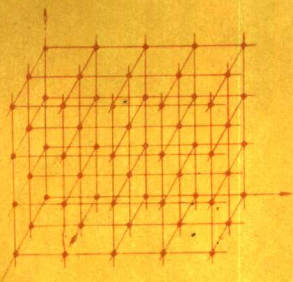


现代物理学丛书

量子频标原理

王义道 王庆吉 傅济时 董太乾 著



科学出版社

现代物理学丛书

量子频标原理

王义道 王庆吉 著
傅济时 董太乾

科学出版社

1986

内 容 简 介

量子频标是当代最先进、最精密的时间、频率计量标准，它广泛应用于计量、导航、通信、大地测量等方面。本书主要叙述各种量子频标的物理原理。全书共分八章，其中第一、二章介绍各类频标共同的物理基础；第三章介绍与频标有关的波谱学及量子电子学基础；第四章介绍频率控制原理；第五章至第八章主要介绍各类频标的工作原理，影响其性能的诸因素以及改进的措施。书末还附有附录和索引等。

本书可供从事量子频标研究和制造的科研和工程技术人员，以及大专院校有关专业的师生参考。

现代物理学丛书

量 子 频 标 原 理

王义道 王庆吉 著
傅济时 董太乾

责任编辑 李义发

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年7月第一版 开本：850×1168 1/32

1986年7月第一次印刷 印张：19 1/8

印数：精 1—1,100 插页：精 3 平 2

平 1—1,600 字数：496,000

统一书号：13031·3206

本社书号：4192·13—3

定价：布脊精装 6.20 元
平 装 5.40 元

序 言

量子频率和时间标准(量子频标和原子钟)是量子物理学与电子学高度结合的产物,是波谱学在技术应用上最突出的成就之一,目前它已成为理论性强、工艺精和应用广的新的科学技术分支。以它为基础的时间频率测量的相对精密度和准确度高达 10^{-16} 和 10^{-14} 数量级,远远超过其他物理测量的精度。为此,人们常常把其他物理量,如长度、温度、电压等设法转换成频率(时间)来进行测量以提高其精确度。量子频标不仅在导航、测量大陆漂移和地壳形变等技术领域中有广泛的应用,而且也是测定物理常数和检验物理理论(如量子电动力学、相对论等)的精密实验的必要工具。

时间(或频率)是基本物理量之一。人类研究和掌握自然规律,需要平均流逝的时间和恒定不变的标尺,时间标准是人类探测和研究物质的运动和变化的标尺。计时因人类的需要而创立,计时方法和计时标准的准确与稳定,亦随人类的进步而不断地改进和提高。过去传统的计时方法是以宏观物体的运动和变化作为标准的。宏观计时标准的秒是把地球自转周期(日)平均分成86400等分(世界时),或把地球某一年(1900年)的公转周期(年)细分为31556925.9747等分(历书时)而得到的。以地球自转和公转为基础的宏观计时标准,不仅需要精密的天文观测,手续复杂麻烦,而且准确度有限,只能达到 10^{-6} 和 1×10^{-9} 数量级,远不能满足科学技术发展的要求。

科学家们为了提高时间频率测量精度,为了寻求新的计时标准艰苦奋斗了数十年。近三十年来,随着量子物理学、微波波谱学和无线电电子学的深入发展,对微观物质与电磁场相互作用、对物质的微观量子态和它的跃迁作了比较深入系统的研究。实验证明,

微观量子态的跃迁有稳定不变的周期性的信号,从而找到一种新的作为时间或频率计量的标准,即以物质微观运动的量子跃迁作为时间频率标准——量子频标。这个从宏观尺度到微观尺度的转变,在现代科学技术史上写下了光辉的一页。

量子频标萌芽于二十世纪四十年代末期,五十年代初(1953年)氨(NH_3)分子振荡器的初始运转,标志着量子频标的诞生。之后,量子频标得到迅速发展。目前世界各国已研制出大量性能优异的各类频标,例如,铯原子束和铷气泡式非自激型量子频标;氢激光器和铷激光器等自激型量子频标。量子频标的准确度已达 10^{-14} 数量级,比宏观计时的天文标准的准确度高四、五个数量级。1967年10月13日第十三届国际计量代表大会决定,将铯(^{133}Cs)原子零场基态超精细能级跃迁 $\langle F=4, m_F=0 \longleftrightarrow F=3, m_F=0 \rangle$ 的9192631770个周期所持续的时间定为一秒,称作原子秒,从而开创了以微观量子跃迁为计时标准的新时代。

我国量子频标的研究始于五十年代后期,起步虽然较晚,但在党和国家的领导下,特别是在周恩来总理的热情关怀下,也有较大的发展,已初步建立了各类频标的科研和生产基地,培养了一批从事量子频标研究的科研人才,并取得了不少可喜的科研成果。

为了促进我国量子频标科研工作和量子计量学的发展,北京大学王义遒等四位教师在他们授课讲义的基础上,经修改、扩充编写了“量子频标原理”一书。该书包括量子物理基础、辐射场与物质相互作用、频率控制原理、各类频标的原理、性能和特点。本书从微波到光频,从基础物理理论到工艺设计,从历史发展到前沿工作,从国外动态到国内发展都阐述得比较清晰、细致和深入。据我所知,目前国外也还没有这样全面、系统地介绍量子频标的专著。

我相信,该书的出版,不仅有助于我国量子频标事业的发展,而且也一定会成为从事量子频标研究和使用的科学技术人员、管理干部的良好良师益友。

王天眷

前 言

我国的量子频标事业开始于五十年代末,到七十年代以后,已经形成了一支从事量子频标的研制、生产和使用、维修工作的队伍。他们多数是工程技术人员,迫切希望补充一些有关量子物理和波谱学方面的知识。这样,从七十年代中期,我们陆续举办了几期量子频标物理的短训班和培训班。本书的基础就是这些班上的讲义。这次成书时,我们重新作了全面改写。考虑到我国的现状,本书读者对象仍以工程技术人员为主,只要具备大学理工科的数学和物理基础,就可以看懂本书。尽管如此,我们还是力求从较高的物理水平上去揭示和频标有关的物理现象的本质,使不同程度的读者都能对量子频标物理有一个比较正确和深入的认识。

本书内容以叙述量子频标的物理原理为主,有关工艺细节或略或删,至于频标电路,本书很少涉及。在本书的编写过程中,我们虽然尽量把国内外的一些新成果、新内容包括进来,但由于频标进展日新月异,故本书的内容恐难以跟上量子频标迅速发展的现实。按照习惯用法,书中单位仍采用高斯制,书末附有国际单位制和高斯制的对照表。

本书编写工作的分工如下:导论,第三、七、八章,王义遒;第一、二章,王庆吉;第四、五章,傅济时;第六章,董太乾。全书由王义遒整理定稿,王庆吉校订。徐月亭同志绘制了全部插图(除少数原版图和照片外)。

在本书的编写过程中,王天眷先生仔细地审阅了全书手稿,提出了许多修改意见和宝贵建议;北京大学郑乐民教授阅读了第一、二、三、八章手稿;武汉物理研究所杨世琪副研究员阅读了第七章手稿,并提出了许多建设性意见。借此机会,仅对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

由于我们水平有限,书中错误和缺点会有不少,我们恳切希望广大读者和有关专家们批评指教。

作 者

导 论^[1,1a]

时间是最基本、最重要的物理量。为了描述事物的运动和变化,时间计量是不可缺少的。随着社会生产力和科学技术的发展,人们对时间计量的准确度和精密度的要求越来越高。作为时间计量的标准,过去一直使用着地球自转周期(日)或公转周期(年),但它们的周期太长,不便于日常应用。为了适应人们测量较短时间间隔的需要,还采用了人为的周期运动,如单摆和电磁振荡的周期来作为时间计量标准,不过它们的周期数值还是从天文标准导出来的。在测量高速运动和瞬变过程中,人们倾向于使用周期很短的标准,而对于这些短周期的周期运动,采用频率来描述更为方便。根据周期运动的频率和周期互为倒数的关系,时间计量标准和频率标准是统一的。时间是流逝的过程,时间标准不能象长度、质量标准那样固定不动地保存起来。因此,对时间标准的基本要求就是它的周期均匀性或稳定性。近几十年来的观察表明,天体运动的周期并不均匀。例如,地球自转速率经常变化,即使作了一些预期的修正,由地球自转周期导出的世界时的时间单位的相对稳定性只能达到 10^{-8} 数量级。由地球公转周期导出的历书时时间单位,考虑了天体间的相互影响,虽然理论上是均匀的,但要经过长期天文观测才能实现,其准确度也只有 1×10^{-9} 。现在用优质石英晶体的固有振动控制晶体振荡器发出的电磁振荡,其周期的相对稳定性可达到 10^{-11} /日,但因其周期有人为的任意性,而且有长期的老化漂移,故也不宜作为时间、频率的基本标准。

原子物理学的进步使人们认识到,不受外界干扰的自由原子、分子的内部运动状态是非常稳定的,而且,对所有同类原子(分子)都是相同的。因此,产生了利用十分均匀的物质微观运动周期作为时间、频率的自然计量标准的设想,而能体现原子(分子)这种自

然周期运动的是它们所发射或吸收的电磁振荡。从四十年代末、五十年代初射频波谱学的发展中,人们了解到,某些原子或分子的波谱谱线非常狭窄,其中心频率确是极其稳定,较少受外界干扰;可以用这些谱线作为体现标准频率的参考信号,以校正或控制一般信号发生器的频率,这样,就产生了量子频标和原子钟。1948年,美国国家标准局^[2]首先利用氨分子的反演吸收谱线来校正和控制了石英晶体振荡器的频率。五十年代初,开始尝试用铯原子束基态超精细跃迁谱线来稳定无线电信号频率^[2]。1955年,英国国家物理实验室首先成功地实现了用铯束谱线控制振荡器频率,得到了实用的原子频标装置^[3]。差不多就在第二年,美国出现了商品铯束管频标。与此同时,发明了氨分子受激发射振荡器[即微波激射器(maser)]^[4]。它开辟了量子电子学的广阔领域,也为量子频标提供了新的可能: 激射器的振荡信号具有高度频率稳定性和极纯的频谱,可以直接作为标准频率信号。此后的二十多年中,量子频标在稳定度和准确度等性能上有了显著的提高,从早期的 10^{-3} 数量级,到目前氢激射器频标的稳定度已达 10^{-13} /小时,铯束频标的准确度则已跨入 10^{-14} 数量级^[5]。1967年,在第十三届国际计量大会上,通过了以无干扰的 ^{133}Cs 原子基态超精细跃迁辐射周期的9192631770倍的持续时间为一秒的决定,这就是原子秒的定义。从1972年起,各国已普遍采用了建立在原子秒定义基础上的原子时,电台播发了原子时的时间信号^[6]。自从激光问世以后,出现了光频相干信号源,随着高稳定激光技术的发展和光频测量技术的解决,用激光信号周期作时间标准也成为实际可能了。

由于量子时间频率标准的高度稳定和准确,也由于现代电子技术能提供十分精密可靠的积累计数方法,时间频率测量所能达到的准确度和精密度是任何其它物理量所不可比拟的。这就使时间、频率在物理测量中占有特殊的地位。现在出现了这样一种倾向,即尽可能把其它物理量通过一定的关系转换成频率或时间来进行测量,以提高测量精确度。例如,通过约瑟夫森效应把电压转换为频率,通过核四极矩共振把温度转换为频率来进行测量等等。

目前,根据光速的数值来定义米长度的设想将要付之实现,这样,长度和时间频率的计量标准就可以统一起来。这不仅对计量学,而且对整个物理学和技术的发展都会发生深远的影响。可以说,在现代科学技术上,几乎没有一个部门不用到精确的时间和频率测量,这就极大地扩展了量子频标的应用范围。除了时间频率的计量服务系统以外,量子频标广泛应用于导航、通信、电视、导弹和卫星的控制、天文观测、大地测量、精密仪器校准、电网调节、乃至高速交通管理等技术部门。

量子频标本身是量子理论的产物,它作为精密的科学测量手段,反过来又将对现代科学的发展产生巨大的影响。使用量子频标的最精确的测量将帮助人们去发现极其细微的物理效应:已经利用飞行原子钟对相对论的时钟效应进行了检验;利用火箭荷载的氢激光器频标对引力“红移”效应进行了观测^[7];作为引力波存在的间接证明:脉冲双星 PSR 1913 + 16 公转周期(约8小时)变短(每周期差 -3.2×10^{-12})^[8]是精密时间测量的又一贡献。现在人们正在讨论用高性能稳频激光器来直接探测引力波的可能性^[9]。量子频标使许多物理常数和波谱谱线频率测定的准确度大为提高。原子能级兰姆移位和电子反常 g 值等的精确测量为量子电动力学理论的实验验证作出了贡献^[10],进一步加深了我们对辐射场与粒子相互作用奥秘的了解。

量子频标利用了原子或分子内部能级间的量子跃迁现象。按工作方式不同,可以把它们分成两大类:非自激型和自激型^{*})。在非自激型频标中,原子(分子)系统不能主动发射标准频率信号,而只起着鉴频器的作用。一台受控的振荡器(通过倍频和频率合成)给原子系统发出频率探索信号,当该信号频率偏离原子(分子)跃迁频率时,原子系统给出误差信号,其大小和相位与探索频率偏离原子频率的程度和方向有关。频率自动调整电路把误差信号转变

^{*}) 这两类频标一般俗称为被动型 (passive) 和主动型 (active), 本书根据王天眷先生建议,译成非自激型和自激型。

成控制信号,以调整振荡器频率,使之趋近于原子频率。这样的动态调整过程保证了振荡器频率稳定在原子频率上。铯原子束和铷汽泡频标是这类频标的典型。自激型也称激射振荡型。在这类频标中,原子(分子)系统主动产生受激发射的振荡信号,它本身具有很高的频率稳定性和准确性,可以直接作为标准使用。但是,一般射频量子振荡信号功率很小,频率又不是常用的整数值,不便于实际使用,所以往往利用锁相技术,以激射振荡信号作参考去锁定一台石英晶体振荡器的振荡频率,而以后者作为实际测量比对标准。氢激射器频标就是这样工作的。

量子频标的主要性能是它的标准频率的稳定性和准确性。频率稳定性最终决定于原子(分子)跃迁频率对外界各种干扰因素的敏感程度;以及这些因素本身的稳定性;而准确性则取决于我们对这些干扰因素的影响在理论和实验上的定量了解,以及这些因素的可控制和可测量的程度。这些都和原子(分子)与其特定跃迁的性质有关。为了得到性能良好的频标,必须在大量原子、分子及其数目繁多的各种跃迁谱线中进行细致的选择。同时,还要采取适当的实验措施以保证跃迁谱线具有频标所要求的良好性能,例如,谱线强度大、宽度小。为此,必须具备相当程度的原子、分子物理的知识,具备比较深入的有关辐射场与粒子相互作用的知识,特别是关于波谱学和量子电子学的知识。本书将首先扼要介绍这些方面的物理基础,然后逐一叙述各种频标的具体工作原理和特性。

参 考 文 献

- [1] 吴守贤,漆贯荣,边玉敬编,时间测量,科学出版社(1983)。刘金铭,翟迪成编,现代计时学概述,上海科学技术文献出版社(1980)。
- [1a] Kartaschoff, P., *Frequency and Time*, Academic Press (1978) (本书将由科学出版社出中译本)。
- [2] McCoubrey A. O., *Proc. IEEE.*, 54, 117 (1966)。
- [3] Essen, L., *Nature*, 176, 280 (1955)。
- [4] Gordon, J. P., Zeiger, H. J., Townes, C. H., *Phys. Rev.*, 99, 1264 (1955)。Басов, Н. Г., Прохоров, А. М., *УФН.*, 57, 485(1955)。
- [5] *Proc. of Third Symposium on Frequency Standards and Metrology*, J. de Phys. 42, Supplement to 12, C-8, 219—257 (1981)。

- [6] Smith, H. M., *Proc. IEEE.*, **60**, 479 (1972).
- [7] Vessot, R. F. C., *Proc. 2nd Symposium on Frequency Standards and Metrology*, 659 (1976).
- [8] Taylor, J. H., Fowler, L. A., McCulloch, P. M., *Nature*, **277**, 437 (1979).
- [9] Vessot, R. F. C., *J. de Phys.*, **42**, Supplement 12, C-8 359 (1981).
- [10] 邱元武, *物理*, **6**, 538(1979).

目 录

导论.....	xv
第一章 原子能级与光谱.....	1
§ 1.1 原子结构的基本知识.....	1
1.1.1 原子和它的结构	1
1.1.2 原子中核与电子的相互作用	3
§ 1.2 单电子原子的能级与光谱.....	4
1.2.1 氢原子的玻尔模型和主量子数 n	5
1.2.2 角动量量子数和磁量子数	11
1.2.3 能级和谱线的精细结构	14
§ 1.3 碱金属原子的能级与量子数.....	26
1.3.1 原子的电子壳层结构	26
1.3.2 碱金属原子的量子数和能级	28
§ 1.4 多电子原子的能级和量子数.....	36
1.4.1 $L-S$ 耦合	37
1.4.2 $j-j$ 耦合	44
1.4.3 J_L-L 耦合与拉卡 (Racah) 符号	45
1.4.4 多电子原子能级与光谱举例	47
§ 1.5 塞曼效应和斯塔克效应.....	53
1.5.1 原子的磁矩	54
1.5.2 塞曼效应	55
1.5.3 斯塔克效应	61
§ 1.6 原子能级的超精细结构.....	61
1.6.1 核自旋效应	62
1.6.2 核电四极矩效应	68
1.6.3 同位素效应	72
§ 1.7 超精细能级的塞曼效应.....	74

1.7.1 考虑核自旋时原子的总磁矩	74
1.7.2 超精细能级的塞曼效应	75
1.7.3 超精细结构塞曼跃迁谱线	80
参考文献	85
第二章 分子能级和光谱	86
§ 2.1 分子光谱的特点	86
2.1.1 分子结构与分类	86
2.1.2 分子内部三种运动状态	86
2.1.3 分子光谱的特点	87
§ 2.2 分子转动态与转动能级	89
2.2.1 双原子分子的转动量子数和转动能级	89
2.2.2 多原子分子的转动能级	92
§ 2.3 分子的振动能级与光谱	92
2.3.1 双原子分子振动能级与光谱	92
2.3.2 多原子分子的简正振动与振动能级	96
2.3.3 振动-转动系统	100
§ 2.4 分子的电子态与电子态跃迁	101
2.4.1 分子中电子状态的描述	101
2.4.2 分子的电子带光谱	105
§ 2.5 分子能级的斯塔克效应和塞曼效应	109
2.5.1 斯塔克效应	109
2.5.2 塞曼效应	111
§ 2.6 分子能级的超精细结构	113
2.6.1 分子能级的超精细结构	113
2.6.2 超精细结构的斯塔克效应和塞曼效应	114
参考文献	116
第三章 辐射场与粒子相互作用的基本知识	117
§ 3.1 电磁场与粒子相互作用的经典图象	117
3.1.1 自由辐射场的基本性质	117
3.1.2 辐射场的模与模密度	122
3.1.3 辐射场的产生	125
3.1.4 辐射阻尼和谱线的自然宽度	130

3.1.5	受激发射与吸收	133
3.1.6	电磁波在介质中的吸收和色散	136
§ 3.2	光子与量子跃迁	139
3.2.1	黑体辐射规律与光子	139
3.2.2	光子的基本性质	142
3.2.3	光子的状态和它的统计涨落	144
3.2.4	量子跃迁	146
3.2.5	辐射跃迁系数之间的爱因斯坦关系式	148
§ 3.3	波谱信号的观测	151
3.3.1	电磁波谱	151
3.3.2	观测量子跃迁的两种实验方法	153
3.3.3	波谱信号参量的描述	156
3.3.4	调制在观察波谱信号中的作用	160
§ 3.4	跃迁几率与信号强度	164
3.4.1	孤立原子二能级偶极跃迁几率	164
3.4.2	孤立二能级偶极跃迁几率的经典解释——磁共振 ...	168
3.4.3	有限寿命下二能级的平均跃迁几率	173
3.4.4	弛豫和弛豫作用下的稳态跃迁速率	174
3.4.5	跃迁矩阵元及其与电磁场偏振的关系	178
3.4.6	跃迁几率的实际估算	184
3.4.7	信号强度	186
3.4.8	信号的饱和	188
3.4.9	等距多能级系统的跃迁几率 (Majorana 公式)	191
§ 3.5	谱线的频移与增宽	194
3.5.1	有限辐射寿命引起的线形与线宽	194
3.5.2	辐射频移与增宽	196
3.5.3	饱和增宽	200
3.5.4	碰撞增宽与频移	202
3.5.5	多普勒增宽和频移	206
3.5.6	若干克服多普勒增宽的方法	210
3.5.7	实验条件不善引起的谱线增宽与频移	213
3.5.8	均匀增宽与非均匀增宽、谱线的实际宽度	216
§ 3.6	受激发射放大与振荡	218

3.6.1 受激发射增益	218
3.6.2 谐振腔的特性	221
3.6.3 振荡条件	222
3.6.4 激光器的振荡频率	225
3.6.5 激光器的振荡频谱	228
参考文献	232
第四章 频率控制原理	235
§ 4.1 量子频标的指标及其表征	235
4.1.1 频率准确度	236
4.1.2 频率稳定度	236
4.1.3 频率复现性	239
§ 4.2 非自激型量子频标工作原理	239
4.2.1 非自激型量子频标的伺服环路	239
4.2.2 简化的伺服环路及其静态特性	241
4.2.3 闭环工作过程	243
4.2.4 伺服环路的动态特性曲线、捕捉带及同步带	245
§ 4.3 锁频环路的瞬变过程与截止频率	247
4.3.1 锁频环路的线性化	247
4.3.2 基本环路方程	249
4.3.3 环路的瞬变过程	250
4.3.4 环路截止频率	253
§ 4.4 噪声与干扰对输出频率的影响及环路的设计	256
4.4.1 环路各点噪声对输出频率的影响	256
4.4.2 非自激型量子频标伺服环路的设计	260
§ 4.5 自激型量子频标基本原理及其特性	265
参考文献	270
第五章 原子束频标	271
§ 5.1 铯束管的基本结构	271
§ 5.2 原子在不均匀磁场中的运动	274
5.2.1 铯原子的超精细结构	274
5.2.2 二极场中原子的运动轨迹及其探测条件	275
§ 5.3 束强及其分布	282

5.3.1	薄壁小孔的泻流	282
5.3.2	经长管道准直器的泻流	284
5.3.3	检测束强	287
5.3.4	无偏转束形	287
5.3.5	原子束的速率分布	289
5.3.6	有偏转场时的束形	289
§ 5.4	谱线的线形及线宽	298
5.4.1	单振荡场的跃迁几率	299
5.4.2	分离振荡场的跃迁几率	301
5.4.3	振荡场相移对跃迁谱线的影响	305
5.4.4	跃迁过程的经典描述	307
5.4.5	两种激励方法的比较	311
§ 5.5	束的检测与信噪比	311
5.5.1	表面电离法	311
5.5.2	静电计或电子倍增器输出端的信噪比	313
5.5.3	束管输出端的检测信噪比	317
§ 5.6	束管优值及铯束频标的短期频率稳定度	318
§ 5.7	铯束频标的准确度	323
5.7.1	由磁场引起的频移及其误差	323
5.7.2	多普勒效应引起的频移	327
5.7.3	与辐射场有关的频移	346
5.7.4	频率牵引效应	350
5.7.5	伺服电路不完善引起的频率误差	351
5.7.6	铯束频标准确度现状	355
§ 5.8	铯束频标进展及其它束型频标	355
5.8.1	铯束频标发展近况	355
5.8.2	其它原子及分子束频标	360
	参考文献	364
第六章	非自激型光抽运气泡式原子频标	366
§ 6.1	非自激型光抽运气泡式原子频标的结构	366
§ 6.2	量子物理部分的基本原理	367
6.2.1	^{87}Rb 原子的能级	367
6.2.2	光抽运原理	370