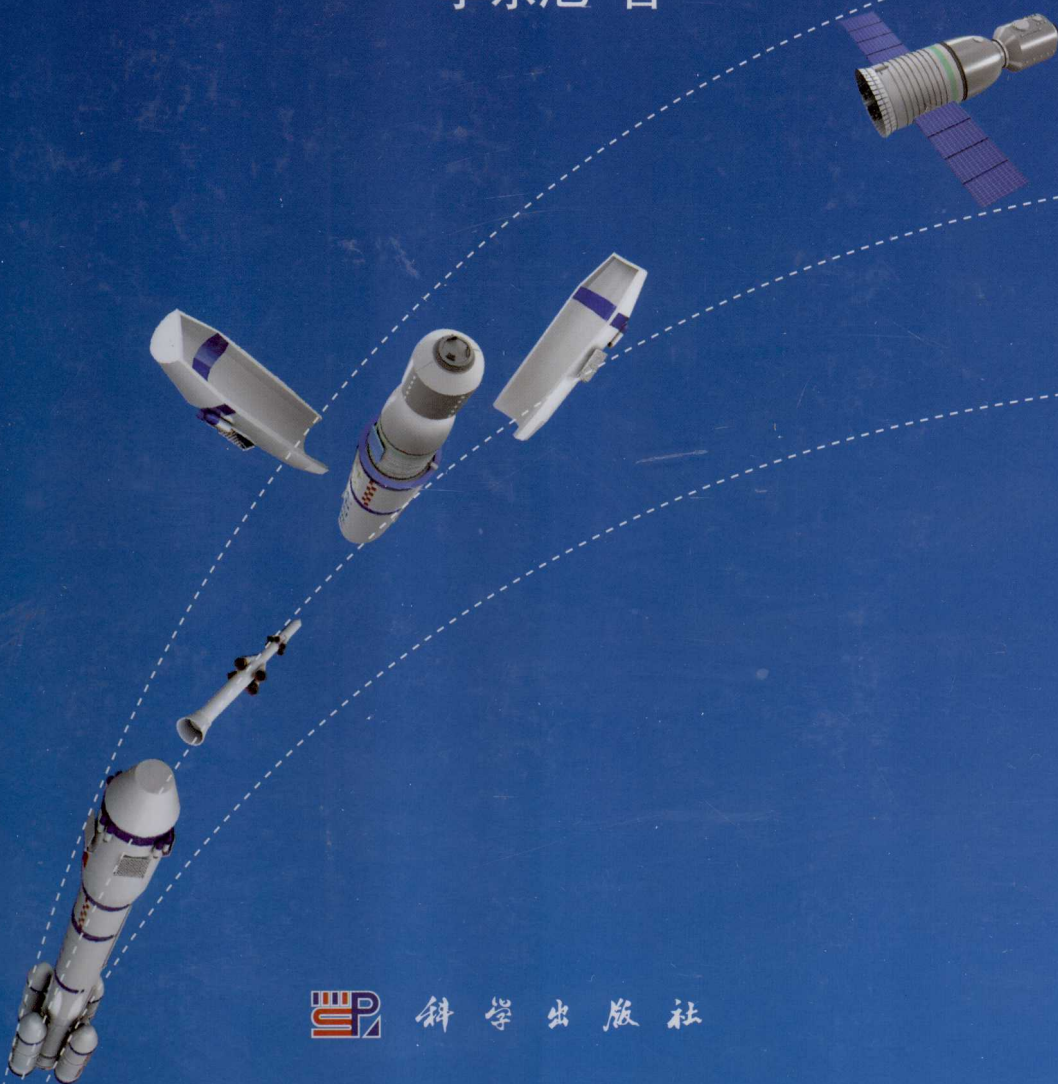


航天飞行器分离动力学

李东旭 著



科学出版社

013027376

V47
24

航天飞行器分离动力学

李东旭 著



科学出版社

北京



北航

C1635211

V47
24

013051378

内 容 简 介

本书主要针对航天飞行中的分离与碰撞问题开展研究,包括动力学建模、分离特性分析、碰撞的发生与规避等。研究涉及航天飞行中的正常分离和故障状态下的应急分离,以及分离中的碰撞问题。研究对象包括:火箭、助推器、逃逸飞行器、卫星、飞船等。本书系统地研究了飞行器分离与碰撞的主要动力学问题,包括助推器与运载火箭分离、整流罩分离、多级火箭的级间分离、星箭分离等典型分离,逃逸飞行器与运载火箭的外分离、返回舱与逃逸飞行器的内分离、稳定栅格翼的半分离等飞行器故障状态下的逃逸分离,以及轨道航天器交会对接中的分离问题。建立了飞行器分离动力学模型、相对运动方程,并在此基础上研究了分离过程中的碰撞问题及碰撞规避的条件。本书关于逃逸飞行器分离动力学的模型和数值仿真结果已经得到了飞行试验的验证,对于载人航天、确保航天员安全具有重要的意义,对于航天器空间交会对接、在轨服务,以及空间站在轨组装与运行也具有重要的应用价值,对其他类型的飞行器的分离、碰撞等研究也具有一定的参考价值。

这是我国第一部系统研究航天飞行器分离动力学的专著,可作为高等院校相关专业研究生及航天领域相关技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航天飞行器分离动力学/李东旭著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-036638-2

I. ①航… II. ①李… III. ①航天器-分离-空气动力学 IV. ①V47 ②V411

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第021027号

责任编辑:刘凤娟 尹彦芳/责任校对:郭瑞芝

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年3月第一次印刷 印张:29 1/2

字数:577 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

专著《逃逸飞行器分离动力学与仿真》(科学出版社, 2003 年) 虽然是针对逃逸飞行器这一特种飞行器在逃逸飞行中的特殊分离问题给出的理论与方法, 但自它出版以来的十年间, 其相对运动学及动力学模型、载荷耦合动力学模型、碰撞动力学模型等成果不仅在逃逸飞行器的结构设计、分离程序设计等工程实际中发挥了直接而重要的作用, 而且也为解决其他飞行器的分离问题提供了重要的理论依据和设计参考。若干年前此书就脱销了, 有的读者找到我办公室来要书, 我也多次承诺将此书再版, 但却一直拖到今天。经过这么长时间陆陆续续的补充完善, 似乎此书可以交给出版社了。

但是, 由于在补充完善的过程中增加了很多的内容, 以致无法再以原书名:《逃逸飞行器分离动力学与仿真》实施再版, 而用现书名:《航天飞行器分离动力学》出版。航天飞行器包括各类运载火箭和航天器(卫星、飞船、空间探测器等), 也包括逃逸飞行器。航天飞行器的分离涵盖了运载火箭各个阶段的正常分离和航天器在轨道上的对接与分离, 也包括逃逸飞行器的各种应急分离。根据研究对象的不同, 航天飞行器分离可概括为三类。第一类分离: 运载火箭正常飞行中的分离, 包括火箭各子级间的级间分离、助推器横向分离、整流罩分离、星箭分离等; 第二类分离: 逃逸飞行器在运载火箭发生故障时逃逸救生飞行中的分离, 包括逃逸飞行器与运载火箭的外分离、返回舱与逃逸飞行器的内分离、稳定栅格翼与逃逸飞行器的半分离等; 第三类分离: 轨道航天器的在轨分离。

在这近十年工程实践和研究思考的基础上, 我认为应该把航天飞行器从发射到入轨飞行全过程中的分离问题系统考虑, 包括正常分离和因故障启动的应急分离。因此,《航天飞行器分离动力学》保留了《逃逸飞行器分离动力学与仿真》全部内容, 但同时增加了运载火箭正常分离与轨道航天器对接分离的内容, 这样将更加全面、完整、系统地反映航天飞行器分离动力学相关问题。由于“逃逸飞行器分离”只是航天飞行器三类分离中的一类问题, 因此这本书再用原书名《逃逸飞行器分离动力学与仿真》就不合适了。而且这本新书《航天飞行器分离动力学》在材料组织、体系构架、逻辑思路和写作风格上也是全新的。

本书主要内容分十章表述; 之后将一些常用公式的推导纳入附录; 最后是本书相关研究中用到的一些主要参考文献和名词术语的索引。

第 1 章, 绪论。主要简要介绍了航天飞行器的基本发展情况和载人航天发展简史, 概述了运载火箭正常分离、逃逸飞行器分离、轨道飞行器分离等问题。

第 2 章, 火箭飞行中正常分离动力学模型。本章针对运载火箭从发射到完成任务全过程中的主要分离建立了分离动力学模型。这些分离包括: 助推器与火箭的横向分离; 多级火箭的级间分离; 整流罩与火箭的分离; 卫星与火箭的分离。

第 3 章, 逃逸飞行器分离类型。逃逸飞行器是我国航天史上的一个非常特殊的飞行器, 其逃逸飞行中的分离与一般火箭的正常分离有着极大的不同, 为了后续动力学建模, 这一章重点介绍逃逸分离的各种不同类型。

第 4 章, 逃逸飞行器运动学模型。为了分析逃逸分离时出现的多个分离或半分离的飞行体在特殊复杂环境条件下的飞行, 并为后续分析这些分离后的飞行体近距离相对飞行奠定基础, 这一章建立了运动学分析所必须的坐标系及坐标转换关系; 建立了运动学微分方程; 建立了飞行体运动参数之间的空间几何关系。研究了分离中各相关的飞行体及飞行体中相关部件或机构的运动规律。

第 5 章, 逃逸飞行器相对分离运动学模型。主要针对各种不同的分离问题, 研究了各分离体相对惯性坐标系的绝对运动以及各分离体之间的相对运动, 包括分离体整体的相对运动及部件的相对运动。为分离碰撞分析提供了运动学基础。

第 6 章, 逃逸飞行器载荷分析。分离过程虽然短暂, 但却非常复杂。在分离过程中作用在飞行器上的各种载荷, 其数量、类型、大小、方向、状态等都在随时间变化, 并与分离状态相关, 而且与一些运动条件和环境因素等相耦合。载荷分析是逃逸分离过程动力学分析的关键。本章分析了逃逸分离中载荷作用情况, 以及飞行器结构弹性变形对载荷产生的干扰和影响, 为建立不同分离状态下各飞行体的动力学基本方程奠定基础。

第 7 章, 逃逸飞行器分离动力学模型。建立分离过程动力学基本方程是进行分离过程分析的基础和主要任务。本章将在载荷分析的基础上, 建立不同分离状态下各飞行体的动力学基本方程或运动微分方程组; 并推导出栅格翼展开时相对运动的动力学方程; 最后对航天员在逃逸分离过程中所将承受的过载进行分析。由于逃逸飞行器结构及其分离过程的特殊性, 分离过程不能简单地仅用飞行器质心运动和飞行器绕质心的转动来描述, 还应包含若干机构的工作工程, 涉及若干不同发动机工作程序, 多个飞行体相对运动对分离过程的影响等, 因此, 本章建立的分离动力学模型是一个高维的强耦合的微分方程组。

第 8 章, 逃逸飞行器分离碰撞动力学模型。主要研究逃逸飞行器分离过程中分离体之间发生碰撞的可能性, 并建立各种不同的碰撞模型, 包括逃逸飞行器与运载火箭之间的外碰撞模型、逃逸飞行器与返回舱之间的内碰撞模型; 并给出碰撞边界的界定。从动量定理、动量矩定理等力学基本原理出发, 建立碰撞动力学基本方程。分析分离中碰撞发生的过程、碰撞对分离的影响等。分析导致碰撞的主要原因, 提出碰撞规避的条件。

第 9 章, 轨道航天器对接与分离动力学模型。轨道航天器飞行期间将依据任

务的需要实施对接和分离。与火箭的分离不同,轨道航天器的交会对接及分离是一个较长的复杂过程。本章首先简要介绍航天器轨道飞行的一般理论;然后介绍轨道航天器在轨对接与分离的基本问题;最后分析航天器在轨对接和分离中的碰撞及碰撞规避问题。

第 10 章,分离过程仿真。由于分离过程的复杂性和特殊性使得分离过程分析非常复杂和困难。因此,本章首先介绍软件工程化设计中的一些基本思想和基本准则,为保证数值仿真的可靠性和正确性奠定基础。然后,以逃逸飞行器分离过程仿真为例,给出了仿真任务设计、仿真流程设计、仿真过程特殊问题处理等方法。最后给出了几个典型分离及碰撞的仿真分析结果,包括逃逸飞行器与返回舱分离、整流罩与火箭分离、星箭分离、轨道航天器对接与分离。

本书对于载人航天、特别是对于确保航天员生命安全意义直接而重大;对于航天飞行器的分离、对接、碰撞等研究具有一般性指导意义;对于其他飞行器也具有重要的参考价值。本书建立的各种分离动力学模型以及建模方法发展了航天飞行器动力学理论。本书部分成果已在工程中得到实际应用,相关动力学理论在实际飞行中得到验证。

特别感谢中国运载火箭技术研究院的大力支持。和该研究院的专家、同仁们一起探索、一起分析、一起试验、一起奋战的那些日日夜夜、春夏秋冬都已沉淀到了这部专著中。特别感谢中国空间技术研究院的大力支持。感谢他们为我提供了非常好的科研环境和科研条件,才使得本书能够最终完成。特别感谢博士生朱仕尧、魏展基,硕士生张国鹏等,他们为本书参考资料的梳理、数学公式的校对、数值仿真的分析等付出了大量辛勤劳动。感谢所有关心、支持、帮助我的领导、专家、同事、朋友和家人。

虽然时光已经从“神舟一号”飞到了“神舟九号”,并掠过了“神舟九号”正飞向未来,但我们对分离动力学的研究与时光永不分离,与祖国的航天事业永不分离。

由于作者水平有限,书中不足和缺点在所难免,欢迎读者批评指正。

李东旭

2012 年 12 月

于国防科学技术大学

目 录

前言

| | |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 航天飞行器简介 | 1 |
| 1.1.1 运载火箭简介 | 1 |
| 1.1.2 航天器简介 | 10 |
| 1.1.3 航天飞行器分离动力学研究对象 | 15 |
| 1.2 载人航天器 | 15 |
| 1.2.1 苏联载人航天发展历程 | 16 |
| 1.2.2 美国载人航天发展历程 | 18 |
| 1.2.3 中国载人航天发展历程 | 20 |
| 1.3 航天飞行器的分离与碰撞问题 | 23 |
| 1.3.1 概述 | 23 |
| 1.3.2 弹道飞行器分离 | 23 |
| 1.3.3 轨道飞行器分离 | 24 |
| 1.3.4 碰撞 | 24 |
| 1.4 发射过程中飞行器的正常分离 | 26 |
| 1.4.1 火箭助推器分离 | 26 |
| 1.4.2 火箭级间分离 | 27 |
| 1.4.3 整流罩分离 | 28 |
| 1.4.4 星箭分离 | 29 |
| 1.5 载人飞船及应急救生 | 29 |
| 1.5.1 载人飞船 | 29 |
| 1.5.2 应急救生 | 32 |
| 1.5.3 上升段救生 | 38 |
| 1.6 逃逸飞行器的应急分离 | 40 |
| 1.6.1 逃逸飞行器及逃逸飞行程序 | 40 |
| 1.6.2 逃逸飞行中的分离 | 50 |
| 1.7 轨道航天器的对接与分离 | 55 |
| 1.7.1 轨道航天器的对接 | 55 |
| 1.7.2 轨道航天器对接碰撞 | 59 |

| | | |
|--------------|-----------------------|-----------|
| 1.7.3 | 轨道航天器的分离 | 60 |
| 1.7.4 | 对接及分离的安全性 | 61 |
| 1.8 | 本书概要 | 62 |
| 1.8.1 | 研究对象 | 62 |
| 1.8.2 | 主要研究内容 | 63 |
| 1.8.3 | 研究目的 | 63 |
| 第 2 章 | 火箭飞行中正常分离动力学模型 | 64 |
| 2.1 | 引言 | 64 |
| 2.2 | 基本坐标系及坐标系间转换关系 | 64 |
| 2.2.1 | 基本坐标系 | 64 |
| 2.2.2 | 坐标系之间的转换关系举例 | 68 |
| 2.3 | 助推器分离的动力学模型 | 70 |
| 2.4 | 火箭级间分离的动力学模型 | 79 |
| 2.5 | 整流罩分离的动力学模型 | 81 |
| 2.6 | 航天器分离的动力学模型 | 86 |
| 2.7 | 分离过程中的运动学分析 | 90 |
| 2.7.1 | 物理量的相互转换关系 | 90 |
| 2.7.2 | 航天器与末级火箭之间的相对运动分析 | 92 |
| 第 3 章 | 逃逸飞行器分离类型 | 95 |
| 3.1 | 引言 | 95 |
| 3.1.1 | 逃逸分离 | 95 |
| 3.1.2 | 基本假设 | 95 |
| 3.1.3 | 分离中应考虑的因素 | 96 |
| 3.2 | 有塔逃逸飞行器与运载火箭分离 | 96 |
| 3.2.1 | 有塔逃逸飞行器 | 96 |
| 3.2.2 | 逃逸状态与分离程序 | 96 |
| 3.2.3 | 控制发动机工作模式 | 99 |
| 3.2.4 | 分离结束标志 | 99 |
| 3.3 | 稳定栅格翼的半分离 | 99 |
| 3.4 | 无塔逃逸飞行器与故障火箭分离 | 101 |
| 3.4.1 | 无塔逃逸飞行器 | 101 |
| 3.4.2 | 高空逃逸发动机 | 102 |
| 3.4.3 | 逃逸时序 | 102 |
| 3.5 | 返回舱与有塔逃逸飞行器的分离 | 103 |
| 3.6 | 返回舱与无塔逃逸飞行器的分离 | 105 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第 4 章 逃逸飞行器运动学模型 | 107 |
| 4.1 引言 | 107 |
| 4.2 参考坐标系及坐标系之间的关系 | 107 |
| 4.2.1 参考坐标系的选取与定义 | 107 |
| 4.2.2 欧拉角定义 | 111 |
| 4.2.3 坐标系之间的关系 | 112 |
| 4.3 分离中飞行器运动分析 | 123 |
| 第 5 章 逃逸飞行器相对分离运动学模型 | 131 |
| 5.1 引言 | 131 |
| 5.2 二体质心相对运动 | 131 |
| 5.2.1 相对速度及其在坐标轴上的分量 | 131 |
| 5.2.2 相对距离及其在坐标轴上的分量 | 133 |
| 5.3 二体刚体相对转动 | 134 |
| 5.3.1 相对角速度 | 134 |
| 5.3.2 两套欧拉角之间的变换关系 | 136 |
| 5.3.3 相对转角 | 137 |
| 5.4 在不同飞行体上的点之间的相对运动 | 139 |
| 5.4.1 Q_1 、 Q_2 是飞行体上确定的点 | 139 |
| 5.4.2 Q_1 、 Q_2 中只有一个点是确定的点 | 144 |
| 5.5 逃逸飞行器与运载火箭的相对运动分析 | 147 |
| 5.5.1 分离面的方程 | 147 |
| 5.5.2 球面方程 | 148 |
| 5.5.3 逃逸飞行器分离面与运载火箭的相对距离 | 148 |
| 5.6 返回舱与逃逸飞行器的相对运动分析 | 152 |
| 5.6.1 分离第一阶段相对运动分析 | 152 |
| 5.6.2 分离第二阶段相对运动分析 | 155 |
| 5.6.3 分离第三阶段相对运动分析 | 160 |
| 第 6 章 逃逸飞行器载荷分析 | 164 |
| 6.1 引言 | 164 |
| 6.2 有塔逃逸飞行器与故障火箭分离时作用在逃逸飞行器上的载荷 | 164 |
| 6.2.1 发动机推力 | 164 |
| 6.2.2 发动机推力矩 | 167 |
| 6.2.3 重力 | 170 |
| 6.2.4 气动力 R 及其在体坐标系中的分量 | 171 |
| 6.2.5 气动力矩 | 171 |

| | | |
|--------------|----------------------------|------------|
| 6.2.6 | 连接插头的摩擦力 F_L 及其在体坐标系中的分量 | 173 |
| 6.2.7 | 连接插头提供的力矩 M_L | 174 |
| 6.2.8 | 附加科氏力 F_K | 180 |
| 6.2.9 | 附加科氏力矩 M_K | 181 |
| 6.3 | 作用在栅格翼上的载荷 | 185 |
| 6.3.1 | 作用在栅格翼上的力 | 185 |
| 6.3.2 | 作用在栅格翼上的外力矩 | 196 |
| 6.4 | 无塔逃逸飞行器与故障火箭分离时载荷分析 | 204 |
| 6.5 | 返回舱与有塔逃逸飞行器分离时载荷分析 | 213 |
| 6.5.1 | 分离第一阶段载荷分析 | 213 |
| 6.5.2 | 分离第二阶段载荷分析 | 218 |
| 6.5.3 | 分离第三阶段 | 224 |
| 6.6 | 返回舱与无塔逃逸飞行器分离时载荷分析 | 224 |
| 6.6.1 | 分离第一阶段 | 225 |
| 6.6.2 | 分离第二阶段 | 226 |
| 6.6.3 | 分离第三阶段 | 228 |
| 6.7 | 结构的弹性变形对载荷的影响 | 228 |
| 6.7.1 | 逃逸塔弹性变形干扰 | 228 |
| 6.7.2 | 栅格翼弹性变形的干扰 | 245 |
| 第 7 章 | 逃逸飞行器分离动力学模型 | 266 |
| 7.1 | 引言 | 266 |
| 7.2 | 有塔逃逸飞行器动力学基本方程 | 266 |
| 7.2.1 | 质心运动方程 | 266 |
| 7.2.2 | 刚体转动方程 | 270 |
| 7.3 | 无塔逃逸飞行器动力学基本方程 | 274 |
| 7.3.1 | 运动微分方程矢量式 | 274 |
| 7.3.2 | 运动微分方程标量式 | 274 |
| 7.4 | 返回舱与逃逸飞行器相独立时的动力学基本方程 | 276 |
| 7.4.1 | 逃逸飞行器运动分析 | 277 |
| 7.4.2 | 返回舱运动分析 | 278 |
| 7.5 | 返回舱与逃逸飞行器不独立时的动力学基本方程 | 281 |
| 7.5.1 | 逃逸飞行器运动微分方程 | 282 |
| 7.5.2 | 相对运动微分方程 | 282 |
| 7.5.3 | 返回舱相对逃逸飞行器的轴向运动 | 284 |
| 7.6 | 稳定栅格翼半分离动力学基本方程 | 285 |

| | | |
|--------------|------------------------|------------|
| 7.7 | 过载分析 | 290 |
| 7.7.1 | 有塔逃逸飞行器与运载火箭分离时过载分析 | 290 |
| 7.7.2 | 无塔逃逸飞行器与运载火箭分离时过载分析 | 292 |
| 7.7.3 | 第二次分离时火工推杆工作阶段过载分析 | 292 |
| 7.7.4 | 第二次分离中返回舱与逃逸飞行器独立后过载分析 | 293 |
| 第 8 章 | 逃逸飞行器分离碰撞动力学模型 | 294 |
| 8.1 | 引言 | 294 |
| 8.2 | 分离体外碰撞模型 | 294 |
| 8.2.1 | 模型图 | 294 |
| 8.2.2 | 坐标关系 | 295 |
| 8.2.3 | Q_1 点与故障球面的相对距离 | 301 |
| 8.3 | 分离体内碰撞模型 | 302 |
| 8.3.1 | 二体相对运动模型与坐标关系 | 302 |
| 8.3.2 | 逃逸飞行器与返回舱的相对关系 | 302 |
| 8.3.3 | 相关点的坐标 | 303 |
| 8.3.4 | 确定返回舱上可能的碰撞点 Q_2 | 305 |
| 8.4 | 碰撞边界的界定 | 318 |
| 8.4.1 | 对应内碰撞模型 | 318 |
| 8.4.2 | 对应外碰撞模型 | 319 |
| 8.5 | 碰撞动力学基本定律 | 320 |
| 8.5.1 | 碰撞定理的矢量式 | 320 |
| 8.5.2 | 碰撞定理的标量形式 | 322 |
| 8.6 | 碰撞对分离的影响 | 326 |
| 8.6.1 | 对运动的影响 | 326 |
| 8.6.2 | 对载荷的影响 | 327 |
| 第 9 章 | 轨道航天器对接与分离动力学模型 | 329 |
| 9.1 | 引言 | 329 |
| 9.2 | 轨道坐标系及轨道参数 | 329 |
| 9.2.1 | 基本轨道坐标系 | 329 |
| 9.2.2 | 轨道参数 | 332 |
| 9.3 | 轨道运动学基本方程 | 333 |
| 9.3.1 | 椭圆轨道 | 333 |
| 9.3.2 | 圆轨道 | 334 |
| 9.4 | 姿态动力学基本方程 | 334 |
| 9.4.1 | 角动量/动量矩 | 334 |

| | | |
|---------------|-------------------|------------|
| 9.4.2 | 动量矩定理 | 335 |
| 9.4.3 | 欧拉方程式 | 336 |
| 9.5 | 航天器实现对接的基本条件和一般规律 | 337 |
| 9.5.1 | 交会过程概述 | 337 |
| 9.5.2 | 交会对接的几个主要阶段 | 338 |
| 9.5.3 | 对接操作相关问题 | 346 |
| 9.6 | 航天器在轨分离问题 | 350 |
| 9.6.1 | 航天器分离过程概述 | 350 |
| 9.6.2 | 航天器分离走廊 | 351 |
| 9.6.3 | 航天器分离安全性 | 352 |
| 9.7 | 航天器碰撞动力学 | 353 |
| 9.7.1 | 接触时的动量交换 | 353 |
| 9.7.2 | 冲击衰减动力学 | 355 |
| 9.8 | 航天器交会对接与分离中的碰撞规避 | 358 |
| 9.8.1 | 降低对接冲击的措施 | 358 |
| 9.8.2 | 航天器交会对接中碰撞规避 | 359 |
| 9.8.3 | 轨道摄动对接会对接的影响 | 360 |
| 9.8.4 | 由航天器系统导致的轨迹偏差 | 366 |
| 9.8.5 | 针对轨迹偏差的保护策略 | 367 |
| 9.8.6 | 交会对接中的碰撞规避机动 | 373 |
| 9.8.7 | 航天器分离中的碰撞规避机动 | 376 |
| 第 10 章 | 分离过程仿真 | 377 |
| 10.1 | 引言 | 377 |
| 10.2 | 结构化程序设计的基本思想与基本准则 | 377 |
| 10.2.1 | 模块与结构 | 377 |
| 10.2.2 | 模块之间的关系 | 378 |
| 10.2.3 | 程序模块化结构设计的设计准则 | 381 |
| 10.3 | 逃逸飞行器分离仿真任务设计 | 382 |
| 10.3.1 | 分离仿真总体结构 | 382 |
| 10.3.2 | 主要变量名说明 | 383 |
| 10.3.3 | 分离仿真子结构模块图 | 383 |
| 10.4 | 逃逸飞行器分离仿真流程 | 388 |
| 10.5 | 逃逸分离过程的中断与处理 | 396 |
| 10.5.1 | 分离程序 | 396 |
| 10.5.2 | 分离中可能出现的故障 | 396 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 10.5.3 故障报警与仿真中断 | 398 |
| 10.6 逃逸飞行器分离过程仿真 | 398 |
| 10.6.1 控制发动机推力对返回与逃逸飞行器分离的影响 | 398 |
| 10.6.2 仿真计算的主要结果与分析讨论 | 402 |
| 10.7 整流罩刚体分离仿真 | 403 |
| 10.7.1 仿真模型 | 403 |
| 10.7.2 仿真参数设置 | 406 |
| 10.7.3 仿真结果分析 | 406 |
| 10.8 整流罩弹性体分离仿真 | 408 |
| 10.8.1 整流罩结构模态分析 | 408 |
| 10.8.2 整流罩振动对分离运动影响分析 | 408 |
| 10.8.3 分离碰撞分析 | 411 |
| 10.9 星箭分离仿真 | 412 |
| 10.9.1 分离纵向推力影响分析 | 413 |
| 10.9.2 姿态扰动对分离过程影响分析 | 414 |
| 10.10 轨道航天器对接与分离仿真 | 415 |
| 10.10.1 软对接仿真 | 415 |
| 10.10.2 航天器在轨分离仿真 | 416 |
| 附录 | 419 |
| A 火箭运动的矢量方程一般式 | 419 |
| B 变质量刚体动力学普遍定理 | 420 |
| 主要参考文献 | 451 |
| 索引 | 455 |

第1章 绪 论

1.1 航天飞行器简介

航天飞行器是指为航天工程服务的飞行器，主要包括运载火箭和航天器。

1.1.1 运载火箭简介

1. 概念

运载火箭是一种把人造地球卫星、载人飞船、空间站、空间探测器等有效载荷送入预定轨道的航天运输工具。它是在导弹的基础上发展起来的，一般由 1~4 级组成，每一级都包括箭体结构、推进系统和飞行控制系统。末级有仪器舱，内装制导与控制系统、遥测系统和发射场安全系统。级与级之间靠级间段连接。有效载荷装在仪器舱的上面，外面套有整流罩。

2. 分类

(1) 运载火箭按其所用的推进剂来分，可分为固体火箭、液体火箭和固液混合型火箭三种类型。我国的长征三号运载火箭是一种三级液体火箭，如图 1-1 所示；长征一号运载火箭则是一种固液混合型的三级火箭，如图 1-2 所示，其第一级、第二级是液体火箭，第三级是固体火箭；美国的“飞马座”运载火箭则是一种三级固体火箭，如图 1-3 所示。

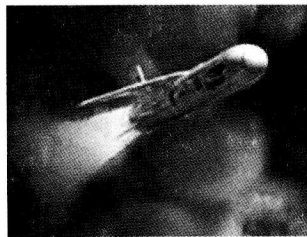
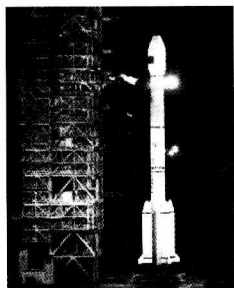


图 1-1 长征三号运载火箭 图 1-2 长征一号运载火箭 图 1-3 美国“飞马座”运载火箭

(2) 按级数来分，运载火箭可以分为单级火箭、多级火箭。其中多级火箭按级与级之间的连接形式来分，分为串联型、并联型、串并联混合型三种。目前大多数火箭均采用串并联混合型。并联一般指助推器与芯级之间的连接关系；串联一般指

火箭芯级之间的连接关系。捆绑助推器的火箭一般分为两助推器和四助推器两种，如图 1-4 和图 1-5 所示；含串联的多级火箭一般有 2~4 个芯级。

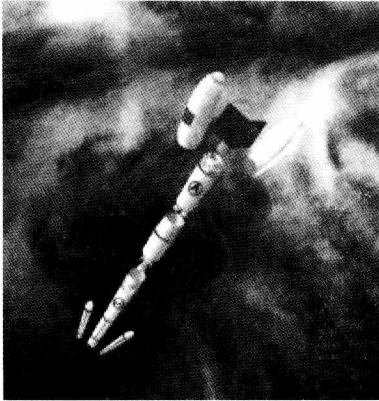


图 1-4 长征三号丙火箭 (两助推器)

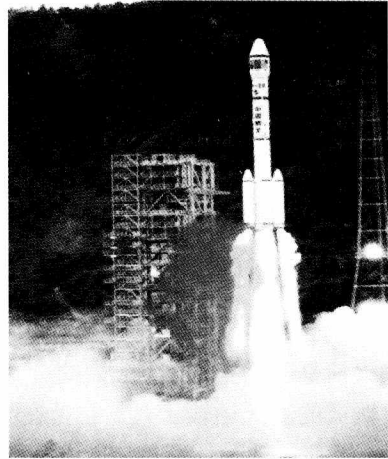


图 1-5 长征二号 E 火箭 (四助推器)

3. 世界各国典型的运载火箭

1) 美国

(1) 大力神 (Titan) 系列运载火箭

美国大力神运载火箭由大力神 2 洲际导弹发展而来，1964 年首次发射，曾将双子座载人飞船送入太空。该系列由大力神 -2、大力神 -3、大力神 -34、大力神 -4 和商用大力神 -3 等型号和子系列组成，目前正在使用的是大力神 -2 和大力神 -4。大力神 -2 用来发射电子情报卫星、军事气象卫星等载荷。大力神 -4 分为 4A 型和 4B 型两种，目前使用的是 4B 型，主要用于发射太阳同步轨道或地球静止轨道大型军用卫星、民用卫星和载人飞船。图 1-6 为大力神系列运载火箭。

(2) 宇宙神 (Atlas) 系列运载火箭

美国宇宙神系列运载火箭系列于 1958 年 12 月 18 日首次发射，曾经发射过世界第一颗通信卫星、美国第一艘载人飞船等，迄今为止该系列共发展了 17 种型号。目前正在使用的主要有宇宙神 -2A、宇宙神 -2AS 和宇宙神 -3。宇宙神 -3 是向宇宙神 -5 过渡的一个子系列，分为 3A 型和 3B 型。宇宙神 -3A 于 2000 年 5 月 24 日成功地进行了首次发射。宇宙神 -3 的最大特点是采用了俄罗斯设计的新型 RD180 大推力液氧 / 煤油发动机。这种发动机还将用于正在研制的宇宙神 -5 上。研制中的宇宙神 -5 将分为多个型号，在第一级采用了通用模块化设计，其中的重型火箭使用了 3 个通用模块，地球同步转移轨道运载能力达到 13t。图 1-7 为宇宙神系列运载火箭。

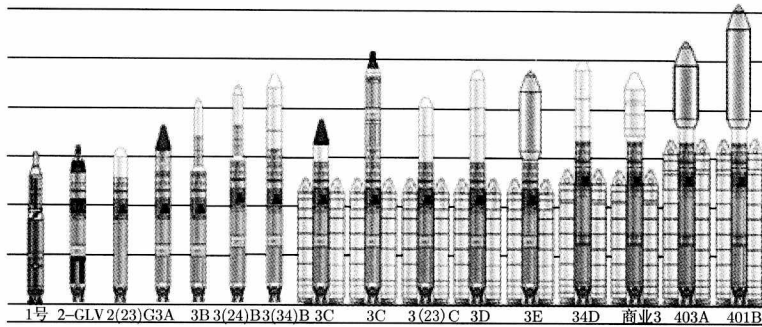


图 1-6 大力神系列运载火箭

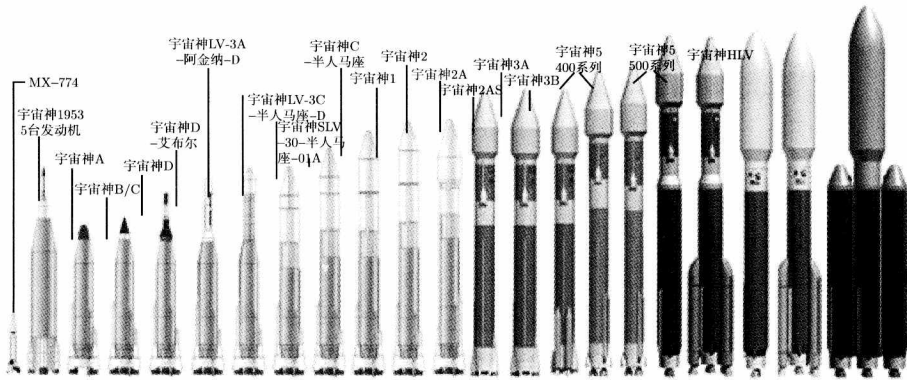


图 1-7 宇宙神系列运载火箭

(3) 德尔它 (Delta) 系列运载火箭

美国德尔它系列运载火箭系列于 1960 年 5 月 13 日首次发射，迄今为止已发展了 19 种型号，目前正在使用的是德尔它 -2 和德尔它 -3 两种型号。美国空军的全部 GPS 卫星都是由德尔它 -2 发射的。德尔它 -3 是在德尔它 -2 的基础上研制的大型运载火箭，可以把 3.8t 的有效载荷送入地球同步转移轨道。德尔它 -3 于 2000 年 8 月发射成功。美国还正在研制具有多种配置的德尔它 -4 子系列，其中的重型德尔它 -4 的地球同步转移轨道运载能力在 13t 以上。图 1-8 为德尔它系列运载火箭

(4) 土星 V(Saturn) 系列运载火箭

土星号运载火箭是美国专为载人登月的阿波罗工程而研制的巨型运载火箭。其中土星 -5 的起飞重量为 3000t，近地轨道能力达 139t，直径 10 m，高 110 m，它能把重达 50t 的阿波罗飞船送入登月轨道，曾先后将 12 名航天员送上月球。图 1-9

为土星 V 系列运载火箭。

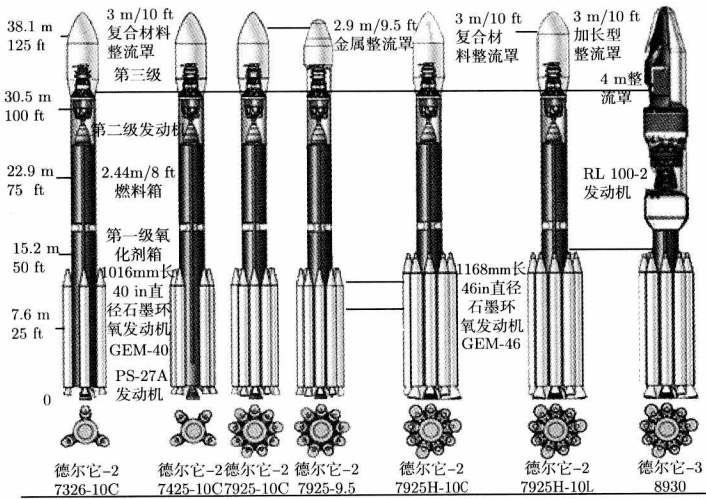


图 1-8 德尔它系列运载火箭

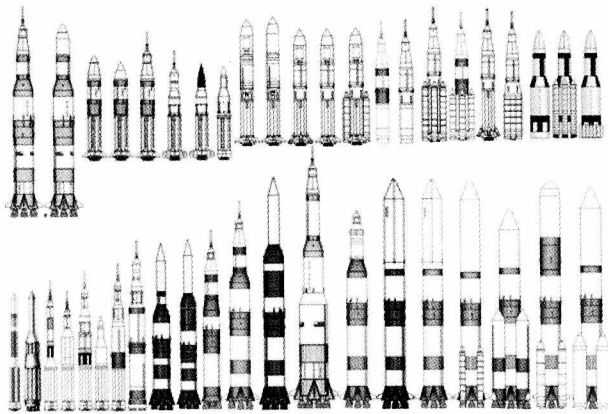


图 1-9 土星 V 系列运载火箭

2) 俄罗斯/苏联

(1) 东方号 (Vostok) 系列运载火箭

俄罗斯东方号系列运载火箭是世界上第一种载人航天运载火箭，它是在卫星号运载火箭的基础上改进而成的。它创造了多次“世界第一”：发射了第一颗人造卫星、第一颗月球探测器、第一颗金星探测器、第一颗火星探测器、第一艘载人飞船、第一艘无人载货飞船进步号等。东方号系列运载火箭该系列主要包括卫星号、月球号、东方号、上升号、联盟号、进步号和闪电号等型号。它也是世界上发射次