

物理实验研究

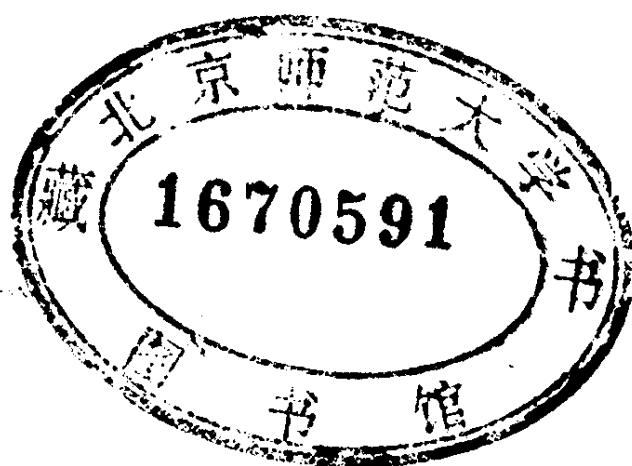
朱鹤年 编著

清华大学出版社

物理实验研究

朱鹤年 编著

7月1158/18



清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书结合现代计量学和实验物理学的进展。分 29 个相对独立的专题论述了物理实验研究中的一系列问题。前 10 篇全面综述、深入分析了实验研究中的一些基本问题,包括有效位数确定、误差分析、不确定度估计、实验结果表示和直线拟合等。其余各篇分别研究了一般院校常开设的一些物理实验,对原理描述、误差分析、方法改进、教学组织等问题进行了讨论、比较和辨析,提出了丰富的参考材料和较多的新颖论点。

本书可作为理工科院校实验教学的参考书,也可供从事实验研究及计量测试工作的技术人员、中学物理教师参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

物理实验研究/朱鹤年编著. —北京:清华大学出版社,1994
ISBN 7-302-01473-6

I. 物… II. 朱… III. 物理学-实验-研究 IV. 04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 01128 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

印刷者:通县宏飞印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 11 3/8 字数: 295 千字

版 次: 1994 年 7 月第 1 版 1994 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 0001—3000

本社分类号: O·151

定 价: 11.00 元

序

“物理实验”是理工科大学学生进校后接受系统实验方法和实验技能训练、培养科学实验能力的一门重要基础课程。

在高等工业院校中,“物理实验”作为一门独立的基础课程开设,还只有十年左右的历史。在这短短的十来年时间里,各工院校已经逐步形成了一支基本稳定的物理实验教学工作者队伍。他们克服了许多困难,进行了大量创造性的劳动,完善实验教学所需要的各种条件,满足了教学的基本要求。他们编写的物理实验教材,由各出版社出版的就有二三十种之多,并在历年来的各级学术会议和学术刊物上发表了大量有关研究文章,反映出实验教学总体水平的不断提高。但是,由于种种历史原因的限制,“物理实验”作为一门独立的课程,还存在着许多不完善的地方。例如,如何建立完善的课程体系;如何更新实验内容,使之更好地适应科学技术的飞速发展;如何在有限的教学课时内,处理好教学中的诸多难点,等等。这些问题已经成为广大实验物理教师十分关注,并且投入了巨大劳动进行研究、探索的课题。

《物理实验研究》一书,是作者多年来在教学实践第一线上,针对课程建设中的重大问题,深入思考、潜心钻研、勤奋耕耘的结晶。

作者在长期教学实践中注意到,实验误差和数据处理是物理实验教学的一个重要组成部分,也是教学中的主要难点之一。作者以其丰富的教学实践经验融汇了现代计量学的一些基本概念和方法,深入浅出,又极具针对性地就一些历史沿袭下来的模糊观点和不正确的教学方法,发表了自己的见解,使一些问题得到了澄清、解释和纠正。并在此基础上介绍了作者探索、总结、改进的工科院

校物理实验教学中的误差分析、不确定度评定、数据处理的一套既具科学性又简易可行的体系和方法。作者还对一些常用基本仪器和典型物理测量问题不确定度的评定和误差处理做了较为详尽的分析,具有很好的参考价值。

本书作者就一般高等学校物理实验课程开设的二十多个实验内容,逐个进行了剖析和讨论,为读者提供了诸多宝贵的资料。作者思路开阔,观点新颖。书中论述的许多议题,都是大家在教学中经常遇到,并十分关心的基本问题。他的这些观点和新建议,无疑将使读者得到有益的启示,并有助于物理实验教学水平的提高,对高等院校物理实验课程的教学改革也必将起到良好的促进作用。

耿完桢

1993. 9. 28

作者的话

参加普通物理实验室的教学工作十年来,自己努力从事一些科研课题的工作,同时结合科学研究的体会,不局限于教学领域的传统思路,对物理实验教学内容和方法的一系列问题做了一些研究和探讨,并在教材和教学实践中贯彻、采用了一些在物理实验教学范畴内较新的论点和方法。一年前,当自己萌生了要写一本实验研究的小册子的想法之后,得到了夏学江教授的热情关怀和帮助。提纲写成后,耿完桢、潘人培、王惠棣、陈守川和丁慎训等教授都分别给我以勉励、帮助、支持或关心。

物理实验是对理工科大学生进行系统实验方法和实验技能训练的一门重要基础课程。物理量测量是各个具体物理实验中必不可少的重要内容。前些时候,在工科物理实验有些关于测量的教学内容中,特别是关于误差理论和数据处理的有关内容中,有的教材一直沿用一些几十年前教材中的不大全面的概念和方法,这些概念和方法早已落后于计量科学发展的进程。从现代计量学的一些基本概念和方法出发,结合物理实验教学的具体特点,探索、改进工科物理教学中可行的误差分析、数据处理及不确定度评定的简化体系和方法,是本书的写作目的之一。

物理实验所涉及的内容十分丰富,这一点对实验教学工作带来了一定困难。以往的少数教材或教学研究文章,就某些专门问题的分析和结论往往是从某基础实验教材因循沿袭而来,个别论点甚至是循环引证的先验看法,难免出现一些片面或不足之处。作者力图走出从教材到同类教材的圈子,从实验物理学的一些专门论著出发,阐述对某些实验教学内容的新看法(其中某些看法在专业

物理或计量学中可能不具有新颖性),纠正某些具有一定影响的片面论点,这是本书的写作意图之二。

物理学是一门实验科学。科学实验是科学理论的源泉,但科学实验也离不开科学理论的指导。长期专门从事物理实验教学,往往会出现过分强调实验经验的作用,一定程度上忽视理论指导、轻视理性思维的倾向。物理理论教学和物理实验教学之间有着深刻的内在联系,两者不能完全割裂开来。本书在对一些具体实验问题的剖析和讨论中,力图强调物理概念的准确性和物理理论的严密性;较多地运用了数学理论和方法,较重视物理实验中理论指导和理性方法的作用;努力结合物理实验的具体特点和规律,给出一些解释实验现象、分析实验结论、阐述实验规律的具体例子;同时总结一些作者提出或实践过的改写某些具体教材内容、改进或新排某些具体实验的经验、思路或新设想,这是本书的写作目的之三。

通过对几十个相对独立的专门问题的讨论,作者力图阐述在物理实验教学领域中较新颖或较少重复的论点及其简要证明,尽量少重复那些一般教材和文章已有的合理论述。书中引述了一些相关的国家标准和国际文件,对某些问题作了有一定特色的综合评述,对不少未作深入讨论的论点或问题注明了文献来源,希望能给广大实验教学工作者提供一些有用的参考信息和文献资料索引,这是本书的写作目的之四。

由于体例限制,本书各篇之间较少有机联系,各篇中往往为突出重点或新颖论点而影响了全面性和系统性;某些数学推演过程稍有跳跃;有的论述未及深入展开;某些论点可能和作者未读过的一些文献重复而未及引证,这些都是本书的不足之处。书中的某些论述,往往着重强调了问题的一个侧面,个别论点也难免片面或错误,作者诚恳地希望得到读者的批评和指正。本书涉及的有争论文点较多,希望通过这本不甚成熟的小书,抛砖引玉,对物理实验教学领域的讨论、争鸣和研究起一点小小的促进作用。

清华大学普通物理实验室的同事们给作者以许多直接的帮助和启发。书中的一些内容,是在同事们的帮助和配合下才得以在教学中贯彻,在实践中深化的。书中的某些论点,是在学术讨论和不同观点的争论中得以完善和系统化的。

路峻岭副教授审阅了全书中绝大多数篇的内容,并提出了许多宝贵的修改意见。钱启予副教授和王岩松、周福民同志对书中四篇内容提出了修改意见。江耀纯同志协助绘制了部分插图。本书写作和出版过程中,得到了西南交通大学袁玉辉教授、北京航空航天大学张士欣副教授、清华大学张玫教授和陈皓明教授的直接关心、帮助和支持。作者谨向他们致以谢意。

在本书完稿之际,很难忘记十年前荐引我由专业教研组走上普通物理实验室岗位的李功平先生和徐亦庄先生当年的教诲。李功平先生勇于实践、坚持真理、刚正不阿的品格和徐亦庄先生严谨治学、精心授业、鞠躬尽瘁的精神,是激励我努力搞好物理实验教学研究工作的动力。

1993年7月

目 录

第 1 篇	有效位数与数字修约.....	1
第 2 篇	浅谈误差与不确定度	12
第 3 篇	不同分析对象的四种分布	26
第 4 篇	物理实验测量的结果表示 ——对教学基本要求中数据处理问题的浅见	38
第 5 篇	工科普通物理实验误差教学的几点考虑	52
第 6 篇	建议不再使用平均误差的概念	70
第 7 篇	实验教学中有关仪器误差问题的商榷	76
第 8 篇	物理实验中的直线拟合	83
第 9 篇	对间接测量数据算法之争的评论.....	106
第 10 篇	应当重视物理实验中名词术语的标准化 和规范化	116
第 11 篇	千分尺的测量不确定度	123
第 12 篇	空气相对压力系数测量实验	130
第 13 篇	关于伏安法测电阻的讨论	136
第 14 篇	灵敏电流计研究	142
第 15 篇	关于电桥灵敏度的讨论	151
第 16 篇	电位差计实验	164
第 17 篇	测微安表内阻的设计性实验方案分析	172
第 18 篇	圆电流圈平面内中心磁场最弱的证明	184
第 19 篇	冲击电流计实验	192
第 20 篇	有关霍耳效应实验的几点讨论	200
第 21 篇	磁控管测比荷公式的证法探讨	207

第 22 篇 空气中的声速测量 219

第 23 篇 薄凸透镜焦距测量误差的综合评析 234

第 24 篇 改写偏振光学实验原理的若干考虑 250

附录 A 偏振光学实验原理 262

第 25 篇 1/4 波片误差对椭圆偏测量的影响 275

第 26 篇 氢原子光谱实验的改进研究 283

第 27 篇 实验误差分析方法在科学研究中的应用十二例 ... 303

第 28 篇 对五个实验问题的小计算或证明 312

第 29 篇 简议浅评九则 323

参考文献..... 341

第 1 篇 有效位数与数字修约

实验数据有效位数的确定是数据处理中的一个重要问题。有效数字一词英文中称 Significant figure^[1],有时也称 signifcant digit^[2]。

一、几种不同的有效数字定义

刘智敏对有效数字作了较严格的定义:“如果计量结果 L 的极限误差不大于某一位上的半个单位,就说该位是有效数字末位,该位到左起第一位非零数字之间的数字个数即有效数字个数”^[3]。与此定义相近的说法如下:对实数 x 的近似值

$$d_m d_{m-1} \cdots d_0 d_{-1} d_{-2} \cdots \quad (d_m \neq 0)$$

若 x 满足不等式

$$d_m d_{m-1} \cdots d_{l+1} (d_l - 1) < x < d_m d_{m-1} \cdots d_{l+1} (d_l + 1)$$

且对 d_{l-1} 的任何值都不能使下列不等式成立

$$d_m d_{m-1} \cdots d_l (d_{l-1} - 1) < x < d_m d_{m-1} \cdots d_l (d_{l-1} + 1)$$

则称 d_m 、 d_l 分别为最高位、最低位的有效数字,有效数字位数为 $m - l + 1$ ^[2]。肖明耀关于有效数字的定义也与上述定义相近,但他进一步把最低位有效数字 d_l 后的一至两位数字与前面的有效数字合起来称作“有效安全数字”^[4]。有人还把 d_l 后的这一至两位数字直接叫作“安全数字”。

这类定义原则上是合理的,对测量结果表示的有效数字位数的确定是可行的。

第二类定义常见于物理实验教材中:测量结果中所有可靠数

字和一位欠准数字(也称存疑位)统称为有效数字。这类定义中,有效数字末位的半个单位已小于极限误差,因而有效数字位数比第一类定义一般多了一位。与第二类定义类似的定义是:实验中凡是用量仪和量具直接读出的数字(包括最后一位估计的读数)都称为有效数字。

第三类处理方法回避对有效数字下严密定义,只通过叙述性文字和举例,实际上把所有可靠数字(从左起第一个非零数字起)和一至两位欠准的或存疑的数字都看作有效数字^[5],这实际上相当于第一类定义中的安全有效数字。

上述三类定义相比较,第二类欠严密。由于物理学和工程技术的许多场合不确定度常取两位,很容易发生与第二类定义不一致的情况。存疑位只取一位往往容易被误解为是公理、是不可违背的规律,用第二类定义的简化约定而作茧自缚,妨碍正确地进行数字修约和实验结果处理(说明见下文)。第三类处理方法定义虽然较模糊,但涉及的名词概念较少,处理较简单,可以较少限制地适用于多种场合。李震复也曾对有效数字下过这样的说明性的定义:为了规定某特定数值或数量所必需的任何数字就称为有效数字^[6]。

国家标准《数字修约规则》中未定义有效数字,只叙述性地说明了“有效位数”的概念。这是一种更宜遵循的做法。标准中说:“对没有小数位且以若干个零结尾的数值,从非零数字最左一位向右数得到的位数减去无效零(即仅为定位用的零)的个数;对其它十进位数,从非零数字最左一位向右数而得到的位数,就是有效位数^[7]”标准[8]中也用有效位数一词。

二、数字修约、数值读取或表示的原则

有效数字或有效位数只是数字修约、数值读取或表示过程中

用到的一种一般性概念,只是一种方法性、工具性的东西,运用它们的根本目的是:保证测量结果的准确度基本不会因位数取舍、数字修约而变大;避免因多读取或保留一些基本无意义的多余位数字而做无用功。换句话说,要求我们在数据读取、运算及结果表达这些具体过程中,获得并保持被测量值的全部有效信息,而不人为地增加任何无用信息。我们宜在实验教学过程中强调两条原则:

1. 有效数字或有效位数在一定程度上反映量值的不确定度(或误差限值)

2. 数字的读取、修约、变换、运算和表示基本上不会增大量值最后结果的不确定度。

这两条表明,有效数字作为一种手段,是服务于测量结果的不确定度的,即服务于获取并处理必需的有效信息的测量工作的。这里所说的“一定程度上”是指测得值和不完整的测量结果数值(未包括不确定度及有关影响量的数值)通常只能有限地反映测量不确定度的部分信息。如果用 0.5 级量程为 150V 的磁电式电压表测某电压,测得值为 110.3V,单从四位有效位数并不能看出测量不确定度是多少,但是它已包含了求得完整测量结果的有效信息。第二条基本不增加不确定度的值,也就是要求在读数、修约、变换、运算等环节中不丢失或减少有效信息量,即不使信息熵增加。

怎样进行数字修约才能基本不增加测量结果的不确定度呢?设修约间隔为 I ,修约值即应为 I 的整数倍。修约过程可看作增加了 $[-I/2, +I/2]$ 的均匀分布的附加误差分量,其标准偏差为 $s_r = \sqrt{3} I/6$ 。文献^[4]提出了判断某个误差分量可否忽略的微小标准偏差准则(有些书中提到的微小误差准则与此类似):可以忽略不计的误差分量的标准偏差应不大于其余各分量综合标准偏差 σ_r 的 $1/5—1/4$ 。考虑到以往有相当多的文献以 $\sigma_r/3$ 作为微小标准偏差的上限值,笔者认为在物理实验中,根据微小标准偏差准则 s_r 应不大于 σ_r 的 $1/5—1/3$,由此可定出修约间隔

$$I \leq (0.7 - 1.1)\sigma, \quad (1-1)$$

除了上述不等式的限制外,修约间隔 I 在多数情况下应当是 10 的整数次幂,如应是 0.01、0.1、1、 10^1 或 10^2 等;必要时也可以是这些数值的 0.5 倍或 0.2 倍,分别叫 0.5 单位修约或 0.2 单位修约^[7]。0.5 单位修约值的最右一位数字只能是 0 或 5,0.2 单位修约则应为 0 或偶数数字。

若已知总不确定度的 A 类分量 Δ_A ,其置信概率一般约等于或大于 95%,再考虑到综合误差分布的一些常用的分布规律,可以推知修约间隔一般应满足下列不等式

$$I \leq (0.3 - 0.5)\Delta_A \quad (1-2)$$

三、原始数据位数的确定

直接测量量的原始数据读取位数主要由计量器具的不确定度(或误差限值)来决定。

1. 游标类量具一般只读到游标分度值的整数倍,如卡尺、分光计、大气压力计等。特殊情况下也可估读到游标分度值的一半,如分度值为 0.1mm 的卡尺当相邻两根游标刻线与主尺刻线对齐程度差不多时原则上可以读到 0.05mm,因为游标卡尺的示值不确定度一般小于 0.1mm,ISO 就曾规定过这种卡尺的示值不确定度为 0.05mm^[9]。

2. 数字仪表一般直接读取仪表的数字显示值。数显值在小范围内上下波动时也可估读其平均值。具有十进步进式指示盘(如电阻盘)的测量仪表(如电桥)一般应当直读其指示数值,特殊情况下也可估读到末位最小步进值的几分之一以减小读数误差,例如用 0.2 级电桥和 0.05 级电阻箱对约 1.1k Ω 的电阻进行比较测量时就可估读到电桥末位步进值的 1/10。

3. 指针式仪表的估读间隔应区别不同情况来确定。估读间隔

I_r 类似上文的修约间隔,也可以把 $\pm I_r/2$ 近似看作均匀分布的估读误差范围来确定 I_r 所应满足的不等式。我们在读数时一般要估读到最小分度值的 $1/4 \sim 1/10$, 估读到 0.1 分度以下是不合理的,因为在刻线细、照明好、线间距不太窄、指示线(或指针)不太粗的条件下,由于人眼的估读本领限制,一般最多只能估读到 0.1 分度。考虑到视差等因素对读数的影响,读数误差往往可能超出 $\pm I_r/2$ 的范围,因此,当已知计量器具的(总)不确定度(或基本误差限或示值误差限)为 Δ_{ins} 时,可定出估读间隔 I_r 应满足的不等式

$$I_r \leq \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{3} \right) \Delta_{\text{ins}} \quad (1-3)$$

(1-3)式中的系数比(1-2)式小,原因之一是 Δ_{ins} 的随机分量一般显著地小于 Δ_{ins} 。合理选取 I_r 值可以保证原始数据中包含尽可能多的被测对象的信息,可避免因估读而人为减少有用的原始信息量。和修约间隔类似,估读间隔 I_r 可取单位量值或其十进倍数量值,也可以取这些量值的 0.5 倍或 0.2 倍。有的学校教材要求学生原始记录只记下分度数,估读间隔的选定应比(1-3)式稍苛刻些,因为测得值等于分度数乘以分度值,运算后还有可能进行数字修约。

上述三种情况下确定估读间隔 I_r 的原则并不是绝对的,还有一些例外

特例 1 检定电流表、电压表及功率表的规程规定了 0.1 、 0.2 及 0.5 级表的数据修约间隔 I 应为 Δ_{ins} 的 $1/4 \sim 1/11.25$ 倍^[10],因而实质上也限定了估读间隔 I_r 。因为检定工作要评定电表的计量特性,确定电表是否符合法定要求,所以读数要求比(1-3)式所对应的要求高。

特例 2 线性度好但准确度等级较低的仪表用于测量并研究某些物理量间的相对关系时, I_r 可允许小于 $0.1\Delta_{\text{ins}}$ 。如用 $0 \sim 15\text{mV}$ 、 0.25mV/div 、 4.0 级交流毫伏表,采取感应法测磁场分布并验证场的叠加原理时,尽管 $\Delta_{\text{ins}} = 0.6\text{mV}$,仍可要求学生估读到

1/5div 即 0.05mV, 这种表在短期使用中的非线性偏差量远小于 Δ_{ins} , 而放大器增益变动等倍率误差分量并不影响验证叠加原理的实验。

特例 3 当被测量值不要求具有和 Δ_{ins} 相对应的准确度时估读间隔可大大放宽, 如用七位半数字多用表检定 0.5 级电压表时, 数字表读数的有效位数可以适当减少。

测量是认识物质世界的一种实践, 有效位数取多少应服从于我们进行测量实践的目的。读数读几位从根本上说取决于测量结果不确定度的需要情况。

四、四种确定运算结果有效位数规则的比较

1. 文献^[4]提出: 加减运算, 以参与运算的末位最高的数为准, 其余各数及和、差均比该数末位多取一位; 乘除运算以参与运算的有效位数最少的数为准, 其余各数及积、商均比该数多取一位。刘智敏也重申过这一规则^[3]。这是计量工作中普遍采用的一种规则。

2. 一些物理实验教材中采用如下规则: 加减运算, 结果的末位和参与运算的末位数位最高的数位对齐; 乘除运算, 结果的有效位数和参与运算的有效位数最少的数相同。这一规则较片面, 常常出现修约误差过大的情况, 因而不宜在物理实验数据处理中采用。例如分光计方位角的平均值原则上可比原始读数多取一位。再用补偿法测得某未知电动势为

$$E_x = 0.986E_N = 0.986 \times 1.0186(\text{V})$$

按这一规则乘积应为 1.00V, 运算结果的不正确修约过程产生了一 0.43% 的系统误差分量, 不管比值 0.986 和标准电势 E_N 的不确定度是多少, 按这一规则都会丢失一部分测量获得的有用信息。

3. 数据运算是实验数据处理的一个中间环节, 在计算工具落

后的年代采用一定的修约规则可以适当提高工作效率。在计算器已经普及的今天,按第一种规则修约数据已几乎不能节省多少时间,因此,在实验研究和实验教学中对有效位数的确定可以抓紧两头,放松中间。抓两头,就是注重于原始读数及测量结果表示的有效位数确定;放中间,就是运算过程中的数和中间运算结果都可适当多取几位。中间过程只要不随便修约都被认为是可以的。在计算机已相当普及的今天,不少科学研究报告都不注重中间过程的数字修约了。

4. 有的教科书要求对参与四则运算的数先按照第二种规则所述的方法进行修约,再对运算结果进行修约,这是一种更不足取的方法。如用这一规则求上述例中的 E_x ,先把标准电动势修约成 1.02V,结果 $E_x=1.01\text{V}$,系统误差分量扩大到了 +0.57% (仅指修约过程产生的误差分量)。

上述四种方法中,第四种是不恰当的;第二种规则虽然在不少情况下可以适用,但常常出现修约误差偏大的问题;第一种规则全面而准确,可以采用;不注重对运算结果的数字修约、抓两头、放中间的第三种做法也是一种可采纳的简单而省心的方法。

五、不确定度或标准偏差的有效位数决定

数据处理过程中要决定不确定度的有效位数,即要决定总不确定度 Δ (或标准偏差不确定度 u_c) 的修约间隔 I_Δ 。 Δ 的位数应怎样定? 对这一问题的回答众说不一,主要有两种意见:

1. 总不确定度 Δ 、标准偏差不确定度 u_c 和反映测量精密度的实验标准偏差 s ,这三个量值都和测量的误差有联系。一些教科书中认为:标准偏差 s 等的数字都是欠准数,因而规定 Δ 、 u_c 及 s 均只取 1 位有效数字。