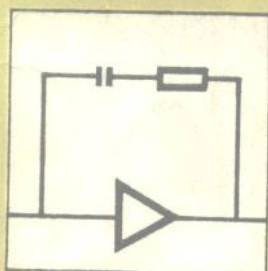
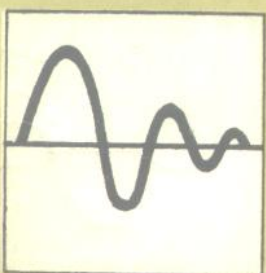
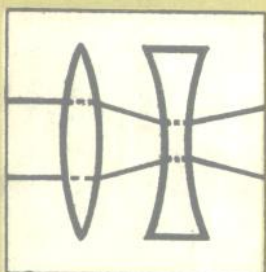


高等学校试用教材



自动检测技术

上册

哈尔滨工业大学吴训一 主编



机械工业出版社

865

73.265
2.11
小

高等学校试用教材

自动检测技术

上册

哈尔滨工业大学 吴训一 主编



机械工业出版社

自动检测技术（上册）

哈尔滨工业大学 吴训一 主编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（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 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 18 · 字数 438 千字

1981 年 1 月北京第一版 · 1981 年 1 月北京第一次印刷

印数 00,001—13,000 · 定价 1.85 元

*

统一书号：15033 · 4900

前 言

本书是根据第一机械工业部一九七八年四月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会确定的计划以及一九七八年七月和十月分别在哈尔滨和天津召开的工业自动化仪表教材会议上制订的《自动检测技术》教材编写大纲编写的。

本书按检测技术的基本理论、被测信息的采集、变换、传输、处理以及检测系统这样的体系加以介绍。重点讨论检测技术的基本概念、基本理论、变换元件、检测仪表和检测系统及其设计的基本原理。

本书共四篇，分上、下两册出版。上册介绍检测技术的基本理论和检测变换元件，其主要内容有：检测技术的基本概念，测量误差的基本理论，信息论在检测技术中应用简介，测量线路分析，各种信息采集的变换原理及其变换元件，它包括机械的、流体的、电的、光的、半导体的、核辐射的变换元件。下册介绍信息的传输、处理和各种检测系统。其主要内容有：信息传输的基本原理，模拟、数字信息处理的基本方法，各种典型的检测系统及其设计原理，以及微处理机在检测系统中的应用。

本书可作为工业自动化仪表专业的试用教材，也可作为有关专业的教学参考书。

本书由哈尔滨工业大学吴训一，刘玉明同志担任主编，上海机械学院秦永烈同志担任主审。刘玉明同志在完成第一稿后因病不能继续工作，由哈尔滨工业大学陈守仁同志接替。参加上册编写工作的还有哈尔滨工业大学褚载祥、陈宏磐同志。

本书初稿曾由上海机械学院等六所高等院校会审，编者根据会审意见作了相应的修改和补充。在本书编写和审稿过程中一机部自动化所王良楣副总工程师，上海工业自动化仪表研究所吴钦伟总工程师、汪世雍副总工程师，哈尔滨工业大学王泽汉教授、耿完楨同志以及有关仪表厂、研究所给予了热情支持，提出了许多宝贵意见，在此一并表示衷心感谢。

由于我们水平有限，时间短促，无论从体系、内容和编写方法上一定存在着许多缺点和错误，希望读者批评指正。

一九七九年十二月

目 录

前言	
绪论	1
第一篇 测量技术的理论基础	2
第一章 测量技术的基本概念	2
§ 1-1 测量的概念和定义	2
§ 1-2 测量仪表的构成和基本性能	4
§ 1-3 检测技术的发展概况	8
第二章 测量误差的理论基础	10
§ 2-1 误差及其分类	10
§ 2-2 精度及提高精度的方法	14
§ 2-3 线性误差及其消除方法	20
§ 2-4 量程及其扩展	22
§ 2-5 误差的评价和处理	23
§ 2-6 信息论在误差理论中应用简介	35
第三章 信息—能量理论基础	46
§ 3-1 信息传递的负熵原理	46
§ 3-2 能量与能量所携带的信息	47
§ 3-3 信息—能量变换分析	50
第四章 直接变换式测量线路	57
§ 4-1 直接变换式仪表	57
§ 4-2 发电式变换器的测量线路	58
§ 4-3 参数式变换器的串接式线路	59
§ 4-4 参数式变换器的分压器式线路	60
§ 4-5 电桥测量线路	62
§ 4-6 交流电桥的特点	71
第五章 平衡式测量线路	77
§ 5-1 概述	77
§ 5-2 有差随动平衡式测量线路	78
§ 5-3 无差随动平衡式测量线路	83
§ 5-4 最佳平衡深度的选择	86
第二篇 检测变换元件	90
第六章 机械式变换元件	90
§ 6-1 弹性测量变换元件	90
§ 6-2 其它机械式变换元件	95
第七章 振动式变换元件	96
§ 7-1 概述	96
§ 7-2 振弦式变换元件	96
§ 7-3 振筒式变换元件	102
第八章 流体式变换元件	107
§ 8-1 静压式变换元件	107
§ 8-2 节流式变换元件	110
§ 8-3 流体振动式变换元件	115
§ 8-4 流体阻力式变换元件	118
第九章 电阻式变换元件	121
§ 9-1 概述	121
§ 9-2 电位器式变换元件	123
§ 9-3 应变式变换元件	125
§ 9-4 热电阻式变换元件	134
§ 9-5 湿敏电阻元件	138
第十章 电磁式变换元件	141
§ 10-1 概述	141
§ 10-2 电感线圈的等效电路	143
§ 10-3 自感式变换元件	146
§ 10-4 变压器式(互感式)变换元件	153
§ 10-5 磁弹性变换元件	156
§ 10-6 其它电磁式变换元件	159
第十一章 电容式变换元件	165
§ 11-1 电容式变换元件的工作原理	165
§ 11-2 电容式变换元件的结构及特性	166
§ 11-3 测量电路	172
§ 11-4 电容式变换元件的应用	173
第十二章 热电变换元件	176
§ 12-1 热电变换元件的物理基础	176
§ 12-2 热电极的材料和常用热电偶	179

§ 12-3	热电偶的结构	184	§ 15-2	半导体力敏电阻	231
§ 12-4	热电偶的冷端处理及 测温的误差	187	§ 15-3	半导体气敏电阻	236
第十三章	压电式变换元件	193	§ 15-4	半导体热敏电阻	238
§ 13-1	压电变换原理及 压电材料	193	§ 15-5	半导体光敏电阻	241
§ 13-2	压电式压力变换器	196	§ 15-6	半导体光电池	246
§ 13-3	压电式加速度变换器	198	§ 15-7	光敏晶体管	250
§ 13-4	压电式超声波换能器	200	§ 15-8	霍尔变换元件	252
§ 13-5	压电式变换器的 测量电路	204	第十六章	核辐射式变换器	258
第十四章	光电变换元件	206	§ 16-1	核辐射的基本特性	258
§ 14-1	光电变换原理和 光电阴极	206	§ 16-2	核辐射检测器	263
§ 14-2	真空光电管	209	§ 16-3	核辐射变换器的应用	267
§ 14-3	光电倍增管	212	§ 16-4	核辐射变换器的误差	268
第十五章	半导体式变换元件	222	附录		
§ 15-1	半导体磁敏二极管、 三极管	222	1. 铂铈 ₁₀ -铂热电偶分度表	270	
			2. 镍铬-镍硅(镍铝) 热电偶分度表	273	
			3. 镍铬-考铜热电偶分度表	276	
			4. 铂铈 ₃₀ -铂铈 ₆ 热电偶分度表	278	

绪 论

一、测量的意义

测量是人类认识事物本质所不可缺少的。通过测量和试验能使人们对事物获得定量的概念和发现事物的规律性。可以说,在人类的一切活动领域中,如科学实验、生产活动和阶级斗争中都离不开测量。没有测量,也就没有科学。科学上很多新的发明和突破都是以实验测试为基础的。例如1916年爱因斯坦提出的广义相对论,由于当时不具备验证的测试条件而在将近五十年的时间内没有得到很快的发展。近年来天文学上的发现和许多精确的测量技术对这个理论进行了成功的验证。才使广义相对论重新得到重视和发展。这一事实说明科学和测量之间的密切关系。各种新的机器、新的工艺过程的研究和分析,都与测量许多物理量有紧密的联系。

为了检查、监督和控制某个生产过程或运动对象,使它们处于所选工况的最佳状态,就必须掌握描述它们特性的各种参数,这就首先要求测量这些参数的大小、方向、变化速度等等。通常把这种工艺流程中含有检查、测量等比较广泛意义的测量叫做检测。本课程的主要目的就是介绍有关自动检测技术的内容。

二、课程内容

本课程的主要基础有数学、物理学、电工电子学、控制理论、计算技术和信息技术等。

本书按检测的基本理论、被测信号的采集、变换、传输、处理以及检测系统这样的体系加以介绍。重点讨论检测技术的基本概念、基本理论、变换元件、检测仪表、检测系统及其设计的基本原理。由于过程检测中各种变换元件直接与被检测对象接触,为了适应各种工况,变换元件的种类和规格很多,它们所处环境条件相差也非常悬殊,因而变换器和检测系统的设计比较复杂。所以在研究本课程时,应以掌握检测技术的基本理论、变换元件的物理基础、变换器和检测系统的结构及设计要点、注意灵活应用这些知识来解决实际问题的方法为主。

本书分上、下两册出版。上册共两篇十六章。第一篇主要阐述测量的基本理论。其中第一章介绍检测技术的基本概念。第二章阐述测量误差的基本理论。第三章讨论变换器的信息-能量理论。第四、五两章介绍测量线路。第二篇共十一章。它阐述各种信息采集的变换原理和变换元件。其中包括机械的、流体的、电的、光的、半导体的及核辐射的变换元件。主要介绍它们的基本原理、特性、误差、结构和设计等问题。在各章中尽可能多地介绍一些新型变换元件。考虑到半导体变换元件在检测技术中的应用日益广泛,所以将半导体变换元件单独列为一章。

下册包括第三、第四两篇,在第三篇中介绍信息传输的基本原理、信息处理的基本方法、模拟和数字数据的处理。第四篇介绍自动检测系统的设计,并详细讨论一些典型检测系统的实例,包括微型计算机在检测系统中的应用。

第一篇 测量技术的理论基础

第一章 测量技术的基本概念

§ 1-1 测量的概念和定义

一、测量的一般概念

测量就是用专门的技术工具靠实验和计算找到被测量的值（大小和正负）。测量的目的是为了在限定时间内尽可能正确地收集被测对象的未知信息，以便掌握被测对象的参数及控制生产过程。例如用电压表测量电路中某点对地电位的数值、在连续生产过程中例如在电厂中对锅炉水位的检测、钢厂中对热风炉风温的检测等。

1. 测量的定义 测量就是以同性质的标准量与被测量比较，并确定被测量对标准量的倍数（标准量应该是国际上或国家所公认的，性能稳定的）。

上述定义用数学公式表示，则为

$$g = \frac{x}{V} \quad (1-1)$$

式中 x —— 被测物理量；

V —— 标准量；

g —— 比值，无量纲的数值。

由式（1-1）可见 g 的大小随所采用的标准量、即测量单位的大小而定，所采用的单位愈小，对给定被测量 x 而言，其比值 g 愈大。为了把测量结果正确反映出来，常须在测量结果 g 的后面标明标准量 V 所用的单位。

式（1-1）称为测量的基本方程式。

在天平称重时物重是被测量 x ，砝码是标准量 V 。水银温度计在测量室温时，被测室温是 x ，温度计上的刻度就是标准量 V 。

2. 测量过程 为简明起见，由最简单的例子——天平称重的分析来考察测量过程。首先应检查空天平是否平衡，即所谓调零。接着为了比较被测量和标准量，把重物和砝码分别放到两侧称盘中，这叫对比。然后判别谁重谁轻，这可以借助于观察天平中间的指针偏向何方，以判别有无差值，这叫示差。如存在差值就要调整砝码的大小，一直到砝码与重物平衡时为止，这个调节的动作就叫平衡。示差和平衡动作完成之后就可根据砝码的大小和多少（必要时再加指针偏移大小）读出（或算出）物重的数字值，这叫读数。

综上所述，整个测量过程包括对比、示差、平衡和读数四个动作。它是贯穿在一切测量过程中的。要改进测量就应简化和完善这些比较动作。

在生产过程中希望自动实现上述测量过程，即上述四个动作能自动完成，这就是自动检测技术研究的内容之一。在过程自动检测中，通过对仪表的标定，将标准量传递到仪表的刻

度上,被测量通过变换,变成一定的指针转角,与标尺刻度对比,平衡后指针稳定下来就可进行读数。对比与平衡这些测量过程都是自动进行的。

3. 测量变换的概念 测量的关键在于被测量和标准量的比较,但是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量。例如用水银温度计测室温时,室温被变换成玻璃管内水银柱的热膨胀位移,而温度的标准量为玻璃管上的刻度,这时被测量和标准量都变换到线位移这样的中间量,以便直接进行比较。可见通过变换可以实现测量,或者使测量更为方便。变换是测量的核心。

综上所述,变换是指把被测量按一定的规律转变成便于传输或处理的另一种物理量的过程。最简单也是最理想的变换规律是变换前与变换后的参数成比例关系。变换元件的这种特性叫线性特性。

变换元件是以一定的物理定律为基础的,它完成一个特定的变换任务。多个变换元件的有机组合可构成变换器或测量仪表,后者将被测量一直变换到观测者能直接感受为止。

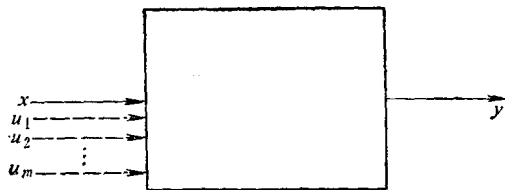


图1-1 变换元件方块图

二、测量仪表的基本功能

测量仪表(装置)是实现测量的物质手段,各种测量仪表就其所具备的基本功能而言都是一样的,一般说来具有变换、选择、比较和显示四种功能。

1. 变换功能 这个功能在测量变换概念中已经谈过,现补充如下。设被测量为 x , 经变换后为输出量 y , 它们的函数关系(也常叫变换函数)为 $y = F(x)$, 但这是理想情况,实际物理系统中还有许多其它影响因素($u_1, u_2, \dots, u_m$)以不同的程度影响着 y , 故有

$$y = f(x, u_1, u_2, \dots, u_m) \quad (1-2)$$

见图 1-1。所以变换元件的输入量与输出量之间实际上是一个多变量函数。

放大可看作变换的一种特殊形式,即同类量的变换。

2. 选择功能 设计制造仪表时,除特定的输入输出关系外,一般不希望 $u_1, u_2, \dots, u_m$ 等影响因素对 y 起作用。即仪表应该具有选择有用输入信号、抑制其它一切无用影响因素的功能。这种选择功能是测量仪表重要的功能之一。

以最常用的电阻丝式变换元件为例,它利用金属丝把被测量 x 的变化变换成电阻 y 的变化。但金属丝电阻 y 的变化是随金属的种类(u_1)、纯度(u_2)、尺寸(u_3)、温度(u_4)等多种因素而改变的。当要利用该金属丝作为电阻温度计时,则输入量为温度,这时尺寸、纯度等因素的影响应该抑制。当利用金属丝作为应变元件时,则输入量是应变,这时纯度、温度等因素的变化对电阻的影响应尽力消除。即应该具有选择应变而抑制一切其他影响的功能。

总之,变换是测量的基础,但无用有害的影响要借助变换器的选择功能来加以抑制。仪表的原理选取、结构设计及性能优劣都与变换和选择功能的密切配合有关。

3. 比较功能 通常被测量和标准量都要变换到一定程度才能比较。模拟式仪表中标准量通常表示成仪表盘的刻度,比较过程由测量者在读数时执行。数字仪表中先将被测量转换成数码,然后与仪表内标准脉冲或标准时间进行比较,比较过程实际上是脉冲的计数过程。在比较过程中标准量应该保持稳定。如果有变化时应能进行校正。

4. 显示功能 显示是人—机联系方法之一。它将测量结果用指针的转角,记录笔的位移、数字值及符号文字(或图象)显示出来。因而显示方法也可相应分为指示、记录、打印等。

指示仪表显示的示值仅是被测量的瞬时值,如要显示被测量的时间历程,就必须有记录走时机构。

关于专门实现显示功能的仪表将在显示技术课程中介绍。

§ 1-2 测量仪表的构成和基本性能

一、测量仪表的构成

测量仪表是由若干个变换元件联接而成的。根据不同的联接方式仪表主要有两种结构,即直接变换型结构和平平衡变换型结构。不同的联接方式对仪表的性能影响较大。

直接变换型结构的特点是全部信息变换只沿一个方向进行,见图 1-2,它是一个开路系统。在这种系统中每个环节传递系数

(如图中 K_1 、 K_2 、 K_3 等)的变化以及作用于每个环节上的干扰(如图中 u_0 、 u_1 、 u_2 、 u_3)都会毫无衰减地影响输出量 y 。因此,这种结构的仪表对每个变换环节的要求都很高。

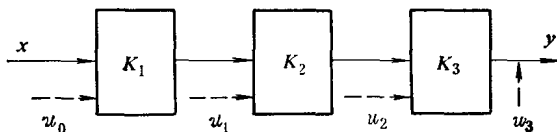


图1-2 直接变换型结构

平衡变换型结构存在两个变换回路,如图 1-3 所示,一个正向变换回路,它的组成环节的传递系数为 K_1 、 K_2 、 $\dots$ 、 K_n 。一个反向变换回路,它的组成环节的传递系数为 β_1 、 β_2 、 $\dots$ 、 β_m 。反向回路的输出为 x_y ,它与输入量 x 进行比较。它们的偏差 Δx 加到正向回路的输入端。当正向回路总的传递系数

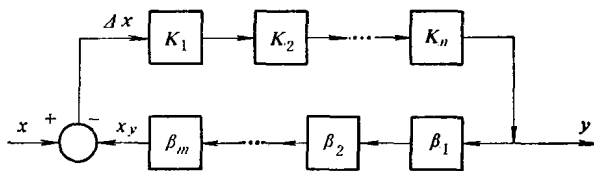


图1-3 平衡变换型结构

$K = \prod_{i=1}^n K_i$ 相当大时, Δx 仅是输入量 x 的很小一部分,因而正向回路成为只是发现和接收偏差 Δx 的环节。平衡变换型结构的特点是整个仪表形成一个负反馈闭路系统。如果 $(K_1, K_2, \dots, K_n)(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m) \gg 1$, 即 $K\beta \gg 1$ 时就可得

$$y \approx \frac{1}{\beta} x$$

由此式可见,正向回路中各环节性能的变化不会影响仪表的输出 y 。所以只要细心制作反向回路就可以保证较高的精度。

二、仪表的基本性能

评价仪表品质的指标是多方面的,但作为仪表的基本性能,主要是衡量仪表测量能力的那些指标,如精确度、稳定性、测量范围、动态特性等。

下面主要介绍三个方面:仪表的精确度;仪表指示的稳定性;仪表的输入、输出特性。

(一) 精确度

说明精确度的指标有三个：精密度，正确度和精确度（以下简称精度）。

1. 精密度 δ 它说明仪表指示值的分散性。即对某一稳定的对象（被测量）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（示值）的分散程度。 δ 愈小则说明测量愈精密。例如某温度仪表的精密度 $\delta = 0.5^\circ\text{C}$ ，意即多次测量结果的分散程度不大于 0.5°C 。

2. 正确度 ε 它说明仪表示值偏差大小的程度。即示值有规则偏离真值的程度。例如某流量表的正确度 $\varepsilon = 0.3 \text{ m}^3/\text{秒}$ ，意即该表的指示值与真值偏离 $0.3 \text{ m}^3/\text{秒}$ 。

3. 精度 τ 它含有精密度与正确度两者之和的意思，即测量的综合优良程度。在最简单的场合下可取两者的代数和，即 $\tau = \delta + \varepsilon$ 。精度最终是以测量误差的相对值来表示的。

在工程应用中，为了简单表示仪表测量结果的可靠程度，引入一个仪表精度等级的概念，用 A 来表示。仪表精度等级 A 以一系列标准百分比数值（0.001；0.005；0.02；0.05；……1.5；2.5；4.0；6 等）进行分档。这个数值通常是仪表在规定条件下，其最大绝对允许误差值相对于仪表测量范围的百分数。它可以用下式表示

$$A = \frac{\Delta_g}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 Δ_g ——仪表在全刻度范围内的最大绝对允许误差；

$x_{\max}, x_{\min}$ ——仪表刻度盘的上限和下限值；

A ——仪表精度等级。

科学研究用的仪表其精度等级值约在 $10^{-1} \sim 10^{-10}$ ；工业检测用的仪表其精度等级值约在 $10^{-1} \sim 4.0$ 。

(二) 稳定性

说明示值稳定性的有二个指标。一是时间上的稳定性，以稳定度表示。二是仪表外部环境和条件变化所引起示值的不稳定，以各种影响系数表示。

1. 稳定度 它是由于仪表中随机性变动、周期性变动、漂移等引起示值的变化。一般它以精密度的数值和时间长短一起表示。例如电压波动引起每 8 小时变化 1.3 毫伏，则写成稳定度 $\delta_s = 1.3 \text{ 毫伏}/8 \text{ 小时}$ 。

2. 环境影响 室温、大气压、振动等等的外部状态变化给予仪表示值的影响，以及电源电压、频率等仪表工作条件变化给予示值的影响统称环境影响，用影响系数来表示。例如周围介质温度变化引起仪表示值变化的影响，可以用温度系数 β_t （示值变化/温度变化）来表示。电源电压变化引起示值变化的影响可以用电源电压系数 β_u （示值变化/电压变化）来表示。例如电压每变化 10% 引起示值变化 0.02 毫安时，可写成 $\beta_u = 0.02 \text{ 毫安}/10\%$ 。

(三) 仪表输入输出特性

说明仪表输入、输出对应关系的主要性能的有灵敏度、灵敏限、线性度、滞环和动特性。

1. 灵敏度 灵敏度是指仪表在稳态下输出变化对输入变化的比值，用 S 表示，即 $S = \frac{dy}{dx}$ 。它是仪表静特性曲线（仪表在稳态下输入输出的关系）上各点的斜率。见图 1-4 中曲线 a 。在线性特性（如图中虚线）的仪表中灵敏度 S 是常数。在非线性特性（如图中线

a) 的仪表中灵敏度 S 在整个量程内不是常数。

2. 灵敏限 通常灵敏限是指仪表示值发生可察觉的极微小变化时所需被测量的最小变化值, 用 Δx_s 来表示。它的单位与被测量的单位相同。

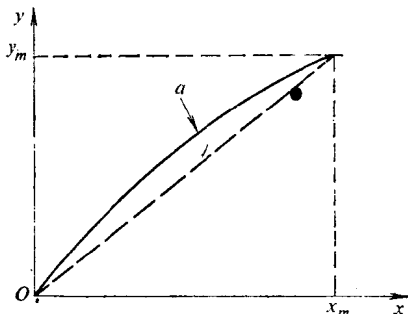


图1-4 仪表的静特性曲线

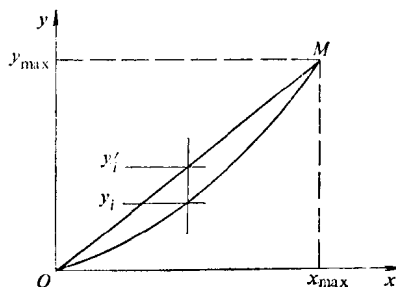


图1-5 求取仪表线性度的示意图

从定量观点看灵敏限的上述定义是不严密的。因为可察觉的极微小的变化和最小变化值 Δx_s 在数值上都是不明确的, 而且仪表示值可察觉的极微小的变化也不可能与噪声等影响完全分开, 后者又常常是随机性的, 因而所谓输入量的最小变化值 Δx_s 就不可能可靠地求得。所以通常把仪表中的零位误差值 Δ_0 (详见 § 2-1) 定为该仪表的灵敏限 Δx_s , 即在数值上 $\Delta x_s = \Delta_0$ 。据此, 当输入量 x 逐渐增大到灵敏限时仪表的相对误差刚好为 $\gamma = \frac{\Delta}{x} = \frac{\Delta_0}{\Delta x_s} = 100\%$ 。式中 Δ 为仪表误差。

3. 线性度 线性度用来说明输出量与输入量的实际关系曲线偏离直线的程度。无论是模拟式的仪表, 还是数字式的仪表, 都希望它们的特性是线性关系。这样模拟式仪表的刻度就可以做成均匀刻度, 而数字式仪表就可以不必采用线性化环节。

通常采用如下的最简单的线性度表示法。首先校正仪表的零点和对应于最大输入量 $x_{\max}$ 的最大示值 $y_{\max}$ 点, 得 O 点及 M 点。将连接 O 点和 M 点的直线作为基准直线, 见图 1-5。然后在图上求出输入、输出实际特性曲线与基准线之间的最大偏差值 $|y_i - y'_i|_{\max}$, 于是线性度 E_l 为

$$E_l = |y_i - y'_i|_{\max} / y_{\max} \quad (1-4)$$

如把理想的直线关系作为仪表的实际特性, 则 E_l 就成为线性误差。

4. 滞环 它说明一个仪表正向 (上升) 特性和反向 (下降) 特性不一致的程度。

如图 1-6 所示, 被测量 x 连续增加时读得的输出 y_c 与被测量连续减小时读得的输出 y_d 之间的差值叫滞环误差, 用 ε_h 表示, 则有

$$\varepsilon_h = |y_d - y_c|$$

在整个测量范围内产生的最大滞环误差以 ε_{hm} 表示, 它与最大的被测示值 $y_{\max}$ 的比值以 E_{hm} 表示, 则有

$$E_{hm} = \frac{\varepsilon_{hm}}{y_{\max}} = \frac{|y_d - y_c|_{\max}}{y_{\max}}$$

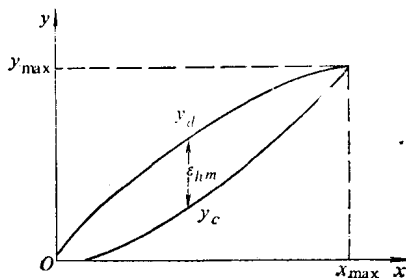


图1-6 求取滞环误差的示意图

一般用百分数表示

$$E_{hm} = \frac{\varepsilon_{hm}}{y_{max}} \times 100\% \quad (1-5)$$

5. 动态特性 当测量随时间而变化的参数时必须研究仪表及被测对象的动态特性。大部分模拟式仪表的动态特性可以用微分方程或传递函数来完整地描述, 但它们的直观性很差, 也很难用实验方法求得。所以常用典型输入信号和给定初始条件下的特解作为仪表动态特性的描述。常用的有过渡函数 $h(t)$ 和脉冲过渡函数 $w(t)$ 。过渡函数 $h(t)$ 是当输入 $x(t)$ 为单位阶跃变化, 初始条件为零时仪表输出 y 随时间而变化的曲线 (叫时间历程), 由于过渡函数的测试和分析比较方便, 所以用得较多。一般当仪表的稳态输出值 $h(\infty)$ 愈快达到, 则仪表的惯性愈小。图 1-7 b 就是仪表的过渡函数曲线。图 1-7 a 是理想的阶跃输入曲线, 虽然这种理想的阶跃输入实现起来也很困难, 但只要输入上升段与测量仪表动态特性的过渡函数曲线的上升段相比可以忽略的话就行了。

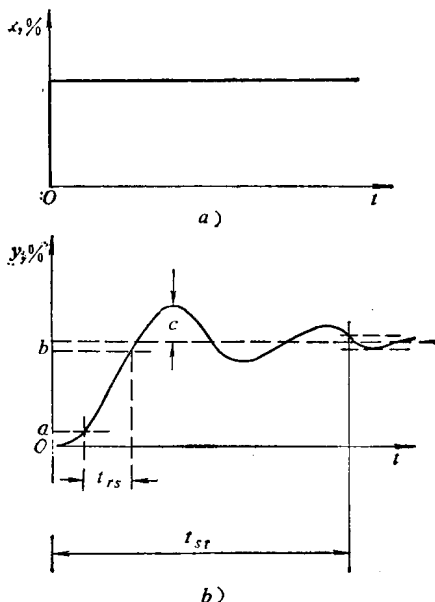


图1-7 仪表的过渡函数

通常用几个参数来表示过渡函数。例如过渡函数 $h(t)$ 能近似成指数函数时, 则仪表动态特性可用一个时间常数 T 来表示。在一般情况下 $h(t)$ 用上升时间 t_{rs} , 响应时间 t_{sr} , 过冲量 c 等参数来综合描述, 如图 1-7 b。这些参数的意义如下:

上升时间 t_{rs} 是指仪表的示值从最终值的 $a\%$ 变化到最终值的 $b\%$ 所需的时间。 $a\%$ 值常采用 5% 或 10% ; 而 $b\%$ 值常采用 95% 或 90% 。例如从最终值的 10% 变化到 90% 的时间为 0.1 秒时, 可写成 $t_{rs} = 0.1$ 秒 ($10\% \sim 90\%$)。

响应时间 t_{sr} 是指从输入量 x 开始变化到仪表示值进入最终值的规定范围内所需的时间。最终值的规定范围常取仪表允许的误差值。这个数值应与响应时间一起写出。例如 $t_{sr} = 0.6$ 秒 ($\pm 2\%$)。

过冲量 c 是指输出最大振幅与最终值之间的差值, 常用对最终值的百分数表示。

脉冲过渡函数 $w(t)$ 就是当输入 $x(t)$ 为单位脉冲, 初始条件为零时仪表输出 y 的时间历程。 $w(t)$ 衰减得愈快, 仪表的惯性就愈小。

仪表的频率特性说明仪表在某个频率的正弦输入信号下, 稳态输出信号在幅值和相角上的比值和差值。频率特性常用波德图表示。幅频波德图上的频宽是一个描述动态特性的重要指标。频宽就是输入信号的频率使增益变化不超过 $\pm K$ 分贝 (例如 ± 3 分贝, 即 $K = 3$) 的频率区间。例如某仪表在输入信号频率从 80 赫到 1500 赫内增益变化刚达到 (不超过) ± 3 分贝, 则该仪表的频宽可写成 $\Delta f = 80 \sim 1500$ 赫 (± 3 分贝)。一般测量静态值和缓慢变化量的仪表要求其频宽为 $0 \sim 2$ 赫, 测动态量时仪表应有的频宽为 $10 \sim 10^4$ 赫。

从研究动态特性来说常用的检测仪表由下列环节组成: 放大环节、非周期环节和振荡环

节。希望检测没有延迟和失真,即要求在相当宽的频带内是一个放大环节。非周期环节可近似地以一个纯滞后环节和一个指数环节来代表,这时希望滞后时间和时间常数都尽可能地小。振荡环节则常以二阶振荡环节来近似。后者的两个重要参数是阻尼比 ζ 和响应时间 t_s 。要使检测仪表有较宽的频带,则阻尼比宜控制在0.5附近。

检测仪表的动态误差是动态中和静态中测量误差的差值。

§ 1-3 检测技术的发展概况

随着科学技术、工农业生产迅猛向前发展,人民生活水平不断提高,检测技术在概念、被测对象的领域、检测工具、方法、理论等方面也相应在发展。

一、在测量概念方面

(1) 目前像环境测量、海洋测量、宇宙测量、生体测量等等各种新的测量领域在不断扩展,其中被测量的表示已不是简单的数值和符号所能满足了,而是要求配有必要的文字、曲线、图表。如对温度场的测量,最好是有一幅该温度场的图像,全面地显示该场各处的温度。又如产品的内伤、地球内藏资源、人类的生理、心理、精神等方面的测量也不能只用简单的数值来表示,而需要综合判断。

(2) 测量愈来愈跟计算紧密结合起来了,例如测量中直接修正非线性,从多次测量值中自动求取平均值以及作某种统计运算,以便提高测量精度。凡此种说明测量概念中已离不开计算的概念了。

(3) 对某变量的现在值和过去值的测量、运算、分析,以便予计(猜测)将来值,这种予测技术也是一种测量,而且是一种愈来愈显得重要的测量。像对地震、气候、病情的予测就是这样的测量。

由此可见,测量的概念随着事物的发展也在变化。不能停留在只是比较数量大小的概念上。

二、在测量对象和测量领域方面

科学、生产、生活的发展极大地扩展了人类的活动范围,它对测量的影响首先反映在新的测量对象、领域和新的测量要求上。例如对人类本身的测量无论从医学、教育、公害等方面的要求看都加强了。这就涉及到很多有关人的心理、生理、精神方面新的被测量,如不安感、疲劳度等等。空间科学的发展提出很多新的测量课题,如某些被测量(空间的气压和气温)的变化范围很宽,要求仪表量程也很宽,且能自动切换量程。再如环境科学中要求测量含量极低的污染物质,甚至低至十几亿分之一,这就要求有灵敏度特别高的仪表和测量方法。军事、交通、农牧业等均迫切要求对气候作出精确预报,这就要对地球大气高、低层运动的各种参数(温度、压力、水汽含量、海面温度、风速、云层等等)作快速综合测量。

三、在测量工具和方法方面

为了解决上述领域中测量的新课题,应不断研究出各种新的测量方法和测量工具。最重要的便是研制各种新的检测变换器。这一方面要依靠找到新的物理定律、原理作为新型检测仪表的物理基础。例如测量地球到月球的距离(约40万千米),如果利用新的激光脉冲测量原理,可使测量精度大大提高。利用微波遥感探测新技术便能不分昼夜地对被测对象进行检测。另一方面应充分利用各种新技术来扩大仪表的测量功能。例如近年来在测量仪表中引入

微处理机进行数据的分析、计算、处理、校验、判断及储存等工作，实现了原来单个仪表根本不可能实现的许多功能，大大提高了测量效率、测量精度和测量的经济性。如国外有些数字电压表，内附微处理机以后，就具有自动校正、自动调节零点、存储最低和最高测量值、计算平均值和自己判断误差的能力。

测量信息数字化也是当前的主要趋势之一。这种方法使信息的传输、存储、运算、判断、显示等大为方便，大大提高了测量的可靠性和稳定性。例如目前工业上质量比较高的模拟仪表，其典型漂移值约为 $0.1\%/小时$ ，对标准信号 $1\sim 5$ 伏而言，其漂移值为 5 毫伏/小时。在抗干扰方面，百米长的电缆可有 5 毫伏的噪声电压，故仪表的总精度不会优于 0.2% 。但是对数字仪表来说，只要能辨别“0”和“1”，就不会受噪声的影响。例如一般数字电路中高电平是 5 伏，则它一千倍于噪声电平，当然噪声对它的影响就很小。漂移问题也不存在。故就可靠性和稳定性来看，数字仪表优于模拟仪表，因此由数字仪表组成的检测系统愈来愈多地得到应用。此外为了适应八十年代电子计算机的广泛应用和近年来微处理机的迅速发展，为了使变换器能直接与计算机衔接起来，目前正致力于研究数字式变换器。

四、在测量理论方面

(1) 目前信息论在测量技术中已经开始应用，它主要应用在误差理论方面，信息——能量理论的应用还主要限于电测仪表。

(2) 利用计算机具有高速处理大量信息的特点，就可以在测量中引入统计技术，对数百、甚至数万个数据求平均值，作最小二乘法的处理，快速富里哀变换等，因此数理统计、相关技术、计算机辅助设计，甚至控制论等都在检测技术中应用日广。

总起来说，测量中应用的主要技术从机械学、热力学、电工学、电子学，发展到今天的自动控制技术、计算机技术、信息处理技术。测量中应用的基础元件也相应的从变换器、放大器发展到反馈闭路系统、电子计算机和今日的微处理机。测量的概念也从比较、定量化、变换、放大等概念发展到控制、计算、信息等概念。

检测技术在五十年代经过一次电子化的飞跃以后，目前正在积极采用计算机（包括微处理机）技术来实现检测技术的新的飞跃。

第二章 测量误差的理论基础

研究测量误差的理论,其目的一方面是要在认识和掌握误差规律的基础上,指导设计、制造、使用测量仪表。另一方面是指导测试工作。因为解决一项测量任务时,需要分析被测对象和被测量的特性,选用适当的仪表和设备,采用一定的测量方法,组成合理的测量系统,保证某些必要的测量条件,对测量结果进行数据处理和恰当的评价。所有这些工作都离不开误差理论的指导。本章将分别讨论上述两方面的内容。主要着重于仪表设计方面的问题。

§ 2-1 误差及其分类

一、误差的基本概念

测量是一个变换、选择、放大、比较、显示诸功能的综合作用,又是一个对比、示差、平衡、读数的比较过程。如果这些过程是在理想的环境、条件下进行,即假设一切影响因素都不存在,则测量将是十分精确的。但是,这种理想的环境和条件在实际中是不存在的。无论是测量设备、仪表,测量对象,测量方法,测量者本身,都不同程度地受到本身和周围各种因素的影响。当这些因素变化时,必然会影响到被测量示值的大小,使示值与被测量的真值之间造成差异,这个差异就是测量误差。

测量的最终目的是求得被测量的真值,但是真值是永远测量不到的,只能以不同的精度逼近真值。在实际中,对给定的测量任务只需达到规定的精度就行了,决不是精度愈高愈好。盲目地提高测量精度的做法,往往会带来相反的效果,浪费劳动力和财力,降低测量的可靠性。

在解决生产过程中的测量任务时,必须根据测量的目的,全面考虑测量的可靠性、精度、经济性和使用简便性。而在科研工作中测量精度的要求往往是放在第一位的。

下面介绍误差、修正值、约定真值等名词。

示值与被测量真值之间的差值叫误差

$$\Delta = M - T \quad (2-1)$$

式中 Δ ——误差;
 M ——示值;
 T ——真值。

在实验室测量和计量工作中常用修正值。示值加上修正值就可得到真值,故有

$$\alpha_c = T - M \quad (2-2)$$

式中 α_c ——修正值。

比较式(2-1)和式(2-2)可知,修正值与误差大小相等方向相反,即

$$\alpha_c = -\Delta \quad (2-3)$$

例 某压力用压力计G测得为1000.2牛顿/米²,该压力用更精确的方法测得为1000.5牛顿/米²,后者近似地可视为被测压力的真值,所以压力计G在该点的修正值为,

$$\alpha_0 = 1000.5 - 1000.2 = 0.3 \text{ 牛顿/米}^2$$

从理论上说真值是无法知道的。但在实践中常这样来定义测量中的真值：真值是指测量次数无限多时所求得的平均值。这是根据误差对称分布时正负误差出现的机会相等，在没有系统误差（或系统误差用校正法给以消除）的情况下，各次示值相加以后求平均值，就能得到极接近于真值的数值。由于测量次数总是有限的，所以平均值还不是真值，我们称它为约定真值。

应该指出，误差是指示值与真值之差，而把示值与平均值（约定真值）之差，叫做偏差。但在习惯上误差和偏差已经不加区分了，且一般都叫误差。

二、误差的分类

（一）按误差出现的规律分类

1. 系统误差 系统误差是指服从一定规律（如定值、线性、多项式、周期性等等函数规律）的误差。即多次测量时误差按一定的函数规律出现。引起系统误差的原因是仪表作用原理不完善；仪表本身材料、零部件、工艺有缺陷；测试工作中使用仪表的方法不正确；测量者有不良的读数习惯等等。例如用电位差计测量电势时，工作电流回路中蓄电池的电压将随电池放电而下降，在短期内可引起随时间线性变化的系统误差。又如等臂天平的两臂不完全相等时，将会引起一个定值误差。

系统误差的特点是有规律性，它总可以归结为一个或几个因素的函数。因素和规律经过仔细研究是可以掌握的，所以在引入相应的校正值以后，系统误差是可以消除的。

系统误差决定了测量的正确度，系统误差愈小，测量就愈正确。

2. 随机误差 随机误差是指服从统计规律的误差，用 δ 表示。它产生的原因是由很多复杂因素微小变化的总和引起的，很难分析。然而，对其全部总和则可以用统计规律（如正态分布、均匀分布、离散双值分布、辛普松分布等等）加以描述。例如传动链的间隙引起的误差属于双值离散分布；摩擦引起的误差属于均匀分布；仪表对正弦干扰电压的检拾造成的误差属于反正弦分布。大量的随机误差则服从正态分布。随机误差不能用校正方法加以消除。

但它的大小与测量次数 n 有关，随 n 增大，随机误差的算术平均值 $\left(\sum_{i=1}^n \delta_i / n \right)$ 将逐渐减小。

随机误差决定测量的精密度，它的平均值愈小，测量愈精密，多次重复测量时分散性小。

3. 缓变误差 缓变误差是指数值上随时间缓慢变化的误差。一般这种误差是由于零部件老化过程所引起的。例如电子管老化过程引起放大倍数的缓慢变化；机械零件内应力变化引起的变形；记录纸收缩等等。这种误差的特点是单调缓慢变化。可在某瞬时引进校正值加以消除，经过一段时间又需要重新进行校正，消除新的缓变误差。系统误差一般只需一次校正，而缓变误差需要不断的校正。

4. 疏忽及粗大误差 它是一种显然与事实不符的误差。没有任何规律可循。它主要是由于操作者粗枝大叶、过度疲劳、操作有错或偶然一个外界干扰等引起的。例如读错刻度值，计算出错，偶然有一个冲击等等。

疏忽及粗大误差在测量中是不允许的，其测量结果是无效的，一旦发现必须去除。

应该指出本类中的疏忽及粗大误差不是仪表本身固有的，主要是测量过程中的过失造成的。