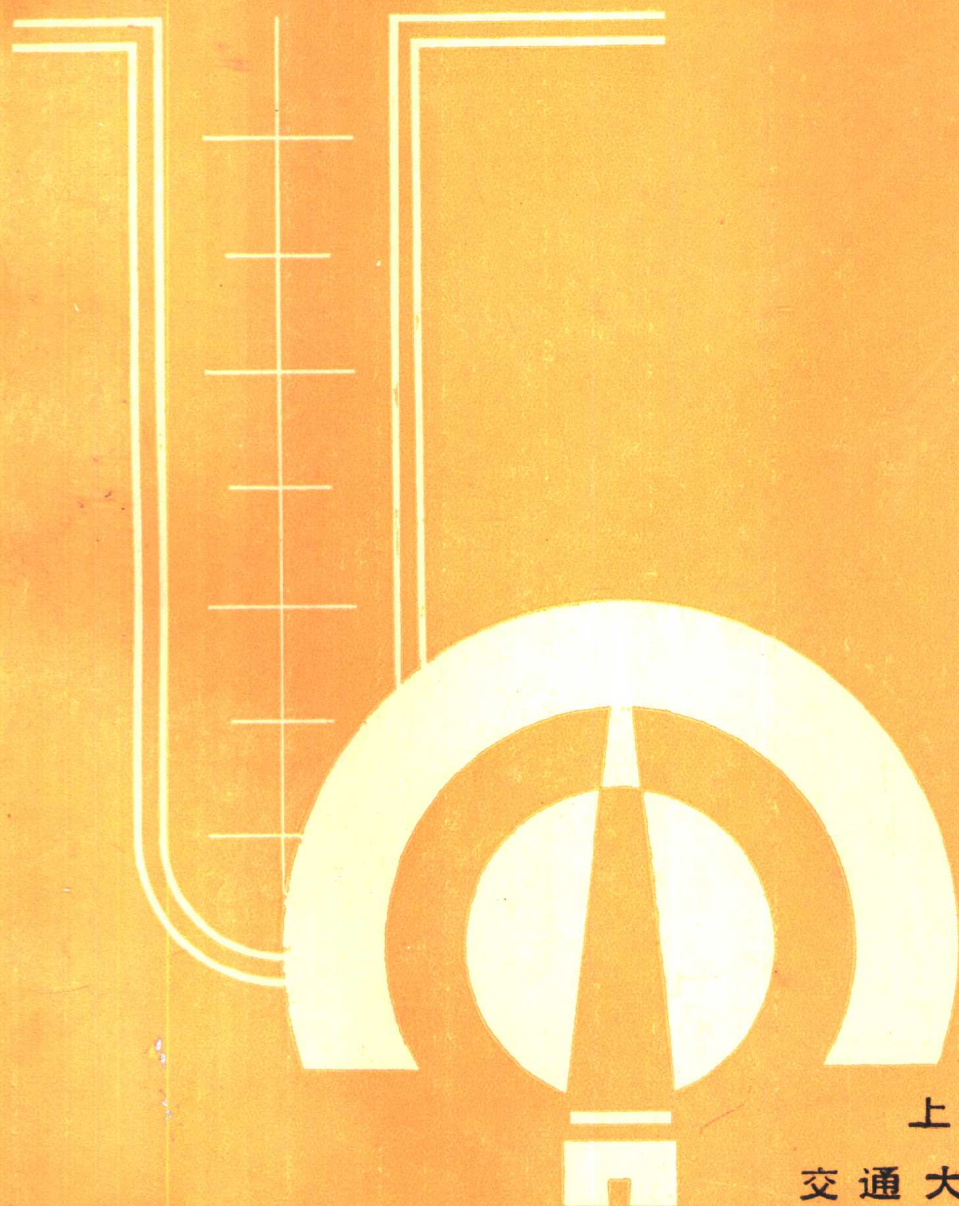


热工与制冷测试技术

RE GONG YUZHILENG GE SHI JI SHU

徐大中 著



上 海

交通大学出版社

热工与制冷测试技术

徐 大 中 编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书包括四大部分内容:一是测量误差的分析、估计及其限制;二是实验数据的回归分析方法、程序框图及其参考程序;三是热工与制冷的基本参数(温度、湿度、压力、风速、流量、液位、转速)的测量方法及其常用仪表的选择和使用;四是微型计算机在测试技术中的应用,并结合实例介绍了传感器输出/输入数学模型的建立、微型计算机测试系统及其采样程序的编制方法。

本书可作为热能、制冷、空调等有关专业测试技术课程的教学用书,也可供有关工程技术人员和技术工人作参考。

热工与制冷测试技术
上海交通大学出版社出版
(淮海中路 1984 年 19 号)
新华书店上海发行所发行
常熟文化印刷厂排版印装

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 17.5 字数 431.000

1985 年 12 月第 1 版 1985 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—5,300

统一书号: 15324 157 科技书 11: 116-217

定价: 3.20 元

前 言

随着科学技术的不断发展和学科之间的互相渗透,实验技术的掌握就显得越来越重要,它已成为大学生和科技人员必不可少的基本技能训练,本书就是适应这种形势而为热能、制冷、空调专业编写的有关测试技术方面的教材。

本书主要论述了测量误差的分析、估计及其限制方法;讨论了实验数据的整理方法(本书着重介绍了应用微型计算机进行回归分析的程序框图和参考程序);热工及制冷的基本参数(温度、湿度、压力、风速、流量、液位、转速)的测量方法及其常用仪表的选择和使用;最后为使学生掌握测试领域中的新技术,论述了微型计算机在测试技术中的应用,并结合实例具体分析传感器输出/输入数学模型的建立、微型计算机测试系统以及采样程序的编制方法。本书教学时数为54学时左右。

本书的第八章由黄滋德同志执笔。

在本书编写过程中,得到了李铭慰教授、吴善勤教授、石家泰副教授、杨本法副教授以及出版社张泉宝同志的热情指导和帮助,谨向他们表示深切的谢意。

限于编者的水平和实践经验不足,书中不妥和错误之处,恳请专家和读者批评指正。

目 录

第一章 测量误差分析	1
§1-1 测量方法概述	1
§1-2 测量误差与仪表的质量指标	3
§1-3 有效数字及其计算法则	9
§1-4 直接测量中的系统误差分析	12
§1-5 直接测量中的随机误差分析	16
§1-6 直接测量中的误差综合	34
§1-7 间接测量中的误差分析	35
第二章 微型计算机在实验数据回归分析中的应用	45
§2-1 概述	45
§2-2 一元线性回归分析	49
§2-3 一元多项式回归分析	56
§2-4 多元线性回归分析	60
第三章 转速测量	73
§3-1 接触式转速测量仪表	73
§3-2 非接触式转速测量仪表	75
第四章 压力测量	82
§4-1 概述	82
§4-2 常用测压仪表	83
§4-3 电测测压技术	91
§4-4 数字巡回压力检测系统	96
§4-5 压差测量	101
第五章 气流速度测量	107
§5-1 利用气压法测量气流速度	107
§5-2 冷库和空调房内微风速的测量	112
第六章 流量测量	116
§6-1 气流法测定流量	116
§6-2 差压式流量节流装置	119
§6-3 进口流量管	141
§6-4 转子流量计	144
§6-5 涡轮流量计	146
第七章 温度测量	158
§7-1 概述	158
§7-2 液体膨胀式温度计	162
§7-3 热电测温技术	165
§7-4 电阻测温技术	184
§7-5 二极管测温系统	190

§7-6	接触式测温方法的误差分析	191
§7-7	测温仪表的校验	193
§7-8	数字式多点温度自动巡回检测装置	194
第八章	湿度测量	217
§8-1	湿度的衡量标准	217
§8-2	干湿球温度法湿度测量	219
§8-3	氯化锂电湿度计	222
§8-4	毛发湿度计	226
第九章	液位测量	231
§9-1	浮子式液位计	231
§9-2	静压式液位计	233
§9-3	电容式液位计	233
第十章	微型计算机在热工及制冷测试中的应用	237
§10-1	微型计算机概述	237
§10-2	微型计算机测试系统的组成	241
§10-3	微型计算机在测试中的应用	249
§10-4	微型计算机在温、湿度测量中的应用	255
§10-5	微型计算机在实验系统控制中的应用	266

第一章 测量误差分析

随着科学技术的不断发展,展示在人们面前需要进行探索的领域越来越宽广,需要研究的学科越来越多,而且各学科之间互相渗透,变得越来越复杂,因此,仅用现有的科学理论往往尚不能揭示出它的内在规律,而必须更多地借助于实验手段,当然实验就离不开对参数的测量。而每一个参数的获得,都是通过人使用一定的测量仪表,在一定的条件下依据一定的理论,使用一定的测量方法和程序进行的。尽管我们进行测量的参数具有客观存在的确定值(所谓真值),但是,由于受到人的观察能力、测量仪表、测量方法以及环境条件等因素的限制,被测参数的真值是无法测量得到的,在测量中所得到的测量值只能是一个近似值,其近似的程度取决于所依据的理论、使用的测量方法、选择的测量仪表、测量所处的环境条件以及测试人员的操作水平等。随着科学技术的不断发展,测量仪表会不断地改进和完善,使测量值不断逼近真值。但不管怎样,两者之间总是存在一定的差异,这种差异的程度,就使用误差这一概念来加以描述。

我们在测量的实践中发现,尽管我们使用同一套仪表,在相同的环境条件下,采用同样的测量方法对同一稳定的参数进行多次测量,却得到不尽相同的测量结果。显而易见,这说明在测量中存在误差。但在某些场合,我们对同一参数进行多次测量时,却可得到同一测量结果,那末,这是否就说明在这些测量中就不存在有误差呢?我们的回答是否定的,所以会出现这种情况,其原因是:一,可能测量仪表灵敏限太大(即分辨率太低),以致不能够反映出事实上存在的测量误差;二,由于某种误差的大小和方向是固定不变的,这就造成了测量值不变的假象。因此,在任何测量中误差总是存在的,这是绝对的,不可避免的,误差分析的任务就在于估计出测量误差的范围,指出误差的性质以及产生误差的原因,从而提出限制或消除测量误差的措施,最后对测量结果的精确度作出评价。

§1-1 测量方法概述

一、被测量

我们在实验中,往往必须知道某些物理量的数值大小,因而必须对它进行检测,通常就把需要检测的物理量称为“被测量”或被测参数。在热工与制冷测试技术中,经常碰到的被测量是:温度、压力、流量、湿度、液位、转速等。

按照被测量随时间的变化关系区分如下。

(一) 静态参数(常量)

某些被测量在整个测量过程中的数值大小始终保持不变,即参数值不随时间而变。例如周围环境的大气压力;制冷压缩机稳定工况的转速等均不随时间而变,我们把这类参数称为静态参数或常量。当然严格地说,上述这些参数的数值也并非绝对恒定不变,只是随时间变化得非常缓慢,因而在进行测量的时间间隔内由于其值变化甚微而可以忽略不计而已。

（二）动态参数

随时间不断改变数值的被测量称为动态参数，例如非稳定工况或过渡过程之压缩机的转速、功率；冷库在打冷过程中的冷库温度等等均属于动态参数。这些参数随时间变化的函数可以是周期函数、随机函数等等。

二、测量过程

要知道被测参数的大小，就需要使用测量仪表来检测它的数值，尽管测量仪表种类繁多，被测量和仪表的结构原理也各不相同，然而从仪表对被测量的测量过程的本质而言，它们都有共同之处。例如弹簧压力表对压力的测量，是根据被测压力作用于弹簧管使其受压变形，把压力转换成弹簧管变形的位移（机械能），然后再通过杠杆传动机构的传递和放大，变成压力表指针的偏转，最后与压力刻度标尺上的测压单位相比较而显示出被测压力的数值；又如用热电偶来测量温度，它是利用热电偶的热电效应，把被测温度转换成热电势信号（电能），然后把热电势信号转换成毫伏表上的指针偏转（机械能），并与温度标尺相比较而显示出被测温度的数值。由此可见，不管各种测量仪表其测量原理如何不同，它们的共同之处在于被测参数都要经过一次（如压力表）或多次（如热电偶测温仪表）的信号能量转换，获得便于测量信号能量的形式，最后由指针或数字形式显示出测量结果。因此，各种测量仪表的所谓测量过程，就是被测参数信号以能量形式进行一次或多次不断转换和传递的过程，以及与相应的测量单位进行比较的过程。

三、一次仪表和二次仪表

测量仪表视其在测量过程中所起的作用不同，一般把它区分为一次仪表和二次仪表。

（一）一次仪表

它是在测量过程中直接感受被测参数的变化并转换成某一信号（能量）变化的仪表。例如压力表中的弹簧管、热电偶测温仪表中的热电偶。一次仪表又称传感器。

（二）二次仪表

它是接受一次仪表的输出信号，并将其放大或转换成其他信号，最后显示出测量结果的仪表。例如压力表中的杠杆传动机构、指针和标尺；热电偶测温仪表中的电位差计（或毫伏表）。

由此可见，有的测量仪表是把一次仪表和二次仪表组合在一个仪表中，如压力表、水银温度计等；而有的测量仪表则将一次仪表和二次仪表分别做成独立的仪表，如热电偶温度计、涡轮流量计等。

四、测量方法的分类

按照获得测量参数结果的方法不同，通常把测量方法区分为直接测量和间接测量。

（一）直接测量

凡是被测参数直接与测量单位进行比较，其测量结果可以直接从测量仪表上获得的测量方法称为直接测量，例如使用水银温度计测量温度。直接测量又可分为：直读法和比较法两类。

1. 直读法

它是可以直接从测量仪表上读得被测量的结果,如压力表等。这种方法的优点是使用方便,但一般精度较差。

2. 比较法

这种测量方法一般不能从测量仪表直接读得测量结果,而往往要使用标准量具,因此测量手续比较麻烦,但测量仪表本身的误差以及其他某些误差则往往在测量过程中被抵消,因此,测量精度一般比直读法高。根据不同的比较方法又可区分为:

(1) 零示法(又称零值法)

在测量时,使被测之量的作用与已知量(量具)的作用效应互相抵消(平衡),以致总的效应减到零,这样就可以肯定被测之量即等于这个已知量,例如利用电位差计来测量热电偶在测温时产生的热电势大小。

(2) 差值法

使用适当的手段测量出被测量 x 与一个已知量 x_k 的差值 $(x - x_k)$, 则有

$$x = (x - x_k) + x_k$$

例如用热电偶温度计测量温度 t 时,从仪表上得到的是被测温度 t 与热电偶冷端温度 t_k 之差。

(3) 代替法

在一定的测量条件下,选择一个大小适当的已知量(通常是可调的标准量具),使它在测量装置中取代被测量而不致引起测量仪表指示值的变化,那末被测量的数值就等于这个已知量。由于在代替法中的两次测量,仪表的状态及其指示值都相同,所以仪表的准确度对测量结果基本上没有什么影响,从而消除了测量结果中的仪表误差,这样就可选择准确度较差的测量仪表而获得高的测量精度。

(二) 间接测量

所谓间接测量就是不直接测量被测量,而是通过测量与被测量有一定关系的其他一个或几个物理量,然后通过它们之间的函数关系计算出被测量的数值。例如在测量风道中空气流量 Q 时,通过测量出风道中的空气流速 c 米/秒和风道的截面积 S 米²,则空气流量 Q 由下式计算而得

$$Q = Sc \text{ 米}^3/\text{秒}(\text{m}^3/\text{s})$$

§1-2 测量误差与仪表的质量指标

一、真值与测量值

我们要进行测量的物理量,它具有客观存在的量值,这一量值就称之为真值,用 x_0 表示。而我们通过测量仪表检测得到的结果称为测量值,用 x 表示。

由于测量仪表、测量方法、环境条件、人的观察能力以及测量程序等都不能做到完美无缺的程度;另一方面,要对物理量进行测量,首先就需要一个比较标准,而真正的比较标准又不存在的,它仅仅存在于纯理论之中。基于上述原因,在测量中总是存在有误差,所以实际上真值 x_0 是无法测量得到的。随着人们认识运动的推移和发展,在实践中不断改进测量仪表、测量方法以及数据处理方法,测量值 x 可以无限地逐渐逼近真值 x_0 ,然而却不能等于真值 x_0 ,因此,我们的目的就在于采取各种手段来获得尽可能接近真值 x_0 的测量值 x , 两

者之间的差异程度称为测量误差。

二、测量误差的分类

(一) 按其误差数值的表示方法可区分为

1. 绝对误差 Δx

设被测量的真值为 x_0 , 其测量值为 x , 则绝对误差 Δx 可表示为

$$\Delta x = x - x_0$$

绝对误差 Δx 表示了测量误差在量值上的大小。测量结果记作

$$x \pm \Delta x$$

2. 相对误差 δ

由于绝对误差 Δx 仅仅能表示出测量误差数值的大小, 而不能表示出测量的精确度, 例如在某温度测量中得测量结果为 $[15 \pm 1]^\circ\text{C}$; 在另一温度测量中得到测量结果为 $[50 \pm 1]^\circ\text{C}$; 尽管它们的绝对误差均为 $\pm 1^\circ\text{C}$, 显然后者的测量精确程度明显高于前者, 为便于测量结果之间测量精确程度的相互比较, 因而引入了相对误差 δ 的概念, 其含义为: 绝对误差 Δx 与测量值 x 之比, 并用百分数表示, 即

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

测量结果就表示为 $(1 \pm \delta)x$

由于被测量的真值 x_0 实际上是无法得到的, 因此, 绝对误差 Δx 和相对误差 δ 也无法求得, 所以在实际计算中往往把高级准确度仪表测量得到的值作为真值 x_0 的近似值来计算。

(二) 按测量误差的特性可区分为

1. 系统误差

它是指在测量中产生的量值大小和符号都恒定不变或遵循一定规律变化的误差, 一般情况下, 产生这种误差的原因也是可以知道的。

2. 随机误差(又称偶然误差)

在消除了系统误差之后, 对同一物理量进行多次重复测量时还会由于某些不可知的原因引起测量值或大或小的现象, 而此种现象又无一定的变化规律, 它的出现完全是随机的。但它一般都遵循正态分布律, 因此可通过数理统计的方法加以处理, 我们把这种误差称为随机误差或偶然误差。

3. 过失误差

凡是在测量过程中完全是由于测量者人为的过失而造成的误差都称为过失误差, 当然此种误差也无规律可循, 但却是完全可以通过主观的努力加以克服。

(三) 按测量误差产生的来源可区分为

1. 仪表误差

它是由测量仪表本身在测量中所造成的误差, 误差大小与仪表的制造工艺、结构完善程度等有关, 通常用仪表的准确度来表示。

2. 人为误差(也称操作误差)

它是由测量者主观原因所造成的误差, 当然它是与人的观察力、操作是否细心有关。

3. 环境误差

它是由于测量环境不符合仪表使用条件而产生的附加误差。

4. 装置误差

它是由于仪表测量装置的安装不符合要求而产生的附加误差。

三、测量的准确度、精密度和精确度

目前,这三个概念的含义在国内外都还存在一些混乱,各种资料中的使用也有些含糊不清,这里仅对大家比较公认的定义作一介绍。

(一) 准确度

它是指测量值 x 与真值 x_0 的符合程度,一般它是由系统误差的大小来表征的,系统误差大,意味着测量的准确度就低,反之就高。

(二) 精密度

它是表征对同一被测量在相同的条件下,使用同一仪表由同一操作者进行多次测量所得结果彼此之间接近的程度。换言之,它是表示测量重复性的好坏,通常它是由随机误差来描述的,随机误差大,测量的重复性就差;反之重复性就好。

(三) 精确度(精度)

它是准确度和精密度的综合反映,习惯上用精度这一概念来综合表示测量误差的大小。它们三者之间的关系可从定义直接得到:如果测量的准确度高,那末测量的精密度也一定好,当然测量精度就高;反之,测量的精密度好,而其准确度却不一定高,同样精度也不一定高。上述结论可用打靶的例子来解释(如图 1-1 所示)。

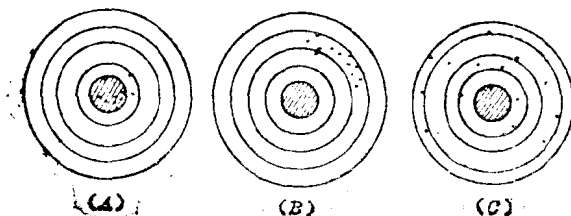


图 1-1 准确度、精密度和精度示意

图 1-1 中的 A、B、C 表示三个射手的射击成绩,由图可知,A 射手的准确度和精密度都好,即精度也高,B 射手的准确度差,但精密度却很好;C 射手则准确度和精密度均不好。

四、测量仪表的基本技术性能

(一) 静态特性

1. 量程和刻度范围

仪表能够测量的最大输入量与最小输入量之间的范围称作仪表的量程或测量范围;而仪表显示盘上的刻度终值(即满刻度)与起始值所限定的范围称作仪表的刻度范围。量程与刻度范围两者之间差异在于仪表存在有基本误差,在实际使用中,往往对这两个概念不加区别。

选用仪表时,首先应对被测量的大小有一初步估计,务必使被测量的值都落在仪表的量程之内,否则,当被测量的值超过仪表的量程,则会导致仪表的损坏,或者不能测量得到被测

量的真实结果。

2. 准确度

它是衡量仪表基本误差大小的标准,一个仪表制成之后,只要使用条件和操作均符合说明书规定的技术要求,那末在测量中造成的仪表误差是固定不变的,因此,它是系统误差的一种,它的大小应用仪表的准确度概念来描述,但在很多场合(包括产品说明书)都沿用精度这一概念来描述,编者认为使用准确度更为恰当,本教材中使用精度这一术语时,表示总的测量误差的大小。

仪表准确度是由仪表的最大绝对误差 Δx 折合到仪表标尺范围的百分数(即相对误差)来表征的,即

$$\text{准确度} = \frac{\Delta x}{\text{标尺上限值} - \text{标尺下限值}} \times 100\%$$

因此,仪表的准确度高,就可以使用它测量得到比较接近真值 x_0 的测量值 x ,因而它是仪表的一个重要技术性能。为此,国家已按其相对百分误差的大小划分成七个等级,即 0.1 级; 0.2 级; 0.5 级; 1.0 级; 1.5 级; 2.5 级; 5.0 级。通常它不仅在产品的说明书中标明,而且还在仪表表面上标出。

例如某一温度表的准确度为 1.0 级,量程为 $50 \sim 100^\circ\text{C}$,如果使用这一温度表来测量温度,那末在测量中可能产生的仪表误差不超过满量程的 1.0%,即为

$$(100 - 50) \times 1.0\% = 0.5^\circ\text{C}$$

在掌握仪表准确度这一概念时必须弄清楚两点:

(1) 在测量中使用同一准确度等级,量程又相同的仪表,那末所引起的仪表误差(绝对误差)与被测参数的数值大小无关。例如上面所举的例子中,不管你测得温度值是 60°C 还是 80°C ,其所产生的仪表误差均为 0.5°C 。因此,被测量的值最好落在满刻度的三分之二左右为宜,而应避免使测量值出现在满刻度的三分之一以下,从而可以避免在测量中导致过大的相对误差。

(2) 对同一准确度的仪表,如果量程不等,则在测量中可能产生的绝对误差是不同的。

例如有两个准确度均为 1.0 级的温度表,一个量程为 $0 \sim 50^\circ\text{C}$,而另一个则为 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 。用这两个温度表来测量同一温度,得到的测量结果均为 40°C ,则可能产生的仪表误差分别为

$$\Delta t_1 = \pm (50 - 0) \times 1\% = \pm 0.5^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = \pm (100 - 0) \times 1\% = \pm 1.0^\circ\text{C}$$

由此可见,准确度等级相同的仪表,量程越大,其绝对误差也越大,所以我们在选用仪表时,在满足被测量的数值范围的前提下,尽可能选择量程小的仪表,并使测量值在满刻度的三分之二左右,这样就可以达到既满足测量误差要求,而又可选择准确度等级较低的测量仪表,从而降低仪表的成本。

例如被测温度值在 40°C 左右变化,绝对误差(系统误差)要求不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,如可供选择的温度表有

量程为 $0 \sim 50^\circ\text{C}$; $0 \sim 100^\circ\text{C}$; $0 \sim 200^\circ\text{C}$ 的 1.0 级表。

量程为 $0 \sim 50^\circ\text{C}$; $0 \sim 100^\circ\text{C}$; $0 \sim 200^\circ\text{C}$ 的 0.5 级表。

试选择合适的温度表。

若单纯根据误差要求,则选用量程为 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的 1.0 级表和量程为 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的 0.5 级表均能满足要求,因为它们的仪表误差均为

$$\Delta t_1 = \pm (50 - 0) \times 1\% = \pm 0.5^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_2 = \pm (100 - 0) \times 0.5\% = \pm 0.5^{\circ}\text{C}$$

显然选用量程为 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$, 准确度为 1.0 级的温度表更为适当,这是因为它既可满足提出的误差要求,而准确度等级却比较低,当然价格也就便宜。

3. 灵敏度和灵敏限(分辨率)

灵敏度是表征测量仪表对被测参数变化的灵敏程度,其值为输出增量与输入增量之比,即

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta a}{\Delta x}$$

式中 Δa ——为输出信号的变化量。

Δx ——引起输出信号变化 Δa 时的被测参数的变化量。

对一台线性仪表而言,它的灵敏度是一个常数。

一般说灵敏度高,仪表的准确度也相应比较高,但必须指出仪表的准确度主要取决于仪表本身的基本误差,而并不能单纯地提高仪表的灵敏度来达到提高准确度的目的。

仪表的灵敏限是指能够引起测量仪表动作的被测参数的最小变化量,也即仪表的死区,通常也称为仪表的分辨率,显然,仪表的灵敏限大,准确度也相应较低,一般仪表的灵敏限应不大于仪表允许绝对误差的一半。

4. 变差

在外界环境条件不变的情况下,使用同一仪表对被测参数进行正行程(即逐渐由小到大再由大逐渐到小)测量时,在相同的被测参数值下仪表的指示值却不相同,这种差异的程度由变差给予表征,其值如图 1-2 中 $\Delta_{\max}$ 所示。

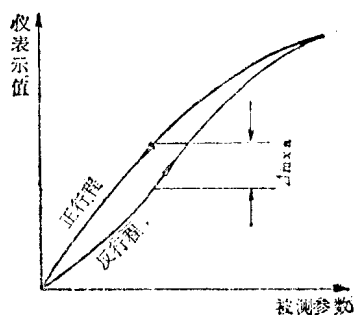


图 1-2 变差示意图

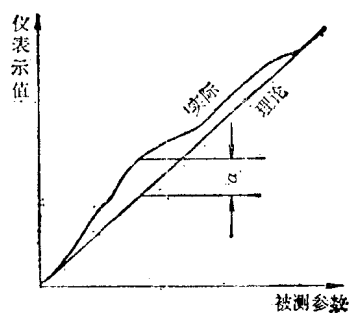


图 1-3 仪表线性示意

5. 线性

常用的仪表不少都为线性仪表,即灵敏度为常数,但它又不绝对是一个常数,这种好坏的程度用“线性”加以表征,其值用仪表的使用范围内输出信号偏离线性的最大偏差 a 与量程(如图 1-3 所示)的百分比表示,即

$$\text{线性} = \frac{a}{\text{量程}} \times 100\%$$

显然仪表的线性差,则它的准确度也一定不高。

(二) 测量仪表的动态特性

动态特性是指仪表对随时间变化的被测量的响应特性。动态特性好的仪表,其输出量随时间变化的曲线与被测量随同一时间变化的曲线一致或者比较接近。但是由于实际被测量随时间变化的形式是各种各样的,所以为了便于比较,在研究动态特性时通常输入标准信号——阶跃变化和正弦变化两种信号来考虑仪表的动态特性,前者称为阶跃响应,后者称为频率响应。

为了便于分析和研究仪表的动态特性,一般必须建立仪表的输入(x)和输出(y)之间的数学模型,对于线性系统,其数学模型通常都是一个线性常系数微分方程式:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned}$$

只要求解此微分方程就可得到仪表的动态性能指标,在具体处理时,分别求出输出(y)与输入(x)的拉氏变换 $y(s)$ 和 $x(s)$, 得到输出与输入的拉氏变换之比

$$w(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1-1)$$

式(1-1)称为传递函数,这样就可把解常系数微分方程转化为解一个代数方程,从而大大简化了数学过程。由于本书主要讨论静态参数的测量,因此对动态特性就不进一步展开讨论,而只给出一般的概念。

1. 频率响应

当输入信号为正弦波(如图 1-4 所示) $x(t) = A \sin \omega t$, 则输出为

$$y(t) = B \sin(\omega t + \varphi)$$

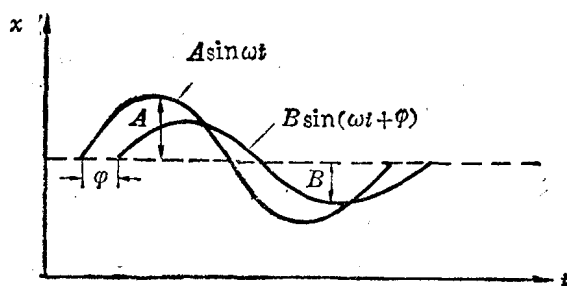


图 1-4 仪表频率响应图示

输入信号振幅 A 即使一定,只要它的频率 ω 有所变化,那末输出信号 $y(t)$ 的振幅 B 和相位 φ 也会发生变化,所谓频率响应就是在稳定状态下的振幅比 A/B 和相位 φ 随频率 ω 变化的情况(如图 1-4 所示),即有

$$A/B = A(\omega) \text{ 和 } \varphi(\omega)$$

其中 $A(\omega)$ 称为幅频特性, $\varphi(\omega)$ 称为相频特性。如果 $A/B \approx 1$; $\varphi \approx 0$, 则仪表的频率响应就好,否则仪表频率响应就差。

仪表的频率响应主要由仪表的固有频率 ω_0 决定,一般 ω_0 高,仪表的频率响应就好,反之就差。

2. 阶跃响应

阶跃响应是指仪表在输入阶跃信号($t=0$ 时 $x(t)=0$, $t>0$ 时 $x(t)=A$)时,其输出信号 $y(t)$ 能否立即跟随输入信号变化的能力。对于一阶仪表其阶跃响应如图 1-5 所示, 其性能由仪表的时间常数 τ 所表征, τ 大,则阶跃响应差, τ 小,则阶跃响应就好。

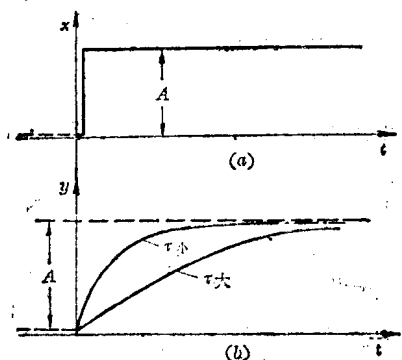


图 1-5 一阶仪表的阶跃响应

通常仪表的阶跃响应性能受仪表内部摩擦力等因素的影响。例如摩擦力大,则阶跃响应性能就差,反之就好。

所以对于动态参数的测量,就要选择动态性能好的测量仪表,才能获得满意的结果,否则动态测量误差就大。

§1-3 有效数字及其计算法则

一、有效数字的基本概念

(一) 有效数字

用数字来表示测量结果的量值似乎是没有可讨论的了,其实不然。例如用一根分度为 1 厘米的标尺来测量某一铁棒的长度,结果由不同的测量者可以记录下不同的结果: 6 厘米; 6.12 厘米; 6.1 厘米; 0.0612 米; …… 60 毫米等等,那末究竟那一个结果比较精确呢?要回答这一问题,首先要弄清楚两个容易糊涂的概念,一是小数点后面的位数越多是否越精确呢?例如上述结果中是否 0.0612 米比 6.12 厘米精确呢?其实这两个数值的精确度完全相同,小数点后面的位数有多有少仅仅是由于使用的单位不同所致,如 1 米和 100 厘米完全是等价的,此时,小数点的位置仅仅与所采用的单位有关。二是一个测量结果的数值保留的位数是否越多越精确呢?例如上述结果中 6.12 厘米是否比 6.1 厘米精确呢?其实也不然,这是因为使用任何测量仪表来测量时,它都只能具有一定的精确度,也即测量值只能精确到一定的程度,例如上面使用分度为 1 厘米的标尺来测量长度时,记录的整数(上例中的 6 厘米)是绝对可靠的,而小数点后面第一位(即十分之一厘米)是估计出来的,因此不同的测量者可以估计出不同的结果(如上例中 6.1 厘米和 6.2 厘米),因而也就是带有一定的可疑性,更不用说小数点后面第二位(即百分之一厘米)了,因而把它再记录在结果中是毫无意义的,这就说明并不是测量结果估计得位数越多越好。为此我们规定:所记录的测量结果只保留最后一位是可疑数字,而其余数字均为准确可靠的,根据这一规则记录下来的数字称为有效数字。由于最后一位是可疑数字,如上例中可以读出的是 6.1 厘米,也可以是 6.2 或 6.3 厘

米,甚至是6.4厘米,由于观察能力差异不大,故大多数测量者读数在6.1与6.3厘米之间,因此,我们又规定测量结果的末位有正负一个单位的误差(有的文献中也有规定为正负半个单位误差)。

(二) 有效数字位数的确定

有效数字的位数是由最左面第一个非零数字开始计算直止最后一位。例如123厘米和0.0253米其有效数字的位数均为三位。这里对下述两点作一说明。

1. 关于“0”

在测量结果中出现的“0”可以是有效数字,也可以不是,这要视具体情况而定。

例如测量温度时记录的结果是20.02°C,此处两个“0”均为有效数字,故它有四位有效数字。

又如测量长度得0.02米或20毫米,则前一个数字的头两个“0”和后一个数字中的后一个“0”均不是有效数字,即有效数字均为一位,因为这些“0”的出现都是由于单位的改变造成的。但如果使用同一根米尺记录的测量结果(当然是按有效数字的概念记录下来的)分别为1.20米和3.00米,则两个结果中的所有“0”均为有效数字,因此,所记录的测量值的最后一位一定要估计到分度值的十分之一。例如一个温度计的分度值为1°C,则测量结果一定要准确到小数点后一位,如果正好是2度,则结果应记成2.0°C,而决不能写成2°C,否则就会误认为两个结果的读数误差分别看成 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 和 $\pm 1^\circ\text{C}$,两者绝对误差相差十倍,所以我们在记录测量结果时必须严格按照有效数字的定义进行。

2. 为了避免在单位换算时出现有效数字的变化,建议用指数形式加以表示

例如有分度值为10厘米的标尺来测量长度时,为避免不同测量者或在计算过程中出现如0.2米;20厘米;200毫米等有效数字含糊不清的情况,按有效数字的定义应记作0.20米; 2.0×10^1 厘米; 2.0×10^2 毫米,这样不管在计算中使用什么单位,其有效数字均是二位,这就避免了由于单位使用不同带来不必要的麻烦。

二、有效数字的计算法则

为了使实验结果的数据处理有统一的标准,对有效数字的计算法则规定如下:

(一)在记录测量值时只保留一位可疑数值,即读数只估计到分度值的十分之一。例如对分度值为1°C的温度计读数只估计到小数点后一位(即十分之一度)。

(二)除非另有规定外,可疑数字均表示末位上有正负一个单位的读数误差。如上例中其误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

(三)在数据处理中,当有效数字确定之后,其余数字应一律舍去,舍去的办法是:凡末位有效数字后边的第一位数字大于5,则在前一位上增加1;小于5时舍去;若等于5,则视末位有效数字是奇、偶数而定,奇数时,在前一位上增加1,是偶数时,则舍去,这样做的目的是在处理大量数据时由于取舍而造成的误差能大都互相抵消,从而降低了在数据整理过程中的误差积累。

(四)在做加减法运算时,其和或差的小数点后面所保留的位数应与所参加运算的诸数中小数点后位数最少者相同。这是因为参加加、减法运算的数具有相同的量纲,当然小数点后位数最少者的测量仪表的分度值最大,其最后一位已经是可疑数字,那末其他诸数的测量仪表虽然都比它有更小的分度值,但均不能提高运算结果的精度。

例如有下列四数相加

$$21.2 \text{ cm}; 2.03 \text{ cm}; 2.023 \text{ cm}; 1.23 \text{ cm}.$$

则在计算式中应写成

$$21.2 + 2.0 + 2.0 + 1.2 = 26.4 \text{ cm}$$

对参加加、减运算的项比较小时,为避免引入过大的舍入误差,往往多保留一位参加运算,在求得和或差后再取其有效位数,对上例的算式为

$$21.2 + 2.03 + 2.02 + 1.23 = 26.48 \text{ cm}$$

最后取 26.5 cm , 而这一结果显然要比上面的计算准确。

这里要指出的是:当两个相近的数相减时要注意计算结果的有效数字的过多丢失,以致使该数的相对误差增大。例如:

$$1.03 - 1.02 = 0.01$$

本来两个数的有效数字均有三位,其相对误差为

$$\pm \frac{1}{102}$$

即近似为 $\pm 1\%$ 。两数相减的结果则只有一位有效数字,导致相对误差达 $\pm 100\%$ 。为了避免这种情况的产生,当碰到两个相近的数相减时,如有可能,应对公式进行处理,而避免作减法。例如:

$$(1) \quad \lg x_1 - \lg x_2 = \lg \frac{x_1}{x_2}$$

(2) 当 x 充分大时

$$\sqrt{1+x} - \sqrt{x} = \frac{1}{\sqrt{1+x} + \sqrt{x}}$$

(五)在作乘除法运算时,各因子所保留的位数应以读数相对误差最大(即有效数字位数最少)相应的那个数的位数为标准来截取,所得之积或商的有效位数一般与此数的位数相同。

例如,在 $0.12 \times 14.3 \times 1.045$ 中三个数的读数相对误差分别为

$$\pm \frac{1}{12} = \pm 8.3\%$$

$$\pm \frac{1}{143} = \pm 0.7\%$$

$$\pm \frac{1}{1045} = \pm 0.01\%$$

可见相对误差以 0.12 为最大,故计算时有效数字位数应以它为标准截取,即

$$0.12 \times 14 \times 1.0 = 1.7$$

计算之积只可能有两位有效数字,为加深理解进一步列出计算式(可疑数字用“?”代之);

$$\begin{array}{r} 0.1? \\ 14.? \\ \hline ?? \\ 4? \\ 1? \\ \hline \end{array}$$