



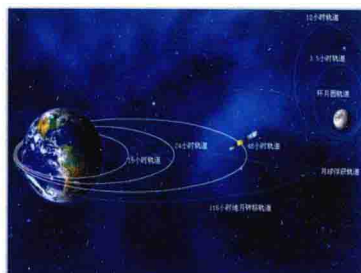
航天器轨道力学理论与工程应用
“十二五”国家重点图书出版规划项目



卫星轨道理论与应用



刘 林 汤靖师◎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

卫星轨道理论与应用

刘林 汤靖师 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是航天器飞行动力学领域的基础论著之一，书中内容是作者 50 多年来在该领域教学、科研和工程实践中的成果总结。主要针对地球、月球和几个大行星的环绕型探测器（通常所说的人造卫星）的质心运动，阐述轨道力学的基本理论及其在航天领域相关工程中的应用。

全书共 12 章，包括轨道力学的基本问题，即二体问题（卫星的无摄运动）对应的轨道解，受摄二体问题的处理方法及其相应的小参数幂级数解，轨道变化的复杂规律与特征，以及这些规律与特征在各特定航天任务中的应用。特别需要说明的是，尽管主要内容是针对环绕型探测器（人造卫星）的，但同样适用于解决太阳系中小天体（小行星和自然卫星等）运动的类似问题，从中获得解决空间探测与航天工程问题的理论依据和实用方法。

本书理论体系完整，与实际应用紧密结合，既具基础性又具实用性。可作为天文、应用数学、一般力学和航天动力学等领域研究生学习轨道力学的基础教材，也可作为天文与航天领域等相关应用系统有关科技人员的参考书。

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

卫星轨道理论与应用 / 刘林，汤靖师著. —北京：电子工业出版社，2015.12

（航天器轨道力学理论与工程应用）

ISBN 978-7-121-27860-0

I. ①卫… II. ①刘… ②汤… III. ①卫星轨道—研究 IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 297729 号

责任编辑：徐 静 许存权

特约编辑：刘丽丽 王 燕

印 刷：北京季蜂印刷有限公司

装 订：北京季蜂印刷有限公司

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：720×1 000 1/16 印张：31.5 字数：706 千字

版 次：2015 年 12 月第 1 版

印 次：2015 年 12 月第 1 次印刷

定 价：138.00 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的技术专家，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，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，发表论文 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中。

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、内容详实，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 21 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、小行星及其他太阳系内天体的探测又将是我国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，著作中包含了这些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。



2015 年 1 月 11 日

前 言

太阳系中各天体的运动，特别是小天体的运动（包括各类空间探测器），所处的力学环境基本上只有一个或两个主要外力源，其他外力作用相当于小扰动，因此，可以分别处理成受摄二体问题或受摄限制性三体问题。例如，各大行星的绕日运动，自然卫星绕大行星的运动，人造卫星绕地球的运动等，运动中承受的外力作用只有一个主要力源，即其环绕的中心天体的质点引力，相应的数学模型都归结为受摄二体问题。

从地球上所发射的航天器不外乎两种类型：环绕型和非环绕型。对太阳系中各天体（包括地球，月球，火星等大天体和小行星）做近距离探测而形成的环绕型探测器，即通常所说的人造卫星，其运行状态就是一个变化椭圆轨道。而非环绕型探测器有多种形态，包括发射月球探测器、火星探测器和多星探测器全过程中的转移轨道段（从相对地球的椭圆轨道转化为双曲线轨道；对火星等探测器而言，运行途中还有相当长一段以太阳为中心天体的椭圆轨道型的巡航段）或飞越某一大天体的运行段（相对该天体为双曲线轨道），还有在两个大天体引力共同作用下的运行段等。简单地说就是相对上述环绕型而言的非固定运行状态的总称。

本书是阐述环绕型探测器的运动规律，即卫星轨道力学，这是全套专著第二本书的内容，即以受摄二体问题为主线展开论述的卫星运动问题，书名为“卫星轨道理论与应用”。而关于以限制性三体问题的研究成果及其在航天领域应用展开的论述，是全套专著第三本书的内容，名为“深空探测轨道理论与应用”。

轨道力学问题的研究既可以像数学那样作为一种逻辑思维的训练，从而获得对原理和形式逻辑关系的普遍了解，又可以从实用角度进行研究和解决具体问题。前者当然不可忽视，而后者同样是本书内容侧重的方面。因此，书中将主要阐述天体力学中有关轨道问题的一些重要方法，包括分析方法和数值方法，以及必要的定性分析知识。

本书是从卫星轨道及其变化规律这一角度来安排内容，全面而系统地阐明卫星

轨道运动中的基本问题，并侧重于对解决各种轨道及其变化问题所涉及的力学概念、数学原理和具体方法给以严格的论述，以便读者更好地利用书中提供的有关方法和结果，去处理轨道设计、地面测控及各有关领域应用涉及的卫星轨道力学问题。全书内容主要包含以下两个部分：

(1) 轨道动力学的基础知识。参考系的建立，无摄运动（对应二体问题）的基本规律，无摄运动与受摄运动之间的关系，受摄运动方程的基本解法（小参数幂级数解）及参考解的选择。

(2) 卫星轨道的摄动理论。全面论述卫星在各种外力因素作用下的受摄运动方程的各种具体解法和结果，摄动解蕴涵的动力学特征及几类特殊轨道的运动规律。

除上述主要内容外，考虑到读者对卫星轨道力学的理论与应用要有一个完整性的了解，对轨道力学在航天测控系统中的直接应用——卫星定轨和预报，也在本书最后一章用适当的篇幅做了概要性阐述；而有关轨道确定的基本原理、数学模型的建立及具体处理方法等，是全套专著第四本书的内容，名为“航天器定轨理论与应用”。

本书是根据作者 50 多年来在教学与科研工作中的积累而写成的，书中内容主要取自作者的几本著作，如《人造地球卫星轨道力学》、《航天器轨道理论》和《月球探测器轨道力学》，以及公开发表的近 200 篇学术论文及 30 多篇相关研究课题的技术报告。这些论著、文章和技术报告中的有关内容在国内已被普遍采（引）用，在此基础上，又进一步根据实际应用状况做了必要的修改与充实，并补充了作者未曾公开发表过的但已证实实用之有效的研究成果，使其成为一本有关环绕型探测器（特别是人造地球卫星）轨道理论的较全面而系统的著作，以适应我国航天事业进一步发展对轨道力学理论的需求。

刘 林

目 录

第 1 章 卫星运动的数学模型与参考系的选择	1
1.1 卫星在轨运动的数学模型及其求解问题	1
1.2 时空参考系	3
1.3 地球坐标系	9
1.4 月球坐标系 ^[13]	22
1.5 火星坐标系 ^[17,18]	30
参考文献	35
第 2 章 二体问题——无摄运动	37
2.1 二体问题的解——六个独立积分	37
2.2 椭圆运动的基本关系式	43
2.3 轨道根数与位置、速度矢量之间的转换关系	48
2.4 椭圆运动的微分关系式	51
2.5 椭圆运动的展开式	55
2.6 抛物线轨道和双曲线轨道	62
参考文献	65
第 3 章 受摄运动方程的建立及其基本解法	66
3.1 受摄运动的处理方法——常数变易法	66
3.2 摄动运动方程的建立	70
3.3 摄动运动方程的各种形式	76
3.4 摄动运动方程的奇点与处理方法	81
3.5 小参数幂级数解的构造——摄动法	86
参考文献	90

第 4 章 改进的摄动法——平均根数法	91
4.1 参考解的选择——平均根数的引入	92
4.2 椭圆运动中有关量的平均值	93
4.3 平均根数法 ^[1-3]	96
4.4 中心天体的扁率摄动解	100
4.5 卫星轨道半长径二阶周期摄动项的获得	110
4.6 扁率摄动解的几种形式及其等价性	113
参考文献	116
第 5 章 中心天体的非球形引力摄动	117
5.1 天体非球形引力位的一般表达形式	118
5.2 太阳系几个大行星和月球非球形引力位的特征	130
5.3 地球非球形引力带谐项的摄动解	135
5.4 地球非球形引力田谐项的摄动解	151
5.5 月球非球形引力摄动解的构造	163
5.6 金星非球形引力摄动解的构造	172
5.7 坐标系附加摄动及其相关问题	175
参考文献	192
第 6 章 小分母问题及其解决方法——拟平均根数法	195
6.1 问题的提出	195
6.2 通约奇点对应的轨道共振问题	196
6.3 拟平均根数法	200
6.4 采用拟平均根数法构造中心天体的非球形引力摄动解	203
6.5 同时消除 $e=0$ 和通约奇点的摄动法	210
6.6 同时消除 $e=0$, $i=0$ 和通约奇点的摄动法	225
参考文献	227
第 7 章 其他引力摄动	228
7.1 卫星轨道的第三体引力摄动模型	228
7.2 地球卫星轨道的第三体引力摄动解	232
7.3 其他大天体卫星轨道的第三体引力摄动简介	243

7.4	中心天体的形变摄动	245
7.5	卫星轨道运动中的后牛顿效应	251
	参考文献	258
第 8 章	非引力摄动与轨道机动问题	260
8.1	太阳辐射压摄动	260
8.2	阻尼效应——大气阻力摄动	272
8.3	表面力模型的改进问题	291
8.4	小推力助推问题与轨道机动	293
	参考文献	295
第 9 章	卫星轨道变化的特征及其应用	297
9.1	恒星周期与交点周期	297
9.2	极轨卫星	303
9.3	太阳同步卫星	306
9.4	冻结轨道的存在及其特征	310
9.5	临界倾角轨道的特征及其应用	318
9.6	中心天体同步轨道的漂移现象	320
9.7	卫星运动的轨道寿命问题	328
	参考文献	332
第 10 章	变换方法	334
10.1	哈密顿力学简介	334
10.2	正则变换	339
10.3	正则变换方法的引用	351
10.4	一般变换方法	372
	参考文献	377
第 11 章	轨道运动方程的数值解法	379
11.1	常微分方程数值解法简介	379
11.2	常用数值解法中的单步法	382
11.3	常微数值解法中的多步法	388
11.4	卫星运动方程数值解中状态量和积分步长的选择	395

11.5 卫星运动方程数值解中沿迹误差的特征及其控制	400
参考文献	404
第 12 章 卫星轨道确定问题	406
12.1 卫星轨道确定问题的提法	406
12.2 初轨确定的基本前提与定轨原理	407
12.3 精密定轨简介	420
12.4 卫星轨道预报与定轨的关系	437
参考文献	438
附录 1 天文常数	440
附录 2 常用公式	442
附录 3 几个大天体的引力场模型	449
附录 4 太阳系大天体的平均轨道计算公式	482
附录 5 IAU2000 天体定向模型	486

第 1 章 卫星运动的数学模型与参考系的选择

1.1 卫星在轨运动的数学模型及其求解问题

太阳系中各大行星和小行星的绕日运动、自然卫星绕大行星的运动，以及人造小天体环绕目标天体（地球、月球、火星等）的运动，主要外力源只有一个。其中，各大行星和小行星的运动，主要力源是太阳引力；自然卫星运动的主要力源是相应的大行星；环绕型探测器运动的主要力源则是相应的目标天体。对于上述各类运动问题，除主要力源外，其他各种外力作用相对较小，这就可以将一般 $N(N \geq 3)$ 体系统转化成受到“干扰”的二体系统，相应的数学问题称为受摄二体问题，所有的干扰源就称为摄动源。为了区别，通常将这一“受摄二体系统”中对应主要力源的天体称为“中心天体”，所要研究的问题，就是上述大、小行星、自然卫星和人造卫星（各类环绕型探测器）在相应的中心天体引力作用和若干摄动因素影响下的轨道运动问题。

人造卫星的运动包含两类完全不同的形态，一是其质心的运动，二是该卫星各个部分相对其质心的运动，后者称为姿态运动，而前者就是轨道运动。研究这两类运动问题，分别形成了相应的轨道动力学（以下简称轨道力学）和姿态动力学。本专著所要阐述的就是人造卫星的轨道力学问题，其主要内容是阐明卫星质心的运动规律，在某些问题中会涉及姿态问题，如卫星运动轨道在表面力类型的外力源作用时，会涉及其自身的姿态问题，但仅仅是引用相应的姿态运动结果，为卫星承受表面力的计算提供相应的有效截面。

以人造地球卫星的轨道运动为例，主要力源是地球的质点引力，其他各种外力源，包括地球的非质点引力、第三体（其他大天体，如日、月等）的质点引力和地球大气阻力、太阳辐射压力等非引力，相对地球质点引力而言均很小，可处理成摄动源。因此，地球卫星运动的轨道力学问题，对应的是一个受摄二体问题。对该问

题, 通常采用地心天球坐标系 $O-xyz$, 在此坐标系中, 受摄二体问题即归结为一个常微初值问题, 即

$$\begin{cases} \ddot{\vec{r}} = -\frac{\mu}{r^3} \vec{r} + \sum_{i \geq 1} \vec{F}_i(t, \vec{r}, \dot{\vec{r}}) \\ t_0: \vec{r}(t_0) = \vec{r}_0, \dot{\vec{r}}(t_0) = \dot{\vec{r}}_0 \\ \mu = G(E + m) \end{cases} \quad (1.1)$$

式 (1.2) 中的 G 是万有引力常数, E 和 m 分别为地球和卫星的质量, 式 (1.1) 中的 \vec{F}_i 是应考虑的各种摄动加速度, $\vec{r} = \vec{r}(x, y, z)$ 和 $\dot{\vec{r}} = \dot{\vec{r}}(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ 是卫星在该坐标系中的位置矢量和速度矢量。对于地球卫星而言, 其质量之小, 由于它的出现, 既不会改变地球引力场的状态, 也不会改变所在空间的任何物理状态, 相应的卫星质量可取为 $m = 0$ 。在此前提下, 式 (1.2) 变为

$$\mu = G(E + m) = GE \quad (1.3)$$

式中 GE 是地心引力常数, 其值现为 (见本书附录 1)

$$GE = 3.986\ 004\ 418 \times 10^{14} \text{ (m}^3/\text{s}^2) \quad (1.4)$$

对于一个地球低轨卫星, 如果在 300km 高的近圆轨道上运行, 地球中心引力加速度 (μ/r^2) 约为 9m/s^2 , 而自然存在的各种摄动加速度 \vec{F}_i ($i=1, 2, \dots$) 中, 最大的地球动力学扁率项相对中心引力加速度的大小为 10^{-3} , 因此, 地球低轨卫星运动方程式 (1.2) 对应的就是一个典型的受摄二体问题, 相应的卫星运动轨道是一个缓慢变化的椭圆。如果该卫星有 1T 重, 并同时存在持续的 100N 大小的机动力 (这一卫星相当于一个机动平台), 相应的机动加速度为 0.1m/s^2 , 这仍可看做一种摄动力, 其相对大小也仅达到 10^{-2} , 比月球环绕地球运动受到太阳的引力摄动 (2×10^{-2}) 还小一些。对于这样一个空间机动平台的运动, 采用受摄二体问题模型来研究它的运动规律仍然有效。

卫星运动方程式 (1.1) 是一类复杂的非线性常微分方程, 如果直接求解, 只能采用数值方法, 在一定时间段内, 它可以提供给定时刻卫星的运动状态, 即 $t: \vec{r}(t), \dot{\vec{r}}(t)$, 但它无法给出卫星运动轨道的变化规律, 而这一重要信息正是航天领域各相关工程部门必须清楚了解的细节, 也是卫星轨道力学理论研究的核心内容, 采用常微分方程的解析理论获取式 (1.1) 的分析解, 从而提供卫星轨道的变化特征及其与相应力学背景的内在联系。本书就是针对这一核心内容, 考虑到我国航天事业发展的需求, 结合我们的研究成果, 用 9 章的篇幅 (2~10 章) 分别阐述卫星轨道理论及其应用的各个细节。

1.2 时空参考系

卫星轨道运动是一个动力学问题，处理一个具体的动力学问题，首先需要选择适当的时空参考系，前面提及的地心坐标系 $O-xyz$ 必须给出确切的定义。关于该问题，本节将结合 2000 年以来国际天文学联合会（IAU）关于基本天文学的决议，介绍与卫星轨道力学有关的时空参考系的选择。

上一节所阐明的卫星轨道运动，有一个明确的中心天体，处理这一类动力学问题，在时空参考系的选择上，除时间系统外，将涉及各相应中心天体的体固坐标系和天球坐标系。对于地球卫星的运动而言，即地固坐标系和 J2000.0 地心天球坐标系。这一节主要阐述时空参考系的基本概念和时间系统，而有关地球、月球和火星等空间坐标系的选取，以及相互之间的转换关系将在后面几节中分别介绍。

1.2.1 参考系的基本定义和建立^[1-3]

参考系包括一套理论和数据处理方法；一组模型和常数；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 IERS 的天球参考架，即国际天球参考架 ICRF；确定该参考架所采用的一组模型常数，即 IERS 规范；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：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，它通过一定数量的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，因此可以自行忽略。尽管如此，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，但在航天应用中，在并不引起误解的情况下，一般就混用参考系与坐标系这两种称谓，如无需要，以后不再说明。

为描述太阳系中各天体和航天器的位置和运动，需要在空间定义这样一个坐标系，其原点在太阳系 (或地球等天体) 质心，坐标标架相对于遥远的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的运动属于该物体本身相对于太阳系 (或地心系) 质心的运动。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。其他各种实用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这样一个坐标系，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。本套专著就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。其他各种实用导出的地球坐标系都要与基本地球坐标系建立联系。其他天体 (如月球、火星等) 坐标系也采用类似的定义。

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，这在本套专著第一本书^[1]的第 3、4 章和第 5 章中都有详细介绍，本书只是从实用角度直接引用。

上述基本坐标系只是一个理想的物理定义，而依赖实体参考架实现的是全局的国际天球参考系 (ICRS) 和局部的地心天球参考系 (GCRS)，前者坐标原点在太

阳系质心，而后者是坐标原点从太阳系质心移至地球质心。还有国际地球参考系 (ITRS)，它是一种协议地球参考系 (CTRS)，即通常所说的地固参考系，目前仍符合于 WGS84 地球引力场系统。

这里特别要说明一点：考虑到参考系的延续性，ICRS 的坐标轴与 FK5 参考系在 J2000.0 历元需尽量地保持接近。ICRS 的基本平面由 VLBI 观测确定，它的极与动力学参考系的极之间的偏差大约为 20 mas，导致这个偏差的原因比较复杂。ICRS 和 FK5 参考系 (J2000.0 平赤道参考系) 的关系由三个参数决定，分别是天极的偏差 ξ_0 和 η_0 ，以及经度零点差 $d\alpha_0$ ，它们的值分别为

$$\begin{cases} \xi_0 = -16.617 \pm 0.010 \text{ mas} \\ \eta_0 = -6.819 \pm 0.010 \text{ mas} \\ d\alpha_0 = -14.6 \pm 0.5 \text{ mas} \end{cases} \quad (1.5)$$

于是 ICRS 和 J2000.0 平赤道参考系的关系可以写为

$$\vec{r}_{J2000} = B \vec{r}_{ICRS} \quad (1.6)$$

其中常数矩阵 $B = R_1(-\eta_0)R_2(\xi_0)R_3(d\alpha_0)$ 称为参考架偏差矩阵，由三个小角度旋转组成； \vec{r}_{J2000} 和 \vec{r}_{ICRS} 是同一个单位矢量在不同参考系中的表示。在目前航天领域中，上述参考架偏差甚小，通常无须考虑，因此，本书将不再区分 ICRS 和 FK5 参考系，都理解为 J2000.0 平赤道参考系。那么，基本参考系就归结为 ICRS, GCRS 和 ITRS，即国际天球参考系、地心天球参考系和地固参考系。

1.2.2 时间系统与儒略日^[1-4]

1. 质心力学时 TDB 和地球时 TT

在上述天球和地球两个参考系中，用做历表和动力学方程的时间变量基准是质心力学时 TDB (Barycentric Dynamical Time) 和地球时 TT (Terrestrial Time)，关于地球时，曾经称为地球动力学时 TDT，1991 年后改称地球时 TT。两种动力学时的差别 (TDB、TT) 是由相对论效应引起的，它们之间的转换关系由引力理论确定。对实际应用而言，2000 年 IAU 决议给出了两者之间的转换公式，即

$$\text{TDB} = \text{TT} + 0^s.001\ 657 \sin g + 0^s.000\ 022 \sin(L - L_J) \quad (1.7)$$

其中 g 是地球绕日运行轨道的平近点角， $(L - L_J)$ 是太阳平黄经与木星平黄经之差，各由下式计算，即

$$\begin{cases} g = 357^{\circ}.53 + 0^{\circ}.985\ 600\ 28 t \\ L - L_J = 246^{\circ}.00 + 0^{\circ}.902\ 517\ 92 t \end{cases} \quad (1.8)$$