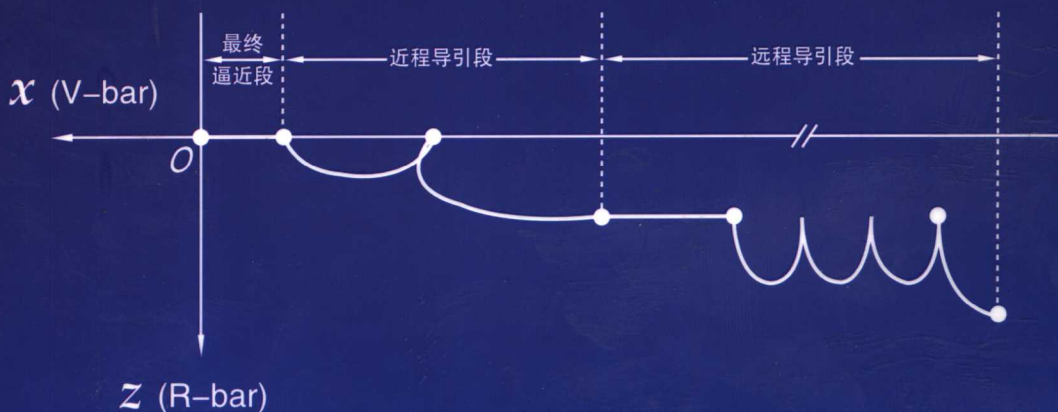


航天器交会对接技术

朱仁璋 著

Rendezvous and Docking
Techniques of Spacecraft

ZHU Renzhang



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

航天器交会对接技术 / 朱仁璋著. —北京: 国防工业出版社, 2007. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 05311 - 1

I. 航... II. 朱... III. 航天器对接 IV. V526

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 118990 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 18½ 字数 406 千字

2007 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 62.00 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



朱仁璋，德国慕尼黑工业大学博士，北京航空航天大学教授，博士生导师。江苏省扬州市人，1941年11月出生。1960年，江苏省扬州中学毕业。1965年，南京大学天文学系毕业。1965年至1985年，在第七机械工业部第八设计院与航天部第五研究院（中国空间技术研究院），从事火箭与卫星设计工作；参加了我国第一颗人造卫星运载火箭弹道设计与计算，以及我国第一颗返回式遥感卫星等的总体设计与轨道计算。1985年5月，受国家教委派遣，出国进修。1985年至1991年，在慕尼黑工业大学航天技术研究所进修与工作，为访问学者、助教。1989年5月，获慕尼黑工业大学工学博士学位。1991年至1993年，在加拿大麦吉尔大学（McGill University）力学工程系工作，完成博士后研究，任研究工程师。1993年12月，由中国空间技术研究院调入北京航空航天大学，任教授。

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选出版。

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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参
(按姓氏笔画排序)

李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 张鸿元

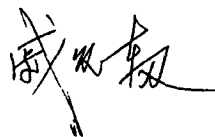
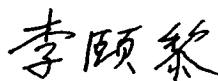
序

航天器交会对接技术是研究航天器在空间交会和对接过程中有关轨道、控制等方面的综合技术学科,以解决交会对接工程的技术方案为目标。由于它具有很强的工程背景,因此,它既以传统的轨道和控制的理论和方法为基础,又必须结合航天器的具体工程实践进行研究和分析,从而涉及的专业面很广,如轨道与姿态动力学、制导与控制技术、机械结构、测量和数据处理、航天推进等方面。交会对接是载人航天工程中的一项重大关键技术,是全面完成载人航天任务必须要解决的技术问题,同时也是人类向更大规模、更远宇宙空间进行航天活动的必要前提。

作者朱仁璋教授长期工作在航天科研和航天教育第一线。在 20 世纪六七十年代参加了我国第一颗人造地球卫星运载火箭(CZ-1 号)设计以及我国第一颗返回式遥感卫星研制的全过程,开创了我国卫星轨道设计的先例。之后,又在多种类型卫星(包括绳系卫星系统)、月球探测轨道等方面开展大量的研究,在轨道理论和卫星设计领域方面积累了深厚的理论基础和丰富的实践经验。在我国载人航天工程展开期间,朱仁璋教授又投入到载人航天方面的研究工作。1999 年,与戚发轫院士、李颐黎教授等合作,编著了 90 万字《载人航天器技术》大型学术著作;2003 年,该书第 2 版(增补“神舟”飞船内容)问世。近几年来,朱仁璋教授潜心钻研与载人航天密切相关的交会对接技术,取得重要的科研成果。本书正是朱仁璋教授在交会对接技术研究领域成果的系统总结,是作者又一部重要的学术著作。

本书密切结合载人航天工程,从交会对接基本轨道原理与姿态运动出发,深入系统地研究了交会对接过程中轨道动力学模型、交会对接的飞行策略、导引与控制规律、发射窗口等问题,全面完整地给出了工程实用的理论模型和工程仿真算例。本书内容充实,系统完整,理论结合实际,是广大航天科技工作

者学习和掌握航天器交会对接技术的一本优秀教材和科技参考书。同时,本书的出版对推进我国航天器交会对接技术的发展有重要意义,特别是对我国将要进行的载人航天器的交会对接试验,在轨道和控制技术方面将提供有力的技术支持。



2007年2月1日

余梦伦 中国运载火箭技术研究院研究员,中国科学院院士
李颐黎 中国空间技术研究院研究员,北京航空航天大学兼职教授
戚发轫 中国空间技术研究院研究员,中国工程院院士

前 言

航天器交会对接是载人航天工程的一项关键技术。几乎在所有的载人航天使命中(如天地往返运输、大型航天器的在轨装配与长期营运、航天器在轨服务、太空救援、登月以及星际航行等),都要应用交会对接技术。

1966年3月16日,Neil Armstrong 和 Dave Scott 乘坐“双子座”飞船,手动操作交会过程,与无人“阿金纳”目标飞行器对接,实现了两个航天器之间的首次交会对接。1967年10月30日,苏联飞船“宇宙号186”与“宇宙号188”完成了首次自动交会对接。此后,苏联(俄罗斯)与美国进行了一系列交会对接/停靠运作,包括1968年至1972年期间的“阿波罗”登月,1973年至1974年的天空实验室计划,1971年至1999年的苏联(俄罗斯)“礼炮”号和“和平”号空间站与“联盟”号飞船和“进步”号货船对接,1975年美国“阿波罗”飞船与苏联“联盟”号飞船对接,20世纪90年代美国航天飞机与俄罗斯“和平”号空间站的对接,以及从1998年10月开始的国际空间站的在轨组装、乘员更换与物资补给等太空使命。

2003年10月15日,中国成功发射了第一艘载人飞船,杨利伟乘坐“神舟”5号环绕地球飞行14圈后安全返回地面,开创了我国载人航天新纪元。2005年10月12日至17日,费俊龙与聂海胜驾驶“神舟”6号飞船飞行77圈,标志我国载人航天工程第一阶段的结束与第二阶段的开始。交会对接与舱外活动是我国载人航天工程第二阶段的重要项目。

航天器交会对接涉及两个飞行器,即目标航天器与追踪航天器。一般情况下,目标航天器为被动飞行器,追踪航天器为主动飞行器。通常将追踪航天器的起飞或入轨作为交会对接飞行的起始点。在交会对接飞行试验中,目标航天器在追踪航天器起飞或入轨前的飞行阶段,根据交会对接顶层设计要求,有可能需要进行轨道机动,因此,这一段可视为目标航天器的“预备段”飞行。

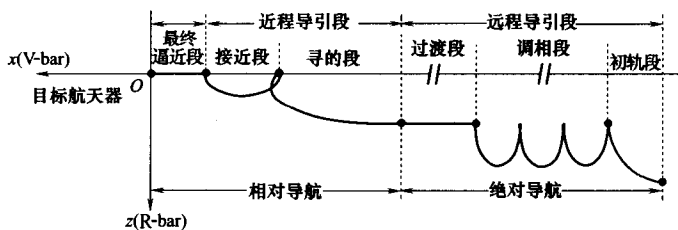
在交会对接飞行使命中,追踪航天器的飞行一般可分为下列7个阶段:(1)发射段;(2)远程导引段;(3)近程导引段;(4)最终逼近段;(5)对接(停靠)段;(6)联合飞行段;(7)分离与轨道转移段。其中,远程段与近程段及最终逼近段为交会飞行阶段(见图)。远程段为绝对导航阶段,近程段与最终逼近段以及对接后的分离转移段为相对导航阶段。近程段又可细分为寻的段与接近段(包括可能需要的绕飞),最终逼近段包括对接前的靠拢与对准运作。

全书共分6章,着重阐述有关航天器交会对接总体设计方面的问题,包括基础理论,制导、控制与动力学,联接系统,交会飞行设计方法等内容。

第1章“交会运动基础理论”,包括绝对运动(相对引力中心的轨道运动)与相对运动(追踪航天器相对目标航天器的运动),两点边值问题,以及姿态运动等内容。

第2章“远程导引段”的内容涉及轨道修正,调相方法与策略,以及由绝对导航向相对导航的过渡段飞行设计。

第3章“近程导引段”着重论述近程段相对运动轨迹的设计方法,制导策略与控制算



航天器交会飞行示意图($-V\text{-bar}$ 逼近)

法,包括位置转移与进入最终逼近段起点的绕飞。

第4章“最终逼近段”阐述最终逼近段的标称轨迹设计与安全模式,应急后撤机动策略,以及相对姿态与相对位移的测定、估计与控制等问题。

第5章“联接与分离转移”分析对接(停靠)系统的组成与对接(停靠)系统动力学,以及对接后的分离与轨道转移策略。

第6章“飞行程序与发射时间”提出交会航天器飞行程序设计(包括目标航天器预备段飞行机动)及发射时间选择与确定的方法。

与交会对接总体设计相关的内容,例如,载人航天器的系统组成、导航测量技术、系统测试与验证等,有兴趣的读者请参阅《载人航天器技术(第2版)》(主编戚发轫,副主编朱仁璋、李颐黎,国防工业出版社,2003)、《空间交会对接测量技术及工程应用》(主编张淑琴,副主编王忠贵、冉隆燧,中国宇航出版社,2005)、《Automated Rendezvous and Docking of Spacecraft》(Wigbert Fehse, Cambridge University Press, 2003)等有关专著。

为满足未来航天使命与空间探测的需求,航天器交会对接技术也在不断发展,引起人们关注的问题可能包括下列项目:(1)航天器自主导航系统的兼容性;(2)航天器联接系统接口的标准化与通用化;(3)GNC性能的提高及周边对接系统与停靠系统技术的发展;(4)变结构控制、模糊逻辑与遗传算法等在自主交会控制中的应用;(5)空间系绳在空间交会对接使命中的应用;(6)智能结构在对接系统与停靠系统中的应用。上述问题有待深入研究与探讨,以进一步提高空间交会对接技术水平。

本书的读者对象主要为航天领域的高校师生与科技工作者,本书可作为大学航天专业的教材与航天设计师的参考书。

最后,作者对中国空间技术研究院的支持与国防科技图书出版基金的资助,表示崇高的敬意;对所有给予关心和帮助的人,致以诚挚的谢意。

限于作者水平,本书肯定有不足之处,恳请读者批评指正。

朱仁璋

2007年5月5日

主要符号含义表

符号	主要含义
a	轨道半长轴
a_0	机动初始轨道半长轴
a_x, a_y, a_z	Hill 坐标系中的机动加速度分量
a_x^*, a_y^*, a_z^*	Hill 坐标系中的制导机动加速度分量
$\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$	Hill 坐标系中的控制机动加速度分量
c	Lambert 问题中的弦长(轨道上两点连线的长度); 切向冲量机动系数, $c = \sqrt{(1 + e \cos E)/(1 - e \cos E)}$; $c \equiv \cos \vartheta$
C	弹性系数(对接系统动力学)
C_D	大气阻力系数
C	速度约束矩阵(停靠系统动力学)
D	靶标基准面直径; 阻尼系数(对接系统动力学)
D	姿态干扰力矩(姿态动力学)
e	轨道偏心率; 恢复系数(对接系统动力学)
e_x	偏心率矢量 e 的分量, $e_x = e \cos \omega$
e_y	偏心率矢量 e 的分量, $e_y = e \sin \omega$
e	偏心率矢量; 欧拉轴矢量(与欧拉角 ϕ 对应)
E	偏近点角; 弹性模量(停靠系统动力学)
E	单位矩阵
f	计算机视觉系统中的相机焦距

f_r	径向推力加速度
f_u	周向推力加速度
f_t	切向推力加速度
f_n	横向推力加速度
f_h	(轨道面外)法向推力加速度
f	摄动(或机动)加速度矢量; 广义外力(停靠系统动力学)
G	牛顿引力常数; 求解测距的目标函数; 四元数估计法中的增益函数
h	轨道运动面积速度的两倍, $h = \mathbf{h} = \sqrt{\mu p}$; 轨道高度
\mathbf{h}	动量矩矢量, $\mathbf{h} = \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}$, \mathbf{r} 为轨道向径; Kalman 滤波中的测量向量与状态向量的关系函数
H	大气密度标高
$\mathbf{H}(\vartheta)$	C - W 解的状态转移矩阵, $\mathbf{H}(\vartheta) = [\mathbf{M}(\vartheta) \quad \mathbf{N}(\vartheta)]$
i	轨道倾角
I	在机体坐标系中表示的转动惯量矩阵
J_2	地球引力位系数, $J_2 = 1.08263 \times 10^{-3}$
J	雅可比矩阵
m	质量
M	平近点角, $M = n(t - t_p)$; 地球质量
$\mathbf{M}(\vartheta), \mathbf{N}(\vartheta)$	表示 C - W 解的状态转移矩阵 $\mathbf{H}(\vartheta)$ 的矩阵块
$\mathbf{M}(\mathbf{Q}), \mathbf{N}(\mathbf{Q})$	以四元数 \mathbf{Q} 表示的姿态转移矩阵
n	平均运动, $n^2 a^3 = \mu$
n_0	初始轨道平均运动, $n_0^2 a_0^3 = \mu$
p	半通径, $p = a(1 - e^2)$
P	轨道周期, $P = 2\pi/n$
\mathbf{q}	四元数 \mathbf{Q} 的矢量部分, $\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T$
\mathbf{Q}	四元数, $\mathbf{Q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4]^T$

r	轨道向径(地心至航天器质心的距离); 追踪航天器离 Hill 坐标系原点(目标航天器质心)的距离
\boldsymbol{r}	轨道向径矢量; 追踪航天器在 Hill 坐标系中的位置矢量, $\boldsymbol{r} = [x \ y \ z]^T$
R	地球平均半径, $R \approx 6371 \text{ km}$; 日月引力摄动函数; 接近段绕飞运动的圆半径; 计算机视觉系统中的靶标基准面半径
s	空间三角形周长之半, $s = (r_1 + r_2 + c)/2$ (c 为弦长); 切向飞行路径(轨道弧长), $ds/dt = v$; $s \equiv \sin \vartheta$
s^*	周向飞行路径, $ds^*/du = r$
\boldsymbol{S}_s	太阳方向矢量
t	时间(区间); 时刻(瞬时)
t_d	停泊时间
t_p	过近地点时刻
T	追踪航天器入轨后的交会段总的飞行时间; 转移起点(t_0)至终点(t_e)的时间, $T = t_e - t_0$; 多维系统动力学(拉格朗日方程)中的动能
T^*	目标航天器预备段飞行时间
\boldsymbol{T}	相对位移矢量(靶标坐标系原点在相机坐标系中的位置矢量); 姿态控制力矩(姿态动力学)
u	纬度幅角, $u = \omega + \theta$; 极坐标系(r, u)中的极角
U	多维系统动力学(拉格朗日方程)中的势能
v	轨道速度
Δv	速度增量
\boldsymbol{v}	轨道速度矢量, $\boldsymbol{v} = d\boldsymbol{r}/dt$
V	地球引力场摄动函数
ΔV_c	避撞机动速度增量
\boldsymbol{W}	Gauss - Newton 迭代法中的权系数对角矩阵; 轨道面法线方向矢量, $\boldsymbol{W} = \boldsymbol{h}/ \boldsymbol{h} $ (\boldsymbol{h} 为动量矩矢量)

x, y, z	Hill 坐标系坐标
$\mathbf{x}(t)$	Kalman 滤波中的状态向量
$\mathbf{z}(t)$	Kalman 滤波中的测量向量
α, β	Lambert 问题中的拉格朗日参数
α_s	太阳赤经
δ_s	太阳赤纬
θ	真近点角; 欧拉角中的俯仰角
ϑ	$\vartheta = n(t - t_0)$
θ^*	相位角(两交会航天器的地心张角)
$\Delta\theta^*$	调相角(相位角的减小量)
θ_i, θ_{ij}	对角线交点测距方程中测距矢量间的夹角
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	第一类欧拉角
θ	第一类欧拉角向量, $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$; 航天器姿态角与机械臂转角组成的向量(停靠系统动力学)
Θ	轨道向径矢量间的夹角
λ	星下点经度(东经); 四元数估计法中的拉格朗日乘子
Λ	太阳黄经
μ	地球引力常数, $\mu = GM = 3.9860 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$
ν	摄动天体(月球或太阳)质量与地球质量之比
ρ	大气密度; 运动轨迹的曲率半径; 相对距离
σ_r	$\sigma_r = f_r/n_0^2 a_0$
σ_t	$\sigma_t = f_t/n_0^2 a_0$
σ_x	$\sigma_x = a_x/n_0^2 a_0, \sigma_x \approx \sigma_t$
σ_z	$\sigma_z = a_z/n_0^2 a_0, \sigma_z \approx -\sigma_r$
φ	星下点纬度;

	欧拉角中的滚转角
ϕ	欧拉角(与欧拉轴矢量 e 对应)
Φ	Kalman 滤波中状态转移矩阵的一般表示
ψ	欧拉角中的偏航角
Ψ	广义坐标(停靠系统动力学)
ω	近地点幅角
ω	刚体转动角速度矢量
ω_e	地球自转角速度
ω_t	目标航天器转动角速度矢量
ω_c	追踪航天器转动角速度矢量
ω_r	交会航天器相对转动角速度矢量
Ω	升交点赤经
Ω_d	降交点赤经, $\Omega_d = \Omega + \pi$
Ω_G	入轨时刻的升交点地理经度(东经)

目 录

第 1 章 交会运动基础理论	1
1.1 绝对运动	1
1.1.1 二体问题	1
1.1.2 轨道根数与位置和速度	4
1.1.3 摄动运动方程	6
1.1.4 主要轨道摄动	11
1.1.5 连续常值推力机动	15
1.2 相对运动	23
1.2.1 Hill 微分方程	23
1.2.2 Hill 方程分析解	25
1.2.3 N 次推力机动模式	31
1.3 两点边界值问题	37
1.3.1 绝对运动 Lambert 问题	37
1.3.2 相对运动 Lambert 问题	53
1.4 四元数与姿态运动	57
1.4.1 四元数	57
1.4.2 姿态运动	61
1.5 小结	62
参考文献	63
第 2 章 远程导引段	64
2.1 远程导引段概述	64
2.1.1 初始轨道	64
2.1.2 调相轨道	64
2.1.3 过渡轨道	64
2.1.4 轨道机动	65
2.1.5 飞行时间与调相角	65
2.2 轨道修正方法	65
2.2.1 轨道倾角与升交点赤经的修正	65
2.2.2 轨道半长轴的改变	67
2.2.3 半长轴与偏心率及近地点幅角的联合修正	69
2.2.4 轨道面内与面外的联合修正	71

2.3	调相机动策略	71
2.3.1	调相原理与约束条件	71
2.3.2	调相轨道选择	72
2.4	导航转换过渡段设计	76
2.4.1	过渡段设计条件与要求	76
2.4.2	过渡段终点位置	77
2.4.3	过渡段起点位置	79
2.4.4	模拟算例	82
2.5	小结	84
	参考文献	84
第3章	近程导引段	85
3.1	寻的段转移	85
3.1.1	切向冲量机动	86
3.1.2	切向连续推力机动	88
3.1.3	切向 N 次推力机动	89
3.2	V-bar 保持点转移	90
3.2.1	保持点转移机动策略	90
3.2.2	径向推力机动	92
3.2.3	双向推力机动	102
3.3	接近段绕飞转移	107
3.3.1	-V-bar 至 +V-bar 的绕飞转移	108
3.3.2	V-bar 至 R-bar 的绕飞转移	111
3.3.3	V-bar 至 H-bar 的绕飞转移	114
3.4	近程导引段轨迹控制	116
3.4.1	控制方法	117
3.4.2	控制阶段	118
3.4.3	控制算法	120
3.4.4	模拟算例	123
3.5	小结	127
	参考文献	128
第4章	最终逼近段	129
4.1	标称轨迹制导机动	129
4.1.1	制导加速度	129
4.1.2	逼近速度	130
4.1.3	制导机动算例	131
4.2	轨迹安全模式	133
4.2.1	被动安全模式	133

4.2.2	主动安全模式	135
4.2.3	安全模式算例	137
4.3	应急后撤机动	142
4.3.1	应急后撤策略	143
4.3.2	后撤轨迹设计	143
4.3.3	后撤机动模拟算例	147
4.4	相对状态测定	151
4.4.1	相对状态测定原理	151
4.4.2	相对状态方程基本形式	152
4.4.3	相对状态求解算法	155
4.4.4	相对状态确定精度分析	161
4.4.5	相对状态确定模拟算例	162
4.5	相对状态估计	168
4.5.1	相对状态估计原理	168
4.5.2	相对姿态估计	172
4.5.3	相对位移估计	176
4.6	相对状态控制	180
4.6.1	相对状态控制原理	180
4.6.2	相对姿态控制	181
4.6.3	相对位移控制	188
4.6.4	人工控制技术	200
4.7	小结	202
	参考文献	203
第5章	联接与分离转移	205
5.1	航天器联接系统	205
5.1.1	联接系统任务与组成	205
5.1.2	对接机构设计要求	206
5.1.3	对接机构类别	207
5.1.4	联接系统组件	208
5.1.5	典型的联接系统	213
5.1.6	对接技术发展趋势	220
5.2	对接系统动力学	220
5.2.1	坐标系定义	221
5.2.2	基本运动方程	222
5.2.3	空间矢量方程	223
5.2.4	接触力与力矩	227
5.2.5	接触动力学简化分析	228
5.3	停靠系统动力学	233