

现代时间系统 及参考坐标系

XANDAI SHIJIANXITONG

J1 CANKAOZUOBIAOXI

宋文尧 编著
张儒杰

测绘出版社

9033676

P127.1
187

现代时间系统
及参考坐标系

ISBN 7-5030-0107-0/P·42

定 价：2.85 元



现代时间系统 及参考坐标系

宋文尧 张儒杰 编著

测绘出版社

本书用新的概念，详尽而系统地介绍了各种时间系统和频率标准及其测量和比对的方法，并且说明了如何建立一个稳定的地球动力学参考坐标系。

现代时间系统及参考坐标系

宋文尧 张儒杰 编著

测绘出版社出版

测绘出版社印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行

开本 787×1092 1/32 · 印张 5.25 · 字数 112 千字

1990 年 6 月第一版 · 1990 年 6 月第一次印刷

印数 0,001—1,000 册 · 定价 2.85 元

ISBN 7-5030-0107-0/P·42

前 言

近十多年来,随着近代科学技术的飞速发展,时间、频率及参考坐标系已经在空间科学(如发射人造卫星和深空探测器,飞行器导航,弹道制导,人造卫星及无线电导航定位)、地球科学(如现代大地测量学,地球物理学,海洋学,大气学等)、天文学以及现代工业的新技术中,日益显示出重要的作用。例如,现代大地测量中应用甚长基线干涉测量、卫星干涉测量、激光测卫、激光测月等都以高精度铯、氢原子钟作为时间频率的标准;全球定位系统(GPS)的卫星上安装铷、铯原子钟作为发射频率的信号源;各种短、中、远程无线电导航定位系统以商品铯钟作为发射源或记录时间频率的基准等。又如在浩瀚的海洋中,时间作为一个时标把海洋地球物理考察船上的各种勘测手段(诸如人工地震测量、重力测量、地磁测量、导航定位、海底勘探与取样等)联系起来,同时接收时间频率各种物理量的信息来确定船舶姿态和位置。在定位技术中,对于时间频率的稳定度要求越来越高,如果有 $1\mu\text{s}$ 的定时误差,就会带来约 300m 的测距误差;真所谓“差之毫厘,谬以千里”。

地球动力学是天文学、地球物理学、地球化学、地质学、地震学、气象学、海洋学以及现代大地测量学相互交叉、相互渗透的一个新的分支学科。地球动力学的基本任务是研究地球各种运动状态及其力学机制,从而探索地球的发展史。地球在宇宙中的运动,除了绕着本身自转轴的旋转运动以及

自转轴在空间的颤动 (*Sway*) 和相对于地球体的摆动 (*Wobble*) 外, 还有地球物理学家利用精密重力仪和水平摆倾斜仪的观测, 来研究日月引潮力对固体地球和海洋的潮汐形变。由于地球整体潮汐形变引起能量耗散, 在某种程度上解释地球自转速度的长期减慢。地球表面的 70% 面积被海洋所覆盖。整个地球被大气包围着。大陆漂移、海底扩散和板块构造假说等地球运动, 已经成为地球科学发展史上的重要里程碑。

地球形状不是一个正球体; 它的赤道部分是凸出的, 有如梨形; 地球核的外层是液体; 地球的自转轴与惯量轴不相重合, 等等; 这些都会引起地球转动速度或自转轴方向发生微小的变化。地球形状及外部重力场、地球内部物理学的研究, 迫使人们去探索和改进地球的液态地核有关的模型。因此, 在这样运动的地球上建立高精度定位的观测站, 应用现代大地测量技术观测天体或人造卫星, 并顾及地球各种运动影响的改正, 便可在长距离边长上测量出精度达厘米或毫米的坐标量(或形变量)。这样高的精度的几何量或物理量只能在一个稳定的参考坐标系中显示出来, 这就涉及到如何定义、建立协议地球参考系和协议天球参考系(亦可称为协议准惯性参考系), 以及维持它们的稳定性的问题。由于观测站是位于某一板块或断块上, 所以地壳本身也会产生形变和位移。研究板块运动和驱动力是动态(或称动力)大地测量学的任务。

在时间-空间坐标系中, 时间是坐标系的一个分量。研究大地坐标值随时间而变化的规律, 由此孕育出四维大地测量学。

值得注意的是, 自 1984 年起国际上已公布和采用了新

的天文常数。一直蕴酿着要出版。新的星历表 FK5。在新的星历表 FK5 中作了部分改变，比如定义了新的力学时来替代历书时等。1988 年 1 月后，国际上成立了国际地球自转服务机构(IERS)，代替国际时间局(BIH)和国际极移服务(IPMS)等机构的工作。新的机构利用了甚长基线干涉测量、激光测卫、激光测月等新技术的观测资料，逐步淘汰了以经典光学仪器为主的观测资料，以确定地球自转参数；其中包括极坐标、世界时、岁差、章动、动力春分点，参考台站位置和指定射电源位置，以及地壳形变参数。

鉴于天文地球动力学处在飞跃发展和重大改革的新时期必然会出现一些新思维、新观点、新名词，因此有必要写一本小册子向从事大地测量学、地球物理学、海洋学以及航天、导航等部门的科技人员系统地介绍这方面的知识。以便读者从学科发展的演变过程中逐步更新概念，并在科学实验和生产实践中得到应用。

本书是作者承担国家自然科学基金研究项目的部分内容。在撰写过程中，曾经得到国家自然科学基金委员会朱文、项永仁两位高级工程师的大力支持。张牙同志对本书提出一些有益建议，并绘制了本书插图。在此一并表示衷心感谢。由于作者水平有限，恳请国内同行专家批评指正。

1989 年 9 月 1 日

目 录

第一章 绪言	(1)
第二章 时间系统	(5)
2.1 世界时 (UT)	(6)
2.2 历书时(ET).....	(11)
2.3 原子时 (AT)	(15)
2.4 协调世界时(UTC).....	(18)
2.5 力学时(DT).....	(21)
2.6 新标准历元和儒略日	(28)
第三章 频率标准	(30)
3.1 晶体振荡器	(30)
3.2 高稳定晶体振荡器	(34)
第四章 原子频率标准	(36)
4.1 铯束型原子频率标准	(36)
4.2 氢喷射器频标 (亦称氢脉泽).....	(38)
4.3 铷汽泡型频标	(39)
第五章 高精度时间和频率测量	(41)
5.1 频率准确度	(41)
5.2 频率稳定度	(42)
5.3 系统漂移率及其计算	(43)
5.4 各种标准频率的性能比较	(44)
第六章 短波无线电时号	(47)
6.1 时间服务	(48)

6.2	亚洲国家的时号	(50)
6.3	北美国家的时号	(54)
6.4	欧洲国家和拉丁美洲国家的时号	(55)
6.5	大洋洲国家和非洲国家的时号	(57)
第七章	时刻和频率比对	(60)
7.1	利用短波时号进行时刻和频率比对	(60)
7.2	利用甚低频讯号校频	(74)
7.3	利用长波时号罗兰-C 定时和校频	(76)
7.4	利用广播电视比对时刻和频率	(87)
7.5	利用卫星比对时刻	(92)
7.6	搬运钟法比对时刻和频率	(96)
第八章	地球动力学中的参考坐标系	(99)
8.1	理想和协议的参考系及其框架	(102)
8.2	协议天球参考系	(105)
8.3	协议地球参考系	(109)
8.4	协议天球参考系与协议地球参考系之间的 关系	(113)
8.5	地球形变	(119)
附录 A	天文常数	(130)
附录 B	黄经章动和交角章动	(132)
附录 C	全球定位系统的参考坐标系	(137)
附录 D	世界诸国发播时号的负责机构、发播时刻 和类型表	(145)
参考文献		(158)

第一章 绪 言

时间测量在传统上是属于天体测量学及其分支——实用天文学的范畴。因此有关时间的测量理论、方法和技术可以在实用天文学中找到。但是，到本世纪 50 年代末，由于原子钟的出现，这种情况发生了巨大的改变，时间测量已发展成为应用物理学的一个重要领域了。随着航天、航空、航海以及工业上科学技术的发展，要求越来越均匀的时间计量系统和越来越精确的时刻。在过去农业社会，是以日出而作，日落而息来安排耕作时间的；而在当今空间科学和物理实验技术高度发展的时代，则要求时间测量的精度以秒的小数 ($10^{-2} \sim 10^{-14}$) 来表示。

世界上许多授时天文台进行时间测量，向用户提供尽可能精确的均匀的时间。测定、维持时间基准，并将时间按一定程序和格式播送出去，称为时间服务工作。本世纪初期开始采用无线电授时，并成立了国际性时间服务组织。至于时间计量，在本世纪 60 年代以前，一直是以天体的宏观运动的天文时作为计量标准的。利用恒星中星仪、超人差棱镜等高仪以及摄影天顶筒等光学仪器进行时间测量。无论从理论上还是从观测上讲，天文时的精确度和均匀性都不是那么理想的。自从原子钟问世，这种情况便发生了划时代的改变。原先以天体的宏观运动，也就是以地球运动为基础的天文时基准，从 1967 年起被以物质内部微观运动为基准的原子时所代替；时间计量的机械钟，主要由晶体振荡器和原子时所

取代。天文学已不再拥有时间计量的统治地位。原子时是与地球自转速率无关的新时间尺度——物理量，而原子时也是最接近于相对论理论中的理想钟。

自 1984 年起，新的天文常数已经公布（参见附录 A、B），新的星历表 FK5 即将出版。新出版的天文年历有某些重大改变，比如用力学时来代替历书时，历元以 J2000.0 年为准，岁差、章动、动力春分点、光行差、自行等天文常数采用 1976 年 IAU 天文常数，章动常数采用 IAU 1980 年章动理论算得的章动常数。因此，本书第二章，对时间系统的世界时、历书时、原子时、协调世界时、力学时作严格定义，并用方框图说明它们之间的内在联系。第二、三章阐述频率标准的四种器件，即晶体振荡器、铷汽泡型频标、铯束原子频标以及氢脉冲频标的器件结构和工作原理。第五章说明高精度时间和频率测量，使读者明确如何判断频率的准确度、稳定度、系统漂移率，最后列表说明各种标准频率的性能比较。

在时间频率的传播与比对方面，过去世界上各授时台都采用短波时号发射，由于受电离层反射的影响，产生了传播时延，虽然这可加以修正，但仍然一直限制了比对精度。近几年来，国际和国内授时台大多采用甚低频长波或者罗兰-C 台链所发射的信号进行比对，亦可采用电视 TV 进行比对。自 1985 年以来，国际上采用 GPS 卫星信号进行长距离时频比对，其精度可达 $10\sim 20\text{ns}$ 。古代用马车装载时钟，经过长途跋涉，采用搬钟法进行时间比对，而在今天搬钟法又复古了，不过运输工具采用了高速喷气飞机。在五大洲之间的时频传播与比对，主要利用罗兰-C、电视 TV、GPS 卫星信号以及搬钟法。这是目前国际上时频比对精度较高的几种方

法。本书第六章，列举全世界各种授时台所发播时频信号的时间、格式，便于读者查阅。第七章阐述时频比对的工作原理。

地球动力学的发展，要求我们结合地球物理学、海洋学、地质学、大地测量学等学科，综合研究天文动力学的有关问题；即地球的自转不均匀性和极移、地球受日月引潮力的影响而产生的固体潮和海潮的形变、天文中的岁差、章动，以及大地构造等形变因素。因此，在第八章，我们阐述了地球动力学的定义，以及建立地球动力学参考坐标系的必要性和可实现性。说明参考框架与参考系的含义，以及使用“协议”与“理想”这两个名词的用意。其次，从定性的观点出发，说明协议天球参考系和协议地球参考系的性质，并分析两者之间的关系。为了说明地球形变，本书简要地写入固体潮、海潮、大陆漂移、海底扩张，大地构造假说的有关理论，使读者树立一个动态的观点，了解人类所生存栖息的地球不仅在宇宙中遨游，而且地壳也要发生形变，因而要建立一个稳定的参考坐标系，使各种新技术所测得的微小变化量，能在一个稳定的框架中反映出来；这是近年来国际和国内学术界讨论的热门话题之一。由于篇幅所限，本书没有涉及如何在全球建立高精度 VLBI 观测网、激光测卫/(SLR) 观测网，来实现协议地球参考系和协议天球参考系等问题。读者如果有兴趣，请参阅本书最后列出的参考文献书目。由于目前国内全球定位系统的观测正在进行，有必要在附录 C 中，列出全球定位系统所采用的参考坐标系的有关几何、物理参数，供读者工作时备查。

全书共有八章和四个附录。在撰写过程中，作者针对现代时间系统及参考坐标系等一系列问题，阅读了国际上有关

专业学术会议文献，深入分析和研究了新理论和新方法，力求做到简明扼要，概念清晰，适用面广，系统地撰写成书，试图对我国测绘和地球科学工作者在研究这方面问题有所裨益。

第二章 时间系统

时间与空间是物质存在的基本属性；任何物质运动都是在时间和空间内发生的。人类的一切活动都离不开时间和空间，所以说时间在科学上和日常生活中是十分需要的。

时间的含义有两个：时间间隔和时刻。它们既有区别又有联系。时间间隔是指客观物质运动过程所经历的时间历程；时刻是指客观物质运动某一状态发生的瞬间，通常以离开时间坐标轴原点的距离来表示。

人们是通过科学实践，相继选用了各种周期性变化过程来进行时间测量的。时间测量的基准应按下列两个要求来选用：

第一，周期运动的稳定性。即在不同时期该基准所表征的运动周期必须一致。在外界条件变化情况下，周期绝对一致是不可能的。

第二，周期运动的复现性。即在任何地方、任何时间，该基准所表征的运动周期在实验中或观测中予以复现，提供使用。

物质的周期运动可满足定义时间和测量时间的要求。钟的运行、太阳经过测站子午圈、或其他更为精密的运动事物，都可作为周期运动。用以测量时间的周期运动，在实践中迄今可分为三类：

第一，转动体的自由旋转

人们很早就利用地球自转运动来测量时间的。地球的自

转运动借助于测站子午圈相对于天球上的基本参考点的运动来度量。一般在天球上选取两个参考点——春分点和平太阳，借此用天文方法测定地球自转而分别导得恒星时和世界时。

第二，开普勒运动

地球自转速率不均匀的发现，动摇了世界时作为时间测量系统的地位。作为时间测量基准，在理论上则要求严格地均匀，这就迫使人们考虑选用另外的周期运动。

纽康根据地球绕太阳的公转运动，编制了太阳历表。人们把纽康的太阳历表作为定义新的时间度量系统的基准，这便是历书时。

第三，谐波振荡

由于历书时的观测误差太大，人们进而选用谐波振荡周期作为更新的时间测量系统的基准，绝大多数机械钟或电子钟的振荡都属于这一类，其中原子钟最为精确，于是导出了原子时。

无论采用那种运动周期来建立时间系统，均匀性是一个重要的技术指标。所谓均匀性，就是指时间尺度上各刻划间的间隔要保持相等。当然，均匀性同其他任何物理参数一样，不可能是绝对的，它总是对满足一定精度要求而言。在时间测量中，人们总是根据一定历史阶段内科学技术所能达到的最高水平来选择不同的时间测量基准，从而建立最佳的时间系统。

2.1 世界时(Universal Time—UT)

在所有定位技术中都需要知道地球相对于恒星的角位

置，所以目前仍然有几种时间基准同时被选用。它们是世界时、历书时、原子时、协调世界时、地球力学时和质心力学时。

人类建立的第一个科学时间基准系统是以地球自转运动为基础的世界时系统。它包括：

2.1.1 恒星时(Sidereal Time——ST)

以春分点为参考点，由春分点周日视运动确定的时间，称为恒星时。某一测站的地方恒星时，在数值上等于春分点相对于当地地方子午圈的时角。由于岁差和章动的影响，春分点在天球上不是固定的，它对应于同一历元，有真春分点和平春分点之别。相应地，恒星时也有真恒星时和平恒星时之分。

2.1.2 平太阳时(Mean Solar Time——MT)

恒星时与地球自转的角度有一定的对应关系，这一点虽能符合以地球自转为基准的时间测量标准的要求，但它不能满足日常生活和科学技术的需要。因此，又选用了以真太阳周日视运动的平均速度为基准的平太阳时。因为地球公转轨道为椭圆，所以真太阳的视运动是不均匀的。为了得到以真太阳周日视运动为基准，同时又与其不均匀无关的时间测量系统，在19世纪末，纽康引进了一个假想的参考点——平太阳。它在天球赤道上作匀速运动，其速度与真太阳的平均速度相等。其赤经用一个约定的表达式来确定，并规定平太阳赤经与太阳平黄经相差尽量小。用这样的假想点作为基本参考点来测定的时间，称为平太阳时。平太阳赤经数值表达式为

$$\alpha_{\odot} = 18^{\text{h}}38^{\text{m}}1^{\text{s}}.45.836^{\circ} + 8640184.542^{\circ}T + 0.0929^{\circ}T^2$$

(2.1)

式中 T 为从 1900 年 1 月 0 日格林尼治平太阳时 12^h 起算的儒略世纪数 (每儒略世纪等于 36525 平太阳日)。

2.1.3 世界时 (UT)

平太阳时的基本单位是平太阳日。一个平太阳日包含 24 个平太阳小时 (86400 平太阳秒)。以平子夜作为零时的格林尼治平太阳时, 称为世界时 (UT)。

世界时 (UT) 和格林尼治平恒星时 (ST) 之间有严格的转换关系。根据定义有

$$\begin{aligned} ST &= H, \\ UT &= H_{\odot} + 12^h \end{aligned}$$

式中 H 和 $H_{\odot}$ 分别代表平春分点和平太阳对于格林尼治子午圈而言的时角。于是

$$ST - UT = H - H_{\odot} - 12^h = \alpha_{\odot} - 12^h$$

所以 $ST = UT + \alpha_{\odot} - 12^h$

$$\begin{aligned} &= UT + 6^h 38^m 45.836^s + 8640184.542^s T \\ &\quad + 0.0929^s T^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

当 $UT = 0^h$, 则世界时 0^h 的格林尼治平恒星时仍用 ST 表示。为

$$\begin{aligned} ST &= 6^h 38^m 45.836^s + 8640184.542^s T \\ &\quad + 0.0929^s T^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

上式就是 1976 年前天文年历中用来计算格林尼治平太阳时 (世界时) 0^h 的平恒星时的基本公式。

根据 1976 年国际天文学联合会 (IAU) 通过的天文常数系统, 格林尼治平太阳时 0^h 的平恒星时的表达式改为

$$\begin{aligned} ST &= 6^h 38^m 45.8285^s + 8640184.627^s T + 0.0929^s T^2 \\ &\quad (2.4) \end{aligned}$$

式中 T 为从 1900 年 1 月 0 日格林尼治平太阳时 12^h 起算的