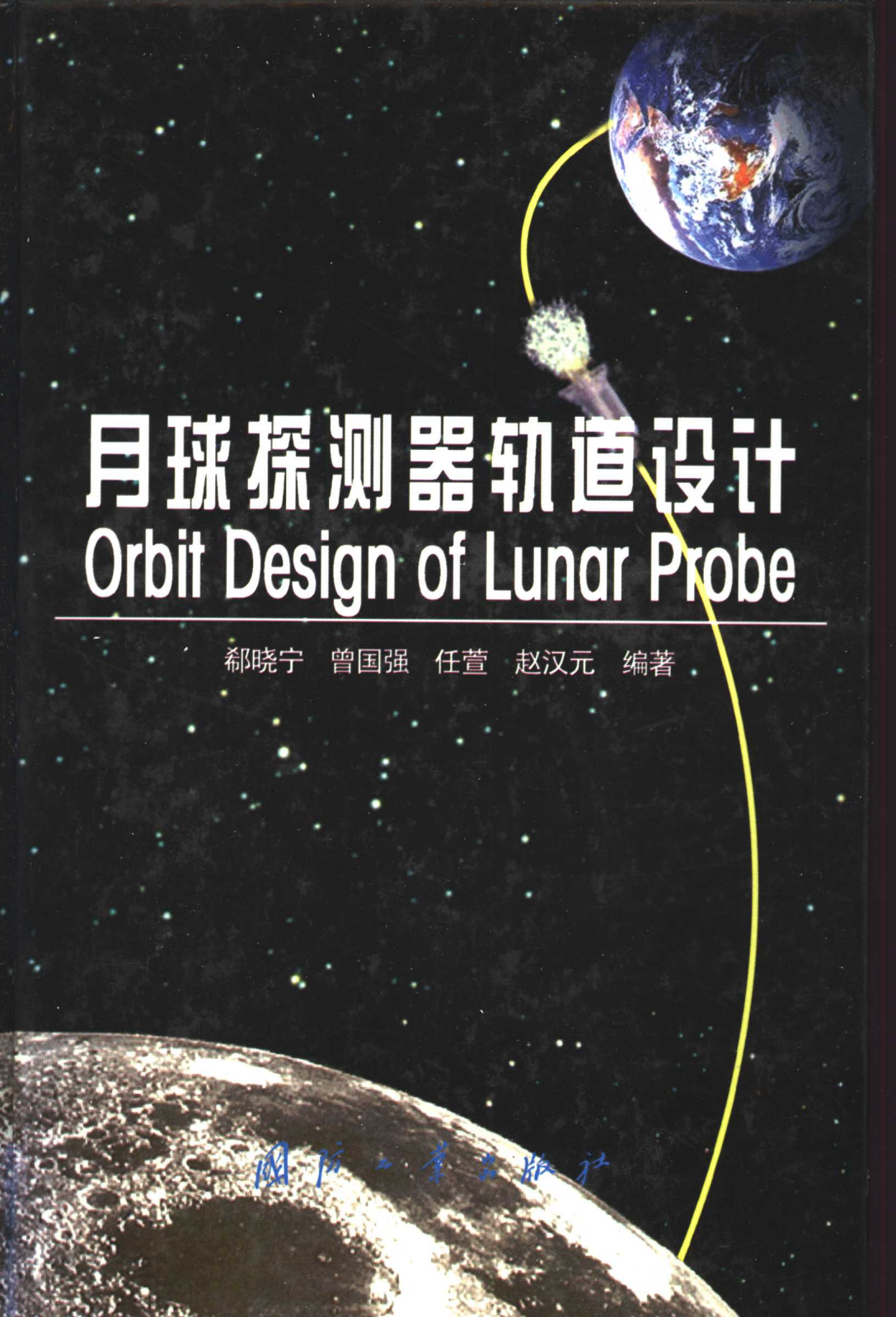




月球探测器轨道设计

Orbit Design of Lunar Probe

郝晓宁 曾国强 任萱 赵汉元 编著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

月球探测器轨道设计/郝晓宁等编著. —北京:国防
工业出版社, 2001. 5
ISBN 7-118-02480-5

I. 月... II. 郝... III. 月球探测器—轨道—设计
IV. V476.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 05418 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)

三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 1/4 265 千字

2001 年 5 月第 1 版 2001 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:23.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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。

IV

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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成
(以姓氏笔划为序)

刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

前 言

月球探测器轨道设计工作是月球探测工程总体和各分系统(如测控系统、发射系统、运载系统和探测器本体等)设计的先导。月球探测工程总体和分系统对轨道提出的一些技术要求,称为轨道的约束条件。典型的轨道约束条件为轨道运动学约束、测控约束和光照约束。

月球探测器轨道设计是以航天器轨道动力学理论和方法为基础,根据轨道设计的约束条件进行轨道的设计与优化。具体内容包括:确定发射窗口;确定发动机需提供的速度增量;确定入轨或变轨时探测器的状态参数,给出标准轨道;确定修正轨道误差的制导方法。

月球探测器在地月空间中的运动轨道大致可分为四种类型:(1)在地球附近的停泊轨道;(2)从地球附近到月球附近的地月转移轨道(即地月转移轨道)及其相反过程的轨道(即月地转移轨道);(3)在月球附近的轨道;(4)在地球上发射和在月球上着陆的轨道以及相反过程的轨道。月球探测器的一种飞行方式为:首先,月球探测器从地面发射至低高度的圆形(或近圆形)地球停泊轨道;然后,在停泊轨道上滑行到合适的位置加速进入地月转移轨道,飞进月球影响球;接着,在月球附近减速,成为圆轨道极月卫星,并飞行数圈;最后,在合适的位置减速,进入着月轨道,实现(硬或软)着月。本书主要针对该种飞行方式的轨道论述了月球探测器轨道设计的方法,还对垂直着月轨道、借助月球近旁转向技术实现绕月后返回地球的探测器轨道和利用小推力的电推进发动机变轨成为月球卫星的轨道进行了论述,并通过一系列的算例对轨道的特性进行定性和定量的分析。

全书共九部分(八章和附录)。第一章概述了月球的一般情况、月球探测的历史和月球探测器轨道设计简介;第二章依据二体和双二体理论建立解析表达式,进行了初步的轨道特性分析和设计;第三章介绍了月球探测器精确轨道计算涉及到的时间系统、坐​​标系统和月球探测器的动力学方程,进行精确的轨道特性分析和设计;第四章专门论述了着月段轨道设计;第五章讨论了窗口选择问题,分析了典型轨道约束条件对窗口选择的影响;第六章叙述了轨道的初、中和末制导;第七章阐述了月球近旁转向技术及其在发射高轨小倾角卫星和高轨逆向卫星中的应用;第八章介绍了月球探测器利用小推力的电推进发动机进行变轨成为月球卫星的技术;附录给出了进行轨道设计采用的天文常数、日月位置的近似计算、月球引力位系数、JPL 的行星/月球历表的简介等。本书第一章由郝晓宁、任萱编写,第二章由曾国强、任萱、郝晓宁编写,第三章由郝晓宁、曾国强编写,第四章由赵汉元、曾国强编写,第五章和附录由郝晓宁编写,第六、七和第八章由曾国强编写。郝晓宁拟定全书内容并审校全稿。

国内关于月球探测器轨道设计的研究成果零星地报道于各专业期刊上,尚未形成系统阐述月球探测器轨道设计的专著。本书是作者多年来研究工作的总结,也试图反映国内外当今研究发展的状况,可作为高等院校航天飞行器设计专业研究生教材,可为航天飞行器设计领域的研究人员和工程设计人员提供一套实用、完整的参考资料。

由于作者水平有限,对书中存在的缺点和不成熟之处,恳请读者批评指正。

编著者

2000年6月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 月球的概况	1
1.1.1 月球的一般特征	1
1.1.2 月球的运动	3
1.1.3 与月球有关的坐标系	12
1.1.4 月球的影响球	15
1.1.5 月球卫星轨道的一般特性	18
1.2 月球探测器的飞行方式和轨道类型	23
1.3 月球探测活动的简史和展望	27
1.3.1 国外月球探测的目前情况	27
1.3.2 月球探测展望	35
1.4 月球探测器轨道设计简介	39
1.4.1 月球探测器轨道设计的目的	39
1.4.2 轨道约束条件	41
第二章 月球探测器轨道初步设计	45
2.1 二体轨道设计	45
2.2 双二体模型下月球卫星地月转移轨道设计	51
2.2.1 月球卫星地月转移轨道设计数学模型	52
2.2.2 参数对地月转移轨道的影响	62
2.3 双二体模型下垂直着月地月转移轨道设计	69
2.3.1 垂直着月地月转移轨道设计数学模型	69
2.3.2 垂直着月轨道与月球卫星轨道比较	72
2.4 入口点分布区域	72
2.4.1 入口点分布区域的确定	72
2.4.2 月球卫星轨道三类入口点分布区域的形状	73

2.4.3 倾角对椭圆速度入口点区域的影响	74
2.4.4 垂直着月轨道三类入口点区域的形状	76
2.5 双二体模型下月球探测器轨道设计算例	77
2.5.1 月球卫星轨道设计算例	77
2.5.2 垂直着月轨道设计算例	80
2.6 月球探测器轨道快速设计	82
2.6.1 月球探测器轨道快速设计数学模型	83
2.6.2 快速设计与精确设计的比较	92
2.6.3 月球探测器轨道的特性分析	94
第三章 月球探测器轨道精确设计	101
3.1 月球探测器精确轨道计算数学模型	101
3.1.1 时间系统	102
3.1.2 坐标系统	103
3.1.3 月球探测器的动力学方程	108
3.1.4 积分器	111
3.2 轨道摄动的影响	112
3.2.1 摄动对地月转移轨道计算精度的影响	112
3.2.2 摄动对月球卫星轨道计算精度的影响	117
3.3 月球卫星标准轨道设计	123
3.4 垂直着月标准轨道设计	130
3.5 精确模型下的月球探测器轨道设计算例	133
3.5.1 月球卫星轨道设计算例	133
3.5.2 垂直着月轨道设计算例	140
第四章 月球探测器着陆段轨道设计	145
4.1 从月球卫星轨道进行的软着陆	146
4.1.1 从月球卫星轨道进行的软着陆范例	146
4.1.2 月球卫星软着陆最佳制动方案	151
4.2 从垂直着月轨道上进行的软着陆	158
4.2.1 从垂直着月轨道上进行的软着陆范例	158
4.2.2 垂直着月软着陆制动方案	159
第五章 窗口选择	166
5.1 光照约束的影响	167

5.2	测控约束的影响	170
5.3	轨道运动学约束的影响	176
5.3.1	月球卫星轨道约束和着月轨道约束	176
5.3.2	地球停泊轨道约束和地月转移轨道约束	180
5.4	窗口选择算例	186
第六章	月球探测器的制导问题	190
6.1	月球探测器的初制导问题	191
6.1.1	误差源及其影响	191
6.1.2	初制导方案	192
6.1.3	初制导的统计分析	198
6.2	月球探测器的中途制导问题	199
6.3	中途制导策略与精度	206
6.3.1	中途制导策略	206
6.3.2	中途制导计算结果	211
6.3.3	中途制导统计分析	213
6.4	月球探测器的末制导问题	216
第七章	月球近旁转向技术	221
7.1	近旁转向的成功应用	221
7.2	月球近旁转向初步分析	224
7.2.1	平面情况近旁转向初步分析	224
7.2.2	空间情况近旁转向初步分析	228
7.3	精确模型下的近旁转向算例	236
7.3.1	发射地球静止卫星算例	236
7.3.2	发射地球高轨逆向卫星算例	240
7.3.3	算例分析	241
第八章	月球卫星最优小推力变轨	243
8.1	研究目的	243
8.2	最优转移问题的分解	245
8.3	轨道优化的数学模型	247
8.3.1	小推力轨道转移数学模型	247
8.3.2	遗传算法概述	248

8.4 冲量情况下的轨道优化	249
8.5 小推力情况下的轨道优化	253
8.5.1 小推力转移轨道优化的第一步	253
8.5.2 小推力转移轨道优化的第二步	258
8.5.3 发动机参数对最优转移轨道的影响	260
附录	263
附录 A 天文常数	263
附录 B 日月位置的近似计算	264
附录 C 儒略日和格里历日期之间的转换	268
附录 D JPL 的行星/月球历表	270
附录 E 引力加速度计算公式	272
附录 F 月球引力位系数	276
附录 G 主要符号表	302
参考文献	308

CONTENTS

CHAPTER 1 INTRODUCTION	1
1.1 General Situation of the Moon	1
1.1.1 General Characteristics of the Moon	1
1.1.2 Movement of the Moon	3
1.1.3 Coordinate Systems related to the Moon	12
1.1.4 Influence Sphere of the Moon	15
1.1.5 General Characteristics of Lunar Satellite Orbit	18
1.2 Flying Modes and Orbital Types of Lunar Probe	23
1.3 History and Prospect of Lunar Detection	27
1.3.1 Current Situation of Overseas Lunar Detection	27
1.3.2 Prospect of Lunar Detection	35
1.4 Introduction of Lunar Probe Orbit Design	39
1.4.1 Objective of Lunar Probe Orbit Design	39
1.4.2 Constraint Conditions of Orbit	41
CHAPTER 2 PRELIMINARY DESIGN OF LUNAR PROBE ORBIT	45
2.1 Design of Two-Body Orbit	45
2.2 Design of Earth-Moon Transfer Orbit for Lunar Satellite under Double Two-Body Model	51
2.2.1 Mathematical Model for Design of Transfer Orbit of Lunar Satellite	52
2.2.2 Influence of Parameters on Earth-Moon Transfer Orbit	62
2.3 Design of Earth-Moon Transfer Orbit for Vertical Moon-Landing under Double Two-Body Model	69
2.3.1 Mathematical Model for Design of Transfer Orbit of Vertical	

Moon-Landing	69
2.3.2 Comparison between Vertical Moon-Landing Orbit and Lunar Satellite Orbit	72
2.4 Analysis about the Distribution Area of Entry Point ...	72
2.4.1 Determination of Distribution Area of Entry Point	72
2.4.2 Shapes of Lunar Satellite's Three Kinds of Distribution Area of Entry Point	73
2.4.3 Influence of Inclination of Lunar Satellite on Distribution Area of Entry Point of Elliptical Velocity	74
2.4.4 Shapes of Vertical Moon-Landing Orbit's Three Kinds of Distribution Area of Entry Point	76
2.5 Examples of Lunar Probe Orbit Design under Double Two-Body Model	77
2.5.1 Example of Lunar Satellite Orbit Design	77
2.5.2 Example of Vertical Moon-Landing Orbit Design	80
2.6 Fast Design Method of Lunar Probe Orbit	82
2.6.1 Mathematical Model for Fast Design of Lunar Probe Orbit ...	83
2.6.2 Comparison between Fast Design and Precise Design	92
2.6.3 Characteristics Analysis of Earth-Moon Transfer Orbit	94
CHAPTER 3 PRECISE DESIGN OF LUNAR PROBE	
ORBIT	101
3.1 Precise Orbit Calculating Model of Lunar Probe	101
3.1.1 Time System	102
3.1.2 Coordinate System	103
3.1.3 Dynamic Equation of Lunar Probe	108
3.1.4 Integrator	111
3.2 Influence of Orbit Perturbation	112
3.2.1 Influence of Perturbation on Precision of Earth-Moon Transfer Orbit Calculation	112
3.2.2 Influence of Perturbation on Precision of Lunar Satellite Orbit Calculation	117
3.3 Design of Nominal Orbit of Lunar Satellite	123

3.4	Design of Nominal Orbit of Vertical Moon-Landing	130
3.5	Examples of Lunar Probe Orbit Design under Precise Model	133
3.5.1	Example of Lunar Satellite Orbit Design	133
3.5.2	Example of Vertical Moon-Landing Orbit Design	140
CHAPTER 4 DESIGN OF MOON-LANDING ORBIT FOR LUNAR PROBE		145
4.1	Soft-Landing from Lunar Satellite Orbit	146
4.1.1	Examples of Soft-Landing from Lunar Satellite Orbit	146
4.1.2	Optimum Braking Scheme of Lunar Satellite Soft-Landing	151
4.2	Soft-Landing from Vertical Moon-Landing Orbit	158
4.2.1	Examples of Soft-Landing from Vertical Moon-Landing Orbit	158
4.2.2	Optimum Braking Scheme of Vertical Soft-Landing	159
CHAPTER 5 LAUNCH WINDOW SELECTION		166
5.1	Influence of Sun lighting Constraint	167
5.2	Influence of Tracking Control Constraint	170
5.3	Influence of Orbit Kinematic Constraint	176
5.3.1	Constraints of Lunar Satellite Orbit and Moon-Landing Orbit	176
5.3.2	Constraints of Earth Parking Orbit and Earth-Moon Transfer Orbit	180
5.4	Examples of Windows Selection	186
CHAPTER 6 GUIDANCE OF LUNAR PROBE		190
6.1	Initial Guidance of Lunar Probe	191
6.1.1	Error Sources and Their Influence	191
6.1.2	Initial Guidance Scheme	192
6.1.3	Statistic Analysis of Initial Guidance	198
6.2	Midcourse Guidance of Lunar Probe	199
6.3	Strategy and Precision Analysis of Midcourse	

Guidance	206
6.3.1 Midcourse Guidance Strategy	206
6.3.2 Calculating Results of Midcourse Guidance	211
6.3.3 Statistic Analysis of Midcourse Guidance	213
6.4 Terminal Guidance of Lunar Probe	216
CHAPTER 7 LUNAR SWING-BY TECHNIQUE	221
7.1 Successful Application of Swing-by	221
7.2 Preliminary Analysis of Lunar Swing-by	224
7.2.1 Preliminary Analysis of Lunar Swing-by in Plane Case	224
7.2.2 Preliminary Analysis of Lunar Swing-by in Space Case	228
7.3 Examples of Swing-by under Precise Model	236
7.3.1 Example of Launching Geostationary Satellite	236
7.3.2 Example of Launching High-Latitude Retrograde Satellite	240
7.3.3 Results Analysis	241
CHAPTER 8 OPTIMUM LOW-THRUST ORBIT	
MANEUVER OF LUNAR SATELLITE	243
8.1 Research Purpose	243
8.2 Decomposition of Optimum Transfer	245
8.3 Mathematical Model of Orbit Optimization	247
8.3.1 Mathematical Model of Low-Thrust Orbit Maneuver	247
8.3.2 Summarize of Genetic Algorithm	248
8.4 Orbit Optimization in Impulse Situation	249
8.5 Orbit Optimization in Low-Thrust Situation	253
8.5.1 First Step of Low-Thrust Transfer Orbit Optimization	253
8.5.2 Second Step of Low-Thrust Transfer Orbit Optimization	258
8.5.3 Influence of Propulsion Parameters on Optimal Transfer	
Orbit	260
APPENDIX	263
Appendix A Astronomical Constants	263
Appendix B Approximate Calculate of Position of the Sun	

	and the Moon	264
Appendix C	Transition between Julian Day and Gregorian Calendar	268
Appendix D	JPL Planet/Moon Ephemeris	270
Appendix E	Calculating Formulas of Gravitational Acceleration	272
Appendix F	Coefficients of Lunar Gravitational Potential	276
Appendix G		302
Reference		308

第一章 绪 论

月球,俗称“月亮”,古时又称“太阴”,是地球唯一的天然卫星(在天文学中常用符号 $\odot$ 表示),是除流星和人造天体之外离我们最近的天体,很自然地成为空间探测的第一个目标。

在讨论月球探测器轨道设计之前,本章首先介绍月球的概况、月球探测器的飞行方式和轨道类型、月球探测活动的历史和展望以及月球探测器轨道设计简介。

1.1 月球的概况

1.1.1 月球的一般特征

对月球的精密观测表明,月球的平均半径 $R_L = 1738\text{km}$, 约为地球半径的 $3/11$ 。月球并不是理想的正球体,令其指向地球方向、轨道运动方向和极方向的半径分别为 a 、 b 和 c , 则 $a - c = 1.09\text{km}$ 、 $a - b = 0.31\text{km}$ 、 $b - c = 0.78\text{km}$,但在一般计算中可将月球作为圆球看待。

月球的体积为 $2.2 \times 10^{25}\text{cm}^3$, 约为地球体积的 $1/49$ 。

月球的质量 $m_L = 7.35 \times 10^{22}\text{kg}$, 令月地质量比为 μ , 则 μ 约为 $1/81.3$ 。这一质量比远大于太阳系中任何其它双星系统的质量比。

月球的平均密度为 3.34g/cm^3 , 约为地球平均密度的 $3/5$ 。

月球表面的引力加速度为 1.62m/s^2 , 约为地球表面引力加速度的 $1/6$ 。

月球上的逃逸速度约为 2.4km/s , 约为地球上逃逸速度的 $1/5$ 。