

化工类油气储运工程 专业实验

沈本贤◎主 编
凌 昊 邹 滢◎副主编



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

化工类油气储运工程专业实验

沈本贤 主 编

凌 昊 邹 滢 副主编



華東理工大學出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

化工类油气储运工程专业实验/沈本贤主编. —上海:华东理工大学出版社,2014.7
ISBN 978-7-5628-3873-9

I. ①化… II. ①沈… III. ①石油与天然气储运—实验—教材 IV. ①TE8-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 066819 号

内 容 提 要

本书是高等院校化工类油气储运工程专业本科实验教学用书,内容涵盖 35 项实验,其中油气原料与产品基本性质的分析测定有 24 项,炼油化工综合实验有 11 项。教学实验所涉及的仪器、设备、方法等既体现传承理念,又努力与时俱进,尽可能地反映油气储运工程和石油化工工业相关分析测试实验技术新的发展水平,专业教学实验与专业工艺学的学习互相呼应,使实验内容能较好地适应科研生产的需要。

本书可以作为高等院校化工类油气储运工程相关或相近专业本科生、研究生的教材,也可作为油气储运、石油化工科研与工程技术人员的参考书。

化工类油气储运工程专业实验

主 编 / 沈本贤

副 主 编 / 凌 昊 邹 滢

责任编辑 / 焦婧茹

责任校对 / 金慧娟

封面设计 / 肖祥德 裘幼华

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址:上海市梅陇路 130 号,200237

电 话:(021)64250306(营销部)

(021)64252344(编辑室)

传 真:(021)64252707

网 址:press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟新骅印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 11.25

字 数 / 279 千字

版 次 / 2014 年 7 月第 1 版

印 次 / 2014 年 7 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-3873-9

定 价 / 28.00 元

联系我们:电子邮箱 press@ecust.edu.cn

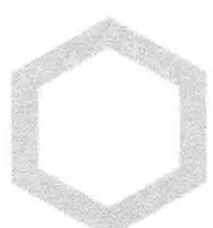
官方微博 e.weibo.com/ecustpress

淘宝官网 <http://shop61951206.taobao.com>





前言



石油与天然气工业的迅速发展,拓宽了油气储运工程发展的空间。以化工方法解决油气储运工程中的问题,已逐步成为油气储运工程专业的特色之一。

在已有的化学、物理、基础技术相对应的实验基础上,作为化工特色鲜明的油气储运工程专业,在学生进入专业阶段学习时,应努力创造条件,使他们能动地获取与专业工艺学相呼应的石油与天然气基本性质和测定技术的知识,能动掌握油气储运与加工过程的实验基本技能和综合实验组织方法。这对于学生理论联系实际能力的培养,加强创新能力的训练,造就更多石油、化工高素质人才具有十分重要的意义。

本书汲取了兄弟高校以专业特色设置专业实验的经验,在参考中国石化石油化工科学研究院编写的《石油及其产品标准分析方法和实验方法》的基础上,经多年专业实验教学的实践与建设,形成了以化工方法解决油气储运工程问题为特色的专业实验内容。

本书涵盖实验共有 35 项,其中石油天然气与油品基本性质的分析测定实验有 24 项,着眼于进行专业实验基本操作、基本技术、基本素养的训练与提高;炼油化工综合实验有 11 项,主要涉及研究型、设计型、综合型实验,着眼于进一步提高动手能力、强化实验基本技能、端正严肃科学态度。本书力求在基本能力培养的基础上,注重团队合作精神、创新意识和创新能力的培养,适合油气储运工程(石油加工方向)等相关专业学生使用。上述实验项目内容,可根据实验条件、教学要求和学时数的情况,进行适当选择和调整。本书还对 HSE 管理基本知识、实验数据的误差分析与数据处理进行了必要介绍,让学生能理论联系实际,提高学生解决实际工程问题的能力。

本书的主编为沈本贤,副主编为凌昊、邹滢。参加本书编写的人员还有赵基钢、刘纪昌、孙辉、李少萍、马宏燎等。

本书涉及的实验项目得到了中华人民共和国教育部、财政部,中国石油化工股份有限公司,华东理工大学教务处、科技处等对专业实验建设的立项资助。在此一并表示衷心感谢!

限于编者的能力与水平,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

目录

第 1 章 HSE 管理基本知识	1
1.1 HSE 简介	1
1.2 HSE 的解释	2
1.3 HSE 管理的目的	2
1.4 HSE 管理体系的基本要素	3
1.5 HSE 管理体系的结构特点	4
第 2 章 实验数据的误差分析与数据处理	5
2.1 测量值的误差	6
2.2 有效安全数字和实验结果数据的表示法	15
2.3 实验数据处理	16
第 3 章 天然气及液化气烟道气性质测定实验	22
3.1 天然气烃类组成分析(气相色谱法)	22
3.2 天然气总硫含量(质量分数)测定(氧化微库仑法)	25
3.3 天然气中有机含硫化合物质量分数测定(GC- FPD 法)	30
3.4 天然气中 CO ₂ 质量分数测定(气相色谱法)	33
3.5 液化石油气的铜片腐蚀实验	36
3.6 烟道气中硫氧化物、氮氧化物及二氧化碳质量分数测定	40
第 4 章 油品及原油性质测定实验	46
4.1 汽油馏程的测定	46
4.2 汽油 PONA 组成的测定	51
4.3 汽油总硫和总氮质量浓度的测定(紫外荧光法)	58
4.4 航空煤油碘值的测定	60
4.5 煤油闪点的测定(闭口杯法)	63
4.6 煤油浊点和结晶点的测定	66
4.7 柴油运动黏度的测定	69
4.8 柴油密度的测定(比重瓶法)	74
4.9 柴油酸度的测定	78
4.10 柴油水分的测定	80
4.11 柴油苯胺点的测定	84
4.12 柴油凝点的测定	86

4.13	柴油冷滤点的测定	90
4.14	润滑油闪点的测定(开口杯法)	93
4.15	原油黏度测定(旋转黏度计法)	96
4.16	原油盐质量浓度的测定	99
4.17	重油馏程的测定(减压蒸馏)	102
4.18	重油四组分的测定(TLC-FID 法)	110
第 5 章 炼油化工综合实验		116
5.1	原油流动性能测试	116
5.2	原油实沸点蒸馏	120
5.3	重油实沸点减压蒸馏	129
5.4	气相色谱测定原油的馏程分布	134
5.5	吸收法气体脱硫	138
5.6	基于分子管理的石脑油吸附分离	143
5.7	石脑油蒸汽裂解制乙烯	148
5.8	固定流化床催化裂化反应	153
5.9	小型提升管重油流化催化裂化	159
5.10	延迟焦化及产物精馏	164
5.11	量气法测定小呼吸损耗	167
参考文献		173

第 1 章

HSE 管理基本知识

在建设资源节约型 and 环境保护型社会的过程中,作为化工类油气储运工程专业的学生有必要对健康、安全、环境体系进行了解。

1.1 HSE 简介

HSE 分别是英文“Health”“Safety”“Environment”的缩写,即“健康”“安全”“环境”。在工业发展初期,由于生产技术落后,人类只是对自然资源的盲目索取甚至是破坏性开采,而没有从深层次意识到这种生产方式对人类所造成的负面影响。国际上的重大事故引起了工业界的普遍关注,使人们深刻认识到石油、石化、化工行业是高风险的行业,必须更进一步采取有效措施和建立完善的健康、安全和环境管理系统,以减少或避免重大事故和重大环境污染事件的发生,从而对安全工作的深化发展与完善起到了巨大的推动作用。

由于对健康、安全和管理在原则和效果上彼此相似,在实际过程中,三者之间又有着密不可分的联系,因此有必要把健康、安全和环境纳入一个完整的管理体系。健康、安全和环境体系的形成和发展是多年管理工作经验积累的成果,它体现了完整的一体管理思想。1974 年,石油工业国际勘探开发论坛(E&P Forum)建立,作为石油公司国际协会的石油工业组织,它组织了专题工作组,从事健康、安全和环境管理体系的开发。20 世纪 60 年代以前主要是体现安全方面的要求,在装备上不断改善对人们的保护,利用自动化控制手段使工艺流程的保护性能得到完善;70 年代以后,注重了对人的行为的研究,注重考察人与环境的相互关系;自

1980 年以后,逐渐发展形成了一系列安全管理的思想和方法。

1991 年,壳牌公司颁布健康、安全、环境(HSE)方针指南。同年,在荷兰海牙召开了第一届油气勘探、开发的健康、安全、环境(HSE)国际会议。1994 年在印度尼西亚的雅加达召开了油气开发专业的健康、安全、环境国际会议,HSE 活动在全球范围内迅速展开。HSE 管理体系是现代工业发展到一定阶段的必然产物,它的形成和发展是现代工业多年工作经验积累的成果。HSE 作为一个新型的健康、安全和环境管理体系,得到了国际上许多大公司的共同认可,从而成为现代公司共同遵守的行为准则。

美国杜邦公司是当今西方世界 200 家大型化工公司中的第一大公司,该公司在海外 50 多个国家和地区中设有 200 多家子公司,联合公司雇员约有 20 万人。杜邦公司推行 HSE 管理,企业经营管理和安全管理都达到国际一流水平。荷兰皇家壳牌石油公司是世界上四大石油石化跨国公司之一,该公司拥有员工约 43 000 人。1984 年该公司学习了美国杜邦公司先进的 HSE 管理经验,取得了非常明显的成效。英国 BP-Amoco 追求并实现出色的健康、安全和环境表现,对健康、安全和环境表现的承诺是该集团五大经营政策(道德行为、雇员、公共关系、HSE 表现、控制和财务)之一。BP 集团健康、安全和环境表现的承诺为:每一位 BP 的职员,无论身处何地,都有责任做好 HSE 工作。良好的 HSE 表现是事业成功的关键。目标是无事故,无害于员工健康,无损于环境。

1.2 HSE 的解释

健康是指人身体上没有疾病,在心理上(精神上)保持一种完好的状态。

安全是指在劳动生产过程中,努力改善劳动条件、克服不安全因素,使劳动生产在保证劳动者健康、企业财产不受损失、人民生命安全的前提下顺利进行。安全生产是企业一切经营活动的根本保证。

环境是指与人类密切相关的、影响人类生活和生产活动的各种自然力量或作用的总和。它不仅包括各种自然因素的组合,还包括人类与自然因素间相互形成的生态关系的组合。

健康、安全和环境管理体系(简称为 HSE 体系)是按规划(Plan)—实施(Do)—验证(Check)—改进(Action)运行模式来建立的,即 PDCA 模式,该模式由美国质量管理专家戴明提出,它是全面质量管理所应遵循的科学程序,故又名戴明循环。

1.3 HSE 管理的目的

HSE 管理的目的有如下几个方面:

- (1) 满足政府对健康、安全和环境的法律、法规要求;
- (2) 为企业提出的总方针、总目标及各方面具体目标的实现提供保证;
- (3) 减少事故发生,保证员工的健康与安全,保护企业的财产不受损失;
- (4) 保护环境,满足可持续发展的要求;
- (5) 提高原材料和能源利用率,保护自然资源,增加经济效益;
- (6) 减少医疗、赔偿、财产损失费用,减少保险费用;
- (7) 满足公众的期望,保持良好的公共和社会关系;

(8) 维护企业的名誉,增强市场竞争力。

1.4 HSE 管理体系的基本要素

HSE 管理体系的基本要素分为三部分:①核心和条件部分;②循环链部分;③辅助方法和工具部分。

1.4.1 核心和条件部分

(1) 领导和承诺:是 HSE 管理体系的核心,承诺是 HSE 管理的基本要求和动力,自上而下的承诺和企业 HSE 文化的培育是体系成功实施的基础。

(2) 组织机构、资源和文件:良好的 HSE 表现所需的人员组织、资源和文件是体系实施和不断改进的支持条件。它有 7 个二级要素。这一部分虽然也参与循环,但通常具有相对的稳定性,是做好 HSE 工作必不可少的重要条件,通常由高层管理者或相关管理人员制订和决定。

1.4.2 循环链部分

(1) 方针和目标:对 HSE 管理的意向和原则的公开声明,体现了组织对 HSE 的共同意图、行动原则和追求。

(2) 规划:具体的 HSE 行动计划,包括了计划变更和应急反应计划。该要素有 5 个二级要素。

(3) 评价和风险管理:对 HSE 关键活动、过程和设施的风险的确定和评价及风险控制措施的制定。该要素有 6 个二级要素。

(4) 实施和监测:对 HSE 责任和活动的实施和监测,以及必要时所采取的纠正措施。该要素有 6 个二级要素。

(5) 评审和审核:对体系、过程、程序的表现、效果及适应性的定期评价。该要素有 2 个二级要素。

(6) 纠正与改进:不作为单独要素列出,而是贯穿于循环过程的各要素中。

循环链是 PDCA 模式的体现,企业的健康、安全和环境方针、目标通过这一过程来实现。除 HSE 方针和战略目标由高层领导制定外,其他内容通常由企业的作业单位或生产单位为主体来制定和运行。

1.4.3 辅助方法和工具部分

辅助方法和工具是为有效实施管理体系而设计的一些分析、统计方法。由以上分析可以看出:

(1) 各要素有一定的相对独立性,分别构成了核心、基础条件、循环链的各个环节。

(2) 各要素又是密切相关的,任何一个要素的改变必须考虑到对其他要素的影响,以保证体系的一致性。

(3) 各要素都有深刻的内涵,大部分有多个二级要素。

1.5 HSE 管理体系的结构特点

按 PDCA 模式建立的 HSE 管理体系是一个持续循环和不断改进的结构,即“规划—实施—验证—改进”的结构。HSE 管理体系由若干个要素组成,关键要素有:领导和承诺,方针和战略目标,组织机构、资源和文件,风险评估和管理,规划,实施和监测,评审和审核等。以上各要素不是孤立的,在这些要素中,领导和承诺是核心;方针和战略目标是方向;组织机构、资源和文件作为支持;规划、实施、检查、改进是循环链过程。在实践过程中,管理体系的要素和机构可以根据实际情况作适当调整。

第 2 章

实验数据的误差分析与数据处理

数据的测定是科学研究和生产实践的基础。实践表明,每项实验都有误差,同一项目的多次重复测量结果总有差异;即实验值与真实值之间的差异。这是由实验环境不理想、实验人员技术水平参差不齐、实验设备与实验方法不完善等因素引起的。随着研究人员对研究课题认识的提高和所使用的仪器设备的不断完善,实验中的误差可以不断减少,但是不可能做到完全消除。一方面,必须对所测对象进行分析研究,事先估计测试结果的可靠程度,并对取得的数据给予合理的解释;另一方面,还必须将所测得数据加以归纳整理,用一定的方式表示出各数据之间的相互关系。前者即误差分析,后者为数据处理。

对实验结果进行误差分析与数据处理的目的在于:

- (1) 根据科学实验的目的,合理选择实验装置、仪器、条件和方法;
- (2) 正确处理实验数据,以便在一定条件下得到接近真实值的最佳结果;
- (3) 合理选定实验结果的误差,避免由于误差选取不当造成人力、物力的浪费;
- (4) 总结测定的结果,得到正确的实验结论,并通过必要的归纳整理(如绘成实验曲线或得到经验公式),为验证理论分析提供条件。

2.1 测量值的误差

2.1.1 真值与平均值

1) 真值。真值是指某物理量客观存在的确定值,它通常是未知的。由于测量仪器、测量方法、环境、人的观察力及测量程序等都不可能完美无缺,因而实验误差难以避免,故真值是无法测得的。当测量次数无限多时,根据正负误差出现概率相等的误差分布定律,取测量值的平均值,在无系统误差情况下,可以获得极为接近于真值的数值。故真值等于测量次数无限多时算出的平均值。但实际测定的次数都是有限的,由有限次数求出的平均值,只能近似地接近于真值,可称此平均值为最佳值,计算时可将此最佳值作真值用。在实际应用上常将精确度高一级的测量仪器所测得的测量值视为真值。

2) 平均值。常用的平均值有以下几种。

(1) 算术平均值。这种平均值最常用。设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 代表各次的测量值, n 代表测量次数,则算术平均值为

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

(2) 均方根平均值。其定义为

$$\bar{x}_{\text{均}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (2-2)$$

(3) 几何平均值。其定义为

$$\bar{x}_{\text{几}} = \sqrt[n]{x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n} \quad (2-3)$$

以对数表示为

$$\lg \bar{x}_{\text{几}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg x_i}{n} \quad (2-4)$$

对一组测量值取对数,所得图形的分布曲线呈对称形时,常用几何平均值。可见几何平均值的对数等于这些测量值 x_i 的对数的算术平均值。几何平均值常小于算术平均值。

(4) 对数平均值。在化学反应、热量与质量传递中,分布曲线多具有对数特性,此时可采用对数平均值表示量的平均值。

设有两个量 x_1 和 x_2 ,其对数平均值为

$$\bar{x}_{\text{对}} = \frac{x_1 - x_2}{\ln x_1 - \ln x_2} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (2-5)$$

以上介绍了各类平均值,目的是要从一组测量值中找出最接近真值的量值。从以上介绍可知,平均值的选择主要取决于一组测量值的分布类型。在实验和科学研究中,数据的分布多属于正态分布,故多采用算术平均值。

2.1.2 误差的分类

误差是指测量值(也包括间接测量值)与真值之差。偏差是指测量值与平均值之差。在测量次数足够多时,测量误差与偏差很接近,习惯上常将两者混用。

根据误差的性质及产生的原因,可将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三种。

(1) 系统误差。它是由某些固定不变的因素引起的。在相同条件下进行多次测量,其误差的数值大小正负保持恒定,或误差随条件改变按一定规律变化。即有的系统误差随时间呈线性、非线性或周期性变化,有的不随测量时间变化。

系统误差的起因有:①测量仪器方面的因素:仪器设计上的缺陷,零件制造不标准,安装不正确,未经校准等。如用未校准而实重偏大的砝码称重,所得称重值总是偏小。再如,使用电子仪器时零点未经校正而造成固定偏向的误差。②环境因素:外界温度、湿度及压力变化引起的误差。③测量方法因素:近似的测量方法或近似的计算公式等引起的误差。④测量人员的习惯偏向或动态测量时滞后现象等。

总之,系统误差有固定偏向和确定的规律,一般可按具体原因采取措施给予校正或用修正公式消除。

(2) 随机误差。它是由某些不易控制的因素造成的。在相同条件下进行多次测量,其误差数值和符号是不确定的,即:时大时小,时正时负,无固定大小和偏向。随机误差服从统计规律,其误差与测量次数有关。随着测量次数增加,出现的正负误差可相互抵消。因此,多次测量值的算术平均值接近于真值。研究随机误差可采用概率统计方法。

(3) 粗大误差。它是与实际明显不符的误差,误差值可能很大,无一定规律。它主要由于实验人员粗心大意、操作不当而造成。此类误差只要操作人员认真细致地工作和加强校对即可避免,有时可采用某些准则来消除。

从以上讨论可知,系统误差和粗大误差是可以设法消除的。由于理论上及仪器、方法上所造成的系统误差往往超过随机误差许多倍,所以首先应该消除系统误差。随机误差是由于暂时未能掌握的某些因素造成的。如外界环境发生微小变化,装置中零件配合不稳定,操作人员读数不稳定等。随机误差是误差理论中的主要研究对象。

2.1.3 误差的表示方法

误差的表示方法有下列几种。

(1) 绝对误差与相对误差。测量值与真值之差的绝对值称为测量值的误差。为了区别后面将要介绍的各种误差,称此误差为绝对误差。

设测量值用 x 表示,真值用 X 表示,则绝对误差 D 为

$$D = |X - x| \quad (2-6)$$

即

$$X - x = \pm D$$

$$x - D \leq X \leq x + D \quad (2-7)$$

真值是未知的,计算时常用多次测量的平均值代替。如果某物理量的最大测量值 x_1 与最小

测量值 x_2 已知, 则可通过下式求出最大绝对误差 $D_{\max}$ 。

$$\begin{aligned} x_1 &= \bar{x} + D_{\max} > X > \bar{x} - D_{\max} = x_2 \\ \bar{x} &= \frac{x_1 + x_2}{2} \\ D_{\max} &= \frac{x_1 - x_2}{2} \end{aligned} \quad (2-8)$$

也就是说, 算术平均值 $\bar{x}$ 是最大绝对误差为 $D_{\max}$ 时之真值 X 的近似值。

【例 2-1】 已知炉中的温度不高于 1150°C , 不低于 1140°C , 试求其最大绝对误差 $D_{\max}$ 与平均值。

【解】 由式(2-8)可得平均温度 $\bar{T} = \frac{1150 + 1140}{2} = 1145(^{\circ}\text{C})$ 。最大绝对误差 $D_{\max} = \frac{1150 - 1140}{2} = 5(^{\circ}\text{C})$, 可写成炉温 $T = 1145^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

某些情况下, 绝对误差不能用来比较测量值之间误差的大小。譬如, 测量电解槽中通过的电流值与测量半导体三极管基极的电流值时, 误差均表示为毫安数量级。显然, 对前者这是非常精确的, 对后者则误差极大。因此, 为了弥补绝对误差概念的不足, 而引出相对误差概念。

绝对误差 D 与真值的绝对值之比, 称为相对误差, 它的表达式为

$$E_r = \frac{D}{|X|} \quad (2-9)$$

式中真值 X 一般为未知, 用平均值代之。

如例 2-1, 相对误差 $E_r = \frac{5}{1145} = 0.00437 \approx 0.44\%$ 。

相对误差常用百分数或千分数表示, 以适应不同精度的要求。

(2) 算术平均误差 δ 。算术平均误差的定义为

$$\delta = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n} = \frac{\sum d_i}{n} \quad (2-10)$$

式中 n ——测量次数;

x_i ——测量值, $i=1, 2, 3, \dots, n$;

d_i ——测量值与算术平均值($\bar{x}$)之差的绝对值, $d_i = |x_i - \bar{x}|$ 。

式(2-10)应取绝对值, 否则在一组测量值中, $(x_i - \bar{x})$ 值的代数和必为零。

算术平均误差的缺点是无法表示出各次测量之间彼此符合的情况。因此偏差彼此相近的一组测量值的算术平均误差, 可能与偏差有大、中、小三种情况的另一组测量值相同。

(3) 标准误差 σ 。标准误差亦称均方根误差。当测定次数为无穷多时, 其定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}}, D_i = |x_i - X| \quad (2-11)$$

对有限测量次数, 标准误差可用下式表示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}} \quad (2-12)$$

标准误差是目前常用的一种表示精度的方法。它不仅与一组测量值的每个数据有关,而且对一组测量值中的较大误差或较小误差很敏感,能较好地表明数据的离散程度。实验越精确,其标准误差越小,它是评定化工测量精确度的标准,故被广泛采用。

2.1.4 精密度、正确度和精确度

测量的质量和水平,可以用误差概念来描述,也可以用精确度等概念来描述。为了指明误差的来源和性质,通常用以下三个概念来描述。

(1) 精密度。精密度可以衡量某物理量几次测量值之间的一致性,即重复性。它可以反映随机误差的影响程度,精密度高则随机误差小。如果实验的相对误差为 0.01% 且误差纯由随机误差引起,则可认为精密度的精度为 10^{-4} 。

(2) 正确度。正确度是指在规定条件下,测量中所有系统误差的综合。正确度高表示系统误差小。若实验的相对误差为 0.01% 且误差纯由系统误差引起,则可认为正确度的精度为 10^{-4} 。

(3) 精确度。精确度表示测量中所有系统误差和随机误差的综合,因此,精确度表示测量结果与真值的逼近程度。若测量的相对误差为 0.01%, 且误差由系统误差和随机误差共同引起,则可认为精确度的精度为 10^{-4} 。

对于实验或测量来说,精密度高,正确度不一定高;正确度高,精密度也不一定高。但精确度高必须是精密度与正确度都高。如图 2-1 所示, A 的系统误差小而随机误差大,即正确度高而精密度低; B 的系统误差大而随机误差小,即正确度低而精密度高; C 的系统误差与随机误差都小,表示正确度和精密度都高,即精确度高。

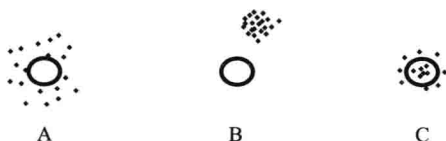


图 2-1 精密度、正确度、精确度含义的示意图

2.1.5 权与不等精度测量的平均值

一般测量基本上都属于等精度测量。在科学研究或高精度测量中,有时在不同测量条件下进行测量,如用不同的仪器、不同的测量方法、不同的测量次数及由不同测量者进行测量(称为不等精度测量),各测量值可靠程度不同,为了得到更精确的测量结果,应让可靠性大的测量值在最后结果中占的比例大一些,可用权的数值来区别这些测量值可靠程度的大小。这时,平均值应采用加权平均值 $\bar{x}_w$ 。其定义为

$$\bar{x}_w = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \cdots + w_n x_n}{w_1 + w_2 + \cdots + w_n} = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i} \quad (2-13)$$

式中, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为各测量值; $w_1, w_2, \dots, w_n$ 为各测量值对应的权数。

当测量环境、仪器、方法和测量者水平相同时, 重复次数越多, 其可靠程度越大, 这时确定权的最简单方法, 是令权数 $w_1, w_2, \dots$ 分别等于对应的测量次数。此时 $x_1, x_2, \dots$ 分别代表各组的平均值。即:

w_1 次测量的平均值为 x_1 ;

w_2 次测量的平均值为 x_2 ;

.....

w_n 次测量的平均值为 x_n 。

如果各组测量的算术平均误差 δ 或标准误差 σ 为已知, 则可按权数与误差平方成反比的原则求出权数。即:

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \sqrt{\frac{w_2}{w_1}} \quad (2-14)$$

【例 2-2】设在测量某一物体长度时, 得到以下结果: $\bar{x}_1 = 1.53\text{mm} \pm 0.06\text{mm}$, $\bar{x}_2 = 1.47\text{mm} \pm 0.02\text{mm}$ 。试求其加权平均值。

【解】

$$\begin{aligned} \frac{w_1}{w_2} &= \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} = \frac{0.02^2}{0.06^2} = \frac{1}{9} \\ \bar{x}_{\text{加}} &= \frac{1.53 \times 1 + 1.47 \times 9}{1 + 9} = 1.48 \end{aligned}$$

2.1.6 仪表的精确度与测量值的误差

1. 电工仪表等一些仪表的精确度与测量误差

这些仪表的精确度常采用仪表的最大引用误差和精确度等级来表示。仪表的最大引用误差的定义为

$$\text{最大引用误差} = \frac{\text{仪表显示值的绝对误差}}{\text{该仪表相应挡次量程的绝对值}} \times 100\% \quad (2-15)$$

式中, 仪表显示值的绝对误差指在规定的正常情况下, 被测参数的测量值与被测参数的标准值之差的最大绝对值。对于多挡仪表, 不同挡次显示值的绝对误差和量程范围均不相同。

式(2-15)表明, 若仪表显示值的绝对误差相同, 则量程范围越大, 最大引用误差越小。

我国电工仪表的精确度等级有七种: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0。如某仪表为 2.5 级, 则说明此仪表的最大引用误差为 2.5%。

在使用仪表时, 如何估算一次测量值的绝对误差和相对误差?

设仪表的精确度等级为 p 级, 其最大引用误差为 $p\%$ 。设仪表的测量范围为 x_n , 仪表的示值为 x_i , 则由式(2-15)得该示值的误差为

$$\left. \begin{aligned} \text{绝对误差 } D &\leq x_n \times p\% \\ \text{相对误差 } E_r &= \frac{D}{x} \leq \frac{x_n}{x_i} \times p\% \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

式(2-16)表明:

(1) 若仪表的精确度等级 p 和测量范围 x_n 已固定, 则测量的示值 x_i 越大, 测量的相对误差越小。

(2) 选用仪表时, 不能盲目地追求仪表的精确度等级。因为测量的相对误差还与 $\frac{x_n}{x_i}$ 有关, 应该兼顾仪表的精确度等级和 $\frac{x_n}{x_i}$ 两者。

【例 2-3】今欲测量大约 90V 的电压, 实验室里有 0.5 级 0~300V 和 1.0 级 0~100V 的电压表, 选用哪一种电压表测量较好?

【解】用 0.5 级 0~300V 的电压表测量 90V 时的最大相对误差为

$$E_{r,0.5} = \frac{x_n}{x_i} \times p\% = \frac{300}{90} \times 0.5\% \approx 1.7\%$$

而用 1.0 级 0~100V 的电压表测量 90V 时的最大相对误差为

$$E_{r,1.0} = \frac{x_n}{x_i} \times p\% = \frac{100}{90} \times 1.0\% \approx 1.1\%$$

此例说明, 如果选择恰当, 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。

2. 天平类仪器的精确度与测量误差

这些仪器的精确度用以下公式来表示:

$$\text{仪器的精确度} = \frac{\text{名义分度值}}{\text{量程的范围}} \quad (2-17)$$

式中, 名义分度值指测量时读数有把握正确的最小单位, 即每一个最小分度所代表的数值。例如 TG—328A 型天平, 其名义分度值(感量)为 0.1mg, 测量范围为 0~200g, 则有

$$\text{天平精确度} = \frac{0.1}{(200-0) \times 10^3} = 5 \times 10^{-7}$$

若仪器的精确度已知, 也可用式(2-17)求得其名义分度值。

使用这些仪器时, 测量值的误差可用下式来确定:

$$\left. \begin{array}{l} \text{绝对误差} \leq \text{名义分度值} \\ \text{相对误差} \leq \frac{\text{名义分度值}}{\text{测量值}} \end{array} \right\} \quad (2-18)$$

3. 测量值的实际误差

由仪表的精确度用上述方法所确定的测量误差, 一般总是比测量值的实际误差小得多。这是因为仪器没有调整到理想状态, 如不垂直、不水平、零位没有调整好等, 会引起误差; 仪表的实际工作条件不符合规定的正常工作条件, 会引起附加误差; 仪器经过长期使用后, 零件发生磨损, 装配状况发生变化等, 也会引起误差; 还可能存在着测量者个人的习惯和偏向引起的误差; 仪表所感受的信号实际上可能并不等于待测的信号; 仪表电路可能会受到干扰。

总之, 测量值实际误差大小的影响因素是很多的。为了获得较准确的测量结果, 需要有较好的仪器, 也需要有科学的作风和方法, 以及扎实的理论知识和实践经验。