

普通物理实验

H. F. 迈纳斯 W. 埃彭斯泰 K. H. 穆尔 著

恽 瑛 曹 恕 潘人培 黄福元 等译

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书是一本大学普通物理实验教材,它与 E. 瑞斯尼克、D. 哈里德著的《物理学》相配合,由 H. F. 迈纳斯等著。全书共分 14 章,73 个实验,其中包括:力学实验 26 个;热学实验 6 个;电磁学实验 21 个;波动和光学实验 13 个;原子物理和核物理实验 7 个,内容较全面,有些实验国内很少见。

本书适合于各类大专院校以及业余大学、电视大学等作为普通物理实验的教学参考书。

H. F. Meiners W. Eppenstein K. H. Moore

LABORATORY PHYSICS

John Wiley & Sons, Inc., 1969

普通物理实验

H. F. 迈纳斯 W. 埃彭斯泰 K. H. 穆尔 著

恽 瑛 曹 恕 潘人培 黄福元 等译

责任编辑 陈菊华

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

*

1987 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1987 年 1 月第一次印刷 印张: 20 插页 1

印数: 0001—5,400 字数: 458,000

统一书号: 13031·3363

本社书号: 4612·13—3

定价: 4.70 元

译者前言

本书是与 R. 瑞斯尼克(R. Resnick)、D. 哈里德(D. Halliday)合著的《物理学》一书相配合的普通物理实验教材,由 H. F. 迈纳斯(H. F. Meiners)等合著。H. F. 迈纳斯是一位有名望的实验物理学家,与 R. 瑞斯尼克同为美国伦塞勒多科性工业学院(Rensselaer Polytechnic Institute)物理系教授,1971 年获得美国物理教师协会的“密立根奖”,1972 年获得“美国杰出教育家奖”,主要著作有《物理实验》、《物理演示实验》、《物理科学探索》等,他被公认为对物理实验作出杰出贡献的物理学家。

全书共十四章,73 个实验,内容比较全面,某些实验为国内其它实验教材所少见,适合于各类大专院校以及业余大学、电视大学等作为普通物理实验教学参考书。

由于书中涉及的某些实验设备我们没有使用过,也缺乏相应的产品说明书,加之译者水平有限,错误和不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

参加本书翻译工作的有恽瑛、曹恕、潘人培、黄福元、柯景风、叶善专、朱育群、吴超明等同志。

1984 年 4 月

序 言

在最近几十年间,工程与科学的一切领域中的技术进步,以及固体物理学、原子核物理学与高能物理学、量子理论的发展已经强调了微观世界,即原子及其组成部分的世界。这就要求每一个未来的工程师与科学家培养他自己的观察现象、提出问题、以及找出原因(如果可能的话)的独创性。这是不可能在短期内做到的,而需要逐步地有指导地向他们介绍分析的基本方法。

物理实验课的目的并不象人们通常想象的那样简单,那样容易定义。它们不可能用一句话加以概括。当今的物理实验课的目的不是验证已知的定律,也不是盲目地把实验数据代入公式,而“造出”一个答案。物理实验课的目的也不是重复那些涉及物理定律的重大应用及工程技术的工程实验课,虽然偶尔作为一种学习手段的重复是可取时我们也重复。

实验课在物理学中不是一门独立的课程。它是理论学习的一个组成部分,并且必须这样看待。在实验室中,学生可以实际接触理论上讲的一些基本定律和原理。

学生在学会观察现象、提出问题以及找出原因之前,他必须掌握一些为最终满足其求知欲所必需的基本工具(或技术)。掌握的程度如何,取决于该生对他的实验工作的态度。

这门实验课的目的是:

1. 通过学生的实际实验工作,向他们介绍实验方法的重要性。
2. 把课堂上讲的理论应用于现实领域中的问题,这些问题有助于加深对经典和近代物理学基本原理的理解。
3. 向学生介绍在科学与工程中普遍使用的数据分析方法。
4. 建立“误差观念”,使工程师与科学家起码应该知道他的测量的相对价值,而不管其测量类型如何。不应把本书中讲到的“精确度分析”方法看作是确定一种测量的相对价值的唯一方法。精确度分析以不同的形式出现在企业、行政管理和科学的一切分支中,学生应该熟悉它的各个侧面,并且应该认识到,在学习基本技术的同时,在应用微积分方面也应更熟练起来了。
5. 使学生通过直接接触而熟悉许多基本测量仪器及它们的应用。
6. 使学生了解,如图解法、差分分析法、微积分应用等等这样一些工具是十分重要的。
7. 使学生深感到,一个即使看起来对他的专业前途似乎是没有价值的实验,由于它用到的分析方法和数学方法而对他的智力发展也会有直接的帮助。
8. 从一开始就向学生介绍参考文献的使用,从而使他们看到其它观点与该问题的处理方法的价值。使用参考文献的习惯,对学生的学术上和今后的专业上的进步将是极为宝贵的,因为参考文献中的一些新鲜见解可以克服思维上的惰性。
9. 使学生通过提出实验报告而提高他的自我表达能力。
10. 让学生直接与指导教师接触,因而有利于对概念和方法作周密的指导和个别的讨论。

上述这些目的中的某些目的如何达到,取决于所提供的实验课的类型。在近几年中,

人们在谈论各种类型的普通物理实验课,例如,“传统”型实验课、“自由”型实验课、“分散”型实验课即“伯克利”型实验课。据作者的看法,任何一种方法都不一定比其它方法更为成功。在本实验教材中,我们力图结合使用尽可能多的不同做法,这就给教师或学生一个选择他们自己喜欢的实验类型的机会。

本书中有些实验有颇详细的说明,另一些实验故意写得很含糊而把细节留给学生。各个实验在难度和实验时间方面差别很大。有些实验使用很简单的设备,而在另一些实验中,仪器是相当复杂的。大多数实验都有若干个不同部分,但不希望学生全部都做;通常是他可以有所选择。

不应把本实验教材看作一本须逐字照办的说明书,应把它用作各个实验的一般性指导书。希望学生偏离书中给出的实验说明,并在实验中加入自己拟定的实验内容。本书只提出各种方案而不作详述,从而强调学生的创造性与主动性。某些特殊实验及各章的引论一般都提出了进一步的工作。有些设备可以轻而易举地用来做本书没有加以描述的“自由”型实验,例如第五章中所讨论的低摩擦装置、带有附件的示波器、微波设备和激光器。

虽然在任何一个实验中没有特别提到计算机在物理实验课中的作用,但是很明显,不应忽视计算机的合理使用。用计算机来作冗长计算的程度,取决于现有设备及学生的经验。就学生而言,使用计算机可以增加兴趣和动力。有许多实验,学生已编排并使用了计算机程序;他们能相当详细地进行计算,特别是在计算误差时。许多正在上物理实验课的二年级学生已把他们的实验数据用作编排程序的练习,或者完成计算程序课的要求。

写实验报告在传统上是一项与物理实验有关的很花时间的任务。我们不要低估很好地表示出实验结果的重要性,但不必花过多的时间。作者没有建议实验课应如何组织,也没有建议学生应交出什么类型的实验报告。这一点留给担任这门课的教师去决定。我们曾用“口头报告”形式,即学生向自己的班级或只向自己的指导教师报告实验中所得到的结果,而收到很好的效果。应该鼓励学生在实验记录本上记录所有的实验数据,包括定性的观察结果。

关于误差的第一章,有时必须十分仔细地加以研究,在第一年的物理课中就应该把这部分内容正式指定给学生。第二章关于图解法的概念,将应用于所有的实验,在适当的时候也要涉及它。第三章包括某些重要设备部件的简单描述,学生在使用有关设备之前必须阅读有关的那几节。

虽然本书是以作者在1956年出版的《分析实验物理学》一书为基础,但是已补充了许多实验。大多数老实验都已改写得没那么刻板了,包括了更多的任选部分,并使用了新近才有的装置。例如,在1956年,还没有气垫导轨和气垫桌,激光器也还没有发明。这两种设备在现在的许多实验中都用上去了。

作者感谢伦塞勒多科性工业学院(RPI)几千名一、二年级学生,他们试做了本书的所有实验;他们的建设性批评给了我们很大的帮助。作者也感谢在普通物理实验课任课的研究生助教以及教授们,他们对本书提出了许多意见。我们也感谢向我们提供了产品照片和文字说明的各科学仪器制造厂商。作者还感谢Walter Eppenstein夫人为本书打印了最后手稿。

作者

1972年5月于纽约特罗伊

目 录

第一章 测量与误差	1
1.1 引言	1
1.2 误差限、置信区间和计算风险率	2
1.3 测量的类型	3
1.4 实验误差	4
1.5 系统误差	5
1.6 理论误差	5
1.7 仪器误差	7
1.8 环境误差	7
1.9 观测误差	9
1.10 刻度与视差	9
1.11 系统误差的传递	10
关于系统误差的问题与习题	11
1.12 偶然误差或无定误差或统计误差	14
1.13 二项分布	19
1.14 泊松分布	20
1.15 高斯(“正态”或误差)分布	22
1.16 中心值或代表值	25
1.17 离散的量度	26
1.18 平均离差 a. d. 和标准离差 s. d. 之间的关系	29
1.19 测量值的剔除	29
1.20 平均值的可靠性	30
1.21 取样尺度(一组测量结果的数目)效应	31
1.22 确定一个直接测量结果的最终误差限的步骤概要	32
1.23 间接测量结果和它们的精确度指标(误差限)	33
1.24 有效数或有效位	38
1.25 小结	39
第二章 图-表法	41
2.1 引论	41
2.2 坐标分度的选取和标注	41
2.3 画出表示数据的点子	44
2.4 以曲线拟合所画的点子和经验方程	44
2.5 准备标题	54
2.6 表差法	54

2.7 小结	56
第三章 实验室仪器	57
3.1 引论	57
3.2 长度和面积	57
米尺	57
游标原理	57
角游标	57
游标卡尺	58
千分卡尺	59
定极求积仪	60
3.3 质量和重量	64
3.4 时间	65
3.5 温度与压力	66
温度计	66
气压计	67
3.6 电路元件	68
电源	68
标准电池	69
电阻器	69
电容器和电感器	71
3.7 电学测量仪器	72
直流电表	72
交流电表	74
瓦特表	75
欧姆表和万用表	76
记录仪	76
阴极射线示波器	76
电子开关	78
3.8 光学仪器	78
使用透镜、棱镜和平面镜的注意点	78
视差	79
望远镜	79
显微镜	79
分光计	81
3.9 光源	82
复色光源	82
单色光源	82
激光器	83
微波	84
3.10 核物理仪器	85
扩散云雾室	85
盖革-弥勒	86

定标器	87
第四章 力学	88
引论	88
实验 4-1 长度、面积和体积的测量	88
实验 4-2 振动弹簧	91
实验 4-3 单摆	93
实验 4-4 振动环	94
实验 4-5 直线运动的分析	96
实验 4-6 摩擦系数——斜面	98
实验 4-7 径向加速度(向心力)	99
实验 4-8 匀速圆周运动的研究	101
实验 4-9 冲击摆——抛体运动	103
实验 4-10 散射	106
实验 4-11 转动和平动	112
实验 4-12 转动运动学和转动动力学	114
实验 4-13 变加速度的研究	116
实验 4-14 弹性体的伸长	117
实验 4-15 驱动阻尼线性振子	120
实验 4-16 驱动扭摆的共振分析	122
实验 4-17 引力的分析	131
第五章 低摩擦装置	136
5.1 引论	136
5.2 气垫导轨	136
5.3 低摩擦运动体实验	137
实验 5-1 一维运动	139
实验 5-2 质量的概念; 牛顿第二运动定律	140
实验 5-3 向心力	141
实验 5-4 线性振子	142
实验 5-5 一维碰撞	143
实验 5-6 质心的运动	144
实验 5-7 线动量	144
实验 5-8 二维碰撞	145
5.4 气垫桌	147
5.5 空气轴承旋转仪	147
实验 5-9 角动量守恒	147
第六章 热学	149
6.1 引论	149
6.2 量热术	149
实验 6-1 量热术——比热和熔解潜热	151

实验 6-2	量热术——热功当量	154
实验 6-3	线膨胀	156
实验 6-4	热导率	157
实验 6-5	热力学常数的测定	161
实验 6-6	分子运动论模型	164
第七章	静电学和直流电	173
引论		173
实验 7-1	电场	174
实验 7-2	静电秤	175
实验 7-3	电压和电阻	178
实验 7-4	基尔霍夫定则	181
实验 7-5	热电学	183
实验 7-6	等离子体物理	186
第八章	电学测量	189
引论		189
实验 8-1	达松伐耳电流计常数的测定	189
实验 8-2	冲击电流计——定标和使用	191
实验 8-3	电阻和热敏电阻的温度系数(惠斯通电桥)	193
实验 8-4	太阳能电池的电动势(电位差计)	196
实验 8-5	阴极射线示波器	198
第九章	磁学	201
引论		201
实验 9-1	毕奥(安培)定律——地磁场	201
实验 9-2	磁化强度和磁导率	203
实验 9-3	电流秤	208
实验 9-4	e/m 的测定	210
实验 9-5	圆形线圈的磁场	213
实验 9-6	霍耳效应	217
第十章	LCR 电路与电子学	220
引论		220
实验 10-1	LCR 电路	220
实验 10-2	交流串联共振电路	225
实验 10-3	二极管	227
实验 10-4	三极管	228
第十一章	波动	231
引论		231
实验 11-1	横波——振动弦线	231
实验 11-2	空气中的声速	233
实验 11-3	金属中的声速	235

实验 11-4 纵波的研究	236
第十二章 几何光学	241
引论	241
实验 12-1 折射计	241
实验 12-2 透镜	243
实验 12-3 显微镜	245
实验 12-4 折射率——分光计	246
第十三章 波动光学	249
引论	249
实验 13-1 干涉和衍射	249
实验 13-2 衍射光栅	251
实验 13-3 迈克耳孙干涉仪	253
实验 13-4 用微波的布喇格衍射	257
实验 13-5 光的偏振	262
第十四章 原子物理和核物理	266
引论	266
实验 14-1 密立根油滴实验	267
实验 14-2 光电效应	274
实验 14-3 光谱分析	277
实验 14-4 电子衍射	279
实验 14-5 γ 射线和 β 射线的吸收	286
实验 14-6 人工放射源的半衰期	289
实验 14-7 核粒子和高能粒子	293
附录	298
A-1 线路图	298
A-2 符号	304
A-3 空气的密度	305
A-4 参考书	306
A-5 三角函数表	307
A-6 常用对数	308

第一章 测量与误差

本章的内容和水平是按大学普通物理的初始阶段编写的,适用于初学者。由于这个缘故,并未包括那些超过最初等微积分知识的推导。虽然对于从统计学理论推导的那些关系式只作介绍而不加以证明,但是我们已尽一切努力以合乎逻辑又可理解的方式来介绍这些基本概念。

在多学期制普通物理课的后阶段,或在第二学年,或在中级程度的各课程中,学生将发现最好能查阅或者购买下列一本或几本更深广的论著(全都涉及物理上的应用):

1. 《科学中的概率与实验误差》(Lyman G. Paratt, *Probability and Experimental Error in Science*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1961,普及本 1966)p. 255.

2. 《观测误差及其处理》(J. Topping, *Error of Observation and Their Treatment*, Reinhold, New York, 1955 及以后,英国物理仪器专论学生版,普及本)p. 119.

3. 《实验-测量理论和实验设计引论》(D. C. Baird, *Experimentation—a n Introduction to Measurement Theory and Experimental Design*, Prentice-Hall, Inc., Englewood, New Jersey, 1962)p. 198.

4. 《物理测量结果之分析》(E. M. Pugh and G. H. Winslow, *The Analysis of Physical Measurement*, Addison Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Massachusetts, 1966,普及本)p. 248.

此外,还有许多与数理统计有关的有用的优秀的初、中级书籍和教材。

1.1 引言

开尔文(Kelvin)勋爵曾用语言把测量的重要性概括为一门科学的最本质部分,这些话将值得摘录如下:

“我常说,假如你能够量度你所谈的东西并能用数量表示它,你对它就有些了解了;假如你不能量度它,不能用数量表示它,你对它的知识就是贫乏而不能令人满意的。这也许只是知识的入门,但不管怎样,你的知识还没有提高到科学的程度。”

大家熟知,指定一个物理上可测的量至少需要两个项目:

1. 数值.
2. 单位.

(必要时,对矢量和某些张量的方向加以说明。)第三个项目经常被省略,但实际上同样很重要。

3. 所说数据的可靠性或可置信程度的指标,这常常通过指定“精确度指数”来实现。

随着一门科学的发展与成熟,其实验势必变得更加精确及(或)更加复杂。但总存在某些领域或特殊的实验,在这些实验中只能得到较低的精确度。在另一些实验中,中等精确度或较低的精确度是完全够用的。在一个发展中的科学分支的前沿(例如原子核或空间科学)中,极高的精确度在一种情况下或许是可能而必要的;但在另一种情况下,得到一

个100%以下可靠的数值,甚至获得可靠到一个数量级的数值,也许就是一个重大的突破了。

每个科学家和工程师都应该有能力估计一个直接测出或算出的测量结果的相对价值。他应当树立“误差观念”,任何时候,甚至在不要计算误差时也应一直想到它。这一点,在处理低精确度的量时与处理高精确度的量时一样是十分重要的。为了有助于达到此目的,本章将初步介绍测量和误差理论及其在单个客体的直接测量结果和由此算出的结果(间接测量结果)中的应用。

1.2 误差限*、置信区间和计算风险率

为了了解和鉴别各种测量分析方法,重要的是认识到一个测量的数值并不象整数3274或者甚至象无理数 $2/3$ 或 π 那样是个唯一的数值。相反,一个测量结果,不论由一次试验产生,还是由重复观测产生,它都仅仅是所有观测结果的全体中的一个取样。它易产生由于外界环境和其他因素造成的统计涨落;它是使用不能做到完全没有误差的仪器得到的;它还或多或少地涉及到作为测量过程中起决定性因素的观测者,一个难免有错误的人。甚至连单位的选择也会由于与单位本身的指定或定义有关的不精确性而造成微小误差。真正值得注意的是,目前在少数情况下,测量结果的准确度与精确度已达到使测不准量约为被测量的 10^{11} 分之一!

相对可靠性的最简单的表示是十分注意有效数字。这完全适用于许多日常工作的情况,而且当数据或时间不够而不可能作详细的分析时,必须始终记住并加以应用。这里我们将不讨论有效数字。高中实验与普通化学中的经验可以通过第1.24节的结论加以补充。

现在假设我们遇到一个记作 $28.4_3 \pm 0.2_3 \text{ km/s}$ 的测量结果。单注意有效数字就应该把这个数值四舍五入成 28.5 km/s (三位有效数字)。显然, $\pm 0.2_3 \text{ km/s}$ (比测量出的 28.4_3 km/s 的1%稍小)起着精确度指数或某种误差量度之作用。可惜,如我们将看到的,能用作指数或误差量度的可计算量有许多,因而重要的是明确指的是哪一种。

我们将给出准确而完整的说法:

(a) 28.4_3 km/s , 误差限为 $\pm 0.2_3 \text{ km/s}$, 或者, 28.4_3 km/s , 误差限为 $\pm 0.9\%$ 。这意味着实验者尽力保证¹⁾误差不超过给定的这个极限值。把这个结果重说一遍是:我们可确信(置信水平为100%,即肯定)这个值在 28.2 和 28.7 km/s 之间。

误差限,既安全又保守,有时甚至是过分保守的。当实验数值能够重复时,正象通常那样,现代统计学这有力的工具可用于缩小所指出的置信区间或误差范围,但要以降低置信水平为代价。为了比较、校核或建立判据,这就相当于取一个计算风险率,它具有公正标定的概率比。为了说明一般概念,举几个例子。例中所讲的各个指数以后再讨论。

(b) 28.46 km/s , 概率误差为 $\pm 0.05_4 \text{ km/s}^{**}$ 。这是一个习惯上保留下来的坏名字。它意味着有(约)50%的置信水平,即不管我们知不知道这个值在 $\pm 0.05_4 \text{ km/s}$ 之内,反

* Limit of error 亦译作“极限误差”。——译者注

1) 对一辆汽车的保证仅仅是制造者和商人作出的,对实验数据的保证则是建立在仪器制造者和实验者的诚实的基础上。

** 此为假定值。——译者注

正差不多。这个指数势必会使一些数值看起来比它们实际值更好些，并很可能使粗心的人搞错。从前它很受物理学家的欢迎，现在用得就很少了。

(c) 28.46 km/s, 标准误差(S.E.)为 $\pm 0.08_1$ km/s, 这还是一个不好的名字, 但它是一个很合理的统计量, 这个指数目前也许比其他指数用得更多。它意味着有约 68% 的置信水平, 无限多次的重复, 将约有 2/3 的次数产生 $28.46 \pm 0.08_1$ km/s 的值, 或者说包括“真值”在内的置信区间为 28.38~28.54 km/s, 其对于非置信区的概率比为 2:1。

(d) 其他常用的指数是 ± 2 S.E., 置信水平为 95%; 以及 ± 3 S.E., 置信水平为 99.7%; 这是统计误差限的相当通用的量度, 因为超出它的可能性非常之小。在一千次中超过 3 S.E. 的仅仅约有 3 次。

至此我们应该清楚, 为什么不管对于单个量还是对于经过一系列测量过程的量都应该标出精确度指标。

1.3 测量的类型

测量可以是(1)直接测量或(2)间接测量。

(1) 直接测量是把一个物理客体的未知量 X 与相同客体的已知量或标准量 S 直接比较(通常借助于仪器)的结果。三种最重要的直接比较是:

(a) 均衡测量、补偿测量或调零测量

此时, 把标准值 S 选择或调节得等于 X 值, 并记下平衡值。这种测量可以得出非常精确的结果。

一个明显例子是用老式的等臂天平称重。另一例子是用惠斯登电桥在比率 1:1 时测量电阻。

(b) 小差值测量

如果差值

$$X - S = \Delta$$

已测定, 那么

$$X = S + \Delta \quad (\Delta \text{ 可正可负})$$

如果 Δ 值不大, 那么 Δ 的误差比较大(按百分比)也是可以容许的, 并不致给 X 带来很大的误差。例如, 考虑用一个 0.5 英寸的块规作为标准量(S) 和一个供测量 Δ 用的差数指示器来测量一段稍大于 0.5 英寸的长度。假如用 $S = 0.500000$ 英寸 ± 5 微英寸 (± 0.000005 英寸)的块规时, 把千分表调节到读零。现在用 S 代替 X , 并且假定千分表读出差值 $\Delta = 98 \pm 2$ 微英寸。

显然, $X = 0.500098$ 英寸, 并且还将说明, Δ 的 ± 2 微英寸的测不准量等于 Δ 值的 $\pm 2\%$, 它对 X 的误差产生的影响比 S 值的 0.500000 英寸中 ± 5 微英寸(0.001%)的容许偏差产生的影响小。这是一个颇为极端的例子, 但说明了这种可能情况。

(c) 比率测量

将一个未知量 X 与一个已知量 S 的某分数或倍数 R 作比较, 此时

$$X = RS$$

(R 由实验上加以确定)。一个很好的例子就是用于测量装置和模拟计算机中的线电位差计。这种情况下, 将标准电位差 S 加到电阻的两端, 这电阻通常是一根均匀的长导线(它

可以绕起来或叠起来), 我们可以使滑动触点选取一部分可确定的长度(R), 因而选取相同比例的一部分电阻. 对于均匀导线, 这也意味着选取的电位差对电位差 S 的比率也是 R .

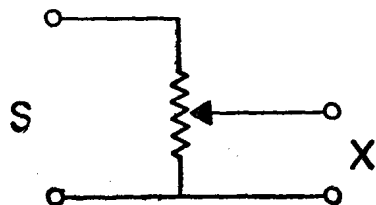


图 1-1

R 测定的精确度(按分数或百分数)将成为被测量 X 的可靠性的主要因素(见图 1-1).

(2) 间接测量由计算作为一个或几个直接测量量的函数的数值而得出.

一个根据单个直接测量量的间接测量的很简单例子是从球半径或最好是直径的直接测量来确定球体积:

$$V = \frac{1}{6} \pi D^3.$$

直径为 D 是一段长度, 可以用足以适用大多数场合的准确度直接加以测量. 于是, 体积 V 可以算出, 而 D 的任何不可靠性都被复合了三次.

再者, 一个直径为 D , 长度为 L 的直圆柱体积是

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 L.$$

如果 D 和 L 是由没有偏见的观测者用不同仪器测出的, 则 D 和 L 的误差将不必复合. 当然, D^2 将有复合效应.

我们的目的是用简单而可靠的方法来计算直接测量结果的可靠度, 并通过间接测量中的计算求出测不准量.

1.4 实验误差

不能把严重的差错(粗差)看作实验误差的主要部分. 用错仪器、读错刻度、数据处理错误、数值和数学上的错误以及其他类似差错, 如果有适当训练、有检测、有经验和有人合作, 是可以当作可避免的差错而不予考虑的. 可惜, 对实验误差却不能这样说. 实验误差尽管可以减小, 但总是伴随着我们. 次要的差错与不可避免的误差之间的界线是很细小的.

因为性质的差异和处理方法不同, 把实验误差分为两大类是合乎习惯的也是方便的.

(a) 系统误差是由一些可以确定的原因造成的, 如果对该过程的物理学是足够了解的话, 至少它在原则上是可以求出或修正的. 它们之所以被称为系统误差, 是因为它们产生一致的效果——其数值一直偏高或一直偏低. 关于处理系统误差的方法和典型例子在第 1.5 到 1.11 节中加以介绍.

(b) 偶然(无定的或随机的)误差是由大量微小的、涨落性的个别扰动累积而造成的, 这些扰动联合给出在某时刻(或某地点上)过高而在另一时刻(或另一地点上)又过低的结果. 个别起因是可以知道的或者只能猜到. 虽然偶然误差在总的效果上通常是可以减小的, 但它们决不能完全消除, 也不能个别地加以计算. 一般来说, 一个测量过程的灵敏度越高, 偶然的偏差起的作用就越重要. 用于分析偶然误差的统计方法从第 1.12 节开始介绍.

(c) 残留误差有时引入残留误差来描述在已经作了尽量修正之后仍然存在或还残留而有疑义的不确定的系统误差. 因为它们是不确定的, 所以它们可以与偶然误差包括

在一起,虽然残留误差与偶然误差必须稍微不同地加以处理。

用机械架上的一支步枪向靶子射击时取得的中弹分布图,给系统误差与偶然误差提供了一个非常好的类比。步枪瞄准“真正的”靶心,正如我们尽力使实验数据能提供“真”值那样。图 1-2 所示的两个中弹分布代表对两支不同步枪射出的子弹作中等规模的取样,每支枪都以同样方式固定,并瞄准完全相同的靶子。

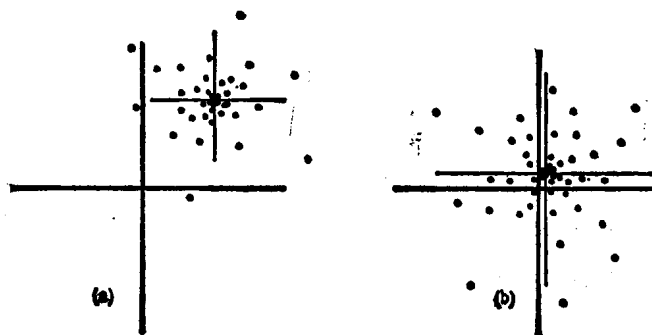


图 1-2

在两种情况中,发射中心对靶心都有系统偏移,图(b)比图(a)小。有人曾经提出,但未被普遍接受,即准确度这词与这一类系统偏移(即系统“误差”)连系在一起。据此,图(b)比图(a)更准确。各个别“值”的离散或散开程度(其各自的位置都作随机变化,并不能预先给予预期),图(a)的比图(b)的小。有人建议把精确度这一词用作离散程度倒数的量度。据此,图(a)的精确度超过图(b)的精确度。在一些术语没有被普遍接受时,最好详细说明这些术语在误差分析中具体指的是什么。

1.5 系统误差

个别的基本粒子,比如电子、光子等等,甚至个别的原子或分子,其行为是不能准确地预言的。这不仅是缺乏合适的仪器或理论、或了解不够的问题,而是由于这些粒子的固有的量子力学性质造成的。值得安慰的是,在我们生活的、进行测量和作绝大多数观测的宏观世界中,涉及大量粒子的总的、统计的行为产生一些现象,在这些现象中,因果关系就象白天和黑夜的关系一样。在处理由系统的扰动因素产生的误差时,往往或多或少会有一种象做家务一样的感觉,这就不令人奇怪了。这并不意味着在每个实验中我们立刻发动一个消除系统误差或使它减到非常小的战役。这种需要花费大量金钱和力气的措施,常常是不必要的,有时甚至是不受欢迎的。如果误差在百分之零点几到百分之几的范围内,那么对绝大部分的测量来说是十分令人满意的。

大多数系统误差都可以简洁地归入如下四种主要类型之一:

1. 理论误差;
2. 仪器误差;
3. 环境误差;
4. 观测误差。

1.6 理论误差

理论误差涉及到用于设计、校准仪器或用于确定间接测量结果的方程式或关系式。在极限情况下,我们可以容许未知的理论误差有一个不大的缓冲的或残留的误差。但是在

大多数情况下,

理论误差容许我们使用那些可以代替无法获得的或非常复杂的公式的近似正确的方程或关系式(或作出修正)。

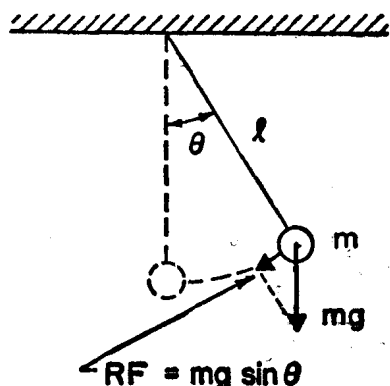


图 1-3 在任意角位移 θ 时, 恢复力 (RF), 即重力 mg 的一个分量 $mg \sin \theta$ 作用在“摆锤”上

科学靠近似法取得最大进步: 首先研究那些最重要的因素, 然后对次要因素作出修正以使问题得以完善。象无摩擦的表面, 无重量的、不可伸长的弦线, 很轻的、无摩擦的滑轮等等这样一些概念, 将作为力学问题的第一级近似解中被忽略的东西以及在后来更加准确的解中又重新被计入的东西而呈现在我们脑海中。

熟知的“单”摆就是一个极好的例子(而且这例子对真实的复摆同样也是很适用的), 见图 1-3。

现在来求一个整循环的摆动时间, 即周期 (T), 如果令 $RF = mg\theta$, 则这个变速运动的微分方程解起来就简单得多。现在, 在小角度的情况下, $\theta \approx \sin \theta$, 因而如果 $\theta = \sin \theta$ 很小, 则周期值按熟知的公式

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

加以计算。

试考察几个 θ 和 $\sin \theta$ 的值。

θ (准确的) (度)	θ (弧度)	$\sin \theta$	百分比差值
1.0	0.01745	0.01745	0.00
3.0	0.05236	0.05234	0.04
5.0	0.08727	0.08716	0.13
10.0	0.17453	0.17365	0.51
15.0	0.26180	0.25882	1.15
30.0	0.52360	0.50000	4.72

如果利用正确的 $RF = mg \sin \theta$ 来求解更加难解的运动方程, 则结果不是封闭形式的答案, 而是一个级数解

这与

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta'}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\theta'}{2} + \dots \right),$$

$$T = T_0 \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta'}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\theta'}{2} + \dots \right),$$

是一样的, 式中 $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 是第一级近似值, 即当振幅 θ' 趋于零时的 T 值。 T 对 T_0 的百分比误差小于相应的 $\sin \theta$ 对 θ 之百分比差值。

应该十分明确, 这种理论误差可以加以修正, 以适应对有关测量过程的总准确度要求。

θ (度)	T_0 (基数 1.0)	T	百分比差值 $\frac{(T-T_0)}{T_0}$
1.0	1.00000	1.00002	+0.002
3.0	1.00000	1.00018	+0.018
5.0	1.00000	1.00048	+0.048
10.0	1.00000	1.00191	+0.190
15.0	1.00000	1.00480	+0.48
30.0	1.00000	1.01808	+1.81

1.7 仪器误差

由于观测者和环境也是整个测量过程的一部分,所以难于把纯粹的仪器误差分出来。当然,分出来是可以做到的,而且今天的仪器制造厂家作好准备以保证他们的仪器“误差将不超过…”。这一类声明给出制造厂家确保他的仪器误差落在此范围之内残留误差限。通用的名称是

“仪器误差限”或“仪器准确限”,

美国标准化学会和美国材料试验学会建议使仪器误差限等于仪器的最小读数或刻度盘的最小可读分度。一个很好的例子就是装在通用的读数电表上的 2~4 英寸面板,这种面板通常刻有 50 个分度(如果是线性刻度盘),而且通常可确保仪器误差限为满度值的 $\pm 2\%$ (即为 ± 1 分度)。这样的仪器通常是可重复读出好于厂家指定的仪器误差限的读数,但是任何达到好于 $\pm 2\%$ 的仪器都要求个别地经常地重新校正。

制造误差限等于或甚小于 0.5% 满度值仪器误差限的读数电表是不经济的。不过,尽管代价很大,有一度时间还是制造过仪器误差限好到 $\pm 0.1\%$ 的笨重的实验室仪表。电位差计和电桥可以更加经济地制造出来,而且达到更高的准确度。

有人曾经估算过,要想通过更换更好的仪器来减少一个数量级的仪器误差限,需要增加的资金花费也许大于一个数量级。但当仪器制造厂家在制造方法、技术或加工等方面有所突破时,就未必是这种情况了。

在过去几十年里,在量测手段方面有了很大改进,其中包括这里还要作简单讨论的减少误差(环境误差和观测误差)的手段。一般说来,我们应当相信制造厂家作出的保证是牢靠的。相当剧烈的竞争以及工业生产的相当好的自行管理使得严重违背仪器误差限保证的情况极其罕见。大多数制造厂家都对它们的仪器超过技术性能这一事实而感到有理由的自豪。关于现有仪器的误差限已不再有任何保密或者含糊的必要了。

当然,这一点是真的,就是粗心或使用不当可能使误差限增大,有些时候增大得很厉害,因此应该去检查或核对。“加固”这个凶恶的动词出自第二次世界大战。让我们战栗地说,许多仪器已经加固(并且小型化)了。

1.8 环境误差

可以把一个定量实验看成一场以观测者为一方,顽抗者自然界为另一方的战斗。设计精良、制作完美的仪器与周密想出的实验程序一起被卷入确立准确度基因的战斗。就象在我们这个世界中的大多数动态过程那样,它们遇到很可能是有害无益的环境压力。