普通高等教育航天类规划教材

◎郗晓宁　王威　等编著◎

近地航天器轨道基础

Fundamentals of Near-earth Spacecraft Orbit



国防科技大学出版社
NATIONAL UNIVERSITY OF DEFENSE TECHNOLOGY PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

V412.4
1

·普通高等教育航天类规划教材·

33/36

近地航天器轨道基础

Fundamentals of Near-earth Spacecraft Orbit

郗晓宁　王威　高玉东　编著

中国科学技术大学 图书馆藏

国防科技大学出版社
·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

近地航天器轨道基础/郗晓宁,王威,高玉东编著.—长沙:国防科技大学出版社,2003.4

ISBN 7-81024-933-9

Ⅰ.近… Ⅱ.①郗…②王…③高… Ⅲ.航天器轨道-基本知识
Ⅳ.V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 024440 号

国防科技大学出版社出版发行
电话:(0731)4572640 邮政编码:410073
E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn
责任编辑:徐 飞 责任校对:唐卫葳
新华书店总店北京发行所经销
国防科技大学印刷厂印装
*
开本:787×960 1/16 印张:23.5 字数:447 千
2003 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-3000 册
*
定价:35.00 元

前　言

在地球的大气层外和引力影响球范围内，基本按照天体力学规律运行的飞行器称为近地航天器，如人造卫星、飞船、月球探测器等。航天器轨道基础是从事航天器设计、测控和应用人员必须具备的知识。近几年航天技术飞速发展，特别是出现飞船、小卫星和空间探测等新的研究热潮。本书就是为了适应这种需要而编写的，并被原航天工业总公司列入普通高等教育航天类规划教材。

本书为近地航天器轨道基础知识的教材。主要内容包括三个部分：(1)第二章至第五章为与近地航天器轨道有关的坐标系统和时间系统；(2)第六章至第八章为航天器轨道力学的基础知识，如二体问题及其轨道摄动；(3)第九章至第十二章为近地航天器(如卫星、星座和月球探测器)轨道的初步设计，还论述了航天器的相对运动与轨道机动的问题。

STK(Satellite Tool Kit)是航天领域先进的卫星系统分析软件，现事实上已成为航天界商用标准软件之一。本教材结合该软件的应用(便于利用该软件进行计算机辅助教学)，这是本教材力图体现的一个特色。本书的部分内容是作者近几年科研成果的反映，包括一些实际应用的例子，这是本书力图体现的另一特色。在本书编写期间，书稿内容曾在国防科技大学多次讲授，教学实践(特别是计算机辅助教学)的经验在书稿修改过程中得到体现。

目录中注有“*”号的部分是建议作为选讲的内容。在学时少或要求不高的情况下，建议简单介绍这些内容，这些内容不会影响理论体系的完整性和内容的连贯性。

本书第一章、第九章、第十章和附录由郗晓宁编写，第二章至第五章由王威编写，第六章至第八章由王威、郗晓宁编写，第十一章由郗晓宁、高玉东编写，第十二章由王威、高玉东编写；郗晓宁拟定编写提纲并审定全书内容。

本书第九章和第十章中吸取了任萱教授的《人造地球卫星轨道力学》一书的部分内容；国防科技大学航天与材料工程学院各级领导和黄圳圭教授、陈克俊教授及机电工程与自动化学院胡小平院长为本书的出版给予了大力支持；另外，多届同学提出过许多宝贵意见。作者在此一并深表感谢！

由于水平有限，书中不妥之处恳请批评指正。

编著者

2002 年 12 月

目　录

前　言
第一章　绪　论
1.1　空间的优势和应用 …… (1)
1.2　空间任务简介 …… (3)
1.3　空间探索先驱 …… (5)
1.4　航天器轨道运动简介 …… (9)
第二章　地球坐标系
2.1　地球自转和天体周日视运动 …… (11)
2.2　天文坐标系 …… (12)
2.3　大地坐标系 …… (13)
2.4　地心坐标系 …… (17)
习　题 …… (19)
第三章　天球坐标系
3.1　天　球 …… (20)
3.2　球面三角初步 …… (21)
3.2.1　球面的基本性质 …… (21)
3.2.2　球面三角形 …… (23)
3.2.3　球面坐标与直角坐标 …… (24)
3.2.4　球面三角形的基本公式 …… (25)
3.3　天球上基本的点和圈 …… (26)
3.4　天球坐标系 …… (29)
3.4.1　地平坐标系 …… (29)
3.4.2　时角坐标系 …… (30)
3.4.3　赤道坐标系 …… (31)
3.4.4　黄道坐标系 …… (32)
3.5　天球坐标系之间的转换 …… (33)
3.5.1　地平坐标系和时角坐标系之间的转换 …… (33)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

3.5.2 赤道坐标系和时角坐标系之间的转换 …… (35)
3.5.3 黄道坐标系和赤道坐标系之间的转换 …… (35)
3.5.4 例 题 …… (36)
习 题 …… (39)
第四章 时间系统
4.1 世界时系统 …… (40)
4.1.1 恒星时 …… (41)
4.1.2 真太阳时和平太阳时 …… (42)
4.1.3 地方时、世界时和区时 …… (45)
4.1.4 平时与恒星时之间的转换 …… (47)
4.1.5 世界时的修正 …… (50)
4.2 历书时系统 …… (51)
4.3 原子时 …… (52)
4.4 力学时 …… (53)
4.5 贝塞尔年和儒略年 …… (53)
习 题 …… (57)
第五章 岁差、章动和极移
5.1 日、月和行星的引力对地球运动的影响* …… (58)
5.1.1 太阳的引力对地球运动的影响 …… (58)
5.1.2 月球的引力对地球运动的影响 …… (60)
5.2 岁 差* …… (61)
5.3 章 动* …… (63)
5.4 岁差、章动对恒星时的影响* …… (64)
5.5 协议天球坐标系 …… (67)
5.6 极 移 …… (69)
5.7 协议地球坐标系 …… (71)
习 题 …… (74)
第六章 *N* 体问题与引力场
6.1 *N* 体问题及其十个初积分 …… (75)
6.1.1 *N* 体问题运动方程 …… (75)
6.1.2 *N* 体问题的十个初积分 …… (76)
6.2 引力位函数* …… (78)
习 题 …… (85)

第七章　二体问题
7.1　二体问题运动方程及其解 …… (87)
7.1.1　运动方程 …… (87)
7.1.2　面积积分 …… (88)
7.1.3　轨道积分 …… (91)
7.1.4　活力积分 …… (94)
7.1.5　过近拱点时间的积分 …… (97)
7.1.6　轨道根数 …… (105)
7.2　轨道根数与位置矢量、速度矢量的关系 …… (106)
7.2.1　由位置矢量和速度矢量计算轨道根数 …… (106)
7.2.2　由轨道根数计算位置矢量和速度矢量 …… (108)
7.3　两个时刻的位置矢量和速度矢量的关系 * …… (110)
7.4　f 和 g 级数 * …… (112)
7.5　球坐标表示的运动状态参数 …… (114)
习　题 …… (121)
第八章　轨道摄动
8.1　Cowell 法和 Encke 法 …… (124)
8.2　一般摄动法 …… (127)
8.3　地球非球形摄动 …… (135)
8.3.1　地球扁率摄动运动方程 …… (135)
8.3.2　地球扁率对轨道根数 Ω 和 ω 的影响 …… (137)
8.4　大气阻力摄动 …… (139)
8.5　太阳光压摄动 …… (143)
8.6　第三体引力摄动 …… (146)
8.6.1　第三体引力摄动方程 …… (146)
8.6.2　日月引力摄动的影响 …… (147)
8.6.3　影响球 * …… (149)
习　题 …… (152)
第九章　人造地球卫星轨道设计
9.1　星下点轨迹 …… (153)
9.1.1　不考虑地球旋转时的星下点轨迹 …… (154)
9.1.2　考虑地球旋转时的星下点轨迹 …… (155)
9.1.3　考虑摄动影响时的星下点轨迹 …… (163)

9.2 地面覆盖 …… (164)
9.2.1 覆 盖 …… (164)
9.2.2 不考虑地球旋转时的覆盖带 …… (166)
9.2.3 考虑地球旋转时的覆盖带 …… (169)
9.2.4 星载测量设备的视角 …… (170)
9.3 卫星星座 …… (172)
9.3.1 星座设计的基本因素与准则 …… (173)
9.3.2 卫星环 …… (174)
9.3.3 星座的基本构形 …… (177)
9.4 星下点光照 …… (182)
9.4.1 星下点的阳光入射角 …… (183)
9.4.2 星下点光照弧段 …… (184)
9.5 卫星受晒 …… (186)
9.5.1 轨道面与阳光方向的夹角 …… (187)
9.5.2 圆轨道受晒因子 …… (188)
习 题 …… (190)
第十章 轨道机动
10.1 轨道调整 …… (193)
10.1.1 周期的调整 …… (193)
10.1.2 长半轴和偏心率的调整 …… (196)
10.1.3 升交点赤经与倾角的调整 …… (201)
10.2 轨道改变 …… (202)
10.2.1 共面轨道改变 …… (203)
10.2.2 轨道面改变 …… (206)
10.2.3 非共面轨道改变的一般情况 …… (209)
10.3 轨道转移 …… (212)
10.3.1 两次冲量的最优转移——Hohmann 转移 …… (212)
10.3.2 双椭圆转移 …… (215)
10.3.3 共面椭圆轨道之间的转移 …… (218)
10.3.4 不同半径的非共面圆轨道之间的转移 …… (220)
10.4 轨道拦截 * …… (220)
10.4.1 通过两已知点的轨道簇 …… (221)
10.4.2 最小能量拦截轨道 …… (222)
10.4.3 固定时间拦截轨道 …… (228)

10.5 星座轨道控制 …… (238)
10.5.1 星座的定位 …… (238)
10.5.2 星座的站位保持 …… (240)
10.5.3 卫星的离轨 …… (241)
习 题 …… (242)
第十一章 航天器的相对运动 *
11.1 相对运动动力学方程的建立 …… (244)
11.2 相对运动动力学方程的求解 …… (248)
11.3 基于 Hill 方程的编队星座设计 …… (252)
11.3.1 初始条件与轨道根数的关系 …… (252)
11.3.2 常用编队星座轨道设计 …… (253)
11.4 基于运动学的相对运动方程 …… (264)
11.4.1 相对运动方程的建立 …… (264)
11.4.2 航天器长期近距离相对运动 …… (265)
习 题 …… (269)
第十二章 月球探测及其轨道设计 *
12.1 月球概况 …… (270)
12.1.1 月球的一般特征 …… (270)
12.1.2 月球的运动 …… (271)
12.1.3 与月球有关的坐标系 …… (276)
12.2 月球探测概况 …… (279)
12.2.1 月球探测器飞行方式和轨道类型 …… (279)
12.2.2 月球探测器轨道设计简介 …… (280)
12.3 二体假设下的月球探测器轨道 …… (284)
12.3.1 地月转移轨道平面内的参数 …… (284)
12.3.2 地球停泊轨道、地月转移轨道与白道的非共面问题 … (288)
12.4 双二体假设下的月球探测器轨道 …… (292)
12.4.1 月球探测器轨道参数 …… (292)
12.4.2 入口点位置的影响 …… (304)
12.5 窗口选择及其与轨道约束的关系 …… (309)
12.5.1 光照约束的影响 …… (310)
12.5.2 测控约束的影响 …… (312)
12.6 轨道初步设计流程 …… (315)
习 题 …… (318)

附 录

附录 A 旋转矩阵及反向矩阵 …… (319)
附录 B 球面三角的一些基本公式 …… (324)
附录 C 天文常数 …… (336)
附录 D 日月位置的近似计算 …… (338)
附录 E 引力加速度的计算公式 …… (342)
附录 F 地图投影简介 …… (345)
附录 G 术语英汉对照表 …… (349)
附录 H 卫星工具软件 STK 简介 …… (353)
参考文献 …… (359)

第一章 绪 论

1957年10月，世界上第一颗人造地球卫星发射升空，开辟了人类进入空间的新纪元。人类的活动区域从此便由陆地、海洋和大气层空间迈向了外层空间，并实现了对月球的近旁飞越、环绕乃至登月的壮举，取得了对近地空间的探索、开发和利用等划时代的成果。空间技术(也称航天技术)的发展给人类社会的进步和文明带来了巨大的影响，使社会生活、国民经济、国防建设等各个领域发生了深刻的变革。

1.1 空间的优势和应用

1. 空间的优势

空间技术使人类摆脱了地球的束缚，从而可以在地球以外的空间认识和改造自然界，体现出巨大的优势。

(1)全球观测

站得越高，看得越远。因此数千年以来，君王和统治者都在最高的山峰设置瞭望塔，以便更广泛地监视他们的领土，防范入侵者。为占领这样的高地，历史上曾爆发过数次战役。从空间进行观测范围可以更大，如图1.1所示。利用空间航天器可以大范围地观测地球，预报天气，监视环境，同时可以覆盖分布很广的地面点并进行相互通信。

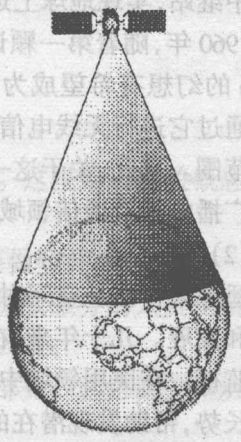


图1.1 全球观测

(2)宇宙观测

在夜晚观察星空的时候，会看到星星的闪烁。这是因为“星光”穿过大气层时产生折射以及其部分光线被吸收共同产生的影响。这种影响增加了全光谱天文观测难度。但如果在大气层之外的空间设置空间天文观测站，则可以避开

需要全本请访问 www.ertongbook.com

大气的影响,获得更加清晰的图像。

基于空间技术诞生的空间天文学打开了一扇通向宇宙观测全新的大门,“哈勃”(Hubble)空间望远镜和“伽玛”(Gamma)射线观测仪上安装的观测设备所能达到的观测范围远远超出人类感官能力,使人类对宇宙的了解发生了革命性变化。

(3)独特的环境

空间技术使人类得以利用空间的独特环境,进行全新的科学技术实验。微重力、高真空、超纯净、强辐射、无对流、显著温差和相对地球的高远位置等特点,有可能使工程技术、生物技术、农业技术、医药技术、能源技术等取得新的突破,创造出在地球表面难以获得的成果。

例如要形成某种新的合金材料,必须将两种或者多种金属按照一定的比例融合在一起。但是,重力使较重的金属沉到底部,因此很难获得均匀的混合物,使制造过程变得非常困难。如果在空间建造一座在轨工厂,利用空间的微重力环境可生产新的合金材料;另外,当一些人还在为地球资源危机问题争论不休时,许多的科学家已经在讨论开发空间资源问题,如开发月球的丰富资源。实际上对空间资源的获取是人类探索空间的重大推动力。

2. 空间应用

以下介绍对人们日常生活产生重大影响的一些重要的近地航天器的应用。

(1)通信卫星

科幻小说作家 C. Clarke 第一次提出将周期为 24 小时的卫星发射到赤道上空 36 000 km 高度的轨道上,在这种情况下卫星运行的角速度大小恰好和地球旋转角速度相等,因此卫星相对地面静止。这些地球静止轨道卫星可以作为通信网络中继站,实现地球上远距离的通信。

1960 年,随着第一颗试验通信卫星 Echo I(回声 1 号)发射入轨,人们看到 Clarke 的幻想有希望成为现实。虽然在空间 Echo I 显得是那么的小,但是仍然可以通过它进行无线电信号转发,这无疑证明了空间完全可以用来拓宽人类通信的范围。从此,关于这一设想的技术探索迅速地发展起来。现在卫星已广泛用于广播电视及通信领域,卫星通信技术实现了信息传输技术的质的飞越。

(2)遥感任务

遥感通常指从空间对地观测。利用卫星进行对地观测,促进了遥感科学的形成和发展。几十年来,在军事领域中,“间谍卫星”使用遥感技术对有敌意国家进行监视。在民用领域中,遥感技术也有广泛应用,例如:通过卫星可以观测庄稼的长势,帮助发现潜在的病虫害。遥感技术还是目前天气预报应用的一项不可缺少的技术。

(3)天基导航

古代航海家通过观察恒星进行导航,而现代航海家利用在轨运行的卫星就能方便地完成导航任务。

例如美国军方研制的由24颗卫星组成的全球定位系统GPS(Global Positioning System)具有全球、全天候、高精度和实时的三维定位、定速、定姿和授时的能力,显示出它在导航中的优越性,以致有人称它为导航技术的新突破。GPS系统的导航应用如图1.2所示。

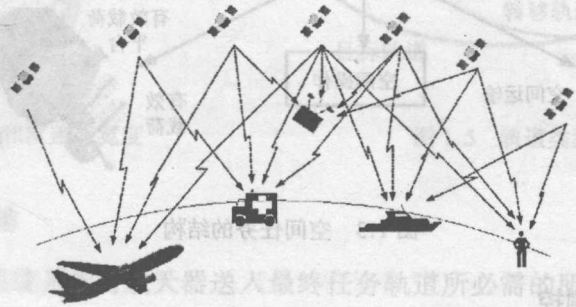


图1.2 GPS的导航应用

(4)空间探索

对未知空间的探索,极大地拓宽了人类认识的范围,使人类对天气、地球乃至宇宙有了全新的认识。

例如前苏联于1959年10月4日发射的"月球3号"探测器,飞至月球北部上空6 200km处拍摄了月球背面的照片,从此人类揭开了月球背面的神秘面纱。

1.2 空间任务简介

空间任务形式复杂,种类广泛,但也有许多相似性。这里给出有关概念的定义:

1)任务目标——为什么进入空间,一旦进入空间要做些什么?

2)用户——使用卫星(可能是多颗卫星)提供的数据或服务的人员及系统;

3)操作人员——从地面上管理和操作空间任务的人员;

4)任务操作——使用户、操作人员、地面和空间各部分一起协调工作从而顺利完成任务。

将以上概念组合在一起,形成所谓的空间任务结构,其组成元素的描述如图

1.3 所示。

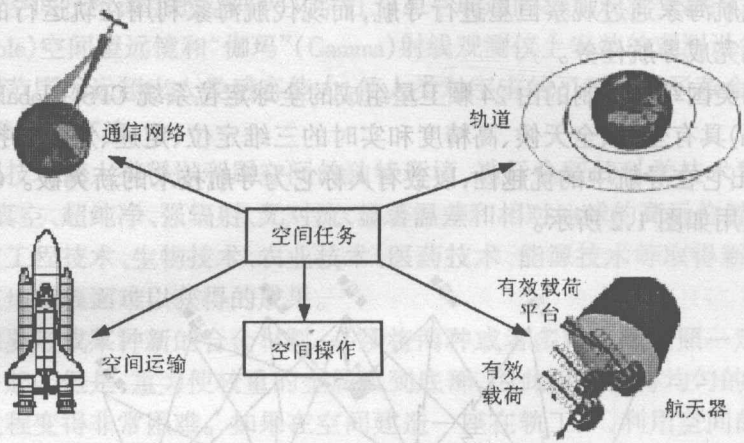


图 1.3 空间任务的结构

1. 航天器测控

航天器测控是指对航天器飞行状态进行跟踪测量并控制其运动和工作状态。航天器测控由控制中心和分布在世界范围内的跟踪站完成。

2. 航天器的平台和载荷

航天器有两个基本的部分:平台与有效载荷。有效载荷包括航天器搭载的用于执行基本任务的人员和仪器。搭载有效载荷的平台用于给有效载荷提供定向、冷热环境和电能等。

3. 轨道

轨道是具有重复性的一类特殊轨迹。

轨道的高度影响航天器对地观测的范围。地球上可以被航天器所载观测设备“看见”的总区域称为可视区(也称为视场,Field of View,简写为 FOV)。当卫星沿轨道在地球上空飞行时,可视区在地球表面形成了覆盖带。覆盖带的两个相关参数在图 1.4 中列出。轨道高度和观测设备的视场角确定了覆盖带宽度。

通常,在一种空间任务中可以有多种不同类型的轨道,包括停泊轨道、转移轨道和最终任务轨道,图 1.5 中对此进行了举例说明。航天器一般从一个临时的停泊轨道出发,然后利用火箭将其推进到转移轨道,之后再进行一次推进将它送入最终任务轨道(也称为目标轨道)。

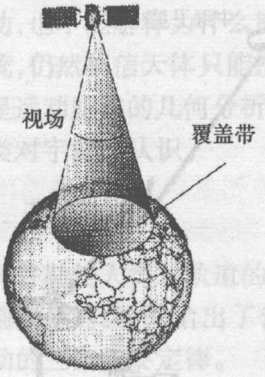


图 1.4 视场和覆盖带宽度



图 1.5 轨道类型

4. 空间运输

空间运输系统是指将航天器送入最终任务轨道所必需的所有系统。通常，空间运输系统包含助推火箭、上面级火箭和用于轨道机动与位置保持的星载推力器。

5. 通信网络

空间任务的完成不仅涉及到火箭和卫星，还包括用来跟踪、命令和控制的地基和天基系统。通信网络将平台、有效载荷、操作人员和用户有机地连接在一起，如图 1.6 所示。

通信网络将空间部分、地面控制站和用户连成一种复杂的网络，在不同的任务之间传递数据。

1.3 空间探索先驱

在火箭和空间探测器飞出地球大气层之前，人类只是利用肉眼和想像认识空间。后来，在望远镜和其他仪器的帮助下人类继续为探索太空而奋斗，从而使人类更加了解自己在宇宙中的居所——地球。

几千年前，古埃及和巴比伦的牧师通过仔细观察天象的变化来安排宗教节日，掌握各种庄稼的种植和收割，并对空间（他们心中神灵所居住的疆域）有了一定的了解。后来亚里士多德（Aristotle，公元前 384—前 322）和托勒密（Ptolemy，公

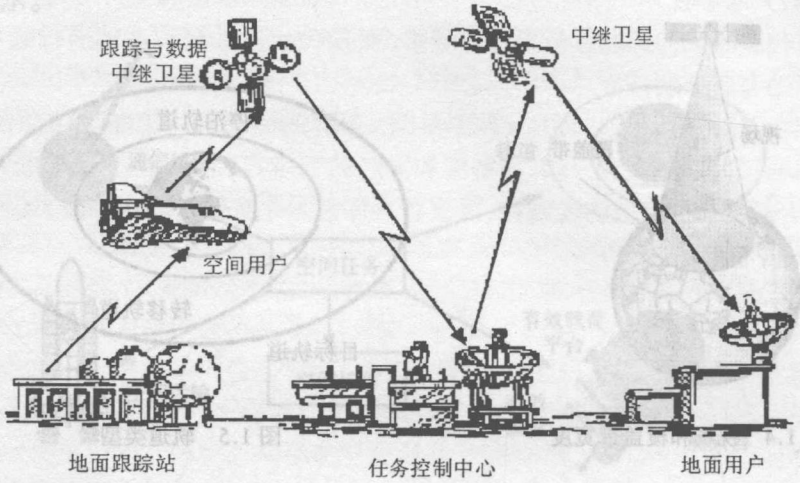


图 1.6 通信网络

元 90—168)等哲学家以地球为宇宙中心,建立了复杂的理论解释和预测太阳、月球、行星和恒星的运动。尽管在 16 世纪前期,哥白尼(Nicolaus Copernicus,1473—1543)和开普勒(Johannes Kepler,1571—1630)等自然哲学家综合了古代的传统理论和新观察结果,并进行了深入分析,形成了相反的理论。但直到 17 世纪,亚里士多德和托勒密的理论在天文学和人类对空间的认识中仍占据统治地位。18 世纪和 19 世纪的天文学家利用哥白尼和开普勒的宇宙模型和牛顿(Isaac Newton,1642—1727)的新物理理论,做出了惊人的发现,包括两颗新的行星——海王星和冥王星。下文简要地介绍一下这些空间探索先驱对人类认识空间和轨道所作的主要贡献。

1. 哥白尼

哥白尼创建了以太阳为宇宙中心的日心说。他将太阳置于太阳系的中心,认为所有的行星都在圆轨道上绕太阳运行。地球是其中一颗行星,它每天绕自转轴旋转一周,同时每年绕太阳转动一周。

哥白尼的日心说详尽地解释了地球上观察到的其他行星运动偶尔出现的逆行现象。托勒密是借助复杂的圆周运动的叠加来解释行星运动的这种逆行,而哥白尼则认为是由于地球超过了行星以及被行星超过造成了这种逆行运动。此外,哥白尼认为正是因为地球围绕太阳转动,在地球上将会看到相距较近的行星位置的移动比相距较远的行星更明显。因为当时不具备观测条件,无法看到这种移动,因此这种观点遭到广泛的怀疑,并且因为哥白尼日心说的观点与当时的

宗教观点相悖,因而遭到排斥。虽然哥白尼的日心说有缺陷,它并不能解释地球的运动,也不能解释为什么地球围绕太阳转动的同时还自转。他同样遵从古希腊传统,仍然相信天体只能按照所谓完美的轨道——圆轨道运动,因此他为了解释行星运动所作的几何分析还是较复杂的,并含有错误。但哥白尼的观点扩展了人类对宇宙的认识。

2. 开普勒

开普勒使人类对轨道的认识发生了根本性的变化。他计算出火星的轨道并不是圆而是椭圆,并给出了他发现的关于轨道运动的三条重要定律。

(1) Kepler 第一定律——行星绕太阳运行的轨道是椭圆,太阳就在椭圆的一个焦点上。

(2) Kepler 第二定律——行星与太阳的连线在相等的时间内扫过的面积是相等的。

(3) Kepler 第三定律——行星轨道周期的平方与轨道长半轴的立方成正比。

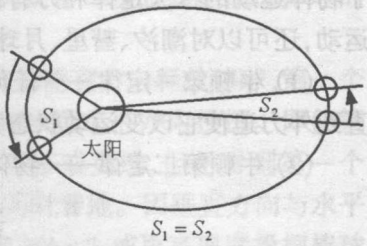


图 1.7 Kepler 第二定律

3. 伽利略

在 1609 年,数学家伽利略(Galileo Galilei,1564—1642)发明了望远镜,从而开创了空间探索的新时代。他利用望远镜对月球、行星和恒星进行观测,获得了惊人的发现,为哥白尼的学说找到了确凿的证据。伽利略通过望远镜观测行星,发现木星有四个卫星围绕其运动(或者称作木星的月球),从而证明了至少有一些星体不围绕地球旋转。此外,他还发现用地心说理论不能解释金星发生的像月球一样有规律地相位变化。

伽利略还在比萨斜塔做了落体实验。通过实验伽利略发现了与亚里士多德不同的结论,证明了所有物体不管它们重量如何都以相同的速度下落。

伽利略关于为什么物体一旦运动后会保持运动的状态的解释与亚里士多德发生抵触。按照亚里士多德的看法,运动需要一个持续的推动力,如果没有一个永恒的推力,地球不会一直运动。伽利略指出:物体一旦运动起来便沿着一定的方向、以一定的速度永远运动不息;要使这物体的运动状态改变,就必须对它施加外力。虽然他从未用过"惯性"这个名词,但他的观点说明了物体的运动具有惯性。

需要全本请访问 www.ertongbook.com