



天体测量和 天体力学基础

李广宇 著



科学出版社

天体测量和天体力学基础

李广宇 著

澳门基金会，
中国科学院行星科学重点实验室，
国家自然科学基金
(批准号 10933004,11178006)，
紫金山天文台小行星基金会
资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书分上、下两篇及附录。上篇阐明《IERS 2010 规范》时空基准变换的原理和方法；下篇讲述天体力学二体问题、三体问题、普遍摄动和特殊摄动的原理和方法，同时扼要讲述人造卫星轨道、航天动力学和地球动力学的基础理论；最后以附录形式给出常用天文物理数据、必要的向量矩阵数学工具、有关的程序设计知识，以及练习题的提示或解答。全书既相对独立，又密切联系，相互呼应；内容全面而又突出重点，论证严谨，行文流畅。天体测量部分以国际上最新最权威的《IERS 规范 2010》为标准讲授，结合当今学科前沿，所给公式、算法及程序都能直接用于研究工作，十分符合当前学术界和工程界的需求。

本书的基本素材来自作者在中国科学院紫金山天文台从事自然科学基金重点课题和国家高技术研究发展计划(863 计划)重点课题时的积累，大部分内容在紫金山天文台、澳门科技大学太空科学研究所、中国科学技术大学王绶琯天文英才班讲授过，天体测量部分被南京大学天文系用作“参考系变换”课程的教材。

本书可供天文学、航天科学、航海导航、地球物理、大地测量等学科及其他相关领域的科研和教学工作者，相关专业本科生和研究生，具有微积分和普通物理力学部分基础的天文、物理、程序设计爱好者及其他有兴趣人士使用。作为本科生教材时可安排 70~80 学时讲授。

有关数据文件、源程序及课件可从科学出版社网站 <http://www.sciencep.com> 免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

天体测量和天体力学基础/李广宇著. —北京:科学出版社,2015.4

ISBN 978-7-03-043409-8

I. ①天… II. ①李… III. ①天体测量②天体力学 IV. ①P12②P13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 033363 号

责任编辑:王 刚 昌 盛 / 责任校对:张凤琴

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 4 月第一次印刷 印张:23 1/4

字数:551 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

天文学是研究天体及其运动的学科. 天体不仅包括太阳、月球、恒星、星系等自然天体, 也包括卫星、飞船等人造天体. 近代天文学研究的内容包括上述各类对象的物理变化、运动规律、化学组成、内部结构和起源演化等. 天文学是一门既古老、又时新且充满活力的学科, 它与其他学科有着千丝万缕的联系, 也与人类的生活生产密不可分, 在人类文明进步的征程中发挥着独特的作用. 天体测量和天体力学是天文学最古老的两个分支, 前者测量天体的位置及其变化的规律, 后者阐述这些变化的机理. 这两个分支与社会生活生产的关系尤为密切. 我国已经和正在实行的一系列空间任务, 包括人造卫星工程、北斗导航工程、载人航天、嫦娥工程以及即将开展的深空探测, 无不以这两个分支学科作为重要基础. 因此, 学术界和工程界急需一本内容深入浅出、新颖翔实, 既结合工程应用, 又符合当前天文教育和研究需求的天体测量和天体力学教材.

李广宇先生在这两个学科领域造诣很深, 他曾参与并完成过包括中国空间技术研究院 863 计划项目在内的很多工程项目, 既有深厚的理论基础, 又有丰富的实践经验, 深得同行赞许, 获得过中国天文学会成立 90 周年天文学突出贡献奖等奖项. 当他从紫金山天文台退休后, 澳门科技大学太空科学研究所把他作为专才引进, 担任特聘教授; 他还担任了中国科学技术大学王绶琯天文英才班“天体测量和天体力学基础”课程的讲授老师, 编写了教材和课件, 在这两地任教时颇受学生欢迎. 他编写的教材, 内容全面而又突出重点, 紧密结合科研工作需要, 论证严谨, 行文流畅, 取材结合当今学科前沿, 特别是天体测量部分以国际上最新最权威的《IERS 规范 2010》为标准, 十分符合当前学术界和工程界的需求. 因此, 我建议他将教材充实修改后交付出版, 并帮助他申请了澳门基金会对出版的资助. 李广宇先生又花了一年多时间对教材进一步修改完善, 现在这个版本比我早先看到的又有了提高, 特别是全书以天体测量、天体力学和附录分篇, 既相对独立, 又密切联系, 相互呼应, 成为该书一大特色.

当此书即将由科学出版社付梓之际, 作为长期从事天文教育和研究的一位老人, 我愿向学术界和工程界推荐李广宇先生的大作, 希望该书的出版能对学科发展有所裨益. 是为序.

许教教

2014 年 3 月 5 日于澳门

目 录

序

上篇 天体测量入门

第 1 章 引言	3
1.1 视运动 真运动	3
1.2 天体测量观测的精度	10
1.3 国际地球自转和参考系服务机构	12
第 2 章 时标	14
2.1 时空度规与坐标时	14
2.2 质心力学时、地球时和原子时	15
2.3 世界时	17
2.4 天球中间赤道	18
2.5 儒略日期	20
第 3 章 行星月球历表	24
3.1 Chebyshev 多项式逼近	25
3.2 历表文件的结构	27
第 4 章 天球参考系和 CIO 变换	30
4.1 国际天球参考系	30
4.2 中间极和中间赤道在 GCRS 中的运动	31
4.3 CIO 变换	33
4.4 用直角坐标表示变换矩阵	34
第 5 章 地球参考系 地球-天球参考系变换	38
5.1 国际地球参考系和参考框架	38
5.2 地球的轴和极 极移	39
5.3 ITRS-TIRS 变换、极移矩阵和 ITRS-GCRS 变换	44
5.4 地球自转角和地球指向参数	45
5.5 地球时与世界时之差	48
5.6 观测站的坐标	49
第 6 章 经典岁差章动变换	54
6.1 历元偏置变换	54
6.2 岁差变换	55
6.3 章动变换	57
6.4 零点差 Greenwich 恒星时	58
第 7 章 天体视位置的计算	62
7.1 视差	62
7.2 光行差	64

7.3 天体测量变换链	65
7.4 精密星历表	67
上篇索引	69

下篇 天体力学基础

下篇 天体力学基础	75
第 8 章 天体力学发展简述	77
第 9 章 匀速圆周运动	83
9.1 向心加速度和向心力	83
9.2 Kepler 第三定律	84
9.3 卫星周期对高度的依赖关系	86
9.4 能量 引力势	88
9.5 球对称天体的引力势	91
第 10 章 二体问题的积分	93
10.1 运动方程 动量积分	93
10.2 二体相对运动 质心参考系和约化质量	94
10.3 动量矩积分	95
10.4 能量积分	97
第 11 章 二体问题的轨道	98
11.1 Laplace 向量	98
11.2 极坐标系内的轨道方程	98
11.3 直角坐标系内的轨道方程	99
11.4 椭圆轨道	100
11.5 抛物线轨道	102
11.6 双曲线轨道	103
11.7 活力公式	104
第 12 章 Kepler 方程	108
12.1 偏近点角	108
12.2 Kepler 方程	110
12.3 Kepler 方程的数值解法	112
12.4 双曲线和抛物线轨道的 Kepler 方程	114
12.5 Lambert 定理	121
12.6 正规化变换	123
第 13 章 轨道根数和状态向量	126
13.1 轨道的空间方位	126
13.2 由状态向量计算轨道根数	128
13.3 状态传递	130
第 14 章 航天器轨道机动和行星际探测	132
14.1 轨道机动	132
14.2 转移至圆轨道	134
14.3 由地球轨道逃逸	135

14.4	近圆轨道间转移	137
14.5	行星际探测	141
第 15 章	级数展开及其应用	149
15.1	Lagrange 系数展开为幂级数	149
15.2	偏近点角展开为平近点角的正弦级数	151
15.3	真近点角展开为平近点角的正弦级数 中心差	152
15.4	太阳沿黄道的视运动	153
15.5	太阳沿赤道方向的视运动	155
15.6	低精度行星历表	157
第 16 章	普遍摄动理论	160
16.1	摄动理论的基本原理	160
16.2	摄动问题的解法	163
16.3	水星近日点的进动	166
16.4	广义相对论效应	169
16.5	常数变易法	171
第 17 章	地球引力势和潮汐势	176
17.1	地球引力势	176
17.2	引力势展开为球谐函数	177
17.3	重力和大地水准面	179
17.4	地球引力势模型	180
17.5	潮汐势	182
第 18 章	人造地球卫星的运动	185
18.1	摄动方程及其解	185
18.2	影响卫星轨道的摄动因素	189
第 19 章	地球动力学初步	191
19.1	角速度 角动量和惯性矩	191
19.2	摄动力矩	193
19.3	Euler 动力学方程和 Poinsot 定理	194
19.4	极移和极移方程	196
第 20 章	岁差和章动	199
20.1	月球和太阳的摄动力矩	199
20.2	中间极运动方程	201
20.3	平极的进动	202
20.4	章动	204
第 21 章	三体问题初步	209
21.1	三体问题	209
21.2	平面圆型限制性三体问题	210
21.3	可积性与混沌	220
21.4	太阳系的稳定性	223
第 22 章	特殊摄动方法	226
22.1	运动方程的数值积分	226

22.2 历表的生成·····	229
第 23 章 初轨计算与微分改进 ·····	234
23.1 几何约束·····	234
23.2 动力学约束·····	235
23.3 经典定轨方法·····	236
23.4 张家祥方法·····	240
23.5 轨道的微分改进·····	241
第 24 章 太阳系天体碰撞的概率 ·····	244
24.1 碰撞概率和碰撞频率·····	244
24.2 交会轨道的性质·····	246
24.3 轨道交会的概率·····	248
24.4 天体碰撞的频率·····	251
主要参考文献·····	255
下篇索引 ·····	256

附 录

附录 1 物理和天文常数 ·····	263
附录 2 矩阵、向量和坐标变换摘要 ·····	264
2.1 矩阵·····	264
2.2 向量·····	265
2.3 极坐标和球坐标·····	269
2.4 三重积和并矢·····	270
2.5 向量的微分·····	272
2.6 相对导数和绝对导数·····	273
2.7 势函数·····	274
2.8 平面直角坐标系的旋转·····	275
2.9 空间直角坐标系的旋转·····	276
2.10 线性矛盾方程组的最小二乘解·····	280
附录 3 程序设计概要 ·····	286
3.1 儒略日换算·····	286
3.2 矩阵向量运算·····	290
3.3 行星月球历表的读出·····	299
3.4 时空参考系变换·····	305
3.5 轨道计算·····	310
3.6 特殊摄动方法·····	318
3.7 初轨计算和微分改进·····	323
附录 4 练习提示或解答 ·····	327
天体测量篇·····	327
天体力学篇·····	333
主要参考文献 ·····	360
跋 ·····	362

上篇
天体测量入门

第 1 章 引 言

本章介绍学习天体测量课程所需的背景知识. 1.1 节从直观出发介绍天体的视运动和真运动, 1.2 节介绍天体测量的精度, 1.3 节介绍国际地球自转和参考系服务机构.

1.1 视运动 真运动

围绕我们的星空, 美丽如五彩缤纷的画卷, 深奥如卷帙浩繁的百科全书. 岁月流逝, 沧桑变迁, 它却永远那样富有魅力, 令人神往. 直观看去, 天空如同一顶硕大无朋的旋转的球形帐幕, 恒星像是镶嵌其上的粒粒钻石, 地平面把帐幕平分为上下两半, 我们则站在它的中心, 这就是天球(图 1.1). 天体在天球上的位置和移动是使用弧和对应的角度来测量的.

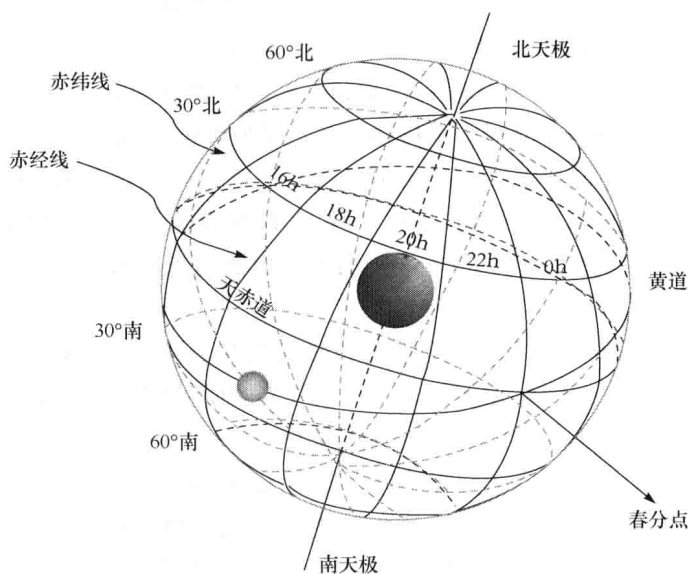


图 1.1 天球

观测天体, 直接看到的就是它们的**视运动**. 天球带着日月星辰由东向西旋转, 每昼夜转过一周, 这叫做**周日运动**. 地球上只有北天极和南天极两点不参与周日运动. 如果把照相机对着北天极长时间曝光, 就会拍摄下一串同心圆图像, 这就是北天恒星周日运动的轨迹(图 1.2). 最里面半径 $44'$ 的小圈是北极星留下的. 天球周日旋转的转轴就是连接北天极和南天极的直线, 叫做**天轴**. 垂直于天轴、在南北天极之间平分天球为南北两半球的大圆叫做**天赤道**, 它与地平面相交于正东与正西两点.

太阳和月亮在星空背景上不断移动着位置. 月亮的移动显而易见, 每昼夜达 13° 之大; 太



图 1.2 北天恒星的周日运动

左上的直线轨迹和右侧北天极附近的

弧线轨迹分别为流星和飞机所留. 云南天文台吴光节研究员摄

阳的移动则需要间接推知,因为它本身的光芒完全掩蔽了背景星空. 逐日记录太阳和某一颗恒星沉没到西方地平线之下的时刻,我们便会发现,某日在太阳之后 2 h 落下的恒星,第二天便会提前到 1 h 56 min 之后落下,如此逐日提前约 4 min. 由此推知,一个月后太阳将会与这颗星同时落下. 换句话说,太阳已经由西向东移动到了恒星所在的位置. 经过一年时间,太阳在天球上由西向东环绕一周,回到最初的位置. 太阳走过的这个大圆叫做**黄道**. 黄道与赤道相交于**春分点**和**秋分点**两点,成约 23.5° 的倾角. 每年 3 月 21 日春分日前后,太阳由南向北经过春分点, 9 月 23 日前后,又由北向南经过秋分点. 太阳沿黄道由西向东的移动引起了星空的四季更迭,这叫做**周年运动**.

除了太阳和月亮,在星空背景上移动位置的还有行星、矮行星、小行星和彗星. 如果在黄道南北距黄道 $8^\circ 30'$ 处各画一条线,便可围出一条 17° 宽、围绕天球一周的带域,叫做**黄道带**. 太阳、月亮和行星的运行,都不会越出这条带域的范围.

在天球上确定天体位置的方法与在地球上确定城市位置的方法一样. 与大地纬度类似,天体向北或向南沿经圈大圆与赤道所成的角度叫做**赤纬**;与大地经度类似,天体向东沿天赤道与春分点所成的角度叫做**赤经**. 与地理坐标略有区别的是,天体赤经常用时间单位时、分、秒表示,沿天赤道一周划分为 24 h,每 15° 为 1 h,每度等于 4 min.

行星除了参与上述周日和周年两种视运动之外,还有其独特而复杂的视运动. 以火星为例,在一段时间里,它沿着黄道与太阳同方向由西向东地在群星间移动,叫做**顺行**. 移动的速度会越来越慢,最后会完全停止下来,接连一两个星期逗留不动,叫做**留**. 而后改变方向,由东向西地**逆行**回去,再停留下来,重新开始新一个周期的顺行(图 1.3).

恒星、太阳、月亮和行星,这些谜一样的天体,它们离我们究竟有多远? 地球在它们中间又占据着一个什么样的位置? 以上我们描述的那些运动都是真实的吗? 究竟是它们如我们看到的那样在运动,还是我们所在的地球在运动,还是两者都在动?

直到 20 世纪 60 年代,空间时代来临之前,人类对于宇宙的知识,对于自身在宇宙中所处

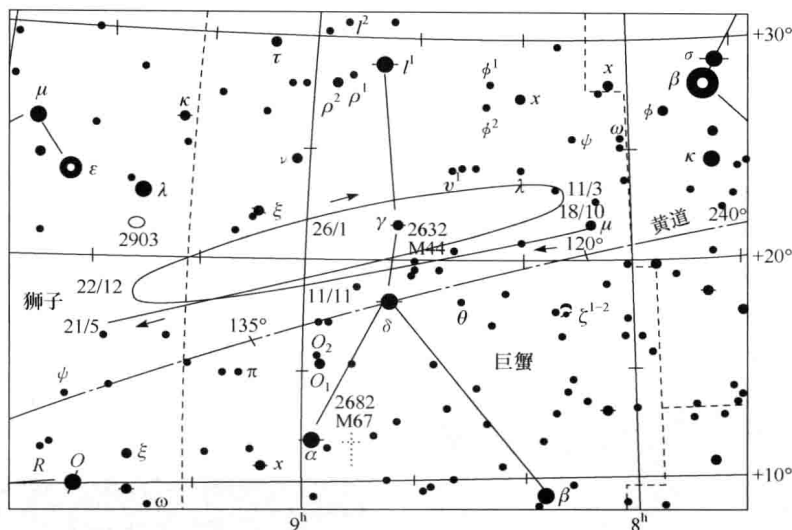


图 1.3 2009 年 12 月至 2010 年 3 月火星在巨蟹座中逆行

位置和运动的知识,都来自于从地面上对天体光线的观测.几个世纪以来观测仪器日新月异的发展和观测精度的飞跃提高,迅速深化了人类对这些问题的认识.然而这只是事情的一个方面,更重要的是如何解释观测到的现象,如何透过事物外在的表象去把握其本质.在这一方面,人类的认识经历了意义更为深远的变革.

物体的视运动和真运动常常是相反的.如果你乘坐的列车停在车站里,当并排停靠的另一列火车突然开动的时候,你常常会误以为自己乘坐的列车向着相反的方向开动了.只有当你注视车轮下的钢轨或站台上的建筑物的时候,才能够确切地分辨出来,运动的是另一列火车,而不是你自己的火车.之所以会发生这样的错觉,是由于你注视着运动列车的时候没有同时选定一个如铁轨、建筑物这样的既独立于两列列车,又与之关联的参考系.没有这样一个观察者和被观察物体共有的背景,观察者便无从知道究竟是自己,还是被观察物体,还是两者都在运动.

人们研究天体运动时,面临相似的困境,为此从需要出发选取了不同的参考系.天文参考系和它们之间的变换是本书上篇讨论的主要课题.古代学者十分自然地把自己居住的地球取作参考系,于是产生了地心说.地心说认为地球静止不动地位于宇宙的中心,太阳和其他天体围绕着地球运动.这一学说很好地解释了天球的周日和周年运动,但在解释行星视运动的时候却遇到了难以逾越的困难.公元 2 世纪时 Claudius Ptolemaeus(100—178,托勒密)在其名世之作《天文学大成》中引进本轮理论改进地心说,解释了行星视运动.随着观测技术的改进和观测精度的提高,在解释行星视运动时,本轮理论也遇到了困难,以至不得不增加本轮的数量,到了 16 世纪时,竟达到 80 多个.

1543 年, Nicolaus Copernicus(1473—1543,哥白尼)划时代的著作《天体运行论》出版,重新提出了古希腊学者提出过的日心说.日心说把参考系从地球移到了太阳,为描述行星运动建立了一个更加真实普遍的体系.在哥白尼的体系中观察行星的运动,就像在固定的月台上观察列车的运动一样真实而自然.

日月星辰东升西落的周日视运动是由于地球自转引起的.用望远镜观测天体时,观测者很容易感知自己随着地球转动得有多快:他必须每半分钟就手动调节望远镜的指向,才能保持观测对象停留在视场内.如今,进入空间时代之后,我们不仅可以间接地推知地球的转动,而且可以从远离地球的行星际空间中直接观察到这种运动.

月球也在运动,它沿着与周日运动正好相反的方向从西向东围绕地球转动.图 1.4 是中国嫦娥 5 号探测器在地月空间不同位置上拍摄的两幅地月系图片.左图是 2014 年 10 月 28 日凌晨 3 时许经过距月面约 1.4 万 km 的近月点后拍摄的,右下方较大圆面是月球背面.右图是 11 月 9 日从绕月轨道转移返回地球途中在距离地球 54 万 km、距离月球 92 万 km 处拍摄的,左上方较小圆面为月球正面.月球离开地球 38.5 万 km,正在绕地球逆时针运动.地球则向左上围绕太阳运动;同时自西向东(逆时针)绕轴自转;月球也按同一方向自转,不过要慢得多.月球绕地球一周费时 27 日 7 h 43 min 11.5 s,行程 2 400 万 km,在天球上平均每昼夜向东移动 13° ,这说明了月球何以每天要迟升起近 1 h.在天空中,月亮的大小似乎与太阳相差无几,这也不是真实的,由于太阳距离我们要遥远得多,它的真实直径超过月球 400 多倍.

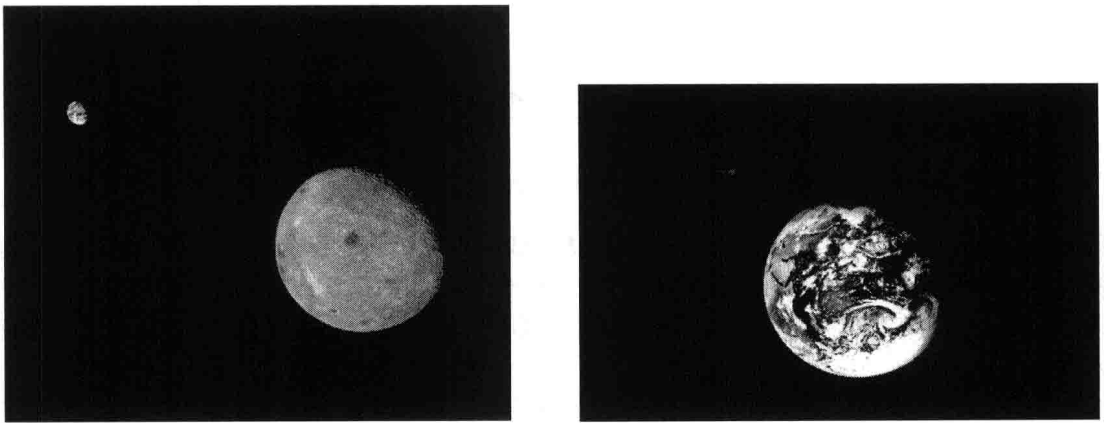


图 1.4 行星际空间中的地月系,嫦娥 5 号拍摄.

左图:探测器距月球约 1.4 万 km,距地球约 38.7 万 km 右下方可见月球背面;
右图:探测器距月球 54 万 km,距地球 92 万 km,左图上方可见月球正面

行星也在围绕太阳运动.设想从空间中居高临下(自北向南)地俯瞰太阳系,就会看到行星都沿逆时针方向围绕太阳运转.地球围绕太阳一周费时 365.26 日,火星则要 686.93 日,地球的角速度大于火星的角速度.如图 1.5 所示,每当地球从相邻的内侧轨道追上火星的时候(由 1 到 2),火星看上去就好像在天空中停顿下来;被地球超过以后(由 2 到 4),它就会掉头倒退起来,然后再恢复原来的顺行(由 4 到 5).行星视运动中出现的顺行、逆行和留的现象,完全是由于行星相对于地球的位置变化引起的,日心说对这一现象提供了简单而真实的解释.

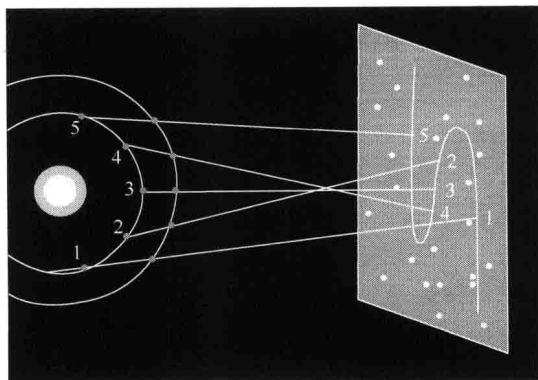


图 1.5 火星的顺行、逆行和留

一旦把参考系从地球上移开,地球自身的复杂运动便一层层地暴露出来.人们逐渐发现,地球在任一时刻的运动,都是由许多各有特色的较简单的运动合成的.为了对此获得一个感性的了解,设想你自己正在一艘海轮的甲板上走动,而海轮则在猛烈的风浪中倾斜颠簸地行驶,此刻你自己的运动应该怎样合成?地球运动的复杂性质更甚于此.直到进入20世纪,这种运动才获得了透彻的分析,我们在宇宙中所处位置也随之清晰地呈现出来.

恒星拱卫天极画出圆周的**周日视运动**(图1.2),是由于我们自身在地面上随着地球自转造成的,天轴实际上正是地球**自转轴**的延长线.我们在这一运动中所具有的速度随大地纬度的不同而异.地球大圆的周长约为4万km,赤道上每一点都以每小时约1670km或每秒464m的速度奔驰,在24h里绕完一周.向两极移动时,圆周逐渐缩短,同一纬度圆周上各点随着地球自转的角速度不变,线速度则相应减小,到了距离两极1000m处,只有每小时250m,在一昼夜里仅爬行过6km的距离.

太阳的视运动同样是一种假象.太阳不但由于地球的自转运动而东升西落,而且由于地球围绕它的**公转**运动在恒星间逐日移动,在一年时间里沿黄道由西向东运行一周.当我们高居太阳系的上空向下鸟瞰时,就会真切地看到地球在黄道平面上按逆时针方向绕太阳公转.正是由于地球的这种真实运动,当我们仍然回到地球上观察时,太阳才好像沿着黄道移动.黄道其实就是地球绕太阳公转的轨道在天球上的投影.尽管地球在公转运动中载着我们每日转过不到 1° ,但是这一运动的线速度却要比自转运动大得多,达到每小时106000km或每秒30km.

上述这些视运动和真运动已经令人眼花缭乱,然而地球的实际运动还要比这复杂得多.地球并不是一个标准的圆球,它的赤道区域略微鼓出,受到太阳和月亮引力的额外牵拉.在这种拉力的作用下,地球的自转轴就像转动陀螺的轴线一样慢慢地沿空间圆锥面转动着,天极因此在天球上极其缓慢地描画着一个角半径为 23.5° 的圆周,转动一周需26000年.地球的这种运动叫做**岁差运动**或**进动**.又由于地球赤道面不与黄道面重合,引起进动的额外拉力的方向也在不断变化,时而偏北,时而偏南,这使得地轴和天极在进动的同时,还在进动轨迹圆周上发生着一种周期18.6年,幅度 $9.2''$ 的摆动,叫做**章动**.

地极还有一种叫做**极移**的运动,主要有周期435日和一年的两个分量.435日分量叫**Chandler摆动**,来源于地球本身的动力学特性,振幅为 $0.1''\sim 0.2''$.周年分量来源于大气和海洋的季节性流动,振幅约 $0.1''$.此外还有周期半年、振幅 $0.01''$ 和周期长达10~20年的几种摆动.

岁差和章动是地球整体与自转轴一道在空间中的运动;与此不同,极移则是自转轴在地体内的运动,表现为地极周期性地在直径仅6~8m的卵圆上摆动,我们脚下的每一块地面也都经历着相对于自转轴的同样摆动.

以上所说的这几种运动,是本课程所要研究的.上篇天体测量部分主要研究时空参考系的选择、变换和对运动本身的描述;下篇天体力学部分则着重揭示运动发生的内在机制和遵循的规律.

为了更加准确地把握这些运动,让我们再把目光投向太阳系以外的广袤宇宙.夜空中灿烂的星斗常使我们以为,在离开太阳系不远的地方有很多恒星拱卫着我们的太阳,这仍然是一种错觉.当Friedrich Bessel(1784—1846,贝塞尔,德国天文学家)在1838年用测定**视差**的方法测量出了几颗恒星的距离时,人们着实大吃一惊.原来在浩瀚的恒星世界里,太阳系只不过是沧海中的一粟,并不像我们以为的那样煊赫.离我们最近的恒星是半人马座的南门二,这是一颗三合星,距离我们4.3光年.其他恒星距离我们还要远得多,以太阳为中心作一个半径65光年

的球面,有 1 140 颗恒星包围其中(图 1.6);星数若要达到 10 000 以上,需要把半径增加到 100 光年.

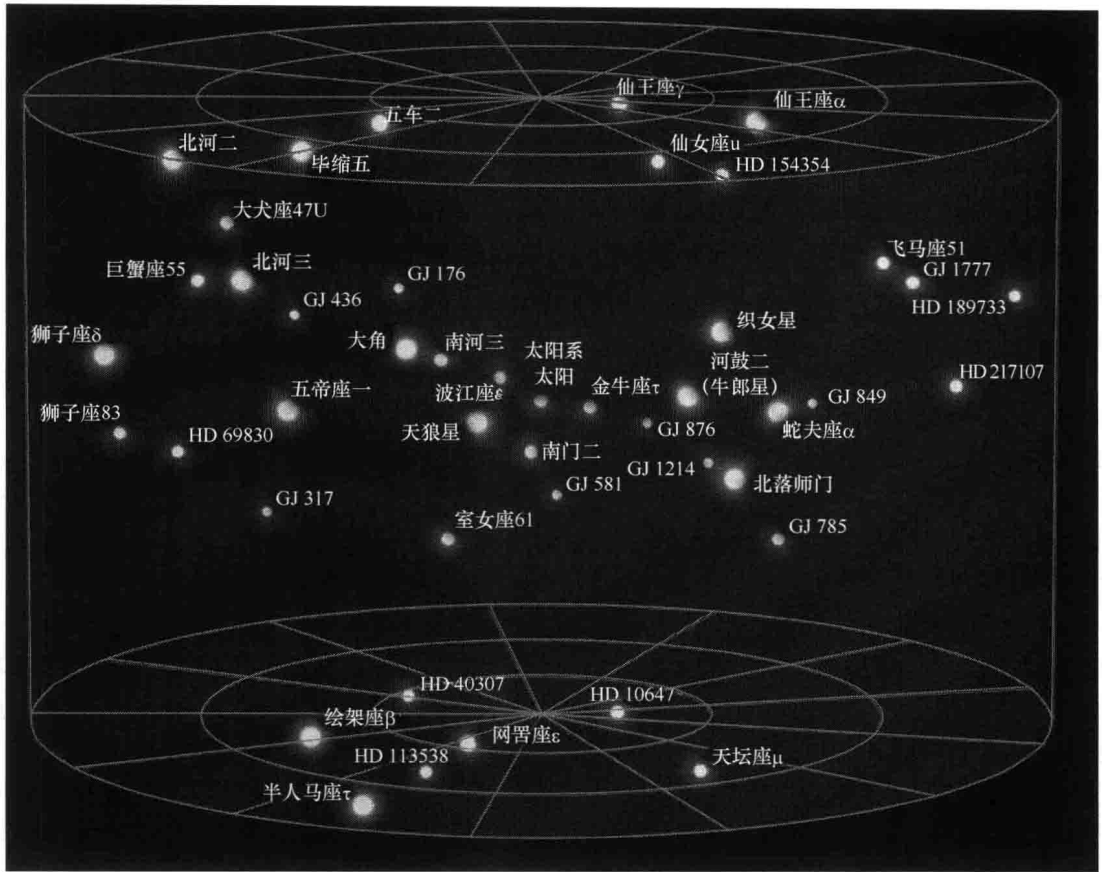


图 1.6 太阳邻近的恒星

描述邻近恒星的运动,只用“杂乱无章”四字即可. 这些恒星在视线方向(径向)的速度各不相同,有些迎着我们扑面而来,有些背着我们扬长而去. 它们在垂直于视线的方向(横向)上的运动也各不相同,似乎毫无规则可循. 但是 Frederick William Herschel(1738—1822, 威廉·赫歇尔,英国天文学家)等在对远近大量恒星、星团和星际气体尘埃的运动进行了综合的统计分析之后,终于领悟出了太阳的真实运动和位置. 太阳在宇宙中的家园原来是一个叫做银河系的由 2 000 亿颗恒星、大量气体、尘埃和暗物质组成的旋涡星系. 太阳率领着它的小小家族居住在银河系一支旋臂的边缘上,距星系中心约 3 万光年,距星系外缘约 2 万光年(图 1.7).

分析表明,太阳以每秒 250 km 的高速围绕银河系中心运动,这样一来,地球围绕太阳运动的轨道就成了螺旋形的. 当太阳沿着螺旋的轴线前进时,地球则沿着螺旋线奔驰. 太阳带着我们在 2.5 亿年里绕银河系中心旋转一周,每当年终除夕的时候,地球并不像我们想象的那样而复始地回到它在年初元旦时的出发点上,而是离开了那个地方 80 亿 km 之遥.

太阳在围绕银河系中心旋转的轨道上还有另外一种约每秒 20 km 的上下起伏的运动,有点像游乐场中的轮盘木马,一面随着机轮转动,一面慢慢地上下颠簸. 太阳围绕银河系中心旋转一周的时候,大概要这样上下摆动两三次,幅度在星系平面上上下各 500 光年的范围内. 这种起伏运动,可能是邻近星流引起的一种非重复性的微弱扰动.

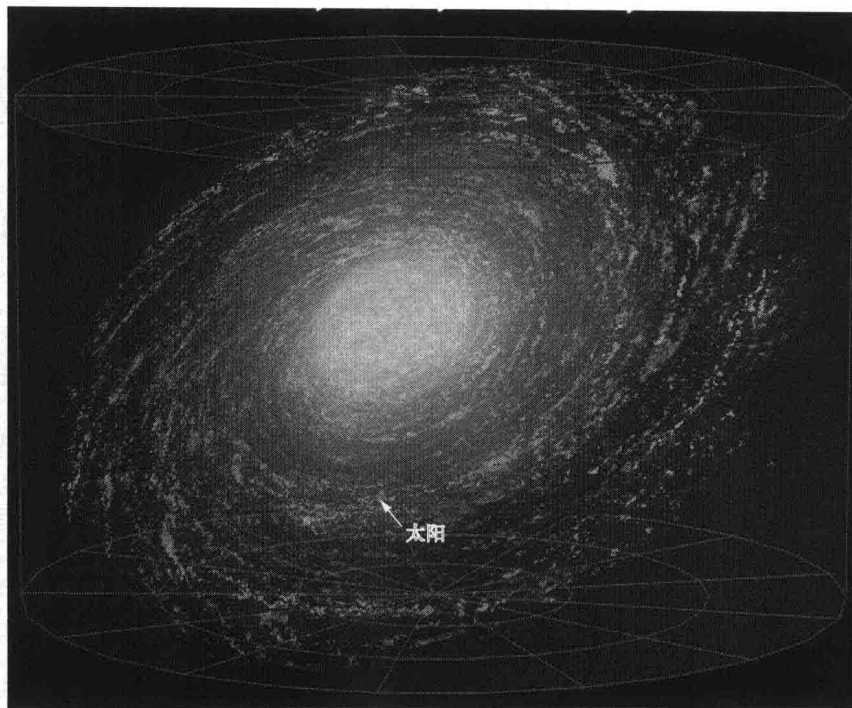


图 1.7 太阳在银河系中的位置

作为星系,银河系并不孤立,它是更高一级的天体系统——本星系群的一员。正如人们常说的:“天外有天。”本星系群是一个直径约 1 000 万光年的星系集团,其成员除我们的银河系外,已经发现的还有 30 多个。夜空中肉眼可见的仙女座星系和大小麦哲伦星系,都是它的成员(图 1.8)。仙女座星系和银河系相距 230 万光年,是本星系群中两个最大的星系,各有若干伴星系围绕着它们。我们的太阳随着银河系在本星系群中以每秒 300 km 的速度奔驰。本星系群又是更高一级组织本超星系团(又称室女座超星系团)的成员。本超星系团的直径达 1.1 亿光年,包含 100 个以上星系群和星系团。几百万个这样的超星系团构成了观测到的宇宙。现在还发现了相对微波背景辐射的运动,这种背景辐射源于宇宙演化初期的大爆炸,相当均匀地存在于宇宙中。据测定,银河系和本星系群相对于微波背景的运动,达到每秒 3 万 km 的惊人速度。对于恒星在星系中和星系在星系团中运动的研究导致了暗物质的发现,对于宇宙总体结构和运动的研究导致了暗能量的发现,这些都是当代天体物理学的前沿课题。

宇宙深处距离我们几亿到上百亿光年的地方,很多星系具有剧烈活动的核心,发出以射电波为主的电磁辐射。这些天体的光学外表像是普通恒星,射电辐射的能力却超出一般星系,因而被叫做类星体。类星体距离遥远,几乎观测不到它们的自行,成为天球参考系定标天体的最佳候选者。

至此可以看到,置身于宇宙一隅的地球表面上的我们自己的运动,可以用确定的方式分解为一系列比较简单的运动:地球绕轴的自转、地轴相对地球本体的极移、地轴相对空间的岁差和章动运动、地球围绕太阳的公转、太阳在银河系中的运动、银河系在本星系群中的运动和本星系群相对于微波背景辐射的运动。尽管这些运动的各个方面还有待于更精密的观测和更深入的研究,但天文学家已经为我们描绘出了一幅相当清晰的图画,我们现在比以往任何时候都