

高等专科学校教材

检测与转换技术

吴绍琳 孙祖达

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书由大专计算机教材编审委员会硬件编辑小组评审、推荐出版。全书共分三章，第一章介绍测量方法、检测仪表的基本特性，误差理论基础和数据处理方法。第二章介绍各类传感器的工作原理、主要特性、测量电路及各类传感器应用实例。第三章介绍各类工程参数的检测方法。

本书可作为高等专科学校计算机应用专业、自动化专业“检测与转换技术”课程的教材及有关专业的教学参考资料，也可供仪器仪表专业师生及从事测试、计算机应用技术、过程控制的工程技术人员参考。

检 测 与 转 换 技 术

吴绍琳 孙祖达

责任编辑 李亚东

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁西路28号)

西安7226印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本787×1092 1/32 印张10.25 字数：215千字

1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷

印数：1—3000

ISBN7-5605-0301-2/TP·28 定价：2.05元

目 录

结 论

第一章 测量的基本概念

§ 1—1	测量与转换的基本概念	(1)
§ 1—2	测量方法	(2)
§ 1—3	检测仪表的组成	(9)
§ 1—4	检测仪表的分类	(11)
§ 1—5	检测仪表的基本性能指标	(16)
§ 1—6	误差理论基础	(22)
§ 1—7	一元回归分析	(41)
	习题与思考题	(49)

第二章 传 感 器

§ 2—1	传感器概述	(51)
§ 2—2	电阻式传感器	(56)
§ 2—3	电容式传感器	(92)
§ 2—4	电感式传感器	(110)
§ 2—5	电涡流式传感器	(127)
§ 2—6	磁电式传感器	(137)
§ 2—7	光电式传感器	(144)
§ 2—8	热电式传感器	(168)

§ 2—9 压电式传感器·····	(179)
§ 2—10 霍尔式传感器·····	(199)
§ 2—11 振弦式传感器·····	(213)
§ 2—12 力平衡式传感器·····	(220)
习题与思考题·····	(227)

第三章 工程参数的检测

§ 3—1 压力测量·····	(230)
§ 3—2 流量测量·····	(240)
§ 3—3 物位测量·····	(259)
§ 3—4 温度测量·····	(272)
§ 3—5 电测技术中的干扰与防护·····	(298)
习题与思考题·····	(310)

参考书目

第一章 测量的基本概念

§ 1-1 测量与转换的基本概念

在科学实验或生产过程中，必须对客观事物进行定性或定量分析，这就需要对被测对象进行测量。

所谓测量即以确定量值为目的的操作。也就是将被测的量和作为测量单位的标准量进行比较，得到被测的量是测量单位的多少倍，并用数字和单位表示出来。

如以 X 表示被测量（被测的量简称被测量），以 E 表示测量单位的标准量，两者的比值为

$$n = \frac{X}{E} \quad (1-1)$$

显然 n 是一个纯数，其对应的被测量为

$$X = nE$$

例如， $E = 1\text{mm}$ ， $n = 6.3$ ，则 $X = 6.3\text{mm}$ 。

由上可见，测量过程就是一个比较过程。测量结果可用一定的数值表示，也可以用一条曲线或某种图形表示。但是，无论其表现形式如何，测量结果应包括两部分。一部分是数值的大小和符号（正或负），另一部分是相应的单位。表示测量结果时，不注明单位，该结果将无意义。

测量过程的核心是比较，但在近代测量中大量遇到的除了比较过程外，还必须进行各种转换。转换的目的有二；其

一，由于被测量能直接与标准量比较的场合不多，大多数的被测量和标准量都要变换到双方便于比较的某个中间变量后再进行比较。例如，压力或温度必须将其转换成相应的形变、位移或其它的物理量才能进行比较；其二，随着电子技术、传感技术、电子计算机技术的迅速发展，把非电量转换成电量的测量，具有能对电信号进行远距离传输、便于测量动态参数及变化过程、测量精度高、便于与计算机连接等优点。转换的方法包括物理量或化学量的转换（如非电量转换成电量）和能量转换（如电压放大、功率放大）。可以说转换是现代检测技术的特征之一。

§ 1-2 测量方法

测量的具体方法是由被测量的种类、数值的大小、所需的测量精确度、测量速度的快慢等一系列因素决定的。

测量方法可按被测量的获得方法不同，分为直接测量和间接测量两大类。按测量方法不同也可分为直接比较测量法，微差测量法，零位测量法，组合测量法等。

一、直接测量法 间接测量法

1. 直接测量法

无须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，称为直接测量法。例如，用标准尺测量长度、用等臂天平测量质量等。由于它“直接”，因而比较简便，在工程参数检测中应用得最广泛。但是直接测量并不等于用直读式仪表的测量，如用电压表（直读式仪表）和用电位差计（比较式仪表）测电压，两者均属于直接

测量法。只要参与测量的对象就是被测量本身，都属于直接测量。

2. 间接测量法

通过对与被测量有函数关系的其它量进行测量，才能得到被测量值的测量方法，称为间接测量法。下面给出两个示例以更好地理解间接测量法的含义。

例：图1-1所示长方体，测量其密度 ρ 。

密度的单位为 (kg/m^3) ，显然无法直接获得具有这种单位的量值，但是可以测出长方体的边长 a 、 b 、 c 及其质量 M ，而后根据下式求得密度 ρ ：

$$\rho = \frac{M}{abc} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-2)$$

式中： a 、 b 、 c 以m为单位， M 以kg为单位。

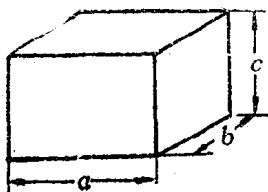


图1-1 长方体的密度测量

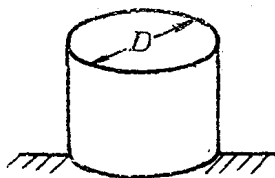


图1-2 贮罐直径的测量

例：试求图1-2所示大型贮罐的直径 D 。

由于直径 D 太大，利用现有的工具直接测出的 D 值误差太大，不过我们可以根据圆的周长 L 与直径 D 之间所具有的 $L = \pi D$ 关系，先利用卷尺直接测出圆周长 $L(\text{m})$ ，而后利用下式计算求出 D ：

$$D = \frac{L}{\pi} \quad (\text{m}) \quad (1-3)$$

以上两例说明，对一个或几个与被测量有确切函数关系的量进行直接测量，然后通过代表该函数关系的公式、曲线或表格求得被测量，这类测量方法均为间接测量。

间接测量手续比较麻烦，一般在直接测量很不方便、直接测量误差较大或缺乏直接测量仪器时才被采用。

一般地说，间接测量法所需要测的量较多，测量和计算的工作量较大，引起误差的因素较多。但是如果对误差进行分析并选择和确定具体的优化测量方法，在比较理想的条件下进行测量时，测量的结果、精确度不一定低，有的甚至有较高的精确度。

二、直接比较测量法 微差测量法 零位测量法 组合测量法

上述四种测量方法中，前三种属于直接测量，后一种应属于间接测量。

1. 直接比较测量法

将被测量直接与已知其值的同类量进行比较的测量方法称直接比较测量法。例如，用一根标度尺测量长度。

直接比较测量法所使用的测量仪表大多是直读指示式仪表，如压力表、电流表、玻璃温度计等。仪表刻度预先用标准量具进行分度和校准，在测量过程中，指示标记的位移，在标尺上相应的刻度值就表示了被测量的值。对测量人员来说，除了将其指示值乘以测量仪器的常数或倍率外，无需作附加的动作或计算。由于测量过程简单方便，在实际工作中应用比较广泛。

2. 微差测量法

它将被测量与同它的量值只有微小差别的已知量相比较

并测出这两个量值间的差值以确定被测量的测量方法为微差测量法。

微差测量法的特征是测量被测量与已知量之间的差值，这种测量方法的最大优点是当满足复现已知量的精确度很高，其值又很接近被测量的条件时，用精度较低的测量仪表也能得到高精度的测量结果。

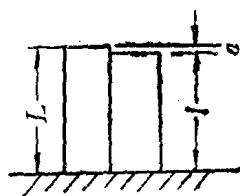


图 1-3 微差测量法示意图

图 1-3 为长度测量中应用微差测量法的一个例子。图中 L 为被测物体的长度， l 为量块的尺寸。被测长度 L 为 $l+a$ ，如果尺寸 a 的测量误差不超过 $\pm \Delta$ ，则测量结果可表示为 $(a \pm \Delta)$ 或 $a\left(1 \pm \frac{\Delta}{a}\right)$ ，其中 $\frac{\Delta}{a}$ 为测量 a 的相对误差。被测量 L 表示如下

$$L = l + (a \pm \Delta) = (l + a) \left(1 \pm \frac{\Delta}{l + a}\right) \quad (1-4)$$

式中， $\frac{\Delta}{l+a}$ 为测量 L 的相对误差。

因为 $l \gg a$ ，所以测量 L 的相对误差远小于测量 a 的相对误差，即

$$\frac{\Delta}{l+a} \ll \frac{\Delta}{a} \quad (1-5)$$

例：设 $l = 500\text{mm}$ ， $a = 5\text{mm}$ ， $\Delta = 0.05\text{mm}$ ；试比较测量 a 与 L 的相对误差。

解：测量 a 的相对误差：

$$\frac{\Delta}{a} = \frac{0.05}{5} 100\% = 1\%$$

测量 L 的相对误差：

$$\frac{\Delta}{l+a} = \frac{0.05}{500+5} 100\% \approx 0.01\%$$

$$\frac{\Delta}{l+a} \ll \frac{\Delta}{a}$$

上例说明微差测量法可以提高测量精确度，它特别适合在线控制参数的测量。例如，用计算机控制的连续轧钢生产线上参与控制过程工作的 x 射线测厚仪，就是按微差式测量法工作的，这时被测量为板料的厚度，已知的标准量是板厚的设定值，测厚仪只测量偏差。微差测量法是一种很有发展前途的测量方法，在工程测量中会获得愈来愈广泛的应用。

3. 零位测量法

零位测量法通过调整一个或几个与被测量有已知平衡关系的（或已知其值的）量，用平衡法确定被测量的测量方法。

零位测量法又称补偿测量法或平衡测量法。它的特点是在仪表内包含有标准量具，还有一个指零部件。在测量过程中被测量与标准量直接比较，测量时要调整标准量（手动或自动），使被测量与标准量之差（称偏差）为零，这个过程称为补偿或平衡操作，偏差为零的状态称为平衡状态。处于平衡状态的测量系统，被测量与标准量相等，因此，标准量的数值就代表了被测量的大小。

采用零位测量法进行测量的优点是可以获得比较高的精确度，但是测量过程比较复杂，在测量时，要进行平衡操作。这种测量方法在工程参数测量和实验室测量中应用很普遍，如天平称重、零位式活塞压力计测压、电位差计及平衡电桥测毫伏信号及电阻值等。

4. 组合测量法

下面通过两个实例，说明组合测量的概念。

例：求出图 1-4 所示刻线 AB 、 BC 和 CD 间的距离。

采用一般测量方法解决这个问题时，是用量具直接量出 AB 、 BC 、 CD 段的尺寸，然而这样的测量精确度有限，欲提高其测量精度，可以同时测出 AB 、 BC 、 CD 以及 AC 、 BD 、 AD 各段尺寸，设直接测得的尺寸为：

$$AB = a_1 \quad BC = a_2 \quad CD = a_3$$

$$AC = a_4 \quad BD = a_5 \quad AD = a_6$$



图 1-4 刻线线段测量

又设 AB 、 BC 和 CD 的实际值分别为 X 、 Y 、 Z ，根据上述直接测量的结果，可以列出如下方程组：

$$X - a_1 = 0$$

$$Y - a_2 = 0$$

$$Z - a_3 = 0$$

(1-6)

$$X + Y - a_4 = 0$$

$$X + Z - a_5 = 0$$

$$X + Y + Z - a_6 = 0$$

求解上述方程组，解出 X 、 Y 、 Z ，便得出 AB 、 BC 和 CD 的尺寸。

例：试求电阻的温度系数。

通过理论分析可知，电阻值与温度间的关系如下：

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 + \dots \quad (1-7)$$

式中： R_t —— $t^\circ\text{C}$ 时电阻的实际值(Ω)；

R_{20} —— 20°C 时电阻的实际值(Ω)；

α 、 β ——为电阻温度系数($\Omega/^\circ\text{C}$)；

t ——电阻体所在处的温度(°C)。

如果能求得 α 、 β 、 R_{20} ，这个问题也就解决了，但是 α 、 β 不能直接测得，为了获得欲求的规律，可以在不同的温度(t_i)条件下，测出相应电阻值 R_{t_i} ，并按如下形式记录下来：

t_i (°C)	t_1	t_2	……	t_n
R_{t_i} (Ω)	R_{t_1}	R_{t_2}	……	R_{t_n}

根据测量结果列出如下方程组：

$$R_{t_1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2$$

$$R_{t_2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2$$

$$\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots$$

$$R_{t_n} = R_{20} + \alpha(t_n - 20) + \beta(t_n - 20)^2$$

解上述方程组，便可得到 R_{20} 、 α 、 β ，进而得到 R_t 随温度变化的规律。

上述两例从测量方法而言，是一种间接测量的方法。它利用直接或间接办法测得一定数目的被测变量的不同组合，列出一组方程，通过解方程组得到被测量的一种方法，这种测量方法定义为组合测量法。

在科学实验和计量检测工作中，常常会遇到组合测量方法的应用实例。

除上述分类外，还可根据传感器与被测对象是否接触分为接触式测量法和非接触式测量法等。

§ 1-3 检测仪表的组成

检测仪表是能确定所感受的被测变量大小的仪表。检测仪表即可以由许多单独的部件组成，也可以是一个不可分的整体。前者多用于复杂的仪表或实验装置中，后者多为工业用的简单仪表。不管是简单仪表，或是复杂仪表，原则上它们均是由几个环节所组成。对于简单仪表，只不过各个环节的界线不大明显而已。这几个环节是：传感器、接口及调理电路、显示器及传输通道。仪表的方框图如图 1-5 所示：

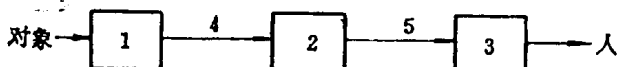


图1-5 检测仪表的方框图

1—传感器 2—接口及调理电路 3—显示器 4、5—传输通道

一、传感器

传感器是感受被测量，并按一定规律将其转换成同种或别种性质输出量的装置。它是检测仪表与被测对象直接发生联系的部分，传感器的好坏，直接影响检测的质量。

二、接口及调理电路

传感器输出往往不能满足显示电路的要求，因此，传感器与显示器之间需要有接口及调理电路。

典型的接口及调理电路由电桥、激励源、放大、滤波、线性化、隔离、偏置、阻抗变换、电平转换以及各种各样的计算（模拟量或数字量）电路组成。

经信号调理，将被测信号放大到数据采集系统的标准信号（0~±10V）或把它转换为过程控制系统用标准信号（4~

20mA)。

三、显示器

测量的结果需要显示出来，显示器是人和仪表联系的主要环节，它有指示式、数字式和屏幕式三种。

1. 指示式显示

又称模拟式显示。被测量值大小由指示器或指针在标尺上的相应位置表示。多数指示仪表的结构简单，价格低廉，显示直观，一直被大量应用。这类仪表有些还带有记录机构，能以曲线形式绘出被测量随时间的变化。记录曲线便于观察被测量的变化过程和变化趋势。但这种仪表读数的精确程度受标尺最小分度的限制，且读数会引入主观误差。

2. 数字式显示

以数字形式给出被测量的数值大小，也可附加打印设备，打印出数据。数字式显示减少了读数的主观误差，提高了读数的精度，还能方便地与计算机联用。这种仪表正在越来越多地被采用。

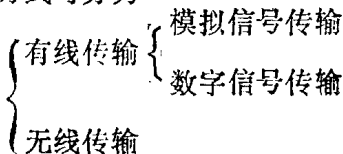
3. 屏幕显示

实际上是一种电视显示方式。它可以显示一个或多个被测量，以数字或曲线形式显示，综合了前两种显示的优点，有利于一组测值进行比较分析。

四、传输通道

传输通道的作用是联系仪表的各个环节，给各环节的输入、输出提供通路。

信号的传输方式可分为



工业生产中应用比较多的是有线模拟信号传输，即用电缆或导线传输直流电压或电流信号。随着数字技术的发展，数字化传感器的出现，以及计算机在仪表中的广泛应用，使数字信号传输应用日益广泛。数字信号传输可以大大提高抗干扰能力，同时由于数字信号传输采用多路数据采集系统，增加了信号处理能力，减少了线路安装与维护方面的投资。目前，随着远距离测量技术和遥感技术的发展，信号的无线传输显得越来越重要。

传输线路选择不当，容易造成信号大量损失，若阻抗不匹配，还可能导致灵敏度降低；若抗干扰措施不力，将使信号严重失真等。因此对采用何种传输线路必须引起足够重视。

§ 1-4 检测仪表的分类

一、按被测量分类

按被测量分类，常见的如压力检测类仪表，流量检测类仪表，液位（或界面）检测类仪表，温度检测类仪表，成分检测类仪表，重量检测类仪表等。

二、按使用性质分类

按使用的性质，仪表可分为标准表、实验室表和工业用表三类等。

“标准表”顾名思义是专门用于校准非标准仪表的，因它本身必须经过有关计量部门定期检定，并具有检定合格证书，方可使用。标准表的精度等级高于被校表，而其本身又是根据量值传递的规定由更高一级的标准表来检定。

“实验室表”多用于实验室中。它的使用环境条件较好，故往往无特殊的防水防尘措施。对于温度、相对湿度、机械振动等的允许范围也较小。这类仪表的精度等级较工业用表为高，但只适于实验室条件下使用。

“工业用表”是长期用于工业生产现场的仪表。根据安装地点不同，工业用表又分为现场安装仪表及控制室安装仪表，前者应有可靠的防护，能抵御环境条件变化的影响。一般工业用表的精度要求不太高，但要求能长期连续工作，有足够的可靠性，在某些场合有防爆要求等。

三、按仪表的功能分类

检测仪表按其功能可分为指示型、记录型、积算型和调节型。有的一块仪表可同时具有多种功能，如指示记录仪、指示调节仪等。

四、按仪表各环节的连接方式分类

前已叙述，检测仪表由传感器、接口及调理电路、显示器及传输通道等几个主要环节组成。根据各环节的连接方式不同检测仪表可分为开环式仪表和闭环式仪表。

1. 开环式仪表

又称串联式仪表，仪表中各个环节串联，如图1-6所示。

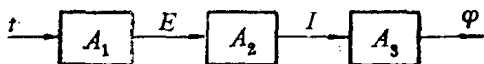


图1-6 开环式仪表方框图

设各个环节的传递系数为 A_1 、 A_2 、 A_3

$$A_1 = E/t; A_2 = I/E; A_3 = \varphi/I$$

整个仪表的传递系数为

$$\frac{\varphi}{t} = A_1 A_2 A_3$$

$$\varphi = A_1 A_2 A_3 t = A t \quad (1-8)$$

式中： t 和 φ 分别为仪表的输入和输出量；

A 为仪表的总传递系数，它等于各环节传递系数的乘积。

由上分析可知，每个环节产生的误差都会影响输出，它们的累积会造成更大的误差。任何一个环节的非线性将使整个仪表呈非线性。因此，试图制成高精度的开环式仪表是相当困难的。

2. 闭环式仪表

又称反馈式仪表，其方框图如图 1-7 所示。

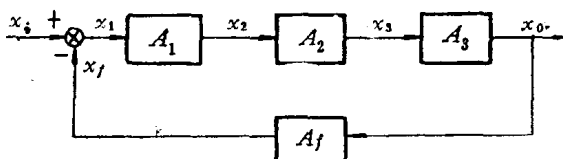


图1-7 闭环式仪表方框图

令各个环节的传递系数为 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_f

$$A_1 = x_2/x_1; \quad A_2 = x_3/x_2; \quad A_3 = x_o/x_3; \quad A_f = x_f/x_o$$

$$\therefore \begin{cases} x_o = A_1 A_2 A_3 x_1 \\ x_1 = x_i - x_f \\ x_f = A_f \cdot x_o \end{cases}$$

求解上述方程组得：