

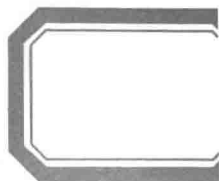
国防科学技术大学学术著作出版资助专项经费资助

航天器相对运动轨道 动力学与控制

刘鲁华 孟云鹤 安雪滢 编著

 中国宇航出版社

国防科学技术大学学术著作出版资助项目经费资助



航天器相对运动轨道 动力学与控制

刘鲁华 孟云鹤 安雪滢 编著



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

航天器相对运动轨道动力学与控制/刘鲁华, 孟云鹤, 安雪滢编著. --北京:中国宇航出版社, 2013. 1

ISBN 978-7-5159-0309-5

I. ①航… II. ①刘… ②孟… ③安… III. ①航天器—轨道力学—动力学—研究 ②航天器—飞行控制—研究

IV. ①V448.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 239336 号

责任编辑 艾小军 责任校对 邓明达 封面设计 文道思

出版发行 **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 北京中新伟业印刷有限公司

版次 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

规格 880 × 1230 开本 1/32

印张 9.75 字数 271 千字

书号 ISBN 978-7-5159-0309-5

定价 49.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

前 言

1957年，第一颗人造地球卫星的成功发射开启了人类航天技术发展的新纪元。半个多世纪以来，人类不断对宇宙空间进行开拓，创造了一个又一个奇迹，所有这一切都离不开航天器轨道动力学与控制理论的发展和进步。进入新世纪，航天技术呈现出新的发展趋势，以航天器交会对接技术、航天器编队飞行技术为代表的涉及两个以上航天器相对运动的控制技术成为世界性热点研究领域，促使着航天器相对运动轨道动力学与控制理论的不断完善和成熟。

本书的主要内容来自三位作者的博士学位论文，即刘鲁华的“航天器自主交会制导与控制方法研究”^[1]、孟云鹤的“近地轨道航天器编队飞行控制与应用研究”^[2]和安雪滢的“椭圆轨道航天器编队飞行动力学及应用研究”^[3]。由于三篇论文都涉及应用前景广泛的航天器相对运动动力学、控制与应用问题，因此作者很早就萌生了合作成书的想法，希望能对相对运动问题进行一定总结，以期抛砖引玉。

本书主要内容可分为三部分，分别是“航天器相对运动轨道动力学问题”、“航天器相对运动轨道控制方法”以及“航天任务中的相对运动问题”。第一部分“航天器相对运动轨道动力学”问题是开展控制方法与应用研究的基础，包括两章研究内容，主要是第2章近圆轨道相对运动动力学与编队构形设计和第3章椭圆轨道相对运动动力学与编队构形设计，两者从相对运动的动力学与运动学角度出发分别研究了近圆轨道与椭圆轨道的相对运动特征、表达与构形设计问题。与第一部分相对应，第二部分“航天器相对运动轨道控

制”主要从“动力学”（第4章）与“运动学”（第5章）角度分别介绍作者在控制问题中的研究成果。基于动力学的相对运动轨道控制方法的特点在于周期短、精度高、计算量大、能耗较多，适合于交会对接等短期任务需求；而基于运动学的相对运动轨道控制方法的特点在于周期长、计算量小、能耗低、方法简便，适合于伴飞与编队等长期任务需求。两者各有特点，恰恰适应于不同的应用背景。第三部分“航天任务中的相对运动问题”包括三章内容，即第6章相对控制方法在非合作目标交会中的应用、第7章近地轨道编队在InSAR系统中的应用以及第8章椭圆轨道编队在日地空间探测中的应用。

本书第1章与第2章由三位作者合作撰写，第4章与第6章的撰写工作由刘鲁华负责，第5章与第7章由孟云鹤负责，第3章与第8章由安雪滢负责，最后由刘鲁华负责全书的统稿及审定工作。

本书在撰写过程中，得到了多方面的支持，作者衷心感谢国防科技大学航天与材料工程学院飞行器控制教研室领导与同事们的关心。感谢余梦伦院士、孙承启研究员、周军教授、李俊峰教授对本书的建议及对出版的大力推荐。感谢国内外同行专家的研究成果。最后特别感谢国防科学技术大学学术著作出版资助专项经费的资助。

限于作者水平，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

作者

2012年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航天器相对运动问题	1
1.1.1 航天器空间交会	1
1.1.1.1 航天器空间交会的概念	1
1.1.1.2 空间自主交会的特点	2
1.1.1.3 空间交会中的相对运动	3
1.1.2 航天器编队飞行	4
1.1.2.1 航天器编队飞行的概念	4
1.1.2.2 航天器编队飞行的特点	4
1.1.2.3 编队飞行中的相对运动	5
1.2 航天器相对运动动力学	6
1.2.1 无摄相对运动模型	6
1.2.2 受摄相对运动模型	9
1.2.3 编队飞行构形设计	10
1.3 航天器相对运动控制技术	13
1.3.1 航天器空间交会任务中的控制技术	13
1.3.2 航天器编队飞行任务中的控制技术	17
1.4 本书结构	22
第 2 章 近圆轨道相对运动动力学与编队构形设计	24
2.1 C-W 方程及其修正形式	24
2.1.1 坐标系及相互转换关系	24
2.1.2 相对运动动力学方程及其解析解	26

2.1.2.1	基本前提	26
2.1.2.2	精确的动力学模型	26
2.1.2.3	线性化的动力学模型	28
2.1.2.4	相对运动的解析解	29
2.1.2.5	状态空间表示	30
2.1.3	C-W 方程的修正形式	32
2.2	相对运动的运动学表达与构形设计	34
2.2.1	相对运动学方程的建立	34
2.2.1.1	前提条件设定	34
2.2.1.2	相对运动运动学方程的一阶近似	34
2.2.2	相对运动的运动学表达方式之一	36
2.2.3	相对运动的运动学表达方式之二	38
2.2.4	半长轴不同的伴飞构形表达	40
2.2.5	相对运动编队构形设计	40
2.3	J_2 摄动编队构形的长期演化	41
2.3.1	J_2 摄动作用下编队构形表达	41
2.3.1.1	无奇点变量的摄动	41
2.3.1.2	摄动作用下参考轨道面内的相对运动	42
2.3.1.3	摄动作用下参考轨道法向相对运动	43
2.3.1.4	构形表达	43
2.3.2	J_2 摄动作用下编队构形仿真	45
2.3.3	编队构形长期演化的几点结论	47
第 3 章	椭圆轨道相对运动动力学与编队构形设计	49
3.1	相对运动模型	50
3.1.1	精确相对运动模型	50
3.1.1.1	单位球模型	50
3.1.1.2	模型适用性	53
3.1.2	一阶相对运动模型	53
3.1.2.1	基于运动学的相对运动模型	53

3.1.2.2	基于动力学的相对运动模型	60
3.2	相对轨迹特性分析	64
3.2.1	基本相对轨迹	64
3.2.1.1	仅相对偏心率不为零时的相对轨迹	64
3.2.1.2	仅相对轨道倾角不为零时的相对轨迹	65
3.2.1.3	仅相对升交点赤经不为零时的相对轨迹	66
3.2.1.4	仅相对近地点纬度幅角不为零时的相对轨迹	69
3.2.1.5	仅相对平近点角不为零时的相对轨迹	69
3.2.2	相对轨迹特性	70
3.3	典型编队构形设计	74
3.3.1	单从航天器编队构形	74
3.3.2	双从航天器编队构形	75
3.3.3	多从航天器编队构形	79
3.4	相对运动稳定性分析	84
3.4.1	受摄相对运动模型	84
3.4.1.1	摄动加速度	84
3.4.1.2	基于动力学的精确模型	85
3.4.1.3	基于运动学的近似模型	86
3.4.1.4	两种模型精度比较	89
3.4.2	受摄相对运动特性	90
3.4.2.1	基本构形的受摄特性	90
3.4.2.2	一般构形的受摄特性	94
3.4.3	基于运动学的稳定编队设计方案	99
3.4.3.1	稳定编队设计方案一	99
3.4.3.2	稳定编队设计方案二	104
3.4.3.3	稳定编队设计算例	107
3.4.4	基于动力学的稳定编队设计方案	111
3.4.4.1	稳定编队设计方案一	111
3.4.4.2	稳定编队设计方案二	113

第 4 章 基于动力学的相对运动轨道控制方法	116
4.1 多冲量最优机动问题及求解方法	117
4.1.1 优化问题的指标函数	117
4.1.2 多冲量状态转移方程	118
4.1.3 时间固定多冲量最优轨道控制求解方法	119
4.1.3.1 无约束标准广义逆方法	119
4.1.3.2 冲量递减策略下的加权广义逆方法	120
4.1.3.3 冲量模值受限的二次规划最优方法	120
4.1.4 时间不固定多冲量最优轨道控制求解方法	121
4.1.4.1 多冲量优化问题的自由度	121
4.1.4.2 非线性最优优化问题的表示和求解	122
4.1.5 基于广义逆和数学规划方法的轨道控制仿真	123
4.2 具有视线约束的相对运动轨道控制	124
4.2.1 最大视线角计算方法	124
4.2.2 基于参考视线的多次机动快速计算算法	126
4.2.2.1 满足视线约束的几种策略	126
4.2.2.2 机动点位置参数的选取	127
4.2.2.3 基于参考视线的接近操作快速算法	128
4.2.3 基于视线制导的停靠点逼近制导方法	130
4.2.3.1 利用视线制导实现停靠点逼近存在的问题及解决方法	130
4.2.3.2 纵向制导方法	131
4.2.3.3 法向制导方法	132
4.2.3.4 基于视线制导的停靠点逼近仿真	133
4.3 相对运动中的多冲量滑移制导方法	134
4.3.1 约束轨道下的多冲量轨道机动	134
4.3.2 多冲量滑移轨道设计	136
4.3.2.1 滑移轨道概念	136
4.3.2.2 指数滑移轨道	137

4.3.2.3	微分方程快速滑移轨道设计	138
4.3.2.4	微分方程慢速滑移轨道设计	139
4.3.2.5	多项式滑移轨道的设计	140
4.3.3	滑移算法在相对运动轨道控制中的应用分析	140
4.3.3.1	接近操作	140
4.3.3.2	撤离操作	141
4.3.4	近程接近与撤离滑移制导的仿真	141
4.3.4.1	接近段仿真	141
4.3.4.2	撤离段仿真	144
4.3.5	考虑多约束条件下的滑移制导方法	145
4.3.5.1	不同形式的约束轨道	146
4.3.5.2	不同形式的微分方程	147
4.3.5.3	多次机动速度增量的计算	150
4.3.5.4	仿真算例	151
4.3.6	滑移制导算法在撤离段应用探讨	153
4.4	滑模变结构理论在相对运动轨道控制中的应用	153
4.4.1	滑模变结构系统及滑模面的选择	153
4.4.1.1	滑模变结构系统	153
4.4.1.2	确定滑模面参数的二次型指标最优化方法	154
4.4.2	抖振现象与抖振的削弱	155
4.4.2.1	切换函数的近似连续化	155
4.4.2.2	趋近率控制	156
4.4.3	线性多变量系统滑模控制策略	157
4.4.3.1	常值切换函数	157
4.4.3.2	指数趋近率滑模控制	157
4.4.3.3	同时启动递阶变结构控制	158
4.4.4	不同策略下逼近段轨道控制的变结构方法仿真	160
4.5	基于遗传-模糊控制方法的绕飞与逼近轨道控制	164
4.5.1	绕飞与逼近操作过程	164

4.5.2	绕飞与逼近段动力学模型	165
4.5.3	模糊控制原理、控制表的建立及优化的方法	166
4.5.3.1	模糊控制原理	166
4.5.3.2	模糊控制表的建立	166
4.5.3.3	利用遗传算法优化模糊控制表	167
4.5.4	考虑导航误差时绕飞与逼近段操作仿真	168
第5章	基于运动学的相对运动轨道控制方法	172
5.1	编队构形的冲量捕获策略	172
5.1.1	相对运动与冲量的关系	172
5.1.1.1	冲量作用与轨道根数的关系	172
5.1.1.2	轨道根数与相对运动的关系	174
5.1.1.3	冲量作用与相对运动的关系	174
5.1.2	简单多冲量与构形生成	176
5.1.2.1	径向冲量作用	176
5.1.2.2	沿迹向冲量作用	177
5.1.2.3	轨道面法向冲量作用	180
5.1.3	编队捕获策略与仿真	180
5.1.3.1	编队捕获策略	180
5.1.3.2	编队捕获仿真	180
5.1.3.3	燃料估算	183
5.2	构形重构的冲量控制策略	184
5.2.1	推力模式的能控性分析	184
5.2.2	相对运动构形的多冲量控制	185
5.2.2.1	三次沿迹向控制冲量的求解	185
5.2.2.2	轨道面法向控制冲量的求解	186
5.2.2.3	冲量求解的讨论	187
5.2.2.4	总能耗与始末构形参数的关系	188
5.2.3	基于简单四冲量的构形重构仿真	188
5.2.3.1	初始条件	188

5.2.3.2	仿真结果	189
5.2.3.3	误差分析	192
5.2.3.4	仿真结论	193
5.3	基于多冲量的构形保持控制方法	194
5.3.1	长期伴飞保持控制思路	194
5.3.2	基于相对运动测量的构形确定方法	195
5.3.3	构形保持控制仿真	197
5.3.3.1	仿真条件	197
5.3.3.2	仿真结果	197
5.3.3.3	仿真结论	202
5.4	不同发动机推力模型的构形控制效果分析	202
5.4.1	三种推力模型	202
5.4.2	相对运动状态转移矩阵	204
5.4.3	基于不同推力模型的构形控制效果	205
5.4.3.1	脉冲推力作用效果分析	205
5.4.3.2	继电器推力作用效果分析	206
5.4.3.3	连续推力作用效果分析	208
5.4.4	连续变化小推力模型的工程方法	209
5.4.4.1	控制作用效果的比较	209
5.4.4.2	连续变推力到继电器推力模型的转换	210
第 6 章	相对控制方法在非合作目标交会中的应用	212
6.1	空间交会任务实现过程	212
6.2	非合作目标空间交会过程示例	214
6.3	非合作目标空间交会不同阶段特征及切换条件	215
6.3.1	远近程交班的切换条件	215
6.3.2	远近程交班过程描述	217
6.3.3	不同交班点条件下的制导策略	218
6.3.4	停靠点初始条件的选择	219
6.3.5	近程接近段的约束条件	219

6.4	非合作目标近程交会仿真	219
6.4.1	远近程交班段仿真	219
6.4.2	近程接近段仿真	221
6.4.3	撤离段仿真	222
第7章	近地轨道编队在 InSAR 系统中的应用	226
7.1	InSAR 系统中航天器编队优化设计	226
7.1.1	主星带伴随编队模式 InSAR 系统概念的提出	227
7.1.1.1	InSAR 测量技术发展概况	227
7.1.1.2	主星带伴随编队模式 InSAR 系统简介	228
7.1.1.3	DEMs 测量任务	229
7.1.2	面向 DEMs 测量的主星带伴随编队 InSAR 系统约束 分析	230
7.1.2.1	测高精度约束	230
7.1.2.2	覆盖约束	234
7.1.3	主星带伴随编队 InSAR 系统优化设计	238
7.1.3.1	优化设计方案	239
7.1.3.2	优化设计实例——三星对称构形的伴随编队	243
7.2	InSAR 系统中航天器编队协同控制	247
7.2.1	问题的提出与解决思路	247
7.2.1.1	构形与姿态协同问题的提出	247
7.2.1.2	构形与姿态协同控制实现的逻辑结构	249
7.2.2	协同规划与控制	250
7.2.2.1	航天器编队协同规划	250
7.2.2.2	编队航天器构形与姿态协同控制	252
7.2.3	构形与姿态协同控制仿真	253
7.2.3.1	仿真条件设置	253
7.2.3.2	构形保持控制	254
7.2.3.3	姿态规划	255

7.2.3.4 姿态控制	256
第8章 椭圆轨道编队在日地空间探测中的应用	259
8.1 日地空间探测中的典型项目介绍	259
8.1.1 椭圆轨道编队飞行优势	259
8.1.2 椭圆轨道编队飞行应用模式	260
8.1.3 椭圆轨道编队飞行试验计划	260
8.2 MMS 任务编队设计要求与指标	262
8.2.1 任务设计要求	262
8.2.2 设计性能指标	264
8.2.2.1 质量因子	264
8.2.2.2 平均边长	266
8.2.2.3 相关计算	267
8.3 MMS 任务编队构形设计	268
8.3.1 初始条件确定	268
8.3.2 编队性能分析	269
8.3.3 编队设计方案	272
8.4 考虑 J_2 项的 MMS 稳定编队设计	276
8.4.1 编队性能分析	276
8.4.2 稳定编队设计方案	279
参考文献	283

- 计 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (2): 328 - 332.
- [169] 孟云鹤, 韩宏伟, 戴金海. J2 摄动作用下近地轨道卫星编队构形长期演化机理分析 [J]. 宇航学报, 2007, 28 (2): 25 - 258.
- [170] 安雪滢, 杨乐平, 张为华, 等. 大椭圆轨道卫星编队飞行相对运动分析 [J]. 国防科技大学学报, 2005, 27 (2): 1 - 6.
- [171] AN XUEYING. Optimization Design and Analysis of Spacecraft Formations on Elliptic Orbits, in *2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*. China, 2008.
- [172] AN XUEYING, YANG LEPING, XI XIAONING. New Analytical Constraints of Relative Motion for Elliptic Orbit Spacecrafts, in *ATAA GNC/AFM/MST/ASC/ASE 2010 Conference*. China, 2010.
- [173] 安雪滢, 张为华, 杨乐平, 等. 考虑地球扁率的大椭圆轨道编队飞行优化设计 [J]. 宇航学报, 2006, 27 (2): 306 - 311.
- [174] 刘鲁华, 汤国建, 余梦伦. 圆轨道近程自主交会轨道设计 [J]. 宇航学报, 2007, 28 (3): 653 - 658.
- [175] 刘鲁华, 韩宏伟. 基于微分方程法的近程交会滑轨轨道设计方法 [J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35 (3): 13 - 17.
- [176] 刘鲁华, 汤国建, 韩宏伟. 一种用于空间交会绕飞与逼近段的模糊控制律 [J]. 飞行力学, 2007, 25 (1): 59 - 62.
- [177] 孟云鹤, 贺勇军, 戴金海. 卫星编队的多冲量轨道机动路径规划方法 [J]. 宇航学报, 2005, 26 (4): 491 - 494.
- [178] 孟云鹤, 戴金海. 近圆轨道卫星编队捕获技术研究 [J]. 空间科学学报, 2006, 26 (2): 148 - 154.
- [179] 孟云鹤, 戴金海. 航天器编队飞行构形保持与重构的继电型控制 [J]. 国防科技大学学报, 2006, 28 (2): 7 - 12.
- [180] 孟云鹤, 韩宏伟, 戴金海. 近地轨道航天器编队构形重构的一种四冲量控制方法 [J]. 宇航学报, 2008, 29 (2): 505 - 510.
- [181] 孟云鹤, 戴金海. 星载 InSAR 辅星编队优化设计与分析 [J]. 中国空间科学技术, 2006, 26 (2): 10 - 16.
- [182] 孟云鹤, 戴金海. 星载 SAR 干涉测量中的卫星编队构形与姿态控制的协同 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18 (9): 2604 - 2608.
- [183] 孟云鹤, 陈克俊, 戴金海. 面向 DEMs 测量的 InSAR 系统伴星编队设

- 计优化 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39 (3): 544 - 549.
- [184] 安雪滢, 郗晓宁, 张为华, 等. 大椭圆轨道航天器四面体编队运动分析与设计 [J]. 国防科技大学学报, 2007, 29 (1): 21 - 26.
- [185] 安雪滢, 张为华, 杨乐平, 等. 基于 J2 项摄动的 MMS 任务编队优化设计 [J]. 宇航学报, 2007, 28 (2): 432 - 437.

第 1 章 绪 论

航天器相对运动问题是航天器由独立运行模式向多航天器协同运行模式发展过程中涉及的基本问题，其中的力学原理是解决航天器相对运动问题的基本理论，该理论的应用主要包括航天器空间交会技术和航天器编队飞行技术，以下从基本概念、特点及研究现状出发，对其中的相对运动问题进行综述。

1.1 航天器相对运动问题

事物总是按从简单到复杂，从个体到群体，从单功能到多功能的规律发展，航天技术也不例外，涉及多航天器应用技术的问题不断被提出，其中最具代表意义的是航天器空间交会和航天器编队飞行。空间交会主要涉及两个航天器之间的短时相对运动及控制问题，而航天器编队飞行常涉及多航天器间的长航时相对运动及控制问题。本书着重以这两类典型任务为背景探讨其中的相对运动问题，以期归纳出多航天器空间任务中的共性问题。

1.1.1 航天器空间交会

1.1.1.1 航天器空间交会的概念

航天器空间交会对接是 20 世纪 60 年代中期发展起来的一项具有战略意义的空间技术，它不仅是航天技术从试验型到应用型转变的重要标志，而且是一个国家航天技术发展水平的重要标志，从其诞生起就备受各航天大国青睐。该技术与工程应用结合非常紧密，目前为实现各种目的的交会对接任务已多达三百余次，当前正朝着自主交会对接（Autonomous Rendezvous and Docking, AR&D）技