

大型柔性结构 分散化振动控制

——理论与方法 (第三版)

李东旭 著



科学出版社

大型挠性结构分散化振动控制

——理论与方法

(第三版)

李东旭 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地论述大型挠性结构分散化振动控制的理论与方法,为航天器大型挠性结构的振动控制问题提供了一种解决途径.全书共分十章.第一章介绍大型挠性结构的动力学及其振动控制问题;第二章~第四章介绍结构动力学基本理论、控制系统基本概念和大系统分散控制基本理论;第五章介绍结构振动分散控制系统的数学建模;第六章~第九章介绍结构振动分散化控制理论,包括结构振动系统局部状态反馈分散控制、多级分散控制、分散化输出反馈振动控制等理论及其数值仿真和实验研究;第十章介绍分散化模糊振动控制理论及其数值仿真.

本书建立的理论与方法体系,不仅适用于航天领域,也适用于地面大型工程结构的振动控制问题.本书可作为航空航天、力学、机械工程、控制工程等专业的研究生教材或参考书,也可供相关研究人员和工程技术人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

大型挠性结构分散化振动控制:理论与方法/李东旭著. —3版. —北京:科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-038650-2

I. ①大… II. ①李… III. ①航天器-结构振动-分散控制-振动控制
IV. ①V414

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第222611号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:郑金红
责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

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>

北京彩虹伟业印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年5月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年1月第 二 版 印张: 28 3/4

2013年9月第 三 版 字数: 545 000

2013年9月第一次印刷

定价: 138.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第三版前言

航天器结构的大型化、轻量化是航天技术发展的一个重要趋势,越来越多的航天器带有各种大型挠性结构,如大面积太阳能电池阵、大面积雷达天线等.这些结构往往具有低频、密模、强几何非线性等动力学特征,其在外层空间特殊物理环境(热冲击、热交变、空间粒子、太阳风等)作用下,以及在航天器本身作轨道机动和姿态机动时,将产生难以避免的挠性振动.作者的另一部专著《挠性航天器结构动力学》(科学出版社,2010年)对这类结构的振动问题给出了较为系统的分析.这类振动给航天器带来严重危害:轻则,影响航天器高精度成像的质量、降低天线等有效载荷的指向精度等,导致航天任务失效;重则威胁航天器安全,导致灾难性后果.由于这类结构本身的结构阻尼很弱,而外层空间缺乏大气阻尼,振动一旦发生,很难自然衰减.因此,航天器振动控制势在必行.

然而,这类复杂挠性结构系统的维数很高,传统的集中控制理论难以解决控制系统设计问题,有些用截断模态来减小结构系统维数的方法往往造成观测溢出或系统失稳;加之航天应用对振动控制装置在体积、质量、功耗、安装约束等多方面的特殊限制,使得航天器大型挠性结构的振动控制在理论上和工程上都面临极大挑战.这也是世界航天领域面临的一道难题.

为此,在国家高技术研究发展计划(863计划)、国家自然科学基金、国家重大专项“高分辨率对地观测系统”等研究项目,以及航天科技集团一院、五院、八院等工程型号任务的大力支持下,我及我的团队自1987年以来,对这个难题开展了持续研究和攻关.研究成果系统地总结于专著《大型挠性结构分散化振动控制——理论与方法》(2002年第一版,2010年第二版).书中提出了大型挠性结构分散化振动控制的理论与方法,为航天器大型挠性结构的振动控制问题提供了一种解决途径.研究成果在地面试验中得到有效验证,并在工程实际中得到成功应用.

这次出版的第三版主要新增了分散化振动控制实验研究内容,并加入近两年取得的一些新的理论研究成果.相对于第二版的变化主要有:(1)在绪论中补充阐述了各类航天器大型挠性结构及其动力学问题、大型挠性结构振动控制面临的挑战与发展现状、分散化控制理论的发展概况等内容;(2)在原版第七章的基础上增加了局部状态反馈分散振动控制的实验研究内容;(3)在原版第九章的基础上增加了太阳能帆板智能结构的振动控制实验研究内容;(4)新增了第十章,介绍大型挠性结构分散化模糊振动控制理论的最新研究成果.

蒋建平博士为本书第三版的材料组织、新增内容编排、全书校对等做了大量工

作, 付出了辛勤而富有创造性的劳动, 在此表示诚挚的谢意! 蒋建平博士、许睿博士生、刘望博士生等的研究成果也部分地加入到了本书第三版中, 在此表示诚挚的谢意! 感谢所有支持、关心、帮助本书出版的人们.

由于作者水平有限, 书中不妥之处在所难免, 欢迎广大读者批评指正.

著 者

2013 年 7 月于国防科技大学

第二版前言

关于结构振动控制的研究与应用已有近百年的历史,然而关于大型挠性结构的振动控制到目前还是一个世界性的难题.主要原因是这类结构系统庞大而复杂,传统的控制方法不能解决此类问题.

这类问题的典型代表是航天器大型挠性结构的振动控制问题.关于大型挠性航天结构的动力学特性分析请参见作者的另一本专著——《挠性航天器结构动力学》(科学出版社,2010),在这本书中,可以较多地了解大型挠性结构的构型特点和这类结构系统所呈现出的高维性、复杂性,以及这类结构由于跨度大、质量轻、阻尼弱等特点所带来的低频、密模、非线性等复杂动力学问题.对于航天器挠性结构,由于各种干扰因素不可避免,该结构的振动必然发生,不可避免;又由于太空环境中不存在大气阻尼,振动一旦被激起,就很难自行衰减.这种振动对航天器是非常有害的:轻则,影响航天器正常工作,降低航天器的姿态稳定性和指向精度,缩短航天器的工作寿命等;重则,可以直接危害航天器的安全,造成灾难性后果.因此,对航天器挠性结构的振动控制势在必行.

目前经典控制理论和现代控制理论在系统的设计和控制方面都得到了许多应用,如建模方法、系统品质方法和控制方法等.然而,所有这些方法都有一个基本的假定:“集中性”,即所有的计算都是依据系统信息(以前的系统信息或传感器采集的信息),且系统信息又集中在给定的中心,通常是集中在一个地理位置上.对于大型挠性航天结构,由于结构系统庞大且复杂,航天结构的特殊要求以及空间环境的特殊性限制了传感器安装的数目与位置,同时星载计算机的计算能力也难以完成如此庞大的计算,因此这类结构系统由于缺乏集中计算能力和集中的信息而不能保持集中性.这就使得传统的集中控制方法在这种情况下难以实现.因此,研究大型挠性结构分散化振动控制的理论与方法具有十分重要的理论意义和实用价值.

本书基本保持了第一版的内容和编排风格,在第一版的基础上增加了两章内容,即第八章和第九章.

第一章,绪论.主要介绍大型挠性结构的工程背景及其结构动力学问题,目前主要的振动控制方法,大型挠性结构振动控制面临的挑战以及分散控制的基本思想.

第二章,结构动力学基本理论.主要介绍结构振动模态分析的基本概念,有阻尼振动与无阻尼振动的特点,组成大型挠性结构的基本单元及其结构动力学模型,复杂组合体的结构动力学模型,多自由度系统的结构动力学基本方程以及多自由度系统振动模态的基本特征.

第三章, 线性控制系统基本理论. 主要介绍系统能观性与能控性的基本概念, 控制器设计的基本方法以及系统稳定性基本理论.

第四章, 大系统分散控制原理. 主要介绍大系统分散化的基本概念与方法, 分散稳定化的基本理论以及分散最优与满意决策的基本原理.

第五章, 结构振动分散化控制系统. 主要介绍结构振动控制系统的数学模型, 包括基于广义位移、模态坐标及弹性应变等不同数学空间和不同物理坐标下的振动控制系统模型, 以及振动控制系统的解耦及分散.

第六章, 结构振动分散化控制理论. 主要介绍结构振动控制的基本理论, 包括振动控制系统可控性理论, 基于动态补偿的分散稳定化理论, 基于局部状态反馈的分散控制理论, 振动系统的多级分散控制理论以及振动系统分散控制器设计方法.

第七章, 振动系统分散控制数值仿真. 本章以一些典型的空问结构为例, 运用分散控制的方法, 对振动的分散控制系统进行了数值仿真研究.

第八章, 结构振动分散输出反馈控制理论. 本章研究结构振动系统的分散化输出反馈振动控制问题. 利用系统测量输出来构建分散化控制器, 主要包括分散保代价静态输出反馈控制器、分散 H_∞ 动态输出反馈控制器和分散鲁棒 H_∞ 动态输出反馈控制器.

第九章, 智能结构分散化振动控制数值仿真. 本章以表面粘贴压电作动器的智能悬臂板结构为研究对象, 进行分散化输出反馈振动控制数值仿真, 包括分散保代价静态输出反馈控制数值仿真、分散 H_∞ 动态输出反馈振动控制数值仿真和分散鲁棒 H_∞ 动态输出反馈振动控制数值仿真.

本书自 2002 年出版以来, 受到广大读者的欢迎, 很快便销售一空. 这些年来, 不断有读者向我索要此书, 然而此书再版之事却一拖再拖. 之所以拖到今天, 一方面的确因为很忙, 没有时间考虑再版的事情; 另一方面, 也是更主要的一方面, 是想等我们还在作的一些研究能有点成果出来, 以便添加到书中去. 感谢我的学生蒋建平博士, 此书中的第八章和第九章主要来自他博士阶段的研究成果.

特别感谢我的好朋友陈小前博士, 正是在他的积极帮助下促成了此书再版的实施. 非常感谢国防科技大学出版社为本书的再版及稿件的校对、编辑等付出了艰辛的努力. 感谢所有关心、支持、帮助过我和我的专著的人们. 本书研究得到了国家高技术研究发展计划 (863 计划) 等许多相关研究项目的经费支持. 在此表示衷心的感谢.

由于作者水平所限, 书中不足之处在所难免, 欢迎读者批评指正.

著 者

2010 年元月于国防科技大学

第一版前言

随着航空航天事业的发展,各种不同形式的大型挠性结构应运而生,如大型飞机的机翼,直升飞机的螺旋桨、尾翼,卫星、飞船、空间探测器、空间站等的太阳能电池翼、天线、机械臂等.这些结构由于受发射重量的限制以及太空作业的特殊需要,往往具有质量轻、跨度大和构型复杂(一般为可伸缩或可折叠的多体结构)的特点.又由于太空环境中没有空气阻尼,而结构本身的阻尼微乎其微,因此这些结构实际上处于零阻尼状态.这样的结构在这样的工作环境下必然表现出非常复杂的结构动力现象.任何一个干扰,如太阳风、流星雨、调姿、变轨、对接碰撞、机构活动和结构伸展等,都将引起这些挠性结构激烈且持续的振动.而由此产生的振动又给航天器带来极为不利的影响:轻则,影响航天器的正常工作,降低工作精度,缩短工作寿命;重则,可使整个航天器失稳翻滚,遭致毁灭性的打击.因此,有必要对大型挠性航天结构的振动采取振动控制措施.又由于这类结构振动系统维数庞大,并且常规的传感器、作动器以及星载计算机都受到太空作业的特殊限制,传统的集中控制方法在这种情况下难以实现,因此研究大型挠性航天结构分散化振动控制的理论与方法具有十分重要的理论意义和实用价值.

本书较系统地介绍了大型挠性航天结构的主要类型以及这类结构的结构动力学分析、振动控制系统的数学建模、大系统分散控制理论和分散化振动控制理论等.本书共七章.

第一章为绪论,主要介绍大型挠性结构的工程背景及其结构动力学问题,目前主要的振动控制方法,大型挠性结构振动控制面临的挑战以及分散控制的基本思想.

第二章为结构动力学基本理论,主要介绍结构振动模态分析的基本概念,有阻尼振动与无阻尼振动的特点,组成大型挠性结构的基本单元及其结构动力学模型,复杂组合体的结构动力学模型,多自由度系统的结构动力学基本方程以及多自由度系统振动模态的基本特征.

第三章为线性控制系统基本理论,主要介绍系统能观性与能控性的基本概念,控制器设计的基本方法以及系统稳定性基本理论.

第四章为大系统分散控制原理,主要介绍大系统分散化的基本概念与方法,分散稳定化的基本理论以及分散最优与满意决策的基本原理.

第五章为结构振动分散化控制系统,主要介绍结构振动控制系统的数学模型,包括基于广义位移、模态坐标及弹性应变等不同数学空间和不同物理坐标下的振

动控制系统模型, 以及振动控制系统的解耦及分散.

第六章为结构振动分散化控制理论, 主要介绍结构振动控制的基本理论, 包括振动控制系统可控性理论, 基于动态补偿的分散稳定化理论, 基于局部状态反馈的分散控制理论, 振动系统的多级分散控制理论以及振动系统分散控制器设计方法.

第七章为振动系统分散控制数值仿真, 本章以一些典型的空问结构为例, 运用分散控制的方法, 对振动的分散控制系统进行了数值仿真研究.

本书所涉及的研究得到了国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目经费及国防科技大学“九五”科研经费的支持. 在此, 特表示衷心地感谢.

由于作者水平所限, 书中不足之处在所难免, 欢迎读者批评指正.

著 者

2001 年 5 月于长沙国防科技大学

目 录

第三版前言

第二版前言

第一版前言

第一章 绪论	1
1.1 航天器与航天器大型挠性结构	1
1.1.1 航天器的分类	1
1.1.2 航天器大型挠性结构	4
1.2 大型挠性结构的动力学问题	12
1.2.1 大型挠性结构的结构特点	12
1.2.2 大型挠性结构的动力学问题	13
1.3 大型挠性结构的振动控制问题	14
1.3.1 结构振动控制的基本概念	14
1.3.2 大型挠性结构振动控制面临的挑战	15
1.3.3 大型挠性结构振动控制研究现状	16
1.4 分散控制理论及其发展概况	19
1.4.1 分散控制理论的基本思想	19
1.4.2 分散控制理论的发展概况	20
1.5 本书主要内容	21
第二章 结构动力学基本理论	23
2.1 结构动力学基本问题	23
2.2 结构单元动力学分析	24
2.2.1 弦的振动	24
2.2.2 杆的纵向振动	27
2.2.3 杆的扭转振动	30
2.2.4 细长梁的横向振动	31
2.2.5 组合结构的振动及振动的组合	39
2.2.6 圆环的振动	46
2.2.7 薄膜的振动	51
2.2.8 板的横向振动	52
2.3 复杂结构的模态综合技术	73

2.3.1	部件模态的基本概念	74
2.3.2	无阻尼自由振动系统的综合方法	76
2.3.3	自由部件模态	80
2.3.4	残余柔度及残余部件模态	86
2.4	多体结构动力学模型	96
2.4.1	连接单元模型	96
2.4.2	多体模型	100
2.5	一般多自由度系统模态分析	113
2.5.1	多自由度系统的一般特性	114
2.5.2	多自由度系统的模态	117
2.5.3	固有频率与固有模态的特性	119
第三章	线性控制系统基本理论	125
3.1	系统的基本概念	125
3.1.1	单变量系统与多变量系统	125
3.1.2	系统输入-输出描述	126
3.1.3	线性系统状态空间描述	129
3.2	系统的能控性与能观性	134
3.2.1	能控性	134
3.2.2	能观性	137
3.2.3	对偶性	140
3.2.4	状态空间的标准分解	140
3.3	系统的稳定性	142
3.3.1	稳定性概念	142
3.3.2	稳定性判据	144
3.4	线性反馈控制率设计	150
3.4.1	状态反馈和输出反馈	150
3.4.2	系统状态空间描述的能控规范形和能观规范形	155
3.4.3	单变量系统极点配置	159
3.4.4	多变量系统极点配置	166
第四章	大系统分散控制原理	169
4.1	分散控制的概念与方法	169
4.2	分散稳定理论	172
4.2.1	固定多项式和固定模式	172
4.2.2	用动态补偿的稳定化	176
4.2.3	用局部状态反馈的稳定化	179

4.2.4	用多级控制的稳定化	187
4.3	系统分散次最优控制设计	192
4.3.1	无约束极小化的最优分散控制	192
4.3.2	用顺序最优化的分散控制	195
4.3.3	大系统的状态估计	196
第五章	结构振动分散控制系统	204
5.1	基于物理坐标的振动控制系统	204
5.2	基于模态坐标的振动控制系统	205
5.3	具有动态补偿的结构振动分散控制子系统	207
5.4	局部状态反馈的振动分散控制子系统	210
5.5	多级分散振动控制子系统	211
第六章	振动系统分散控制理论	216
6.1	振动系统的可控性理论	216
6.2	具有动态补偿的分散化振动控制理论	223
6.2.1	基于结构模态参数的控制理论	223
6.2.2	基于结构物理参数的控制理论	229
6.3	具有局部状态反馈的分散化振动控制理论	232
6.3.1	局部反馈定理	232
6.3.2	振动控制定理	237
6.4	结构振动系统的多级分散控制理论	239
6.4.1	全局反馈与系统解耦	239
6.4.2	局部反馈控制律设计	241
6.5	结构振动系统分散最优控制方法	242
6.5.1	振动系统的最优控制	242
6.5.2	振动系统的次最优控制	245
第七章	挠性结构振动系统分散控制数值分析与实验研究	247
7.1	极点配置算法	247
7.1.1	单输入系统状态反馈极点配置算法	247
7.1.2	多输入系统状态反馈极点配置法	249
7.1.3	单输入情况下结构的振动集中控制	250
7.1.4	多输入情况下结构的振动控制	255
7.1.5	结论	257
7.2	分散控制方法的应用	258
7.2.1	基于模态参数的动态补偿分散控制	258
7.2.2	基于结构物理参数的动态补偿分散控制	263

7.2.3	局部状态反馈分散控制	273
7.3	卫星太阳能帆板振动控制系统的建模与仿真	277
7.4	大型运载火箭振动控制系统的建模与仿真	292
7.5	空间站大型外伸结构振动控制系统的建模与仿真	301
7.5.1	研究模型	301
7.5.2	多级分散控制	303
7.5.3	帆板振动的多级分散化应变控制	305
7.6	局部状态反馈分散振动控制实验	318
7.6.1	实验系统设计	318
7.6.2	动力学特性分析	319
7.6.3	控制系统设计	322
7.6.4	实验结果与分析	326
第八章	结构振动分散输出反馈控制理论	329
8.1	分散保代价静态输出反馈控制理论	329
8.1.1	分散保代价静态输出反馈控制	329
8.1.2	分散保代价静态输出反馈控制器设计	330
8.2	结构振动分散 H_∞ 动态输出反馈控制	333
8.2.1	H_∞ 控制基本理论	333
8.2.2	分散 H_∞ 动态输出反馈控制	335
8.2.3	分散 H_∞ 控制器迭代设计	337
8.2.4	分散 H_∞ 控制器直接设计	339
8.3	结构振动分散鲁棒 H_∞ 动态输出反馈控制	342
8.3.1	结构振动系统的参数不确定性	342
8.3.2	分散鲁棒 H_∞ 动态输出反馈控制	343
8.3.3	分散鲁棒 H_∞ 控制器迭代设计	344
8.4	分散化混合灵敏度 H_∞ 鲁棒控制器设计	347
8.4.1	混合灵敏度 H_∞ 鲁棒振动控制理论	347
8.4.2	分散化混合灵敏度 H_∞ 鲁棒振动控制理论	349
第九章	分散输出反馈振动控制仿真与实验	352
9.1	智能结构分散化振动控制系统模型	352
9.1.1	研究对象	352
9.1.2	分散输出反馈振动控制系统	352
9.2	分散保代价静态输出反馈控制仿真与实验	355
9.2.1	智能悬臂板结构分散控制数值仿真	355
9.2.2	智能悬臂板结构分散振动控制实验	358

9.3	分散 H_∞ 动态输出反馈振动控制仿真	369
9.3.1	初位移扰动下的控制性能	370
9.3.2	随机干扰下的控制性能	371
9.4	分散鲁棒 H_∞ 动态输出反馈振动控制仿真	373
9.4.1	标称系统的控制性能	374
9.4.2	参数不确定系统的控制性能	375
9.5	太阳能帆板智能结构分散控制仿真与实验	378
9.5.1	分散控制仿真分析	378
9.5.2	多板连接智能结构分散振动控制实验	382
9.5.3	1:1 太阳能帆板智能结构分散振动控制实验	391
第十章	大型结构分散化模糊振动控制	396
10.1	模糊控制的基本概念	396
10.1.1	模糊集合	396
10.1.2	隶属度函数	397
10.1.3	模糊规则库	398
10.1.4	模糊推理	398
10.1.5	解模糊	399
10.2	分散化模糊控制系统设计	400
10.2.1	自适应模糊控制器设计	401
10.2.2	独立模态空间的分散自适应模糊控制系统设计	403
10.3	大型桁架结构分散模糊振动控制	406
10.3.1	空间智能桁架结构动力学模型	406
10.3.2	智能桁架作动器与传感器配置优化	407
10.3.3	空间智能桁架分散模糊振动控制仿真	412
10.3.4	智能桁架分散模糊振动控制实验	416
10.4	桁架支撑式太阳翼分散模糊振动控制仿真	419
10.4.1	研究对象	419
10.4.2	太阳翼智能结构闭环控制系统优化	421
10.4.3	自律分散模糊控制策略	428
10.4.4	太阳翼智能结构自律分散模糊控制仿真	432
	参考文献	435
	索引	443

第一章 绪 论

1.1 航天器与航天器大型挠性结构

1957年10月,苏联成功地发射了第一颗人造地球卫星.从此,开始了人类征服太空的新时代.随着航空航天事业的发展,空间结构的振动控制问题也已提到了议事日程.航天器作为大型空间结构(包括人造地球卫星、载人飞船、空间站、宇宙探测器等)便应运而生.由于航天任务的需要,几乎所有的航天器都带有外伸结构.例如,给航天器提供能量的太阳能电池帆板、用于通信或数据中继的大型天线等.随着航天技术的发展,航天器外伸结构逐渐向大型、复杂化方向发展,出现了各种结构形式的挠性结构,如柔性薄膜式太阳能帆板、大型桁架式天线、伞状结构天线等.为对航天器大型挠性结构有一个比较全面的了解,本节首先介绍一下航天器的分类及一些典型的航天器,然后对常见的航天器大型挠性结构(特别是太阳能帆板和天线结构)进行简单的介绍.

1.1.1 航天器的分类

航天器是在外层空间按照天体力学的规律运行,执行特定任务的飞行器.

航天器的分类只能是宏观的和粗略的,并没有十分严格的界定和必须要遵循的原则,主要是为了分析和研究问题时有一个范围和前提.下面给出几种常见的分类.

按航天器特点,航天器综合地可分为无人航天器和载人航天器两类,其中无人航天器包括人造地球卫星、空间探测器和无人货运飞船,而载人航天器包括载人飞船、空间站和航天飞机,如图 1.1 所示.

1. 无人航天器

无人航天器包括人造地球卫星、空间探测器和无人货运飞船.

1) 人造地球卫星

人造地球卫星是环绕在地球空间轨道上运行(至少一圈)的无人航天器,简称人造卫星.人造卫星是发射数量最多的一种航天器,占全部航天器的90%左右,在科学、军事和国民经济各个方面都获得了极其广泛的应用.以科学探测和研究为目的有天文卫星(图 1.2)、观测卫星、地球物理卫星、大气密度探测卫星和电离层卫星等;用于军事目的的有照相侦察卫星、电子侦察卫星(图 1.3)、海洋监视卫星、核爆炸探测卫星、导弹预警和拦截卫星等;为国民经济服务的有通信卫星、导航卫

星、气象卫星、测地卫星和地球资源卫星等。

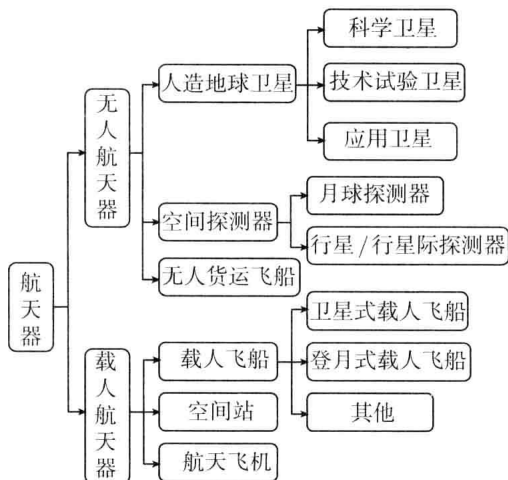


图 1.1 航天器综合分类

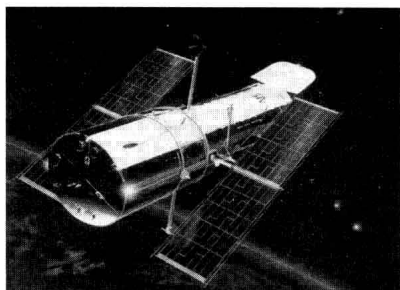


图 1.2 “哈勃” 太空望远镜



图 1.3 “军号” 电子侦察卫星

2) 空间探测器

空间探测器是对月球和月球以远的天体和空间进行探测的无人航天器, 又称深空探测器, 主要包括月球探测器、行星/行星际探测器. 迄今为止, 人类共发射了 15 种型号的各类空间探测器近百个, 已先后对月球 (图 1.4)、水星、金星、火星 (图 1.5)、木星、土星、天王星、海王星、冥王星、哈雷彗星以及许多小行星和卫星进行了近距离或实地考察, 获得了丰硕的成果.

3) 无人货运飞船

俄罗斯 (前苏联) 研制了无人运货飞船“进步号”和“进步 M 号”. “进步号”货运飞船在“联盟号”载人飞船的基础上研制, 主要用于地面至空间站的往返货物运输. 从 1978 年 1 月 20 日起至 1990 年 5 月 20 日, 共进行了 42 次飞行. “进步 M 号”是“进步号”的改进型, 其货运量比“进步号”多一百公斤, 于 1989 年 8 月 23

日开始使用, 至 1998 年 5 月 14 日共执行任务 39 次. “进步 M 号” 的改进型称为 “进步 M1”.

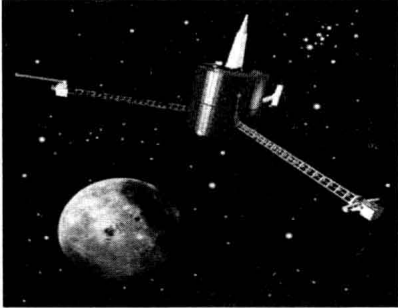


图 1.4 “月球探测者号” 探测器



图 1.5 美国 “勇气号” 火星车

2. 载人航天器

载人航天器包括载人飞船、空间站和航天飞机.

1) 载人飞船

载人飞船 (图 1.6) 是一种天地往返运输器, 也是载人航天器中最小的一种. 人类通过载人飞船突破并掌握了载人航天的基本技术, 并进行交会对接、出舱活动和医学生理等多种试验. 载人飞船还是重要的天地往返运输器, 为空间站接送航天员和物资. 由于体积小、重量轻和成本低, 因而飞船可长期停留在空间站上. 作为空间站的救生艇, 1984 年它曾把出故障的 “礼炮 -7” 空间站的航天员运回地面. 现正研制的 “国际空间站” 也将用 “联盟 -TM” 飞船作为救生艇.

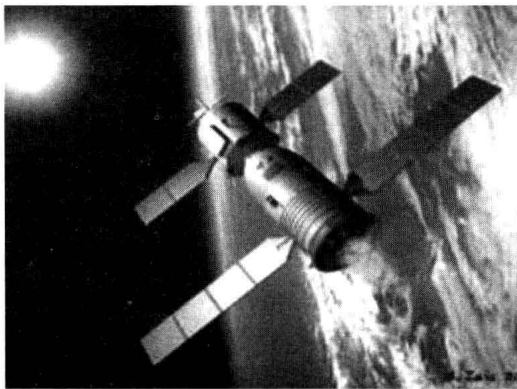


图 1.6 “神舟” 五号飞船

2) 空间站

空间站是可供多名航天员巡访、长期工作和居住的载人航天器. 典型的有俄罗