



航天器轨道力学理论与工程应用
“十二五”国家重点图书出版规划项目

参考坐标系及航天应用

黄 珙 刘 林◎著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



航天器轨道力学理论与工程应用
“十二五”国家重点图书出版规划项目

参考坐标系及航天应用

黄 珙 刘 林 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是项目丛书(共4个分册)中的第一本,因丛书的核心内容是小天体(主要针对各类航天器)运动的轨道问题,这是一个动力学问题,那么,首先就要确定时空参考系的选择,这就是本书作为丛书第一本的根本原因。

本书系统地介绍参考坐标系的基本理论、现状及其发展,论述了天球参考系、地球参考系和相对论天文参考系的定义、实现和维持,以及各坐标系之间的转换,特别对航天领域有关卫星应用和深空探测中常用的参考系作了详述。

全书共8章。第1~2章介绍参考系的基本概念和时间尺度,第3~5章阐述参考系的具体实现及实际应用的重点内容,第6章阐述天文参考系涉及的相对论理论,第7~8章具体针对航天应用的需求,提供了行星和月球历表的计算,并系统地介绍了几个典型天体的星体参考系,及其与天球参考系的转换关系。

本书可供航天领域、大地测量、地球动力学和天文等专业的科技人员,以及高等院校有关专业的师生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

参考坐标系及航天应用/黄斌,刘林著. —北京:电子工业出版社,2015.5

(航天器轨道力学理论与工程应用)

ISBN 978-7-121-26096-4

I. ①参… II. ①黄… ②刘… III. ①天球坐标系—应用—航天工程 IV. ①P21②V57

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第106546号

责任编辑:徐 静 许存权

印 刷:北京天来印务有限公司

装 订:北京天来印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:10 字数:256千字

版 次:2015年5月第1版

印 次:2015年5月第1次印刷

定 价:98.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

总 序

本套著作丛书将系统地总结天文与航天领域关于航天器轨道力学的理论、关键技术创新和工程应用等方面的研究成果，并以此作为凝聚人才、打造尖端科研人才和开展航天科技自主创新研究的重要知识平台。

全套著作包含航天工程事业发展中需要的轨道力学所涉及的各个方面，包括精确的天文参考系，各类航天器的轨道运行理论、计算方法，工程应用中的轨道设计、测量、跟踪与控制，以及科学应用等。核心部分是轨道力学理论与计算方法，其理论体系完备，方法实用，与工程实践联系紧密，著作中的主要理论与方法在我国多项航天任务中已得到了成功的应用。撰写组成员包括从事与航天工程有密切联系的教学和理论研究专家、多年来活跃在航天工程第一线技术专家，既保证了这套著作的严密理论体系，又能满足我国航天事业发展的实际需求，为我国当前和未来的重大航天工程实施提供理论和技术支撑。

本套著作除总结了作者自 20 世纪 50 年代末以来多年的研究成果外，还涵盖了作者在南京大学、上海天文台、相关高校和航天工程等单位讲课所撰写的 10 多本教材的相关内容，全套著作共有以下四个分册：

- (1) 参考坐标系及航天应用
- (2) 卫星轨道理论与应用
- (3) 深空探测轨道理论与应用
- (4) 航天器定轨理论与应用

这是一套体系严密，同时具有基础性和实用性，符合我国航天工程实践的专著。

考虑到四个分册编写内容之间的联系和差别，以及便于读者阅读，在四个分册中对某些问题进行了必要的重复阐述，同一内容也会有不同的表述等，但仍保持了全套丛书体系的完整性。

刘 林
2014 年 12 月

序言一

刘林教授从事太阳系动力学与航天器轨道力学的教学与研究近 60 年，已出版卫星轨道力学方面的专著与教材 10 本，论文 260 多篇，并主持完成相关研究课题 40 多项，很多研究成果已成功地应用于航天任务。

在我国航天器轨道与天体力学有关部门的专家中，许多人都受到过刘林教授的指导。目前，刘林教授仍然坚持在人才培养和航天器轨道理论与应用研究工作的第一线，不断取得研究成果。近年来又带领他的入室弟子——也是活跃在我国天文与航天领域的专家和青年骨干，完成了这套“航天器轨道力学理论与工程应用”著作，对各类航天器的运行轨道，从基本理论、各种外力作用下的解算方法，到重要结果蕴涵的动力学特征，都有详尽的论述，对航天器轨道设计，轨道测控和实际应用都有指导意义。该套著作理论清晰、方法具体、内容充实，是关于各类航天任务中有关轨道技术的重要指导和技术参考书，也是天文学，特别是天体测量、天体力学与航天动力学紧密结合的范本。

本套著作共分四个分册，首先阐明航天中所用的参考坐标系和有关常数，然后详细论述各种卫星的轨道理论与应用，再详细论述深空探测的轨道理论与应用；最后，论述航天器如何定轨。著作逻辑分明，结构清晰，可供从事航天轨道设计与应用的科技人员参考。



2015 年 2 月 14 日

序言二

进入二十一世纪以来,我国航天事业迎来了一个快速发展时期,载人航天工程和月球探测工程取得了重大突破,二代导航系统、高分辨率对地观测系统等工程正稳步推进。随着我国经济和科技实力的不断增强,进行深空探测,开展对火星、小行星以及其他太阳系内天体的探测又将是我国今后航天活动的一个重要方向。

航天器轨道动力学是航天科技的一项关键理论基础,是航天事业的重要技术支撑。航天器轨道动力学内容涉及天体力学、天体测量学、大地测量以及动力系统、估计理论等领域,是各类航天器轨道理论分析、预报和定轨计算的基础,同时也为航天器轨道维持与控制、各类轨道和星座设计及航天测控系统等多个领域的应用提供重要的理论支持。

本套著作系统地总结了近年来关于航天器轨道力学的理论研究、关键技术创新和工程应用等方面的研究成果,既包含了航天器轨道动力学的各种基础知识和重要理论,也体现了轨道动力学在目前一线航天任务中的重要应用。理论体系完备,与工程实践联系紧密,可为应用卫星、载人航天、深空探测等当前和未来重大航天工程提供技术支撑。

著作撰写组成员中有从事与航天工程有密切联系的教学和理论研究专家,有多年活跃在航天工程第一线的技术专家,著作中包含了专家多年来从事相关理论研究的经验和工程经验。著作的出版,既有利于航天器轨道动力学的应用,又能够进一步促进学术领域的研究发展。

沈广毅

2015年1月11日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 参考系的概念	1
1.2 基本坐标系以及相互转换关系	2
1.3 参考系的发展现状及发展趋势	7
第 2 章 时间系统	9
2.1 以 SI 秒长为基础的时间尺度	9
2.2 以地球自转为基础的时间尺度	10
2.3 时间尺度的转换	11
2.4 协调世界时、世界时、恒星时和地球自转角的转换	13
2.5 新标准历元和儒略日	15
第 3 章 天球参考系	17
3.1 天球参考架	18
3.2 天球中间极 (CIP)、天球中间零点 (CIO) 和 地球中间零点 (TIO)	22
3.3 地球动力学轴的空间运动——岁差和章动	26
3.4 岁差和章动转换矩阵	30
3.5 天文常数	37
第 4 章 地球参考系	42
4.1 关于地球参考系的建立	42
4.2 地球参考系的定义	43
4.3 地球参考架间的变换	45
4.4 国际地球参考系 ITRS 及其实现	46

第 5 章 天球参考系和地球参考系间的坐标变换	50
5.1 天球中间极 (CIP) 相对地球本体的运动——极移和自转	50
5.2 天球参考系和地球参考系间的坐标变换	53
5.3 ITRS 和 GCRS 间坐标变换的算法	54
5.4 IERS 科学产品及服务	57
第 6 章 天文参考系的相对论理论	59
6.1 一般原理	62
6.2 谐和参考坐标系	65
6.3 旋转参考系	83
6.4 参考系的分层结构	87
第 7 章 行星和月球历表	88
7.1 行星和月球历表	88
7.2 行星和月球历表数据的 Chebyshev 多项式表示	90
7.3 JPL 行星和月球历表的结构和使用	93
第 8 章 航天领域中常用的参考系	97
8.1 航天领域中常用参考系的概况	97
8.2 地球坐标系	99
8.3 月球坐标系	101
8.4 火星坐标系	108
附录	114
附录 1 IAU/IAG 工作组推荐的天体自转北极和本初子午线参数值	114
附录 2 基本天文学标准 (SOFA) 程序库	116
附录 3 第 21 届 IAU 大会 (1991 年) 关于相对论参考系的决议	123
附录 4 第 24 届 IAU 大会 (2000 年) 有关参考系的决议	129
附录 5 第 26 届 IAU 大会 (2006 年) 有关参考系的决议	140
附录 6 第 24 届 IUGG 大会 (2007 年) 有关 GTRS 和 ITRS 的决议	145
附录 7 第 27 届 IAU 大会 (2009 年) 采纳 2009 天文常数和 ICRF2 的 相关决议	146
参考文献	148

第1章 绪 论

1.1 参考系的概念

物质的运动无处不在，如银河系中恒星的运动、太阳系中行星和卫星的自转及其轨道运动、地球的自转和极移、航天器在地球附近或太阳系中的运动以及地球的板块运动。这些天体或地球上的点在空间的位置和运动必须相对某个参照物来描述，这样的参照物就是参考系，描述不同物体的运动应选择不同的参考系。引进适当的参考系可以使研究的问题清晰、动力学模型简单；反之，如果参考系选择不当，将使问题复杂化。例如，天体的平动、自转运动或人造地球卫星的运动应在天球参考系中描述，而地球的板块运动则在地球参考系中描述更为方便。这些参考系可以用数学模式和动力学给予定义，如太阳系天体的历表是通过解算描述天体在太阳系动力学模型中的运动方程得到，它定义了某些不变的点和方向，构造了动力学天球参考系。在宇宙中非常遥远的天体，如类星体或星系没有自行，或者小于 2×10^{-5} 角秒/年，由这些遥远天体的运动性质或者其几何结构定义的参考系称为运动学天球参考系。地面上的台站坐标用理论模式描述的参考系称为地球参考系。牛顿力学框架下定义的参考系是相对三维空间的，而广义相对论中定义的参考系一般都是针对四维时空的。

参考系包括：

- (1) 一套理论和数据处理方法。
- (2) 一组模型和常数。
- (3) 一个对应的参考架。

例如，目前国际上通用的 IERS (International Earth Rotation and Reference System Service) 国际天球参考系 (ICRS) 包括：

(1) IERS 的天球参考架, 即国际天球参考架 ICRF。

(2) 确定该参考架所采用的一组模型常数, 即 IERS 规范。

(3) 确定该参考架参考点(河外射电源或光学对应体)坐标值的一套理论和数据处理方法。

因而, 参考系是多方面因素组成的系统, 例如国际天球参考系(ICRS), 它的原点在太阳系的质心, 采用一组精确测量的河外射电源的坐标实现其坐标轴的指向, 其基本平面(XY 平面)接近 J2000.0 平赤道, X 坐标轴指向接近 J2000.0 平春分点。

与参考系对应的坐标系是用于描述物体位置、运动和姿态的一种数学工具。对于欧氏空间, 坐标系的定义包括三个要素, 即坐标原点的位置、坐标轴的指向、坐标尺度。坐标系是理论定义的, 因而没有误差可言。坐标系之间的转换关系, 包括原点间的平移、坐标轴方向的旋转以及坐标尺度的调整。

参考架是数学上定义的坐标系的物理实现, 它通过一定数量物理点的标定坐标来实现。由标定了坐标值的一组物理点组成的框架称为参考架。国际天球参考架(ICRF)作为国际天球参考系(ICRS)的实现, 由一组精确测量的河外射电源的坐标实现其坐标轴的指向, 并确定了 212 颗定义源作为定标的基准和坐标网格。这些河外射电源非常遥远, 因此自行可以忽略。尽管如此, 由于射电源的结构不稳定性, 仍会导致参考架的不稳定, 因此需要长期监测。而在光学波段由依巴谷星表(Hipparcos)给予实现, 并将其命名为依巴谷天球参考架(HCRF)。有了参考架, 其他天体的位置可以相对于这个框架给以描述, 才能真正使天体的位置及其变化加以定量的描述。

总之, 坐标系是理论概念的数学表示, 参考架是坐标系的物理实现, 参考系是包含理论概念和物理实体(参考架)的综合系统。

尽管参考系与坐标系在概念上有所区别, 但在以下问题讨论中, 在并不引起误解的情况下, 一般就混用参考系与坐标系。

1.2 基本坐标系以及相互转换关系

坐标系的引进可以使问题清晰、理论推导简单。反之, 如果坐标系选择不合适, 将会使得问题复杂化。对于不同的问题, 最适合采用的坐标系也各不相同。

同。在众多坐标系中，有些坐标系仅作为推导工具而引进，这是一些仅在中间推导过程中使用的坐标系。这类中间坐标系可以按推导的需要而引进，不一定要遵守公认的定义和共同的约定。然而，不同的中间坐标系之间常常不能相互直接比较，所以，它们最终都需要联系于某些公认定义的、可作为基本标准的坐标系。将作为基本参考标准的坐标系称为基本坐标系，其他的一些坐标系称为导出坐标系。

对于航天应用来说，有两个基本坐标系是必需的，即基本天球坐标系和基本地球坐标系。基本天球坐标系用于描述航天器或太阳系天体的位置和运动，基本地球坐标系用于基于地球的观测描述。为描述天体和航天器在空间的位置和运动，需要在空间定义一个坐标系，其原点在太阳系（或地球）质心，坐标标架相对于遥远天体背景的整体没有旋转。如果这样的坐标系得以实现，就认为，相对于这个坐标系所描述的物体运动属于该物体本身相对于太阳系质心系（或地心系）的运动。通常将符合这种要求的天球赤道坐标系称为基本天球坐标系，并用符号 FCCS (Fundamental Celestial Coordinate System) 表示。其他各种导出的天球坐标系都要与基本天球坐标系发生联系。

同时，为描述测站在地球上的位置和运动，需要在地球本体内定义一个坐标系，其原点在地球总质量（含流体部分）的质心，其标架相对于地球的平均岩石圈整体没有旋转。如果这样的坐标系得以实现，就认为，相对于这个坐标系描述的测站的运动属于该测站自身的运动，而这个坐标系相对于基本天球坐标系的运动是地球质心的平动和绕质心的自转运动。本书将符合这种要求的地球赤道坐标系称为基本地球坐标系，并用符号 FTCS (Fundamental Terrestrial Coordinate System) 表示。其他各种导出的地球坐标系都要与基本地球坐标系建立联系。

一个有实际意义的基本坐标系，除上述的非旋转性外，还必须满足一个最重要条件，即这个坐标系必须有“可实现性”，就是其原点、基本面和经度起始点必须具备“可观测性”。所谓可观测性，必须是不依赖于任何已知坐标框架的“绝对可观测性”。例如，在没有任何已知数据的条件下，要能测量出一个天体（或一个测站）在该坐标系中的坐标，只有地球的某些动力学平面具有这种可观测性。

然而，地球的动力学平面，无论在空间还是在地球本体都不是固定的。任何可观测的动力学平面都只有瞬时的意义，基于其建立的坐标系都是瞬时坐标系。这样看来，对于基本坐标系的“不旋转”和“可实现”这两个主要要求却是相互

矛盾的。解决这个矛盾的途径是给出地球的瞬时动力学平面的运动规律，以此规律为基础，可以用一组有旋转的瞬时动力学平面的空间定向维持一个不旋转的坐标系。这样，瞬时坐标系的可观测性就转变成基本坐标系的可观测性。

综上所述，要实现一对理想的基本坐标系，需要解决以下三个环节上的有关问题。

(1) 选取适当定义的瞬时动力学平面，建立适当的瞬时坐标系。

(2) 在不同时刻参考当时的瞬时坐标系，通过一定的方法对一组目标天体开展一系列定标观测。

(3) 在不同的瞬时坐标系之间建立确切的理论关系，将各瞬时观测结果换算到一个共同约定历元的坐标系（即基本坐标系）。此过程中涉及的各种概念、常数、函数关系、数据处理方法等，都需要经过严格的协调（详见第 5、第 6 章）。经这样处理后，由大量的瞬时观测数据综合成为一个参考架，该参考架才是基本坐标系的体现。至于坐标原点的定义，需要通过动力学方法建立的框架实现。

上述三个环节构成了实现理想基本坐标系的一套整体方案，这方案就成为地基测量的参考系统（Reference System），通常简称为“参考系”。

基本天球坐标系 FCCS 和基本地球坐标系 FTCS，它们的基本面（或基本方向）都和地球的动力学平面（或动力学轴）相联系。由于地球的各动力学轴的方向（自转角速度方向、自转角动量方向、最大惯量矩方向和轨道角动量方向）无论相对于空间还是相对于地球本体都存在着复杂的运动，为实现基本坐标系，需要精确描述瞬时动力学轴的运动规律，给出瞬时坐标系和基本坐标系间的转换关系。这将在第 3、第 4、第 5 章中介绍，本节先给出基本坐标系的转换关系。

从数学上讲，FCCS 和 FTCS 之间的关系只要用三个欧拉角（自转角 Φ 、章动角 Θ 和进动角 Ψ ）就可以充分描述，这些欧拉角的具体定义与所采用的坐标旋转次序有关。可以有几种不同的旋转方式，但最后都可达到同样的目的。以图 1.1 所示的两个坐标系为例，令 $[FCCS]$ 和 $[FTCS]$ 分别为 FCCS 和 FTCS 的坐标标架（单位基矢量组成的矩阵），即

$$[FCCS] = (\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3), \quad [FTCS] = (\bar{e}_1', \bar{e}_2', \bar{e}_3'),$$

其中 $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$ 和 $\bar{e}_1', \bar{e}_2', \bar{e}_3'$ 分别为 FCCS 和 FTCS 的单位基矢量。

假设天体的位置矢量为 $\bar{\rho}$ ，其在 FCCS 和 FTCS 的坐标分别为 x_1, x_2, x_3 和 y_1, y_2, y_3 ，则有

$$R_3(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

(1.1) 式的形式很简单, 但是, 由于地球的动力学轴对空间和对地球本体的方向都是时变的, 不论怎样选取 FCCS 轴和 FTCS 轴, 都不能使得两者中任何一个始终和地球的动力学轴的方向保持固定关系。不难理解, 在这种情况下, 由于地球存在快速的周日自转, (1.1) 式的三个欧拉角都存在周日变化。如果用这样一组参量描述地球的空间姿态, 这些参量将是不可观测的。因为任何天体测量观测过程都不是瞬间完成的。过去传统测量技术通常取一天为一个观测时段, 对现代测量技术, 也需要几个小时, 将来最短也需要几分钟。在这时段内, 这些具有周日变化的参量都已发生了显著变化。

可见, 对于地球绝对姿态的描述来说, (1.1) 式的形式虽然最简单, 但无法实现。需要引进瞬时坐标系, 使得各坐标旋转角都不含快速的周日变化, 这样才有可观测性。设想若引进这样的瞬时天球坐标系 ICCS (Instantaneous Celestial Coordinate System), 使得 ICCS 和 FCCS 之间的差异只是由于地球的动力学面(赤道面和黄道面)的空间摆动所引起, 而与地球的周日自转角无关, 因此坐标旋转参数没有快速的周日变化。再引进瞬时地球坐标系 ITCS (Instantaneous Terrestrial Coordinate System), 使得 ITCS 和 FTCS 之间的差异只是由于地球的赤道面相对于地球本体的摆动所引起, 而与地球的周日自转角无关, 因此坐标旋转参数也没有快速的周日变化。而设法使 ICCS 和 ITCS 二者有公共的极轴, 它们之间只有周日自转角的变化。在此基础上, 采用一个钟速接近于地球自转角速度时钟的时间读数, 近似模拟地球自转角, 这样自转角未被模拟的部分将是一个变化缓慢的小量。

如果引进瞬时天球坐标系 ICCS 和瞬时地球坐标系 ITCS, 其对应的坐标标架为 $[ICCS]$ 和 $[ITCS]$, 这两个坐标系间的关系可以写成

$$[FTCS]^{-1}[FCCS] = ([FTCS]^{-1}[ITCS])([ITCS]^{-1}[ICCS]) \quad (1.5)$$

$$([ICCS]^{-1}[FCCS])$$

(1.5) 式的左端是基本天球坐标系和基本地球坐标系间的关系, 它代表了地球平均岩石圈相对于遥远天体整体背景的“空间绝对姿态”。右端将这空间绝对姿态

分解成三部分,一部分($[ICCS]^{-1}[FCCS]$)是瞬时天球坐标系相对于空间背景的姿态变化,另一部分($[ITCS]^{-1}[ICCS]$)是瞬时地球坐标系相对于瞬时天球坐标系姿态变化,还有一部分($[FTCS]^{-1}[ITCS]$)是地球本体相对于瞬时地球坐标系姿态变化。如果这样的分解能够实现,将可实现地球姿态观测方程的线性化, $[ITCS]$ 和 $[ICCS]$ 将能够通过观测实现,并最终实现 $[FCCS]$ 和 $[FTCS]$ 转换参数的确定。实现这种分解方式的关键是寻找一个合理的参考轴,作为瞬时坐标系 $[ITCS]$ 和 $[ICCS]$ 公共轴。有关公共参考轴以及瞬时坐标系 ITCS 和 ICCS 的选取,请见第3、第4章和第5章。

1.3 参考系的发展现状及发展趋势

较早时期,人类的天体测量活动依靠相对孤立的地面观测台站。尽管这些测量活动可以同时服务于地球自转参数测量、测站经纬度的测量,但一直没有严格建立起测站的“框架”概念,地面参考框架以“大地网”的形式依靠经典的大地测量技术通过测量区域的或局部的观测点建立大至国家版图范围的最佳参考椭球拟合。直到1981—1986年的国际地球自转联测(MERIT)期间才将参考系问题作了比较系统的定义和约定,提出全球统一的国际参考系规范。随着VLBI技术的发展,1997年国际天文联合会(IAU)决定从1998年开始采用ICRS规范,结束了依据FK5系统的光学星表实现天球参考系的时代。1990年代IAU的一系列参考系方面的决议,反映了当时多种空间测量技术迅猛发展的现状,满足了由VLBI带动的毫角秒天体测量时代的需求。由于VLBI观测技术的进一步发展,观测精度不断提高,数据分析发现IAU 1976岁差模型、IAU 1980章动模型实现的天极存在不可忽略的误差,在此基础上提出了新的岁差章动模型,并在2000年的IAU大会决议采用IAU2000岁差一章动模型,同时引入了天球中间极(CIP)和天球中间零点(CIO)的定义,最终在2006年的IAU大会进一步完善,形成IAU2006决议,与天球参考系有关的、包括IAU2006岁差理论、黄道的定义,并进一步规范了参考系的极和零点。

纵观近十多年国际地球参考框架(ITRF)的发展史,除了精度上的提高,在基本定义、分析技术和输出产品方面也有很大进步,ITRF2000标志了一个新世代的开始。在ITRF2000之前的参考框架中,如ITRF93和ITRF97,使用了经典大

地测量和空间大地测量的观测联合平差，最后的综合解连接到板块构造模型（如 AM0-2 和 NUVEL-1A）所定义的参考系统。按照上述方法定义的大地参考框架的原点，本质上是不完备的地球表面形状中心（CF），而不是地球系统的质心（CM）。从 ITRF2000 起，参考框架的确定摆脱了经典大地测量，完全由空间大地测量资料的平差获得；参考框架原点由卫星激光测距（SLR）观测确定，框架的尺度因子主要由 VLBI 观测定义，参考框架的原点从理论上讲应是地球系统的质心。同时，参考框架的空间定向采用无整体旋转（no net rotation）约束，比原先的板块构造模型约束更合理。有关国际地球参考框架，详见第 4 章。

自 ITRF2000 以后，科学界一直有呼声，希望能有一套和参考框架自洽的地球自转参数（polar motion, UT1）。传统上，大地参考框架的台站坐标和速度是由一个机构负责确定的，而地球自转参数是由 IERS 另一个机构独立实现的。从实现 ITRF2005 起，要求各种空间观测技术的分析中心，送交包括台站坐标和地球自转参数的松弛解，以及它们的协方差矩阵，然后，参考框架处理中心对所有松弛解作总体平差求解。求解出的地球自转参数和 IERS 的解相比，虽然很接近，但还是存在一定差别，特别是 Y 极坐标存在 0.029mas/yr 的明显漂移。用户的反映还是 IERS C04 序列的质量更好一些，这说明在目前的 ITRF 框架求解过程中，还有一些整体旋转的系统误差没有消除干净，有待进一步改进。

第2章 时间系统

时间尺度主要分为两种：基于原子物理的原子时系统（SI 秒）和基于地球自转的世界时系统。原子时系统包括实际应用需要的国际原子时（TAI）、地球时（TT），以及理论研究需要的坐标时—质心坐标时（TCB）和地心坐标时（TCG）。其中 TCB 和 TCG 分别是四维时空的太阳系质心天球参考系（BCRS）和地心天球参考系（GCRS）中的坐标时。质心力学时（TDB）以及历书时（ T_{eph} ）与 TCB 紧密相关，用于太阳系历表。基于地球自转的时间尺度包括真恒星时（GST）、平恒星时（GMST）以及世界时（UT1）。由于地球自转的不均匀性，以及潮汐的影响，以地球自转为基础的时间尺度长期变慢，滞后于 SI 时间。为了和原子时系统保持同步，并兼顾地球自转变慢的效应，引入协调世界时 UTC 和闰秒。

2.1 以 SI 秒长为基础的时间尺度

国际度量衡局（BIPM）在 2006 年对于 SI 秒长的定义是一种对特定的原子（铯原子 133）辐射周期的计数，并没有给出实现的地点或当地的引力场，仅仅是一种原时的实现方案。SI 秒可以在任何地方实现，比如地球表面、人造地球卫星、火星上，以及太阳系质心处等，对于所有的观测者，实现 SI 秒的方法都是一样的。

为了实际使用，国际原子时 TAI（一种坐标时）的秒长与旋转的地球平均海平面上实现的 SI 秒长相同。TAI 是一种均匀连续的时间尺度，使用 50 多个国家实验室里按照 SI 秒定义制作的、约 300 个原子钟的资料综合得到。TCB 和 TCG 分别是 IAU 定义的广义相对论四维时空的 BCRS（全局参考系）和 GCRS（局部参考系）中的坐标时。相对于地球表面实现的 SI 秒长，TCB 的速率快 1.55×10^{-8} ，TCG 的速率快 6.79×10^{-10} 。另外两个经常使用的时间尺度，地球时 TT 和质心力学时 TDB，也是坐标时（都不能直接测量，只能从可测量的原时转换得到，关于原