



普通高等教育“十二五”规划教材——物电类
国家特色专业物理学教材

普通物理实验

主编◎王昆林 岳开华



西南交通大学出版社



普通高等教育“十二五”规划教材——物电类
国家特色专业物理学教材

普通物理实验

PUTONG WULI SHIYAN

主 编 ◎ 王昆林 岳开华
副主编 ◎ 沙育年 颜 茜

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

普通物理实验 / 王昆林, 岳开华主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2014.8
普通高等教育“十二五”规划教材, 物电类 国家特
色专业物理学教材
ISBN 978-7-5643-3402-4

I. ①普… II. ①王… ②岳… III. ①普通物理学—
实验—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 202497 号

普通高等教育“十二五”规划教材——物电类
国家特色专业物理学教材
普通物理实验

主编 王昆林 岳开华

责任编辑	牛 君
助理编辑	胡晗欣
封面设计	严春艳
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都中铁二局永经堂印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	17.75
字 数	437 千字
版 次	2014 年 8 月第 1 版
印 次	2014 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-3402-4
定 价	39.50 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

编 委 会

主 任 陆 华

副主任 司民真 山玉林

委 员 周瑞云 董 刚 徐卫华 王新春

王昆林 王怡林 杨 群

序

特色专业是指充分体现学校办学定位，在教育目标、师资队伍、课程体系、教学条件和培养质量等方面，具有较高的办学水平和鲜明的办学特色，获得社会认同并有较高社会声誉的专业。特色专业是经过长期建设形成的，是学校办学优势和办学特色的集中体现。2010年7月，楚雄师范学院物理学（师范类）专业被批准为第六批国家特色专业建设点。这套教材就是楚雄师范学院物理与电子科学学院在建设国家特色物理学（师范类）专业过程中的部分成果展示。

在特色专业的建设中，根据目前中学物理新课标及中学物理教学改革趋势，构建课程体系和改革教学内容。整合课程内容，突出专业基本知识、基本技能以及教师职业核心能力培养。实施“5+5”课程改革计划，即“力学，热学，电磁学，光学，原子物理5门基础知识课程+5个相应中学物理课程学习”，突出专业基本知识的学习，同时熟悉中学物理课程体系。在学生实践能力的培养上，我们搭建6个实践平台即实验教学“8+2”模式平台、设计性实验平台、开放实验室平台、学科竞赛（如大学生电子设计大赛、物理教学技能大赛）平台、学生社团活动、大学生科研项目及参与学生教师科研项目平台，为培养学生的创新精神、实践能力助力。本套教材编写过程中，我们根据学生实际，从实验课程构架情况以及对学生要求出发，以够用、适用为准则，以培养应用型人才为导向，希望能够指导学生更好地掌握相关物理学内容。在编写过程中，我们得到了学校各级领导和同事的大力支持，也借鉴了一些国内同行的先进经验，在此一并表示衷心感谢。

由于时间和水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请广大师生在使用过程中提出宝贵意见，以利将来改进。

丛书编委会

2014年3月

前 言

物理学的本质是研究物质的基本结构和运动规律。物理学及其发展是揭示自然奥妙，认识自然规律，从而推动人类科学文明历史前进的动力。实验物理和理论物理作为物理学的两大组成，相互促进、共同发展，形成整个物理学史的前进足迹。当实验物理中有新的发现、出现新结果时，就会激励和促进理论物理研究出现新的模型、理论，使人类对自然规律的探索向更广、更深推进。物理学是科学的基础，实验物理是物理学的基础。

物理学在人的科学素质培养中具有重要的地位，物理实验教学是关系人才科学素质培养的重要环节。教材是实施教学的基本保证，为此由长期在教学第一线艰辛敬业工作多年、具有丰富教学经验的楚雄师范学院物理与电子科学系教师，团结协作，积极配合，历经一年多编写成此教材。

本教材的编写充分考虑了实验仪器的基本特性和现今学生的实际情况，在我系教师编写并使用多年的《普通物理实验讲义》的基础上，加入了新的内容，进行了重新编写，尽量做到循序渐进、逐步提高。实验安排由浅入深、由易到难，从验证性实验逐渐过渡到综合性、设计性实验及研究性实验。本教材采用了不确定度评定实验结果，用了一定的篇幅叙述不确定度及误差统计规律和处理的方法，并较为详细地介绍了分析误差、处理实验数据的理论依据，这对于后续实验课的开设是十分有益的，希望能够引起读者的重视。

由于编者水平有限，本书还存疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2014 年 6 月

名人名言

很多学生在学习物理时形成了一种印象，以为物理学就是一些演算。演算是物理学的一部分，但不是最重要的部分。物理学最重要的部分是与现象相关的。绝大部分物理学是从现象中来的，现象是物理学的根源。一个人不与现象接触不一定不能做重要的工作，但是他容易误入形式主义的歧途；他对物理学的理解不会是切中要害的。

——杨振宁

我希望我得到诺贝尔奖，将能提高中国人对实验的认识，过去中国人从小就受到劳心者治人，劳力者治于人的观点的影响。普遍不太重视实验，觉得理论要比实验更高明，更高深。大家认为学习就是学习理论，从来没有说学习就是更好地学习实验，我希望从此以后能够摆脱中国轻实验过分重视理论的旧传统。

——丁肇中

目 录

第 1 章 普通物理实验基础知识	1
1.1 普通物理实验课的目的	1
1.2 测量误差和有效数字	2
1.3 实验数据的处理方法	12
1.4 力学和热学实验基本知识	15
1.5 电磁学实验基本知识	18
1.6 光学实验基本知识	28
第 2 章 力学实验	31
实验 2.1 长度测量	31
实验 2.2 用单摆法测定重力加速度	36
实验 2.3 固体和液体密度的测定	40
实验 2.4 自由落体运动研究	46
实验 2.5 气垫导轨上滑块运动的研究	49
实验 2.6 牛顿第二定律的验证	52
实验 2.7 惯性秤	55
实验 2.8 动量守恒定律的验证	59
实验 2.9 用三线摆测定刚体的转动惯量	62
实验 2.10 杨氏模量的测定	66
实验 2.11 简谐振动的研究	71
实验 2.12 弦振动的研究	74
实验 2.13 用共鸣管测声速	78
实验 2.14 超声法测量声速	81
第 3 章 热学实验	83
实验 3.1 用混合法测定固体的比热容	83
实验 3.2 金属线胀系数的测定	87
实验 3.3 冰的熔化热的测定	91
实验 3.4 液体黏滞系数的测定	93
实验 3.5 不良导体导热系数的测定	97
实验 3.6 液体表面张力系数的测定	100
实验 3.7 气体定律及气态方程验证	103
第 4 章 电磁学实验	107
实验 4.1 用稳恒电流场模拟静电场	107
实验 4.2 伏安法测量电阻	111
实验 4.3 用直流电桥测量电阻	115
实验 4.4 灵敏电流计特性的研究	124

实验 4.5	用板式电位差计测量电池的电动势和内电阻	131
实验 4.6	双臂电桥测量低电阻	136
实验 4.7	磁场的描绘	141
实验 4.8	示波器的使用	146
实验 4.9	RLC 电路的相频特性研究	153
实验 4.10	交流电桥	158
实验 4.11	RLC 电路谐振特性研究	163
实验 4.12	RLC 串联电路暂态过程的研究	169
实验 4.13	简易万用表的制作	175
实验 4.14	霍尔效应及其应用	182
电磁学实验附录		190
第 5 章 光学实验		203
实验 5.1	发光强度的测量	203
实验 5.2	薄透镜焦距的测定	206
实验 5.3	分光计的调整及折射率的测定	210
实验 5.4	液体折射率的测定	217
实验 5.5	透镜组基点的测定	221
实验 5.6	显微镜、望远镜放大率的测量	226
实验 5.7	平行光管的调整和使用	231
实验 5.8	等厚干涉现象的研究	236
实验 5.9	用菲涅耳双棱镜测波长	239
实验 5.10	迈克耳逊干涉仪的调整和使用	243
实验 5.11	用透射光栅测光波波长和角色散率	248
实验 5.12	偏振现象和旋光现象的研究	251
第 6 章 综合性和设计性实验		256
实验 6.1	滴数法测量固体漂浮性物体的密度	256
实验 6.2	振动与匀加速直线运动合成研究	256
实验 6.3	轨迹显现法研究物体平抛运动	257
实验 6.4	激光准直法测量金属材料杨氏模量研究	258
实验 6.5	气垫导轨上黏滞阻力的研究	259
实验 6.6	自制单摆的设计与研究	259
实验 6.7	乐器声学特性与音律的观测研究	260
实验 6.8	半导体温度计的设计与制作	260
实验 6.9	电阻测量优化研究	261
实验 6.10	微小长度(微米数量级)的测量(略)	261
实验 6.11	气体折射率的测量(略)	261
实验 6.12	用分光计测量液体的折射率(略)	261
实验 6.13	望远镜、显微镜、幻灯机模型的设计与组装(略)	261
附录 物理常数表		262
参考文献		271

第1章 普通物理实验基础知识

1.1 普通物理实验课的目的

物理学是实验的科学。物理学新概念的确立和新规律的发现要依赖于反复实验。物理学上新的突破常常是通过新的实验技术得以实现的。物理实验的方法、思想、仪器和技术已经被普遍地应用在自然科学各个领域和技术部门。

普通物理实验课是对学生进行实验教育的入门课程，其教学目的在于使学生学习物理实验基础知识的同时，受到严格的训练，掌握初步的实验能力，养成良好的实验习惯和严谨的科学作风。

物理实验课上的学习：

1. 学习基础实验方法、仪器和数据处理知识

通过对被测量的定量测量，对被测量及相关的物理过程有明确具体的了解，例如测冷热纯铜的弹性模量为 $(1.27 \pm 0.05) \times 10^{11} \text{ Pa}$ ；测油滴的电荷分析计算出电子电荷为 $(1.61 \pm 0.02) \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

2. 锻炼手的操作技能

对实验装置的安装、调整，对计量器具的正确操作，是做好实验的基础。

3. 学习实验的物理思想

每个实验都是一个物理过程，通过此过程将间接测量量转换为若干直接测量量，将难测的量变换成容易测的量，将测不准的量变换成比较测得准的量，在这些变换中有丰富的物理思想。

4. 培养思维能力

思维是在观察的基础上，进行分析、综合、判断、推理和提出新思想的认识过程，它对任何工作都十分重要，在实验中是培养思维能力的好机会，如：

- (1) 观察现象、分析测量数据、判断实验的进行是否正常。
- (2) 对实验故障的分析、判断，可找出问题的所在及解决方法。
- (3) 审查实验记录，发现可能存在的问题。
- (4) 分析实验结果，给出恰当的评价，提出深入思考的问题，等等。

实验课虽然是在教师指导下的学习环节，但学生在实验课上的活动有较大的独立性，我们期望学生以研究者的态度去组装实验装置，进行观测与分析，探讨最佳实验方案，从中积

累经验、锻炼技巧，为以后独立设计实验方案和解决新的实验课题创造条件。

1.2 测量误差和有效数字

1.2.1 测量与仪器

测量是指用实验方法确定被测对象的量值的实验过程，测量分为直接测量与间接测量。直接测量是指被测量和同类单位的标准物或计量器具直接比较，得出被测量量值的测量。

例如，一桌子的长度与米尺相比，得出桌子长度为 1.248 m；一铁块的质量（通过天平）与砝码相比，得出铁块质量为 31.85 g。

间接测量是指由一个或几个直接测得量经已知函数关系计算出被测量量值的测量。例如，测量单摆的摆长 l 和振动周期 T ，由已知的公式 $g = 4\pi^2 l / T^2$ 算出重力加速度 g 值的过程就是间接测量。

测量时使用的仪器称为测量仪器，测量仪器用于直接或间接测出被测对象的量值。如游标卡尺、天平、停表、温度计、电表、惠斯登电桥、照度计、分光计等。测量结果给出被测量的量值，它包括两部分：数值和单位。不标出单位的数值不能是量值，一般测量量值还应给出不确定度。

仪器的准确度等级 测量时是以计量器具为标准进行比较的，当然要求仪器准确。不过由于测量的目的不同，对仪器准确程度的要求也不同，比如称量贵金属的天平必须准确到 0.01 g，而粮店卖粮的台秤偏差不超过 20 g 都是可以的。为了适应各种测量对仪器的准确程度的不同要求，国家规定工厂生产的仪器分为若干准确度等级。各类各等级的仪器，又有对准确程度的具体规定。例如 1 级螺旋测微计，测量范围小于 50 mm，最大误差不超过 ± 0.004 mm；又如等级为 1.0 级、量程为 500 mA 的电流表，测量范围为 0 ~ 500 mA 时的基本误差限为 ± 5 mA。

仪器的精确度等级 测量结果的精密度和正确度是与测量仪器的精确度等级密切相关的。我们通常用精度和级别来描述仪器的这种性质。仪器的精度通常指它能分辨的物理量的最小值。仪器的精度越高，即它的分度越细，允许的偏差就越小。由于多种因素，如材质不均匀、加工装配的缺欠以及环境（如温度、湿度、震动、杂散光、电磁场等）的影响，仪器的精度受到一定的限制。按照标准，在正常使用条件下（如温度、湿度范围、放置方式、额定功率等都符合要求），用某种级别的仪器进行测量时，对最大允许偏差有具体规定，这种最大允差也叫仪器的极限误差或允差，我们用 $\Delta_{\text{仪}}$ 来表示。 $\Delta_{\text{仪}}$ 可在产品说明书和仪器手册中查找到。仪器的级别和最大允差有关，如模拟式（即指针式）电表级别分为 5.0、2.0、1.5、1.0、0.5、0.2、0.1 等。

最大允差 $\Delta_{\text{仪}}$ 、量程 A 、级别 a 的关系为 $\Delta_{\text{仪}} = Aa\%$ 。它表示在该量程下正确使用仪器进行测量，结果可能出现的最大误差。而数字式电表测量结果的最大误差较为复杂，通常表示为读数 $\times$ 某百分数 + 最末位的几个单位（具体见说明书）。

实验时要恰当地选取仪器，仪器使用不当对仪器和实验均不利。表示仪器的性能有许多

指标,其中最基本的是测量范围和准确度指标。当被测量超过仪器的测量范围时,首先对仪器会造成损伤,其次可能测不出量值(如电流表),或勉强测出(如天平),但误差将增大。对仪器准确度等级的选择也要适当,一般是在满足测量要求的条件下,尽量选用准确程度低的仪器。减少准确度高的仪器的使用次数,可以减少在反复使用时的损耗,延长其使用寿命。

1.2.2 测量与误差

做物理实验时要对一些物理量进行测量。各被测量在实验当时条件下均有不以人的意志为转移的真实大小,称此值为被测量的真值。测量的理想结果是真值,但是它是不能确知的,因为,首先测量仪器只能准确到一定程度;其次有环境条件的影响,并且观测者操作和读数不能十分准确,理论也有近似性,所以测得值和真值总可能不一致。定义测得值减去真值的差为测得值的误差,即

$$\text{测得值}(x) - \text{真值}(a) = \text{误差}(\varepsilon)$$

误差 ε 是一代数值,当 $x \geq a$ 时, $\varepsilon \geq 0$; $x < a$ 时, $\varepsilon < 0$ 。由于真值是不能确知的,所以测得值的误差也不能确切地知道,在此情况下,测量的任务是:

- (1) 给出被测量值的最佳估值;
- (2) 给出真值最佳估值的可靠程度的估计。

关于什么是最佳估值,留到后面去讨论,但是可以想到最佳估值一般不确定度比较小。为了减小误差就要分析误差的来源,实际上任何测量的误差都是多种因素引入误差的综合效应。现在以用单摆测重力加速度为例作一些分析。物理理论中的单摆,是用一无质量无弹性的线,挂起一质量为 m 的质点,在摆角接近零时,摆长 l 和周期 T 之间存在 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ 的关系,其中 g 为当地的重力加速度。在用单摆测重力加速度的测量中,误差的来源大致有如下几方面:① 米尺和停表本身不准确;② 对仪器的操作不准确;③ 仪器读数不准确;④ 摆线质量不为零;⑤ 摆锤体积不为零;⑥ 摆角大小引入的误差不可忽略;⑦ 存在空气浮力和阻力;⑧ 支点状态不理想;⑨ 支架震动或空气流动。

通常误差来源可有:

- (1) 被测量的定义不完善;
- (2) 相同条件下被测量在重复观测中的变化;
- (3) 测量方法和测量程序的近似和假设;
- (4) 复现被测量的方法不理想;
- (5) 取样的代表性不够;
- (6) 测量仪器的计量性能局限;
- (7) 测量标准或标准物质的不确定度;
- (8) 引用数据或其他参量的不确定度;
- (9) 对主要环境条件等影响量的认识不当或测控不完善;
- (10) 对模拟式仪器的读数有人为偏移。

在相同条件下的重复测量中,所得测量值一般不尽相同,这表示每次测量的误差不同,

并且在测量之前不可预知测量值是偏大些或偏小些，例如用手按秒表测摆的振动周期每次不尽相同的情形。这是偶然因素造成的，这一类误差称为**随机误差**。

还有如下的不同的测量例子：

(1) 用一块 2.5 级 0 ~ 1 A 的电流表测一回路的电流 I 为 0.73 A，而用另一块 0.5 级 0 ~ 1 A 的电流表测同一回路电流为 0.716 A；

(2) 用一天平称一物体质量，物体在左盘，砝码在右盘，平衡时，砝码值为 74.251 9 g，物体与砝码交换后则为 74.251 9 g；

(3) 测一单摆的振动周期 T ，当摆的振幅在 5° 附近时测得 $T_1 = 1.983$ s，振幅在 10° 附近时为 $T_2 = 1.987$ s。

上述各项测量值在重复测量时基本不变，但随测量条件的改变（换表、交换称盘、增加摆角等）而改变，此类误差称为**系统误差**。

测量值的误差均同时包涵随机误差和系统误差，研究误差的目的是：

(1) 尽量减小测量值中影响较大的误差；

(2) 对残存的误差的大小给出某种估计值（估计不确定度）。

绝对误差与相对误差 设被测量 X 的测量值为 x ，其真值为 a ，误差 $\varepsilon = x - a$ 称为绝对误差； ε 与 a 的比值 ε/a 称为相对误差。应注意绝对误差和误差绝对值 $|\varepsilon|$ 不同。实际上绝对误差 ε 与真值 a 不可确知，在以后将讨论对它作某种估计。

1.2.3 系统误差

对实验进行理论分析或对比实验之后，可以得知其系统误差的来源，并可采取一定的措施去削减系统误差。由于天平左右臂长不完全相等引入的系统误差，可将物体放在天平左盘、右盘上各称两次取平均去消除。由于摆的周期与振幅有关，缩小振幅可以减小系统误差，但是振幅不宜过小，当测量要求更高时，可根据理论分析得出的修正公式去补正。有时是仪器自身的误差而引起系统误差。

工厂生产仪器要经过设计、选材、加工、组装和校验一系列过程，在此生产过程中产品将或多或少偏离设计值，这是仪器的基本误差。国家规定工厂生产某一准确度等级的某种仪器，仪器的基本误差必须小于相应等级的容许误差。例如，生产 2.5 级 0 ~ 100 mA 电流表，在测量范围内测量值的误差要小于 $2.5\% \times 100$ mA，即 2.5 mA；生产 0.5 级 0 ~ 100 mA 电流表，测量值的误差要小于 $0.5\% \times 100$ mA，即 0.5 mA。因而 0.5 级电流表测量值比 2.5 级电流表测量值更可靠。但是任何精密的仪器都是有误差的。

对系统误差的研究主要是：

(1) 探索系统误差的来源，设计实验方案削减该项误差；

(2) 估计残存系统误差的可能范围。

1.2.4 随机误差

在同一条件下，对同一物理量进行重复测量，各次测得值一般不完全相同，这是由于测

量时存在随机误差。一个测得值的随机误差是多项偶然因素综合作用的结果，在测量前不能得知测得值将偏大或偏小。多次测量均有相似的结果，具有以下几个特点：

- (1) 每次测量的随机误差是不确定的；
- (2) 出现正号或负号随机误差的机会相近，大多数有抵偿性；
- (3) 出现绝对值小的随机误差的机会多一些，绝大多数的分布具有有界性和单峰性。

算术平均值 设在相同条件下的 n 次测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的误差为 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ ，真值为 a ，则

$$(x_1 - a) + (x_2 - a) + \dots + (x_n - a) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n$$

将上式展开整理后，两侧除以 n ，得

$$\frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) - a = \frac{1}{n}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n)$$

它表示算术平均值的误差，等于各测量值误差的平均，假如各测量值的误差只是随机误差，而随机误差有正有负，相加时可抵消一些，所以 n 越大，算术平均值越接近真值。因此可以用算术平均值作为被测量真值的最佳估值。

又当测量值的误差中包含有已知的系统误差，则相加时它们不能抵消，这时应当用算术平均值加上修正值为被测量真值的最佳估值（修正值与已定系统误差绝对值相等，符号相反）。

实验标准偏差 具有随机误差的测量值将是分散的，对同一被测量做 n 次测量，表征测量结果分散性的量 s 称为实验标准偏差， s 可由如下贝塞尔公式算出：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.2.1)$$

式中， s 反映了随机误差的分布特征， s 大表示测量值分散，随机误差的分布范围宽； n 为数据的个数； x_i 为测量值； $\bar{x}$ 为平均值。

平均值的实际标准偏差 测量值有随机误差，它们的平均值也必然有随机误差，由于求和时随机误差的抵偿效应，平均值误差的绝对值较小，它的实验标准偏差 $s(\bar{x})$ 也应小于由式 (1.2.1) 求出的 s 值，通常注明 $s(\bar{x})$ 等于

$$s(\bar{x}) = s / \sqrt{n} \quad (1.2.2)$$

实验标准偏差的统计意义 标准偏差小的测量值，表示分散范围较窄或比较向中间集中，而这种表现又显示测量值偏离真值的可能性较小，即测量值的可靠性较高。

按误差理论的高斯分布可知，当不存在显著系统误差时：

$[\bar{x} - s(\bar{x})] \sim [\bar{x} + s(\bar{x})]$ 范围内包括真值的概率约为 2/3。

$[\bar{x} - 1.96s(\bar{x})] \sim [\bar{x} + 1.96s(\bar{x})]$ 范围内包括真值的概率约为 0.95。

关于测量次数 n ，增加测量次数 n ，计算平均值时的抵偿效果会好些，从式 (1.2.2) 可知 n 增大 $s(\bar{x})$ 将变小，所以增加测量次数对提高平均值的价值是有利的。但是测量次数也不是越多越好，因为增加 n ，测量时间就要延长，实验环境可能出现不稳定，实验者也要疲劳，

这将引入新的误差。对此一般的原理是，在随机误差较大的测量中要多测几次，一般实验取 6~10 次为宜，分散性小的多数一般测量从效率考虑是单次测量。

1.2.5 实验中的错误与高度异常值及粗大误差

实验中有时出现错误，可能是公式错了、装置安错了、电路联错了、对象观察错了、仪器操作错了、数读错了、计算错了等。实验搞错了在时间上和精神上都是损失，我们首先要防止出现错误，其次要尽早地发现错误。

防止错误的关键是熟悉实验理论和条件，明确要观察的现象，懂得正确使用仪器。尽早发现实验中的错误是实验者的良好修养。初学者往往只顾观测而忽视分析，由于未及时发现错误，造成很多数据作废或重做实验。应当养成一边观测一边分析思考的习惯。

数据分析是发现错误的重要方法。

例如：测量单摆摆动 50 个周期的时间，得出 98.4 s、96.7 s、97.7 s，从数据可知摆的周期接近 2 s，但是前两个数据相差 1.7 s，后两个相差 1.0 s，它们都在半个周期以上，显然这样大的差异不能用手按秒表稍许提前或错后的操作不当去解释，即测量有错误。

在一组数据中，有时有一两个稍许偏大或偏小的数值，如果简单的数据分析不能判定它是错误数据，就要借助于误差理论。

粗大误差 粗大误差是实验中所出的错误，要尽量避免。

1.2.6 测量不确定度

测量的是测得被测量在测量条件下的真值，前已讨论这是不可能的，测得值只能是真值的近似值，现在要讨论不是测得值和真值偏离的大小，而是如何计算测得值与真值之差的可能的范围，即测量的不确定度。

测量不确定度的来源有多个，这些不同来源的不确定度在计算方法上只有两类：一类称为 A 类分量，它是用统计学方法计算的分量，是随机误差性质的不确定度；另一类称为 B 类分量，是用其他方法（非统计方法）评定的分量，是系统误差性质的不确定度，计算不确定度，常用计算标准去表示，称为标准不确定度。

1. 直接测量值的标准不确定度的 A 类分量 $u_A(x)$

测量 x 的平均值 $\bar{x}$ 的实验标准差

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

取 x 的标准不确定度的 A 类分量

$$u_A(x) = s(\bar{x}) \quad (1.2.3)$$

当测量值 x 的分布为正态分布时，不确定度 $u_A(x)$ 表示 $\bar{x}$ 的随机误差在 $-u_A(x) \sim +u_A(x)$ 范围内的概率近似为 2/3。

2. 直接测量值的标准不确定度的 B 类分量 $u_B(x)$

设 x 误差的某一项的误差限为 Δ , 其标准差 $s = \Delta/k$ (k 为与该未定系差分量的可能分布有关的常数), 则标准不确定度 B 类分量为:

$$u_B(x) = \Delta/k \quad (1.2.4)$$

按均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 则 $u_B(x) = \Delta/\sqrt{3}$, $\bar{x}$ 的该项误差在 $-u_B(x) \sim +u_B(x)$ 范围内的概率为 57%。

【例 1】使用量程 0 ~ 300 mm, 分度值 0.05 mm 的游标卡尺测量长度时, 按国家计量技术规范 JJG30—84, 其示值误差在 ± 0.05 mm 以内, 即极限误差 $\Delta = 0.05$ mm, 则由游标卡尺引入的标准不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = 0.05 \text{ mm} / \sqrt{3} = 0.029 \text{ mm}$$

【例 2】使用数字毫秒计测一时间间隔 t , 按 JJG602—89 其示值误差在 $\pm$ (晶体频率准确度 $\times$ 时间间隔 $t + 1$ 个时标) 范围内, 频率准确度为 1×10^{-5} 。

当 $t = 2.157$ s 时, 则 $\Delta = (1 \times 10^{-5} \times 2.157 + 0.001) \text{ s} \approx 0.001$ s, 则由数字毫秒计引入的标准不确定度 $u_B(x)$ 为

$$u_B(x) = 0.001 \text{ s} / \sqrt{3} = 0.00058 \text{ s}$$

3. 合成标准不确定度 $u_C(x)$ 或 $u_C(y)$

对一物理量测定之后, 要计算测得值的不确定度, 由于其测得值的不确定度来源不只一个, 所以要合成其标准不确定度。

例如, 用螺旋测微计测钢球的直径, 不确定度的来源有:

- (1) 重复测量读数 (A 类评定);
- (2) 螺旋测微计的固有误差 (B 类评定);

又如, 用天平称量一物体的质量, 不确定度的来源有:

- (1) 重复测量读数 (A 类评定);
- (2) 天平不等臂 (B 类评定);
- (3) 砝码的标称值的误差 (B 类评定), 标称值指仪器上标明的量值;
- (4) 空气浮力引入的误差 (B 类评定)。

由不同来源分别评定的标准不确定度要合成为测得值的标准不确定度。首先应明确一点, 作为标准不确定度不论是 A 类评定或 B 类评定在合成时是等价的; 其次是合成的方法, 由于实际上各项误差的符号不一定相同, 采用算术求和将可能增大合成值, 国际统一约定采用平方根法, 合成两类分量。

对于直接测量, 设被测量 X 的标准不确定度的来源有 k 项, 则合成标准不确定度 $u_C(x)$ 取下式中的 $u(x)$ 可以是 A 类评定或 B 类评定。

$$u_C(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^k u^2(x)} \quad (1.2.5)$$

对于间接测量, 设被测量 Y 由 m 个不相关的直接被测量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 算出, 它们的关系为 $y = y(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 各 x_i 的标准不确定度为 $u(x_i)$, 则 y 的合成标准不确定度 $u_c(y)$ 为

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (1.2.6)$$

偏导数 $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ 为灵敏系数, $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ 的计算与导数 $\frac{dy}{dx}$ 的计算很相似, 只是计算 $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ 时要把 x_i 以外的变量作为常量处理, 对于幂函数 $y = Ax_1^a \cdot x_2^b \cdots x_m^k$, 由于

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = y \frac{a}{x_1}, \frac{\partial y}{\partial x_2} = y \frac{b}{x_2}, \dots, \frac{\partial y}{\partial x_m} = y \frac{k}{x_m}$$

式 (1.2.6) 成为比较简单的形式:

$$u_c(y) = y \sqrt{\left(a \frac{u(x_1)}{x_1} \right)^2 + \left(b \frac{u(x_2)}{x_2} \right)^2 + \dots + \left(k \frac{u(x_m)}{x_m} \right)^2} \quad (1.2.7)$$

4. 测量结果的报道

$$Y = y \pm u_c(y) \quad (\text{单位})$$

或用相对不确定度则

$$Y = y(1 \pm u_r) \quad (\text{单位})$$

测量后, 一定要计算不确定度, 如果实验时间较少, 不便于比较全面计算不确定度时, 对于随机误差为主的测量情况下, 可以只计算 A 类标准不确定度作为总的标准不确定度, 略去 B 类标准不确定度不计; 对于系统误差为主的测量情况下, 可以只计算 B 类标准不确定度作为总的标准不确定度。计算 B 类标准不确定度时, 如果查不到该类仪器的容许误差, 可取 Δ 等于分度或 $\frac{\Delta}{\sqrt{3}}$ 。

对于间接测量结果其不确定度可用如下方法进行:

- (1) 对函数求全微分 (对加减法), 或先取对数再求全微分 (对乘除法);
- (2) 合并同一分量的系数, 合并时, 有的项可以相互抵消, 从而得到最简单的形式。
- (3) 系数取绝对值;
- (4) 将微分号变为不确定度符号;
- (5) 求平方和。

以上是操作过程, 不是数学推导。所谓“不确定度符号”, 可以指各直接测量值的最大允差、标准差或合成标准不确定度等, 但在同一式中必须性质相同, 具有相同的置信概率。这样, 间接测量结果的置信概率不变。

有时间接测量结果其不确定度可依表 1.2.1 中公式进行。