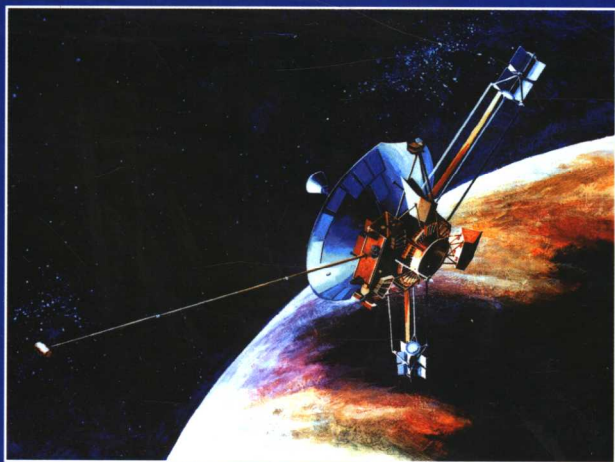


月球探测器 轨道力学

刘林 王歆 著

An Orbital Dynamics of Lunar Probe



国防工业出版社
National Defense Industry Press

月球探测器轨道力学

An Orbital Dynamics of Lunar Probe

刘林 王歆 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

月球探测器轨道力学/刘林,王歆著. —北京:国防工业出版社,2006.9

ISBN 7-118-04636-1

I. 月... II. ①刘... ②王... III. 月球探测器—轨道力学 IV. V476.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 077603 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 $\frac{1}{2}$ 字数 181 千字

2006 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 25.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 68428422

发行邮购:(010) 68414474

发行传真:(010) 68411535

发行业务:(010) 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

前 言

随着航天技术的发展和各种需要,20世纪90年代中后期,深空(行星际空间和地月空间)探测又进入了新的高潮。对我国而言,深空探测的第一站当然是月球。要按计划将深空探测器送入最终目标轨道,完成探测任务,将涉及飞行力学、轨道力学、节约能量的优化和控制等问题,而提供探测器在多种力学因素作用下的运行轨道及其变化规律,则是探测器发射后使其成功进入目标轨道的基本依据,也是优化与控制的重要前提。南京大学天文系在20世纪60年代初就开展了月球飞行的研究工作,近10年来又系统地开展了深空探测器轨道力学的研究工作,并有着近50年的天体力学和轨道力学的教学和研究工作积累。撰写《月球探测器轨道力学》一书的目的就在于为探测器的轨道设计、测控以及相关应用提供理论依据和实用方法,以适应我国深空探测事业发展的需要。

尽管书中主要针对月球探测器的运动问题安排有关内容,但很多基本原理和相应的处理方法,同样适用于解决某些行星际探测器的轨道运动问题。

深空探测器(包括月球探测器)的运动,通常分为三个阶段:近地停泊轨道、飞往目标天体的过渡轨道和环绕目标天体的运行轨道(即形成目标天体的卫星,也称轨道器),也可是绕飞后飞离目标天体返回地球或继续飞往行星际空间。关于近地停泊轨道,它对应一种人造地球卫星(低轨或高轨)的运动,本书将不再涉及这些内容,而是针对后两个飞行阶段涉及的轨道力学及其有关问题安排相应的章节,进行系统的阐述,特别是基本概念与力学原理。

全书分为四个部分共八章。第一部分包括第一章和第二章,主要内容是月球及其运动的背景知识和月球探测器运动涉及的天体力学基础知识。第二部分包括第三章和第四章,主要内容是飞往目标天体(月球)的过渡方式、转移轨道、接近目标天体而还未形成目标天体轨道器之前的双曲线运动,后一内容同样适用于飞离目标天体的运动。第三部分包括第五章、第六章、第七章,主要内容是月球卫星运动的有关问题。由于月球与地球在某些方面(如自转速度、引力场模型等)有明显差别,月球卫星绝不是地球卫星的“克隆”,地球卫星轨道的某些特征以及解决其运动问题的某些方法也不能简单地搬到月球卫星上来,而且,月球还可以作为深空探测中各种目标天体的一种特有类型,即慢自转天体的典型代表,有关内容可推广应用。最后一部分即第八章,尽管是以月球探测器为背景,但其内容与整个深空探测有关,即将探测器定位在太阳系各层次空间的某些特殊点(即限制性三体问题的平动点)上,满足探测的需要,如监测和获取月球背面的信息、太阳活动的状态等。

王歆博士参加了本书前期的大纲制定和第三章、第四章的撰写工作。在书稿完成的最后阶段,我的三位博士研究生张巍、侯锡云和王海红做了大量的整理工作,在此表示衷心的感谢。

本书可以作为有关专业的大学高年级本科生和研究生的基础教材,同时也为从事航天动力学的研究人员和工程技术人员提供必要的专业知识。

刘林

2006年2月

目 录

第一章 月球概况与月球的运动	1
1.1 月球概况	1
1.2 月球的自转与天平动	6
1.3 月球的轨道运动与月球历表	8
参考文献	13
第二章 月球探测器的运动及相应的动力学模型	15
2.1 二体问题与椭圆轨道.....	16
2.2 受摄二体问题的处理方法.....	28
2.3 圆型限制性三体问题的数学模型与 Jacobi 积分.....	33
2.4 圆型限制性三体问题的五个平动解 及其稳定性问题.....	39
参考文献	50
第三章 向月飞行的转移轨道	51
3.1 脉冲式轨道过渡.....	51
3.2 小推力轨道过渡.....	57
3.3 利用光压加速的力学机制.....	64
3.4 利用共线平动点 L_1 的节能过渡问题	67
3.5 转移轨道段的短弧定轨问题.....	68
参考文献	75
第四章 探测器接近月球时的双曲线轨道	77
4.1 二体问题中的双曲线轨道.....	77
4.2 双曲线运动的轨道计算.....	80
4.3 双曲线运动的受摄运动方程.....	81
4.4 月球非球形引力摄动.....	83

参考文献	87
第五章 环月卫星的轨道运动	88
5.1 研究月球卫星运动所采用的参考系	88
5.2 月球卫星受摄运动的数学模型	98
5.3 月球卫星受摄运动方程的分析解法	101
5.4 主要摄动源对应的轨道分析解	103
5.5 月球物理天平动影响的定量分析	117
参考文献	125
第六章 月球卫星的轨道寿命及其有关问题	127
6.1 影响低轨月球卫星轨道偏心率变化的主要摄动源	128
6.2 低轨月球卫星的轨道寿命问题	130
6.3 高轨月球卫星的轨道寿命问题	137
6.4 月球卫星的冻结轨道及有关问题	139
参考文献	142
第七章 月球卫星的精密定轨	143
7.1 观测几何与坐标系转换	143
7.2 力学模型与状态微分方程	149
7.3 状态微分方程右函数的计算	152
7.4 状态估计——批处理定轨	161
7.5 批处理定轨中状态转移矩阵的简化	168
参考文献	170
第八章 探测器定点在平动点附近的运动问题	171
8.1 探测器定点在三角平动点附近的运动状态 及其有关问题	171
8.2 探测器定点在共线平动点附近的动力学条件	177
8.3 共线平动点附近的晕轨道	180
8.4 如何将探测器送往平动点附近的目标轨道	191
参考文献	193
附录一 天文常数	195
附录二 两种月球引力场模型	198

Contents

Chapter 1 Background and the Motion of the Moon	1
1.1 Introduction to Moon	1
1.2 Rotation and Libration of the Moon	6
1.3 Orbit Motion of Moon and Lunar Ephemeris	8
Reference	13
Chapter 2 Motion of Lunar Probe and Corresponding Dynamical Model	15
2.1 Two Body Problem and Elliptic Motion	16
2.2 Solution of Perturbed Two Body Problem	28
2.3 Mathematical Model of Circular Restricted Three Body Problem and Jacobi Integral	33
2.4 Five Libration Points of Circular Restricted Three Body Problem and its Stability	39
Reference	50
Chapter 3 Transfer Orbit to Moon	51
3.1 Impulsive Transfer	51
3.2 Low Thrust Transfer	57
3.3 Mechanism of Using Light Pressure	64
3.4 Low Energy Transfer Using L_1 Point	67
3.5 Orbit Determination of Short Arc of Transfer Orbit	68
Reference	75
Chapter 4 Hyperbolic Orbit	77
4.1 Hyperbolic Orbit in Two Body Problem	77
4.2 Orbit Compute of Hyperbolic Orbit	80

4.3	Perturbed Motion of Hyperbolic Orbit	81
4.4	Non – spherical Perturbation of Moon	83
	Reference	87
Chapter 5	Orbit Motion around the Moon	88
5.1	Reference Frame of the Study of the Motion of Lunar Satellite	88
5.2	Mathematical Model of Perturbed Motion	98
5.3	Analytical Solution of Perturbed Motion of Lunar Satellite	101
5.4	Analytical Solution Due to Main Perturbation Source	103
5.5	Quantity Analysis on the Physical Libration of the Moon	117
	Reference	125
Chapter 6	Orbit Lifetime of Lunar Satellite and the Relevant Problem	127
6.1	Main Sources of Perturbation Affect the Eccentricity Variation	128
6.2	Orbital Lifetime of Low Lunar Satellite	130
6.3	Orbital Lifetime of High Altitude Lunar Satellite	137
6.4	Frozen Orbit of Lunar Satellites and the Corresponding Problems	139
	Reference	142
Chapter 7	Precise Orbit Determination of Lunar Satellites	143
7.1	Geometry of Observation and Coordinates Transformation	143
7.2	Force Model and Differential Equation of the State	149
7.3	Compute of the Right Function of the Differential Equation of the State	152

7.4	State Estimation —Batch Precise Orbit	
	Determination	161
7.5	Simplify of the State Transition Matrix in Batch Precise	
	Orbit Determination	168
	Reference	170
Chapter 8 Stationary Motion of Deep Space Probe		
	around Libration Points	171
8.1	Stationary Motion of Deep Space Probe around	
	Triangular Libration Points	171
8.2	Dynamical Condition for Stationary Motion of Deep	
	Space Probe around Collinear Libration Points	177
8.3	Halo Orbit around Collinear Libration Points	180
8.4	How to Launch the Probe the Target Orbit near	
	Collinear Libration Points	191
	Reference	193
Appendix A Astronomical Constants		
		195
Appendix B Two Models of Lunar Gravity Field		
		198

第一章 月球概况与月球的运动

1.1 月球概况

月球围绕地球运动,是地球唯一的自然卫星,在太阳系内所有的行星——卫星系统中,地球与月球构成的地月系(一起围绕太阳运动)有突出的特点,那就是月球与它的主星地球比较,相对质量和相对体积都是最大,以致可以认为地球和月球组成了一个“双行星”。

为了研究月球探测器的运动,首先要了解月球的基本状况。在这一章里将要介绍一些与探测器运动有关的月球的基本参数和月球运动(包括相对质心的自转运动和其质心相对地球的轨道运动)的已有结论及其有关问题^[1-3]。

1. 地月距离

早在两千余年前,古希腊时代的学者就已尝试测量月球到地球的距离,由于当时并无严格的测量方法,测量精度当然不高。

1751年—1753年,法国天文学家拉卡伊(N. L. LaCaille, 1713—1762)和拉朗德(J. J. Lalande, 1732—1807)首次采用三角测量法,测得的月球地平视差 p_0 值为 $57'$ (见图1.1),与近代测得的数值 $57'2''.6$ 相当接近。图1.1中 E 为地球球心, A 为地面上—测量点, M 为月球球心,正处于 A 点的地平线上,角

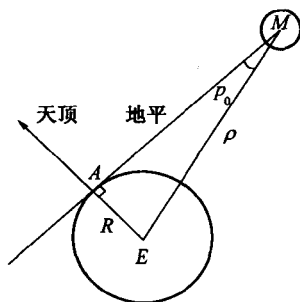


图 1.1 月球地平视差示意图

p_0 为地平视差,即地球半径 R 在月球球心处的张角。如果能测出 p_0 ,便能算得月球的距离 ρ ,有

$$\sin p_0 = R/\rho \quad (1.1)$$

第二次世界大战期间,雷达技术获得了高度发展,战后 1957 年成功地实现了雷达的月球测距,得到准确的月球到地球的距离值是 $384\,402 \pm 1\text{km}$ 。直到 1969 年 7 月美国阿波罗 11 号宇宙飞船实现载人登月飞行,宇航员在月面上安放了后向反射器,同年 8 月 1 日实现了用后向反射器的月球距离测定,使得地月距离的测量精度得到了根本性的提高。目前在月面上共安放了五个后向反射器装置,激光测月的精度已达到厘米级。

现在国际上采用的地月平均距离是 $384\,401\text{km}$,这一距离是地球赤道半径的 60.27 倍。

2. 月球的大小、质量和内部结构

(1) 形状和大小

与地球类似,月球也不是标准的球体,可以近似地用一个三轴椭球体去拟合。根据现代测量的结果,月球参考椭球体的赤道半径为 $1\,738\text{km}$,相当于地球赤道半径的 0.272 5 倍。若将赤道两轴和极轴分别记作 a, b, c ,则有

$$\begin{cases} a - b = 0.31\text{km} \\ a - c = 1.09\text{km} \end{cases} \quad (1.2)$$

由此可知,月球相对地球而言更接近球形,按体积而言,仅为地球的 2%。

显然,月球的角直径也因月球距离的变化而变化,最大时为 $33'31''$,最小时为 $29'22''$ 。

(2) 质量和密度

天文学家测得的地月系质心在地球体内距地心 0.732 3 倍地球赤道半径处,相应的月球质量 M 与地球质量 E 之比为

$$M/E = 1/81.30 \quad (1.3)$$

月球质量的采用值为 7.35×10^{22} kg。

月球的平均密度为 3.34g/cm^3 ，只有地球平均密度 (5.52g/cm^3) 的 60%。由月球的质量和大小可知，其表面重力加速度为 1.623m/s^2 ，只有地球的 1/6。由于月球表面重力小，脱离月球的逃逸速度比地球上的逃逸速度 (11.20km/s) 小得多，只有 2.38km/s ，这个速度远小于气体分子在月面高温下的热运动速度，因此气体能轻易地从月球表面逃逸。宇宙飞船的登月考察证实，月球上几乎没有大气，只有极微量的氦和氩原子，其数密度在 $3 \times 10^7 \sim 6 \times 10^{10}$ 个/ m^3 ，只是地球表面大气密度的 10^{-12} 倍。

(3) 内部结构

月球质量密度的状况也表明其内部结构与地球的内部结构有较大的差别。但也有相似之处，即月球的内部结构亦可分为三个层次：月壳、月幔和月核。月壳在正面（对着地球的一面）的平均厚度约为 65km ，而背面却有 100km 左右。月球岩石圈的厚度大约为 800km ，它包含了月壳和上月幔，岩石圈下部为软流圈，它构成了下月幔。软流圈一直扩展到距月面超过 1400km 的深处，抵达月核。月核的直径可能只有 400km 左右，但是否有月核的存在，目前还有争论。

3. 月球引力场模型

(1) 月球引力场的表达

就月球形状和内部的质量分布而言，通常采用月球重力场这个词。而就探测器绕月球的空间运动而言，不妨还是采用月球引力场这个词。与地球情况类似，由于人们无法给出月球的具体形状和内部质量分布，月球引力场的数学模型同样只能用一个球谐展开式来表达。在月固坐标系（坐标原点在月球质量中心）中，这一形式如下：

$$V = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{R_c}{r} \right)^l \bar{P}_{lm}(\sin\varphi) [\bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \bar{S}_{lm} \sin m\lambda] \right\} \quad (1.4)$$

其中 G 是引力常数, M 是月球质量, GM 称为月心引力常数, R_e 是参考地球体的赤道半径。 r, λ, φ 为空间点在月固系中的球坐标分量: 月心距、经度和纬度。 $\bar{P}_{lm}(\sin\varphi)$ 是 $\sin\varphi$ 的缔合勒让德 (Legendre) 多项式, 当 $m = 0$ 时即退化为一般德勒让德多项式 $\bar{P}_l(\sin\varphi)$ 。这里 $\bar{P}_{lm}(\sin\varphi)$ 是归一化的形式, 相应的球谐展开式系数 \bar{C}_{lm} 和 \bar{S}_{lm} 即归一化 (Normalization) 系数, 它们是月球形状和质量分布的函数, 其值的大小即反映月球形状不规则和质量分布不均匀的程度。 $\bar{P}_{lm}(\sin\varphi), \bar{C}_{lm}$ 和 \bar{S}_{lm} 与相应的非归一化的 $P_{lm}(\sin\varphi), C_{lm}$ 和 S_{lm} 有如下关系:

$$\begin{cases} \bar{P}_{lm}(\sin\varphi) = P_{lm}(\sin\varphi)/N_{lm} \\ \bar{C}_{lm} = C_{lm}N_{lm}, \quad \bar{S}_{lm} = S_{lm}N_{lm} \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\begin{cases} N_{lm} = [(l+m)! / ((1+\delta)(2l+1)(l-m)!)]^{1/2} \\ \delta = \begin{cases} 0, & m = 0 \\ 1, & m \neq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (1.6)$$

式(1.4)表达的是一个非球形引力位, 它有两大部分, 其中第一部分 GM/r 则表达了一个球形引力位, 相当于质量 M 全部集中在月球的质心; 而第二部分球谐函数展开式表达的是对球形引力位的“修正”, 即非球形引力场的表征。在非球形引力位中, $m = 0$ 和 $m \neq 0$ 的两部分具有不同的性质, 故在实际应用中常把它们分开, 即

$$V = V_0 + \Delta V \quad (1.7)$$

$$\Delta V = \Delta V_l + \Delta V_{lm} \quad (1.8)$$

$$\begin{cases} \Delta V_l = \frac{GM}{r} \sum_{l=2}^{\infty} \bar{C}_{l,0} \left(\frac{R_e}{r}\right)^l \bar{P}_l(\sin\varphi) = \\ \frac{GM}{r} \sum_{l=2}^{\infty} (-J_l) \left(\frac{R_e}{r}\right)^l \bar{P}_l(\sin\varphi) \\ \bar{J}_l = -\bar{C}_{l,0} \end{cases} \quad (1.9)$$