



# 空间飞行器 控制设计准则(上册)

科学出版社

# 空间飞行器控制设计准则

(上册)

林来兴 潘科炎 等 編譯

科学出版社

1981

## 内 容 简 介

本书是由美国宇航局最近几年编写的空间飞行器设计准则这套资料中的有关控制系统设计方面的十七篇专题汇编而成的，分上、下两册出版。上册以空间飞行器扰动力矩和空间环境为主；下册以姿态敏感器和星上计算机为主。

上册首篇对空间飞行器控制系统发展的各有关方面作了系统简介，使读者对这一控制领域有一个较完整的了解。

本书主要作为从事空间飞行器控制系统工作的工程技术人员和研究人员的設計指导，也可作为有关科技管理人员制定规划和进行产品检验的参考，对高等学校有关专业的师生也有参考价值。

## 空间飞行器控制设计准则

(上册)

林来兴 潘科炎 等 编译

责任编辑 李淑兰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1981 年 9 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

1981 年 9 月第一次印刷 印张：18

印数：0001—1,200 字数：412,000

统一书号：15031·361

本社书号：2258·15—8

定价：3.65 元

## 前 言

为了对空间飞行器控制系统的研制和设计提供较全面的参考资料，我们从美国宇航局(NASA)最近几年来所总结的空间飞行器设计准则(它分为环境、结构、制导和控制、化学推进剂等四个方面)中选择十七篇编译了这本《空间飞行器控制设计准则》，分上、下两册出版。

美国宇航局编写这些设计准则的目的在于为承担飞行任务的空间飞行器提供一个统一的设计标准。这套设计准则总结了迄今为止在研究、发展、试验以及运行计划中积累起来的重要经验和知识，它可直接应用于空间飞行器的研制工作。设计者可利用这些准则改进设计工作，提高设计效率并增强设计者对结构的信心。

这些设计准则都是以专题形式发表，编写规格统一，除了引言和附录及与此专题有关的主要参考文献外，还有三个主要部分：

(1) 技术发展水平 回顾并评价了目前设计中的实践做法；指明有关当代技术状态的重要方面；引证了有关参考文献以提供进一步的论证材料。这一部分是对整个论题的综述，用来提供背景材料并为“设计准则”和“推荐经验”两部分准备适当的基础。

(2) 设计准则 说明为保证飞行任务的完成而必须遵循的设计规范、指南或限制。这些设计准则也可作为科技管理人员指导设计和对将来产品进行检验的参考。

(3) 推荐经验 说明如何满足设计准则要求。这一部分尽可能地推荐了最好的经验或提出适当的参考文献。这些推荐经验与设计准则，对空间飞行器设计和估价提供了指导。

本书由北京控制工程研究所第二，十，十一研究室的一部分同志担任翻译(译者附在译文后面)。全书由林来兴、潘科炎同志负责编译，屠善澄所长校对译文并指导整个编译工作。为了让读者对空间飞行器控制技术发展水平有一个较为完整的了解，由林来兴同志编写了“空间飞行器控制技术的现在和将来”一文。

由于我们水平有限，编译中定会出现不妥之处，请同志们批评指正。

编者

1979年7月

# 目 录

<b>空间飞行器控制技术的现在和将来</b> .....	1
1. 引言 .....	1
2. 空间飞行器及其控制技术的发展概况 .....	1
2.1 空间飞行器的分类 .....	1
2.2 美苏两国发展空间飞行器的简况 .....	5
2.3 应用卫星控制技术的发展概况 .....	6
3. 空间飞行器控制的基本概念和分类 .....	9
3.1 姿态控制系统的分类 .....	10
3.2 轨道控制 .....	16
4. 空间飞行器控制技术的发展水平 .....	19
5. 人造地球卫星控制的发展方向 .....	23
6. 结束语 .....	33
附录 典型空间飞行器姿态控制系统性能汇编 .....	34
<b>结构挠性对空间飞行器控制系统的影响</b> .....	45
1. 引言 .....	45
2. 技术发展水平 .....	46
2.1 设计和飞行经验的回顾 .....	46
2.2 潜在问题 .....	56
3. 设计准则 .....	57
3.1 分析研究 .....	57
3.2 仿真研究 .....	57
3.3 试验 .....	58
4. 推荐经验 .....	58
4.1 分析研究 .....	58
4.2 仿真研究 .....	61
4.3 试验 .....	61
4.4 对几类特定空间飞行器的推荐经验 .....	62
附录 A 能量下降法在自旋稳定空间飞行器上的应用 .....	66
附录 B 振型坐标下的控制系统与结构动力学方程的推导 .....	67
参考文献 .....	68
<b>空间飞行器的质量排出力矩</b> .....	72
1. 引言 .....	72
2. 技术发展水平 .....	72
2.1 设计经验和飞行经验的评论 .....	73
2.2 分析 .....	78
2.3 试验方法 .....	79

2.4 小结 .....	80
<b>3. 设计准则 .....</b>	<b>80</b>
3.1 根据质量排出力矩源审定空间飞行器的设计 .....	81
3.2 确定扰动力矩的可能值 .....	81
3.3 扰动力矩的最小化及其控制 .....	81
<b>4. 推荐经验 .....</b>	<b>82</b>
4.1 鉴别质量排出源 .....	82
4.2 估计扰动力矩 .....	82
4.3 试验 .....	89
<b>附录 符号 .....</b>	<b>90</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>90</b>
<b>空间飞行器的气动力矩 .....</b>	<b>92</b>
1. 引言 .....	92
2. 技术发展水平 .....	92
2.1 概述 .....	92
2.2 历史背景 .....	93
2.3 飞行经验 .....	93
2.4 表面和大气相互作用的估算 .....	94
2.5 轨道高度上的大气 .....	99
2.6 飞行器特性 .....	100
2.7 试验 .....	100
2.8 小结 .....	101
3. 设计准则 .....	101
3.1 气动力矩分析 .....	101
3.2 气动力矩影响的评定 .....	102
3.3 气动力矩的控制 .....	102
4. 推荐经验 .....	102
4.1 气动力矩的分析 .....	103
4.2 使气动力矩影响成为极小 .....	104
附录 A 飞行器环境力矩的相对幅值 .....	105
附录 B 适应系数和动量交换系数的定义 .....	106
附录 C 符号表 .....	107
<b>参考文献 .....</b>	<b>108</b>
<b>空间飞行器的重力矩 .....</b>	<b>110</b>
1. 引言 .....	110
2. 技术发展水平 .....	110
2.1 概况 .....	110
2.2 历史回顾 .....	110
2.3 飞行经验 .....	111
2.4 地球重力场 .....	113
2.5 重力矩方程 .....	113

2.6 惯性张量 .....	114
2.7 陀螺项 .....	115
2.8 质量分布 .....	115
2.9 小结 .....	116
3. 设计准则 .....	116
3.1 重力矩分析 .....	116
3.2 估计干扰力矩的影响 .....	117
3.3 重力矩的控制 .....	117
4. 推荐经验 .....	118
4.1 重力矩分析的经验 .....	118
4.2 重力矩的控制 .....	123
附录 A 刚体重力矩方程的推导 .....	125
附录 B 力矩和冲量矩的确定 .....	126
附录 C 符号表 .....	131
参考文献 .....	132
<b>空间飞行器的辐射力矩 .....</b>	<b>135</b>
1. 引言 .....	135
2. 技术发展水平 .....	135
2.1 概述 .....	135
2.2 历史回顾 .....	136
2.3 飞行经验 .....	136
2.4 辐射源 .....	139
2.5 辐射力 .....	142
2.6 辐射力矩 .....	143
2.7 表面性质 .....	144
2.8 试验 .....	146
2.9 小结 .....	146
3. 设计准则 .....	147
3.1 辐射力矩分析 .....	147
3.2 辐射力矩影响的估计 .....	148
3.3 辐射力矩的控制 .....	148
4. 推荐经验 .....	148
4.1 辐射力矩分析 .....	148
4.2 辐射力矩影响的最小化 .....	152
参考文献 .....	154
<b>空间飞行器的磁力矩 .....</b>	<b>156</b>
1. 引言 .....	156
2. 技术发展水平 .....	156
2.1 飞行经验 .....	156
2.2 空间飞行器的磁性 .....	157
2.3 补偿和试验方法 .....	157

2.4 磁场 .....	158
2.5 小结 .....	158
<b>3. 设计准则 .....</b>	<b>158</b>
3.1 磁干扰力矩源 .....	158
3.2 环境磁场 .....	159
3.3 磁偶极子矩的控制 .....	159
<b>4. 推荐经验 .....</b>	<b>159</b>
4.1 磁干扰力矩的确定 .....	160
4.2 磁干扰的控制和减小 .....	169
附录 A 坐标系和术语 .....	172
附录 B 空间飞行器磁性能的测量技术 .....	175
附录 C 符号 .....	180
参考文献 .....	180
<b>空间飞行器电磁干扰的估算和控制 .....</b>	<b>183</b>
<b>1. 引言 .....</b>	<b>183</b>
<b>2. 技术发展水平 .....</b>	<b>183</b>
2.1 飞行经验 .....	183
2.2 电磁干扰源 .....	185
2.3 电磁干扰的传播 .....	187
2.4 易受干扰的设备 .....	189
2.5 电磁环境中的主要因素 .....	189
2.6 设计步骤 .....	190
2.7 电磁干扰控制技术 .....	190
2.8 试验 .....	191
<b>3. 设计准则 .....</b>	<b>193</b>
3.1 电磁干扰控制的组织管理 .....	193
3.2 电磁干扰的估计 .....	194
3.3 设计方法 .....	195
3.4 试验 .....	195
<b>4. 推荐经验 .....</b>	<b>196</b>
4.1 干扰控制程序 .....	196
4.2 估计卫星对电磁相容性的要求 .....	196
4.3 干扰控制的分析 .....	197
4.4 干扰控制技术 .....	198
4.5 电磁干扰源的控制 .....	201
4.6 敏感装置的保护措施 .....	201
4.7 试验 .....	203
参考文献 .....	203
<b>空间飞行器磁场的估算和控制 .....</b>	<b>204</b>
<b>1. 引言 .....</b>	<b>204</b>
<b>2. 技术发展水平 .....</b>	<b>204</b>



2.1 飞行和设计经验 .....	204
2.2 磁场源 .....	206
2.3 对飞行器磁性能的控制要求 .....	206
2.4 磁性能控制 .....	207
2.5 磁测量 .....	208
2.6 在试验、运输和发射准备阶段磁性能的变化 .....	210
2.7 试验设备 .....	211
<b>3. 设计准则 .....</b>	<b>211</b>
3.1 磁场问题的估算 .....	212
3.2 磁性能的控制 .....	212
<b>4. 推荐经验 .....</b>	<b>213</b>
4.1 敏感设备 .....	213
4.2 磁场源 .....	213
4.3 试验 .....	214
附录 A 飞行器的磁场和磁强计特性 .....	215
附录 B 专业词汇 .....	216
附录 C 单位制和单位转换系数 .....	217
参考文献 .....	218
<b>空间飞行器在推力机动期间的姿态控制 .....</b>	<b>219</b>
1. 引言 .....	219
2. 技术发展水平 .....	219
2.1 自旋稳定 .....	222
2.2 被动控制 .....	226
2.3 主动闭环控制 .....	226
3. 设计准则 .....	234
3.1 性能 .....	235
3.2 设计的考虑因素 .....	235
3.3 设计检验 .....	236
4. 推荐经验 .....	237
4.1 分析研究 .....	237
4.2 仿真研究 .....	238
4.3 试验 .....	239
4.4 推荐的具体经验 .....	240
参考文献 .....	245
<b>地球磁场 .....</b>	<b>249</b>
1. 引言 .....	249
2. 技术发展水平 .....	249
2.1 地球的主磁场 .....	250
2.2 地球主磁场模型 .....	261
3. 设计准则 .....	262
3.1 地球的表面 .....	263

3.2 地球表面到同步轨道 .....	263
3.3 同步轨道 .....	264
3.4 同步轨道以上 .....	264
附录 A 坐标系和术语 .....	265
附录 C 地磁场环境模型 .....	268
参考文献 .....	277

# 空间飞行器控制技术的现在和将来

## 1. 引言

在近代人类科学技术发展史上,发生了三次技术革命:第一次是在十七世纪,以蒸汽机为代表;第二次是在十九世纪,以电机为代表;第三次是从本世纪五十年代开始一直延续到现在,以电子计算机与自动化,原子能和空间技术为代表。现在人们把电子计算机,原子能和空间技术这三者称为现代科学技术的标志。从1957年发射第一个人造地球卫星以来,二十年来,世界各国发射的各种空间飞行器已达2451个(到1979年底)。空间技术发展是异常迅速的,从五十年代末期研究试验阶段到七十年代中期转入广泛实际应用阶段。它不仅已经广泛应用于军事方面,而且已经普遍应用于国民经济并成为科学研究的强有力的手段。美国在空间技术方面发展了几千项有实用价值的新技术(例如:遥感,卫星通信,遥控,自动化等),有人估计,这些技术若能充分转移到国民经济,可使美国每年得益八百多亿美元,而美国二十年来花费在空间上的活动经费总共约一千多亿美元(估计全世界花在空间上的活动费用约二千多亿美元)。空间飞行器的控制技术是空间技术的一个极其重要的组成部分;一方面由于目前空间飞行器几乎都需要进行复杂的控制,而现代控制理论和先进技术(如计算机和电子技术)又能够满足这种控制的要求;另一方面从经济效果来看,早期飞行器的控制系统很简单(例如自旋稳定),控制系统占整个飞行器的费用只是很少一部分或微不足道,而今天有些复杂控制系统占整个飞行器费用已高达三分之一左右。本文着重对空间飞行器(特别是应用卫星)控制的现状和今后发展动向进行简要综述,对载人飞船和宇宙探测器也作一些必要的叙述。

## 2. 空间飞行器及其控制技术的发展概况

### 2.1 空间飞行器的分类

为了便于分析并对空间飞行器的发展有一个概括性的了解,本文根据空间飞行器的功能,用途和控制方面的特点,对到目前为止所发射的两千多个空间飞行器进行了分类(见表1)。分类的原则是:(1)根据轨道性质和空间飞行器载人与否;(2)根据空间飞行器在轨道上的功能。表中首先根据轨道和载人与否把空间飞行器分为下列三大类:

(1) 人造地球卫星 这里包括应用卫星和科学技术实验卫星两类。它们的轨道由一百多公里到几十万公里。

(2) 载人飞船 目前仅包括近地轨道和从地球轨道到登月轨道,今后载人飞船可能到各种星球上。

(3) 宇宙探测器 飞出地球轨道到各行星的探测器。

其次根据卫星在轨道上的功能对应用卫星进行分类,过去分类是按用途来称呼,如侦察、气象、通信、导航卫星等,这是历史上形成的。比较科学的分类方法应该是按卫星在轨道上的功能来分。这样,应用卫星就可以分为下列四种:

表 1 空间飞行器的分类、用途和控制技术发展简表

空间飞行器分类	空间飞行器功能	控制系统的特点	空间飞行器用途	发射数量	发 展 简 况	主要控制方式
人造地球卫星	地 球 观 察 站	1. 对地指向精度取决于目标位置定位精度(如30米目标定位精度,在1000公里轨道高度的工星指向精度为 $10^{-8}$ 度)。 2. 高稳定度( $10^{-3}\sim 10^{-4}$ 度/秒)。 3. 指向误差跳动量比指向精度高一个数量级。 4. 侦察和资源卫星还有回收和落点(包括多回收舱)的控制技术。	侦察卫星	约800	包括照相,电子,海洋监视三种。美国1959年开始发射,已进入第四代侦察卫星。“大鸟”为普、详查相结合的侦察卫星,能实时侦察,寿命150天,具有六个回收舱,地面分辨率 $<0.3$ 米,能分辨地面上军人或非军人。现已发射第五代侦察卫星HK-11。它与大鸟比较,轨道高,寿命长,用数字传输提供高分辨率照片。海洋监视卫星苏联发射较早(1967年),占领先地位。	三轴喷气控制。“大鸟”除喷气控制外,还有重力梯度稳定。
			预警卫星	16	美国从1970年到1977年已发射4颗实验型和5颗工作型卫星,都是同步轨道。这几年来已预警各国几千次导弹发射。3分钟能收到来自卫星的报警信号。	早期自旋稳定,现采用三轴控制。
			气象卫星	113	美国1964年开始发射,现进入第三代气象卫星(泰罗斯-N),平均每6年更新一代。“泰罗斯”和“雨云”为实验卫星。“艾萨”和“诺阿”分别为第一代和第二代工作卫星。1978年美国发射泰罗斯-N属于第三代气象卫星。目前正在组织全球气象卫星,它由5颗同步卫星和2~4颗近地轨道卫星组成。可预报20~30天气象。	由自旋稳定发展为以飞轮为主的三轴控制。
			地球资源卫星	8	美国已发射3颗,计划发射6颗,1号为实验,2号为多光谱遥感,原计划3、4号采用制图照相并能回收胶卷。以上称为“陆地卫星”。5、6号为海洋资源卫星,(现已有改变),还计划发射预报地震卫星。苏联1977年才开始发射地球资源卫星。	三轴控制,为及时处理图象,将向更高指向精度的三轴控制发展。
	中 继 站	1. 静止卫星,位置保持精度 $<0.1$ 度。 2. 对地指向精度高( $0.1^{\circ}\sim 0.05^{\circ}$ )。 3. 中继卫星控制要求最高,除对地指向外,还要求对目标卫星精确跟踪。	通信卫星	256	美国从1958年起经过6年实验,到1965年通信卫星进入应用阶段。现已进入第三代。同步轨道通信卫星苏联落后于美国近十年。目前在同步轨道有65颗,在大椭圆轨道有43颗(“闪电”)。通信能力:20个转发器,6千多路双向话路,两个电视信道。同步轨道通信卫星目前正处在大力发展和应用阶段。	过去大部分采用双自旋稳定。目前采用以飞轮为主三轴控制。位置保持现采用地面测控,今后可能发展为星上自主控制。
			直接电视广播卫星	4	为了能直接收到卫星广播,必须提高到达地面的电波强度(加大星上发射功率和缩小波束覆盖范围)。目前集体接收直播实验卫星有:ATS-6(1974年发射),CTS和“静止-T”(1976年发射),日本广播卫星(1978年4月发射)。计划1985年进入实用阶段(个体接收)。	高精度·长寿命,三轴控制和挠性体太阳帆板定向控制。天线单独对地指向控制。

续表

空间飞行器分类	空间飞行器功能	控制系统的特点	空间飞行器用途	发射数量	发 展 简 况	主要控制方式			
人造地球卫星	中继站		跟踪和数据中继卫星	27	1971年美国发射第一颗中继卫星(大椭圆轨道),苏联1975年开始发射军用中继卫星(1千公里)。美国下一代中继卫星由4颗同步轨道(2颗备用)卫星组成。1981年发射,寿命10年,这个系统能中继地面和卫星观测的数据。	长寿命和高精度多体姿态控制和同步定点位置控制。			
	应用卫星	基准站		导航卫星	139	从1963年发射实用型子午仪导航卫星,至今已发射三十多颗,定位精度优于50米。改进型子午仪系统为“三体星”,目前已发射3颗。新一代全球定位导航系统由24颗卫星组成,三维定位精度5~7米,速度精度0.06米/秒。能连续导航,九十年代计划用同步轨道卫星(采用短基线干涉测量技术)实现通信和导航综合系统。	早期二轴重力梯度稳定。以后发展为重力梯度加惯性轮的半被动三轴稳定。现采用四个斜装飞轮实现三轴控制。		
								测地卫星	16
		轨道拦截		反卫星	32	苏联从1966年至今发射了31颗反卫星,目前已具有作战能力(拦截卫星)。目前反卫星水平:机动变轨高度<2000公里,倾角<5°,有人估计反卫星可能在九十年代导致空间战(摧毁侦察卫星)。苏联在这方面比美国领先。	由捷联式惯性导航,空间交会和红外-太阳定向校准等三系统组成。		
	科学和技术实验卫星	卫星技术实验站	与应用卫星控制系统要求相当,但工作寿命短一些。主要是进行卫星本身技术实验。	技术实验卫星	约650	属于实验卫星范围包括较广。技术较复杂如美国ATS系列卫星,目前共发射6颗,3颗为重力梯度稳定,二颗自旋稳定。ATS-6卫星为三轴控制。	早期采用被动控制(重力梯度或自旋稳定),目前为主动三轴控制(三个零动量飞轮)。		
		天体观察站	对天体指向,要求精度高(秒级)。	天文卫星				天文卫星已成为研究天文的第三代工具(第一代用望远镜,第二代用射电望远镜)。代表性天文卫星如美国高能天文卫星,OAQ,OSO系列和荷兰ANS卫星(控制系统采用星上计算机)。	高精度对天体指向三轴控制和自旋稳定。
		空间环境观察站	除了特殊要求外,一般空间环境测量卫星的控制系统较简单。	科学实验卫星				以探测近地空间物理为背景的科学卫星至1973年基本上完成任务,并发现地冕(由氢氦组成)和磁层。空间环境参数和变化规律,美苏基本掌握。今后主要发射长寿命多用途综合性科学卫星。特别是高层,电离层,磁层,宇宙线,深空层等方面耦合过程的多因素综合观测和研究。	早期较多采用自旋稳定,现为三轴控制或者对卫星中观察仪器平台单独实现控制。

续表

空间飞行器分类	空间飞行器功能	控制系统的特点	空间飞行器用途	发射数量	发 展 简 况	主要控制方式
载人飞船	载人轨道飞行	<ol style="list-style-type: none"> <li>除姿态和轨道控制外还有人机系统。</li> <li>回收控制和应急救生系统。</li> <li>航天飞机控制是所有空间飞行器控制要求最高, 难度最大的空间飞行器, 它既有载人飞船控制问题也有运载工具控制技术。</li> </ol>	飞船(载人/不载人)	70/36	<p>美国“水星”载人飞船(1962年开始发射共4/8艘), “双子座”(1964年开始发射共11/3艘)。“阿波罗”飞船载人登月从1965年~1969年共进行7次(包括1次失败)。苏联“东方”飞船(1963年开始发射, 共6艘), “上升号”(1965年开始发射, 共2艘), “联盟号”(1967年开始发射, 共27艘)和“礼炮号”(1971年开始发射至今共5艘)。</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>“双子座”和“阿波罗”姿态控制指向精度达到<math>0.5\sim 1^\circ</math>。</li> <li>人机系统。</li> <li>采用升力控制返回落点。</li> </ol>
	载人地球观察和实验站		空间站	9	<p>美国“天空实验室”(1973年发射), 宇航员工作了84天。1978年苏联首次发射联盟号-礼炮号-联盟号三合一的空间组合体, 两名宇航员在空间停留175天。利用在轨道上的真空和失重环境制造地面上不可能得到的材料(如超导性合金, 泡沫金属等)。八十年代发射载运4~12人的长寿命空间站。计划在九十年代发射空间太阳能动力站, 发电1千万千瓦, 成本费用500美元/千瓦。欧洲计划八十年代用航天飞机发射“空间实验室”, 多次来回重复使用。</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>采用控制力矩陀螺的长寿命控制系统。</li> <li>交会对接控制系统。</li> </ol>
	运载工具多次使用		航天飞机		<p>美国计划在1980~1985年制造5架航天飞机, 它是一种可以重复使用100次的空间运载工具, 由可回收助推器和轨道器两部分组成。轨道器上有一个载荷舱, 长18米, 直径4.8米, 可带重30吨载荷。也可在轨道停留30天。它是今后空间的主要运载工具, 将来可望发射费用降低1~2数量级(估计近百美元/公斤)。</p> <p>航天飞机首次发射计划在1981年初进行。</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>分三段控制: 起飞段, 轨道飞行段, 再入段。采用星上计算机控制。</li> <li>再入分三段: 早期再入段、末区能量管理段和着落段, 保证航天飞机对准跑道进行无推力水平着陆。</li> </ol>
宇宙探测器	<p>飞出地球轨道并通过空间探测月球, 行星际空间以及落在这些星体上进行探测的容器, 称为宇宙探测器, 但通常把月球、火星、太阳行星的人造卫星也包括在内。</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>目前对行星探测还处在探索阶段, 故指向精度要求比对地球指向精度低。</li> <li>轨道控制较复杂, 例如到行星表面实现软着陆控制技术。</li> </ol>	<p>月球探测器</p> <p>金星、水星探测器</p>	~110	<p>苏联1959年开始向月球发射探测器。美苏先后有“徘徊者”、“观察者”、“月球号”和“阿波罗”等。获得大量考察资料。如月球起源学说(分出, 俘获, 双吸积), 其中双吸积理论(月球和地球同时吸积形成)有可能成为最有前途的机制。</p> <p>苏联“金星”, 美国“水手”、“先驱者”等探测器。证实水星大气主要是<math>CO_2</math>, 外貌如月, 有弱磁场。金星有稠密<math>CO_2</math>大气, 有电离层, 磁场弱, 为地磁1/100, 日夜温度相同(约700K)。</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>自旋稳定和轴控制, 后者控制精度略高于前者。今后进一步提高精度需要单独控制探测仪器平台。</li> <li>月球人造卫星(RAE-2)采用月球重力梯度稳定。</li> </ol>

续表

空间飞行器分类	空间飞行器功能	控制系统的特点	空间飞行器用途	发射数量	发 展 简 况	主要控制方式
宇宙探测器			火星探测器		苏联“火星号”，美国“水手”探测器；证明火星有弱磁场，有 CO <sub>2</sub> 大气。美国1976年发射“海盗”火星探测器，证明火星无生命，具有科学价值；技术上的成就是在火星上实现高度自动化水平软着陆。	
			木星、土星及其他探测器		美国1972年发射“先驱者-10”号，1977年发射“旅行者”1、2号，探测木星、土星。证明木星更象太阳，而不象地球，是一个流体行星，没有固体表面。磁场比地磁场大10倍，朝日和背日温度相等。其他探测器对三大基础科学研究（物质结构，生命起源和天体演化）都起很大作用。	

(1) 地球观察站 卫星处在轨道上，对地球来说站得高，看得远(视场大)，用它来观察地球是非常有利的。属于这种功能的卫星目前有：侦察，预警，气象，地球资源卫星等，而地球资源卫星基本上是由侦察卫星和气象卫星发展过来的。

(2) 中继站 卫星在轨道上对获取到的信息进行放大和转发。属于这种功能的卫星目前有：通信，直接电视广播，跟踪和数据中继卫星。

(3) 基准站 卫星在轨道上作为位置的精确基准点，其测轨精度要求非常准确。属于这种功能的卫星目前有：导航卫星，几何测地卫星等。

(4) 轨道拦截 卫星作为一个武器去拦截在轨道上运行的卫星，目前称为反卫星。

表1 根据卫星在轨道上的上述功能，列出了各种功能的卫星控制系统的特点和要求。跟踪和数据中继卫星对姿态控制要求比较复杂。这种卫星除要求姿态精确指向地球以外，同时还要求严格对准跟踪目标。由于目标视场很窄，因此卫星姿态对目标指向精度要求很高，而上述两个要求一般需要同时满足。这是一种相当复杂的控制系统。应用卫星姿态对地指向精度要求最高的是地球资源卫星，因为观测地球资源目标的定位精度除了决定于测轨精度以外，还决定于姿态指向精度。例如目标定位精度要求在3~30米之间，则在1000公里轨道上，卫星姿态对地指向精度要求在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 度。

## 2.2 美苏两国发展空间飞行器的简况

二十多年来，人造地球卫星占空间飞行器总发射量的90%以上，它的重要性是显而易见的，从军事意义来说，占领空间就可能控制全球，而人造地球卫星中三分之二以上是应用卫星(包括军用和民用)，美苏两国所发射的空间飞行器占总数的95%以上，其中苏联占60%，美国仅占35%左右。在发射数量上苏联目前已占领先地位。但是在质量方面美国仍然占优势，特别是应用卫星(如侦察，预警，通信和导航卫星等方面)和载人飞船。只有在海洋监视卫星和轨道拦截反卫星这两方面，目前苏联在技术和数量上可能占领先地位。苏联发射第一颗卫星虽然比美国早，但当时(1957年)苏联并没有进一步发展空间飞行器的计划，所以在头几年时间内美国发射人造卫星的数量就超过了苏联，到1959年

美国已发射成功 7 颗,苏联才发射 4 颗(其中一颗为月球探测器)。但在当时,美国发射卫星的可靠性相当差。发射成功 7 颗卫星,但失败了 11 颗。空间技术发展的初期,美国把重点放在应用卫星上,特别是军事应用卫星,例如 1959 年 2 月美国发射发现者-1 侦察卫星,1960 年开始发射第一颗气象(泰罗斯)卫星和导航卫星(子午仪),接着就发射了通信实验卫星和同步轨道通信卫星(晨鸟)。而苏联当时的重点都放在载人飞船上,一直到 1962 年苏联才开始转向应用卫星。在 1969 年美国阿波罗载人飞船登月成功,空间活动到达高潮,从此美国发射量逐年下降,而苏联发射量逐年稳定上升,目前苏联空间飞行器每年发射数量为美国的 4 倍,这种倾向还在发展。

### 2.3 应用卫星控制技术的发展概况

随着应用卫星的发展和广泛应用,对卫星控制技术相应地提出了越来越高的要求。军事应用卫星发射数量所占的比重最大,而发挥作用最大的是侦察,通信,导航气象,导航



图 1 大鸟侦察卫星(构思图)

等卫星,下面对前三种应用卫星的发展和控制技术进行简要综述:

**侦察卫星** 侦察卫星是应用卫星中发射最早(1959 年发射)和数量最多(约占空间飞行器总发射量的 1/3)的一种卫星。美国第一代侦察卫星是从 1960 年到 1963 年,第二代是从 1963 年到 1967 年,第三代是从 1966 年到 1972 年,从 1971 年开始发射大鸟卫星(亦称大鹏),这是第四代侦察卫星,第五代侦察卫星计划在七十年代末期发射。这代卫星可以进行实时、全天候侦察,到目前为止大鸟侦察卫星已经发射 15 颗(图 1),它是一颗普查、详查相结合的侦察卫星,照片信息可以通过中继卫星直接实时转送,它还能变轨和调整卫星相对于目标的位置,例如在照相时,为了得到高质量的照片,卫星下降到低轨道(如 150 公里),在不照相时,卫星就上升到高轨道(如 400~500 公里),以减少大气阻力,从而延长卫星寿命。大鸟侦察卫星视场很窄,实际上相当于一个置于轨道上的

“显微镜”,其直径为 3 米,长 15 米,重达 12~13 吨。卫星轨道为太阳同步轨道,卫星每天在同一当地时间通过地面上空。这样光照条件就保持相同,使照片判读比较方便。星上带有足够燃料,工作寿命可达 150~220 天左右。卫星带有六个回收舱,可以定期从轨道上回收。由于卫星工作寿命增加,第五代照相侦察卫星(实时侦察)投入使用后,使得美国照



相侦察卫星的数目由每年发射 4 颗减少到 2 颗。而苏联每年平均大约要发射 35 颗, 苏联以数量来弥补在卫星质量上与美国的差距。大鸟卫星地面分辨率小于 0.3 米(早期侦察卫星分辨率大于 6 米)。这种卫星在 160 公里轨道上可以分辨出地面上行走的人, 而且还可以区分出军人或非军人, 但是还不能确定军人军衔。

**通信卫星** 卫星通信和其他通信手段比较, 具有下列优点: (1) 通信容量大; (2) 覆盖面积广; (3) 通信距离远; (4) 可靠性高; (5) 灵活性好; (6) 成本费用低。因此, 通信卫星当前已经成为军用和民用上最广泛使用的和发展前途最大的卫星。1978 年在同步轨道上的通信卫星已有 65 颗, 预计到 1981 年将增到一百多颗。另外, 由于苏联在地理位置和技术上的困难, 苏联通信卫星大部分采用 12 小时周期的大椭圆轨道, 以闪电为代表, 目前已发射约 40~50 颗。各代通信卫星和控制方式的发展见表 2。卫星结构见图 2。

表 2 各代通信卫星分类表

代 类	I		II		III	
	1	2	3	4	5	6
方 案	自旋卫星	双自旋卫星	三轴稳定卫星	高功率卫星	通信技术平台	多用途通信站
有效载荷功率	<0.1千瓦	<0.5千瓦	<1千瓦	>1千瓦	>3千瓦	>10千瓦
有效载荷重量	<30公斤	<200公斤	<300公斤	<500公斤	>500公斤	>2000公斤
姿态控制精度	1°	0.5°	0.2°	0.05°	0.05°	0.05°
工作寿命	2年	7年	8年	10年	12年	15年
运载火箭	德尔它	阿特拉斯-人马坐	德尔它 阿特拉斯-人马坐	阿利昂 航天飞机和临时过渡级	航天飞机+空间拖船	??
转移轨道和入轨方法	自旋稳定固体燃料发动机	自旋稳定固体燃料发动机	自旋稳定固体燃料发动机		三轴稳定直接入轨	三轴稳定直接入轨
研制/首次工作	1960~1967	1965~1972	1970~1980	1978~1988	1985~1992	1990~2000
典型卫星	晨鸟 国际卫星 I	国际卫星 IV	卫星通信 国际卫星 V	实用广播卫星, 国际卫星 VI		

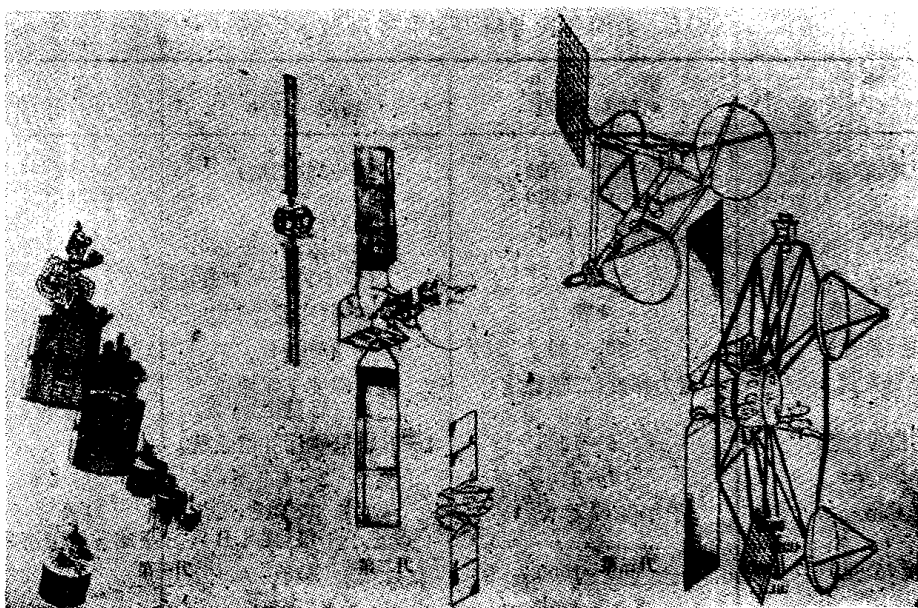


图 2 通信卫星