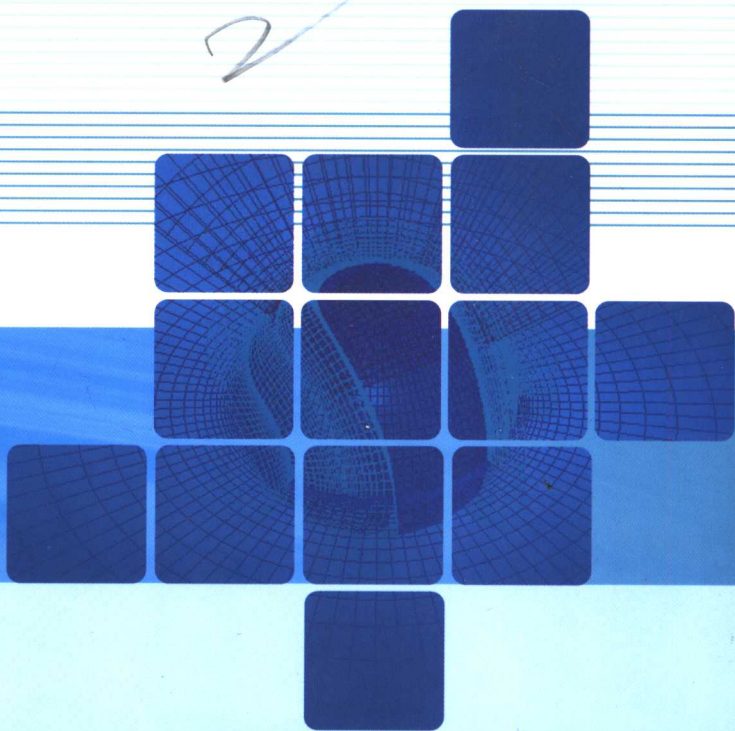


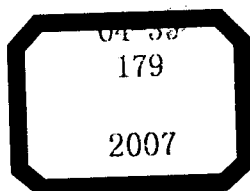
新概念物理实验 测量引论

——数据分析与不确定度评定基础

■ 朱鹤年 著



高等教育出版社
Higher Education Press



新概念物理实验测量引论

——数据分析与不确定度评定基础

朱鹤年 著



高等教育出版社

内容简介

实验测量数据分析和不确定度的内容很丰富,对同一组数据、按不同教材模式评定的扩展不确定度往往有显著的偏差。本书作者打破从正态分布讲起的传统思路,结合计量物理学的研究进展,调和了两类不确定度评定体系的矛盾,阐述了它们的共通物理内涵和使数学结果趋同的约定方法,创建了科学严谨的简明理论架构,阐述了方便实用的分析计算步骤,说明了深浅不同的教学要求层次。

书中论述或引述了多处与以往教材有所不同的新概念、新论点、新解法,还介绍了用积木式仪器构建研究性组合实验平台、实验物理学与数学结合、实验中融入科学方法论教学环节等典型例子,反映了作者对物理实验测量理论、对物理实验课程建设的创造性成果与哲学思考。

全书约8万字,分三部分:1)数据分析与不确定度评定基础知识;2)数据分析与不确定度评定24例;3)新概念问答30组。

本书精炼实用,突出基础但富含提高内容,可作为各类高校物理实验课程的补充教材或参考书,也可供其他社会读者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

新概念物理实验测量引论:数据分析与不确定度评定
基础 / 朱鹤年著. —北京:高等教育出版社,2007.3

ISBN 978 - 7 - 04 - 020939 - 6

I. 新… II. 朱… III. 物理学 - 实验数据 - 数据处理
IV. 04 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 012722 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787 × 960 1/16
印 张 7
字 数 120 000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.wideu.com>

版 次 2007年3月第1版
印 次 2007年3月第1次印刷
定 价 15.10元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20939 - 00

前言

本书力求简而精炼,薄而实用,强调基础但也富含提高内容,以便用作各校物理实验课程的补充教材或参考书。

前年读到一本名校的英文版实验教材,感到实验题目好,但引论部分停留在 20 年前的初版水平上,于是萌生了写一册薄书之念。近年为准备交流,查阅了大量资料,深感这些年各校在物理实验教学改革中普遍取得了不少成果,仪器设备改观大,现代化的浪潮高,校校在出新教材。但有的教材重剪辑而轻研究,重规模而轻实效,重显示而轻内涵,重更新而轻基础,有一些亟待改进之处,这些也促使我尽早写一册能融入计量物理学新概念、以基础性教学内容为主、一般院校都能参考的薄书。今年暑期,北京大学和中国科技大学的老师对我的鼓励也加速了成书的进程。

传统的实验教材对测量引论部分一般以统计分布为基础。鉴于:1)数据处理课程的内容尚未形成很严密的公理化体系;2)不确定度的现有文件较难用于一般测量;3)本课程学时少,学生数学基础不够;4)教材模式多样、表述各异、评定结果差别大。因此本书做了一些改革,主要特点是:1)内容比规范有所滞后;2)适当简化,一些要点直接给出定义或结论;3)论述有跳跃和适度模糊;4)方法有可操作性;5)使两大类不确定度评定模式的物理内涵和数学结果趋同,避免争论;6)适合不同层次读者的需求。小 5 号字体的部分主要供研究性教学用,或供教师、专业人员阅读。提高部分的某些复杂计算,可让学生套用教学网站的现成程序。实验绪论部分的内容宜在 1.5 小时以内,配以课后练习和自学。有关立论的导出及方法的来由,可安排 2 学时的选听课或适量的自学参考教材。

周光召院士说:“为什么 20 世纪最重要的物理学发现在德国土地上发生?首先德国人非常重视实验和实验数据的分析……第二是德国有很强的数学传统……第三个是德国有很强的哲学传统。”基础实验教学如何借鉴历史,本仁者见仁,宜百花齐放,但不能依赖先进设备。去年春四所高校的六位教授在南京大学举行的报告会上说,我国一些高校物理与生物、

化学基础教学实验设备已不亚于国外一流大学,欣慰之余,颇感任重,更待反思。

近年来,我们既重视教学基本要求,注意内容的基础性、物理性、实践性和相对稳定性,又力求体现高起点、多层次、综合性、研究性、开放式的特点。理科实验还力求做到三点:1)多用通用仪器,让学生多动手,用积木式仪器构建研究性组合实验平台;2)强调实验物理学与数学结合,加强数据处理与实验设计环节的教学;3)多途径、多环节突出实验物理学方法的学习,让学生受到科学方法论的熏陶,鼓励勤实践、善思考、勇探索。书中举例介绍了反映上述三点的实验内容,融入了作者对物理实验课程建设、对测量理论的研究成果与哲学思考。

书中论述或引述了二百多处与一般实验教学文献有所不同的新概念、论点或解法,包括作者对某些见解的含蓄批评。交流有益改革,争鸣促进教学,标新本为正源,求疵以冀补裘,觅瑕琢璞能使物理实验教学事业更加光辉。回顾二十三年来的教学经历,深感善意批评能使人冷静反思。十五年前,当有教学指导专家批评我们的教材论点时,是耿完桢教授、丁慎训教授给予了不同程度的理解支持,使我的教学研究更加深入。八年前,当有教育管理专家批评我们的课程建设思路时,是吴敏生教授、顾秉林教授和黄贺生教授给予了不同形式的信任和帮助,使我能潜心于教学学术及以物理系、基科班为重点的教学探索。这些善意批评和支持帮助,都是使我和同事们能在精品课建设路上迈出较大步伐的动力。因此作者也恳切地希望读者对本书提出批评,本书虽经过一些推敲,但新论点多时“出现粗差的概率”可能也大。

作者特别感谢北京大学物理学院段家骝教授和廖慧敏博士、复旦大学物理系马世红教授和陆申龙教授、上海理工大学光电学院许陇云教授、清华大学机械学院李岩教授和贾维溥教授,感谢她(他)们对本书初稿提出了审阅意见和修改建议。作者感谢访问学者岳峻峰副教授和邱菊副教授、常缨高级工程师对本书写作的具体帮助,这三位同志对初稿作了仔细检查和验算。万新军、谈宜东等五位博士生助教和基科5陈天琪等七位同学参与了初稿讨论,实验教学中心的同事们也给予了关心和支持,吴念乐教授对本书出版给予了具体帮助,朱邦芬教授对部分内容作了修改,在此谨致谢意。

已届耳顺之年,未敢言“知天命”,更未忘老师们的教育与培养。两年前提理科基地检查组的专家问我们何以能全身心投入教学时,不假思索的答复是师辈如是、以师为范。在长辈老师中,有时关心自己和关注物理教学的张

II

培林教授、夏学江教授。我们这些尚在教学岗位者回报师辈培养的最实际行动就是让精心教书育人的好传统得以继承。

朱鹤年

2006年11月27日 于清华园

目 录

第 1 部分 数据分析与不确定度评定基础知识	1
§ 1 物理量与测量	3
§ 2 误差的定义、分类及简要处理方法	4
§ 3 直接测量结果的不确定度评定 (evaluating uncertainty)	8
§ 4 方和根合成时标准差或不确定度的微小分量判据 (Criterion for negligible components of standard deviation or uncertainty)	13
§ 5 间接测量结果的不确定度合成	14
§ 6 直线拟合方法概述	18
§ 7 有效数字的修约方法简介	22
§ 8 结束语	25
第 2 部分 数据分析与不确定度评定 24 例	27
[E1] 电压源输出电压的平均值及其不确定度	29
[E2] 自组电桥测电阻	30
[E3] 伏安法内外接法比较实验的五个教学层次	30
[E4] 弹性模量的灵敏系数及不确定度计算	32
[E5] 转动惯量平行轴定理的实验验证	33
[E6] 测角仪实验中折射率 n 的灵敏系数与不确定度	35
[E7] 玻璃色散曲线方程的直线化拟合	35
[E8] 测量空气中的声速	36
[E9] 牛顿环法测球面曲率半径的不确定度	38
[E10] 迈克耳孙干涉仪实验中易被疏忽的首要误差分量	40
[E11] 直线拟合的自变量选择与异常值剔除举例 (热敏电阻实验)	41
[E12] 变偏法测表内阻——方程与因变量的选择	43

[E13]	模拟式电表测电源电动势实验中的有效信息与加权回归	44
[E14]	吸收系数测量公式的合理简化与模型误差	46
[E15]	功函数实验电路中的一种系差	47
[E16]	圆半径回归中的最佳方法与不确定度	48
[E17]	塞曼效应测磁通密度	49
[E18]	数字温度计设计中的合理要求讨论	50
[E19]	冷却法测液体质量热容的三种散热模型的初步比较思路	51
[E20]	在比较法测温度传感器非线性实验中重视误差分析的教学思路	53
[E21]	光栅常量的不确定度与加权平均方法	55
[E22]	稳健直线拟合的经验调和法及应用简介	58
[E23]	三等线纹尺示值误差的测量不确定度	59
[E24]	量块(端度规)校准	61

第3部分 新概念问答 30 组

[Q1]	为什么说在区间 $\pm u_c$ 内的置信概率约为 $2/3$, 而不是 0.683 ?	65
[Q2]	为什么说“任何测量结果都可能具有误差”, 而不说“都有误差”?	65
[Q3]	为什么要弱化误差分布律和概率密度函数的有关概念?	66
[Q4]	随机误差的定义为何与《国际通用计量学基本名词(第二版)》不同?	67
[Q5]	为什么说“分析可能产生的各种误差”、“对各种误差因素全面考察, 既不遗漏, 也不重复”的要求欠妥?	68
[Q6]	为何不能说“标准电阻、砝码的示值误差对制造厂是随机误差”?	68
[Q7]	如何理解误差的随机性?	69
[Q8]	如何推导出不确定度的修约间隔规则?	70
[Q9]	不确定度未知时为何不能做数值运算有效数字正确与否的判断?	70
[Q10]	教学中如何评判两个不确定度评定结果之间的一致性?	71
[Q11]	验证性实验如何给出“验证成功”的判据?	71
[Q12]	为什么说方和根合成是约定? 为什么 u_c 合成模式有 $u_B = U_B/\sqrt{3}$, 并按正态分布均值规律求 t , 而 U 合成模式	

将分量扩大到 1.2 倍?	72
[Q13] 为什么 u_c 合成模式中约定分布未知的 u_B 自由度取 20, 而 U 合成模式中 A 类分量未按文献[3]也乘以 1.2?	73
[Q14] 本书采用以前比较少见的数据处理架构, 出发点是什么?	74
[Q15] 一般测量有哪些特点? 为何强调一般测量?	75
[Q16] 单次测量不算 A 类分量是否不确定度更小? (单次测量 佯谬)	76
[Q17] 如何说明大多数情况下系统性误差起主要影响?	76
[Q18] 为什么不能用相关系数 r 来评价直线拟合的质量优劣?	77
[Q19] 为什么单次测得值的置信限用式(33), 而不用两条平行线 $y' = (b_0 + b_1 x') \pm 2s_y$ 表示因变量的预报区间?	78
[Q20] 为何说测多组散布数据拟合的方法主要为减小未定系差 影响?	78
[Q21] 为什么大学物理实验中不宜用逐差法?	79
[Q22] 拟合时不用相关系数判据, 为何给出斜率与截距的相关 系数?	81
[Q23] 平均值的有效位数如何取? 什么是“广义平均值”?	82
[Q24] 有何实例能说明误差分析的重要性? (多次运用误差理论 的案例)	84
[Q25] 正态分布直方图教学中要注意哪些问题?	86
[Q26] 什么是未定系统误差随机化方法?	88
[Q27] 如何粗略判断直线拟合中的异常值?	88
[Q28] 人称理论物理学是数学物理学, 实验物理教学如何与数学 结合?	89
[Q29] 误差分析与数据处理部分的要点如何归纳?	90
[Q30] 为什么要在两类不同教材体系的不确定度评定方法 之间调和?	91
附录 1 中国计量科学院《对 GUM95 的建议修改意见》摘录	94
附录 2 教学中部分重点概念、公式与要点一览表	97
参考文献	99

第1部分

数据分析与不确定度
评定基础知识

§1

物理量与测量

国际计量局在《A concise summary of the International System of Units (8th edition, 2006)》的页首写道:“Metrology is the science of measurements, made at a known level of uncertainty, in any field of human activity.”科技研究、产品制造、物质生活、物资流通与质量管理都离不开测量,测量涉及人类活动的一切领域.在物理学发展史上,对物理现象、状态或过程的各种量的准确测量,是实验物理的关键工作.

测量是用实验方法获得量的量值的过程(process of experimentally obtaining one or more quantity values that can reasonably be attributed to a quantity)^[1-06]. 量值(value of a quantity)一般是由一个数乘以计量单位所表示的特定量的大小. 可测量的量(measurable quantity)是“现象、物体或物质的可以定性区别和定量确定的属性”^[1],在基础物理实验中测量的基本上都是物理量.

在物理实验中,不仅要明确测量对象,选择恰当的测量方法,正确完成测量的各个步骤,还要学习误差理论和实验数据处理的基本概念,学会能够对多数测量表示出完整的测量结果,包括表示出确定水平的不确定度.

u_c 合成模式(参考 ISO 等《指南》的模式,在部分基础物理实验教材基础上有所改进^[2,4])

[例 1] 用三个 0.1 级电阻箱组成自组电桥测某个电阻,测量结果写成下式:

$$Y = y \pm u_c = (4030.0 \pm 4.5) \Omega$$

$$(\nu_{\text{eff}} \approx 78) \quad (1)$$

式(1)中 $u_c = 4.5 \Omega$ 是合成标准不确定度(combined standard uncertainty). 式(1)表示:被测量的真值 Y_i 基本位于区间 $(y - u_c, y + u_c)$ 之内,位于该区间内的概率约为 $2/3$ (不等于 0.683).

U 合成模式(参考计量院建议的模式,在清华大学基础物理实验教材基础上作了增补^[3,5])

[例 1] 用三个 0.1 级电阻箱组成自组电桥测某个电阻,测量结果写成下式:

$$Y = y \pm U = (4030 \pm 9) \Omega$$

$$(p \approx 0.95) \quad (1')$$

式(1')中的 $U = 9 \Omega$ 是概率约等于(或大于)0.95 的扩展不确定度(expanded uncertainty). 式(1')表示:被测量的真值 Y_i 一般位于区间 $(y - U, y + U)$ 之内. 教学实验中约 0.95 的概率说明可不写出.

提高要求:写出有效自由度 ν_{eff} , 它被用来计算扩展不确定度, ν_{eff} 的意义见 3.2 节.

工业化国家的规范与标准中, 大多要求结果表示具有约等于或大于 0.95 的概率.

完整的测量结果表示中, 必须包括测量所得的被测量 (measurand) 的数值 ($y/\Omega = 4030$) 和测量单位 (Ω), 一般应给出不确定度.

教学中必要时还要写出对测量结果有作用的影响量的值. 例如测量电流计的内阻时写出室温为 $t = (20.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$, 因为被测量值随温度升高而增加, 温度是重要的影响量.

测量对象、测量单位、测量方法和测量不确定度曾被称为测量的四个要素.

§2

误差的定义、分类及简要处理方法

2.1 测量误差 (error of measurement) 的定义^[1]

测量结果 (result of measurement) y 和被测量真值 (true value of measurand) Y_i 之差 dy 称为误差. 这里借用微分符号表示误差, 为说明它是小量且可正可负, 间接测量量的误差合成式与全微分的代数和式相同.

$$dy = y - Y_i \quad (2)$$

真值是理想的概念, 只有定义严密时通过完善的测量才可能获得, 它一般无从得知. 因此一般不能计算误差, 只在少数情况下用准确度高的实际值作约定真值时才能计算误差.

[例 2] 用准确度等级为 1.5、量程为 5 mA 的电流表测精密恒流源 2.0000 mA (约定真值) 的输出电流, 估读间隔为 0.02 mA, 三次读数分别为 2.02 mA、2.00 mA 和 1.98 mA, 示值误差分别为 0.02 mA、0.00 mA 和 -0.02 mA.

误差的普遍性. 由于测量仪器不准确、原理或方法不完善、环境条件不稳定、人员操作不熟练等原因^[7], 任何测量结果都可能具有误差. 虽然一般不知道真值因而不能计算误差, 但是能分析误差产生的主要因素, 能减小或基本消除有的误差分量对测量的影响. 对测量结果中未能消除的误差影响, 要估计出它们的极限值或表征误差分布特征的参量, 如标准偏差. 误差的普遍性要求我们: 必须

重视对测量误差的分析,重视不确定度评定,尽可能完整地表示测量结果。

2.2 误差的分类及简要处理方法

误差主要分为两类:随机误差和系统误差。它们的性质不同,应分别处理。

还有一类误差,由于外界干扰、操作读数失误等原因而明显超出规定条件下的预期值,以前称为粗大误差。包含粗大误差的测得值或粗大误差称为异常值(outlier)。测量要避免出现高度显著的异常值。已被谨慎确定为异常值的个别数据要剔除。文献中有多种异常值的判断方法^[6]。

2.2.1 随机误差(random error)

1. 随机误差的定义

随机误差是重复测量中以不可预知方式变化的测量误差分量(component of measurement error that in replicate measurements varies in an unpredictable manner)^[1-06]。

电表轴承摩擦力矩的变动、螺旋测微计测头的压紧力在一定范围内变化、操作读数时在一定范围内随机变动的视差影响、数字仪表末位取整数时的随机舍入过程等,都会产生一定的随机误差分量。

【例3】用惠斯通电桥测微安表内阻时,须降低电源电压以避免过载。若还用原配的检流计,电桥将变得不灵敏。检流计的灵敏阈一般取偏转0.2分格所对应的量值,它近似为可觉察的最小电流改变。电桥比率臂值为1时,如平衡后要使检流计平均偏离1分格被测电阻需改变 δ_R ,近似可得偏离0.2分格电阻需要改变 $0.2\delta_R$,那么由灵敏阈决定的测量误差 $e(R)$ 是随机误差分量,它在区间 $\pm 0.2\delta_R$ 内时大时小,时正时负。

随机误差分量是测量误差的一部分,其大小和符号虽然不知,但在相同条件下对同一稳定被测量的多次重复测量中,它们的分布常常满足一定的统计规律。随机误差分布绝大多数是“有界性”的,大多数有抵偿性,相当多的有单峰性,即绝对值小的误差出现概率大。

定义不严密、复现法不理想、环境条件不稳定、取样代表性不够等,会使被测量体现值波动,被测量有“原分布”。这些影响反映在测得值波动中,细析不确定度来源时需要考虑。

2. 算术平均值(arithmetic mean or average)

大多数随机误差有抵偿性,即测量次数足够多时,正、负误差之和的绝对值

近似相等. 因此, 用多次测得值的算术平均值作被测量的估值, 能减小随机误差的影响. 设对同一量重复测了 n 次, 一般应使 $n \geq 6$, 测得值为 y_i , 平均值为:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

3. 实验标准[偏]差 (experimental standard deviation)

随机误差引起测得值 y_i 的分散性用实验标准偏差 s 表征, s 由贝塞尔法 (Bessel method) 算出:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

s 反映了随机误差的分布特征. s 大表示测得值分散, 随机误差的分布范围宽, 精密度 (precision) 低; s 小表示测得值密集, 随机误差的分布范围窄, 精密度高.

测量准确度 (measurement accuracy) 的定义为 “closeness of agreement between a measured quantity value and a true quantity value of the measurand”^[1-06]. 准确度反映随机误差和系统误差的综合影响程度. 不确定度小, 准确度高. 准确度曾称为 “精度”, 现在精度只是精密度的简称.

计算 u_c 要用到平均值的实验标准偏差 s_y (experimental standard deviation of the mean), 文献[1]中强调平均值的实验标准偏差不应简称为 “平均值的标准偏差”.

$$s_y = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

4. 残差与最小二乘法

残差 (residual, residual error) 是测量列中某一测得值 y_i 与该测量列的算术平均值之差. 更一般的定义为 y_i 与其 (最佳) 估计值 $\hat{y}_i$ 之差, 记作

$$v_i = (y_i - \hat{y}_i) \quad (6)$$

最小二乘法 (method of least squares), 简称 MLS. 数据处理要充分利用测量所获得的信息, 以减小误差对结果的影响. MLS 是一种根据实验数据求未知量 “最佳” 估值的方法, 其原理可表述为: 使 (等精密度的因变量) y_i 的残差平方和 (residual sum of square) 或标准差的平方为极小值. 残差平方和最小记作

$$RSS = \sum v_i^2 = \min \quad (7)$$

2.2.2 系统误差(systematic error)^[1]

系统误差是重复测量中保持恒定或以可预知方式变化的测量误差分量,简称系差。(component of measurement error that in replicate measurements remains constant or varies in a predictable manner)^[1-06]. 测量中出现系差的例子见下文.

【例4】 电流表未调零,无电流时示值已是0.03 mA,测量将产生+0.03 mA的系差.

【例5】 采用电流表内接的电路接法测量电阻,由于电流表有内阻 R_i ,如果用中学常用的算法,将电压 V 除以电流 I 得电阻值 $R = V/I$,会产生大小为 R_i 的系差.

单摆运动方程小角度解近似,电表分度与磁场不均匀,螺纹副的螺距有误差,测量时温度等影响量对额定值的偏离,空气浮力对天平质量称量的影响,波长已知的空气折射率以1代替等,都会产生一定的系差分量.

系统误差包括已定系差和未定系差.

1. 已定系差

指符号和绝对值已经知道的误差分量.实验中应尽量消除已定系差,或对测量结果进行修正,得到已修正结果(corrected result).修正公式为:

$$\text{已修正测量结果} = \text{测得值(或其平均值)} - \text{已定系差} \quad (8)$$

修正值(correction)等于负已定系差,已修正结果等于测得值加修正值.

例5中电流表内接,用 $R = V/I - R_i$ 代替 $R = V/I$ 的简单算法,能基本消除电流表内阻的已定系差影响.预先调整仪表零点等操作,能减小测得值的系差.

2. 未定系差

指符号或绝对值未被确定而未知的系差分量.一般只能估计其限值或分布特征值.未定系差分量大多和下文的B类不确定度分量来源有大致对应关系.

误差的随机性,包括随机误差的随机变量特性和未定系差的某种“随机性”,是不确定度分量方和根合成法的基础.对于不同测量条件、不同被测量值或不同时段等,未定系差在一定意义上可以说具有随机性.

例如在 $(20.0 \pm 2.0)^\circ\text{C}$ 的空调室内,某一时刻室温对 20.0°C 的偏离误差是定值系差,但不同时刻的偏离误差在 $\pm 2.0^\circ\text{C}$ 内变动,变动范围已知但分布规律未知,具有随机性.变频空调的温度偏离误差分布常有单峰性,到达温控极值点就启停的开关式空调偏离误差分布一般无峰.

系差分析的重要性.大量一般测量的实践表明,系统误差分量对测量结果的

影响常常显著地大于随机误差分量的影响^[5 p105]. 因此大学物理实验要重视对系差的分析, 尽量减小它对测量结果的影响: 1) 对已定系差进行修正; 2) 合理评定系差分量大致对应的 B 类不确定度分量; 3) 通过方案选择、参数设计、计量器具校准、环境条件控制、计算方法改进等环节减小系差影响. 用多个散布测量点直线拟合求斜率, 将一些未定系差随机化, 是减小系差影响的方法之一.

§3

直接测量结果的不确定度评定 (evaluating uncertainty)

不必测量与被测量有函数关系的其它量, 就能直接得到被测量值的测量方法叫直接测量法 (direct method of measurement). 用等臂天平测质量、用电流表测电流等都是直接测量. 用式 (1) 形式表示的直接测量结果中, 不计已定系差时, 被测量值 y 可取多次测量的平均值 $\bar{y}$; 若只测一次, y 就取单次测得值 y_1 . 如有已定系差, 还须按式 (8) 将测得值或其平均值减去已定系差, 得到 y 的值.

3.1 测量不确定度的概念^[1]

Uncertainty of measurement; Parameter characterizing the dispersion of the quantity values being attributed to a measurand, based on the information used^[1-06]. 不确定度是表征被测量的真值 (或与定义、测量任务相关联的被测量值) 所处的量值散布范围的评定. 它表示由于测量误差的存在而对被测量值不能确定的程度. 不确定度反映了可能存在的误差分布范围, 即随机误差分量和未定系差分量的联合分布范围.

用合成标准不确定度 u_c 表示时, u_c 正比于一定概率的误差限 (本书中均指绝对值). 可近似地说: 误差在区间 $(-u_c, u_c)$ 内的概率约 2/3.

[例 6] 例 1 中电桥法测量电阻的结果为 $\hat{R}_x \pm u_c = (4030.0 \pm 4.5) \Omega$, 有效自由度 $\nu_{\text{eff}} \approx 78$, 说明电阻量值

用扩展不确定度 U 表示时, U 为误差分布基本宽度之半. 误差一般在 $\pm U$ 之间, 在 $\pm U$ 外的概率不大于 5%.

[例 6] 氢光谱实验中, 测得 H_α 线 15℃ 时的波长为 $\lambda_{H_\alpha} = (656.24 \pm 0.06) \text{ nm}$, 测量不确定度为 0.06 nm,