

总参谋部测绘导航局推荐读物



原子钟 与时间频率系统

(文集)

王义遒 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

原子钟与时间频率系统

(文集)

王义道 著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

当今节奏高速的信息化社会,时间频率系统对于生产保障、经济运行、社会管理、技术开发、科学研究和国防安全等具有头等重要的意义。时间频率系统的核心是原子钟。本书叙述目前使用和未来发展的各种原子钟的工作原理、关键技术、性能指标、应用领域,以及国内外的發展概况和趋势。附录中列出了现有国内外商品原子钟的性能指标。在此基础上,本书概述了时间频率系统的内涵、功能、构成和运行,介绍了国外时间频率系统的建设运行情况,并对建设我国时间频率系统的决策、方案和措施提出了许多建议。

本书是一本文集,包含从通俗科普到相对深入不同层次的文章,可以作为从事时间频率系统工作的技术人员和行政管理人员参考,也可供从事原子钟科研、开发、生产的工程技术人员,以及大专院校和科研院所相关专业师生的入门指导和技术资料,还可供关心时间频率及其应用的社会人士广泛阅读。

图书在版编目(CIP)数据

原子钟与时间频率系统/王义道著. —北京:国防工业出版社,2012. 10
ISBN 978-7-118-07871-8

I. ①原… II. ①王… III. ①原子钟—频率基准—文集 IV. ①TM935. 115—53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 013577 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 19 字数 340 千字

2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 56.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

随着科学技术突飞猛进,人们的工作与生活节奏日益快捷,精密时间频率的测量、控制、同步、统一成为日常生活、经济、科技和国防不可或缺的组成部分。精密时间频率系统的建设目前也成为各大国(小国可以应用大国所提供的全球系统,如 GPS 服务而不必由本国独立建设)社会关心的大事。这个系统的核心部件是原子钟。因此,对原子钟及有关精密时间频率系统的知识也越来越为社会公众所关注。

为了适应这种迫切需求,近 10 年来,笔者曾在不同时间、不同场合、应不同的要求做过和写过一些有关原子钟和时间频率系统的报告和文章。这些报告和文章大都是科普性、介绍性的,也有一些是综述性、评论性和工作建议性的,较少非常深入、专门的内容,但简略与繁详的程度差别很大。它们适宜于从事有关时间频率技术和管理部门的工作人员参考,并为开始进入该领域的科技人员做入门指导之用,当然也可满足社会大众要求了解这个领域的现状和发展的愿望。2006 年 9 月,有关单位曾把相关文章汇集成为一本专门文集,作为“内部资料”供相关人员阅读参考。文集附录还收录了几篇笔者对我国时频体系建设有一定参考价值的国外资料的译文,编制了国外商品原子钟性能指标的汇总表。这次决定把这本文集公开成书出版,增添了 5 篇 2006 年以后发表的文章,对个别文章做了较大的增补与删节,以反映时频科技的新发展。对一些过去已经发表过的文章,则只做了少数文字修改,因此,在数据资料引用上难免因文章写作时间不同而有所出入,请读者鉴谅;不过读者也可由此体会相关工作的进展。由于是报告和文章的汇集,难免有所重复,这次出版,把过多的重复做了删节,为保留全文的完整性,有些删节处用“略,参见某文”的方式注明。

航天科工集团 23 所倪燮良研究员协助编制了《国内外原子钟产品性能指标汇总表》，并审阅了全书初稿，做了许多校对、订正工作；中国卫星导航定位应用管理中心张宁和国防工业出版社汪淳对本书出版做了大量细致的工作，付出颇多，对此致以衷心地感谢！

在学术上，原子钟和时间频率系统是一个较狭窄的领域，但在科学技术和应用上却牵涉到大量学科与行业，不少涉及该学科的前沿（与原子钟有关的诺贝尔物理奖有 12 个，见文 11 附录），对这一领域所有方面都精通是很困难的。由于才识有限，书中错误、疏漏和不当之处在所难免，希望读者不吝赐教。电子邮箱：wangyq@pku.edu.cn。

王义道

2011 年 8 月 10 日于北京蓝旗营

导 读

由于本书是一个文集,文章之间缺乏连贯性,为了使不同要求的读者能够较快地找到适合自己需要的内容,特编制此“导读”。

上篇 原子钟

- 为较通俗地了解原子钟的一般概念、工作原理和应用,请读文 1:原子钟及其进展。
- 为简要地理解原子钟工作的量子物理原理,请读文 2:量子效应在计量上的应用。
- 为全面扼要地了解常用原子钟的工作原理和性能特点,可读文 5:星载原子钟国外的发展概况和我国的发展途径,5.2 节:原子钟的工作原理及发展概况。
- 为较详细地全面了解常用原子钟的工作原理、物理特性、基本性能和应用,作为从事该项工作入门指导的,可读文 3:时间频率量子标准。本文实际上是 1986 年科学出版社出版的《量子频标原理》专著的细节录和补充。
- 为较具体地了解新型原子钟发展概况的,请读:
 - (1) 文 3,3.2 节,四、激光冷却铯原子喷泉频标;
 - (2) 文 4:冷原子钟;
 - (3) 文 6:实用原子钟的发展与前瞻。
- 为较具体详细地了解激光冷却的原子钟,包括工作在微波段和光频段(光钟)的,请读:
 - (1) 文 3,3.2 节,四、(二)原子的激光冷却与陷阱(叙述激光冷却的基本工作原理);
 - (2) 文 4:冷原子钟。
- 具体了解星载原子钟的工作特点及其相关问题,请读:
 - (1) 文 5:星载原子钟国外的发展概况和我国的发展途径;
 - (2) 附录 1:空间钟为什么不一般?

- 为了解我国原子钟发展概况,请读:

(1) 文 5:星载原子钟国外的发展概况和我国的发展途径,5.4 节:我国原子钟发展概况;

(2) 文 7:原子频标在中国的发展;

(3) 文 8:原子钟与相关物理学的研究。

- 国内外商品原子钟的主要性能指标,请读附录 2:国内外主要商品原子钟性能指标汇总表。

下篇 时间频率系统

- 关于时间频率的基本概念、定义和特征,请读文 9。
- 关于时间频率系统的内涵、组成与功能,请读文 10。
- 关于时间频率的传递发播系统的情况,请读文 10。
- 关于我国建立时间频率系统的意义与政策建议,请读文 11、文 12、文 13。
- 关于美国与俄罗斯的时间频率系统的情况,请读附录 3、附录 4、附录 5。
- 关于时间频率系统的应用,请读文 14。

目 录

上篇 原子钟

1	原子钟及其进展	2
2	量子效应在计量上的应用	8
2.1	概述	8
2.2	建立在量子跃迁基础上的频率标准	8
2.3	建立在频率测量上的计量标准	15
2.4	量子力学规律与测量不确定性	17
3	时间频率量子标准	19
3.1	概述	19
3.2	铯原子束频率标准	24
3.3	铷气室原子频标	45
3.4	氢激射器频标	53
3.5	新频标探索	62
3.6	量子频标的应用	67
	参考文献	71
4	冷原子钟	74
4.1	原子喷泉频率标准	74
4.2	其他冷原子钟	96
	参考文献	109
5	星载原子钟国外的发展概况和我国的发展途径	114
5.1	概述	114
5.2	原子钟的工作原理及发展概况	115
5.3	国外星载原子钟发展概况	134
5.4	我国原子钟发展概况	144
5.5	对发展我国星载原子钟的看法及战略与途径的探讨	149
	参考文献	156

6 实用原子钟的发展与前瞻	158
6.1 概述	158
6.2 新物理方法与器件的应用	161
6.3 传统原子钟的性能钻研与工艺改进	165
7 原子频标在中国的发展	167
7.1 概述	167
7.2 国家原子频率基准	167
7.3 氢脉泽频率标准	170
7.4 光抽运汽泡型铷原子频率标准	171
7.5 铯束频率标准	173
7.6 其他频率标准	174
参考文献	175
8 原子钟与相关物理学的研究	177
8.1 概述	177
8.2 光抽运汽室频率标准的研制	179
8.3 原子束频率标准的研究与开发	183
8.4 激光冷却原子钟的探索	188
8.5 结束语	192
参考文献	193
附录1 空间钟为什么不一般?	196
附录2 国内外主要商品原子钟性能指标汇总表	205

下篇 时间频率系统

9 时间频率量的特征及其对时频系统建设的影响	222
9.1 时间频率量的显著特点	222
9.2 时间频率量的特征对时间频率体系建设的影响	225
9.3 结束语	228
参考文献	228
10 时间频率发播系统(提纲)	229
10.1 时间频率系统基本概念介绍	229
10.2 国外时频系统简介	233
10.3 天基发播系统	235
10.4 地基发播系统	241

10.5	标准时间传递方法与系统的比较·····	244
10.6	对我国时频体系建设的建议·····	249
	参考文献·····	250
11	建设我国独立自主时间频率系统的思考·····	252
11.1	时间频率量的特点及其影响·····	252
11.2	建设我国独立自主的时间频率系统的必要性和系统框架·····	252
11.3	怎样建设我国自主的时间频率系统·····	256
	附录:与原子钟研究密切相关的诺贝尔物理奖·····	260
12	发展我国原子钟事业,要研究与生产相结合,走产业化的道路	
	(摘要)·····	261
13	建设自主完善的时间频率系统是国运所系·····	262
13.1	时间频率是强国强军的关键技术·····	262
13.2	原子钟是时间频率系统的核心部件·····	264
13.3	原子钟和时间频率系统的发展概况·····	267
13.4	我国原子钟和时间频率系统发展状况与发展谋略·····	268
	参考文献·····	271
14	自主创新“北斗”技术,提升城市管理水平·····	272
附录3	美国天基 PNT 简介·····	275
附录4	美军时间频率法制文件·····	281
附录5	俄罗斯联邦国家时间频率服务·····	285

上 篇

原子钟

- 1 原子钟及其进展
 - 2 量子效应在计量上的应用
 - 3 时间频率量子标准
 - 4 冷原子钟
 - 5 星载原子钟国外的发展概况和我国的发展途径
 - 6 实用原子钟的发展与前瞻
 - 7 原子频标在中国的发展
 - 8 原子钟与相关物理学的研究
- 附录1 空间钟为什么不一般?
- 附录2 国内外主要商品原子钟性能指标汇总表

1 原子钟及其进展

第二次世界大战结束的时候,原子弹威力无穷,成为风靡世界的话题。那时候,什么东西以挂上“原子”的称号为时髦,连“圆珠笔”都被称为“原子笔”,世界进入了“原子时代”。差不多同时,精确地说,差3年,1948年,诞生了世界上第一台原子钟。但是,原子钟没有原子弹那样家喻户晓。原子钟太脱离老百姓的生活实际了,没有名气。现在,在中国原子钟似乎要吃香了,有人说,现代战争“威力靠原子弹,打准靠原子钟”;甚至说,“原子钟比原子弹更重要”,因为现代战争靠的是“精确打击”。

为什么原子钟那么重要呢?原子钟在现代战争和民用上有哪些功能?

俗话说:“兵贵神速”。打仗最重要的就是速度与准确了。现代战争发挥威力的是装有核弹头的火箭、导弹。但打不准,不仅没有作用,还会伤及无辜。炮火的威力在于命中目标,否则就是浪费。要知道一颗导弹值几百万元、上千万元啊。火箭、导弹的位置、方向和速度是靠电磁波(或光,光也是电磁波)来控制的。电磁波的速度是 299792.458km/s (约30万 km/s),一栋建筑,一艘军舰,一架飞机,要打准,精确度总要在 $3\text{m} \sim 10\text{m}$,如果用时间来控制,精确度要达到一亿分之一秒(10^{-8}s ,即 10ns)。如果1台钟1天(86400s)校正1次,要保持这么高的精确度,钟的天稳定度就要达到 1×10^{-13} ,这样稳定的钟只有原子钟。

原子钟为什么这样稳定?我们知道时钟是靠某种周期运动周期的恒定性来做时间标准的,如摆的振动周期、电子表中石英晶体的振荡周期等。但是,这些运动的周期容易受外界的影响而不太稳定。最稳定的是原子中电子围绕原子核所做的周期运动,这些运动随着原子中电子结构的差别有各种不同的形式和相差很大的周期。在微观物理上,原子中不同的电子运动有不同的能量,它们属不同的原子“能态”。原子可以在外加电磁波的作用下从一种能态转变到另一种能态,这时会发射或吸收相应频率(或周期,它们互为倒数)的电磁波。若一个能态的能量为 E_1 ,另一能态的能量为 E_2 ,则原子从 E_1 态“跃迁”到 E_2 态时所吸收或发射的电磁波频率为 $\nu = (E_2 - E_1)/h$ 这里, h 为普朗克常量。当 $E_1 < E_2$,就发生吸收;反之,则为发射。由于原子能态非常确定,这个频率也是十分确定的。根据原子的电子状态不同,原子吸收或发射电磁波的频率(原子频率)差别很

大,有的处在无线电(射频)波段,有的达到光波段。原子钟就是利用原子吸收或发射的这些稳定周期的电磁波来作为时间标准的。

原子频率一般比常用(如导航、通信、雷达)的电磁波频率高,而且不是整数,因此原子钟实际上还是用通常的电子振荡器的振荡信号作为标准频率(时间)信号。不过,这个频率是严格受原子运动控制的,从而使钟的走时稳定性取决于原子频率。具体的控制过程如图 1-1 所示,受控电子振荡器发出的电磁振荡信号经过频率变换电路使它的频率变得接近于原子频率。原子接到这种信号时就会作出响应,发射或吸收相应频率的电磁波,这个电磁波就称为“共振信号”。当原子接到电磁波信号的频率与其自身频率完全相同时,共振信号最强,偏离时则减弱,这个“共振”范围叫“线宽”。根据共振信号的大小及其距离峰值的位置可以判断外来信号频率是否与原子频率相符及其偏离的程度。这样,当电子振荡器信号频率由于某种原因而偏离共振峰值时,我们就会发现共振信号的减弱,并藉以调节振荡器频率使之回复到原有频率上,从而达到输出信号频率的稳定。

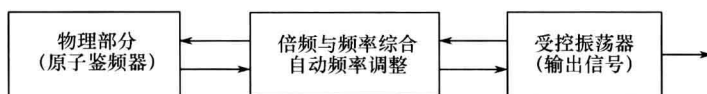


图 1-1 原子频标的基本组成

在这里,最重要的物理过程就是要体现原子频率的共振信号取出来。在此过程中还要求原子频率保持稳定不变,而且原子系统对外加信号频率的响应要越尖锐越好(即共振曲线的强度要大,线宽越窄越好)。但是,世界上没有绝对不变的事物。实际上,原子频率也不是绝对稳定的,原子的整体运动,原子与原子的碰撞,原子和外电、磁场及电磁波的作用等都会使原子频率发生微小的变动;而原子振荡对外加信号频率响应的线宽不仅与上述因素有关,还取决于原子与外加信号的相互作用时间的长短。这给了原子钟研究以深厚的物理内容,包括选择原子及其电子运动的类型,研究各种物理因素对原子频率的影响,探索减少乃至消灭其影响,以及缩小共振信号线宽的方法等。在半个多世纪的原子钟探索历史上,有 11 个(加上 2005 年的 1 个,现共有 12 个)诺贝尔物理奖是授予与原子钟有关的研究的,从这里可以看到原子钟研究对整个物理学发展的影响,这是因为物理学的进展是和测量精确度的提高密不可分的。

经过科学家长期艰苦的努力,从大量原子、分子和离子的各种电子运动形式中筛选,现在成熟的原子钟有 3 种,它们分别使用了外层电子只有一个的铯、铷和氢原子。为了减少原子间的相互作用,它们都处于气态,而铯原子钟则更是利用了定向运动的“原子束”。原子束的好处有两个:一是可以基本消除原子之间

的碰撞相互作用；二是其行进方向可以和外加的电磁波传播方向垂直交叉，这样，在两者相互作用过程中可避免发生多普勒效应。碰撞和多普勒效应都是使原子共振信号频移和加宽的主要原因。因此，铯束原子钟具有最高的准确度，是当前国际上产生秒定义信号的原子钟。按国际规定，1s 是不受干扰的铯原子一个称为“基态超精细结构跃迁”的信号周期的 9192631770 倍。此数也就是这个原子“跃迁”信号的频率。现在我们所使用时钟显示的秒、分、小时、日等时间都要追溯到这个基本的时间单位上去。所以铯原子钟是时间“基准”。而以地球自转周期或绕太阳的公转周期确定时间单位的时代已成为过去，我们真正是处在“原子时代”了。

利用原子束的铯原子钟的准确度可以达到 1×10^{-14} 数量级。就是说，用这种时间标准来量度 1s 时间，误差不会超过 10fs (1×10^{-15} s)，用来测量一天时间，偏差不超过 1ns。这是一般人所难以想象的准确度，等于做一个实验，其数据的有效数字有 14 位 ~ 15 位。

除了准确度以外，稳定度也是原子钟的重要性能指标，这在文章开头已经提到了。要使原子钟的稳定度高，就要让电子振荡器的频率稍有变化时原子系统就能感受到。就是说，要求共振信号的强度高、线宽窄。为此，首先要把原子系统中的大量原子都处在一种状态下。上面说过，当原子受到频率适当的电磁波照射时会吸收或发射同样频率的电磁辐射。如果有些原子在一个态，另一些原子在另一个态，这样发射和吸收互相抵消，共振信号就减弱了。为了使所有原子都处在同一个态，我们就要进行原子态的制备，这是保证得到强的共振信号的前提。

制备原子态的方法一般有两种：一是磁选态，它利用不同能态的原子带着不同的磁矩，就好像方向不同的磁针，在磁场中会有不同的偏向。这样，在原子束中不同能态的原子就走着互相不同的轨道，我们可以选取一种轨道的原子而丢弃另一种轨道上的原子。二是光抽运，它利用两种不同能态的原子对特殊频率和偏振光的吸收概率的不同。若 E_1 态原子比 E_2 态原子更能吸收光，则原子吸收光后就会被激发到一种“激发态”，这是一种不稳定的原子态，原子会很快返回“基态”。原来的 E_1 和 E_2 两种状态都属基态，而返回到这两种基态的概率往往是相等的。经过这样一个循环，原属 E_1 态的原子有可能迁移到 E_2 态，由于光对该态的作用小，原子就会长期呆在该态。这样，我们就能把几乎所有原子都制备到该态。铯和氢原子钟中用的是磁选态方法，而铷原子钟则用了光抽运方法。显然，后一种方法可利用的原子多些，因为选态方法只选用了一种原子，而抽运方法则使非所用态的原子转变为有用态原子，原则上所有原子都利用上了。不要小看这两种似乎很简单的方法，它们都得过诺贝尔物理奖呢！

为了缩小共振线宽,要采取避免原子之间的碰撞和与外加辐射场相互作用过程中的多普勒效应,这与提高准确度的措施是相同的。此外,还要尽量延长原子系统和外加的电磁波的作用时间。前面提到原子束是减少碰撞和多普勒效应的理想方法,但它有装置和制造工艺复杂的缺点。简单的办法是用气室,气室里的原子做无规运动,而且速度极大,在通常温度下达几百米每秒到上千米每秒,产生的多普勒效应很大。由于该效应来源于原子与电磁场相互作用过程中因自身运动而感受到辐射场的相位不同,因此如果能使原子运动局限于远比辐射场波长小的区域,原子在运动中感受到的辐射场相位变化不大,又在迅速的无规运动中被平均化,这样就可有效减少多普勒效应。这时,自然会发生原子与周围物质碰撞的问题。可用特殊物质包围原子,如用惰性气体组成的缓冲气体,或用长链饱和化合物,如聚四氟乙烯涂层涂敷器壁,这种物质与工作原子的碰撞对原子状态的干扰较小,可以降低共振信号的碰撞频移和增宽。铷和氢原子钟就是利用了这种机制达到了压窄共振线宽的目的。在原子束频率标准(原子钟)中由于原子通过电磁场相互作用区的时间是有限的,以致共振信号展宽,为了延长相互作用时间,可采取多次作用的办法,即在原子束的路径上设置几个相位相同的电磁波作用区,原子和电磁场相互作用的干涉使共振信号产生干涉花纹,共振中央的线宽极窄,如图 1-2 所示。这个方法称为 Ramsey 分离场方法,也荣获了诺贝尔物理奖。

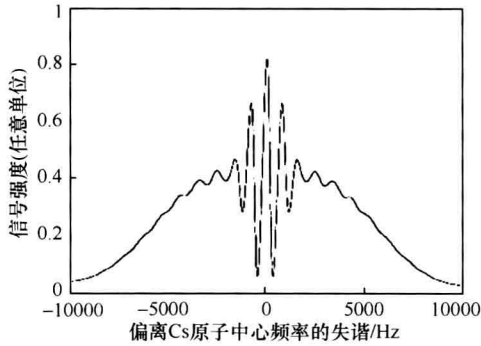


图 1-2 Ramsey 共振花纹(一般的共振信号曲线只是它的包络线,线宽大得多)

采用这些措施后,高级的铯和铷原子钟的天稳定度(稳定度与测量取样时间有关,天稳定度表示以一天为取样时间进行测量的数据)可达 10^{-14} 数量级,而氢原子钟则可达到 10^{-15} 以下,甚至进入 10^{-16} 。

上述通常难以想象的准确度和稳定度对当代科学来说有时还不够,例如,要验证广义相对论和量子场论的一些结论,探测引力波等。所以,进一步提高原子钟的准确度仍然是科学家的一种追求。在这方面,目前有几个发展方向,都取得

了突出的成就。一是对传统的原子钟采用激光冷却原子的办法降低原子运动的速度,从而进一步减少了多普勒效应和碰撞的影响;二是离子储存,用电场、磁场中囚禁的离子代替一般原子做原子钟的工作物质;三是光频原子钟,即把原子钟的工作频率提高到光波波段。下面简述这些进展。

(1) 冷原子钟 影响传统原子钟准确度提高的最主要因素还是剩余的多普勒效应。它来自两方面,一是原子运动速度高;二是用分离场方法使原子与辐射场相互作用时,难以完全保证各个辐射场的相位一致。因此,降低原子速度成为提高原子钟性能的关键。正是这种要求推动了 20 世纪 80 年代以后激光冷却原子技术的蓬勃发展,成为物理学上的一个重要成就,获得了 1997 年诺贝尔奖。关于它的原理不在这里叙述。简单说来,它依靠光与原子相互作用过程中光子和原子之间的动量和能量的交换,原子不断吸收来自反方向的光子使它的动量连续损失,从而降低了速度。用这种方法可使原子速度从几百米每秒降至几厘米每秒,相应地温度从室温(约 300K)降至 μK 量级。这样就可大大减少多普勒效应的影响。还有更重要的,用冷原子束可实现“原子喷泉”,就是把慢速原子团垂直上抛,然后让它们在重力场中自由下落,形成喷泉一样的形状。原子束在上抛和下落的路径上设置一个辐射场,这是一个场,没有相位差别。但对原子说来,却是两个分离的场,原子经受这两个场作用后所得的共振信号宽度非常窄。现在法、美、德等国已实现了这种铯原子喷泉钟,其准确度接近 1×10^{-15} (2003 年以后详情见文 4),而若用铷原子做钟,还可进一步把准确度做到 10^{-16} 数量级(原子间碰撞引起的频移更小)。

(2) 离子储存 离子带电,更容易受电场、磁场的作用。因此,可以设计特殊的电场、磁场使离子囚禁在空间一个远小于与其作用的电磁波波长的小区域中,这样可以缩小多普勒和碰撞效应。所以,用离子做原子钟具有极高的性能潜力。现在已经研究了好几种离子,如汞、镱、铍、钡、镁等离子,它们确实都表现了很好的做原子(离子)钟的性能,汞离子钟已成为现实。在光频波段,汞、铷等离子表现更为出色,用它们做原子钟,期望可得到 10^{-18} 的准确度。

(3) 光钟 一般说来,随着频率的提高,原子钟的准确度和稳定度也都相应提高,因为这些指标都是指它们对标称频率(时间)的相对值。这种钟发出频率处在光波段的标准信号,所以它的受控信号发生器是激光器,激光的频率则受原子控制。问题是,光波的周期太短了,只有飞秒($1 \times 10^{-15}\text{s}$)量级,跟通常所用的时间相比实在难以利用。必须找到一种能把周期这么短暂的时间标准与日常生活所用的时间连接起来的方法,这是长时期困扰科学家的课题。但是,在 2000 年前后,这个问题被德国和美国的科学家联合解决了,他们巧妙地利用飞秒脉冲激光器把光波与无线电(射频)波联系起来,从而真正地实现了“光钟”。可以期

望这种光钟能达到 10^{-18} 的准确度和稳定度。尽管目前离实际应用还有一段距离,相信不要太久,光钟就会在科学测量中显示自己的光彩。

综上所述,已可体会原子钟与日常生活的关系。尤其在高速信息时代,时间的精密同步和测量起着关键作用。时间信号虽可通过电波传递而利用国外先进的时号,但对中国这样的大国,要维护国家安全与政治独立,我们必须建立自主的时间系统,发展自己的原子钟。

——《物理教学》2003 年第 4 期第 2 页 ~ 4 页