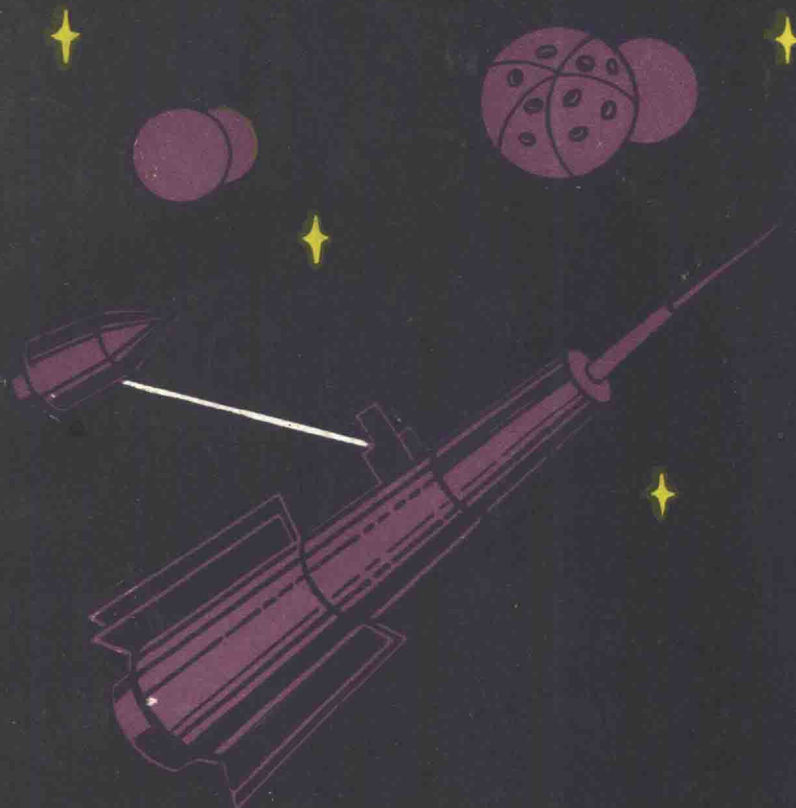




近代物理与计量

吴桂秀 编

中国计量出版社

近代物理与计量

吴桂秀 编

中国计量出版社

1986·北京

内 容 提 要

计量技术是科学技术发展的前沿,近代物理为当代计量技术奠定了新的基础,本书是介绍近代物理在计量中应用的科普读物,其中对激光、核磁共振、光抽运、约瑟夫森效应和其它一些物理效应的基本原理及在计量技术中的应用深入浅出地作了介绍。

本书可供计量测试工作者、青年学生和自然科学爱好者参考。

近代物理与计量

吴桂秀 编

责任编辑 刘长顺

—

中国计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—

开本 787×1092 1/32 印张 4 1/8

字数 95 千字 印数 1—7000

1986年6月第-版 1986年6月第一次印刷

统一书号 15210·669

定价 1.05 元

前 言

计量作为一门科学，其形成和发展与物理学有着紧密的联系。物理学的发展，不但使许多物理效应被人们所认识，而且计量有效地应用了这些物理效应发展了一系列的测量、测试手段。同时物理学的发展，使计量基本单位的复现进入由自然基准逐步代替实物基准的发展时期。另外，物理学与计量相结合，使许多物理常数的精密测量成为可能。如测定光速 c 的数值这一事实就可以说明，物理学与计量之间的关系是何等的密切。大家知道，现在测定光速值准确度已达 10^{-9} 量级，比早期测定值的准确度要高一百至一千倍。光速值的精确测定不仅有助于如验证相对论方面的近代物理上的重要意义，而且在计量上有重大的应用价值。因为目前尽可能以基本物理常数为基础定义计量基准已成为一种发展趋势。事实上，最近国际计量大会所通过的新的米定义，就已把真空中光速值 $299\,792\,458\text{ m/s}$ 作为一个不带误差的物理常数使用。米定义为“米是光在真空中 $1/299\,792\,458\text{ s}$ 的时间间隔内所经过的距离”。这样，长度单位实际上已演变成时间单位和精确光速值的导出单位。这种建立在基本物理常数基础上的单位定义比一般自然基准具有更明显的优点。它的准确度不受某种基准物质性能的限制，从而为提高单位复现性的准确度展示了更广阔的前景。又如，为了大幅度地提高测量准确度和灵敏度，为了扩大不同条件下的计量测试范围，广泛地利用各种物理效应和充分地利用物理学新成就方面已越来越受到人们的重视，其中在低温条件下所呈现的各

种量子化效应尤引人注目。再者，一些经典技术难以解决的问题，利用新的物理效应之后就得到妥善解决。

本书是介绍有关某些近代物理学原理（包括物理效应）在计量中应用的科普读物。它是作者根据多年从事物理学教学的体会，历年来讲过的有关物理学讲稿，并参考了近年来国内外有关计量科学方面的资料和书籍编写而成的。

书中主要介绍了激光、核磁共振、光抽运、约瑟夫森效应等在计量中的应用，同时还简要地介绍一些其它物理效应（包括新发现的量子化霍尔效应）在计量中的应用。能使读者了解物理学和计量的关系，增进对计量工作重要性的认识 and 通过对某些计量学原理、计量测试方法的了解，以加深对计量与先进科学技术之间密切关系的认识，从而引起对科学实验和计量测试技术方面的更大兴趣，有裨于当前所从事的工作。

本书在编写过程中承蒙中国计量科学研究院张钟华副研究员和沈乃澂同志认真审阅并提出了很多宝贵意见。另外，在此书的编写过程中还得到了浙江省计量测试学会副理事长张礼和同志和浙江省计量测试学会科普委员会许绍雄等同志的关心和支持。作者谨向他们及被引用文献资料的作、译、编者表示衷心感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在许多错误或不足之处，敬请读者批评指教。

一九八四年三月

目 录

前 言

第一章 近代物理与计量	(1)
一、科学从测量开始.....	(1)
二、计量促进近代物理.....	(3)
三、近代物理推动计量.....	(4)
附注	(6)
1. 计量的分类	(6)
2. 计量单位的统一	(7)
第二章 激光在计量中的应用	(8)
一、激光是什么?	(8)
二、怎样产生激光?	(10)
三、几种激光器简介.....	(12)
1. 固体激光器	(13)
2. 二氧化碳激光器.....	(13)
3. 氩离子激光器.....	(13)
4. 砷化镓激光器.....	(14)
5. 液体激光器	(14)
6. 氢-氦激光器.....	(14)
四、激光在计量中的应用	(18)
1. 激光测长.....	(18)
2. 激光微定位	(28)
3. 激光测微小角度	(28)
4. 激光测流速	(31)
5. 激光测电流	(32)
6. 激光测电压	(36)

第三章 核磁共振方法在计量中的应用	(37)
一、从原子的磁性说起	(37)
1. 质子的磁矩, 核磁子	(38)
2. 核陀螺, 磁旋比	(38)
3. 核自旋量子数	(39)
4. 原子核的磁矩	(39)
5. 例题	(40)
二、什么是核磁共振现象?	(40)
1. 拉摩进动频率与外加恒定磁场之间的数量关系	(42)
2. 用量子力学观点解释核磁共振	(42)
三、怎样观察核磁共振现象?	(43)
1. 强磁场中的稳定吸收法	(43)
2. 在弱磁场中的自由进动法	(48)
四、核磁共振方法在计量中的应用	(49)
1. 用核磁共振方法复现电流单位	(49)
2. 用核磁共振方法测量磁场强度	(57)
3. 用核磁共振方法定量分析化合物	(60)
第四章 光抽运和塞曼效应在计量中的应用	(65)
一、光抽运是什么?	(65)
二、怎样实现光抽运?	(67)
1. 原子能级的塞曼分裂	(67)
2. 基态塞曼光抽运原理	(68)
3. 基态塞曼光抽运实验装置	(70)
三、光抽运在计量中的应用	(73)
1. 原子时间频率标准	(74)
2. 光抽运方法测量磁场强度	(86)
第五章 约瑟夫森效应在计量中的应用	(88)
一、超导电现象	(88)
1. 对铜导体实验的结果	(89)
2. 超导电现象的发现	(89)

3. 磁场与超导电性的关系	(90)
二、什么是约瑟夫森效应?	(91)
1. 直流约瑟夫森效应	(93)
2. 外部感应交流约瑟夫森效应	(94)
3. 内部感应交流约瑟夫森效应	(95)
三、约瑟夫森效应在计量中的应用	(95)
1. 约瑟夫森电压标准	(95)
2. 用超导量子干涉器件测量微弱磁场	(100)
第六章 一些其他物理效应在计量中的应用	(106)
一、温差电效应在计量中的应用	(106)
1. 温差电现象的发现及其三个效应	(106)
2. 热电偶测量温度方法和应用	(107)
3. 热电偶测温范围、准确度及影响温差电势的一些因素	(108)
二、压电效应在计量中的应用	(110)
1. 什么是压电效应?	(110)
2. 应用	(110)
三、光电效应在计量中的应用	(112)
1. 光电效应和光电变换器	(112)
2. 应用	(113)
四、磁光效应在计量中的应用	(114)
五、霍尔效应在计量中的应用	(115)
1. 霍尔效应的基本概念	(115)
2. 应用	(115)
六、量子化霍尔效应在计量中的应用	(117)
1. 量子化霍尔效应简介	(117)
2. 量子化霍尔效应在计量中的应用——建立电阻的自然基准	(119)
参考文献	(121)

第一章 近代物理与计量

一、科学从测量开始

人们要认识自然和改造自然，首先必须掌握事物间的最基本关系——数量关系。就是说，需用数字和单位这两部分来描述自然界物体和现象的基本特性。为此，人们就必须运用测量器具，对被了解的对象进行测量。

俄国著名化学家门捷列夫（Д. И. Менделеев）曾经说过：“科学从测量开始。”英国著名物理学家麦克斯韦（J. C. Maxwell）在讲到测量在科学中的重要性时也曾指出：“任何一种现象的最重要方面是可测量的问题。”人类通过长期的测量实践，深深认识了测量和科学有着密切的关系，可以说，没有测量就没有科学，没有精密的测量就没有先进的科学技术。测量也正是在伴随着科学技术的不断发展中而发展起来的。综上所述：“测量是技术生命的神经系统。精密的测量是精确的知识和经济的设计所必需的；方便的测量是敏捷的通讯和有效的组织所必须的。”（A. H. Cook）。

为了使测量在工农业生产和科学研究等方面发挥更大的作用。因此，我们不但要对测量理论和保证测量方法、测量器具所需准确度的统一问题进行研究，而且要对社会实际应用中所需要的测量（测试）技术也要进行研究。另外，国家计量部门要制订计量方面的法规，实行计量监督管理，建立计量基准器、标准器，组织量值传递和测试工作，保证国家计

量制度的统一和计量器具的一致，准确与正确使用。只有这样，才能保证测量的统一，使测量具有更深刻的社会意义。

在工农业生产和科学技术工作中，保证测量的准确度尤其重要。否则，即使由于量具不准，也会造成很大的损失。例如，我国某印染厂在抢修一台机器时，因加工的四个零件由于游标卡尺不准，产生了大的误差而使零件全部报废。造成该厂停产30多小时，并造成几万元的经济损失。

科学从测量开始，而测量又与计量有着密切的关系。因此，计量和测量诸因素的有机结合，也是使物质生产产生最佳经济效果的重要环节。在现代条件下，测量和计量的应用已渗透到生产力的各个领域，其相互依存、相互促进的关系更加明显。

国外的一些统计资料也表明，计量和测量在国民经济中确实起到重要作用。例如苏联从计量工作上可收回的盈利是计量工作投资的1.5至2倍。美国仅从天然气贸易一项估计，假若能把许可的测量误差由3%降到1%，那么每年可减少损失6亿美元。

美国的阿波罗计划在高峰时，要检定的项目就有24 000项，而失败的事故中有40%是由于振动测量不准确造成的。

又如发射人造卫星，需要高准确度的自动控制系统和遥测系统，如果测量控制不准，最后一级火箭速度有千分之二的相对误差，卫星就会偏离预定轨道近一百公里；一艘核潜艇在海底连续航行三个月，艇上的时钟与陆地标准钟如果相差百万分之一秒（ $1\mu s$ ），就会造成三百米的定位误差。由此可见，科学技术现代化，计量工作要先行，测量工作不可无。

二、计量促进近代物理

准确地测量基本物理常数，不仅是为了使这些常数数值彼此之间能够自洽，而且也是为了比较不同方法所获得的结果能更好地了解自然界。假若用两种独立的方法测量同一个物理常数所测得的结果之差远大于各自的不确定度，那么，就应当对其进行严格的考查。例如，美国物理学家密立根(R. Millikan)从1907年到1917年期间通过油滴试验的方法，测出的电子电荷值与后来(1930年)另一位科学家用X射线法和银电解法测得的电子电荷值不一致，相差值达到后者不确定度的三倍以上。为了解决这个矛盾，经过四十年的测量和分析，进一步发现密立根测出的电子电荷值有误。据说，这是由于密立根当时引用了一名研究生提供的错误的空气粘度系数而造成的。

精密的测量对验证物理学定律无疑是十分重要的。大家知道，在近代物理中，爱因斯坦(A. Einstein)相对论质量能量转换定律为：

$$E = mc^2$$

式中， E ——能量；

m ——质量；

c^2 ——光速。

这是用数学方法反映质量和能量辩证的相互关系。但是，当时没有人能从实验上加以证明。只有在铀裂变被发现之后，测试技术也得到了充分的发展，并能准确地测定真空中光速 c 、质量 m 和射线能量时，才能通过热核反应观测质能转换关系，对上述定律进行验证。定律中的光速 c 是一个常数，可以用实验来测定。1973年以前所采用的光速值是299 792.5

km/s, 其不确定度为 0.1km/s, 比它四十多年前所采用的光速值准确度要高 1 至 2 个数量级。而 1973 年后所采用的光速度值是 299 792 458m/s, 其不确定度为 1.2m/s, 准确度又比 1973 年前提高了两个数量级。

随着近代工业的不断发展和科学技术的进步, 尤其是在近几十年来, 计量已突破经典的度量衡范畴, 而形成了包括长度、热学、力学、电磁学、光学、声学、化学、电离辐射、时间频率、无线电以及量子计量等许多分支的一门新兴学科。当今的计量学是把原子物理学中的最新成就加以应用和发展的一门科学, 它在物理学的许多领域中可以广泛应用。

三、近代物理推动计量

上面我们介绍了计量促进了近代物理的发展。现在我们要说, 近代物理上的新成就又推动了计量的发展, 从而把计量测试技术提高到了新的水平。

例如, 精密测量电子电荷与普朗克常数比 $2e/h$ 、质子磁旋比 γ_p 等基本物理常数, 不仅是物理学本身的需要, 而且它对提高整个电学计量的准确度起着决定性的作用。大家知道, 现在利用超导现象的约瑟夫森效应, 通过测量 $2e/h$ 常数, 则保持电压单位的准确度可提高到 2×10^{-8} 。又如, 利用光波波长和真空磁导率 μ_0 , 可以确定静电电容。从计算电容传递到电阻, 准确度可提高到 10^{-8} 。这两种方法不仅可以提高电测量的准确度, 而且更加便于国际比对。再如, 采用两种不同的核磁共振方法准确测定质子磁旋比 γ_p 值, 还可以用来监视安培单位。

从长度的测定方法和基准的演变, 我们可以看到, 随着

近代物理学的发展其准确度也在不断提高。1889年确定的以国际米为基础的米定义铂铱米尺作为国际米的基准，即1米等于保存在巴黎附近色夫尔国际计量局内铂铱合金米尺上两条刻线间在0℃时的距离，经过了七十一年，于1960年又重新规定“米等于氪-86原子的 $2p_{1/2}$ 和 $5d_{5/2}$ 能级之间跃迁所对应的辐射，在真空中的 $1\,650\,763.73$ 个波长的长度”作为米的定义。1973年后又规定氦氖激光器的辐射波长作为长度副基准。由于这些年来人们对激光稳频技术和激光辐射频率、波长测量的研究取得了新的发展，并且各方面对米定义的复现准确度也提出了更高的要求。于是1983年第17届国际计量大会便正式规定以光在真空中 $1/299\,792\,458$ s的时间间隔内所经过的距离作为米的新定义。这个新的米定义把反映物理量单位概念的定义和复现的方法作了区分。使其在科学技术不断发展的过程中，复现的方法可以不断改善，复现的准确度也可以不断提高，并且不受定义本身的限制。

对于时间和频率基准，我们知道，它们是应用了近代物理的成就之后其准确度才大大提高的。当然，最早采用的平太阳日是以地球自转为基础建立的时间系统，一秒等于 $1/86\,400$ 平太阳日。但由于地球自转是不均匀的，不稳定的，因此，基于地球自转所建立的平太阳时作为时间基准受到了很大影响。所以在1960年的国际计量大会上确认：把根据历书时确定的秒作为国际单位制的时间单位秒的定义。根据国际会议一致通过的规定：历书时的起始元是太阳几何平黄经为 $279^\circ 41' 48''$ 时的那一瞬间，作为历书时1900年1月0日12时整。历书时秒长等于从这瞬间开始的一个回归年长度的 $1/31\,556\,925.9747$ 。由于历书时使用起来很不方便，而且其量级也很难再提高了，所以1967年第十三届国际计量大会通过决议，规定了新的秒定义，即：“秒是铯-133原子基态

的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个同期的持续时间”。

客观事实说明同样是 1 秒钟，但现在与以前相比，人们对它的认识却发生了很大变化。现在人们对时间的认识不但深化了，而且更加珍惜了。同样时间也变得越来越宝贵了。所以在科学技术高度发达的今天，人们即使对 10^{-23} 秒的短暂瞬间也要加以捕捉，甚至对三十万年才差 1 秒的误差也要精心核对。

四十多年来，时间和长度基准的准确度有了很大的提高，最佳的时间基准铯原子钟，准确度已达 10^{-14} 量级。长度也从 10^{-6} 量级进入到 10^{-8} 到 10^{-10} 量级。

由于近代科学的发展，应用量子效应来建立基本单位的新型基准，大大提高了基准的准确度。如利用高稳定的激光器，有可能建立新的长度和时间频率基准，进而实现两个基准的统一。应用低温超导的约瑟夫森效应，可以监督电压基准；应用量子化霍尔效应还可以建立电阻的自然基准。用激光和 X 射线干涉技术，精密测量原子间距、准确测定阿伏伽德罗常数，可望建立物质的量（摩尔）的基准和原子质量基准，进而统一摩尔与质量两个基准。

由此可见，尽可能以基本物理常数为基础定义计量基准，是一种发展趋势。因为理论上指出在一定条件下自然界的这些基本物理常数是不变的，所以定义在基本物理常数基础上的基准必然具有很高的稳定性。

（本章参考文献〔1〕～〔12〕、〔28〕）

附注：

1. 计量的分类

从计量学的观点出发，按基本单位来划分，分为长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量、发光强度等七

大类。我国以往习惯按物理学的类别把计量划分为十大类，即：长度、力学、温度、电磁、无线电、时间频率、化学、声学、光学、电离辐射等。十大计量中的某些基准、标准器具则完全是我国自己研制的，它的精确度经过与国际比对，证明已经达到国际上的先进水平。

2. 计量单位的统一

“一个国家使用什么样的计量单位，是这个国家的主权，完全由它的政府来决定。但各个国家所使用的计量单位，都毫无例外的尽量要求统一。否则，生产、科研、商业、贸易、文化交流就会遇到一系列的困难，往往使整个社会要浪费很多人力、物力、财力和时间，去进行繁琐的换算，并在实际工作中带来种种的不方便。特别是在国际经济、技术、文化交流活动日益增多的今天，不但要求国内的计量单位制要统一，而且国际间的计量单位制也必将日趋统一”。*

中华人民共和国国务院于1984年2月27日发布《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，决定在采用先进的国际单位制的基础上，进一步统一我国的计量单位。《命令》指出：“我国的计量单位一律采用中华人民共和国法定计量单位”；“我国目前在人民生活中采用的市制计量单位，可以延续使用到1990年，1990年底以前要完成向国家法定计量单位的过渡。……”*

* 摘自《中华人民共和国法定计量单位资料汇编》。

第二章 激光在计量中的应用

激光是六十年代初发展起来的一门尖端技术。由于它在生产、医疗、精密测量、科学技术及国防建设等方面有很大用处，因此，自从它问世以后，发展就异常迅速。今天它在各个领域的应用，仍在继续发展。

在本章中，我们首先简要介绍激光和激光器，然后重点介绍激光在计量中的应用。

一、激光是什么？

激光是什么？简单地回答，激光是一种颜色很纯（单色性很好）、能量高度集中（亮度很高）的光。

激光为什么会比普通光源在亮度上有成万甚至成亿倍地提高呢？这主要是由于激光具有很好的方向性。例如，设一个发光点所发的光分散在 180° 范围内，现在把光集中到 0.18° 范围内（这是激光器能做到的，图2.1），那末，就很容易算出单位立体角内的光功率将提高 8×10^5 倍，即光源的亮度提

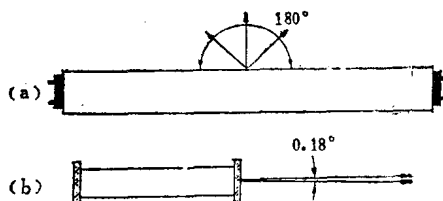


图2.1 激光具有很好的方向性

高了八十万倍(在此规定光源在单位面积上,向某一方向的单位立体角发射的光功率,就为光源在这个方向上的亮度)。

一台红宝石巨脉冲激光器的亮度要比普通电灯的亮度约高七万八千亿倍,比太阳的亮度也要高二百二十亿倍。尽管激光的总能量并不大,但激光的能量在空间上和时间上的高度集中,使它在焦点附近能产生几千开甚至几万开的高温,能熔化以至气化各种对激光有一定吸收的金属和非金属材料。因而,激光已成功地用于加工工业。同样,由于激光束的发散角很小,能量高度集中,故在远距离保密通讯及远距离测量等方面也都具有很大的优越性。

那末,什么是激光的单色性呢?它又有什么实际意义呢?我们知道,白光通过一块分光镜后就能分解成逐渐变化的红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等各种颜色的光(见图2.2所示)。但这里的“红”光并非单色光,而是指波长范围约

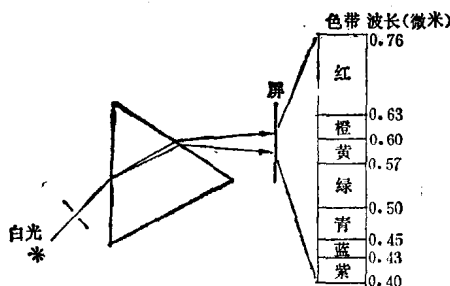


图2.2 白光的分解

为0.76至0.63微米的光,是一段色带。橙、黄、绿等也类似。所谓单色光是指波长范围很小的一段辐射,一般小于几个埃。可见,单色光并不是单一波长的光,而是有一个波长范围,这个波长范围就称为单色光的谱线宽度:波长范围越小,即