

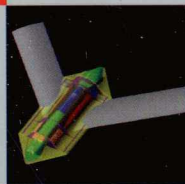


国防特色教材·力学/“十一五”国家重点图书

飞行器动力学与控制

张嘉钟 魏英杰 曹伟 编著

Dynamics and Control of Astronautic Vehicle



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·力学

飞行器动力学与控制

张嘉钟 魏英杰 曹 伟 编著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书根据国防科工委“十一五”规划教材的要求,针对力学专业的教学需要编写。本书内容包括:绪论,飞行器动力学建模的基本方法,飞行器轨道动力学与控制,飞行器姿态动力学,飞行器姿态稳定控制,复杂航天飞行器动力学,载人航天飞行,星际飞行等。通过本课程的学习使力学专业的本科生、研究生或相关专业的学生对航天飞行器的背景知识增加了解,掌握空间飞行器动力学分析的基本方法,明确航天器动力学研究的内容,把握复杂航天器动力学研究的方向。

本书可作为高等学校力学专业和相关专业的本科生和研究生的教学或自学用书,也可供研究人员和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞行器动力学与控制/张嘉钟,魏英杰,曹伟编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.3

(航天科学与工程系列丛书)

国防特色教材 “十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-5603-3198-0

I. ①飞… II. ①张… ②魏… ③曹… III. ①飞行器-姿态飞行控制-动力学-教材 ②飞行器-飞行控制-教材 IV. ①V412.4 ②V448.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 029903 号

飞行器动力学与控制

张嘉钟 魏英杰 曹伟 著

责任编辑 刘 瑶

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号(150006) 发行部电话:0451-86418760 传真:0451-86414749

<http://hitpress.hit.edu.cn>

东北林业大学印刷厂 各地书店经销

*

开本:787mm×960mm 1/16 印张:13 字数:283 千字

2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5603-3198-0 定价:38.00 元

前 言

航天事业自 20 世纪以来,历经几代人的努力,目前已经成功地实现了载人航天、登月飞行、行星际和恒星际的探索。航天事业的发展不仅推动了科学技术的发展,也进一步促进了相关领域的技术发展,并促进了国民经济的增长。航天事业已经成为国民经济的重要组成部分,因此,力学专业的学生了解航天领域的发展以及未来技术应用的前景对其自身的发展和对国民经济的发展都是必要的。为适应这一需要,编者在国防科工委制订的该项教材编写计划背景下,结合多年的教学经历编写了本书。编写本书的目的是使学生初步了解航天器的相关背景知识,掌握航天飞行器动力学与控制的基本理论,明确航天飞行器动力学研究的主要内容,把握未来复杂航天器技术的发展。

全书共分 8 章:第 1 章绪论,介绍了航天器及航天器动力学研究的问题;第 2 章飞行器动力学建模的基本方法,介绍了牛顿-欧拉法、拉格朗日法、凯恩法等航天飞行器建模的主要基本方法;第 3 章飞行器轨道动力学与控制,介绍了飞行器的运行轨道、轨道转移和轨道摄动源等问题及相关概念;第 4 章飞行器姿态动力学,介绍了简单飞行器的姿态动力学及姿态控制的原理;第 5 章飞行器姿态稳定控制,介绍了重力梯度稳定、自旋稳定和三轴稳定的原理;第 6 章复杂航天飞行器动力学,介绍了复杂航天器的多体动力学以及多柔性体动力学建模的问题;第 7 章载人航天飞行,介绍了载人航天环境和生命保障、载人航天器及载人航天史;第 8 章星际飞行,介绍了空间航行的基本理论、太阳系探测以及恒星际航行所面临的时空和技术问题。

本书可以作为高等学校本科生和研究生的教学用书。本书的内容主要参考了曲广吉教授著的《航天器动力学工程》、褚桂柏教授主编的《航天技术概论》等

书籍和相关文献,并补充了近年来在航天器方面的最新成果。在此特向参考文献的相关作者表示感谢。

本书撰写分工如下:魏英杰负责第1、2、3、6章,曹伟负责第4、5、7、8章,张嘉钟教授负责全书统稿及修改工作。由于全书内容涉及的领域比较广,鉴于作者水平有限,书中难免出现不足之处,恳请读者批评指正。

编者 张嘉钟

2011年1月

符 号 表

A	面积
A	方向余弦阵
A_n	方向余弦矩阵
a	轨道半长轴
B_m	地球磁场强度
c	光速, $c = (29.979\,29 \pm 0.000\,08) \times 10^4 \text{ km/s}$
C	雅可比矩阵
C_D	阻力系数
C_L	升力系数
C_n	定常矩阵
$C\xi, C\eta, C\zeta$	刚体的中心惯性主轴
D	气动阻力
D_n	$O_{n+1} - xyz$ 相对 $O_{n+1} - xyz$ 的方向余弦矩阵
dF	作用在 dm 上的力
e	偏心率
f	真近点角, 即近地点和卫星所在位置矢径之间的夹角
F	主动作用力
F^*	惯性力
F_j	第 j 个质点的合力
F_r	第 r 个刚体上的合力
F_j^*	第 j 个质点的惯性力

F_r^*	第 r 个刚体上的惯性力
$f_{n,n-1}$	铰点 O_n 处物体 B_n 对物体 B_{n-1} 的作用力
G	万有引力常数 $G = (6.670 \pm 0.005) \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{mm}^2/\text{g}^2$
H	系统角动量矢量
h	单位质量的动量矩矢量
H_C^T	动量矩在质心连体坐标系 $C\xi\eta\zeta$ 中的坐标列阵
i	轨道倾角, 即轨道面与赤道面的夹角
I_x, I_y, I_z	主惯量矩
J_1, J_2, J_3	物体对轴 $C\xi, C\eta$ 和 $C\zeta$ 的转动惯量
$[J]_C$	刚体相对质心连体坐标系的惯性矩阵
J_g	陀螺的转动惯量
J_f	框架的转动惯量
L	气动升力
$L_\odot$	日心黄经, 从春分点沿黄道逆时针度量到日心的角距
L	系统拉格朗日函数
M	质量
m_i	第 i 个刚体的质量
M	主动作用力矩
M_x, M_y, M_z	外力矩的分量
M^*	惯性力矩
M_r	第 r 个刚体上的合力矩
M_r^*	第 r 个刚体上的惯性力矩
$M_{n,n-1}$	铰点 O_n 处物体 B_n 对物体 B_{n-1} 的作用力矩
N	运动质点数
p	半正焦弦

P	太阳光压常数
P	系统线动量
p_n	刚体的动量
q_i	系统第 i 个广义坐标
$\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n$	系统独立广义速度
Q_i	对应于广义坐标 q_i 的广义力
r	刚体序号
R	受照表面的反射系数
$\dot{R}_j$	第 j 个质点的运动速度
S	横截面面积
T	周期
T_E	航天器总动能
T_n	章动能
$\dot{T}_{EP}$	平台的能量耗散速率
$\dot{T}_{ER}$	转子的能量耗散速率
V	系统的势能
v_i^r	第 r 个刚体质心的第 i 个偏速度
v_r	第 r 个刚体平动速度
v_{A1}	轨道 A 在交点处所对应的卫星速度
v_{B1}	轨道 B 在交点处所对应的卫星速度
x_C	物体的质心 C 在固定坐标系 $Oxyz$ 中的坐标
x_i	广义坐标 $q_1, \dots, q_n$ 及时间 t 的函数
y_C	物体的质心 C 在固定坐标系 $Oxyz$ 中的坐标
Z	第 i 个柔性体中 dm 的径向量
z_C	物体的质心 C 在固定坐标系 $Oxyz$ 中的坐标

Z_i	第 i 个刚体的质心位置
λ_k	拉格朗日算子
$\dot{\sigma}$	转子轴沿框架轴的进动角速度
Ω	升交点赤经, 从春分点到升交点的角距
ω	卫星升交点矢径与近地点矢径夹角叫做近地点角距
$\omega_{i,j}$	广义坐标 $q_1, \dots, q_n$ 及时间 t 的函数
ω_r	第 r 个刚体的转动速度
ω_i^r	第 r 个刚体的第 i 个偏角速度
ω_g	陀螺相对于框架绕自旋轴的旋转角速度
$\{\omega\}$	刚体的角速度矢量在质心连体坐标系中的坐标列阵
$\tilde{\omega}^j$	ω^j 的反对称矩阵
$\overline{[\omega^j + \omega^{jk}]}$	$\omega^j + \omega^{jk}$ 的反对称矩阵
δA	作用在刚体间的力由于虚位移 δZ_i 引起的虚功
δP_i	第 i 个柔性体内部弹性力的虚功率
δP	作用在物体间铰中弹簧力和阻尼力的虚功率
ψ, θ, φ	物体的质心连体坐标系 $C\xi\eta\zeta$ 相对质心平动坐标系 $Cx'y'z'$ 的欧拉角
μ	地球引力常数 $\mu = 3.896 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$
$\mu_T = I_z/I_T$	纵横惯量比
Φ_{ai}	附件 i 的模态矩阵
η_{ai}	附件 i 的模态坐标
Λ_{ai}	附件 i 的刚度矩阵

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 航天飞行器简介	1
1.1.1 航天飞行器	2
1.1.2 航天器的轨道	7
1.1.3 航天器的姿态稳定	12
1.1.4 航天器的环境载荷	16
1.1.5 航天器的应用	16
1.2 航天飞行器的动力学问题	17
1.2.1 简单航天器的动力学问题	17
1.2.2 复杂航天器的动力学问题	18
1.3 我国航天器的发展状况	24

第 2 章 飞行器动力学建模的基本方法

2.1 牛顿 - 欧拉法	32
2.2 拉格朗日法	37
2.3 达朗贝尔原理	44
2.4 凯恩方法	45
2.5 虚功原理	46

第 3 章 飞行器轨道动力学与控制

3.1 航天飞行器运行轨道	47
3.1.1 坐标系	48
3.1.2 轨道方程(二体运动)	49
3.1.3 航天飞行器轨道摄动	55
3.1.4 用矢量法求摄动运动方程	57
3.2 航天飞行器轨道转移	61
3.2.1 同平面内的轨道转移	61
3.2.2 非共面轨道转移	63

第 4 章 飞行器姿态动力学

4.1 姿态参数的描述	65
4.2 运动学方程	67

4.3	刚体姿态动力学方程	68
4.4	航天飞行器环境扰动	70
4.4.1	重力梯度力矩	71
4.4.2	大气阻力矩	73
4.4.3	地磁力矩	73
4.4.4	太阳光压力矩	74
4.4.5	星上惯性力矩	76
第5章 飞行器姿态稳定控制		
5.1	重力稳定航天器	78
5.1.1	伸收杆过程的系统姿态运动方程	79
5.1.2	重力稳定过程的系统姿态运动方程	80
5.1.3	重力稳定的天平动频率和周期	81
5.1.4	重力稳定的稳定性条件	82
5.2	自旋稳定航天器	82
5.2.1	航天器自旋稳定原理	82
5.2.2	单自旋稳定航天器姿态动力学	83
5.2.3	双自旋稳定航天器姿态动力学	86
5.2.4	自旋航天器的主动控制	91
5.3	三轴稳定航天器	96
5.3.1	姿态控制器	97
5.3.2	飞轮控制姿态动力学方程	98
5.3.3	单框架控制力矩陀螺稳定航天器姿态动力学方程	101
第6章 复杂航天飞行器动力学		
6.1	多体系统的运动学分析	105
6.1.1	多体系统的混合坐标系及其相关矩阵	105
6.1.2	多刚体系统的运动学	107
6.1.3	柔性多体系统的运动学	110
6.2	用牛顿-欧拉法建立复杂航天器的动力学方程	113
6.2.1	多刚体系统的单体动力学方程	113
6.2.2	多柔体系统的单体动力学方程	116
6.3	拉格朗日法建立复杂航天器的动力学方程	119
6.3.1	中心刚体加柔性附件类航天器动力学方程	119
6.3.2	含复合柔性结构类航天器动力学方程	124
6.4	凯恩法建立复杂航天器的动力学方程	127

6.4.1 相邻柔性体间的运动学关系	127
6.4.2 多体系统中柔性体 B_k 的运动学方程	130
6.4.3 柔性多体系统动力学方程	132
6.5 柔性航天器动力学分析算例	133
第7章 载人航天飞行	
7.1 载人航天环境和生命保障	139
7.1.1 航天器环境	139
7.1.2 环境控制和生命保障	140
7.2 载人航天史	142
7.3 载人航天飞行器	145
7.3.1 宇宙飞船	145
7.3.2 航天飞机	147
7.3.3 载人空间站	152
7.4 展望火星飞行	158
第8章 星际航行	
8.1 星际航行的基本理论	163
8.1.1 齐奥尔科夫斯基公式	163
8.1.2 阿克莱公式	164
8.1.3 航天飞行速度	167
8.2 太阳系探测	172
8.2.1 太阳系	173
8.2.2 行星际探测	178
8.2.3 行星际航行轨道	184
8.3 恒星际飞行	189
参考文献	193

第1章 绪 论

【教学目的】

通过本章的学习,希望达到如下教学目的:

1. 了解各类航天器的特点。
2. 了解航天器动力学领域存在的问题。

【内容提要】

绪论部分主要针对航天飞行器及其动力学问题,以及我国航天事业的发展状况作一简要介绍,对本课程有一个初步的了解。在飞行器部分,根据飞行器的功能特点主要介绍了人造卫星、深空探测轨道器、载人飞船、航天飞机、空间站及其轨道、姿态和环境载荷等问题。介绍上述内容的目的是使学生对所研究的背景对象的任务、结构特点以及环境载荷对轨道和姿态的影响问题有更深入的了解。带着对这样一些问题的思考学习本门课程,意在提高学生主动学习的精神。在动力学部分针对飞行器向复杂结构方向发展的特点,主要介绍了复杂航天器动力学方面所面临和应该研究的问题。在我国航天事业的发展状况一节中主要介绍了我国航天事业中的一些重大事件以及政府关于航天事业未来发展的政策。

本章部分内容主要参考褚桂柏教授主编的《航天技术概论》一书和曲广吉教授著的《航天器动力学工程》一书,了解详细内容请参见上述文献。

飞行器动力学与控制的研究对象是航天飞行器,研究的内容是航天器在空间环境载荷条件下,其轨道运动和姿态稳定的动力学特性以及动力学建模的方法。为此,本章将对航天飞行器及其动力学问题作一简要介绍,最后简要介绍我国航天事业的发展状况。

1.1 航天飞行器简介

目前,航天飞行器根据其功能可以划分为五大类,即卫星、深空探测器、轨道着陆器(包括返回器)、载人航天器(如宇宙飞船、航天飞机等)、空间站。由于功能的需要,其结构特征、运行轨道、姿态稳定的方式以及感受的载荷环境都存在较大差异。下面将以上分类加以介绍,目的是使学生对研究对象的背景知识有深入的了解。

1.1.1 航天飞行器

1. 人造卫星

人造地球卫星是人类的一大创举。1957年10月4日,苏联用卫星号运载火箭把世界上第一颗人造地球卫星送入太空,开创了人类迈出地球、探索宇宙的新纪元。尽管它只有86.3 kg重,呈球形,直径为0.58 m,外部伸展了4根条形天线,如图1.1所示,在天上正常工作了3个月,但它却是世界上第一个人造天体,把人类几千年来探索宇宙的梦想变成现实。

人造地球卫星出现以后,20世纪60年代,苏联和美国发射了大量的科学实验卫星、技术试验卫星和各类应用卫星,卫星凭借它得天独厚的空间位置,其应用日益多样化。20世纪70年代,卫星全面进入应用阶段,向侦察、通信、导航、预警、气象、测地、海洋和地球资源等专门化方向发展。如图1.2、图1.3所示,卫星的结构都与图1.1有明显的差别。同时,各类卫星也

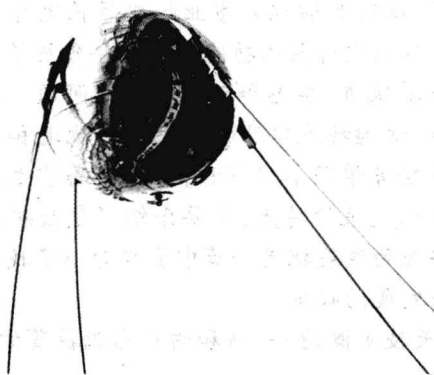


图 1.1 前苏联的第一颗人造地球卫星

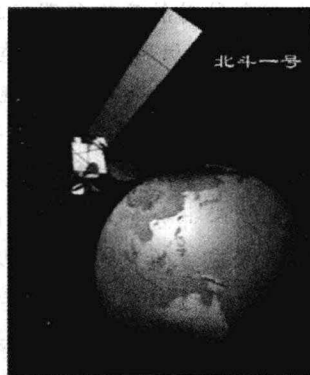


图 1.2 我国北斗一号导航卫星

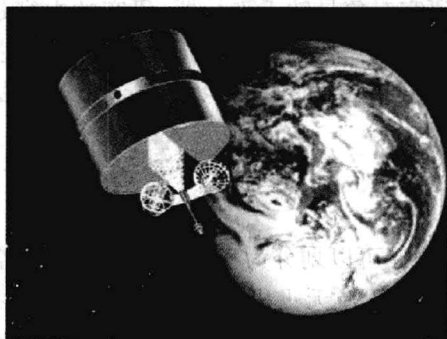


图 1.3 风云二号气象卫星

向多用途、长寿命、高可靠性和低成本方向发展。自 20 世纪 80 年代后期起,单一功能的微型化、小型化卫星受到各国的重视,这类质量轻、成本低、研制周期短、见效快的小型卫星将成为卫星发展史上的新动向。

2. 深空探测器

空间探测的主要目的是了解太阳系的起源、演变和现状;探索生命的起源和演变;通过对太阳系内的各主要行星及其卫星的比较研究,进一步认识地球环境的形成和演变;行星际探测器为行星和行星际空间的研究提供了新的手段。空间探测器实现了对月球和太阳系中其他行星的逼近观测和直接取样探测,从而开创了人类探索太阳系内天体的新阶段。

空间探测活动主要分为两个阶段:一是围绕月球的探测活动;二是围绕太阳系中其他行星的逼近观测和直接取样探测活动。1969 年 7 月 20 日,美国 N·A·阿姆斯特朗和 E·E·奥尔德林乘坐阿波罗 11 号飞船登月成功,在月球静海西南角着陆,成为涉足地球之外另一天体的首批人员,首次实现了人类登上月球的理想。图 1.4 为美国阿波罗 11 号飞船及登月舱。图 1.5~1.7 分别展示了部分探测木星、火星、深空探测器的图片。从这些图片中可以看到其结构的相对复杂性。

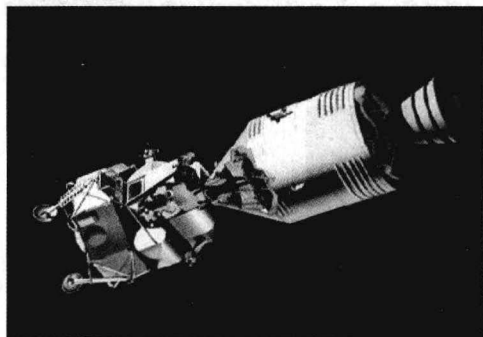


图 1.4 美国阿波罗 11 号飞船及登月舱

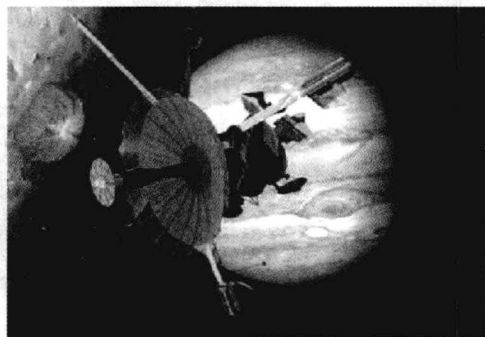


图 1.5 伽利略号探测木星

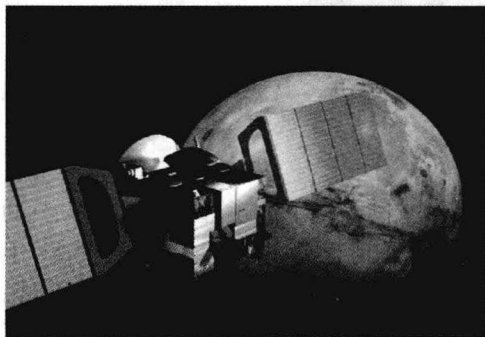


图 1.6 欧空局火星快车轨道器

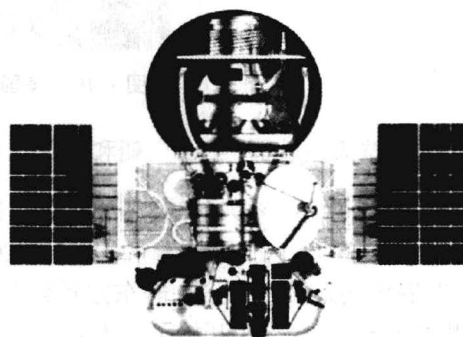


图 1.7 深空探测器

3. 轨道着陆器/返回器

轨道着陆器是航天飞行器家族中的重要成员,为满足在外星球着陆、自主行走及探测的要求,如勇气号火星探测器(图 1.8),其结构相当复杂,完成一系列的动作,如与轨道器分离(图 1.9),进入预定的着陆轨道,实现软着陆,着陆器展开实现预定功能形态,实现自主行走调整姿态。对于载人轨道着陆器,还需要具备生命保障系统和返回轨道器的功能。图 1.10 为美国阿波罗飞船的登月舱。



图 1.8 勇气号火星探测器

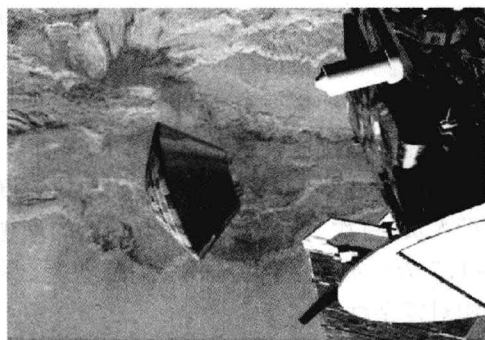


图 1.9 探测着陆器与轨道器分离

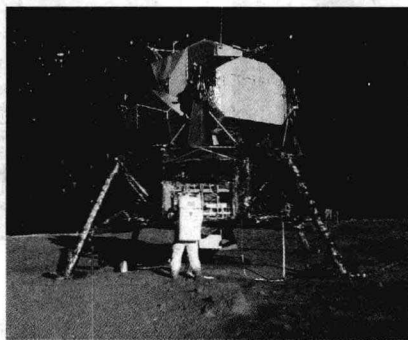


图 1.10 美国阿波罗飞船的登月舱

4. 载人航天运载器(宇宙飞船和航天飞机)

载人航天面临一系列的问题,如生命的保障问题、空间环境下的生理问题和航天员的运动等前所未有的问题,因此与卫星和深空探测相比载人航天具有更高的技术难度。1961 年 4 月 12 日,苏联成功地发射了第一艘东方号载人飞船,尤里·加加林成为人类第一位航天员,揭开了人类进入太空的序幕,开始了世界载人航天的新时代。俄罗斯计划 21 世纪前期发射无人和载人火星飞船以及建立载人月球基地。

载人航天器目前分为两类:一类是载人飞船,属于一次性空间运载器;另一类是航天飞机,属于多次性空间运载器。

(1) 载人飞船。

苏联自1961年4月至1970年9月,共发射了17艘载人飞船(东方号6艘、上升号2艘、联盟号9艘)。1965年3月,航天员在上升号上第一次走出飞船;1966年1月,两艘联盟号飞船第一次在轨道上交会对接,并实现两个航天员从一艘飞船向另一艘飞船转移。截至1985年,还发射了27艘载人飞船(联盟T号、TM号)和25艘无人飞船(进步号)用做天地往返运输系统。图1.11和图1.12为前苏联采用的载人飞船,根据功能的需要其形态各异。

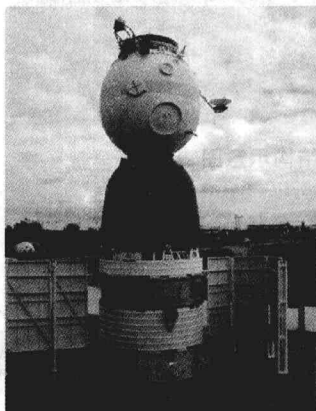


图 1.11 前苏联联盟号载人飞船

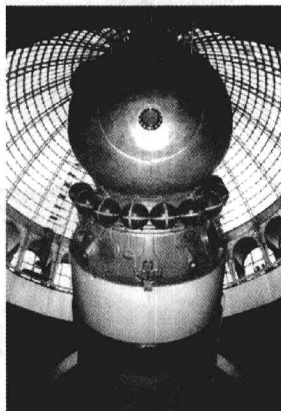


图 1.12 前苏联上升号载人飞船

1961年5月~1966年11月,美国发射了16艘载人飞船(水星号和双子座号)。水星号和双子座号计划是载人登月飞行目标阿波罗计划的前两个阶段。1965年6月,双子座飞船上的航天员第一次步入太空;1966年3月,双子座-8和阿金纳飞行器在轨道上第一次成功地实现对接,此后,双子座飞船系统进行过多次交会和对接。1967~1972年共发射了14次阿波罗飞船(其中3次无人飞行,3次载人绕月飞行,6次载人登月飞行,12名航天员登上月球等)。

(2) 航天飞机。

1969年,尼克松政府宣布20世纪70年代研制载人航天飞机,20世纪80年代投入使用,往返于地面站和国际空间站之间,运送物资和人员。迄今为止已有两架航天飞机在大气层中发生空难,目前正在研究高可靠性的航天飞机。图1.13为美国航天飞机结构示意图;图1.14为美国未来空天飞机设想图,其重要问题就是可靠性问题。