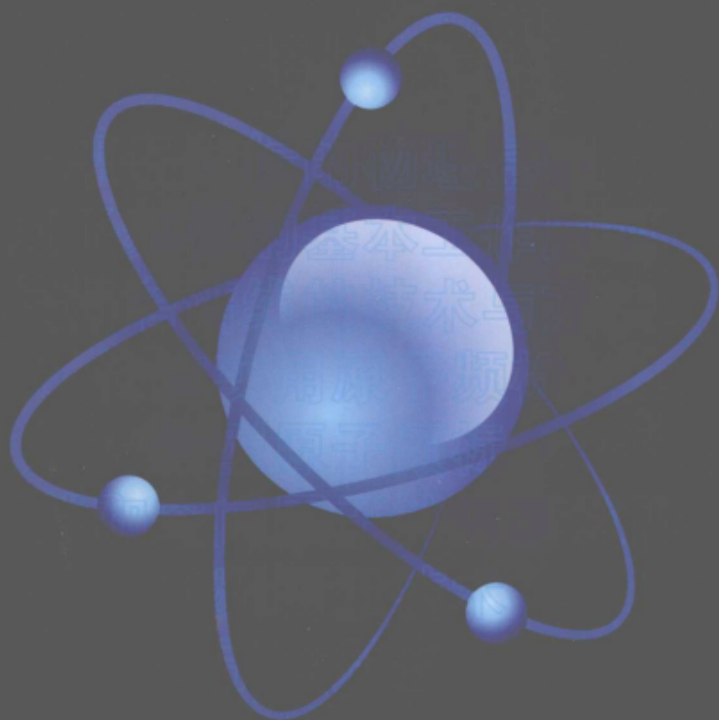


YUANZI ZHONG JIBEN YUANLI YU SHIPIN CELIANG JISHU

原子钟基本原理 与时频测量技术

翟造成 张为群 蔡勇 杨佩红 编



上海科学技术文献出版社

本书从时频应用的实际出发,较系统扼要地介绍了各类原子钟,包括冷原子钟和光钟工作原理,以及常用时间和频率测量技术,对原子钟的某些应用方面也作了简单介绍。全书共分9章:引论;原子频标的物理基础;获得窄谱线的技术与方法;原子频标的基本工作原理;传统原子频标;新型原子频标;星载和空间原子钟;时频测量技术与方法;时频高端应用举例等。全书着重阐述原子时频的基本概念,行文力求简单易懂,并列有大量图表,以供参详。

本书可供原子时频应用有关学科,如天体测量、导航定位、时频计量等领域的工程技术人员,以及从事原子频标研究方面的工作人员和高等院校有关专业的学生阅读参考。

ISBN 978-7-5439-3610-2



9 787543 936102 >

定价: 26.80元

原子钟基本原理 与时频测量技术

翟造成 张为群 蔡勇 杨佩红 编

上海科学技术文献出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

原子钟基本原理与时频测量技术/翟造成等编. —上海: 上海科学技术文献出版社, 2009. 2

ISBN 978-7-5439-3610-2

I. 原… II. 翟… III. 原子钟 IV. TH714.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第207582号

原子钟基本原理与时频测量技术

翟造成 张为群 蔡 勇 杨佩红 编

*

上海科学技术文献出版社出版发行
(上海市长乐路746号 邮政编码200040)

全国新华书店经销

江苏常熟市人民印刷厂印刷

*

开本787X1092 1/16 印张10.5 字数205 000

2009年2月第1版 2009年2月第1次印刷

ISBN 978-7-5439-3610-2

定价: 26.80元

<http://www.sstlp.com>

序

人们生活在空间与时间中,对任何事物的描述和研究都离不开空间和时间。当今科学技术日新月异,人类认识世界的能力大为扩展。从空间上,大至宇宙广袤,小至基本粒子精微;从时间上,久远至天体之起源,短暂至某些基本粒子的寿命;而把空间与时间联系起来的物体运动速度,也是快慢悬殊。这里其大小、久暂与快慢的跨度大概可以达到40个数量级(10^{40})左右。要把数量这么悬殊的现象描述记录下来,总要选取一个合适的单位和标准。现在科学家确定分别以“米(m)”和“秒(s)”作为空间和时间的通用单位,而其标准则依赖于时间单位秒的定义:1秒是无干扰的铯原子基态两个超精细能级间的跃迁辐射的9 192 631 770个周期所持续的时间。这个定义值依靠铯原子钟来实现。为什么空间长度单位“米”还要依赖时间单位“秒”?因为铯原子频率基准是当今所有计量标准中准确度最高的,以秒为单位的时间和光速的定义值相结合来测量长度比用任何实物“米”标准所给出的测量准确度都要高。长度 $s = ct$,这里, t 是光走过长度 s 所需的时间,而光速的定义值为 $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ 。这样,长度测量就归结为时间测量。从这里我们就可以看到用来测量时间的原子钟在现代生活中的重要意义了。

上面这些知识就是从本书中得到的。

如今,由于时间频率量是在所有物理量中可以测得最精密和最准确的,在计量学上有一种把所有物理量通过一定的物理关系都转化为时间频率量来进行测量的趋势。因此,时间频率测量的应用非常广泛,从精密的科学测量,诸如确定物理常数和原子分子结构、验证物理理论、进行天文观测、大地测量,直到

工程技术,如数字通信、信息网络、导航定位、宇宙飞行、火箭导弹制导、卫星发射、地质勘探、电网调节、交通管制、精密仪器制造等领域。这里,各种不同性能和用途的原子钟成为重要工具。因此,了解各种原子钟的基本工作原理和大致构造,了解标准时频信号的传递、比对和时频测量技术都是十分必要的。有关这些方面的知识,国内曾经出版过一些专门著作,或散见于不同的书刊里。不过,时间频率测量及其标准的发展十分迅速,尤其是在新旧世纪交接前后,可说是发生了革命性的进步。这主要是因为激光冷却和陷俘原子物理与技术的开拓,和以飞秒光梳为代表的光频精密测量和变换技术的发明,这使得时间频率测量手段和技术也是日新月异。这样一些著作就显得老化,一本比较新的、能反映时代进步的有关原子钟和时间频率测量的读本是有广泛需求的。

中国科学院上海天文台对中国时间频率领域的发展做出过显著的贡献。长期以来,上海天文台是中国标准时间频率的发播中心,在天文时的测量和研究上是中国时间频率工作的先驱。直到20世纪70年代后期,发播标准时间的任务才转给中国科学院陕西天文台(现在的中国科学院国家授时中心)。但此后,他们在时间频率工作上,尤其是氢原子钟的研制和开发上做了大量工作,现在是国内唯一能进行几种氢钟小批生产的单位,为开拓我国独立自主的时间频率测量系统发挥了重要作用。

现在以翟造成研究员为首的团队又编写了这样一本关于原子钟和时间频率测量的读本,对于从事这个领域的实际工作者是很有参考价值的。这本书的一个特点是收集材料比较新,到目前为止原子钟发展的主要状况和大体工作原理都涉及了。其次是历史线索比较清晰,读者可以从中明了原子钟发展的轨迹。第三,本书对时间频率测量技术,特别是高端应用也做出了大概的介绍。

我想,上述几方面对我国从事时间频率工作的读者是很有帮助的。

王义道

2008年8月2日

编 者 的 话

原子钟,专业的语言称原子时间频率标准(简称原子频标),自1948年问世后,半个多世纪来原子钟的研究有了长足的发展。传统原子钟早已形成产业进入商业生产,并获得广泛的应用。最近一二十年来,随着激光冷却和陷俘原子的技术的发明和发展,又催生了冷原子钟和光钟的诞生,更使准确度由 10^{-14} , 10^{-15} 一举跃入 10^{-16} , 10^{-17} ,甚至 10^{-18} ,对科学和技术的发展产生了重要影响。在我国,随着国产原子钟逐步走向实用,应用领域,特别是与之并行发展的高端技术,如卫星导航、深空跟踪等进入快速发展期,这些高端用户,对高精度原子钟提出更高的要求,并面临对各种原子钟的比较与选择。应用领域的工程技术人员,希望了解不同原子钟的基本工作原理,以及时频应用中实用的测量技术与方法。本书就是为了满足这种需求所进行的一种尝试。它是由作者多年来为天文技术领域的研究生和技术人员开设《原子频标原理与时频测量技术》课程的教材整理而来。本书从实用出发,简单地,但较系统、全面地介绍了原子钟的物理基础,目前正在研究和生产的各种原子钟(包括新兴冷的原子钟和光钟)的基本工作原理以及它们的特点与性能比较。本书的读者对象以应用领域的工程技术人员为主。在编写中避开了复杂难懂的数学推导和理论计算(其实也是作者的能力所限),同时对时频应用中的常用时频测量技术也作了较全面的介绍。本书更像一本时频“手册”,有一定的实用性。

原子钟的发展尽管已有半个多世纪的历史,但人们还是对它不够熟悉,为了使读者容易理解,我们在本书开头的原子频标的物理基础等几个章节中,采用了“科普”的语言与描绘,可能不够“科学”,甚至专业工作者读起来感到有点“陌生”,但考虑到兼顾广大读者,这种折中或许也是必要的。

原子钟技术发展很快,不断有新物理原理和新技术涌现出来,尽管我们在编写本书过程中,力图尽量把国内外这方面的新成果、新进展反映出来,但总难以跟上原子钟发展的步伐。

这本书能够出版,首先要感谢我所在研究室、课题组的鼓励和单位科技处的支持,没有他们的帮助,这本书是不可能出版的。在编写过程中,来自相关单位及其同行朋友的帮助至关重要。虽然平时给研究生开设这方面的课,但主要涉及比较实用的微波原子频标较多,对于有着深远意义的原子的激光操控,冷原子钟和光钟,则涉及较少,我们本身也知之甚少。作为一本原子频标及其应用方面的书,又不能不涉及,否则造成缺憾。尽管有着单位同事和领导的支持,写作起来仍感到很难。正在为难之时,北京大学黄凯凯博士给我寄来一本“原子的激光冷却和陷阱”的书,是王义道老师写的,我们如获珍宝,日夜仔细阅读,反复学习、理解,总算对相关内容建立了基本概念,获益匪浅。与此同时也阅读了几十篇相关资料,更向国内从事相关研究的实验室及同行请教,这些包括北京大学杨东海教授实验室的黄凯凯博士,陈徐宗教授实验室的伊林博士,中科院上海光机所王育竹院士实验室的魏荣博士、边凤刚博士、邓见辽博士和胡正峰博士等,以及中科院武汉物理与数学研究所詹明生研究员实验室的王瑾研究员、李交美博士,还有梅刚华研究员、高克林研究员、朱熙文研究员等,也有国家授时中心张首钢研究员、郭文阁研究员、王正明研究员、胡永辉研究员等等。他们不但提供了许多资料,还进行了非常有帮助的讨论与交流,对本书的成文促进和帮助很大,没有他们的帮助,很难成书。还有很多其他同志的帮助,这里就不一一列举了。我们借此机会,向所有给予我们帮助的良好师友表示衷心的感谢!

在本书编写过程中,王义道教授和朱熙文研究员仔细地审阅了全书的手稿,提出了许多宝贵建议,借此机会,谨对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

由于编者水平有限以及所掌握的资料面不够广,文中错误和不当之处肯定会有,欢迎读者批评指正,不胜感谢。

编 者

2008年5月

目 录

第一章 引论	1
1.1 前言	1
1.2 时间计量基准与原子钟	2
1.2.1 世界时	2
1.2.2 历书时	3
1.2.3 原子时	3
1.2.4 协调世界时	5
1.3 原子钟发展历史回顾	6
参考文献	9
第二章 原子频标的物理基础	11
2.1 能量的量子化和量子跃迁	11
2.2 原子的精细能级	12
2.3 原子的超精细能级	12
2.4 原子的超精细磁能级	13
2.5 量子系统及其与电磁场的相互作用	14
2.5.1 量子系统	14
2.5.2 电磁场与量子系统的相互作用	15
参考文献	16
第三章 获得窄谱线的技术与方法	17
3.1 微波频段所常采用的技术	17
3.1.1 分离振荡场技术	17
3.1.2 缓冲气体技术	18
3.1.3 原子储存泡技术	19

3.1.4	离子阱技术	19
3.1.5	激光减速与囚禁技术	20
3.1.6	原子喷泉技术	21
3.1.7	CPT 囚禁技术	21
3.2	光学频段所常采用的技术	22
3.2.1	Ramsey-Borde 分离激光场技术	22
3.2.2	碱土金属原子的超低温冷却	23
3.2.3	单个储存离子的激光边带冷却	24
3.2.4	光晶格	25
	参考文献	26
第四章	原子频标的基本工作原理	28
4.1	原子共振器的作用原理与构成	28
4.1.1	态选择-原子态制备	29
4.1.1.1	原子在非均匀磁场中分类	29
4.1.1.2	光抽运技术	30
4.1.1.3	微波-光抽运技术	31
4.1.2	原子的探测	32
4.1.3	信号的检测	32
4.1.3.1	原子检测	32
4.1.3.2	光检测	33
4.1.3.2.1	线性吸收-透射光检测	33
4.1.3.2.2	荧光检测	34
4.1.3.3	双能级荧光检测	34
4.1.3.4	微波检测	36
4.2	标准信号的产生及控制-原子频标的构成	36
4.2.1	原子振荡器型	37
4.2.2	原子谐振器型	38
4.2.3	光频标	38
	参考文献	39
第五章	传统原子频标	40
5.1	磁选态型铯原子频率标准	40

5.1.1 铯原子(Cs^{133})基态($6S_{1/2}$)的超精细结构	40
5.1.2 铯束管谐振器的结构和工作原理	41
5.1.3 频率控制	43
5.1.4 商品小铯钟	43
5.1.5 实验室型铯原子基准钟	44
5.1.6 商品铯原子频标的主要技术指标	45
5.1.7 实验室型铯频标的主要性能指标	46
5.2 激光抽运选态型铯原子频标	46
5.2.1 物理结构和工作原理	46
5.2.2 可能采用的光跃迁	47
5.2.3 激光抽运铯钟实际采用的技术方案	48
5.2.3.1 单频方案	48
5.2.3.2 双频方案	48
5.2.3.3 斜入射光检测方案	49
5.3 谱灯光抽运型铷原子频率标准	51
5.3.1 铷(Rb^{87})原子的能级结构	51
5.3.2 铷气泡频标的结构与工作原理	52
5.3.3 频率控制	54
5.3.4 铷原子频标的主要技术指标	55
5.4 激光抽运铷原子频标	55
5.5 氢原子频率标准	57
5.5.1 主动型氢原子频标	57
5.5.1.1 氢原子基态的超精细结构能级	57
5.5.1.2 氢原子振荡器的结构与工作原理	58
5.5.1.3 频率控制	60
5.5.1.4 氢振荡器的频率调谐	60
5.5.1.5 主动型氢原子频标的主要技术指标	62
5.5.2 氢原子钟小型化	63
5.5.2.1 谐振腔的小型化	63
5.5.2.1.1 电极负载腔	63
5.5.2.1.2 介质负载腔	64
5.5.2.1.3 隔膜腔	64
5.5.3 被动型氢原子钟	64

5.5.4 TE_{111} 主动型小氢原子钟	66
5.6 频率标准的选用	67
5.6.1 频标特点与性能比较	67
5.6.2 常用频率源的选择	68
参考文献	69
第六章 新型原子频标	71
6.1 离子阱微波原子频标	71
6.1.1 离子贮存技术	71
6.1.1.1 射频阱的结构	71
6.1.1.2 潘宁阱的结构	71
6.1.2 离子阱微波频标	72
6.2 原子喷泉型频标	74
6.2.1 原子喷泉的技术基础	74
6.2.1.1 激光冷却-光学粘团	74
6.2.1.2 激光囚禁-磁光阱	75
6.2.2 铯原子喷泉频标	77
6.2.2.1 铯原子喷泉的结构和工作原理	77
6.2.2.2 频率控制	78
6.2.3 铷原子喷泉频标	80
6.3 CPT 原子钟	81
6.3.1 被动型相干布居数囚禁原子钟	81
6.3.2 主动型相干布居数囚禁原子钟	82
6.4 光频标和光钟	83
6.4.1 光频标需解决的关键技术	83
6.4.2 离子光频标和光钟的工作原理	84
6.4.2.1 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子光频标	84
6.4.2.2 飞秒激光梳和光钟	86
6.4.3 钙冷原子光钟	87
6.4.4 钙热原子束光频标	89
6.4.5 光晶格铯原子钟	91
参考文献	93

第七章 星载和空间原子钟	95
7.1 星载原子钟的新发展	95
7.1.1 激光光抽运 Cs 原子钟	95
7.1.2 小型冷原子钟 HORACE	97
7.1.3 小型微波汞(Hg)离子钟	99
7.1.4 CPT-maser	100
7.1.5 脉冲激光抽运铷原子频标	102
7.1.6 CPT 冷原子钟	103
7.2 空间微重力原子钟计划	104
7.2.1 ACES(Atomic Clock Ensemble in Space)计划	105
7.2.2 SUMO(Superconducting Microwave Oscillator Experiment) 计划	107
7.2.3 PARCS(Primary Atomic Reference Clock in Space)计划	107
7.2.4 RACE(Rubidium Atomic Clock Experiment)计划	107
7.2.5 空间微重力钟的特点与比较	108
参考文献	109
第八章 时频测量技术与方法	112
8.1 频率标准的主要技术指标	112
8.1.1 频率准确度	112
8.1.2 频率稳定度	112
8.1.3 频率复现性	114
8.1.4 开机特性	114
8.2 本地时频测量	114
8.2.1 频率稳定度测试设备	114
8.2.1.1 工作原理	114
8.2.1.2 功能与显示界面	115
8.2.2 10 ms~1 000 s 的时域频率稳定度测量	116
8.2.3 日频率稳定度、日频率漂移及频率准确度	117
8.3 地面远程高精度时频测量	118
8.3.1 卫星双向法	119
8.3.2 卫星共视法	121
8.3.3 载波相位法	123

8.3.4 最高精度的时间传递技术的时间传递能力的验证	123
8.4 星-地时频比对	124
8.4.1 微波 T/F 传递系统	124
8.4.2 激光时间传递系统	125
8.5 卫星定时与校频	126
8.5.1 GPS(GLONASS)定时方法	127
8.5.1.1 单站直接法	127
8.5.1.2 单站间接法	127
8.5.1.3 通过法	127
8.5.1.4 单星共视法	128
8.5.1.5 多星共视法	128
8.5.1.6 多星跟踪法	128
8.5.1.7 全视法	128
8.5.2 GPS 校频	129
8.5.3 “北斗一号”定时与校频	129
8.5.3.1 单向定时法	129
8.5.3.2 双向定时法	130
8.5.3.3 “北斗一号”共视时间比对原理	130
8.6 高精度时频传递方法比较	131
参考文献	131
第九章 时频高端应用举例	133
9.1 建立国家原子时守时系统	133
9.2 卫星导航定位系统	134
9.2.1 概述	134
9.2.2 被动式卫星定位与定时的基本原理	134
9.2.3 “北斗一号”定位和定时的基本原理简述	136
9.2.3.1 定位原理	136
9.2.3.2 定时原理	136
9.2.4 卫星导航系统中的时间系统	137
9.2.4.1 卫星导航系统中的时间尺度	137
9.2.4.2 GPS 时	137
9.2.4.3 GLONASS 时间系统和系统时间	137

9.2.4.4 “北斗一号”时间系统和系统时间	139
9.3 应用原子钟的空间系统	139
9.3.1 早期卫星导航定位系统与星载原子钟	140
9.3.2 GPS 全球定位系统	140
9.3.3 GLONASS 全球导航系统	141
9.3.4 GALILEO 导航卫星系统	142
9.3.5 BEIDOU 卫星定位系统	142
9.3.6 QUASI-ZENITH 卫星系统	142
9.3.7 NAVEX	143
9.3.8 MILSTAR	143
9.3.9 GRAVITY PROBE-A	143
9.3.10 GASSINI-HUYGENS MISSION	143
9.4 国外空间钟计划与基础物理测试	143
9.4.1 引言	143
9.4.2 微重力环境下的基础物理学	145
9.4.2.1 微重力环境使原子钟受益	145
9.4.2.2 微重力环境使基础物理测试受益	145
9.4.3 用空间钟进行基础物理测试的基本考虑	145
9.4.4 利用微重力钟的基础物理测试	146
9.4.4.1 空间微重力钟计划实验系统简述	146
9.4.4.2 重力红移的测量	147
9.4.4.3 寻找精细结构常数可能的时间变化	147
9.4.4.4 光的各向同性	148
9.4.4.5 LLI 和 LPI 原理检验	149
9.4.4.6 狭义和广义相对论的其他一些测量	149
9.4.4.7 空间微重力钟的应用前景	150
9.4.5 结束语	151
参考文献	151

第一章 引 论

1.1 前言^[1]

时间是能够最精确测量的一个量。石英手表一天能够精确到 0.1 秒(10^{-6}), 一个好的航海计时器一天能够精确到一个毫秒(10^{-8}), 而一个原子钟一天可以精确到一个纳秒(10^{-14})。但是, 大多数的人只想要使用时间, 却很少关心时间是什么。那么时间是什么? 开始, 或许觉得这个问题很简单, 但当你组织自己的语言, 试图做出回答的时候, 可能又会感到茫然, 不知如何措词才好。爱因斯坦说, 时间是钟所指示的那个。希腊哲学家柏拉图说, 时间是无始无终的运动表象。而德国的哲学家康德则认为, 时间是所有经历的“先天”记录。我们想象不出有哪样事情不与时间相关。

其实, 时间是物质存在的基本形式之一。任何的时间计量都是以一定的周期性物理现象为基础的, 因此我们可以通过对物质的运动(或变化)的观察来计量时间。选择一个合适的物质运动过程, 使其他的物质运动过程与这个选定的过程进行比较, 分辨和确定事件发生的先后次序以及运动快慢的程度, 从而对它们进行分析和研究。

但是, 客观物质世界的运动和发展过程是各种各样的, 它们之间的差别很大, 有些天体的年龄可达一百多亿年, 某些基本粒子的寿命只有 10^{-24} 秒, 因此就目前人类对客观世界的认识水平而言, 人们是在 $10^{-24} \sim 10^{18}$ 秒这个广大的区间来计量和使用时间的。对于这样一个广大的时间区间, 不可能用唯一的物质运动过程来计量, 必须根据实际问题, 选用不同的时间计量方法。也就是说, 时间计量的尺度不同, 计量的方法也不同。例如, 时钟用来计量时、分、秒, 而历法用来计量年、月、日, 计数器或时号示波器则用来计量秒的小数, 而放射性元素衰变以及古生物钟则可测定亿万年和地质时期。不同时间计量方法属于不同的学科, 它们具有各自的特征。

目前测量天体年龄的方法, 是先测定天体的能量损耗速度和质量, 再根据能量转换定律, 对它的寿命进行估算。

测定地球的年龄和岩石形成的时间以及各地质时期的绝对年龄, 普遍采用放

射性元素衰变法,这是地质纪年学的研究内容。

研究古生物的生长节律,能推断古生物时代的时间记录,这就是所谓古生物钟。每一块保存较好的化石都可以当作一座时钟,它能告诉我们化石的年龄及其生存的地质时代,这属于古生物学的范畴。

日、月、年,世纪的时间计量,则是研究地球的公转周期和自转周期的协调问题,属天文学历法范畴。

在天文学和物理学中所说的时间计量则多指日以下的时间间隔(10^5 秒)的计量。同时,还要确定一个初始历元,作为时间计量的起点。

显然,我们所说的时间计量多指后者,也是计时学的主要研究内容。

很明显,如果我们以秒为基本单位(关于秒的精确定义正是我们要论及的内容,这里不妨以日常生活中对秒的理解)列出如表 1-1,那么我们就可以看出不同的时间计量尺度,它的计量方法和服务对象也不相同。

表 1-1

时间(单位“秒”)	方 法 与 用 途
$> 10^{18}$	天体史,用于宇宙论
$10^{12} \sim 10^{18}$	地质年代,用于古地质学、古生物学
$10^0 \sim 10^{10}$	时钟、计时、历法,用于民用交通
$10^{-12} \sim 10^0$	计时学,用于航空、航海,大地测量,空间技术
$10^{-12} \sim 10^{-24}$	原子核物理学,粒子物理

应该看到计时学所关心的时间尺度有一个自身发展的过程,早期是较大的尺度,年、月、日;逐渐向较小的尺度:时、分、秒伸延;到 20 世纪中叶就精确到秒的三位~四位小数。这种延伸的过程,与人类掌握的运动速度密切相关。人类在古代步履维艰,活动范围受江河、山林等地理条件的很大限制,当然日、月、年这样的尺度就足够“精细”了。而近代交通工具的发达,对物质变化现象的敏锐,则日、月、年可称“漫长”的岁月,所以计时以时、分、秒来计。现代宇宙空间技术的飞速发展,计时尺度已延伸到 10^{-9} 秒或更短的瞬间,从而计时的精度也要求随之提高,这是很自然的现象。

1.2 时间计量基准与原子钟^[1-3]

1.2.1 世界时

自从地球上产生人类起,由于劳动和生活的需要就学会了计时,尽管在早期对计时学的理解是模糊的,但毋庸置疑计时学很早就已诞生。“日出而作,日入而息”这一句话就确切地反映了早期的计时学。

古代的计时学没有明确的、严格的科学概念,因而也没有公定的标准。计时的