

物理常数与计量

《国际精密测量与基本常数会议》

文集选译

中国计量科学研究院情报室编

编 者 按

《基本物理常数与计量》译文集选自1970年8月3日至7日在美国标准局盖茨堡基地举行的《国际精密测量和基本常数会议》文集(NBS Special publication 343)。

国际精密测量和基本常数会议是近十余年来召开的基本常数方面规模较大的一次国际性的讨论会。参加这次会议的有美、英、苏、日、法、西德、加拿大、澳大利亚、瑞士、丹麦、比利时、荷兰等国的理论和实验物理工作者及计量工作者一百余人。国际上对基本常数的精密测量极为重视，这主要有两方面的原因：其一，基本物理常数的精确数值对于物理学和计量学的研究起着极为重要的作用；其二，由于六十年代以来，一些新的物理技术（如：激光、约瑟夫逊效应、X射线干涉技术等）的应用，使一些基本常数测定值的精度有了大幅度的提高，使其可能更好地为物理学和计量学服务。

近年来，基本常数的测量精度有了较大的提高，大多数已在 10^{-6} 以上，已达到或超过了某些基本单位基准的准确度，使利用常数作基准的可能性变为现实性。基本单位中，目前准确度最高是频率（或时间），由于它能用无线电发播进行传递，使之在基准中居于最优越的地位。而其它一些基本单位又能与频率建立起联系，其桥梁是基本物理常数，具体实现的技术是物理学的一些量子效应。应用这些新的量子效应来建立计量基准的一个新的计量研究领域称为量子计量学。例如，长度单位米是用波长 λ 来定义的，而波长与频率之间的关系为 $\lambda\nu = c$ ，式中 c 为真空中的光速。因此，可

通过频率和光速来定义长度单位,实现长度与时间基准的统一。再如,用核磁共振法通过精密测定质子回转磁比 γ_p 来复现电流单位安培,这是利用了 $\omega_p = \gamma_p B$ 的关系,式中 ω_p 为与磁场 B 相应的共振频率。利用交流约瑟夫森效应的关系式 $2eV = h\nu$,精密测定 e/h ,可以监视电压单位。X射线干涉技术可用于精密测定阿伏伽德罗数 N ,从而可探索建立质量的自然基准。由此可见,计量学的一些主要基本单位,如长度、质量、电流等单位可分别通过精密测量真空中的光速 C 、阿伏伽德罗数 N 、质子回转磁比 γ_p 等基本常数来建立各自的自然基准。

这次会议以后,与建立计量基本单位自然基准有关的物理常数的精密测量工作又有了新的进展。如在测量激光波长和频率基础上重新确定了光速的推荐值,其准确度为 $\pm 4 \times 10^{-9}$;比以前的数值提高了一百倍。 e/h 的测量不可靠性已达到 10^{-8} 的数量级,有的国家已利用交流约瑟夫逊效应监视本国的电压单位。用核磁共振的弱磁场法测量 γ_p 的准确度也可望达到 2×10^{-7} 。

本书在译、校过程中,除我院有关实验室的同志外,还得到了西安交大物理教研组、重庆大学物理教研组、中南物理研究所等单位及有关同志的大力支持,特此致谢。由于编者水平所限,文中难免错误或不妥之处,欢迎读者批评指正。

本书可供高等院校、研究机构和计量部门的有关人员参考。

路线是个纲，纲举目张。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业、干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验，引以为戒，这就是我们的路线。

目

录

频率与时间基准

准确的频率测量的概况和展望

.....(美) H. Hellwing 等(1)

推进作为频率基准的氢激光器的发展

.....(英) R. F. C. Vessot 等(13)

长度基准与光速测量

微波调制激光器用于长度测量

.....(美) Z. Bay(34)

光频和光速测量(美) Z. Bay 等(43)

里德伯常数

里德伯常数的测定(英) G. W. Series(50)

里德伯常数的新测定

.....(日) Toshiro Masui(69)

从 He I 线测量决定里德伯常数

.....(美) E. G. Kessler, Jr 等(75)

电学基准

电学基准的现状及其改进的前景

.....(美) R. D. Cutkosky(84)

作为电动势基准的斯塔克伏特计

.....(日) 古原(95)

质子回转磁比

质子回转磁比概述(英) P. Vigoureux(109)

应用核共振监视电基准

.....(美) R. L. Driscoll 等(119)

日本电气试验所测定 γ_0 的工作以及关于
 获得用作电流原子基准的均匀的可计
 算磁场的两个建议……(日) 古原等(124)
 在强磁场中测定质子回转磁比
 ……………(英) B. P. Kibble等(139)

法拉第常数与原子质量

法拉第常数及其在测定基本常数中的重要
 性……………(英) A. Horsfield(148)
 用碘库仑计测定法拉第常数
 ……………(美) V. E. Bower(161)
 关于测定 $\Delta m/m$ 之 Nier 电路的改进意见
 ……………(美) L. Julie(169)

质子磁矩

以核磁子为单位的质子磁矩
 ……………(美) D. O. Fystrom(178)
 μ_g/μ_n 的测量……(英) B. W. Pettey 等(186)
 以核磁子为单位的质子磁矩, μ_p/μ_n 的新测
 定……………(瑞士) H. Gubler(192)
 高准确度测量离子的回转加速频率的新技
 术……………(美) J. Luxon 等(199)

X 射线

在 X 射线波长的相对测量和绝对测量方面
 的问题……………(美) J. A. Bearden(210)
 $\text{AlK}_{\alpha 1,2}$ 波长的刻线光栅测量
 ……………(美) A. Henins(217)
 X 射线/光学干涉测量及 X 射线基本常数的
 测量……………(美) R. D. Deslattes(255)

硅晶体中220重复距离的光学干涉测量

..... (美) R. D. Deslattes(237)

阿伏伽德罗数的新测定

..... (英) I. Curtis 等(244)

重力常数

重力加速度绝对测定的近况 佐久间(254)

用于重力加速绝对测定的激光干涉仪系统

..... (美) J. A. Hammond 等(272)

澳大利亚悉尼地区重力加速度的绝对测定

..... (沃) D. L. H. ribbing 等(288)

最小二乘法在基本常数评定中的应用

为最小二乘法平差答辩... (美) E. R. Cohen(296)

关于基本常数的校正值

..... (美) C. Eisenhart(301)

准确频率测量的概况和展望

(美) H. Heilwing 等

1. 引言

现今的国际计量单位制(SI)是基于和自然界基本性质有关的六个基本单位(质量除外);时间、长度、质量、温度、电流和光度[1]。其中时间单位,或更确切些,时间间隔(以后称时间—译者注)单位一秒,是国际上所采用的单位中准确度*最高的单位,其简单原理是自然界提供的:由于地球自转的周期是一天。直到不久前,秒还是依据地球的自转,而后来依据地球绕太阳的公转确定的[2]。经过极长期(很多年)的观测,依此定义的秒的准确度能接近到 1×10^{-8} [2,3]。若观测期较短,准确度就要相应地变坏。图1表示自从原子钟问世以来,时间标准准确度的改进情况。图中,准确度是用所有偏差修正后综合的不确定度 1σ 来表示。偏差修正是对每一具体标准的理论和实验估计的结果,其实际性能总是与基本单位定义中所采用的理想条件有某种程度的不一致。

图1(略)表明,在1947年前只有天文的定义。1947年,第一台氨分子钟在美国标准局开始运转[4]。这个钟的性能并没有超过天文钟。但是,氨分子钟的出现是极为重要的,这有两个原因:第一,时间的单位第一次和一个(假设

* 所谓准确度,指的是某种物理测量或进行此种测量的仪器与所规定的定义相符合的程度。

的)不变的物理常数联系起来,在这里即和氢分子的反演跃迁联系起来,而不是仅仅基于宏观天体的运动,已经知道,宏观天体运动具有缓慢变化(对此缓慢变化只能进行部分的而不是全部的修正)。第二,借助于频标来定时间间隔即用下列关系式:

$$\tau \equiv \frac{b}{\nu} \quad (1)$$

同时 $b \equiv 1$, τ 和 ν 是相应的量子跃迁辐射周期和频率。于是,时间的单位一秒可用该辐射的一定的周期数来确定*。

根据铯的超精细跃迁制成的第一台完整的原子钟系统,于1955年在英国物理研究所开始运转并测定[5]。这和以前的标准相比,其性能超过一个数量级。如图1所示,世界上若干实验室对铯原子中的进一步改进[3][6-15],使其准确度目前达到优于 1×10^{-12} 的数值[16-19]。铯原子钟的此种性能,使1967年的第13届国际计量大会通过了以下定义:“一秒是相应于铯¹³³原子基态的两个超精细能级间跃迁辐射的9192,631770个周期的时间”。

频率的单位一赫,由式(1)确定,其中 $b \equiv 1$ 赫·秒。

2. 准确频率测量的原理和方法

作为时间基本标准的铯原子束装置不但是最准确的频率源,而且是所有基本标准中最准确的标准,如图2所示,它比其它标准要准确得多。图2(略)表示SI单位制中所有六个基本单位的标准的准确度[1.20]。时间、长度、电流、

* 时间和频率可有单独的标准,因而式(1)中的常数 b 为一基本常数,在某种意义上与光速很相似,其量纲为赫·秒。

温度和光度的量，表示实际仪器设备能达到对应于该基本单位定义的能力。这些是经过偏差修正的理论和实验估价以及国内外的相互对比而得出的。

必须注意，对任何一个基本单位的相对测量的精密度*都应显著地优于所述的相应基本标准的准确度。

再者最准确的时间频率计量，也是各类计量（例如长度、质量、力、压力、电阻、电流）中最精密的。准确而精密的频率测量易于借助仪器并可实现高度的自动化。频率测量技术的普适性使其能在一般计量学方面广泛应用。无线电广播的准确频率和时间讯号普及于全世界。

由图 2 可明显地看出，基于确定时间或频率的测量，其准确度可以远远的超过其他五种基本单位的测量。因此凭借时间和频率的测量方法，一些物理常数可测得极准确，而对原子和分子的量子跃迁的测量，尤其是这样。

用于测量原子或分子跃迁频率的系统，包括物理和技术程序的几个步骤。这些程序会导致偏差修正和相应的不确定度，这些步骤可分为三类：1. 粒子制备；2. 粒子囚禁；3. 粒子探测[21]。

基本是不需要制备粒子。但是通常需要选择一定的能态或获得所需能级粒子数的分布。这可利用空间态选择、光抽运等做到。必须注意把干扰影响减至最小。

精密测量的一个基本方法是使观测时间尽可能长的粒子和探测辐射的同步相互作用的时间，而对讯号不引起过度的干扰或过多损耗。相互囚禁技术对降低多普勒效应也非常重要。

在简单气泡吸收测量中，多普勒效应是最严重的限制。

* 所谓精密度，是指一组给定的测量随时间的重复性。

各种囚禁技术，如带涂层壁的贮存器，离子贮存充有缓冲气体的贮存泡或进行粒子束都是可能的。

对粒子的探测。通常用一共振结构（腔或干涉仪）来增强相互作用和设置明确的空间作区。探测过程中会引入扰动，如 Bloch-Siegert 效应[22]和光子反冲[21,23]。

以下详细讨论能获得最准确的测量的三种方法。这三种方法都能够显著减少多普勒效应限制。

2.1. 粒子束

在一粒子束装置中，粒子从源中射出，形成粒子束在真空中通过，如图 3 所示。一极化器（空间态选择器，光抽运等）产生某种所需的能级粒子数分布。然后粒子束进入探测区，并在跃迁期间被“囚禁”在那里。适当强度和频率辐射探测使粒子数分布及辐射的传输和反射强度发生变化。因

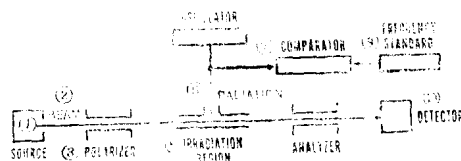


图 3 准确频率测量：粒子束法

图中文字：①源②束③极化器④振荡器⑤辐射⑥照射压⑦比较器⑧分析器⑨频率标准⑩探测器

此，可能有两种探测方式。一种是对一选定能级的粒子数计数来分析粒子数分布，因此需要一个类似极化器的分析器和粒子探测器，此探测法的一个例子如图 3 所示[24]。另一种探测方式（在图 3 中未示出）包括对辐射强度[25,26]的检测。在一定的条件下，特别是当束强度点够高时，此系统变成一

频率发生器（微波激励器、激光振荡器）〔25〕和一台频标相对比，即可探测和测其输出频率。

在粒子束中，多普勒效应由于束的窄狭和单向性而大大降低了。如果细心设计共振装置使束行进时不遇到与束平行的净辐射功率，实际上就可以消除由一级多普勒效应应造成的限制〔24〕。为修正二级多普勒效应，对于粒子速度必须有适当了解。若将探测区在空间上分离，粒子制备就不会频率偏差。

2.2. 粒子贮存

在贮存装置中，粒子贮存在一容器内，此容器如图 4 所示安装在供振装置中。粒子制备可和探测同时进行，例如用光抽运和检测抽运跃迁辐射的强度，如图 4 所示〔27〕。但

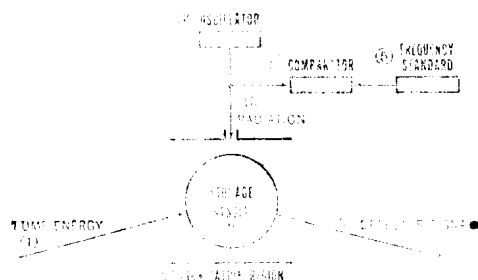


图 4 准确频率测量：分子贮存法

图中文字：①抽运能量②振荡器③辐射④比较器⑤
频率标准⑥贮存器⑦探测信号⑧照射器

是，这将引起难以估计的频移〔28〕。因此把制备区和探测区分开并采用如图 3 所示将贮存原理与极化和分析技术联系起来，是有益的。也就是说，把图 4 中的贮存装置插入图 3 系统中的极化器和分析器之间，这样就构成一个贮存束装

置[29,30]。还可随意调节此系统的参数(束强度、抽运强度……)这样就有可能发生自振[28,61]。

贮存技术的优点在于延长囚禁时间,而产生一极尖锐的谱线。若将粒子的运动限制在短于探测辐射的半波区域内,实际上也可以消除一级多普勒效应。这时微波频率是容易的,而对极短的波长就比较为困难。但是缓冲气体能充分的限制粒子运动。缓冲气体[28]和贮存器[31]的壁涂层也用来减少因壁碰撞产生的频移和弛豫过程。因贮存粒子的动能和贮存器处于热平衡,根据贮存器的温度,便能高度准确地计算出二级多普勒频移。

2.3. 饱和吸收

如图5所示,在一饱和吸收装置,振荡器的辐射以相反方向通过装有被研究的粒子的气泡。监察跃迁辐射强度与辐射传播矢量平行的,速度分量接近零的粒子,和辐射场产生一个非线性增强的相互作用(“Lamb 下陷”)[32,33]。此系统的参量可以这样的调节,使平行于辐射束的速度分量大的粒子不被探测。这样就显著降低了一级多普勒效应,也使相互碰撞的粒子大多数免除探测*。谱线宽度则主要由粒子穿过辐射束的飞越时间决定。二级多普勒修正可由气泡温度决定。在频率较高时,饱和吸收法被光子反冲效应所限制,此效应引起辐射频率 ν_E 与吸收频率 ν_A 相差一个分数量[21,23],

$$(\nu_A - \nu_E)/\nu = h\nu/mc^2 \quad (2)$$

式中, ν 为 ν_A 和 ν_E 的平均值, m 为粒子质量, h 为普朗克常数, c 是光速。

* 粒子碰撞使粒子的速度和方向改变。强烈碰撞使粒子免除探测因为碰撞以大的几率产生一个平行于辐射束的大的速度分量。

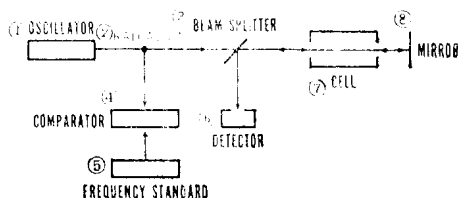


图5 准确频率测量：饱和吸收法

图中文字：①振荡器 ②辐射 ③束分离器 ④比较器
⑤频率标准 ⑥探测器 ⑦泡 ⑧镜

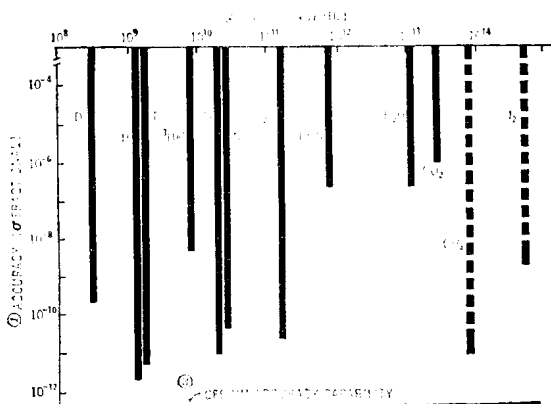


图6 整个电磁波谱内所选准确频率测量概况

这些准确度只反映至1970年夏的技术状况，对甲烷和碘分子用预期值表示

图中文字：①准确度（1 σ 分度） ②频率（赫） ③
铯准确度

3. 准确频率测量概况

为图6示出已发表的准确频率测量中最重要的。画出了1 σ 准确度与电磁波谱中的跃迁位置的关系。CH₄和 I₂虚线，

它们的频率还没有测出*。频率高于30兆兆赫的还没有成功。但是,几个小组的进展,尤其是美国标准局的K. Evenson[34]和麻州理工学院的 A. Javan [35] 的工作进展,即将成功。 CH_4 和 I_2 的测量准确度的估计数值是根据分别独立地和 CH_4 跃迁锁频的两个激光器间的拍频的估计和根据对 I_2 的类似情况的研究及对绝对波长的测定而得出的。表 1 是图 6 的数据补充。

HCN , H_2O 和 CO_2 的测量是通过金属—金属点接触二极管的倍频而做到的。这些数值的准确度较低,主要是由于在激光振荡器中观察分子跃迁。由于多普勒效应、压力效应、共振腔频率牵引等原因,使这种技术有较大的不确定度。 CH_4 和 I_2 的实验表明,使用饱和吸收法,将高度地提高测量的准确度。

$^3\text{He}^+$ 的测量表明,离子贮存是一种很有前途的强有力的谱线分析工具。但是,有几个实验参数尤其是贮存离子的动能(多普勒效应)[36]。还未完全了解,需要进一步研究。

最准确测量的基础方法已经讨论了,这是饱和吸收(CH_4 , I_2),贮存器和粒子束(Tl , NH_3 , H_2S , C_3)。铯束作为时间和频率的基本单位的原始标准,这是过去十五年测量最准确的装置(见图 1)。如图 6 下部的横线表示,它现在的准确度为 5×10^{-13} [15, 17, 18, 19]。

4. 准确频率测量的重要性和影响

我们一般地能够认识四个领域,在这四个领域内,准确频率测量是很重要的对某些未来科学技术的发展的也是可预

* 到目前为止,已用长度测定了它们的频率到大约六位数字,但根本未用频率度量。

表1 准确频率测量概况

粒子	跃迁	技术	频率	率	准确度	参考文献
D	$F, m_F = \frac{1}{2} \frac{1}{2} \leftarrow \rightarrow \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	贮存激光器	327 384	352, 51赫	2×10^{-10}	[37]
H	$F, m_F = 10 \leftarrow \rightarrow 0, 0$	贮存激光器	1420 405	751, 768赫	2×10^{-12}	[38, 39]
T	$F, m_F = 10 \leftarrow \rightarrow 0, 0$	贮存激光器	1516 701	470·809赫	5×10^{-12}	[40]
$^3\text{He}^+$	$F, m_F = 10 \leftarrow \rightarrow 0, 0$	离子贮存	8665 649	905赫	6×10^{-9}	[41]
^{205}Tl	$F, m_F = 10 \leftarrow \rightarrow 0, 0$	粒子束	21 310 833	945.9赫	1×10^{-11}	[42, 43]
$^{15}\text{NH}_3$	J, K=3 3反演	束激光器	22 789 421	731赫	5×10^{-11}	[44]
H_2^{12}S	1-1 $\leftarrow \rightarrow$ 1,	粒子束	168 762	762 373赫	2×10^{-10}	[45]
$\text{H}^{12}\text{C}^{14}\text{N}$	110 $\leftarrow \rightarrow$ 040	激光	0.890	7606兆赫	2×10^{-7}	[46, 47]
H_2^{16}O	001 $\leftarrow \rightarrow$ 020	激光	10.718	073兆赫	2×10^{-7}	[47]
$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$	P(18), 001 $\leftarrow \rightarrow$ 100	激光	28.359	800兆赫	1×10^{-7}	[34]
$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$	R(12), 001 $\leftarrow \rightarrow$ 020	激光	32.176	685兆赫	6×10^{-7}	[50]
$^{12}\text{CH}_4$	P(7), V_3 带	饱和吸收	≈ 88 兆赫		(1×10^{-11})	[32]
I^2	R(127), 11-5电子跃迁带	饱和吸收	≈ 474 兆赫		(2×10^{-9})	[33]
	$\text{B}^3 \text{I}^+_{\infty} \leftarrow \rightarrow \text{X}' \Sigma^+_{\infty}$					

1. 按照定义 $V_{\text{CS}} = 9192 \quad 631 \quad 770$ 赫

2. 对水蒸气激光的几种其它跃迁频率测量, 如在 H_2O [48] 中谱线为 2.5 兆赫 (118微米) 在 D_2O [49]

中谱线为 3.6兆赫 (84微米) 激光。

见的。这些概括地示于表 2。在本文讨论的范围内，仅最后一项——基本常数和基本标准是重要的，这将详细讨论，而作前三项只作简单说明。

计量学及应用包括雷达测距，特别是远距离（星际的测量），一般的星际探测，地面和空间导航（在导航中几周，几月甚至几年的无失锁的同步是必要的），包括高比特率 (bit rates) 和较好的使用电磁波谱的远程通讯和飞机预防碰撞系统，这是多半由于用畴技术利用准确钟的好处。

红外区和可见光区的准确频率测量好使原子和分子结构方面的知识大为增加。谱线常数如跃迁频率、 g 因子、斯塔克系数、旋转失真等，很容易以空前的精密度和准确度而测量出来。

表 2 影 响 范 围

計量学及其在技术上的应用

譜 綫 常 数

广 义 相 对 論

基本常数和基本标准

用在不同引力位势能的位置上的时间和频率座标的测量差值来验证广义相对论，要用安置在卫星或其它天空物体上的钟来进行。如果把现在的准确度提高一个数量级，有些试验就将可以在地球表面进行。

对整个电磁波谱频率进行准确测量的能力将大大地影响基本常数和基本标准系统。图 6 表明，频率测量已在兆兆赫频段内进行，不久即可能实现时间和频率标准(现在是铯¹³³)与长度标准(现在是氪⁸⁶) 的比较。这些标准之间的关系(包括光速 c) 是：