



绕月探测 飞行控制

RAOYUE TANCE FEIXING KONGZHI



麻永平 主编

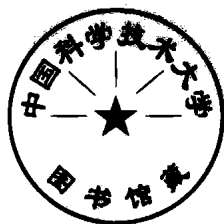


国防工业出版社
National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十一五”统编教材

绕月探测飞行控制

麻永平 主编



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

绕月探测飞行控制 / 麻永平主编. —北京: 国防
工业出版社, 2010. 2

总装部队军事训练“十一五”统编教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 06704 - 0

I. ①绕... II. ①麻... III. ①月球探测器 - 飞行控制
- 教材 IV. ①V476.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 013431 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)

北京四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 10 1/8 字数 311 千字

2010 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 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

总装备部军事训练统编教材 编审委员会

(2008)

主任委员 夏长法

副主任委员 邱爱慈 聂 皞

委 员 于俊民 徐克俊 周朝猛 安敏建

史续生 陈 波 孙宝升 冯书兴

唐清安 单志伟 杨 军 魏震生

张大伟 姜世忠 熊家新 田 禾

秘 书 宋安基 石根柱

本书编审委员会

主 编 麻永平

副 主 编 周建亮 李 剑 陈险峰

主 审 张 渊

编写人员 (按姓氏笔画排序)

付卫中 李 立 汪广洪 陈 翔

周开民 郑爱武 赵 瑞 赵凤才

贾 敏 高 薇 崔 雁 谢 圆

谢剑锋

校 对 高 薇

前 言

绕月探测工程是我国继突破人造地球卫星和载人航天之后,航天技术发展的第三个里程碑,是一项技术上复杂且可靠性要求极高的系统工程。在绕月探测飞行任务中,飞行控制自始至终是一条主线,保障飞行控制任务的圆满完成是飞行控制中心的核心任务。

绕月探测任务飞行控制需求多种多样,涉及因素众多,各个系统间接口复杂,更重要的是轨道控制要求高,实时性要求强。所有这些都对飞行控制中心提出了非常高的要求,这些要求是以往任何卫星测控任务和载人航天任务都不曾遇到过的。针对绕月探测任务的特点和要求,如何规划一个有效、健全的飞行控制系统,如何设计这个系统的工作模式和控制模式,以及如何设计合理可行的飞行控制实施方案是飞行控制中心面临的重要任务。同时,建设一个现代化的月球探测飞行控制中心,完成月球探测地面控制任务甚至后续的深空探测任务,还需突破一系列重大技术难点,完成一系列多学科交叉技术攻关。

针对绕月探测飞行控制的上述特点和要求,本书以飞行控制中心为立足点,阐述了绕月探测飞行控制技术及飞行控制过程,在我国绕月探测领域,第一次较全面系统地论述了绕月探测飞行控制的技术体系及飞行控制总体技术,力图达到总结经验、培养人才的目的,并以此促进后续月球探测等深空探测飞行控制任务相关技术的拓展和研究。

本书由麻永平主编,周建亮、李剑和陈险峰为副主编。

第1章由高薇编写,概要地介绍了月球相关知识、人类探测月球的历史和现状以及我国绕月探测工程的基本情况。第2章由陈翔、赵凤才、付卫中、谢圆、汪广洪编写,全面介绍了任务中使用的飞行控制系统,详述任务中所采用的飞行控制技术,主要包括飞行控制计划、上行控制、遥测处

理、国际联网、仿真与地面验证等相关内容。第3章由李立、赵瑞、陈翔、高薇、崔雁、郑爱武编写,主要介绍了绕月探测飞行任务的飞程序,对测控支持条件进行需求分析,介绍了绕月探测工程各阶段的飞行控制任务,并在此基础上对实施绕月探测飞行控制任务的关键过程和飞控决策支持进行分析和讨论。第4章由贾敏编写,简要地介绍了奔月轨道设计及相关坐标系定义和约束条件,并在此基础上详细地论述了整个奔月及绕月飞行轨道测量和确定的方法,以及各阶段轨道的特性和控制策略的制定与实施。第5章由赵凤才、贾敏编写,介绍了绕月探测卫星姿态控制系统以及飞行过程中各阶段所采用姿态的定义,并据此详细地描述了各飞行阶段姿态测量与确定的方法。第6章由汪广洪、谢剑锋编写,对绕月探测任务中各种故障对策实施方法、应急轨道控制方案进行了介绍,并对飞行控制中心应急工作模式进行了论述。第7章由周开民、高薇编写,介绍了后续国内外月球探测计划,并对未来深空测控技术的发展趋势和技术要求进行了展望。本书由陈险峰完成大纲编写和审改,高薇完成统稿和校对。

在本书的编写过程中,总装备部机关、有关基地、研究所及航天飞行控制中心的领导和专家提出了许多宝贵意见,在此表示深深的谢意。

由于本书涉及的学科范围广,技术难度大,加上编写时间仓促,谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

目录

第1章 概论	1
1.1 概述	1
1.2 了解月球	2
1.2.1 月球的运动参数	2
1.2.2 月球的物理参数	3
1.2.3 月球的地形地貌	3
1.3 人类月球探测的历史和现状	4
1.3.1 第一次探月高潮	4
1.3.2 月球探测活动的宁静期	9
1.3.3 近期的月球探测	9
1.4 绕月探测工程的任务和目标	12
1.4.1 绕月探测工程任务	12
1.4.2 绕月探测工程目标	12
1.4.3 绕月探测工程测控系统任务	14
1.4.4 绕月探测工程测控系统测控要求	15
1.5 绕月探测工程的组成	16
1.5.1 卫星系统	16
1.5.2 运载火箭系统	19
1.5.3 发射场系统	19
1.5.4 测控通信系统	19
1.5.5 地面应用系统	23
1.6 绕月探测工程的飞行控制	24
1.6.1 绕月探测飞行控制的概念、地位和作用	24

1.6.2 绕月探测飞行控制的主要内容	24
第2章 绕月探测飞行控制保障	26
2.1 概述	26
2.2 飞行控制系统组成	26
2.2.1 硬件系统组成	27
2.2.2 软件系统组成	33
2.3 飞行控制计划	39
2.3.1 计划工作模式	39
2.3.2 飞行控制计划的分析与设计	41
2.3.3 飞控计划的生成与输出	46
2.3.4 飞控计划的验证	47
2.3.5 飞控计划的实施	48
2.4 上行控制	51
2.4.1 概述	51
2.4.2 基本概念	52
2.4.3 遥控工作模式	56
2.4.4 上行控制任务准备	58
2.4.5 上行控制任务实施	71
2.5 遥测数据处理	83
2.5.1 概述	83
2.5.2 遥测数据处理基本概念	84
2.5.3 遥测数据处理要求	90
2.5.4 遥测数据处理步骤	92
2.5.5 遥测数据显示设计	93
2.5.6 卫星状态实时监视与分析	94
2.6 国际联网	97
2.6.1 国际联网的作用	97
2.6.2 国际联网运行模式	98
2.6.3 CCSDS SLE 协议	99
2.6.4 国际联网系统组成	103

2.6.5	国际联网关键技术及发展趋势	108
2.7	飞行控制仿真与地面验证	110
2.7.1	数字仿真系统	110
2.7.2	飞控模拟器	112
2.7.3	仿真工作模式	115
2.7.4	飞行控制地面验证	117
第3章	绕月探测飞行控制实施	122
3.1	飞行程序	122
3.1.1	卫星分系统工作模式及状态	122
3.1.2	各阶段飞控事件	125
3.1.3	飞行控制重点和技术难点	130
3.1.4	关键控制环节	133
3.2	测控支持条件需求分析	137
3.2.1	任务各阶段测控弧段	137
3.2.2	测控电平计算与预报	138
3.2.3	测控站工作模式	144
3.2.4	上行点频切换	146
3.2.5	日凌期间卫星测控	147
3.3	发射及入轨控制	148
3.3.1	发射窗口选择	149
3.3.2	发射倾角和近地点高度确定	150
3.3.3	发射段飞控工作	151
3.3.4	入轨段飞控工作	152
3.4	调相轨道段控制	157
3.4.1	变轨控制流程	158
3.4.2	远地点变轨控制	162
3.4.3	近地点变轨控制	162
3.4.4	VLBI 测定轨	163
3.4.5	测控资源调配	164
3.4.6	阴影区飞控流程调整	164

3.5	地月转移轨道段控制	165
3.5.1	地月转移时间确定	167
3.5.2	中途修正实施原则	168
3.5.3	中途修正控制流程	169
3.5.4	紫外敏感器成像	171
3.5.5	科学探测设备控制	172
3.6	月球捕获轨道段控制	172
3.6.1	月球捕获制动	173
3.6.2	远月点修正	179
3.6.3	490N 发动机断开控制	180
3.6.4	在轨测试	181
3.7	环月轨道段控制	183
3.7.1	环月姿态建立	183
3.7.2	有效载荷工作控制	186
3.7.3	轨道维持控制	188
3.7.4	月食期间卫星控制	194
3.7.5	轨道机动控制	196
3.7.6	受控撞月控制	197
3.8	飞控决策支持	200
3.8.1	飞控事件分类	200
3.8.2	飞控决策实施模式	202
3.8.3	正常飞控决策实施	203
3.8.4	故障处置决策实施	204
第4章	轨道测量与控制	206
4.1	奔月轨道	206
4.2	坐标系的定义	207
4.2.1	J2000.0 地心惯性系	207
4.2.2	站心地平坐标系	207
4.2.3	月心天球坐标系	208
4.2.4	月理坐标系	208

4.2.5	环月轨道参考坐标系	208
4.2.6	卫星坐标系	208
4.3	轨道设计约束条件	209
4.3.1	轨道的运动学约束	209
4.3.2	光照约束	209
4.3.3	观测约束	210
4.3.4	科学探测需求约束	210
4.4	轨道测量与轨道确定	211
4.4.1	VLBI 测量原理	211
4.4.2	初轨确定	213
4.4.3	精密定轨	216
4.5	各阶段轨道特性与控制策略	221
4.5.1	发射段	221
4.5.2	调相轨道段	222
4.5.3	地月转移轨道段	223
4.5.4	月球捕获轨道段	228
4.5.5	环月工作轨道段	230
4.6	轨道控制实施	231
4.6.1	轨道控制实施过程	231
4.6.2	动量轮卸载对轨道的影响	232
4.6.3	加速度计及发动机推力标定	234
4.6.4	剩余燃料计算	235
4.7	受控落月	236
第5章	姿态测量与控制	237
5.1	概述	237
5.2	卫星姿态控制系统简介	238
5.2.1	敏感器	239
5.2.2	中心控制器	243
5.2.3	执行机构	244
5.3	姿态定义	246

5.3.1	巡航姿态	246
5.3.2	点火(机动)姿态	246
5.3.3	正飞姿态	246
5.3.4	侧飞姿态	247
5.4	姿态测量与确定	247
5.4.1	姿态表示	247
5.4.2	姿态四元数定义与转换	247
5.4.3	姿态测量与确定方法	249
5.5	建立环月姿态计算	256
5.6	姿态控制	256
5.6.1	姿态控制模式	257
5.6.2	卫星停旋控制	258
5.6.3	建立使命轨道前变轨前后姿态控制	259
5.6.4	建立对月定向姿态控制	259
5.6.5	环月期间姿态控制	261
第6章	应急飞行控制技术	264
6.1	概述	264
6.2	应急飞行控制技术基本概念与基本问题	264
6.2.1	应急控制与正常控制的配合	264
6.2.2	应急飞行控制技术与其它技术的关系	266
6.2.3	应急飞行控制技术特点	266
6.3	卫星故障对策及处理	268
6.3.1	绕月探测卫星故障模式	268
6.3.2	卫星故障的特点	269
6.3.3	故障模式分类	269
6.3.4	卫星故障的判断	270
6.3.5	卫星故障的处理	270
6.4	测控网故障	272
6.4.1	测控网构成	272
6.4.2	测控网故障处理	273

6.5 应急轨道控制	274
6.5.1 故障对轨控的影响	274
6.5.2 应急控制策略约束条件	276
6.5.3 入轨轨道异常的应急控制	277
6.5.4 调相轨道段应急控制	280
6.5.5 地月转移轨道段应急控制	300
6.5.6 近月制动轨道段应急控制	301
6.5.7 环月维持的应急控制	306
第7章 月球探测的后续发展	307
7.1 概述	307
7.2 国外月球探测后续任务	307
7.2.1 美国月球探测计划	307
7.2.2 欧洲月球探测计划	309
7.2.3 日本月球探测计划	310
7.2.4 俄罗斯月球探测计划	310
7.2.5 印度月球探测计划	310
7.3 我国月球探测后续任务	311
7.3.1 月球探测二期工程	311
7.3.2 月球探测三期工程	312
7.4 深空测控技术的发展	313
7.4.1 深空测控网	313
7.4.2 月球软着陆控制技术	316
7.4.3 月球返回与再入控制技术	318
7.4.4 环月轨道交会对接控制技术	322
7.4.5 深空探测器遥操作技术	323
7.4.6 轨道测定与控制技术	329
结束语	330
附录 缩略语	331
参考文献	333

第 1 章 概 论

1.1 概 述

月球是地球唯一的天然卫星,由于其独特的空间位置和潜在资源,自然成为人类开展深空探测的首选目标,也是人类向外层空间发展的理想基地和前哨站。月球探测是深空探测活动的第一步,目前,世界上航天大国正纷纷制定重返月球及开展月球探测的计划,我国作为一个世界大国和主要航天国家,在 2000 年 11 月 22 日,国务院新闻办公室发表了《中国的航天》白皮书,明确提出了我国开展深空探测的发展目标。

考虑到我国的科学技术水平、综合国力和国家整体发展战略,综合分析国际上月球探测的发展历程,以及主要航天国家和组织提出的 21 世纪初月球探测的战略目标和实施计划,我国月球探测工程将分三个发展阶段分步实施。第一阶段月球探测一期工程的主要目标是实现绕月探测;第二阶段月球探测二期工程的主要目标是实现月球软着陆探测和月面巡视勘察;第三阶段月球探测三期工程的主要目标是实现采样返回。这三步简称“绕、落、回”。2004 年 1 月 23 日,国务院正式批准绕月探测工程立项,并于 2007 年 10 月 24 日成功发射了首颗绕月探测卫星——“嫦娥”一号绕月探测卫星。

绕月探测工程区别于以往绕地飞行的人造卫星任务和载人航天任务,其轨道设计复杂、测控距离远,地面飞行控制在原有控制模式的基础上呈现了很多新的特点。

本章将主要介绍月球概况、人类进行月球探测的历史和现状以及我国绕月探测工程的基本情况。

1.2 了解月球

1.2.1 月球的运动参数

将月球看作刚体,月球的运动可分为质心的运动(即轨道运动)和环绕质心的转动(即自转运动)两部分,它的轨道运动参数如下(Preter, 1999):

平均半长轴 = 384400km

近地点距离 = 363300km

远地点距离 = 405500km

恒星月 = 27.3217d

朔望月 = 29.5306d

平均轨道速度 = 1.023km/s

轨道平均倾角 = $5^{\circ}9'$

赤道平均倾角 = $6^{\circ}41'$

轨道偏心率 = 0.0549

离开地球的速度 = 3.8cm/年

由于摄动作用,月球轨道长半轴的变化可达 2700km。月球椭圆轨道的偏心率平均值是 0.0549,接近 1/18,由于摄动作用,每隔 31.8d 就出现小的周期变化,变化在 1/15 ~ 1/23 的范围内。

月球围绕地球作椭圆轨道运动时,月球轨道与黄道的夹角平均值为 $5^{\circ}9'$,夹角的变化范围是 $4^{\circ}57' \sim 5^{\circ}19'$,月球旋转轴的倾角为 $1^{\circ}32'$,因此,月球赤道与月球轨道面的平均夹角为 $6^{\circ}41'$ 。

月球绕地球转一周历时 27.3217 天,这一时间称为“恒星月”。它是以恒星定标的,即月球从某颗恒星的近旁出发,又返回到该星附近同一位置的时间间隔。月球自转周期恰好等于它绕地球公转的周期,也是 27.3217 天,因此,任何时间我们在地球上只能看到月球的一面。由于月球的天平动,累积起来,人们从地球上可以观测到月球整个表面的 59%。由于月球自转,因此在月球上也像地球一样有白天和黑夜之分。

月球自转一周的时间等于一个恒星月,因此月球上一天的时间相当于地球的近一个月。月球任何一个地方一个白天的时间相当于地球的近14天。

1.2.2 月球的物理参数

月球基本上是一个圆球体,直径为3476km,相当于地球直径的27%;质量为 7.35×10^{22} kg,约为地球质量的1/81;体积只有地球体积的1/49;表面积为 $3.79 \times 10^7 \text{km}^2$,是地球表面积的1/14;月球的平均密度为 3.34g/cm^3 ,比地球的平均密度(5.52g/cm^3)小得多。

月球重力加速度只有地球的1/6,月球赤道上的重力加速度为 1.62m/s^2 。月球上的逃逸速度只有 2.38km/s ,比地球上的逃逸速度(11.2km/s)小得多。月球重力场分布并不均匀,经重力测量发现在一些月海盆地内有重力异常,称为质量瘤。

根据月球探测的结果,月球没有全球性的偶极磁场。在Apollo任务中,只检测到了一个非常弱的磁场,大约只有 $(3 \sim 300) \times 10^{-9} \text{T}$ 。

由于没有大气层的保温和传热,月表昼夜温差非常大,白天受阳光照射的地方,温度可高达 130°C 至 150°C ,而夜间和阳光照射不到的阴暗处,温度会下降至 -160°C 至 -180°C 。月食的时候,月表会迅速冷却,两小时内温度下降可达 250°C 之多,说明月球表面的导热性非常小。另外,月球本身并不发光,只是因为表面反射太阳光而发亮。从天文学角度来说,月球的反照率只有7%。

1.2.3 月球的地形地貌

月球的基本地理单元包括月海和高地。月海是月面上宽广的平原,月球上有22个月海,约占月表面积的17%。除东海、莫斯科海和智海位于月球背面外,其他19个月海都分布在月球的正面。高地是指月球表面高出月海的地区,一般高出月球水准面约 $2 \text{km} \sim 3 \text{km}$,面积约占月球表面积的83%。在月球正面,高地的总面积和月海的总面积大体相等;在月球背面,高地的面积则要大得多。除月海、高地外,月面上布满了大大小小的撞击坑,是月球上一个独特的形貌特征。