

时 间 测 量

吴守贤 漆贯荣 边玉敬 编著



时 间 测 量

吴守贤 漆贯荣 边玉敬 编著

科 学 出 版 社

1 9 8 3

内 容 简 介

本书介绍各种时间系统及时间测量,全书共分八章:时间测量基准,世界时系统,历书时系统,原子时系统,短波无线电时号,世界时的时号改正数,高精度时间和频率测量,远距离时间和频率比对等。全书着重阐述时间测量工作的基本概念,行文力求浅显易懂,并列有大量图表,以供查考。

本书可供天文学、大地测量、空间技术、导航等方面工作人员和大学天文系师生阅读参考。

时 间 测 量

吴守贤 漆贯荣 边玉敏 编著

责任编辑 夏墨英

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

*

1983 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1983 年 1 月第一次印刷 印张:10 1/2

印数:0001—2,950 字数:235,000

统一书号:13031·2134

本社书号:2213·13—5

定价: 1.65 元

前 言

时间测量和授时工作，在传统上属于实用天文学的一个分支，因此，其理论、方法和技术，过去往往包括在实用天文学书籍内。但是，到了本世纪五十年代末期，由于原子钟问世，这种情况有了很大改变。时间测量已远远超出天文学的传统范畴，逐步发展成为应用物理学的一个重要的新领域。从六十年代起，国际上相应地陆续出现了一些这方面的专著。例如：

1. 飯岛重孝等：時の科学，コロナ社，1966.

2. Л. И. Бакушин, Н. С. Блинов: Служба точного времени, 2-е изд., М., Наука, 1978.

3. B. E. Blair: Time and Frequency——Theory and Fundamentals, U. S. Govt. Printing Office, Washington, D. C., 1974.

4. G. Kamas: Time and Frequency User's Manual, U. S. NBS Technical Note 695, 1977.

5. P. Kartaschoff: Frequency and Time, Academic Press, London-New York, 1978.

但是在我国，除南京大学天文系的专业课讲义《时间工作》外，至今尚无系统论述时间工作的书籍出版。

根据我们多年来从事时间工作的实践以及与不少应用部门专业工作者的有益讨论，深感到有必要编写一本系统地论述时间工作的书籍，以适应我国应用部门日益增长的需要。为此，我们编写了本书。

在本书编写过程中，我们没有采用一般天文学教程所惯

用的叙述方法,而是着重于阐述基本概念,使目前从事于空间技术研究的时间工作者以及其他非天文专业的具有理工科大学毕业水平的读者易于接受. 我们曾经多次与从事上述工作的同志讨论过这种叙述方法,并在一些专题讲座中进行过实践,一般认为可以收到较好的效果. 事实上,本书的大部分内容就是在这些专题讲座的基础上重新整理写成的.

本书的绪论、第一章、第三章、第五章、第六章由吴守贤执笔;第二章、第四章、附录和图表由漆贯荣执笔;第七章、第八章由边玉敬执笔. 在编写过程中,田润清同志提供了一份关于原子钟的资料,后来这份资料成为§4.3的主要参考. 此外,许邦信、任江平、夏一飞、刘绍亮、潘小培等同志曾热情支持本书的编写工作,提出了许多宝贵意见,在此谨向他们表示深切谢意.

由于我们的水平有限,疏漏谬误之处在所难免,请读者批评指正.

作 者

于中国科学院陕西天文台

目 录

绪论	1
第一章 时间测量基准	8
§ 1.1 时间测量的基本方程	8
§ 1.2 1960 年以前的时间测量基准(世界时)	10
§ 1.3 1960—1966 年的时间测量基准(历书时)	14
§ 1.4 1967 年以后的时间测量基准(原子时)	16
第二章 世界时系统	20
§ 2.1 恒星时	20
§ 2.2 太阳时	21
§ 2.3 平恒星时, 平太阳时与地球自转周期的关系	23
§ 2.4 地方时与时区	26
§ 2.5 本初子午线	30
§ 2.6 年的天文记法	32
§ 2.7 白赛尔年与假年岁首	34
§ 2.8 儒略周期和儒略日	35
§ 2.9 世界时的测定	36
§ 2.10 极移对世界时的影响	53
§ 2.11 地球自转速率变化对世界时的影响	57
§ 2.12 世界时测定技术的发展	59
第三章 历书时系统	72
§ 3.1 历书时的由来	72
§ 3.2 历书时定义的解释	76
§ 3.3 历书时的获得	78
§ 3.4 历书时的修正	80
§ 3.5 历书时的测定	82

§ 3.6	历书子午线	86
第四章	原子时系统	91
§ 4.1	历史的回顾	91
§ 4.2	石英晶体振荡器	93
§ 4.3	原子频率标准的类型	97
§ 4.4	原子频率标准的性能	103
§ 4.5	原子钟守时原理	108
§ 4.6	国际原子时系统	112
第五章	短波无线电时号	124
§ 5.1	引言	124
§ 5.2	时号的型式	127
§ 5.3	协调世界时	129
§ 5.4	亚洲国家的时号	137
§ 5.5	北美国家时号	141
§ 5.6	欧洲国家的时号	145
§ 5.7	拉丁美洲国家的短波时号	154
§ 5.8	大洋洲国家的时号	156
§ 5.9	非洲国家的短波时号	157
§ 5.10	世界各国长波时号简况	158
§ 5.11	时码	160
§ 5.12	电波传递的时延	174
第六章	世界时的时号改正数	178
§ 6.1	基本问题	178
§ 6.2	天文测时资料的归一化	181
§ 6.3	综合时号改正数系统的建立	183
§ 6.4	综合时号改正数系统的保持	186
§ 6.5	综合时号改正数的确定	189
§ 6.6	中国的综合时号改正数系统	191
§ 6.7	国际时间局系统	193
§ 6.8	苏联的世界时系统	203

第七章 高精度时间和频率测量	211
§ 7.1 术语和定义	211
§ 7.2 时间间隔测量设备和方法	215
§ 7.3 频率测量	222
第八章 远距离时间和频率比对	241
§ 8.1 利用短波时号定时和校频	241
§ 8.2 利用甚低频讯号校频	253
§ 8.3 利用罗兰-C 定时和校频	257
§ 8.4 利用广播电视比对时间和频率	273
§ 8.5 利用卫星比对时间	278
§ 8.6 搬运钟	281
附录	285
A. 与标准时间和频率有关的国际组织	285
B. 有关无线电频带的规定	288
C. 钟面读数和频率源的频率值表示方法	288
D. 标准频率和时号的发播	290
E. 对原子频标主要技术指标的一般要求	290
F. 石英晶体振荡器检定方法	294
G. 电子计数器内石英晶体振荡器检定方法	300
附表	305
A. 世界短波无线电时号一览表	305
B. 与 TAI 保持联系的实验室	312
C. 罗兰-C 台有关资料	317
参考文献	324

绪 论

时间与空间是物质存在的基本形式。任何物质的运动、变化或发展过程，都是在时间和空间内发生的。我们人类的一切活动，也离不开时间和空间。因此时间测量在科学上和日常生活中都是非常重要的。

通常所说的时间测量，实际上包含既有差别又有联系的两个内容：时间间距的测量和时刻的测定。时间间距是指客观物质运动（或变化）的两个不同状态之间所经历的时间历程。时刻是指客观物质在某一种运动（或变化）状态的瞬间，通常以离开时间坐标轴原点的距离来表示。

客观物质的运动和发展过程是形形色色的，它们之间的差异很大。比如，天体的年龄以数百亿年计，而有文字记载的人类社会仅有数千年历史。至于某些基本粒子的寿命，则只有 10^{-6} 秒（或更短）。因此，根据目前人类对客观物质认识的水平，广义的时间测量是指 $10^{-24} \sim 10^{30}$ 秒这一时间区域内的测量（图1），所以人们不可能用唯一的物质运动过程来测量时间，而必须根据所要研究问题的实际情况，选用不同的时间测量方法。

例如，测量天体的年龄，目前采用的方法是先测定天体的能量损耗速度和该天体的质量，然后根据质能转换定律估算它的寿命。这样，天文学家可以测量数百万年到数百亿年之间的时间间距。测量地球年龄、岩石形成时间以及各地质时期的绝对年龄，一般采用放射性元素衰变法，并形成了一个专门学科——地质纪年学。假设有一放射性元素，开始时有 N_0 个原

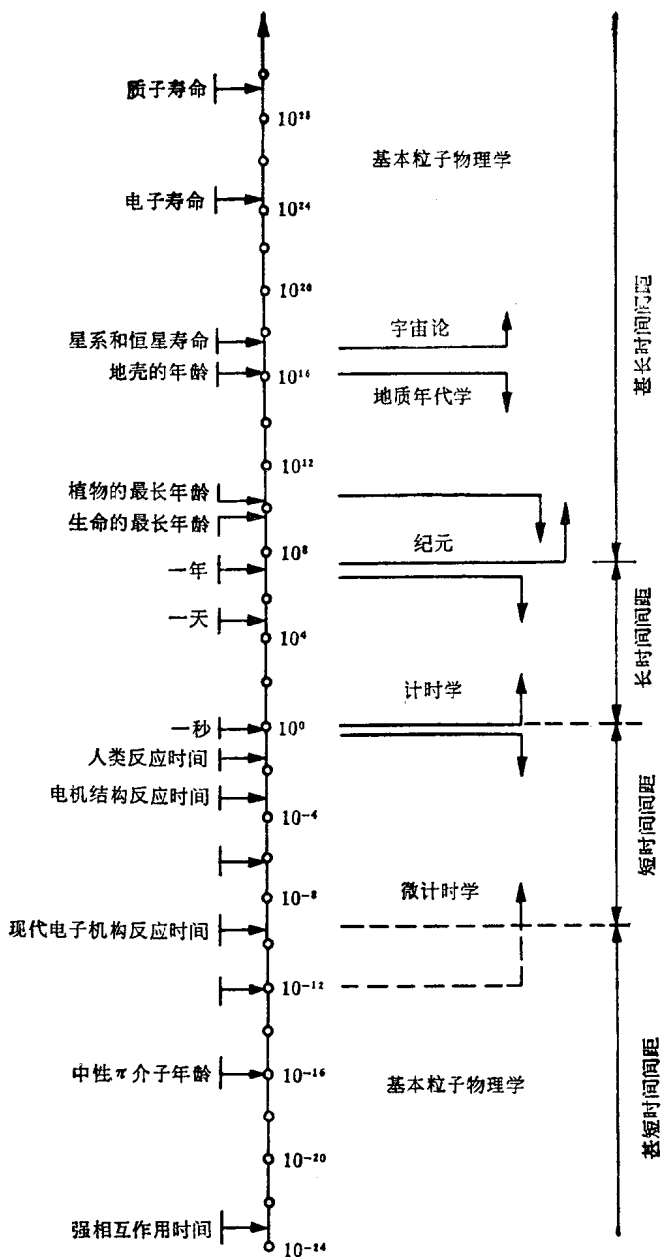


图1 时间测量的范围

子,过了时间 t , 由于衰变只剩下 N 个原子.按照衰变规律有

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

其中 λ 叫衰变常数. 由此可以得到 $N = \frac{1}{2} N_0$ 时, 即半数原子发生衰变所需的时间

$$T = 0.6931/\lambda$$

T 称为放射性元素的半衰期. λ 随元素的不同而异, 可以用现代实验方法来加以测定; 然后在地球的岩石中寻找 λ 已知的这些放射性元素, 测定其衰变后的原子数, 这样便可测定该岩石的年龄. 已经知道的元素衰变法有: 铅法、钾-氩法、铷同位素 Rb^{87} 法、碳同位素 C^{14} 法、钾同位素 K^{40} 法, 等等. 1975 年有人提出, 如果用激光技术进行同位素的富集, 可以把测定的时间间距扩展若干倍. 放射性元素衰变法可以测定数千年到数十亿年的时间间距. 用这种方法估算的地球年龄大约是 45 亿年.

测量古生物的时代, 是利用生物都具有的生理节律. 例如, 古动物生长节律是由它们所处的生活时期的生理特征在骨骼、贝壳的外部形态和内部结构上铸成的各种花纹和图式表现出来. 这些花纹和图式是古动物生理节律的记录. 当研究了古生物化石上反映生理节律的这种记录以后, 对照现代同一生物的生理节律, 并与现代计时方法作比较(例如年、月、日), 便能推断古生物时代的时间记录, 这就是古生物钟. 每一个保存较好的古生物化石, 都可以当作一座“时钟”. 它能告诉人们化石本身的年龄和生存的地质时代. 古生物钟(例如珊瑚表壁上的环脊)证实了地球自转速率长期变慢的论断, 它与天文学上的测定结果完全一致. 研究这种时间测量方法属于古生物节律学.

日、月、年、世纪的测定属于天文学中的历法范畴. 历法实质上是以地球绕日公转周期和地球绕轴自转周期来测量时间

的.这两种运动反映了地球上四季和昼夜的交替,其规律与人类的活动密切相关.但遗憾的是,自然界中的这两种周期没有整数公约因子.如何照顾四季和昼夜这两种现象的有规律的协调,便构成了编制历法的基本任务.

我们通常所说的时间测量,并不是指上述广义的时间测量,而是指小于1日的时间间距(10^5 秒)的测量和精确到秒的小数位后的时刻的测定.对于一些专业天文台和物理实验室,时间测量的概念甚至是指秒以下的时间间距的测量.这类时间测量以及它所达到的高精度,在现代科学实验中有着广泛的用途,它是本书阐述的主要内容.

必须指出,时间测量的范围随着科学技术的发展,对精度的要求也越来越高.在过去以步行为主要交通方式的时代,以时、日来计算时间;而在空间科学和物理实验技术高度发展的现代,则要求以秒的小数(10^{-2} — 10^{-8} 秒)来计算时间.因此,本世纪五十年代以后,时间测量技术及其精度得到了飞跃发展(图2).

测量时间的目的主要在于建立计量时间的系统(又称基准或尺度),以提供尽可能准确和均匀的时间.确定、保持某种时间基准,并通过一定方式把代表这种基准的时间信息传出去供用户使用,这一整套工作称为授时,或称为时间服务.随着人类社会的发展和科学技术的进步,授时的规模和质量不断提高.从“击鼓报时”之类的初始方法,到二十世纪初期出现无线电播时,甚至建立专门的国际性服务组织,反映了人类活动和科学技术对于时间需求的变化.历史记载表明,人类曾试图用各种周期运动现象(天然的或人工的)作为测量时间的标准,并以各式各样的器件,诸如漏壶、烛灯、日规以及摆钟等来保持时间.直到二十世纪六十年代以前,人类测量时间的标准一直是以天体的宏观运动为基础的天文时.由于在理论和

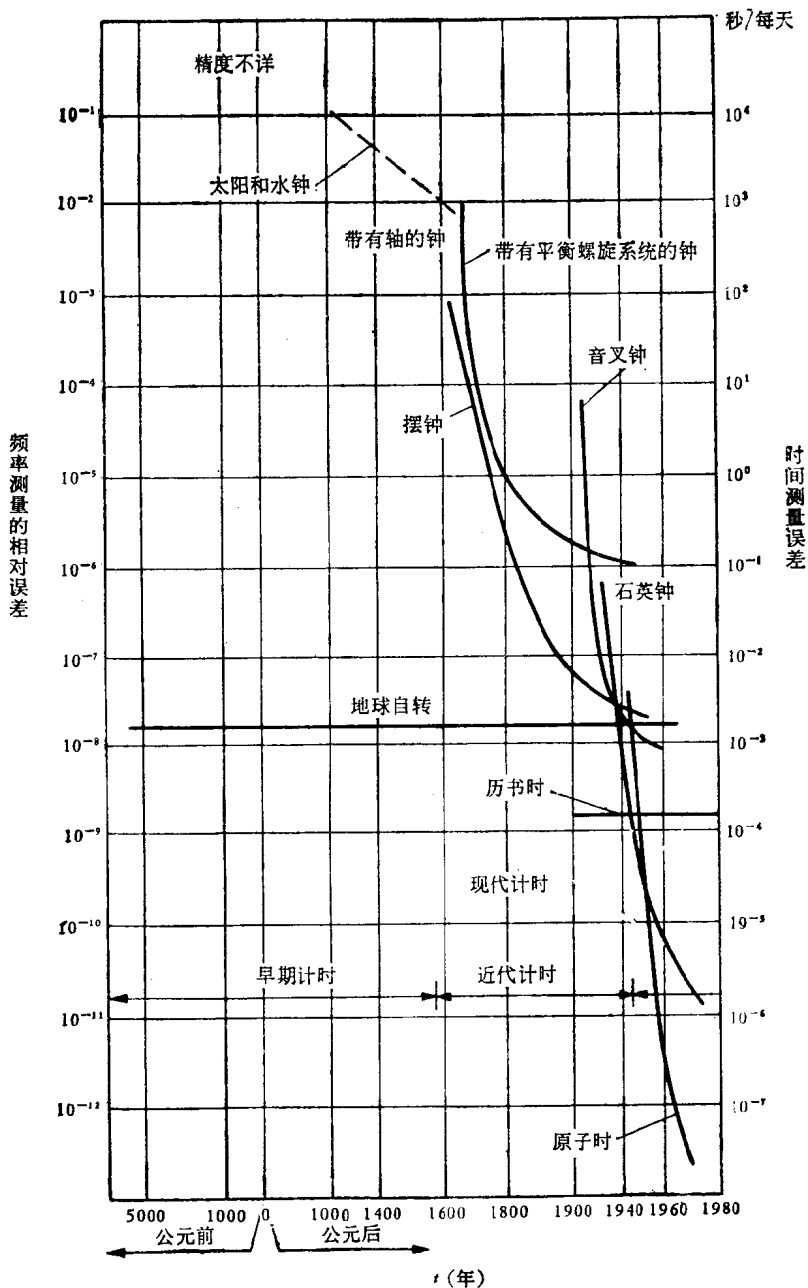


图 2 时间测量精度的发展

实测两个方面都存在着难以逾越的障碍,天文时的准确度和均匀性受到了限制.原子钟问世之后,这种局面才发生了具有划时代意义的变革.以地球运动规律为基础的时间的天文标准,从1967年起被以物质内部微观运动特征为基础的原子时所取代;精密时间指示器变成了主要是晶体振荡器和原子时.守时设备的更新和其他学科的发展,促使授时领域发生了许多根本性的变化.今天,授时部门必须而且已经能够以多种方法高精度地传送时间标准,并且为分散在一定范围内的时钟之间建立并保持同步提供了可靠的参考信号.“同步”是指在某一系统中的各个钟相对于同一瞬间事件能够给出相同的钟面读数.一般而言,它们不一定要参考于某一时间尺度,而只需要有一个共同的参考信号.任何可以清楚识别的电磁事件都可以作为这样的参考信号.相对于同一参考信号,各个钟面读数之间的偏差大小,称为同步精度.用户可能获得的某授时系统的时号接收精度,代表着该系统所拥有的维持同步的能力.本书中介绍的短波授时系统,对于几毫秒精度的同步要求来说是可以满足的.然而,人造卫星跟踪网络和快速相干通讯等系统,却要求在很大范围(甚至全球范围)内保持微秒量级甚至更高的时间同步.因此,近一、二十年来,除了短波、长波、超长波授时系统以外,又出现了许多新的高精度同步技术.图3给出了当前使用或实验的各种授时方法.由图可见,大多数授时方法都以某种类型的无线电发播为基础.尽管几乎没有哪一种系统能够同时满足所有用户的需要,也没有哪一种系统可以囊括其他各种系统的优点,然而高精度授时技术的进展,对于用户要求的多样性是能够适应的.

第一章 时间测量基准

§ 1.1 时间测量的基本方程

一般说来，任意一个连续运动的物理过程或不断变化的物理量 x ，都可以表征成以时间 t 为自变量的函数：

$$x = f(t)$$

如果能够测定 x 的变化并精确地记录其变化特征，那么我们就可以用它作为某种时间测量“仪器”的“指针”，进行时间测量。

$f(t)$ 的最简单形式是线性函数，即

$$x = f(t) = a + bt$$

严格地说，在客观世界中表现为这种函数形式的物理量并不存在，它只是一种理想化的形式。因此，我们只能在众多的不断变化的物理量中寻找最接近这种理想的物理量。

一般情况下，上述方程可以写为

$$x = a + bt + \phi(t) \quad (1.1)$$

这里 $\phi(t)$ 是未知的非线性部分。为了测量时间，我们对于选取物理量的要求是： $\phi(t)$ 要尽量小，在一定的精度范围内近似于零；或者 $\phi(t)$ 在经过详细研究后能够得到确切形式，在记录 x 的变化时可以把它扣除，即记录 $X = x - \phi(t)$ 。

方程 (1.1) 被称为时间测量的基本方程，现在，我们可以忽略 $\phi(t)$ 来考察它的意义。这时 (1.1) 式可写为

$$x = a + bt \quad (1.2)$$

显然，当 $t = 0$ 时， $x = a$ 。这里常数 a 表征了 x 的起始状态，

指示了时间测量的起点,或者说,规定了时刻的起算点,用天文学上的术语,就是说它规定了历元(epoch).

将(1.2)式对自变量 t 求导数,得

$$\frac{dx}{dt} = b$$

常数 b 表示物理量 x 在单位时间内的变化. 当规定以时间间隔 dt 作为某种时间测量单位时,即令 $dt = 1$ 时,则 $dx = b$. 这就表明,只要如实地把 b 所表示的 x 的变化状态记录下来,就实际上给出了时间间隔的单位.

实践证明,为了进行时间测量,按(1.1)式来选择物理过程时,最方便的是取某种周期性变化的物理过程,即经过某一时间间隔以后,物理量 x 的某种运动状态能重新再现. 这样既能方便地记录这种状态,从而比较容易地测量时间间隔;同时又能确切地描述它的某种运动特征,便于测定时刻.

事实上,人类通过生产实践,曾自觉或不自觉地选用了各种各样的周期性变化过程进行时间测量,创造了各种各样巧妙的测量时间的器具. 但是,为了更精确地测量时间,必须采用一种公认的有权威性的时间测量仪器(或方法)作为时间测量的基准. 这种基准一般应按两方面的特征来选择,即:

(1) 周期运动的稳定性,这就是说,在不同的时期内该基准所给出的运动周期必须是一样的,不能因为外界条件变化而有过大的变化(绝对没有变化是不可能的);

(2) 周期运动的复现性,是指用(1.1)式表述的那种过程在地球上任何地方、任何时候,都应该能够在实际中通过一定的实验(或观测)予以复现,并付诸应用.

当然,“稳定性”和“复现性”同任何其它物理参数一样,不可能是绝对的,总是针对一定的精度指标而言的. 也就是说,在某一历史阶段内,它只是人类科学技术水平所能达到的最