流量平衡式测量系统 .....	165
	思考与练习题 .....	166
<b>第6章</b>	<b>常用无损检测方法 .....</b>	<b>169</b>
6.1	超声检测 .....	169
6.1.1	超声检测的基础知识 .....	169
6.1.2	超声场及介质的声参量简介 .....	172
6.1.3	超声波在介质中的传播特性 .....	175
6.1.4	由圆形压电晶片产生的声场简介 .....	179
6.1.5	超声波检测方法 .....	182
6.1.6	超声检测技术的应用 .....	188
6.2	射线检测 .....	190

6.2.1	射线检测的物理基础 .....	190
6.2.2	X射线检测的基本原理和方法 .....	195
6.2.3	X射线照相检测技术 .....	196
6.2.4	常见缺陷及其影像特征 .....	201
6.2.5	$\gamma$ 射线检测及中子射线检测简介 .....	205
6.2.6	射线的防护 .....	205
6.3	涡流检测 .....	207
6.3.1	涡流检测的基本原理 .....	207
6.3.2	涡流检测的阻抗分析法 .....	208
6.3.3	涡流检测的应用 .....	216
6.4	声发射检测 .....	219
6.4.1	声发射检测的原理及特点 .....	219
6.4.2	声发射检测定位方法 .....	225
6.4.3	声发射检测仪器 .....	228
6.4.4	声发射检测的应用 .....	230
6.5	红外检测 .....	231
6.5.1	红外无损检测技术的特点 .....	231
6.5.2	红外无损检测基础 .....	232
6.5.3	红外无损检测仪器 .....	234
6.5.4	红外无损检测技术的应用 .....	235
6.5.5	红外无损检测技术的发展 .....	237
6.6	激光全息检测 .....	237
6.6.1	激光全息检测的原理与特点 .....	237
6.6.2	激光全息检测方法 .....	240
6.6.3	激光全息检测的应用 .....	241
6.7	其他无损检测方法 .....	243
6.7.1	磁粉检测法 .....	243
6.7.2	微波检测法 .....	246
6.7.3	液体渗透检测法 .....	249
6.7.4	声振检测法 .....	252
	思考与练习题 .....	254

## 第7章 软测量技术 .....

7.1	概述 .....	256
7.1.1	软测量技术的概念和分类 .....	256
7.1.2	影响软测量仪表性能的因素 .....	259
7.2	软测量方法 .....	261
7.2.1	基于回归分析的软测量方法 .....	261
7.2.2	基于状态估计的软测量方法 .....	265
7.2.3	基于模式识别的软测量方法 .....	269
7.2.4	基于人工神经网络的软测量方法 .....	274
7.2.5	基于模糊数学的软测量方法 .....	284
7.2.6	基于过程层析成像的软测量方法 .....	288



7.2.7 基于相关分析的软测量方法 .....	294
7.2.8 基于现代非线性信息处理技术的软测量方法 .....	296
思考与练习题 .....	300
<b>第8章 智能测试系统设计及虚拟仪器 .....</b>	<b>301</b>
8.1 被测信号的种类 .....	301
8.1.1 数字信号 .....	301
8.1.2 模拟信号 .....	302
8.2 智能测试系统的基本结构及功能 .....	302
8.2.1 系统硬件组成 .....	302
8.2.2 系统软件组成 .....	303
8.3 智能测试系统的设计原则 .....	305
8.3.1 组建测试系统的基本原则 .....	305
8.3.2 组建测试系统的基本方法 .....	305
8.4 虚拟仪器技术 .....	308
8.4.1 虚拟仪器的概念 .....	308
8.4.2 虚拟仪器的组成 .....	309
8.4.3 虚拟仪器的软件开发平台 LabVIEW .....	311
8.4.4 构建一个简单的虚拟仪器 .....	318
8.4.5 虚拟仪器设计举例 .....	325
思考与练习题 .....	328
<b>参考文献 .....</b>	<b>329</b>

# 第1章 检测技术基础知识

为了完成科学实验和工业生产中提出的检测任务,并且尽可能地获取到被测量的真实值,必须对测量方法、测量误差、测量数据及处理、检测系统的结构等方面的理论进行研究。只有了解和掌握了这些检测技术理论,才能实施有效的测量。

## 1.1 概 述

### 1.1.1 检测技术的含义、作用和地位

检测是采用现代科技方法与装置对工业现场的有关信息进行检查与测量,并将结果加以全面利用的一项应用技术,它是工业自动化的核心技术之一。

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、检测系统结构以及检测信号处理的一门综合性技术。因此,检测技术研究的范围比较广泛,主要有以下几个方面:

(1) 研究信号检测中的方法、工具、设备,以便能方便、迅速、准确、可靠地完成检测任务。

(2) 研究检测中的信息处理与变换的方法。从被检测对象中获取的信号,经检测元件、测量电路等装置后,常包含各种干扰信号,这不仅会引入测量误差,还会对测量的可靠性、准确性带来不利影响。为了克服干扰的影响,需要使用较复杂的数据处理和变换方法。

(3) 研究检测问题中的信息传输、存储、显示的方法与技术,研究检测仪器仪表、检测系统的抗干扰技术和故障检测、诊断的技术。

(4) 研究使用计算机辅助设计技术对检测方法、检测用仪器仪表及检测系统进行详细的理论分析,对参数及结构进行最优化设计。

(5) 研究检测系统和计算机及其他系统的通信。

一方面,现代化的检测技术在很大程度上依赖于经济生产和科学技术的发展水平;另一方面,经济与科学技术的发展也反过来进一步促进检测技术的提高与进步。自动检测技术已成为一些发达国家最重要的热门技术之一,它可以给人们带来巨大的经济效益并促进科学技术的飞跃发展,因此在国民经济中占有极其重要的地位和作用。

### 1.1.2 自动检测系统的组成及结构形式

#### 1. 自动检测系统的组成

检测系统的主要作用在于测量各种参数以用于显示或控制。为实施测量,一般检测系统包括传感器、测量电路、显示或输出等几大部分,如图1-1所示。

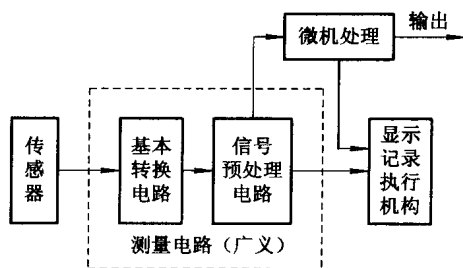


图 1-1 检测系统的构成

### 2. 自动检测系统的结构形式

检测各种被测参数时，为了实现检测的目的，检测系统的组成可以使用各种各样的结构形式。但归纳起来，广泛采用的结构形式主要有以下几种。

#### 1) 重复(串联)结构

为了提高检测系统的灵敏度和抗干扰能力，常采用多个基本元件的串联(重复)结构形式。例如，用热电堆检测温度时，基本检测元件是热电偶，热电堆由多个单个热电偶串联而成，其输出是各单个热电偶输出热电势之和。对同一被测温度，采用热电堆比采用单个热电偶，其输出电势提高了若干倍。由于输出信号增强了，从而可以使测量电路简化并提高抗干扰能力。

#### 2) 反馈结构

这里所说的“反馈”主要是指负反馈在放大器和检测系统中的应用。将反馈技术引入到检测技术中，不仅可以提高测量精度，改善检测系统的性能，而且能使某些用传统检测系统无法解决的问题得以解决。

典型的反馈型检测系统如图 1-2 所示。可以看出，反馈型检测系统与一般检测系统的区别在于，它具有一个由“逆传感器”构成的反馈回路。由闭环系统的性质可知，当主回路的放大倍数足够大时，反馈型检测系统的特性基本上是由逆传感器的特性所决定的。

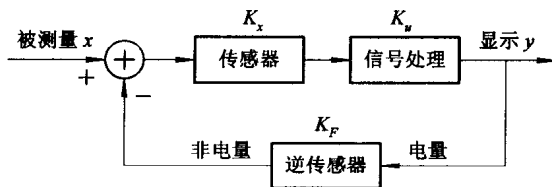


图 1-2 反馈型检测系统

“逆传感器”可视为将电量转换为被测非电量的传感器。反馈型检测系统中所采用的比较和平衡方式有：力或力矩平衡、电流平衡、电压平衡、热流平衡、温度平衡等。

反馈型检测系统的静态特性可用下式表示：

$$y = \frac{K_x K_u}{1 + K_x K_u K_F} x \tag{1-1}$$

式中： $K_x$  为传感器的静态传递系数； $K_u$  为信号处理部分的静态变换系数； $K_F$  为逆传感器的静态传递系数。当  $K_x K_u$  足够大，使  $K_x K_u K_F \gg 1$  时，则  $y \approx (1/K_F)x$ 。

### 3) 差动结构

被测量为差动结构的检测系统如图 1-3 所示。传感器输入为  $u_1$ ，干扰量(或称影响量)为  $u_2$ ，输出为  $y$ ，变换器 A 输出为  $y_1$ ，变换器 B 输出为  $y_2$ ，总的输出为  $y = y_1 - y_2$ 。这就是所谓的差动结构。

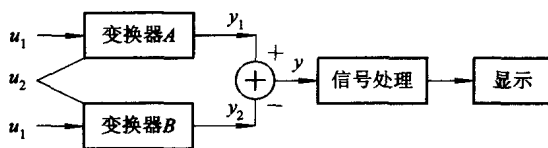


图 1-3 差动结构检测系统

采用差动结构的目的是消除或减弱干扰量的影响，同时对有用信号即被测信号的灵敏度要有相应的提高。为此变换器 A 和 B 采用对称结构，均为线性变换器，则有静态关系式：

$$y_1 = f(u_1, u_2) = K_A u_1 + K'_A u_2 \quad (1-2)$$

$$y_2 = f'(u_1, u_2) = -K_B u_1 + K'_B u_2 \quad (1-3)$$

$$y_1 - y_2 = f(u_1, u_2) - f'(u_1, u_2) = (K_A + K_B)u_1 + (K'_A - K'_B)u_2 \quad (1-4)$$

因为变换器 A 和 B 为对称结构，故

$$K_A \approx K_B, K'_A \approx K'_B$$

则

$$y \approx 2K_A u_1 \quad (1-5)$$

由式(1-5)可见，灵敏度提高了一倍，同时克服了干扰量对测量值的影响，因此差动结构是在工程检测中广泛采用的结构形式之一。例如，位移检测系统的差动电感式、差动变压器式、差动电容式检测系统都采用的是差动结构。

### 4) 扫描结构

欲对某物体一定面积上的参数进行检测或对具有一定宽度的运动物体的某参数进行检测时，要使所采用的传感器能把被测物体所需检测的部分全部覆盖住，这是有困难的，而且会增加设备成本。为解决此问题，通常采用扫描结构检测，使传感器在被检测物体上按直角坐标系作有规律(即有两个自由度)的运动，把被测物体上所有应该检测的位置都检测到。图像检测系统几乎都采用的是扫描结构形式。

## 1.1.3 非电学量电测法的特点

检测系统的被测量是表征被测对象的各种物理及化学等现象或过程的量，由于通过传感器后其通常转换成电学量，因此这种检测方法也称为非电学量的电测法。非电学量电测法具有如下特点：

(1) 可在极宽的被测量范围内十分方便地调整整机灵敏度，即具有很宽的幅值域。利用电子技术能把信号放大数万倍，因此可测量极微弱的电信号。

(2) 电测仪器具有极小的惯性，即具有相当宽广的频域，因而既能测量缓慢变化的信号，又可测量随时间作快速变化的信号。

(3) 精度高且便于传输，特别是电信号可以用无线电发射、接收，也可直接传输给计算机，对信号进行加工等。



(4) 电测仪器能够用单元电气部件来装配组合成装置系统或自动系统,这就大大地方便了科研及工业应用。

### 1.1.4 自动检测技术的发展方向

传感器技术、电子技术、通信技术、计算机技术等引入检测领域给检测技术和仪器仪表带来了巨大变化,使智能仪器、虚拟仪器技术、网络化检测技术相继问世,逐步形成了功能比较齐全的现代测试系统。检测技术的总体趋势是向着自动化、智能化、集成化、网络化方向发展。不断提高其智能化与自动化程度,不断提高其测量精度、测量范围和测量可靠性,伴随着这些发展,检测技术将不断扩大其应用领域。

#### 1. 以微处理机为中心的智能化检测系统

以微处理机为中心的智能化检测系统借助计算机丰富的软、硬件资源对被测信号进行实时处理和输出,能够测量多种参量,既有电气量,又有非电气量;具有多个输入通道,可进行多点测量;能够快速进行动态在线实时测量,能够实时对快速信号分析处理,排除噪声干扰,消除偶然误差,修正系统误差;具有自校正和自诊断及与计算机通信的功能,从而实现测量结果的高准确度以及具有对被测信号的高分辨能力。

#### 2. 虚拟仪器

虚拟仪器(VI)是继模拟仪器、数字仪器、智能仪器之后出现的概念性仪器,它由通用计算机、模块化功能硬件和专用控制软件组成。利用计算机丰富的软件资源,可实现部分功能硬件的软件化,以增强检测系统的灵活性;利用计算机强大的运算能力、图形环境和在线帮助功能,建立具有良好人机交互性能的虚拟仪器面板,以适应各种环境下不同信号的检测。虚拟仪器中应用软件是整个仪器的核心,硬件仅仅是信号输出、输入部件和软件运行的物理环境。用户只要通过调整或修改部分软件,便可方便地改变或增减仪器的测试功能,使用户充分发挥自己的才能并提供想象的空间,也使仪器系统的组建和功能的开发更为灵活而方便。

#### 3. 网络化检测系统

总线和虚拟仪器的应用,使得组建集中和分布式测控系统比较方便,可满足局部或分系统的测控要求,但仍然满足不了远程和范围较大的检测与监控的需要。近十年来,随着网络技术的高速发展,网络化检测技术与具有网络通信功能的现代网络检测系统应运而生。例如,基于现场总线技术的网络化检测系统,由于其组态灵活、综合功能强、运行可靠性高,已逐步取代相对封闭的集中和分散相结合的集散检测系统。又如,面向 Internet 的网络化检测系统,利用 Internet 丰富的硬件和软件资源,实现远程数据采集与控制、高档智能仪器的远程实时调用及远程监测系统的故障诊断等功能;同时,由于网络互联技术的发展,使得 Internet 与企业网和测控系统互联十分方便,因而借此组建的网络化检测系统,不但可以节省大量的现场布线,扩大检测系统的地域范围,而且可以实现高速、实时的远程在线监测。这种网络化检测系统是当今传感技术、网络通信技术和计算机技术高度发展的必然产物。



## 1.2 测量方法

### 1.2.1 测量的基本概念

测量是检测技术的主要组成部分,是借助于专门的技术和仪器装置,采用一定的方法获取某一客观事物定量数据资料的认识过程。根据国际通用计量学基本名词的定义,测量是以确定被测量值为目的的一组操作,也就是说,测量是将被测量与标准量(单位)进行比较从而确定被测量对标准量的倍数,并用数字表示这个结果。测量结果也可以表示为一条曲线,或显示成某种图形,既包含数值(大小和符号),又包含单位。传统测量就在于追求被测量与标准量的比值的精确数值,是一种数值测量,其测量结果的表示是一种数值符号描述。这种数值符号描述方式有许多优点,如精确、严密、可以给出许多定量的算术表达式等。

随着测量领域的不断扩大与深化,由于被测对象的多维性或被分析问题的复杂性,或由于信息的直接获取、存储方面的困难等原因的存在,只进行传统的单纯的数值测量,其测量结果单纯以数值符号来描述,在很多情况下被发现是不完备的。如人体血压测量,血压计量的高压值为 18 kPa,进一步给出更精确的数值(17.9 kPa)的数值符号描述是没有意义的。实际上更需要的是给出血压是“高”、“偏高”、“正常”还是“偏低”、“低”的语言符号描述。这可视为定性的“符号”,它属于语义测量领域。虽然它的精度低、不严密、具有主观随意性等,但是与数值测量结果的数值符号表示(简称数值表示)相比较有很多优点:它非常紧凑,信息存储量少,无需建立精确的数学模型,允许数值测量有较大的非线性和较低的精度,可以进行推理、学习,并可以将人类经验、专家知识与智能事先完成,因而容易被人们理解,不需要专家亲临现场,等等。

如上面所述,测量结果的语言符号表示具有数值符号表示所不具有的优越性,并且它是实际的需求,这就导致学者们设法采用人类的自然语言定性描述被测对象,进而对传统测量定义与概念进行延拓,如提出“测量是以确定被测量的定量描述符号或定性描述给出符号的全部操作”。

### 1.2.2 测量的分类

#### 1. 按测量手续分类

按测量手续分类,测量可以分为直接测量、间接测量和联立测量。

##### 1) 直接测量

在使用仪表进行测量时,对仪表读数不需要经过任何运算,就能直接表示测量所需要的结果,称为直接测量。例如,用磁电式电流表测量电路的支路电流,用弹簧管式压力表测量锅炉压力等就为直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而迅速,缺点是测量精度通常较低。这种测量方法是工程上大量采用的方法。

##### 2) 间接测量

在使用仪表进行测量时,首先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量,将测量值代入函数关系式,经过计算得到所需要的结果,这种测量称为间接测量。这种测量



手续较多，花费时间较长，但是有时可以得到较高的测量精度。间接测量多用于科学实验中的实验室测量，工程测量中也有应用。

### 3) 联立测量

在应用仪表进行测量时，若被测物理量必须经过求解联立方程组才能得到最后结果，则称这样的测量为联立测量(也称为组合测量)。在进行联立测量时，一般需要改变测试条件，才能获得一组联立方程所需要的数据。

联立测量的操作手续很复杂，花费时间很长，是一种特殊的精密测量方法。它多适用于科学实验或特殊场合。

在实际测量工作中，一定要从测量任务的具体情况出发，经过具体分析后，再确定选用哪种测量方法。

## 2. 按测量方式分类

按测量方式分类，测量可以分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

### 1) 偏差式测量

在测量过程中，用仪表指针的位移(即偏差)决定被测量的测量方法，称为偏差式测量法。应用这种方法进行测量时标准量具不装在仪表内，而是事先用标准量具对仪表刻度进行校准。在测量时，输入被测量，按照仪表指针在标尺上的示值，决定被测量的数值。它以直接方式实现被测量与标准量的比较，测量过程比较简单、迅速，但是测量结果的精度较低。这种测量方法广泛用于工程测量中。

在偏差式测量仪表中，一般要利用被测物理量产生某种物理作用(通常是力或力矩)，在此物理作用下，使仪表的某个元件(通常是弹性元件)产生相似但方向相反的作用。此相反的作用又与某变量密切相关，这个变量通常是指针的线位移或角位移(即指针偏差)，便于人们用感官直接观测。在测量过程中，此相反作用一直要增加到与被测物理量的某物理作用相平衡。这时指针的位移在标尺上对应的刻度值，就表示了被测量的测量值。

### 2) 零位式测量

在测量过程中，用指零仪表的零位指示检测系统的平衡状态，在测量系统达到平衡时，用已知的基准量决定未知被测量的测量方法，称为零位式测量法(又称为补偿式或平衡式测量法)。应用这种方法进行测量时，标准量具装在仪表内，在测量过程中，标准量直接与被测量相比较。测量时，要调整标准量，直到被测量与标准量相等，即使指零仪表回零。例如，用图 1-4 所示电位差计电路测量电压。在进行测量之前，应先调  $R_1$ ，将电路工作电流  $I$  校准；在测量时，要调整  $R$  的活动触点，使检流计  $G$  回零，这时  $I_x$  为零，即  $U_k = U_x$ 。这样，标准电压  $U_k$  的值就表示被测未知电压值  $U_x$ 。

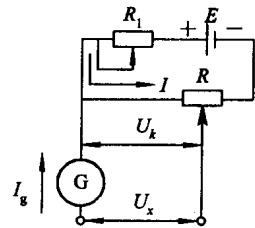


图 1-4 电位差计的简化等效电路

零位式测量法的优点是可以获得比较高的测量精度。但是，测量过程比较复杂，要进行平衡操作，花费时间长。采用自动平衡操作以后，可以加快测量过程，但它的反应速度由于受工作原理所限，也不会很高。因此，这种测量方法不适用测量变化迅速的信号，只适用于测量变化较缓慢的信号。这种测量方法在工程实践和实验室中应用也很普遍。

### 3) 微差式测量

微差式测量法是综合了偏差式测量法与零位式测量法的优点而提出的测量方法。这种方法是将被测的未知量与已知的标准量进行比较并取得差值,用偏差法测得此差值。应用这种方法进行测量时,标准量具装在仪表内,并且在测量过程中,标准量直接与被测量进行比较。由于二者的值很接近,因此测量过程中不需要调整标准量,而只需测量二者的差值即可。

设  $N$  为标准量,  $x$  为被测量,  $\Delta$  为二者之差。则  $x=N+\Delta$ , 即被测量是标准量与偏差值之和。由于  $N$  是标准量,其误差很小,并且  $\Delta \ll N$ , 因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量  $\Delta$ 。即使测量  $\Delta$  的精度较低,但因  $\Delta \ll x$ , 故总的测量精度仍很高。

微差式测量法的优点是反应快,而且测量精度高,它特别适用于在线控制参数的检测。

## 1.3 自动检测系统的基本特性

检测系统的输入—输出特性是检测系统最基本的特性。把检测系统的特性分为两种:静态特性——输入不随时间变化的输入/输出关系;动态特性——输入随时间变化的输入/输出关系。要提高检测系统的精度,改善检测系统的性能,必须先了解检测系统的静态、动态特性,才能设法改进检测系统的性能。

### 1.3.1 静态特性

检测系统的静态特性通常以指标的形式给出。这些指标主要有:线性度、灵敏度、迟滞、重复性、阈值和分辨力、稳定性、漂移、静态误差等。

#### 1. 线性度

在静态标准条件下,利用一定精度等级的校准设备,测得的特性曲线称为系统的静态校准曲线。系统的校准曲线与选定的拟合直线的偏离程度称为系统的线性度,又称为非线性误差。如图 1-5 所示,用  $\Delta y_{\max}$  表示校准曲线与拟合直线的最大偏差,用  $y_{F.S.}$  表示系统的满量程输出值(F. S. 是 full scale 的缩写),则线性度  $e_L$  可表示为

$$e_L = \pm \frac{\Delta y_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-6)$$

显然,线性度的值与所选的拟合直线有关。选择拟合直线的原则是获得尽量小的非线性误差,同时还要方便使用和计算。

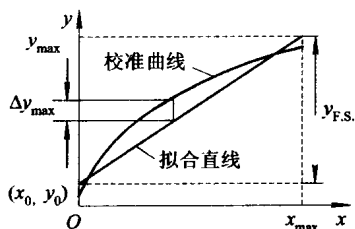


图 1-5 传感器的线性度





### 2. 灵敏度

灵敏度是指系统在稳态工作情况下输出改变量与引起此变化的输入改变量之比。常用  $S_n$  表示灵敏度，其表达式为

$$S_n = \frac{dy}{dx} \tag{1-7}$$

显然，非线性系统的灵敏度各处不一样，如图 1-6(a)所示。只有线性系统的灵敏度才为常数，如图 1-6(b)所示，这时

$$S_n = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{1-8}$$

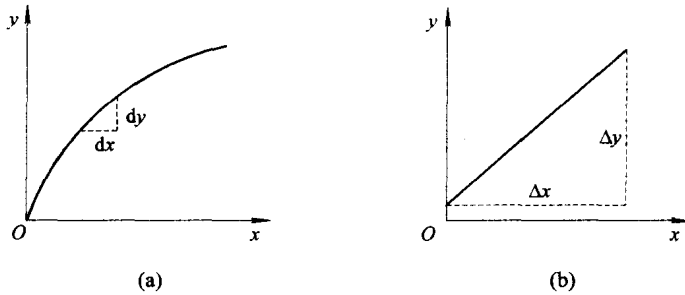


图 1-6 灵敏度的定义  
(a) 非线性特性；(b) 线性特性

### 3. 迟滞(迟环)

在相同工作条件下作全量程范围校准时，正行程(输入量由小到大)和反行程(输入量由大到小)所得输出输入特性曲线往往不重合。也就是说，对应于同一大小的输入信号，系统正、反行程的输出信号大小不相等，此即迟滞现象。迟滞(或称迟环)正是用来描述系统在正、反行程期间特性曲线不重合程度的，如图 1-7 所示。迟滞的大小常用正、反行程最大输出差值  $\Delta y_{max}$  对满量程输出  $y_{F.S.}$  的百分比来表示，其表达式为

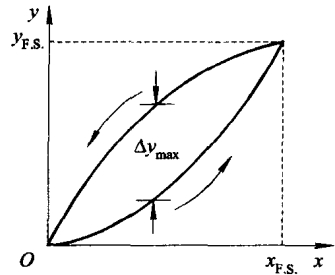


图 1-7 迟滞

$$e_h = \pm \frac{\Delta y_{max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \tag{1-9}$$

产生迟滞的主要原因是系统的机械部分存在各种缺陷，如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材料的内摩擦、积尘等。

### 4. 重复性

重复性是指在相同工作条件下，输入量按同一方向作全量程多次测试时，所得系统特性曲线不一致性的程度，如图 1-8 所示。重复性的计算方法有多种。比较简单的方法是先求出正行程的最大偏差  $\Delta y_{max1}$  和反行程的最大偏差  $\Delta y_{max2}$ ，再取这两个偏差中的较大者为  $\Delta y_{max}$ ，然后用  $\Delta y_{max}$  与满量程输出  $y_{F.S.}$  的百分比表示，即

$$e_r = \pm \frac{\Delta y_{max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \tag{1-10}$$