

测量基础及 常用仪器仪表 教程

张志刚 王宇 由玉文 / 主编

CELIANG JICHU JI
CHANGYONG
YIQIYIBIAO JIAOCHENG



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

测量基础及常用仪器仪表教程

主 编 张志刚 王 宇 由玉文

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

测量基础及常用仪器仪表教程/张志刚,王宇,由玉文主
编. —天津:天津大学出版社,2012. 8

ISBN 978-7-5618-4473-1

I. ①测… II. ①张…②王…③由… III. ①测量学 -
高等学校 - 教材②测量仪器 - 高等学校 - 教材③测量仪表
- 高等学校 - 教材 IV. ①P2②TH761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 211551 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647
网 址 publish.tju.edu.cn
印 刷 河间市新诚印刷有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 9.25
字 数 231 千
版 次 2012 年 9 月第 1 版
印 次 2012 年 9 月第 1 次
定 价 20.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

测量技术基础知识的掌握和常用仪器仪表的熟练使用是顺利开展工程实践及科研活动的关键。对于建筑环境与设备工程专业而言,测量技术在实际工程的验收、运行调节过程中都起着重要作用。在课程体系中,该课程是联系理论知识与实践应用的关键环节。

该实验教材编入了建筑环境与设备工程专业、热能与动力工程专业所涉及的测量技术基础,同时编入了温度、压力、流速、流量等热工测量参数的常用测试方法及测量仪表,室内环境污染物测量仪表及建筑声光环境测量仪表。为专业实验教学内容的顺利开展奠定了基础。

本教材由天津城市建设学院张志刚任主编,第1、2章由张志刚编写,第3、4、5、8章由王宇编写,第6、7、9章由由玉文编写,第10、11章由张丽璐编写,全书由张志刚统稿。

本教材在编写过程中,参阅了其他兄弟院校的同类教材、资料及文献,并得到许多同行专家的支持和帮助,在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在不妥和错漏之处,恳请广大读者批评指正,以求进一步改进。

编者

2012年4月

目录

第1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	(8)
1.4 直接测量中的系统误差分析	(10)
1.5 直接测量中的随机误差分析	(13)
1.6 直接测量中的误差综合	(20)
1.7 间接测量中的误差综合	(21)
第2章 实验数据整理	(31)
2.1 可疑数据的舍弃	(31)
2.2 实验数据整理的一般方法	(35)
2.3 一元线性回归	(38)
2.4 一元多项式回归	(44)
2.5 多元线性回归分析	(47)
第3章 温度测量仪表	(50)
3.1 膨胀式温度计	(51)
3.2 热电偶温度计	(53)
3.3 热电阻测温计	(61)
3.4 光学高温计	(64)
3.5 红外测温仪	(66)
3.6 红外热像仪	(68)
第4章 湿度测量仪表	(71)
4.1 干湿球湿度计	(71)
4.2 露点湿度计	(74)
4.3 光电式露点湿度计	(75)
4.4 电阻、电容湿度计	(76)
第5章 压力测量仪表	(78)
5.1 液柱式压力计	(78)
5.2 弹性式压力计	(80)
5.3 压力表的选择、安装与校验	(82)
第6章 流量测量仪器	(85)
6.1 压差流量计	(85)
6.2 转子流量计	(87)
6.3 涡街流量计	(90)

6.4	电磁流量传感器	(91)
6.5	涡轮流量计	(92)
6.6	超声波流量计	(94)
6.7	电子风量罩	(98)
第7章	流速测量仪表	(100)
7.1	机械式风速仪	(100)
7.2	散热率法流速测量仪器	(101)
7.3	动力测压法测量流速	(106)
第8章	热量测量仪表	(108)
8.1	热量分配表	(108)
8.2	热水热量表	(109)
8.3	蒸汽热量测量仪表	(112)
8.4	热流计	(113)
第9章	液位测量仪器	(116)
9.1	静压式液位计	(116)
9.2	浮力式液位计	(118)
9.3	电接点数字式水位计	(120)
第10章	气体污染物成分测量及仪器	(122)
10.1	一氧化碳和二氧化碳测量	(122)
10.2	二氧化硫测量	(124)
10.3	氮氧化物等有毒气体测量	(127)
10.4	挥发性有机物测量	(128)
10.5	甲醛测量	(130)
10.6	氨气测量	(132)
第11章	其他参数测量子仪器	(135)
11.1	可吸入颗粒物测量	(135)
11.2	噪声测量	(136)
11.3	照度测量	(138)
参考文献		(139)

第1章 测量误差分析

随着科学技术的不断发展,展示在我们面前、需要进行探索的领域越来越多,需要研究的学科也越来越多,而且学科之间相互渗透,使得研究对象也变得越来越复杂,因此,仅用当前掌握的科学理论往往不能揭示出其内在规律,而必须更多地借助于实验手段。

实验离不开对参数的测量,而每一个参数都是人使用某一测量仪表、在一定的条件下、根据一定的理论、应用某种测量方法和程序进行测量取得的。尽管要测量的参数在某一时刻具有客观存在的确定值(所谓真值),但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通过测量得到的,在测量中所获得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量人员的操作水平等。随着科学技术的不断发展,测量仪表被不断地改进和完善,使测量值逐渐趋近真值。但不管怎样,两者之间总是存在一定的差异,而这种差异的程度,就以误差这一概念来描述。

在测量实践中还会发现,尽管使用同一套仪表,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。这说明在测量中存在误差。但在某些场合下,对同一参数进行多次测量时,却又得到同一测量值,这是否就可以说在这种场合的测量中不存在误差呢?回答是否定的,出现上述情况,其原因是测量仪表的灵敏限(即分辨率)太低,以致在测量中不能够反映出测量参数存在变化的客观现象。因此,在测量中误差总是绝对存在的,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,进而提出限制测量误差的措施,最后对测量结果的可信程度做出评价。

1.1 测量方法概述

1.1.1 被测参数(量)

在实验中,往往需要知道某个物理量在某一时刻的数值,因而必须对它进行检测。通常把需要检测的物理量称为被测参数或被测量。在热工测量中,经常遇到的被测参数有温度、压力、流量、液位、湿度等。按照被测参数随时间变化的关系可分为静态参数和动态参数。

1. 静态参数(常量)

某些被测参数在整个测量过程中的数值始终保持“不变”,即参数值不随时间而变化。例如周围环境的大气压力、制冷压缩机稳定工况下的转速等均不随时间变化,人们把这类参数通称为静态参数或常量。当然,严格地讲这些参数也并非绝对恒定不变,只是随时间变化得非常缓慢而已,因而在进行测量的时间间隔内由于其数值变化甚微而可以忽略不计。

2. 动态参数

数值随时间不断改变的参数被称为动态参数,例如非稳定工况或过渡过程中压缩机的

转速、功率,非稳定工况下的室内温度、湿度等均属于动态参数。这些参数随时间变化的函数可以是周期函数、随机函数等。

1.1.2 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,仪表的结构原理各不相同,然而从仪表对测量参数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,使压力表指针偏转,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,获得便于测量的信号能量形式,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转换和传递以及与相应的测量单位进行比较的过程。

1.1.3 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,被区分为一次仪表和二次仪表。

1. 一次仪表

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,称为一次仪表,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。

2. 二次仪表

在测量过程中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,称为二次仪表,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)等。

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。

1.1.4 测量方法的分类

按照获得测量参数结果的方法,通常把测量方法区分为直接测量和间接测量。

1. 直接测量

被测参数直接与测量单位进行比较,其测量结果又可直接从测量仪表上获得的测量方法称为直接测量,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。直读法可以直接从测量仪表上读得被测参数的数值,如压力表、水银温度计等。这种方法的优点是使用方便,但一般精度较差。

②比较法。比较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,因此测量过程比较麻烦,但测量仪表本身的误差以及其他某些误差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以下三种。

a. 零示法(又称零值法)。用零示法测量时,使被测量的作用效应与已知量(量具)的作用效应互相抵消(平衡),以致总的效应为零,于是可以肯定被测量与已知量相等,如利用电位差计来测量热电偶产生的热电势。

b. 差值法。差值法是使用适当的手段测量出被测量 x 与一个已知量 x_b 的差值 $(x - x_b)$, 则有 $x = (x - x_b) + x_b$ 。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_m 之差。

c. 代替法。代替法是在一定测量条件下,选择一个大小适当的已知量(通常由可调的标准量具获得),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,则被测量的数值就等于这个已知量。由于在代替法的两次测量中,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。

2. 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 V 时,先测量出风道中的空气流速 v 和风道的截面面积 F ,则空气流量 $V = v \cdot F$ 。

1.2 测量误差与仪表的质量指标

1.2.1 真值与测量值

被测量在某一时刻具有客观存在的量值,即真值,用 x_0 表示。而通过测量仪表检测得到的结果称为测量值,用 x 表示。

对物理量进行测量时,首先需要有一个比较标准,而真正的比较标准是不存在的,它仅仅存在于纯理论之中;另一方面,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暇的程度,因此在测量中总是存在误差的,所以实际上真值 x_0 是无法通过测量得到的。随着人们认识能力的发展,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 可以无限地逼近真值 x_0 ,但却不能等于真值 x_0 ,因此测量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。

由于被测参数的真值是不可知的,所以在计算中一般将高一级仪表测量得到的值看作真值(也称为相对真值)。

1.2.2 测量误差的分类

1. 按误差数值的表示方法分类

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。测量结果记为 $x \pm \Delta x$ 。

②相对误差 δ 。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程度。为便于测量结果之间测量精确程度的相互比较,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

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

例如,在某温度测量中测得结果为 $15 \pm 1^\circ\text{C}$ ($\delta = \pm 6.667\%$);在另一温度测量中测得结果为 $50 \pm 1^\circ\text{C}$ ($\delta = \pm 2.000\%$)。尽管它们的绝对误差均为 1°C ,但后者的测量精确程度明显高于前者。

2. 按测量误差的特性分类

①系统误差。系统误差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变化。这一现象无一定的变化规律,是完全随机的,但一般都遵循正态分布规律,因此可以通过数理统计的方法进行处理,这种误差被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由于测量者人为的过失而造成的误差都称为过失误差,此种误差也无规律可循,但完全可以通过主观的努力加以克服。

3. 按测量误差产生的来源分类

①仪表误差。仪表误差是由测量仪器本身在测量中造成的误差,与仪器的设计水平、制造工艺、结构完善程度等有关,用仪器的准确度表示。

②人为误差(也称操作误差)。人为误差是由测量者主观原因(观察力、操作水平、责任心等)造成的误差。

③环境误差。环境误差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。装置误差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。

1.2.3 测量的准确度、精密度和精密度

1. 准确度

准确度是指测量值 x 与真值 x_0 的符合程度,一般由系统误差的大小来表征。系统误差大,意味着测量的精确度就低;反之就高。

2. 精密度

精密度是指对同一被测量在相同的条件下,使用同一台仪表由同一个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,它表示测量重复性的好坏,通常用随机误差来描述,随机误差大,测量的重复性就差;反之重复性就好。

3. 精确度(精度)

精确度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,那么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。

以上结论可用打靶的例子来解释。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。

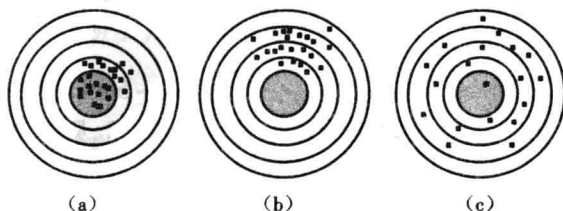


图 1-1 准确度、精密度和精确度

1.2.4 测量仪表的基本技术性能

1. 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为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。量程与刻度范围之间的差异在于仪表具有基本误差，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，否则将导致仪表的损坏，或者不能测得被测量的真实结果。

(2) 准确度

准确度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，则在测量中产生的仪表误差是固定不变的。这种仪表误差是系统误差的一种，它的大小应用仪表的准确度来描述，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。

仪表的准确度由仪表的最大绝对误差 Δx 折合到仪表刻度范围的百分数（即相对误差）来表示，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，就可用它测得比较接近真值 x_0 的测量值 x ，因而它是仪表的一个重要技术性能。我国将仪表按其相对百分误差的大小划分成 7 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，而且在仪表表面上标出。如 0.1 级表示仪表的基本误差为 0.1%，其他类推。

例如，某一温度表的准确度为 1.0 级，量程为 50 ~ 100 °C，如果使用这一温度表来测量温度，则在测量中可能产生的仪表误差不超过满量程的 1.0%，即为

$$\Delta t = \pm (100 - 50) \times 1.0\% = \pm 0.5\text{ °C}$$

在掌握仪表准确度这一概念时必须弄清楚以下两点。

①在测量中使用同一准确度等级、量程相同的仪表，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，不管你测得的温度值是 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 2/3 左右为宜，而应避免使测量值出现在满刻度的 1/3 以下，从而可以避免在测量中导致过大的相对误差。

②对同一准确度等级的仪表,如果量程不同,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 0 ~ 50 ℃,而另一个则为 0 ~ 100 ℃。用这两个温度表来测量同一温度,得到的测量结果均为 40 ℃,则可能产生的仪表误差分别为:

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

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

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,所以在选用仪表时,应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 2/3 左右,这样可以既满足测量误差要求,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 ℃ 左右变化,绝对误差(系统误差)要求不超过 0.5 ℃,可供选择的温度表有:

量程为 0 ~ 50 ℃、0 ~ 100 ℃、0 ~ 200 ℃ 的 1.0 级表

量程为 0 ~ 50 ℃、0 ~ 100 ℃、0 ~ 200 ℃ 的 0.5 级表

试选择合适的温度表。

若单纯根据误差要求,选用量程为 0 ~ 50 ℃ 的 1.0 级表和量程为 0 ~ 100 ℃ 的 0.5 级表均能满足要求,因为它们的仪表误差均为:

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

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

显然选用量程为 0 ~ 50 ℃,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,价格较低。

(3) 灵敏度和灵敏限(分辨率)

灵敏度表示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 ——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。

一般来说灵敏度高,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反行程(即逐渐由小到大再逐渐由大到小)测量时,在相同的被测参数值下仪表的指示值却不相同,这种差异的程度用变差来表示,其值如图 1-2 中 $\Delta_{\max}$ 所示。

(5) 线性

常用的仪表许多是线性仪表,即灵敏度为常数,但实际上一般仪表的灵敏度并不完全是

一个常数,这种好坏的程度用“线性”来表示,其值用仪表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。

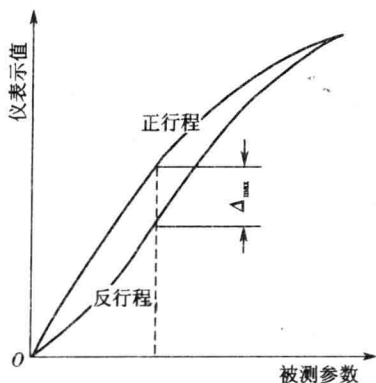


图 1-2 变差示意图

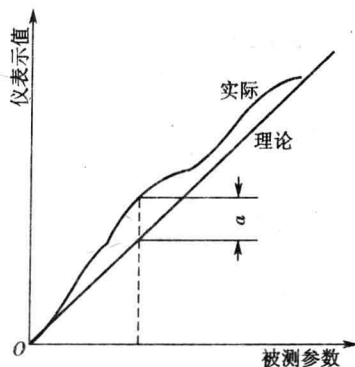


图 1-3 仪表线性示意图

2. 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多种多样的,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察仪表的动态特性,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量 x 和输出量 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:

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

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,分别求出输出量 y 与输入量 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:

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

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。由于动态参数的测量比较复杂,自前可依靠记录仪先记录下测量结果,然后再通过信号处理技术得到比较满意的测量数据。因涉及的仪表及测量技术较为复杂,故以下主要讨论静态参数的测量,对动态特性只给出一般概念。

(1) 频率响应

若输入信号为正弦波 $x(t) = A \sin \omega t$, 则输出信号为 $y(t) = B \sin(\omega t + \varphi)$ 。(如图 1-4 所示)

即使输入信号振幅 A 一定,只要它的频率 ω 有所变化,则输出信号 $y(t)$ 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

$$A/B = A(\omega) \angle \varphi(\omega)$$

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, 其性能用仪表的时间常数 τ 表示: τ 大, 则阶跃响应差; τ 小, 则阶跃响应好。

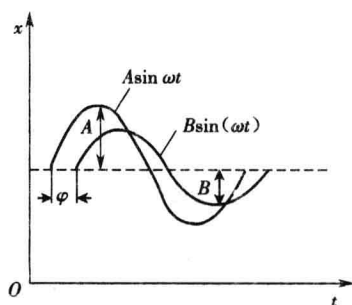


图 1-4 仪表频率响应

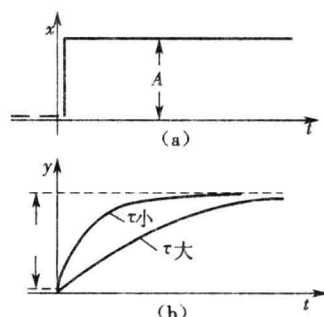


图 1-5 一阶仪表阶跃响应

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, 摩擦力大, 阶跃响应性能就差, 反之就好。

因此对于动态参数的测量, 只有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

1.3.1 有效数字的基本概念

1. 有效数字

用一根分度为 1 cm 的标尺来测量一根铁棒的长度, 不同的测量者会记录下不同的结果: 6 cm, 6.12 cm, 6.1 cm, 0.061 2 m, 60 mm 等。究竟哪个结果比较精确呢? 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表示测量结果就越精确? 比如上述结果中是否 0.061 2 m 比 6.12 cm 精确呢? 其实这两个数值的精确程度完全相同, 这里小数点后面的位数的多少仅仅是由使用的单位不同所致。二是一个测量结果的数值保留的位数是否越多越精确? 例如上述结果中 6.12 cm 是否比 6.1 cm 精确? 其实也不然, 这是因为使用任何测量仪表来测量时, 它都只能达到一定的精确程度, 也即测量值只能精确到一定的程度, 使用分度为 1 cm 的标尺来测量长度时, 记录的整数(如 6 cm)是绝对可靠的, 而小数点后面第一位(即 1/10 cm)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 6.1 cm 和 6.2 cm),因而也就带有一定的可疑性,更不用说小数点后面第二位(即 1/100 cm)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读的位数越多越好。为此规定,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,规定测量结果的末位有一个单位的误差(有时规定为半个单位误差)。

2. 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至最后一位。例如 123 cm 和 0.025 3 m,其有效数字的位数均为三位。

(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,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 4 位有效数字。

又如测量长度得 0.02 m 或 20 mm,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(按有效数字概念记录)分别为 1.20 m 和 8.00 m,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 °C,则结果应记成 2.0 °C,而绝不能写成 2 °C,否则就会误认为两个结果的读数误差分别为 0.1 °C 和 1 °C,两者绝对误差相差 10 倍,所以在记录测量结果时必须严格按照有效数字的定义进行。

(2) 有效数字表示形式

为了避免在单位换算时出现有效数字的变化,建议用指数的形式加以表示。例如用分度值为 10 cm 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 m、20 cm、200 mm 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 m、 2.0×10^1 cm、 2.0×10^2 mm,这样不管在计算中使用什么单位,其有效数字均是两位,这就避免了由于单位使用不同带来的不必要的麻烦。

1.3.2 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。

①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 1/10。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 1/10 °C)。

②除非另有规定外,可疑数字均表示末位上有一个单位的读数误差。如上例中其误差为 ± 0.1 °C。

③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,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大都互相抵消,从而降低了在数据整理过程中的误差积累。

④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,则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。

例如下列4数相加: $21.2\text{ cm} + 2.03\text{ cm} + 2.023\text{ cm} + 1.23\text{ cm}$,则计算结果应写成 26.4 cm 。

当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 26.48 cm ,最后取 26.5 cm ,而这一结果显然要比上面的计算准确。

⑤在作乘法运算时,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,3个数的读数相对误差分别为 $\pm 1/12 = \pm 8.3\%$, $\pm 1/143 = \pm 0.7\%$, $\pm 1/1045 = \pm 0.1\%$,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 $0.12 \times 14 \times 1.0 = 1.7$,计算的积只能有两位有效数字。

从计算结果可以看出,相乘的积只有一位数字是可靠的,根据有效数字的定义可保留一位可疑数字,所以最后确定积的有效数字为两位,即与相乘的各因子中位数最少的相同。当相乘结果有进位时,则相乘的积的有效数字位数比相乘因子中位数最少者多一位,例如 3.4×5.28 ,如按上述规则,相乘之积的有效数字位数也应是两位,但实际上它应是3位。

⑥在对数计算中,所取对数尾数应与其真数的有效数字位数相等。

例如:计算 $N = \lg 149$,查常用对数表得 $N = 2.1372$ 。其中2为首数, 0.1372 为尾数,由于真数149是三位有效数字,所以最后取 $N = 2.137$ 。

⑦在所有的计算式中,对于 π 、 $\sqrt{2}$ 及 e 等常数的有效数字的位数可以认为是没有限制的,在计算中可根据需要来取舍。

1.4 直接测量中的系统误差分析

1.4.1 系统误差的来源及其改善

1. 仪表误差

仪表误差即由于测量仪表本身的不完善(如结构设计不合理、存在摩擦等)而产生的误差。不管选用的仪表准确度多高,仪表本身的基本误差总是存在的。人们只能根据测量误差的允许范围,选择适当准确度的测量仪表使误差满足测量要求。

此外,随着仪表使用时间的增长,仪表零部件的磨损、元件的老化或变质等会造成仪表的附加误差。

2. 装置误差

装置误差即由于测量仪表和电路的安装、布置以及调整不当而造成的误差。应严格按照说明书的要求进行安装和调试,以便把装置误差降低到最低限度。

3. 校验误差

校验误差即在校验测量仪表时,由于所使用的标准表本身存在附加误差(除仪表基本误差外)而形成被校验表的附加误差。

4. 环境附加误差

环境附加误差即由于测量仪表使用的环境条件(如温度、湿度、电磁场等)与使用说明书中规定的条件不相符而产生的附加误差。例如某测量压力的仪表,规定使用的环境温度为 $20 \pm 5^\circ\text{C}$,电源电压为 $220 \pm 10\text{ V}$ 。当仪表在环境温度为 36°C ,电源电压为 220 V 情况下使用时,压力表就产生了附加误差。因此当仪表一定要使用在偏离规定的环境条件时,必须对测量结果加以适当的修正以消除环境附加误差。

5. 方法误差(理论误差)

方法误差即由于测量方法的不完善,或者由于测量所依据的理论不完善而导致的误差。例如测量某容器(截面面积为 S)中的液体的质量(液体高为 H),则有 $m = \rho HS$ 。若把测量液体的密度 ρ 视为常数,则上式变为 $m = \rho HS = KH$ 。因此,液体质量就可以用液柱的高度 H 来直接标定。在标定后,如果所测液体的密度与标定时的密度 ρ 有差异,则测量所得的结果与实际情况就有差异,这种差异就是由于测量方法的不完善而造成的,故在数据处理时必须对密度加以修正以克服方法误差。

6. 人为误差

人为误差即由于测量人员的感觉器官和运动器官的某些缺陷,或由于测量人员的技术水平不高而造成的误差。因此,在测量中必须细心操作而力求避免。

1.4.2 消除系统误差的一般方法

①在测量之前尽可能设法预见到一切可能产生系统误差的来源,从而采取相应措施加以消除,或者使其影响减弱到可以接受的程度。例如,在测量之前应对所有仪表和连接线路进行仔细检查,使其安装和调整都尽量满足仪表所规定的条件;把仪表调到零位;在有电磁场干扰的环境测量应有屏蔽措施;读数尽可能在外界条件比较稳定的情况下进行等。

②在考虑测量方法时,有条件时可采用一些有效的测量方法(如前面叙述的代替法、零示法等)来消除或削弱系统误差对测量结果的影响。

例如用等臂天平称物体质量时(如图1-6所示),可以分两步进行。首先让未知质量的物体 W 与中介介质 G 平衡,则有 $W = \frac{l_2}{l_1}G$ 。由于制造上的误差, l_1 和 l_2 不能完全相等,即 $l_1 \neq l_2$,因此如果取 $W = G$ 就会产生误差。为了消除这一误差可再增加一个测量步骤,把重物 W 取下,代之以标准砝码 G_0 ,并通过调整 G_0 使天平重新达到平衡,此时就有 $G_0 = \frac{l_2}{l_1}G$ 。比较上述两式显然有 $W = G_0$,这样就消除了由于 $l_1 \neq l_2$ 而带来的误差,从而提高了测量精度。

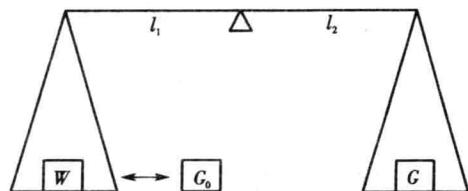


图1-6 代替法示意图

③在进行数据处理时,设法估计出在测量过程中还没有消除的系统误差最终对测量结