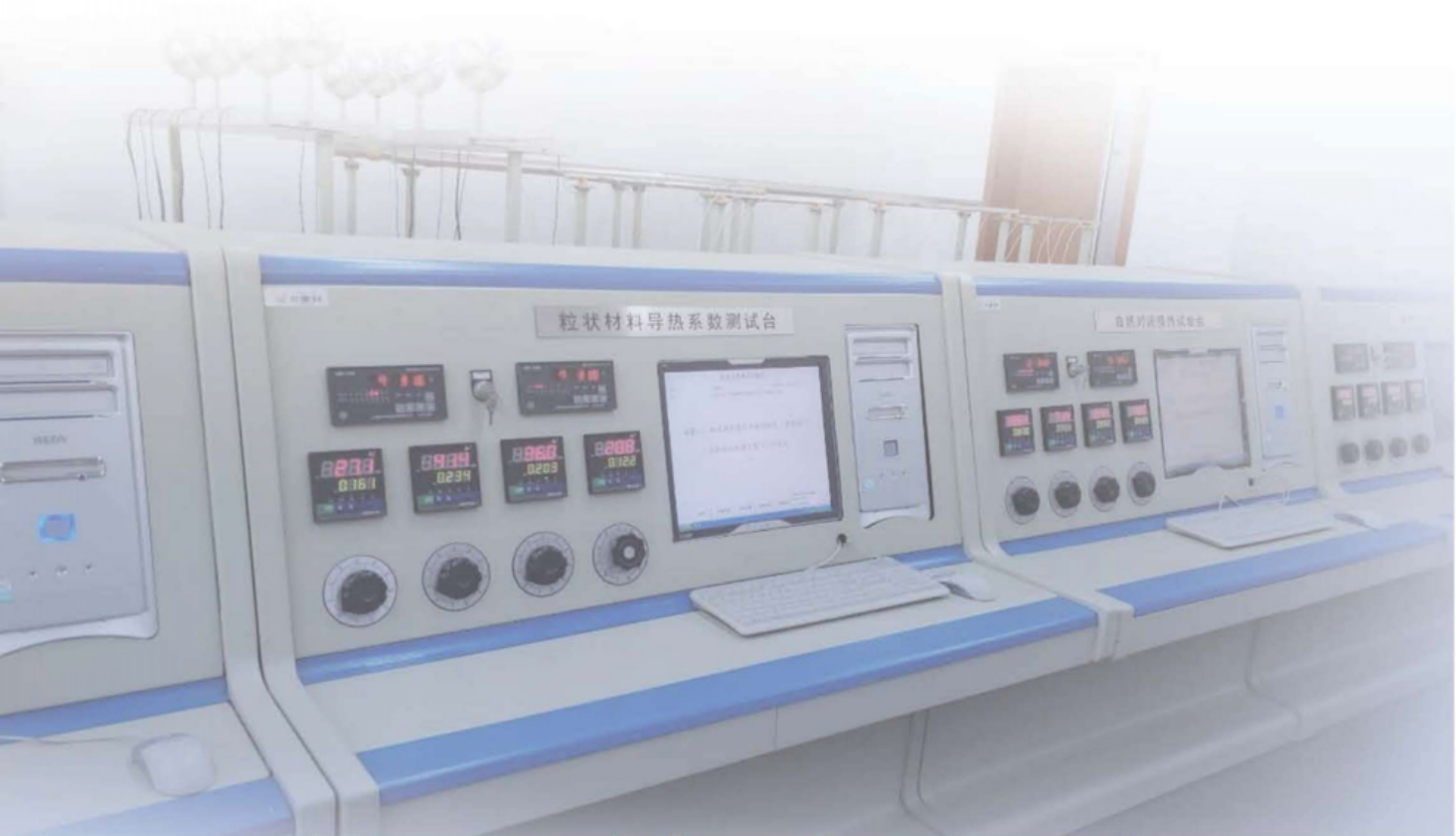




同济大学本科教材出版基金资助



热工基础实验

臧建彬 王晓东 主编



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

热工基础实验

臧建彬 王晓东 主编

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

热工基础实验 / 臧建彬, 王晓东主编. --上海:
同济大学出版社, 2017. 6

ISBN 978 - 7 - 5608 - 7039 - 7

I. ①热… II. ①臧… ②王… III. ①热工学—实验—高等学校—教材 IV. ①TK122 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 103247 号

热工基础实验

臧建彬 王晓东 主编

出品人 华春荣 责任编辑 胡毅 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店、网络书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 6.5

字 数 162 000

版 次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 7039 - 7

定 价 30.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

SYNOPSIS OF CONTENTS

>>>>>>>>>>>>>

本书适合能源应用工程及相关专业本科生学习使用。

本书适合能源应用工程及相关专业本科生学习使用。

FOREWORD

>>>>>>>>>>>>>>>>

“热工基础实验”是学习“热工基础”课程的必需实践环节,其目的是加深学生对理论课程所涉及的基本原理的理解,学习基本物理参数的测量,提高数值计算的实践能力。本课程要求学生提前阅读实验指导书,在实验教师指导下自己动手,亲自实践,边做边想,认真记录,并写出实验报告。

在撰著本书时,由于时间仓促,水平所限,难免有疏漏之处,期望实验指导老师与学生能提出宝贵的意见,以便在修订再版时进一步完善。

于同济大学

>>>>>>>>>>>>>

二、图解法	32
三、逐差法	34
四、最小二乘法	34
第二章 热工仪表及测试技术实验	38
第一节 热电偶的制作与标定	38
一、实验目的	38
二、实验原理和热电偶的焊接	39
三、热电偶的校验	41
四、实验仪器和设备	42
五、实验步骤	42
六、实验数据记录	43
七、思考题	43
第二节 弹簧管压力表的标定	43
一、实验目的	43
二、实验原理	43
三、实验装置	44
四、实验步骤	44
五、实验数据记录与处理	46
六、思考题	46
第三节 毕托管、热球风速仪风速测试	46
一、实验目的	46
二、实验原理	46
三、实验装置与仪器	49
四、实验步骤	49
五、数据记录和处理	49
第四节 管内水流量测试及流量计标定实验	50
一、实验目的	50
二、实验原理	50
三、实验装置和仪器	54
四、实验步骤	54
五、实验数据记录和处理	54
第三章 工程热力学实验	55
第一节 二氧化碳 $p-v-T$ 的测定	55

一、实验目的	55
二、实验原理	56
三、实验装置	57
四、实验步骤和注意事项	57
五、实验数据记录与整理	58
六、实验报告	59
七、思考题	59
第二节 喷管流动实验	60
一、实验目的	60
二、实验原理	60
三、实验装置	61
四、实验原理	62
五、实验步骤和注意事项	63
六、实验报告内容	64
七、思考题	65
第三节 气体定压比热容测定	65
一、实验目的	66
二、实验原理	66
三、实验装置	67
四、实验步骤	67
五、实验数据处理	68
六、注意事项	69
七、思考题	69
第四节 空气绝热指数测定	70
一、实验目的	70
二、实验原理	70
三、实验装置和测量仪器	71
四、实验步骤	72
五、实验数据的整理	72
六、思考题	73
第四章 传热学实验	74
第一节 圆球法测定材料导热系数	74
一、实验目的	74
二、实验原理	74

三、实验装置	76
四、实验步骤	77
五、实验数据的记录与处理	77
六、实验思考题	78
第二节 外掠平板换热系数的测定	78
一、实验目的	78
二、实验原理	78
三、实验装置	80
四、实验步骤	81
五、实验数据的记录和处理	81
六、实验思考题	83
第三节 横管的自然对流换热	83
一、实验目的	83
二、实验原理	83
三、实验装置	84
四、实验步骤	85
五、实验数据的记录与处理	85
六、实验思考题	87
第四节 黑体辐射实验	88
一、实验目的	88
二、实验原理	88
三、实验设备	89
四、实验方法和步骤	90
五、实验数据的记录与处理	91
第五节 热流计法测壁面导热系数	91
一、实验目的	91
二、实验原理	92
三、实验装置及测量仪器	92
四、实验方法和步骤	93
五、实验记录及结果处理	93

赋予国际千克原器、国家千克副原器乃至工厂用的 F1 级 1 kg 砝码的质量值都是分别用于不同用途的 1 kg 的约定真值。与约定真值具有相同意义的称谓还有指定值、最佳估计值、约定值和参考值。

总之,误差是针对真值而言的,真值一般都是指约定真值。

二、误差的分类

误差可以按照不同的方式进行分类。按照其表示形式,误差可以分为绝对误差和相对误差。按照其性质特点,误差又可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1. 按表示形式分类

1) 绝对误差

绝对误差定义为测得值与被测量的真值(常用约定真值代替)的差值。

绝对误差的特点:

(1) 绝对误差是一个具有确定的大小、符号及单位的量值。单位给出了被测量的量纲,其单位与测得值相同。

(2) 绝对误差不能完全说明测量的准确度,因此绝对误差不便于比较不同量值、不同单位、不同物理量等的准确度。

与误差绝对值相等、符号相反的值称为修正值,一般用 c 表示。在测量仪器中,修正值常以表格、曲线或公式的形式给出。在自动测量仪器中,还可将修正值编成程序存储在仪器中,仪器输出的是经过修正的测量结果。该已修正结果是将测量值加上修正值后的测量结果,这样可提高测量准确度。

2) 相对误差

相对误差定义为绝对误差与被测量真值(常用约定真值代替)的比值。为估计相对误差方便起见,当约定真值也难以得到时,也可以近似用测量值来代替。

相对误差的特点:

(1) 相对误差具有大小和符号,其量纲为 1,一般用百分数来表示。

(2) 相对误差常用来衡量测量的相对准确程度。

引用误差定义为测量器具的最大绝对误差与该标称范围上限(或量程)之比。可见,引用误差是一种相对误差,而且该相对误差是引用了特定值,即标称范围上限(或量程)得到的,故该误差又称为引用相对误差或满度误差。

2. 按性质分类

1) 系统误差

在相同测量条件下,对同一被测量进行多次测量,误差的绝对值和符号保持不变,或按一定规律变化,这类误差称为系统误差。前者称恒值误差,后者称变值误差。例如,测量仪表指针零点偏移将产生恒值系统误差;利用标准孔板测量蒸汽流量,由于实

际测量时的蒸汽压力和温度与计算孔板孔径时所采用的数值存在差异,而引起变值测量误差。

系统误差就个体而言是具有规律的,其产生的原因往往是可知的。例如,由于仪表使用不当或测量时外界条件变化等因素。因此可以通过试验的方法加以消除,也可以通过引入修正值的方法加以修正。

2) 随机误差

在相同测量条件下,对同一被测量进行多次测量,由于受到大量的、微小的随机因素的影响,测量误差的绝对值的大小和符号没有一定的规律,且无法简单估计,这类误差为随机误差。例如,仪表内部存在有摩擦和间隙等不规则变化,测量过程中外界环境(如气压、温度、湿度、电磁干扰等)的瞬间变化,测量过程中不稳定的读数等引起的误差。这类误差一般用统计理论来进行估计。

3) 粗大误差

明显地歪曲了测量结果的误差称为粗大误差,大多是由于测量者粗心大意造成的,例如读数错误、记录或运算错误、测量过程中的失误等。粗大误差其数值往往大大地超过同样测量条件下的系统误差和随机误差,它对测量结果的歪曲是严重的,以至于使测量完全不可信赖。因此,粗大误差一经发现,必须从测量数据中剔除。

三、误差的来源

误差的来源是多方面的,在测量过程中,几乎所有因素都将引入测量误差。在分析和计算测量误差时,不可能、也没有必要将所有因素及其引入的误差逐一计算。因此,要着重分析引起测量误差的主要因素。

1. 测量设备误差

测量设备误差主要包括标准器件误差、装置误差和附件误差等。

标准器件误差是指以固定形式复现标准量值的器具,如标准电阻、标准量块、标准砝码等,它们本身体现的量值,不可避免地存在误差。任何测量均需要提供比较用的基准器件,这些误差将直接反映到测量结果中,造成测量误差。减小该误差的方法是在选用基准器件时,应尽量使其误差值相对小些,一般要求基准器件的误差占总误差的 $1/3 \sim 1/10$ 。

测量装置是指在测量过程中,实现被测的未知量与已知的单位量进行比较的仪器仪表或器具设备。装置误差是指测量装置在制造过程由于设计、制造、装配、检定等的不完善,以及在使用过程中,由于元器件的老化、机械部件磨损和疲劳等因素而使设备所产生的误差。减小装置误差的主要措施是要根据具体的测量任务,正确选取测量方法,合理选择测量设备,尽量满足设备的使用条件和要求。

附件误差是指测量仪器所带附件和附属工具所带来的误差。如测长仪的标准环

规、千分尺的调整量杆等也会引入误差,减小该误差的办法是在购买设备时,要注意检查设备和附件的出厂合格证和检定证书。

2. 测量方法误差

测量方法误差又称为理论误差,是指因使用的测量方法不完善,或采用近似的计算公式等原因所引起的误差。

如用均值电压表测量交流电压时,其读数是按照正弦波的有效值进行刻度,由于计算公式 $\alpha = K_F \bar{U} = \frac{\pi \bar{U}}{2\sqrt{2}}$ 中出现无理数 π 和 $\sqrt{2}$, 故取近似公式 $\alpha \approx 1.11 \bar{U}$, 由此产生的误差即为理论误差。

3. 测量环境误差

测量环境误差是指各种环境因素与要求条件不一致而造成的误差。如对于电子测量,环境误差主要来源于环境温度、电源电压和电磁干扰等;激光光波比长测量中,空气的温度、湿度、尘埃、大气压力等会影响到空气折射率,因而影响激光波长,产生测量误差;高精度的准直测量中,气流、振动也有一定的影响等。

减小测量环境误差的主要方法是改善测量条件,对各种环境因素加以控制,使测量条件尽量符合仪器要求。

4. 测量人员误差

测量人员即使在同一条件下使用同一台装置进行多次测量,也会得出不同的测量结果。这是由于测量人员的工作责任心、技术熟练程度、生理感官与心理因素、测量习惯等的不同而引起的,称为人员误差。

为了减小测量人员误差,就要求测量人员要认真了解测量仪器的特性和测量原理,熟练掌握测量规程,精心进行测量操作,并正确处理测量结果。

5. 测量对象变化误差

被测对象在整个测量过程中处在不断的变化中。由于测量对象自身的变化而引起的测量误差称为测量对象变化误差。例如,被测光度灯的光度、被测温度计的温度、被测线纹尺的长度等,在测量过程中均处于不停的变化中,由于它们的变化,使测量不准而带来误差。在测量过程中,应尽量避免时间间隔的存在,才不会引起测量误差。

总之,误差的来源是多方面的,在进行测量时,要仔细进行全面分析,既不能遗漏,也不能重复。对误差来源的分析研究既是测量准确度分析的依据,也是减小测量误差,提高测量准确度的必经之路。

第二节 测试准确度的质量概述

质量是当今人们十分关注的问题。人们在从事测量活动中,测量质量也是人们追

求的目标。这些体现在国际标准化组织所制定的 ISO9000 族标准、ISO10012 标准及 ISO/IEC17025 标准中。

ISO9000: 2000 标准(《质量管理体系——基础和术语》)对“质量”的定义是: 一组固有特性满足要求的程度。对测量来说, 测量的目的是确定被测量的量值, 因为其测量结果是否准确, 是衡量该测量质量好坏的关键, 即关心该测量结果与被测量真值的接近程度。测量是一个完整的过程, 在该测量过程中, 所用到的各种测量资源都会在不同程度上影响测量结果。这些测量资源包括所用到的测量设备、测量方法、测量环境、测量人员、实验室的管理等组成的实验室测试和校准能力等, 严格讲对被测量定义的不完善程度也是一种影响测量结果和测量质量的因素。

ISO10012: 2003(《测量管理体系——测量过程和测量设备的要求》), 就是对测量质量保证工作的具体化, 要求企业切实建立起“测量管理体系”, 以提高测量准确度。“测量管理体系”包括两个方面: 一方面要求所有的测量设备都应该计量确认; 另一方面要求对重要的测量过程加以监控。

ISO/IEC17025: 2005(《校准和检测实验室能力的通用要求》)是国际上通用的实验室认可准则, 该标准把影响实验室检测和校准准确性的因素归纳为七个——人员、设施和环境条件、检测和校准方法及方法的确认、设备、测量的溯源性、抽样、检测和校准物品的处置, 并分别做了具体的技术要求, 如规定了检测实验室应具有并应用评定测量不确定度的程序。

以上说明, 研究与掌握好误差理论及数据处理方法与测量、质量和标准化等紧密相关。与测量质量有关的常用名词术语主要有:

测量准确度表示测量结果与被测量真值之间的一致程度。在我国工程领域中俗称精度。测量准确度是一个反映测量质量好坏的重要标志之一。就误差分析而言, 准确度是测量结果中系统误差和随机误差的综合, 误差大, 则准确度低; 误差小, 则准确度高。当只考虑系统误差的大小时, 称为正确度; 只考虑随机误差的大小时, 称为精密度。

准确度、正确度和精密度三者之间既有区别, 又有联系, 对于一个具体的测量, 正确度高的未必精密, 精密度高的也未必正确, 但准确度高的, 则正确度和精密度都高, 故一切测量要力求准确, 也宜分清准确度中正确度与精密度何者为主, 以便采取不同的提高准确度的措施。准确度在数值上一般多用相对误差来表示, 但不用百分数。

重复性是指在相同条件下(即相同的测量程序、相同的操作人员、相同的测量仪器、相同的使用条件以及相同的地点, 这些条件也称为重复性条件), 在短时间内对同一个量进行多次测量所得测量结果之间的一致程度, 一般用测量结果的分散性来定量表示。

复现性是指在变化条件下(即不同的测量程序、不同的操作人员、不同的测量仪器、不同的使用条件以及不同的时间、地点等), 对同一个量进行多次测量所得测量结果之间的一致程度, 一般用测量结果的分散性来定量表示, 复现性也称为再现性。

确定性是指测量仪器保持其计量特性随时间恒定的能力。它可以用几种方式来定量表示,如用计量特性变化某个规定的量所经过的时间;或用计量特性经规定的时间所发生的变化等。

示值误差是指测量仪器的示值与对应输入量的真值之差。由于真值不能确定,故在实际应用中常采用约定真值。

偏移是指测量仪器示值的系统误差。通常用适当次数重复测量的示值误差的平均值来估计。

最大允许误差是指对于给定的测量仪器,规范、规程等所允许的误差极限值,有时也称为允许误差限。

不确定度是与测量结果相关联的、用于合理表征被测量值分散性大小的参数。它是定量评定测量结果的一个重要质量指标。

第三节 随机误差的性质与处理

一、随机误差的特点

在测量实践中我们会发现,对某量用同一台测量仪器、相同的测量程序、同一测量人员,在相同的环境条件下进行多次重复测量时,测得值各不相同,其误差的符号和绝对值以不可预知的方式变化着,究其原因这正是随机误差的第一个特征,随机误差具有随机性。

由于产生测量误差的因素微小,不能够掌握和控制,且随时间、环境条件、状态等因素随时变化。因此影响随机误差的因素只有在测量过程之中充分体现,这是随机误差具有的第二个特征,随机误差产生在测量过程中。

随机误差从表面上看,不可预知和没有规律。其实不然,人们通过实践观察到并且证明了,在相同的条件下,对某量进行大量的多次重复测量,其随机误差呈现出某种确定性规律,即随机误差服从统计规律。因此,随机误差可依据概率论与数理统计理论进行处理,即用特征量标准偏差 σ 来表示。测量次数 n 越大,标准偏差 σ 就越小,亦即随机误差就越小。由此推出随机误差具有的第三个特性,随机误差与测量次数有关,增加测量次数可减小随机误差对测量结果的影响。

综上所述,随机误差的特性可归纳为三个方面:具有随机性、产生在测量过程中、与测量次数有关,重复性条件下增加测量次数可减小随机误差对测量结果的影响。

二、随机误差的评价指标

随机误差性质上属随机变量,其处理方法的理论依据是概率论与数理统计。具体

参量可用随机变量的数学期望(算术平均值)、方差(标准偏差)和协方差等特征量来描述。

1. 数学期望

按数学期望的定义,随机误差 δ 的数学期望为

$$E(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta f(\delta) d\delta \quad (1-1)$$

式中, $f(\delta)$ 为 δ 的分布密度函数。

数学期望 $E(\delta)$ 是误差 δ 的分布中心,它反映了 δ 的平均特征,或者说数学期望 $E(\delta)$ 是 δ 所有可能取值的平均值。

2. 方差和标准差

按定义,随机误差 δ 的方差为

$$D(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} [\delta - E(\delta)]^2 f(\delta) d\delta \quad (1-2)$$

通常,随机误差的数学期望 $E(\delta) = 0$, 因为有

$$D(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta^2 f(\delta) d\delta \quad (1-3)$$

随机误差的方差是反映随机误差取值的分散程度的,是误差随机波动性的表征参数。

对于具有某一确定分布的随机误差 δ ,其方差为一确定的常数。由于一般随机误差的数学期望为零,因为在通常的数据处理中只给出方差就足够了,它成为评定数据精度的基本参数。

实用上更常使用标准差。按照定义,标准差应为方差的正平方根,即

$$\sigma = \sqrt{D(\delta)} \quad (1-4)$$

应注意,标准差没有负值。显然,标准差与方差具有相同的作用,其意义是十分明显的。方差或标准差可作为测量精度的评定参数。

由于 σ 的量纲与被测量的量纲相同,因此标准差是更常使用的参数。

3. 协方差(相关矩)和相关系数

随机误差 δ_x 和 δ_y 的协方差定义为

$$D(\delta_x, \delta_y) = E[(\delta_x - E\delta_x)(\delta_y - E\delta_y)] \quad (1-5)$$

随机误差 δ_x 和 δ_y 的相关系数则为

$$\rho_{xy} = \frac{D(\delta_x, \delta_y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1-6)$$

协方差或相关系数反映误差之间的线性相关关系,这一相关关系影响到误差间的抵偿性。

三、置信概率和极限误差

作为数据精度的评定参数,实用中更广泛地使用置信概率和极限误差。

1. 置信概率

在某些重要的测量场合,希望能给出表征误差分布的一个区间性指标,使误差出现在该区间之外的可能性几乎为零。该区间表征了误差分布的界限,定义为置信区间。置信概率 p 为误差 δ 落入置信区间的概率,若 δ 超出该区间的概率为 α ,则有 $p = 1 - \alpha$ 。

已知测量总体的概率密度 $f(x)$,测量结果分布在以测量真值即无系统误差时的期望值 μ 为中心,置信概率 p 的一个区间 $[\mu - \Delta_1, \mu + \Delta_2]$,该区间称为置信区间,如图 1-1 所示。

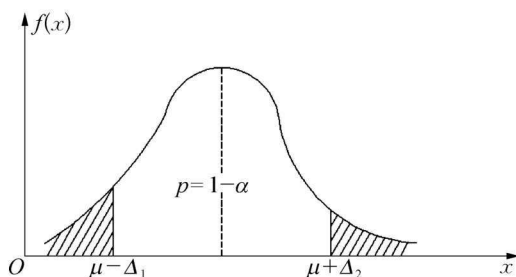


图 1-1 误差分布的置信区间、置信概率

该区间可表示为

$$P(\mu - \Delta_1 \leq x \leq \mu + \Delta_2) = \int_{\mu - \Delta_1}^{\mu + \Delta_2} f(x) dx = p \quad (1-7)$$

式中, Δ_1, Δ_2 分别为上半置信区间宽度和下半置信区间宽度。式中的置信概率 p 又可称为置信水平, $\alpha = 1 - p$ 称为显著水平。

2. 极限误差

极限误差是指极端误差,是误差不应超过的界限,此时对被测量的测量结果(单次测量或测量列的算术平均值)的误差,不超过极端误差的置信概率为 p ,并使差值 $1 - p = \alpha$ 可以忽略。此极端误差称为测量的极限误差,并以 Δ 表示。

极限误差 Δ 的值可依据测量标准差、误差分布及要求的置信概率确定:

$$\Delta = k s \quad (1-8)$$

式中, k 为置信因子,是误差分布、自由度和置信概率的函数,通常由表可查。