

CAMBRIDGE

An Introduction to  
Uncertainty in Measurement

# 测量不确定度导论

[澳] 莱斯·柯卡普 鲍伯·弗伦克尔 著

Les Kirkup Bob frenkel

曾翔君 骆一萍 申淼 译



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

An Introduction to  
Uncertainty in Measurement

# 测量不确定度导论

莱斯·柯卡普

LES KIRKUP

[澳]

著

鲍伯·弗伦克尔

BOB FRENKEL

曾翔君 骆一萍 申 森 译

**西安交通大学出版社**

Xi'an Jiaotong University Press

This is a Simplified Chinese translation of the following title published by Cambridge University Press:  
An Introduction to Uncertainty in Measurement ISBN 9780521605793  
CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS 2006

This Simplified Chinese translation for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

©Cambridge University Press and Xian Jiaotong University Press 2011

This Simplified Chinese translation is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this Simplified Chinese translation is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and Xian Jiaotong University Press.

本书中文简体字翻译版由剑桥大学出版社授权西安交通大学出版社独家出版发行。

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2009-120

---

### 图书在版编目(CIP)数据

测量不确定度导论/(澳)柯卡普(Kirkup, L.),  
(澳)弗伦克尔(Frenkel, B.)著;曾翔君,骆一萍,  
申森译. —西安:西安交通大学出版社,2011.7  
书名原文:An Introduction to Uncertainty in Measurement  
ISBN 978-7-5605-3957-7

I. ①测… II. ①柯… ②弗… ③曾… ④骆… ⑤申…  
III. ①测量-不确定度-理论 IV. ①TB9

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第122311号

---

书 名	测量不确定度导论
著 者	(澳)莱斯·柯卡普 鲍伯·弗伦克尔
译 者	曾翔君 骆一萍 申森
出版发行	西安交通大学出版社 (西安市兴庆南路10号 邮政编码 710049)
网 址	<a href="http://www.xjtipress.com">http://www.xjtipress.com</a>
电 话	(029)82668357 82667874(发行中心) (029)82668315 82669096(总编办)
传 真	(029)82669097
印 刷	西安交通大学印刷厂

---

开 本	787 mm×1092 mm 1/16	印张	14	字数	211千字
版次印次	2011年7月第1版 2011年7月第1次印刷				
印 数	0001~3000册				
书 号	ISBN 978-7-5605-3957-7/TB·64				
定 价	35.00元				

---

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

---

版权所有 侵权必究

# 译者序

著名俄国科学家门捷列夫说过：“没有测量，就没有科学”，英国科学家库克也认为：“测量是技术生命的神经系统”，这足以说明测量对现代科学技术发展所起的作用。从事测量的人员经常遇到的问题就是如何对自己的测量结果进行评价，常用的方法是采用测量误差来衡量测量的准确度，包括使用“绝对误差”，“相对误差”和“引用误差”等术语。如果一台仪表的准确度用一个相对量来表示，例如 0.2 级，则表示该仪器已被更高准确度等级的标准仪表（例如 0.01 级）校准过，说明采用 0.2 级的仪表测量的结果，其引用误差不超过标准表的 0.2%。这是一种比较粗略的，甚至是定性的描述测量真值的方法，因为它并没有告诉我们真值究竟在哪里。相比之下，测量不确定度这个概念的提出更加科学，它反映的是测量结果中真值所在的定量区间及其出现的概率，并采用绝对值来表示。所以评价一个测量结果的不确定度，必须考虑很多因素，包括标准仪表本身的不确定度，以及随机扰动等对测量真值的影响。正如本书的作者所言，很多教科书中把误差和不确定度混用，这种情况在国内也是存在的；另外，国内的一些教科书上目前仍然只讲授测量误差，而不提及测量不确定度。自从上世纪 90 年代中期，国际计量局和国际标准化组织等机构出版发行了“测量不确定度表示指南(GUM)”以来，测量不确定度已经逐步在全世界的测试计量实验室、认证机构甚至贸易机构中推行。但是在国内，不确定度在工业界还没有被普遍的采纳，测量误差仍然是主要的表示手段，这就需要加强对大学生以及从事测量的专业人员的培训。虽然目前在大学中已经开始把不确定度写入了学生的教材，但是像本书这样能够全面的、系统的而且比较浅显的讲授测量和不确定度的教材还不多见。

本书是由剑桥大学出版社出版发行的大学本科生教材，当然也适用于研究生和其它测量工程师学习和参考。本书的最重要的特点是不仅介绍了不确定度的估计方法，还采用大量的篇幅论述了不确定背后的统计学原理。为了使读者不至于对枯燥的统计学理论产生厌倦，本书还提供了大量生动的实例和练习题，涉及到科学的各个领域，对于读者开拓视野，了解计量学的内容以及掌握不确定度原理很有意义。

本书第 1、2、3、7 章由西安交通大学曾翔君翻译，第 4、5、6、9 章由西安交通大学骆一萍翻译，第 8、10、11 章由西安交通大学城市学院申森翻译，全书由曾翔君

统稿。

在本书的翻译过程中参阅了一些参考书和资料,学习和吸收了不少经验。出版过程得到了西安交通大学城市学院申忠如教授的具体指导,并得到了交大出版社的大力支持,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。另外,研究生郑立翔、张宏韬、李平、任伟、李迎和刘玉领等人也参与了部分翻译、校对以及修改工作,在此对他们的工作也表示衷心的感谢。

由于能力的限制,本书肯定存在不足和错误,不过我们尽量遵照原著进行了翻译,请广大读者指正。

译 者

2011年1月16日夜  
于西安交通大学

# 基于《测量不确定度表示指南(GUM)》的 测量不确定度导论

测量使科学理论具体化,推动了生产工艺的进步,促进了有效的贸易。测量的本质是不确定度,科学与工程领域的学生需要来识别他们测量中的不确定度,并能够对不确定度进行量化。本书介绍的测量和不确定度的内容适合于科学与工程领域的大学二年级和三年级学生。计算和表示不确定度的方法是来自于国际上认可并推荐的标准(即 GUM),其理论基础是统计学,文中还提供了大量的实例以及练习题。另外,对大学本科生的一些典型实验案例的详细分析也有助于强化读者对书中所述内容的理解。本书也适用于那些希望了解这一重要领域中一些最新方法的工业界的人士。本书的其它相关在线资源可参见网址:[www.cambridge.org/9780521605793/](http://www.cambridge.org/9780521605793/)。

Les Kirkup 在高等教育界有 25 年以上的工作经验。在 1990 年移居澳大利亚之前,他在英格兰和苏格兰担任学术职位,现在是悉尼科技大学科学学院的副教授。曾在英国谢菲尔德(Sheffield)获得物理专业的学士学位,在伦敦(London)获固态物理学专业的硕士学位,并在佩斯利(Paisley)获得博士学位。他是美国物理协会、澳大利亚物理协会和澳大利亚计量协会的会员。撰写过三本著作,其中包括《Data Analysis with Excel》(2002,剑桥大学出版社)一书。Les Kirkup 作为一名尽职尽责的老师,他的许多教学研究都是致力于提高本科生在物理科学以及工程学等领域的实验技能。他是一名积极的研究者,现正在研究如何扩大高性能液相色谱仪的色谱范围,并在很多领域的期刊上发表了论文,这些期刊包括《Computer Applications in the Biosciences》,《Computers in Physics》,《Review of Scientific Instruments》,《Medical and Biological Engineering and Computing》,《Physics Education》,《European Journal of Physics》,《American Journal of Physics》,《Physiological Measurement》,《Measurement Science and Technology and Journal of Chromatography A》。

Bob Frenkel 在悉尼大学获得物理学硕士学位,又在新南威尔士大学获得工程硕士学位。作为澳大利亚国家计量院有关电气标准方面的一名高级实验科学家,负责澳大利亚国家直流电压标准的维护和开发。他在很多学术期刊上都发表过论文,这些期刊包括《Articles in Metrologia》,《Measurement Science and Technolo-

gy》,《Journal of Physics E: Scientific Instruments》,《Transactions of the IEEE (Instrumentation and Measurement)》,《Journal of Electrical and Electronics Engineering (Australia)》,《Transactions of the Instrument Society of America and Proceedings of the Metrology Society of Australia》(他是该协会的创会成员之一)。他还是澳大利亚国家权威测试协会的一名电气评估师。他的另一个专业兴趣是计量统计学,自从 20 世纪 90 年代中期国际标准化组织出版和发行了《测量不确定度表示指南(GUM)》以来,计量统计学变得越来越重要。作为“国家计量院不确定度委员会”的一名成员,他是有关统计学方面的顾问,参加过许多有关 GUM 的学术研讨会。

# 前 言

在写书的过程中,我们和很多读者进行了交流,他们都希望了解科学技术中的测量及不确定度。

学习理工科的本科生应该有专门的介绍计量学的教科书,而在所有这类教科书中使用的术语和概念应该是清晰的,并且是相互一致的。目前,学生们经常遇到的问题是有些教科书中使用的概念和术语与其它教科书不一致,例如,有些教科书把术语“误差”(error)和“不确定度”(uncertainty)进行了严格的区分,但另外一些教科书却将它们混用。这种不一致性可能会误导学生,使他们不能确定如何正确地对他们的测量结果进行表示。

直到最近,这种不一致性也影响到专业的计量学家们的工作(他们的主要职责包括测量、对测量不确定度进行估计以及测量标准的维护)。例如,在国际贸易中要求各国之间在不确定度的定义、计算以及表示方法上应该达成一致的协议,缺乏这个协议,将使得全球经济不能高效地运作。在 20 世纪 90 年代中期,一些主要负责定义、维护和开发各领域技术标准和测量标准的国际机构,出版发行了《测量不确定度的表示指南(GUM)》。这些国际机构包括:国际计量局(BIPM),国际度量衡局,国际标准化组织(ISO)和国际电工委员会(IEC)。GUM 正在被全世界不同学科领域的一些机构广泛采用,例如,物理和工程领域的测量和标定实验室,化学和生物化学分析实验室,医疗测试机构,产品和资质认证机构,也包括层级最高的国家计量局等机构。

尽管 GUM 在测量的所有领域具有主导地位,但在 2005 年以前它几乎不被大学和学院的老师所知。我们写这本书的目的之一是给本科生介绍 GUM 和它的统计学背景。我们认为把 GUM 中关于误差和不确定度的概念及其表示方法引入教学中,能够使学生对这些概念的理解更加清楚和一致。随着 GUM 在工业和商业实验室中被广泛应用,新一代的研究生也希望在工作中能够应用不确定度的概念和估计方法,并理解其背后的统计学原理。本书也试图满足他们的这些需要。

本书的前几章是一些介绍性的资料,适合大学一年级的学生,但是整本书更适合二年级的学生使用,特别是那些已经做过一些实验,并且已经学习过微积分和统计学基础知识的学生。在介绍统计学原理时,我们没有采用在数学上严格的表示



方法,而是采用较为直观的图和表来介绍它们。

在本书中我们还介绍了一些使用蒙特卡洛仿真(MCS)方法的内容。虽然根据 GUM 中提供的标准方法,不确定度的传递规则主要是计算输入变量的一阶微分,但是我们必须承认,有时候也需要采用其它一些解析或数值的方法(例如当被测量和输入变量的关系非常复杂时)。MCS 就是这样一种方法,因此了解这方面的一些知识是非常必要的。另外一个重要的原因是,在教学中,如果要使学生理解一个统计过程,则采用 MCS 方法比采用理论方程更直观。MCS 与理论统计学的关系就像是实验物理学与理论物理学一样。MCS 是一个很有价值而且容易实现的教学工具,因为它仅需一台个人电脑、一套能够产生随机数的软件以及一些编程或制作电子表格的知识即可。

书中我们还详细介绍了一些本科生的实验,在这些实验中获得“真实的”数据,将通过本书所提供的方法进行分析和处理。这些实验也适用于对测量和不确定度相关课程的教学,为此,文中还提出了如何开发和改进实验的一些建议。

渴望了解 GUM 的人不仅仅局限于大学,本书还面向这样一些专业人群,他们不一定整天从事测量或对不确定度进行估计的工作,但是却必须非常熟悉当前国际上对测量和不确定度做出的一些规定。一般讨论不确定度以及 GUM 相关内容的专业书籍通常都假定其读者是(或者将会成为)有经验的计量学家,因此内容比较深奥。本书把基本原理和特定的实例结合起来,希望能够对这些读者有所帮助——他们想了解国际上对测量及不确定的规定,却很少有精力去读懂那些专业的书籍。不过在书中一些地方我们也增加了一些有深度的内容,这是因为有时候需要对一些无法通过简单公式来说明的概念进行阐述。

不确定的计算和表达方式仅仅构成了测量的一个方面,其它方面还包括误差的检测、描述、分析以及最小化。想方设法将误差最小化并不是一件枯燥无味的工作,相反在国家计量局中进行这样的工作往往具有开创性,所以也是令人愉悦的。在本书中也包含了对这些内容的一些讨论。由于任何精密测量都可能存在许多潜在的误差源,所以在计量学中了解各种学科分支是非常有益的。事实上,最好的计量学家往往是科学的“多面手”。在书中我们也举例说明了这种学科多样性对于解决科学和技术中测量的难题和疑惑的重要性。

写书的巨大成就之一就是作者在写的过程中会学到很多东西。“教学相长”是一句古语,这非常适用我们。我们感谢那些帮助我们理清思路的人,也感激在弥补这个差距(教师为其学生写的教材与计量学专家为有经验的计量学者写的专业书籍之间的差距)的努力中所获得的各种帮助。

我们真诚的感谢我们的同事和同行对本书正文中所引用的实例、讨论的问题以及描述的主题上给我们提出的建议。感谢设在悉尼的澳大利亚国家计量局的 Errol Atkinson, Mark Ballico, Robin Bentley, Noel Bignell, Nick Brown, Ilya

Budovsky, Henry Chen, Jim Gardner, Asa Jamting, John Peters, Steve Quigg, Brian Ricketts 和 Greig Small;感谢悉尼技术大学的 Nick Armstrong, Sherran Evans, Matthew Foot, Jim Franklin, Suzanne Hogg, Walter Kalceff, Geoff McCredie 和 Greg Skilbeck;感谢来自 Stunt Agency 的 Jennifer Fenton,以及感谢剑桥大学出版社的 Simon Capelin 和 Vince Higgs。我们还要感谢 Alan Johnston 给封面设计提出的建议,感谢封面上大胆飞越海峡的 Avril Wynne。另外,我们还要感谢我们的家人在写此书的过程中给予我们的爱,大力的支持以及对我们的容忍。

莱斯·柯卡普,鲍伯·弗伦克尔 2005

# 目 录

译者序

前言

<b>1 不确定度在科学技术中的重要性</b> .....	(1)
1.1 测量的重要性 .....	(2)
1.2 小结 .....	(11)
<b>2 测量的基础</b> .....	(13)
2.1 测量的单位 .....	(13)
2.2 科学计数法与工程符号表示法 .....	(19)
2.3 四舍五入法和有效数字 .....	(19)
2.4 相对不确定度的另一种表示方式 .....	(22)
2.5 小结 .....	(23)
<b>3 在测量中使用的术语</b> .....	(24)
3.1 测量及相关的术语 .....	(24)
3.2 小结 .....	(29)
<b>4 测量中的不确定度</b> .....	(30)
4.1 测量与误差 .....	(30)
4.2 不确定度是表征测量数值偏差的参量 .....	(36)
4.3 度量不确定度的基本量——标准差 .....	(38)
4.4 不确定度估计中的不确定度 .....	(42)
4.5 合成标准不确定度 .....	(43)
4.6 小结 .....	(45)
<b>5 一些统计学的概念</b> .....	(46)
5.1 从统计总体中抽取样本 .....	(46)
5.2 最小二乘法模型和最小二乘法拟合 .....	(51)

5.3	协方差和相关系数	(66)
5.4	小结	(70)
<b>6</b>	<b>系统误差</b>	(71)
6.1	通过特定信息揭示系统误差	(71)
6.2	改变实验条件揭示系统误差	(80)
6.3	小结	(82)
<b>7</b>	<b>不确定度的计算</b>	(83)
7.1	被测量模型以及从输入量到被测量的不确定度的传递	(83)
7.2	具有相关性的输入变量	(94)
7.3	小结	(108)
<b>8</b>	<b>概率密度、高斯分布和中心极限定理</b>	(109)
8.1	投硬币或掷色子时所得结果的分布	(109)
8.2	概率密度的一般特性	(113)
8.3	均匀分布或矩形分布	(115)
8.4	高斯分布	(118)
8.5	对非高斯分布的实验观察	(120)
8.6	中心极限定理	(124)
8.7	小结	(133)
<b>9</b>	<b>对高斯分布的抽样</b>	(135)
9.1	高斯总体中长度为 $n$ 的样本的均值抽样分布	(135)
9.2	高斯总体中长度为 $n$ 的样本的方差抽样分布	(136)
9.3	高斯总体中长度为 $n$ 的样本的标准差抽样分布	(139)
9.4	小结	(141)
<b>10</b>	<b><math>t</math> 分布和韦尔奇-萨特思韦特公式</b>	(142)
10.1	高斯分布的置信区间	(143)
10.2	采用 $t$ 分布的置信区间	(148)
10.3	韦尔奇-萨特思韦特公式	(152)
10.4	小结	(161)

<b>11 测量不确定度的实例研究</b> .....	(167)
11.1 测量结果的报告.....	(167)
11.2 玻璃间静摩擦系数的确定.....	(168)
11.3 凹坑形成实验.....	(172)
11.4 钢密度的测量.....	(178)
11.5 水在敞口容器中的蒸发速率.....	(183)
11.6 小结.....	(188)
<b>附录 A 习题答案</b> .....	(189)
<b>附录 B 置信度为 95% 时置信因子 <math>k</math> 的值与自由度 <math>\nu</math> 的关系</b> .....	(193)
<b>附录 C 对韦尔奇-萨特思韦特公式的进一步讨论</b> .....	(194)
<b>参考文献</b> .....	(197)
<b>索引</b> .....	(200)

# 1 不确定度在科学技术中的重要性

我们每天都与不确定度在一起生活,比如,我们不确定周末的天气是否适合户外烧烤?一种特定的食物或环境污染物对我们健康的危害有多大?我们的投资是否明智? P.1

我们希望尽可能消除或降低不确定度,如果能做到这一点,我们就会对计划要做的事情充满信心,或者降低了风险。为此我们可以寻求专家的帮助,比如天气预报员、医疗研究者和理财顾问,等等。

科学技术中的不确定度有着更加具体的定义,这种定义是为了进行准确测量而规定的。所谓准确测量,即意味着需要使用测量标准以及测量过程中需要对不确定度进行估计,这对科学技术的各个领域都是必要的。在科学技术的各个领域,保持和提高测量准确度的学科被称为计量学<sup>①</sup>。它的主要内容是在测量过程中识别、分析和使误差最小化,并通过计算得到测量结果的不确定度。

对测量准确度的要求与测量场合有关。超市中的秤盘用来测量水果或者蔬菜的重量,要求准确度能达到1%就可以。与之相比,一个国立艺术品实验室的天平在测量标称<sup>②</sup>为1千克的质量时,要求准确度达到千万分之几。在第一个例子中的1%和后一个例子中的千万分之几,都是用数字表示的测量准确度(前者准确度低,后者准确度高),但是它们都有各自的适用范围。准确度和不确定度的含义是相反的:高准确度意味着低不确定度,低准确度意味着高不确定度。 P.2

测量的结果一定存在不确定度问题,然而具体是在哪方面不确定呢?众所周知,测量结果通常是包含测量单位的一个数值。如前所述,实验室的天平测量的结果应该是带测量单位的一个数字,某一个人的体重是73千克,代表质量是73个单

---

<sup>①</sup> 这个词源于希腊语“去测量”。不要把它(metrology)和气象学(meteorology)这个词相混淆,后者是对气象和天气的研究。对于测量准确度的要求,比如说长度、重量和体积,早在远古社会就为人们所认识,而当时的社会只存在相对原始的技术和当代不称其为“科学”的学科。

<sup>②</sup> “标称”值是一个在具体测量值中理想的或者需要得到的值。因此如果物体的质量的标称值为1千克,即意味着准确测量值应该接近1千克。

位,每个单位是一千克。同理,在杯中的咖啡温度是 45 摄氏度,一块砖的长度是 231 毫米,汽车的速度是 60 千米每小时,等等。单位不同,则对同一个被测量进行表示其数值也不同,例如上例中汽车的速度也可以表示为 17 米每秒。在有些情况下测量值是无量纲的,此时量值被定义为两种其它量值的比例,并且这两种量值都可以按照同一单位来表示,那么它们的单位在计算过程中就被“约去”。例如,静态摩擦系数  $\mu_s$  被定义为两个力的比值,因此  $\mu_s$  是无量纲数,比如玻璃与玻璃间的摩擦系数  $\mu_s \approx 0.94$ 。

把测量结果用一个量化数值来表示的方式比其它方式拥有更多的有用信息。在后面的例子中,我们或许会犹豫是否把测量的结果称为“测量”,也许称之为经验判断或者估算更为合适。事实上,这正是我们日常生活中的行为方式。当我们在拥挤街道上停车的时候,大多数情况下,司机都会在没有尺子或其它工具的条件下,大致估计可以利用的停车空间。我们可以认为一个人很英俊或者美丽,但是这种英俊或美丽是不能严格进行量化的<sup>①</sup>。

在描述商品价格的时候一般都严格采用量化数值,同时在纯粹的应用科学方面,如在医疗和工程领域也常常需要量化数据来描述各种“不确定度”,测量砖块长度时采用什么样的仪器是最适合的? 该仪器的准确度怎样来确定? 另外,如何定义砖块的长度? 这个长度定义应该适用于各种情况,包括那些具有粗糙或不平坦边缘的砖块的情况。最后,在我们用长度来衡量一块砖块是不是合格之前,我们应该给出一个允许的偏差范围,那么如何确定这个范围呢?

P.3 这本教材将会讨论测量及测量值中的不确定度,特别是如何定量表达测量中的不确定度。有关这些内容的国际准则在《测量不确定度的表示指南》(简称为 GUM)一书中进行了详细的阐述,并由国际标准化组织出版发行(在 1995 年出版了修正后的新版)。在讨论和阐述该指南的具体内容之前,先通过一些实例来介绍测量和不确定度的重要性。

## 1.1 测量的重要性

测量中的不确定度有多么重要呢? 能够完全地确定或量化不确定度的细致的测量可以导致新的科学发现,而完成这个科学发现的科学家或者科研团队的成果也能得到国际上的认可。细致的测量可以帮助工程师改进复杂系统,例如宇宙飞

---

<sup>①</sup> 这个典故源于古希腊,指公元前八世纪一个叫荷马的人,他在一本历史传记中叙说到:美貌的斯巴达人海伦被带到了特洛伊(现今的土耳其),从而引发了长达十年的特洛伊之战。希腊人出动了一千艘战舰去特洛伊索要海伦回国。

船的安全极限,而对于警察来说或许会更有助于他们起诉那些驾驶机动车辆超速的司机。在生化计量学方面,需要通过准确的测量来评估食物被污染的等级,例如鱼体内的水银含量。在医疗计量学方面,高准确度的血压测量可以有效降低误诊的概率。本章将给出一些由于准确测量而获益的具体实例。在本章结尾我们会提到测量中普遍采用的 SI(Système International, 国际单位制)<sup>①</sup>,其中包括测量距离用的米(m)、测量质量用的千克(kg)和测量时间用的秒(s)。

### 1.1.1 基本物理常量的测量

在物理学领域的理论中包含着一些基本常量,例如光的速度  $c$ ,普朗克常量  $h$ ,微细结构常量  $\alpha$ ,和万有引力常量  $G$ <sup>②</sup>。这些常量均为真正的常数,它们不会随着时间或者地点的变化而变化,且无论是在地球还是在宇宙中的其它任何地方,它们都拥有同样的数值。这些常量有些是准确已知的,也有一些是被严格定义出来的,例如光的速度  $c$ ,在真空中被定义为  $c=299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;而普朗克常数  $h$  是放射物的光子能量与其频率的比值, $h=6.626069 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  (焦耳·秒)是准确已知的,它的不确定度小于百万分之一。

P.4

万有引力常量  $G$ ,出现在描述相对空间的重力关系的表达式中,这个表达式是由艾萨克·牛顿在 17 世纪发现的: $F=Gm_1m_2/r^2$ ,其中  $F$  是两个质量物体  $m_1$  和  $m_2$  之间的万有引力, $r$  是两个物体之间的距离。在使用这个方程计算万有引力的时候,我们必须知道  $G$  的数值。因为  $G$  非常小,大约是  $6.68 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ,所以在实验室中,已知质量的两个物体产生的万有引力很小。例如两个相同的直径大约为 36 cm 的实心球体,每个质量为 200 kg,两者相距 1 m,它们相互之间的万有引力约为  $2.7 \times 10^{-6} \text{ N}$ ,这约等于一个小蚂蚁(小蚂蚁质量大约为 3 mg)重量的 1/10。

地球的质量非常巨大,所以产生的万有引力受到我们的重视,地球质量大约为  $6 \times 10^{24} \text{ kg}$ (该质量是在  $G$  已知的情况下推导得出的)。在实验室测量  $G$  的过程中,由于两个物体的质量太小,所以它们之间的万有引力很微弱,这使得准确测量  $G$  值变得比较困难。在测量这些万有引力时,必须去除周围万有引力的干扰,包括大量的通常由地球和在周围做实验的科学家自身体重引起的引力。在编写本书时(2005 年),可以被接受的  $G$  值小数部分的不确定度大约是万分之几,这比其它已知基本常量的小数部分的不确定度要大很多。早在 20 世纪 90 年代对  $G$  进行测量时得到的各种测量结果之间大概有千分之几的偏差,不过也有人声称,有一些独

① 法语缩写词,是用来表示法国在相关方面被认可的中心地位。在 18 世纪后期,法国在引入和建立统一的被大众认知的“米”制测量单位方面做出了突出的贡献,该单位最后被引入 SI 标准中。

② 大写  $G$  是为了不和小写  $g$  混淆。小写  $g$  一般用来表示地球表面重力加速度的大小,并随地理位置的改变而变化。



立的测量结果的不确定度比这小很多<sup>①</sup>。准确测量  $G$  的实验显然受到隐含的系统误差(系统误差将会在本书后面的章节来讨论)的影响。

测量  $G$  或者其它具体物理常量时,了解测量的不确定度非常重要。如果对同一被测量的两个值,所测得的测量值之间存在明显差异,并且超过了每个测量值自身的不确定度,那么我们会知道“这肯定有问题”:被测量可能在两次测量的期间产生了一些变化,或者测量过程中的系统误差没有被考虑进来。

P.5 不辞辛苦地研究  $G$  值和其它常量的测量,将让我们对自然界产生新的认识。在应用物理和工程领域中,寻找误差产生的原因可以帮助我们更好地了解被测材料的特性或者提高实验技术水平。例如在测量万有引力常量  $G$  的过程中,很多测量实验是基于一条扭转的金属扭矩条,该扭矩条会对临近质量的引力场产生反应,已经发现这些扭矩条不具有理想的弹性,也就是说,扭转的程度与扭矩之间并非完全成比例,而且所谓的“滞弹”效应也非常明显。这一发现对认识扭矩条自身的特性很有帮助。在理论物理学中,对  $G$  的高确定度的测量,最后将会对当前的一个推测结论起到证实或证伪作用,即在实验室中的两物体距离如果在亚毫米级别,是否存在非常小的,但是却能检测出来对万有引力平方反比定律的违背。只有通过细心的测量以及切合实际对不确定度进行估计,我们才能确信  $G$  值的研究结果所推导出的各种结论。

### 1.1.2 细致的测量导致了新元素被发现

在 19 世纪末,雷利(Rayleigh)勋爵对乍看上去似乎符合预期且没什么特别的测量数据进行了细致的分析却得到了惊人的发现。雷利采用两种方法测量了氮气的密度<sup>②</sup>。在第一种方法中,氮气全部从大气中获得的,其方法是让空气通过加热的铜片去除其中所有的氧气。另外一个方法是,首先让空气通过沸腾的氨水,接着让空气和氨气的混合气体通过加热的铜管,使空气中的氧气和氨气中的氢气结合形成水,这样同样去除了氧气,但是从空气中获得的氮气与氨水中的氮气就部分地“污染”在一起了。通过第二种方法得到的氮气(化学的方法)比第一种方法得到的氮气(大气的方法)密度低了 0.1%。尽管非常接近,但雷利仍对这 0.1%的偏差感到不适,并打算违背自己的直觉去寻找另一种能降低或者忽略误差的方法。这次,他对实验进行了更细致的研究,通过改变实验条件来试图增加两者的误差。他用纯净的氧气来替代化学方法中的空气,这样所有收集的氮气都是从氨水中获得的。

① 第 4 章中的图 4.2 会进一步说明这点。

② 雷利测量了氮气的质量。因为测量是在标准的温度和压力下进行的,氮气的体积是固定的,所以氮气的密度很容易得到。