



周培森 主编

周培森 刘震涛 吴淑荣 编著

自动检测与仪表

自动检测与仪表
ZIDONGJIANCE YUYI BIAO

清华大学出版社

自动检测与仪表

周培森 主编

周培森 刘震涛 吴淑荣 编著

31527 / 35

清华大学出版社

前 言

在工农业生产、科学研究、国防建设及国民经济各个部门中,经常需要检测各种基本参数或物理量,以便获取有关被测对象或生产过程特征的一些参数的定量信息,为安全、经济和自动化的生产提供可靠的依据;与此同时,各种参数的自动检测及其仪表的使用对于能源的节约、现代化企业的管理和经济效益的提高等方面均是非常重要的。

“自动检测与仪表”一书主要阐述了工业生产过程及能源节约中主要参数的自动检测方法,原理和仪表,以及为获取定量信息而进行精确测量的误差分析和数据处理等基本内容,同时适当加强了提高部分的内容。本书可作为机械、冶金、能源及自动化仪表等有关专业和有关学习班的教材,也可作为其他专业学生和工厂企业、事业等有关部门的科技人员的参考书。

本书具有如下特点:

1. 加强了参数检测及计量方面基本知识与理论的介绍,如误差理论及其在检测中的应用、数据处理的基本方法等,它们不仅是自动检测的基础知识,也是工厂企业中计量测试与仪表工作人员进行计量技术考核所要求的基础知识部分;加强了检测仪表中关键环节——传感器的原理与应用特点的分析;强调了理论和实践的结合,书中不仅有专门的章节介绍使用中的实例,而且从编写的指导思想上既考虑到对学生的要求,也照顾到工厂企业中广大的计量测试与仪表工作者的实际需要,努力做到系统地、通俗地、理论联系实际地和有重点地阐述自动检测的原理、方法、仪表和数据处理,做到学用一致。这样有利于提高学生分析问题、解决问题的能力,从而为四化建设多贡献力量。

2. 注意了教学各个环节的配合。根据本门课程在我校及校外的有关专业学生中讲授的经验,课内外总学时可安排为120小时(视学生的程度可适当增减),同时,安排了五个基本实验和四个现场教学环节,并在每节、章之后布置一定数量的课外作业。根据77届以来,校内外各届学生的教学实践过程来看,这几个教学环节紧密配合,教学效果是比较好的。

3. 随着我国经济建设规模日益扩大,能源问题已提到了国家战略目标的高度,为了培养学生节约能源、管理好企业的思想和能力,在本书中充实了一部分在能源中应用的重要的检测技术,如温度和热流检测技术以及烟气成分分析等内容。

4. 根据四化建设的需要与新技术革命的要求,本书除保证基础部分外,适当加强了提高部分的内容。第1至10章主要为基础部分,而第11至第13章的新型传感器、微型计算机的应用及自动检测中信号处理技术等则是着重于提高的内容。努力做到普及与提高相结合,在普及基础上提高。

学习本课程的基本要求是:系统了解工业生产过程及能源节约中主要参数的自动检测方法及其基本原理;熟悉常见检测仪表的原理,特点,技术指标和使用要求,达到合理选择、正确使用之目的;为了能够进行准确地测量,获得可靠的数据,应掌握误差的概念,对实验数据与测量结果具备初步处理与分析的能力;培养学生进行实验研究的技能。为了达到上述基本要求,本书内容是比较丰富的,教师可根据不同对象及需要,讲述有关内容,并作适当

删节。如第2章的部分内容和第11、12及13章的内容可作为学生深入学习和参考之用。学生也可根据自己工作的需要选学有关内容。

本书由周培森同志主编。第1、2、3、4、5、7、11、13章及第6章的第4节由周培森副教授编写。第8、9、10、12章及第6章的1、2、3节由刘震涛副教授编写,习题及思考题部分由吴淑荣同志编写。全书由王家桢副教授审阅。在编写过程中,清华大学自动化系工业自动化仪表专业的师克宽教授和其它教师,机械系和校外有关单位的领导和同志们给予了热情的支持和帮助,在此一并表示深切的谢意!

由于作者水平有限,不妥及错误之处,恳请读者批评指正。

编者 1986年7月

于清华大学

目 录

前 言	(i)
第一章 基本知识	(1)
§1.1 测量的概念	(1)
§1.2 测量的单位	(2)
§1.3 检测仪表的组成	(2)
§1.4 仪表的性能指标	(4)
§1.5 检测的基本方法	(9)
§1.6 检测仪表的分类	(10)
§1.7 有效数字与科学计数	(13)
第二章 误差分析与数据处理	(16)
§2.1 引言	(16)
§2.2 测量误差的概念和分类	(16)
§2.3 随机误差概率密度的正态分布	(19)
§2.4 算术平均值与标准误差	(23)
§2.5 置信区间与置信概率	(28)
§2.6 测量结果的正确表示 t 分布的应用	(30)
§2.7 不等精度测量的权与误差	(34)
§2.8 粗差的判别与坏值的舍弃	(36)
§2.9 系统误差	(39)
§2.10 误差的传递	(43)
§2.11 误差的合成	(45)
§2.12 最小二乘原理	(48)
§2.13 曲线的拟合	(49)
§2.14 经验公式的选择与检验	(52)
第三章 温度检测概述	(54)
§3.1 温度与温标	(54)
§3.2 国际实用温标及其传递	(56)
§3.3 温度检测原理及其仪表分类	(61)
第四章 接触式测温仪表	(64)
✓ §4.1 热电偶传感器	(64)
✓ §4.2 热电偶温度计及其正确选用	(75)
✓ §4.3 热电偶参比端温度的处理	(78)
✓ §4.4 热电偶测温的常用线路	(83)
§4.5 热电偶的定期检查、处理与校验	(85)

§4.6	热电偶温度计的测量误差分析	(87)
§4.7	金属热电阻及半导体热电阻	(89)
§4.8	热电阻温度计及其线路	(96)
第五章	热辐射式测温仪表	(99)
§5.1	概述	(99)
§5.2	热辐射测温的理论基础	(100)
§5.3	热敏探测器	(103)
§5.4	光电探测器	(110)
§5.5	亮度平衡测温方法与光学高温计	(114)
§5.6	辐射测温方法与辐射温度计	(118)
§5.7	比色测温方法与比色温度计	(121)
§5.8	红外温度计与光电温度计	(123)
§5.9	新的测温方法与仪表——多色法与热象仪	(127)
第六章	温度检测技术	(133)
§6.1	高温烟气温度的测量	(133)
§6.2	瞬时温度的测量	(142)
§6.3	金属表面温度的测量	(146)
§6.4	金属及合金转变温度的测定方法与数据处理	(159)
第七章	指示、记录与简单的调节仪表	(164)
§7.1	动圈式仪表的工作原理	(164)
§7.2	配热电偶的动圈式仪表	(167)
§7.3	与热电阻配套的电桥	(170)
§7.4	实验室用手动电位差计	(175)
§7.5	自动平衡显示仪表	(178)
§7.6	简单的调节仪表	(185)
§7.7	干扰信号及抗干扰措施	(193)
第八章	压力、应力和流速检测	(201)
§8.1	压力测量	(201)
§8.2	电阻应变式传感器与应力测量	(212)
§8.3	流速检测	(215)
第九章	流量与物位检测	(218)
§9.1	节流变压降流量计	(219)
§9.2	转子流量计	(228)
§9.3	其它流量计	(231)
§9.4	物位的测量与控制概述	(233)
§9.5	常用物位测量仪表	(236)
§9.6	其它物位测量仪表	(240)

第十章 节能检测技术与仪表	(243)
§10.1 热流检测技术及热流计	(244)
§10.2 烟气成分分析仪表	(262)
§10.3 燃烧效率监测仪	(274)
第十一章 新型传感器	(277)
§11.1 概述	(277)
§11.2 光纤传感器	(278)
§11.3 新材料及新元件在传感器技术中的应用	(285)
§11.4 集成化及信息处理型传感器	(288)
第十二章 微型计算机在检测技术中的应用	(292)
§12.1 概述	(292)
§12.2 应用实例	(293)
第十三章 自动检测中的信号处理	(300)
§13.1 概述	(300)
§13.2 傅里叶级数——周期信号的频谱分析	(300)
§13.3 傅里叶变换(FT).....	(305)
§13.4 离散傅里叶级数(DFS)与离散傅里叶变换(DFT).....	(315)
§13.5 沃尔什函数	(320)
§13.6 沃尔什级数及其与傅里叶级数的比较	(325)
§13.7 沃尔什矩阵与阿达玛矩阵	(328)
§13.8 沃尔什变换	(332)
§13.9 快速阿达玛变换	(336)
§13.10 沃尔什变换与傅里叶变换的比较	(340)
§13.11 沃尔什函数应用举例	(341)
习题、思考题及答案	(347)
附录 I：标准化热电偶分度表	(359)
附录 II：标准化热电阻分度表	(367)
附录 III：WFT-202辐射感温计分度表.....	(368)

第一章 基本知识

§1.1 测量的概念

测量或检测一词，人们在日常生活、学习、生产和科学实验中是经常用到的。测量的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。例如，人的体温的测量，目的就是测定体温的高低，提供必要的信息，有助于医生的诊断。这里，人体或其某个部位，如口腔或腋下就是被测对象，它是指被研究的物体或系统。体温就是被测量或被测参数。被测量是指需要数值定量的一些参数或物理量，它含有表征被测对象某些特征的定量信息，例如，温度、压力、时间、长度和重量等。温度的测量单位是摄氏度，其符号为 $^{\circ}\text{C}$ ，因此某些物理量的测量单位就是人为定义其数值为1的某个物理量。所谓测量就是用实验的方法，借助一定的仪器或设备，把被测量与其单位进行比较，求取二者的比值，从而得到被测量数值大小的过程。

设被测量为 X_0 ，其单位为 u ，二者的比值为 x_0 ，则测量过程可用数学形式描述如下：

$$x_0 = X_0 / u$$

或
$$X_0 = x_0 \cdot u \quad (1.1.1)$$

上式称之为测量的基本方程式。式中，数值化后的比值 x_0 称为被测量的真实数值，简称为真值。因为在实际求取数值化比值时，只能用有限位数的数字来表示，而真值 x_0 却往往不能用有限位数的数字来表示；加之，在测量过程中必定有各种误差存在（详见第二章），所以被测参数的真值 x_0 只能近似地等于其测量值 x ，即测量基本方程式应改写如下：

$$X_0 \approx x \cdot u \quad (1.1.2)$$

应当注意，被测量真值 x_0 或其测量值 x 的大小均与其单位有关；单位愈小，它们的数值愈大。因此，一个完整的测量结果应该包含两部分内容，即所得的测量值 x 与所采用的测量单位 u 。

从测量基本方程式可知，测量过程有三要素：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，是为了求取比值而实际使用的一些仪器设备。有些测量仪器输入的是被测量，而输出的就是被测量与其单位的比值——测量值。例如，体温计，压力表，激光测距仪等。

通过测量可以得到被测量的测量值，然而测量目的还未全部达到，为了准确地获取表征对象特征的定量信息，还要对实验结果进行数据处理与误差分析，估计结果的可靠性等，以便为保证安全生产，提高经济效益，为保证产品的质量，为生产过程的自动化，以及科学研究等提供可靠的数据。至于测量技术，其意义更加广泛，它是指下面的全过程：按照被测对象的特点，选用合适的测量仪器与实验方法，通过测量及数据的处理和误差分析，准确得到

被测量的数值，并为提高测量精度，改进实验方法及测量仪器，为生产过程的自动化等提供可靠的依据。

此外，人们还常用到“计量”一词，计量一般指基准器的研制、量值的传递、计量单位的统一和管理、精密测量技术等方面。就工程实际方面来说，常用测量一词。然而“计量”与“测量”并无严格的区别，在英文中它们均系“measure”一词。

§1.2 测量的单位

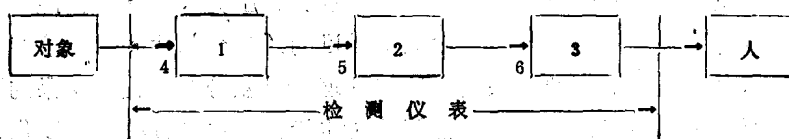
数值为1的某量，称之为该量的测量单位或计量单位。由于测量单位是人为定义的，它带有任意性、地区性与习惯性等。例如，质量的单位就有：公斤、市斤、磅、克、盎司、克拉等；长度的单位就有：米、市尺、英尺、海里、码等。早期的单位还是不够科学和严格的。单位制的不统一和混乱，不仅在世界各国，而且在一个国家内部都是存在的，它给人们的生活、生产及科学技术的发展等带来了极大的不便和困难，因此测量单位必须予以统一。同时，随着生产和科学技术的发展，对测量精确度的要求越来越高，因此，也必须提高测量单位的准确性与科学性。

根据1954年国际度量衡会议的决定，自1978年1月1日起实行国际单位制。我国于1977年5月27日颁发了《中华人民共和国计量管理条例(试行)》并公布了试行方案。1984年2月27日，国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，并同时颁布了《中华人民共和国法定计量单位》。按照国务院的命令，我国从1986年起出版的书刊中统一使用法定计量单位。计量单位种类庞杂，数量繁多，本书不作赘述。读者使用时，可参阅有关书刊。

我们伟大的祖国是历史悠久的文明古国，远在公元前三百多年的战国时期就有了度量衡标准。“度”就是指长度计量，“量”就是指容量计量，“衡”就是指质量计量。随着生产和科学技术的发展，计量的范围日益扩大，已从古代的度量衡发展为现代的十大类计量：长度、力学、温度、电磁、无线电、时间频率、化学、声学、放射性和光学计量等。为了实际得到上述的基本单位和导出单位，稳定、精确及方便地复现它们，并进行量值的传递和检测工作，保证量值的统一和准确，必须进行大量的科学实验研究，研制更精确的计量仪器和测量设备，提高测试技术等。我国已成立了专门的计量机构，从事这方面的工作。

§1.3 检测仪表的组成

检测仪表是将被测量与其单位进行比较，并得到其量值大小的实验设备或仪器。检测仪表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室中，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



1. 传感器, 2. 变换器, 3. 显示器, 4. 5. 6. 传输通道

图 1.3.1 检测仪表方框图

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、变换器、显示器以及连接它们的传输通道。检测仪表的方框图，如图 1.3.1 所示。

一、传感器

传感器是检测仪表与被测对象直接发生联系的部分。它的作用是感受被测量的变化，直接从对象中提取被测量的信息，并转换成一相应的输出信号。例如，体温计端部的温泡可认为是传感器，它直接感受体温的变化，并转换成水银柱高度的变化而输出位移信号。传感器的好坏，直接影响检测仪表的质量，它是检测仪表的重要部件。对传感器有如下要求：

1. 准确性：传感器的输出信号必须准确地反映其输入量，即被测量变化。因此，传感器的输出与输入关系必须是严格的单值函数关系，且最好是线性关系。即只有被测量的变化对传感器有作用，非被测量则没有作用。真正做到这点是困难的。一般要求非被测参数对传感器的影响很小，可以忽略不计。

2. 稳定性：传感器的输入、输出的单值函数关系是不随时间和温度而变化的，且受外界其他因素的干扰影响很小，工艺上还能准确地复现。

3. 灵敏性：即要求较小的输入量便可得到较大的输出信号。

4. 其他：如经济性、耐腐蚀性、低能耗等。

传感器往往也被称为敏感件，一次元件等。

二、变换器

它的作用是将传感器的输出信号进行远距离传送、放大、线性化或转变成统一的信号，供给显示器等。例如，压力表中的杠杆齿轮机构将弹性敏感元件的小变形转换并放大为指针在标尺上的转动。又如，在单元组合仪表中，将各种传感器的输出信号转换成具有统一数值范围的气或电信号，使一种显示仪表能够适用于不同的被测参数。

对变换器的要求是：能准确稳定地传输、放大和转换信号，受外界其它因素的干扰和影响要小，即所造成的误差应尽量小。

三、显示器

显示器的作用是向观察者显示被测量数值的大小。它可以是瞬时量的显示，累积量的显示，越限和极限报警等；也可以是相应的记录显示；有的甚至有调节功能去控制生产过程，如 XCT-101 型动圈式双位调节仪表就具有指示、极限报警及双位调节的功能。显示仪表有时被称为二次仪表。

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。被测量数值大小由指示器或指针在标尺上的相对位置来表示。有形的指针位移或转角用于模拟无形的被测量是较方便、直观的。指示式仪表结构简单、价格低廉、显示直观，一直被大量应用。有的还带记录机构，以曲线形式给出被测量随时间变化的数据。但这种仪表读数的精度和仪器的灵敏度等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：直接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连用。

这种仪表正越来越多地被采用。

3. 屏幕显示：实际上是一种电视显示方式。它结合了上述两种显示方式的优点，具有形象性和易于读数的优点，又能同时在电视屏幕上显示一个被测量或多个被测量的大量数据，有利于对它们进行比较分析。

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、输出信号提供通路。它可以是导线、管路(如光导纤维)以及信号所通过的空间等。信号传输通道比较简单，易被人所忽视。如果不按规定的要求布置及选择，则易造成信号的损失、失真及引入干扰等。例如微量成分分析时，如管路选择不当，会造成信号的大量损失。又如，传输电信号时，若传输导线阻抗不匹配，则可能导致仪表的灵敏度降低，电信号失真等。

§ 1.4 仪表的性能指标

仪表的性能指标是评价仪表性能好坏、质量优劣的主要依据；它也是正确地选择仪表和使用仪表，以达准确测量之目的，所必需具备和了解的知识。大家知道，在仪表选择和使用不当时，即使选用性能好、质量高的仪表，也不能够得到准确的测量结果。相反情况下，如果选择、使用得当，则精度较差的仪表往往也能够满足测量要求。因此，深入了解反映仪表性能的主要指标；根据要求，正确地选择和使用仪表，对于测量工作者来说是十分重要的。

仪表的性能指标很多，概括起来不外乎技术、经济及使用方面的指标。

仪表技术方面的指标有：基本误差、精度等级、变差、灵敏度、量程、响应时间、漂移等。

仪表经济方面的指标有：功耗、价格、使用寿命等。当然，性能好的仪表，总是希望它的功耗低、价格便宜、使用寿命长等。

仪表使用方面的指标有：操作维修是否方便，能否可靠安全运行以及抗干扰与防护能力的强弱、重量体积的大小、自动化程度的高低等。

显然，上述性能指标的划分也是相对的。在未加说明的情况下，有关性能指标一般指仪表在规定的工作条件(如参比条件)下而言。仪表正常工作时，对于电源电压，频率，温度，湿度，振动，外界电磁场，安装位置等条件，按照仪表的出厂规定，有一定的要求。下面对仪表的一些重要性能指标分别介绍如下。

一、测量范围与量程

在正常工作条件下，仪表可以进行测量的被测参数的范围叫做测量范围，其最低值和最高值分别叫做测量范围的下限和上限。测量范围的表示法是用下限值至上限值来表示。例如，某台秤的测量范围是0至100公斤，某温度计的测量范围是 -20°C 至 $+200^{\circ}\text{C}$ 。

测量的量程是测量范围的上限($l_{\text{上}}$)与下限($l_{\text{下}}$)的代数差，记为 $L=l_{\text{上}}-l_{\text{下}}$ ，如上述温度计的量程为 $L=220^{\circ}\text{C}$ 。

给出测量范围，便知上、下限及量程。若仅给出量程，

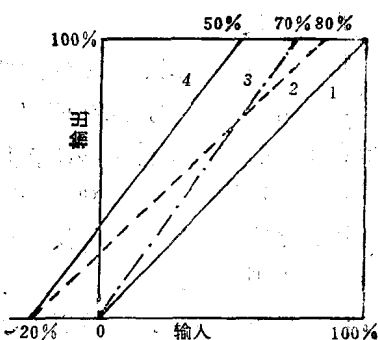


图 1.4.1 零点迁移与量程迁移

便无法判断仪表的测量范围。

如果以被测量的数值相对于仪表量程的百分数作为仪表的输入,以指针位移或转角相对于全标尺的百分数作为仪表的输出,分别用横坐标及纵坐标表示,则所得的输入、输出关系曲线称之为标尺特性曲线,如图 1.4.1 所示。对于线性标尺,标尺特性曲线为直线。对于非线性标尺,则是曲线。

在实际使用中常需对仪表的测量范围做适当的改变。改变的方法有两种。一是零点迁移,它将标尺特性曲线平移,如图 1.4.1,直线 1 变为直线 2,此时输入零点迁移至 (-20%) ,仪表的测量范围变为 $-20\% \sim 80\%$,但仪表的量程保持不变,仍然是 100% 。二是量程迁移,它保持输入零点不变,改变标尺特性曲线的斜率,如图 1.4.1,由直线 1 变为直线 3,此时量程变为 70% ,测量范围变为 $0 \sim 70\%$,仪表的灵敏度也变化了,但其零点保持不变。当然视实际需要,量程及零点可同时迁移,如图 1.4.1,直线 1 变为直线 4。

二、仪表的基本误差

基本误差是指仪表在规定的工作条件(参比工作条件)下的误差,仪表的基本误差有如下几种形式:

1. 绝对误差:仪表的指示值 x 与被测量的真值 x_0 之间的代数差值称之为仪表示值的绝对误差,符号为 δ , 表示为:

$$\delta = x - x_0 \quad (1.4.1)$$

式中,真值 x_0 可为被测量公认的约定真值,也可由标准仪表所测得的测量值。绝对误差 δ 说明了仪表示值偏离真值的大小,它能够说明仪表测量的精确度。

在校准或检定仪表时,常采用比较法,即对于同一被测量,将标准表的示值 x_0 (真值)与被校表的示值 x 进行比较,则它们的差值就是被校表示值的绝对误差。如果它是一恒定值,则是系统误差(详见第二章),它可能是仪表在非正常工作条件下使用而产生的,或其它原因所造成的附加误差。此时仪表的示值应加以修正,修正后才可得到被测量的实际值 x_0 。

$$x_0 = x - \delta = x + c \quad (1.4.2)$$

式中,数值 c 称为修正值或校正量。修正值与示值的绝对误差的数值相等,但符号相反,即为:

$$c = -\delta = x_0 - x \quad (1.4.3)$$

试验室用的标准表常由高一级的标准表校准,检定结果附带有示值修正表,或修正曲线 $c=f(x)$ 。

2. 相对误差:仪表示值的绝对误差 δ 与被测量真值 x_0 的比值,称之为仪表示值的相对误差 r , r 常用百分数表示

$$r = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \quad (1.4.4)$$

指示值的相对误差比其绝对误差能更好地说明测量的精确程度。如有两组测量值,第一组 $x_0 = 1000^\circ\text{C}$, $x = 1005^\circ\text{C}$, $\delta = +5^\circ\text{C}$, $r = 0.5\%$; 第二组: $x_0 = 100^\circ\text{C}$, $x = 105^\circ\text{C}$, $\delta = +5^\circ\text{C}$, $r = 5\%$ 。由此可见两组的绝对误差虽然均为 $+5^\circ\text{C}$,但第一组的相对误差小得多,显然第一组测量比第二组精确。但在评价仪表质量时,利用相对误差作为衡量标准也很不便,因为使用仪表时,一般不应测量过小的量(如靠近测量范围下限的量),而多用在测量接近上限的量如 $\frac{2}{3}$ 量程处。故用下面的引用误差的概念来评价仪表质量更为方便。

3. 引用误差：仪表指示值的绝对误差 δ 与仪表量程 L 之比值，称之为仪表示值的引用误差 q 。引用误差 q 常以百分数表示

$$q = \frac{\delta}{L} \times 100\% \quad (1.4.5)$$

比较式(1.4.5)及式(1.4.4)可知：在 q 的表示式中虽利用量程 L 代替了真值 x_0 ，但分子仍为绝对误差 δ 值；当测量值取仪表测量范围的各个示值或在刻度标尺的不同位置时，示值的绝对误差 δ 值也是不同的，因此引用误差仍与仪表的具体示值 x 有关。为此，取引用误差的最大值，既能克服上述的不足，又更好的说明了仪表的测量精度。

4. 引用误差的最大值(或最大引用误差)：在规定的工作条件下，当被测量平稳地增加和减少时，在仪表全量程所取得的诸示值的引用误差(绝对值)的最大者，或诸示值的绝对误差(绝对值)的最大者与量程的比值的百分数，称为仪表的最大引用误差，符号为 $q_{\max}$ ，可表示为：

$$q_{\max} = \frac{|\delta|_{\max}}{L} \times 100\% = \frac{|x - x_0|_{\max}}{L} \times 100\% \quad (1.4.6)$$

最大引用误差是仪表基本误差的主要形式，故也常称之为仪表的基本误差。它是仪表的主要质量指标，它很好地说明了仪表的测量精确度。

三、仪表的精度等级

1. 允许引用误差，简称允许误差，符号为 Q 。顾名思义，它说明了仪表在出厂时所规定的引用误差的允许值。也即，仪表在出厂检验时，诸示值的最大引用误差不能超过其允许值。记为：

$$q_{\max} \leq Q \quad (1.4.7)$$

必须注意， q 、 $q_{\max}$ 及 Q 值均是以百分数来表示的，而且比较时一般是取误差绝对值的。

2. 精度等级：工业仪表常以允许的引用误差作为判断精度等级的尺度。人为规定：取允许引用误差百分数的分子作为精度等级的标志，也即用允许引用误差去掉百分号(%)后的数字来表示精度等级，其符号是 G ，则 $G = Q \times 100$ ，或 $Q = G\%$ 。

各种仪表的精度等级的数字是有一定规定的，工业仪表常见的精度等级如表 1.4.1 所示。

表 1.4.1 工业仪表常见精度等级

精度等级 G	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0
允许(引用)误差 $ Q $	0.1%	0.2%	0.5%	1%	1.5%	2%	2.5%	5%
引用误差 $ P $	$\leq 0.1\%$	$\leq 0.2\%$	$\leq 0.5\%$	$\leq 1\%$	$\leq 1.5\%$	$\leq 2\%$	$\leq 2.5\%$	$\leq 5\%$

一般情况下，一级精度仪表，表示其允许误差的绝对值， $|Q| = |\pm 1\%| = 1\%$ ，也可省去绝对值符号，简记为 $Q = 1\%$ ；当记为 $Q = \pm 1\%$ 时，则表示允许误差的变化范围可以从 -1% 至 $+1\%$ ，其余同此。另外要注意的是：精度等级的标志说明了引用误差允许值的大小，它决不意味着该仪表实际测量中出现的误差。如果认为 1.0 级仪表所提供的测量结果一定包含着 $\pm 1\%$ 的误差，那就错了。只能说在规定的条件下使用时它的绝对误差的最大值的范围不超过量程的 $\pm 1\%$ 。如量程为 100 V 的一级电压表， $|\delta|_{\max} \leq |\pm 1\%| V = 1 V$ 。或 $q_{\max} \leq 1\%$ 。

显然，仪表精度等级的数字愈小，仪表的精度愈高。0.5 级的仪表精度优于 1.0 级仪表，而劣于 0.2 级仪表等。

工业测量中，单次测量值的误差就是用工业仪表的精度等级来估计的（一般取 3σ 作为极限误差，详见第二章）。

由此可见，仪表的精度等级是反映仪表性能的最主要的质量指标。它充分地说明了仪表的测量精度。

例如，按毫伏刻度的电子电位差计检验记录如下：

示 值 x [mV]	0.00	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00
真 值 x_0 [mV]	0.01	1.98	4.01	5.97	8.04	9.99
绝 对 误 差 δ [mV]	-0.01	+0.02	-0.01	+0.03	-0.04	+0.01
引 用 误 差 q [%]	-0.1	+0.2	-0.1	+0.3	-0.4	+0.1

由此可得最大引用误差为：

$$q_{\max} = \frac{\delta_{\max}}{L} \times 100\% = -0.4\%$$

若仪表为 0.5 级精度，则允许误差为：

$$Q = \pm 0.5\%$$

因 $|q_{\max}| < |Q|$ ，故此仪表合格。

四、仪表的灵敏度与分辨率

灵敏度定义为由于仪表输入的变化所引起的输出的变化 Δy 与输入变化量 Δx 之比。换句话说，仪表的灵敏度是单位输入量的变化所引起的输出量的变化。上述定义中输入与输出的变化量均是指它们在两个稳态值之间的变化量而言。如灵敏度用符号 S 表示，则可记为：

$$S = \Delta y / \Delta x \quad (1.4.8)$$

由于输入、输出变化量 Δx 和 Δy 均是有量纲的，所以 S 也是有量纲的。如输入量为温度， $[\Delta x] = ^\circ\text{C}$ 。输出量为指针在标尺上的位移， $[\Delta y] = \text{分格}$ ，则 $[S] = \text{分格}/^\circ\text{C}$ 。如果输入与输出是同类量，则此时 S 可理解为放大倍数。因此仪表的灵敏度比放大倍数的含义要广得多。

线性标尺仪表的灵敏度为一常数；非线性标尺仪表的灵敏度为一变量。在标尺各处， S 值不同。当仪表标尺零点迁移时，标尺零点及仪表测量范围变化，仪表量程及灵敏度不变。当量程迁移时，灵敏度、量程及测量范围均变化，仅标尺零点不变。

仪表灵敏度高，仪表示值读数的精度可以提高，但仪表的灵敏度应与仪表的精度等级相适应。前者应略高于后者。过高的灵敏度提高不了测量的精度，反而会带来读数的不稳定。

分辨率定义为仪表示值可以响应与分辨的最小输入量的变化，它说明了仪表响应与分辨输入量微小变化的能力。它又可称为灵敏度限或鉴别阈。

灵敏度与分辨率是说明仪表性能的重要指标。灵敏度越高，分辨率越好，二者也应是相适应的。

五、变差

仪表处在正常工作条件时，令被测量逐渐增加(称之为上行)和逐渐减少(称之为下行)，对于仪表的同一示值，上述两次测量值的代数差的绝对值，也即上行读数与下行读数代数差的绝对值称之为变差。设上行读数为 $x_{上}$ ，下行读数为 $x_{下}$ ，则变差 v 记为：

$$v = |x_{上} - x_{下}| \quad (1.4.9)$$

根据定义若上行误差为 $\delta_{上}$ ，下行误差为 $\delta_{下}$ ，则变差又可表示为：

$$v = |\delta_{上} - \delta_{下}| \quad (1.4.10)$$

如果仪表的变差除以量程的结果在允许误差范围之内，则此仪表合格。

变差又称回差，实际反映在仪表检验时所得的上升曲线和下降曲线常出现不重合的现象。其原因可能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；或是由于仪表内传动机构的摩擦、间隙等造成。

六、漂移

一定工作条件下，保持输入信号不变时，输出信号随时间或温度的缓慢变化称之为漂移。随着时间的漂移称为时漂。随着环境温度的漂移称之为温漂。例如，弹性元件的时效，电子元件的老化，放大线路的温漂，热电偶热电极的污染等均为漂移。

漂移能够说明仪表工作的稳定性能，需要长时间运行的仪表，这个指标更为重要。

七、可靠性

现代工业生产的自动化程度日益提高，仪表的任务不仅要提供检测数据，而且以此为依据，直接参与生产过程的控制，因此仪表在生产过程中的地位越来越重要。仪表出现故障往往会导致严重的事故，为此必须加强仪表可靠性的研究，提高仪表的质量。

衡量仪表可靠性的综合指标是有效度，其定义为：

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

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尽可能短，也即有效度的数值越大越好。此值越接近 1，仪表工作越可靠。

八、响应时间

仪表的响应时间定义为：当仪表输入阶跃变化时，仪表输出从一个稳态到另一稳态值(有某些情况下取其 90%)所需的时间。

当仪表输入从一稳态到另一稳态突然变化时，只有经过一定时间稳定之后，才有相应的输出响应。这是因为仪表的传感器响应输入量的变化需要时间，仪表各个环节信号的放大，传输和变换均需有一定的时间等。

上面仅介绍了仪表的某些主要性能指标。应当注意，某些指标的概念可能有差别，有待

于统一。有些指标在不同情况下,定义的方法也会有不同,另外对专门的仪表还需专门指标等。

§ 1.5 检测的基本方法

检测方法是指被测量与其单位进行比较的实验方法。根据检测仪表的特点,检测的基本方法可有非零法与零位法、接触法与非接触法等。如果按照被测对象的特点来分,又有静态测量与动态测量、点参数测量与场参数测量等。下面分别叙述之。

一、非零检测法与零位检测法

1. 非零检测法:通过仪表的测量机构,直接或间接检测被测量所产生的输出信号的大小,该输出信号不为0,其相应的数值就是被测量的测量值,由显示器显示之。例如:压力计的弹簧管承受压力后产生形变,经传动机构带动指针转动,当形变后的作用力矩与反作用力矩平衡时,指针稳定指示在标尺的一定位置,经过预先标定,该位置就相当于某个压力的数值。目前多数的检测仪表依据此方法而工作。这种仪表结构简单、直观、经济,故应用甚广。但其精度较低,且往往要消耗被测对象的部分能量,损失部分信号等。

2. 零位检测法:通过仪表的测量机构,比较被测量与已知标准量两者差值信号的大小与相位,调节已知标准量的大小,使两者完全平衡或全部抵消,此时测量系统对差值信号的指示为0,则已知标准量的数值就是被测量的测量值的代表。零位检测法的典型例子是“天平”称重。待称量的重物置于天平的一侧,另一侧放置标准砝码;当天平平衡时,指示器在中央零位,则砝码的质量精确地等于被测物的质量。依据此法而工作的,还有电位差计,平衡电桥等。零位测量法有利于消除各种干扰因素的影响,提高测量的准确性,是精密仪表的发展方向,但是仪表的结构较复杂,价格较贵。

二、接触式检测法与非接触式检测法

1. 接触式检测法:检测仪表的传感器与被测对象直接接触,承受被测参数的作用,感受其变化,从而获得信号,并检测其信号大小的方法。例如,体温计中的传感器,直接与人体接触,承受温度的作用,感受其变化而指示温度值。又如弹簧管压力计也是如此。

2. 非接触检测法:检测仪表的传感器不必直接与被测对象相接触,而是间接承受被测参数的作用,感受其变化,从而获得信号,达到检测目的的一种方法。例如,用辐射温度计测量温度时,它的传感器不与被测对象接触,而是接受其辐射的能量,间接承受被测对象温度的作用,得到电信号,并转变成温度后显示之,因此它是一种非接触式测温仪表。各种遥测与遥感式的仪表也是依据非接触测量法进行工作的。相对于接触式测量法,非接触式测量法有其独特的优点。它不干扰被测对象,既可对被测对象的局部“点”进行检测,又可对被测对象进行扫描,得到其二维、三维、甚至四维的信息。特别是在一些接触方法不能胜任的场合,例如运动对象的参数测量、腐蚀性介质及危险场合下的参数测量等,使用非接触测量方法就更为方便,安全和准确了。

三、静态检测法与动态检测法

静态检测法是指被测对象处于稳定情况下的测量,此时被测参数不随时间而变化,故又

称稳态测量。动态检测是在对象处于不稳定的情况下进行测量。此时被测参数随时间而变化，因此这种测量应当是瞬间完成，只有这样才能得到动态参数的测量结果。

一般情况下，被测参数多是随时间变化的，生产过程中的检测量常是如此。运动是绝对的，静止是相对的。因此，过程检测实际上应是动态测量。主观上想重复测量得到某量的同一数据是不可能的。如果被测参数随时间变化很缓慢，而测量所需时间又相对很短时，被测对象可近似为稳态情况，此时，测量过程可认为是稳态或静态测量。这种近似也是产生测量误差的原因之一。

四、点参数测量法与场参数测量法

点参数测量法系指测量被测对象某个局部点的参数，而场参数测量则是指测量被测对象的某个参数的平面分布或空间分布。

由于动态测量及场参数的测量属于专门的研究课题，本书暂不作讨论。一般情况下只考虑稳态的被测对象及其点参数的检测。

§ 1.6 检测仪表的分类

由于科学技术及生产的迅速发展，检测仪表的种类繁多，不胜枚举。为此，简单分类如下。

一、按被测参数分类

常见的有热工参数，电工参数及机械参数等几大类参数的检测仪表。在热工参数或过程参数的自动检测仪表中，通常按照被测量来分类。如有温度检测仪表，压力、流量、热量、料位及成分分析仪表等。

二、按使用性质分类

常见的有标准表，实验室表和工业用表等三种。“标准表”顾名思义是专门用于校准非标准仪表的。它本身必须经过有关计量部门的定期检定，并具有检定合格证书，方可使用。标准表的精度等级必须高于被校表，而其本身又是根据量值传递的规定由更高一级的标准表检定之。

“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虽较工业用表为高，但使用条件要求较严，只适于实验室条件下读数，不适于远距离观察及传送信号等。

“工业用表”是长期安装使用于实际工业生产现场上的仪表。这类仪表为数最多。据安装地点的不同，又有现场安装及控制室安装之分。前者应有可靠的防护，能抵御环境条件恶化的影响，其显示也应醒目。工业用表的精度一般不高，但能长期连续工作，并具有足够的可靠性。在某些场合下使用，还必须保证不因仪表引起事故，如在易燃易爆环境条件下使用时，应有很好的防爆能力等。

三、按显示器的功能分类

检测仪表按显示器的功能可分为指示仪，记录仪，积算仪和调节仪等。有的一块仪表可