

# 1 绪论

## 1.1 基本类型

### 1.1.1 活塞式+螺旋桨

汽油机—— 等容循环 (OTTO 循环)

柴油机—— 等压循环 (Diesel 循环)

做功特点:

(1) 进气量小

(2) 各冲(过)程在同一汽缸内按序完成 (“个体作业”) → 功率(生产率)受限。

### 1.1.2 燃气轮机

做功特点:

(1) 进气量小

(2) 各过程分别由专门部件连续完成 (“流水作业”) → 功率(生产率)大。

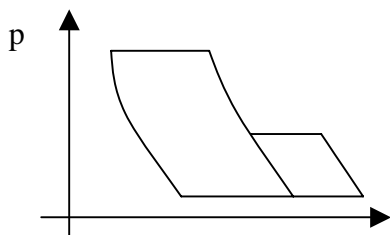
- 五大基本部件(进气装置、压气机、燃烧室、涡轮和排气装置);
- 三大核心部件(压气机、燃烧室、涡轮)——核心机, 燃气发生器
- 其它部件随用途(WP、WZ、WJ、WS)而异。如:加力燃烧室、减速器

(1) 涡轮喷气发动机 (WP)

- 结构简单
- 能量损失大、油耗高, 加力耗油成倍增长

WP6: 最大  $sfc=0.99\text{kg/daN}\cdot\text{h}$ ; 加力: 1.63

- 加力燃烧室+可调喷管



(2) 涡轮螺旋桨发动机 (WJ)

- 燃气发生器出来的能量绝大部分在动力涡轮中膨胀做功 → 减速器  $n \searrow 1000-2000\text{rpm}$  → 螺旋桨;
- 燃气剩下的能量一部分在尾喷管中继续膨胀, 产生一小部分推力;

- 螺旋桨直径大，飞行速度受到限制， $M=0.5-0.7$ ；
- 排气能力损失少，推进效率高，油耗小；

### (3) 涡轮轴发动机 (WZ)

- 燃气发生器排出的燃气能量几乎全部在动力涡轮中膨胀做功，由尾喷管排出时，速度很低；
- 输出转速高，以减少由发动机传到直升机主减速器的传动扭矩，使输出轴的直径与重量较小。两种形式：
  - A. 动力涡轮直接输出→主减
  - B. 动力涡轮→小减速器（体减）→ $n \searrow 6000-8000\text{rpm}$ →主减（直九为 B 型）

- 航机它用为 WZ

任何形式的航空发动机 (WP、WS、WJ) 均可以改型为地面及舰船用动力。

### (4) 涡轮风扇发动机 (WS)

后风扇（未广泛使用）

- 方案简单；
- 浪费大（高温合金昂贵）、加工困难；
- 风扇增压比受到限制。

前风扇（广泛使用）

- 油耗低、噪声小；
- 迎风面积比 WP 大，但比 WJ 小，小流量比可以高速飞行。

EX：民用大流量比发动机从前能够看透到后，即透过外涵道。

### (5) 桨扇发动机 (JS)

80 年代石油危机引起。

### (6) 冲压发动机（导弹上用）

当  $M$  数为  $3.5-4$  时，压气机压比为 1，必须放弃压气机，而采用冲压发动机。

## 1. 2 航空发动机发展简史

### 1. 2. 1 发展简史

航空发展始于本世纪初，前四十年为活塞时代（继承于内燃机），后六十年为喷气时代。

综观航空喷气发展史：“竞争是动力，战备为先导，效益作基础，军用民用交替发展，并正向齐头并进转化”。

热战时期（二次大战末期）：以军为主，出现“喷气”；

冷战时期：以军作主导，军民交替发展’。

(1) “军”突破“音障”；“民”出现 WJ。

(2) “热障” ( $M \geq 3$ ) 出现并克服。

(3) 60 年前后

(苏) 57 年人造卫星上天, 引发西方军备紧跟和扩充. 从而“导弹走俏, 喷气转民”, 民用型 WS (SPEY) 与 WZ (陆用) 悄然出现。

(4) 63 年苏联航空节

(苏) 军用型常规喷气飞机大出风头 (以 WP 为主)。

(美) “又一次面临喷气转向”. 此时 WS 由民转军, 随之出现 V/S、远程轰炸机。

(5) 大动荡时期: 70 年后逐渐向军民并进转化。

中东战争要求: 飞机具有中空 ( $H=6-8\text{KM}$ )、高速 ( $M \leq 3$ )、大机动 (格斗性); 发动机具有变工况与可靠性。

“风扇军转民化”并要求“三高一低” (高流量比、高压比、高温、低油耗)。

民用有向“桨扇”转化的趋势 (但目前并未普及, 仍然是 WS)。

总之, 目前已形成美、俄、英 (老牌)、法 (小发为主) 四国的技术主流。

## 1. 2. 2 先进发动机介绍

军用: 小流量比 WS

美国 F15-E, F16-C/D——F110-GE-100 (7. 07, 加力 12268daN)

F100-PW-220 (7. 4, 10590daN)

F16-A/B——F100-PW-200 (7. 7, 10590daN)

YF22 —— F119 ( $>10$ , 15560daN)

俄罗斯 Su27 —— AL31-F (AL31-F) (7. 14, 12258daN)

法 国 Rafale —— M88 (9. 0, 7500daN)

欧 洲 EFA (欧洲战斗机) —— EJ200 (10, 9000daN)

中 国 F10 —— WS10 (10A)

民用: 大流量比 WS

Boeing777——GE90 34. 25-44. 5 吨

流量比 9. 0

增压比 45

风扇直径 3. 124 米

PW4048 32. 3-40. 0 吨

流量比 7. 0

增压比 36

风扇直径 2. 844 米

湍达 (Trent) 882 (R&R) 31. 7-37. 5 吨

流量比 6. 01

增压比 39. 3

风扇直径 2.794 米

(一机多发, 也说明结构问题没有唯一解)

Boeing737-300, 400, 500, 600, 700, 800

A340-200, -300, KC-135R—— CFM56 4.7-5.50, 8220-16000daN

### 1.3 我国发动机简介

(1) WP6 (单转子加力 WP)——J6, 强 5

(2) WP7 系列(双转子加力 WP)——J7, J8

(3) WP13 系列(双转子加力 WP)

(4) WS9 (双转子加力 WS)

(5) 运 7 —— WJ5

运 8 —— WJ6

运 12 —— WJ9

直 9 —— WZ8

轰 6 —— WP8

(6) 在研

### 1.4 基本设计要求

(1) 先进性(战技指标)

(2) 安全可靠性(以保护人与机为前提)

(3) 工艺性—— 针对客观条件, 正确权衡先进性与可行性间的关系。

(4) 使用维护性——注意单元体设计、检查窗口设计与维护检测设计, 降低维护费用。

(5) 继承性

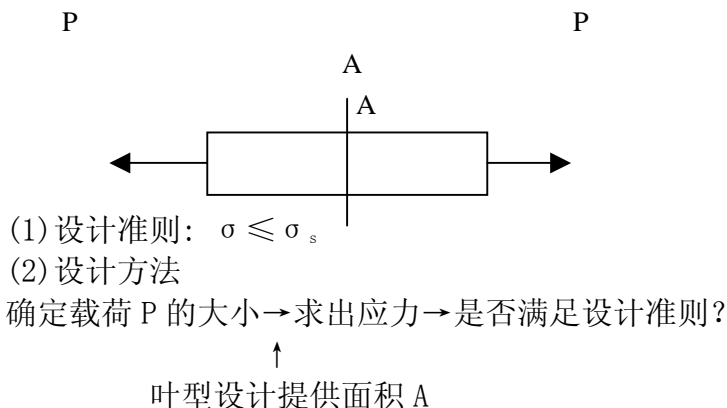
(6) 经济性

## 2 发动机受力分析

由结构完整性计划看出，载荷与载荷谱的确定是实现计划的首要条件。

### 2.1 载荷、载荷谱及其在结构设计中的作用

#### 2.1.1 静载荷是发动机结构静强度设计的基础



#### 2.1.2 载荷谱是发动机结构疲劳寿命设计的基础

通俗地说，载荷谱即载荷随时间变化的历程。载荷谱研究包括两个方面：

(1) 飞行任务剖面

随发动机的使用不同而不同。

(2) 飞行任务混频

\* 载荷谱研究花费很大。

## 2.2 作用在各零部件上负荷

### 2.2.1 负荷类型(实际指“负荷的产生”)

(1) 气体力 —— 气体对各零组件表面的作用(压)力。

与气体接触的所有零件均有气体力。

(2) 质量负荷——具有质量(或点)的构件在力场(通常指速度矢量变化引起的惯性力场)中受有的作用力。

(3) 温度负荷

因温度影响(受热不均或材料不同)而引起零组件本身或相互间的约束，从而产生“内在”的作用力。

#### (4) 其它负荷

摩擦力、挤压力等。

### 2.2.2 负荷方向

上述负荷通常均以分布力(体力、面力)出现。实际使用中,可用合力或合力矩表示,它们的方向有轴向、横向(径向)、切向之分。

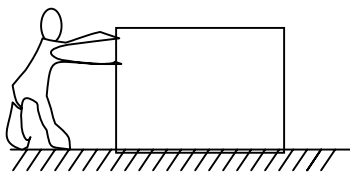
### 2.2.3 负荷传递性

#### (1) 定义

传递性系指负荷沿给定物体(零组件、气体、液体)的传递过程。它们的传递路线主要用于定性分析时的结构强度要求。(目的)

#### (2) 传递特点

- a) 处于平衡(静止)状态的传递路线呈“封闭式”。如果“封闭路线”位于研究对象的范围内,那么它们的负荷则称为内在力;否则为外传力。
- b) 随着研究对象的范围划分和约束的位置变化,内在力和外传力要发生相互转化。



#### (3) 传递方式

- a. 不同零组件间必须要有承压面┐ 传递压力  
└ 传递摩擦力(剪切力)

举例: 两个用螺栓连接在一起的机匣,受拉和受压时承压面的不同。

- b) 同一零件本身┐ 取决于作用力与约束间的相对位置  
└ 单向应力按流线比拟(注意圣维南原理模糊区)

### (3) 发动机中载荷的传递方式

- a. 在零件或组件中相互抵消而不传递出去。  
如：离心力、轮盘的热应力
- b. 有些虽然传递给相邻的组件或零件，但在发动机内部抵消不传给飞机。  
如：部分轴向力或扭矩
- c. 有些则通过相邻零件传递，最后传到飞机上去。  
如：大部分的轴向力及惯性力

## 2.2.4 负荷引起的失效模式

机械构件的失效模式是多样化的(含不确定性)，主要取决于负荷引起的应力变化与性质，而不是仅仅取决于应力的分布和水平。

负荷大小与其变化规律统称为“谱”。

不同载荷谱(或应力谱)  $\left\{ \begin{array}{l} \text{静强度、静刚度} \\ \text{动强度(疲劳)、动刚度} \\ \text{断裂强度(裂纹扩展)} \end{array} \right\}$  引起不同失效模式

## 2.3 气体力计算

### 2.3.1 动量定律

在定常流动中，管内流体在单位时间流出的动量与流入的动量之差，等于作用在管内流体上的体积力与表面力的矢量和。

$$m\vec{v}_1 - m\vec{v}_0 = \vec{R}_{\text{体}} + \vec{R}_{\text{面}}$$

把面力分为两部分：(1) 管壁反力  $\vec{R}_{\text{壁}}$  和截面 0-0、1-1 处管外流体压力  $\vec{R}_{\text{截}}$ ，因此：

$$\vec{R}_{\text{壁}} = (m\vec{v}_1 - m\vec{v}_0) + (-\vec{R}_{\text{体}} - \vec{R}_{\text{截}})$$

管内流体作用于管壁的压力为  $\vec{R}'_{\text{壁}}$ ，等于  $-\vec{R}_{\text{壁}}$ ，即

$$\vec{R}'_{\text{壁}} = -\vec{R}_{\text{壁}} = (m\vec{v}_0 - m\vec{v}_1) + (\vec{R}_{\text{体}} + \vec{R}_{\text{截}})$$

对于气体：  $\vec{R}_{\text{体}} = 0$ ，因此：

$$\vec{R}'_{\text{壁}} = -\vec{R}_{\text{壁}} = (m\vec{v}_0 - m\vec{v}_1) + \vec{R}_{\text{截}}$$

### 2.3.2 直管通道

设定图示为正方向“+”， $R_{\text{壁}}$ 为壁面对气体的作用力(为“+”方向)，由动量定理可得，

$$mc_1 - mc_0 = P_0 F_0 - P_1 F_1 + R_{\text{壁}}$$

$$R_{\text{壁}} = mc_1 - mc_0 - P_0 F_0 + P_1 F_1 = (mc_1 + P_1 F_1) - (mc_0 + P_0 F_0)$$

作用于内壁表面的气体力 $R'_{\text{壁}}$ 为

$$R'_{\text{壁}} = -R_{\text{壁}} = - \left[ \underbrace{(mc_1 + P_1 F_1)}_{\text{出口}} - \underbrace{(mc_0 + P_0 F_0)}_{\text{进口}} \right]$$

出口  $\geq$  进口 (试证明!)

结论：

- (1) 管壁受有的气体力仅与进出口参数有关。
- (2) 截面气体力=该截面气体的动、静压之和。
- (3) 直管气体力等于进出口的截面气体力代数和。
- (4) 直管气体力恒指向收敛方向。(式子中的“-”表示)

推论：

弯管气体力的大小和方向是进出口截面气体力的矢量和(方向恒指离心方向)。

直观解释：

思考题：

- (1) 收敛喷管的受力向后，问去掉喷管后发动机推力是不是就要加大？
- (2) 加力后加力燃烧室前的气流参数不变，那么发动机的推力为什么增大？

### 2.3.2 叶栅通道

对于压气机而言：(下标 z——转子，下标 j——静子)



轴向（下标 0）

$$P_{z0} = m(c_{2a} - c_{1a}) + p_2 F_2 - p_1 F_1 \quad (\text{向前})$$

$$P_{j0} = m(c_{3a} - c_{2a}) + p_3 F_3 - p_2 F_2 \quad (\text{向后})$$

切向（下标 t）

$$P_{zt} = m(c_{2u} - c_{1u}) \quad (\text{与转向相反})$$

$$P_{jt} = m(c_{3u} - c_{2u}) \quad (\text{与转向相同})$$

对于涡轮而言：（内容雷同，从略）

**叶栅受力特点：**

压气机：动叶  $\text{T}$  轴力与流向相反（向前）

└ 切力与转向相反

静叶  $\text{T}$  轴力与流向相反（向前）

└ 切力与转向相同（逆于动叶）

涡轮：动叶  $\text{T}$  轴力与流向相同（向后）

└ 切力与转向相同

静叶  $\text{T}$  轴力同于动叶（向后）

└ 切力与转向相反（逆于动叶）

### 2.3.3 涡轮转子轴向力计算

(1) 叶片上的气体力

$$P_1 = m_g(c_{2a} - c_{1a}) + p_2 F_2 - p_1 F_1 \leq 0$$

（实际为负值，即向后）

(2) 盘前密封齿以外的气体力

$$P_2 = \pi(d_2^2 - d_3^2)p_a/4$$

(3) 盘前密封齿以外的气体力

$$P_3 = \pi d_3^2 p_b/4$$

(4) 盘后端面的气体力

$$P_4 = \pi d_2^2 p_c/4$$

总的轴向气体力为：

$$P_{tz} = P_1 - P_2 - P_3 + P_4 \quad (\text{实际为负值，即向后})$$

**\* 转子受力特点：**

- 1) 部件轴力是气体对所有外表面的作用力的轴向分量代数和；
- 2) 多级转子轴力应是各级外表面气体轴力的代数和。

### 2.3.4 典型发动机的气体轴力分布

(1) 轴力分布特点：

a. 推力是发动机所有部件气体轴力(通过传递后)的代数和。

气体轴力通常以扩压器为界，前者向前，后者向后。承力壳体以受拉为主。如果出现受压则应有局部加强措施。

b. 飞行状态变→轴力分布变→推力变（以加力状态为例）

c. 径向止推轴承是转子轴力传出(向静子)的必经之路。

可见，发动机的主轴承是转子向静子传力的关键件(不仅支撑，还要传力)，径向止推轴承尤其显得重要。

(2) 卸荷：

目的：适当减小径向止推轴承的轴向负荷，以保证其可靠工作。

措施：

1) 后腔(B 腔)减压到 0.13--0.16 MPa，则压气机转子由[+52000]降至(+29000)，而轴承机匣相应由[-20100]增至(+2900 dan)；

2) 前腔(A 腔)增压，使压气机转子由(29000)降至 25400dan，而前机匣则由(-100)增至 3500 dan；

3) 压气机(OK)与涡轮(TY)转子相连(共轴). 25400-23100=2300 dan.

	压气机 转 子	压气机 静 子	燃烧室	进气锥	轴 承 机 匣	涡 轮 转 子	涡 轮 静 子	尾喷管	推 力
卸荷前	+52000	+6500	+12500	-100	-20100	-23100	-12700	-6300	+8700
B 腔 通大气	+29000				+2900				+8700
A 腔 通大气	+25400			+3500					+8700

原理：卸荷的实质是利用各部件气体轴力的重新分配，实现减小整个转子的外传轴力（通过径向止推轴承传出）。故而对推力无影响。

注意：每套径向止推轴承允许承受的轴力控制在 1000 dan 左右，过小会引起反向冲击与滚动表面蹭伤。

## 2.4 气体力作用于组合件上的扭矩

（气体的动量矩方程）

### 2.4.1 涡轮

(1) 静子

涡轮静子作用于气流的扭矩为

$$M_{tj}' = m_g (c_{1u} r_1 - c_{0u} r_0)$$

通常涡轮为轴向进气，即 $c_{0u}=0$ ，则

$$M_{tj}' = m_g c_{1u} r_1$$

根据反作用力原理，气流给静子的扭矩为

$$M_{tj} = -M_{tj}' = -m_g c_{1u} r_1$$

## (2) 转子

涡轮转子作用于气流的扭矩为

$$M_{tz}' = m_g (c_{2u} r_2 - c_{1u} r_1)$$

由于涡轮出口气流的方向一般接近轴向，可认为  $c_{2u}=0$ ，则

$$M_{tz}' = -m_g c_{1u} r_1$$

根据反作用力原理，气流给转子的扭矩为

$$M_{tz} = -M_{tz}' = m_g c_{1u} r_1$$

因此，

$$M_{tj} = -M_{tz}$$

即涡轮转子与涡轮静子所承受的扭矩大小相等，方向相反。

## 2.4.2 压气机

从整个压气机来说，进、出口气流均为轴向，

$$c_{1u} = c_{2u} = 0$$

故无动量矩变化，也就是作用于整个压气机的扭矩为零。这就说明作用于各级静子叶片扭矩总和的大小等于作用于各级转子叶片的扭矩总和，但方向相反，

$$M_{cj} = -M_{cz}$$

## 2.4.3 WP 发动机

略去机械损失，不计传动附件的扭矩，那么发动机在稳定工作状态下，涡轮转子的扭矩大约等于压气机转子的反扭矩，

$$M_{cz} = -M_{tz}$$

因此

$$M_{cj} = -M_{tj}$$

思考题：（1）发动机在非稳定状态下，扭矩关系如何？

（2）将发动机看成整体，根据其进口气流的方向，运用动量矩定律分析其扭矩关系。

## 2.4.4 WJ 发动机

因为  $M_{cz} + M_{\text{桨}} = -M_{tz}$

所以  $M_{\text{桨}} = -M_{tz} - M_{cz} \geq 0$

这样  $M_{tj} \neq M_{cj}$

$$|M_{tj}| \geq |M_{cj}|$$

发动机承受的总的扭矩也不为零，剩余的扭矩通过安装节传递到飞机上，

其数值大约等于螺旋桨的扭矩。

思考题：若通过减速器带动螺旋桨，减速比为  $I$ ，则扭矩如何变化？

## 2.5 机动飞行时的惯性力与惯性力矩

飞机作不等速直线或曲线飞行，在发动机上产生惯性力或惯性力矩。

### 2.5.1 惯性力

转子的惯性离心力为

$$P_j = mR\Omega^2 = \frac{W}{g} R\Omega^2 = nW$$

式中  $W$ ——重量， $R$ ——飞行轨迹的曲率半径；

$$n = \frac{R\Omega^2}{g} \quad \text{——过载系数，表示发动机、飞机零部件的质量惯性力是其重量的 } n \text{ 倍。}$$

其重量的  $n$  倍。

歼击机 7~8，最大 10；轰炸机最大 3。

例：（1）电梯上的过载；

（2）汽车上、下坡；

（3）飞行员训练的旋转装置；

（4）新百门口的“挑战者”号模拟器。

### 2.5.2 惯性力矩（着重讨论陀螺现象）

（1）定义

高速旋转的物体的自转轴被迫改变方向，就会产生陀螺力矩，出现陀螺效应。陀螺对外力矩的施力体的反作用力矩称为陀螺力矩（或回转力矩）。（实质是转子上各质点受有哥氏惯性力的合力矩。）与陀螺相关的效应称为陀螺效应（或回转效应）。

$$\vec{M}_G = J_0 \vec{\omega} \times \vec{\Omega}$$

$$\text{大小：} |M_G| = J_0 \omega \Omega \sin(\vec{\omega}, \vec{\Omega})$$

方向：（右手定则）；

式中  $J_0$ ——转子对旋转轴转动惯量（ $J_0 = \sum mr^2$ ）

$\vec{\omega}$ ——转子旋转角速度， $\vec{\Omega}$ ——飞机转弯角速度

当  $(\vec{\omega}, \vec{\Omega}) = 90^\circ$  时， $\sin(\vec{\omega}, \vec{\Omega}) = 1$

- 陀螺力矩不是作用在转子上，而是作用在静子机匣上（通过轴承）。
- 在大多数情况下，飞机做机动飞行时，发动机上所有转动零件在飞机做机动飞行时都存在陀螺力矩。

(2) 危害

- a. 转子受交变载荷，而出现低周疲劳损坏。
- b. 飞机操纵困难。

## 2.6 静子的承力系统

### 2.6.1 承力系统定义和要求

\* 典型引例：人体骨架（站立与双杆运动）、高层建筑笼形电梯的盒式垂井。

(1) 定义：

在发动机静子中，向安装节(支承点)传递负荷的由构件组成的主干路线称为承力系统(又称传力方案)。

主干构件主要由承力壳体、承力框架(穿过气流通道的)以及安装节组成。

(2) 设计要求：

1) 在满足承受负荷(强度要求)与保证足够刚性(影响性能)的前提下，力求简单、轻。

2) 注意温度与受力对变形带来的影响。

3) 装拆与维护方便。

Ex：用双层机匣构成承力壳体，可防止性能衰退：

### 2.6.2 单转子传力方案

\* 安装节有主、辅之分。

\* 主干路线取决于静子结构方案、转子支承形式与安装节位置。

(1) 内传力方案

使用维护方便(适合于单管 KC)；转子支承负荷由低温框架传出；刚性弱(早期采用)

(2) 外传力方案（常用于涡轮后支承）

刚性好、轻(充分利用静子承力构件)；涡轮支承必须由高温框架传出，困难较多，应注意框架与后支承的隔热

(3) 内外混合传力方案

刚性好(盒形结构)；应合理设置热补偿结构(削弱局部刚性与选材)。

(4) 内外平行传力方案

热应力小(适于涡轮前支承传力，而又不穿过高温区)；涡轮转子径向间隙均匀化受影响

### 2.6.3 风扇发动机传力方案特点

(1) 内涵部分类同于单转子；

(2) 内涵轴向传力汇聚点前移，而横向传力分前后两汇聚点(视辅助安装节而定)。

由于内涵承力壳体受弯大、压比高、KC 小，故而趋于外传力。

### 2.6.4 安装节基本结构特点

\* 安装节作为联接件,用于发动机在飞机上的固定;并传递它的外传力。

\* 安装节结构形式不仅取决于飞机与发动机的机种;而且还与发动机在飞机上的安装型式、安装位置有关。

(1) 布局原则按“静定”结构设置

1) 不致因温度、变形或制造装配,而引起内应力。

飞机与发动机不是刚体,受热、受力引起的变形量较大,所以不希望出现“静不定”约束。

2) 设计计算精度高,对可靠性至关重要。

结构负荷只需用力平衡方程式获得,不需用变形一致条件。

(2) 安装面有主、辅之分

1) 目的:

A. 利于飞机与发动机的加强部位相对集中——轻、易实现。

B. 利于飞机与发动机的装配。

2) 主按装节:

\* 功用:

A. 作为发动机在飞机上的定位点,通常以固持铰形式出现。

B. 传递推力和大部分惯性力。

\* 位置要求:

A. 置于低温区(对发动机和飞机结构均有好处)。

B. 力求靠近重心(其惯性外传力相对集中)。

C. 推力销不通过重心(或轴线),以避免推力线落入推力脉动园内,或形成变向惯性力矩,从而对辅助安装节带来影响。

3) 辅助安装节:

\* 功用:只传递部份横向外传力,并允许相对轴向位移,起发动机辅助支承和热补偿作用。

\* 要求:

A. 其位置与主安装节间距离的确定,既要使其传递的横向力减小,又要注意横向弯矩对机匣壳体变形带来的影响。

B. 其安装部位的刚性要作适当的局部强化,以保证薄壁壳体的园度。

Ex: 发动机主机部分自由度与约束的计算

(静定结构必须具有六个自由度约束(常用两个安装面))

$$WP6: \quad 6 * 1 + 5 * 2 - 3 * 4 - 1 * 1 - 3 * 1 = 0$$

机	主	杆	杆	球	球	滑	偏	三	件

	体	机	自	数	铰	铰	动	心	插	数							
	自		由		约	数	球	推	销	三							
	由		度		束		铰	力	约	插							
	度						约	销	束	销							
							束										
WP7:	6	*	1	+	5	*	5	-	3	*	10	-	1	*	1	=	0



### 3 压气机

#### 3.1 概述

##### (1) 功用

利用涡轮传来的旋转机械功，提高流过气体的压力，以提供发动机工作时所需要的压缩空气。

##### (2) 结构形式

###### 1) 按气体流动方向

轴流式

离心式

混合式(前轴后离)：

###### 2) 按转子数目

单转子

多转子(双或叁)—— 前级可用作风扇和增压压气机—— 改善起动性与防喘

##### (3) 基本设计要求

1) 在满足总体性能与可靠性(强刚度与耐久性)要求的条件下，力求紧凑、轻(注意它们间的相对性，通过平衡、协调，以实现综合指标先进)。

2) 具有较宽的工作范围：

A. 增设附属装置；

B. 改进参数选择(级压比)

3) 工艺性与维护性(叶片多)。

##### (4) 组成

转子、静子、附属装置(进气与防冰、封气、防喘)。

#### 3.2 轴流压气机转子

##### 3.2.1 功用与组成

\* 功用：利用高转速带动叶片高效率地对来流做功。

\* 组成：盘、鼓(轴)与叶片。

##### 3.2.2 设计要求(由转速高的特点引出)

(1) 构件强度、刚性应足够(不破坏、变形量小)

(2) 联接可靠(保证所需功率的传递)

传力、传扭、定心、定位(由图 3-5 受力概况引出)。

(3) 平衡性好(对称性与定心)，否则引起振动(工作时重要振源)。

##### 3.2.3 基本类型

(1) 鼓式：(叶片可固定在鼓上)

\* 结构简单，质量轻，零件数少；加工方便，成本低；抗弯刚性好(材料集中在大直径处，故重量轻)。

\* 强度差。

(2) 盘式：(叶片固定在盘上)

\* 强度好(由鼓元分析推论)。

- \* 抗弯刚性差（仅由转轴承受）；传递扭矩和定心困难（因为联接半径小，受切力与相对变形大）；盘轴结构易振动。

- \* 适于单盘转子或小流量发动机；目前，加强盘式转子（定距环不传扭）运用较广（spey、WP7、WP15 低压）。

(3) 混合式（鼓盘混合）：（叶片固定在盘上，盘间藉鼓相联）

- \* 综合鼓、盘式的特点，“取长补短”，运用广。

### 3.2.4 盘鼓(轴)间联接

- \* 单个零件的强度与刚性计算由专门课程介绍。

- \* 联接结构以传力、传扭、定位、定心为主。

为保证平衡性，“定心”结构为重点。

#### 3.2.4.1 定心联接结构

(1) “定心”的概念

(2) 基本形式（不同联接形式，将会获得不同定心效果）

A. “强制式”定心联接

B. “自主式”定心联接

C. 径向补偿结构：

(3) 按“用途”分类：

工艺定心—— 加工时采用（顶针孔）

装配定心—— 装配时采用（园柱面紧度配合）

工作（热）定心—— 工作（或受热）时，要求被联接件间的自由变形差不致引起定心失效

#### 3.2.4.2 盘鼓(轴)所在半径位置分析

- \* 上述定心结构引出的变形差与盘鼓(轴)所在半径密切相关。

- \* 由盘、鼓径向位移分布看出：旋转时，在U盘=U鼓处对应的半径称为恰当半径。

(1) R恰 的特性

(2) 结构分析

#### 3.2.4.3 传力、传扭、定位、定心：（先介绍 图 3-5 受力概况）

轴流压气机系由串级而成。因此对于它的传力、传扭与定位均存在因串级累积的现象，必须予以注意。

(1) J57

(2) spey

(3) WP6

(4) CFM56

### 3.2.5 工作叶片及其固定

#### 3.2.5.1 设计要求

特点：单薄、量多、尺寸形状复杂。

组成：叶身+榫头

- (1) 强度突出（拉断、疲劳、打伤与腐蚀）；
- (2) 刚性合理，尤其要注意振动特性；
- (3) 工艺要求高、制造精度高；
- (4) 便于维修与更换。

### 3.2.5.2 叶身特点

- (1) 造型（叶型与扭曲规律，截面积与重心分布规律）—— 由专门课程讨论。
- (2) 阻尼凸台（为抗振与抗外物用）与叶冠。
- (3) 增加前缘半径的可扩散叶型和宽弦比叶片（为抗外物）。

### 3.2.5.3 榫头及其联接

- (1) “销钉式”榫头：
- (2) “燕尾式”榫头：
- (3) “枞树式”榫头：（在涡轮章节介绍）

## 3.3 轴流压气机静子

组成：机匣与整流器。

- 特点：
- (1) 系属承力、传力薄壁件；
  - (2) 构成气流通道；
  - (3) 与转子结构形式密切相关（装配与封严等）。

### 3.3.1 设计要求

- (1) 在重量轻条件下，具有足够刚性与强度，通常指周向刚性均匀与局部强度足够。
- (2) 提高效率，减少漏气，通常指叶尖与级间封严。
- (3) 装配、维护与工艺。
- (4) 包容性，防止二次损伤（破损安全设计）。

### 3.3.2 机匣

#### 3.3.2.1 按结构方案划分：

- (1) 不可分解式（整体式）

- \* 重量轻、结构简单；周向刚性均匀突出。
  - \* 装配性差；中间级检查困难。
  - \* 转子与机匣至少有一为可分解的；对于多级者，通常不采用等外径机匣；
- (2) 可分解式

- \* 装配性获得明显改善。
- \* 注意结合面气密性（注意安装边结构与螺栓密度， 不许采用软质垫圈或垫片）。

- \* 重量稍有增加（因为有安装边）。

#### 1. 按剖分方向划分

- i) 横向剖分：

- \* 周向刚性均匀，且获加强。
- \* 重量较大，适于级数少，故而除风扇外，压气机采用不多。
  - ii) 纵向剖分：
- \* 装配性好，易于检查。
- \* 周向刚性不均匀，必须注意之。
- \* 工艺复杂。

成对的半机匣不允许互换（防错设计）

- iii) 混合剖分：

WP6 纵(装配检查)横(材料不同)剖分结合

WP7 整体分段与纵横剖分结合

## 2. 按使用性质划分

- i) 装配剖分—— 保证装拆与工作定位
- ii) 工艺剖分—— 由材料不同与便于加工而设置

EX: WP6

### 3.3.2.2 按材料与施工

(材料毛坯与施工方法密切相关)

- (1) 铸造
- (2) 锻造
- (3) 钣金

### 3.3.2.3 风扇机匣特殊要求（具有强调作用）

- (1) 包容性(环、筋与加强壁、外表面缠包数十层玻纤布组成包容机匣，以及双层机匣等)；
- (2) 降噪音(内壁面装有玻纤和环氧泡沫塑料等吸音材料)；
- (3) 注意安置宜于外物排放的通道；
- (4) 刚性强(直径大，且为主安装座)。

### 3.3.3 整流器

功用：将气体动能高效地转化成压力能，且以一定方向排出。

结构形式：主要取决于机匣、转子形式及叶片的长短。

#### 3.3.3.1 按叶片固定支点形式：(仅用示意图，暂不讲结构)

- (1) 单支点—— 根部(外端)固定在机匣上，叶片呈悬臂式，其通道内壁由转子构成。
- (2) 双支点—— 框式(暴露新矛盾)

#### 3.3.3.2 按固定形式：(讲结构)

- (1) T型(或燕尾型)榫头(SPEY)
  - \* 结构简单，联接可靠，装拆方便(要有周向止动螺钉(块)，适用于纵向剖分机匣)。
  - \* 机匣厚，环形槽难加工与检查。
- (2) 柱形榫头(WP6)

\* 加工方便(准确度易保证)

机匣薄(2.5mm)

\* 机匣开孔多——强度、刚性削弱较多，不适于焊接  
——应有专门密封措施

(3) 焊接在中间环(WP6, J57)或机匣上(WP7)

\* 生产率高

重量轻(叶片可用锻材)

\* 更换叶片困难(死结构)；

工艺要求高： WJ6— 翼型孔冲压工艺(前后缘易磨损)。

J57— 叶片作冲头时要先作硬化处理(先硬后退)。

WP7— 由叶冠点焊能保证精度。

### 3.4 防喘装置

#### 3.4.1 进气装置

功用：为压气机提供良好的进气条件(流量与畸变度)。

(1) 要求(不同机种,有所侧重)

(2) 防冰措施

(3) 防外物打伤措施

#### 3.4.2 防喘装置

##### 3.4.2.1 防喘原理

\* 现象：低转速、猛推油门、开炮废气以及进气畸变时，都可能出现整机不稳定工作(低频喘振)→强烈振动和熄火，甚至叶片拆断

\* 功用：用于扩大稳定工作范围(尤其是高压比)

\* 机理(原理)：由前几级分离而引起的。

\* 防喘措施：(由速度三角形引出)

降低  $u$  — 多转子(目前运用甚广,在此不作介绍)。

提高  $Ca$  — 中间级放气、机匣处理(改善局部叶高分离)。

改变静叶角 — 可旋导叶与整流叶片。

##### 3.4.2.2 放气装置

\* (优) — 防喘；且能改善启动性。

\* (缺) — 有能量损失，因此额定工况不用；连续调节困难。

(1) 钢带式 (WP6、SPEY)

\* 放气均匀；结构简单；迎面积小。

\* 密封性差(注意 WP6 的材料差异影响)；放气量不可调；对机匣削弱较大(故仅能用于一级)。

(2) 活门(活塞)式

优、缺点与上述相反(可调量有限)

##### 3.4.2.3 可旋导叶与整流静叶

\* 连续可调、效率高、迎面积小。

\* 结构复杂，应注意：

- a. 干涉性（操纵环与叶片的轴线不同，其传动机构易干涉）
- b. 密封性（机匣开孔，且有相对运动）
- c. 同步性（同级与不同级间）

#### 3.4.2.4 处理机匣

其能改善首级叶尖的分离，使由旋转失速与进气畸变引起的喘振得以缓和。  
(见图)

#### 3.4.3 封气装置

- \* 封严装置用于静转子间需封严的相对运动部位。
- \* 仅介绍气路系统中常用的非接触式结构—— 萁齿封气装置。

#### 3.5 材料

普遍存在的问题：不太懂→ 不重视。

学 习 目 的：了解它→ 选用它。

##### 3.5.1 重要性

(1) 发动机性能提高受到材料发展的制约。

\* “产业革命”重要标志之一是新材料的出现；

\* 钛、复合材料的出现，对压气机性能有着大幅度的提高。

(2) 经济性、工艺性以及结构设计都与材料的选用密切相关。

\* 矿产资源、冶炼水平、成型技术；

\* 结构设计(包括表面保护和热处理、粘结、机械联接等技术 )受特定材料(复合材料)的性能影响。

(3) 故障分析通常以材料分析(组织、元素与断口)为先导。

##### 3.5.2 选材原则与要求

(1) 原则

(2) 要求

##### 3.5.3 典型新材料

常用的有、铝、镁。可由图简介之，重点介绍如下：

(1) 钛合金

\* 比强大，储量多，阻尼性好。

\* 温度介于钢、铝之间。

\* 加工困难，冷加工与不锈钢相近(质粘、硬度不高，刀具磨损)。

热加工易吸氮、氢、氧而发脆。

冷压加工易开裂 ( $\sigma_{0.2}/\sigma_b = 0.8 \sim 0.9$ )。

对缺口敏感 ( $\sigma_{-1}/\sigma_b$  较低)。

导磁率、导热系数低。

减磨性差、易着火。

(2) 复合材料

- \* 比强特大(可达钛的 3.5 倍)，比刚度也大(频率)；减振性好(多层阻尼)，抗疲劳性好(多层复合)。
- \* 但温度低、抗冲击差(脱层)、质量不稳定(手工)。
- \* 碳-铝纤维复合材料用于风扇机匣、压气机叶片（比强为钛合金 1.5 倍）。

### 3 压气机

#### 3.1 概述

##### (1) 功用

利用涡轮传来的旋转机械功，提高流过气体的压力，以提供发动机工作时所需要的压缩空气。

##### (2) 结构形式

###### 1) 按气体流动方向

轴流式

离心式

混合式(前轴后离)：

###### 2) 按转子数目

单转子

多转子(双或叁)—— 前级可用作风扇和增压压气机—— 改善起动性与防喘

##### (3) 基本设计要求

1) 在满足总体性能与可靠性(强刚度与耐久性)要求的条件下，力求紧凑、轻(注意它们间的相对性，通过平衡、协调，以实现综合指标先进)。

2) 具有较宽的工作范围：

A. 增设附属装置；

B. 改进参数选择(级压比)

3) 工艺性与维护性(叶片多)。

##### (4) 组成

转子、静子、附属装置(进气与防冰、封气、防喘)。

#### 3.2 轴流压气机转子

##### 3.2.1 功用与组成

\* 功用：利用高转速带动叶片高效率地对来流做功。

\* 组成：盘、鼓(轴)与叶片。

##### 3.2.2 设计要求(由转速高的特点引出)

(1) 构件强度、刚性应足够(不破坏、变形量小)

(2) 联接可靠(保证所需功率的传递)

传力、传扭、定心、定位(由图 3-5 受力概况引出)。

(3) 平衡性好(对称性与定心)，否则引起振动(工作时重要振源)。

##### 3.2.3 基本类型

(1) 鼓式：(叶片可固定在鼓上)

\* 结构简单，质量轻，零件数少；加工方便，成本低；抗弯刚性好(材料集中在大直径处，故重量轻)。

\* 强度差。

(2) 盘式：(叶片固定在盘上)

\* 强度好(由鼓元分析推论)。



- \* 抗弯刚性差（仅由转轴承受）；传递扭矩和定心困难（因为联接半径小，受切力与相对变形大）；盘轴结构易振动。

- \* 适于单盘转子或小流量发动机；目前，加强盘式转子（定距环不传扭）运用较广（spey、WP7、WP15 低压）。

(3) 混合式（鼓盘混合）：（叶片固定在盘上，盘间藉鼓相联）

- \* 综合鼓、盘式的特点，“取长补短”，运用广。

### 3.2.4 盘鼓(轴)间联接

- \* 单个零件的强度与刚性计算由专门课程介绍。

- \* 联接结构以传力、传扭、定位、定心为主。

为保证平衡性，“定心”结构为重点。

#### 3.2.4.1 定心联接结构

(1) “定心”的概念

(2) 基本形式（不同联接形式，将会获得不同定心效果）

A. “强制式”定心联接

B. “自主式”定心联接

C. 径向补偿结构：

(3) 按“用途”分类：

工艺定心—— 加工时采用（顶针孔）

装配定心—— 装配时采用（园柱面紧度配合）

工作（热）定心—— 工作（或受热）时，要求被联接件间的自由变形差不致引起定心失效

#### 3.2.4.2 盘鼓(轴)所在半径位置分析

- \* 上述定心结构引出的变形差与盘鼓(轴)所在半径密切相关。

- \* 由盘、鼓径向位移分布看出：旋转时，在U盘=U鼓处对应的半径称为恰当半径。

(1) R恰 的特性

(2) 结构分析

#### 3.2.4.3 传力、传扭、定位、定心：（先介绍 图 3-5 受力概况）

轴流压气机系由串级而成。因此对于它的传力、传扭与定位均存在因串级累积的现象，必须予以注意。

(1) J57

(2) spey

(3) WP6

(4) CFM56

### 3.2.5 工作叶片及其固定

#### 3.2.5.1 设计要求

特点：单薄、量多、尺寸形状复杂。

组成：叶身+榫头

- (1) 强度突出（拉断、疲劳、打伤与腐蚀）；
- (2) 刚性合理，尤其要注意振动特性；
- (3) 工艺要求高、制造精度高；
- (4) 便于维修与更换。

### 3.2.5.2 叶身特点

- (1) 造型（叶型与扭曲规律，截面积与重心分布规律）—— 由专门课程讨论。
- (2) 阻尼凸台（为抗振与抗外物用）与叶冠。
- (3) 增加前缘半径的可扩散叶型和宽弦比叶片（为抗外物）。

### 3.2.5.3 榫头及其联接

- (1) “销钉式”榫头：
- (2) “燕尾式”榫头：
- (3) “枞树式”榫头：（在涡轮章节介绍）

## 3.3 轴流压气机静子

组成：机匣与整流器。

- 特点：
- (1) 系属承力、传力薄壁件；
  - (2) 构成气流通道；
  - (3) 与转子结构形式密切相关（装配与封严等）。

### 3.3.1 设计要求

- (1) 在重量轻条件下，具有足够刚性与强度，通常指周向刚性均匀与局部强度足够。
- (2) 提高效率，减少漏气，通常指叶尖与级间封严。
- (3) 装配、维护与工艺。
- (4) 包容性，防止二次损伤（破损安全设计）。

### 3.3.2 机匣

#### 3.3.2.1 按结构方案划分：

- (1) 不可分解式（整体式）

- \* 重量轻、结构简单；周向刚性均匀突出。
  - \* 装配性差；中间级检查困难。
  - \* 转子与机匣至少有一为可分解的；对于多级者，通常不采用等外径机匣；
- (2) 可分解式

- \* 装配性获得明显改善。
- \* 注意结合面气密性（注意安装边结构与螺栓密度， 不许采用软质垫圈或垫片）。

- \* 重量稍有增加（因为有安装边）。

#### 1. 按剖分方向划分

- i) 横向剖分：

- \* 周向刚性均匀，且获加强。
- \* 重量较大，适于级数少，故而除风扇外，压气机采用不多。
  - ii) 纵向剖分：
- \* 装配性好，易于检查。
- \* 周向刚性不均匀，必须注意之。
- \* 工艺复杂。

成对的半机匣不允许互换（防错设计）

- iii) 混合剖分：

WP6 纵(装配检查)横(材料不同)剖分结合

WP7 整体分段与纵横剖分结合

## 2. 按使用性质划分

- i) 装配剖分—— 保证装拆与工作定位
- ii) 工艺剖分—— 由材料不同与便于加工而设置

EX: WP6

### 3.3.2.2 按材料与施工

(材料毛坯与施工方法密切相关)

- (1) 铸造
- (2) 锻造
- (3) 钣金

### 3.3.2.3 风扇机匣特殊要求（具有强调作用）

- (1) 包容性(环、筋与加强壁、外表面缠包数十层玻纤布组成包容机匣，以及双层机匣等)；
- (2) 降噪音(内壁面装有玻纤和环氧泡沫塑料等吸音材料)；
- (3) 注意安置宜于外物排放的通道；
- (4) 刚性强(直径大，且为主安装座)。

### 3.3.3 整流器

功用：将气体动能高效地转化成压力能，且以一定方向排出。

结构形式：主要取决于机匣、转子形式及叶片的长短。

#### 3.3.3.1 按叶片固定支点形式：(仅用示意图，暂不讲结构)

- (1) 单支点—— 根部(外端)固定在机匣上，叶片呈悬臂式，其通道内壁由转子构成。
- (2) 双支点—— 框式(暴露新矛盾)

#### 3.3.3.2 按固定形式：(讲结构)

- (1) T型(或燕尾型)榫头(SPEY)
  - \* 结构简单，联接可靠，装拆方便(要有周向止动螺钉(块)，适用于纵向剖分机匣)。
  - \* 机匣厚，环形槽难加工与检查。
- (2) 柱形榫头(WP6)

\* 加工方便(准确度易保证)

机匣薄(2.5mm)

\* 机匣开孔多——强度、刚性削弱较多，不适于焊接  
——应有专门密封措施

(3) 焊接在中间环(WP6, J57)或机匣上(WP7)

\* 生产率高

重量轻(叶片可用锻材)

\* 更换叶片困难(死结构)；

工艺要求高： WJ6— 翼型孔冲压工艺(前后缘易磨损)。

J57— 叶片作冲头时要先作硬化处理(先硬后退)。

WP7— 由叶冠点焊能保证精度。

### 3.4 防喘装置

#### 3.4.1 进气装置

功用：为压气机提供良好的进气条件(流量与畸变度)。

(1) 要求(不同机种,有所侧重)

(2) 防冰措施

(3) 防外物打伤措施

#### 3.4.2 防喘装置

##### 3.4.2.1 防喘原理

\* 现象：低转速、猛推油门、开炮废气以及进气畸变时，都可能出现整机不稳定工作(低频喘振)→强烈振动和熄火，甚至叶片拆断

\* 功用：用于扩大稳定工作范围(尤其是高压比)

\* 机理(原理)：由前几级分离而引起的。

\* 防喘措施：(由速度三角形引出)

降低  $u$  — 多转子(目前运用甚广,在此不作介绍)。

提高  $Ca$  — 中间级放气、机匣处理(改善局部叶高分离)。

改变静叶角 — 可旋导叶与整流叶片。

##### 3.4.2.2 放气装置

\* (优) — 防喘；且能改善启动性。

\* (缺) — 有能量损失，因此额定工况不用；连续调节困难。

(1) 钢带式 (WP6、SPEY)

\* 放气均匀；结构简单；迎面积小。

\* 密封性差(注意 WP6 的材料差异影响)；放气量不可调；对机匣削弱较大(故仅能用于一级)。

(2) 活门(活塞)式

优、缺点与上述相反(可调量有限)

##### 3.4.2.3 可旋导叶与整流静叶

\* 连续可调、效率高、迎面积小。

\* 结构复杂，应注意：

- a. 干涉性（操纵环与叶片的轴线不同，其传动机构易干涉）
- b. 密封性（机匣开孔，且有相对运动）
- c. 同步性（同级与不同级间）

#### 3.4.2.4 处理机匣

其能改善首级叶尖的分离，使由旋转失速与进气畸变引起的喘振得以缓和。  
(见图)

#### 3.4.3 封气装置

- \* 封严装置用于静转子间需封严的相对运动部位。
- \* 仅介绍气路系统中常用的非接触式结构—— 萁齿封气装置。

#### 3.5 材料

普遍存在的问题：不太懂→ 不重视。

学 习 目 的：了解它→ 选用它。

##### 3.5.1 重要性

(1) 发动机性能提高受到材料发展的制约。

\* “产业革命”重要标志之一是新材料的出现；

\* 钛、复合材料的出现，对压气机性能有着大幅度的提高。

(2) 经济性、工艺性以及结构设计都与材料的选用密切相关。

\* 矿产资源、冶炼水平、成型技术；

\* 结构设计(包括表面保护和热处理、粘结、机械联接等技术 )受特定材料(复合材料)的性能影响。

(3) 故障分析通常以材料分析(组织、元素与断口)为先导。

##### 3.5.2 选材原则与要求

(1) 原则

(2) 要求

##### 3.5.3 典型新材料

常用的有、铝、镁。可由图简介之，重点介绍如下：

(1) 钛合金

\* 比强大，储量多，阻尼性好。

\* 温度介于钢、铝之间。

\* 加工困难，冷加工与不锈钢相近(质粘、硬度不高，刀具磨损)。

热加工易吸氮、氢、氧而发脆。

冷压加工易开裂 ( $\sigma_{0.2}/\sigma_b = 0.8 \sim 0.9$ )。

对缺口敏感 ( $\sigma_{-1}/\sigma_b$  较低)。

导磁率、导热系数低。

减磨性差、易着火。

(2) 复合材料

- \* 比强特大(可达钛的 3.5 倍)，比刚度也大(频率)；减振性好(多层阻尼)，抗疲劳性好(多层复合)。
- \* 但温度低、抗冲击差(脱层)、质量不稳定(手工)。
- \* 碳-铝纤维复合材料用于风扇机匣、压气机叶片（比强为钛合金 1.5 倍）。

## 5 燃烧室、加力燃烧室和排气装置

### 5.1 燃烧室

(本节应注意与燃烧课程的协调, 避免重复)

#### 5.1.1 概述

(1) 功用: 将燃的化学能转换成气体的热能, 并加热到涡轮前允许的温度。

(2) 燃烧环境:

(3) 设计要求 (简介组织燃烧)

1) 烧着:

2) 烧稳:

3) 烧好:

4) 寿命:

5) 维护方便。

#### 5.1.2 基本类型: (从简)

(1) 分管式—— WP5

(2) 环管(联管)式—— WP6、SPEY

(3) 环形式(包括全环形的、带头部的以及短环形的)—— WJ6、RB199。

(4) 回流式—— JT15D

(5) 折流式—— TM3C、J69。

#### 5.1.3 基本构件

组成: 扩压器、壳体、火焰筒、喷嘴与点火器。

##### 5.1.3.1 扩压器

(1) 功用:

1) 降速增压, 损失小。

2) 空气分配

(2) 从气路角度出发:

1) 一级扩压—— SPEY、WP6

2) 二级扩压—— JT3D

3) 突然扩张—— RB199、TM3C

(3) 从结构角度出发:

\* 要求—— 保证型面; 可靠传力—>强度、刚性要好 (“热” 矛盾较缓和)。

1) 承力支柱(板)—— 呈流线化—— JT3D

2) 末级静叶承力—— WP6、WP7、WP8

3) 气路中管道安排。

### 5.1.3.2 壳体（内、外机匣）

- (1) 外机匣—— 内压薄壁件
- (2) 内机匣—— 外压薄壁件

### 5.1.3.3 火焰筒

\* 组成：涡流器、本体及传焰管。

- (1) 涡流器

\* 功用—— 引入一股流，并形成回流区，保证烧着、烧稳。

- 1) 叶片式（通常用于非蒸发式喷咀）。

- 2) 无叶片式

- (2) 本体

- 1) 头部—— 其与涡流器、喷咀密切配合。

- 2) 筒体

- (3) 传焰管

\* 功用—— 传焰、均压。

- (4) 火焰筒固定形式呈“静定”

\* 简支式—— 喷咀铰支，后端定位—— WP6、WP7、WP8

\* 悬臂式

JT3D、J57—— 利用向前的轴向力而使火焰筒顶死在六个喷咀上。

WJ6、JT9D、WP5—— 在前段利用径(斜)向销钉固定之。

### 5.1.3.4 喷咀

(1) 功用—— 将燃油雾化、汽化，并形成一定浓度场的混气（注意煤油与柴油、汽油的区别）。

- (2) 设计要求：

- 1) 混气要求具有稳定燃烧的浓度场—— 雾化方法必须与回流区相适应。

- 2) 在满足雾化条件下，油泵压力应尽可能低，以简化燃油系统。

- 3) 起动性要好—— 因为此时油泵无法建立正常油压。

- (3) 结构特点：

- 1) 离心喷咀

- 2) 气动喷咀

- 3) 蒸发喷咀

- 4) 甩油喷咀

### 5.1.3.5 点火器

- (1) 功用—— 在结构简单的条件下，保证各种状态可靠点燃。

- (2) 点火方式

- 1) 间接式

\* 先点燃特制的微型燃烧室(点火器)，形成小火炬，再作引燃用。



- \* 固定形式要注意密封、漏油和膨胀自由等因素。

点火器与机匣为固持、与火焰筒为活铰。

- \* 点火能量大, 高空性能较好。

对安装位置(相对于主燃区)不太敏感—通常与联焰管联合使用。

- \* 要注意其引气(点火用)与冷却(点火器不工作时不形成死区); 重、复杂。

## 2) 直接式

- \* 常用高能低压电咀—可防止导通时电压骤降, 而影响电能输出。

- \* 简单、轻。

- \* 对安装位置要求严—因点火能量受限, 故必须位于高温区。

易污染或烧蚀 (通常置于火焰筒头部)。

## (3) 周向布局的影响因素:

上半部—清洁

中 部—传焰路线最短。

下半部—贫油熄火后再起动容易, 但点火器易污染。

## 5.1.4 排污与控污

### 5.1.4.1 污染物生成

- \* 正常燃烧产物为二氧化碳和水蒸汽。

1) CO—供氧不足而成—无味、有毒———慢车时雾化不好所致。

2) UHC(U-未燃)— 燃料燃烧不完全—臭味、致癌—

3) SO<sub>2</sub>—燃料杂物(受油质、产地影响)引起—对环境和金属均有害。

4) NO<sub>x</sub>(大气污染物-NO、NO<sub>2</sub>)—高温时两种离子直接结合所致—有毒(形成亚硝酸和硝酸)—— 起飞时大功率状态温高所致。

5) 微粒子(炭粒与冒烟) —局部高温富油区燃烧不完全所致—污染环境和降低能见度。

### 5.1.4.2 主要控污措施

- \* 由于工况不同, 生成的污染物也不同, 因此相互间有矛盾, 容易顾此失彼。 低功率时生成 CO、UHC 与冒烟, 高功率时生成 NO<sub>x</sub>。

#### (1) 排气冒烟污染控制技术

1) 低功率污染在于使火焰筒头部的局部富油区得以减弱或减小。

2) 高功率污染在于使燃区降温—提前引入二股气流较有效。

#### (2) 低污染燃烧室研制

#通常按分级(串、并级)处理之, 即分为预燃级和主燃级。

#前者以改善雾化为主, 后者以降温为主。

### 5.1.5 材料与涂层

#### 5.1.5.1 要求

热强、热安定性、耐蚀性、热导率(与可焊性)。

#### 5.1.5.2 主要材料

低温区—不锈钢 1Cr18Ni9TiA、结构钢 30CrMoSiA、碳钢 10#。

高温区—镍基 GH30、GH39、GH44。

#### 5.1.5.3 表面涂层

\* 功用—防腐、隔热—>提高热强。

\* 类别：

1) 高温珐琅涂层—厚度 0.04—0.10 mm，烧结而成—自身脆，且母材性能下降。

2) 热扩散涂层—渗铝，防氧化—母材性能受影响。

3) 热喷镀涂层—要有起粘结作用的中间层—用于难熔材料的防氧化。

4) 烘烤涂层—受粘结剂性能影响。

### 5.2 加力燃烧室

#### 5.2.1 概述

(1) 功用—使发动机在最大状态下继续提高推力—补燃(其前提是主机参数不变，因此加力室必须与尾喷管协调工作)。

##### (2) 工作环境

\* 进口温度高(950—1000℃以上)，对燃烧有利。

\* 但是：

速度大(350—450 m/s)；压力低(高空低速时，其比一个大气压低得多)。

含氧量小(尤其对于高  $T_3^*$ ，其含氧量更低)

余气系数低(因为无转动件，温度可达 2000K， $\alpha = 1.2—1.5$ )。

\* 所以，加力室不需二股气流降温，而且也会引起损失增大(流速大)。

##### (3) 设计要求

1) 薄壁圆筒应具有足够的强度与刚性(含失稳)

2) 流阻要小(因为流速大)

3) 热膨胀自由

4) 起动平稳与迅速(其与尾喷管的协调操纵有关)

#### 5.2.2 基本构件

组成：扩压器、混合器、稳定器、供油与点火装置、壳体等。

##### 5.2.2.1 扩压器

- (1) 功用—降速、增压。
- (2) 结构特点

#### 5.2.2.2 混合器

- (1) 功用—将外涵空气引入内涵用(用于加力风扇发动机)。
- (2) 结构:
  - 1) 漏斗混合器—利用多个漏斗引气
  - 2) 环形混合器—利用平行射流紊流混合, 在该区内可设置火焰稳定器。
  - 3) 菊花混合器—(介于上述之间)

#### 5.2.2.3 火焰稳定器

- (1) 设计要求
  - 1) 权衡烧着、烧稳、烧好与阻力小间的矛盾。
  - 2) 传焰要求突出—对烧着、烧稳均有利。
  - 3) 具有足够刚性与热膨胀自由—否则会引起局部过热; 热变形对燃烧较敏感。
- (2) 结构特点
  - 1) 环形稳定器:
  - 2) 径向稳定器—WP7 乙、WP13(都有大小各十个稳定器)
  - 3) 蒸发式稳定器: (SPEY 或 WS9)
  - 4) 气动式稳定器: (法国“阿塔”)
  - 5) “沙丘”式稳定器:

#### 5.2.2.4 供油系统与点火装置

- (1) 喷咀特点:
  - 1) 喷油量需由自动控制实现之, 不能人为随意调节。

这是由于要求主机参数不变所致。显然, 油量的变化范围和变化率都比主燃烧室要小些。
  - 2) 喷咀位置与稳定器形式密切相关。

通常在稳定器前形成均匀混气, 而在其附近形成局部富油区(因为回流区小, 来不及形成良好的浓度场)。
  - 3) 喷咀小而数量多, 以保证雾化质量。
- (2) 常用形式
  - 1) 单路离心喷咀
  - 2) 直流喷咀
  - 3) 针塞喷咀
- (3) 供油系统
- (4) 点火装置
  - 1) 预燃室(WP6、WP7)

- 2) 高能电咀 (F100 的值班稳定器内)
- 3) 催化点火(SPEY)
- 4) 热射流 (J57-F13)

#### 5.2.2.4 壳体

##### (1) 功用:

- 1) 保证燃气能正常地(不振荡)、完全地燃烧。
- 2) 承受一定负荷。
- 3) 有时需与飞机长度协调。

##### (2) 结构:

### 5.3 排气装置

#### 5.3.1 尾喷管

(1) 功用: 将燃气的部分热焓转变成动能, 并以一定方向排出。

##### (2) 要求:

- 1) 具有足够刚性, 以保证排气流量精度与喷口动作的灵活性。
- 2) 喷口动作要求平稳, 以使发动机状态变化匹配。

##### (3) 尾喷管结构:

- 1) 不可调收敛喷口 WP5、WP8 (可增有延伸管)
- 2) 可调式收敛喷口 (通常用于加力状态)

##### <1> 鱼鳞片调节 WP6

形状复杂、刚性好(薄壁、盒形), 且需通风冷却。

鱼鳞片调节要求打开快、收拢慢; 且需同步动作。

喷口面积应能调整, 以满足各状态的推力要求。

鱼鳞片片数的确定—可用于推算加力比。

安装座可兼作辅助安装节。

##### <2> 气动调节 (引压气机空气)

##### 3) 可调收敛扩张式喷口

双控鱼鳞片 J79 复杂

单控鱼鳞片 J57、WP15

引射式 利用冲压的高压空气

##### 4) 矢量' 喷口 飞马发动机(垂直、短距起落用)

#### 5.3.2 反推力装置

功用: 缩短飞机着陆滑跑距离。

要求: 强刚度足够大;

简单可靠, 且能重复使用(广泛用于民航)。

结构：蚌壳式 SPEY 511（与喷口联体）；  
Olympus（喷口与反推力分开），  
叶栅式 RB211（外涵反推力）。

### 5.3.3 消音装置

‘噪音’是协和飞机未获广泛使用的致命原因之一。

#### (1) 噪音来源

外噪音

内噪音

#### (2) 噪音特点

1) 工作状态不同而噪声表现不同。

慢车状态——高频哨音声， 最大状态——低频轰鸣声；

不正常时—— 振荡燃烧或喘振或其它。

2) 有方向性——通常沿进出口轴线成  $20^\circ \sim 50^\circ$  的方向为最大。

3) 轰鸣噪声与喷气速度有关——亚音时与 8 次方成正比；超音时与 3 次方正

比

#### (3) 结构——（仅针对轰鸣噪声的消音装置而言）

\* 原理：分散紊流混合的能量； 减小紊流混合的气动剪力。

1) 星形式—— 增加与周围气体的接触区, 或细化射流柱。

2) 波纹式—— 利用引射作用，减小相对速度差。

## 6 航空发动机的支承

发动机总体结构通常可分为转子、静子与附件及其传动三大部份。发动机(转子)的支承就是指转子向静子传递负荷的必经的关键部位，也是发动机的最薄弱环节之一。显然,它的布局(方案)对发动机总体结构至关重要。

### 6.1 转子支承方案

转子支承方案是指压气机与涡轮转子联在一起的支承方案。

符号：      \* ——— \* ——— \*

压气机      涡轮

#### 6.1.1 单转子支承方案

- (1) 两支点：    1—1—0      吉伦  
                      0—2—0      WP8 起动机  
                      1—0—1

- (2) 四支点：

- \* 压气机、涡轮分别按两点支承。支承安排呈“静定”的。
- \* 联轴器作用 (与止推轴承位置安排有关)

- (3) 三支点：      1—2—0    WP6、WP8  
                              1—1—1    HK-4

- (4) 支承安排特点(小结)：

1) 支承安排通常呈“静定”的，联轴器广泛采用‘柔性’的一不致因制造装配误差而带来附加载荷。

2) 保证转子刚性条件下，力求减少支承数目与轴承机匣—以使结构简化，重量轻。

- 3) 止推轴承设在主承力机匣(通常在中间位置)。

#### 6.1.2 双(多)转子支承方案

双转子支承方案所用轴承数较多，为此需对轴承按序编号。

- (1) 七支点

J57	高压转子	1—2—0
	低压转子	1—2—1
SEPY	高压转子	1—2—0
	低压转子	1—2—1

- (2) 五支点

WP7	高压转子	0—2—0
	低压转子	1—2—0

- (3) 四支点

JT9D	高压转子	0—1—1
------	------	-------

低压转子 1—1—0

(4) 三转子支承方案

RB 211——八支点方案

高压转子 1—0—1

中压转子 1—2—0

低压转子 0—2—1

## 6.2 联轴器

着重介绍‘柔性’联轴器。

### 6.2.1 功用

- (1) 传力(轴力、径力)——球头、端面和螺旋套齿。
- (2) 传扭——套齿(绝大多数联轴器均采用)。
- (3) 不共轴自位(起铰支作用)——球头。

### 6.2.2 套齿不共轴时的受力特点

(1) 啮合齿载荷呈周期变化,且沿齿向不均匀分布——弯曲+挤压——> 实际承载能力仅为名义能力的 10—20 %。

(2) 正常工作时, 名义的齿侧间隙(Delta)应大于齿宽(B)与倾角(Fai)的乘积。即在另一侧齿面不产生附加的挤压应力; 但过大侧隙又容易引起冲击。

(3) 为保证传扭强度, 需增加套齿半径 R。

(4) 外套齿摆动中心应尽可能靠近内套齿中心。

### 6.2.3 设计要求

1. 在高转速下可靠工作。
2. 装配的不可见性与可达性。
3. 平衡性结构(结构的对称性与装配的重复性)。

### 6.2.4 典型结构

单转子 WP8 装配与工作——全面而复杂。

WP6 方便简单(含不可见), 但偏心、不平衡性。

WJ6 方便、装配(含不可见), 但间隙 A 与齿侧配合。

双转子 WP7 高压‘刚性’(双锥面); 低压球头、调整垫、不可见。

## 6.3 支承结构

### 6.3.1 航空用滚动轴承

#### (1) 工作特点

- 1) 高温、高速、载荷大。
- 2) 易于低温无油起动。
- 3) 有时允许短时间没有滑油供入。

(2) 结构特点

<1>精度、材料均有特殊要求—由工作条件提出。

<2>滚动体小而多—承载大、振动小、离心力小—广泛采用轻系列、特轻系列。

<3>滚动体与内外环的滚道接触：

(3)保持架：

作用：减少滚动体碰撞与摩擦；导热。

保持架作悬浮运动，易振动，需有高速定心措施：

(4)特殊结构：

1)润滑冷却(后者为主)的专用形式：

<1> 球轴承 内环中心 孔

<2> 滚棒轴承可用翼形保持架与中心供油。

2)椭圆轴承、轴向预压轴承(后者常用于小型球轴承)—用于克服‘蹭伤’现象(‘蹭伤’是高速轴承主要故障特征之一)。

3)挤压油膜轴承—减振用。

6.3.2 典型支承特点

WP8

WP7

SEPY

6.4 封油装置

6.4.1 功用

1.防止滑油外泄； 2.防止高温气体内渗。

6.4.2 非接触式

形式：

螺旋式

篾齿式

6.4.3 接触式

形式： 涨圈式、浮动圈式(后者更适于较大的相对径向位移量)。

原理：(仅介绍涨圈式)

在一定压差下，涨圈外径涨紧并游动、单侧贴合并滑动。压差过大时，可用多道涨圈。



## 7 附件系统

### 7.1 概述

功用：保证发动机正常工作的所需的“神经”系统。

组成：主要有滑油、起动、燃油与调节系统，以及保证它们正常运行的传动系统。有的机种还有喷水、冷却系统等。

(为防内容重复，本章主要介绍滑油、传动系统)

### 7.2 滑油系统

#### 7.2.1 功用

- (1) 保证轴承、齿轮等相对运动构件的冷却与润滑(以冷却为主)。
- (2) 提供适当的液压动力(WP6 放气用)。
- (3) 有时为防冰用。

#### 7.2.2 设计要求(对滑油的要求除外)

- (1) 保证所有工作状态下，滑油系统都能正常工作。

由于滑油系统属于两相(液相与气相)流动，因此油的流动以及它的温度、压力都与工作状态的变化(飞行包线、飞行姿态和起动等)密切相关。

- (2) 循环使用滑油的消耗量要小——注意封严装置与通气管等的泄漏。
- (3) 结构轻、紧凑与可靠(寿命长)。
- (4) 维护与检查方便——便于接近与采用磁堵。

#### 7.2.3 系统简介

系统有‘开、闭’之分(针对滑油流动而言)：

A. ‘开式’用于短期或一次使用，或局部开式——用于靶机；

B. ‘闭式’为节省滑油——常用。

循环量取决于冷却、油质与操纵(含附件活动)所需，其中以冷却为主。

进回油的容积流量并不连续，而是取决于油气的生成，

$$W_{\text{回}} \geq 3 * W_{\text{进}}$$

- 供油路线
- 回油路线
- 通气路线

### 7.4 附件传动系统

#### 7.4.1 传动对象(WP7)

(传动对象系指需要提供机械动力与感受机械转速的附件)

燃油系统用：输油泵、主泵

(含进、回油泵)、前回油泵、油气分离器、离心通风器。

起动系统用：起动发电机。

飞机系统用：液压泵。

感受系统用：转速传感器(属发电机)、低压转速调节器(调节主泵)。

#### 7.4.2 附件与其传动的布局原则

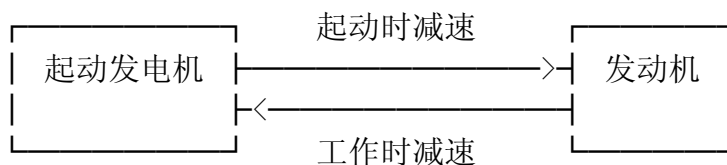
- (1) 满足各附件的工作要求；

- (2) 相对集中与附件集约化；
- (3) 附件应便于调整与更换—常用快卸环与浮动轴；
- (4) 减小迎风面积。

#### 7.4.3 双速传动机构—仅用于起动发电机

(1) 目的：起动过程中，使电机电流与起动扭矩减少；发电过程中，保证电机强度与改善电力品质。

(2) 功用：使电机的转速在发动机不同状态(起动与工作)下基本保持不变，并又能满足两者间的转速匹配要求。



(3) 功率传递路线：

起动过程：电机(电动机)→摩擦离合器→棘轮离合器→发动机。

发电过程：发动机→滚棒离合器→摩擦离合器→电机(发电机)。

正向盘动转子时：传递路线类同于起动过程，但伴有棘轮离合器的答、答声；

反向盘动转子时：棘轮离合器、滚棒离合器都起作用，使传递路线自锁，且伴有滚棒离合器的‘韧性’撞击手感。显然，这样可防止附件反转而受到损坏。

摩擦离合器—防止起动与切换转速时的冲击和过载，起保护电机作用。

棘轮离合器—低转速时单向啮合，高转速时全部脱开。

滚棒离合器—高转速与反向盘动转子时具有‘韧性’切换的自动啮合特性。