挠性航天器结构动力学

李东旭 著

科学出版社
www.sciencep.com

挠性航天器结构动力学

李东旭　著

科　学　出　版　社

北　京

内 容 简 介

本书简介了航天器的分类及主要航天器类型，给出了挠性航天器的定义和相关概念，综述了作为航天器典型挠性结构的太阳能电池翼的主要类型，归纳了挠性航天器结构动力学相关问题。在此基础上，以航天器太阳能电池翼为对象，系统地研究了挠性航天器结构动力学的一般问题及特殊问题，包括：一般矩形结构太阳能帆板结构动力学特性分析，圆形结构太阳能帆板力学特性分析，框架式太阳能帆板结构的应变模态特性分析，挠性航天器刚柔耦合动力学分析，挠性航天器太阳能帆板多体结构动力学特性分析，半刚性太阳能电池翼结构动力学特性分析，太阳能帆板非线性结构动力学特性分析，挠性航天器轨道运动与帆板振动的耦合动力学分析。

本书旨在为挠性航天器结构动力学问题的研究奠定一般性的理论基础，提供各种不同的解决思路，给出具体多样的分析方法。通过理论推导及数值仿真给出挠性航天器结构动力学特性和规律，所得到的一些结果和结论为挠性航天器姿态控制系统设计、航天器挠性结构设计以及挠性结构的振动控制设计提供了一定的参考。本书建立的理论模型、提出的分析方法和采用的一些解题技巧和手段也可作为求解其他挠性结构和一般结构动力学问题的参考。

本书可作为高等院校相关专业研究生以及航天领域相关科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

挠性航天器结构动力学/李东旭著. —北京：科学出版社，2010
ISBN 978-7-03-026654-5

I. ①挠… II. ①李… III.①航天器—挠性—结构动力学 IV.①V41

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第019513号

责任编辑：胡 凯 刘凤娟/责任校对：陈玉凤
责任印制：钱玉芬/封面设计：王 浩

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
源海印刷有限责任公司印刷
科学出版社编务公司排版制作
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 3 月第 一 版 开本：B5 (720 × 1000)
2010 年 3 月第一次印刷 印张：37 1/2
印数：1—1 500 字数：738 000

定价：120. 00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

1957 年 10 月 4 日，苏联用“卫星”号运载火箭成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星，开辟了人类进入空间的新纪元。人类社会的活动区域从此由陆地、海洋和大气层空间迈向外层空间。世界航天已走过半个多世纪的历程，曾经应用的、正在运行的和将要发射的各类航天器数不胜数。

大多数航天器都利用太阳为其提供必要的能量。将具有光电转换特性的材料制作成太阳能电池片并按一定顺序排列安装在结构上就形成了太阳能电池阵结构。一般，太阳能电池阵结构为一端与航天器相连，另一端自由伸展的外伸结构。通常把这种结构叫做太阳能帆板或太阳能电池翼。航天器在发射状态时，太阳能电池阵结构处于收拢状态，入轨后展开。因此这类结构往往为多体结构，且质量较轻。航天器越大，需要的能量越多，太阳能帆板的面积就越大，相应结构的挠性也就越大。太阳能帆板是航天器上最典型、最常见的挠性结构。除此之外，还有其他类型的挠性结构，如天线、机械臂、探测器支撑桁架等。本书中，将带有挠性结构的航天器统称为挠性航天器。

航天器挠性结构由于自身所具有的跨度大、质量轻、刚度低、结构阻尼弱、板间连接刚度低等特殊性，任意一个微小的扰动都极易激起结构的振动。然而，在航天器运行过程中，多种干扰因素不可避免，如空间碎片、太阳风、热辐射、温度冲击等外部干扰，以及航天器的调姿、变轨、控制系统的极限环振荡，航天器内部机构的运动等产生的内部扰动。因此航天器挠性结构的振动是难以避免的。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度和指向精度，缩短航天器的工作寿命等；重则，可以造成结构破坏直接危害航天器的安全，引发灾难性后果。航天历史上这样的事故不断发生。因此，对航天器挠性结构的振动控制势在必行。为了对挠性航天器实施振动控制，只有首先认识并掌握航天器挠性结构的特征及其振动的客观规律，才能正确有效地设计振动控制系统，以确保航天器正常工作和安全运行。

本书以航天器太阳能电池翼或太阳能电池帆板为对象，对挠性航天器结构动力学问题开展了较为全面深入的研究，建立了较为完善的挠性航天器结构动力学理论体系，包括基础理论、一般性方法、特殊技术等。通过对各种不同类型的航天器挠性结构动力学问题数值仿真分析，得到了若干有价值的结果，也发现了许

多内在的规律。

本书共分 12 章。

第 1 章：绪论。简介航天器的分类及主要航天器类型，给出挠性航天器的定义和相关概念，综述作为航天器典型挠性结构的太阳能电池翼的主要类型，归纳挠性航天器结构动力学相关问题，并简要介绍本书关注的焦点问题。

第 2 章：挠性航天器太阳能电池翼构型分析及其简化模型。分析了太阳能电池翼结构的构型和结构特点，给出了太阳能电池翼的分类原则，并从结构变形的挠性程度定义了太阳能电池翼结构的主要类型，建立了太阳能帆板的不同简化模型，为下一步建立太阳能帆板的结构动力学模型和进行结构动力学特性分析提供必要的基础。

第 3 章：挠性结构相关力学基本问题及基础理论。重点介绍与挠性航天器结构动力学相关的基本问题及基本理论，包括固体力学的基本概念、结构动力学基本方程、求解复杂结构力学问题的基本方法、结构动力学系统的基本特性等，为后续章节奠定分析的基础。

第 4 章：太阳能电池翼基本构件和单元的结构动力学模型。主要介绍一些基本构件或单元的结构动力学模型，包括解析模型和有限元模型。这些模型都是在分析挠性航天器结构动力学问题中经常用到的。

第 5 章：一般矩形结构太阳能帆板结构动力学特性分析。以一类典型矩形太阳能帆板为例介绍了该类帆板模态分析中的数学模型、动力学方程及关键技术问题的分析方法，给出了该类帆板模态计算的有限元模型，通过计算机仿真给出了模态分析结果，并分析了质量偏心、部件间连接刚度、基板刚度等因素对动力学特性的影响。本章的求解过程为这种类型的挠性航天器结构动力学分析提供了一般性方法。

第 6 章：圆形太阳能帆板力学特性分析。介绍了一些新型超柔薄膜圆形太阳能帆板特点和结构组成；针对该薄膜结构，给出了圆形帆板非线性有限元模型的建模方法，建立了有限元模型，包括板模型和薄膜模型；并分别使用线性和非线性有限元方法分析了圆形帆板结构的静力学和动力学问题，分析了固有频率与帆板厚度的关系，给出了这类帆板的一些力学规律。

第 7 章：框架式太阳能帆板结构的应变模态特性分析。介绍了一种特殊的太阳能电池翼结构：框架式太阳能电池翼结构。分析了这类结构的特点，建立了这类太阳能电池翼结构动力学分析的数学模型。仿真分析了结构的模态、结构在不同载荷作用下的动力学响应以及应变模态的节线分布规律。重点是给出框架式太阳能帆板结构应变模态分析的理论与方法。

第 8 章：挠性航天器刚柔耦合动力学分析。研究航天器刚体运动与挠性结构

振动的耦合动力学问题。针对带有挠性附件的挠性航天器，在计及动力刚化的基础上建立了其刚柔耦合一次近似动力学模型，提出了航天器–挠性梁和航天器–挠性板两种刚柔耦合简化模型，分析了挠性航天器刚柔耦合系统的动力学特性。

第 9 章：挠性航天器太阳能帆板多体结构动力学分析。针对帆板展开以后的多体结构动力学问题，采用半解析法研究了多块板构成的太阳能帆板的横向弯曲与振动特性，建立了由若干块线弹性矩形薄板通过微扭弹簧连接而成的多体系统结构模型，分别以两块、3 块方板组成的太阳能帆板为例，求得了它们在多种形式载荷作用下的挠度表达式，分析了结构弯曲挠度的特点。

第 10 章：半刚性太阳能电池翼结构动力学特性分析。以一类半刚性太阳能电池翼为研究对象，采用有限元方法建立半刚性太阳能电池翼的帆板、桁架、框架在外载荷作用下变形场和应力场分析的数学模型和太阳能电池翼动力学特性分析的数学模型，分析了帆板、桁架和框架在典型载荷作用下的变形和应力分布情况。分析了太阳能电池翼主展开桁架在几种特定外载荷作用下静变形问题，从而得出结构静刚度参数与应力应变的分布规律；分析了太阳能电池翼整体动力学特性以及基板刚度、连接件刚度等对整体结构动力学特性的影响。

第 11 章：太阳能帆板非线性结构动力学特性分析。研究挠性太阳能帆板的几何非线性大变形问题，重点是建立挠性结构的结构动力学基本方程和理论模型。

第 12 章：挠性航天器轨道运动与帆板振动的耦合动力学分析。以挠性航天器太阳能帆板为研究对象，研究太阳能帆板在飞行中的力学问题。分析了轨道飞行运动参数对太阳能帆板静变形的影响，得到了航天器一个轨道周期飞行过程中太阳能帆板的静变形变化曲线；分析了太阳能帆板在平衡位置为曲线时的振动特性以及轨道飞行运动参数对动变形的影响，从最基本的力学分析中揭示了太阳能帆板在轨飞行中的动力学行为，为研究计及航天器轨道和姿态运动影响的太阳能帆板振动特性问题提供了与实际更近的动力学模型。

与本书相关的研究工作在国家自然科学基金等项目的支持下，历时 18 年。众多的教授、实验师、研究生等倾情奉献、呕心沥血、潜心研究、执着探索，为挠性航天器结构动力学相关问题的研究作出了重要的贡献。这里，特别地感谢研究团队中的唐乾刚教授、任均国教授、高普云教授、雷勇军教授、孙祥一副教授和我的研究生蒋建平博士、刘志臻博士、梁金登博士、王达博士以及在读博士生刘望，他们的研究成果极大地丰富了本书的内容。

本书是我国第一部研究挠性航天器结构动力学问题的专著。本书旨在为挠性航天器结构动力学问题的研究奠定一般性理论基础，提供各种不同的解决思路，给出具体多样的分析方法，通过对挠性航天器结构动力学的特性及规律的认识与分析，为进一步的挠性航天器姿态控制系统设计、航天器挠性结构设计以及挠性

结构的振动控制设计等提供科学的依据和重要的基础。本书建立的理论模型、提出的分析方法和采用的一些解题技巧和手段也可作为求解其他挠性结构和一般结构力学问题的参考。本书可作为高等院校相关专业研究生以及航天领域相关科研人员的参考书。

限于作者水平，书中不妥和错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

作　者

2009 年于国防科学技术大学

目　　录

前言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　航天器简介 …… 1

1.1.1　航天器的分类 …… 1

1.1.2　卫星 …… 3

1.1.3　空间探测器 …… 11

1.1.4　无人货运飞船 …… 16

1.1.5　载人航天器 …… 17

1.2　挠性航天器的概念 …… 19

1.2.1　相关概念定义 …… 19

1.2.2　刚性航天器与挠性航天器 …… 20

1.3　太阳能电池片、太阳能电池阵、太阳能电池阵结构 …… 21

1.3.1　航天器能源 …… 21

1.3.2　太阳能电池片 …… 22

1.3.3　太阳能电池阵 …… 25

1.3.4　太阳能电池阵结构的概念 …… 25

1.3.5　贴身式太阳能电池阵结构 …… 27

1.3.6　对称式太阳能电池帆板 …… 29

1.3.7　非对称式太阳能电池翼 …… 36

1.3.8　组合式太阳能电池翼 …… 38

1.3.9　新型太阳能电池阵结构 …… 39

1.4　挠性航天器结构动力学问题 …… 51

1.4.1　挠性航天器典型事故及事故分析 …… 51

1.4.2　结构的特殊性带来的问题 …… 54

1.4.3　太空环境的特殊性带来的问题 …… 54

1.4.4　航天器运动干扰带来的问题 …… 57

1.4.5　面临的挑战 …… 57

1.4.6　挠性航天器结构动力学分析相关问题 …… 59

1.5　本书焦点 …… 61

1.5.1　研究对象 …… 61

1.5.2　研究任务 …… 61

参考文献 …… 62

第 2 章　挠性航天器太阳能电池翼构型分析及其简化模型 …… 68

2.1 引言 …… 68
2.2 太阳能电池翼构型分析 …… 68
2.2.1 太阳能电池翼主要的结构形状 …… 68
2.2.2 太阳能电池翼结构的共性 …… 70
2.2.3 太阳能电池翼结构的个性 …… 71
2.2.4 太阳能电池翼连接部件的结构特点分析 …… 73
2.3 太阳能电池翼结构的类型 …… 75
2.3.1 分类原则 …… 75
2.3.2 挠性系数 …… 75
2.3.3 挠性定义 …… 75
2.3.4 挠性帆板的分类 …… 76
2.4 常用太阳能电池翼结构的简化模型 …… 77
2.4.1 悬臂梁模型 …… 77
2.4.2 悬臂板模型 …… 77
2.4.3 刚柔耦合模型 …… 79
2.4.4 带刚性边框的挠性帆板模型 …… 80
2.4.5 半刚性电池翼模型 …… 81
2.4.6 帆板部件模型 …… 83
2.5 小结 …… 85
第 3 章 挠性结构相关力学基本问题及基础理论 …… 86
3.1 引言 …… 86
3.2 固体力学的基本概念 …… 86
3.2.1 强度问题 …… 86
3.2.2 刚度问题 …… 89
3.2.3 稳定性问题 …… 89
3.2.4 本构关系 …… 89
3.2.5 边界条件 …… 90
3.3 固体力学基本方程 …… 90
3.3.1 平衡方程 …… 90
3.3.2 几何方程 …… 92
3.3.3 物理方程 …… 93
3.3.4 弹性力学基本方程的矩阵表示 …… 93
3.4 结构动力学的基本理论 …… 97
3.4.1 结构的动力学特性 …… 97
3.4.2 结构动力学基本方程 …… 97
3.4.3 结构动力学特征值问题——微分方程的齐次解 …… 101
3.4.4 结构动力学动力响应问题——微分方程的非齐次解 …… 102
3.5 求解固体力学问题的有限单元法基本理论与方法 …… 103

3.5.1 有限元法的基本思路 103
3.5.2 单元的位移、应变与应力 104
3.5.3 刚度矩阵、质量矩阵、结点力向量 112
3.5.4 有限元推导结构动力学方程的基本思路 123
3.6 结构动力学系统的基本特性 129
3.6.1 固有频率与固有模态的特性 129
3.6.2 展开定理 131
3.6.3 特征值的有序性 132
3.6.4 特征值的隔离定理 133
参考文献 134
第 4 章 太阳能电池翼基本构件和单元的结构动力学模型 135
4.1 引言 135
4.2 常见基本构件的结构动力学解析模型 135
4.2.1 弦的振动 135
4.2.2 薄膜的振动 139
4.2.3 薄板的振动 141
4.2.4 计算板横向振动的近似方法 152
4.2.5 圆板的横向振动 154
4.2.6 杆的纵向振动 160
4.2.7 杆的扭转振动 161
4.2.8 杆的横向振动 163
4.3 常见基本构件的结构动力学有限元模型 171
4.3.1 纵向振动杆单元 171
4.3.2 横向振动梁单元 172
4.3.3 扭转振动杆单元 174
4.3.4 空间梁单元 175
4.3.5 板单元 178
4.3.6 连接单元 183
参考文献 188
第 5 章 一般矩形结构太阳能帆板结构动力学特性分析 189
5.1 引言 189
5.2 矩形太阳能帆板结构特点分析 189
5.3 矩形帆板模态分析的数学模型 191
5.3.1 解析模型 191
5.3.2 半解析模型 193
5.3.3 有限元模型 197
5.4 太阳能帆板展开状态整体有限元模型 199
5.4.1 帆板结构展开状态 199

5.4.2 帆板展开状态有限元模型 199
5.4.3 基板连接件连续条件处理 201
5.4.4 帆板部件的有限元模型 202
5.4.5 部件单元的有限元划分 203
5.5 数值计算及结果分析 205
5.5.1 基板模态 205
5.5.2 连接结构对结构系统动力学特性的影响 205
5.5.3 基板刚度和偏心对结构系统动力学特性的影响 206
5.5.4 基板振型图 206
5.5.5 结果分析 214
5.6 小结 215
参考文献 216
第 6 章 圆形太阳能帆板力学特性分析 217
6.1 引言 217
6.2 模型简化 218
6.2.1 物理模型 218
6.2.2 基本假设 220
6.2.3 构型分析及模型简化 220
6.2.4 圆形帆板的参数分析 220
6.3 数学模型 223
6.4 静力学问题数值仿真分析 225
6.4.1 有限元离散 225
6.4.2 薄膜单元、各向同性、有张力展开状态线性静力学分析 225
6.4.3 薄膜单元、正交异性、有张力展开状态静力学计算 227
6.4.4 薄膜单元、各向同性、温度载荷下的静力学计算 228
6.4.5 薄膜单元、正交异性、温度载荷下的静力学计算 229
6.4.6 薄板单元、各向同性、有张力展开状态非线性静力学分析 230
6.5 帆板屈曲前的动力学特性分析 230
6.5.1 有限元模型 230
6.5.2 各向同性薄膜帆板的非线性动力学特性分析 231
6.5.3 正交异性薄膜帆板的特征值分析 232
6.5.4 薄膜厚度和温度载荷对非线性动力学特性的影响 232
6.5.5 非线性薄膜模型与非线性薄板模型的动力学特性比较 236
6.5.6 线性薄板模型与非线性薄板模型的动力学特性比较 236
6.5.7 帆板边数对频率和振型的影响 237
6.6 帆板屈曲后的动力学特性分析 240
6.6.1 分析方法一 241
6.6.2 分析方法二 242

6.7 小结 243
参考文献 243
`第 7 章 框架式太阳能帆板结构的应变模态特性分析 245
7.1 引言 245
7.2 动力学基本方程 246
7.2.1 简化模型 246
7.2.2 结构上一点的运动方程 247
7.2.3 板式结构振动的动力学基本方程 252
7.2.4 板式结构有限元模型 257
7.3 结构的应变模态 266
7.4 基于板式模型的太阳能帆板应变模态分析 267
7.4.1 仿真模型设计 267
7.4.2 板式模型的动力学特性仿真 267
7.4.3 仿真结果分析 268
7.5 周边为刚架的框架式太阳能帆板应变模态分析 269
7.5.1 周边刚架模型仿真参数设计 269
7.5.2 周边刚架式太阳能帆板仿真 270
7.5.3 仿真结果分析 271
7.6 具有“工字形”刚架的框架式太阳能帆板应变模态分析 272
7.6.1 “工字形”刚架模型仿真参数设计 272
7.6.2 “工字形”刚架式太阳能帆板仿真 272
7.6.3 仿真结果分析 274
7.7 周边为刚架的框架式太阳能帆板动力响应分析 274
7.7.1 干扰力载荷作用点与动力响应点位置想定 274
7.7.2 冲击载荷作用下的位移响应 275
7.7.3 简谐干扰力作用下帆板的动力响应 276
7.7.4 结果分析 278
7.8 小结 278
参考文献 279
第 8 章 挠性航天器刚柔耦合动力学分析 280
8.1 引言 280
8.2 刚柔耦合系统动力学基本问题 280
8.2.1 Kane 动力学模型 280
8.2.2 挠性结构的运动变形 283
8.2.3 动力刚化现象 285
8.3 航天器–梁式挠性结构系统刚柔耦合动力学分析 287
8.3.1 挠性航天器梁式简化模型 287

8.3.2 刚柔耦合系统的运动学模型 288
8.3.3 结构动力学系统有限元模型 295
8.3.4 Kane 动力学模型仿真分析 298
8.3.5 有限元动力学模型仿真分析 302
8.3.6 挠性航天器耦合运动数值仿真分析 305
8.4 航天器–板式挠性结构系统刚柔耦合动力学分析 310
8.4.1 挠性航天器板式简化模型 310
8.4.2 基于 Kane 方程动力学模型 311
8.4.3 板式结构系统的有限元模型 320
8.4.4 板模型 Kane 动力学模型仿真分析 326
8.4.5 板模型有限元动力学模型仿真分析 329
8.5 挠性航天器在轨飞行中的刚柔耦合动力学分析 330
8.5.1 刚柔耦合动力学建模 330
8.5.2 挠性航天器刚柔耦合运动仿真分析 339
8.6 小结 343
参考文献 344
第 9 章 挠性航天器太阳能帆板多体结构动力学分析 345
9.1 引言 345
9.2 多体结构动力学基本理论 345
9.2.1 多杆模型 345
9.2.2 多梁模型 351
9.3 航天器太阳能帆板多体结构动力学模型 361
9.3.1 简化模型 361
9.3.2 单块帆板的动力学方程 363
9.3.3 连接结构的动力学模型 367
9.3.4 两块板连接而成的太阳能帆板的弯曲 371
9.4 太阳能帆板结构的特征问题分析 374
9.4.1 由单块悬臂板组成的太阳能帆板的振动 375
9.4.2 由多板连接组成的太阳能帆板的振动 376
9.5 太阳能帆板多板结构的动力学分析 381
9.5.1 各向同性方形悬臂板 381
9.5.2 两块板连接而成的太阳能帆板多体结构动力学分析 383
9.5.3 3 块板连接而成的太阳能帆板多体结构动力学分析 390
9.6 含连接支架的太阳能帆板多体结构整体动力学分析 400
9.6.1 结构特点分析 400
9.6.2 数学模型 401
9.6.3 太阳能帆板多体结构的整体动力学特性分析 412
9.7 小结 414

参考文献 …… 415
第 10 章 半刚性太阳能电池翼结构动力学特性分析 …… 416
10.1 引言 …… 416
10.2 半刚性太阳能电池翼的物理模型 …… 417
10.3 半刚性太阳能电池翼整体动力学模型及特性分析 …… 418
10.3.1 整体简化模型 …… 418
10.3.2 匀直悬臂梁模型动力学特性分析 …… 421
10.3.3 分段梁模型动力学特性分析 …… 431
10.3.4 “匀直+匀直”双梁模型动力学特性分析 …… 434
10.3.5 “分段+匀直”双梁模型动力学特性分析 …… 440
10.3.6 端部带集中质量块的悬臂梁模型动力学特性分析 …… 443
10.4 半刚性太阳能电池翼的有限元模型 …… 447
10.4.1 连接刚度建模 …… 447
10.4.2 挠性基板建模 …… 448
10.4.3 太阳能电池片建模 …… 449
10.4.4 主伸展桁架有限元模型 …… 449
10.4.5 太阳能电池翼整板有限元模型 …… 450
10.5 单板力学特性分析 …… 452
10.5.1 单块帆板的静力学特性分析 …… 452
10.5.2 单块帆板的模态分析 …… 455
10.5.3 张力对帆板固有频率的影响 …… 461
10.6 主展开桁架力学特性分析 …… 463
10.6.1 主展开桁架的静力学特性分析 …… 463
10.6.2 主展开桁架的模态分析 …… 465
10.7 半刚性太阳能电池翼整体力学特性分析 …… 469
10.7.1 半刚性太阳能电池翼整体结构静力学特性分析 …… 469
10.7.2 半刚性太阳能电池翼整体结构模态分析 …… 474
10.8 小结 …… 489
参考文献 …… 490
第 11 章 太阳能帆板非线性结构动力学特性分析 …… 491
11.1 引言 …… 491
11.2 挠性航天器结构系统的一般模型 …… 491
11.2.1 航天器–帆板结构系统 …… 491
11.2.2 挠性航天器部件模型 …… 492
11.3 大挠性太阳能帆板的非线性梁模型 …… 495
11.3.1 大挠性几何非线性梁变形场描述 …… 495
11.3.2 大挠性几何非线性梁模型的动力学方程 …… 497

11.4 大挠性太阳能帆板的非线性板模型 …… 512
11.4.1 几何非线性板变形场描述 …… 512
11.4.2 有限元离散 …… 514
11.4.3 运动学分析 …… 517
11.4.4 动力学方程 …… 520
11.5 太阳能帆板非线性振动仿真分析 …… 523
11.5.1 结构模型 …… 523
11.5.2 动力学方程的建立 …… 524
11.5.3 数值仿真 …… 531
11.6 小结 …… 533
参考文献 …… 533
第 12 章 挠性航天器轨道运动与帆板振动的耦合动力学分析 …… 534
12.1 引言 …… 534
12.2 航天器在轨飞行运动学特性分析 …… 534
12.2.1 轨道运动与姿态运动 …… 534
12.2.2 研究模型 …… 537
12.3 载荷分析 …… 538
12.3.1 坐标系描述 …… 539
12.3.2 作用在航天器本体上的载荷 …… 545
12.3.3 作用在太阳能帆板上的载荷 …… 553
12.4 轨道飞行运动参数对太阳能帆板静变形的影响分析 …… 559
12.4.1 基本假设 …… 559
12.4.2 航天器的运动方程 …… 560
12.4.3 太阳能帆板的静变形方程 …… 564
12.4.4 轨道飞行引起的太阳翼帆板静变形仿真分析 …… 568
12.5 轨道飞行对太阳能帆板振动特性影响分析 …… 573
12.5.1 平面曲梁的有限元动力学方程 …… 573
12.5.2 太阳能帆板曲梁模型的仿真分析 …… 582
12.6 小结 …… 584
参考文献 …… 585

第 1 章　绪　　论

1.1　航天器简介

1.1.1　航天器的分类

航天器是在外层空间基本按照天体力学的规律运行并执行特定任务的飞行器[1]。

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[2]。

1. 按航天器特点分

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。

2. 按发射方式分

航天器按发射方式分为陆地发射、空中发射、海上发射和太空施放四类。

航天器的发射初期，几乎都是陆地塔架发射，所以没有航天器按发射方式分类的方法。

1982 年 6 月 27 日美国航天飞机“哥伦比亚号”在第 4 次飞行中，首次投放国防部卫星取得成功，从此航天器的发射有了太空施放方式。

1990 年，美国轨道科学公司首次从大型运输机上发射其飞马座空射型运载火箭，将 450kg 的有效载荷送入低地轨道，开创了航天器的空中发射方式。

由来自美国、俄罗斯、乌克兰和挪威的 4 家企业合资经营的海上发射公司于 1999 年 3 月进行的首次海上发射，天顶 3SL 火箭把一颗模拟卫星送入轨道，从此航天器的发射又增加了海上发射方式。

3. 按完成任务方式分

航天器按完成任务方式分为独立型、组合型和组网型航天器。

初期的航天器，无论是人造卫星还是空间探测器多是独立型航天器。

之后，出现了组合型航天器(主要指卫星，也称为卫星星座)。如为了缩短对某地的侦察时间间隔，在相同或不同轨道上，发射同样的卫星，增加观测次数；又如为了获得本土气象资料，将“详查”与“普查”结合起来，在太阳同步轨道和地球静止轨道上部署气象卫星，获取大范围与小范围相互补充的气象观测资料等。

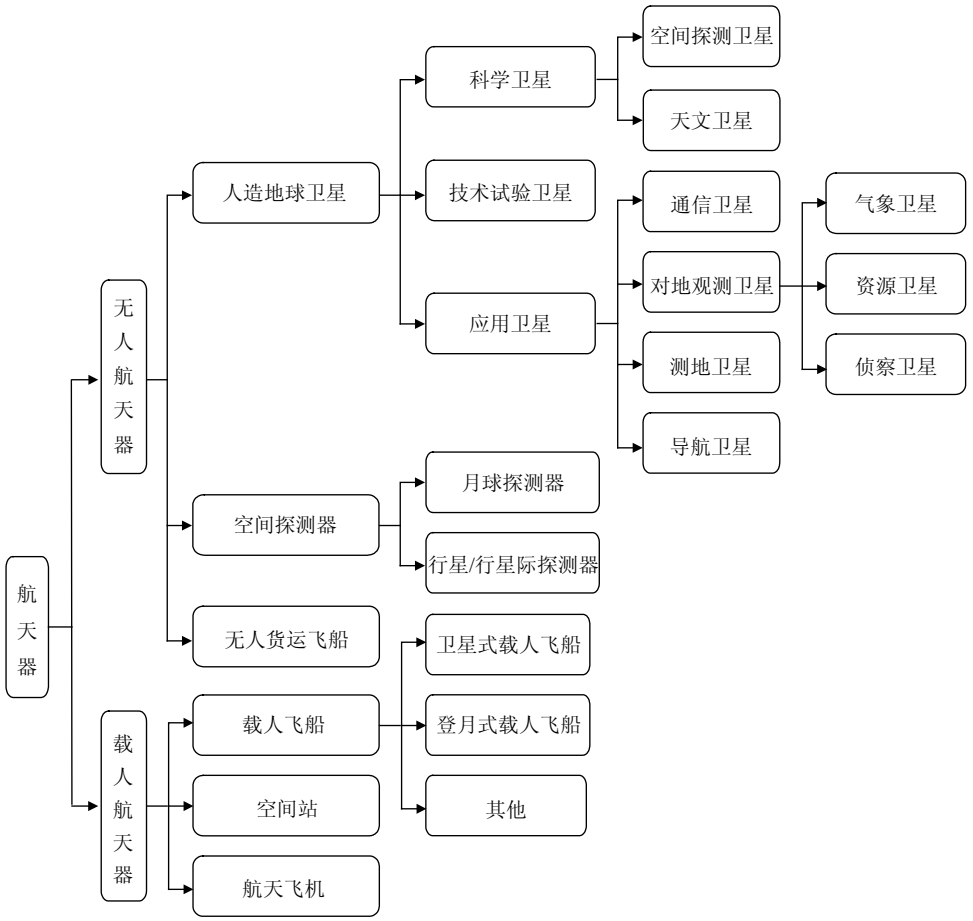

图 1.1 航天器综合分类

组网型航天器，如众多的卫星网。当今组网成为航天器发展的重要方向，而且组网规模越来越大，功能越来越强。与组合型航天器不同，航天器网通过精心设计航天器，科学选择轨道参数，优化地面测控系统，将航天器组成一个不可分割的整体，以完成特定的航天任务，如“全球星”系统、“铱星”系统等。

现在航天专家们又提出了航天器在轨重构的概念，将航天器分解为功能模块的组合，通过交会对接技术在空中组装为不同需要的构型。目前的国际空间站只是在轨组装，可以说是在轨重构的一种特殊情况。

4. 其他分类方式

此外，航天器分类还可以按照其他的依据，如按质量分类、按控制方式分类、按主体结构配置分类、按结构分类、按任务数量分类等。

1.1.2 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得到了极其广泛的应用。以科学探测和研究为目的的有天文卫星、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；用于军事的有照相侦察卫星、电子侦察卫星、海洋监视卫星、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。

1. 卫星的分类

(1) 按服务对象分为民用卫星、军用卫星和军民混用卫星。

(2) 按运行轨道分为低轨道($h < 6\,000$km)卫星、中高轨道($6\,000\text{km} < h < 20\,000$km)卫星、高轨道($h > 20\,000$km)卫星。

(3) 按轨道类型分为地球同步轨道卫星、地球静止轨道卫星、太阳同步轨道卫星、极轨道卫星和晕轨道卫星。

(4) 按轨道形状分为圆(近圆)轨道卫星、椭圆轨道卫星和大椭圆轨道卫星。

(5) 按用途分为科学卫星、技术试验卫星和应用卫星。

2. 科学卫星简介

科学卫星主要包括空间探测卫星和天文卫星。

1) 空间探测卫星

该类卫星主要是对空间物理环境，特别是近地空间环境和日地关系进行探测。以下为这类卫星的几个例子。

1957 年 10 月 4 日，苏联用“卫星号”运载火箭成功地发射了世界上第一颗人造地球卫星——“斯普特尼克 1 号”卫星，如图 1.2 所示[3]，该卫星属于空间探测卫星。

1958 年 2 月 1 日美国发射了第一颗人造地球卫星“探险者”一号，该卫星是空间探测卫星。它比苏联在 1957 年 10 月 4 日发射的世界上第一颗人造地球卫星晚了 3 个多月。

中国的“实践”系列卫星也属于空间探测卫星。自 1971 年 3 月 3 日成功发射实践 1 号卫星以来，已发射了实践 2 号[4](图 1.3)、实践 2 号甲(乙)、实践 4 号、实践 5 号系列卫星。

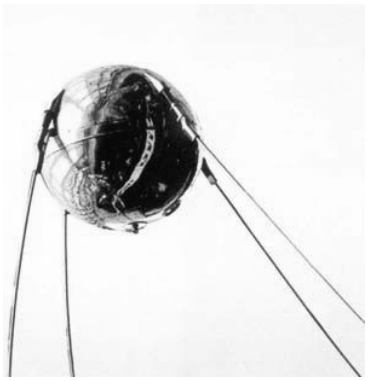

图 1.2 “斯普特尼克-1 号”卫星

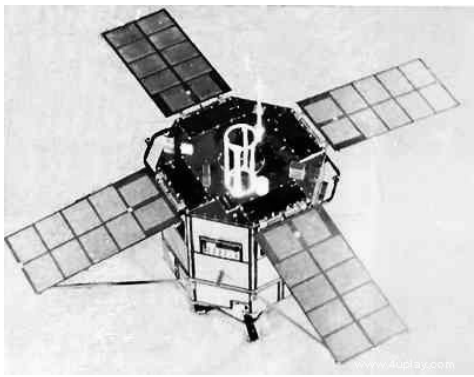

图 1.3 “实践二号”卫星

2) 天文卫星

世界第一颗天文卫星是美国 1960 年发射的“太阳辐射监测卫星”。1968 年升空的“轨道天文台”是最早专门用于紫外天文观测的卫星。第一颗X射线观测卫星是 1970 年发射的“天文卫星 1”。1972 年入轨的小型“天文卫星 2”则是第一颗专门用于γ射线天文观测的卫星。用于红外观测的第一颗卫星于 1983 年进入太空。美英等国合作于 1983 年发射了世界上第一颗红外天文卫星“IRAS”。现今最重要的天文卫星是美国哈勃空间望远镜、“康普顿”γ 射线空间望远镜以及 1999 年升空的“钱德拉”X射线望远镜(AXAF)。

2003 年 8 月 25 日空间红外望远镜的发射，标志着美国航空航天局的“大天文台计划”达到了顶峰。所谓大天文台，其实就是 4 架独立建造的太空望远镜，用以研究天文学几个最基本的问题：宇宙、星系，还有太阳系如何起源，又将如何终结等。

众所周知的哈勃空间望远镜，如图 1.4 所示[5]，是该计划的第一座大天文台，1990 年 4 月 25 日由“发现号”航天飞机搭载送入轨道。

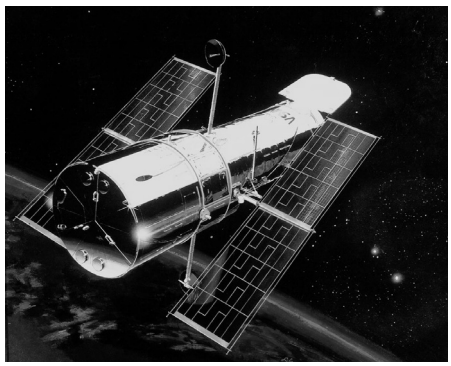

图 1.4 哈勃空间望远镜

1991 年 4 月 5 日，“康普顿”伽马射线天文台[6](图 1.5)由“亚特兰蒂斯号”航天飞机携带升空。1999 年 7 月 24 日，第三架望远镜——“钱德拉”X射线天文台[7](图 1.6)由“哥伦比亚号”航天飞机发射，并被助推火箭送入更高的轨道。

图 1.5 “康普顿”伽马射线天文台

图 1.6 “钱德拉”X 射线天文台

2005 年 5 月美国发射了“空间干涉测量仪”(SIM)卫星来取代“空间红外望远镜”(SIRTF)。SIM 由分布在约 9m 长的长杆上的 7 个直径 0.3m 的望远镜组成，对红移的观察更准确，观测天体具体位置的精确度是哈勃空间望远镜的 1000 倍，如图 1.7 所示[6]。

1999 年 12 月 10 日入轨的欧洲航天局的“多镜面”X射线观测卫星（XMM）的灵敏度是美国“钱德拉”X射线空间望远镜的 5 倍，如图 1.8 所示[6]。

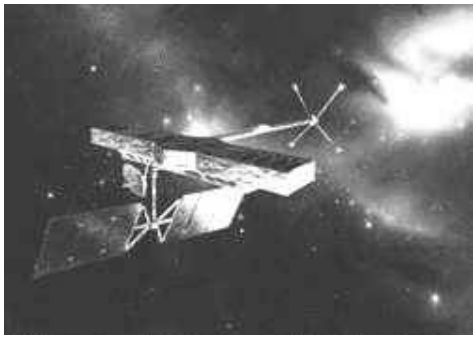

图 1.7 “空间干涉测量仪”卫星

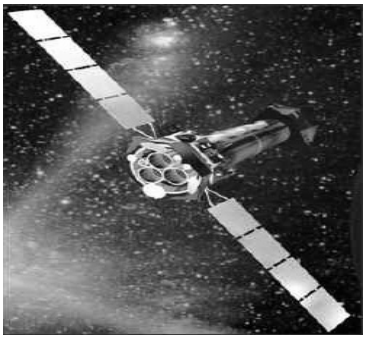

图 1.8 “多镜面”X 射线观测卫星

日本发射了一系列天文卫星。1997 年 2 月 12 日发射了世界上最大的“空间射电望远镜”(VSOP)，如图 1.9 所示[6]。2006 年 2 月 22 日成功发射了首颗“ASTRO-F”红外天文卫星。

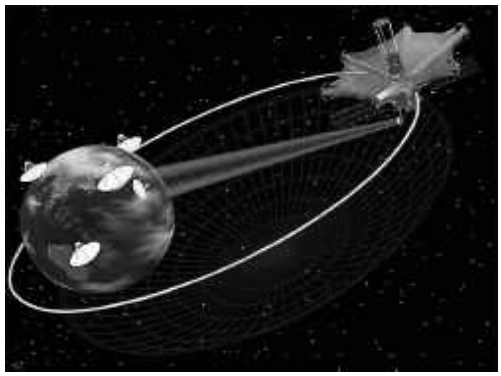

图 1.9 世界上最大的“空间射电望远镜”

3. 技术试验卫星简介

技术试验卫星用于在轨试验新技术、新原理、新方案、新设备和新材料，为航天的发展充当“开路先锋”。如苏联在 1957 年 11 月 3 日发射的世界第一颗带生物的卫星——人造地球卫星 2 号(它载有一只名叫“莱依卡”的小狗)。美国发射过用于试验新的气象观测仪器和探测方法的第二代试验气象卫星系列——“雨云号”系列卫星等。中国的“实践号”系列卫星既是科学卫星又是技术试验卫星。例如，“实践-2 号”任务是探测空间环境，试验太阳电池阵对日定向姿态控制和大容量数据存储等新技术。

4. 应用卫星简介

应用卫星直接为国民经济和军事服务，所以品种和发射数量最多，用途最广，对人类社会影响最大。

目前常用的应用卫星有三种：一种是通信卫星，另一种是遥感卫星，第三种是导航卫星。

1) 通信卫星

通信卫星，是作为无线电通信中继站的卫星。通信卫星一般采用地球静止轨道，这条轨道位于地球赤道上空 35 786km 处。卫星在这条轨道上以 3 075m/s 的速度自西向东绕地球旋转，绕地球一周的时间为 23 小时 56 分 4 秒，恰与地球自转一周的时间相等。

自从 1958 年 12 月美国发射世界第一颗试验通信卫星“斯科尔”以来，通信卫星已广泛应用于固定和移动通信、电视直播、数字音频广播、数据中继等方面。通信卫星的出现使现代通信产生了极大的飞跃，成为当代社会不可缺少的支柱。

中国的第一颗静止轨道通信卫星是 1984 年 4 月 8 日发射的，命名为“东方红

二号”。1997 年发射的“东方红三号”[8](图 1.10)是由我国新研制的一种中容量广播通信卫星，有 24 个转发器，工作寿命为 8 年。

当今最著名的静止轨道移动通信卫星是“国际移动卫星-3 号”,它可为全球陆、海、空用户提供移动通信服务。20 世纪 90 年代问世的中低轨道移动通信卫星开辟了全球个人通信的新时代，如大名鼎鼎的“铱星”系统。

现在，全世界有 200 多个国家和地区，正在应用约 300 颗地球静止轨道通信卫星，提供 80%的洲际通信和 80%的国际电视转播，并开通部分国内或区域卫星通信和电视广播业务，在航天领域率先形成产业化。

美国从 1976 年开始研制跟踪和数据中继卫星(TDRS)，如图 1.11 所示[9]。在地球静止轨道上适当部署三颗跟踪和数据中继卫星，则相当于把三个地面测控通信站搬到了空间，它能对轨道高度在 200~12 000km 范围内的所有用户卫星、载入飞船和空间站实现连续跟踪和数据通信。跟踪和数据中继卫星质量为 2 270kg，星体为六面体，两块太阳电池板展开后宽 17.4m，可提供 1 850W 电功率。星上装有 Ku 波段和 S 波段合用的两个抛物面天线，直径达 4.9m。

图 1.10 “东方红三号”通信卫星

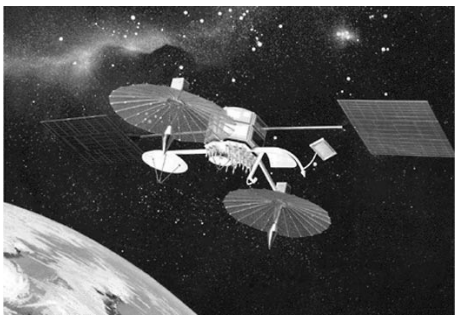

图 1.11 跟踪和数据中继卫星

2003 年 12 月 14 日 9 点 42 分美国航空航天局的“跟踪与数据中继卫星 J”(TDRS-J)成功发射。TDRS-J 是美国航空航天局用来与航天飞机、国际空间站、哈勃空间望远镜以及其他地球轨道航天器通信的 3 颗下一代卫星中的最后一颗。

新一代的 TDRS 卫星[10](图 1.12)重约 3 175kg，入轨后其 20.7m 长的太阳能帆板和两部直径 4.6m 的石墨网状天线展开。为了把直径 4.6m 的天线安装到宇宙神火箭的整流罩内，休斯公司采用了一种石墨网状天线设计，使尺寸很大的天线在发射过程中被折叠成炸玉米卷形。入轨后，天线可弹开，形成所需的精确形状。

如图 1.13 所示[11]，军事星系统(MILSTAR)是于 20 世纪 80 年代初开始实施的一项军事卫星通信系统工程。

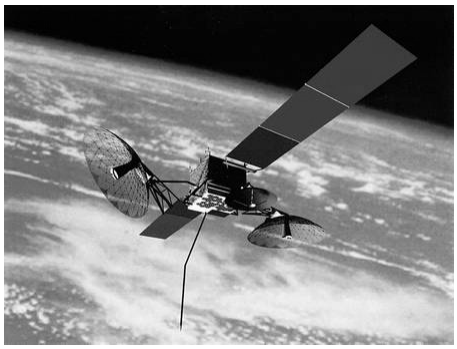

图 1.12 新一代数据中继卫星

图 1.13 美国“军事星”

2) 对地观测卫星

对地观测卫星主要有气象卫星、资源卫星和侦察卫星三种。

自从 1961 年 4 月美国发射第一颗气象卫星以来，已约有 160 多颗气象卫星升空，它们大大提高了气象预报的准确性，并在海洋、农业、交通和环境监测等非气象方面也大显身手。当代最先进的极轨气象卫星是美国 1998 年 5 月 13 日发射的“诺阿 15”，它是获得全球气象资料的“大腕”，用于提供中长期数值天气预报所需要的数据。第一颗静止轨道气象卫星是 1969 年由美国发射的，目前美国使用的是第二代卫星“戈斯 8, 9, 10”，代表现今最高水平，主要进行区域观测，提供短期天气预报数据。

我国已先后发射了多颗极轨气象卫星。现在拥有极轨气象卫星的国家有美国、俄罗斯和中国，拥有静止轨道气象卫星的国家和团体有美国、俄罗斯、欧洲航天局、印度、日本和中国。这些气象卫星已在全球组成严密的观测网。

在气象卫星的基础上，美国于 1972 年 7 月 23 日又成功发射了世界上第一颗资源卫星——ERTS-1。目前，最先进的资源卫星当数法国的“斯波特 4”、美国的“陆地卫星 7”和加拿大的“雷达卫星”，它们在分辨率、幅宽、波段等方面各有所长，其中加拿大“雷达卫星”载有合成孔径雷达，能全天候、全天时进行对地观测，代表了未来的发展方向。

侦察卫星是用于获取军事情报的人造地球卫星。自 1960 年前后出现以来，发展迅速，已成为现代作战指挥系统和战略武器系统的重要组成部分。欧洲侦察卫星的代表“太阳神 2”[12](图 1.14)，光电侦察卫星的典型代表是高级“KH-11”[13](图 1.15)，雷达侦察卫星的代表是“长曲棍球”，海洋监视卫星的代表是新一代“白云”，电子侦察卫星的代表是“军号”[14, 15] (图 1.16、图 1.17)。

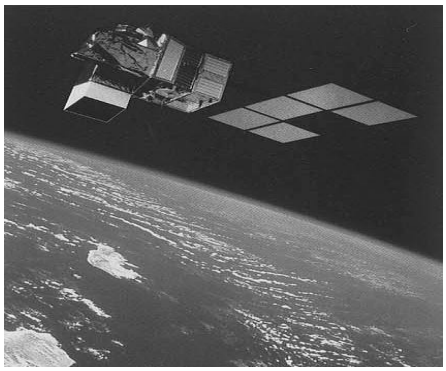

图 1.14　欧洲“太阳神 2”侦察卫星

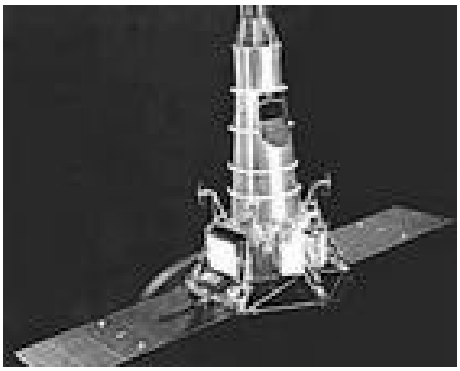

图 1.15　“KH-11”锁眼卫星

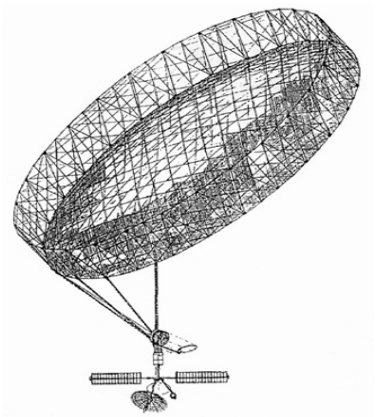

图 1.16　“军号”电子侦察卫星

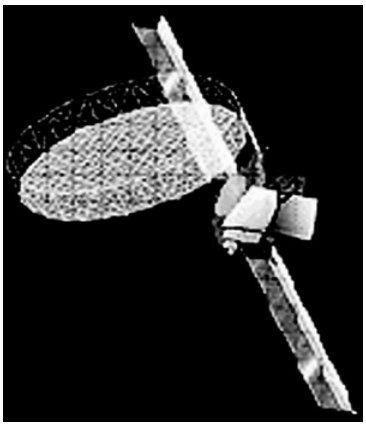

图 1.17　新型电子侦察卫星

3) 导航卫星

导航卫星的发明引起导航定位技术的重大变革。它不受气象条件和航行距离的限制，实现了高精度、全天候、全天时、全球性、终端小等的导航定位，广泛用于军事和国民经济的众多领域，并产生深远影响。

第一颗导航卫星是 1960 年 4 月美国发射的“子午仪”。目前使用的导航系统有美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS。

导航卫星网由数十颗卫星[16](见图 1.18)组成，也称为导航卫星星座，具有全球覆盖能力。导航卫星按导航方式不同可分为测速和测距卫星，根据卫星运行轨道的高度可分为低轨道、中高轨道和地球同步轨道导航卫星。

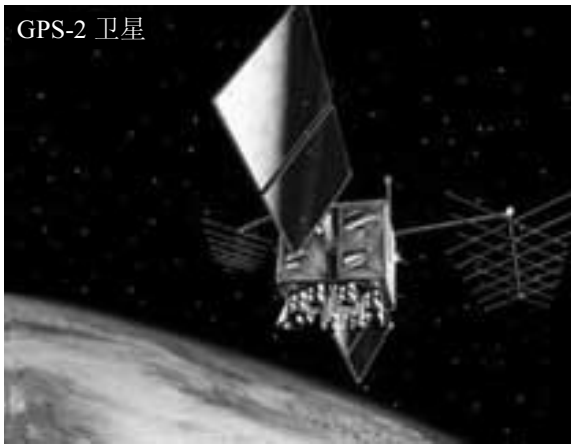

图 1.18 GPS-2 卫星

4) 测地卫星

测地卫星是专门用于大地测量的人造地球卫星。测地卫星用于测定地面点位坐标、地球形体和地球引力场参数，属卫星测地系统的空间部分，可作为地面观测设备的观测目标或定位基准。世界上第一颗专用的测地卫星是美国于 1962 年 10 月发射的“安娜号”卫星。前苏联和法国也先后发射过专用的测地卫星。

5) 资源卫星

1972 年 7 月 23 日美国发射了世界上第一颗地球资源卫星 ERTS-1，后改名为“陆地卫星”，用于勘测和研究地球自然资源，如图 1.19 所示[17]。

中国和巴西合作的“中巴地球资源卫星”于 1999 年 10 月发射升空。

图 1.19 “陆地卫星”

从 1957 年苏联发射第一颗卫星到现在半个多世纪的时间里，世界上有几十个国家先后发射了各种不同的卫星共计超过 5 000 颗，这里仅列举了其中很少的一

部分。

1.1.3 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、水星、金星、火星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星、哈雷彗星以及许多小行星、卫星进行了近距离或实地考察，获得了丰硕的成果。

1. 月球探测器

1959 年 1 月 2 日，苏联发射了世界第一个无人月球探测器——“月球-1”，此后的二十多年中，苏联共向月球发射了 32 个探测器，美国也向月球发射了 21 个探测装置。1969 年 7 月美国的“阿波罗 11 号”实现了人类登月之梦，在月球探测中取得最辉煌的成果。此外，欧洲首个月球探测器“智慧 1 号”，已于 2003 年 9 月 27 日发射升空。日本的月球探测器 “月亮女神”2005 年发射。中国于 2008 年发射了自己的第一个月球探测器“嫦娥一号”。1994 年美国发射的“克莱门汀号”探测器发现月球南极一个深坑中的不见阳光的角落可能有冰，接着在 1998 年又发射了“月球探测者号”探测器[18](图 1.20)，对月球进行水资源探测。

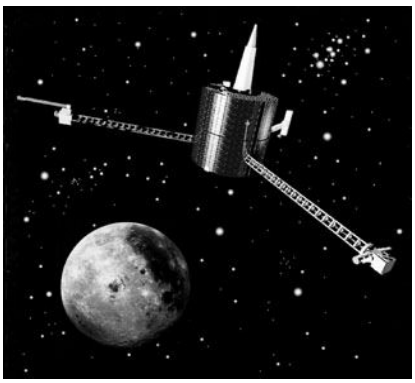

图 1.20 “月球探测者号”探测器

2. 行星、行星际探测器

1961 年 2 月 12 日苏联发射的“金星 1 号”是第一个飞向金星的探测器。美国在 1962 年 8 月 27 日发射的“水星 2 号”是第一个成功探测金星的探测器。

美国的“先驱者号”是世界上第一个行星和行星际探测器。1972 年 3 月 3 日向木星发射的“先驱者 10 号”是第一个到达木星、木星卫星、土星附近的探测器。之后“先驱者 10 号”行星探测器携带访问地外文明的镀金铝牌飞过冥王星，于

1983 年 6 月 13 日飞出海王星的轨道，飞离太阳系进入恒星际空间，成为第一个飞出太阳系的探测器。1997 年，“先驱者 10 号”已远离地球 90 亿千米，它发出的无线电信号要经过 9 小时才能到达地球站。“先驱者 10 号”原设计寿命为 22 个月，但它已在太阳系深空中工作超出了 25 年，如图 1.21 所示[19]。

图 1.21 “先驱者 10 号”行星探测器

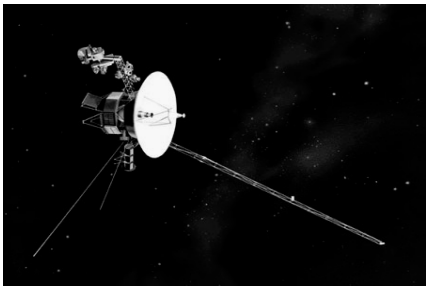

图 1.22 “旅行者 1 号”

分别于 1977 年 8 月和 9 月升空的美国“旅行者 1 号”和“旅行者 2 号”是访问木星的第二批“探访者”。其中“旅行者 2 号”不但对木星和土星进行了探测，还首次对天王星和海王星进行了探测，完成了四星联游的壮举。“旅行者 1, 2”最后也分别飞出太阳系。1998 年，“旅行者 1 号”[20](图 1.22)超越“先驱者 10 号”，成为在宇宙中飞行得最远的人类探测器。世界上第一个木星专用探测器是美国于 1989 年 10 月 18 日发射的“伽利略号”。

美国于 1973 年 11 月 3 日发射升空的“水手 10 号”[21](图 1.23)是第一个水星探测器，该探测器也是第一个探测金星和水星的双星探测器。

1962 年 11 月 1 日，苏联发射了世界上第一个火星探测器“火星 1 号”，但由于通信故障，未能完成任务。美国于 1965 年发射的“水手 4 号”是第一个成功飞掠火星的探测器。1972 年 1 月 3 日，“水手 9 号”成为第一颗绕火星轨道运行的人造火星卫星。首次在火星上登陆的探测器是苏联于 1971 年 5 月 19 日发射升空的“火星 2 号”。

1979 年，美国的“先驱者 11 号”为土星拍摄了第一张近距离照片。1997 年 10 月 15 日，由美国和欧洲合作研制的世界上第一个土星专用探测器“卡西尼号”升空。

1990 年 10 月 6 日，美国和欧洲合作的第一个太阳探测器“尤利西斯号”升空。

1978 年美国发射的一颗叫做“国际日地探险者 3 号”的卫星成为世界上第一个彗星探测器。1997 年 3 月和 4 月，美国的“克莱门汀号”探测器对海尔–波普回归进行了探测。“星尘号”探测器于 2000 年 12 月穿越一颗“维尔特 2 号”的彗星。1984~1986 年，全世界先后专门发射了 5 个哈雷彗星探测器，其中有苏联的

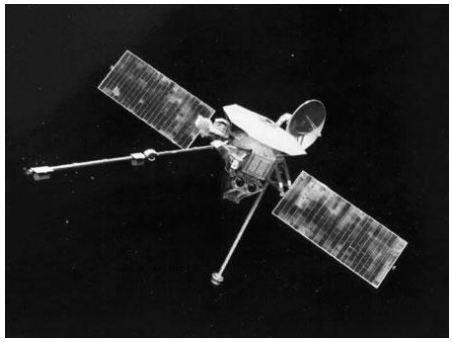

图 1.23 美国 1973 年发射的“水手 10 号”

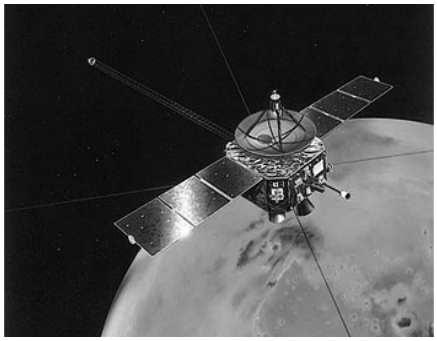

图 1.24 日本“希望号”飞船

“维加 1, 2 号”、欧洲航天局的“乔托号”、日本的“先驱号”和“彗星号”，它们都取得了很好的探测成果。

美国的“尼尔号”探测器于 2000 年 2 月 14 日进入了名叫“爱神星”的小行星运行轨道，这是人类发射的航天器首次成功地进入围绕小行星运行的轨道。

3. 火星探测器

在不太遥远的未来，让人类登上火星是太空探索的最大梦想之一。1962 年 11 月苏联向火星发射了第一个火星探测器“火星 1 号”。目前在火星轨道上飞行的探测器有日本的“希望号”探测器[22](图 1.24)，美国的“火星观察者号”探测器[23] (图 1.25)、“火星环球勘探者”探测器[23](图 1.26)、“火星奥德赛号”探测器[24](图 1.27)和“火星勘测轨道飞行器”[25](图 1.28)以及欧洲航天局的“火星快车”[26](图 1.29)。

主要的火星探测飞行器如图 1.23~图 1.29 所示。

图 1.25 “火星观察者号”探测器

图 1.26 “火星环球勘探者”探测器

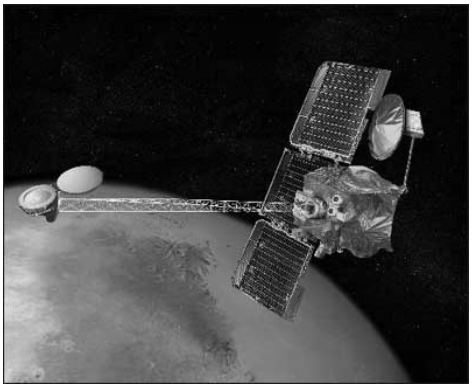

图 1.27　“火星奥德赛号”探测器

图 1.28　火星勘测轨道飞行器

图 1.29　“火星快车”探测器

目前在火星陆地上执行探测任务的只有美国的“勇气号”[23](图 1.30)和“机遇号”火星车[27](图 1.31)。设计寿命仅三个月的这对“漫游者”兄弟却在超期服役达两年多之后仍在火星表面不懈探索着。但“猎兔犬 2 号”探测器登陆火星失败。

主要的火星探测登陆车如图 1.30~图 1.35 所示。

图 1.30 美国“机遇号”火星车

图 1.31 美国“勇气号”火星车

图 1.32 “海盗号”探测器[28]

图 1.33 “火星探路者号”火星车[23]

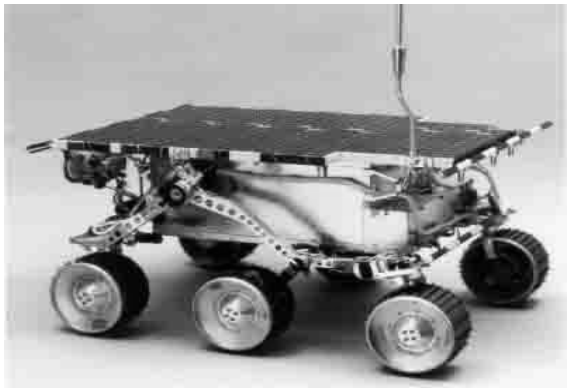

图 1.34 “火星探路者”携带的索杰纳(Sojourner)机器人[29]