



M5.5.3.1 发动机燃油和控制系统

修订批准页:

1

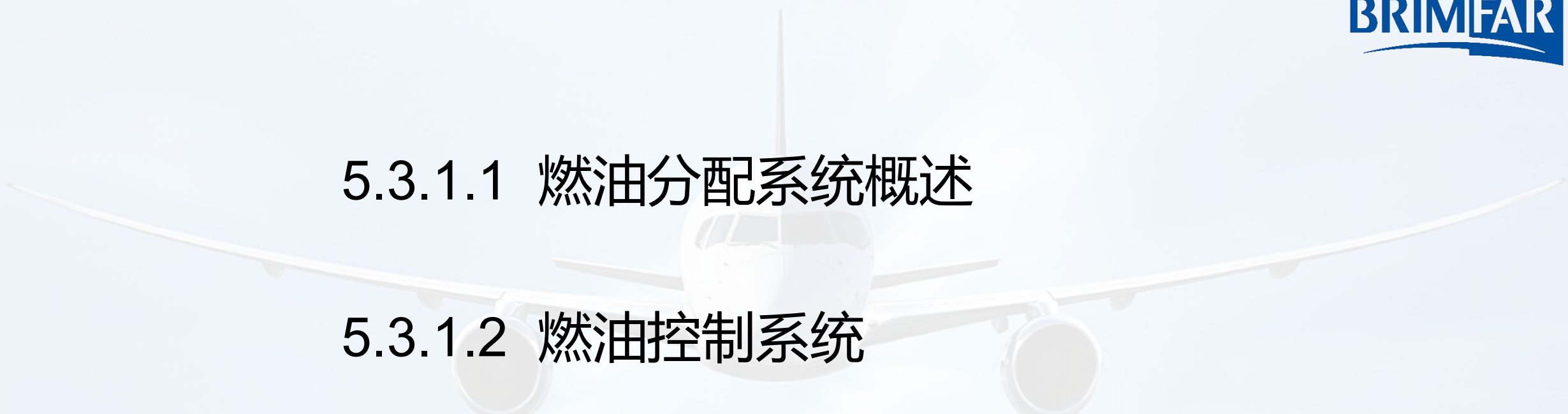
版次	修订时间	编写/改版	修订说明	审核/时间	审批/时间
R0	2020.06.14	谈海军	新编课件	谈海军 2020.08.07	张玉 2020.08.11

目的与要求:

目的	通过本次课程的学习，掌握燃油分配系统概述，燃油控制系统，典型发动机燃油及控制系统维护介绍
要求	<ol style="list-style-type: none">1. 燃油分配系统的作用、组成和工作2. 液压机械式控制、监控型电子控制和全权限数字式发动机控制 (FADEC)3. 典型发动机燃油及控制系统常见维护

课程安排:


序号	内容	等级	课时
1	燃油分配系统概述		2H
2	燃油控制系统		2H
3	典型发动机燃油及控制系统维护介绍		1H

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

5.3.1.1 燃油分配系统概述

5.3.1.2 燃油控制系统

5.3.1.3 典型发动机燃油及控制系统维护介绍

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

5.3.1.1 燃油分配系统概述

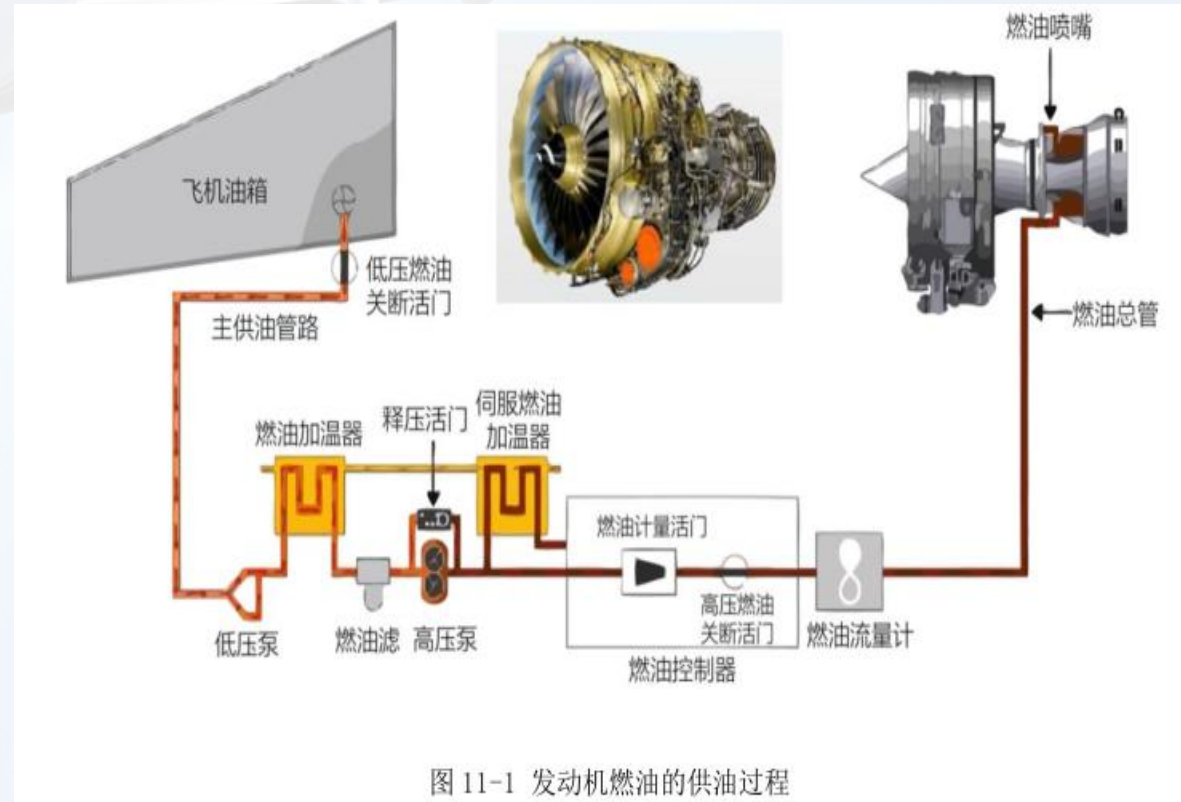
1 燃油分配系统

1.1 发动机燃油系统的功用

各工状，将清洁的、无蒸汽的、增压的、计量好的燃油供给发动机，同时向附件系统提供伺服压力燃油来操纵发动机附件

避免出现超温、超转、喘振、熄火和超扭

- 燃油泵
- 燃油加热器
- 燃油滤
- 燃油控制器
- 燃油流量计
- 燃油总管
- 燃油喷嘴



1.2 发动机燃油系统的主要部件

a. 燃油泵

增压

低压泵, 低压离心泵, 增压级, 给高压泵需流量和压力的燃油, 防止高压泵气蚀

高压泵 高压齿轮泵, 主级, 发动机的燃油系统提供所需的最终压力的燃油

供油

送到发动机燃油系统的燃油压力取决于飞机燃油系统, 飞机的增压泵有故障, 发动机的燃油系统应该能照常工作

b 燃油泵组件

到设定值打开，防止泵后压力过高，损坏下游部件和造成漏油

低压泵和高压泵一个壳体内，一根传动轴传动

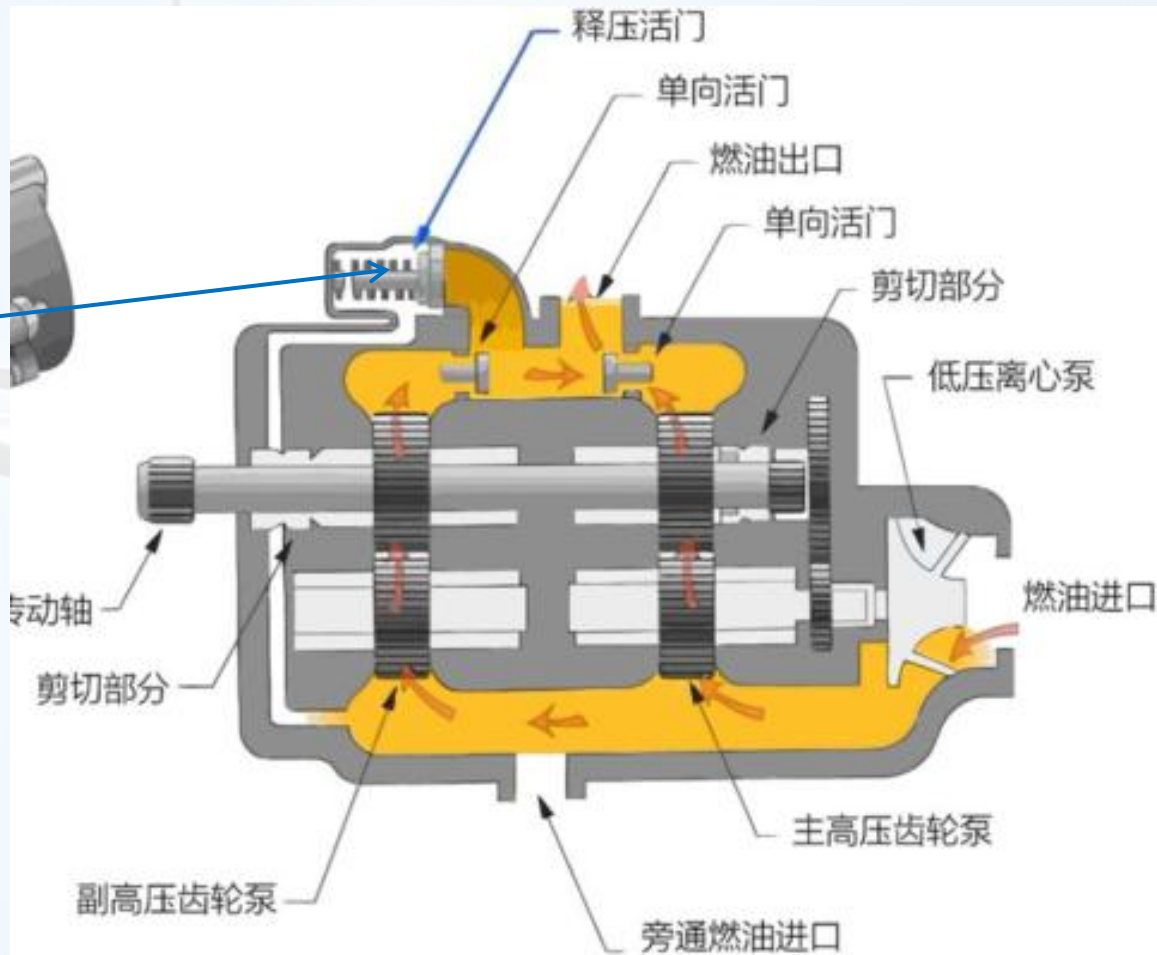
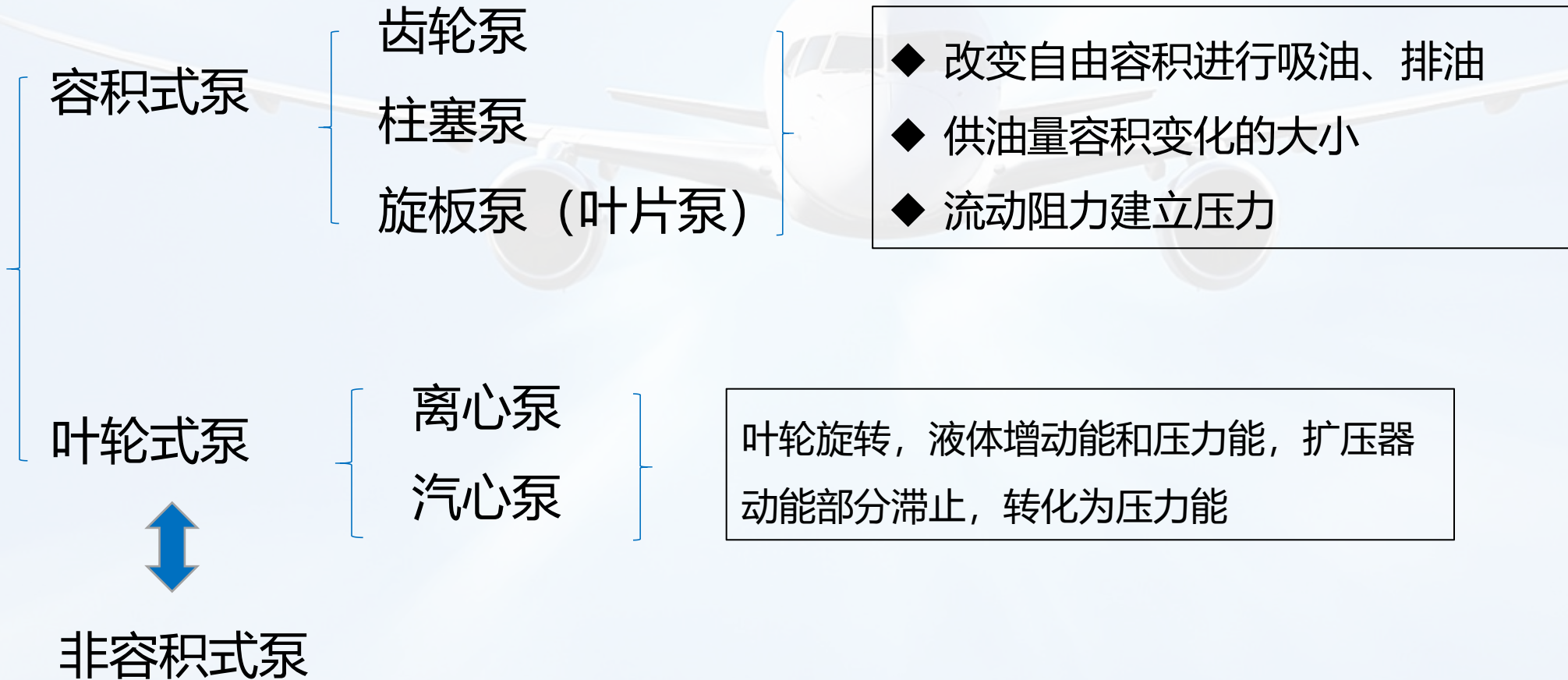


图 11-2 一种发动机驱动的燃油泵

c 油泵分类

油泵是一种将机械能转变为压力能的机械，供油增压原理分类



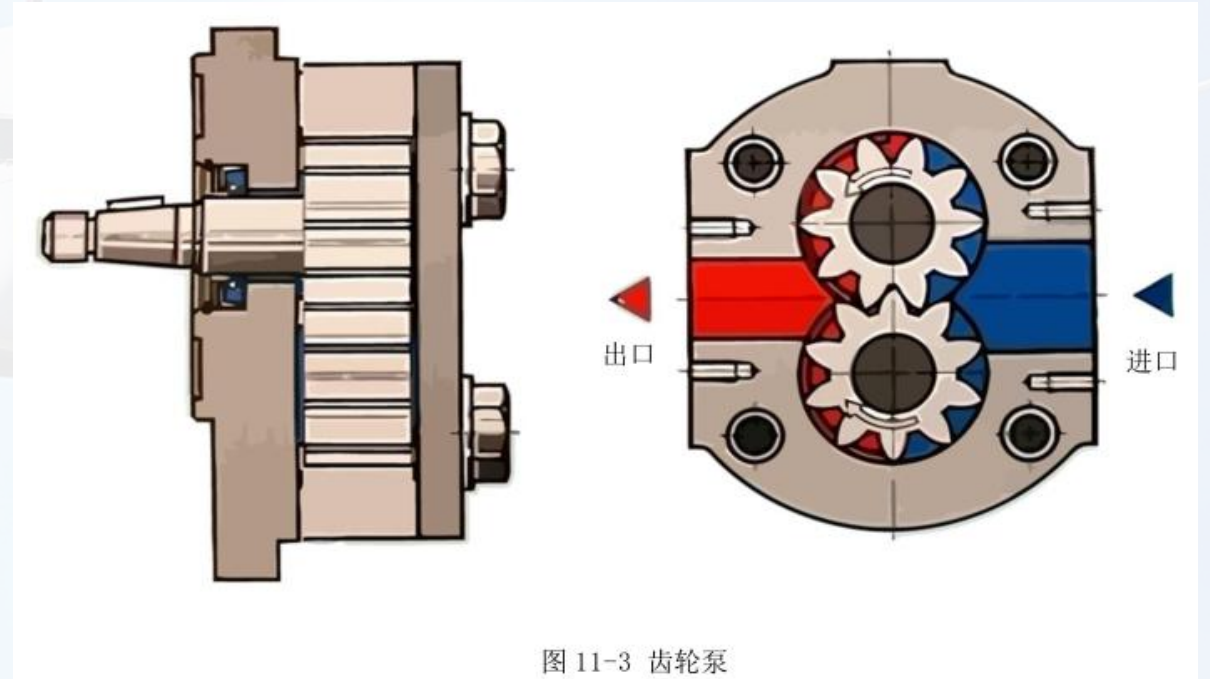
d 民航发动机泵

- ◆ 渐开线直齿外啮合齿轮泵
- ◆ 轴向倾斜式变量柱塞泵
- ◆ 旋板泵
- ◆ 离心泵

a) 齿轮泵

A 齿轮泵组成

- ◆ 尺寸相同外啮合齿轮
- ◆ 壳体
- ◆ 端盖
- ◆ 传动轴



B 齿轮泵定量泵特点

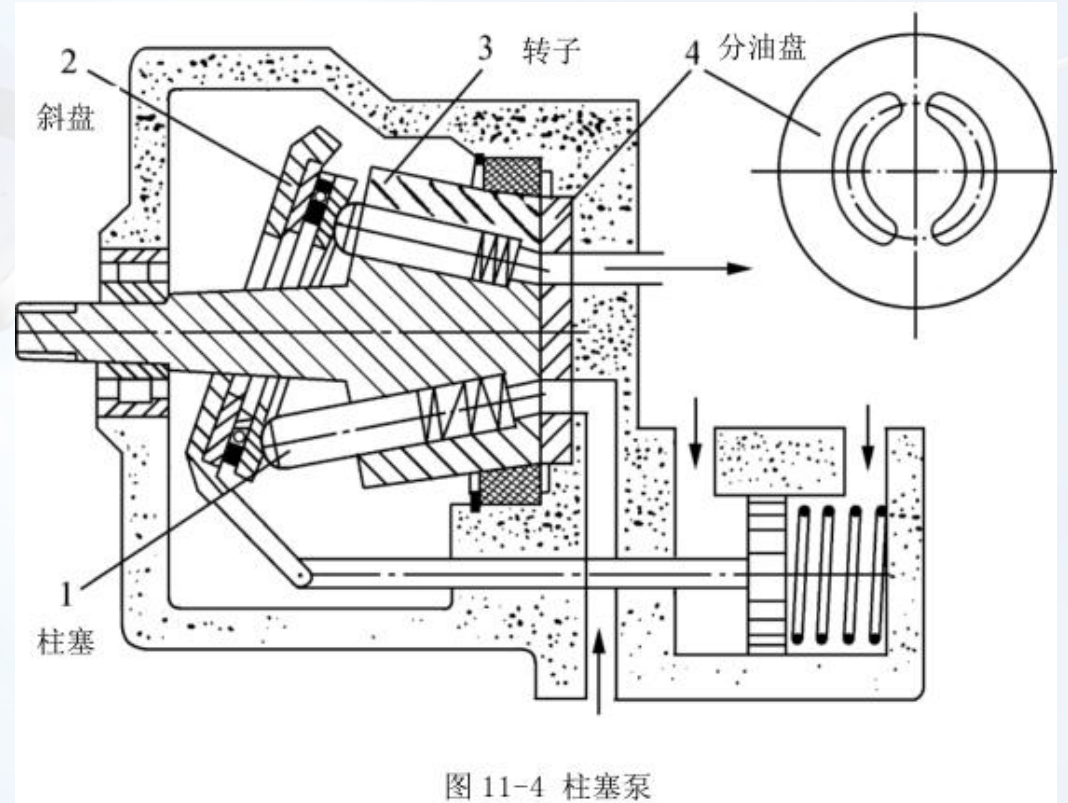
- 吸油过程：轮齿脱离啮合→容积变大→压力下降→实现吸油；
- 排油过程：轮齿进入啮合→容积变小→压力上升→实现排油
- ◆ 流量和转速对应关系。
- ◆ 转速不变时，供油量通过旁通回油调节（供油量高于需油量，油量返回油泵进口）

b) 柱塞泵

A 柱塞泵组成

- ◆ 柱塞
- ◆ 斜盘
- ◆ 转子
- ◆ 分油盘

- 周向均匀若干个柱塞孔腔
- 柱塞靠弹簧和油压顶在斜盘面上
- 转子旋转，转子小端面与分油盘贴合



B 柱塞泵特点

柱塞泵可以做成变量泵

供油量 {
◆ 转速
◆ 斜盘角度

- 吸油过程：柱塞伸出→容积变大→压力下降→实现吸油；
- 排油过程：柱塞缩回→容积变小→压力上升→实现排油

转速不变时，供油量通过改变斜盘角度调节

b 燃油滤

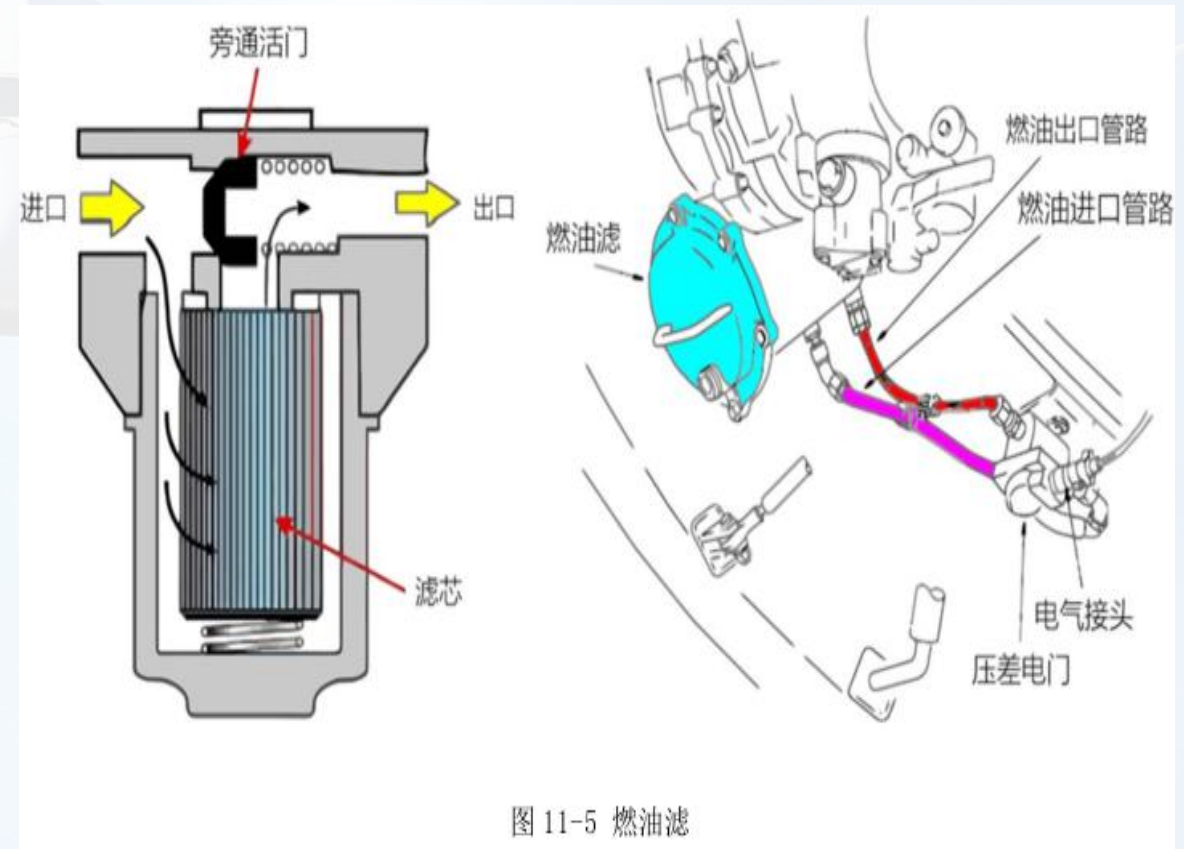
a) 燃油滤作用和分类

过滤燃油，保持燃油的清洁

- ◆ 粗油滤 进入喷嘴之前，过滤主燃油，防喷嘴堵塞
- ◆ 细油滤 过滤伺服油，一次性油滤，油滤堵塞后更换
 - 微米或者目，表示油滤的过滤度。
 - 目是每平方英寸的孔数

b) 燃油滤组件部件

- ◆ 滤芯
- ◆ 旁通活门 燃油不会中断
- ◆ 堵塞指示器或压差电门 指示信息



c 燃油加温器

a) 燃油加温器作用和方法

加温燃油，防止结冰堵塞油路

- 方法
- ◆ 热滑油
 - ◆ 压气机引气

b) 燃油加热器

- ◆ 7根铝合金管（U型）和7块隔板。
- ◆ 7块隔板形成迂回流动路径
- ◆ 燃油在铝合金管内流动；
- ◆ 滑油管外部流动，
- ◆ 进出口压力差达到一定值时，旁通活门打开，直接流出

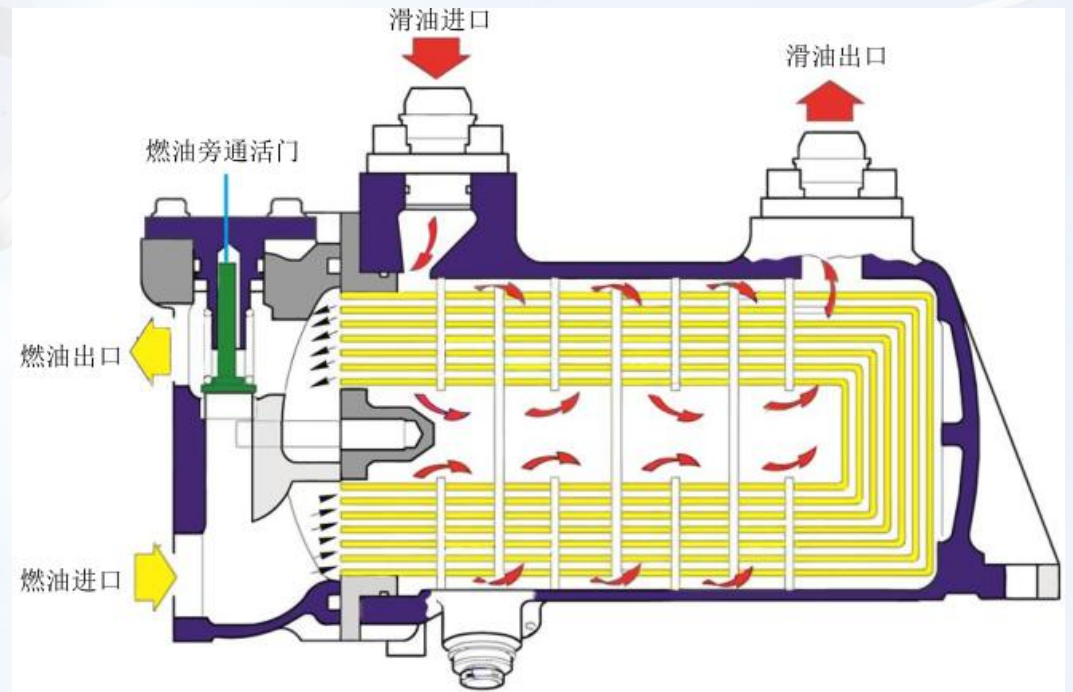


图 11-6 燃油/滑油热交换器

d 其他燃油部件

燃油控
制器功
用是

◆ 动力油控制作动器和活门

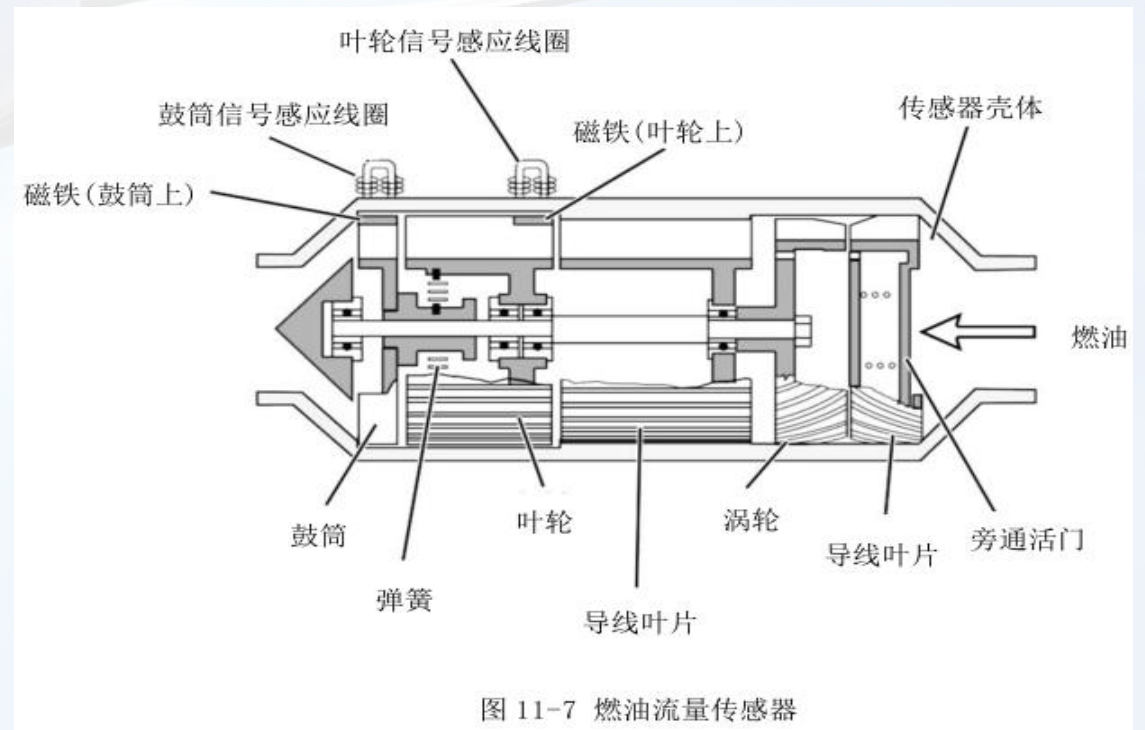
◆ 计量燃油

涡轮流量传感器

测量涡轮转速间
接测流量

a) 燃油流量传感器工作原理

- ◆ 传感器中涡轮通过轴驱动鼓筒
- ◆ 叶轮用弹簧与传动轴连
- ◆ 鼓筒与叶轮装磁铁，传感器壳体有感应线圈。
- ◆ 磁铁转至线圈处产生脉冲信号
- ◆ 弹簧的延迟效应，叶轮晚于鼓筒磁铁到线圈处，产生相位差
- ◆ 相位差的大小与涡轮转速成正比，而涡轮转速又与燃油得质量流量成正比，
- ◆ 通过测量脉冲电信号的相位差则可测量燃油流量工作原理



b) 燃油分配活门

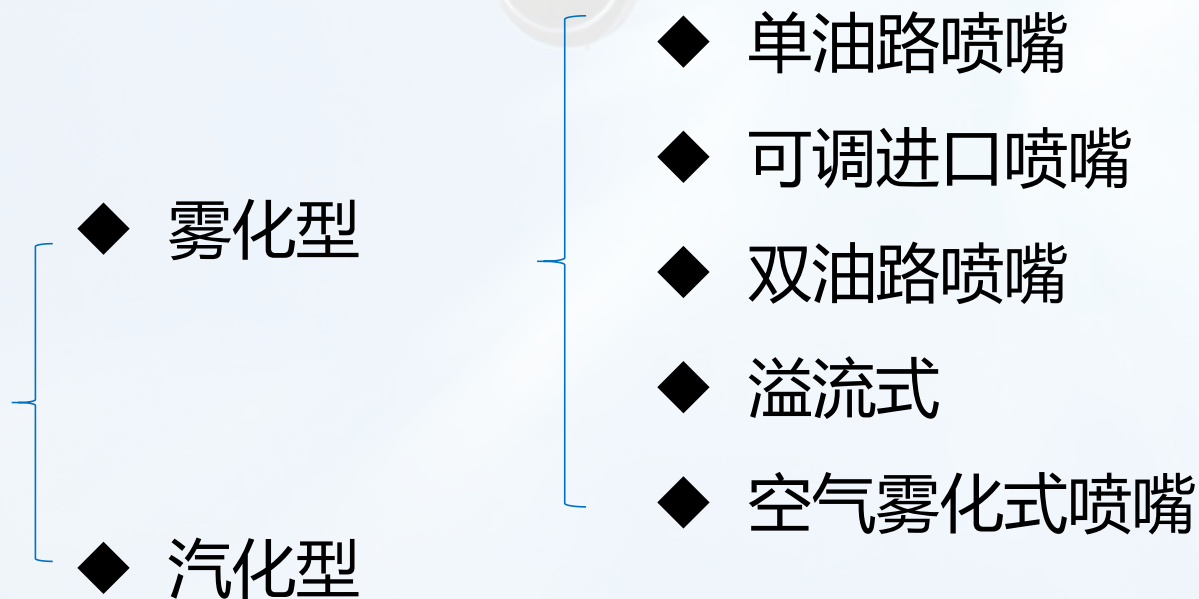
经燃油总管将计量好的燃油分送到各个燃油喷嘴

各流量下喷嘴都有良好的雾化

- ◆ 低流量，部分喷嘴工作
- ◆ 高流量，所有喷嘴工作

c) 燃油喷嘴

燃油喷嘴的基本功能是使燃油雾化或汽化，以保证燃油快速燃烧，燃油喷嘴另一种空气喷雾原理，高速空气取代高速燃油来雾化，在低的燃油流量下使燃油雾化。



A 单油路喷嘴

- ◆ 一个内腔，使燃油产生漩涡
- ◆ 一个固定面积的雾化孔
- ◆ 较高流量，良好的雾化
- ◆ 低转速和高空油压较低，喷嘴不适

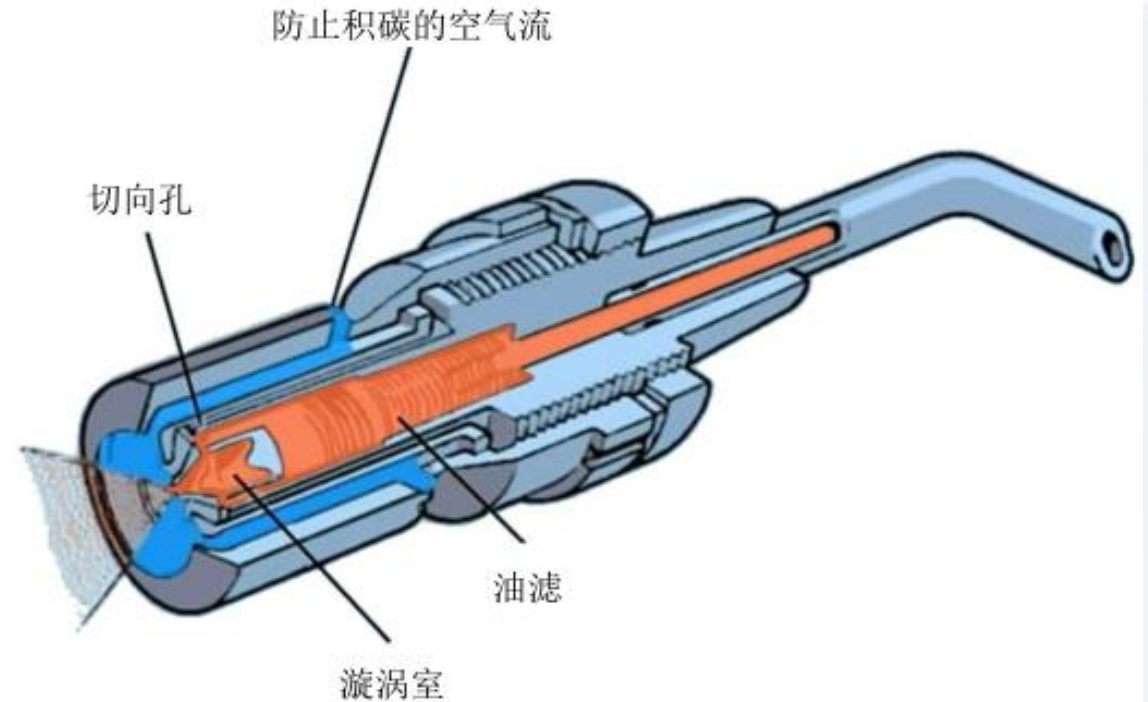
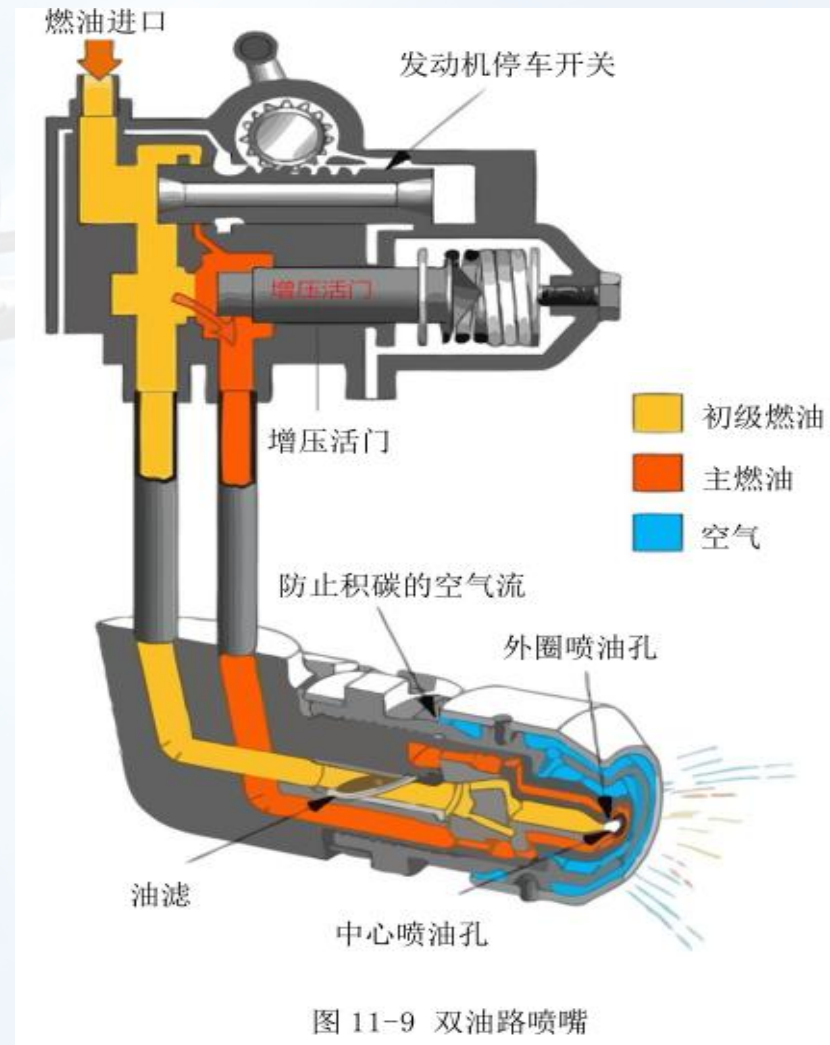


图 11-8 单油路喷嘴

B 双油路喷嘴

- ◆ 初级和主燃油总管
- ◆ 两个孔，一个大一小很多。小的低流量，大的高流量
- ◆ 增压活门分配燃油到不同的总管
- ◆ 双油路喷嘴较宽流量范围有效雾化。高空低燃油流量时，也有效的雾化



C 空气雾化喷嘴

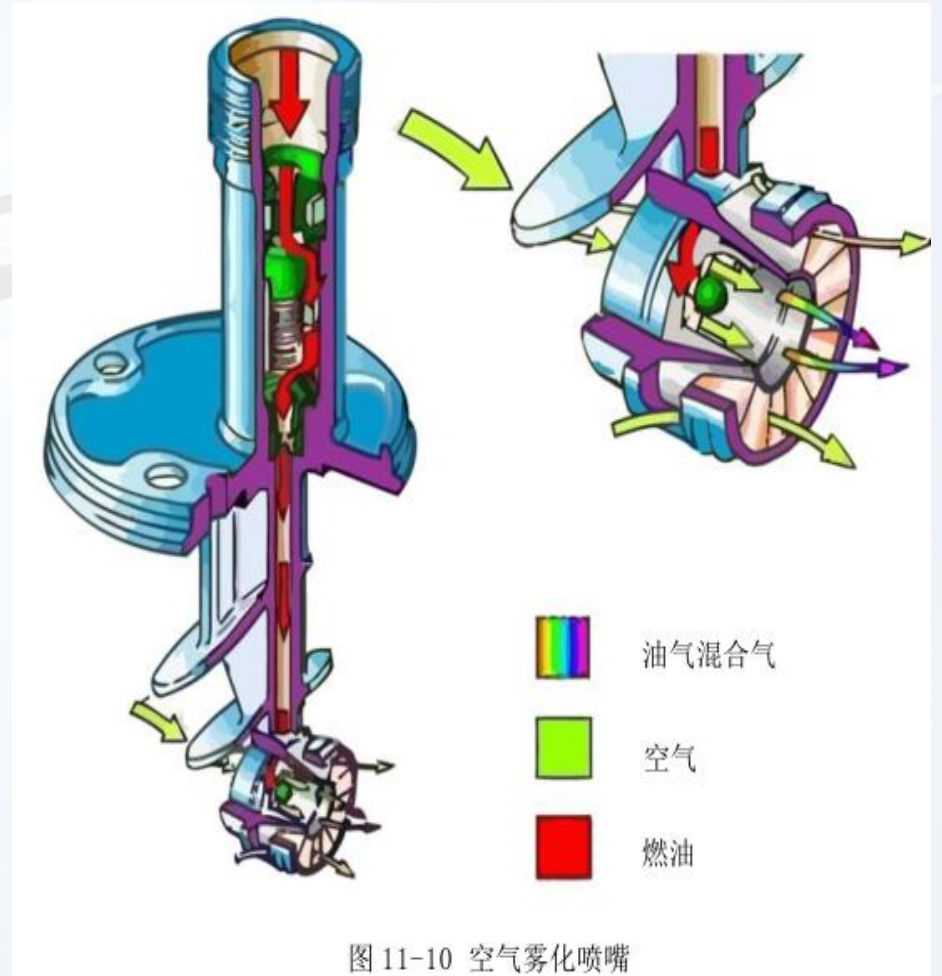
空气雾化喷嘴喷出的是油气混合气

优点

- ◆ 油气混合均匀
- ◆ 避免了局部富油
- ◆ 减少积碳的形成
- ◆ 减少排气冒烟
- ◆ 不要求很高的供油压力
- ◆ 较宽的转速范围，出口温度分布比较均匀。

缺点，启动时

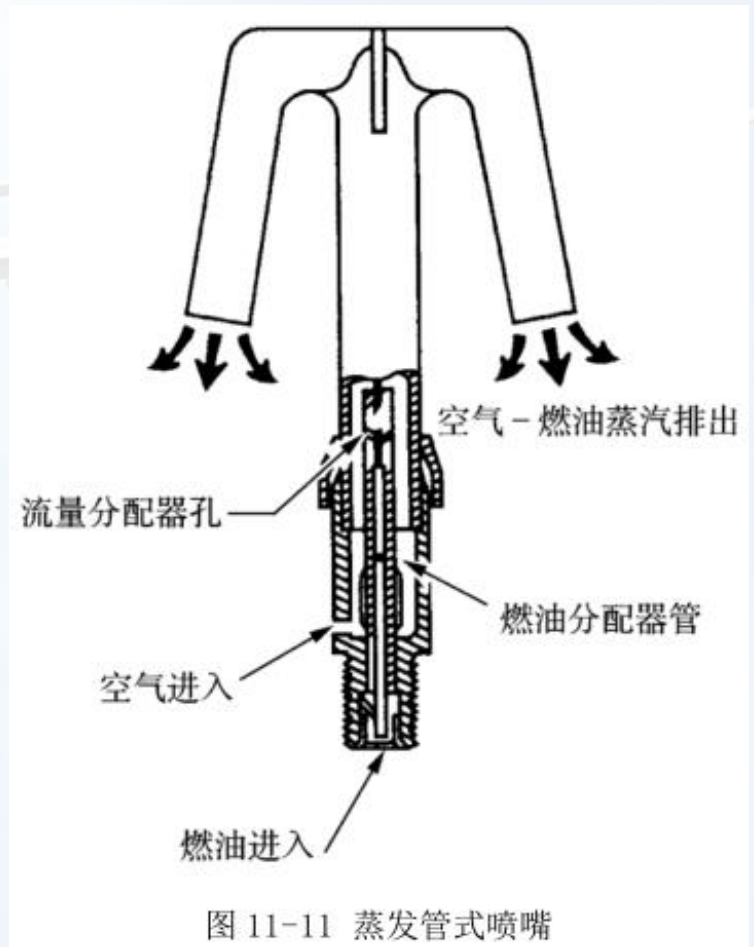
- ◆ 气流速度较低
- ◆ 压力较小
- ◆ 造成雾化不良



D 蒸发管式喷嘴

特点

- ◆ 燃油在蒸发管内汽化并与空气混合，燃烧稳定，
- ◆ 启动时仍然需要雾化喷嘴



E 喷嘴内有单向活门

- ◆ 为防止停车后，燃油从喷嘴滴出形成积炭，
- ◆ 喷嘴内有单向活门，
- ◆ 停车关断燃油，总管压力降低，单向活门关闭

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

5.3.1.2 燃油控制系统

2.1 发动机控制的基本方面

a 控制概念

◆ 稳态控制

人工指令不变的情况下，对外界干扰引起的发动机状态变化，能消除干扰的影响，保持既定的发动机稳定工作点不变的控制功能，如恒速控制

◆ 过渡控制

人工指令改变的情况下，控制发动机从原有工作状态，平稳、快速、准确地过渡到所选定的新的工作状态，如加速控制

◆ 安全限制

各种工作状态和全部的飞行条件下，保证发动机主要参数不超出安全范围，如燃油控制器确保发动机转速改变期间没有超温、超转、压气机失速、燃烧室熄火等

b 发展阶段

- ◆ 供油太多，燃烧后的温度太高**烧坏涡轮**，或者富油熄火
- ◆ 供油太少，出现贫油熄火

发展经历了三个阶段

- ◆ 传统的液压机械式控制
- ◆ 监控型电子控制
- ◆ 现代的全功能数字式发动机控制 FADEC
(Full Authority Digital Engine Control)

2.2 液压机械式控制

a 主要功用

曾是使用最多的控制器，良好的使用经验和高可靠性

主要功用

- ◆ 感受各种参数，按要求，供应燃油，产生推力
- ◆ 操纵控制发动机的可变几何形状，VSV，VBV，保证发动机稳定工作和提高发动机的性能

b 部件

液压机械式

液压油源为伺服油

- 凸轮
- 杠杆
- 滚轮
- 弹簧
- 活门

气动机械式

压气机空气伺服介质

- 薄膜
- 膜盒
- 连杆

c 液压机械式组成

组成部分

计算系统：感受各种参数，所有工段控制计量部分的输出；

计量系统：按照要求的推力，发动机工作状态和飞机状态，在工作限制之内，依据计算的流量供应燃油

d 计量活门

$$q_m = \mu A \sqrt{2\rho\Delta p}$$

- ◆ 节流面积和前后压差
- ◆ 面积成正比，与压差的平方根成正比
- ◆ 压差不变，供油量计量活门的流通面积有关
- ◆ 压力调节活门中，双金属式的温度敏感元件，温度补偿器，补偿燃油温度变化对供油量的影响

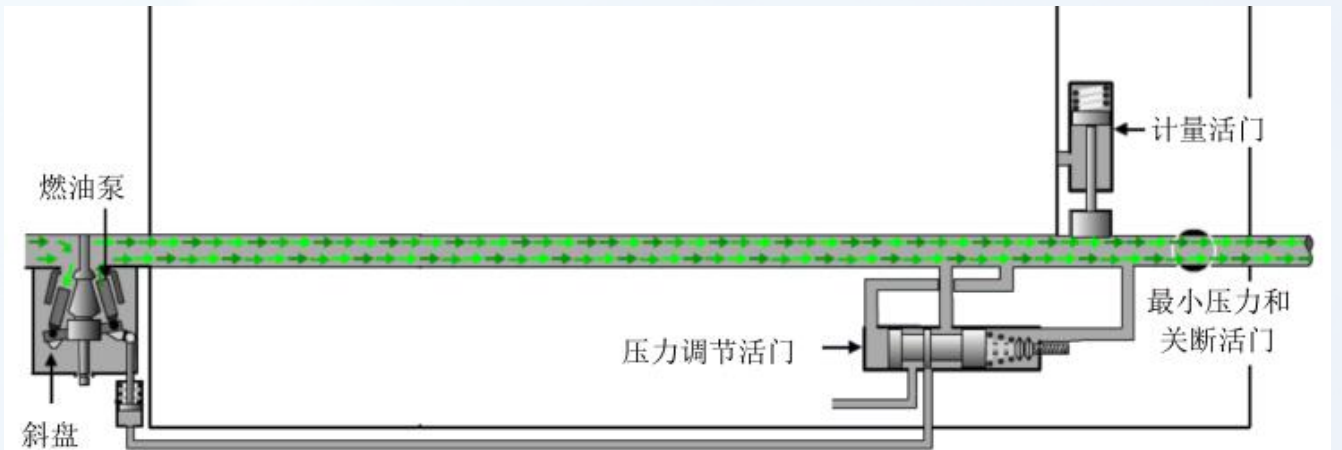


图 11-13 燃油计量原理

b 民航发动机常用燃油控制器的共同特点:

- ◆ 燃油泵通常有齿轮泵（包括增压级和主级）、柱塞泵和叶片泵
- ◆ 控制器一般分为计算部分和计量部分
- ◆ 改变燃油流量通过改变计量活门的流通面积和前、后压差
- ◆ 转速调节器通常实施闭环转速控制
- ◆ 一些燃油控制器采用三维凸轮作为计算元件
- ◆ 最小压力和关断活门 增压活门作用正常工作所需的最低压力；发动机停车时，活门关闭，切断供油
- ◆ 风车旁路活门及油泵卸荷活门 发动机工作时，风车旁路活门关闭（不卸荷），燃油压力上升，打开最小压力活门向燃油总管供油；在发动机停车时，该活门打开，使油泵卸荷活门处于卸荷状态，给处于风转状态下的发动机所驱动的油泵卸荷
- ◆ 进入燃油控制器的高压油，先经燃油滤过滤

2.3 监控型电子控制

a 发展原因

- ◆ 需要监视和控制的参数越来越多，控制回路不断增加
- ◆ 提高飞机、发动机的性能，对发动机控制的精度要求也越来越高
- ◆ 发动机控制和飞机系统之间联系的增加以及状态监视、故障诊断等功能的扩充，飞机和发动机一体化控制的水平要求不断提高。

传统缺陷

- ◆ 计算的参数是很有限的
- ◆ 增加控制参数，重量、体积、成本增加，还难以实现

b 组成

监控型电子 控制器

- ◆ 液压机械式控制器 主控制器负责发动机的完全控制，包括启动、加速、减速控制，转速控制
- ◆ EEC Electronic Engine Controller 监督能力 对推力进行精确控制，并对发动机重要工作参数进行安全限制，便于同飞机接口，易于推力管理，状态监视，信号显示和数据储存

◆ CFM56-3, 主控制器MEC (Main Engine Controller) 和PMC (Power Management Controller)

◆ RB211-535 , 燃油流量调节器 FFG (Fuel Flow Governor) 与发动机电子控制器

EEC

c 监控型电子控制器的特点：

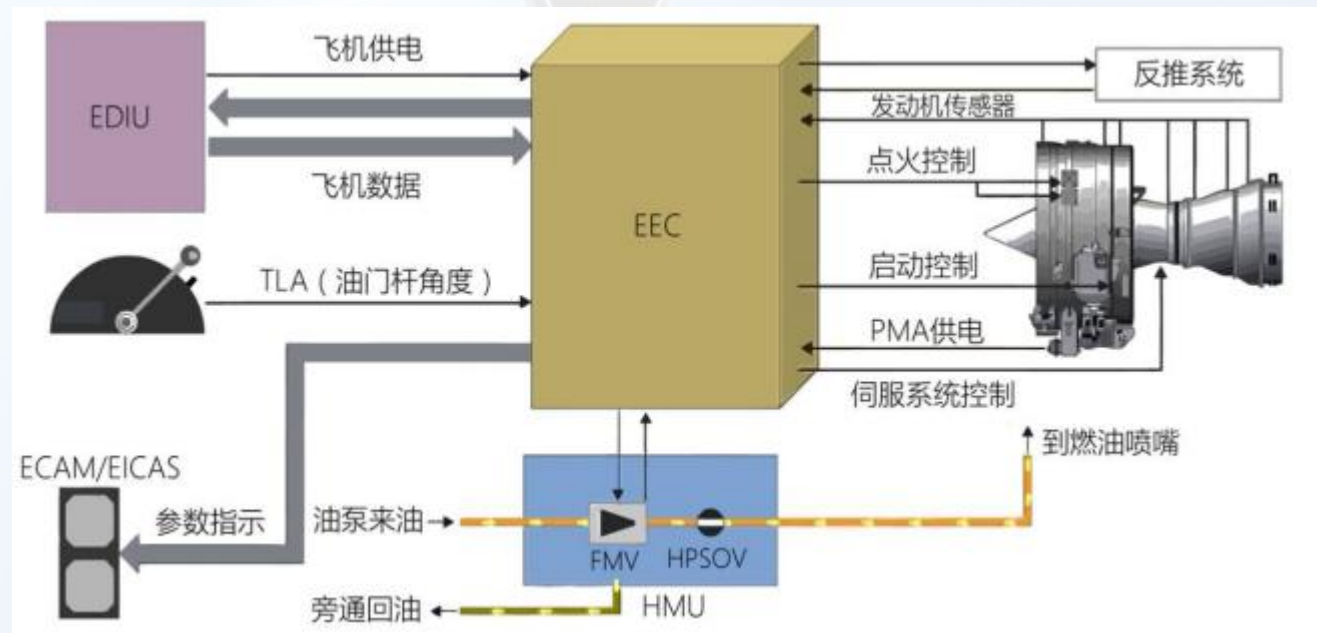
- ◆ 液压机械式燃油控制器是主控制器，电子控制器是辅助控制器
- ◆ EEC 通过力矩马达与液压机械控制器联系，实现电/液转换。
- ◆ EEC故障，冻结在当时位置，使EEC 退出工作，由液压机械式控制器恢复全部控制。
- ◆ 多数的液压机械控制器的供油计划高于EEC的供油计划，EEC减少液压机械控制器的供油达到目标值，即称下调
- ◆ EEC 参与工作时，外界变化，可以精确保证选定的目标值
- ◆ EEC有自检能力（BITE）
- ◆ E E C 一般装在风扇机匣外侧，有减震，空气冷却。也有的EEC位于飞机电子设备舱。
- ◆ EEC由专用发电机，飞机电源备用电源及地面试验电源。

2.4 全功能数字式发动机控制 Full Authority Digital Engine Control

a. FADEC 的组成及作用

- ◆ (EEC) 或 (ECU) **核心部件**
- ◆ (FMU) 或 (HMU) **执行机构**
- ◆ 传感器、作动器、活门、发电机和互连电缆等

控制计算由计算机进行，通过电液伺服机构输出控制液压机械装置及各个活门、作动器



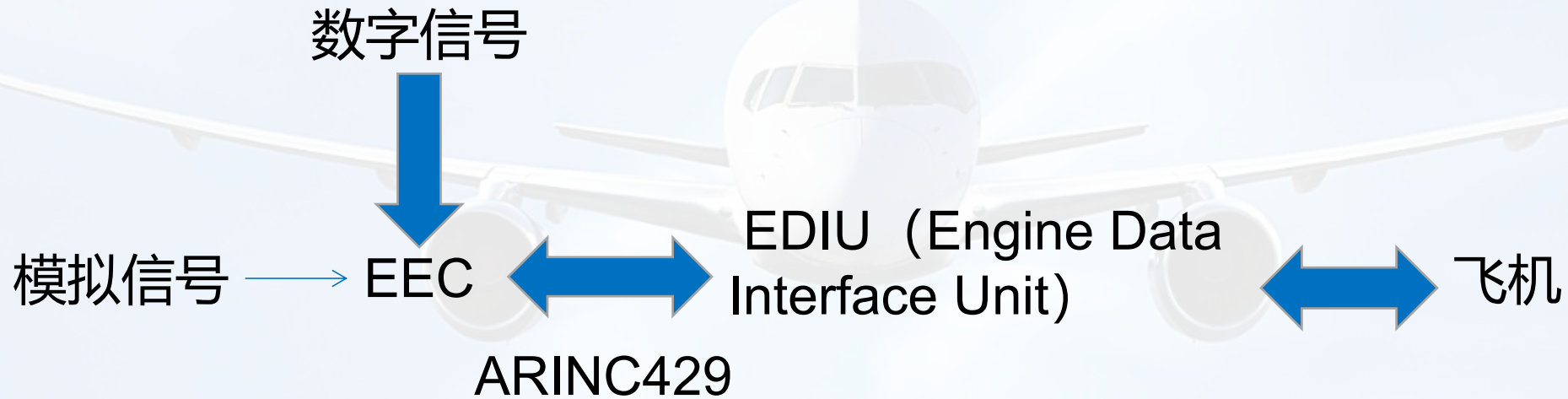
b 典型 HMU 的具体功能

- ◆ 液压机械式控制器作为主控制器，负责发动机的完全控制，包括起动、加速、减速控制，转速控制
- ◆ 发动机电子控制器具有监督能力，对推力进行精确控制，并对发动机重要工作参数进行安全限制
- ◆ 电子控制便于同飞机接口，易于推力管理，状态监视，以及信号显示和数据储存

具体功能

- ◆ 计量燃油流量
- ◆ 限制最大、最小供油量
- ◆ 最低燃油压力
- ◆ 停车时切断燃油
- ◆ 风转状态下给油泵卸荷
- ◆ 发动机超转保护
- ◆ 提供高压油、伺服油到发动机控制附件等

c 数据通信



EEC 可以把输入的模拟信号转换为数字信号，同时 EEC 也可以把数字信号转换为模拟信号操纵电动液压伺服机构、电磁活门以及供给驾驶舱显示

d 发动机电子控制器 EEC

- ◆ 双通道计算机
- ◆ 铝制外壳
- ◆ 右侧2点钟位置（后向前）
- ◆ 冲压空气流过 EEC 内部腔室，
从冷却空气出口排出

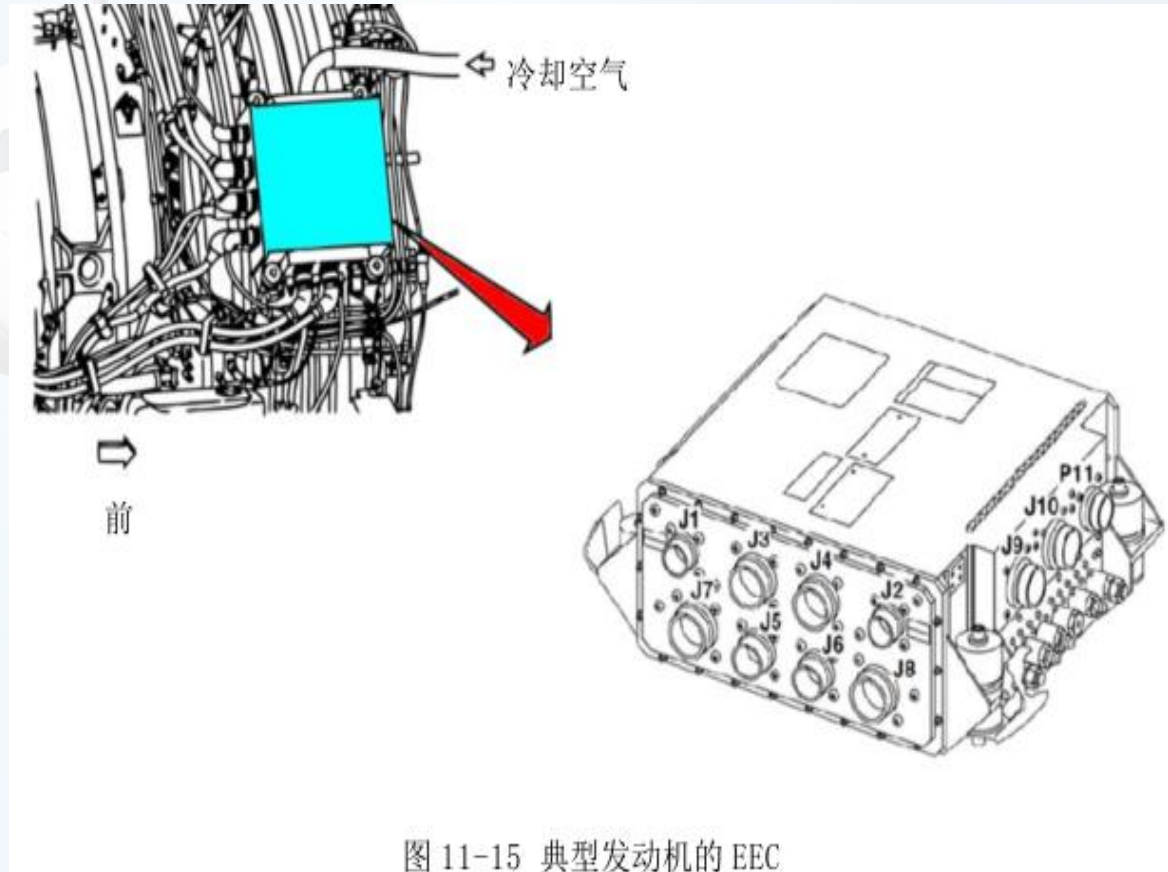


图 11-15 典型发动机的 EEC

e 液压机械装置HMU Hydro-Mechanical Unit

a) HMU作用

- ◆ 把 EEC 输出的电信号转换成液压信号并对其进行液压放大
- ◆ HMU 由于型号不同，配置的发动机不同，安装位置也略有不同
- ◆ HMU 执行 EEC 命令计量供给发动机的燃油流量，执行驾驶员指令供应燃油和切断供油，并向发动机相关部件提供伺服油

b) CFM56-7B 发动机的HMU

- ◆ EEC数据到HMU， EEC 控制 HMU 中的力矩马达 FMV 位置。
- ◆ FMV 解算器将 FMV 位置信号返回到 EEC， 燃油流过打开的FMV使得 HPSOV 打开。 FMV 控制燃油流量， 多余的燃油通过旁通活门返回到热交换器的进口。
- ◆ 把EEC输出的电信号转换成液压信号并对其进行液压放大

c) CFM56-7B 发动机的HMU部件

- ◆ FMV (Fuel Metering Valve)
- ◆ TBV(Transient Bleed Valve)
- ◆ HPTACCV (High Pressure Turbine Active ClearanceControl Valve);
- ◆ LPTACCV(Low Pressure Turbine Active ClearanceControl Valve)
- ◆ 可调放气活门VBV;
- ◆ 可调静子叶片VSV

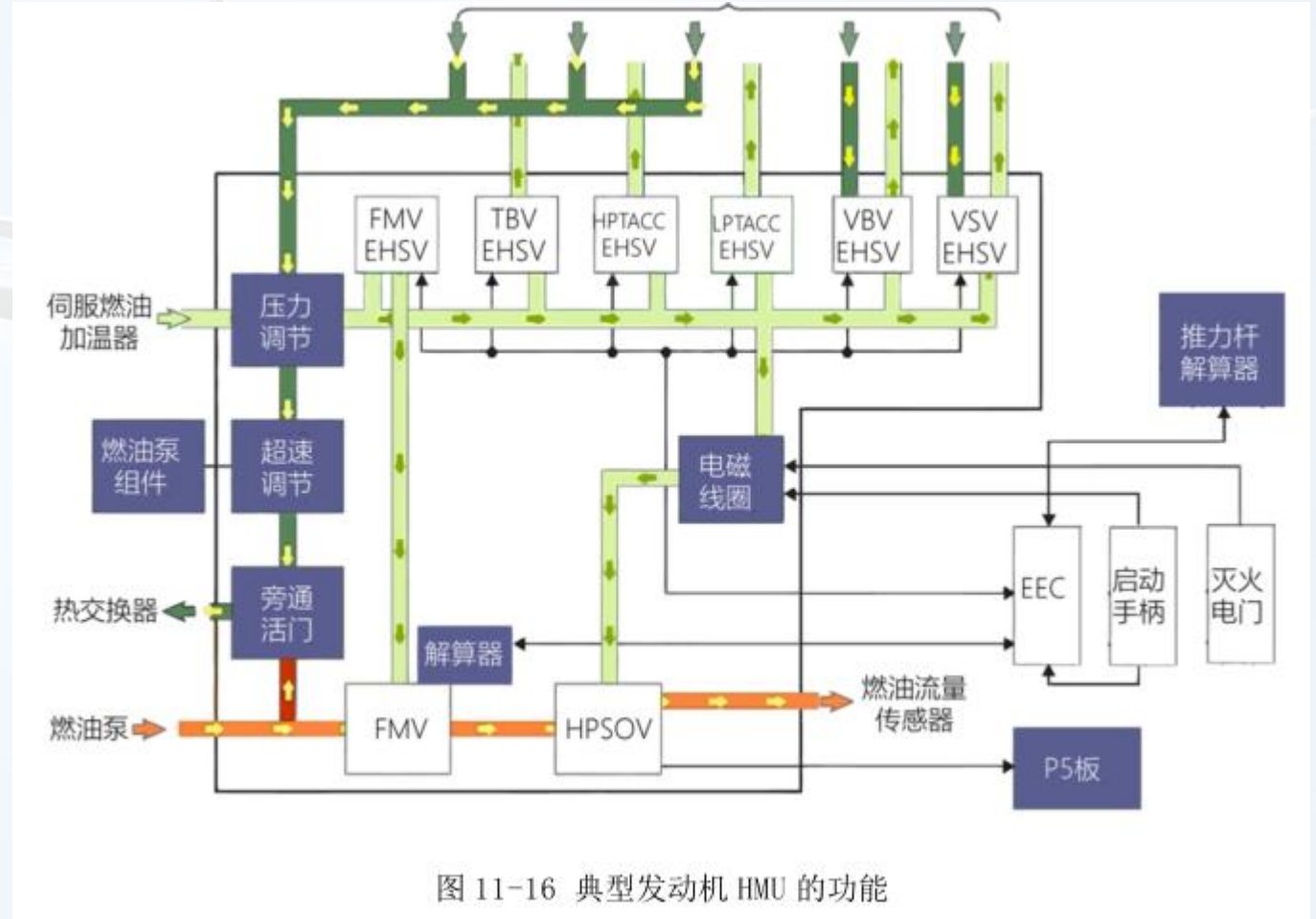


图 11-16 典型发动机 HMU 的功能

d) HPSOV关断

- ◆ 当将起动手柄移动到停车位置时，控制电磁活门导通，伺服燃油压力关闭 HPSOV
- ◆ 灭火手柄电门也能接通控制电磁活门
- ◆ HPSOV 关闭时，燃油停止流向燃油喷嘴

可以排故，关车燃油不断

f . FADEC 的工作特点

- ◆ FADEC 容错系统，余度控制。不重要故障，可继续工作
- ◆ EEC双通道，一个 A，另一 B，之间可以相互通信
- ◆ 两个通道相同并持久工作的，但两个通道之间相互独立，但只有一个通道处于控制状态
- ◆ 控制器自动切换到备用系统
- ◆ 都不能控制发动机某一系统时，自动换为失效—安全模式，从而保证飞机或发动机处于最安全状态
- ◆ EEC 通常实施闭环控制 EHSV {
 - 控制计量活门开度
 - 改变计量活门的流通面积

a) 跨通道数据链 CCDL作用

- ◆ 其中的一个通道的一些重要输入信号有故障，两个通道仍然保持正常工作；
- ◆ 跨通道数据链也可以使EEC比较输入信号，平均误差

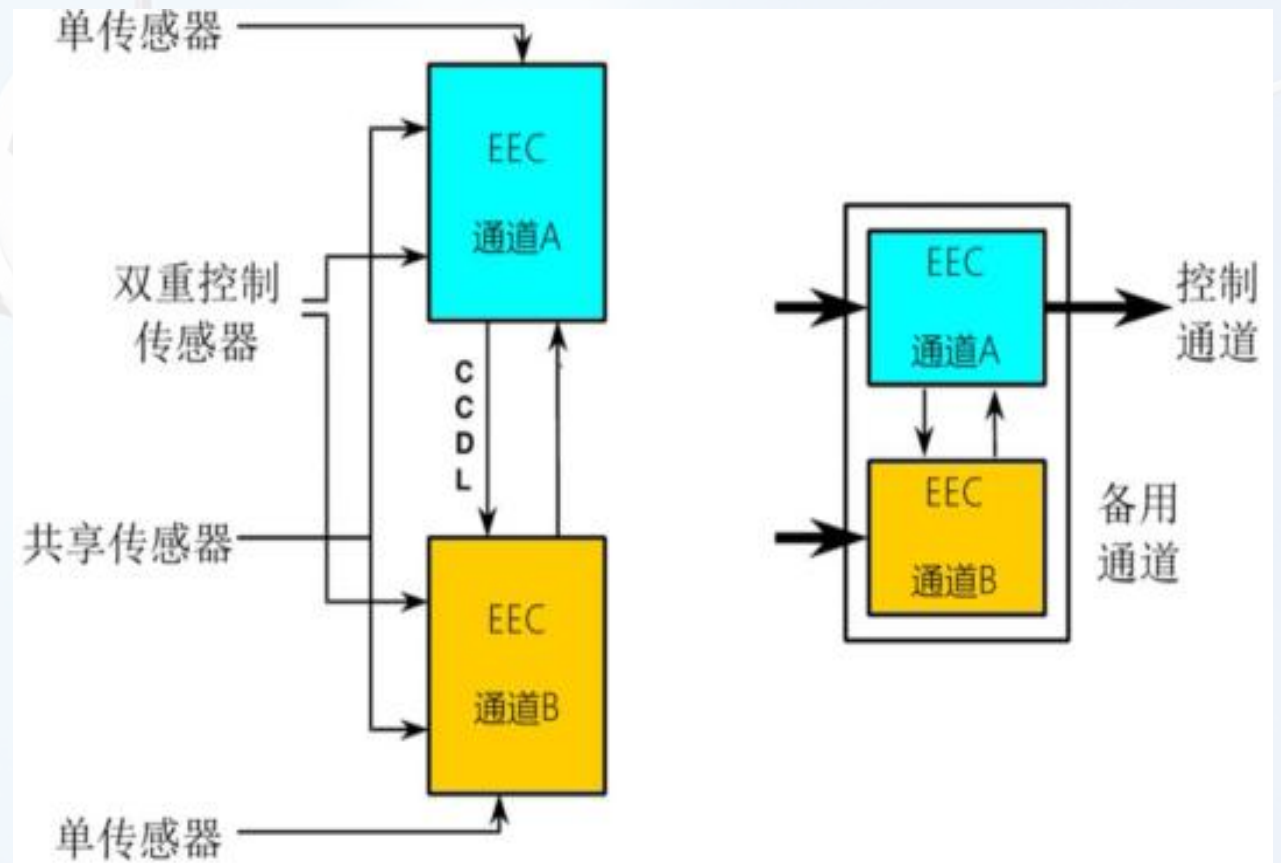


图 11-17 FADEC 的系统设计

b) EEC 通常实施闭环控制

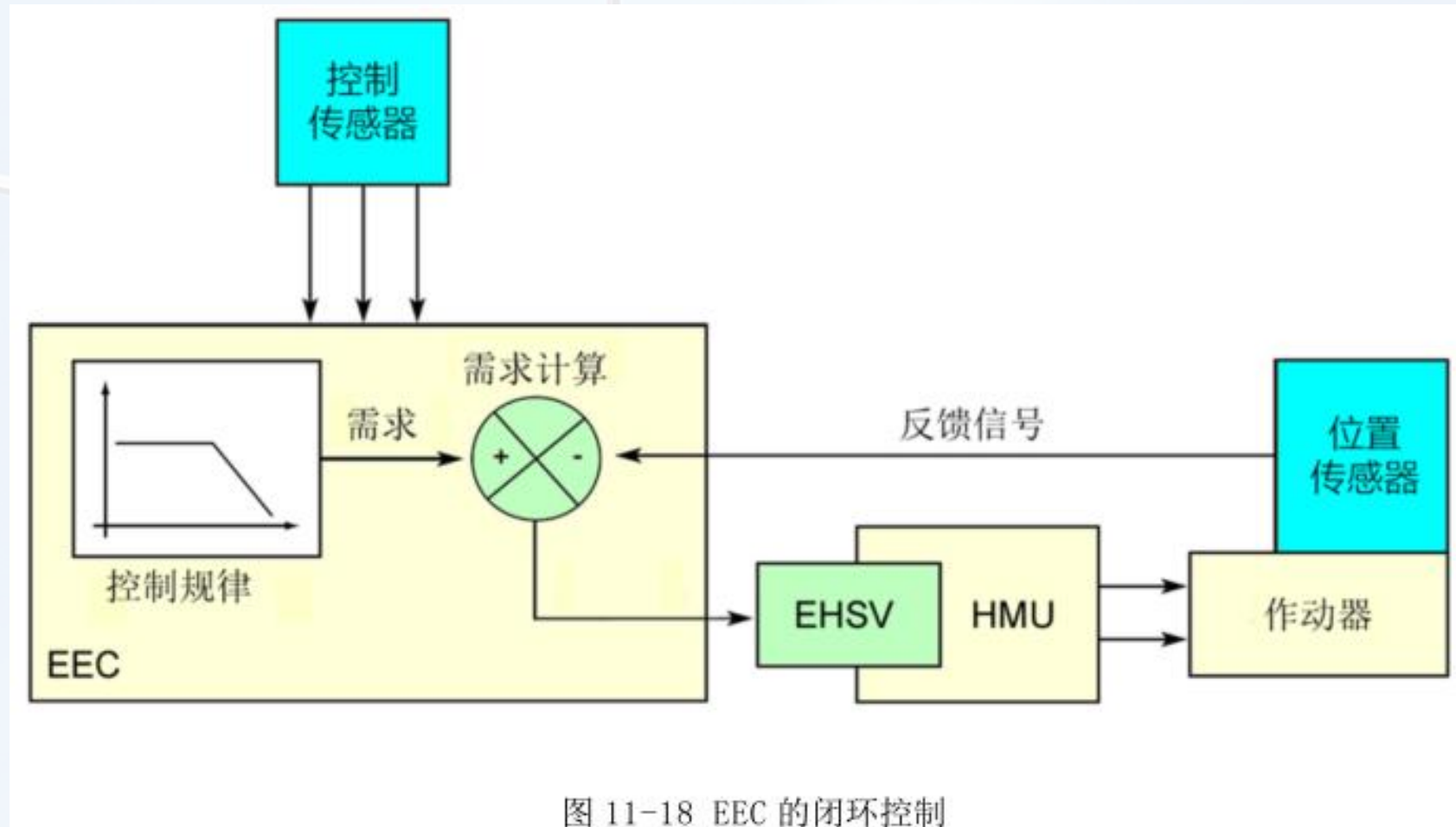


图 11-18 EEC 的闭环控制

c . FADEC 的优点

- ◆ 提高发动机性能
- ◆ 降低了燃油消耗
- ◆ 减轻了驾驶员负担
- ◆ 提高了可靠性
- ◆ 改善了维护性
- ◆ 为发动机控制发展提供潜力
- ◆ 能复杂的计算，实现各个部件的最佳控制

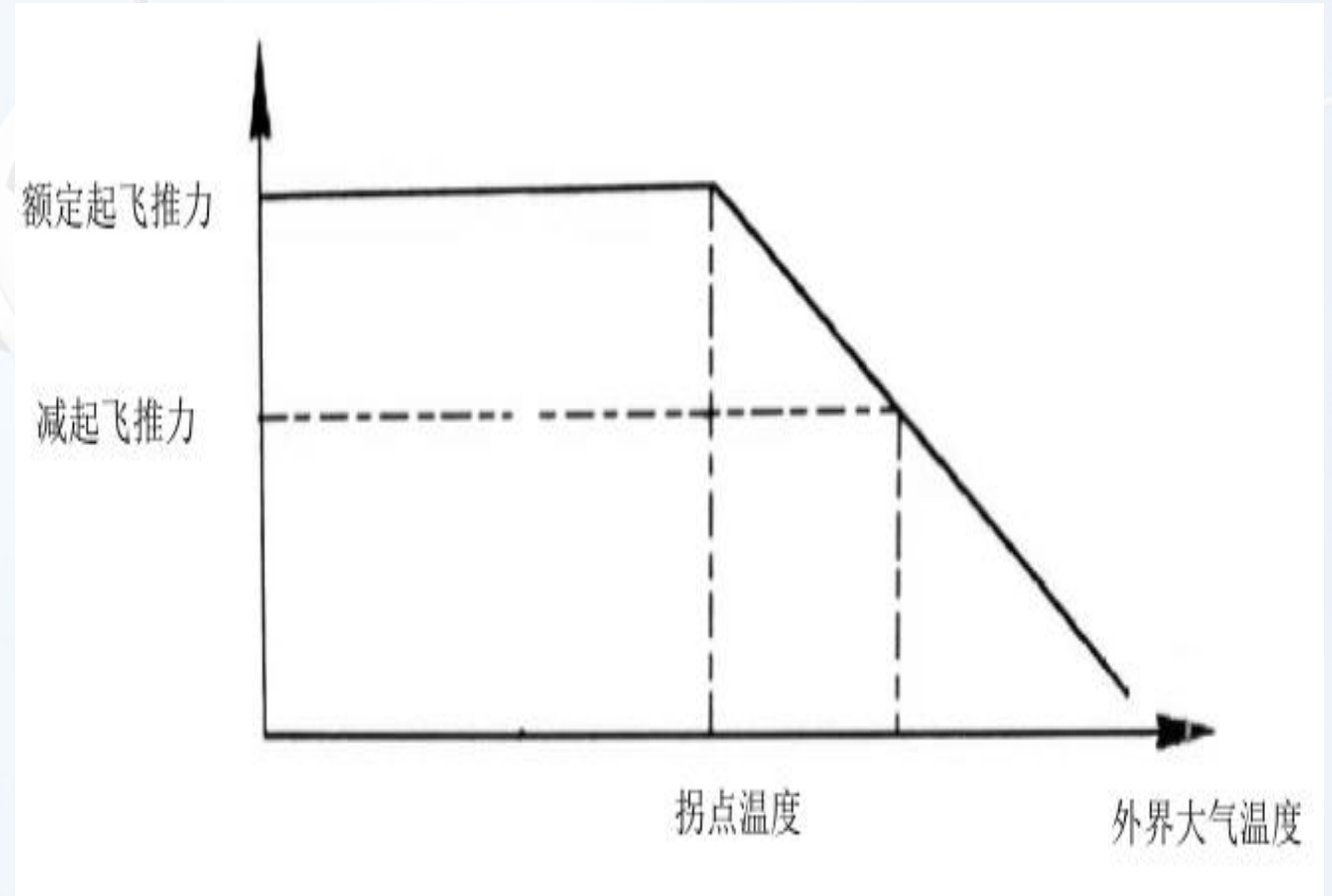
2.5 减推力起飞

a 几种起飞推力对比

额定起飞推力	减额定起飞推力	减起飞推力（灵活起飞推力）
发动机在不超过型号审定中的工作限制条件下，批准的起飞推力	把起飞推力额定比最大起飞推力低的级别，它是该发动机减额定后，起飞时所能产生的最大推力	起飞推力低于减额定起飞推力的推力
发动机识别塞输给EEC的	飞行手册中有规定的起飞限制和性能数据	起飞，随时取消减推力选择起飞推力
		1 定减推力 规定好了减推力的多少 2 输入假想温度 假想的、比实际大气温度高且高于拐点温度的温度

b 灵活起飞推力

控制系统按照额定平功率控制曲线控制发动机起飞推力时，得到如图的减起飞推力，按此推力控制供油，实际大气温度没有这样高，相应的排气温度就会下降



c 减推力起飞特点

- ◆ 延缓发动机和热端部件在翼寿命,
- ◆ 降低维修成本节约燃油

减推力起飞限制

- ◆ 最多减少推力到额定推力的 75%，以确保飞行安全
- ◆ 应定期检查发动机的全功率起飞能力

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

5.3.1.3 典型发动机燃油及控制系统维护介绍

3.1 典型发动机燃油及控制系统的部件识别



图 11-20 电子控制器



图 11-21 燃油计量组件

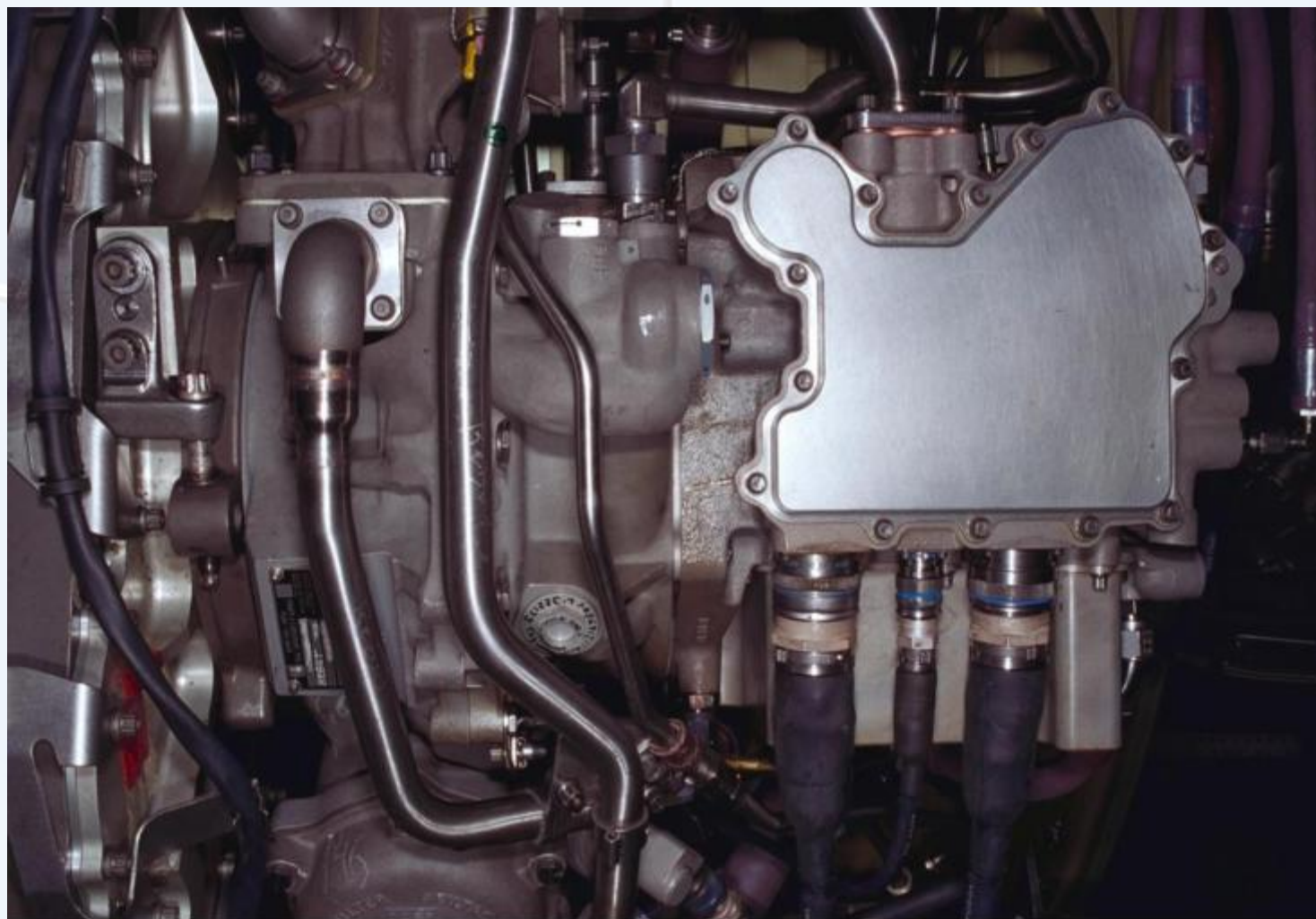


图 11-22 燃油泵组件和液压机械装置

图 11-25 燃油喷嘴



图 11-23 燃油滤

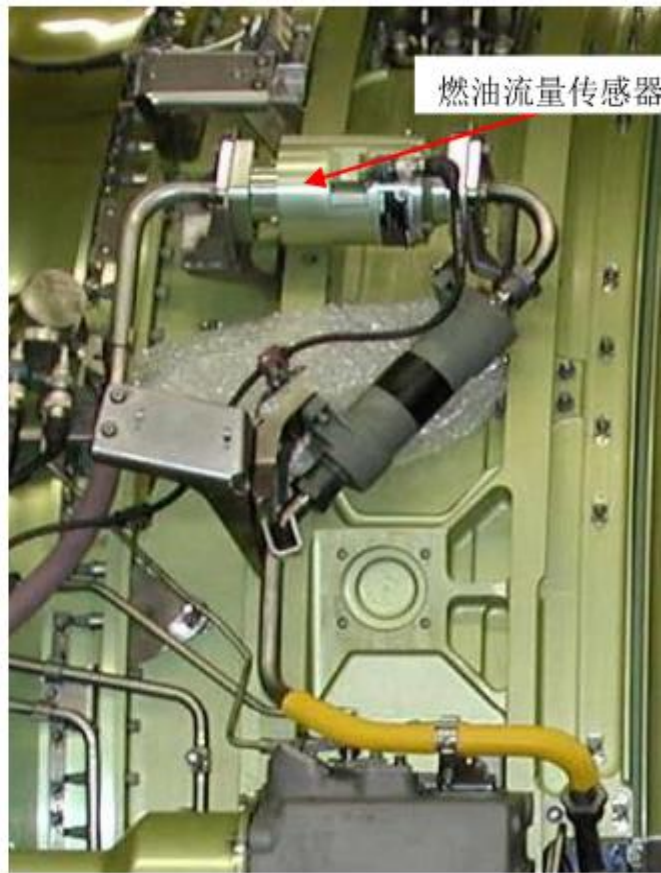


图 11-24 燃油流量传感器

3.2 燃油及控制系统的维护及安全事项

- 维护工作
1. 燃油渗漏检查
 2. 燃油部件的更换
 3. 定期更换燃油滤滤芯

- ◆ 渗漏检查，需要发动机运转判断渗漏部位，遵守发动机安全通道及打开发动机风扇整流罩的限制
- ◆ 燃油具有毒性，自我保护
- ◆ 运转时温度高，应等冷却下来，以免造成人员烫伤

1. 燃油渗漏检查

- ◆ 首先要判断渗漏部位
- ◆ 然后测量单位时间内的渗漏量，不同机型的发动机，行标准不同，一个门槛值
- ◆ 冷天或长时间停场后，橡胶密封圈收缩或硬化，可能会有渗漏致发动机慢车 5 分钟以上后检查

2. 燃油部件更换

- ◆ 需严格按照手册程序和紧固件的规定力
- ◆ 慢车测试或更高功率测试渗漏

3. 定期更换燃油滤

- ◆ 主燃油滤滤芯一般需要定期更换
- ◆ 驾驶舱或相关位置出现燃油滤旁通指示时，检查燃油滤
 - 1) 5 加仑的容器放于燃油滤组件下方。
 - 2) 拆下燃油滤排放堵头的保险。
 - 3) 将燃油滤盖上的堵头拆下，并使燃油排放至容器中。
 - 4) 为堵头**更换**一个新的密封圈。
 - 5) 拆下油滤盖上的5 个螺母和垫片，并检查损伤情况。
 - 6) 拆下螺栓和垫片，并检查损伤情况。
 - 7) 从燃油滤壳体上拆下杯盖。
 - 8) 拆下并**报废盖子上的**密封圈。
 - 9) 从盖子上拆下燃油滤滤芯。

增加

4 航空燃油及添加剂

要求：燃油需要有高热值、比重在6.4 ~ 6.8 lb/gal（磅/加仑）、硫含量低、凝固点在-40 --53 F，有润滑性。燃烧后保持固体颗粒为最低，固体颗粒能够冲击涡轮叶片和导向器，这样易引起腐蚀

型号： Jet-A 增加

Jet - A1

Jet-B

Jet-A , Jet-A 1和 Jet - B 是主要的商用燃油，可互换的。

增加

航空燃油及添加剂

- 要求：燃油需要要有高热值、比重在6.4 ~ 6.8 lb/gal（磅/加仑）、硫含量低、凝固点在-40 --53 F，有润滑性。燃烧后保持固体颗粒为最低，固体颗粒能够冲击涡轮叶片和导向器，这样易引起腐蚀。
- 型号：
 - ① Jet-A
 - ② Jet - A1:
 - ③ Jet-B :
 - ④ Jet-A , Jet-A 1和 Jet - B 是主要的商用燃油，可互换的。

小结:

序号	内容
1	燃油分配系统概述
2	燃油控制系统
3	典型发动机燃油及控制系统维护介绍



感谢聆听，欢迎指正