

# 绕月探测卫星飞行控制

吴伟仁 周建亮 高 薇 著



中国宇航出版社

# 绕月探测卫星飞行控制

吴伟仁 周建亮 高 薇 著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

绕月探测卫星飞行控制/吴伟仁, 周建亮, 高薇著.

—北京: 中国宇航出版社, 2012. 2

ISBN 978-7-5159-0236-4

I. ①绕… II. ①吴… ②周… ③高… III. ①月球探测器—  
飞行控制 IV. ①V476.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 138067 号

责任编辑 张铁钧 刘亚静 责任校对 王妍 封面设计 文道思

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830  
(010) 68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010) 68371900 (010) 88530478 (传真)  
(010) 68768541 (010) 68767294 (传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑  
(010) 68371105 (010) 62529336

承印 北京国中画印刷有限公司

版次 2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230 开本 1/32

印张 8.75 字数 242 千字

书号 ISBN 978-7-5159-0236-4

定价 68.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

## 序

自古以来，月球引发了人们无尽的遐想，探索月球一直是人类的美好愿望和不懈追求。作为地球唯一的天然卫星，月球以其独特的空间位置和潜在资源，成为人类开展深空探测的首选目标。实施探月工程是党中央、国务院做出的重大战略决策，作为我国科技创新的标志性工程之一，在 2020 年前将实现“绕、落、回”的目标。嫦娥 1 号卫星圆满完成绕月探测任务后，2010 年 10 月 1 日，嫦娥 2 号卫星成功发射，直接地月转移，成功环月，有效探测，开展了一系列技术试验验证，获得了迄今为止最高分辨率的全月图，并飞离月球，奔赴日地拉格朗日  $L_2$  点，实现了我国空间探测由 40 万千米到 150 万千米的跨越。

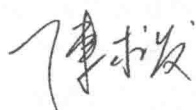
火箭发射、星箭分离以后，飞行控制成为绕月探测卫星飞行任务实施的主线和影响成败的关键。嫦娥 2 号卫星的飞行控制是一项多学科、高技术集成的系统工程，与近地航天器飞行控制相比较，具有飞行距离远、通信时延长、技术动作多、控制精度高、实施风险大等特点，在飞行控制系统设计、工作模式、实施方案、风险分析、故障预案等诸方面达到了我国航天器飞行控制的最高水平，这也是工程总体和测控通信、卫星、地面应用等各系统密切配合、大力协同取得的成果。

本书紧密结合嫦娥 2 号卫星飞行控制的实施，系统论述了绕月探测卫星飞行控制的技术基础和技术体系，全面阐述了飞行控制的总体技术和各阶段的实施要点，是对我国绕月探测卫星飞行控制过程中积累的专业技术和经验的重要归纳与总结，也是我国第一部系

统全面地阐述绕月探测卫星飞行控制技术的论著。本书将对参与绕月探测卫星飞行控制的各系统进行技术交流、优化设计发挥重要作用，也能为后续月球探测及深空探测任务的飞行控制提供有益借鉴和重要参考。

随着探月工程和后续深空探测工程的实施，飞行控制面临更高的要求、更新的技术，需要我们不断积累、勇于创新，去迎接新的挑战。衷心祝愿我国航天事业蓬勃发展，再创辉煌。

探月工程总指挥



2011年9月

## 前 言

飞行控制是指地面飞行控制中心通过航天测控网对飞行器实施的一系列过程操作，主要内容是进行飞行器飞行期间的轨道测量、状态监视和上行控制，以及飞行器探测期间的任务规划实施与操作管理。

嫦娥2号任务的实施是一项技术复杂且可靠性要求极高的系统工程。自火箭分离以后，飞行控制始终是任务实施的主线和影响任务成败的关键。嫦娥2号任务飞行控制特点：一是测控距离远，飞行时间长，技术状态多，控制精度高，实时性要求强；二是以飞行控制中心为实施主体，卫星系统、测控通信系统、地面应用系统天地一体、统筹协调，接口关系复杂；三是系统风险大，可靠性要求极高。针对这些特点和任务具体要求，首先要建设一个健全高效的飞行控制系统，其次要设计科学有效的工作模式，第三要制定合理可行的飞行控制方案并可靠实施。探月工程是一项高风险的事业，必须充分预估可能发生的各类风险，识别各类故障模式，并制订相应的故障预案，以确保飞行任务的成功。

本书结合嫦娥2号卫星飞行控制工程实际，系统论述了绕月探测卫星飞行控制的技术基础，以飞行阶段为主线，针对发射段、地月转移轨道段、月球捕获轨道段、环月初期运行轨道段、试验轨道段、环月长期运行轨道段等各阶段的控制特点，全面阐述了飞行控制的总体技术和实施要点，最后介绍了应急飞行模式和飞赴日地拉格朗日 $L_2$ 点的飞行控制。

本书初稿完成于2010年年底，随着嫦娥2号卫星飞行控制方案的实施，先后进行了多次修改和补充完善，在此过程中，北京航天

飞行控制中心的赵凤才、陈翔、彭德云、李立、崔雁、刘勇、周开民、张强、穆冬，探月与航天工程中心的刘彤杰、节德刚、宁远明等同志参与了部分编写、修改和文图整理工作。探月与航天工程中心，总装备部机关、有关基地和研究所，航天科技集团公司五院，中科院国家天文台及北京航天飞行控制中心的领导和专家提出了许多宝贵意见，在此一并致谢。

本书首次重点论述了我国绕月探测卫星的飞行控制原理与技术，可作为后续探月工程和深空探测器飞行控制的有益借鉴，也可供从事深空探测领域研究的科研工作者和高等院校相关专业师生参考。

由于本书涉及的学科范围广、技术复杂，且无同类书籍可资参考，加之编写时间仓促，如有谬误之处，恳请读者批评指正。

作者

2011年8月

# 目 录

第 1 章 飞行控制概述 .....	1
1.1 嫦娥 2 号工程概述 .....	1
1.1.1 工程目标和科学探测任务 .....	1
1.1.2 主要技术状态 .....	2
1.2 飞行控制规划 .....	6
1.2.1 发射段 .....	6
1.2.2 地月转移轨道段 .....	7
1.2.3 月球捕获轨道段 .....	8
1.2.4 环月轨道段 .....	9
1.3 测控支持条件 .....	11
1.3.1 测控网组成 .....	11
1.3.2 飞行任务关键弧段跟踪情况 .....	13
1.3.3 测控工作模式 .....	22
1.4 飞行控制系统 .....	31
1.4.1 系统组成 .....	31
1.4.2 系统验证 .....	41
第 2 章 飞行控制技术基础 .....	46
2.1 飞行控制计划 .....	46
2.1.1 飞行控制计划工作模式 .....	46
2.1.2 飞行控制计划分类 .....	47
2.1.3 飞行控制计划设计 .....	49
2.1.4 飞行控制计划生成 .....	50



2.1.5	飞行控制计划验证 .....	50
2.1.6	飞行控制计划实施 .....	51
2.2	遥测数据处理 .....	51
2.2.1	遥测数据分类 .....	52
2.2.2	遥测数据模式 .....	52
2.2.3	遥测数据接收与处理 .....	54
2.2.4	遥测数据监控显示 .....	56
2.3	上行控制 .....	58
2.3.1	遥控工作模式 .....	58
2.3.2	遥控信息类别 .....	58
2.3.3	遥控信息生成 .....	59
2.3.4	遥控指令链设计 .....	60
2.3.5	遥控信息发送 .....	60
2.3.6	遥控信息执行情况比判 .....	61
2.4	轨道确定与控制 .....	63
2.4.1	坐标系定义 .....	63
2.4.2	轨道测量与确定 .....	65
2.4.3	轨道控制策略 .....	77
2.4.4	轨道预报 .....	80
2.4.5	轨道控制实施 .....	80
2.5	姿态监视与控制 .....	82
2.5.1	姿态数据的坐标系约定 .....	82
2.5.2	卫星姿态监视 .....	82
2.5.3	卫星姿态控制 .....	84
<b>第3章</b>	<b>发射段飞行控制 .....</b>	<b>89</b>
3.1	状态监视 .....	89
3.1.1	运载火箭飞行状态监视 .....	89
3.1.2	卫星状态监视 .....	90
3.2	推进管路排气控制 .....	91

3.3	发射段弹道测量与确定 .....	91
3.4	测控站引导原则 .....	93
3.5	关键事件的确定和使用 .....	94
3.5.1	起飞事件 .....	94
3.5.2	星箭分离事件 .....	94
<b>第4章</b>	<b>地月转移轨道段飞行控制 .....</b>	<b>96</b>
4.1	入轨控制 .....	98
4.1.1	初轨确定与入轨判断 .....	98
4.1.2	太阳翼和定向天线展开控制 .....	99
4.1.3	卫星初始状态设置 .....	102
4.1.4	加速度计零位标定 .....	105
4.1.5	星敏感器标定 .....	106
4.2	中途修正 .....	107
4.2.1	实施原则 .....	108
4.2.2	修正轨控策略 .....	109
4.2.3	控制参数计算 .....	110
4.2.4	实施流程 .....	112
4.3	技术试验 .....	114
4.3.1	监视相机成像试验 .....	114
4.3.2	紫外敏感器导航/拍图试验 .....	118
4.3.3	X频段测控技术试验 .....	121
4.4	星地时间同步控制 .....	126
4.5	VLBI测轨 .....	128
4.5.1	VLBI工作模式 .....	128
4.5.2	VLBI信标机使用原则 .....	129
4.6	科学载荷设备控制 .....	130
<b>第5章</b>	<b>月球捕获轨道段飞行控制 .....</b>	<b>132</b>
5.1	控制策略 .....	133

5.2	控制参数计算 .....	135
5.2.1	第1次制动量分析 .....	136
5.2.2	近月点高度分析 .....	138
5.2.3	环月轨道平面机动控制参数计算 .....	139
5.2.4	近月制动控制参数计算 .....	142
<b>第6章</b>	<b>环月初期运行轨道段飞行控制 .....</b>	<b>143</b>
6.1	卫星平台在轨测试 .....	145
6.1.1	第1阶段 .....	145
6.1.2	第2阶段 .....	145
6.1.3	第3阶段 .....	146
6.1.4	第4阶段 .....	146
6.2	建立对月定向姿态控制 .....	147
6.2.1	时机确定 .....	147
6.2.2	控制参数计算 .....	147
6.2.3	实施流程 .....	148
6.3	轨道维持控制 .....	149
6.3.1	目标 .....	149
6.3.2	时机 .....	149
6.3.3	控制参数计算 .....	150
6.3.4	实施流程 .....	151
6.4	侧飞转正飞控制 .....	155
6.5	卫星科学载荷在轨测试 .....	155
<b>第7章</b>	<b>试验轨道段飞行控制 .....</b>	<b>156</b>
7.1	预选着陆区 .....	157
7.2	降轨控制 .....	159
7.2.1	降轨准备条件分析 .....	159
7.2.2	降轨控制条件分析 .....	159
7.2.3	降轨控制策略计算 .....	164

7.2.4 降轨控制实施 .....	168
7.2.5 对月定向控制 .....	171
7.3 CCD 立体相机成像控制 .....	172
7.3.1 成像控制条件分析 .....	173
7.3.2 成像控制实施 .....	174
7.4 升轨控制 .....	177
7.4.1 升轨准备条件分析 .....	177
7.4.2 升轨控制条件分析 .....	178
7.4.3 升轨控制实施 .....	179
<b>第 8 章 环月长期运行轨道段飞行控制 .....</b>	<b>183</b>
8.1 全月面拍摄 .....	184
8.1.1 成像策略选择 .....	184
8.1.2 成像控制 .....	185
8.1.3 全月面图像补充拍摄 .....	186
8.2 第 1 次轨道维持及月食前调相 .....	187
8.2.1 轨道维持需求分析 .....	188
8.2.2 月食调相效果分析 .....	188
8.2.3 控制方案设计 .....	189
8.2.4 控制实施流程 .....	191
8.2.5 控制实施及控后效果分析 .....	192
8.3 月食期间飞行控制 .....	193
8.3.1 月食对环月卫星的影响 .....	194
8.3.2 主要采取的措施 .....	195
8.3.3 月食基本情况 .....	197
8.3.4 主要测控及控制流程 .....	198
8.3.5 控制实施 .....	200
8.4 LDPC 遥测编译码试验 .....	200
8.5 第 2 次轨道维持及正飞转侧飞 .....	202
8.5.1 控制方案设计 .....	202

8.5.2	控制实施流程 .....	204
8.5.3	控制实施及控后效果分析 .....	205
8.6	S频段音码混合测距试验 .....	205
8.7	其他日常飞行控制工作 .....	206
8.7.1	轨道保障 .....	207
8.7.2	时差校正 .....	207
8.7.3	星载测控设备切换 .....	207
8.7.4	动量轮卸载 .....	208
<b>第9章</b>	<b>应急飞行控制 .....</b>	<b>209</b>
9.1	应急飞行控制特点和要求 .....	209
9.1.1	应急飞行控制特点 .....	209
9.1.2	应急飞行控制要求 .....	210
9.2	应急处置分工和决策程序 .....	212
9.2.1	应急处置分工 .....	212
9.2.2	应急处置决策程序 .....	213
9.3	卫星故障应急处置对策 .....	214
9.3.1	故障分类 .....	214
9.3.2	故障模式判别 .....	214
9.3.3	故障应急处置 .....	216
9.4	测控网故障应急处置对策 .....	219
9.5	应急轨道控制 .....	222
9.5.1	入轨异常 .....	224
9.5.2	中途修正控制异常 .....	224
9.5.3	月球捕获轨道段控制异常 .....	225
9.5.4	环月试验轨道段降轨控制异常 .....	232
9.5.5	环月轨道维持异常 .....	233
<b>第10章</b>	<b>飞赴日地拉格朗日 <math>L_2</math> 点 .....</b>	<b>234</b>
10.1	拉格朗日点介绍 .....	234

---

10.2 轨道设计 .....	235
10.2.1 月球逃逸段 .....	235
10.2.2 转移飞行段 .....	236
10.2.3 日地拉格朗日 $L_2$ 点绕飞段 .....	237
10.3 各系统工作模式 .....	238
10.3.1 卫星系统工作模式 .....	238
10.3.2 测控系统工作模式 .....	238
10.3.3 地面应用系统工作模式 .....	239
10.4 轨道控制实施方案 .....	239
10.4.1 月球逃逸段控制实施方案 .....	239
10.4.2 转移飞行段控制实施方案 .....	244
10.4.3 日地拉格朗日 $L_2$ 点绕飞段控制实施方案 .....	247
附录 A 缩略语和专有名词对照表 .....	249
附录 B 嫦娥 2 号工程大事记 .....	251
附录 C 月球基本参数 .....	254
附录 D LP165P 月球重力场模型 .....	255
参考文献 .....	264

# 第 1 章 飞行控制概述

飞行控制是地面飞行控制中心通过航天测控网对航天器实施的一系列过程操作。嫦娥 2 号 (CE-2) 卫星飞行控制的特点是卫星控制模式多样、飞行控制过程复杂、关键控制弧段多、测控距离远、飞行控制周期长等。因此,自卫星发射之日起,飞行控制是保证工程任务圆满完成的核心。本章主要分析飞行控制任务总体情况、任务规划、测控支持条件以及飞行控制系统组成等内容。

## 1.1 嫦娥 2 号工程概述

嫦娥 2 号卫星于 2010 年 10 月 1 日由长征 3 号丙 (CZ-3C) 运载火箭在西昌卫星发射中心发射升空,发射方位角为  $97.5^\circ$ ,卫星经主动段、地月转移轨道段和月球捕获轨道段 3 个阶段,最终进入平均高度为 100 km 的月球极月圆轨道,并在预定时机变轨到  $100\text{ km}\times 15\text{ km}$  椭圆轨道,以验证后续探月工程飞行任务轨道设计技术和低轨道高度下的快速测定轨能力,同时在 15 km 近月点处进行预选着陆区 (虹湾区) 高分辨率成像。在  $100\text{ km}\times 15\text{ km}$  轨道上运行两天后升轨回到 100 km 圆轨道继续开展后续探测工作。

### 1.1.1 工程目标和科学探测任务

嫦娥 2 号飞行任务主要实现 6 项工程目标和 4 项科学探测任务。

#### 1.1.1.1 工程目标

- 1) 突破运载火箭直接将卫星发射至地月转移轨道的发射技术。
- 2) 试验 X 频段深空测控技术,初步验证深空测控体制。
- 3) 验证 100 km 月球圆轨道捕获技术。

4) 验证  $100\text{ km} \times 15\text{ km}$  轨道机动与快速测定轨技术。

5) 试验低密度奇偶校验码 (LDPC) 遥测信道编码、高速数据传输、降落相机等技术。

6) 对后续探月工程飞行任务预选着陆区进行高分辨率成像试验。

### 1.1.1.2 科学探测任务

1) 获取月球表面三维影像, 分辨率优于  $10\text{ m}$ 。

2) 探测月球物质成分。

3) 探测月壤特性。

4) 探测地月与近月空间环境。

## 1.1.2 主要技术状态

### 1.1.2.1 轨道设计

嫦娥 2 号卫星由长征 3 号丙运载火箭直接送入地月转移轨道。卫星在此轨道上飞行约  $112\text{ h}$ , 到达距月面约  $100\text{ km}$  的近月点进行减速制动, 进入环绕月球南北极运动的月球极轨道。此后经过两次近月点制动, 降低远月点高度, 最终实现高度为  $100\text{ km}$  的月球极月圆轨道飞行。通过轨道修正和仪器设备在轨测试, 进入在轨工作状态。

为了实现虹湾区域成像, 在  $100\text{ km}$  环月圆轨道初期运行阶段, 卫星择机制动, 将近月点高度降至  $15\text{ km}$ , 进入  $100\text{ km} \times 15\text{ km}$  轨道, 对虹湾区域进行高分辨率成像。卫星在轨运行  $2 \sim 3$  天后, 再次变轨至  $100\text{ km}$  环月圆轨道, 进入环月长期运行阶段。

2011 年 4 月 1 日, 卫星在轨运行半年, 设计寿命期满, 经过充分论证, 控制嫦娥 2 号卫星由月球轨道出发, 奔赴日地拉格朗日  $L_2$  点。

### 1.1.2.2 卫星系统

嫦娥 2 号卫星起飞质量约  $2\ 480\text{ kg}$ , 包括结构, 热控, 制导、



导航与控制 (GNC), 测控数传, 供配电, 数据管理, 推进, 定向天线, 科学载荷和技术试验等 10 个分系统。

结构分系统用于支撑和固定卫星的各种设备、仪器, 使之构成一个整体, 以承受地面运输、火箭发射和空间运行时的各种力学和空间运行环境, 是一个由中心承力筒和 28 块蜂窝夹层板组成的长方形箱体结构。

热控分系统由多种热控材料、部件和装置组成, 主要功能是通过控制卫星内部和外部的热交换过程, 保证卫星从发射到寿命末期在轨飞行期间, 在各种正常模式下, 星上仪器、设备的工作温度均在要求的范围内, 满足星上各分系统对热环境的要求。

GNC 分系统由传感器部件、执行机构部件和控制器部件组成, 主要任务是完成卫星奔月过程所需的各种姿态变换和控制; 实现卫星对月定向的三轴稳定姿态、太阳电池帆板对日跟踪和定向天线对地跟踪。

测控数传分系统由测控、数传和甚长基线干涉 (VLBI) 信标等部分构成, 主要任务是配合地面设备完成卫星的跟踪测轨、遥控和遥测任务, 并完成科学数据的传输。

供配电分系统由一次电源子系统、二次电源子系统和总体电路子系统组成, 主要任务是满足整星的供电需求。

数据管理分系统将卫星测控任务综合在一个以计算机为主的系统中, 用以实现卫星遥测、遥控、程控、星载自主控制、校时等整星控制和管理功能。

推进分系统采用双组元统一推进系统, 配置了 1 台变轨发动机和 12 台姿控推力器。变轨发动机为各次变轨提供所需动力, 姿控推力器在卫星整个寿命期间完成卫星的姿态控制和动量轮卸载, 并在环月运行期间提供轨道修正和轨道保持所需推力。

定向天线分系统采用双自由度机构实现半空间覆盖, 为数传下行信道和遥测提供满足飞行任务要求的天线增益。

科学载荷分系统包括 7 种科学探测仪器和 1 套科学载荷数据管