

QJ

中华人民共和国航天行业标准

FL 1610

QJ 20608—2016

月球探测轨道设计 环月轨道设计准则

Orbit design of lunar exploration—
Design criteria for lunar satellite orbit

2016—12—14 发布

2017—03—01 实施

国家国防科技工业局 发布

前 言

本标准由中国航天科技集团公司提出。

本标准由中国航天标准化研究所归口。

本标准起草单位：北京空间飞行器总体设计部、中国航天标准化研究所。

本标准主要起草人：周文艳、汪中生、刘德成、高 珊、雪 丹、泉浩芳。

月球探测轨道设计 环月轨道设计准则

1 范围

本标准规定了环月轨道的设计准则，包括环月轨道设计的依据、内容与原则，以及环月轨道设计的方法和程序等。

本标准适用于环月遥感任务和月球软着陆任务的月球探测器的环月轨道设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包含勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GJB 1702 卫星轨道术语

GJB 2701 卫星轨道设计准则

QJ 20001 月球探测工程术语

QJ 20002 月球探测器坐标系

3 术语和定义

GJB 1702 和 QJ 20001 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

环月轨道 lunar satellite orbit

围绕月球飞行的轨道。

3.2

动力下降轨道 power descending orbit

软着陆探测器在环月轨道上运行到指定位置，发动机点火直至软着陆到月面的有动力飞行轨迹。

注：动力下降轨道的起始点一般称为动力下降初始点。

3.3

β 角 beta angle

探测器到太阳的矢量与探测器轨道面的夹角。探测器到太阳矢量沿轨道面法向时， β 角为正，反之为负。

4 一般要求

4.1 设计依据

环月轨道设计要满足探测器飞行使命的有关要求，设计依据文件包括任务书、各系统间接口要求、轨道设计输入文件。在轨道设计的全过程中应充分考虑工程总体需求、地面测控系统能力、运载火箭的性能、地面应用系统的配置，以及月球探测器有关分系统的要求，主要包括以下约束：

- a) 探测任务约束：环月轨道设计是为了完成特定任务的轨道设计，不同任务应选择不同轨道类型。对于全月面遥感任务，一般选择环月圆极轨道进行探测。

- b) 工程总体对发射窗口的要求：对于环月遥感任务，环月轨道的初始 β 角决定了发射窗口；对于软着陆任务，着陆光照条件决定了发射窗口，着陆点决定了环月轨道的初始运行方向。
- c) 测控系统的约束：根据测控系统对环月轨道的测控弧段要求及测控精度，确定环月变轨策略。
- d) 探测器系统的约束：主要包括有效载荷、热控、电源、制导导航与控制、推进系统的约束。

4.2 设计原则

设计原则应符合GJB 2701的规定，遵循协调性、优化设计、继承性、先进性和现实性的原则，同时要针对环月轨道的特点，遵循可扩展性，即对任务完成后的扩展任务进行设计，最大限度地发挥探测器的能力。

4.3 环月轨道设计的主要任务和内容

环月轨道设计的主要任务是在满足设计约束的前提下，通过对轨道设计各相关参数进行分析，给出满足任务要求的轨道方案，并对轨道方案进行优化，达到速度增量最优。在研制各阶段的任务安排可参照GJB 2701中的相关规定执行。

环月轨道设计的主要内容包括：

- a) 环月轨道参数选择；
- b) 环月轨道演化分析；
- c) 环月轨道误差分析；
- d) 环月轨道任务几何分析；
- e) 速度增量预算；
- f) 环月轨道控制策略设计。

5 详细要求

5.1 动力学模型的选择

5.1.1 概述

根据轨道特点以及对于计算精度的不同要求，选用合适的动力学模型，在月球中心引力场模型基础上，考虑5.1.2~5.1.4这些主要的摄动因素。

5.1.2 月球引力摄动

月球引力摄动是环月轨道的主要摄动，应根据轨道特点及计算精度不同要求采用相应的月球引力场模型的阶数和级数。月球引力势函数见公式（1）。

$$\Phi(r, \varphi, \lambda) = \frac{\mu}{r} + \frac{\mu}{r} \sum_{n=1}^{\infty} C_n^0 \left(\frac{R}{r} \right)^n P_n^0(u) + \frac{\mu}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n \left(\frac{R}{r} \right)^n P_n^m(u) [S_n^m \sin m\lambda + C_n^m \cos m\lambda] \cdots \cdots (1)$$

式中：

- Φ ——月球引力球谐函数；
- r ——月心距离的数值，单位为千米（km）；
- φ, λ ——分别为探测器当前位置的月球纬度和经度的数值，单位为度（°）；
- μ ——月球引力常数，单位为千米三次方每秒二次方（ km^3/s^2 ）；
- C_n^m, S_n^m ——分别为带谐和田谐系数（ m, n 为阶数和级数）；
- R ——月球平均赤道半径的数值，单位为千米（km）；
- P_n^m ——勒让德多项式（自变量为 $u = \sin \phi$ ）。

月球非球形摄动的引力加速度按公式（2）计算。

$$a_g(r, t) = \nabla \Phi(r, t) \dots\dots\dots (2)$$

式中:

a_g ——月球非球形摄动的引力加速度, 单位为千米每秒二次方 (km/s^2);

t ——时间, 单位为秒 (s)。

5.1.3 日地引力摄动

环月轨道要考虑日地摄动, 对应的摄动加速度按公式 (3) 计算。

$$a_{se}(r, t) = -\mu_e \left(\frac{r_{e-b}}{|r_{e-b}|^3} + \frac{r_{m-e}}{|r_{m-e}|^3} \right) - \mu_s \left(\frac{r_{s-b}}{|r_{s-b}|^3} + \frac{r_{m-s}}{|r_{m-s}|^3} \right) \dots\dots\dots (3)$$

式中:

a_{se} ——摄动加速度, 单位为千米每秒二次方 (km/s^2);

μ_e ——地球引力常数, 单位为千米三次方每秒二次方 (km^3/s^2);

μ_s ——太阳引力常数, 单位为千米三次方每秒二次方 (km^3/s^2);

r_{e-b} ——地球到探测器的矢径, 单位为千米 (km);

r_{m-e} ——月球到地球的矢径, 单位为千米 (km);

r_{s-b} ——太阳到探测器的矢径, 单位为千米 (km);

r_{m-s} ——月球到太阳的矢径, 单位为千米 (km)。

5.1.4 太阳光压摄动

环月轨道要考虑太阳光压摄动, 太阳光压系数按公式 (4) 计算。

$$C_{srp} = \gamma P_s a^2 \frac{A}{M} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

C_{srp} ——太阳光压系数, 单位为立方米每秒二次方 (m^3/s^2);

γ ——阴影因子, 无量纲;

P_s ——距离太阳一个天文单位处的光压, 即 $P_s = 4.56 \times 10^{-6} \text{N/m}^2$;

a ——一个天文单位的距离 1.4959787×10^{11} , 单位为米 (m);

A ——垂直于太阳光的探测器截面积, 单位为平方米 (m^2);

M ——探测器质量, 单位为千克 (kg)。

太阳光压摄动加速度按照公式 (5) 计算。

$$a_{srp} = C_{srp} \frac{r_{b-s}}{|r_{b-s}|^3} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

a_{srp} ——太阳光压摄动加速度, 单位为米每秒二次方 (m/s^2);

r_{b-s} ——探测器到太阳的矢径, 单位为米 (m)

5.1.5 坐标系选择

环月轨道设计所需要的坐标系应从QJ 20002中选取, 包括:

- a) 地心 (第一) 赤道坐标系/地心惯性系;
- b) 月心惯性坐标系;
- c) 月心 (第一) 赤道坐标系;
- d) 月心 (第二) 赤道坐标系/月心固连坐标系;

e) 探测器轨道坐标系。

5.2 环月轨道设计

5.2.1 轨道参数选择

5.2.1.1 环月遥感任务

对于遥感任务的环月轨道，确定轨道参数时应考虑下列主要因素：

- a) 轨道高度的选择：根据相机月面分辨率、相机月面幅宽、旁向重叠率、回归周期、轨道演化和速度增量、阴影时长确定轨道高度；确定轨道高度也要考虑测定轨精度和轨控误差；
- b) 轨道倾角的选择：根据遥感任务对区域覆盖的需求、相机幅宽、旁向重叠率、轨道摄动特性确定轨道倾角；
- c) 近月点幅角和偏心率的选择：根据轨道演化分析结果以及轨控频次要求，确定环月轨道的近月点幅角和偏心率；
- d) 升交点赤经的选择：根据初始环月轨道确定升交点赤经。

5.2.1.2 月球软着陆任务

对于月球软着陆任务的环月轨道，包括环月圆轨道和环月椭圆轨道，轨道参数的选择应考虑下列主要因素：

- a) 轨道高度的选择：根据动力下降点高度和速度、速度增量确定环月圆轨道的高度；
- b) 动力下降起始点高度的选择：动力下降段可用推进剂决定动力下降起始点高度的上限，月面地形起伏、测定轨精度、引力摄动导致的近月点高度降低以及降轨变轨误差决定动力下降起始点高度的下限；
- c) 轨道倾角的选择：根据着陆点位置、着陆方向和着陆机会确定轨道倾角；
- d) 升交点赤经的选择：根据着陆点位置和着陆光照条件确定环月轨道升交点赤经；
- e) 椭圆轨道的近月点幅角的选择：根据着陆点位置确定近月点幅角。

5.2.2 轨道演化分析

对全任务期间的环月轨道进行轨道预报，分析近月点幅角、近月点高度、轨道半长轴、偏心率和月面星下点轨迹等与探测器安全性和目标任务要求相关的轨道参数变化范围。

5.2.3 轨道误差分析

根据测控系统的定轨精度和探测器的变轨精度，分析近月点幅角、近月点高度、轨道半长轴和偏心率等与探测器安全性和目标任务要求相关的轨道参数变化范围。

5.2.4 任务几何分析

5.2.4.1 地面站可见弧段计算

地面站可见弧段计算应考虑下列因素：

- a) 地面站位置；
- b) 地面站天线的最低仰角；
- c) 月球遮挡。

5.2.4.2 光照条件分析

根据平台、载荷各设备使用要求，光照条件分析应给出如下结果：

- a) 标称轨道的阴影和光照时间；
- b) 轨道误差情况下的阴影和光照时间；
- c) 月食期间的光照条件。

5.2.4.3 其他几何分析

其他的几何条件分析包括：

- a) β 角；
- b) 太阳—探测器—地球夹角（SPE）和太阳—地球—探测器夹角(SEP)；
- c) 着陆区或成像区太阳高度角；
- d) 太阳电池阵、敏感器、天线等对太阳、地球和月球的方位要求。

5.2.5 速度增量预算

根据环月轨道演化分析结果、环月轨道维持频率需求、环月轨道维持量计算，以及任务需求计算环月轨道运行所需的速度增量。

5.2.6 轨控策略设计

轨控策略的设计应满足如下要求：

- a) 根据环月轨道任务要求及飞行阶段划分确定轨道机动过程；
- b) 根据轨道演化规律、误差分析情况确定轨道维持过程；
- c) 轨控应在满足最长点火时间、变轨频次、探测器速度增量需求的前提下，选择速度增量最小的变轨方案；
- d) 变轨时机应满足阴影时长的要求；
- e) 尽可能满足变轨事件的测控要求。

5.3 环月轨道设计验证

应采用不同单位独立研制出的不同软件工具对轨道设计结果进行仿真分析和验证。

5.4 环月轨道设计流程

环月轨道的设计流程见图1。在环月轨道设计的过程中，在某些环节可能有迭代和反复的情况出现。

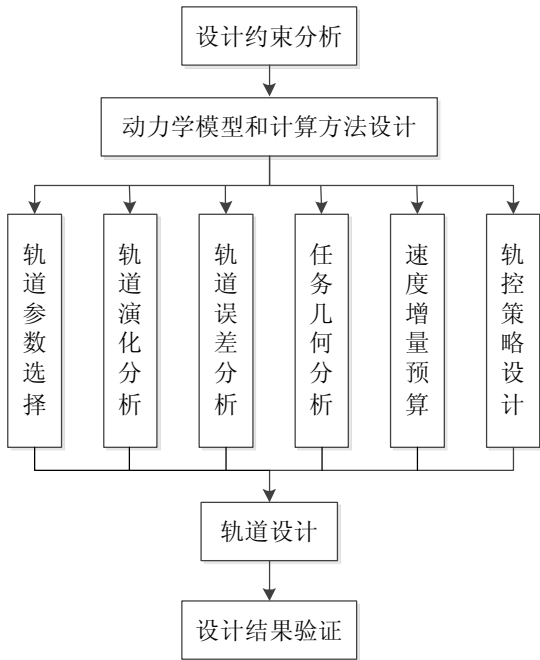


图 1 环月轨道设计

中华人民共和国航天行业标准

**月球探测轨道设计
环月轨道设计准则**

QJ 20608—2016

*

中国航天标准化研究所出版

北京市丰台区小屯路 89 号

邮政编码：100071

中国航天标准化研究所

印务发行部印刷、发行

版权专有 不得翻印

*

2017 年 2 月出版

定价：16 元