

自控系统中的测量 与显示技术

● 施文济 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

自控系统中的测量 与显示技术

● 施文济 编著 蔡凤仪 主审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材分5篇,共18章。主要从测量技术、显示技术、测量装置组成等几个方面来介绍自控系统中所需的各种参数的测量与显示的工作原理、使用方法及配套装置等应用技术知识。

本教材取材广泛、深度适宜、偏重应用,同时侧重反映了目前自动控制系统中测量与显示技术方面的新技术、新动向。

本教材可作为高等院校电气自动化、电气技术、应用电子技术、机电一体化、信息电子技术、计算机应用等专业的教材,同时也适用于职大、夜大和函大的教学,还可供从事自动控制、检测技术领域的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自控系统中的测量与显示技术/施文济编著. —北京:中国水利水电出版社, 2003

浙江省高等教育重点教材

ISBN 7-5084-1416-0

I. 自… II. 施… III. ①自动控制系统-控制测量-高等学校-教材
②自动控制系统:显示系统-高等学校-教材 N. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第011669号

书 名	浙江省高等教育重点教材 自控系统中的测量与显示技术
作 者	施文济 编著
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266(总机)、68331835(发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 15.75印张 373千字
版 次	2003年4月第一版 2003年4月第一次印刷
印 数	0001—4100册
定 价	30.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

在工业生产中,自动化控制系统大致可分为信息检测、信息转换、信息显示、信息处理、信息传送、信息执行等几个环节,在实现自动化过程的上述环节中,信息检测、转换、显示是极其重要的组成环节。只有精确、及时地将被控对象的各项参数进行检测,并正确、直观、形象地显示出来,整个系统才能正常、有效地工作。因此测量与显示技术是自动控制技术必不可少的内容之一。

本书主要介绍自控系统中测量、转换、显示、应用等几个方面的基础技术知识。在测量技术方面,首先将测量中一些必要的基本概念及理论作简要综述,接着根据检测信号的种类将其分成电量测量及非电量测量来进行介绍,再针对检测到的信号按模拟量、数字量来进行处理。在显示技术方面,主要讲述用模拟、数字、图像等方式来显示所测信号的各种技术手段。最后讲述如何运用所学的测量、显示技术,按照各种课题的要求,来设计有关自动测量装置的步骤及方法。同时对保证其准确、可靠地测量所采用的抗干扰措施也作简要介绍。

本书共五篇十八章,第一篇测量技术基础,从叙述测量技术的基本概念出发,对测量的方法及分类、测量仪表与测量系统的组成特点、测量误差与数据处理等基础知识进行简要的介绍;第二篇电参量测量技术,主要介绍在自动化领域中各种电参量(电压、电流、功率、频率、阻抗等)的测量方法,并对各种测量方法所引起的相关误差进行分析,以及如何提高测量精度的有关措施;第三篇非电量测量技术,主要介绍自动化领域中各种非电量(热工量、机械量、成分量、状态量等)的电测方法,着重介绍将各种非电量转换成电量的传感器及其应用;第四篇显示技术,主要介绍自动化领域中显示(记录)被测量数值的模拟显示(记录)技术、数字显示(记录)技术及计算机图形显示技术;第五篇自动测量装置,主要介绍自动测量装置的设计步骤及其思想方法,同时对与测量有关的干扰和干扰的抑制方法作简要的阐述。该篇可供学生自学或毕业设计参考。

本书的特点是将测量技术、显示技术与自控系统有机地结合起来,阐述自控系统中运用测量技术、显示技术的基本概念及应用中的注意事项,强调实用性和系统性。培养学生的实际应用能力。

通过对本书的学习,读者能对工程技术中有关测量、显示方面的课题拟订方案,包括合理选择传感器及测量仪表;配置相应的测量电路,进行电信号的转换、传输或处理,为自动化系统提供测量信号;根据任务的技术要求来设计自动测量

装置。

本书被列为浙江省高等学校重点建设教材（浙教高教〔2000〕200号），得到“浙江省高等学校重点建设教材”项目基金的资助及浙江水利水电专科学校校内配套资金帮助，使本教材得以顺利出版，在此对省教委及在编写过程中给予支持与帮助的学校领导和同行深表谢意！

本书承蒙山东省计量科学研究所蔡凤仪高级工程师主审，山东省科学院自动化研究所王秉玉研究员、韩清副研究员参审，主要对本教材内容的正确性、合理性、实用性作全面审定。本书在编写过程中还得到许多导师和同行的大力支持与帮助，在此深表谢意！在这里特别要感谢中国科学院院士、浙江大学侯虞均教授，生前对本书编写的方向及结构思路作了有益的指导；感谢山东大学徐萌、浙江大学施荫玉、苏州大学蔡起福等教授有益的讨论与建议；感谢留美学者邢健、蔡阳、侯盛璐等博士为本书提供国外在测量和显示技术等方面发展新动态及新技术的信息；感谢浙江水利水电专科学校机电系主任刘吉来副教授、电气教研室蒋世祥、王仙娟、徐伟杰、万军等教师在编写过程中有益的建议和帮助。

由于编著水平有限，本书难免有不妥和错误之处，恳切希望读者予以批评指正。

施文济

2003年3月于杭州

目 录

前言

第一篇 测量技术基础

第一章 测量基础知识.....	1
第一节 测量的基本概念、方法及其分类	1
第二节 测量仪表的基本性能及测量系统	5
第二章 测量误差及其处理方法	12
第一节 误差的分类及其产生原因	12
第二节 误差的处理及其消除方法	15
第三节 测量结果的处理	19
小结	23
思考题与练习题	24

第二篇 自动化领域中的电参量测量技术

第一章 自动化领域中信号电压（电流）的测量	26
第一节 被测信号电压（电流）的主要特点、分类及注意事项	26
第二节 交流电压的测量	28
第三节 脉冲电压的测量	43
第四节 缓变微弱信号的测量	47
第五节 信号电流的测量	50
第二章 自动化领域中信号功率的测量	54
第一节 信号功率的测量	54
第二节 分贝（decibel）的测量	57
第三章 自动化领域中信号频率的测量	59
第一节 计数法测量频率	59
第二节 其他测频方法	63
第四章 自动化领域中阻抗的测量	69
第一节 阻抗的基础知识	69
第二节 伏安计法测量阻抗	70
第三节 电桥法测量阻抗	72
第四节 测量阻抗的其他方法	79
第五节 阻抗测量的应用	83
小结	84
思考题与练习题	85

第三篇 自动化领域中的非电量测量技术

第一章 传感器的基础知识	86
第一节 传感器的概念及组成	86
第二节 传感器的分类	87
第三节 新型传感器的开发方向	89
第二章 典型传感器	91
第一节 阻抗式传感器	91
第二节 电势式传感器	101
第三节 热电传感器	108
第四节 光电式传感器	118
第三章 数字信号输出式传感器	124
第一节 脉冲输出式数字传感器	124
第二节 频率输出式数字传感器	133
第三节 数码输出式数字传感器	135
第四章 其他传感器	137
第一节 放射性同位素	137
第二节 超声波传感器	140
第三节 红外传感器	144
第四节 激光传感器	147
第五章 新型传感器简介	152
第一节 新材料的应用	152
第二节 新器件的应用	155
小结	158
思考题与练习题	159

第四篇 自控系统中的显示技术

第一章 显示技术概述	161
第一节 信息显示技术的概念	161
第二节 显示系统的基本构成及特点	162
第三节 显示技术的发展趋势	163
第二章 模拟显示技术	166
第一节 模拟显示的基本概念	166
第二节 模拟显示仪表	169
第三章 数字显示技术	178
第一节 数字式显示的基本概念	178
第二节 数字显示仪表	180
第四章 计算机图形显示	194
第一节 计算机图形显示的概况	194
第二节 图像显示在人—机联系中的作用	200
第三节 计算机图形显示器件	202

第五章 新型显示仪表..... 216

第一节 智能显示仪表 216

第二节 仪表数据加载 218

第三节 虚拟仪器（仪表） 219

小 结..... 220

思考题与练习题..... 221

第五篇 自动测量装置

第一章 自动测量装置..... 220

第一节 自动测量装置概述 220

第二节 任务的分析 225

第三节 方案的拟订 227

第四节 框图的构成 228

第五节 电路的配置 229

第六节 误差的分析与综合 229

第二章 测量装置的干扰及抑制..... 231

第一节 测量装置的干扰问题 231

第二节 测量装置干扰的来源及途径 233

第三节 抑制测量装置干扰的措施 239

小 结..... 241

思考题与练习题..... 241

参考文献 242

第一篇 测量技术基础

本篇从叙述测量技术的基本概念出发,对测量的方法及分类;测量仪表与测量系统的组成;测量误差与数据处理等基础知识进行简要的介绍,为以后学习各种测量技术奠定理论基础。

第一章 测量基础知识

第一节 测量的基本概念、方法及其分类

一、测量的基本概念

测量与工程、医学、科学实验、工业生产有着非常密切的关系,它在人们对自然界的认识过程中起了重大的作用,有些新的发明和突破都是以实验测试为基础的。在工业生产中,就是靠准确而及时地检测生产过程中的各种有关参数来实现生产过程自动化。

测量是人类认识客观世界的最基本的方法。测量技术也是人类科学技术和改造客观世界能力的重要标志。测量是通过实验,对客观事物取得定量意义的过程。事实上,这种过程就是把待测量直接或间接地与另一同类的已知量进行比较,用已知量作为计量单位,求得待测量的过程。人们通过测量可以建立对客观事物属性量度的认识,并可通过对测量结果数据进行必要的归纳和演绎,从中找到客观事物的演变规律,提出科学的理论。

在测量技术的发展过程中,由于技术的进步,被测对象和范畴不断扩大,出现了一些不同性质的测量过程,于是就提出了四种不同的称呼:测量、计量、检测、测试。在本书中所涉及的测量技术主要是指在自动系统中为了对各种物理量进行监控所采用的各种检测手段,而对计量、测试范畴的测量技术不作介绍,如需了解可参阅有关书刊。

所谓测量即以确定量值为目的的操作,其目的就是为了准确地获取表征被测对象特征的某些参数的定量信息。其实质就是将被测的量和作为测量单位的标准进行比较,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。

由此可见,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,该测量结果将无意义。

在各种测量过程中,必须有一个体现测量单位的已知量,这些体现测量单位的器具在测量学中被称为量具。在实际测量时,往往只有少量量具能够直接参与比较,例如测量长度用的直尺,测量液体体积用的量杯等。而在大多数场合,通常不能直接比较。特别是电测技术

中，由于被测量与标准量均为电参数，因此无法直观地看到它们。若要将它们进行比较，必须采用较为复杂的方法和专门的比较设备才能完成。例如，用标准电阻来测量未知电阻时，需要借助于电桥；用标准电池测量未知电压时，需要借助于电位差计等。这些用作比较的设备称为比较仪。

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，采用电容式检测元件进行压力或物位等参数进行测量时，首先必须将压力或物位转换成相应电容量的变化才能进行比较，为了便于显示和控制，还需要进一步将电容量的变化转换成统一的电信号。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、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）。可以说转换是现代测量技术的特征之一。

综上所述，测量过程应具有三个要素：一是测量单位；二是测量方法，它是将被测量与其单位进行比较的实验方法；三是测量仪器与设备，它是测量过程的具体体现与实施者，是为了求取比值（测量值）而实际使用的一些仪器设备。

二、测量方法及其分类

测量方法的正确与否是十分重要的，它直接关系到测量工作是否能正常进行，能否符合规定的技术要求。因此，必须根据不同的测量任务要求，进行认真的分析，找出切实可行的测量方法，然后根据测量方法选择合适的测量工具，组成测量装置（或测量系统），进行实际测量，如果测量方法不合理，即使有高级精密的测量仪器或设备，也不能得到理想的测量效果。

测量方法分类形式有多种多样，例如：根据在测量过程中，被测量是否随时间变化而分为静态测量和动态测量；根据测量数据是否通过对基本量的测量而求得，可分为绝对测量和相对测量；根据测量条件可分为等精度测量和非等精度测量；按测量手段分类可分为：直接测量、间接测量和组合测量；按测量方式分类可分为：偏差式测量法、零位式测量法和微差式测量法等。除了上述分类外，近来还出现另外一些分类方法，例如按测量敏感元件是否与被测介质接触，可分为接触式测量与非接触式测量；按测量系统是否向被测对象施加能量，可分为主动式测量和被动式测量等。

1. 按测量手段分类

(1) 直接测量 (Direct Measurement)。用预先按已知标准定度好的测量仪器对某一未知量直接进行测量，从而得出未知量的数值，这类测量称为直接测量，例如：用磁电式电表测量电压或电流，用弹簧管式压力表测量压力等。

直接测量并不意味着就是用直读式仪表进行测量，许多比较式仪器，例如电桥、电位差计及外差式频率计等虽然不一定能直接从仪器度盘上获得被测量之值。但因参与测量的对象就是被测量本身，故仍属直接测量。

直接测量的优点是测量过程简单而迅速，是工程技术中采用得比较广泛的测量方法。

(2) 间接测量 (Indirect Measurement)。对几个与被测量有确切函数关系的物理量进行直接测量，然后通过代表该函数关系的公式、曲线或表格求出该未知量，这类测量称为间接测量。例如，直接测出电阻 R 的阻值及其两端的电压 U ，由欧姆定律 $I=U/R$ 便可求出被测电

流 I 的值。

需要进行间接测量的情况有：

- 1) 直接测量很不方便。
- 2) 直接测量误差较大。
- 3) 缺乏直接测量的仪器。
- 4) 为了尽可能简化电路及程序等而进行的多参数综合测试。

这类测量方法大多数用在科学实验中的实验室，工程中有时也应用这种测量方法。

(3) 组合测量 (联立测量) (Measurement in Closed Series)。在测量中，使各个未知量以不同的组合形式出现 (或改变测量条件来获得这种不同的组合)，根据直接测量和间接测量所得到的数据，通过解一组联立方程而求出未知量的数值，这类测量称为组合测量，又称联立测量。组合测量中，未知量与被测量存在一定的函数关系 (表现为方程组)。

例如，为了测量电阻的温度系数，需利用电阻值与温度间的关系，即：

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

式中 α 、 β ——电阻的温度系数；

R_{20} ——电阻在 20°C 时的电阻值；

t ——测试时的温度。

为了测出电阻的 α 、 β 与 R_{20} 值，采用改变测试温度的方法，在三种温度 t_1 、 t_2 及 t_3 下，分别测出对应的电阻值 R_{t1} 、 R_{t2} 与 R_{t3} ，然后代入上述公式，得到一组联立方程，即

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \\ R_{t3} = R_{20} + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2 \end{cases}$$

解此联立方程组后，便可求得 α 、 β 和 R_{20} 。

组合测量的测量过程比较复杂，较花费时间，但容易达到较高精度，因此它可以认为是一种特殊的精密测量方法，一般适用于科学实验或特殊场合。

2. 按测量方式分类

(1) 偏差式测量法 (Deviation Method of Measurement)。在测量过程中，用仪表指针的位移 (即偏差) 表示被测量的测量方法，称为偏差式测量法。用这种方法测量，标准量具并不装在仪表内，而是事先用标准量具，对仪表刻度进行校准；然后，在测量时输入被测量，按照仪表指针在标尺上的指示值，决定被测量的数值。它是以间接方式实现被测量与标准量的比较。例如，用磁电式电流表测量电路中某支路的电流；用磁电式电压表测量某电气元件两端的电压等。这种方法的测量过程比较简单、迅速，但是测量的精确度较低。这种测量方法已广泛用于工程测量。

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、但是方向相反的作用，此相反作用又与某变量紧密相关，这个变量通常是指针的线位移或角位移 (即指针偏差)，它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。

例如弹簧压力表就是这种类型仪表。由于被测介质压力的作用，使弹簧变形，产生一个弹性反作用力，被测介质压力越高，弹性变形位移越大，弹簧反作用力越大。当被测介质压力产生的作用力与弹簧变形反作用力相平衡时，这时指针位移在标尺上对应的刻度值，就表示被测介质压力值。很显然，此压力表的指示精确度取决于弹簧质量及刻度校准情况，由于

弹簧变形力不是力的标准量,必须用标准重量校准弹簧,因此这种类型仪表一般精确度不高。

(2) 零位式测量法 (Zero Method of Measurement)。零位式测量法 (又称补偿式或平衡式测量法), 是在测量过程中, 用指零仪表的零位指示来检测测量系统是否处于平衡状态, 当测量系统达到平衡时, 用已知的基准量决定被测未知量的量值。应用这种方法进行测量, 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, 即进行平衡操作, 一直到被测量与标准量相等, 即指零仪表回零。

例如, 用电位差计测量待测电势, 如图 1-1-1 所示的电路是电位差计的简化等效电路。

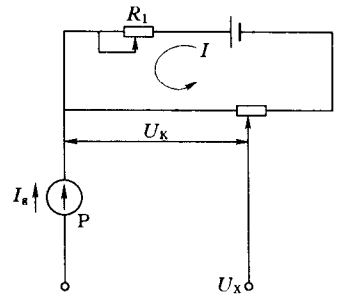


图 1-1-1 电位差计的简化等效电路

测量前应先调电位器 R_1 , 将回路工作电流 I 校准, 测量时, 要调整 R 的活动触点, 使检流计 P 回零, 这时 I_g 为零, 即是 $U_k = U_x$, 这样, 标准电压 U_k 的值就表示被测未知电压值 U_x 。

采用零位式测量法进行测量的优点是可以获得比较高的测量精确度, 但是测量过程比较复杂。在测量时, 要进行平衡操作, 费时较多, 因此这种测量方法不适于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实验室中应用很普遍。

(3) 微差式测量法 (Differential Method of Measurement)。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一种测量方法。它将被测的未知量与已知的标准量进行比较, 并取得差值, 然后用偏差式测量法求得此偏差值。应用这种方法进行测量时, 标准量具装在仪表内, 标准量直接与被测量进行比较, 由于两者的值很接近, 因此, 不需要调整标准量。

设: N 为标准量, X 为被测量, Δ 为两者之差。显然, 有关系式 $\Delta = X - N$, 经移项后得 $X = N + \Delta$, 即被测量是标准量与偏差值之和。

N 是标准量, 其误差很小, 由于 $\Delta \ll N$, 因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量, 即使测量 Δ 的准确度较低, 但是, 因为 $\Delta \ll X$, 故总的测量准确度仍然很高。

例如, 用高灵敏度电压表和电位差计, 采用微差法测量当负载变动时稳压电源输出电压的微小变动值。如图 1-1-2 所示。

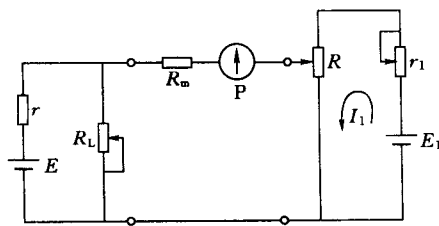


图 1-1-2 微差法测量稳压电源输出电压的微小变动值

r 与 E 表示稳压电源的等效内阻和电势, R_L 表示稳压电源的负载; R 、 r_1 与 E_1 表示电位差计。在测量之前, 应预先调整 r_1 值, 使电位差计工作电流 I_1 为标准值, 然后, 使稳压电源的负载电阻 R_L 为额定值, 进而调整 R 的活动触点位置, 使高灵敏度电压表指零, 增加或减少 R_L 值, 即改变稳压电源的负荷。这时高灵敏度电压表的偏差值即是负荷变动所引起的稳压电源输出电压的微小波动值。注意, 在这种电路中, 要求高灵敏度电压表的内阻 R_m 要足够高, 即要求 $R_m \gg R$ 、 r_1 、 R_L 、 r , 否则

测量误差会较大。

微差式测量法的优点是反应快, 而且测量精确度高。它特别适于在线控制参数的控制。

例如, 在计算机控制的连续轧钢生产线上, 参与校制过程工作的 X 射线测厚仪就是按照微差式测量方法工作的。这时被测量是板料厚度, 已知的标准量是板料厚度的设定值。测厚

仪只显示偏差, 由于整个轧机系统是处于闭环控制过程中, 因此轧制过程中的板厚偏差值是很小的。微差式测量法是一种很有发展前途的测量方法, 在工程测量中会将获得越来越广泛的应用。

第二节 测量仪表的基本性能及测量系统

在生产和科研中, 经常会遇到各种测量任务, 在这类任务面前, 测量人员首先要考虑的是应该运用什么样的测量原理, 采用哪种测量方法, 然后还必须考虑使用什么样的测量工具去完成。通常, 我们把这类参与测量工作所需要的技术工具称为测量仪表, 由此可见测量仪表是实现测量技术必须的物质基础。

一、测量仪表的基本性能

评价仪表性能的指标是多方面的, 但作为衡量测量仪表基本性能的主要指标有以下几个方面。

1. 精确度 (Accuracy)

说明精确度的指标有三个: 精密度、准确度和精确度。

(1) 精密度 δ (Precision)。它说明仪表指示值的分散性。即对某一稳定的被测量由同一测量者使用同一仪表在相当短的时间内重复测量多次, 其测量结果 (指示值) 分散的程度。

δ 越小表示测量愈精密, 例如某温度仪表的精密度 $\delta = 0.5^\circ\text{C}$, 即表示多次测量结果的分散程度不大于 0.5°C 。精密度是随机误差大小的标志, 精密度高, 意味着随机误差小。但必须注意: 精密度与准确度是两个概念, 精密度高不一定准确。

(2) 准确度 ϵ (Accuracy)。它说明仪表指示值与真值的偏离程度。例如某流量计的准确度 $\epsilon = 0.3\text{m}^3/\text{s}$, 意即该仪表的指示值与真值偏离 $0.3\text{m}^3/\text{s}$ 。准确度是系统误差大小的标志, 准确度高, 意味着系统误差小。同样, 准确度高不一定精密。

(3) 精确度 τ (Accuracy)。精确度是精密度与准确度的综合反映。精确度高, 意味着精密度和准确度都比较高。精确度常以测量误差的相对值表示, 即

$$A = \frac{x - x_0}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% = \frac{\Delta x}{\text{仪表测量范围}} \times 100\% \quad (1-1-1)$$

式中 x ——被测参数的测量值;

Δx ——绝对误差, $\Delta x = x - x_0$;

x_0 ——被测参数的标准值 (即标准表所测得的数值);

$x_{\max} - x_{\min}$ ——仪表测量范围;

A ——测量过程中的精度。

由式 (1-1-1) 可看出, 仪表的精度不仅与绝对误差有关, 还与仪表的测量范围有关。

【例 1-1】 有一台测温仪表, 其标尺范围为 $100 \sim 500^\circ\text{C}$, 已知其绝对误差最大值 $\Delta t_{\max} = 5^\circ\text{C}$ 则其相对百分误差为

$$A_{\max} = \frac{5}{500 - 100} \times 100\% = 1.25\%$$

【例 1-2】 上例的测温仪表, 现根据测量的需要, 仪表的测量范围由 $100 \sim 500^\circ\text{C}$, 改为 $0 \sim 200^\circ\text{C}$, 其他条件不变, 则该仪表最大相对百分误差为

$$A_{\max} = \frac{5}{200 - 0} \times 100\% = 2.5\%$$

由以上二例看出：其绝对误差相等，测量范围大的仪表精度高，测量范围小的仪表精度低。

仪表的精度等级是指仪表在规定的工作条件下允许的最大百分误差。按照国家统一规定所划分的等级有：…、0.1、0.25、0.5、1、1.5、2.5、4.0、…。所谓1级表，即该仪表允许的最大相对误差为 $\pm 1\%$ ，其余类推。精度等级的表示方法：一级为①，其余类同，如②.5、④.0等分别表示2.5级和4.0级。[例1-1]说明该仪表的最大误差大于1.0%，小于1.5%，其精度等级应为1.5级，[例1-2]的精度等级为2.5级。

2. 稳定性 (Stability)

仪表的稳定性有两个：一是仪表指示值随时间的稳定性，以稳定度表示；二是仪表外部环境和工作条件变化引起仪表指示值的稳定性，用影响量表示。

(1) 稳定度 (Stability)。稳定度是表示仪表的指示值于规定时间内，在所有条件恒定不变的情况下，维持其示值不变的能力。它是由于仪表中随机性变动、周期性变动及漂浮等引起示值的变化，一般以仪表精密数值和时间长短一起表示。例如某仪表电压示值变化为1.3 mV/h。

(2) 影响量 (Influence Quantity)。测量仪表除了设备本身性能特性之外，而由外界环境变化引起仪表指示值变化的量，称为影响量。它是由温度、湿度、气压、振动、电源电压及电源频率等一些外加环境影响所引起的。说明影响量时必须将影响量与示值偏差同时表示。例如，某仪表由于电源电压 U 变化 $\pm 10\%$ 而引起其示值变化0.02mA，则应写成0.02mA/V $\pm 10\%$ 。

3. 仪表的输入、输出特性 (Input and Output Characteristic of the Instrument)

仪表的输入、输出特性有两大类：静特性和动特性。

所谓静特性是指在使用测量仪表时，输入量（被测参数）不随时间而变化或随时间变化很缓慢，可以不必考虑仪表的输出量与输入量的动态关系，只需考虑它们之间的静态关系。讨论静特性时，联系仪表输出量与输入量之间的关系式是不含时间变量的代数方程。

动特性是指输入量（被测参数）随时间变化很快，这时必须考虑测量仪表输出量与输入量的动态关系。而且联系仪表输出量与输入量之间的关系往往是含有时间变量的微分方程。

静特性和动特性彼此间会相互牵制，当静特性显示出非线性和随机性质时，静特性会影响动态条件下的测量结果，这时表征动特性的微分方程就十分复杂，在工程上有时几乎无法解出，而且出现这种情况的可能性还是较多的。例如，干摩擦、间隙及迟滞回线等物理现象都将导致静特性出现非线性和带有随机性质，此时只能做工程上的近似处理。

(1) 测量仪表的静特性 (Steady of the Measurement Instrument)。其中：

1) 线性度 (Linearity)。对于理论上具有线性刻度特性的测量仪表，往往会由于各种因素的影响，使得仪表的实际特性偏离其理论上的线性特性。所以非线性误差就是仪表校验曲线与理论直线之间的最大偏差。这种非线性现象如图1-1-3所示。

非线性误差则是衡量偏离线性程度的指标，它取实际值与理论值之间的绝对误差的最大值 $\Delta'_{\max}$ 和仪表测量范围之比的百分数，即

$$\delta_L = \frac{\Delta'_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

在实际工作中，如果非线性的阶次不高，则对应于输入量变化不大的范围内，可以把实际曲线的某一段用切线或割线来代替，即静态特性的线性化。在设计这类仪器时，应把测量范围用在最接近

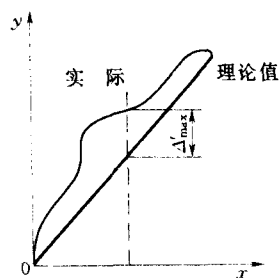


图 1-1-3 非线性误差特性曲线

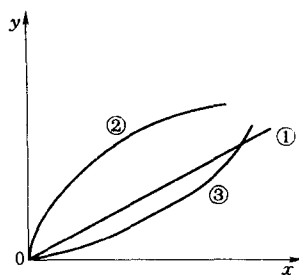


图 1-1-4 仪表的
刻度特性

直线的这一段，这样可以使仪器的静态特性近似于线性。

必须指出，并不是所有的仪器非线性的静态特性都能实现线性化的，如果某仪器的非线性程度异常强烈，以至于对它进行线性化后会失去原来的静态特性性质，则就无法进行线性化。仪表的刻度特性可分为两类：①线性刻度特性，用方程表示是一次代数方程，其几何表现是直线，如图 1-1-4 中①所示；②非线性刻度特性，用方程表示是高次代数方程或超越方程，其几何表现是曲线，如图 1-1-4 中②、③所示。

在常用的测量仪器中，数字电压表具有线性刻度特性；晶体管毫伏表具有上凹的非线性刻度特性；万用表电阻档则具有上凸的非线性特性。

从测量角度来看，希望测量仪表具有线性刻度特性，但由测量原理所决定，经常会遇到非线性刻度特性。例如测温用的热电偶，其热接点的温度与热电偶输出热电势的关系不是直线，如果将热电偶配用数字式电压表显示，由于数字电压表需要输入线性电压，因此必须先将热电偶的输出电势进行“线性化”处理，才能与数字电压表配接。

2) 灵敏度 (Sensitivity)。灵敏度是表征测量仪表对被测参数变化的灵敏程度。是指仪表在稳态下输出变化对输入变化的比值，即

$$S = \frac{df(y)}{dx} = \frac{dy}{dx} = f(x) \quad (1-1-3)$$

式中 S ——仪表的灵敏度；

dy ——仪表指针的直线位移或转角位移；

dx ——被测参数的变化量。

更确切地说，灵敏度 S 等于测量仪表的指示值增量与被测量增量之比，它是仪表输入、输出静态特性曲线上各点的斜率。

灵敏度表示单位被测量的变化所引起仪表输出指示值的变化量。很显然，灵敏度 S 值越高，仪表就越灵敏。

测量仪表的灵敏度可分为三种情况：①在整个测量范围，灵敏度 S 保持为常数，即灵敏度 S 不随被测量变化而变化；②灵敏度 S 随被测量（输入值）增加而增加；③灵敏度 S 随被测输入量增加而减少。

上述三种情况分别示于图 1-1-5。

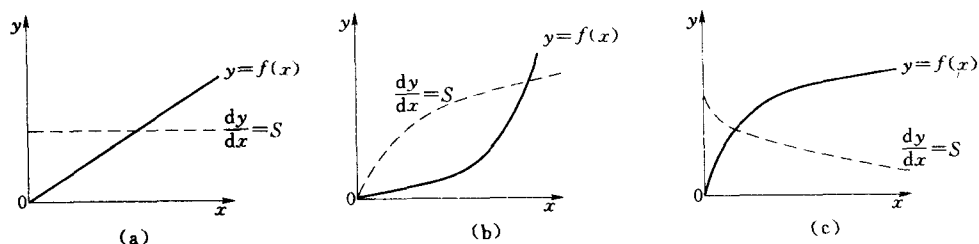


图 1-1-5 测量仪表的灵敏度
(a) S 为常数；(b) $S > 0$ ；(c) $S < 0$

通常，希望测量仪表的灵敏度 S 在整个测量范围保持为常数，这样一方面有利于读数；另

一方面便于分析和处理测量结果。

仪表的灵敏度可以用增大环节放大倍数来提高, 但仅从加大灵敏度, 而不改变仪表基本性能, 来企图提高仪表精度, 是不合理的。相反可能出现似乎灵敏度很高, 但精度实际上却下降的虚假现象:

【例 1-3】一台测温仪表, 其标尺长度为 40 cm, 其测量范围为 400°C, 精度等级为 0.5 级, 则

$$\hat{S} = \frac{dy}{dx} = \frac{40}{40} = 0.1 \text{ cm/}^{\circ}\text{C}$$

该仪表在测量过程中允许出现的最大误差为

$$400^{\circ}\text{C} \times (\pm 0.5\%) = \pm 2^{\circ}\text{C}$$

若提高该仪表的放大倍数, 使灵敏度增加, 设 S 从 0.1 cm /°C 增加到 0.2 cm /°C, 则仪表的测量范围将从 400°C 下降到 40cm /0.2cm/°C = 200°C; 若仪表的误差性能没有变化, 即可能出现的最大误差仍为 ±2°C, 则仪表的相对百分误差为

$$A_{\max} = \frac{\pm 2}{200 - 0} \times 100\% = \pm 1\%$$

即虽然仪表的灵敏度提高了, 而仪表的精度反而降低。为了防止这种虚假灵敏度, 通常规定仪表标尺上的最小分格值不能小于仪表允许误差的绝对值。

从灵敏度的定义可知, 灵敏度是刻度特性的导数, 因此它是一个有单位的量。当我们讨论某一测量仪表的灵敏度时, 必须确切地说明它的单位。例如, 对电压表, 用电压灵敏度 S_V 表示, 单位是 mm/V, 即每伏输入引起多少毫米的指针偏转; 对电流表, 则应用电流灵敏度 S_I 表示, 其单位是 mm/A, 即每安培输入引起指针多少毫米的偏转。

如果测量系统由多个环节组成, 各环节的灵敏度分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 , 而且各环节以图 1-1-6 所示的那样串联的方式相连接, 即

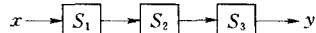


图 1-1-6 串联系统的示意图

则整个系统的灵敏度可用下式表示为

$$S = S_1 S_2 S_3 \quad (1-1-4)$$

提高灵敏度可得到较高测量精度, 但应当注意, 灵敏度愈高, 测量范围往往愈窄, 稳定性往往愈差。

3) 变差 (Variation)。变差也称回差 (Hysteresis error), 是仪表在外界条件不变的情况下, 其正向特性 (即被测参数由小到大变化) 和反向特性 (即被测参数由大到小的变化) 不一致的程度, 即相同的被测参数值所得到的仪表指示值不相等, 二者之差值为变差的绝对值, 如图 1-1-7 所示。

变差的大小, 取在同一被测参数值下, 正反向特性间仪表指示值的最大绝对误差值 $\Delta''_{\max}$ 与仪表标尺范围之比的百分数表示, 即

$$\delta_V = \frac{\Delta''_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1-1-5)$$

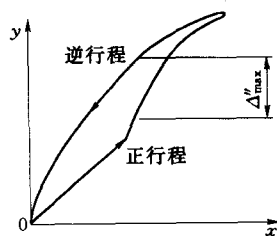


图 1-1-7 仪表变差特性

仪表变差引起的原因: 由于传动机构的间隙, 运动部件的摩擦, 弹性元件的弹性滞后等影响因素引起的, 因此在仪表设计时, 应在选取材料上、加工精度上给以较多的考虑, 尽量减少变差。

(2) 测量仪表的动特性 (Transient of the Measurement Instrument)。前面所介绍的用来表示仪表精度的相对百分误差、非线性误差、变差等都是指仪表在检测过程中达稳态后的误差, 都属静态 (稳态) 误差。这里所介绍的动态误差是指检测系统中被测参数信息处于变动状态下仪表示值与被测参数实际值之间的

差异。

例如用体温表测量体温，需要等 3min 以上才能从口腔内拿出观测体温，因为此时体温表的水银柱的上升才趋于稳定，故读数较准确；若 1~2min 内拿出，就会引起较大的动态误差 Δ_1 、 Δ_2 ，如图 1-1-8 所示。因为，此时口腔内热量传递给体温表内水银的过程尚未结束，故引起较大的动态误差。

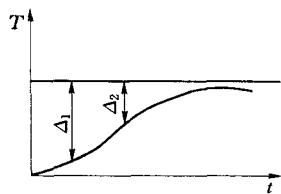


图 1-1-8 体温表的动态响应

引起动态误差的原因是由于测量元件和检测系统中各种运动惯性以及能量传递需要时间所造成。衡量各种运动惯性的大小以及能量传递的快慢常采用时间常数 T 和传递滞后时间（纯滞后时间） τ 两个参数表示之。

1) 时间常数 T (Time Constant)。例如采用热电偶和自动平衡式显示仪表组成的检测系统中，若被测参数有一阶跃变化，则记录仪表所显示出来的反应曲线将按一定规律变化（例如指数曲线），如图 1-1-9 所示；图中 T 为热电偶与自动平衡式显示仪表的时间常数，它是表征温度上升快慢的一个指标，若 T 越大，则反应曲线上升越慢，动态误差存在的时间越长、数值越大；若 T 越小，曲线上升越快，动态误差存在时间愈短，数值越小。在检测系统中我们总是希望 T 越小越好。

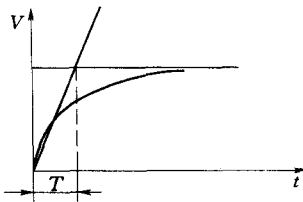


图 1-1-9 检测仪表的反应曲线

2) 传递滞后（纯滞后）时间 τ (Transpot Delay Time)。在气体成分分析系统中，由于存在着较长的取样管线，故存在着纯滞后时间 τ ，如图 1-1-10 所示，其中 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 为动态误差。

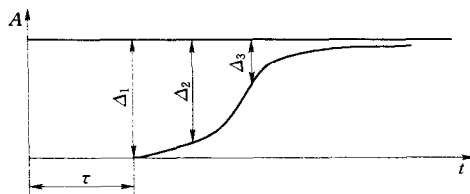


图 1-1-10 检测系统纯滞后时间 τ 的反应曲线

由图中可知，在纯滞后时间 τ 内，动态误差 Δ_1 最大，且一直存在到 τ 时间结束；不像时间常数 T 对动态误差的影响是逐渐减少的，故在检测系统中 τ 的不利影响远远超过时间常数 T 的影响，应该引起足够的重视，通常要求 τ 越小越好。

二、测量仪表与测量系统

1. 测量仪表 (Measuring Instrument)

测量仪表是实现测量的物质手段，是测量方法的具体化。作为近代完整的测量仪表应包括下列四个基本环节：

(1) 变换器 (Transmitter)。它的功能是将被测的物理（或化学）量进行比例变换，以便获得便于传输和测量的信号能量形式。

(2) 标准量 (Standard Value)。它的功能是提供标准量，要求它输出的标准量能够准确可调。

(3) 比较器 (Comparator)。它的功能是将已经经过比例变换后的被测量与标准量进行比较，并且根据比较结果的差值大小与极性去调节有关的环节（如标准量的大小），以达到两