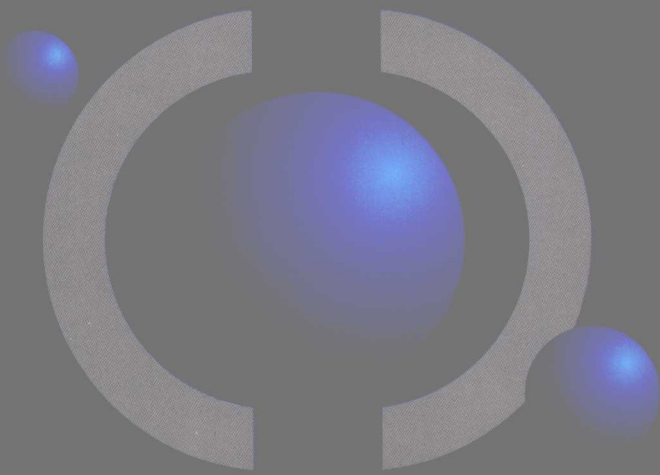


Dynamic Analysis on Coupled Astronaut-Vehicle System

航天员-航天器耦合 动力学分析

李东旭 陈善广 著



中国宇航出版社

航天员 - 航天器耦合 动力学分析

Dynamic Analysis on Coupled Astronaut - Vehicle System

李东旭 陈善广 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

航天员—航天器耦合动力学分析 / 李东旭,陈善广著. —北京:
中国宇航出版社,2007.9

ISBN 978-7-80218-199-1

I.航... II.①李...②陈... III.航天员—航天器—耦合—动力学 IV.V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 088549 号

责任编辑 刘亚静 责任校对 王妍
刘西琳 封面设计 03 工舍

出版 中国宇航出版社
发行 北京市阜成路8号 邮编 100830
社址 (010)68768548
网址 www.caphbook.com/www.caphbook.com.cn
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 北京智力达印刷有限公司
版次 2007年9月第1版 2007年9月第1次印刷
规格 880×1230 开本 1/32
印张 15.25 字数 439千字
书号 ISBN 978-7-80218-199-1
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

几十年前,发射一次火箭就代表一个国家的航天活动。到了今天,空间科学及应用才能真正代表航天。2003年10月,我国第一艘载人飞船神舟-5号上天,标志着中国掌握了载人航天技术,成为世界上能独立开展载人航天活动的第三个国家。2005年,我国2名航天员在神舟-6号飞船上开展的科学实验是我国历史上第一次真正意义上有人参与的空间科学实验。

载人航天与其他航天活动相比,一个显著的特点是航天员参与太空活动,从事科学实验、对地观测、机械操作等。航天员的参与必然给航天器带来新的问题和新的挑战。航天员的各种活动,如穿舱、操纵仪器等,必然会对航天器的姿态、微重力环境等带来影响,从而进一步影响与之相关的科学实验、对地观测、指向/定位精度等。航天员的太空活动是不可避免的,故其影响也就不可避免。而影响的程度因航天员活动的强度、形式、作用范围、作用时间等不同而不同。有的影响可以忽略不计,有的可能超过精度要求所能允许的范围,有的甚至可能超过控制系统的能力而造成灾难性的后果(如果航天员活动的某种频率与航天器的某个模态合拍的话)。航天员太空活动的意义具有二重性:一方面,空间活动中航天员的直接参与对科学技术的发展与进步起了积极的推动作用,拓宽了科学研究的领域和范畴,使许多在地面重力加速度环境条件下无法开展的研究得以在太空实现,例如,利用微重力环境条件的晶体生长、细胞分裂、材料加工等;另一方面,正是由于人的参与,给航天器系统,包括姿态稳定、指向精度、微重力环境等,带来了不可忽视的干扰和影响。

同样,航天器的各种运动学和动力学行为,如变轨、调姿、外力干扰、火箭飞行等,也会给航天员带来生理、心理,以及运动学和动力学

方面的影响,例如振动频率的影响。根据 ISO 标准,80 Hz 以上的载荷对人体的影响很小,对人体危害最大的载荷范围是 0.1~0.63 Hz 和 1~8 Hz。如果火箭或航天器上的环境载荷的频率进入或接近危害频率的范围的话,就可能使航天员感觉不适甚至引起生理失调。

总之,航天员、航天器、内环境、外环境等,彼此之间并非完全独立,而是构成一个相互影响、高度耦合的系统。因此航天员航天器系统面对的问题,除了各系统本身的问题外,还有各系统间的耦合效应。航天器的冲击载荷、振动及噪声环境等,轻则带来航天员心理和生理的不适,重则危及航天员的生命。航天员的空间活动也会对舱内的微重力环境、航天器的飞行姿态等造成一定影响,而这个影响又可能反作用于航天员。

本书针对航天员-航天器耦合动力学问题,在综述了国外相关研究情况的基础上,以航天员-航天器系统为对象,较系统地讨论了与航天员舱内活动相关的动作类集合、脚本设计、动作分解等,以及航天员活动中所涉及的运动学及动力学分析中的基本问题;建立了相关数学模型,包括航天员人体测量学模型及生理学模型、航天员运动学和动力学模型、航天器在航天员运动干扰下的数学模型和动力学方程、航天员和航天器复合系统动力学基本方程等;分析了航天员空间活动中的若干动力学扰动问题,并建立了干扰力模型以及航天器在航天员干扰和外部动力学干扰联合作用下的数学模型和动力学方程;分析了航天器在航天员扰动下的控制问题,讨论了几种控制策略和控制方法,设计了相应的控制器;提出了航天员对微重力环境扰动的控制方案建议;针对航天器振动对航天员影响的问题,在分析动力学系统传递函数特征的基础上提出了一种吸振器设计方案。作为对所建立的动力学模型和控制系统方案的应用演示,选用了国外的干扰力飞行实验数据和假想的航天员活动方式及航天器参数作为系统输入,对所建立的动力学模型进行了数字仿真。通过对仿真结果的分析,得出了一些对理论和工程均有一定参考价值的建议。

在国外,航天活动中已开展了大量的相关实验,包括地面实验和飞行实验,为载人航天事业的发展与航天技术的进步奠定了基础。在

我国,载人航天刚刚起步,真正有人参与的空间科学实验也开始不久。虽然有一些国外资料可查,有一些国外的实验数据可参考,有一些国外的研究结论可借鉴,但毕竟能得到的资料和数据非常有限。因此,我国有必要针对航天员—航天器系统中航天员与航天器相互影响的问题以及若干相关动力学问题独立自主地开展研究。

本书对航天员与航天器系统的动力学问题作了一些探索和尝试性的研究。

本书共分 12 章。各章内容分述如下。

第 1 章:世界载人航天发展简史。对国内外载人航天的发展情况作了简要的介绍,包括苏联(俄罗斯)、美国、欧洲、中国等的载人航天进程和主要的载人航天事件。

第 2 章:航天员与航天器的动力学相互影响问题。主要介绍自 20 世纪 60 年代以来以美国为代表的航天国家对航天员的扰动影响的研究情况及发展历史,包括理论分析、地面实验和重要的空间飞行实验等。对其实验结果进行了分析,指出这些结果对我们的启示和载人航天面临的挑战与种种问题,以及开展航天员—航天器耦合动力学研究的意义,为后续的研究作铺垫。

第 3 章:航天员—航天器耦合动力学分析中的基本问题。对航天员空间活动的内容进行了介绍和分类,讨论了航天员空间任务及其相关运动的分解与组合问题。对航天员空间任务及其相关运动进行分解,是下一步航天员空间活动运动学和动力学建模,以及求解航天员运动参数的基础。对频度的概念进行了阐述,包括任务事件、动力学事件的一般性定义和广义定义。分析并确定事件的频度有利于分析航天员运动对航天器影响的概率和范围。

第 4 章:人体运动学及动力学模型。构建了航天员的测量学模型和生物力学模型,建立了航天员运动学方程和动力学方程。

第 5 章:航天员空间活动运动学和动力学分析。基于已建立的人体几何模型、运动学模型和动力学模型,以典型动作类为对象,对航天员活动中的静态参数——转动惯量、动力学参数——角动量、运动学参数——质心运动轨迹,进行了分析,并对结果进行了讨论,提出了航天员活动中应遵循的原则。

第6章:航天员扰动动力学建模。本章将航天员和航天器作为一个系统来考虑,并针对此系统建立了仅考虑航天员干扰作用下的航天器动力学方程。采用9段人体模型建立了航天员坐标系与体段之间的坐标系变换关系;设定了航天器坐标系及惯性参考系,并建立了所有坐标系之间的变换关系,为物理问题的描述和数学模型的建立奠定了基础;假设航天器仅受到航天员活动的干扰而忽略其他干扰,在此前提下,根据系统动量矩守恒的基本原理,通过详细的公式推导得到了求解该系统动力学问题的基本方程,为进一步研究航天器在航天员活动影响下的动力学问题提供了分析模型。

第7章:航天员-航天器系统在航天员扰动下的动力学仿真。在“概念层次”上,即抽象各种运动形态的共有特征,对航天员的运动进行分解和组合。将航天员的活动分解为一些典型的动作单元,并以穿舱活动为例建立了动作单元。参考了美国开展的相关实验的测量结果,并结合假设,仿真分析了起立动作、停靠动作、右臂单摆运动、左臂双摆运动和右臂操作仪表盘5类航天员运动对航天器姿态的扰动影响。

第8章:航天员-航天器耦合动力学分析。全面考虑了航天员扰动和航天器外部干扰共同作用的情况,给出了干扰力模型,分别针对航天员在束缚状态、漂浮状态和碰撞情况,建立了航天器在有控和无控条件下的运动学方程和动力学方程。

第9章:航天员-航天器系统动力学仿真分析。对第8章所建立的系统方程进行了数值仿真计算和分析,通过将不同干扰力模型输入系统进行仿真分析,得出了一些有参考价值的结果和结论。

第10章:航天员-航天器-姿态控制系统耦合动力学分析。主要分析了航天员对“有控”航天器的姿态扰动问题:1)假设航天器采用喷气推力进行姿态控制,根据给定的姿态精度范围,设计了航天器姿态稳定时的极限环参数和开关曲线。2)根据航天器姿态控制的性能指标要求,设计了航天器的姿态控制律,在此基础上,分析了航天员舱内活动引起的扰动对航天器姿态的影响情况,对航天员推离动作进行了仿真,并研究了航天员穿舱活动对航天器的影响。计算中采用了国外实测统计数据。3)针对航天员-航天器-姿态控制系统建立的数

学模型进行了仿真分析,为航天员空间活动对“有控”航天器的干扰影响分析提供了一种分析的方法。4)研究了PD控制器设计问题,也进行了仿真分析。通过分析得出了一系列参考结论。

第11章:航天员-航天器力学环境耦合影响问题。对航天员活动可能对空间微重力造成的影响进行了分析,并在分析国外控制方法的基础上,提出了控制方案建议。同时,也对航天器振动可能对航天员身心造成不良影响进行了分析,提出了吸振器构想和被动控制建议。

第12章:结论与展望。从6个方面对本书的研究给出了结论性的意见;从8个方面对相关学科的发展提出了期待;对结构、工效、控制、微重力利用与控制、力学实验与测量设备、装置、地面实验、空间实验、航天员训练、一体化设计与计算机仿真、半物理仿真、振动控制等提出了具体建议,最后对载人航天的发展进行了展望。

在这里我要特别地感谢我的博士研究生刘志臻、仝西岳和硕士研究生蒋婷、李杨柱。他们以其对中国载人航天事业极大的兴趣、饱满的热情和无怨无悔的奉献精神,在该项研究中不遗余力地付出了各自的聪明才智、心血和汗水。他们开展了大量艰苦而富有成效的研究,并取得了若干有创造性的成果。本书中许多章节的结果与结论主要来自他们的研究。其中,刘志臻和李杨柱为国内外研究情报的收集、整理和分析作出了主要的贡献。第4章和第5章主要来自蒋婷的研究。第6章和第7章主要来自李杨柱的研究。第8章和第9章主要来自刘志臻的研究。仝西岳在自己的论文工作之余,也参加了该项研究工作,与刘志臻、李杨柱一起共同开展了本书第10章所涉及的研究。第11章主要来自刘志臻的研究。如果没有他们的辛勤劳动和无私奉献,这本书是不可能完成的。在该项研究工作中及该书的撰写过程中还得到了许多领导、专家和朋友们的大力支持和真情帮助。在此,一并表示诚挚的感谢。

该书是我国首次研究航天员-航天器耦合动力学问题的专著。书中所建立的模型、方程,以及仿真分析中所涉及的对象和所引用的参数对航天员和载人航天器均无特指,具有普遍性意义,对分析未来载人航天的相关问题及开展有人参与的空间科学实验等,都有一定的

参考价值。

由于作者经验不足、时间短缺、认知水平有限，书中错误、问题、遗漏、疏忽等，在所难免。恳请各位专家同人批评斧正。

李东旭

于中国航天员科研训练中心

2006年

目 录

| | |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 世界载人航天发展简史 | 1 |
| 1.1 发展载人航天的意义 | 1 |
| 1.2 苏联及俄罗斯载人航天简史 | 3 |
| 1.2.1 东方号飞船 | 4 |
| 1.2.2 上升号飞船 | 7 |
| 1.2.3 联盟号系列飞船 | 9 |
| 1.2.4 进步号系列货船 | 18 |
| 1.2.5 第一代礼炮号空间站 | 19 |
| 1.2.6 第二代礼炮号空间站 | 21 |
| 1.2.7 和平号空间站 | 23 |
| 1.2.8 苏联航天飞机的发展历程 | 29 |
| 1.2.9 俄罗斯的新航天计划 | 30 |
| 1.3 美国载人航天简史 | 31 |
| 1.3.1 飞船的发展历程 | 32 |
| 1.3.2 阿波罗登月工程 | 33 |
| 1.3.3 航天飞机的发展历程 | 37 |
| 1.3.4 天空实验室 | 39 |
| 1.3.5 国际空间站 | 40 |
| 1.3.6 美国的新航天计划 | 50 |
| 1.4 欧洲载人航天简史 | 52 |
| 1.5 中国载人航天发展简述 | 53 |
| 1.5.1 载人航天工程——扬帆起航 | 53 |
| 1.5.2 从神舟-1号到神舟-4号飞船——探索前进 | 56 |
| 1.5.3 神舟-5号飞船——千年跨越 | 63 |

| | |
|---------------------------------------|------------|
| 1.5.4 神舟-6号飞船——承先启后 | 67 |
| 参考文献 | 71 |
| 第2章 航天员与航天器的动力学相互影响问题 | 76 |
| 2.1 引言 | 76 |
| 2.2 问题与挑战 | 77 |
| 2.2.1 载人航天发展中提出的新问题 | 77 |
| 2.2.2 载人航天对科学技术提出的挑战 | 78 |
| 2.3 国外研究情况简介 | 80 |
| 2.3.1 关于分析模型 | 82 |
| 2.3.2 地面模拟实验 | 87 |
| 2.3.3 飞机失重实验 | 98 |
| 2.3.4 在轨飞行实验 | 98 |
| 2.3.5 其他相关研究及实验 | 116 |
| 2.4 国外研究结果的启示 | 118 |
| 2.4.1 实验数据指示 | 119 |
| 2.4.2 实验主要结论 | 120 |
| 2.4.3 启示 | 121 |
| 2.5 研究航天员-航天器耦合动力学的意义 | 122 |
| 2.5.1 现实意义 | 123 |
| 2.5.2 工程意义 | 124 |
| 2.5.3 理论及科学意义 | 124 |
| 2.5.4 广泛的空间应用意义 | 124 |
| 2.5.5 对航天员舱外活动的意义 | 125 |
| 2.5.6 对实验的指导意义 | 125 |
| 2.5.7 对确保飞行成功与安全意义 | 125 |
| 参考文献 | 126 |
| 第3章 航天员-航天器耦合动力学分析中的基本问题 | 129 |
| 3.1 引言 | 129 |
| 3.2 航天员舱内活动项目 | 130 |
| 3.2.1 特定的空间任务 | 130 |
| 3.2.2 在轨生活 | 131 |

| | | |
|------------|--------------------------|------------|
| 3.2.3 | 可能随机出现的活动 | 132 |
| 3.3 | 航天员活动分类 | 133 |
| 3.3.1 | 按运动形式分类 | 133 |
| 3.3.2 | 按动力学特征分类 | 134 |
| 3.3.3 | 按运动学特征分类 | 135 |
| 3.3.4 | 按身体参与状态分类 | 136 |
| 3.4 | 任务的分解与组合 | 137 |
| 3.4.1 | 任务全周期定义 | 137 |
| 3.4.2 | 任务分解的原则 | 138 |
| 3.4.3 | 任务分解示例 | 138 |
| 3.5 | 运动的分解与组合 | 139 |
| 3.5.1 | 动作分解的原则 | 140 |
| 3.5.2 | 动作分解示例 | 140 |
| 3.6 | 航天员空间活动脚本设计 | 142 |
| 3.6.1 | 脚本设计的目的 | 143 |
| 3.6.2 | 脚本设计的内容 | 143 |
| 3.6.3 | 关于航天员活动脚本的声明 | 143 |
| 3.6.4 | 脚本设计举例 | 144 |
| 3.7 | 频度分析 | 157 |
| 3.7.1 | 开展频度分析的意义 | 157 |
| 3.7.2 | 关于频度的一般性定义 | 158 |
| 3.7.3 | 关于事件的定义 | 160 |
| 3.7.4 | 关于时间的定义 | 161 |
| 3.7.5 | 航天员空间活动频度的定义 | 163 |
| 3.7.6 | 对航天员空间活动频度的度量 | 164 |
| 3.7.7 | 频度分析方法 | 165 |
| 3.8 | 小结 | 168 |
| | 参考文献 | 168 |
| 第4章 | 人体运动学及动力学模型 | 170 |
| 4.1 | 引言 | 170 |
| 4.2 | 人体测量学模型 | 170 |

| | | |
|--------------|-------------------------------|------------|
| 4.2.1 | Hanavan 的人体模型 | 170 |
| 4.2.2 | 人体测量尺寸 | 171 |
| 4.2.3 | 质量参数 | 172 |
| 4.2.4 | 人体体段模型及其参数计算公式 | 173 |
| 4.2.5 | 人体几何参数及静态参数 | 177 |
| 4.3 | 人体的生物力学模型 | 178 |
| 4.3.1 | 人体平面及人体轴定义 | 178 |
| 4.3.2 | 人体坐标系定义 | 179 |
| 4.3.3 | 人体关节活动范围界定 | 180 |
| 4.4 | 人体运动学模型 | 182 |
| 4.4.1 | 人体正向运动学模型 | 183 |
| 4.4.2 | 人体反向运动学模型 | 185 |
| 4.5 | 航天员的动力学模型 | 187 |
| 4.5.1 | 人体树形拓扑结构 | 187 |
| 4.5.2 | 航天员在自由态下的动力学方程 | 190 |
| 4.5.3 | 航天员在束缚态下活动的动力学模型 | 191 |
| 4.6 | 小结 | 194 |
| | 参考文献 | 194 |
| 第 5 章 | 航天员空间活动运动学和动力学分析 | 196 |
| 5.1 | 引言 | 196 |
| 5.2 | 仿真分析方法 | 196 |
| 5.2.1 | 任务的介绍 | 197 |
| 5.2.2 | 仿真计算 | 197 |
| 5.2.3 | 分析比较 | 199 |
| 5.3 | 活动类型分析 | 200 |
| 5.3.1 | 航天员活动的分类 | 200 |
| 5.3.2 | 典型动作类 | 200 |
| 5.3.3 | 航天员活动的组合 | 201 |
| 5.3.4 | 航天员空间活动特征状态分析 | 202 |
| 5.3.5 | 讨论 | 204 |
| 5.4 | 航天员的运动参数分析 | 204 |

| | | |
|--------------|---------------------------------------|------------|
| 5.4.1 | 运动参数的分析步骤 | 204 |
| 5.4.2 | 典型姿态的姿态角 | 205 |
| 5.4.3 | 常见典型动作的转动惯量计算 | 213 |
| 5.4.4 | 航天员旋转运动分析 | 214 |
| 5.4.5 | 讨论 | 221 |
| 5.5 | 动力学参数分析 | 222 |
| 5.5.1 | 典型动作的角动量分析 | 222 |
| 5.5.2 | 旋转运动角动量计算 | 226 |
| 5.5.3 | 旋转运动中质心运动轨迹分析 | 226 |
| 5.5.4 | 讨论 | 226 |
| 5.6 | 小结 | 229 |
| | 参考文献 | 229 |
| 第 6 章 | 航天员扰动动力学建模 | 231 |
| 6.1 | 引言 | 231 |
| 6.2 | 基本假设 | 231 |
| 6.3 | 坐标系定义 | 232 |
| 6.3.1 | 常用坐标系 | 232 |
| 6.3.2 | 航天员坐标系 | 233 |
| 6.4 | 系统动力学方程 | 235 |
| 6.4.1 | 符号记法说明 | 235 |
| 6.4.2 | 航天器动量矩 | 238 |
| 6.4.3 | 航天员动量矩 | 239 |
| 6.4.4 | 航天员 - 航天器系统动量矩 | 240 |
| 6.4.5 | 等效扰动力矩 | 250 |
| 6.5 | 小结 | 250 |
| | 参考文献 | 251 |
| 第 7 章 | 航天员 - 航天器系统在航天员扰动下的动力学仿真 | 253 |
| 7.1 | 引言 | 253 |
| 7.2 | 运动分解 | 254 |
| 7.2.1 | 自由态动作分解 | 254 |
| 7.2.2 | 调姿动作 | 256 |

| | | |
|------------|----------------------------------|------------|
| 7.2.3 | 束缚态动作分解 | 257 |
| 7.3 | 航天员空间动作集合 | 258 |
| 7.4 | 起立动作对航天器扰动仿真分析 | 259 |
| 7.4.1 | 动作设计 | 259 |
| 7.4.2 | 原始参数 | 259 |
| 7.4.3 | 相关参数计算 | 262 |
| 7.4.4 | 仿真结果 | 264 |
| 7.5 | 停靠动作对航天器扰动仿真分析 | 266 |
| 7.5.1 | 动作设计 | 266 |
| 7.5.2 | 原始参数 | 266 |
| 7.5.3 | 相关参数计算 | 268 |
| 7.5.4 | 仿真结果 | 270 |
| 7.6 | 右臂单摆运动对航天器扰动仿真分析 | 272 |
| 7.6.1 | 动作设计 | 272 |
| 7.6.2 | 原始参数 | 273 |
| 7.6.3 | 仿真结果 | 273 |
| 7.7 | 左臂双摆运动对航天器扰动仿真分析 | 275 |
| 7.7.1 | 动作设计 | 275 |
| 7.7.2 | 原始参数 | 275 |
| 7.7.3 | 仿真结果 | 277 |
| 7.8 | 右臂操作仪表盘对航天器扰动仿真分析 | 278 |
| 7.8.1 | 动作设计 | 278 |
| 7.8.2 | 原始参数 | 278 |
| 7.8.3 | 仿真结果 | 279 |
| 7.9 | 小结 | 280 |
| | 参考文献 | 281 |
| 第8章 | 航天员-航天器耦合动力学分析 | 284 |
| 8.1 | 引言 | 284 |
| 8.2 | 航天员不同活动引起的动力学问题分析 | 285 |
| 8.2.1 | 航天员在弹簧座椅上时的束缚态动作的 动力学问题 | 285 |

| | | |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 8.2.2 | 航天员不在弹簧座椅上时的束缚态动作的 动力学问题 | 285 |
| 8.2.3 | 航天员单手或双手抓住手柄后的身体下摆运动的 动力学问题 | 286 |
| 8.2.4 | 航天员单手或双手抓住手柄后的身体往复摆动的 动力学问题 | 286 |
| 8.2.5 | 航天员舱内行走和转身的动力学问题 | 286 |
| 8.2.6 | “接触式碰撞”的动力学问题 | 287 |
| 8.2.7 | 漂浮过程中准备离开时的动力学问题 | 287 |
| 8.3 | 干扰力模型 | 288 |
| 8.3.1 | 重力梯度力矩模型 | 288 |
| 8.3.2 | 气动干扰模型 | 289 |
| 8.3.3 | 航天员抓握动作对航天器的干扰 | 292 |
| 8.3.4 | 典型动作的干扰特征曲线 | 293 |
| 8.3.5 | 典型动作的干扰特征曲线分析 | 297 |
| 8.4 | 动力学方程中的基本描述 | 303 |
| 8.4.1 | 基本坐标系 | 303 |
| 8.4.2 | 坐标变换关系 | 303 |
| 8.4.3 | 航天器姿态描述 | 305 |
| 8.4.4 | 变量声明 | 306 |
| 8.5 | 束缚态肢体运动时的航天器姿态动力学模型 | 308 |
| 8.5.1 | 航天器运动方程 | 308 |
| 8.5.2 | 动力学简化模型 | 309 |
| 8.5.3 | 航天员 - 航天器系统开环姿态动力学模型 | 310 |
| 8.5.4 | 闭环航天员 - 航天器系统姿态动力学模型 | 324 |
| 8.5.5 | 航天员对航天器的干扰力矩计算模型 | 330 |
| 8.6 | 碰撞时航天器的姿态动力学模型 | 331 |
| 8.6.1 | 基本问题 | 331 |
| 8.6.2 | 开环航天员 - 航天器系统动力学模型 | 331 |
| 8.6.3 | 闭环航天员 - 航天器系统动力学模型 | 333 |
| 8.6.4 | 航天员对航天器的干扰力矩计算模型 | 335 |

| | | |
|-------------|----------------------------------|------------|
| 8.7 | 航天员自由态运动过程中的航天器姿态动力学模型 | 336 |
| 8.7.1 | 基本问题描述 | 336 |
| 8.7.2 | 开环航天器动力学模型 | 336 |
| 8.7.3 | 闭环航天器动力学模型 | 336 |
| 8.8 | 小结 | 337 |
| 参考文献 | | 337 |
| 第9章 | 航天员 - 航天器系统动力学仿真分析 | 338 |
| 9.1 | 引言 | 338 |
| 9.2 | 任务分析 | 338 |
| 9.2.1 | 航天员操作仪器前的就位活动分析 | 339 |
| 9.2.2 | 航天员进餐前的就位活动分析 | 341 |
| 9.2.3 | 航天员食品准备及进餐活动分析 | 341 |
| 9.3 | 任务脚本 | 343 |
| 9.3.1 | 航天员操作仪器前的就位活动脚本 | 343 |
| 9.3.2 | 航天员进餐前的就位活动脚本 | 345 |
| 9.3.3 | 航天员食品准备及进餐活动脚本 | 349 |
| 9.4 | 航天员动作分类 | 353 |
| 9.5 | 航天员活动对航天器姿态扰动的仿真 | 353 |
| 9.5.1 | 坐标系定义 | 353 |
| 9.5.2 | 载人航天器刚体姿态动力学模型 | 353 |
| 9.5.3 | 仿真参数 | 355 |
| 9.5.4 | 干扰力矩 | 356 |
| 9.5.5 | 航天器姿态响应的仿真结果 | 360 |
| 9.5.6 | 结果分析 | 368 |
| 9.6 | 小结 | 368 |
| 参考文献 | | 369 |
| 第10章 | 航天员 - 航天器 - 姿态控制系统耦合动力学分析 | 370 |
| 10.1 | 引言 | 370 |
| 10.2 | 刚体航天器姿态运动学方程和动力学方程 | 372 |
| 10.2.1 | 基本假设 | 372 |
| 10.2.2 | 姿态运动学方程 | 372 |