

高等学校教学用书

HUAGONGYUANLI
SHIYAN

化工原理实验

● 于奕峰 袁中凯 尤小祥 编



天津科学技术出版社

内 容 提 要

本书是与《化工原理》教材配套使用的化工原理实验教材,全书分五部分:化工实验数据处理、化工原理基础实验、计算机实验仿真和数据处理、演示实验、常用测量技术。它包括全国高校化工原理教学指导委员会规定的全部实验内容,即流体流动阻力的测定、离心泵实验、过滤实验、传热实验、精馏实验、吸收实验和干燥实验等。本书突出工程特点,并配有计算机实验仿真操作和数据处理操作,实践性强,注重理论与实践结合,培养学生工程观点和实践能力。

本书可作为高校本、专科及各类成人教育的化工原理实验课教材,也可供化工、轻工、环境工程等专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验/于奕峰,袁中凯,尤小祥编. —天津:天津科学技术出版社,2006

ISBN 7-5308-4181-5

I. 化... II. ①于...②袁...③尤... III. 化工原理-实验-高等学校-教材 IV. TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 080975 号

责任编辑:张 萍 吴文博

版式设计:邱 芳

责任印制:张军利

天津科学技术出版社出版

出版人:胡振泰

天津市西康路 35 号 邮编 300051

电话(022)23332393(发行部) 23332390(市场部) 27217980(邮购部)

网址:www.tjkjcs.com.cn

新华书店经销

唐山市三泰印务有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9 字数 211 000

2006 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

定价:13.00 元

目 录

绪论	(1)
一、化工原理实验教学目的	(1)
二、化工原理实验教学要求	(2)
三、化工原理实验注意事项	(3)
第一章 实验数据误差分析和数据处理	(6)
第一节 实验数据误差分析	(6)
一、误差的基本概念	(6)
二、有效数字及其运算规则	(10)
三、误差的基本性质	(11)
第二节 化工原理实验数据处理	(18)
一、确定需要测量的参数	(18)
二、测量参数的读数与记录	(18)
三、实验数据处理	(19)
第二章 实验	(33)
实验一 流体流动阻力的测定	(33)
实验二 流量计校核实验	(38)
实验三 离心泵实验	(41)
实验四 过滤实验	(47)
实验五 气体强制对流传热系数的测定	(52)
实验六 换热器传热系数的测定	(58)
实验七 精馏实验	(64)
实验八 填料塔吸收实验	(71)
实验九 干燥实验	(82)
第三章 实验仿真和数据处理	(87)
第一节 化工原理仿真实验概述	(87)
第二节 仿真实验	(90)
第三节 实验数据处理	(95)
第四章 演示实验	(97)
实验一 雷诺实验	(97)

实验二 柏努利方程实验·····	(98)
实验三 流体流动形态实验·····	(100)
实验四 热边界层实验·····	(101)
实验五 电除尘实验·····	(103)
实验六 旋风分离器实验·····	(104)
实验七 板式塔冷膜实验·····	(105)
实验八 固体流态化实验·····	(107)
第五章 流体压力、流量和温度的测量·····	(109)
第一节 流体压力测量·····	(109)
一、液柱式压差计·····	(109)
二、弹性式压力计·····	(112)
三、膜片式压力计·····	(112)
四、流体压力测量技术要点·····	(113)
第二节 流体流量测量·····	(115)
一、测速管(毕托管)·····	(115)
二、孔板流量计和喷嘴流量计·····	(117)
三、文丘里流量计·····	(118)
四、转子流量计·····	(118)
五、涡轮流量计·····	(120)
六、涡街流量计·····	(121)
七、体积式流量计·····	(123)
八、流量计的校正·····	(124)
第三节 温度测量·····	(126)
一、化工生产和实验中常用的温度计·····	(126)
二、温度测量技术要点·····	(135)
参考文献·····	(139)

绪 论

化工原理是紧密联系生产实际、实践性很强的课程,是化学工程、制药工程、环境工程、生物工程等专业学生必修的技术基础课,它已形成了完整的教学内容和教学体系。化工原理实验是学习、掌握和运用这门课程必不可少的重要实践课程。化工原理实验属于工程实验范畴,它具有明显的工程特点。每一个单元操作实验相当于化工生产中的一个基本过程,通过它能建立起一定的工程概念。同时,随着实验课的进行,会遇到大量的工程实际问题,对学生来说可以在实验过程中更实际、更有效地学到更多工程实验方面的原理及测试手段,可以看到复杂的真实设备与工艺过程同描述这一过程的教学模型之间的关系。

一、化工原理实验教学目的

(1)通过实验在实践中进一步学习、掌握和运用学过的基本理论,加深对化工单元操作的理解,巩固和深化所学理论知识。例如,离心泵实验,第一步固定泵的转速,改变阀门开度,可以测得一组定转速下泵的特性曲线。第二步固定管路中阀门开度,改变泵的转速可以得到一条管路特性曲线。再改变管路中阀门开度,就可以测得改变管路阻力的一系列管路特性曲线。也就是说,通过实验改变管路的阀门开度,可测得泵的特性曲线;改变泵的转速,可测得管路的特性曲线。这样,可以使学生进一步了解泵性能和管路性能的各种影响因素,帮助学生理解书本上较难懂的概念。

(2)通过实验熟悉实验装置的结构与性能,熟悉工艺流程,掌握操作方法。对学生进行实验方法、实验技能的基本训练,使学生进一步掌握实验基本技能(基本实验技术),培养独立组织和完成实验的能力。通过实验要培养学生能找出工程实际问题的实质,提出问题并解决之。应该经常提出如下问题并试图回答。

这套设备或工艺过程最关键的特征是什么?包含的基本原理是什么?这些理论如何应用于此?

能否找出操作的平衡状态、稳定状态和过渡状态?如何操作能达到或接近这些状态?独立变量有哪些,如何测量和控制它们?仪器检测范围?误差产生的原因?误差有多大?如何控制和减少误差?

(3)通过实验数据的测取、归纳运算、实验报告的编写等一系列任务,提高学生的计算能力和编写报告的能力。培养学生实事求是的科学态度和严肃认真的学习态度,为将来从事科学研究和解决工程实践问题打好基础。

总之,化工原理实验教学的目的在于培养实践能力和解决实际问题的能力。这种能力的培养是书本学习所无法替代的。

二、化工原理实验教学要求

对于学生,化工原理实验是第一次接触到用工程装置进行实验,往往感到陌生,无从下手;有的学生又因为是几个人一组而有依赖心理。为了切实收到教学效果,要求每个学生必须做到以下几点。

1. 课前预习

(1)认真阅读实验教材,复习课程教材有关内容。清楚地掌握实验项目要求,实验所依据的原理,实验步骤及所需测量的参数。熟悉实验所用测量仪表的使用方法,掌握其操作规程和安全注意事项。

(2)到实验室现场熟悉实验设备和流程,摸清测试点和控制点位置。确定操作程序、所测参数项目、所测参数单位及所测数据点如何分布等。

(3)具备计算机辅助教学手段时,可让学生进行计算机仿真练习。通过计算机仿真练习,熟悉各个实验的操作步骤和注意事项,以增强实验效果。

(4)在预习和计算机仿真练习基础上,写出实验预习报告。预习报告内容包括实验目的、原理、流程、操作步骤、注意事项等。准备好原始数据记录表格,并标明各参数的单位。

(5)特别要思考一下设备的哪些部分或操作中哪个步骤可能会产生危险,如何避免,以保证实验过程中人身和设备安全。预习报告经指导教师检查通过后方可进行实验。

2. 实验课中的操作训练

(1)实验操作是动手动脑的重要过程,一定要严格按操作规程进行。安排好测量范围、测量点数目、测量点的疏密等。

(2)实验进行过程中,操作要平稳、认真、细心。观察现象要仔细,记录数据要精心,实验数据要记录在备好的表格内,实验现象要详细记录在记录本上。学生应注意培养自己严谨的科学作风,养成良好的习惯。

(3)实验结束整理好原始数据,将实验设备和仪表恢复原状,切断电源,清扫卫生,经教师允许后方可离开实验室。

3. 实验后的总结——编写实验报告

实验报告是对实验的全面总结,也是一份技术文件,是对实验结果进行评估的文字材料。实验报告应简单明了、数据完整、结论明确,有讨论、有分析,得出的公式或图线有明确的使用条件。编写实验报告的能力也需要经过严格训练来提高,为今后写好研究报告和科学论文打下基础。

实验报告应包括以下内容:

- (1)实验时间、报告人、同组人等;
- (2)实验名称、实验目的与要求;
- (3)实验基本原理;
- (4)实验装置简介、流程图及主要设备的类型和规格;
- (5)实验操作步骤;
- (6)原始数据记录表格;

(7)实验数据的整理。实验数据的整理就是把记录的实验数据通过归纳、计算等方法整理出一定的关系(或结论)的过程,应有计算过程举例,即以一组数据为例从头到尾把计算过程一

步一步写清楚；

(8)将实验结果用图示法、列表法或方程表示法进行归纳,得出结论；

(9)对实验结果及问题进行分析讨论；

(10)参考文献。

实验报告必须书写工整、文字通顺、数据完全、结论明确。图形、图表的绘制必须使用直尺或曲线板。实验报告必须采用学校统一印制的实验报告纸编写。

三、化工原理实验注意事项

化工原理实验有其自身的特殊性。为了安全成功地完成实验,除了每个实验有每个实验的特殊要求外,在这里提出一些化工原理实验中必须遵守的注意事项和一些必须具备的安全知识。

(一)注意事项

1. 设备启动前必须检查的事项

(1)对于泵、风机、压缩机、电机等转动设备,用手使其转动(俗称盘车)从声响上判别有无异常,并检查润滑油位。

(2)设备上各阀门的开、关状态。

(3)接入设备的仪表开、关状态。

(4)应有的安全措施,如防护罩、绝缘垫、隔热层等。

2. 仪器仪表使用前应做到的事项

(1)了解原理与结构。

(2)掌握连接方法与操作步骤。

(3)分清量程范围,掌握正确的读数方法。

3. 操作过程中的注意事项

(1)操作中要严守自己的岗位,精心操作。注意整个实验的进行,随时观察仪表示值的变动,保证操作过程稳定进行。产生不合规律现象时要及时观察研究,分析其原因。

(2)操作过程中设备及仪表发生问题应立即按停车步骤停车,并报告指导教师。同时应自己分析原因供教师参考。未经教师同意不得自行处理。在教师处理问题时,学生应了解其过程,这是学习分析问题与处理问题的好机会。

4. 实验结束时必须做到的事项

应先将有关的气源、水源、热源、仪表的阀门或电源关闭,然后再切断电机电源。

5. 特别注意事项

化工原理实验要特别注意安全。进实验室后要搞清楚总电闸的位置和灭火器材的安放地点。

(二)安全知识

为了确保设备和人身安全,从事化工原理实验的实验者必须了解以下安全知识。

1. 化学药品和气体

在化工原理实验中所接触的化学药品不多,但仍应在使用之前,了解药品的性能,如毒性、易燃性和易爆性等。并搞清楚其使用方法和防护措施。

在化工原理实验中,应尽量避免采用水银。如遇水银压差计,要慎重操作,开关阀门要缓

慢,防止冲走压差计中的水银。操作过程要小心,不要碰破压差计。一旦水银被冲洒出来,一定要认真地尽可能地将它收集起来。无法收集的细粒,要用硫磺粉和氯化铁溶液覆盖。

化工原理实验中所用的气体种类较多,一类是具有刺激性的气体,如氨、二氧化硫等,这类气体的泄漏一般容易被发觉。另一类是无色无味,但有毒性或易燃易爆的气体,如一氧化碳等,不仅易中毒,而且在室温下空气中的爆炸范围为 12% ~ 74%,氢在室温下空气中的爆炸范围为 4% ~ 74%。当气体和空气的混合物在爆炸范围内,只要有火花等诱发因素,就会立即爆炸。因此,使用有毒或易燃易爆气体时,系统一定要严密不漏,尾气要导出室外,并注意室内通风。

2. 高压钢瓶

高压钢瓶是一种贮存各种压缩气体或液化气的高压容器。钢瓶一般容积为 40 ~ 60 L,最高工作压力为 15 MPa,最低的也在 0.6 MPa 以上。瓶内压力很高,并且贮存的气体本身某些是有毒或易燃易爆气体,故使用钢瓶一定要掌握其构造特点和安全知识,以确保安全。

钢瓶主要由筒体和瓶阀构成,其他附件还有保护瓶阀的安全帽、开启瓶阀的手轮、使运输过程中不受震动的橡胶圈。另外,在使用时瓶阀出口还要连接减压阀和压力表(俗称气表)。

标准高压钢瓶按国家标准制造,经有关部门严格检验方可使用。各种钢瓶使用过程中,还必须定期送有关部门进行水压试验。经过检验合格的钢瓶,在瓶肩上用钢印打上下列信息:

- (1)制造厂家;
- (2)制造日期;
- (3)钢瓶型号和编号;
- (4)钢瓶质量;
- (5)钢瓶容积;
- (6)工作压力;
- (7)水压试验压力、水压试验日期和下次送检日期。

各类钢瓶的表面都应涂上一定颜色的油漆,其目的不仅是为了防锈,主要是能从颜色上迅速辨别钢瓶中所贮气体的种类,以免混淆。常用的各类钢瓶的颜色及其标识列表如下。

气体种类	工作压力 /MPa	水压试验压力 /MPa	气瓶颜色	文 字	文字颜色
氧	15	22.5	浅蓝色	氧	黑色
氢	15	22.5	暗绿色	氢	红色
氮	15	22.5	黑 色	氮	黄色
氨	15	22.5	棕 色	氨	白色
压缩空气	15	22.5	黑 色	压缩空气	白色
二氧化碳	12.5(液)	19	黑 色	二氧化碳	黄色
氩	3(液)	6	黄 色	氩	黑色
氯	3(液)	6	草绿色	氯	白色
乙 炔	3(液)	6	白 色	乙 炔	红色
二氧化硫	0.6(液)	1.2	黑 色	二氧化硫	白色

为了确保安全,在使用钢瓶时,一定要注意以下几点。

- (1)当钢瓶受到明火或阳光等热辐射的作用时,气体因受热而膨胀,使瓶内压力增大。当

压力超过工作压力时,就有可能发生爆炸。因此,在钢瓶运输、保存和使用时,应远离热源(明火、暖气、炉子等),并避免长期在日光下暴晒,尤其在夏天更应注意。

(2)钢瓶即使在温度不高的情况下受到猛烈撞击,或不小心将其碰倒跌落,都有可能引起爆炸。因此,钢瓶在运输过程中,要轻搬轻放,避免跌落撞击,使用时要固定牢靠,防止碰倒。更不允许用锤子、扳手等金属器具敲打钢瓶。

(3)瓶阀是钢瓶中关键部件,必须保护好,否则将会发生事故。

①若瓶内存放的是氧、氢、二氧化碳和二氧化硫等,瓶阀应用铜和钢制成。若瓶内存放的是氨,则瓶阀必须用钢制成,以防腐蝕。

②使用钢瓶时,必须用专用的减压阀和压力表。尤其是氢气和氧气不能互换,为了防止氢和氧两类气体的减压阀混用造成事故,氢气表或氧气表的表盘上都注明有氢气表或氧气表的字样。氢气及其他可燃气体瓶阀,连接减压阀的连接管为左旋螺纹;而氧气等不可燃气体瓶阀,连接管为右旋螺纹。

③氧气瓶阀严禁接触油脂。因为高压氧气与油脂相遇,会引起燃烧,以至爆炸。开关氧气瓶时,切莫用带油污的手和扳手。

④要注意保护瓶阀。开关瓶阀时一定要搞清楚方向后缓慢转动,旋转方向错误或用力过猛会使螺纹受损,可能冲脱而出,造成重大事故。关闭瓶阀时,不漏气即可,不要关得过紧。用毕或搬运时,一定要安上保护瓶阀的安全帽。

⑤瓶阀发生故障时,应立即报告指导教师。严禁擅自拆卸瓶阀上任何零件。

(4)当钢瓶安装好减压阀和连接管线后,每次使用前都要在瓶阀附近用肥皂水检查,确认不漏气才能使用。对于有毒或易燃易爆气体的钢瓶,除了保证严密不漏外,最好单独放置在远离实验室的小屋里。

(5)钢瓶中气体不要全部用净。剩余压力一般应大于 0.1 MPa,以供检查。

(6)钢瓶必须严格按期检验。

3. 电器设备

化工原理实验中电器设备较多,某些设备的电负荷也较大。因此,注意安全用电极为重要,对电器设备必须采取安全措施。操作者必须严格遵守下列操作规定。

(1)在接通电源之前,必须认真检查电器设备和电路是否符合规定要求,对于直流电设备应检查正负极是否接对。必须搞清楚整套实验装置的启动和停车操作顺序,以及紧急停车的方法。

(2)严禁用湿手去接触电闸、开关和任何电器。电器设备要保持干燥清洁。

(3)合闸动作要快,要合得牢。合闸后若发现异常声音或气味,应立即拉闸,进行检查。

(4)必须按照规定的电流限额用电。严禁私自加粗保险丝或用其他金属丝代替保险丝。当保险丝熔断后,一定要查找原因,消除隐患,而后再换上新的保险丝。

(5)离开实验室前,必须把分管本实验室的总电闸拉下。

第一章 实验数据误差分析和数据处理

第一节 实验数据误差分析

由于实验方法和实验设备的不完善,周围环境的影响,人的观察力以及测量程序等限制,实验观测值和真值之间,总是存在一定的差异,在数值上即表现为误差。为了提高实验的精度,缩小实验观测值和真值之间的差值,需要对实验的误差进行分析和讨论。

一、误差的基本概念

测量是人类认识事物本质所不可缺少的手段。通过测量和试验能使人们对事物获得定量的概念和发现事物的规律性。可以说,没有测量,也就没有科学。科学上很多新的发现和突破都是以实验测量为基础的。

测量就是用实验的方法,将被测物理量与所选用作为标准的同类量进行比较,从而确定它的大小。

1. 真值与平均值

真值也叫理论值或定义值。通常真值是无法测得的。若在实验中,测量的次数无限多时,根据误差的分布定律,正负误差的出现几率相等。在无系统误差的情况下,将测量值加以平均,可以获得非常接近于真值的数值。但是在我们的实验测量中次数是有限的。用有限测量值求得的平均值只能是近似真值。常用的平均值有下列几种。

(1)算术平均值 算术平均值是最常见的一种平均值。

设 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 为各次测量值, n 代表测量次数,则算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1-1)$$

(2)几何平均值 几何平均值是将一组 n 个测量值连乘并开 n 次方求得的平均值。即

$$\bar{x} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (1-2)$$

(3)均方根平均值 均方根平均值按下式计算

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} \quad (1-3)$$

(4)对数平均值 在化学反应及热量、质量传递中,其分布曲线多具有对数的特性,在这种情况下表征平均值的量就应该用对数平均值。

设两个量 x_1, x_2 , 其对数平均值为

$$\bar{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (1-4)$$

应指出,变量的对数平均值总小于算术平均值。如变量相差甚微时,可以用算术平均值代替对数平均值而误差不大。

以上介绍各平均值的目的是要从一组测定值中找出最接近真值的那个值。在化工实验和科学研究中,数据的分布较多属于正态分布,故通常采用算术平均值。

2. 误差的分类

根据误差的性质和产生的原因,一般分为系统误差、偶然误差和过失误差三种。

(1)系统误差 系统误差是指在测量和实验过程中未发觉或未确认的因素所引起的误差,而这些因素影响结果永远朝一个方向偏移,其大小及符号在同一组实验测量中完全相同,当实验条件一经确定,系统误差就获得一个客观上的恒定值。

当改变实验条件时,就能发现系统误差的变化规律。

系统误差产生的原因:①仪器不良,如刻度不准,仪表未进行校正或标准表本身存在偏差等;②周围环境的改变,如外界温度、压力、湿度的变化等;③实验人员个人的习惯和偏向,如读数偏高或偏低等所引起的误差。针对仪器的缺点、外界条件变化影响的大小、个人的偏向,分别加以校正后系统误差是可以消除的。

(2)偶然误差 在已消除系统误差的一切量值的观测中,所测数据仍在末一位或末二位数字上有差别,而且它们的绝对值和符号的变化,时大时小,时正时负,没有确定的规律,这类误差称为偶然误差或随机误差。偶然误差产生的原因不明,因而无法控制和补偿。但是,倘若对某一量值做足够次数的等精度测量,就会发现偶然误差完全服从统计规律,误差的大小或正负的出现完全由概率决定。因此,随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值趋近于零,所以多次测量结果的算术平均值将更接近于真值。

(3)过失误差 过失误差是一种显然与事实不符的误差,它主要是由于实验人员粗心大意、过度疲劳和操作不正确等原因引起的。此类误差无规则可寻,只要加强责任感、多方警惕、细心操作,过失误差是可以避免的。

3. 误差的表示方法

利用任何量具或仪器进行测量时,总存在误差,测量结果总不可能准确地等于被测量的真值,而只是它的近似值。测量的质量以测量精确度作为指标,而通常则是根据测量误差的大小来估计测量的精确度。测量结果的误差愈小,则测量就愈精确。

(1)绝对误差 测量值 X 和真值 A_0 之差为绝对误差,通常称为误差。记为

$$D = X - A_0 \quad (1-5)$$

由于真值 A_0 一般无法求得,因而上式只有理论意义。常用高一级标准仪器的示值作为实际值 A ,以代替真值 A_0 。由于高一级标准仪器存在较小的误差,因而 A 不等于 A_0 ,但总比 X 更接近于 A_0 。 X 与 A 之差称为仪器的示值绝对误差,记为

$$d = X - A \quad (1-6)$$

d 的相反数称为修正值,记为

$$C = -d = A - X \quad (1-7)$$

通过检定,可以由高一级标准仪器给出被检仪器的修正值 C 。利用修正值便可以求出该仪器的实际值 A ,即

$$A = X + C \quad (1-8)$$

(2)相对误差 衡量某一测量值的准确程度,一般用相对误差来表示。示值绝对误差 d 与被测量的实际值 A 的百分比值称为实际相对误差,记为

$$\delta_A = \frac{d}{A} \times 100\% \quad (1-9)$$

以仪器的示值 X 代替实际值 A 的相对误差称为示值相对误差,记为

$$\delta_X = \frac{d}{X} \times 100\% \quad (1-10)$$

一般来说,除了某些理论分析外,用示值相对误差 δ_X 较为适宜。

(3)引用误差 为了计算和划分仪表精确度等级,提出引用误差概念。其定义为仪表示值的绝对误差与其量程范围之比。

$$\delta_n = \frac{\text{示值绝对误差}}{\text{量程范围}} \times 100\% = \frac{d}{X_n} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中 d ——示值绝对误差;

X_n ——标尺上限值 - 标尺下限值。

(4)算术平均误差 算术平均误差是各测量点的误差的平均值。

$$\delta_{\bar{x}} = \frac{\sum |d_i|}{n} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1-12)$$

式中 n ——测量次数;

d_i ——第 i 次测量的误差。

(5)标准误差 标准误差亦称均方根误差。其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}} \quad (1-13)$$

上式适用于无限测量的场合。实际测量工作中,测量次数是有限的,则改用下式

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \quad (1-14)$$

标准误差不是一个具体的误差, σ 的大小只说明在一定条件下等精度测量集合所属的每一个观测值对其算术平均值的分散程度。如果 σ 的值愈小,则说明每一次测量值对其算术平均值的分散度就愈小,测量的精度就愈高,反之精度就愈低。

4. 精密度、准确度与精确度

反映测量结果与真值接近程度的量,称为精度(亦称精确度),它与误差大小相对应,测量的精度越高,其测量误差就越小。“精度”应包含精密度和准确度两层含义。

(1)精密度 测量中所测得数值重现性的程度,称为精密度。它反映偶然误差的影响程度,精密度高就表示偶然误差小。

(2)准确度 测量值与真值的偏移程度,称为准确度。它反映系统误差的影响程度,准确度高就表示系统误差小。

(3)精确度(精度) 它反映测量中所有系统误差和偶然误差综合的影响程度。

在一组测量中,精密度高的准确度不一定高,准确度高精密度的也不一定高,但精确度高,则精密度与准确度都高。

为了说明精密度与准确度的区别,可用下述打靶例子来说明,如图 1-1 所示。

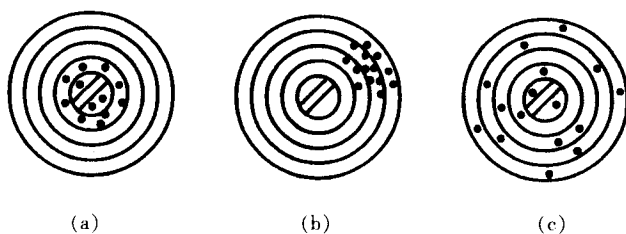


图 1-1 精密度和准确度关系

图 1-1 中(a)表示精密度和准确度都很好,则精确度高;(b)表示精密度很好,但准确度却不高;(c)表示精密度与准确度都不好。在实际测量中没有像靶心那样明确的真值,而是设法去测定这个未知的真值。

学生在实验过程中,往往满足于实验数据的重现性,而忽略了数据测量值的准确程度。绝对真值是不可知的,人们只能订出一些国际标准作为测量仪表准确性的参数标准。随着人类认识运动的推移和发展,可以逐步逼近绝对真值。

5. 测量仪表精确度

测量仪表的精度等级是用最大引用误差(又称允许误差)来标明的。它等于仪表示值中的最大绝对误差与仪表的量程范围之比的百分数。

$$\begin{aligned}\delta_{\text{rmax}} &= \frac{\text{最大示值绝对误差}}{\text{量程范围}} \times 100\% \\ &= \frac{d_{\text{max}}}{X_n} \times 100\%\end{aligned}\quad (1-15)$$

式中 δ_{rmax} ——仪表的最大引用误差;

d_{max} ——仪表示值的最大绝对误差;

X_n ——标尺上限值 - 标尺下限值。

通常情况下是用标准仪表校验较低级的仪表。故此,最大示值绝对误差就是被校表与标准表之间的最大绝对误差。

测量仪表的精度等级是国家统一规定的,把允许误差中的百分号去掉,剩下的数字就称为仪表的精度等级。仪表的精度等级常以圆圈内的数字标明在仪表的面板上。例如某台压差计的允许误差为 1.5%,这台压差计的精度等级就是 1.5 级,用Ⓢ表示。通常简称 1.5 级仪表。电工仪表的精度等级有 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 等。

仪表的精度等级为 a , 它表明仪表在正常工作条件下,其最大引用误差的绝对值 δ_{rmax} 不能超过的界限,即

$$\delta_{\text{rmax}} = \frac{d_{\text{max}}}{X_n} \times 100\% \leq a\% \quad (1-16)$$

由式(1-16)可知,在应用仪表进行测量时所能产生的最大绝对误差(简称误差限)为

$$d_{\text{max}} \leq a\% \cdot X_n \quad (1-17)$$

而用仪表测量 X 的最大示值相对误差(简称相对误差限)为

$$\delta_{\max} = \frac{d_{\max}}{X} \leq a\% \cdot \frac{X_n}{X} \quad (1-18)$$

由上式可以看出,用指示仪表测量某一被测量所能产生的最大示值相对误差,不会超过仪表允许误差 $a\%$ 乘以仪表测量上限 X_n 与测量值 X 的比。在实际测量中为可靠起见,可用下式对仪表的测量误差进行估计,即

$$\delta_m = a\% \cdot \frac{X_n}{X} \quad (1-19)$$

【例 1-1】用量限为 5 A,精度为 0.5 级的电流表,分别测量两个电流, $I_1 = 5$ A, $I_2 = 2.5$ A,试求测量 I_1 和 I_2 的相对误差为多少?

由式(1-19)得

$$\delta_{m1} = a\% \cdot \frac{I_n}{I_1} = 0.5\% \times \frac{5}{5} = 0.5\%$$

$$\delta_{m2} = a\% \cdot \frac{I_n}{I_2} = 0.5\% \times \frac{5}{2.5} = 1.0\%$$

由此可见,当仪表的精度等级选定时,所选仪表的测量上限越接近被测量的值,则测量的误差的绝对值越小。

【例 1-2】欲测量约 90 V 的电压,实验室现有 0.5 级 0~300 V 和 1.0 级 0~100 V 的电压表,问选用哪一种电压表进行测量为好?

解:用 0.5 级 0~300 V 的电压表测量 90 V 时的相对误差为

$$\delta_{m0.5} = a_1\% \cdot \frac{U_n}{U} = 0.5\% \times \frac{300}{90} = 1.7\%$$

用 1.0 级 0~100 V 的电压表测量 90 V 时的相对误差为

$$\delta_{m1.0} = a_2\% \cdot \frac{U_n}{U} = 1.0\% \times \frac{100}{90} = 1.1\%$$

上例说明,如果选择得当,用量程范围适当的 1.0 级仪表进行测量,能得到比用量程范围大的 0.5 级仪表更准确的结果。因此,在选用仪表时,应根据被测量值的大小,在满足被测量数值范围的前提下,尽可能选择量程小的仪表,并使测量值大于所选仪表满刻度的三分之二,即 $X > \frac{2}{3} \cdot X_n$ 。这样,既能满足测量误差要求,又可选择精度等级较低的测量仪表,从而降低仪表的成本。

二、有效数字及其运算规则

在测量的数值计算中,该用几位数字来表示测量或计算结果,是一件很重要的事情。不是说一个数值中小数点后面位数越多越准确。实验中从测量仪表上所读数值的位数是有限的,而且取决于测量仪表的精度,其最后一位数字往往是由仪表精度所决定的估计数字。即一般应读到测量仪表最小刻度的十分之一位。数值准确度大小由有效数字位数来决定。

1. 有效数字

一个数据,其中除了起定位作用的“0”外,其他数都是有效数字。如 0.0037 只有 2 位有效数字,而 370.0 则有 4 位有效数字。有效数字位数的读取是由实验结果精确度要求及测量仪

表精确度决定的。一般要求测试数据有效数字为4位。要注意有效数字不一定是可靠数字。如测流体流动阻力所用U形管压差计,最小刻度是1 mm,但我们可以读到0.1 mm,如45.65 kPa。又如二等标准温度计最小刻度为0.1 °C,我们可以读到0.01 °C,如15.16 °C。此时有效数字为4位,而可靠数字只有3位,最后一位是不可靠的,称为可疑数字。记录测量数值时只保留1位可疑数字。

为了清楚地表示数值的精度,明确读出有效数字位数,常用指数的形式表示,即写成1个小数与相应的10的整数幂的乘积。这种以10的整数幂来记数的方法称科学记数法。

如	981 000	有效数字为4位时,记为 9.810×10^5 ;
		有效数字为3位时,记为 9.81×10^5 ;
		有效数字为2位时,记为 9.8×10^5 ;
	0.000 718	有效数字为4位时,记为 7.180×10^{-4} ;
		有效数字为3位时,记为 7.18×10^{-4} ;
		有效数字为2位时,记为 7.2×10^{-4} 。

2. 有效数字运算规则

(1)记录测量数值时,只保留1位可疑数字。

(2)当有效数字位数确定后,其余数字一律舍弃。舍弃办法是四舍六入,即末位有效数字后边第一位数小于5则舍弃不计;大于5则在其前一位数上增1;等于5时,前一位为奇数,则进1为偶数,前一位为偶数,则舍弃不计。这种舍入原则可简述为:“小则舍,大则入,正好等于奇变偶”。如:保留4位有效数字

$$2.717\ 29 \rightarrow 2.717;$$

$$3.142\ 85 \rightarrow 3.143;$$

$$4.623\ 56 \rightarrow 4.624;$$

$$5.376\ 56 \rightarrow 5.376。$$

(3)在加减计算中,各数所保留的小数点后的位数,应与各数中小数点后位数最少的相同。例如将13.65、0.008 2、1.632三个数字相加时,应写为 $13.65 + 0.01 + 1.63 = 15.29$ 。

(4)在乘除运算中,各数所保留的位数,以各数中有效数字位数最少的那个数为准;其结果的有效数字位数亦应与原来各数中有效数字位数最少的那个数相同。例如: $0.012\ 1 \times 25.64 \times 1.057\ 82$ 应写成 $0.012\ 1 \times 25.6 \times 1.06 = 0.328$ 。上例说明,虽然这三个数的乘积为0.328 182 3,但只应取其积为0.328。

(5)在对数计算中,所取对数位数应与真数有效数字位数相等。

三、误差的基本性质

在化工原理实验中通过直接测量或间接测量得到有关的参数数据,这些参数数据的可靠程度如何?如何提高其可靠性?因此,必须研究在给定条件下误差的基本性质和变化规律。

1. 误差的正态分布

如果测量数列中不包含系统误差和过失误差,从大量的实验中发现偶然误差有如下几个特征。

(1)绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的机会多,即误差的概率与误差的大小有关。这是误差的单峰性。

(2)绝对值相等的正误差和负误差出现的次数相等,即它们出现的概率相同。这是误差的

对称性。

(3)极大的正误差或负误差出现的概率都非常小,即大的误差一般不会出现。这是误差的有界性。

(4)随着测量次数的增加,偶然误差的算术平均值趋向于零。这叫误差的抵偿性。

根据上述误差的特征,可以得出误差出现的概率分布图;如图 1-2 所示。图中横坐标表示偶然误差,纵坐标表示各误差出现的概率,图中曲线称为误差分布曲线,以 $y = f(x)$ 表示。其数学表达式由高斯提出,具体形式为

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1-20)$$

或

$$y = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2} \quad (1-21)$$

上式称为高斯误差分布定律,亦称为误差方程。式中 σ 为标准误差, h 为精确度指数, σ 与 h 的关系为

$$h = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma} \quad (1-22)$$

若误差按函数关系分布,则称为正态分布。 σ 越小,测量精度越高,分布曲线的峰越高且越窄; σ 越大,分布曲线越平坦且越宽,如图 1-3 所示。由此可知, σ 越小,小误差占的比重越大,测量精度越高;反之,则大误差占的比重越大,测量精度越低。

2. 测量集合的最佳值

在测量精度相同的情况下,测量一系列观测值 $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ 所组成的测量集合,假设其平均值为 M_m ,则各次测量误差为

$$x_i = M_i - M_m, i = 1, 2, \dots, n \quad (1-23)$$

当采用不同的方法计算平均值时,所得到的误差值

不同,误差出现的概率亦不同。若选择适当的计算方法,使误差最小,而概率最大,由此计算的平均值为最佳值。根据高斯误差分布定律,只有各点误差平方和为最小,才能实现概率最大。这就是最小二乘法原理。由此可知,对于一组精度相同的观测值,采用算术平均得到的值是该组观测值的最佳值。

$$\text{最佳值 } M_0 = \frac{M_1 + M_2 + \dots + M_n}{n} = \frac{\sum M_i}{n} = M_m \quad (1-24)$$

3. 有限测量次数中标准误差 σ 的计算

由误差基本概念知,误差是观测值和真值之差。在没有系统误差存在的情况下,以无限多次测量所得到的算术平均值为真值。当测量次数为有限时,所得到的算术平均值近似于真值,

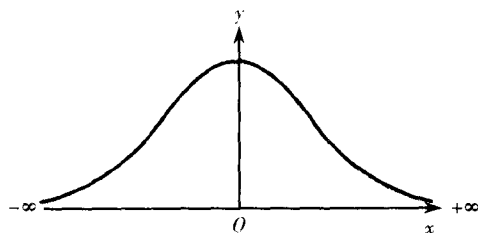


图 1-2 误差分布曲线

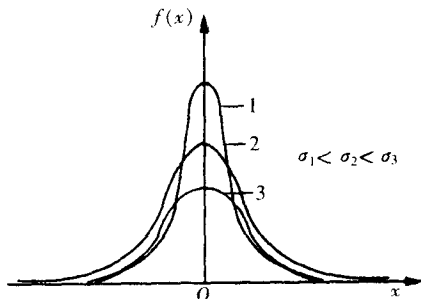


图 1-3 不同 σ 的误差分布曲线

称最佳值。因此,观测值与真值之差不同于观测值与最佳值之差。

令真值为 A , 算术平均值为 a , 观测值为 M , 并令 $d = M - a$, $D = M - A$, 则

$$\begin{aligned} d_1 &= M_1 - a, & D_1 &= M_1 - A, \\ d_2 &= M_2 - a, & D_2 &= M_2 - A, \\ &\vdots & &\vdots \\ d_n &= M_n - a, & D_n &= M_n - A, \\ \sum d_i &= \sum M_i - na, & \sum D_i &= \sum M_i - nA \end{aligned}$$

因为 $\sum M_i - na = 0$,

所以 $\sum M_i = na$

代入 $\sum D_i = \sum M_i - nA$ 中, 即得

$$a = A + \frac{\sum D_i}{n} \quad (1-25)$$

将式(1-25)代入 $d_i = M_i - a$ 中得

$$d_i = (M_i - A) - \frac{\sum D_i}{n} = D_i - \frac{\sum D_i}{n} \quad (1-26)$$

将式(1-26)两边各平方得

$$\begin{aligned} d_1^2 &= D_1^2 - 2D_1 \frac{\sum D_i}{n} + \left(\frac{\sum D_i}{n} \right)^2 \\ d_2^2 &= D_2^2 - 2D_2 \frac{\sum D_i}{n} + \left(\frac{\sum D_i}{n} \right)^2 \\ &\vdots \\ d_n^2 &= D_n^2 - 2D_n \frac{\sum D_i}{n} + \left(\frac{\sum D_i}{n} \right)^2 \end{aligned}$$

$$\text{对 } i \text{ 求和} \quad \sum d_i^2 = \sum D_i^2 - 2 \frac{(\sum D_i)^2}{n} + n \left(\frac{\sum D_i}{n} \right)^2$$

因在测量中正负误差出现的机会相等, 故将 $(\sum D_i)^2$ 展开后, $D_1 \cdot D_2, D_1 \cdot D_3, \dots$ 为正为负的数目相等, 彼此相消, 故得

$$\begin{aligned} \sum d_i^2 &= \sum D_i^2 - 2 \frac{\sum D_i^2}{n} + n \frac{\sum D_i^2}{n^2} \\ \sum d_i^2 &= \frac{n-1}{n} \sum D_i^2 \end{aligned}$$

从上式可以看出, 在有限测量次数中, 自算术平均值计算的误差平方和永远小于自真值计算的误差平方和。根据标准误差的定义

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}}$$

上式中 $\sum D_i^2$ 代表观测次数为无限多时误差的平方和, 故当观测次数有限时,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \quad (1-27)$$