

中等专业学校试用教材

设备安装 测试基础

张锡璋 主编



中国建筑工业出版社

中等专业学校试用教材

设备安装测试基础

张锡璋 主编

中国建筑工业出版社



目 录

绪论	1
思考题	1

第一篇 机械设备安装工程测试技术

第一章 测量基础知识	2
第一节 技术测量的基本知识	2
第二节 测量工具的度量指标和测量误差	4
第三节 测量结果的整理	5
思考题与习题	11
第二章 量具和量仪	14
第一节 钢尺	14
第二节 量块	16
第三节 线规、厚薄规和正弦规	18
第四节 游标量具	20
第五节 螺旋测微量具	23
第六节 机械式量仪	24
第七节 水平仪	27
第八节 气动量仪——浮标式气动量仪	32
第九节 光学量仪——读数显微镜	34
第十节 电动量仪——电感测微仪	35
第十一节 测量工具选择及维护保养	37
思考题与习题	39
第三章 工业设备安装中常用的测量方法	41
第一节 概述	41
第二节 钢丝法	42
第三节 液面法	50
第四节 用水平仪测量直线度	52
第五节 联轴节的找正对中	58
第六节 温度测量——热电偶	74
思考题和习题	78
第四章 机械参数电测技术	82
第一节 概述	82
第二节 电阻应变仪	82
第三节 电阻应变仪在工业设备安装中的应用	93
思考题与习题	95
第五章 振动及其测量	96
第一节 概述	96

第二节 单自由度的简谐振动	97
第三节 消振与隔振	108
第四节 振动的测量	111
思考题与习题	117
第六章 机械的平衡	119
第一节 机械平衡的目的和方法	119
第二节 回转构件平衡计算	120
第三节 回转构件的平衡试验	126
第四节 回转构件的平衡精度	136
思考题与习题	139

第二篇 安装工程测量

第七章 水准测量	143
第一节 水准测量原理	143
第二节 水准测量的仪器和工具	145
第三节 水准仪的使用	149
第四节 水准测量	151
第五节 水准测量的精度及校核	155
第六节 微倾式水准仪的检验和校正	159
第七节 自动安平水准仪	163
第八节 精密水准仪	164
思考题与习题	166
第八章 角度测量	167
第一节 角度测量原理	167
第二节 DJ ₆ 型光学经纬仪	168
第三节 经纬仪的使用	173
第四节 水平角测量方法	174
第五节 竖直角测量方法	178
第六节 经纬仪的检验与校正	180
第七节 DJ ₂ 型光学经纬仪	185
思考题与习题	188
第九章 距离测量及直线定向	189
第一节 距离丈量	189
第二节 距离改正及精密量距	194
第三节 直线定向	198
第四节 罗盘仪及其使用	201
思考题与习题	203
第十章 经纬仪导线测量	204
第一节 平面控制测量概述	204
第二节 经纬仪导线测量的外业	204
第三节 经纬仪导线的内业计算	207

第四节 导线测量错误的检查	217
思考题与习题	219
第十一章 设备安装施工测量	220
第一节 概述	220
第二节 测设的基本工作	221
第三节 平面点位的测设方法	224
第四节 设备的定位和抄平测量	225
第五节 轨道安装测量	227
第六节 相关设备安装测量	229
第七节 工业锅炉基础检测	230
第八节 安装中的高程测量	231
第九节 设备安装高程测量	232
第十节 塔架类设备安装	233
第十一节 钢结构安装测量	233
第十二节 构筑物的沉降观测	234
第十三节 倾斜观测	237
第十四节 场地的平整测量	237
思考题与习题	240
第十二章 激光测量仪和准直量仪	241
第一节 激光经纬仪	241
第二节 激光水准仪	243
第三节 光学准直量仪	245
第四节 激光准直仪	250
思考题与习题	252

绪 论

工业设备安装是工业建设的重要组成部分。优质的工业设备,除了要有优良的设计、精确的制造外,还有赖于正确的安装,才能充分发挥其应有的性能。设备在安装就位以前要放线,就位以后要找平找正、调整和试运转。所有这些都离不开测试技术,即依赖运用正确的安装工艺,使用经济、有效、准确的测量工器具和测量方法。

工业设备安装测试技术与一般零件的测量和机械装配测量技术既有共同处,也有不同之处。零件测量主要是几何形状和尺寸的测量;机械装配测量,由于多种零件和部件的互相装合,其位置精度常常有较高的要求。而安装测试,不仅包括机械测量(包括零件形状、尺寸和机械装配测量),而且包括工程测量,如放线和找标高等,不仅有机机械参数测量,如尺寸、位置等,还要有非机械参数的测量,如温度、压力、振动和噪声等;不仅在静态进行测量,还要在动态中进行测量。

设备安装测试技术是实验科学的一部分,它的任务是通过各种测试手段,保证所安装的设备位置准确、运行可靠。其主要内容有:测试基础理论;常用的量具、量仪的构造、原理、使用、维护、检验校正和使用;工业设备安装中常用的测量方法和检测调试技术等。

设备安装测试技术是实践性很强的一门科学,因此要求不仅要掌握基础理论,还要熟悉操作技能。尽管有好的测量工器具和适用的测量方法,如果不能认真仔细、正确地操作,也会达不到目的。因此,理论联系实际和认真仔细是设备安装测试技术的两大特点。

“设备起重与搬运”、“设备安装工艺”和“设备安装测试”是工业设备安装专业的主要专业课。其中“设备起重与搬运”和“设备安装测试”是工业设备安装过程中不可缺少的工序。因此,本书的重点是测试的基本理论和常用的测试方法,而测试的具体应用实例还要在其他专业课中详细介绍。本书所列举的一些实例,仅是为掌握方法和引导应用而设置的。

思 考 题

1. 设备安装测试技术在工业设备安装中的作用是什么?
2. 设备安装测试技术与零件尺寸测量及机械装配测量有何异同?
3. 设备安装测试技术的主要任务是什么?
4. 你打算如何学好这门课程?

第一篇 机械设备安装工程测试技术

第一章 测量基础知识

第一节 技术测量的基本知识

技术测量主要是研究零件的几何参数和零件间相对位置的测量和检验的问题。

所谓测量,就是将一个待定的物理量与一个作为测量单位的量进行比较的过程。测量可以用不同的工具和不同的方法进行,并且得到不同的测量精度。因此,测量包括四个方面的因素:测量对象、测量单位、测量方法和测量精度。

“检验”是与测量相近似的一个概念。通常它的含义比测量更广泛一些。例如,零件表面疵病的检验和金属内部缺陷的检验等,就不能用测量这个概念。

一、长度基准

解放前,我国处于半封建半殖民地的社会,计量单位十分混乱。从1959年7月2日国务院颁布我国计量制度开始,到1986年为止,度量衡的计量单位全部采用国际单位制。从1986年起在我国统一实行的法定计量单位中,仍包括国际单位制的基本单位。

国际单位制的基本单位规定:长度的基本单位是米(m)。在机械制造中,常用其导出单位毫米(mm)作为计量单位;在技术测量中,常以微米(μm)作为计量单位。基本长度单位米和其导出单位间的换算关系如下:

$$1\text{ m} = 10\text{ dm} = 10^2\text{ cm} = 10^3\text{ mm} = 10^6\mu\text{m}$$

基本长度单位米,最初是法国规定的。法国在1790年规定:经过巴黎的地球子午线的四千万分之一为一米。并制造了基准米尺。1889年被国际上采纳为国际标准米尺。国际标准米尺属于线纹基准,是用铂铱合金制造的,它的横断面为X型,全长1020mm,在尺身两端的抛光面上,各刻着三条线,在0℃时,中间两条线的距离为1米。

由于金属内部的不稳定以及温度的影响,因此国际基准米尺的长度也并不是永恒不变的。由于在近代物理中,建立起光波干涉测量法后,就有条件取某种元素的光波波长作为长度单位的标准。在1960年第十一届国际度量衡代表大会上通过了米的新定义:一米长等于氪原子 $86(\text{Kr}86)$,在真空中,从能级 $2P_{1/2}$ 过渡到 $5d_5$ 时,辐射橙黄光波长的16507673.73倍。用光波波长作为长度基准,既稳定可靠,又不致损坏或消失,且便于复制和传递。

在机械工程中,光波基准不便于直接应用,而是用端面基准——量块作为媒介的。因此为了保持全国统一,在全国范围内要建立尺寸传递系统。由光波基准到量块,由量块到各种量具、量仪以至工件,必须进行层层检定和核对。这项工作是由国家计量局、各地区计量中心、省市计量机构,一直到企业的计量机构所组成的全国计量网来负责的。

二、测量工具的分类

按照测量工具的特点和构造可分为：

(一) 标准量具 按照基准复制出来的代表一个固定尺寸的量具，它可以作为标准用来校对和调整其他测量工具，当然也可用于精密测量。例如：量块、角度块规等就是标准量具。

(二) 通用量具和量仪 它可以用来测量一定范围内的任一值。按机构上的特点，又可以分为以下几种：

1. 固定刻线量具，例如钢尺、卷尺等。
2. 游标量具，包括游标卡尺、深度游标卡尺、高度游标卡尺和游标量角器等。
3. 螺旋测微量具，包括千分尺、深度千分尺、螺纹千分尺和公法线千分尺等。
4. 机械量仪，包括百分表、千分表、杠杆百分表、杠杆千分表、杠杆齿轮比较仪和扭簧比较仪等。
5. 光学量仪，包括光学计、读数显微镜、干涉仪和激光准直仪等。
6. 气动和液动量仪，包括浮标式气动量仪和铁水平等。
7. 电动量仪，包括电感测微仪和电容式测微仪等。

(三) 极限量规 它是无刻度的专用量具，它不能测量工件的实际尺寸，只能用来检验工件是否合格，因为它只有一个最大极限尺寸和一个最小极限尺寸。

(四) 检验夹具 它是由量具和量仪及定位元件组成的组合体，用来提高测量或检验速度和精度，多用于大批量的生产中。

三、测量方法的分类

根据不同的出发点，测量方法有不同的分类。

(一) 根据获得测量结果的方法不同，测量方法可分为：

1. 直接测量法 凡是被测物理量，可由量具或量仪上直接读得测量值的测量方法称为直接测量法。例如，用直尺测桌长。

2. 间接测量法 测得的物理量和未知量之间有一定的函数关系，根据测得量计算出未知量的测量方法称间接测量法。例如：要知矩形桌面的面积，先测出桌面的长和宽，再计算出矩形桌面的面积。

(二) 根据测量结果的读数值不同，测量方法又可分为：

1. 绝对测量 用绝对法测量时，量具和量仪上读得的数是被测参数的实际数值。例如用游标卡尺或千分尺测量轴径即为绝对测量。因此绝对测量又称全值法。

2. 相对测量 用相对测量法测量时，量具和量仪上指示的数值只是被测参数对标准量的偏差。例如用千分表测量轴径。因此相对测量又叫微差法或比较量法。

(三) 根据测量工具与被测对象是否有机接触，测量方法又可分为：

1. 接触测量法 测量工具与被测对象的表面直接接触，并有机作用的测量力存在。例如用千分尺测量轴径。

2. 不接触测量法 测量工具与被测对象之间没有机械作用的测量力存在。例如用读数显微镜测量微裂缝的长。

(四) 根据同时测量参数的多少，测量方法又可分为：

1. 分项测量法 分别地对每一个参数进行测量。例如分别测量螺纹的外径、内径、螺距等。

2. 综合测量法 同时测量工件有关互换性的几个参数,从而总的判断工件是否合格。例如用通端螺纹塞规检验螺纹。

(五) 根据测量在工艺过程中所起的作用,测量方法又可分为:

1. 被动测量 指在工件加工完后进行测量,此时测量的结果用于发现废品并剔除废品。

2. 主动测量 指工件在加工过程中进行的测量,此时测量结果可直接用以控制加工过程,从而可及时防止废品的产生,应该大力提倡。

第二节 测量工具的度量指标和测量误差

一、度量指标

测量工具的度量指标,是测量中首先应该考虑的问题。它反映测量工具的主要性能,也是选择测量工具的依据。其主要的有下列几项:

1. 刻度间隔——简称刻度,它是标尺上两相邻刻线间的距离。
2. 分度值——标尺上每一刻线所代表的测量数值。
3. 标尺的示值范围——标尺上全部刻度所代表的测量数值。
4. 测量范围——整个测量工具所能测量出的最大和最小的尺寸范围。
5. 灵敏度——能引起量仪指示数值变化的被测尺寸的最小变动。灵敏度说明了量仪对被测量数值微小变动引起反应的敏感程度。
6. 示值误差——测量工具上的读数与被测尺寸实际数值之差。
7. 示值变化——在外界条件不变的情况下,对同一个尺寸多次重复测量时,量具量仪所指示的最大和最小读数之差。
8. 测量力——在测量过程中,量具量仪上的测量面与被测对象之间的接触力。如千分尺,其测量力规定为 $6\text{N}\sim 10\text{N}$ 。
9. 放大比——量仪指针的直线位移或角位移与被测尺寸变化的比。显然,这个比值等于刻度间隔与分度值之比。

二、测量误差

任何测量过程,不管用什么测量工具和测量方法,总是不可避免地存在着测量误差。产生测量误差的原因是很多的,例如:测量工具的误差;测量方法引起的误差;测量力引起的误差;环境条件(指温度、湿度、振动、气压、灰尘等因素)引起的误差;测量者主观因素引起的误差等。测量误差依其性质可分为下列三种:

(一) 系统误差 在同一条件下,多次测量同一量值时,误差的绝对值和符号保持恒定;或在条件改变时,按某一个确定的规律变化的误差,称为系统误差。所谓规律,是指这种误差可以归结为某一个因素或某几个因素的函数。这种函数一般可用解析公式、曲线或数表来表示。例如,测量工具的标尺刻度不准确,校准量具量仪所用的基准件(如量块)的误差,测量时未遵守标准温度(20°C),刻度盘偏心引起的角度测量误差等。由于系统误差有一定规律,因此可以找出规律将误差消除。

系统误差的数值往往比较大,而在测量数据中如何发现和消除系统误差,是提高测量精确度的一个重要问题。若发现系统误差存在,必须采取技术措施予以消除,或减小到最低

限度。

(二) 随机误差 随机误差又叫偶然误差。在相同条件下,重复测量同一量时,误差的大小和方向都是不定的,这种误差称为随机误差。所谓随机,是指它在单次测量中,误差出现是无规律可循的。造成随机误差的原因有:测量各部分的间隙、摩擦、变形、测量力的变化,目测和估计判断误差等。也就是说,随机误差是由许多暂时未被掌握的规律,或一时不便于控制的因素所造成的。但若进行多次重复测量时,误差服从统计规律,因此常用概率论和统计原理对它进行处理。在测量实际当中,为了减少随机误差,可以对同一量多测量几次,取其算术平均值作为测量结果。

(三) 粗大误差 所谓粗大误差是指远远超出随机误差的范围,并且显著地改变着测量结果的偶然误差,称为粗大误差。粗大误差主要是由于测量时疏忽大意造成的。因此,在测量中必须严肃认真,仔细操作,精心观察,并在一系列的测量数据中,将粗大误差剔除,误差分析时,主要分析系统误差和随机误差。

三、精度

精度是和误差相对的概念,而误差则是不准确、不精确的意思,即测量结果离开真值的程度。由于误差分系统误差和随机误差,因此笼统的精度概念已不能反映上述误差的差异,因此有必要引出如下的概念。

1. 精密度 精密度是指在多次测量中所得到的数值重复一致的程度。它说明在一个测量过程中,在同一条件下进行重复测量时,所得结果彼此之间符合到什么程度。

2. 正确度 正确度表示测量结果中其系统误差大小的程度。理论上可用修正值来消除。

3. 准确度 准确度是指精密和正确程度的综合反映,说明测量结果与真值的一致程度。

一般来说,精密度高而正确度不一定高,但准确度高的,精密度和正确度都高。

第三节 测量结果的整理

在实际测量工作中,正确地把测量结果表达出来是件很重要的事情。

一、有效数字

正确地测量结果,应该是规整而清楚,使人一目了然地看到全部的测量结果和准确度。通常用表格的形式记录测量结果,称为原始数据。记录原始数据,应该符合测量准确度的要求。一般除了从量具量仪上直接读出的数字外,还可以用眼睛估计下一位的数字。因此,规定实测数据中最后一位数字是有误差的数字或称存疑的数字。例如:用分度值为1mm的钢板尺测量一个物体的长度为123.4mm,其中:123mm是从尺上直接读出来的,是精确的;而0.4mm是用眼睛估计出来的,是不精确的或存疑的。实测数据都应该这样表达出来,即最后一个数字是存疑数字,误差就发生在这位数字上。这样表达测量数据,一方面可以使人一看就大体知道测量的精确度;另一方面可使以后的误差传递运算简化而不损伤测量精确度。

实测数据中,测得的数字(包括存疑数字),统称为有效数字。因此记录实测数据的法则是:保留一位存疑数字。应用这个法则要注意下面几个问题:

1. 如果被测量正好对准测量工具上某一刻线, 例如用温度计测量温度时, 温度计上的水银柱正好与 98°C 刻线对齐, 这时应该记录为 98.0°C 。它表示 98°C 是精确的, 而“0”为存疑的。若记录为 98°C , 那就意味着“8”是估计出来的数字, 显然这与客观实际不符, 因而是错误的。

2. “0”有时为有效数字, 有时不是有效数字, 这要看“0”所在的位置和所起的作用。例如 123.4mm , 可以写成 0.1234m 和 0.0001234km , 但其有效数字仍然都是四个。所以表示小数点的位置的“0”不是有效数字。

3. 对很大或很小的数, 可用10的方幂表示, 称为标准式记数法。例如低碳钢的弹性模量 $E=2.0\times 10^5\text{MPa}$, 其大小为 200000MPa , 但有效数字却是两位。

二、直接测量中误差的确定

要减少随机误差, 就要增加测量次数。若测量次数足够多, 便可发现随机误差完全服从统计规律, 按正态分布曲线分布。即绝对值相等正误差和负误差出现的机率大致相等。随着测量次数增加, 随机误差的算术平均值将逐渐趋近于零。因此, 多次测量结果的算术平均值将逐渐趋近于真值。由于在实际当中, 测量次数不能足够多, 仅进行有限的几次, 还想知道测量结果的准确性, 于是我们把几次测量结果相加, 求出它的算术平均值。这个平均值就是这个测量系统在这种情况下最接近真实值的数值, 可以用来代表测量结果。而每次测得的数值与其平均值的差, 就是每次的测量误差。每次的测量误差的算术平均值就是测量结果的平均误差, 可以用代表测量结果的误差。

【例1-1】用千分尺测量金属丝的直径, 5次测得的数如下(单位为mm):

$$d_1 = 3.235; d_2 = 3.232; d_3 = 3.234; d_4 = 3.233; d_5 = 3.231$$

试求其测量结果和测量误差。

【解】若用 d 表示测量结果的算术平均值, 则

$$\begin{aligned}d &= \frac{1}{5} (d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5) \\&= \frac{1}{5} (3.235 + 3.232 + 3.234 + 3.233 + 3.231) \\&= 3.233 (\text{mm})\end{aligned}$$

每次测量的误差是

$$\begin{aligned}\Delta d_1 &= d - d_1 = -0.002 (\text{mm}) \\ \Delta d_2 &= d - d_2 = 0.001 (\text{mm}) \\ \Delta d_3 &= d - d_3 = -0.001 (\text{mm}) \\ \Delta d_4 &= d - d_4 = 0 \\ \Delta d_5 &= 0.002 (\text{mm})\end{aligned}$$

则误差的算术平均值 Δd 为

$$\begin{aligned}\Delta d &= \frac{1}{5} [|\Delta d_1| + |\Delta d_2| + |\Delta d_3| + |\Delta d_4| + |\Delta d_5|] \\&= \frac{1}{5} (0.002 + 0.001 + 0.001 + 0 + 0.002) \\&= 0.0012 \approx 0.001 (\text{mm})\end{aligned}$$

于是测量结果表示为

$$D = d \pm \Delta d = 3.233 \pm 0.001 (\text{mm})$$

由例1-1可归纳为: 若用 x 表示要测物理量, 每次测得的数值为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$, 则测量结果的算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$x = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_i + \dots + x_n) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-1)$$

测量误差的算术平均值 Δx 为

$$\Delta x = \frac{1}{n} [|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \dots + |\Delta x_i| + \dots + |\Delta x_n|] = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x_i|}{n} \quad (1-2)$$

测量结果 X 表示为

$$x = x \pm \Delta x \quad (1-3)$$

用例1-1的计算方法, 不仅计算烦琐, 而且容易发生错误。而在实际当中常用简易计算方法求平均值。方法如下:

设测得值为 n 个, 任选其中一个测值 x_i 作为临时平均值, 再从各测值中减去 x_i , 得

$$\Delta x'_1 = x_1 - x_i$$

$$\Delta x'_2 = x_2 - x_i$$

.....

$$\Delta x'_n = x_n - x_i$$

等式两边相加得

$$\sum \Delta x'_i = \sum x_i - nx_i$$

两边同除以 n 得

$$\frac{\sum \Delta x'_i}{n} = \frac{\sum x_i}{n} - x_i$$

$\therefore$

$$x = \frac{\sum x_i}{n} = x_i + \frac{\sum \Delta x'_i}{n} \quad (1-4)$$

【例1-2】用简易算法求例1-1中金属丝的平均直径。

【解】在 d_i 中任选一个测值, 如 $d_2 = 3.232$ 代表临时平均值, 则计算结果如下:

d_i	d_2	Δd_i
3.235		+ 0.003
3.232	3.232	0
3.234	(-)	+ 0.002
3.233		+ 0.001
3.231		+) - 0.001
		+ 0.005 = $\sum \Delta d'_i$

$$\therefore d = d_2 + \frac{\sum \Delta d'_i}{n} = 3.232 + \frac{0.005}{5} = 3.233 \text{ (mm)}$$

如果由于时间的限制, 仅进行了一次测量, 可用测量工具的分度值的十分之一 (有时用五分之一或二分之一) 作为测量误差。

三、绝对误差和相对误差

测量结果的误差, 可以用误差的绝对值表示, 称绝对误差。如例1-1中的 $\Delta d = 0.001\text{mm}$ 。

测量结果的绝对误差与测量结果的平均值的比值的百分数, 称相对误差。如

$$\frac{\Delta d}{d} \times 100\% = \frac{0.001}{3.233} \times 100\% = 0.31\%$$

由此可见，相对误差的含意是：测量误差占测量结果的百分比。

综上所述：如果一个物理量测得的结果是 x ，这个结果比真值 x 上下相差不超过 Δx ，

则 Δx 是测量结果的绝对误差， $\frac{\Delta x}{x} \times 100\%$ 为它的相对误差。

在许多情况下，相对误差比绝对误差更有意义。

四、间接测量中误差确定

在间接测量中，实测的数值 x 与要求的数值 y 存在一个函数关系，即

$$y = f(x) \quad (1-5)$$

令 Δy ——表示间接测量中的绝对误差，

$\frac{\Delta y}{y}$ ——表示间接测量中的相对误差。

当 Δy 与 y 相比足够小时，可以用变量 y 的微分 dy 的绝对值代替 Δy （ $\because dy \geq 0$ ，而 $\Delta y > 0$ ）。即

$$\frac{\Delta y}{y} \approx \frac{dy}{y} \quad (1-6)$$

$$\therefore \frac{dy}{y} = d(\ln y) \quad (1-7)$$

于是有：

1. 对加法

若

$$y = x_1 + x_2$$

则

$$\ln y = \ln(x_1 + x_2)$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = \frac{dx_1 + dx_2}{x_1 + x_2}$$

$\therefore$

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{x_1 + x_2}$$

即

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 \quad (1-8)$$

在一般情况，若

$$y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$$

则

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n \quad (1-9)$$

由此可见：和的绝对误差等于各个直接测量的绝对误差之和。

2. 减法

若

$$y = x_1 - x_2$$

则

$$\ln y = \ln(x_1 - x_2)$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = \frac{dx_1 - dx_2}{x_1 - x_2}$$

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{x_1 - x_2}$$

即

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 \quad (1-10)$$

注意：因为 dx 是一个代数量，可正可负，也可为零； Δx 是一个算术量，只可正或零。

考虑最不利情况，因此采用相加。

显然，差的绝对误差也等于各个测量的绝对误差之和。

3. 乘除法——积和商

若

$$y = \frac{x_1}{x_2} \cdot x_3$$

则

$$\ln y = \ln x_1 - \ln x_2 + \ln x_3$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = \frac{dx_1}{x_1} - \frac{dx_2}{x_2} + \frac{dx_3}{x_3}$$

∴

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2} + \frac{\Delta x_3}{x_3} \quad (1-11)$$

即：积和商的相对误差等于各自的相对误差之和。

4. 方幂与根

若

$$y = x^n \quad (n \text{ 为有理数})$$

则

$$\ln y = n \ln x$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = n \frac{dx}{x}$$

∴

$$\frac{\Delta y}{y} = n \frac{\Delta x}{x} \quad (1-12)$$

即：方幂与根的相对误差等于直接测量时的相对误差的 n 倍。

5. 以 e 为底的 x 次幂 ($e = 2.718$)

若

$$y = e^x$$

则

$$\ln y = x$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = dx$$

即

$$\frac{\Delta y}{y} = \Delta x \quad (1-13)$$

若

$$y = e^{nx} \quad (n \text{ 为有理数})$$

则

$$\ln y = nx$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = n \cdot dx$$

即

$$\frac{\Delta y}{y} = n \cdot \Delta x \quad (1-14)$$

6. 常用对数

若

$$y = \lg x = 0.43429 \ln x$$

$$\ln y = \ln (\lg x)$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = \frac{0.43429}{x \lg x} \cdot dx = \frac{0.43429 \cdot \frac{dx}{x}}{y}$$

∴

$$\Delta y = 0.43429 \frac{\Delta x}{x} \quad (1-15)$$

即 常用对数的绝对误差近似等于直接测量的相对误差的一半。

7. 三角函数

若
则

$$y = \sin x$$

$$\ln y = \ln \sin x$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = \frac{\cos x}{\sin x} \cdot dx = \operatorname{ctg} x \cdot dx$$

$$\therefore \frac{\Delta y}{y} = \Delta x \cdot \operatorname{ctg} x \quad (1-16)$$

若

$$y = \cos x$$

$$\ln y = \ln \cos x$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = d \ln \cos x = - \frac{\sin x}{\cos x} \cdot dx = - \operatorname{tg} x \cdot dx$$

$$\therefore \frac{\Delta y}{y} = \Delta x \cdot \operatorname{tg} x \quad (1-17)$$

若

$$y = \operatorname{tg} x$$

$$\ln y = \ln \operatorname{tg} x$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = d \ln \operatorname{tg} x = \frac{dx}{\cos x \sin x}$$

$$\therefore \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x}{\cos x \sin x} \quad (1-18)$$

若

$$y = \operatorname{ctg} x$$

则

$$\ln y = \frac{dy}{y} = d \ln \operatorname{ctg} x = \frac{-dx}{\sin x \cos x}$$

$$\therefore \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x}{\sin x \cos x} \quad (1-19)$$

8. 反三角函数

若
则

$$y = \arcsin x$$

$$\ln y = \ln \arcsin x$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = d \ln \arcsin x = \frac{dx}{\sqrt{1-x^2} \cdot \arcsin x}$$

$$\therefore \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x}{\sqrt{1-x^2} \cdot \arcsin x} \quad (1-20)$$

若

$$y = \arccos x$$

$$\ln y = \ln \arccos x$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = d \ln \arccos x = \frac{-dx}{\sqrt{1-x^2} \cdot \arccos x}$$

$$\therefore \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x}{\sqrt{1-x^2} \cdot \arccos x} \quad (1-21)$$

若

$$y = \operatorname{arctg} x$$

$$\ln y = \ln \operatorname{arctg} x$$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = d \ln \operatorname{arctg} x = \frac{dx}{(1+x^2) \operatorname{arctg} x}$$

$$\therefore \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x}{(1+x^2)\operatorname{arc} \operatorname{ctg} x} \quad (1-22)$$

若 $y = \operatorname{arcc} \operatorname{tg} x$
 则 $\ln y = \ln \operatorname{arc} \operatorname{ctg} x$

$$d \ln y = \frac{dy}{y} = d \ln \operatorname{arc} \operatorname{ctg} x = \frac{-dx}{(1+x^2)\operatorname{arc} \operatorname{ctg} x}$$

$$\therefore \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x}{(1+x^2)\operatorname{arc} \operatorname{ctg} x} \quad (1-23)$$

值得指出的是：在间接测量中，因为被测的物理量有误差，则由它决定的要测物理量便产生误差。上述的计算仅揭示了间接测量中误差传递的规律。显然，要提高间接测量的精确度，关键是提高直接测量的精确度。对那些由于测量不正确等原因而引起的粗大误差，应在误差计算之前就予剔除。对于系统误差，在正式测量之前就应排除，如测量前对量具和量仪的校正等。因为有系统误差的测量，多数情况下是没有意义的。所以，上述误差传递的计算，仅对随机误差而言，决不可混为一谈。

思考题与习题

- 1-1 你了解“测量”和“检验”两个术语的意义和它们之间的区别吗？
- 1-2 测量方法有哪些分类？
- 1-3 测量工具有哪些分类？
- 1-4 测量工具的度量指标都是什么？其含义是什么？
- 1-5 测量误差为什么是不可避免的？
- 1-6 如何减少偶然误差和粗大误差？
- 1-7 什么叫绝对误差和相对误差？引入相对误差有什么意义？
- 1-8 什么是直接测量和间接测量？
- 1-9 如何记录实测数据？并注意什么问题？
- 1-10 如何确定直接测量和间接测量的误差？
- 1-11 用刻度间隔为 1 mm 的米尺测得正方形的边长为 20.0 mm。试求正方形的面积和周长的测量绝对误差和相对误差。

1-12 根据有效数字的计算法则计算下列各式。

1. $8.4g + 12.34g = ?$ (g 为重力加速度)

2. $7.96\sqrt{2} + 13.4\pi = ?$

3. $7.38\sqrt{3} + \lg 2 = ?$

1-13 用该数值 $i = 0.02 \text{ mm}$ 的游标卡尺测得圆柱体的直径和高 5 次数据如下：

测次 n	1	2	3	4	5
高 h (mm)	123.02	123.00	123.04	122.98	123.02
直径 D (mm)	20.00	20.02	19.98	20.04	20.02

试求此圆柱体的直径 (D)、高 (h) 和体积 (V) 及绝对误差、相对误差。

1-14 利用单摆测量当地重力加速度。测得摆长 l 和周期 T 5 次数据如下：

测次 n	1	2	3	4	5
摆长 l (mm)	1000.1	1000.2	999.9	999.8	1000.0
周期 T (s)	2.01	2.02	1.99	1.98	2.00

试求该地重力加速度大小及测量绝对误差和相对误差。

1-15 用游标卡尺测量圆锥台。测量其大端直径(D)、小端直径(d)和高(h)数据如下:

测次 n	1	2	3	4	5
D (mm)	19.98	19.99	20.01	20.00	20.04
d (mm)	9.98	9.98	10.02	10.02	9.96
h (mm)	19.98	20.00	20.02	19.98	19.96

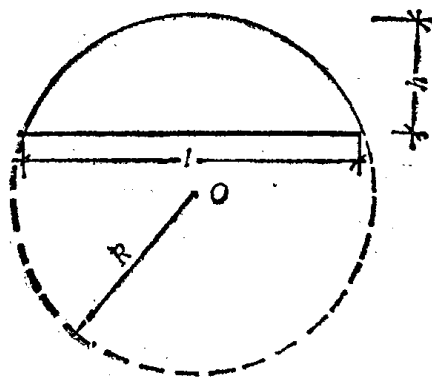
试求该圆锥台的锥度和测量误差。

1-16 用千分尺测求弓形板的曲率半径 R (见1-16题图)。测弦长(l)和弦高(h)如下,

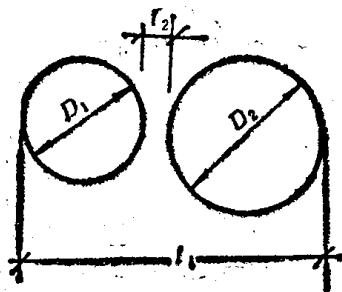
测次 n	1	2	3	4	5
l (mm)	30.002	30.004	30.002	29.998	29.996
h (mm)	95.002	95.004	95.000	94.996	94.994

试求该弓形板的曲率半径 R 及测量误差。

1-17 用游标卡尺测孔中心距可有几种方案(见1-17题图)? 假设 $\Delta D_1 = \Delta D_2 = 0.001\text{mm}$, $\Delta l_1 = 0.007\text{mm}$, $\Delta l_2 = 0.006\text{mm}$; 那么哪种方案的测量误差最小而哪种误差最大?



1-16 题图



1-17 题图