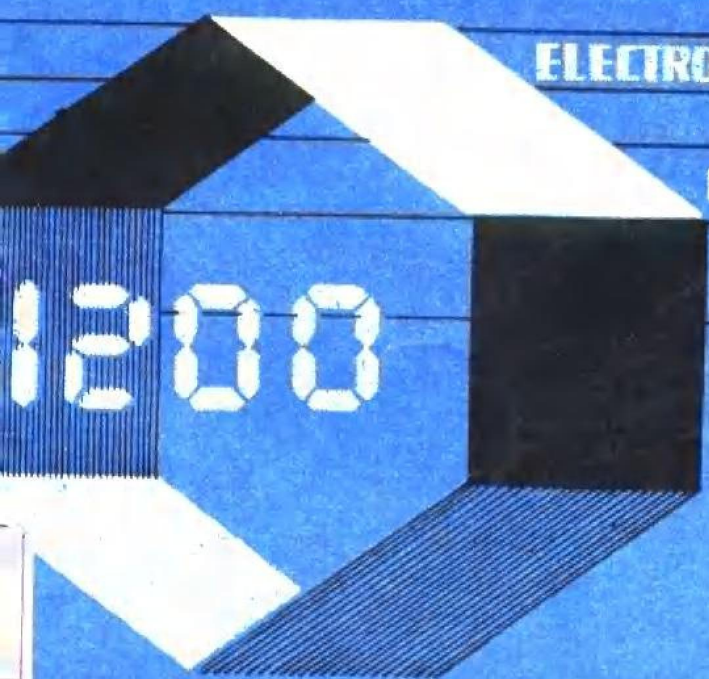


王家桢 顾利忠 刘蜀仁 编著

王家桢 主编

电动显示 调节仪表

ELECTRONIC INSTRUMENTATION FOR
INDICATION AND CONTROL



清华大学出版社

内 容 提 要

本书为了适应近代新技术发展的需要,既介绍当前广泛应用的模拟式仪表,又介绍带有微机的数字式仪表。显示仪表和调节仪表关系密切,写在同一本书中有利于对比分析,也便于掌握自动化系统的知识,这是本书的特点。本书由浅入深,结合实际地讲述典型仪表原理,同时对典型仪表的特性、选用原则和调校方法作了介绍,除可供高等学校有关专业用作教材外,也可供自动化工程技术人员自学参考。

电动显示调节仪表

王家桢 顾利忠 刘蜀仁 编著

王家桢 主编

清华大学出版社出版

(北京清华园)

河北省永清县印刷厂印刷

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 $19\frac{1}{2}$ · 字数 477 千字
1987年12月北京第1版 1987年12月北京第1次印刷

印数 0601~8000

统一书号: 15235·338 定价: 3.60元

ISBN 7-302-00157-X/TH·5(课)

前 言

工业生产过程中,各种参数的检测和控制,要用到多种多样的仪表,其中大多数是用电信号传递和处理信息的,称为电动仪表。

检测系统应包括电信号的获取部分,即敏感元件或传感器。这部分的内容已安排在《检测技术》课程中,因此在《电动显示调节仪表》这门课程里,只讨论转变为电信号之后所用的指示、记录和调节仪表。

电动仪表可分为数字式和模拟式两类,本课程以目前工业生产所普遍应用的模拟式仪表为主,也适当安排了部分数字式仪表的内容,对于近来发展较快的带微机的仪表,也有典型介绍。

学习本课程可以了解典型电动显示调节仪表的原理、特性、选用原则和调校方法,必要时能对原有仪表进行改装。对非典型的仪表,也能独立分析,正确使用。当生产或科研有特殊需要时,能从事专用仪表的研制工作。

电动显示调节仪表的种类繁多,原理不同,线路各异,而且不断地推陈出新,更新换代。因此,必须掌握普遍规律,灵活运用,学会分析研究的方法。但是,如果脱离具体仪表,则原理无从体现,规律难以捉摸。空谈分析研究的方法,势必抽象玄虚,无法理解。本教材的安排是针对少数几类典型仪表,介绍线路,解释原理,在分析讨论中逐步积累实际知识,建立基本概念。通过学习,总结对比,不难概括成共同的理论基础。

由于仪器仪表是一门知识面宽、翻新很快、实践性强的学科,单靠书本知识显然不够,应特别重视自学和实际动手能力的培养。为此,除课堂讲授外,必须安排实物观察、参观、演示及实验等环节。为了便于组织自学,本教材篇幅较大,可酌情指定一部分内容课外阅读。

考虑到教材不同于科技报导,应以较成熟的技术内容为主。某些革新成果或专利,即使在一定程度上反映技术发展的趋势或动态,也不宜作为教材的基本内容,可在其它环节里引入,或作为课外阅读的材料。

本课程安排在《自动调节原理》、《电子技术基础》和《计算机原理》课程之后,所以有关这三门课中所建立的概念和分析方法,在本教材里将直接引用。实际上本课程是上述三门课中所讲授理论的具体应用。

本教材由清华大学自动化系王家桢、顾利忠、刘蜀仁三位同志编写,由王家桢同志任主编。由于我们的水平有限,内容一定有不少错误之处,恳切希望得到批评和建议。

序

在为振兴经济开展企业改造的任务中,仪表起着重要的作用。现代化的工业生产,要依靠各种显示仪表提供信息,使人们了解生产情况,正确而及时地操作。还要利用各种调节仪表实现自动控制,保证生产过程在完全、高效、优质、节能的要求下顺利进行。如果认为自动化是现代化的催化剂,那么,没有仪表就没有自动化,也就难以实现现代化。

为了适应这种形势,我国已有不少院校设置了自动化仪表专业,并且出版了一些教材。我看了本校自动化系王家桢等同志编写的《电动显示调节仪表》之后,认为它有以下几方面的特点:

一、从内容的范围来看,通常是将显示仪表和调节仪表分为两个独立的部分,教材也分别编写,本书则将二者合在一起。因为它们只是在功能上有所不同,而在基本概念、基本原理和基本方法上却是一致的。合起来之后,不仅能使读者对仪表自动化系统有一个更完整的认识,还可能对课程改革起一定的促进作用。

二、从内容取材来看,本书针对最常见的国产典型仪表,切合国情,学以致用。

三、从内容的深度和广度来看,本书灵活地运用了电路、电机、电子技术、调节原理、计算机原理等课程中的概念、原理和方法,并在原有的基础上联系生产实际,对各种仪表的性能进行了深入分析。这样做,既加深了对上述课程的巩固程度,又培养了综合运用所学知识的能力。

四、从内容的先进性来看,本书在详细阐述了 DDZ-Ⅲ 系列电动单元组合仪表各部分的功能和工作原理之后,又扼要地介绍了 EK 调节器,使读者能进一步理解先进的设计思想。此外,还加入了目前发展较快的有微机的单回路调节器和分散型综合控制系统两章,这将为掌握先进的电动显示调节仪表及系统奠定基础。

五、从内容的表达情况来看,本书思路清楚,文笔流畅,深入浅出,便于自学。

虽然以上所说的特点,只是我个人的体会,但是,由于作者不仅具有多年的教学经验,而且长期参加科学研究和生产实践,我相信在这种背景下写出的教材,将不会使读者失望。

童诗白

于清华大学自动化系

1987年1月

目 录

前言

第一章 基本知识	1
§ 1-1 基本名词术语和概念	1
§ 1-2 仪表的分类	9
第二章 动圈式指示调节仪表	16
§ 2-1 动圈式指示仪表的原理与结构	16
§ 2-2 配热电偶的动圈温度指示仪表	23
§ 2-3 配热电阻的动圈温度指示仪表	28
§ 2-4 动圈式双位及三位调节仪表	32
§ 2-5 动圈式时间比例调节仪表	41
§ 2-6 动圈式连续电流输出PID调节仪表	44
§ 2-7 ZK-50型可控硅电压调整器	52
第三章 自动平衡显示仪表	57
§ 3-1 基本工作原理	57
§ 3-2 自动电位差计测量电路	60
§ 3-3 自动平衡电桥测量电路	65
§ 3-4 JF-12型放大器	71
§ 3-5 静态误差分析	77
§ 3-6 动态特性分析	84
§ 3-7 抗干扰措施	102
第四章 数字显示及有微机的记录仪表	109
§ 4-1 采样定理	109
§ 4-2 量化误差	112
§ 4-3 数模(D/A)转换	116
§ 4-4 模数(A/D)转换	121
§ 4-5 非线性模数转换	133
§ 4-6 数字模拟混合记录仪	138
§ 4-7 固定热印头记录仪	146
§ 4-8 DR型数字记录仪	148
第五章 DDZ-II系列电动单元组合仪表	152
§ 5-1 概述	152
§ 5-2 差压变送器	153
§ 5-3 温度变送器	162
§ 5-4 调节器	169
§ 5-5 电动执行器	180
§ 5-6 电-气阀门定位器	186
第六章 DDZ-III系列电动单元组合仪表	191

§ 6-1 概述	191
§ 6-2 安全栅和分电盘	193
§ 6-3 两线制差压变送器	200
§ 6-4 有线性化电路的温度变送器	210
§ 6-5 基型调节器	218
§ 6-6 EK 系列仪表的调节器	233
第七章 有微机的单回路调节器	248
§ 7-1 概述	248
§ 7-2 基本 PID 算式	251
§ 7-3 PID 功能的实现	257
§ 7-4 用电位器设定参数的单回路调节器	260
§ 7-5 可编程单回路调节器	269
第八章 分散型综合控制系统	279
§ 8-1 概述	279
§ 8-2 基本调节器	281
§ 8-3 标准算法	285
§ 8-4 数据通信	293
§ 8-5 CRT 显示	297
附录一 常用热电偶分度表	302
附录二 常用铂热电阻分度表	303
附录三 铜热电阻分度表	304

第一章 基本知识

§ 1-1 基本名词术语和概念

有关各种检测控制仪表的绝大多数专用名词术语,将在讨论具体仪表时相继出现,并结合具体实例解释其含义。这样更易于理解而且印象深刻。但是,某些普遍应用于仪表领域的基本概念应首先建立,否则不便讨论问题,对各种仪表的原理和性能也难以分析和比较。为此,在本节里先介绍若干最常用的基本概念,与此同时,对某些通用的名词术语,也就有了一定的了解和熟悉。

(一) 计量、检测、计、器、仪表

我国具有悠久的历史,从文献记载和出土文物中可以得知,古代劳动人民和学者曾经创造过多种计量方法和器具。远在公元前三百多年的战国时期,就有了度量衡标准。所谓“度”就是长度计量;“量”就是容积计量;“衡”就是质量计量。

现代的计量是由古代的度量衡发展而来的。随着科学技术的进步,计量的范围日益扩大。一般地说,现代计量的对象可以分为十大类,即长度计量、力学计量、温度计量、电磁计量、无线电计量、时间频率计量、化学计量、声学计量、放射性计量和光学计量。

计量工作对建设社会主义的现代化强国有重要作用。现代化的工农业生产、国防建设、科学研究和国内外贸易,都迫切需要高度发展的计量科学技术。没有完善的计量管理制度就不可能有高质量的工农业产品,没有近代计量科学技术就不可能进行先进复杂的科学研究。反之,计量科学的发展也要依靠各个领域取得的成果给予促进和不断更新。总之,在一定意义上说,计量科学技术的水平标志着一个国家经济和科学技术发展的程度。

我国1955年成立了国家计量局,统一管理全国计量工作,各省、市、自治区也都有计量管理机构,还有中国计量科学研究院从事有关的研究工作。

广义的计量是指“计量学”、“计量技术”、“计量管理”三者的统称,包括研究建立计量基准器,研究量值传递和精密测量技术,以及制定一系列的计量管理制度等。

就工程实用方面说,最常用的是对未知物理量的“测量”,或称为对某个参数的“检测”。

测量或检测的实质就是用实验的方法把某个物理量与所采用单位进行比较,从而求出数学比值,将这一过程用数学形式表示就可以写为以下公式

$$q = \frac{Q}{V} \quad (1.1.1)$$

式中, Q 为某个被测的物理量, V 为所选用的单位; q 为测得的数学比值。此式通常称为测量的基本方程式。

由上式可见,当 Q 为一定时, q 的数值大小与所采用的单位 V 有关,单位愈小则所得的数值愈大。因此,为了能确切地反映出测量的结果,必须在数学比值 q 的后面附上明确的单位。也就是说,一个完整的测量结果应该包含两部分内容,即测得的“值”和所用的“测量单位”。

随着科学技术的发展,出现了各种各样的单位制。其中有的单位制只在少数国家或地区里使用。因此,不同的国家或地区所采用的量具或仪器仪表就有可能不一样。在这种情况下,技术数据的传递和交流都必须经过换算。

由于科学技术方面的国际交流日渐频繁,而且单位制的混乱也给科学研究本身造成困难,所以有必要予以统一。在1960年第11届国际计量大会上通过了国际单位制(国际代号为SI)。我国国务院已发布通知,在我国实行国际单位制。有关国际单位制及其应用的知识请查阅国家标准总局发布的GB3100~3102-82,或查阅中国标准出版社出版的《量和单位》一书。

所谓计、器、仪表,无非是为了将被测之量与计量单位相比较而用的一些设备。

一般地说,具有指示或记录装置的仪表,宜称为“计”或“仪”,但某些被习惯称为“表”的,例如压力表、电流表等,仍可称为“表”。

没有指示或虽有指示但不作为主要功能的仪表则称为“器”,例如调节器、变送器等。不过仪表中的某些部件也有称为“器”的,如计数器、滤波器等,这就不一定是仪表了。

具有多种功能的仪表,或由多种仪表组合成的总体,可以称为“装置”,有些可以称为“机”,例如组装式电子综合控制装置、过程控制计算机等。在仪表内部某些部件也有称为“装置”的,如指示装置、发讯装置等,它本身不见得是仪表。

总之,计、器、仪等名词之间的区分不很明显,装置二字既可以代表多种功能或多种仪表的总体,又可以代表某些部件,也是比较含糊的。值得注意的是“仪表”这个词决不仅限于以指示或记录为唯一功能的设备。象调节器、变送器、执行器以及运算设备都是仪表。一些人心目中认为仪表都必须具有指针和标尺,是以检测为主要目的的设备,这种概念是十分片面的。

当然,具有指针和标尺的仪表比较直观,就以这种有指示装置以检测和显示为主要功能的仪表为例,可以形象地说明不少基本概念,况且这样的仪表确实占有重要的地位。因此,将指针和标尺的知识稍作介绍,仍有一定的实用意义。

(二) 指针及标尺分度

在生产车间现场就地安装的仪表,为了醒目,多采用矛形指针,即其端部有三角形尖头如矛状,见图1.1.1。

实验室用的台式仪表,为了消除视差,多采用刀形指针,即指针端部压成薄片状如刀形,见图1.1.2。

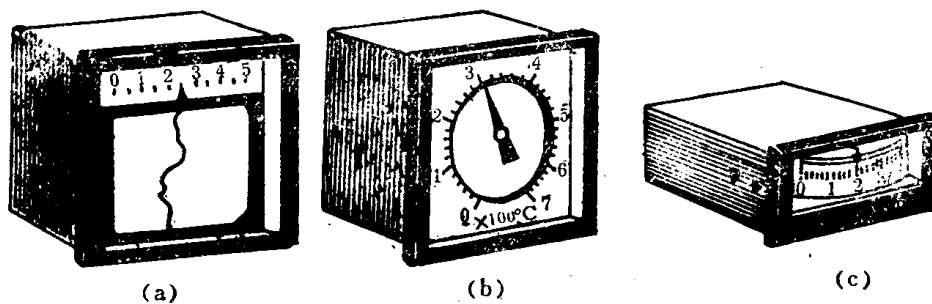


图1.1.1 工业仪表的三种外形及其指针标尺

所谓“视差”就是由于视线与标尺表面不垂直所引起的读数误差。

刀形指针的好处是在读数时如使刃部与刀背部重合，就可保证视线垂直于标尺表面，也就可以避免视差。

某些实验室用仪表，在标尺上还装有反光镜，如图 1.1.2。这也是为消除视差而设。读数时若使指针与其在镜中的象重合，就可保证视线垂直于标尺表面。

标尺的形状一般有三类，即直线式、扇面式和柱面式，分别如图 1.1.3 中 (a)、(b) 和 (c) 所示。

某些仪表的扇面标尺，其刻度分布在整个圆周上，就成为圆盘状。个别仪表的柱面标尺扩展到整个圆周，成为圆筒状。

大多数仪表的标尺是固定不动的，由指针的位移或转角决定读数。但也不尽然，也有指针不动而标尺旋转的。

标尺上有“分度标记”（即刻度，也叫“分度线”）和数字。任意两相邻分度标记的中心线之间的间隔叫做“分格”。每个分格的宽度或弧长叫做“分格间距”（也叫“分度尺寸”）。每个分格所对应的被测值之差叫做“分格值”（分度值）。

凡是具有相等分格间距和相等分格值的标尺，称为“线性标尺”，否则称为“非线性标尺”，标尺上标志着“0”数字的分度标记，叫做“零分度标记”。这个零分度标记处于分度标记的始点或终点的标尺，通常叫做“单向标尺”；如处在其间某一位置，叫做“双向标尺”，如在整个标尺上根本没有零分度标记，叫做“无零标尺”。

由始点分度标记到终点分度标记，其间的距离或弧长，叫做“标尺长度”。注意，它并不是指刻度盘本身的尺寸，也不代表指针的活动范围。

标尺上始点和终点分度标记所对应的被测值，叫做“标尺始点值”和“标尺终点值”。由这两个值所限定的被测值的范围，叫做“标尺范围”。

某些仪表的标尺上，分度标记旁的数字，或由附近的数字推算出的数值，并不直接代表被测量值，还必须乘以某个系数，此系数称为“标尺系数”。例如从分度标记上读出 2.5，标尺上还有醒目的“ $\times 100^\circ\text{C}$ ”，被测量值就应该是 250°C 。

自动记录仪表的记录纸，纸上所印的坐标分格往往与标尺上的分度标记有密切关系，在此顺便介绍。图 1.1.4 之 (a) 为“长图”（也叫“带形”）记录纸。其横坐标代表被测量，纵坐标代表时间。对应于始点和终点分度标记的两竖线之间的距离，称为记录纸的“有效宽度”。图 1.1.4 之 (b) 为“圆图”（也叫“盘形”）记录纸。它采用极坐标的形式，径向代表被测量，转角代表时间。但它和普通极坐标稍有区别。因为圆图记录仪表的记录笔常被设计

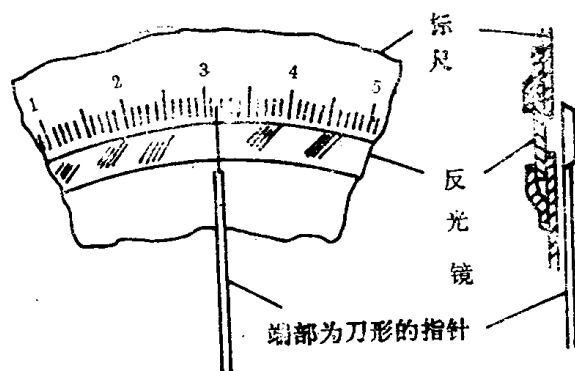


图 1.1.2 实验室仪表的指针和标尺

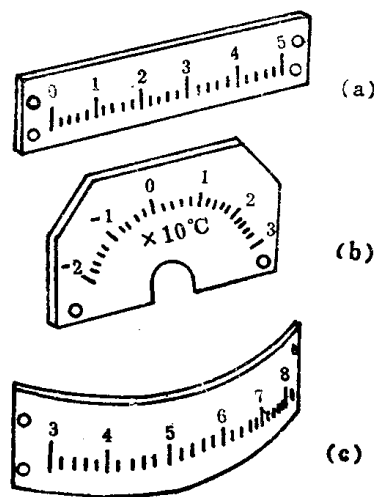


图 1.1.3 三种标尺形状

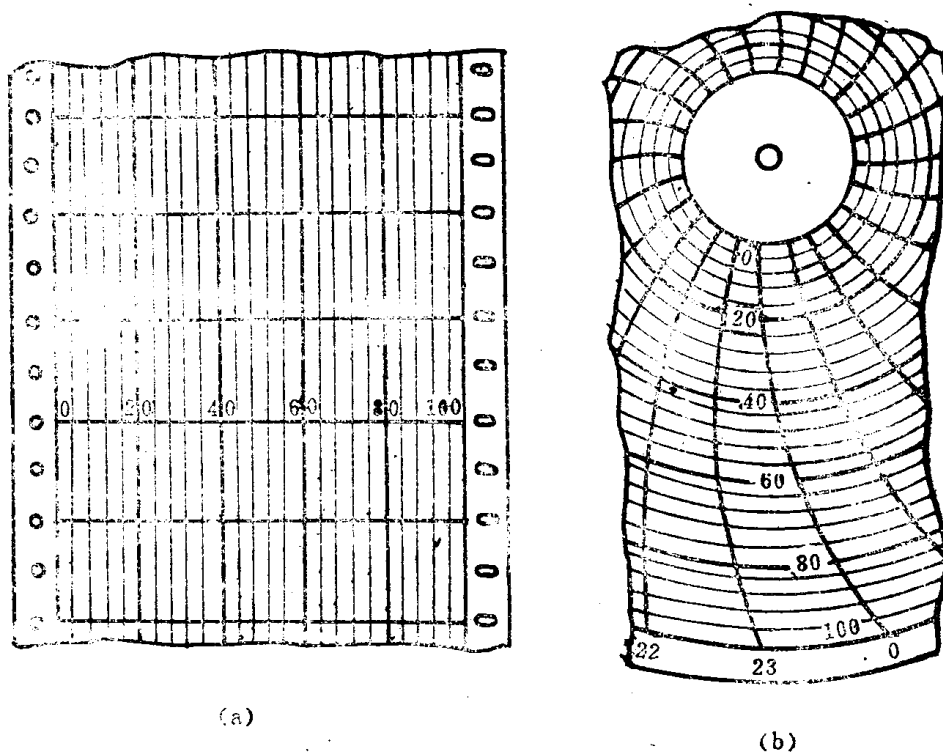


图1.1.4 长图和圆图记录纸

成摆动方式，笔尖的运动轨迹是圆弧，所以记录纸上的径向坐标并不是直线而呈弧形。

有些长图记录仪表，其走纸速度分为若干档，可由使用者根据需要自行选择，也就是说时间坐标有不同的比例。圆图记录仪表则不然，其记录纸的旋转速度通常不能改变，多半设计成每 24 小时旋转一周，每一昼夜更换一次记录纸。

与非线性标尺的性质相当，记录纸上代表被测量的坐标也可能是不均匀的。

(三) 测量范围上下限及量程

对某个仪表来说，可以按规定的精度进行测量的被测变量的范围，就叫“测量范围”。其最低值和最高值，分别叫做“范围下限”和“范围上限”，简称为“下限”和“上限”。

测量范围的表示法，就是用下限值和上限值及其间的“至”字代表。例如 0 至 100℃，-20℃至 +200℃等。

单纯“范围”二字常是指输入端测量范围，如果其前加修饰语，就可表示调节范围，标尺范围等。

上限值和下限值的代数差，称为“量程”，它通常指测量的量程。例如范围为 -20℃至 +100℃时，其量程为 120℃。

有时在“量程”二字前加修饰语，可以限定所用以衡量量程的物理量的种类。例如电量程、压力量程、温度量程等。

给出测量范围便知上下限及量程，但如仅仅给出量程，则无法判断其测量范围。

(四) 零点迁移和量程迁移

如果被测变量值相对于量程的百分数做为仪表的输入，以指针位移或转角相对于标尺长度的百分数做为仪表的输出，分别用横坐标和纵坐标表示，这样可以用曲线把“标尺特性”

描绘出来。如果是线性标尺，就会是图 1.1.5 中的直线 1。如果是非线性标尺，这条线应该是曲线。

用图形表示标尺特性的办法，不仅能够一目了然地看出标尺是否线性，而且可以借助于这种图形，说明测量范围的改变方法及其效果。有时为了满足使用的需要，可以通过技术措施，把仪表的测量范围做适当的改变。

如果测量范围改变的结果，是输入和输出间的标尺特性曲线有平移而斜率不变，例如图 1.1.5 中由直线 1 变为直线 2，则称为“零点迁移”。因为标尺上的零分度标记现在相当于输入 -25%，即零点发生了移动。经过上述迁移之后，当指针在标尺终点分度标记时，对应的输入值也发生了变化，不再是 100% 而是 75%。仪表的测量范围是 -25% 至 +75%，它的量程仍然是 100%，没有改变。

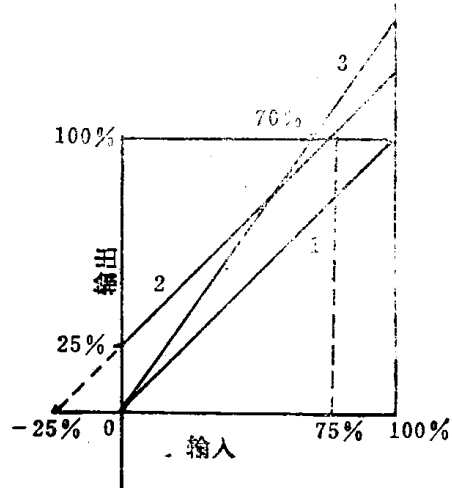


图 1.1.5 零点迁移和量程迁移示意图

如果测量范围改变的结果是使输入输出间标尺特性曲线的斜率发生改变，它的起点并不改变，如图 1.1.5 中的直线 1 变为直线 3。这种情况称为“量程迁移”。经过量程迁移以后，标尺上的终点分度标记所对应的被测变量不再是原先的上限值，而是它的某一倍数，例如 70% 但零点并没有变化。显然，量程变小了。

也可能在某种情况下，需要在零点迁移的同时也进行量程的迁移，其效果即为以上两种情况的综合，无需多做叙述。

零点迁移和量程迁移措施可以使仪表扩大通用性，是从事自动化仪表工作的技术人员经常用到的基本技能。具体仪表在何种条件下能够进行迁移，以及有多大的迁移余地，要视仪表的结构而定，后面再作分析。

(五) 灵敏度

“灵敏度”是仪表的重要特性之一，其定义是：当被测量变量的数值改变之后，经过了足够的时间，仪表的指示值已达到稳定状态之下，输出的变化量 ΔY 与引起此变化的输入的变化 ΔX 之比。这个比值用 S 表示，就叫“灵敏度”。

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (1.1.2)$$

由于 X 和 Y 都是有具体量纲的，所以灵敏度 S 也有量纲，其量纲视 X 和 Y 而定。

对于线性标尺的仪表，输入每变化一个分格值，其输出指针位移一个分格，所以灵敏度为一恒定常数。对于非线性标尺的仪表，灵敏度与指针的位置有关。也就是说，沿标尺各处的灵敏度不一定相同。

由上述灵敏度的表达式可以看出，灵敏度实质上是仪表的放大倍数。它体现了仪表把微小的被测值的变化放大成指针明显位移的本领，也就是对被测值细微变化的敏感程度。

灵敏度的定义也就是图 1.1.5 所示标尺特性曲线的斜率。所以量程迁移意味着灵敏度的改变，如果仅仅进行零点迁移，则灵敏度不变。

有必要再次强调指出，以上通过指针标尺为例说明的普遍性概念，同样也适用于无指针

标尺的其它仪表。对于零点迁移、量程迁移、灵敏度等问题，凡是谈到仪表的输出，并不一定都是指针的位移，其它形式的输出也同样适用。

正因为上述理由，灵敏度的含义比一般说的放大倍数要广泛得多。一般电子线路里的放大倍数是把输入信号的变化变成输出信号的变化之后，放大了多少倍，它通常是无量纲的数字。而仪表的灵敏度则不然，它的输出量和输入量多半是截然不同的物理形式，因此只有同样功能的仪表才可以比较它们的灵敏度。

灵敏度的概念也可以推广到由多个仪表所组成的测量或调节系统中去，如果这些仪表是首尾串联的（即前一个仪表的输出作为后一个仪表的输入），则总灵敏度为各个仪表的灵敏度之乘积。

也可以把灵敏度的概念用到仪表内部的某个线路或部件上。除了放大电路的放大倍数是灵敏度的实例以外，即使一个电阻，也可以根据欧姆定律写出输入为电流输出为电压降的关系。因此，它的阻值就是灵敏度。弹性元件服从虎克定律，如将外力看作输入，将其变形看作输出，于是弹性的刚度系数的倒数（即柔度系数）就是它的灵敏度。如此类推，变压器的变比、电位器的分压比、杠杆的传动比、齿轮减速器的减速比等等，无一不是灵敏度的具体体现。

（六）误差

仪表上由读数装置（指针和标尺就是一种读数装置）所显示的被测值叫做“示值”。它不一定正确地反映当时被测的“真值”，而可能存在误差。严格地说，真值是个假定的理论值，是用任何仪表也无法测出的，因为任何仪表都可能有或多或少的误差。所以实际讨论误差时都用“约定真值”代替“真值”。某个量的约定真值是用适当精度的仪表测出或用特定的方法确定的。例如用经过国家标准计量机构标定过的标准仪表校验普通工业仪表时，标准仪表的测量结果就做为约定真值，工业仪表的示值如与之不符，就认为是后者有误差。

示值与公认的约定真值之间的代数差称为“绝对误差”。即

$$\text{绝对误差} = \text{示值} - \text{约定真值} \quad (1.1.3)$$

绝对误差通常简称为“误差”。正误差表明仪表的示值偏大，负误差则表明示值偏小。

绝对误差与约定真值之比称为“相对误差”。用相对误差来衡量的精度比较合理，因为它表示了误差占被测值的百分比。

对于仪表的质量评价，用相对误差衡量也很不便，因为一般使用仪表不应测量过小的量，多用在测量接近上限值的量。所以应用最多的是“引用误差”，它是绝对误差与量程之比，以百分数表示。

必须注意，即使用同一仪表，测量同一数值时，引用误差的大小也与使用的具体条件有很大关系。使用时如果严格按照此种仪表所规定的环境条件（包括环境温度、相对湿度、电源电压、安装姿势等等），误差可能不大，而在其它条件下使用就可能有较大的误差。所以评论仪表的质量时应强调按照规定的参比工作条件下的误差进行比较，这种条件下的误差叫做“基本误差”。与此相应，在不符合正常工作条件下所出现的误差，其中除了基本误差之外还含有“附加误差”。

还必须注意“系统误差”和“随机误差”这两个概念。前者是指在同一条件下，对某一给定的同一值进行多次测量时，其绝对值和符号都保持不变的误差。或者，当条件改变时，按一定的规律变化的误差。随机误差是指其绝对值和符号在多次测量中以不可预计的方式变

化，也就是没有规律的误差，或按统计规律出现的误差。

对于研究测量和实验技术的人员来说，当然要分析测量结果的可靠性，所以要探讨随机误差问题。对于制造和使用仪表的人员主要是研究用何种技术措施减小有规律的误差，例如用补偿方法或事先仔细检验以取得修正值等等。而对于随机误差就不是仪表本身的改进所能解决的。

上面提到的“修正值”，是为了得到正确的测量结果，必须在所测量的含有系统误差的结果上进行代数相加的某个值。例如在校验时发现仪表测量 5 mA 时示值为 4.9 mA，即绝对误差为 -0.1mA 。于是可以在今后测得 4.9 mA 时，加修正值 $+0.1\text{mA}$ 。修正值是在校验仪表过程中取得的，它的绝对值和各校验点的绝对误差一致，但符号与绝对误差相反。

仪表和自动化工作者除了主要关心系统误差之外，大多数情况下只分析静态误差，较少考虑动态误差。所谓“静态误差”是指被测值变化十分缓慢（至少比仪表所能达到的最高动作速度要慢得多，所以可以不考虑仪表的惯性）的情况下所呈现的误差。反之，因惯性延迟所引起的附加误差就叫“动态误差”。

当然以上是指多数情况，因为石油、化工、热能等领域常常是慢过程。而电力工业则快速过程较多，某些科学实验也会遇到快速过程。但总的说静态误差的应用普遍得多。

（七）精度等级

“精度”这个词含义笼统，它是泛指示值与公认的约定值之间的一致程度。

在规定的条件下按规定的程序对仪表进行检定时，观察到与规定的特性曲线的最大正偏差和最大负偏差，这些偏差可以表征仪表的精确程度，叫做“测量精度”。为了便于理解，在图 1.1.6 中将偏差有意识地放大，使之突出。图中直线 OA 为规定的输入输出特性曲线。在检定或校验的过程中得到实际特性曲线 1 和 2。其中曲线 1 是输入值由下限到上限逐渐加大时得到的，叫做“实际上升校验曲线”；曲线 2 是输入值由上限向下限减小的过程中得到的，叫做“实际下降曲线”。这两条曲线和规定的直线 OA 间出现偏差，沿纵坐标的方向上可以得到两个偏差的最大值，即最大实际正偏差和负偏差。这里的正和负是根据式 (1.1.3) 的定义得来的。

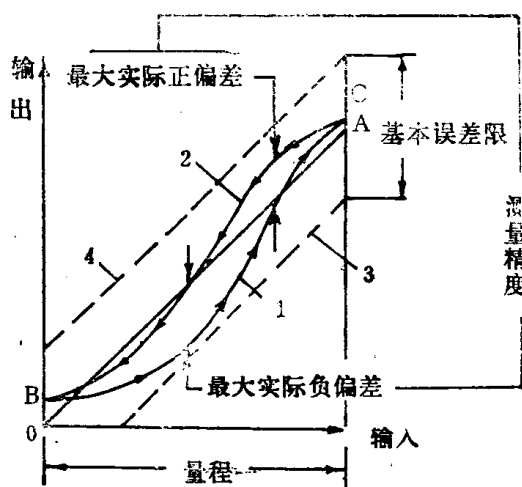


图 1.1.6 测量精度示意图

在直线 OA 的上下各有虚线 3 和 4，代表基本误差的下限和上限。在规定的安装使用条件下，仪表的最大偏差不超出这两虚线间的区域，就认为符合基本误差的允许范围。

从图 1.1.6 可知，曲线 1 和 2 愈接近于 OA 线则仪表的精度越高。

为了衡量仪表的质量，制定了“精度等级”，凡属于同一精度等级的仪表，应满足该类仪表规定的全部共同精度要求，用同一种表示精度等级的数字或符号作为等级指标。

工业用仪表常用基本误差的引用误差作为判断精度等级的尺度。例如仪表在规定的使用条件下基本误差不超过量程的 $\pm 0.5\%$ ，就用这个引用误差百分数的分子作为等级的标志。也就是说这个仪表的精度是 0.5 级。

要注意的是，精度等级的标志是代表允许基本误差的大小，它决不意味着该仪表实际测

量中出现的误差。

代表精度等级的数字愈小，仪表的精度愈高，0.5 级的仪表优于 1 级仪表而劣于 0.2 级仪表。

(八) 滞环、死区和回差

仪表校验所得的实际上升曲线和实际下降曲线常出现不重合的现象，如果不重合的原因是由于仪表内某些元件有能量的吸收，例如弹性变形的滞后现象、磁性元件的磁滞现象等，则会使仪表的特性曲线形成图 1.1.7 的环状，叫做“滞环”。这种效应会使仪表在同一输入值时具有不止一个输出值，从而出现误差。

上升和下降不重合也可能由于“死区”所引起，其特性如图 1.1.8。所谓死区是输入变化小至一定程度之后不足以引起输出的变化，因而出现某个范围，在这个范围内仪表的灵敏度等于零。例如仪表内的晶体管起始偏置不当，或传动机构中存在摩擦、间隙等，就可能造成上述结果。

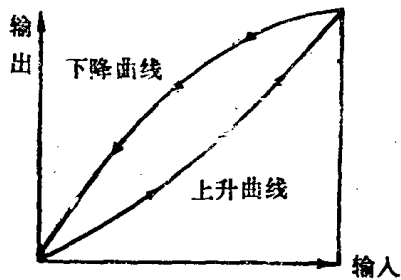


图 1.1.7 滞环的形成

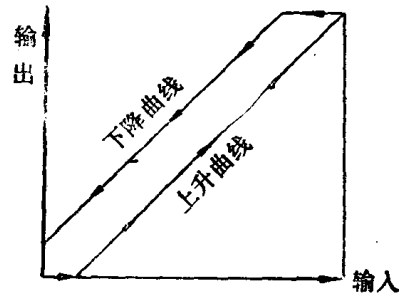


图 1.1.8 死区的形成

存在死区的仪表要求输入值大于某一限度才能引起输出变化，否则仪表灵敏度为零，所以这种限度叫做“灵敏限”。与之相应，死区也叫做“不灵敏区”。理想情况下不灵敏区的宽度为灵敏限的两倍（这里所说的宽度是指输入值的变化量）。

也可能某种仪表既有滞环又有死区，其综合效应无非是以上两种特点的结合。

无论是滞环、死区或两者的结合，都会使输入在全范围（整个量程）内上升和下降时，形成两不重合的特性曲线。这两线间的输出最大差值称为“回差”。亦称“变差”或“来回变差”。

(九) 重复性和再现性

在同一工作条件下，对同一输入值，按同一方向连续多次测量的输出值之间相互一致的程度，称为“重复性”。为了便于测量，是在多次测量中选其输出差别最大的值，也就是重复性最差的值，作为重复性优劣的标志。在图 1.1.9 中画出了三条上升曲线和三条下降曲线，其间有滞环。重复性是指在上升的各曲线间的最大离散程度和下降的各曲线间的最大离散程度之中的最大者。

如果在图 1.1.9 中上升和下降之间选其离散程度最大之点，则称为“再现性”。其实它也是用非再现性的最大值作为再现性的优劣标志。

重复性不包括滞环、死区，它表示仪表不受随机因素

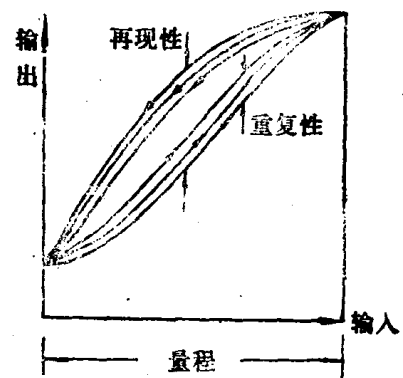


图 1.1.9 重复性和再现性

影响的能力。

再现性包括滞环和死区,也包括重复性。

重复性和再现性都用全范围输出的百分数表示。数字愈小仪表的质量愈高。

重复性和再现性优良的仪表并不一定精度高,但是经过仔细校验,得到修正之后,可以有较正确的测量结果。重复性和再现性差的仪表决不可能是高精度的,因为在同一条件下多次测量时,得到的数据很分散,说明仪表性能不稳定。反之,高精度的优质仪表一定有很好的重复性和再现性。

(十) 可靠性

现代工业生产的自动化程度日益提高,仪表的任务不仅是提供检测读数,而常常是直接参与生产过程的控制。因此,仪表出现故障往往会招致极为严重的事故。这就促使人们对仪表可靠性的衡量指标注意研究,以提高仪表的质量。

衡量仪表可靠性的尺度已不止一种,最浅显直观的要算“可靠度”,其含义可用事例说明,如果有100台同样类型的仪表,工作1000小时之后,大约有99台仪表仍能正常运行,则这批仪表工作1000小时后的可靠度就是99%。

实际上一般仪表出现的故障大多数是容易修复的,彻底毁坏的故障极少。修复之后又可以正常运行。但是,即使是轻微的易于修复的故障,也不允许出现得过于频繁。所以就出现了“平均无故障工作时间”的指标,它表示相邻两次故障间隔时间的平均值。这个平均值的倒数,表示某一单位时间里仪表可能发生故障的概率,称做“故障率”。举例来说,如果某种仪表的故障率为0.03%/千小时,就是说若有一万台这样的仪表工作一千小时之后,只可能有三台在这段时间里出现过故障。换言之,这种仪表的平均无故障工作时间是333.3万小时(相当于380.5年),这当然是非常高的指标了。

为了衡量仪表维修的难易程度,可以采用“平均修复时间”做为指标,它是每次修复时间的平均值。

对于使用者来说,当然希望平均无故障工作时间尽可能长,同时又希望平均修复时间短。于是就引出一个综合性的指标,即“有效度”。其定义为

$$\text{有效度} = \frac{\text{平均无故障工作时间}}{\text{平均无故障工作时间} + \text{平均修复时间}} \quad (1.1.4)$$

§ 1-2 仪表的分类

随着科学技术的飞速发展,生产面貌日新月异,仪表的种类五花八门不胜枚举,如果漫无边际地罗列其种类,势必陷入繁琐纷陈的枯燥纲目之中而徒劳无益。如简述若干主要类别,略加比较,结合介绍名词术语,或可有助于对仪表概况的了解。

1. 就使用性质而分有“标准表”、“实验室表”、“工业用表”。

“标准表”顾名思义是专门用于校验非标准仪表用的,它本身经过计量部门的定期检定并具有合格证书。标准表有不同的精度级,必须按照规定的级别,进行逐级校验。不允许将标准表当做普通仪表直接使用在工业生产中。标准表本身的精度必须根据标准传递的规定由高一级标准表检定。

“实验室表”用于科学实验任务中,它的使用环境条件较好,因此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比较小。这类仪表的精度比工业用表要高。其显示装置也只适于在实验室条件下读数，不适于远距离观察。

“工业用表”是长期安装使用于实际工业生产装置上的仪表。这类仪表为数最多。根据安装地点不同，工业仪表有现场安装及控制室安装之分。前者应有可靠的防护，能抵御环境条件恶劣的影响，其显示也比较醒目。工业用表的精度一般不十分高，但能长期连续工作，并具有足够的可靠性。某些场合下，不仅要求仪表本身可靠，还必须保证不因仪表引起事故，例如易燃易爆环境条件下所用的仪表，就必须有足以充分信赖的防爆能力。

2. 就测量方式分有“直读仪表”和“比较仪表”。

所谓“直读仪表”是直接读数的仪表，必须注意直接读数并不一定是直接对被测参数进行测量。例如用玻璃杆水银温度计测量温度，可以直接从刻度上读数，但它并不是直接测量温度，而是测量水银柱的长度。只不过水银的膨胀与温度有关，于是可以间接判断温度的高低。绝大多数仪表都是利用某种物理现象把不易观察的被测参数变换成另外一种易于观察的物理量而进行测量。仅仅在被测参数本身就十分直观，可以一目了然地观察时才可以直接对它测量。比如液位测量就可以通过玻璃管或玻璃板直接进行测量，这种情况终究是少数。不过间接测量而可以直接读数的却相当普遍。除了以上所举的玻璃杆水银温度计之外，用热电偶和动圈仪表测量温度也是直接读数（当然它也是用间接测量的方法）。

至于“比较仪表”，就和上述情况不同，它的读数是用已知量和未知量比较之后得到的。例如用电位差计测量直流电动势，当检流计指零时，读数是从已知的电流和电阻的乘积上得到的。这和天平在平衡之后从砝码上读出被测质量值的道理有相似之处，都是先经过比较，待达到平衡之后（检流计指零就是电路的平衡）从已知值上读出被测值，这就叫做“比较仪表”。采用比较仪表的先决条件是必须有相当精确的已知值（例如砝码的质量），并且要正确地判断真正的平衡状态。如果满足上述条件，比较仪表的精度就高于直读仪表。

3. 就原理性方框图的构成方式分，有“串联”（或称为“开环”）式仪表和“反馈”（或称为“闭环”）式仪表。

为了便于分析，常把复杂的仪表分解为若干环节，在原理性方框图中以方框代表每个环节。如果构成的方式是前一个环节的输出作为后一个环节的输入，首尾衔接形成一串，如图 1.2.1，则称为“串联”方式。

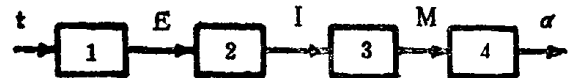


图1.2.1 串联式仪表的方框图

以热电偶和动圈仪表组成的温度指示仪表为例，可以认为图中的环节 1 代表热电偶，当

冷端（自由端）温度为已知恒定值时，它将输入量 t （温度）变为输出量 E （电动势）；整个电路的总电阻相当于环节 2，它将输入量 E 变为输出量 I （电流）；磁场和动圈形成环节 3，它将输入量 I 变为输出量 M （转矩）；动圈上下的张丝（或游丝）相当于环节 4，它将输入量 M 变为输出量 α （转角）。于是，由上列四个环节串联而成的整个系统就可以将输入量 t 变为输出量 α ，而 t 就是被测参数， α 就是指针转角。

如果以 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 分别代表各环节的放大倍数（即灵敏度），也就是说，

$$K_1 = \frac{E}{t}; \quad K_2 = \frac{I}{E}; \quad K_3 = \frac{M}{I}; \quad K_4 = \frac{\alpha}{M}$$

则对整个仪表而言，就有下列关系：

$$K = \frac{\alpha}{t} = \frac{\alpha}{M} \cdot \frac{M}{I} \cdot \frac{I}{E} \cdot \frac{E}{t} = K_1 K_2 K_3 K_4 \quad (1.2.1)$$

此处 K 代表整个仪表的灵敏度或传递系数。式(1.2.1)表明,各环节的放大倍数如有变化都会引起仪表的测量误差,而且各环节的相对误差对整个仪表有同等程度的影响。因此,串联方式的仪表中的各环节都必须保持足够的精度。

根据式(1.2.1)可知,如某一些环节具有非线性特征(即其灵敏度在测量范围内不是常数),有可能人为地选定另一些非线性环节提供补偿,这种情况可以用图1.2.2为例加以说明。图中表示由三个环节串联而成的仪表,环节1和2都具有非线性,分别用曲线I和II表示这两个环节的灵敏度随输入量变化的规律。如果能选择适当的第三环节,使之具有曲线III的特性,就可以使整个仪表具有直线IV的效果。即整个仪表的输出 Y 与输入 X 呈线性关系,这种措施就叫做“线性化”。

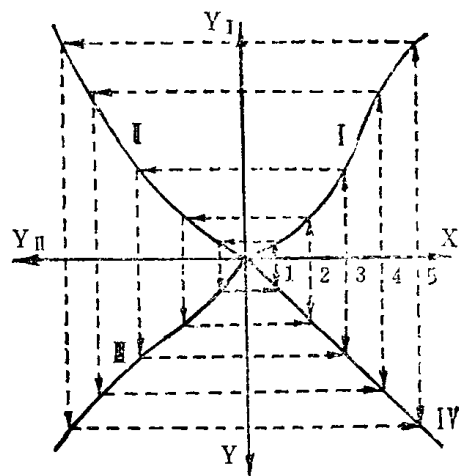


图1.2.2 非线性的补偿

在串联环节构成的仪表中,各环节特性的配合不仅可以实现线性化,有时也利用这一规律谋求温度补偿,即当环境温度波动引起某环节特性漂移时,在另一环节中同时形成反方向的漂移,二者相互抵消就可使温度波动引起的误差抑制在很小的范围内。

当然,实际上用环节串联的方式构成高精度的仪表是相当困难的。因为每个环节都有可能引起误差,要真正做到各环节的相互补偿并不容易,特别是当被测变量要经过多次变换,以致必须有多环节串联时,更难实现。

精度较高的仪表常采用“反馈”方式,其含义是将输出信号通过某种途径又重新送入输入端。如果在输入端它和原有的输入信号相加,就叫做“正反馈”,如果和原有输入信号的作用相反,就叫做“负反馈”。仪表里常用的反馈方式绝大多数是负反馈,按负反馈方式构成的仪表,其简化方框图如图1.2.3所示。

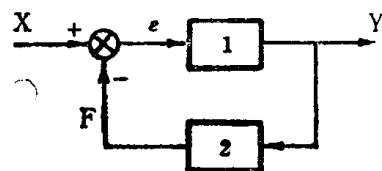


图1.2.3 反馈式仪表的方框图

图中 X 和 Y 分别代表整个仪表的输入和输出。环节1的放大倍数是 K_1 ,环节2的放大倍数是 K_2 ,后者将仪表的输出信号 Y 变为反馈信号 F 。

值得注意的是,反馈信号 F 和仪表的输入信号 X 极性(或相位)相反,在图上分别用正负号表示。在经过减法运算之后,得到差值 ε 送入环节1。

至此,可以写出下列关系式:

$$X - F = \varepsilon \quad (1.2.2)$$

$$Y = K_1 \varepsilon \quad (1.2.3)$$

$$F = K_2 Y \quad (1.2.4)$$

作为仪表的输出信号,在给定的信号范围内, Y 的值显然是有限的。从式(1.2.3)可知,如果 K_1 的值足够大,则可以认为差值 ε 十分微小,以至可以忽略。而这就意味着式(1.2.2)中 X 和 F 的值接近相等。于是,整个仪表的灵敏度或放大倍数 K 就可以有如下结果: