



## M5.5.3.4 发动机空气系统

## 修订批准页:

1

版次	修订时间	编写/改版	修订说明	审核/时间	审批/时间
R0	2020.06.14	谈海军	新编课件	谈海军 2020.08.07	张玉 2020.08.11

## 目的与要求:

<b>目的</b>	通过本次课程的学习，掌握空气系统概述，典型发动机空气系统维护介绍
<b>要求</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 压气机控制</li><li>2. 内部、外部冷却，</li><li>3. 涡轮间隙控制</li><li>4. 典型发动机空气系统常见维护及安全注意事项</li></ol>

## 课程安排:

序号	内容	等级	课时
1	空气系统概述		1H
2	内部、外部冷却, 涡轮间隙控制		2H
3	典型发动机空气系统维护介绍		1H

A faint, light-colored silhouette of a commercial airplane is centered in the background of the slide.

5.3.4.1 空气系统概述

5.3.4.2 典型发动机空气系统维护介绍

A faint, light-colored silhouette of a commercial jet airplane is centered in the background, facing forward. The aircraft has two engines mounted under the wings and a vertical stabilizer at the rear.

# 5.3.4.1 空气系统概述

A faint, light-colored silhouette of a commercial airplane is centered in the background, showing the fuselage, wings, and tail.

# 1 内部、外部冷却

## 概述

- ◆ 内部和外部部件以及附件装置的冷却
- ◆ 压气机防喘控制
- ◆ 涡轮间隙控制
  - 外部空气系统
  - 内部空气系统

## 增加空气系统功能

- ◆ 发动机的内部部件和附件装置的冷却
- ◆ 发动机防冰
- ◆ 轴承腔封严
- ◆ 控制轴承的轴向载荷
- ◆ 推力平衡
- ◆ 压气机防喘控制
- ◆ 控制涡轮叶片的叶尖间隙
- ◆ 提供引气

增加

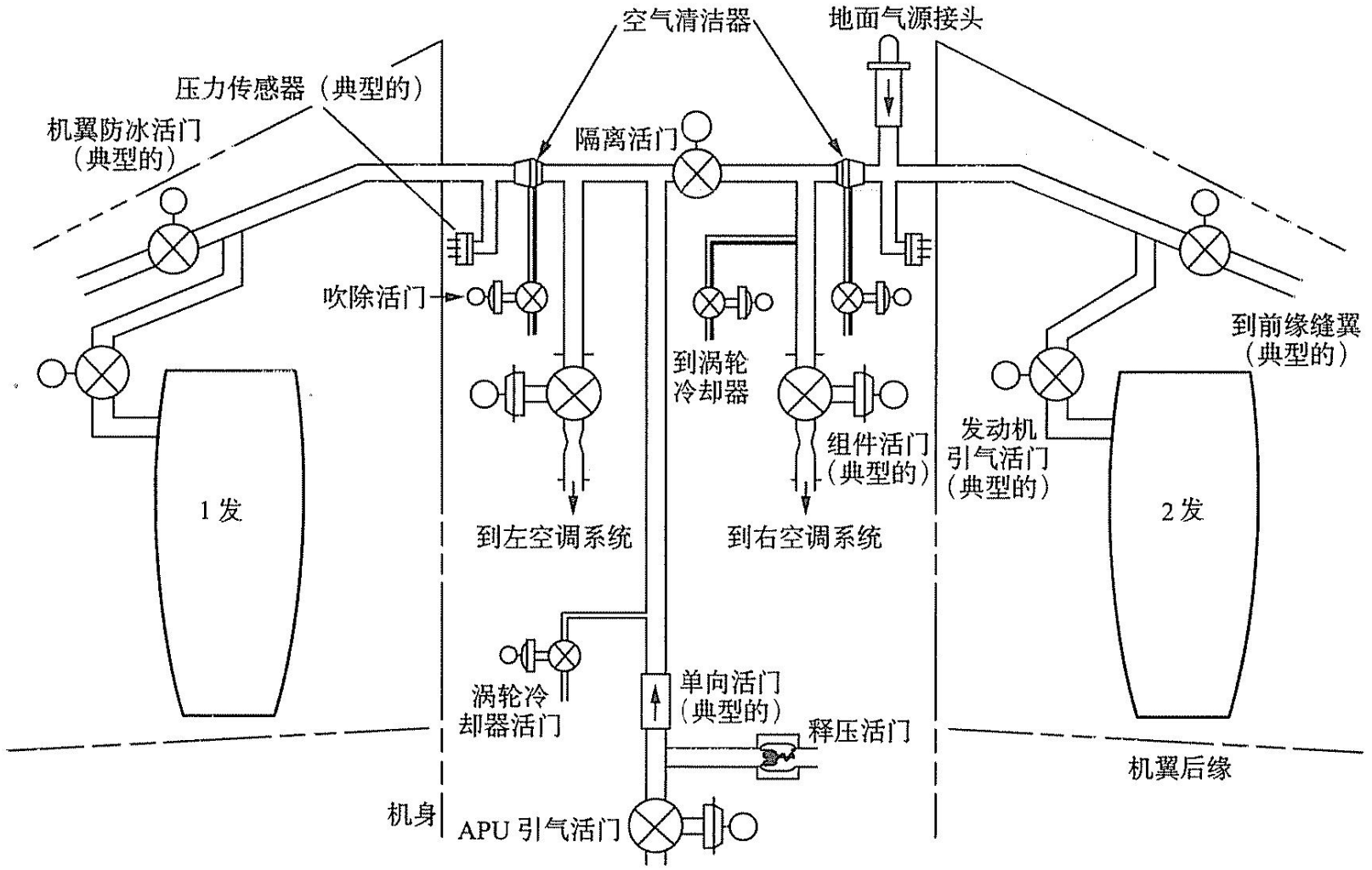


图 6-1 气源系统布局图

# 1.1 发动机内部冷却

内部冷却空气系统

外部冷却空气系统

内部封严  
压力平衡  
内部冷却



取自于内涵道气流

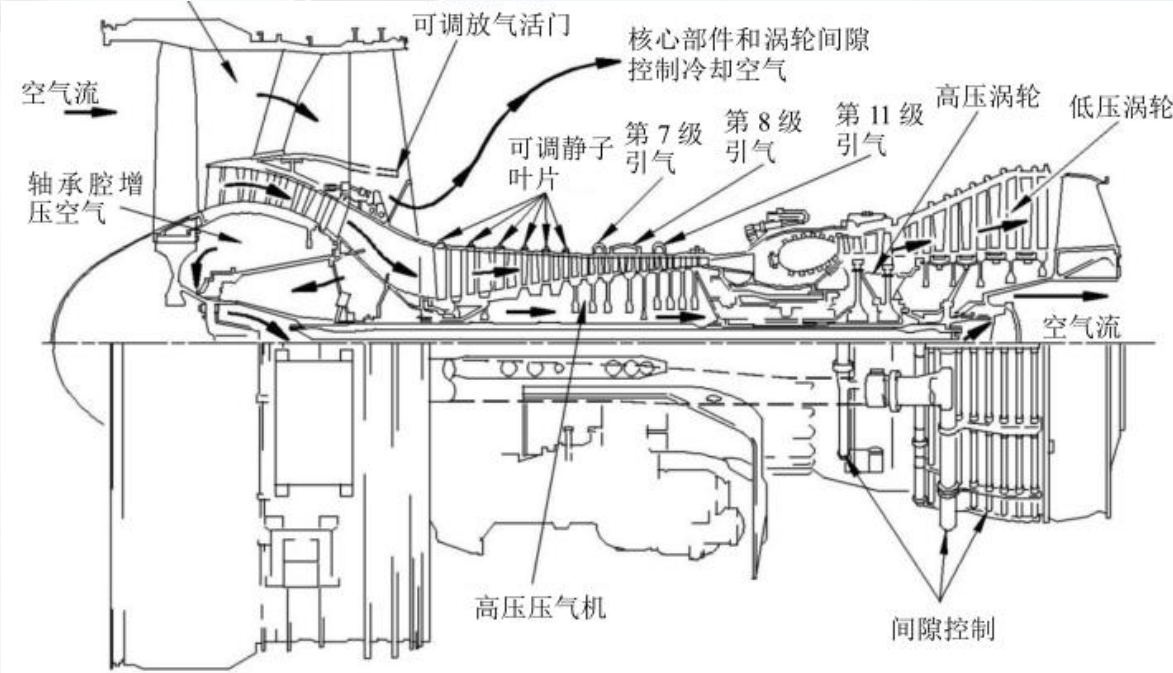


图 13-1 发动机内部空气流

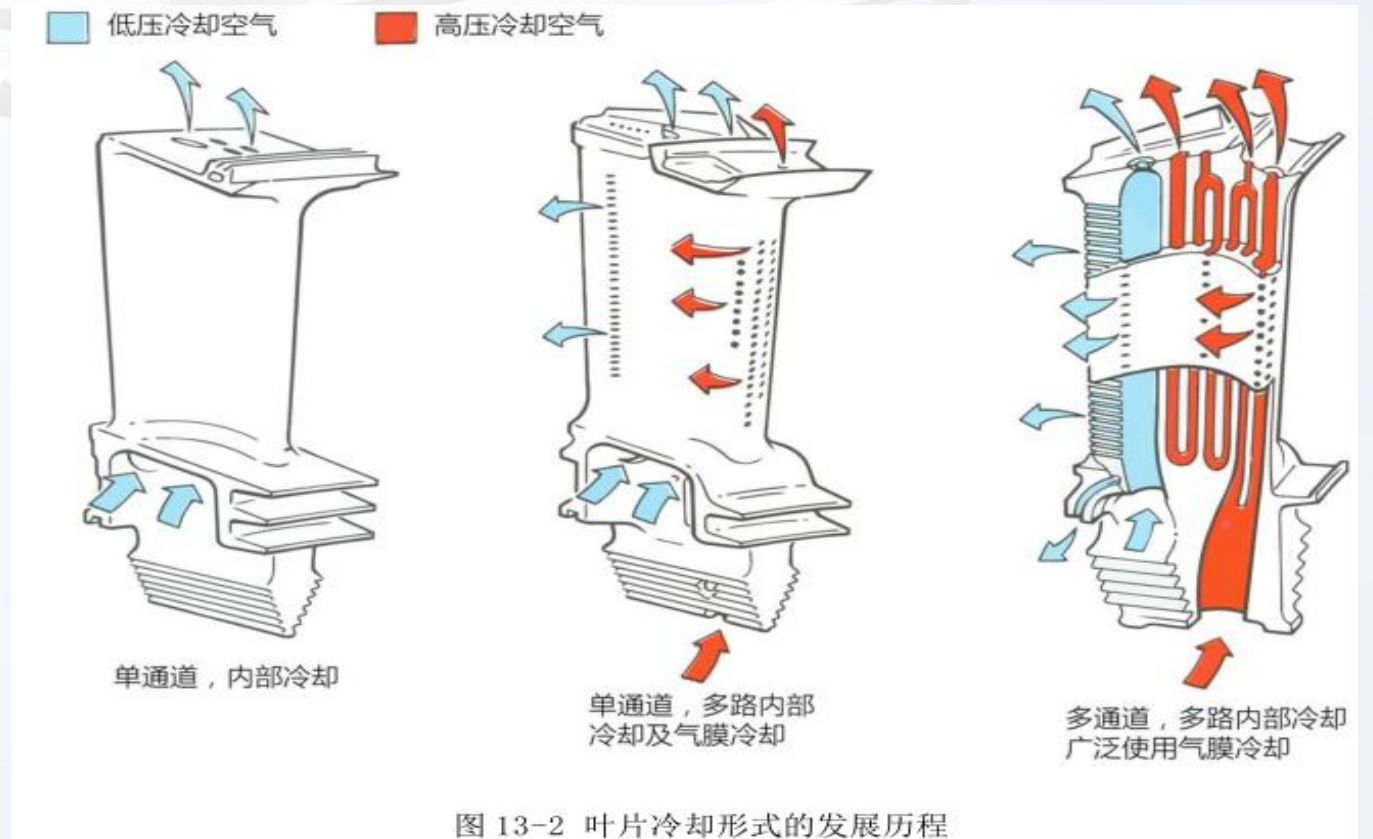
## a 压气机冷却空气

- ◆ 控制压气机轴和盘的温度，既冷却，也可加热
- ◆ 涡轮机匣冷却，减小径向间隙，从而减小漏气损失

提高涡轮前燃气温度

发动机设计重要考虑是

发动机零件以及附件在特定情况下温度不超标，不会危及发动机安全工作



## b 燃烧室冷却

- ◆ 未用于燃烧的空气，被引入火焰筒。
- ◆ 1/3用在稀释区降低燃气温度，
- ◆ 2/3冷却空气沿火焰筒壁的内表面流动，形成气膜

### c 涡轮冷却

单通道

高压涡轮导向器和叶片冷却

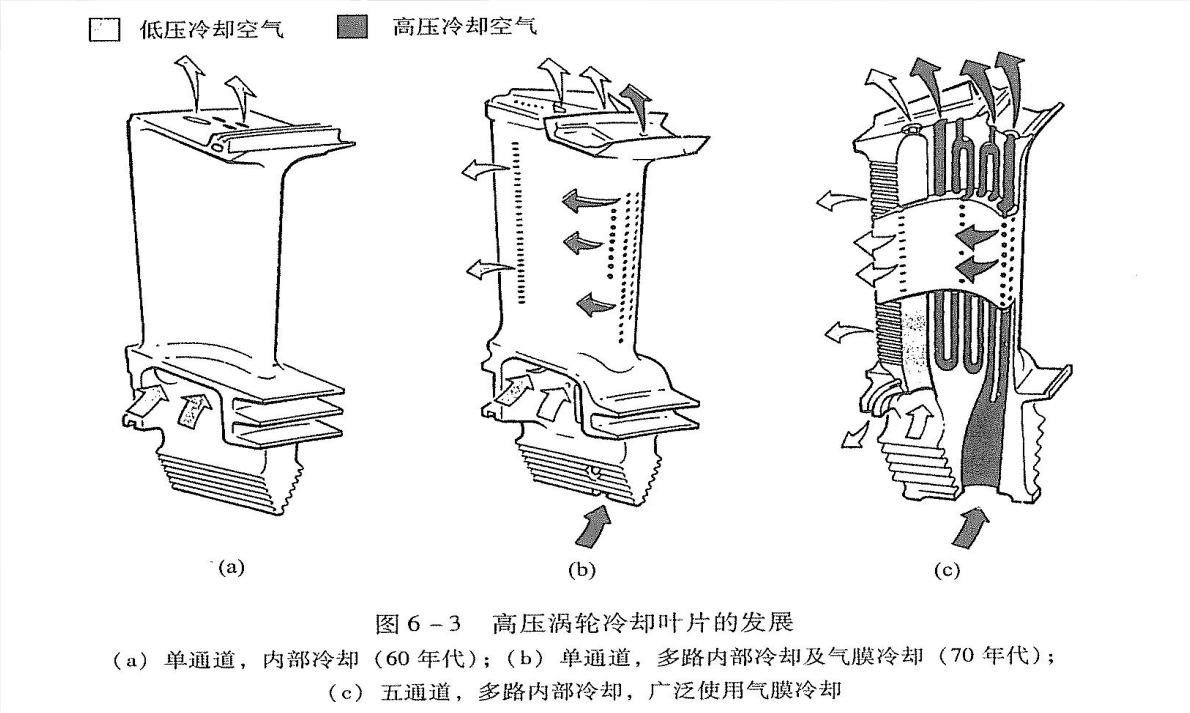
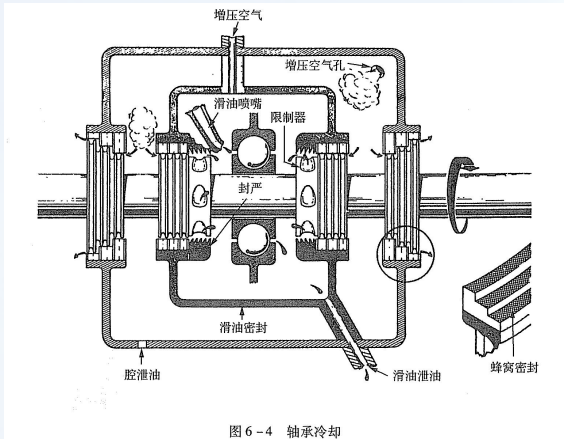
多通道的内部冷却涡轮叶片，带外部气膜冷却、冲击式冷却

涡轮盘和轴冷却

冷却涡轮盘的空气进入轮盘之间的空腔，并往外流过轮盘的表面

轴承腔冷却

冷却和封严

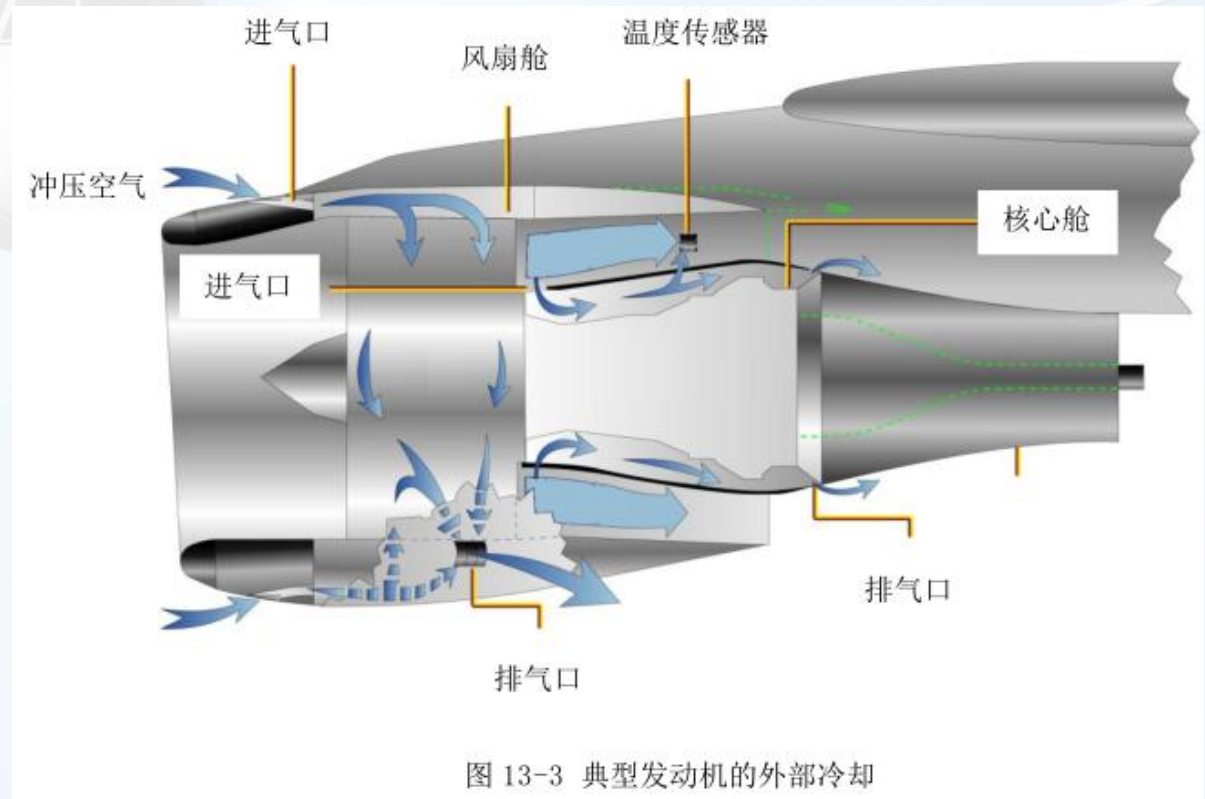


## 1.2 发动机外部及附件冷却

发动机整流罩与机匣之间的区域被分为两个部分

- ◆ 风扇舱 外部冲压空气
- ◆ 核心舱 对流冷却

发动机停车后由对流冷却



## a 外部冷却作用


- ◆ 发动机风扇整流罩与风扇机匣之间区域的通气 ← 整体驱动发电机
- ◆ 核心舱所有发动机和飞机附件得到足够冷却 ← 点火导线
- ◆ 防止可燃气体在发动机舱内聚集

## b 封严件作用

### 封严件作用

- ◆ 滑油从发动机轴承腔漏
- ◆ 出控制冷却空气流防止
- ◆ 主气流的燃气进入涡轮盘空腔

封严方法取决于周围的温度和压力、可磨损性、发热量、重量、可用的空间、易于制造及易于安装和拆卸



## 2 压气机气流控制

## 2. .1 目的和方法

### a 目的和方法

目的

- ◆ 避免叶片失速
- ◆ 防止压气机喘振
- ◆ 提高的工作稳定性和压气机效率

方法

- ◆ 可调放气活门VBV (Variable Bleed Valve)
- ◆ 可调静子叶片 VSV (Variable Stator Vane)

## b 喘振

## 喘振阶段

- ◆ 启动
- ◆ 加速
- ◆ 减速等过渡状态
- ◆ 反推展开

## 喘振的探测

- ◆ 压气机出口压力的下降率
- ◆ 转子的减速率

## 喘振

- ◆ VBV开, VSV关的方向上调节
- ◆ 瞬时减少供油, 降低涡轮前温度, 增加空气流量, 喘振恢复
- ◆ 连续点火以防熄火

## c VBV 和VSV防喘控制



VBV活门的开度是可变的，计算决定开、关和开度大小

## 2 2 可调静子叶片

### 高压压气机的进口导向叶片和前几级静子叶片角度可调的结构

作动器→摇臂组件→主杆、连杆  
→作动环→叶片转动

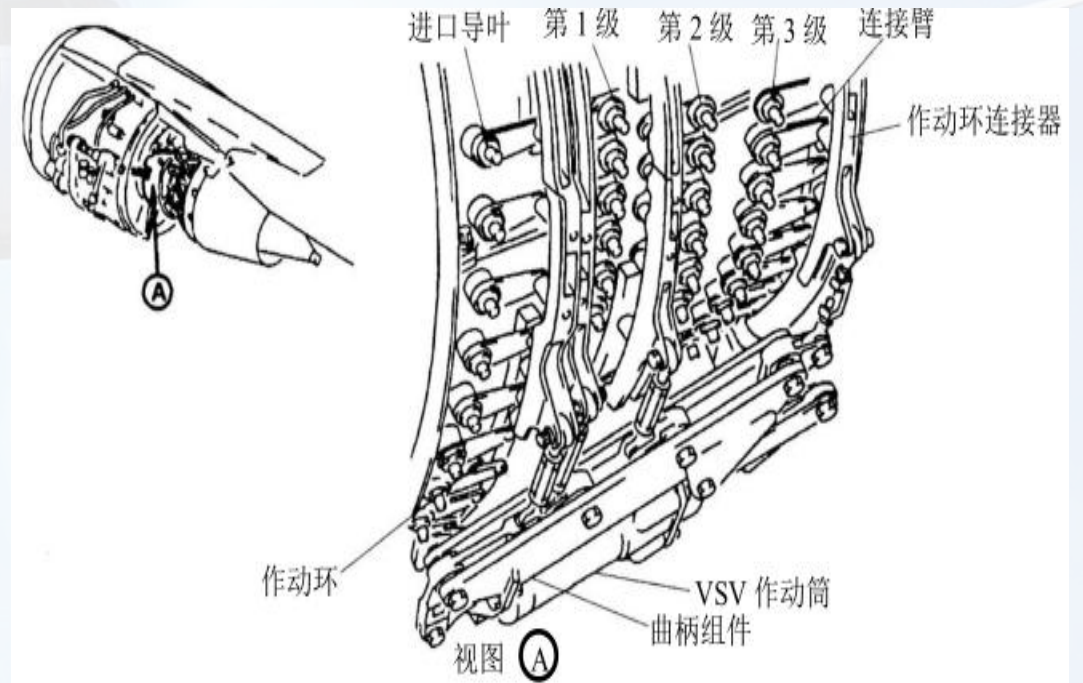


图 13-4 CFM56-3 发动机可调静子叶片系统

- ◆ 压气机转速下降时，静子叶片关小，最佳攻角流入转子叶片
- ◆ 压气机转速增加时，静子叶片开大，最佳角度进入转子叶片

VSV 与VBV协调工作，开关相反

VSV关作动时（攻角减小），VBV开方向作动

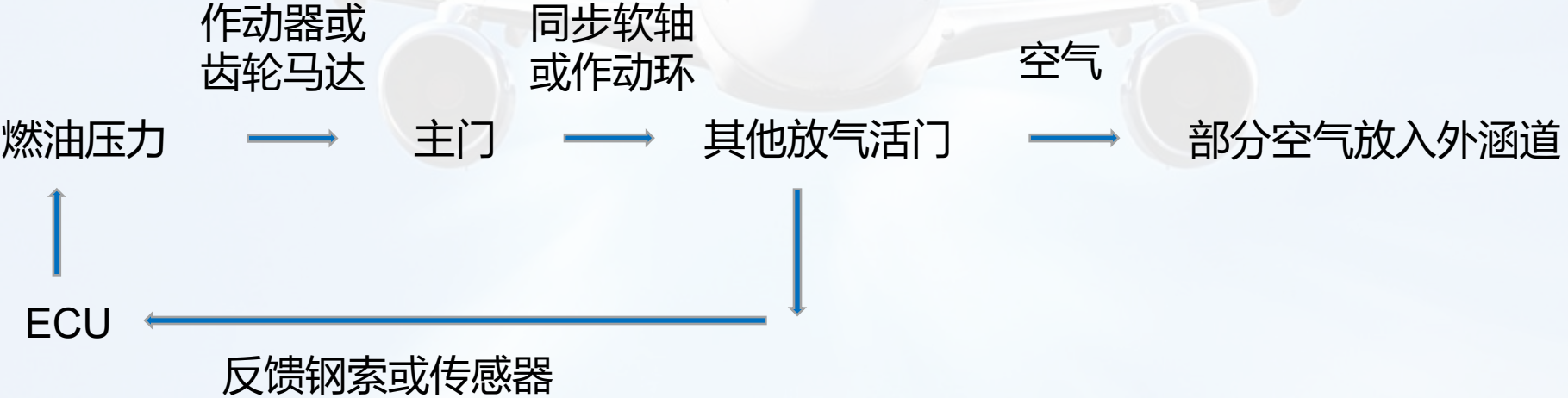
## CFM56-7B

- ◆ 慢车位时，VSV在关位
- ◆ N2 转速超过 95%时，VSV 在全开

## 2.3 可调放气活门

- ◆ 快速减速防止失速喘振
- ◆ 低转速和反推力工作时，防外物损伤发动机
- ◆ 改善发动机的工作稳定性

# a 放气活门闭环



b 可调放气系统

a) CFM56-5B

活门间软轴连接，易卡阻与磨损

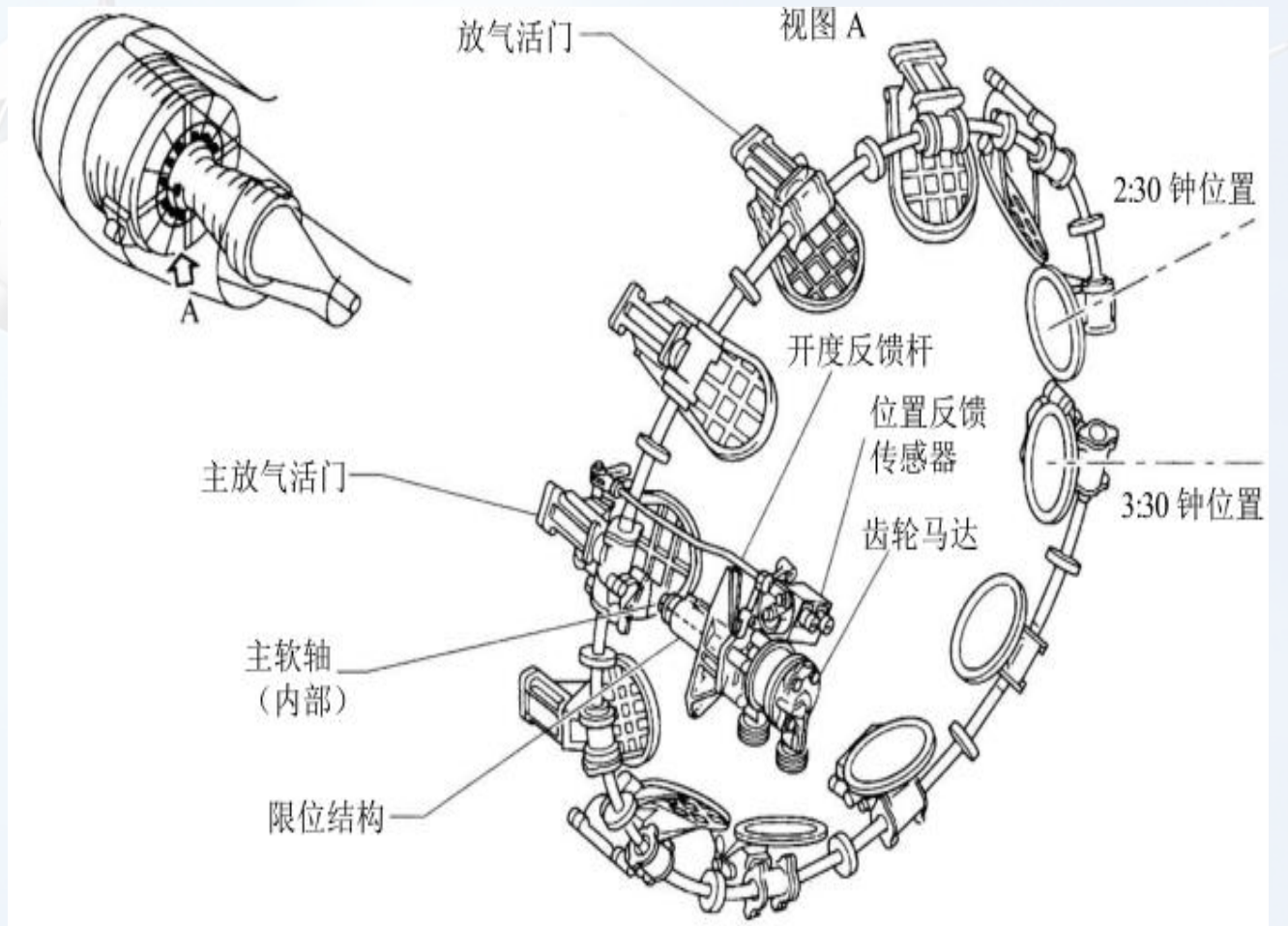
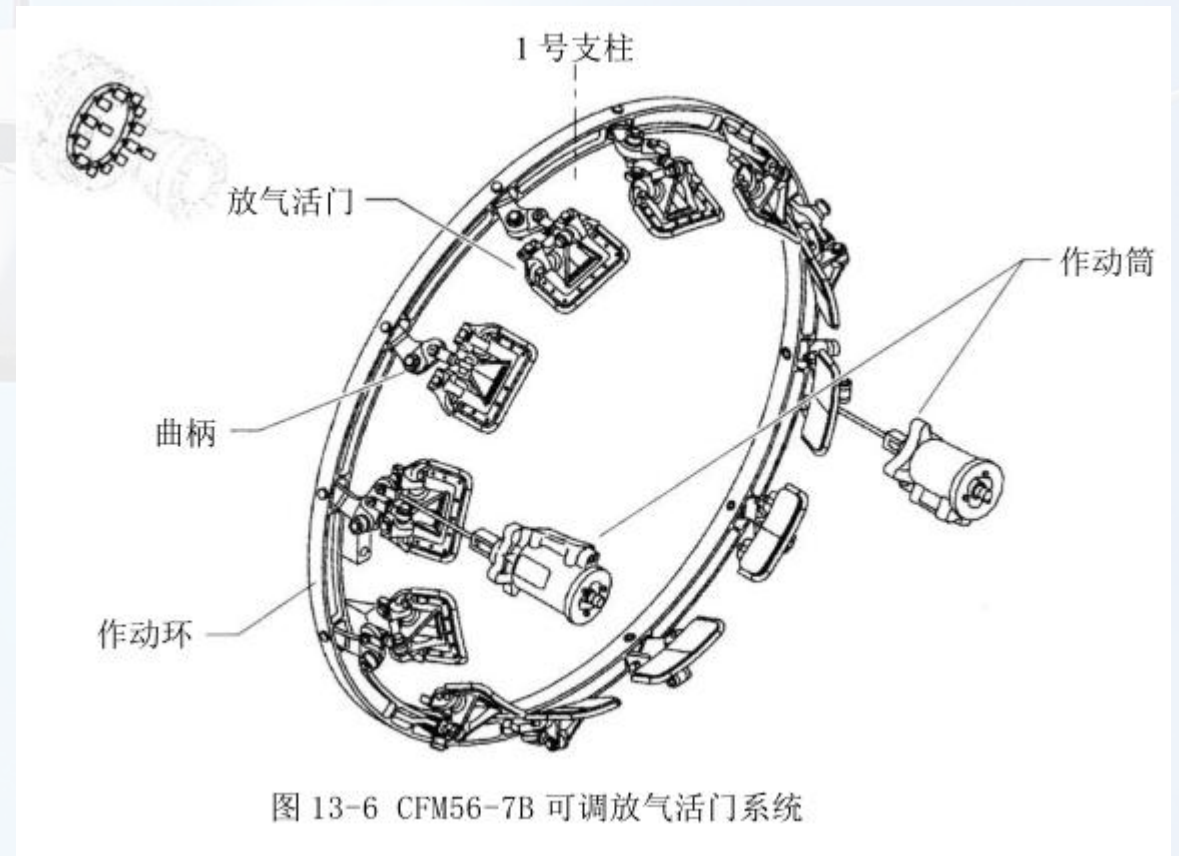


图 13-5 CFM56-5B 可调放气活门系统

## b) CFM56-7B

CFM56-7B作动环，结构，简单，  
较软轴连接可靠

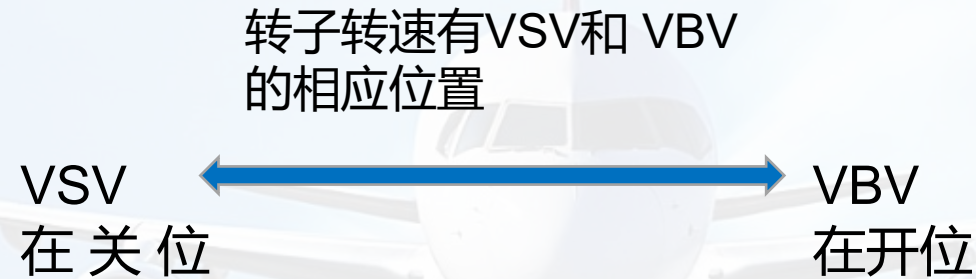
- ◆ CFM56-7B 两个作动器在风扇框架两侧
- ◆ 作动杆移动活门作动环
- ◆ 控制十二个放气活门的开关
- ◆ 前推作动杆，活门开大，排气
- ◆ 后移作动器，活门开小，放气量减少
- ◆ 放气活门可在全关和全开之间任意作动



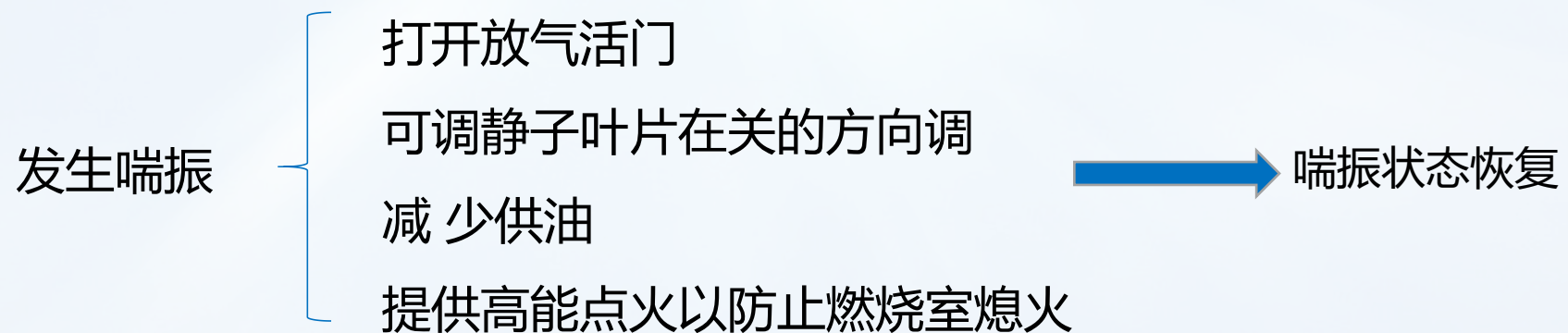
### c) 放气活门总结

- ◆ 活门打开放压气机中间级，或低压后高压前的空气，压气机前面级增加流量，增大轴向速度，减小攻角，保持足够的喘振裕度
- ◆ 低速距喘振边界近，裕度小，放气；
- ◆ 快速减速，高压转子的节流，低压裕度小，放气。
- ◆ 关闭过早，没有脱离喘振，仍可能喘振；
- ◆ 关闭过晚，放掉空气，造成浪费。
- ◆ 活门关闭转速受大气温度变化，温度高，关闭转速增大

- 增加 VSV和 VBV的目的压气机失速导致发动机喘振



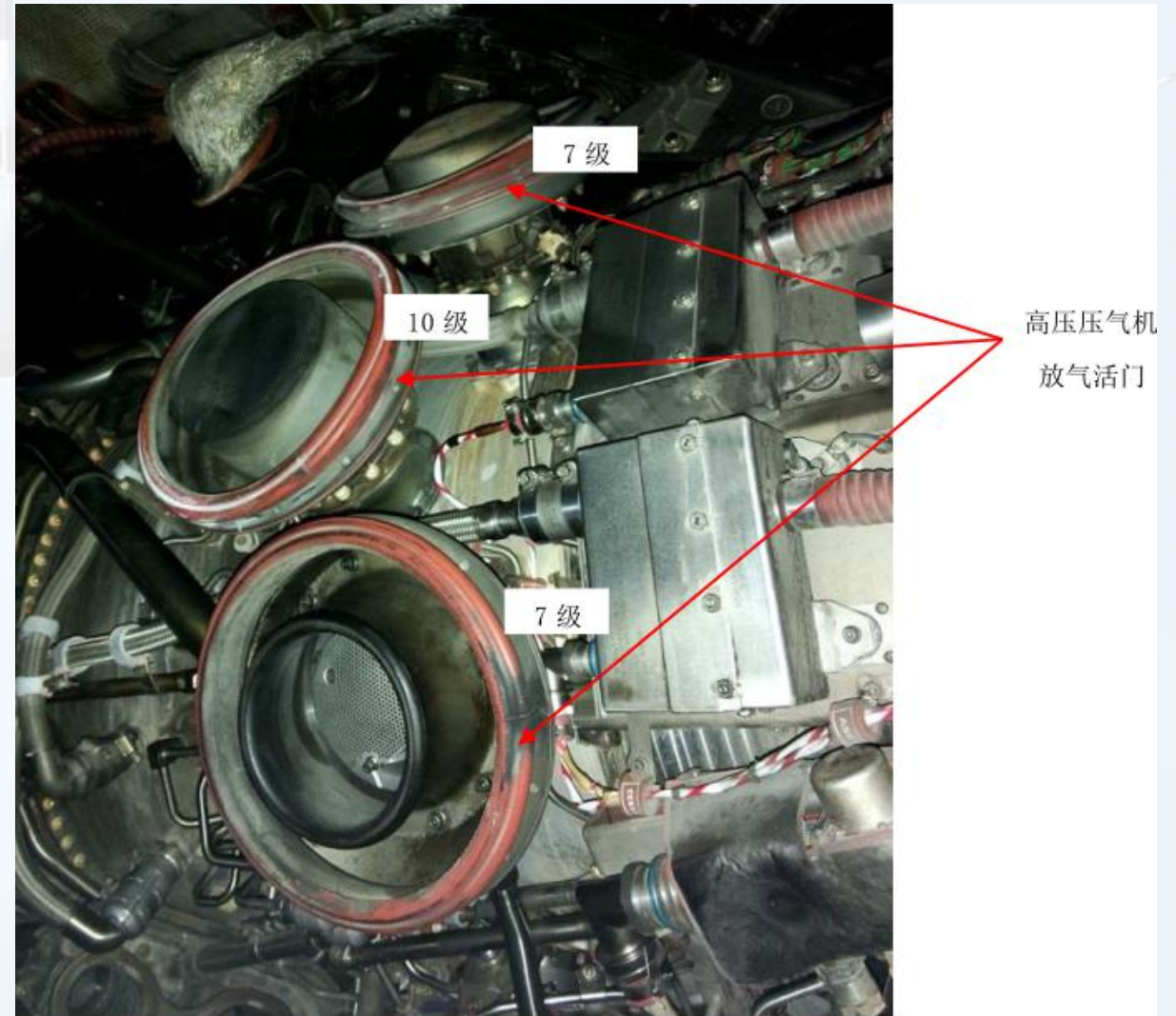
压气机喘振的探测依据压气机出口压力的下降率或转子的减速率



## 2 4 高压压气机放气活门 在高压压气机的中间级和靠后级

### V2500 高压压气机放气系统

- ◆ 7 级三个 (7A、7B、7C) , 10 级
- ◆ 全开和全关两个位置
- ◆ 进口温度修正后的N2 控制活门电磁阀
- ◆ 电磁阀控制高压12 级的伺服空气 (P3) 通断控制活门的开关
- ◆ 活门弹簧加载开位发动机启动活门开



## 高压压气机放气活门不同名称

a) 启动放气活门

b) 瞬时放气活门TBV

- ◆ 启动放气活门启动过程中开启,不受发动机控制器
- ◆ 瞬时放气活门TBV (Transient Bleed Valve) 启动、加减速等过渡态过程中均处于开启,控制器进行控制

## a) 启动放气活门

- ◆ 在发动机启动开启，结束后，活门立即关闭
- ◆ 启动放气活门不受ECC控制，取决于启动活门状态

### CFM56-3

- ◆ 5 级启动放气活门由启动活门下游的压力空气克服放气活门内的弹簧力将其打开；
- ◆ 启动活门关闭，在弹簧力的作用下，第五级启动放气活门也关闭

## b) 瞬时放气活门TBV

- ◆ TBV在启动、加减速等过渡态均开启状态，提高压气机失速裕度，防喘
- ◆ 发动机稳态关闭
- ◆ TBV由发动机控制器控制
- ◆ ECU→HMU上TBV 电液伺服阀→放气活门作动器→活门

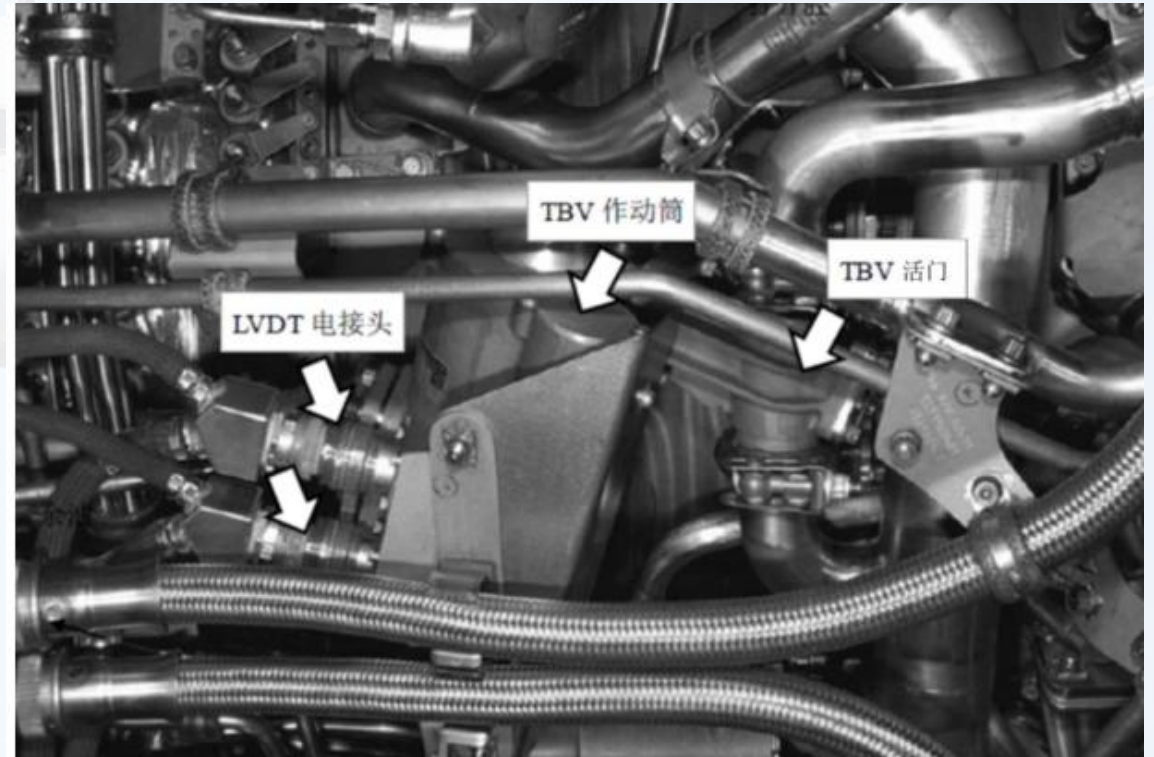


图 13-8 瞬时放气活门 (TBV) 系统

## 害处

- ◆ 结冰限制空气流量,
- ◆ 冰块脱落损坏发动机或进气道

## 要求

- ◆ 可靠,
- ◆ 易于维护,
- ◆ 轻
- ◆ 发动机性能损失小

## 方法

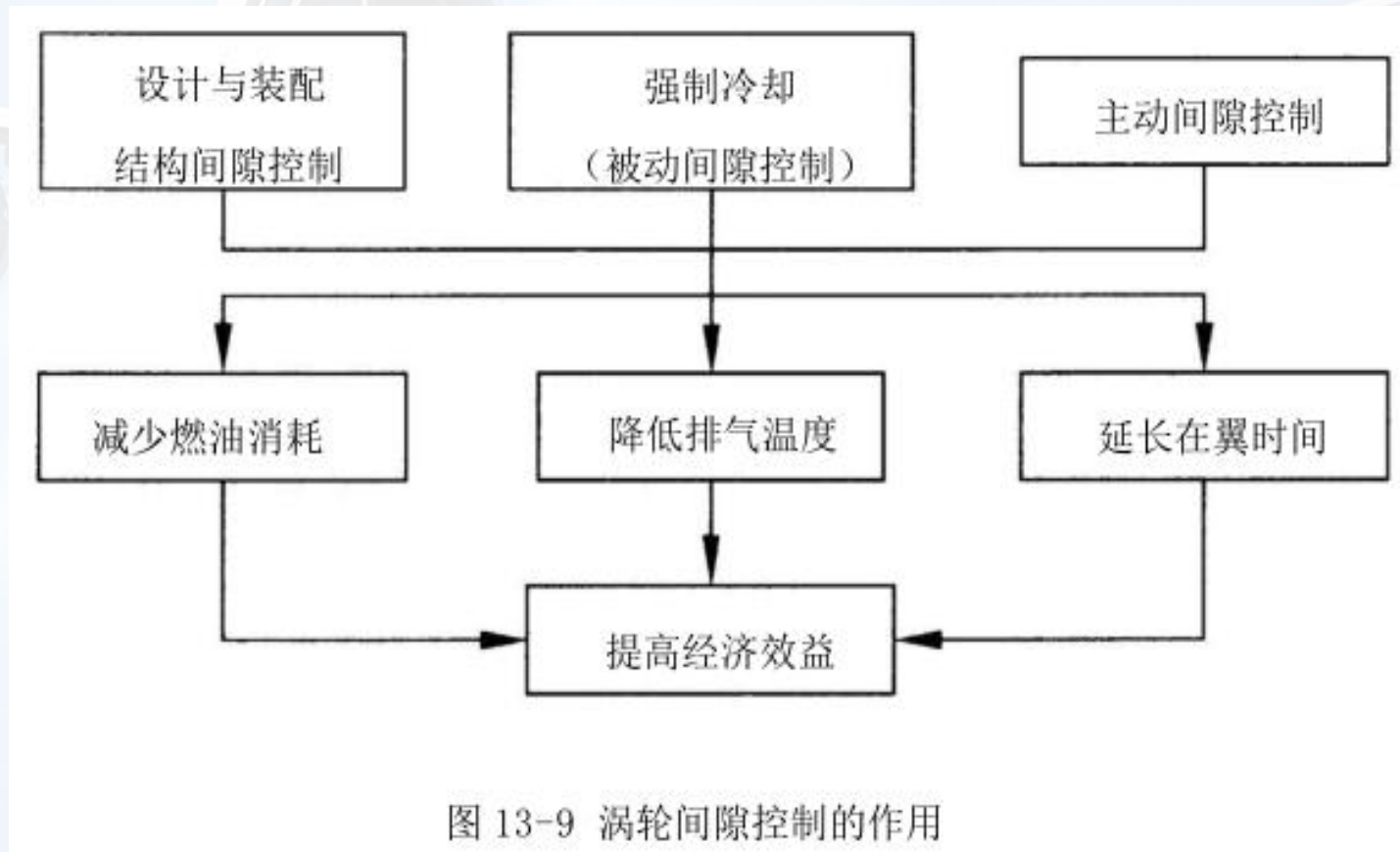
- ◆ 涡轮喷气采用热空气防冰 ← 取自高压压气机
- ◆ 涡轮螺桨发动机采用电加温
- ◆ 热空气与电加温混合型。

A faint, light-colored silhouette of a commercial airplane is centered in the background, showing the fuselage, wings, and engines.

# 3 涡轮间隙控制

## a 涡轮间隙控制概述

减少涡轮叶片叶尖和机匣之间间隙，减少漏气损失，提高发动机性能，



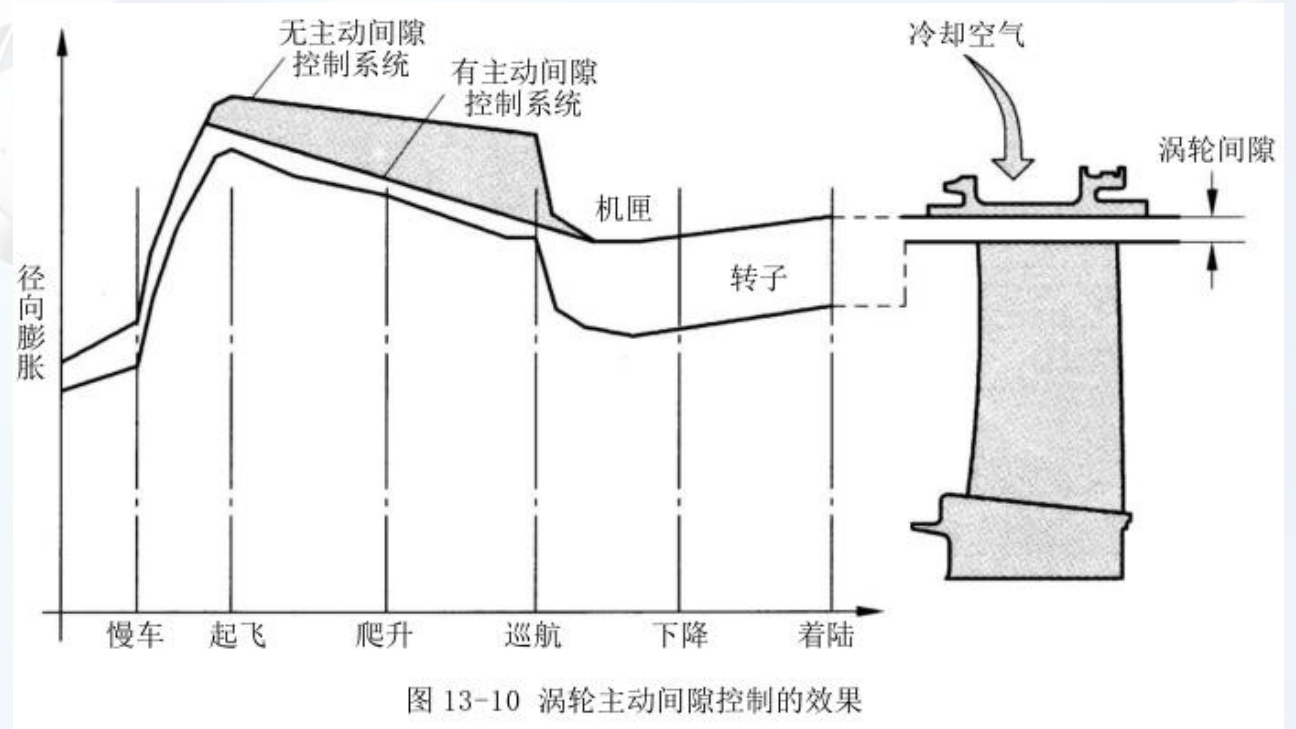
## b 被动控制

选取膨胀系数合适的材料，并由气流冷却来控制涡轮间隙

- ◆ 被动间隙控制高压和低压涡轮，对涡轮机匣冷却，流量或温度不受控，不能保持最佳涡轮间隙
- ◆ 低压涡轮机匣冷却采用风扇出口空气
- ◆ 高压涡轮间隙控制从高压压气机引出的气体进行部件冷却

### c 主动控制

- ◆ 主动间隙涡轮机匣膨胀量与转子叶片的伸长量相一致，不会接触，同时最小涡轮间隙，高效率。
- ◆ 高、低压涡轮工作温度对发动机性能影响不一样，分别进行控制



## a) 高压涡轮间隙

控制高压压气机不同级引气，改变流量和温度，实现涡轮间隙的主动控制

- ◆ 4级和9级引气，EEC 安全性和经济性选择引气，
- ◆ 高压涡轮间隙控制活门负责选择控制空气量

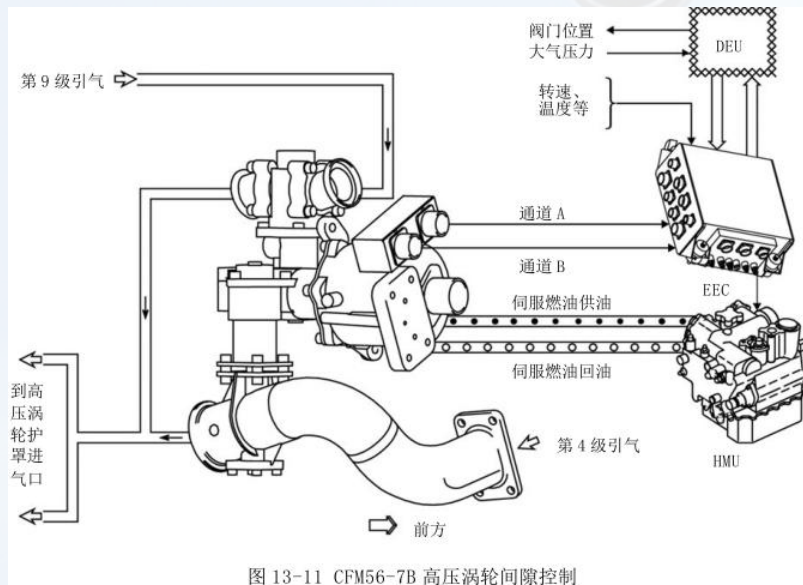


表 13-1 高压涡轮间隙控制空气与发动机状态的关系 (CFM56-7B)

发动机工作状态	高压涡轮间隙控制引气
失效安全状态	无引气
暖启动	9级模式，以减小高压涡轮摩擦
起飞和爬升	最初全4级模式，然后过渡到混气模式
巡航	4级模式，使燃油消耗最低
下降	低流量9级模式，防止出现摩擦

## b) 低压涡轮间隙

- ◆ 机械液压式控制器，控制器简单，被动控制
- ◆ FADEC 控制的大多数主动间隙控制
- ◆ 精度都比较低
- ◆ 被动低压间隙控制，冷却空气流量不受控制
- ◆ 主动控制控制空气流量控制间隙

### c) 压气机间隙控制

- ◆ 通过压气机引气冷却来实现
- ◆ 压气机的暖气进入转子鼓筒内部控制压气机 转子膨胀改变转子的尺寸，从而达到间隙控制
- ◆ 是主动间隙控制系统
- ◆ 压气机的中间级，压气机间隙控制活门调节流量

A faint, light-colored silhouette of a commercial airplane is centered in the background of the slide, showing the fuselage, wings, and tail.

## 5.3.4.2 典型发动机空气系统维护介绍

## 4.1 典型发动机空气系统的部件识别

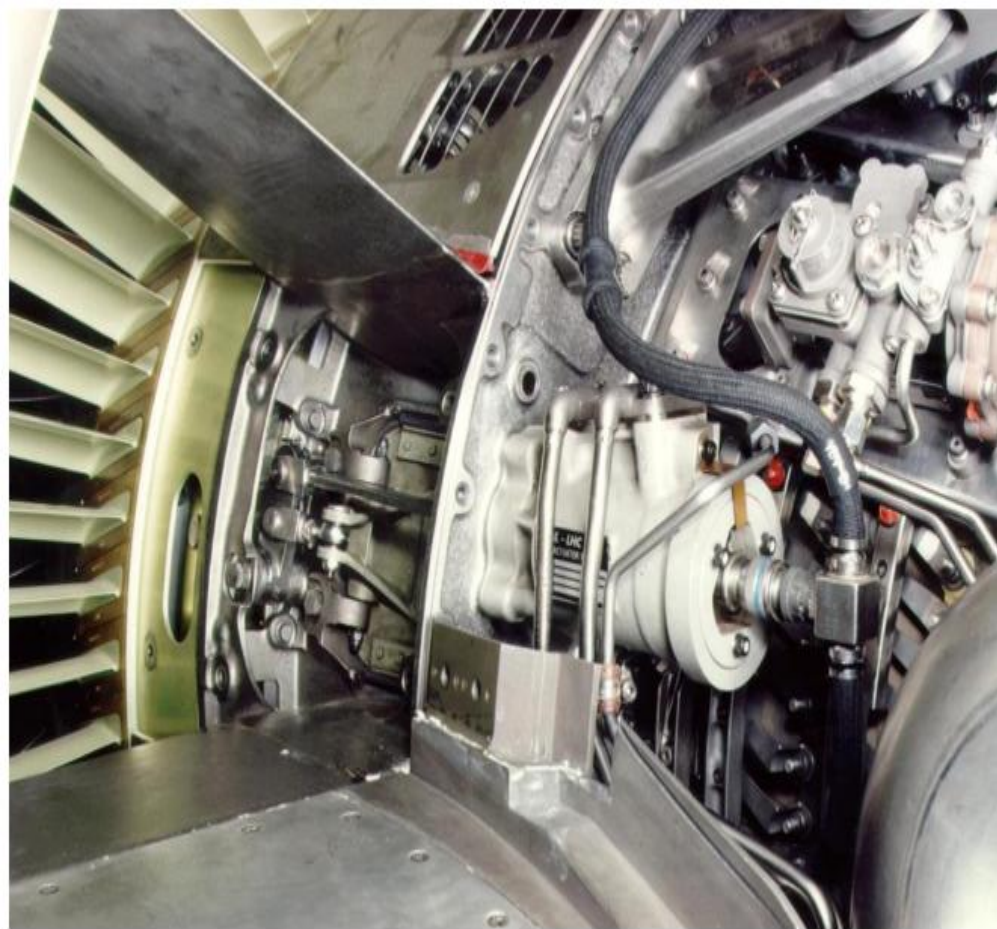


图 13-13 可调放气活门 VBV



图 13-12 可调静子叶片 VSV

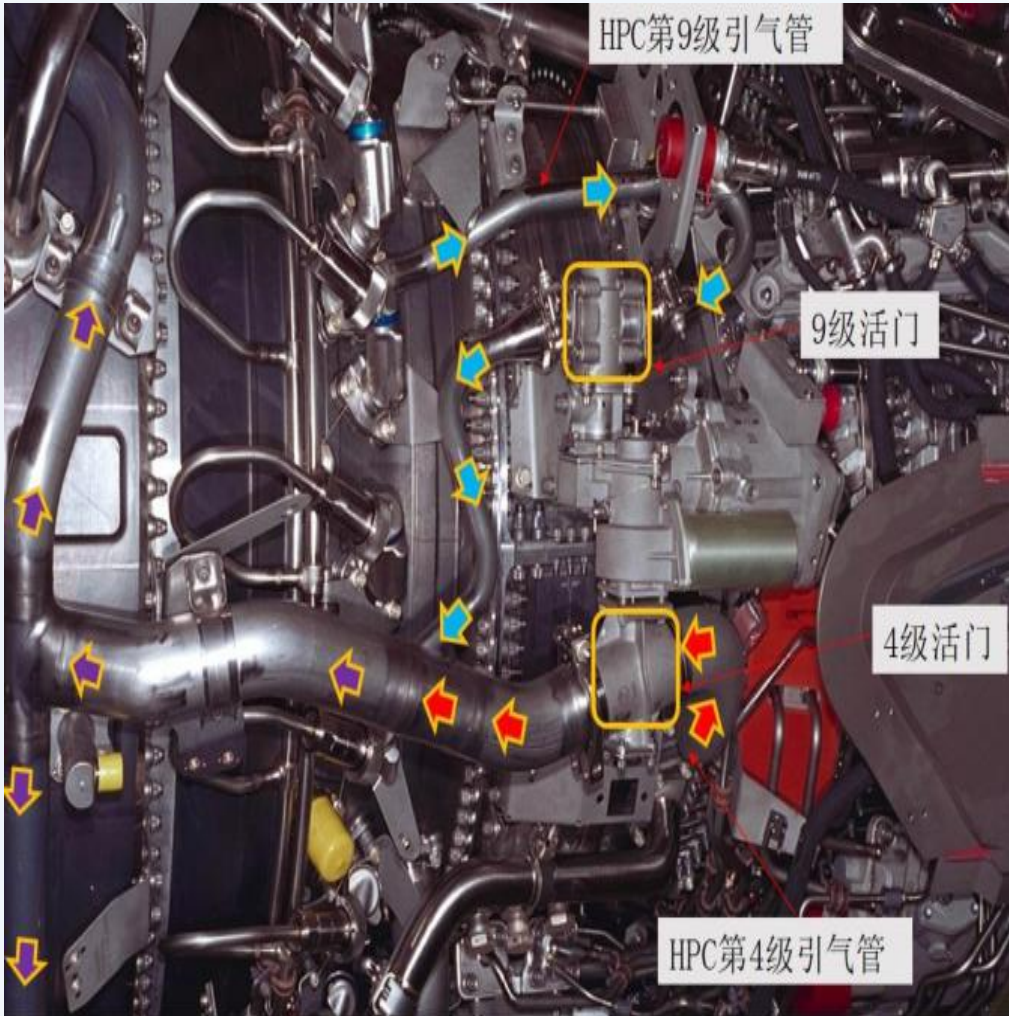


图 13-14 高压涡轮主动间隙控制 HPTACC

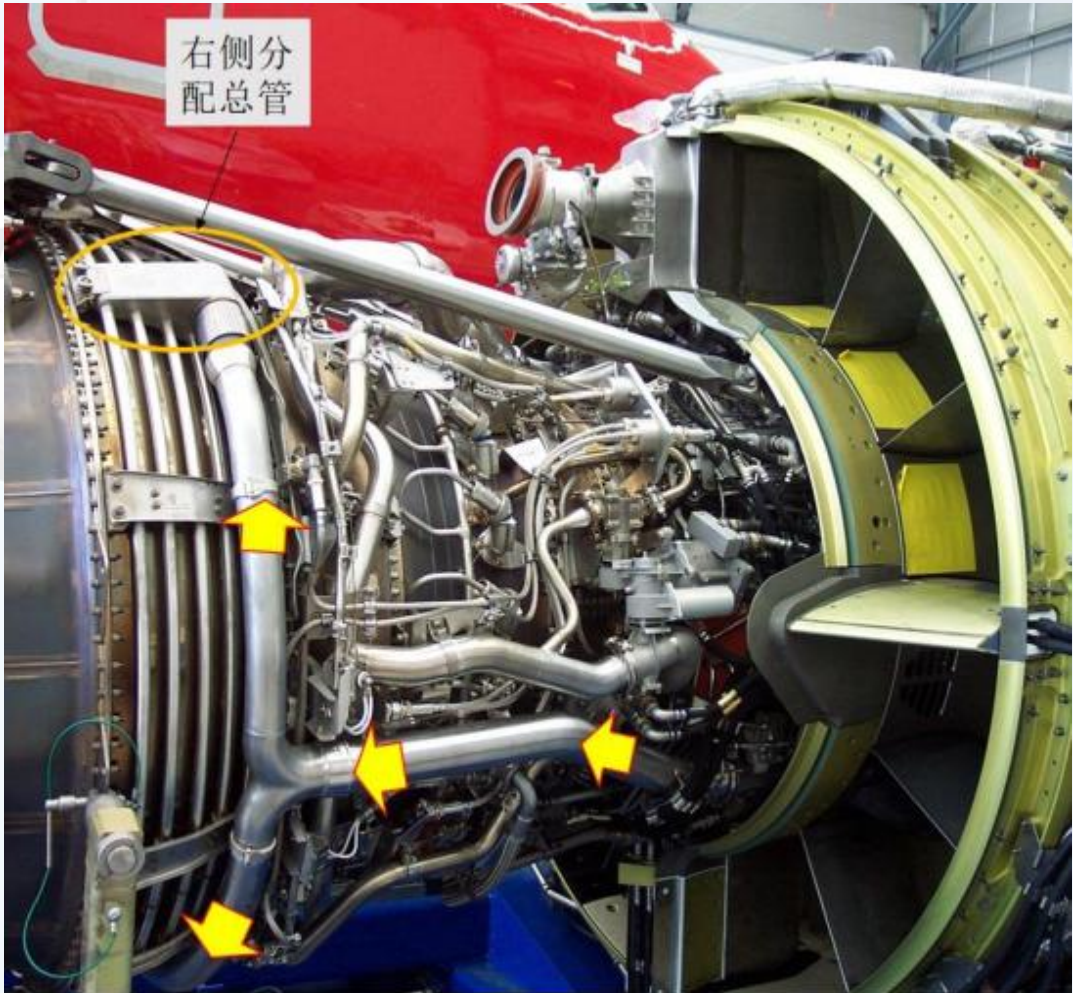


图 13-15 低压涡轮主动间隙控制 LPTACC

## 4.2 空气系统的常见维护及安全注意事项

- ◆ 部件是热的，免发生烫伤
- ◆ 根据厂家维护手册，可人工方式操纵 VSV
- ◆ 根据厂家维护手册，可人工方式操纵 VBV

a 目视检查VSV 作动筒等部件

- ◆ 检查作动筒与燃油管路有无燃油渗漏及损伤。
- ◆ 作动筒是否松动。
- ◆ 电气连接导线及插头是否松动，有无损伤。
- ◆ VSV 其他作动部件是否损伤

## b 目视检查 VBV 作动筒等部件

- ◆ 检查作动筒与燃油管路有无燃油渗漏及损伤。
- ◆ 作动筒是否松动。
- ◆ 电气连接导线及插头是否松动，有无损伤。
- ◆ VSV 其他作动部件是否损伤

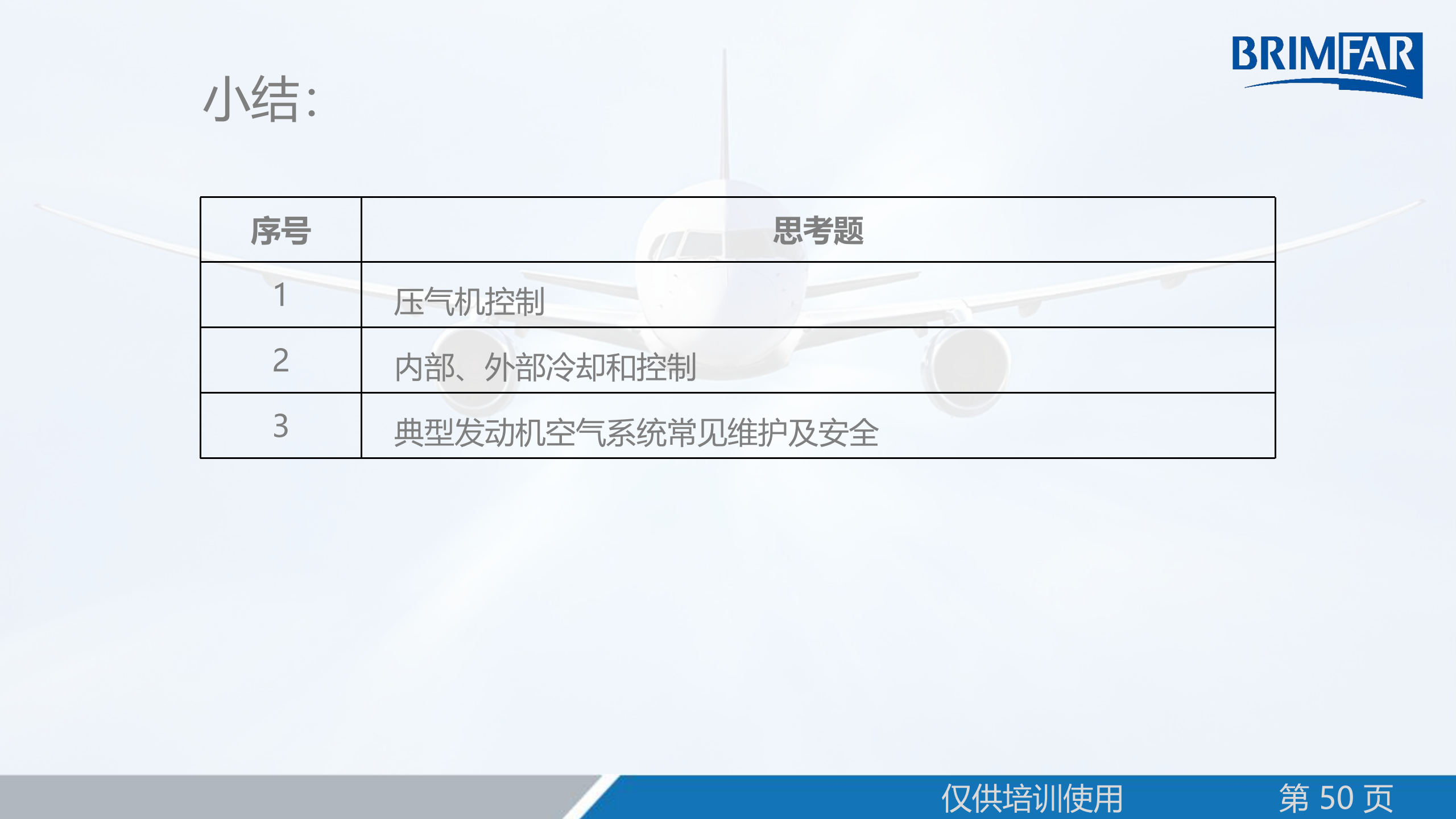
### c 目视检查放气活门

- ◆ 目视检查放气活门与燃油管路有无燃油渗漏及损伤。
- ◆ 放气活门是否松动。
- ◆ 电气连接导线及插头是否松动，有无损伤。
- ◆ 排气管道及封严是否损伤。

#### d 目视检查间隙控制活门

- ◆ 目视活门与燃油管路有无燃油渗漏及损伤。
- ◆ 电气连接导线及插头是否松动，有无损伤

# 小结:

A faint, light-colored image of a commercial airplane is visible in the background of the slide.

序号	思考题
1	压气机控制
2	内部、外部冷却和控制
3	典型发动机空气系统常见维护及安全



**感谢聆听，欢迎指正**