




航天器控制原理

# 第36讲 航天飞机的制导与控制

主讲：黄 河

西北工业大学 精确制导与控制研究所





## 第36讲 航天飞机的制导与控制

- 航天飞机的历史
- 航天飞机的结构组成
- 航天飞机的控制系统
- 航天飞机的飞行控制
- 再入与着陆的制导与控制



# 一、航天飞机的历史



## 19 航天飞机

一架飞机在天空自由自在地飞着。他一会儿俯冲，一会儿爬升，一会儿翻筋斗，觉得很得意。

突然一声呼啸(xiào)，一个庞然大物腾空而起。只见他三角形的翅膀，尖尖的脑袋，方方的机尾，转眼间便飞得无影无踪了。飞机想：“这是什么呀？怎么飞得这样快呢？”



# 一、 航天飞机的历史



航天飞机上观测的地球边沿



# ★一、★ ★ ★ 航天飞机的历史



奋进号鸟瞰地球





# 一、航天飞机的历史



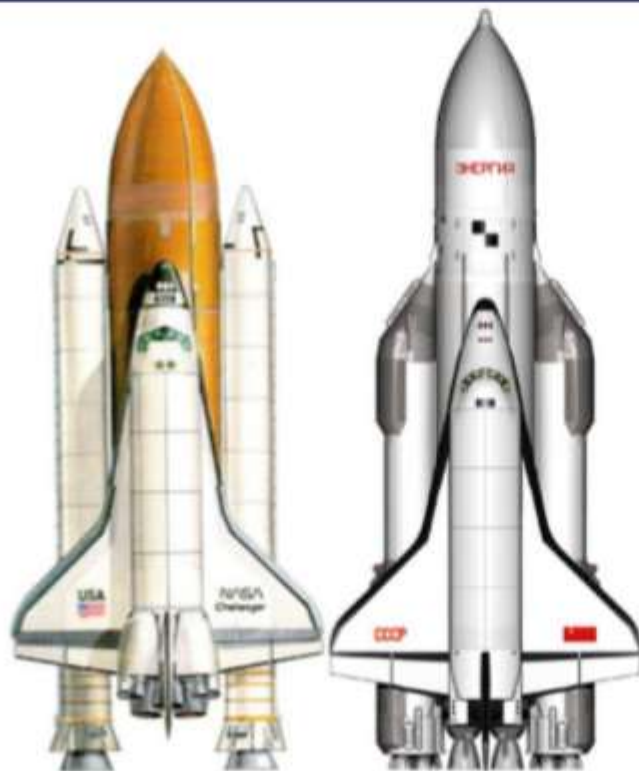
航天飞机参与了众多的航天任务



# 一、 航天飞机的历史

这架拥有镰刀与箭头标志的航天飞机与NASA的同事们一样，自上世纪70年代就开始了初始的研发，以应对美国的“太空挑战”。苏联人将其命名为“暴风雪（Buran）”。“暴风雪”号的设计要求是可使用100次以上，能够将40吨有效载荷送入200千米高，倾角55.7度的地球轨道；标准机组成员4人，包括正副驾驶员各一，另有2名从事舱外活动和其他领域研究的宇航员。在“暴风雪”号航天飞机上还将进行复杂的军事研究。抵抗敌对国家的军事活动也是“暴风雪”号的设计任务之一。

1988年11月15日格林尼治时间3点，“暴风雪”号由“前进”号火箭助推，从拜科努尔发射场发射升空，进入一条近地点247公里，远地点256公里的轨道。这是它的第一次无人测试飞行，在环绕地球飞行了2圈，1小时25分钟后“暴风雪”号成功返回地面。这次自动飞行的难度显然要比美国1981年“哥伦比亚”号航天飞机有人驾驶的飞行大得多。“暴风雪”号配备有小型引擎，可以在一定程度上实现有动力返航。如果第一次着陆失败，还可作二次飞行；它还可以通过机翼展缩调整飞行姿态，着陆时机动性也比美国的航天飞机强。



“暴风雪”号与“挑战者”号的对比

美 国：挑战者号  
前苏联：暴风雪号

# 一、 航天飞机的历史



然而这次试飞，也是“暴风雪”号的终点。由于经费严重紧张，这项计划超过了200亿美元的计划让美国政府开始担忧发展航天飞机是否值得。甚至可以说，“暴风雪”计划在某种意义上加速了苏联的瓦解。1991年，苏维埃帝国崩溃，军方停止了对该计划的拨款支持。1993年，“暴风雪”号航天飞机机体的设计者，被美国政府联合评估后承认，暴风雪计划就此结束。他们希望苏联能开发其他小型航天设备，但资金不足，只能作罢。2002年，“暴风雪”号航天飞机中难以飞行的一架连同“能源号”火箭一起，被存放在俄国的博物馆而被冻结。至此“暴风雪”计划在俄罗斯空中航天的历史。

1993年，前苏联，暴风雪号设计结束。





# ★ ★ ★ 一、 航天飞机的历史

- 开拓者号，企业号，测试
- 哥伦比亚号19810412，20030201
- 挑战者号19830404，19860128
- 发现号19840830
- 亚特兰蒂斯号19851003
- 奋进号19920507



# 一、 航天飞机的历史



2011年7月8号，亚特兰蒂斯号退役。

# 一、航天飞机的历史



未来发展：空天飞机





## 二、航天飞机的组成结构

- 运载火箭
- 飞船（航天器）
- 航空器

高精尖





## 二、 航天飞机的组成结构

航天飞机系统：

轨道器（航天飞机）

（可重复使用100次）

外储箱（1个，不可重复）

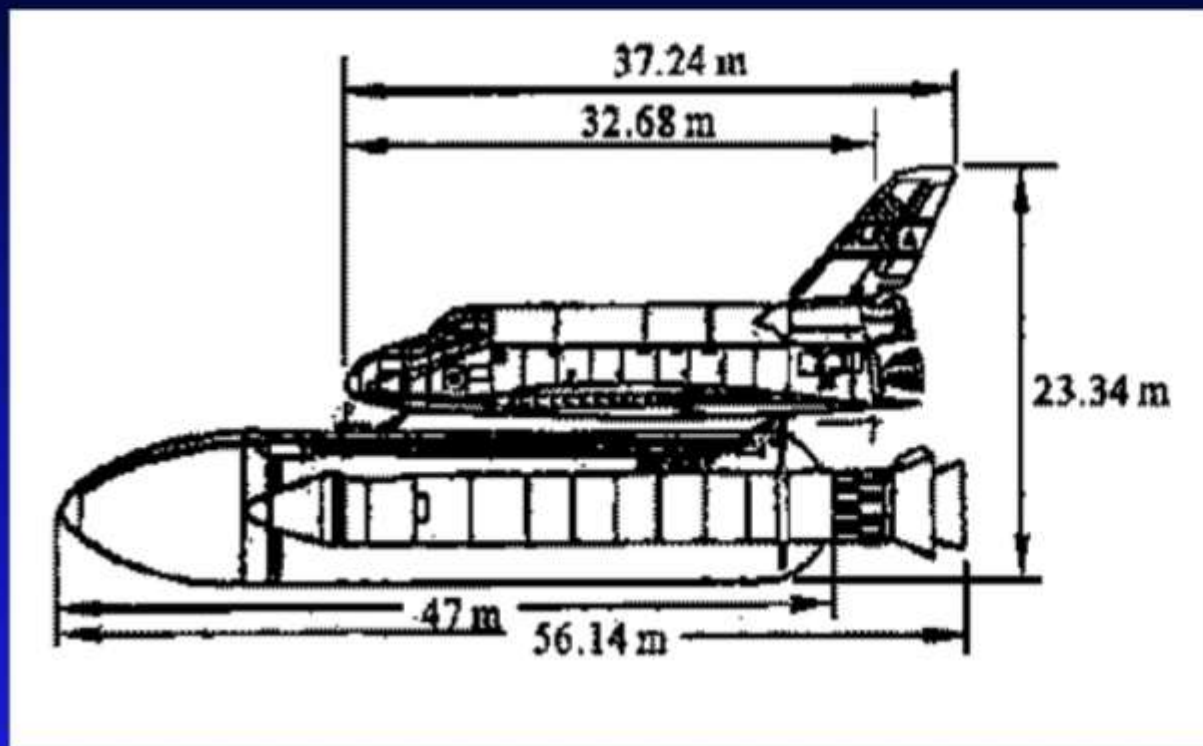
固体火箭助推器（2个）

（可重复使用20次）



航天飞机是一种部分可重复使用的  
第一代空间运输工具。

## 二、 航天飞机的组成结构



整个系统：

全长56.14 m，高23.34 m；

起飞总质量2 000 t多。

# 轨道器（航天飞机）

- 整个系统的核心部分。
- 全长37.24 m；
- 三角形后掠机翼的最大翼展23.97 m；
- 不带有效载荷时质量68 t；
- 飞行结束后，携带有效载荷着陆的轨道器质量可达87 t。





## 轨道器（航天飞机）

- 飞行过程及其环境比现代飞机要恶劣得多，适于在大气层中作高超音速、超音速、亚音速和水平着陆的气动外形；
- 承受再入大气层时高温气动加热的防热系统。





# 轨道器的结构

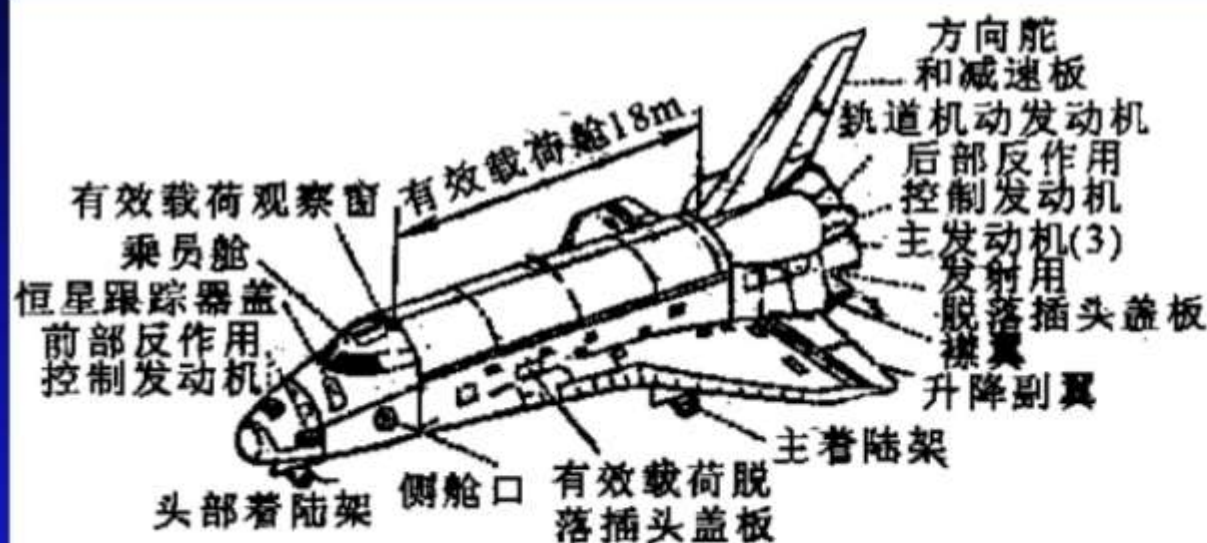



图 10.2 航天飞机结构示意图

前、中、尾三段机身组成



## 前段结构

- 分为头锥和乘员舱两部分
  - 头锥处于航天飞机的最前端，具有良好的气动外形和防热系统，
  - 乘员舱为核心，分为三层：
    - 最上层是驾驶台，有4个座位，
    - 中层是生活舱，
    - 下层是仪器设备舱。
    - 可容纳4至7人，紧急情况下也可容纳10人。
- 


# 前段结构







## 中段结构

- 有效载荷舱；
  - 长18m，直径4.5 m；
  - 一次可携带质量达29t多的有效载荷；
  - 舱内可以装载各种卫星、空间实验室、大型天文望远镜和各种深空探测器等；
  - 舱内设遥控机械手和电视装置；
  - 前、后段机身的承载结构。
- 



# 中段结构



## 后段结构

- 三台主发动机；
- 尾段还装有两台轨道机动发动机；
- 反作用控制系统；
- 尾段还有升降副翼、襟翼、垂直尾翼、方向舵和减速板等气动控制部件。



## 外储箱

航天飞机系统上惟一不可回收的部件；

全长47m，直径8.64m，净质量33t；

尖头圆柱体，由铝合金制成。

内有前、后两个储箱：

✓前储箱装600 t多液氧；

✓后储箱装102 t液氢；

外储箱总共可装700 t多的推进剂。





# 固体火箭助推器



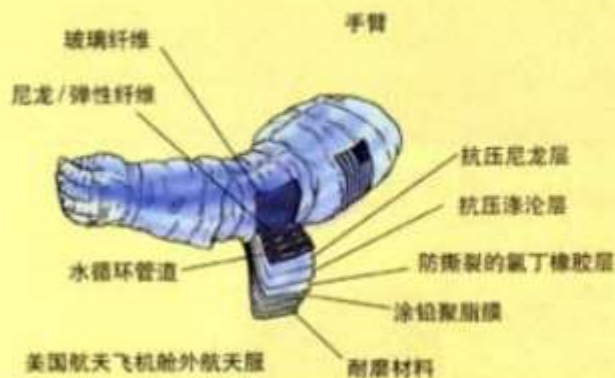
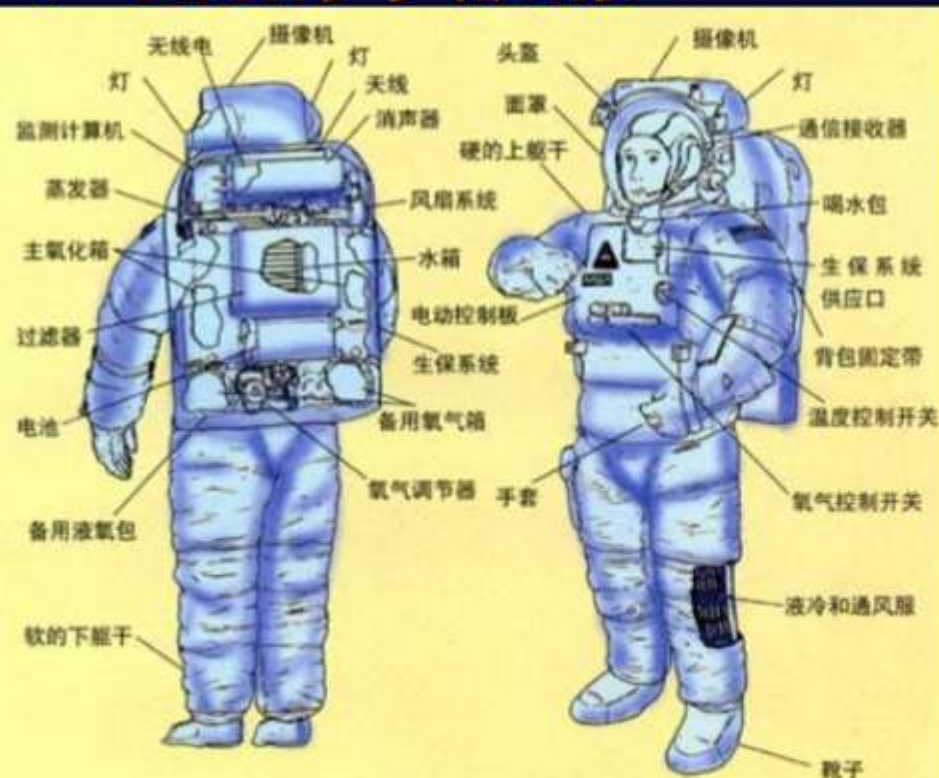


# ★ 固体火箭助推器

- 平行地安装在外储箱的两侧，航天飞机的下方；
- 两台固体火箭助推器的结构完全相同；
- 每台助推器长约45.46 m，直径3.7m，自重83 t；
- 可以装503t的固体推进剂；
- 推力13MN，可以重复使用20次。



# 航天飞机的宇航服



航天飞机的航天服是在出舱时穿上,而平常航天员只穿舒适的舱内工作便服。当航天飞机起飞和再入时,航天员是穿一种特制的橘红色的航天服。

### 三、航天飞机的控制系统

航天飞机控制系统的特点：

- 包括运载火箭、卫星和飞机3种不同的控制，要求这三者有机地结合；
- 飞行包括发射上升、入轨、轨道运行、离轨和再入返回等阶段；
- 控制系统要保证航天飞机在各飞行状况下正常执行任务和安全可靠地运行；
- 载人航天器和多次重复使用的。



## 轨道和姿态敏感器：

- 惯性测量单元
- 星跟踪器
- 航天员光学瞄准具
- 速率陀螺
- 气动参数测量系统
- 雷达高度表
- 加速度计
- 微波扫描波束着陆系统





# ★ 航天飞机系统的执行机构：

## (1) 主发动机和外储箱

- ✓ 最先进的高压补燃氢氧发动机；
- ✓ 可重复使用、高性能、可调节推力的液体推进剂火箭发动机；
- ✓ 3台主发动机结构完全一样；
- ✓ 位于轨道器的尾部；
- ✓ 装在摇摆发动机架里；
- ✓ 一台主发动机约可使用55次。



# ★ 航天飞机系统的执行机构:

## (1) 主发动机技术指标

推力:

✓ 1700kN(海平面), 2100kN(真空)

推力调节范围:

✓ 50%~109% 额定推力

推力方向变化:

✓ 俯仰方向:  $\pm 10.5^\circ$  ;

✓ 偏航方向:  $\pm 8.5^\circ$  。



# ★ 航天飞机系统的执行机构：

## (1) 主发动机技术指标

比冲：

363.2s (海平面)，455.2s (真空)

推进剂：

液氢(燃料)，液氧(氧化剂)

质量：2.869t

燃烧时间：480 s

飞行次数：55次；起动次数：100次

工作寿命：7.5h





# ★ 航天飞机系统的执行机构：

## (2) 固体火箭助推器

- 固体火箭发动机
- 推力矢量控制系统
- 分离、回收、自爆安全
- 由电子设备、推力终止、故障检测等分系统以及头锥、前段、尾裙、支撑等结构组成。
- 装有一套回收系统，它由引导伞、助力伞和三顶主降落伞组成。



# ★ 航天飞机系统的执行机构：

## (2) 助推器性能指标

推    力：13150kN(海平面)

比    冲：253s

摇摆舵偏转角：

±8°（俯仰、偏航方向）

固体推进剂质量：503.6t

总质量：

586.6t(起飞)，82.9t(回收)

燃烧时间：125 s

重复使用次数：20次



# ★ 航天飞机系统的执行机构：

## (3) 轨道机动系统

### 主要功能：

为航天飞机提供入轨、轨道运行、变轨、交会和脱离轨道所需要的推力。

### 组成：

两台液体火箭发动机

后机身两侧两个对称的吊舱内

可重复使用100次

推力矢量控制





# 航天飞机系统的执行机构：

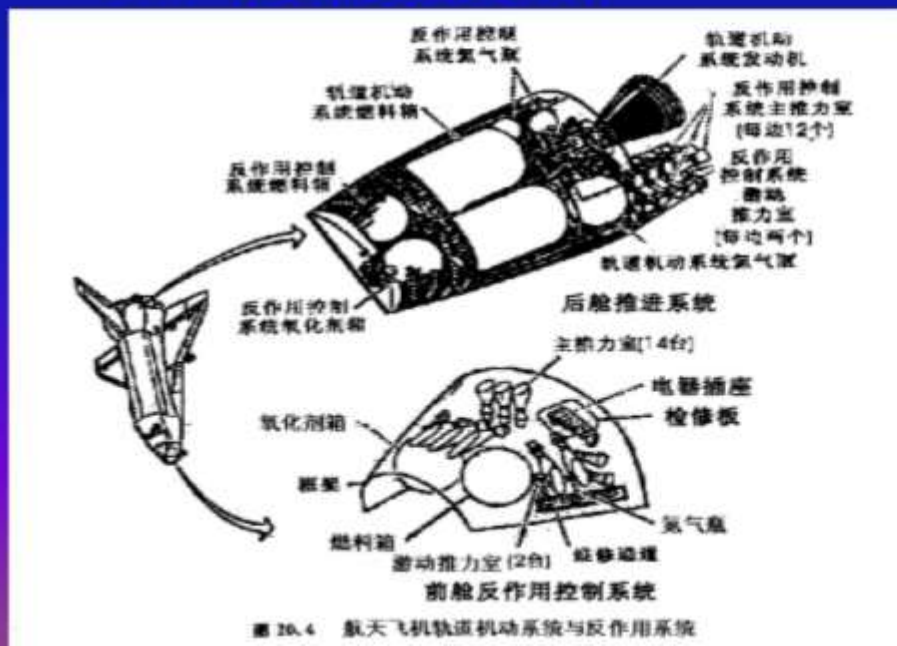
## (4) 反作用控制系统

主要功能：

三轴姿态控制和轨道控制

组成：

44个液体推力器



# ★ 航天飞机系统的执行机构：

## (5) 气动力控制系统

升降副翼：

用于俯仰和滚动姿态控制；

方向舵：用于偏航姿态控制；

襟翼：一对，处于机身下面，

可提供一定程度的俯仰控制；

垂直尾翼上的方向舵用作偏航控制。



# ★ 航天飞机系统的执行机构:



## 控制系统硬件配置

- 轨道测量和姿态敏感器 40个
- 通用计算机(包括海量存储器2个) 5台
- 驱动装置 14个
- 执行机构 66个
- 轨道手动操纵器 2个
- 姿态手动操纵器 2个
- 显示设备和接口装置 4套
- 操纵台显示器 2套





# 四、 航天飞机的飞行控制

## 航天飞机飞行过程



航天飞机的发射和飞行过程

## 四、 航天飞机的飞行控制

- 上升阶段
- 入轨阶段
- 轨道运行阶段
- 离轨阶段
- 再入与着陆阶段



# 四、 航天飞机的飞行控制

- 轨道运行阶段

- 轨道上回收并检修卫星
- 在轨释放卫星
- 空间站组装
- 微重力实验







## 四、 航天飞机的飞行控制

- 再入阶段分为3个过程

- 初期再入
- 末段能量管理
- 进场与着陆

*升力式再入方式*



## 四、 航天飞机的飞行控制

- 再入阶段控制系统的特点

- 飞行速度变化范围大, ( $Ma, 0.25 \sim 25$ )
- 能实现水平着陆
- 飞行控制系统适应多种环境
  - 纯空间的航天器工作方式
  - 进场着陆时纯气动航空器
  - 两种方式之间的过渡, 平衡状态
- 考虑载人特点, 过载小于  $1.5g$
- 气动减速过程中热保护措施
- 地面导航跟踪设备系统庞大

## 四、航天飞机的飞行控制

### • 再入与着陆阶段敏感器和执行机构状态

表 10.1 航天飞机再入与着陆阶段敏感器和执行机构的工作状态

轨道和姿态敏感器	初期再入	末端能量管理	进场着陆
1. 惯性测量单位	→	→	→
2. 速率陀螺	→	→	→
3. 加速度计	→	→	→
4. 空中战术导航系统	→	→	→
5. 气动参数测量系统		$M_a = 3.5$ →	→
6. 微波扫描波束着陆系统			→
7. 雷达高度表			→
执行机构			
1. 俯仰轴推力器	→	$q = 20$ →	
2. 滚动轴推力器	$q = 10$ →		
3. 偏航轴推力器	→	$M_a = 1$ →	→
4. 升降副翼	$q = 2$ →	→	→
5. 机体襟翼	$q = 2$ →	→	→
6. 速度制动装置		$M_a = 10$ →	→
7. 舵		$M_a = 3.5$ →	→
8. 着落架(舱)			→



## 四、 航天飞机的飞行控制

### • 再入与着陆阶段的飞行过程

4点：开始再入  
距离着陆跑道缩短到96.4km，进入第2阶段；

5点：末段能量管理  
轨道高度为3.5km，  
速度约为 $150 \pm 6\text{m/s}$ ；

9点

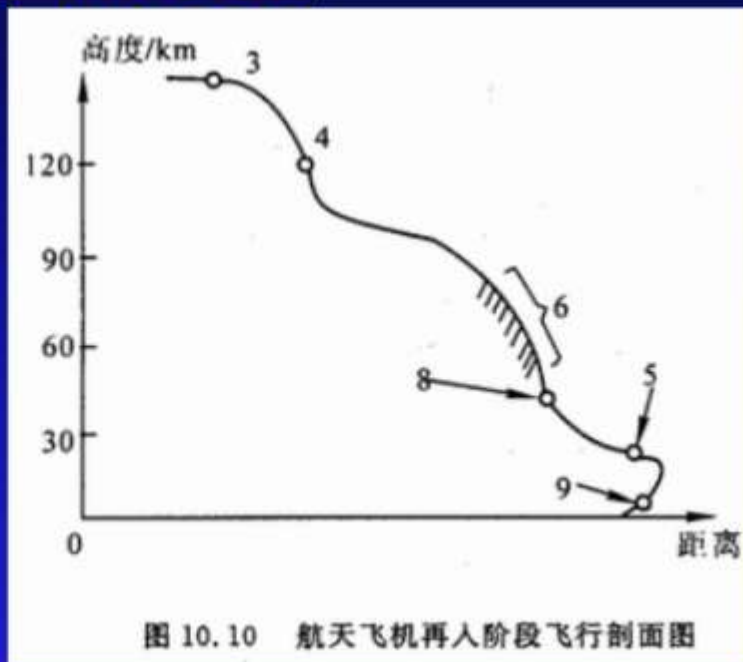


图 10.10 航天飞机再入阶段飞行剖面图

## 四、 航天飞机的飞行控制

### • 末端能量管理

- ✓ 消耗航天飞机的动能
- ✓ 利用制动器改变高能条件下的阻力，升阻比和飞行轨迹

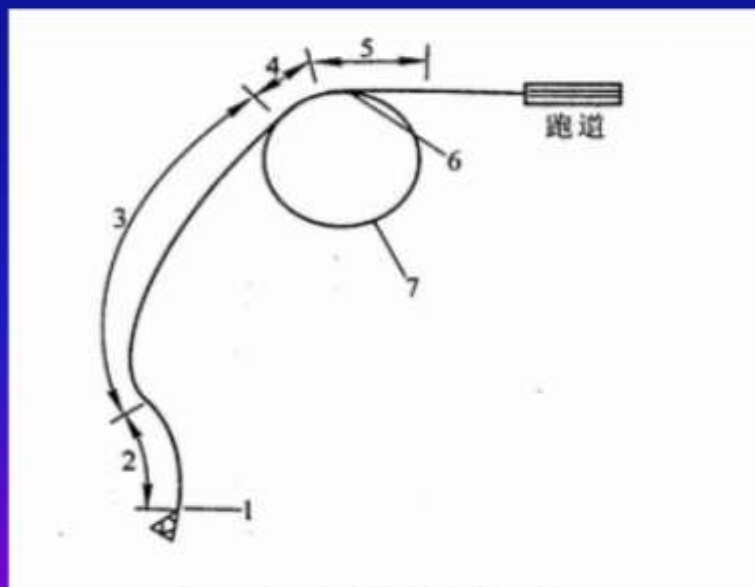


图 10.11 末端能量管理制导过程

1—再入/末端能量管理界面;2—S形转弯;3—搜索;  
4—航向校正;5—末段;6—跑道入口;7—航向校正柱面

## 四、 航天飞机的飞行控制



### • 自动着陆飞行剖面图

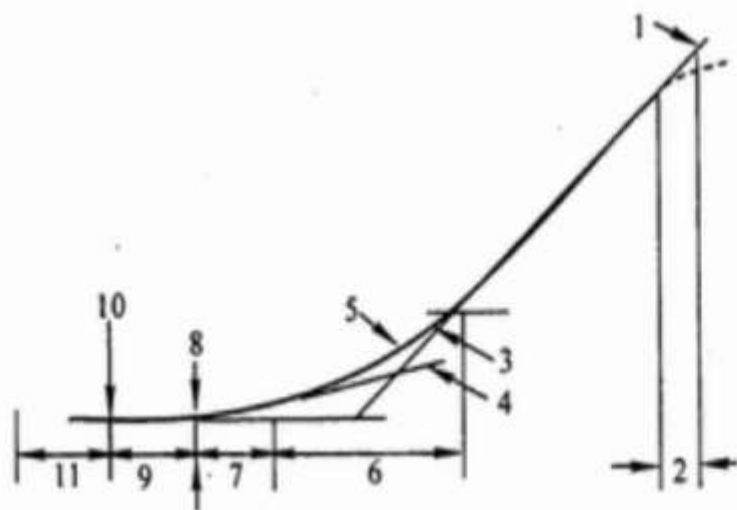


图 10.12 航天飞机自动着陆飞行剖面图

1— 开始自动着陆;2— 轨道搜索;3— 陡滑;4— 小角度下滑;5— 放起落架;6— 照明和小角度下滑;  
7— 最后照明;8— 质量在主轮;9— 着陆;10— 质量在前轮;11— 航天飞机停在跑道上