

时空参考系

Space-Time Reference Systems

[德] Michael Soffel Ralf Langhans 著

王若璞 赵东明 译



科学出版社

时空参考系

Space-Time Reference Systems

〔德〕 Michael Soffel Ralf Langhans 著

王若璞 赵东明 译



科学出版社

北京

图字:01-2014-7103 号

内 容 简 介

本书在传统时空理论的基础上,将时间尺度与空间坐标在爱因斯坦引力理论框架中进行描述,并纳入 IERS 的最新约定(IERS C03/C10),对天文-大地时空参考系的最新进展进行概括和总结。全书共 11 章,内容包括时间系统及其相关技术、质心动力学参考系、经典天文坐标系、天文测量方法、天地地球参考系及其转换、天文软件与天文年鉴以及天文常数系统等。

本书可供天文学、空间科学、地球科学、航空航天、测绘导航等学科师生使用,也可供相关领域的科研工作者和工程技术人员参考。

Translation from English language edition: Space-Time Reference Systems by Michael Soffel and Ralf Langhans.

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.

Springer-Verlag Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media. All Rights Reserved.

图书在版编目(CIP)数据

时空参考系/(德)索菲尔(Soffel, M.)等著;王若璞,赵东明译. —北京:科学出版社,2015. 8

书名原文:Space-Time Reference Systems

ISBN 978-7-03-045538-3

I. ①时… II. ①索…②王…③赵… III. ①天体测量-研究②天体力学-研究 IV. ①P12②P13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 206214 号

责任编辑:张艳芬 邢宝钦 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 9 月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:328 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译者序

时空参考系是天文、空间科学、测绘导航等众多学科的基础,随着理论的进一步完善与观测技术的发展,其实现精度显著提高,时间尺度与空间坐标都必须在爱因斯坦的引力理论框架中进行数学描述,或者至少在广义相对论的后牛顿近似框架下进行讨论。

《时空参考系》(*Space-Time Reference Systems*)一书是关于天文-大地时空参考系的最新概括与总结,反映了相关理论与技术的最新发展。该书在传统时空理论的基础上,将时间尺度与空间坐标在爱因斯坦的引力理论框架(广义相对论)中进行数学描述,并且纳入了 IERS 的最新约定(IERS C03/C10),不仅有基于地球瞬时旋转极与春分点的经典传统天球-地球参考系的转换方法,而且有基于无旋转原点的新的转换范式。同样,时间也从原来天文学范畴转变为计量科学与基本天文学的交叉学科范畴。

全书共 11 章,内容包括时间系统及其相关技术、质心动力学参考系、经典天文坐标系、天体测量方法、天地球参考系及其转换、天文软件与天文年鉴以及天文常数系统等。可为从事空间科学、地球科学、航空航天、测绘导航等领域相关的教学科研与工程技术人员提供有益的参考。

本书由中国人民解放军信息工程大学王若璞、赵东明翻译,赵东明翻译第 1~4 章、第 10 章和第 11 章,王若璞翻译其余部分,并对全书进行统稿。在翻译本书过程中,得到了国家自然科学基金(41474021, 41374042, 11373001)和地理信息工程国家重点实验室开放基金(SKLGIE2013-Z-1-1)的支持,中国人民解放军信息工程大学导航与空天目标工程学院和地理空间信息学院也给予了大力支持。中国人民解放军信息工程大学郑勇教授、中国科学院大学于锦海教授、河南理工大学张捍卫教授阅读了初稿,提出许多宝贵意见。译者所在教研室的同事也参与了部分章节的翻译和校对,在此一并表示衷心的感谢!

限于译者水平,书中不妥之处在所难免,恳请读者指正。

译者

2014 年 12 月

原 书 序

本书的核心内容形成于 1995 年以来在德累斯顿技术大学定期开设的一系列相关课程。在巴黎及其他欧洲城市每年召开的时空参考系工作组或国际会议中,与相关国际专家进行的众多次讨论,促使我们确定了天文-大地时空参考系这一主题的相关细节,并形成一本包含习题和计算机程序的教科书。随着天文时空参考系的实现精度越来越高,这一主题的复杂性与日俱增,以至于全球仅有屈指可数的专家能窥得全豹。在过去,借助于天文年历来解决天文参考系的某些具体问题是轻而易举的事。如今,一些重要的天文年历已不再出版,人们转而指望每个天文台或国家相关机构拥有自己的软件来处理此类实际问题。现有的高精度时空天文参考系在很多方面都需要做更进一步的讨论,并且获得如国际天文学联合会(IAU)等组织的认定。在过去的数十年中,这个问题经历了与测量精度提高有关的重大变化,其中一个方面就是相对论。当前,不仅在时间尺度方面,而且空间坐标也必须在爱因斯坦的引力理论框架(广义相对论(GRT))中进行数学描述,或者至少在广义相对论的后牛顿近似框架下讨论。

此类参考系所涉及的一个中心问题是某种与空间固联的天球参考系(CRS)和某个地球参考系(TRS)之间的转换。为此,已专门引入了一些反映地球(地月系质心)在黄道面上做平移运动以及与地球在空间旋转有关(瞬时旋转轴(IRP)、天赤道)的传统参数。作为天球参考系至地球参考系之间转换的中间量,瞬时旋转轴与春分点(黄道与天赤道交点之一)在历史上扮演过重要角色。然而,随着甚长基线干涉测量(VLBI)的快速发展,在历史上首次实现了不以地球平动和转动为参考的天球参考系。这导致了 CRS-TRS 转换范式的改变,经典的旋转轴随即被某个协议的天球中间极(CIP)代替,同时春分点也被某个天球中间原点(CIO)取代。这些内容在被 IAU 官方决议接受之后,就有必要在教科书中加以反映。根据上述理由,我们认为推出一本新的天文时空参考系和参考架的教科书具有重要意义,其也可作为 IERS 决议(IERS C03/C10)和天文历书增补的这两部分内容的引论。

为了让读者对各种模型和量级的大小有一定认识,对于本书中的所有主题,我们提供了一系列的 Maple 文件。显然,符号运算语言 Maple 易于使用,并有着具有吸引力的图形界面,然而其设计的初衷并非用于大数据集的操作。读者所需的 Maple 文件可以从 <http://astro.geo.tu-dresden.de/astroref/> 下载,且仅用于教学,它们并不是为了大量数值计算而开发的。

我们需要提及近期出现的一些教科书,它们讨论了本书主题的某些部分。Audoin 和 Guinot 于 2001 年出版的 *The Measurement of Time: Time, Frequency and the Atomic Clock* 一书中对关于时间及其测量的物理学进行了全面介绍。本书中许多方面在 Kopeikin 等于 2011 年出版的 *Relativistic Celestial Mechanics of the Solar System* 一书中也有讨论,但该书的重点是相对论方面。另一个非常有用的参考文献是 Kaplan(2005)。van Altena 的 *Astrometry for Astrophysics: Methods, Models and Applications* 一书已由剑桥大学出版社于 2012 年出版。

本书是天文-大地时空参考系这一问题的概论。针对初学者(如大地测量学或物理学的学生),书中对一些经典的问题,尤其是空间坐标方面的问题出于教学上的考虑进行了详尽介绍(显然,对于此领域的专家,这部分内容显得保守并有些过时)。我们希望课后习题和 AstroRef 软件包中的 Maple 文件能够辅助学习过程并提供对量级的深刻认识。从这个意义上讲,本书可作为 IERS 决议(IERS C03/C10)以及第 10 章所讨论的专业天文软件 SOFA 或 NOVAS 的引论。对于非相对论天文学或空间大地测量学领域的专家,本书有助于更好地理解与我们的主题有关的相对论方面的知识。

最后非常荣幸地向为本书做出贡献的众多专家致以感谢。如果没有大量的改进建议、内容扩展和实例实现,本书将仍处于雏形。我们尤其要感谢: Felicitas Arias (BIPM, Paris), Johannes Böhm (TU Vienna), Agnès Fienga (Besancon observatory), Erik Høg (U Copenhagen), Chopo Ma (GSFC), Hervé Manche (Paris observatory), Jürgen Müller (TU Hannover), Elena Pitjeva (IPA, St. Petersburg), Cyril Ron (Astronomical Institute, Prague), Ulli Schreiber (Wettzell), Harald Schuh (TU Vienna), Irina Tupikova (TU Dresden), Lambert Wanninger (TU Dresden), Norbert Zacharias (USNO) 以及 Sven Zschocke (TU Dresden)。我们非常感谢对时空参考系这一问题的研究贡献最大的两位科学家: Nicole Capitaine 和 Patrick Wallace。他们阅读了全书,并提出了大量改进建议,感谢他们为本书付出的大量心血。

Michael Soffel

Ralf Langhans

德累斯顿,德国

符号列表

- t : 物理坐标时, 特指 TCB
 T : 物理坐标时, 特指 TCG
 f : 频率
 ϕ : 振荡器的相位
 $y(t)$: 相对频率波动
 $x(t)$: 相位时间
 σ_y : Allan 方差
 $S_y(f)$: 功率谱密度
 F : 总自旋量子数
 I : 单个原子核自旋量子数
 m_F : 磁量子数
 τ : 本征时间
 c : 真空中的光速
 ds : 距离微元
 $g_{\mu\nu}$: 基本度规张量
 x^μ : 坐标分量, $\mu=1, \dots, N$ (N 为空间或时空维数)
 $\mathbf{x}$: 笛卡儿空间坐标, 特指 BCRS 空间坐标
 $\mathbf{X}$: 笛卡儿空间坐标, 特指 GCRS 空间坐标
 U : 牛顿引力位
 U_{geo} : 重力位
 $g(\phi)$: 引力加速度
 k_E : TT 与 TCG 之间的尺度因子
 L_C : TCB 与 TCG 长期变率间的尺度因子
 L_B : 用 TCB 定义 TDB 的尺度因子
 w, w^i : BCRS 下的度规位
 W, W^a : GCRS 下的度规位
 $\Gamma_{\mu\nu}^a$: Christoffel 符号
 $\mathbf{z}_A$: 天体 A 在 BCRS 中的坐标位置
 m_I : 惯性质量
 m_G : 引力质量

- η_N : Nordtvedt 参数
 G : 牛顿引力常数
 z : 天顶距
 a : 高度角
 A : 方位角
 h : 时角
 δ : 赤纬
 λ : 黄经
 β : 黄纬
 R_x : 关于 x 轴的旋转矩阵
 ϵ : 黄赤交角
 $\Delta\epsilon$: 交角章动
 $\Delta\phi$: 黄经章动
 Λ : 天文经度
 Φ : 天文纬度
 $R_{12}(\tau)$: 互相关函数
 n : 折射率
 ζ : 大气折射改正
 Π : 周年视差
 Π_G : 地心(周日)视差
 β : $\beta = v/c$
 ζ_A, θ_A, z_A : 岁差角
 P : 岁差矩阵
 N : 章动矩阵
 x_p, y_p : 地极坐标
 ϕ_A, ω_A, χ_A : 附加岁差角
 l, l', F, D, Ω : 基本幅角
 z : 红移
 L : 角动量
 $T(\sigma)$: 转换函数
 X, Y : CIP 的 GCRS 坐标
 B : 参考架偏置矩阵
 $s(t)$: 定义 CIO 位置的角
 $s'(t)$: 定义 TIO 位置的角

目 录

译者序

原书序

符号列表

第 1 章 绪论	1
1.1 天文大地参考系	1
1.1.1 时间问题	1
1.1.2 各种时空参考系	4
1.1.3 经典的视位置、真位置和平位置	6
1.2 天文大地测量中的应用	7
1.2.1 导航	7
1.2.2 地球动力学和地球系统	7
第 2 章 时间	9
2.1 振荡器的稳定性	9
2.2 偏差和漂移	13
2.3 石英振荡器和原子钟	14
2.4 铯钟	17
2.5 铷钟	18
2.6 氢钟	19
2.7 喷泉钟	20
2.8 光钟	21
2.9 高精度时钟的应用	22
2.10 相对论和度规张量	23
2.11 洛伦兹变换	26
2.12 地球质心坐标时的 TCG、TT、TAI 和 UTC	28
2.13 时区	34
2.14 儒略日	34
2.15 太阳系质心坐标时的 TCB、 T_{eph} 和 TDB	36
2.16 Fairhead-Bretagnon 序列	37
2.17 授时问题	38

2.18 卫星授时	38
第3章 时间与空间	40
3.1 参考系和参考框架	40
3.2 正则质心度规	43
3.3 天体运动方程	45
3.3.1 单位球面上的测地线	46
3.3.2 EIH 运动方程的推导	47
第4章 太阳系质心动力学参考系	49
4.1 概念	49
4.2 观测方法	49
4.2.1 地基光学天体测量	49
4.2.2 月球激光测距	49
4.2.3 行星雷达观测	56
4.2.4 航天器雷达跟踪	56
4.3 太阳系历表	57
4.3.1 数值历表	57
4.3.2 半解析历表	76
第5章 经典天文坐标系	77
5.1 恒星与太阳的视运动	77
5.2 空间坐标系	82
5.2.1 天球上的标志	83
5.2.2 笛卡儿坐标系与天球坐标系	84
5.2.3 地平坐标系	85
5.2.4 第一赤道坐标系	87
5.2.5 第二赤道坐标系	87
5.2.6 黄道坐标系	88
5.3 天文坐标系之间的关系	89
5.3.1 地平坐标(A, z)与时角坐标(h, δ)	89
5.3.2 时角坐标(h, δ)与赤道坐标(α, δ)	91
5.3.3 旋转矩阵	91
5.3.4 赤道坐标(α, δ)与黄道坐标(λ, β)	94
5.4 恒星时	95
第6章 天体测量	97
6.1 大气折射	97
6.1.1 Saastamoinen 模型	99

6.1.2	大气折射积分改正	99
6.1.3	折射改正的应用	103
6.2	视差	104
6.2.1	周年视差	104
6.2.2	地心视差	107
6.3	光行差	108
6.3.1	周年光行差	111
6.3.2	周日光行差	112
6.4	恒星的空间运动	113
6.5	岁差	114
6.6	章动	119
6.7	视位置	122
6.8	高精度天文测量	122
6.8.1	光线引力弯曲	122
6.8.2	Klionić 范式	126
第 7 章	天球参考系	131
7.1	概念	131
7.1.1	太阳系质心天球参考系	131
7.1.2	地心天球参考系	132
7.2	观测方法	135
7.2.1	甚长基线干涉测量	135
7.2.2	空间天体测量任务	138
7.3	经典天球参考系	142
7.3.1	FK3、FK4、FK5 基本星表	143
7.3.2	照相星表与综合星表	144
7.3.3	依巴谷与第谷星表	144
7.3.4	2MASS	144
7.3.5	施密特改正镜测量星表	145
7.3.6	美国海军天文台 CCD 照相天图星表	145
7.4	国际天球参考系	145
7.4.1	ICRS 的定向	147
7.4.2	ICRF 的光学实现	147
第 8 章	地球参考系	148
8.1	概念	148
8.1.1	局部地球参考系	148

8.1.2 全球地球参考系	149
8.2 观测方法	150
8.2.1 经典方法	150
8.2.2 卫星激光测距	153
8.2.3 全球定位系统	154
8.2.4 GLONASS	158
8.2.5 DORIS	158
8.2.6 GALLIEO	159
8.2.7 陀螺仪	159
8.3 国际地球参考系	162
第9章 从 GCRS 到 ITRS	166
9.1 极移	166
9.2 世界时、UT1 与日长变化	170
9.2.1 世界时	170
9.2.2 UT1 及其变化	173
9.3 天球中间极	174
9.3.1 瞬时旋转轴	175
9.3.2 CIP 的定义	177
9.3.3 CIP 在 GCRS 中运动,天极补偿	179
9.3.4 IAU2000 岁差-章动模型	180
9.3.5 基本章动角	184
9.3.6 框架偏差矩阵	185
9.3.7 Capitaine 与 Wallace 序列	186
9.3.8 CIP 在 ITRS 中的运动	187
9.4 CIO、TIO、ERA 与 GAST	190
9.4.1 天球中间零点	190
9.4.2 地球中间零点	192
9.4.3 地球自转角与 GAST	193
9.5 GCRS 到 ITRS 的转换	194
9.5.1 基于春分点的经典转换	194
9.5.2 基于 CIO 的转换	195
第10章 天文软件与天文年鉴	197
10.1 软件实现	197
10.1.1 SOFA	197
10.1.2 NOVAS	198

10.2 天文年历	198
10.2.1 APFS	198
10.2.2 天文年历	198
第 11 章 天文常数	200
11.1 自然常数	200
11.2 已定义和可测的自然常数	201
11.3 自然单位的相关问题	201
11.4 体常数和框架	201
11.5 初始值和模型	202
11.6 当前的最佳估计	203
参考文献	205
缩略词	217
附录 A 习题解答参考	221
附录 B AstroRef 软件包使用说明	234
B.1 概述	234
B.2 下载	234
B.3 安装与使用	234
B.4 函数	235
B.4.1 概述	235
B.4.2 辅助函数	236
B.4.3 时间函数	239
B.4.4 天球和地球参考系函数	244
B.4.5 折射函数	249
B.4.6 视位置函数	250
B.4.7 历表函数	255
B.5 变量	258

第 1 章 绪 论

1.1 天文大地参考系

本书论述的是天文(大地测量)参考系。书中介绍了各种专用的、特别是在地球附近起基础性作用的时空参考系。

“参考系”一词表示的不仅是在一个时空流形内的数学坐标系,而且它标定了在近地空间发生的时空事件,这些事件必须经专业的观测和系统分析才能获知。此类事件被假定有很小的空间(这里)和时间(现在)范围,如 GPS 或无线电天线的相位中心,或在某个历元瞬间的行星质心。

1.1.1 时间问题

“时间是什么?如果没人问我,我知道;如果让我解释,我却说不清楚了。”圣·奥古斯丁(Saint Augustine)的这句话明确地道出了对于时间(或任何其他的基本科学概念,如空间、物质和生命等)概念的分析是多么困难。对于时间的概念,这里仅关注两个方面:一个是理论上的概念;另一个是更加实际的、自然的概念。在理论方面,牛顿将普通生活中“相对的、明显的和普通的时间”比作出于自然本质且稳定流动的“绝对的、真实的和数学上的时间”,而没有参照任何实物。由于与实践冲突,这一理论概念后来被爱因斯坦的引力理论推翻。

在实践中仅涉及如何测量时间的问题。著名的诺贝尔奖获得者费曼(Feynman)曾经说过:并不是时间本身使物理学家感兴趣,而是如何测量时间。在这个意义上,时间的概念和钟表制造技艺有着千丝万缕的联系。任何时钟所涉及的物理过程都是人们所熟知的定律,并且能够指明其进程。在实践过程中,对周期性过程有着专门的应用,如时间的测量通常是指对频率的确定。

图 1.1 给出了公元前 3000 年到现在钟表制造技艺的发展史。在这段时间内可以发现钟表的精度提高了约 14 个数量级。

日晷可以追溯到大约公元前 1500 年的古埃及时期。通过观察一个直立在地上的杆或柱子的影子,就可以推断出时间。古埃及、古罗马和古代中国还使用了水钟。由伽利略在 1600 年引入并由惠更斯(Huygens)在 1656 年实现的钟摆振荡器使人们在计时的精度上获得了重大进步。航海者的经度问题众所周知:船只的纬度可以通过天文方法直接获得,而经度却不能直接获得。在海洋上确定地理经

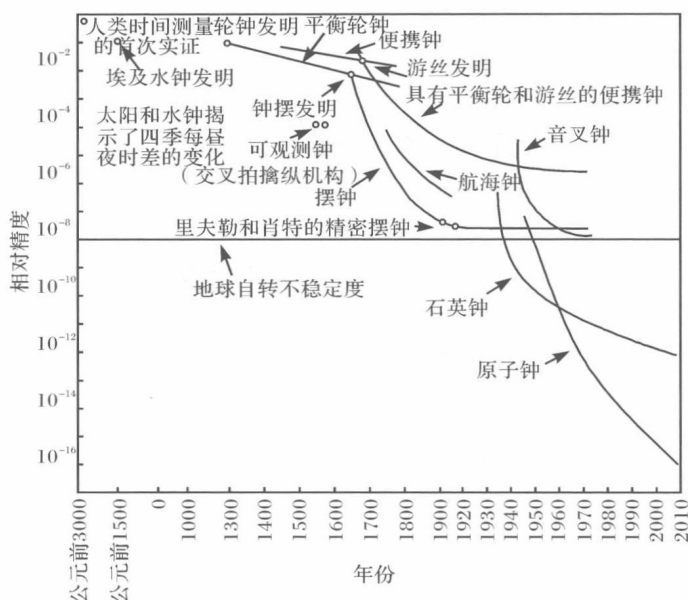


图 1.1 钟表制造技艺的发展史

度的方式之一是，将航海天文钟所显示的已知港口时间和通过天文观测所确定的本地时间进行比较。但是，就算每天少算或多算 1min，在经历了一个月的航行后，最终的误差也将达半小时。在 30min 之内，地球已经转过了 7.5° ，这对应着数百英里^①的航行偏差。

18 世纪初，由英国议会任命的经度委员会发起了一场科学竞赛，以找出一种测量经度问题的实用方法 (Sobel et al., 2003)。人们考虑了两种可能的方法：月球距离法和制造一个精确的时钟，即航海天文钟。这个为精密计时器所设的奖最终颁给了伦敦的钟表匠约翰·哈里森 (John Harrison)，他的杰作 H4 (图 1.2) 目前已有 250 年历史，足以媲美现代的机械时钟。它的弹簧系统产生了一个几乎恒定的动力，即使在上发条时也保持稳定，而在海上航行时温度变化所造成的误差，则被一个双金属片控制调节器有效地消除了。在官方测试中，时钟的精度达到了经度委员会所要求指标的三倍：在经历了从朴次茅斯 (Portsmouth) 到巴巴多斯 (Barbados) 的 22 天航行之后，裁判将这个航海天文钟的读数与木星的伽利略卫星轨道进行比较，检出误差仅在 39s 之内！这意味着约翰·哈里森的 H4 相对精度大约是一天 1.8s，或者说相对精度是 2×10^{-5} 。

20 世纪初，航海天文钟的精度大约为每天 10^{-1} s，摆钟的精度达到了每天

① 1 英里 = 1.609344 千米。



图 1.2 约翰·哈里森的航海精密计时表
伦敦格林尼治国家海事博物馆收藏

10^{-2} s。通过采用某些晶体振荡代替钟摆或游丝的方法使时钟的精确性大大提高。而现代原子钟,如铯原子钟、铷钟或氢钟的精确性则更高。近几十年来,一种新型的喷泉原子钟开始流行。经典的原子钟是基于微波波段原子的跃迁;由于其随机性,需要的平均时间超过数分钟甚至数天以实现最高的精度和稳定性。同时,通过利用更高频率的原子跃迁,已经开发出了新型的原子钟(即光钟),所需的平均时间明显缩短。现在,钟的稳定性(精度)已接近 10^{-17} ,这已经是一个可以和宇宙年龄即 4×10^{17} s 相提并论的数字了。

现在,根据相对性原理,特定的时钟所显示的时间取决于两个因素:时钟在观察者读取时间时的速度和时钟所在地的重力位。随某个观察者运动的时钟读数并不适用于其他观察者。因此,引入标准化的时间尺度在实际应用中就变得非常重要。原子钟的读数是现在所有仍在使用的天文时间尺度的基础(注意:有些“时间”,尤其是世界时和恒星时,都是地球自转角度的描述,而不是严格意义上的时间尺度)。时间尺度是一个精心选择的时间坐标,它可用于某个空间区域,如地球附近发生的任何事件;它应当与在该空间区域中的一个真实时钟的原时之间有着简单明确的定义关系。

根据相对论,这里必须把地心时间尺度和日心(太阳系质心)时间尺度区别开来。地心坐标时(TCG)是基本的地心时间尺度,也是地心天球参考系(GCRS)的时间坐标。它的实现是通过一组与 TCG 关联的原子钟的原时及对应的 GCRS 坐

标 $\mathbf{X}$ 来获得的。TCG 是一种实现时钟同步的重要工具:两个原时为 τ_1 和 τ_2 的时钟同步是指它们相对应的 TCG 值一致,即 $\text{TCG}(\tau_1, \mathbf{X}_1) = \text{TCG}(\tau_2, \mathbf{X}_2)$ 。地球时 (TT) 与 TCG 仅相差一个比例常数,TT 近似为大地水准面上钟的原时。除了由历史原因引起的常数偏移之外,国际原子时 (TAI) 与 TT 一致。从实用的角度来看,TAI 直接来自分布于世界各地的大量原子钟的读数,而时间尺度 TT 和 TCG 产生于 TAI。在这个意义上,一个实用的时间尺度是通过实际的时钟读数产生的 (这是与纯数学时间坐标的本质区别)。

某种用于参考系的时间尺度,由其可靠性、频率稳定性和频率精度与可用性来表征。Arias(2010)将这些特征归纳如下。

时间尺度的可靠性与时钟制造过程中的可靠性是紧密相关的。可靠性也与冗余性有关;就 TAI 来说,大量的时钟是必需的。

时间尺度的频率稳定性是指维持单位尺度大小和理论尺度大小之间固定比率的能力(衡量频率稳定性的指标是 Allan 方差,将在后面对其讨论)。

时间尺度的频率精度是指利用单位尺度大小重现其理论尺度的能力。在按要求采用频率稳定性算法进行尺度计算后,通过比较时间尺度的频率与一级频率标准的频率(必要时应用频率改正)可以提高频率精度。

世界范围内时间尺度的可用性是指为每个人提供事件追溯手段的能力,这取决于所需要的精度。对于 TAI,为达到参考时间尺度所需的长期频率稳定性,最终所需的延迟可达数十天。

对于行星际飞船的导航,特别需要用到质心时间尺度。太阳系质心坐标时 (TCB) 在太阳系质心天球参考系 (BCRS) 中发挥了与 TCG 类似的作用。同时根据定义,用于行星星历中的质心动力学时 (TDB) 本质上不同于 TCB,差别就在于 IAU2006 B3 号决议确定的一个比例常数。例如,TCB 和 TCG 这样的质心与地心时间尺度之间的关系涉及复杂的四维时空变换(狭义相对论洛伦兹变换的一般规则)。

1.1.2 各种时空参考系

当前,不仅对于时间问题,而且空间坐标的有关问题都必须在爱因斯坦的引力理论(GRT)框架下描述。对于太阳系中的大多数应用,GRT 的一阶后牛顿近似就足够了。时间与空间不再是独立的实体,而是一个四维时空的不同侧面。

在爱因斯坦的 GRT 中,引力场由某种时空度规张量 $g_{\mu\nu}$ 描述。此度规张量是一个非常有用的工具,因为它把观测的坐标背景与观测量联系了起来。它为描述理想的时钟速率、光的传播和在引力作用下 N 体问题中的天体运动提供了一个工具。

中心概念的出发点是正则质心时空度规张量。此正则度规是太阳系质心动