

高等学校教材

# 自动检测技术及仪表

(修订本)

哈尔滨工业大学 陈守仁 主编

GAO DENG XUE  
XIANG JIAO CAI

机械工业出版社



高等学校教材

# 自动检测技术及仪表

(修订本)

哈尔滨工业大学 陈守仁 主编



机械工业出版社

本书是在1981年出版的《自动检测技术》下册基础上补充了部分上册内容修订而成的。在内容上作了较多的更新与补充。全书共分二篇：第一篇为自动检测技术及仪表的理论基础；第二篇为工业参数自动检测技术及仪表。本书内容除以热工量（温度、压力、流量、物位）测量及仪表为主外，还包括有机械量、成分量及物性量等参数的测量及相应的仪表。主要讲述了测量技术及仪表设计等内容，并兼顾系统应用。

本书为高等院校工业自动化仪表与检测技术及仪表等专业的教材，也可供从事自动化及检测技术方面的工程技术人员参考。

## 自动检测技术及仪表

（修订本）

哈尔滨工业大学 陈守仁 主编

\*

责任编辑：邱锦来 版式设计：吴静霞

责任印制：王国光

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 28·字数 690 千字

1981年2月北京第一版

1989年11月北京第二版·1989年11月北京第六次印刷

印数 7,401—73,100·定价：5.50 元

\*

ISBN 7-111-01797-8/TP·102（课）

## 前 言

本书是在1981年出版的高等学校试用教材《自动检测技术》的基础上,根据1983年12月原全国高等工业学校工业自动化仪表专业教材编审委员会制定的大纲修订而成的。根据教学计划要求,原书上、中、下三册,其中中册内容重新编写独立成册为《数字信号处理》,上册内容中误差理论基础部分及以机械量为主的检测变换原理部分内容分别编写出《误差理论与实验设计》及《传感器原理及设计基础》独立教材。本书是以下册内容为主补充了部分上册有关热工量参数变换原理而修订成的。修订中的主要指导思想是加强仪表整体概念,增加设计内容,兼顾系统应用的需要,在此基础上作了适当删减和更新,扩大了专业面,以适应专业发展的需要。在修订中注意了采用法定计量单位及新的标准。

本书共分二篇,九章,第一篇:第一、二章介绍自动检测仪表共有的理论基础,对仪表的功能、设计方法作了较深入的分析。第二篇:第三、四、五章分别介绍温度、压力、流量等参数的测量,是本书的重点,在修订中,作了较多的修改。考虑到即将开始推行1990年国际温标,所以在第三章中对ITS-90温标作了概要介绍,以适应发展的需要;在热电偶、热电阻以及光学测温方面都贯彻了新的国家标准及IEC标准,增加了测温新技术的内容。第四章除补充了一些新型测压技术外,还增加了真空测量与仪表等内容。第五章除保留了常用仪表的设计分析外,补充了示踪法及相关技术在流量测量中的应用。第六章为物位测量及仪表,重点介绍了常用的电容式物位计、射线式物位计等内容。第七章为机械量测量及仪表,根据当前生产过程的需要,充实了称重仪表内容,增加动态轨道衡一节。第八、九两章介绍成分及物性参数测量及仪表,是这次修订后的新增内容。根据生产流程需要,除介绍了热导、磁性、红外线等主要类型分析仪器原理与设计外,还重点介绍了当前发展迅速的色谱仪。物性测量方面着重介绍了密度、含量、酸度、粘度、湿度等参量的测量方法及仪表。

全书除着重分析参数测量原理及技术外,加强了典型仪器的设计方法的介绍。另外对各种仪表的定标、检定方法都作了较系统的介绍,以满足不断发展的计量技术的需要。

初版《自动检测技术》上册主编是吴训一同志,下册主编是陈守仁同志。本书主编是陈守仁同志。参加修订的有李铁桥(第四章及§8-1、§8-2、§8-3、§8-4),孙毓星(§7-6、§8-5、§8-6),陈宏善(第九章及§5-3),王承暉(第六章及§7-1、§7-2、§7-3、§7-4、§7-5)和徐文辉(§3-8)等同志。

本书由上海机械学院秦永烈同志主审。参加审稿的还有清华大学、天津大学、华中理工大学、浙江大学、重庆大学、上海工业大学、上海化工学院、上海大学、上海第二工业大学及上海工业自动化仪表研究所等单位的有关同志。他们对修订本提出了很多宝贵意见,对此深表感谢。

限于作者的水平和能力,错误和不妥之处在所难免,期望读者批评指正。

作者

1989.1 于哈尔滨

# 目 录

<b>第一篇 自动检测技术及仪表的理论基础</b> .....	1
<b>第一章 概述</b> .....	1
§ 1-1 关于测量的概念 .....	1
§ 1-2 测量方法 .....	2
一、直接测量法 .....	3
二、间接测量法 .....	4
§ 1-3 测量仪表的功能 .....	5
一、测量仪表和测量系统 .....	5
二、测量仪表的功能 .....	6
§ 1-4 测量仪表的性能指标 .....	7
一、测量仪表的静态特性 .....	7
二、测量仪表的动态特性及动态误差 .....	11
<b>第二章 自动检测仪表的设计概要</b> .....	16
§ 2-1 测量仪表的构成 .....	16
一、直接变换型仪表 .....	16
二、平衡变换型仪表 .....	17
§ 2-2 自动检测仪表的设计原则 .....	26
一、设计前的准备 .....	26
二、原理方块图的确定 .....	26
§ 2-3 自动检测仪表及检测系统的设计方法 .....	29
一、两类检测仪表及检测系统 .....	29
二、两类设计方法——实验归纳法和实验分析法 .....	29
<b>第二篇 工业参数自动检测技术及仪表</b> .....	32
<b>第三章 温度测量及仪表</b> .....	32
§ 3-1 温度的概念及测量方法的分类 .....	32
一、温度的概念 .....	32
二、温度的测量方法及分类 .....	32
§ 3-2 温标及温度标准的传递 .....	34
一、国际温标简介 .....	34
二、温度标准的传递 .....	37
§ 3-3 膨胀式温度计和压力式温度计 .....	37
一、膨胀式温度计 .....	37
二、压力式温度计 .....	39
§ 3-4 热电偶温度计 .....	41
一、概述 .....	40
二、热电偶的基本原理 .....	41
三、热电偶基本定律 .....	42
四、热电极材料及常用热电偶 .....	44
五、热电偶的结构 .....	53
六、热电偶的参比端处理 .....	58
七、补偿导线的应用 .....	60
八、热电偶的检定 .....	62
九、热电偶的测温误差 .....	65
§ 3-5 电阻温度计 .....	69
一、概述 .....	69
二、热电阻材料及常用热电阻 .....	69
三、热电阻的结构 .....	73
四、半导体热敏电阻 .....	75
五、电阻温度计的测温误差 .....	76
§ 3-6 接触法测温误差分析 .....	79
一、沿测温元件导热引起的误差 .....	79
二、测温元件热辐射引起的误差 .....	80
三、其它误差 .....	80
§ 3-7 光辐射测温法及仪表 .....	81
一、理论基础 .....	81
二、全辐射式温度计 .....	84
三、部分辐射式温度计 .....	86
四、亮度温度计 .....	87
五、颜色温度计 .....	94
六、真实温度的测量 .....	96
七、几种测量方案特点的比较 .....	97
§ 3-8 光导纤维测温技术 .....	99
一、部分辐射光导纤维耦合测温仪 .....	99
二、比色光导纤维耦合测温仪 .....	104
§ 3-9 温度检测系统设计举例之一——高速气流的温度测量 .....	107
一、方案选择 .....	108
二、结构设计 .....	108
三、误差计算 .....	110
§ 3-10 温度检测系统设计举例之二——运动物体表面温度的测量 .....	111
一、对任务的分析 .....	112
二、在线仪表的选择设计 .....	113

§ 3-11 热流测量.....	117	气流快变压力的测量.....	168
一、热阻式热流计.....	118	一、方案分析.....	168
二、热水热流计.....	121	二、测量系统的组成.....	169
§ 3-12 温度测量仪表的标定装置.....	123	三、测量系统主要参数的确定.....	170
一、接触式测温仪表的标定装置.....	123	四、应变式压力传感器的设计要点.....	171
二、非接触式测温仪表的标定装置.....	126	五、测量系统的标定.....	176
第四章 压力测量及仪表.....	133	第五章 流量测量及仪表.....	179
§ 4-1 概述.....	133	§ 5-1 概述.....	179
一、压力的概念.....	133	一、关于流量的概念.....	179
二、压力的测量单位.....	133	二、流量测量仪表的分类.....	180
三、压力测量仪表的分类.....	134	§ 5-2 总量测量及仪表.....	187
四、压力标准的传递.....	136	一、椭圆齿轮流量计.....	187
§ 4-2 液柱式压力计.....	137	二、腰轮流量计(罗茨流量计).....	187
§ 4-3 活塞式压力计.....	139	三、容积式流量计的误差.....	188
一、活塞式压力计的作用原理.....	140	§ 5-3 差压式流量计.....	190
二、活塞式压力计的基本参数.....	141	一、理论基础及流量方程.....	190
三、活塞式压力计的修正.....	143	二、标准节流装置.....	193
§ 4-4 机械弹性式压力计.....	143	三、标准节流装置的适用范围及安	
一、弹簧管式压力计.....	144	装要求.....	203
二、其它机械弹性式压力计.....	145	四、标准节流装置的压力损失 $\delta_p$ .....	203
§ 4-5 电测弹性变形式压力计.....	145	五、标准节流装置有关系数的确定.....	206
一、电位器式远传压力计.....	146	六、压差的测量.....	215
二、电感式压力计.....	146	七、差压式流量计的安装要求.....	223
三、霍尔式压力计.....	146	八、用标准节流装置测量流量的误	
四、电容式压力计.....	147	差计算.....	224
五、应变式压力计.....	147	九、标准节流装置在制造、安装、使用中	
§ 4-6 谐振式压力计.....	148	不符合要求时的处理及附加误差.....	228
一、振弦式压力计.....	148	十、标准节流装置的设计计算.....	234
二、振筒式压力计.....	152	§ 5-4 流体阻力式流量计.....	240
§ 4-7 压电式压力计.....	154	一、转子流量计.....	240
一、压电效应与压电材料.....	154	二、靶式流量计.....	245
二、压电式压力传感器的结构.....	156	§ 5-5 测速式流量计.....	246
三、压电式压力计的测量电路.....	157	一、电磁流量计.....	246
§ 4-8 真空测量及仪表.....	159	二、涡轮流量计.....	251
一、概述.....	159	§ 5-6 流体振动式流量计.....	254
二、压缩式真空计.....	159	一、卡门涡街式旋涡流量计.....	254
三、热导式真空计.....	161	二、旋进式旋涡流量计.....	256
四、电离式真空计.....	162	§ 5-7 质量流量的测量.....	257
§ 4-9 压力测量仪表动态特性的求取.....	163	一、直接式质量流量计——涡轮转矩式	
一、频率特性的实验测定.....	163	质量流量计.....	257
二、动态校准装置.....	165	二、推导式质量流量计.....	258
§ 4-10 压力检测系统设计举例——高温		三、温度、压力补偿式质量流量计.....	259
		§ 5-8 用示踪法测量流量.....	260

一、概述 .....	260	五、闪光测速仪 .....	314
二、传输时间法 .....	261	六、光电式转速表 .....	315
三、稀释法 .....	266	§ 7-3 振动测量及仪表 .....	315
§ 5-9 相关流量计 .....	266	一、理论基础 .....	316
§ 5-10 流量测量装置设计举例——大粘度		二、加速度计 .....	318
液体流量测量装置的设计 .....	268	三、速度计 .....	320
一、任务要求 .....	268	§ 7-4 厚度测量及仪表 .....	321
二、对任务的分析 .....	268	一、接触式测厚仪 .....	321
三、靶式流量变送器的设计 .....	269	二、涡流式测厚仪 .....	322
四、仪表的分度及流量系数的测定 .....	273	三、微波测厚仪 .....	323
五、流量测量误差 .....	276	四、射线式测厚仪 .....	324
§ 5-11 流量标准的传递及其装置 .....	276	§ 7-5 电子皮带秤 .....	326
一、液体流量计的检定 .....	277	一、称量原理 .....	326
二、气体流量计的检定 .....	281	二、传感器及秤架结构 .....	327
第六章 物位测量及仪表 .....	285	三、电子皮带秤的信号处理 .....	330
§ 6-1 概述 .....	285	四、仪表的标定 .....	334
§ 6-2 压力式物位仪表 .....	288	§ 7-6 动态轨道衡 .....	335
一、压力式物位计 .....	288	一、概述 .....	335
二、差压式液位计 .....	289	二、动态轨道衡称重原理 .....	336
§ 6-3 浮力式液位仪表 .....	290	三、动态轨道衡设计概要 .....	338
一、浮子式(恒浮力式)液位计 .....	290	第八章 成分分析仪器 .....	343
二、浮筒式(变浮力式)液位计 .....	292	§ 8-1 概述 .....	343
§ 6-4 电气式物位仪表 .....	293	一、成分分析仪器及其特点 .....	343
一、电阻式物位仪表 .....	293	二、成分分析仪器的作用 .....	343
二、电容式物位仪表 .....	294	三、成分分析仪器的分类 .....	344
三、电感式物位仪表 .....	300	四、成分分析仪器的组成 .....	345
§ 6-5 超声波物位仪表 .....	301	五、成分分析仪器的主要性能指标 .....	346
一、基本原理及方案 .....	301	六、成分分析仪器的的发展趋势 .....	347
二、声速校正 .....	303	§ 8-2 热导式气体分析仪 .....	348
三、液位测量的近限与远限 .....	304	一、基本原理 .....	348
四、测时电路 .....	305	二、检测器(热导池) .....	350
§ 6-6 放射性物位仪表 .....	306	三、测量线路 .....	355
一、核辐射的基本特性 .....	306	四、热导式CO <sub>2</sub> 分析仪 .....	356
二、放射性液位计 .....	308	§ 8-3 磁性氧量分析仪 .....	358
三、使用放射性物位计时的防护 .....	309	一、磁性氧量分析仪的物理基础 .....	358
第七章 机械量测量及仪表 .....	312	二、热磁对流式氧量分析仪 .....	360
§ 7-1 概述 .....	312	三、磁力机械式氧量分析仪 .....	364
§ 7-2 转速测量 .....	313	§ 8-4 氧化锆氧量计 .....	365
一、离心式转速表 .....	313	§ 8-5 红外线气体分析器 .....	368
二、磁性转速表 .....	313	一、概述 .....	368
三、测速发电机 .....	314	二、红外线气体分析器的型式与结构 .....	370
四、感应脉冲式转速表 .....	314	三、红外线气体分析器的主要部件 .....	371

§ 8-6 气相色谱仪	376	三、粘度的测量方法	426
一、概述	376	§ 9-5 湿度测量及仪表	426
二、气相色谱法的分离原理	377	一、干湿球湿度计	427
三、定性分析和定量分析	381	二、电阻湿度计	427
四、工业气相色谱仪的基本组成	385	三、电容湿度计	429
五、检测器	388	四、石英振荡吸收式湿度计	429
六、温度控制、程序控制和数据处理	392	五、热吸收式湿度计	430
七、微处理器在色谱分析中的应用	395	参考书目	430
第九章 物性参数测量及仪表	401	附录	431
§ 9-1 密度测量及仪表	401	一、铂铑 <sub>10</sub> -铂热电偶分度表	431
一、密度和相对密度	401	二、镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶分度表	434
二、密度的测量	401	三、工业用铂热电阻分度表 ( $R_0 = 100.00 \Omega$ )	437
§ 9-2 物质含量的测量及仪表	408	四、工业铜热电阻分度表 (Cu50)	439
一、含量的表示方法	408	五、工业铜热电阻分度表 (Cu100)	439
二、含量的测量	409	六、角接取压孔板 $a_0 = f(a_0\beta^2, R_{eD}, \beta)$ 关系表	440
§ 9-3 pH值测量仪	413	七、喷嘴 $a_0 = f(a_0\beta^2, R_{eD}, \beta)$ 关系表	440
一、与pH值有关的基本概念	413	八、法兰取压孔板 $a = f(a\beta^2, R_{eD}, \beta, D)$ 关系表	441
二、测量pH值使用的电极	414		
§ 9-4 粘度测量及仪表	419		
一、粘度的基本概念	419		
二、流体粘度与温度、压力的关系	419		



# 第一篇 自动检测技术及仪表的理论基础

## 第一章 概 述

### § 1-1 关于测量的概念

根据国际通用计量学基本名词的推荐“测量是以确定量值为目的的一组操作”。这里的量值均指物理量而言。对于每一个物理量仅仅是一些物理对象共有的定性性质，例如温度、质量、长度等等。每一物理量代表了一定的物理对象的某一方面性质，而更具体的说，每个量又有它的定量性质，如温度高低、质量大小、长度长短等等。

为了确定某一物理量的大小，就要进行比较，因此，也有人把测量定义为“实验比较过程”，即应用专用的技术工具，通过实验和(或)计算找出物理量的值，找出一个物理量比另一个物理量大或小多少倍。实际上为了比较方便，常把相同物理量与同一个标准量相比较，例如，用 $Q$ 表示某一物理量，而选定标准量为 $[Q]$ ，经过比较即

$$\frac{Q}{[Q]} = m$$

或写成

$$Q = m [Q] \quad (1-1)$$

式(1-1)称为基本测量方程式，式中 $m$ 即表示被测物理量 $Q$ 的数值，也可以 $\{Q\}$ 表示， $[Q]$ 称为物理量单位。可见，测得的物理量值是一个名数，它由表示物理量的数值 $\{Q\}$ 和物理量的单位 $[Q]$ 组成。

同一物理量，由于所选择的单位不同，得到测量结果的数值也不同。

如选两个不同单位 $[Q]$ 、 $[Q]'$ ，对某同一物理量进行比较，显然物理量 $Q$ 本身的大小不应随所选单位变化，即应有：

$$Q = \{Q\} \cdot [Q] = \{Q\}' \cdot [Q]'$$

由此可得

$$\frac{\{Q\}}{\{Q\}'} = \frac{[Q]'}{[Q]}$$

即通过比较所得的物理量数值反比于所采用的测量单位。这里告诉我们在给出测量值大小时，一定要同时给出所用的测量单位。

前面已谈到测量工作实际上是一个比较过程，亦即定义中所指出的“操作”。更完善地说，这个过程包括两个组成部分，即实验和计算两部分。

随着科学技术的发展，测量的领域不断扩大，参数范围也在不断地延伸；另外，在很多情况下需要测试的信息又往往与其它一些背景物理量掺杂在一起，在测量中要把我们需

要的信息从杂乱的背景中选择出来，因此往往通过简单的实验比较很难完成测量任务。为此，要应用比较复杂的测量器具，它应具有更多的功能。常把前面提到的简单的比较操作过程称为狭义的测量，而能完成对被测对象进行检出、变换、分析、处理、判断、比较、存储、控制、显示等功能的综合过程称为广义的测量。

## § 1-2 测量方法

测量方法是完成测量任务所采用的手段。一般是根据给定的原理，规定出在测量中所涉及的运算和实际操作。

在测量过程中，由于测量对象、测量环境、测量参数不同，采用着各式各样的测量仪表和测量方法。在大多数情况下，如果能正确选用一台测量仪表，按标准规定使用，可以得到满意的测量结果，但是在实际测量中，也会经常出现没有一个现成的测量仪表，甚至没有一种现有的测量方法可以完成所要求的测量任务，这就要求从事测量工作的技术人员能提出新的测量方法，研制新的测量仪表，这往往要花费很大的精力和投资，即使这样也不是目前碰到的所有问题，在现有的科技水平上都能解决。因此，研究测量方法，设计新的测量仪表或测量系统，是从事测量技术工作人员的一项重要任务。

下面介绍有关测量的几个基本概念。

1. 简单测量 当选用适当的测量仪表即可直接完成测量任务，即可测得足够精度的被测物理量（输入量）的大小时，常把这种测量称为简单测量。有时为了得到测量结果还要进行一些计算，这时前面指的简单测量仅仅是全部测量工作的实验部分。

2. 直接测量 任何测量都包含有不同的简单测量。如果在测量过程中，只包括一项简单测量和只根据一些已知数据对测量结果运算就可以得到被测物理量的大小，这种测量称为直接测量。这里指的已知数据常常可以包括被测物理量的一些特性和所采用仪器的计量特性。

3. 间接测量 如果对被测物理量的测量包括两个或两个以上的简单测量，或包括根据若干直接测量结果来计算出最后测量结果，这种测量称作间接测量，也叫非直接测量。

直接测量和非直接测量的区分，可以通过下面简单例子来加以说明。例如，测量管道内气体质量流量，可以采用直接与管道内质量流量成比例的测量方法直接测定，从而得到测量结果。这里流量标定是直接以质量数来进行的。另外，在很多场合，是用通过体积流量来推导质量流量的，即

$$q_m = \rho q_v \quad (1-2)$$

式中  $q_m$ ——质量流量，单位为  $\text{kg/s}$ ；

$\rho$ ——介质密度，单位为  $\text{kg/m}^3$ ；

$q_v$ ——体积流量，单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

介质密度  $\rho$  往往与很多因素有关，如压力、温度等等，在实际流动中往往不是一个常数，因此，只根据  $q_v$  的大小确定  $q_m$  是不可靠的，为此常在测量  $q_v$  的同时，测出  $\rho$  的大小，再经乘法运算而求得  $q_m$  值。如果  $\rho$  不变，此时又变成了直接测量。

由上面分析可知，对于间接测量，除包括两个或两个以上的实验部分外，计算也由两部分组成，即第一部分求直接测量结果，而第二部分求间接测量结果。

前面对测量作了一些简单的概括，下面根据不同测量方法进一步介绍它们的特点。

### 一、直接测量法

前面已介绍了直接测量的概念，那是从包括简单测量的数目来分类的，更直观的也可以定义为：不必对与被测量有函数关系的其它量进行测量而能直接得到被测量值的测量方法。在工程上常用事先分度好的测量仪表对某一被测量直接进行测量，它们都属于直接测量法。

为了进行直接测量，常采用以下一些方法：

1. 偏差法 当测量仪表用指针相对于刻度线的位移（偏差）来直接表示被测量大小时，这种方法就是偏差式测量法（简称偏差法）。在使用偏差法测量时，指针式仪表内没有标准量具，而只有经过标准量具标定过的刻度尺。由于刻度尺的精确度不能做得很高，所以这种测量方法的测量精度一般不高于0.5%，经过特殊设计时可达0.1%。

在偏差法测量仪表中，被测量的作用为仪表中某个元件的反作用（这个反作用常与指针位移或偏转角度成线性关系）所平衡。被测量增大，则所需平衡的反作用也要相应增大，因此指针的偏转也随之按比例增大。最常见的例子是动圈毫伏表。

2. 零位法（平衡法） 这种测量方法的原理是：被测量和某已知标准量作用在指零机构上，使其达到平衡，故两个作用的总效应为零。据此（指零机构的指示为零）可以肯定被测量值就等于该已知量值。在零位法中测量结果的误差主要取决于标准量的误差，因此测量精度一般比偏差法高。

零位法在计量工作和工程测试中应用极广。用电位差计测量未知电压就是应用零位法。图1-1是其原理示意图，图中 $E$ 为工作电源，测量前调节 $R_p$ ，以便校准工作电流 $I_s$ ，使其达到标准值，在电位器 $R_s$ 上将产生标准电压降 $U_s$ 。（ $U_s = R_s I_s$ ）接入被测电压后调节电位器的动触点，使检流计 $G$ （指零机构）的示值返回零点，这时 $A$ 、 $B$ 两点间产生标准电压降 $U_x$ ，检流计 $G$ 指零表明 $AC$ 支路中没有电流流

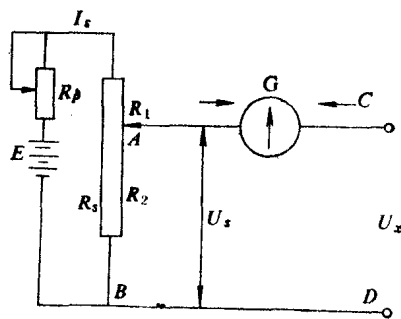


图1-1 电位差计原理示意图

过，从而精确地保证 $A$ 点和 $C$ 点等电位，则有 $U_x = U_s$ 。从图中可知 $U_s = \frac{R_2}{R_s} U_{s0}$ ，所以标准电压降 $U_s$ 随动触点的位置而变。零位法仪表中必须有一个可变化的标准量，指零机构（ $G$ ）检查标准量 $s$ 和待求量 $x$ 对它的正、反作用是否相等，指零机构愈灵敏，这两个作用相等的判断愈准确，愈有利于提高测量精度。

采用零位法测量时，必须执行调节标准量（在本例中调节工作电流 $I_s$ 和电位器动触点得到一个精确的 $U_s$ ）的操作，这就需要一个时间历程，因而仪表就难以测量变化较快的被测量，即使做成自动平衡式仪表，其测量速度也受到一定限制。

3. 微差法 微差法是偏差法和零位法的组合。被测量 $x$ 的大部分作用先与已知标准量 $s$ 的作用相抵消，剩余部分即两者的差值 $d = x - s$ 再用偏差法测量。微差法总使差值 $d$ 很小（微差之名由此而得），因此，即使差值测量的精度不高，但最终结果仍可达到较高精度。 $d$ 愈小，它的测量误差对总的误差影响就愈小。微差法的另一个优点是不需可调节的标准量具，也无需平衡操作，这样，标准量的精度容易做得高，对被测量的反应也可以快，比较适用于工程测试。

微差法的典型例子就是用不平衡电桥测量电阻。如果图1-1中的检流计G换成毫伏表，用它来测量差值  $\delta = U_x - U_s$ ，这也是零位法转变成微差法的例子。

设微差  $\delta$  是输入信号  $U_x$  的百分之一，毫伏表测量  $\delta$  的相对误差  $\Delta\delta/\delta$  为1%，标准量  $U_s$  的相对误差为0.01%，此时

$$\left| \frac{\Delta\delta}{U_x} \right| = \frac{\Delta\delta}{\delta} \cdot \frac{\delta}{U_x} = 0.01 \times 0.01 = 0.0001 = 0.01\%$$

又 
$$\frac{\Delta U_s}{U_s} = 0.01\%$$

则总误差为

$$\frac{\Delta U_x}{U_x} = \frac{\Delta\delta}{U_x} + \frac{\Delta U_s}{U_s} = 0.01\% + 0.01\% = 0.02\%$$

由上述例子可以看出，微差法虽然不能全部消除指示仪表的误差，但却能大大减小指示仪表误差对整个测量结果的影响，相对误差为1%的指示毫伏表，可使整个测量结果达到0.02%的精度。

## 二、间接测量法

当方程中有两个或两个以上的自变量时，要通过相应的简单测量，再经过运算得到被测结果，这种测量方法叫间接测量法。根据测量原理和采用的测量方式的不同，间接测量常有以下几种典型测量方程：

### 1. 典型间接测量的测量方程

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

式中  $y$ ——所求物理量的标准值；

$x_1, x_2, \dots, x_n$ ——用直接测量求得的物理量的标称值。

### 2. 间接测量方程的变形形式

$$z = f(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (1-4)$$

式中  $z$ ——所求物理量的标称值；

$$y_1 = \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

$$y_2 = \varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

$$y_m = \varphi_m(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

$x_1, x_2, \dots, x_n$ ——用直接测量法求得各物理量的标称值。

显然，从数学角度可以将式(1-4)转化为间接测量典型方程(1-3)的形式：

$$z = \psi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1-5)$$

只是从测量程序安排上使用式(1-4)形式更明显一些。

### 3. 第二种间接测量方程的变形形式

$$f(y_1, y_2, \dots, y_m; x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1-6)$$

式中  $y_1, y_2, \dots, y_m$ ——所求物理量的标称值；

$x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}$ ——在第  $i$  次实验条件下经过直接测量法测得各物理量的标称值。

一般上式选取实验次数时，常根据需求解之未知数来确定，一个未知数需要一个独立方程。



当然有时为了减小随机误差，往往选取较多的测量（实验）次数，即测量次数超过未知数数目。

前面讲到的直接测量与间接测量有时很难区分，尤其是当计算机应用于测量装置以后，从定义上看将有一些间接测量方法也转化为直接测量了，即由于仪表本身智能化，使测量过程变得更简单、更直接了。

目前在生产过程中还应用着与测量概念相近的术语——检验。在这里常常不需要被测参数的准确值，但要分辨参数所在的某一范围。例如机械加工中，检验某零件尺寸是否在公差带之内，此时并不要求确知各零件尺寸值；又如在电子工业中对电器元件虚焊的检验，这里只要求发现有无虚焊点的存在等等。检验在生产过程中与测量有着同样重要的作用，除了可单独离线在实验室检验外，在生产过程中也常采用在线检验。为了概括这一工作，人们常把检验和测量结合在一起，统称检测技术，而在过程生产自动化范畴内的检测大部分是自动进行的，因此目前我国通常把这些有关的装置又称为自动检测仪表。

### § 1-3 测量仪表的功能

#### 一、测量仪表和测量系统

物理量的测量，宏观地说应使用各种不同特点的测量器具，而测量器具一般包括三大类：量具、测量仪表、测量变送器。

量具是不转换测量信号的，只用来实现测量比较，通常用来保存标准量，如质量砝码，长度块规，温度定点装置等等。

测量仪表和测量变送器是属于转换测量信号的测量器具，它们都是用来测量被测物理量的。测量仪表和测量变送器的区别仅在于它们的输出信号形式不同。测量仪表的输出信号是可以被人直接接受的，例如通过指示器位移或数字显示等等。因而人们可以直接读出测量结果。而测量变送器一般用于信号的统一或便于传输、存储或进一步转换、比较以及作为控制信号等等。例如目前生产中经常使用的温度变送器、压力变送器等就属这一类。

测量仪表是可以独立地完成测量任务的装置，即可通过测量仪表的指示及其附带的技术资料可以求得被测量大小及给出测量结果的可靠程度。

测量系统是组合起来以执行特定测量任务的全套测量仪器和其它设备的总体。它与测量仪表的区别仅在于它们的成套不同。例如，进行某项测量工作时，根据需要我们选配了独立的功能环节，如检测变换、放大、运算、比较、显示等环节。其中各环节都是有自己独立的技术指标的。为了得到测量结果，要对各环节根据系统的构成进行特性综合和误差综合。

工业自动化生产中多采用各种测量仪表及测量变送器，而在科学研究中，为了便于调整测量装置的功能，提高测量精度或扩大装置的通用性，常常用通用仪器组成一些专用的测量系统，尤其是在一次性测量时，可以减少购置专用测量装置。

例如在科研实验室里，要测量一个变化较快的压力，往往可以购置一些适当量程的应变式压力传感器作为检测环节，后面配以相应的应变仪及快速记录仪，如图 1-2 所示。这里除应变式压力传感器以外，其它部分都是实验室通用仪器，而且可以保证较高精度。显然这比购置专用应变式压力计要优越得多。

## 二、测量仪表的功能

前面介绍了测量仪表及测量系统的概念，尽管它们的用途和测量的参数及对象差别很大，但完成测量任务时仪表具备的功能都基本相同。这些基本功能有：检出、变换、标准量保存、运算比较、结果显示等。一切测量仪表根据原理和对象的不同，对上述基本功能环节可能有不同要求或者有不同复杂程度，但仔细分析起来，都需要有上述几个基本功能。而且根据一些特定要求有时还要引进其它一些辅助功能。

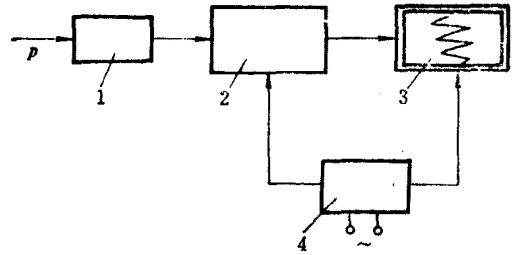


图1-2 应变式压力测量系统

1—应变传感器 2—应变仪 3—记录仪 4—电源

1. 检出变换功能 这个功能在测量中是第一性的，由它首先将被测量  $x$  从被测对象中检出变换成输出量  $y$ ，它们之间的函数关系  $y = f(x)$  也叫做变换函数，但这是理想情况，实际物理系统中还有许多其它影响量 ( $u_1, u_2, \dots, u_n$ ) 以不同程度影响输出量  $y$ ，故实际上一个测量仪表的变换函数为

$$y = F(x, u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (1-7)$$

用框图表示时，可如图 1-3 所示。由图可见，各种输入量（被测量  $x$  和各影响量  $u_1, u_2, \dots, u_n$ ）的作用通道各不相同，但个别的也可能相同。

放大功能可以看作是变换的特殊形式即同类量的变换。

与变换密切相关的选择功能是指仪表响应被测量  $x$ ，抑制影响量 ( $u_1, u_2, \dots, u_n$ ) 的本领，对式 (1-7) 求全微分时，可得

$$dy = \frac{\partial y}{\partial x} dx + \frac{\partial y}{\partial u_1} du_1 + \frac{\partial y}{\partial u_2} du_2 + \dots + \frac{\partial y}{\partial u_n} du_n \quad (1-8)$$

其中

$$\frac{\partial y}{\partial u_1} = K_{u_1}, \quad \frac{\partial y}{\partial u_2} = K_{u_2}, \dots, \quad \frac{\partial y}{\partial u_n} = K_{u_n}$$

称为仪表对各影响量的灵敏度，选择性很强的仪表这些系数都应该很小。

2. 标准量保存功能 任何一个测量仪表都保存有标准量（或它的代表），以便直接或间接地与被测量比较。在模拟式仪表中，一般标准量从形式上是保存在仪表的刻度盘上的。刻度盘上的分格及分格值就是由标准量传递下来的。在数字仪表中一般以稳定的脉冲或时间段作为标准量。所保存的标准量的精度之高低，将直接决定该测量仪表的精度。

3. 运算比较功能 在任何仪表中，代表被测量  $x$  的作用一定要与代表标准量  $s$  的反作用进行比较，并达到平衡，通常就是以标准量在平衡时的大小来衡量（或比例地衡量）被测量的大小的。此外，近代的测量装置（或系统）中往往含有极强的运算功能，包含有微处理机的测量装置便是典型例子。

4. 显示功能 测量仪表的显示功能就是把测量结果用便于人眼观察的形式表示出来，是人机联系的一种手段。测量仪表的显示方式可分为三类：

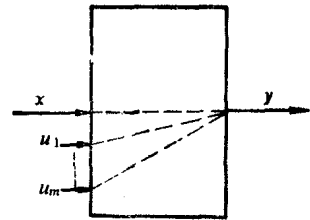


图1-3 变换环节

- (1) 模拟式 如指针式仪表的角位移或线位移, 记录笔所记录的参数变化曲线等。
- (2) 数字式 各种数码显示器的数字、字符、数字式的打印记录等等。
- (3) 图形式 这种方式是显示功能发展到较高阶段的产物, 它除了具有模拟、数字、字符显示的作用外, 还能显示曲线、表格、图象、背景、变量场、物理量的动态变化过程, 并有色彩配合, 闪烁加强作用等。

## § 1-4 测量仪表的性能指标

评价一个测量仪表好坏的标准应该尽量统一, 以便能对各种不同的测量仪表很方便地进行比较; 其次这些指标必须是容易被测定的。

评价测量仪表品质好坏的指标是多方面的, 作为测量仪表的基本性能, 主要还是衡量仪表测量能力的那些指标。如精度、稳定性、测量范围、动态性能。此外, 在对仪表进行全面分析时, 往往还要考虑到工作可靠性、经济性等项指标。这些指标有时还是相当重要的, 尤其随自动化水平的提高, 对其要求也相应提高, 对可靠性与经济性的研究, 已独立形成了一个研究领域。

仪表运行特性通常分为静态特性和动态特性两大类。当被测量是恒定量或缓变量时, 就可只考虑静态性能指标。当被测量变化较快时, 必须考虑仪表本身输入和输出关系和由于动态性能不好引起的动态附加误差。

### 一、测量仪表的静态特性

仪表的静态特性都可以用仪表静态特性曲线来描述。对测量仪表作静态校准时应该保持所有影响量恒定(或为零), 把标准量作为被测量, 通过标准值的输入可以得到如图 1-4 所示的特性曲线(这里是一温度计特性曲线)。水平坐标表示输入量的真值。在仪表分度时, 此值一般由上一级标准给出, 而垂直坐标表示本仪表的输出值, 例如指针式仪表可以是转角输出。

#### (一) 精确度

与精确度有关的指标有三个: 精密度、正确度和精确度等级。

(1) 精密度 它说明测量仪表示值的不一致程度。即对某一稳定的被测量在相同的规定的工作条件下, 由同一测量者用同一仪表在相当短的时间内连续重复测量多次, 其测量结果的不一致程度。不一致程度愈小, 则说明测量仪表愈精密。

(2) 正确度 它说明仪表示值有规律地偏离真值(或约定真值)大小的程度, 正确度反映了仪表系统误差的大小。

(3) 精确度 它是精密度与正确度两者的总和, 即测量仪表给出接近于被测量真值的能力。精密度高和正确度高是精确度高的必要条件。

(4) 精确度等级(精度等级) 在工程测试中, 为了简化表示仪表测量结果的可靠程

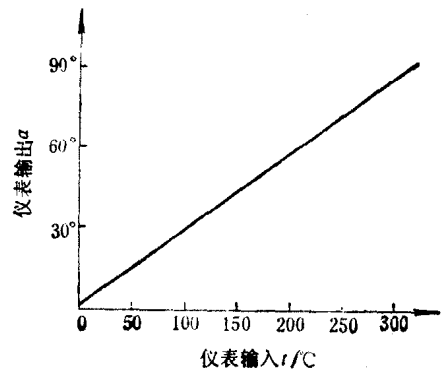


图1-4 温度计的静态特性

度，引入一个仪表精度等级概念。用  $A$  表示精度等级， $A$  以一系列标准百分比数值 (0.001; 0.005; 0.02; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0; 6.0等) 进行分档。这个数值通常就是仪表在规定工作条件下，其最大绝对允许误差  $\Delta_{g_{max}}$  相对于仪表测量范围的百分数。它可以用下式表示：

$$A = \frac{\Delta_{g_{max}}}{x_{max} - x_{min}} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中  $\Delta_{g_{max}}$ ——最大绝对允许误差值；  
 $x_{max}$ 、 $x_{min}$ ——测量范围的上下限值；  
 $A$ ——精度等级。

## (二) 稳定性

测量仪表的稳定性是指在规定工作条件保持恒定时，在规定时间内仪表性能保持不变的能力。一般它用精密度的数值和观测时间长短表示。时间间隔的选择，根据仪表使用要求，差别可以很大，如从几分钟到一年不等。

## (三) 影响系数

制定仪表性能指标的的目的之一是为了互相比较，因此被比较的仪表应在相同（或相近）的工作条件下使用，以排除各种影响的干扰，因此必须规定一个共同的标准工作条件（如环境温度为  $20^\circ\text{C}$ ，相对湿度  $65\%$ ；大气压力为  $101.33\text{kPa}$ ；电源电压为  $220\text{V}$  等等）。可是实际又很难达到这个要求，故又规定一个标准工作条件允许变化的范围，如温度为  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ；相对湿度为  $65\% \pm 5\%$ ；大气压为  $101.33 \pm 5\text{kPa}$ ；电源电压为  $220 \pm 3\text{V}$  等等。在这种影响量（除仪表的被测量外，能导致仪表输出改变的量）变动较窄的情况下，其影响量的作用可以忽略不计，这就便于互相比较了。仪表实际工作的条件要比标准工作条件坏很多，这时影响量的作用可以用影响系数来表示。它是一个比值（示值变化/影响量变化值）。例如某压力表的温度影响系数为  $200\text{Pa}/\text{K}$ 。影响系数是仪表性能的重要指标。

以上所述各种工作条件可以用图1-5来表示，即在标准工作条件范围内规定仪表标准性能；在正常工作条件下，性能受工作条件影响，影响大小可以用影响系数估算；而在极限工作条件内，只能保证仪表不被损坏，一般不规定性能指标。

## (四) 仪表静态输入—输出特性

这主要是有关静态特性曲线形状的一些性能指标，如灵敏度、灵敏限、分辨率、线性度、滞环、量程等。它们用来在上述性能范围内，对仪表性能作进一步的限制，其目的是保证已确定的精确度能得以实现。

### (1) 灵敏度 它表征仪表在稳态下输出增

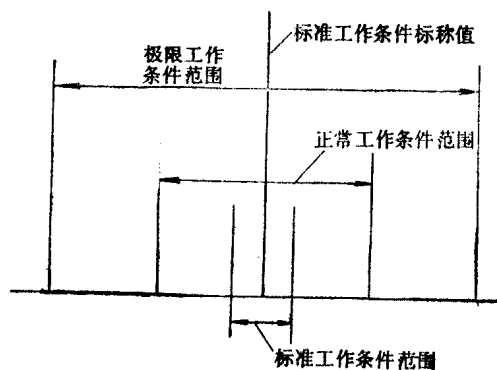


图1-5 仪表的工作条件

量对输入增量的比值，用  $K$  表示，即  $K = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ 。它是静态特性曲线上相应点的斜率。如特性曲线是一条直线，如图 1-6 a 所示，各点斜率相等，则  $K$  为一常数。如静态特性曲线不是直线，如图 1-6 b 所示，则说明灵敏度将随被测量的大小而变。如图中在  $x_1$  和  $x_2$  处的  $K$  值不



等。

表示灵敏度时输入量和输出量必须用实际物理单位。

前面读到的影响系数实际上是仪表对该影响量的灵敏度，它将影响总的输出大小。影响量对结果的影响可能是改变仪表的灵敏度，产生灵敏度漂移，也可能是影响仪表的零漂。影响的形式要由具体分析而定，但最终都是改变仪表特性，如图 1-7 所示。

(2) 灵敏限 当仪表的输入量相当缓慢地从零开始逐渐增加，在仪表的示值发生可察觉的极微小变化时，此时对应的输入量的最小变化值，称为灵敏限。用  $\Delta x_s$  表示，它的单位与被测量单位相同。灵敏限表示仪表可敏感的最小输入量值，比  $\Delta x_s$  再小将察觉不到示值的变化。

从严格的定量观点要求，上述定义不够明确，因为示值可察觉的微小变化和输入量最小变化值在数值上都是含混不清的，测定时常因人而异。为了改进灵敏限的明确性，最好对可察觉的极微小示值变化从数量上规定一个较确定的值。此外有时还应用死区这一概念，它是指输入量的变化不致引起输出量有任何可察觉的变化的有限区间，用输入量程的百分数表示。

(3) 分辨率 是指示装置可有意义地区分两紧邻所示量值的能力的定量表示。分辨率说明仪表能够检测到被测量最小变化的本领。同样，为了消除分辨率的模糊性，也应对示值的变化从量上规定一个数值。一般模拟式仪表的分辨率规定为最小刻度分格值的一半；数字式仪表的分辨率为最后一位的一个字。

(4) 线性度 它用来说明仪表静态特性曲线对一条规定直线的吻合程度。通常采用端基线性度来描述这个指标，规定直线是一条通过特性曲线上、下限值的端基直线（见图 1-8）。常用实际校准曲线与端基直线之间的最大偏差值  $|y_i - y_i|_{\max}$  与  $y_{\max}$  之比来衡量线性度，并叫端基线性度，以  $E_s$  表示，即

$$E_s = \frac{|y_i - y_i|_{\max}}{y_{\max}} \quad (1-10)$$

如果把理想的端基线作为仪表的实际特性曲线，则  $E_s$  就变成了端基线性度误差。

(5) 死区、回差和滞环 这是几个不同的概念，由于它们经常同时出现，很难分开也很容易混淆，所以把它们放在一起介绍。

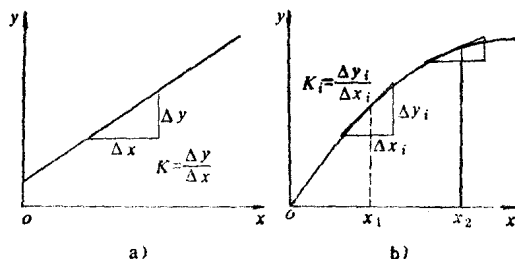


图1-6 仪表灵敏度曲线

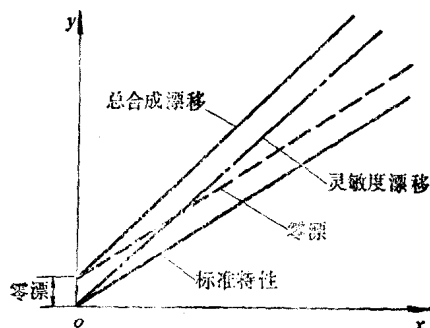


图1-7 仪表的漂移特性

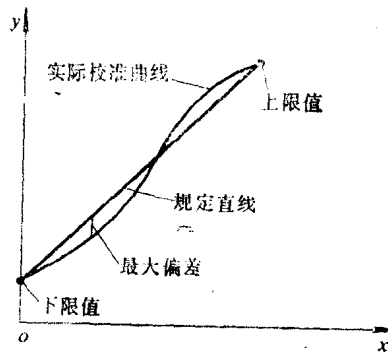


图1-8 仪表的端基线性度