

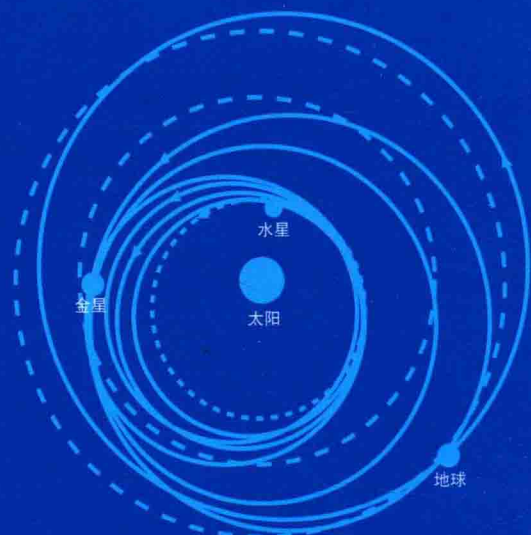


空天科学与工程系列教材·飞行动力学与控制

航天器轨道力学 理论与方法

Theories and Methods of
Spacecraft Orbital Mechanics

张洪波 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

空天科学与工程系列教材·飞行动力学与控制

航天器轨道力学理论与方法

Theories and Methods of Spacecraft

Orbital Mechanics

张洪波 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统深入地介绍了航天器轨道力学的相关知识,主要包括:轨道力学发展历程、太阳系、时间与坐标系统等基础知识;二体问题、二体轨道的初值与边值问题、轨道确定、轨道摄动、轨道设计等轨道力学核心内容;脉冲推力、有限推力、小推力轨道机动和航天器相对运动等轨道控制内容;多体问题、月球和行星际探测轨道设计等深空探测相关知识。

本书可作为航天器总体设计与论证、控制系统设计、运行管理与评估等相关专业的高年级本科生和研究生教材,对从事相关工作的研究人员、工程技术人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

航天器轨道力学理论与方法/张洪波编著. —北京:国防工业出版社,2015. 10

空天科学与工程系列教材. 飞行动力学与控制

ISBN 978-7-118-10327-4

I. ①航... II. ①张... III. ①航天器轨道—轨道力学—教材 IV. ①V412.4 ·

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 227910 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 31 字数 860 千字

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 92.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

总 序

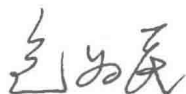
经过 50 余年的发展,航空航天技术在经济建设、武器装备、科学研究、日常生活中发挥的作用日益彰显。航天技术的研究具有系统复杂、技术尖端、应用性强、辐射面广等特点,是衡量一个国家综合国力的重要标志,同时也能对国家的科学研究与工业技术发展产生巨大的牵引作用。

飞行动力学与控制是飞行器设计的核心技术之一。它以经典力学和自动控制理论为基础,研究飞行器在力和力矩作用下的运动与控制规律,以满足飞行任务的要求,与飞行器的工程设计和实际应用有着紧密的关系。飞行器的总体论证与设计、控制系统设计、结构设计、飞行试验与评定、任务规划、运行管理、效能评估等都与飞行动力学与控制密切相关。因此,航空航天领域不仅需要掌握飞行动力学与控制原理的专门人才,相关专业人员掌握一些飞行力学知识也是非常必要的。

国防科技大学航天科学与工程学院是我国飞行动力学与控制方面科学研究和知识传承的一个重要基地,早在 20 世纪 50 年代“哈军工”时期就创办了相关专业。程国采、张金槐、任萱、赵汉元、贾沛然、黄圳圭等老一辈学者,积极参与我国重大航天工程领域的研究,学术造诣深厚。为提高学校办学水平,他们注重从科研实践中系统总结,精心提炼,著书立说,惠及后人。20 世纪 80 年代开始,先后出版了《远程火箭弹道学》《弹道导弹制导方法与最优控制》《飞行器再入动力学与制导》《远程火箭精度分析与评估》《人造地球卫星轨道力学》《大型航天器动力学与控制》等一系列高水平教材。这些书注重理论联系实际,突出用飞行动力学与控制理论解决工程实际问题,不仅在我国航天教育领域得到广泛应用,而且成为航天部门科研人员的案头参考书。

进入新世纪以来,运载火箭、弹道导弹、近地航天器等传统飞行器的设计与应用逐步成熟,而高超声速飞行器、智能化航天系统、先进深空探测航天器的研究初露端倪。国防科技大学的研究力量一直紧跟这一技术发展趋势,参与和推动着我国飞行动力学与控制技术的进步。通过对原有教材经典内容的继承和对新科研成果的提炼,推出了这套飞行动力学与控制系列教材。教材涵盖了弹道学、轨道力学、姿态动力学、导航技术、精度分析与评估等飞行动力学与控制的主要内容,在知识的经典性与先进性、理论性与实践性方面做到了较好的统一。

经过几代人的艰苦努力,我国的航天事业已逐渐缩小了与先进国家的差距。未来的发展离不开一大批掌握先进知识与理念的人才,我希望也相信这套教材能在我国航天人才培养和航天工程实践中发挥重要作用。作为我国航天队伍中的一员,我期待看到本系列教材的出版,并乐意为之作序。



2013 年 9 月 13 日

前 言

君子之教，喻也。道而弗牵，强而弗抑，开而弗达。

——《大学·学记》

编著本书的初衷是为航天专业的研究生提供一本课程参考教材。2009年，我接手学校的轨道力学研究生课程，当年恰逢实施新的研究生培养方案，找不到一本与课程大纲切合较好的教材，教学效果受到影响，于是我萌生了编写一本参考教材的想法。经过两年的时间，2011年本书的第一稿编写完成。试用三年后，根据学生的反馈与个人的教学体会，2014年进行了一轮较大幅度的修改。之后又试用了一年，再经小幅修改后有了今天出版的这本教材。

若自1687年牛顿出版《自然哲学的数学原理》算起，轨道力学的发展已有300余年的历史。期间经过无数伟大的数学家和天文学家的辛苦耕耘，目前已积累的知识可谓浩如烟海。如何从中选取一部分组成一个相对较完整的体系，是编著本书过程中最令人踌躇的事。总体而言，在内容选择上我坚持了这样几个想法：一是研究生经过本科阶段的训练，已经具备了较强的自学能力，研究生阶段的学习应该侧重对一门科学的知识体系与知识脉络的掌握，本书与本门课程也应如此；二是数学力学基础与抽象思维能力对航天专业，尤其是飞行力学专业的研究生至关重要，轨道力学的很多经典理论是一些史上最杰出的数学家和力学家的思想精华，对它们的学习和研究有助于提高学生的理论水平；三是轨道力学是一门实践性很强的科学，在航天任务中要解决很多具体的工程问题，学生有必要掌握一些解决问题的方法与技巧，因此本书也选择了一些这方面的内容；四是科技史教育在培养学生的综合素质与创新能力方面的作用越来越受到重视，因此书中有意增加了一些科技史方面的内容。

内容编排上，第1章和第2章介绍轨道力学的基础知识，包括基本概念、发展历史、太阳系与近地空间环境、坐标系统、时间系统等，已有知识储备的读者可以跳过这部分内容。第3章~第7章是轨道力学的核心内容，包括二体问题的解、二体轨道的初值问题和边值问题、轨道确定、轨道摄动等，很多内容源自经典天体力学。第8章论述了航天器轨道设计，第9章~第11章分别论述了脉冲推力、有限推力和小推力轨道机动，这四章与航天任务紧密相关，内容叙述上以近地航天任务为主，相关理论与方法对月球和行星探测任务同样适用。第12章论述了航天器间的相对运动理论。第13章论述了多体问题的基本理论，第14章论述了月球与行星际探测轨道设计，主要介绍与深空探测有关的相关知识。最后附录中给出了轨道力学中一些常用的数据、公式与算法。

在本书的编著过程中参考了国内外众多学者的学术成果，在此表示由衷的感谢。尤其要感谢原国防科技大学的任莹教授和肖峰教授，他们编著的《人造地球卫星轨道力学》《球面天文学与天体力学基础》等教材是本书非常重要的参考。还要特别感谢杨嘉墀、刘林、R. H.

Battin、J. W. Cornelisse、V. A. Chobotov 等人,他们的著作也是本书的重要参考。书中对这些学者成果的引用除需特别注明的地方外,很多并未加以标注,在此致以感谢。汤国建、郑伟两位教授在我接手轨道力学课程之初,将多年积累的教案、课件、讲义等倾囊相授,本书成稿之后又仔细审阅了全稿,提出了宝贵的修改意见,在此对他们表示深深的感谢。感谢教研室研究生们的帮助,他们在校稿、文档整理、绘图等方面给了我许多帮助。最后要感谢我的家人,她们对家庭的照顾使我能够全身心地投入工作,完成本书的写作。

学然后知不足,教然后知困。在课程教学和本书的编写过程中,我深深地感觉到自己所学的浅薄。由于水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者不吝指正(zhanghb1304@nudt.edu.cn)。

张洪波

二〇一五年仲春于长沙

目 录

第1章 绪论	1
1.1 轨道力学的发展历程	1
1.1.1 古典天文学	1
1.1.2 天体力学	5
1.1.3 航天动力学	11
1.2 轨道力学的主要研究内容	15
1.2.1 轨道动力学	15
1.2.2 轨道控制	16
1.3 轨道力学的地位与作用	17
参考文献	18
第2章 轨道力学基础知识	19
2.1 太阳系	19
2.1.1 太阳	19
2.1.2 地月系统	21
2.1.3 行星及其卫星	27
2.1.4 小天体	33
2.2 天球	34
2.2.1 天球的定义	34
2.2.2 天球上基本的点和圈	35
2.2.3 天体视运动	36
2.2.4 岁差、章动与极移	36
2.3 时间系统	39
2.3.1 世界时	40
2.3.2 原子时	42
2.3.3 历书时与动力学时	43
2.3.4 年、历元和儒略日	45
2.4 坐标系统	46
2.4.1 坐标系的定义及转换	46
2.4.2 天球坐标系	50
2.4.3 地球坐标系	51
参考文献	53
第3章 二体问题	54
3.1 二体问题运动方程	54

3.2	二体问题的六个积分	56
3.2.1	动量矩积分	56
3.2.2	轨道积分	57
3.2.3	时间积分	59
3.2.4	轨道速度	60
3.3	二体轨道的特性	64
3.3.1	圆锥曲线的几何特性	64
3.3.2	椭圆轨道	65
3.3.3	抛物线轨道	67
3.3.4	双曲线轨道	68
3.4	经典轨道要素	72
3.4.1	经典轨道要素的定义	72
3.4.2	经典轨道要素与直角坐标运动状态参数的转换	73
3.4.3	经典轨道要素与球坐标运动状态参数的转换	76
3.5	春分点轨道要素	79
3.5.1	春分点要素的定义	79
3.5.2	春分点要素与位置、速度的转换	81
	参考文献	83
第4章	二体轨道初值问题	84
4.1	拉格朗日系数	85
4.1.1	真近点角差表示的拉格朗日系数	85
4.1.2	转移矩阵的性质	86
4.2	飞行时间方程	87
4.2.1	抛物线轨道	87
4.2.2	椭圆轨道	89
4.2.3	双曲线轨道	93
4.3	普适变量与普适时间方程	98
4.3.1	桑德曼变换	98
4.3.2	普适变量描述的圆锥曲线运动方程	99
4.3.3	普适时间方程	101
4.3.4	普适函数的计算	109
4.4	开普勒方程的求解	110
4.4.1	椭圆运动的级数展开	110
4.4.2	牛顿迭代法	114
4.5	f 和 g 级数	119
	参考文献	122
第5章	二体轨道边值问题	123
5.1	边值问题初步分析	124
5.1.1	端点时间约束	124
5.1.2	两种特殊的边值问题	124

5.2	边值问题的定解条件	126
5.2.1	端点速度大小	126
5.2.2	端点速度方向	128
5.2.3	偏近点角差	130
5.2.4	偏心率	132
5.2.5	虚焦点	137
5.3	兰伯特定理	142
5.3.1	兰伯特定理的解析表达	142
5.3.2	边值问题变换	145
5.4	兰伯特问题求解	148
5.4.1	高斯迭代法	148
5.4.2	普适迭代法	150
	参考文献	157
第6章	航天器轨道确定	158
6.1	根据雷达观测资料确定初始轨道	159
6.1.1	单雷达站单点定轨	159
6.1.2	纯位置矢量定轨	163
6.2	根据光学测角资料确定初始轨道	164
6.2.1	拉普拉斯方法	165
6.2.2	高斯方法	168
6.3	多站同步观测定轨方法	173
6.3.1	多站同步光学测角定轨	173
6.3.2	多站同步测距定轨	174
6.3.3	多站同步测距、测速定轨	176
6.4	轨道改进的基本原理	176
	参考文献	179
第7章	航天器轨道摄动	180
7.1	特殊摄动法	181
7.1.1	摄动力分析	181
7.1.2	科威尔法	183
7.1.3	恩克法	183
7.2	参数变分法	187
7.2.1	轨道要素变分方程	187
7.2.2	正则参数变分方程	193
7.3	一般摄动法	194
7.3.1	古典摄动法	195
7.3.2	平均要素法	196
7.3.3	半解析法	198
7.4	地球非球形摄动	199
7.4.1	地球引力位	200

7.4.2	主要带谐项的解	204
7.4.3	J_2 项的影响	213
7.5	大气阻力摄动	215
7.5.1	气动力计算	215
7.5.2	大气模型	216
7.5.3	摄动影响分析	219
7.6	太阳光压摄动	221
	参考文献	223
第 8 章	航天器轨道设计	224
8.1	星下点轨迹	224
8.1.1	无旋地球上的星下点轨迹	225
8.1.2	旋转地球上的星下点轨迹	226
8.1.3	考虑摄动影响时的星下点轨迹	233
8.2	地面覆盖	236
8.2.1	轨道上任一点的覆盖区	236
8.2.2	无旋地球上的覆盖带	238
8.2.3	旋转地球的覆盖问题	240
8.3	卫星轨道及星座设计	241
8.3.1	轨道分类	241
8.3.2	卫星轨道设计	242
8.3.3	卫星星座设计	243
8.4	太阳照射问题	246
8.4.1	星下点照明	246
8.4.2	卫星受晒问题	249
8.5	卫星发射问题	252
8.5.1	发射窗口	252
8.5.2	发射段弹道	253
	参考文献	257
第 9 章	脉冲推力轨道机动	258
9.1	轨道机动的分类	258
9.2	轨道改变	261
9.2.1	共面轨道改变	262
9.2.2	改变轨道面的变轨	265
9.2.3	一般非共面轨道改变	268
9.2.4	拦截问题	269
9.2.5	广义拦截问题	272
9.3	轨道转移	274
9.3.1	共面圆轨道间的最优转移	274
9.3.2	共面椭圆轨道间的最优转移	279
9.3.3	非共面轨道间的最优转移	282

9.3.4	多冲量转移	284
9.4	轨道调整	285
9.4.1	轨道保持	285
9.4.2	轨道中途修正	288
	参考文献	292
第 10 章	有限推力轨道机动	294
10.1	引力损耗问题	295
10.2	最优机动轨道与主矢量	296
10.2.1	最优控制问题描述	297
10.2.2	最优推力方向和主矢量	297
10.2.3	边界条件	299
10.3	速度增益制导	301
10.3.1	Q 制导方法	301
10.3.2	速度增益制导原理	304
10.3.3	关机控制	307
10.4	迭代制导	309
10.4.1	制导动力学方程	309
10.4.2	最优控制问题表述	311
10.4.3	最优控制问题求解	312
	参考文献	315
第 11 章	小推力轨道机动	316
11.1	径向常推力加速度的飞行轨道	317
11.2	切向常推力的飞行轨道	320
11.2.1	数值方法求解	321
11.2.2	近似方法求解	323
11.3	非共面圆轨道间的小推力转移	327
11.3.1	轨道机动的摄动运动方程	327
11.3.2	问题的最优控制解	328
11.4	基于春分点要素的最优机动轨道设计	334
11.4.1	春分点要素变分方程	334
11.4.2	最优机动轨道设计	342
	参考文献	346
第 12 章	航天器间的相对运动	348
12.1	轨道坐标系中的相对运动方程	349
12.1.1	相对运动方程的建立	349
12.1.2	相对运动方程的积分	351
12.1.3	相对运动特性分析	353
12.2	基于 C - W 方程的轨道交会设计	356
12.2.1	两冲量固定时间交会问题	356
12.2.2	最优轨道交会问题	358

12.3	视线坐标系中的交会末制导方法	362
12.3.1	相对运动方程	362
12.3.2	运动方程的自由解	365
12.3.3	末制导方法	366
12.4	改进的相对运动描述模型	371
12.4.1	T-H 方程	371
12.4.2	轨道要素法	373
	参考文献	376
第 13 章	多体问题	377
13.1	一般 N 体问题	378
13.1.1	N 体问题运动方程	378
13.1.2	10 个首次积分	378
13.1.3	N 体系统的机械能	380
13.2	N 体问题中的相对运动	383
13.2.1	相对运动方程的建立	383
13.2.2	第三体对人造地球卫星的轨道摄动	385
13.3	引力影响球	386
13.3.1	拉普拉斯影响球	386
13.3.2	内层与外层影响球	389
13.4	三体定型运动	390
13.4.1	三体定型运动的一般描述	390
13.4.2	等边三角形解	390
13.4.3	直线解	394
13.5	圆形限制性三体问题	396
13.5.1	旋转坐标系中的运动方程	396
13.5.2	雅可比积分与零速度面	398
13.5.3	平动点	402
	参考文献	406
第 14 章	月球与行星际探测轨道设计	407
14.1	行星探测轨道设计	408
14.1.1	日心轨道	408
14.1.2	地心轨道	412
14.1.3	目标行星中心轨道	415
14.1.4	近旁转向技术	418
14.1.5	三维行星探测轨道	421
14.2	月球探测轨道设计	423
14.2.1	简单的月球探测轨道	424
14.2.2	圆锥曲线拼接法	426
14.2.3	多圆锥曲线法	430
14.3	平动点附近的周期轨道	431

14.3.1	平动点附近运动的稳定性	431
14.3.2	共线平动点附近的周期轨道	434
14.3.3	三角平动点附近的周期轨道	438
14.3.4	不变流形及流形拼接	441
	参考文献	443
附录 A	常用天文数据	445
A.1	IAU2009 天文常数	445
A.2	太阳、大行星及月球基本参数表	445
A.3	大行星轨道根数	446
A.4	日月位置的近似计算	449
附录 B	时间与坐标系统相关公式	455
B.1	时间系统相关公式	455
B.2	年、月、日及儒略日	457
B.3	坐标系统相关公式	458
B.4	IAU2000B 章动系数	460
附录 C	摄动力计算	462
C.1	地球非球形引力加速度的计算	462
C.2	EGM2008 地球引力场系数	465
C.3	Jacchia - Roberts 大气模型计算公式	466
附录 D	二体轨道公式	472
D.1	常用轨道公式	472
D.2	椭圆轨道参数换算	473
附录 E	数学知识	476
E.1	矢量运算	476
E.2	球面三角公式	477
E.3	连分数与超几何函数 $F\left(3, 1; \frac{5}{2}; z\right)$ 的计算	479

第1章 绪 论

众所周知,地球被一层大气包围着,称为地球大气层。探测发现,地球大气层的范围一直向上延伸到距离地球表面 2000 ~ 3000km,而实际上 100km 以上的大气已经非常稀薄,只会对穿越其中的物体产生非常微弱的阻力作用。因此,一般把距离地球表面 100km 以上的宇宙范围称为空间或太空。根据距离地球的远近,又将距离小于地一月距离(约 3.84×10^5 km)的宇宙范围称为近地空间,大于地一月距离的称为深空。人类探索、开发和利用太空以及地球以外天体的活动称为航天。在太空中主要按照天体力学的规律飞行、执行特定航天任务的飞行器称为航天器。根据执行任务的不同,航天器可分为人造地球卫星、飞船、空间站、航天飞机、深空探测器(也称空间探测器)等。人造地球卫星又可细分为遥感卫星、气象卫星、导航卫星、通信卫星、中继卫星、试验卫星等;深空探测器也可细分为月球探测器、行星探测器、行星际探测器等不同种类。

航天器轨道力学是以各类航天器为研究对象,分析它们在万有引力及其它外力作用下的运动特性及控制规律的一门科学。研究过程中,一般把航天器抽象为质点或质点系力学模型,而不考虑姿态运动、挠性部件振动、内部液体晃动等带来的影响。轨道力学的研究内容可分为轨道动力学和轨道控制两部分。前者研究航天器在外力作用下的质点运动规律,后者则研究如何确定作用在航天器上的外力变化规律,使之能够按照需要改变运动轨迹。

航天器轨道力学是一门基础理论与工程实践紧密结合的交叉学科,内容既涉及一般力学、天体力学、控制理论、优化理论等基础知识,也涉及航天器轨道设计、轨道确定、轨道转移、交会对接、返回控制等工程技术问题。掌握航天器轨道力学的理论与方法能够为将来从事航天器任务分析、总体设计、分系统设计、发射与运营管理、应用效果评估等工作打下坚实的基础。

1.1 轨道力学的发展历程

人造天体与自然天体在万有引力场中的运动规律类似,因此轨道力学的很大一部分内容源自天文学中的天体力学,而天体力学的发展则可追溯到早期的古典天文学。

1.1.1 古典天文学

1. 原始天文观测时期

生活在地球上的人类,很早以前就对一些基本的天文现象有了认识。先民们通过肉眼观测天体,将天象及其变化记录成册,以此来辨别方向、确定时辰、编制历法,安排重大的社会活动。大约在公元前 4000 年,古埃及人就注意到每当天狼星第一次于日出之前在东方的地平线上出现,尼罗河就开始泛滥,这个天象被称为天狼星的偕日升。古埃及人把偕日升作为一年的开始,经过长期观测确定出两次天狼星偕日升的时间间隔为 365.25 天,并以此为基础建立了历法,这就是现在全世界通行的公历的前身。我国天文学的起源可追溯到久远的年代,在最古老的历史文献《尚书·尧典》中就有记载:“寅宾日出,平秩东作,日中星鸟,以殷仲春”,是说当

日出正东时就是春分日,要举行祭祀,以利农耕。在我国汉代已经出现了比较精确的日晷,通过测量日影的移动来确定时辰,如图 1-1 所示。

古人观测天象除了作为一种实用的生存手段外,神秘的天象也给人在感性上带来惊异和敬畏的冲击,人们企图利用天上出现的偶然现象对人间事务和个人命运进行预测,这就是星占。在古巴比伦就有一批职业的星占学家,时刻关注和记录着天空的变化,长期以来形成了可观的天象记录与对应解释,图 1-2 是公元前 17 世纪古巴比伦记录金星动态的泥板文书。星占学家希望有能力把握太阳、月亮和行星的运动规律,从而能预测各天体在未来某个时刻的位置,以期借此预测人间的事务。记载有未来某时刻及对应时刻天体位置的表称为星历表。事实上,对星历表精益求精的追求,一直到 17 世纪都是研究天体运动规律背后的驱动力,当然目的不再仅局限于星占^[2]。

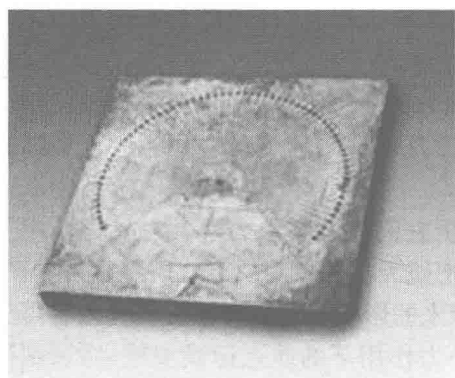


图 1-1 1897 年托克托出土的汉代石质日晷



图 1-2 古巴比伦记录金星动态的泥板文书

2. 古希腊天文学

古希腊天文学对天体运动的描述和解释构成了古典天文学的主体。古希腊民族喜好辩论、崇尚理性、讲学之风盛行。从公元前 6 世纪的泰勒斯到公元 2 世纪的托勒密近 800 年间,古希腊天文学发展迅速,先后出现过四大学派^[4]。

爱奥尼亚学派由泰勒斯(Thales, 约公元前 624—546)创立,其主要贡献是把古巴比伦和古埃及的天文学知识介绍到希腊。该学派认为可见天空是完整球形天空的一半,圆盘状的大地倒扣在球体中心,星辰都随同天空围绕北极星旋转。

毕达哥拉斯学派由著名几何学家毕达哥拉斯(Pythagoras, 约公元前 570—496)创立,该学派对数最感兴趣,特别强调脱离形式的纯粹的数,因此容易导出这样一种观点,即行星在天空中复杂的视运动可以看成多种简单运动的复合结果。该学派的菲洛劳斯(Philolaus, 约公元前 480—385)提出了一个地动学说,认为地球、太阳、月亮和行星都围绕着一团中央火运行,太阳是一面大镜子,反射了中央火发出的光芒,日月五大行星的视运动是地球也在运动的反映。毕达哥拉斯还根据月食时阴影的边缘是弧状的,推测出地球是球形的。

柏拉图学派由哲学家柏拉图(Plato, 约公元前 427—347)创立,该学派接受毕达哥拉斯学派圆是最完美图形的观点,并用这个观点解释宇宙。柏拉图试图使天文学成为数学的一个分支,并提出了一个后面几个世纪的天文学家都致力于解决的首要问题:能否用匀速而整齐的运动解释行星的视运动。因为相比于太阳、月亮和恒星的运动,解释五大行星不规则的视运动是最复杂的

问题(图 1-3)。柏拉图的学生欧多克斯(Eudoxus, 约公元前 410—356)提出了同心球理论, 试图解决柏拉图所述的天文课题。欧多克斯设想地球是宇宙的中心, 每一个天体复杂的视运动轨迹都是由若干个同心球的匀速圆周运动复合而成的, 为此每颗行星需要设置 4 个同心球。亚里士多德(Aristotle, 公元前 384—322)作为古希腊最伟大的思想家, 在天文学方面支持欧多克斯的同心球理论。他坚持认为大地是不动的, 否则一定会观测到恒星的周年视差。在以后的两千多年间, 这个理由一直是地球不动的重要证据, 因为宇宙的广袤远远超出了古人的想象空间。亚里士多德还提出了自己的运动学与动力学理论, 认为物体在不受外部影响的情况下将处于静止状态, 因此解释物体的运动必须寻找外部的原因, 这为地静说反对地动说提供了理论依据。

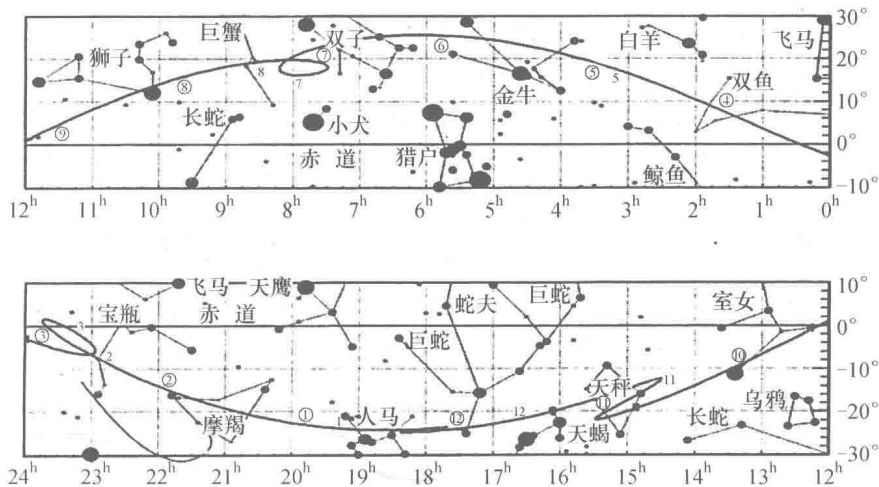


图 1-3 2006 年水星在星座间的视运动轨迹图
(图中数字和加圆圈数字分别表示每月 15 日水星和太阳的位置)

亚历山大学派形成于亚历山大大帝远征时期, 它将古希腊的几何天文学与古巴比伦的算术天文学高度融合, 开启了古希腊天文学新的历史时期, 又称希腊化时期。这一时期的天文学人才济济, 成果累累。阿里斯塔克(Aristarchus, 公元前 310—230)在一篇名为《论日月的大小和距离》的论文中, 基于希腊几何学的演绎推理, 得到太阳是一个比地球直径大 6~7 倍的球体的结论(图 1-4)^[2]。鉴于大的物体绕小的物体转动不合常理, 因此阿里斯塔克认为地球和五个行星都以太阳为中心运转。由于地球每年绕日一周, 同时每天自转一圈, 所以才产生天体的周年变化和周日视运动。他还认为由于恒星离地球的距离太过遥远, 因此地球公转导致的恒星周年视差很难观测到。阿里斯塔克是第一个提出严格的日心地动观点的学者, 被称为哥白尼的先驱。

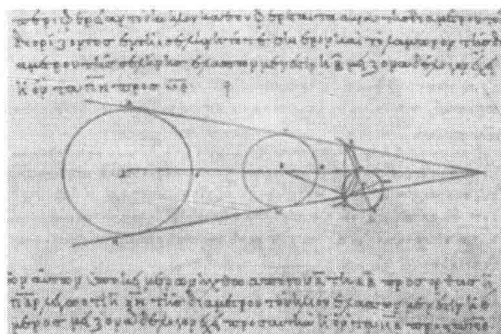


图 1-4 阿里斯塔克证明过程中的插图

以一部《圆锥曲线论》闻名数学史的阿波罗尼乌斯(Apollonius, 公元前 262—190)在用匀速圆周运动描述天体运行时提出了两种方案。在第一个方案中, 行星绕地球运动, 但地球并不处于圆周的圆心, 而是偏向一边, 行星在偏心圆上作匀速运动。第二个方案中, 行星在一个较小的圆周“本轮”上作匀速运动, 而本轮的中心则在一个较大的圆周“均轮”上作匀速运动, 地

球位于均轮的中心(图 1-5)。阿波罗尼乌斯的这两个数学发明为天文学家解决行星视运动问题提供了基础。喜帕恰斯(Hipparchus, 旧译依巴谷, 公元前 190—127)利用阿波罗尼乌斯的偏心圆模型来描述太阳的运动,很好地解决了四季长度不等与匀速圆周运动的矛盾。喜帕恰斯还是一位勤奋的观测者,他对恒星方位进行了精密的测量,编制了包含有 1080 个恒星的星表,对促进西方天文学的发展起了很大作用。通过比较自己与前人的观测数据,喜帕恰斯还发现了春分点的退行即岁差现象。

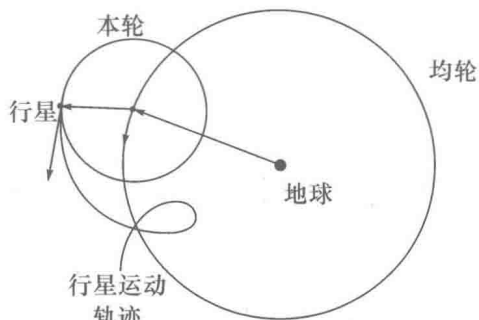


图 1-5 本轮—均轮模型

在喜帕恰斯之后的 300 年中,古希腊天文学进展不大。最令人瞩目的工作是古埃及天文学家托勒密(Ptolemy, 约公元后 100—170, 图 1-6)完成的,他集古希腊天文学之大成,写成巨著《至大论》(后来被阿拉伯人译为《天文学大成》)。托勒密继承了偏心圆、本轮和均轮的假设,又引入了一个重要的概念——“对点”。对点是地球在偏心圆中相对于圆心的镜像,圆周上的点不是作匀速运动,而是变速运动,速度变化的规律是让对点上的观测者看起来是匀速的(图 1-7)。基于托勒密提供的宇宙几何模型,能对日月和五大行星的运动给出相当精确的预报,而且从数学上讲,当一级本轮预报精度不足时,还可以增加次级,乃至三级、四级本轮,直到获得足够的预报精度。但增加本轮的同时也增大了数学计算的难度,有文献讲哥白尼看到的托勒密体系有多达 80 个本轮,数学计算极其繁复,以致要从简单性出发进行改革。此外,对点的引入使得天体的运动不再是匀速运动,这在许多人看来是对古希腊原则的冒犯,因此也成为改革托勒密体系的原因之一。无论如何,托勒密的工作代表了人类对认识自然的理性追求,是那个时期人类智慧的最高代表。在此之后的一千多年内,《至大论》一直被欧洲和西亚人奉为经典。



图 1-6 托勒密肖像

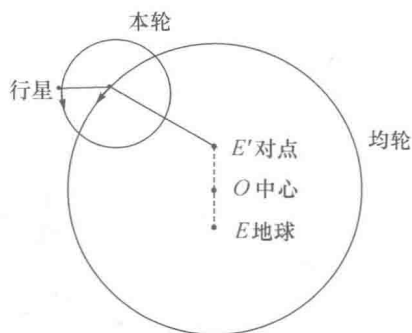


图 1-7 托勒密的对点示意图

3. 阿拉伯天文学

托勒密写成《至大论》之时,雅典文化已趋势微。从公元 476 年西罗马帝国衰亡至公元 15 世纪文艺复兴的 1000 年间,欧洲的天文学几乎没有进展。这段时期,世界范围内天文学的进步主要在阿拉伯世界。

阿拉伯人通过对周边先进文化的大翻译运动,激励了自身天文学的起步与发展。他们很重要的一项贡献是发展了球面三角学,极大地提高了天文学的计算能力。巴格达学派的阿尔巴塔尼(Al-Battani, 约 858—929)第一个在天文计算中引入了正弦函数,发现了球面三角形