

一章 基础知识和工作原理

基础知识

1. 牛顿第一二三定律:

牛顿第一定律是: 任何物体都保持静止的或沿一直线作匀速运动的状态, 直到作用在它上面的力迫使它改变这种状态为止。又称 **惯性定理**

牛顿第二定律: 物体受到外力作用时, 它所获得的加速度的大小与外力的大小成正比, 与物体的质量成反比, 加速度的方向与外力的方向相同。

牛顿第三定律: 一个物体对另一个物体施力, 则第二个物体就同时对第一个物体也施力。两个物体之间的作用力和反作用力, 在同一直线上, 大小相等而方向相反。

2. 热力学第一定律:

- 系统与外界所交换的热量等于系统内能的变化量加上系统与外界交换的功。
- 自然界一切物体都具有能量, 能量有各种不同形式, 它能从一种形式转化为另一种形式, 从一个物体传递给另一个物体, 在转化和传递过程中能量的总和不变。

热力学第二定律:

- 开尔文说法: “不可能制造出从单一热源吸热并使之全部转变为功的循环发动机”。
- 克劳修斯说法: “不可能由低温物体向高温物体传送热量而不引起其它变化”。
- 热动力机中, 工质从热源所得到的热量, 不可能全部变为功, 只能将其中一部分热量变为功, 其余的热量必须通过工质放给某个冷源。

工作原理

涡喷发动机的工作原理

喷气发动机的热力循环是什么?(布来顿循环或定压循环)

净推力和总推力

推力原理

推力是怎样产生的? 运用牛顿第二定律解释发动机推力

影响推力的因素

发动机的推荐效率的定义 以及其影响因素, 如何提高涡扇发动机的推进效率

影响热效率的因素

SFC 的影响因素

表征发动机推力的两个重要参数

什么是涡轮风扇发动机的涵道比? 发动机的涵道比与推力的分配有什么关系? 举例说明

1 涡喷发动机的工作原理 ?

涡喷发动机以空气为介质,

- 进气道将所需的外界空气以最小的流动损失送到压气机;
- 压气机通过高速旋转的叶片对空气压缩做功, 提高空气的压力;
- 空气在燃烧室内和燃油混合燃烧, 将化学能转变成热能, 生成高温高压燃气;
- 燃气在涡轮内膨胀, 将热能转为机械能, 驱动涡轮旋转, 带动压气机;
- 燃气在喷管内继续膨胀, 加速燃气, 燃气以较高速度排出, 产生推力。

2 喷气发动机的热力循环是什么?(布来顿循环或定压循环)

[1]绝热的压缩过程[2]定压的加热过程[3]绝热的膨胀过程[4]定压的放热过程

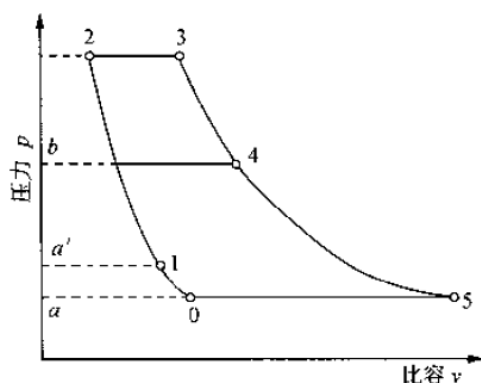


图 1-14 布萊頓循環

它包括：

绝热压缩过程，在进气道、压气机中进行（0 ~ 1 ~ 2）；

等压加热过程，在燃烧室中进行（2 ~ 3）；

绝热膨胀过程，在涡轮、喷管中进行（3 ~ 4 ~ 5）；

定压放热过程，在大气中进行（5 ~ 0）。

推力原理

涡轮喷气发动机作为飞机的动力装置，在工作时连续不断地吸入空气，空气在发动机中经过压缩、燃烧和膨胀过程产生高温燃气从尾喷口喷出，流过发动机的气体动量增加，使发动机产生反作用推力，发动机作为一个热机，它将燃料的热能转变为机械能。涡轮喷气发动机同时又作为一个推进器，它利用产生的机械能使发动机获得推力。

3 净推力和总推力

根据牛顿第 2，第 3 定律，气流进入发动机和离开发发动机的动量发生变化，产生推力。

净推力：取决于离开发发动机的燃气动量与进来的空气动量加进来的燃油动量。

净推力还包括喷管出口的静压超过周围空气的静压产生的推力。

$$F_n = Q_m a (V_j - V_a) + A_j (P_j - P_{am})$$

$Q_m a * V_a = F_d, F_d$ 造成两个影响，

1 是冲压，提高燃烧效率效率，即冲压影响。

2 是阻力。即空速的影响。

两者一正一付，从 p17 的图看一看，总的影响是增加的。

即，空速的提高，推力增加。

总推力：是指当飞机静止时发动机排气产生的推力，

包括排气动量产生的推力

和喷口静压和环境空气静压之差产生的附加推力。

$$F_g = Q_m a (V_j) + A_j (P_j - P_{am})$$

正常飞行时，压气机、扩压器、燃烧室、排气锥产生向前推力，

涡轮、尾喷口产生向后的推力。

4 推力是怎样产生的？运用牛顿第二定律解释发动机推力

[1] 气体流过发动机时，发动机的内壁及各部件对气体施加作用力，使其动量发生变化，而气体必然同时给予发动机及各部件以反作用力，这些反作用力在轴向分力的合力，即为发动机的推力。

[2] 牛顿第二定律 [3] 牛顿第三定律

$$F = q_m (V_5 - V) + A_5 (P_5 - P_0)$$

F: 推力 (牛顿)

q_m : 进入发动机的空气质量流量 (公斤/秒)

V_5 : 喷气速度 (米/秒)

V : 飞行速度

A_5 : 喷管出口面积 (米²)

P5: 喷管出口压力(帕)

P0: 大气压力

(注意: 各个部件产生推力的方向)

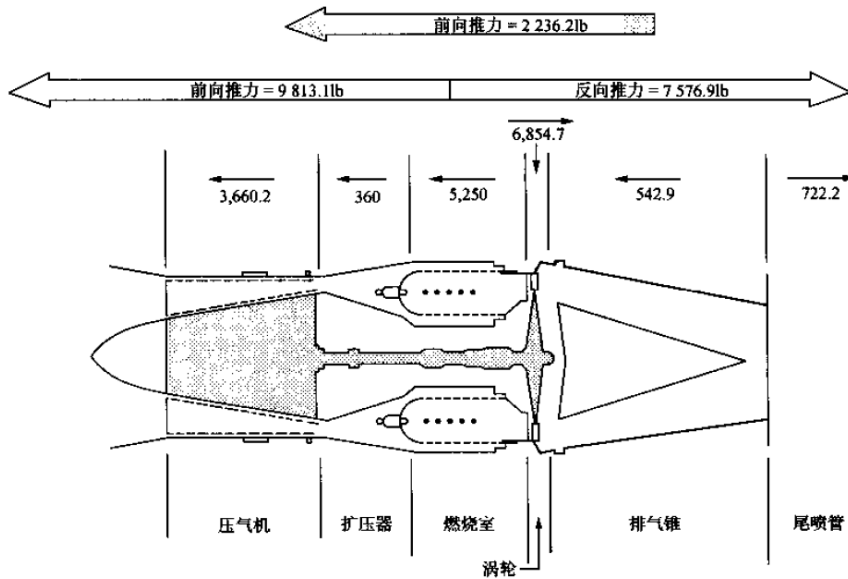


图 1-15 涡喷发动机的推力分布

5、影响发动机推力的因素:

气体流过发动机时对发动机壳体内外壁面的作用力的合力, 在发动机轴线方向的分力, 叫推力。

影响推力的因素: 通过发动机的空气**质量流量**和**单位推力**。 $F = F_s * Q_m$

单位推力 F_s : 发动机推力 F 与流过发动机空气的质量流量的比值, 每单位气体产生的推力。

质量流量 Q_m : 受大气条件的影响。空气温度、飞行高度、空气压力

(第四章: 涡扇发动机推力影响因素: 理解涡扇与涡喷的构造原理, 涡扇是改变了质量流量的影响因素)

6、飞行高度对发动机推力有什么影响?

高度对推力的影响是同空气密度相关的。随着飞机高度增加, 空气压力减小, 温度也下降。但是, 外界空气压力减少比温度下降的快。

所以, 随高度增加, 发动机实际推力下降。当高度到达同温层, 温度停止下降, 外界压力随高度继续下降时, 推力下降较快。

2. 影响推力的因素

所有发动机是在变化的空速和高度下工作，状态变化影响进入发动机的空气温度和压力，通过发动机的空气量和在发动机喷口的燃气压力。从推力公式可知，当油门位置一定仅考虑通过发动机空气速度的变化时，随着飞机速度的增加，推力减少；另一方面，冲压的影响增加空气流量增大推力（见图 1-16）。在推力公式中最重要的变量是空气质量流量，空气温度和压力决定进入发动机的空气密度，影响空气流量。当空气密度减小时，空气流量减少，发动机产生的推力减小。温度增加，空气密度减小。压力增加，空气密度增大。飞行高度增加，空气压力减小，空气温度降低。但是，外界空气压力的减小比温度下降的快，发动机实际推力随高度增加而减小。

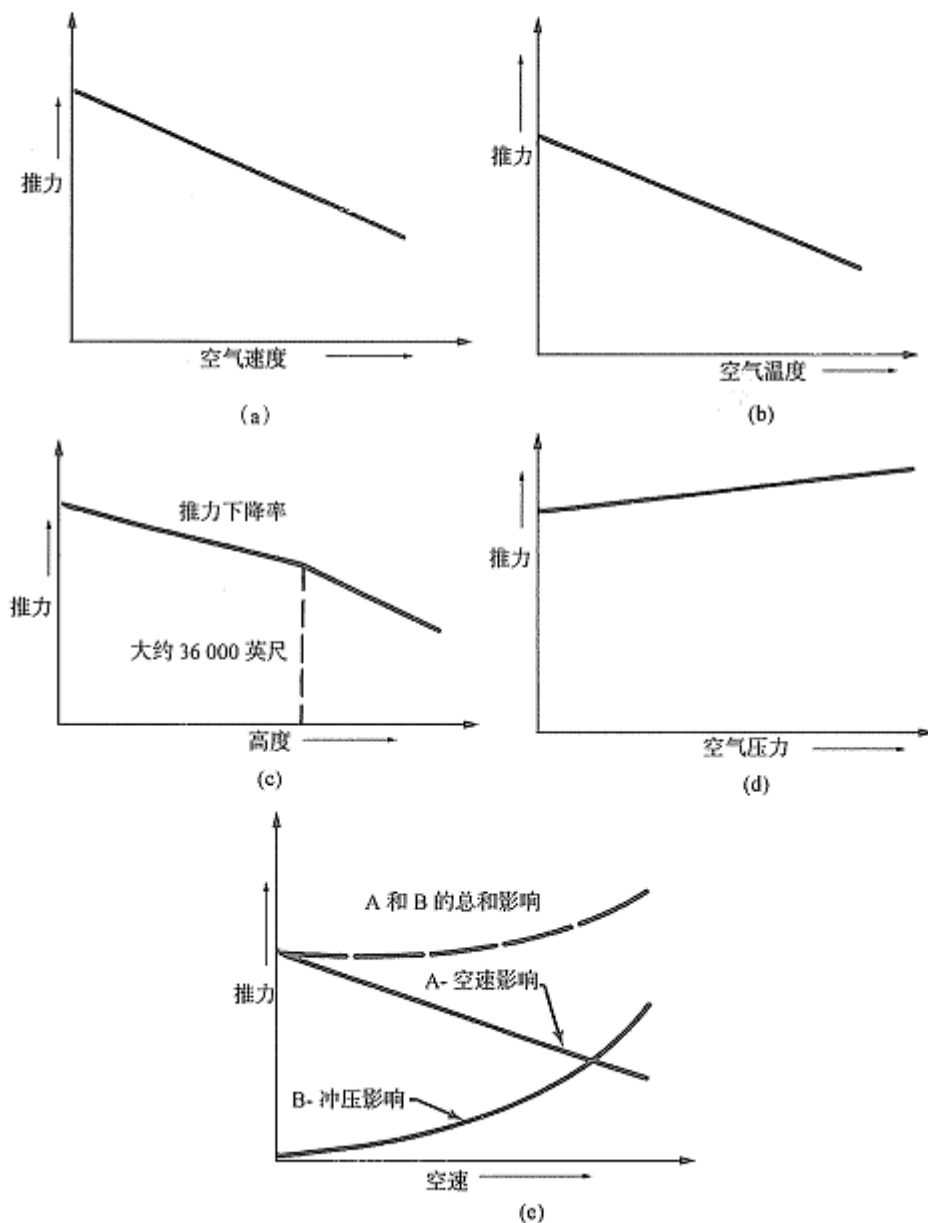


图 1-16 影响推力的因素

6 影响热效率的因素？

热效率表明，在循环中加入的热量有多少变为机械功。热效率也称做**内效率**。

影响因素有：

● 加热比（涡轮前燃气总温）	增大，热效率也增大。
● 压气机增压比，	提高，热效率增大， 当增压比等于 最经济增压比 时，热效率最大， 继续提高增压比，热效率反而下降。
● 压气机效率	增大，热效率也增大。

● 涡轮效率。

增大，热效率也增大。

(**推进效率**：推进功率与单位时间流过发动机的气体获得动能增量的比值。推进功率是推力与飞行速度的乘积。推进效率表示发动机产生的可用功有多少转变成推进功率，也称作**外效率**。

发动机总效率：燃料完全燃烧放出的热量有多少转变成发动机的推进功。总效率等于发动机的热效率与推进效率的乘积。)

附加：发动机的推荐效率的定义 以及其影响因素，如何提高涡扇发动机的推进效率

对于涡轮风扇发动机：涵道比、飞行速度。纯涡喷：飞行速度。涡桨：飞行速度。

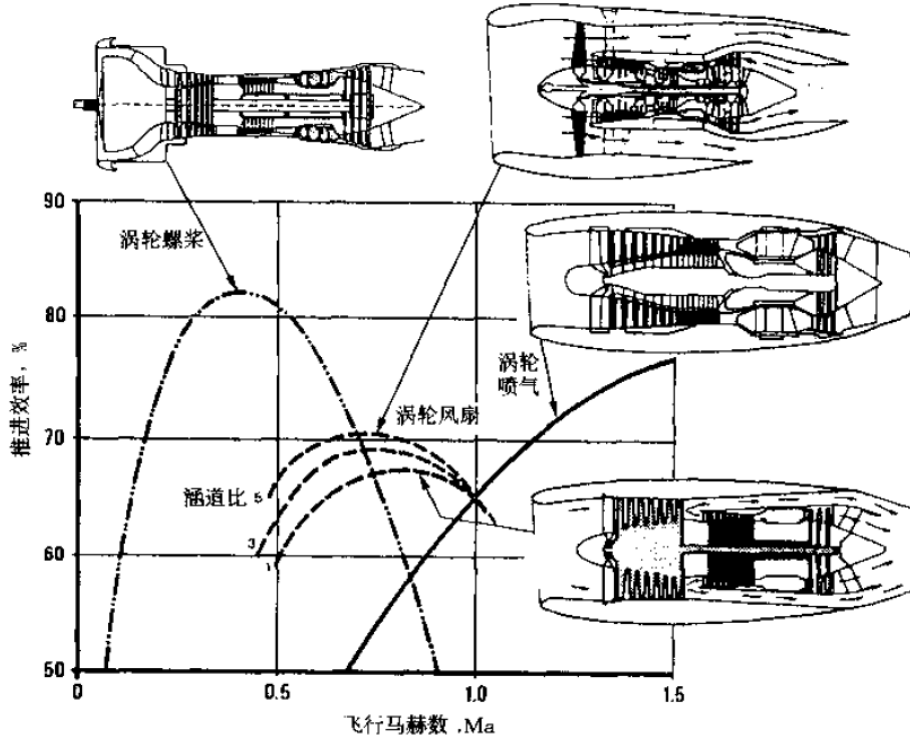


图 1-17 推进效率的比较

7 SFC 的影响因素：

产生单位推力在一小时内所消耗的燃油质量称为**燃油消耗率**。

影响燃油消耗率的因素有：

- 单位推力和
- 燃烧室出口与进口总温的差值。

单位推力：发动机的推力与流过发动机空气的质量流量的比值，称为单位推力。

10 表征发动机推力的两个重要参数？

- 发动机压力比 EPR：低压涡轮出口总压与压气机进口总压之比。分类：可以由电机械式或电子式传感器指示
- 另外一个参数是风扇转速 N_1 。

11 什么是涡轮风扇发动机的涵道比？发动机的涵道比与推力的分配有什么关系？举例说明

- 涡轮风扇发动机的涵道比是通过外涵道的空气流量和通过内涵道的空气流量之比。
- 涡轮风扇发动机的涵道比越大，外涵所产生的推力所占的比例越大，
- 如涵道比为 4 以上的高涵道比涡扇发动机，外涵所产生的推力约为总推力的 80%

3. 发动机的一些重要参数

发动机压力比：压力比是在发动机上两个不同地点之间的压力关系。压气机的增压比指压气机出口与进口空气总压之比，说明压气机增加进来的空气压力的能力。发动机压力比用 EPR 表示。它一般是指低压涡轮的出口总压与低压压气机进口总压之比，同气流通过发动机的加速成比例，对于轴流式压气机的涡扇发动机它表征推力。

$$EPR = p_{07}/p_{02} \text{ (普惠公司 JT 系列)}$$

$$EPR = p_{04.95}/p_{02} \text{ (PW4000 系列)}$$

罗-罗公司的三转子发动机如 RB211-535E4，EPR 用风扇出口总压与进口总压之比表示。

发动机推力仅在地面试车台上能精确测量，在飞机上推力只能间接测量，发动机压力比 (EPR) 是一个推力表征参数并在驾驶舱显示。

发动机涵道比：它是指涡扇发动机通过外涵的空气质量流量与通过内涵的空气质量流量之比。涵道比为 1 左右是低涵道比，2~3 左右是中涵道比，4 以上是高涵道比。

排气温度：用 EGT 表示。涡轮进口总温是发动机最重要、最关键的一个参数，但是由于这里温度高，温度场不均匀，目前实际上是测量涡轮排气温度间接反映涡轮进口温度的高低，限制 EGT 以保证涡轮进口温度不超限。

风扇转速：用 n_1 表示。对于高涵道比涡扇发动机，由于风扇产生的推力占绝大部分，风扇转速也是推力表征参数，在驾驶舱显示。

1.2.5 发动机性能指标

(1) 推力：发动机最主要的性能指标。推力单位英制是磅 (lb)；公制是牛顿 (N) 或千牛顿 (kN)。10 kN 等于 1 020 kg 或 2 249 lb。

(2) 单位推力：发动机推力与流过发动机空气的质量流量的比值。

(3) 推重比：发动机推力与发动机重量的比值。

(4) 迎面推力：发动机推力与发动机最大迎风面积的比值。

(5) 燃油消耗量：单位时间进入燃烧室的燃油质量，也称燃油流量。英制单位是磅/小时 (lb/h)。

(6) 燃油消耗率：产生单位推力每小时所消耗的燃油质量，即产生每磅推力每小时消耗的燃油量，又称耗油率。英制单位是磅/磅力·时⁻¹ (lb/lbf·h⁻¹)。耗油率是决定飞机的航程和续航时间的重要参数。它是重要的经济性指标。

(7) 轴功率 (SHP)：供给螺旋桨的功率。

(8) 当量轴功率 (ESHP)：计算总的功率输出时，轴功率加上喷气推力的影响。

由于涡轴和涡桨发动机通过旋转轴输出功率，在试车台上依据轴的转速和扭矩测量发动机产生的功率 (马力)。喷气发动机在试车台上测量发动机输出推力 (磅)。在空速每小时 375 mile (英里) 时，1 lb (磅) 推力等于 1 hp (马力)。因此，推力马力 (THP) 即喷气发动机在给定的空速运行时产生的近似推力功率，等于推力乘上空速再除以 375。

(9) EGT 裕度：EGT 限制值 (红线值) 与发动机 EGT 实际最高值之差值。起飞时 EGT 最高，计算起飞 EGT 裕度。它是表示发动机性能衰退的重要参数。

四章 发动机特性

涡轮喷气发动机：

当飞机的飞行高度升高时，简要说明如何保证发动机的稳态工作？

什么是燃气涡轮喷气发动机的加速性？大气条件和飞行状态对发动机的加速性有何影响？

燃气涡轮发动机加速时应注意什么？

燃气涡轮喷气发动机与活塞式发动机相比有哪些特点？

涡喷发动机的优点？

燃气涡轮喷气发动机常用的工作状态有哪些？是如何确定的？

涡轮发动机的特征，什么是**燃气涡轮发动机的特性**？发动机特性分哪几种？

何为燃气涡轮喷气发动机的转速特性？其规律如何？

何为燃气涡轮喷气发动机的高度特性？其规律如何？

什么是燃气涡轮喷气发动机的速度特性？其规律如何？

双转子涡喷发动机的特点？（或者 双转子与单转子发动机性比的优点？）

双转子涡喷发动机中是如何满足高压转子和低压转子的共同工作的？

1. 当飞机的飞行高度升高时，简要说明如何保证发动机的稳态工作？

稳态是指发动机在某一转速下连续的工作状态。

①转速一致，单轴涡喷发动机，压气机和涡轮的转速是同步的；

②流量连续，流过涡轮的燃气流量等于流入压气机的空气流量加上进入燃烧室的燃油流量，再减去引气系统引出的空气流量，如果假设燃油流量近似于引气流量，则简化为**流过涡轮的燃气流量等于流入压气机的空气流量**，

③压力平衡，涡轮进口燃气总压等于压气机出口总压乘以燃烧室的总压恢复系数。

④功率平衡，压气机消耗功等于涡轮输出的功乘以机械效率。

（单轴发动机稳态工作的条件：转速一致、流量连续、压力平衡和功率平衡，涡轮功率与压气机功率的平衡是暂时的，相对的，有条件限制的，随外界条件和部件的性能变化而变化）

当飞行高度升高时，由于大气密度减少，进入发动机的空气流量减少，这时若供油量保持不变，引起涡轮前燃气总温会升高，使涡轮功率增大，涡轮功率将大于压气机功率，发动机转速会增大，为了保持转速不变，随着飞行高度的增高，应适当地减少供油量来控制涡轮前总温，使涡轮功率等于压气机功率。

2. 什么是燃气涡轮喷气发动机的加速性？大气条件和飞行状态对发动机的加速性有何影响？

发动机**加速**的必要条件是要有剩余功率。改变发动机转速的最好方法是改变涡轮前温度以改变涡轮功率，而改变涡轮前温度可通过改变供油量来实现。

快推油门时，发动机转速快速上升的能力叫**加速性**，

- 加速性的好坏由加速时间来衡量。
- 加速时间通常指从慢车转速加速到最大转速或某一转速的时间。
- 加速时间越短，加速性越好。

影响因素：

1 大气温度降低、大气压力升高、飞行速度增大时，引起空气流量增大，剩余功率随之增大，发动机加速时间短，加速性能变好；

2 飞行高度升高，除因空气流量减小，加速性变差外，还由于高空燃烧条件变差，稳定燃烧范围缩小，供油量增加受到限制，加速性变差。

3. 燃气涡轮发动机加速时应注意什么？

为缩短加速时间应尽可能增大涡轮前燃气温度，以增大剩余功率。

但是注意：

- 不能发生涡轮超温，
- 发动机超转，
- 压气机不能发生喘振，
- 燃烧室不要出现富油熄火。

(减速时受到 压气机喘振和贫油熄火 的限制。)

4. 燃气涡轮喷气发动机常用的工作状态有哪些？是如何确定的？

最大起飞工作状态：不使用喷水时批准使用的最大起飞推力，该推力级别使用有时间限制，仅用于起飞；

最大连续工作状态：这是批准发动机连续使用的最大推力，为延长发动机寿命，这个级别推力在驾驶员的判断下保证安全飞行使用；

最大巡航工作状态：巡航时批准使用的最大推力；工作时间不受限制。

慢车工作状态：是发动机能够保持稳定工作的最小转速，用于在地面或空中以最低推力工作。油门杆在慢车位。此外还有

- 最大爬升即正常爬升批准的最大推力工作状态及
- 反推力工作状态。
- 最大复飞推力是飞机复飞时允许使用的最高推力

5. 涡轮发动机的特征，什么是燃气涡轮发动机的特性？发动机特性分哪几种？

特征：

- 发动机作为一个热机，它将燃料的热能转变为机械能，
- 同时作为一个推进器，它利用所产生的机械能使发动机获得推力。

发动机的特性：燃气涡轮 发动机的推力和燃油消耗率（简称耗油率），随发动机转速、飞行高度和飞行速度的变化规律叫发动机特性。

发动机特性分为：

转速特性：保持飞机高度和飞机速度不变的情况下，发动机推力和燃油消耗率随发动机转速的变化规律叫发动机转速特性。

高度特性：在给定的调节规律下，保持发动机的转速和飞机速度不变时，发动机的推力和燃油消耗率随飞机的高度的变化规律叫高度特性。

速度特性：在给定的调节规律下，保持发动机的转速和飞行高度不变时，发动机的推力和燃油消耗量随飞机速度（或马赫数）的变化规律叫速度特性。

6. 何为燃气涡轮喷气发动机的转速特性？其规律如何？

在保持飞机的飞行高度和飞行速度不变的条件下，发动机的推力和燃油消耗率随发动机转速的变化规律，叫做发动机的转速特性，又叫节流特性。

- 推力随转速的增加而增大；
- 燃油消耗率随转速的增加而下降，接近最大转速附近，略有增加。

大气温度上升，空气密度下降，在同样的转速下，流过发动机的空气流量减小，压气机增压比下降，使发动机的推力减小、燃油消耗率增加。

大气压力上升，使总压上升，造成流量和各截面的总压增加，推力增加，但燃油消耗率不受影响。

大气湿度上升，空气密度下降，空气流量下降，发动机推力将下降，但对涡轮发动机来说，仅 1/4 空气用来燃烧，故对推力影响不大，而对活塞发动机影响大。

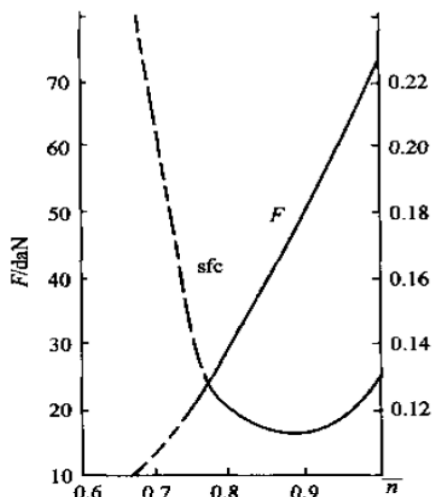


图 4-1 转速特性

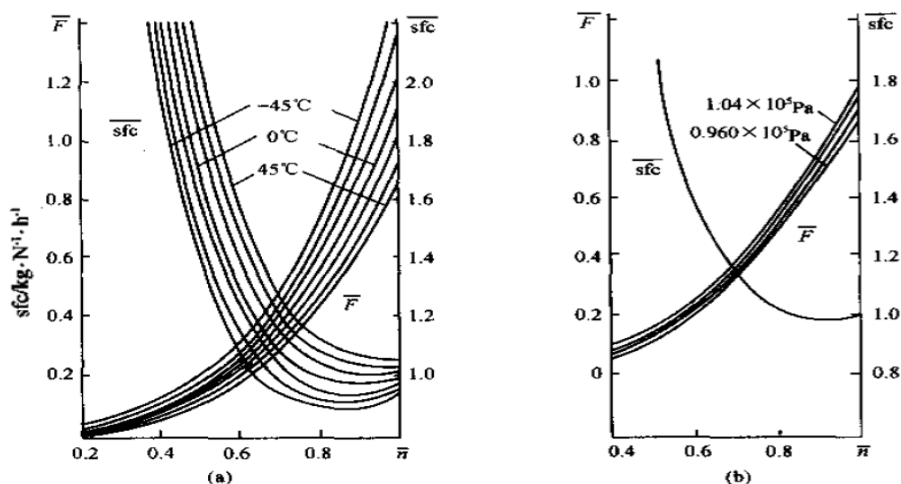


图 4-2 大气条件对转速特性的影响
(a) 不同大气温度；(b) 不同大气压力

7、何为燃气涡轮喷气发动机的高度特性？其规律如何？

在给定调节规律的条件下，保持发动机的转速和飞行速度不变时，发动机的推力和燃油消耗率随飞行高度的变化规律。
推力随着飞行高度的增加而下降，
在 11000 米以下下降的慢，
在 11000 米以上的同温层内，下降的较快。
燃油消耗率随着飞行高度的增加，
在 11000 以下下降，
在 11000 米以上的同温层不变。

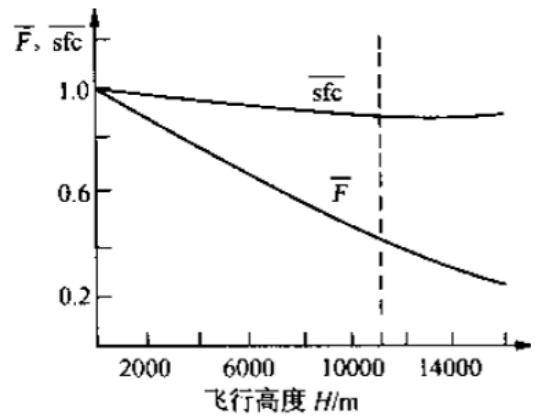


图 4-3 高度特性

8、什么是燃气涡轮喷气发动机的速度特性？其规律如何？

在给定的调节规律下，保持发动机的转速和飞行高度不变时，发动机的推力和燃油消耗率随飞行速度的变化规律，叫发动机的速度特性。

- 在低速范围内，随着飞行马赫数的增大，推力有所下降；燃油消耗率增加。
- 在高速范围内，随着飞行马赫数的增大，燃油消耗率增加，推力开始增大但当马赫数继续增大时推力转为下降。

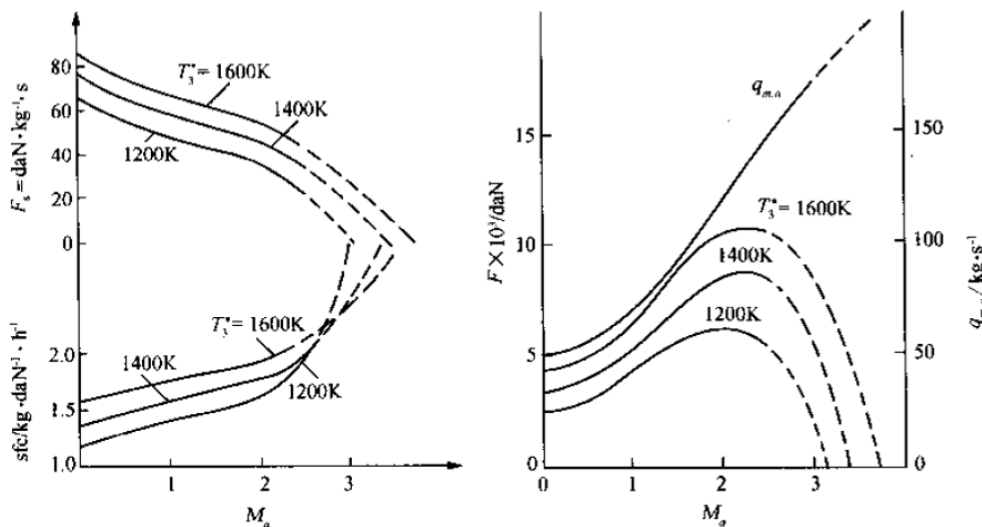


图 4-4 速度特性

(解释: $F = QM (V_5 - V_0)$, 低速时, QM 进气少, 推力下降, 当大于一点的 M 数时, q_m 增加效果好, 推力增加比较快。大 M 数时, 主要是影响 V_0 , 由于 V_5 基本保持不变, V_0 增加比较多, F 反而减少。
3 楼解释的是单位推力 F_s (取决于进气速度 V_0), 基本正确。 $F = F_s * Q_m$, Ma 在 2 附近推力达到最大。所以开始, F 减小, 是因为 F_s 减小, Q_m 增加, 但是 F_s 减小的更快。中间, F 增加, 是因为 Q_m 更快。后期, F 减小, 是因为 F_s 减小更快。)

9、双转子涡轮发动机的特点？

1. 双转子发动机启动时，启动机只带动一个转子，可用功率较小的启动机。
2. 双转子发动机具有良好的加速性。
3. 双转子可使压气机在更宽的范围内稳定工作，是防喘的有效措施。
4. 双转子的压气机具有更高的增压比，可以产生更大的推力。
5. 双转子在发动机低转速下具有较高的压气机效率和较低的涡轮前总温，在低转速工作时，燃油消耗率比单转子发动机低得多。

10、双转子涡轮发动机中是如何满足高压转子和低压转子的共同工作的？

高压转子的共同工作条件与单转子发动机中压气机和涡轮的共同工作条件一样，即：

- 转速一致，
- 流量连续，
- 压力平衡，

- 功率平衡。

保持高压转子在某个转速稳定工作是通过控制供油量来控制高压涡轮前燃气总温，使高压涡轮输出的功率等于高压压气机消耗的功率，此时低压转子自动建立平衡。

当调节供油量，高压涡轮燃气温度为一定数值，相应的低压涡轮前燃气温度也就具有某一定数值。这样，低压涡轮输出的功也就有一个定值，带动低压压气机到达某个转速，从而使低压压气机所消耗的功率恰好等于低压涡轮输出的功率，低压转子便自动地稳定在该转速下工作。

11. 燃气涡轮喷气发动机与活塞式发动机相比有哪些特点？

与活塞式发动机相比燃气涡轮喷气发动机

- 结构简单，
- 重量轻，
- 推力大，
- 推进效率高，
- 而且在很大的飞行速度范围内，发动机的推力随着飞行速度的增加而增加。

12. 涡喷发动机的优点？

- 推力大，
- 高空性能好。
- 速度特性比涡扇发动机好。

涡轮喷气发动机通过迅速加速相对小的空气质量产生很大的推力。在正常巡航转速范围，涡喷发动机的推进效率随空速增加迅速地增加。

涡轮风扇发动机

简述涡扇发动机的质量附加原理

为什么民航大型飞机使用涡扇发动机？（涡扇发动机的优点？特点？）

影响**涡扇**发动机推力的因素：

影响涡扇发动机 sfc 燃油消耗率的因素

. 风扇发动机的涵道比

1. 简述涡扇发动机的质量附加原理。

涡扇发动机的工作是以质量附加原理为基础的。

作为热机，当发动机获得一定的机械能之后，通过将这部分可用能重新分配，将内涵的一部分可用能通过涡轮驱动风扇传递给外涵，增加发动机的总空气流量，减低排气速度，降低噪音，并在一定的飞行马赫数范围内，增大发动机的推力，降低燃油消耗率。

在一定的飞行速度下，当工质获得的可用能量（即可以转变为气体动能的能量）一定时，如果工质的质量越大（即参见产生推力的气体质量越多），即发动机的推力越大。

2. 为什么民航大型飞机使用涡扇发动机？

在高亚音速范围内与涡喷发动机相比，涡扇发动机具有**推力大、推进效率高、噪音低、燃油消耗率低**的特点。它适合于高亚音速飞行，广泛应用于民航干线飞机。

缺点：

风扇直径大，迎风面积大，因而阻力大，发动机结构复杂，其速度特性不如涡喷

4.2.2 涡扇发动机特性

涡扇发动机的推力和燃油消耗率随发动机转速、飞行速度和飞行高度的变化规律称为涡扇发动机特性。影响发动机推力的因素有：流过内涵的空气流量、单位推力和涵道比。影响燃油消耗率的因素有：油气比、单位推力和涵道比。

这里转速特性所指的发动机转速是高压转子转速，推力随转速的增大而一直增大；燃油消耗率随转速增大开始降低得较快，后来下降缓慢，到接近最大转速时有所增加（见图4-5）。

讨论高度特性时假设涡轮前温度不变。随飞行高度上升时，推力一直减小；燃油消耗率在11000m以下随高度增加而减小，在11000m以上，燃油消耗率保持不变（见图4-6）。

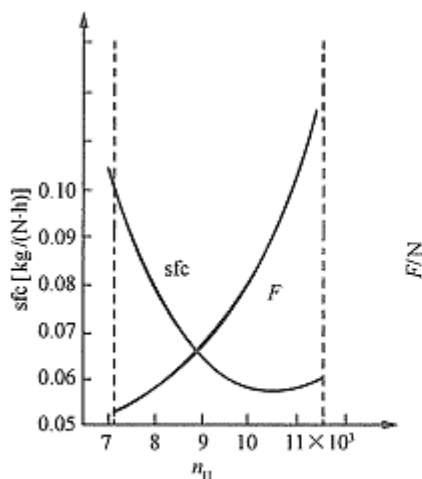


图4-5 转速特性

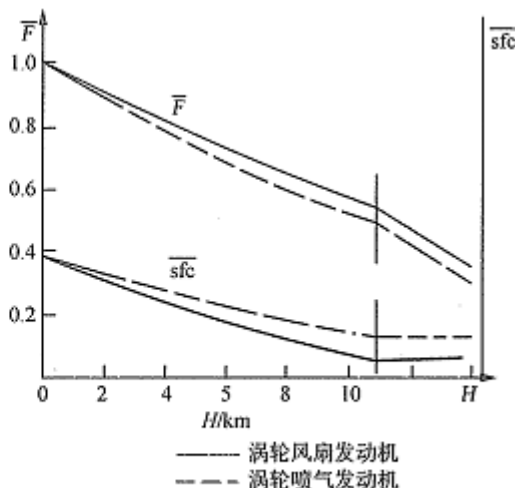


图4-6 高度特性

(涡扇发动机的3个特性与涡喷的类似。)

4. 简要说明涡扇发动机的速度特性。

在给定的调节规律下，保持发动机的转速和飞行高度不变时，发动机的推力和燃油消耗率随飞行速度（或马赫数）的变化规律，叫发动机的速度特性。

在讨论速度特性时假设涡轮前温度不变。随着飞行速度增大，涵道比也增大，单位推力减小，推力减小，而且涵道比越大，推力下降的越快；随着速度增大，燃油消耗率增加，而且涵道比越大，增加的越快。

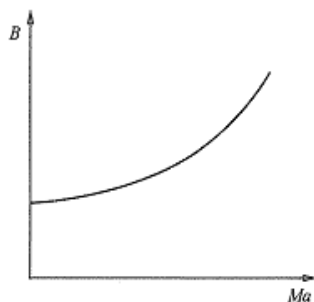


图4-7 涵道比随速度的变化

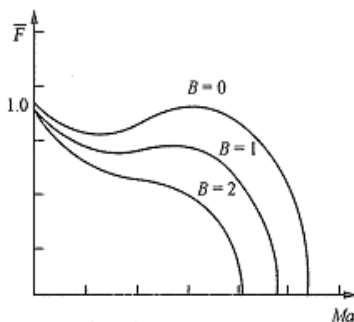


图4-8 推力随速度的变化

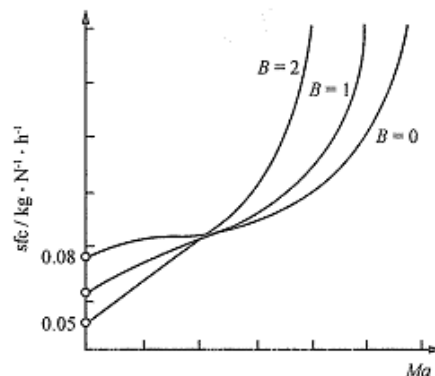


图4-9 燃油消耗率随速度的变化

3. 影响涡扇发动机推力的因素：

内涵流量，单位推力和涵道比三个。

- 内涵流量增大，推力增大；
- 单位推力增大，推力增大；
- 涵道比增大，推力增大。

4. 影响涡扇发动机 sfc 燃油消耗率的因素：

油气比、单位推力、涵道比

5. 风扇发动机的涵道比：

涵道比的定义：外涵道空气质量流量与内涵道的空气质量流量之比。

涵道比随**转速**的增大而减小。

随着**飞行速度**的增大，涵道比在不断地增大。（低涵道比发动机上升的慢；高涵道比的上升的快）

在 11000 米以下，高度升高时涵道比减小；在 11000 米以上，涵道比均保持不变。

（空气流量增加时，外涵道增加的多；减少时，外涵道减少的多）

涡桨发动机

何谓涡桨发动机？什么是直接传动涡轮螺旋桨发动机？涡桨发动机螺旋桨可由哪两种方法驱动？

涡轮螺旋桨发动机产生的总推力（拉力）如何分配的？

涡桨发动机的拉力由谁产生？

什么是螺旋桨桨叶迎角？影响桨叶迎角的相关因素？

涡桨发动机的负拉力是如何实现的？

在现代涡桨发动机中，多采用恒速螺旋桨，如何保持螺旋桨恒速？

涡桨发动机的当量轴功率

1. 何谓涡桨发动机？什么是直接传动涡轮螺旋桨发动机？涡桨发动机螺旋桨可由哪两种方法驱动？

当来自涡喷发动机基本部分（常常称为燃气发生器）的排气用于旋转**附加的涡轮**并通过**减速器驱动螺旋桨**时，这就是**涡桨发动机**。

- 在某些涡桨发动机，附加功率直接从压气机功率传动轴驱动螺旋桨减速器产生。这种类型称为**直接传动涡轮螺旋桨发动机**。

- 在现代涡轮螺旋桨发动机中更多的有自由涡轮，他独立于驱动压气机的涡轮，在发动机排气流中自由转动。自由涡轮通过减速器驱动螺旋桨。

驱动方式：可由**燃气发生器涡轮**驱动，也可由它自己的**自由涡轮**驱动。

2. 涡轮螺旋桨发动机产生的总推力（拉力）如何分配的？

涡轮螺旋桨发动机的涡轮既带动压气机也带动螺旋桨。约 2/3 的涡轮功率用来转动压气机，其余的 1/3 用来转动螺旋桨和传动附件。

涡桨发动机的拉力绝大部分由螺旋桨产生，而只有 10%-15%由喷气产生。

3. 涡桨发动机的拉力由谁产生？

涡桨发动机的涡轮设计成从膨胀的燃气中吸收大量的能量不仅提供满足压气机和其他附件需要的功率，而且输出最大可能的扭矩到螺旋桨轴。 **拉力是由在前面的螺旋桨和后面的喷管组合作用产生的。**

4. 涡桨发动机的负拉力是如何实现的？

通过改变螺旋桨的桨叶角为负值，产生负拉力。

桨叶角：螺旋桨旋转平面和桨叶弦线构成的夹角。桨叶攻角：桨叶弦线与相对风的夹角。

5. 什么是螺旋桨桨叶迎角？影响桨叶迎角的相关因素？

- 桨叶弦线和相对风的夹角。
- 相对风的方向由飞机的速度和螺旋桨的旋转运动决定。

6. 涡桨发动机控制器的功用是什么？

涡桨发动机燃油控制器接受驾驶员的功率要求信号，通过调节燃油流量，提供要求的功率而且不超过发动机转速和涡轮进口温度限制。涡桨发动机燃油控制器中有最大转速限制器、排气温度限制器和扭矩限制器，以保证这些重要参数不超过安全限制。

控制器考虑一些变量（

- 压气机出口压力、
- 燃气发生器转速、
- 自由涡轮转速和
- 压气机进口温度）

旋转涡桨发动机的螺旋桨多是恒速螺旋桨。

7. 在现代涡桨发动机中，多采用恒速螺旋桨，如何保持螺旋桨恒速？

保持螺旋桨恒速是由**螺旋桨调速器**实现的，它感受螺旋桨或自由涡轮的转速，通过改变螺旋桨的桨叶角，即变大距，变小距，改变负荷保持螺旋桨恒速。

8. 涡桨发动机的特点？

涡轮螺旋桨发动机综合了涡轮喷气发动机的优点同螺旋桨的推进效率。

- 涡轮喷气发动机通过迅速加速相对小的空气质量产生大的推力，
- 涡轮螺旋桨对相对大的空气质量施加较少的加速产生拉力。

在正常速度范围内，涡桨发动机推进效率保持高于或低于常数，而涡喷发动机随空速增加迅速增加。涡桨发动机的耗油率比同尺寸的涡扇和涡喷发动机低。

9. 涡桨发动机的当量轴功率：

供给螺旋桨的功率为轴功率。计算总的功率输出时，必需加上喷气推力所产生功率的影响称为当量功率。

涡轴发动机（直升机）

自由涡轮式涡轴发动机的两个主要部分是什么？现代直升机的旋翼通常由谁驱动？

涡轴发动机自由涡轮的作用及应用

什么是涡轮轴发动机的功率匹配最大原理？

由多台发动机驱动旋翼的直升机中，当总扭矩超限时，应如何处理？为什么？

涡轮轴发动机中由什么部件保证旋翼转速恒定和涡轮前燃气总温不超限？

直升机驾驶舱中的功率杆和桨距杆各有什么功用？

为什么现代涡轮轴发动机控制采用电子控制装置？

1. 自由涡轮式涡轴发动机的两个主要部分是什么？现代直升机的旋翼通常由谁驱动？

涡喷发动机的基本部分常常称为**燃气发生器**。如果燃气发生器后又独立于驱动压气机的涡轮，两者之间气动连接，这称为**自由动力涡轮**。如果自由涡轮发动机的输出轴经过减速器带动旋翼，这就是**涡轮轴发动机**。

- 自由涡轮式涡轴发动机的两个主要部分是燃气发生器部分和自由涡轮部分。
- 直升机的**旋翼**通常由自由涡轮通过减速器驱动。

2. 涡轴发动机自由涡轮的作用及应用

作用：自由涡轮通过与燃气发生器的**气动连接**，它的输出轴经过减速器来带动旋翼，并保持旋翼恒速。

应用：不仅在直升机使用，也可用来驱动船舶、火车、汽车或者工业设备上。

3. 什么是涡轮轴发动机的功率匹配最大原理？

直升机采用多台发动机时，要求每台发动机输出功率应相同即**功率匹配**，这对直升机的强度是有利的。

若不同，则输出扭矩大的发动机不做改变，使输出扭矩小的发动机增加燃油量增大输出扭矩，直到与输出扭矩大的相等，这称为匹配最大原理。

它可以防止扭矩负载分配回路将好的发动机的功率减小去匹配功率受到限制的发动机。

4. 由多台发动机驱动旋翼的直升机中，当总扭矩超限时，应如何处理？为什么？

- 如果总扭矩超限，将同时减少各台发动机的燃油流量减少输出扭矩。
- 这是因为由多台发动机驱动旋翼的直升机中要求各台发动机**输出的功率相同，即功率应匹配**。

5. 涡轮轴发动机中由什么部件保证旋翼转速恒定和涡轮前燃气总温不超限？

由自由涡轮**转速调节器**始终保证动力涡轮转速等于驾驶员选定的基准值，以保持旋翼的转速恒定。

排气温度限制器保持涡轮前燃气总温不超限，测量动力涡轮进口温度同固定的限制值比较，当超出时，发出信号减少燃油流量。

6. 直升机驾驶舱中的功率杆和桨距杆各有什么功用？

- 功率杆或可用功率轴给出燃气发生器可以提供的最大功率，该杆控制起动、停车和燃气发生器的转速等。
- 桨距杆或负载要求轴确定发动机实际发出的功率。负载要求轴与总距调节相连。

7. 为什么现代涡轮轴发动机控制采用电子控制装置？

这是因为采用电子控制装置时，**易于实现旋翼的恒速、负载的分配、基准选择、超温限制、超扭限制等功能**，而且能自动**精确地**调准保证旋翼转速下的功率要求。

七章 辅助动力装置

简述辅助动力装置及其组成？

说明 **APU** 的引气有什么用途、使用要求？（**APU** 如何供气供电？）

APU 的作用？

现代大型燃气涡轮发动机和 **APU** 的启动机分别是哪种类型？各有哪些优缺点？

APU 的启动过程

说明 **APU** 启动和人工停车的部件以及 **APU** 火警时，从何处进行灭火操作。

APU 自动停车的条件，如何保证 EGT 不超温？

APU 超温分为：

APU 的离心电门作用：

APU 供气条件：

APU 防喘措施

APU 停车可有 3 种不同方法

1. 简述辅助动力装置及其组成？

- **APU** 是一台小型燃气涡轮发动机，分 3 个部分：功率部分、引气部分、附件齿轮箱部分。
- 功率部分包括压气机、燃烧室和涡轮。功率部分驱动压气机和齿轮箱。现代 **APU** 的功率部分的压气机提供空气给燃烧室，
- 引气部分的压气机又称负载压气机提供引气给飞机气源系统，用负载压气机省油，在不需要引气时可以断开引气，EGT 不容易到极限值，延长 **APU** 寿命；进入负载压气机的空气流量可以调节，可满足气源系统的要求。
- 附件齿轮箱上装有发电机、起动机、燃油泵、冷却风扇等。
- **APU** 也具备一些系统，如燃油、滑油、空气、控制、指示、排气系统等。

2. 说明 **APU** 的引气有什么用途、使用要求？（**APU** 如何供气供电？）

用途：

- 在地面启动主发动机和发动机的反流检查；
- 地面和起飞爬升时空调用气，可使飞机减少对地面设备的依赖；
- 在空中提供备用气源。

使用要求：

- 在地面可以提供电源和气源，
- 在空中一定高度以后提供电源或气源，
- 高度继续增加到一定值后，仅提供电源；
- **APU** 是短时间工作的，一旦主发动机工作后，发动机正常运转，则不需要它供电供气。

使用要求：

- **APU** 不管其电/气负荷的变化，都工作在接近其额定转速的区域。
- **APU** 燃油控制器自动调节燃油流量保持该转速。

3. **APU** 的作用？

- 启动主发动机，
- 地面和起飞爬升时给空调供气。
- 提供电源。
- 地面通电电源，
- 空中备用电源。

4. 现代大型燃气涡轮发动机和 **APU** 的启动机分别是哪种类型？各有哪些优缺点？

分别是

- 空气涡轮启动机和
- 电动启动机或
- 启动-发电机。

空气涡轮启动机的

- 优点是：扭矩大、重量相对轻、工作可靠、结构简单和使用经济。
- 缺点：需要外界气源、必须遵守启动工作限制：工作时间，冷却时间，循环次数确保启动不过应力和过热。

APU 启动机-发电机的

- 优点是重量轻，可以启动及发电，不需要外界气源，
- 缺点是输出扭矩小。

（APU 直流电动机，优缺点与直流发电机相似，请看电源那本书，发动机的启动那章有关发动机的空气涡轮启动机的优点，缺点我是实在想不出 就答应该是只能同引气启动吧，考官也没说啥。

C. 另外，启动机还有**燃气涡轮启动机**、**火药启动机**、**液压启动机**，还有**冲击启动**等。

5. APU 的启动过程？

- 在驾驶舱内，将面板上的 APU 主电门置于启动位，
- 进气门打开，燃油关断活门打开，燃油增压泵接通，
- **APU 控制组件**实行启动前测试，检查电路和传感器状态。测试失败，APU 不启动。
- 测试完成 **APU 控制组件**作动启动机马达，
- 启动机马达作动后 **APU 监视和控制**正确加速到 100%转速，

监视加速有两个理由，使 **APU 启动程序**最佳和保护 APU 不受损坏。

- 在约 10%转速开始点火和供油。
- 当达到 50%转速，启动机被离心电门断开，启动机停止工作。
- 发动机继续加速至控制转速的 95%，离心电门断开点火电路，所有正常工作的控制和保护电路准备，APU 可以供电供气。

6. 说明 APU 启动和人工停车的部件以及 APU 火警时，从何处进行灭火操作。

- 启动只能在驾驶舱 APU 操纵面板上。
- 人工停车部位：驾驶舱 APU 操纵面板；地面 APU 操纵面板。

灭火操作：

- 操纵装在驾驶舱 APU 灭火控制板上的灭火开关；
- 操纵装在 APU 地面控制板上的灭火开关。

7. APU 自动停车的条件，如何保证 EGT 不超温？

自动停车条件：

- 超转（感应转速超过控制转速即超过了 110%）、
 - 滑油压力低于最小允许值、
 - 滑油温度高于允许值、
 - 着火的情况下，APU 火警探测系统可自动使 APU 停车。
- APU 控制组件在加速期间控制计量燃油，满足在安全工作范围内的最好加速，防止 EGT 超温；
 - 当达到工作转速时，确保发动机恒速和 EGT 不超温。

当 APU 引气负荷过大时，引气活门要关闭一些，减少引气量，而不使涡轮超温。

8. APU 超温如何处理

关车后检查 APU 本体有

- 无燃油、滑油渗漏，
- 内部是否损坏，

APU 控制组件功能是否失效。

9. APU 的离心电门作用：

离心电门的功用是控制 APU 的启动和点火，控制工作程序和超转保护电路。

10. APU 供气条件：

- APU 转速在 95%~105%。
- APU 引气电门置“ON”位。

11. APU 超温分为： 1 启动超温 2 启动完成后的超温。

1 首先启动超温，类似于发动机的热悬挂，就是发动机的 EGT 温度升高了，而发动机的转速没有提高，这个时候只能对发动机采取停车的方法。

照成热悬挂的原因:

1. 起动机带转没有达到自加转速即停止带动。
2. 燃油供油不当, 富油
3. 压气机性能衰减 气源压力不足 场温太高和场压过低。

2 启动完成后的超温, 也就是 APU 的发动机在转速 95%以上后的超温, 就是我们题库中解释的超温。首先我们想到超温的原因是供油加大。但是由于我们 APU 的发动机转速是恒定的, 即供油恒定。假使供油量加大, 那说明, 我们 APU 的转速降低, 所以才会加大燃油供给, 而加大燃油供给的原因, 就是 APU 的输出加大, 而我们 APU 的输出, 无非就是供电或供气输出, 一般情况下, 是由于供气输出加大, 所以导致 APU 速度降低, 而我们 APU 为了保持速度恒定, 所以供油加加大, 而供油加大, 导致 APU EGT 温度升高。所以解决的办法就是 APU 引气活门关闭, 放气活门打开。使 APU 的负载降低, 从而使 APU EGT 温度降低

12. APU 防喘措施。

APU 压气机也可能喘振, 特别是当引气负荷改变时。防喘措施有两种。

没有负载压气机的 APU 上使用防喘系统, 当可能喘振时, 防喘活门放掉空气。飞行期间防喘活门正常打开防止喘振, 由于没有发生喘振时, 空气也放掉, 这种方法是耗费燃油的。

有负载压气机的 APU 使用的防喘方法较好。喘振保护系统监视负载压气机出口管道的空气流量, 如果压气机喘振, 打开喘振控制活门。作为一般的规则, 如果负载压气机后空气流量减少或停止, 喘振控制活门打开。在这些 APU 上, 空气流量信号送到作为喘振控制活门一部分的气动控制组件。现代 APU 空气流量信号转换成电信号送到 APU 控制组件。APU 控制组件将打开信号送到喘振控制活门力矩马达。并接受实际活门位置反馈信号。在某些 APU 上, APU 引气活门和喘振控制活门功能组合于一个活门。这种类型的引气/喘振活门能从负载压气机供应所有空气到飞机或者使所有空气通到 APU 排气管。APU 控制组件也接受进气温度和进气压力, 使用这些信号进行喘振保护, 因为负载压气机在高空, 空气密度低容易喘振(见 7 - 8)

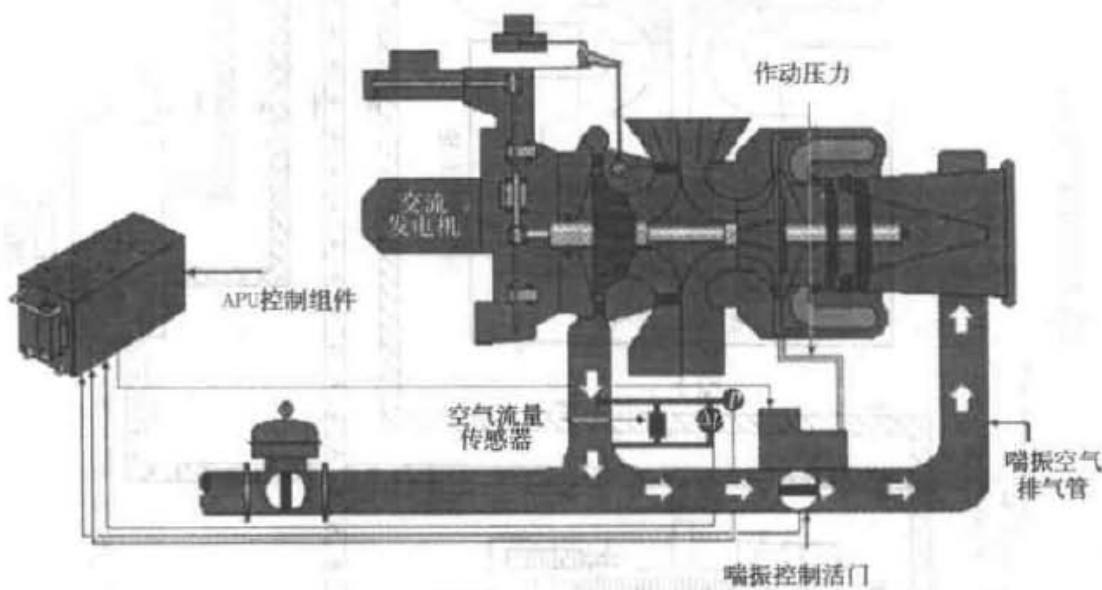


图 7 - 8 喘振控制活门

13. APU 停车可有 3 种不同方法—NEW!

正常停车是于动使主电门移到 OFF 位进行的;正常停车冷却周期可从 0 到 120S(秒)变化, 冷却周期后控制组件断开燃油。

自动停车是 APU 控制组件因重要部件故障作动的;自动停车命令是 APU 控制组件立即作动的, 没有任何冷却周期。如果离心电门触发超转感应电路(通常为控制转速的 110%), 会切断向燃烧室的供油, 使 APU 停车, 此即超转停车。如果滑油压力低于最小允许值, APU 会自动停车。如果滑油温度高于允许值, 或者有火警引起, APU 会自动停车。

应急停车是由灭火手柄或备用紧急停车开关作动的。APU 有火警探测系统和灭火瓶。着火情况下, 探测系统

除了作动警告灯和警铃外还可以自动使 APU 停车。

新型 APU 以及采用 FADEC 控制的 APU 在保护系统中还设置多重保护性停车。例如，APU 没有加速停车、没有转动停车、低速停车、没有火焰停车、传感器故障停车、进气过热停车、直流电源损失停车、没有 EGT 转速信号停车等。

第八章 发动机使用维修

什么是发动机的一次循环？记录发动机循环数和工作小时数的目的是什么？

发动机各种接近盖板类型和作用

发动机有几个主单元体组成

发动机在存放和运输

发动机吊架上有几个吊点？

发动机整流罩有哪些？

什么情况下发动机需要地面试车？

试车注意事项？

如何对压气机进行清洗？

更换发动机叶片

1. 什么是发动机的一次循环？记录发动机循环数和工作小时数的目的是什么？

- 一次循环是指发动机启动、运转和停车。
- 记录循环数和小时数用于
监视 限寿件，发动机零部件的性能变化，衰退率。

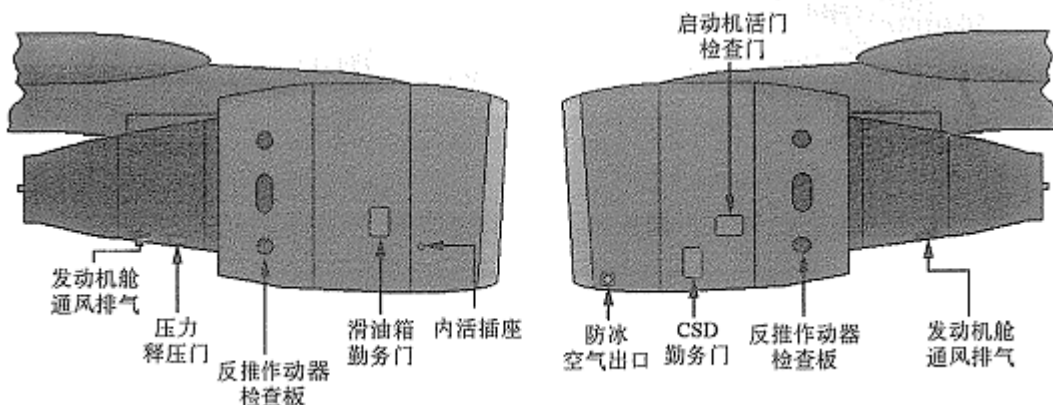
2. 发动机各种接近盖板类型和作用

滑油箱勤务门，

CSD 勤务门，

启动机活门检查门

发动机舱有很多检查板和检查口用于各种目的（见图 8-3）。发动机舱通风排气口用于冷却核心发动机。当舱内过压时压力释压门打开。反推作动器检查板可以接近反推装置球螺旋作动器。滑油箱勤务门可接近油箱和有时也能接近屑末探测器。内话插座可连接飞机内话系统。防冰空气出口排出进口整流罩防冰后的热空气。CSD（恒速传动装置）或 IDG（整体传动交流发电机）勤务门用于检查滑油面。打开启动机检查门可手动打开启动机空气活门。检查门或检查板有锁扣，工作之后，关闭锁扣。发动机停场或系留期间所有的孔口加堵盖，防止水分、脏物或动物进入发动机。



3. 发动机有几个主单元体组成？

- 单元体设计概念是将发动机分成 若干个结构上独立的 能在外场甚至飞机上拆换的单元体。
- 包括
 - 风扇主单元体、
 - 核心发动机主单元体、
 - 低压涡轮主单元体、

- 附件齿轮箱。

4. 发动机在存放和运输：对发动机应进行油封处理，即发动机内外表面要用专门的防腐蚀剂加以保护，

- 所有的孔口要封死，
- 将发动机装在罩袋内，其中
- 放规定量的干燥剂，并放在干燥的环境中。
- 如运输，可包装在木板条箱或者金属箱内。

4. 发动机吊架上有几个吊点？

三个吊点，前两个 后一个

5. 动力装置安装和拆卸

发动机安装节连接和固定发动机到飞机吊架上，同时传递发动机推力，垂直、侧向载荷和扭矩到飞机上。例如 B737-300 飞机的发动机有 2 个前安装点和 1 个后安装点，分别在风扇框架中盒结构和涡轮框架上，同时前安装节还辅助以推力杆传递推力和扭矩到飞机上。安装节连接有隔振装置以及搭地线。发动机重量作用在垂直轴（Z 轴）上，由前、后安装节传递；发动机推力作用在纵轴（X 轴）上，仅由前安装节传递；侧向载荷作用在横轴（Y 轴）上，主要由机动飞行产生，由前、后安装节传递。振动和飞行机动在所有方向上产生附加载荷，由安装节传递到飞机。

发动机更换有 3 种批准的方法：第 1 种称为自持系统方法，第 2 种使用吊车支持的吊索方法，第 3 种使用升起加载器（见图 8-4）。

5. 发动机整流罩有哪些？

进气整流罩，风扇整流罩，反推整流罩。

装置前隔框上的部件和附件。反推整流罩也称风扇反推整流罩是左右两部分，提供平滑的气动表面，同时是操作反推装置的部件和附件的外罩。它上面有固定的反推器结构和可动的反推器结构也称为移动套筒。整流罩内侧有防火涂层，在同风扇框架的连接上有防火密封，密封是用有硅层热阻的钛金属制造的。核心整流罩覆盖发动机的热部件，很多发动机上核心整流罩和反推整流罩是组合的。

整流罩在发动机的外面提供平滑的气动表面减少阻力，同时也保护发动机上安装的部件和附件。它们表面的最关键部位必须有 1 级气动平滑度，其他区域必须有 2 级气动平滑度（见图 8-2）。例如，B737-300 飞机的动力装置整流罩有进口整流罩、风扇整流罩、反推整流罩，此外还有连接飞机吊架的前整流装置。进口整流罩提供空气进入发动机的合适通道，气动阻力最小；里面还有消音板，抑制进口空气噪音；防冰空气管，通过热空气阻止进口整流罩结冰。风扇整流罩覆盖风扇静子机匣区域和附件齿轮箱，分成左右两半，可以打开进行维护工作。它减低气动阻力，保护并接近安装在风扇框架、附件齿轮箱、防火墙、反推

6. 什么情况下发动机需要地面试车？

发动机安装之后；

为了确认发动机故障；

检查飞机系统；

调整或部件更换后检验（使用 FADEC 的发动机更换后可不试车检查）；

发动机闲置一段时间后检验发动机

7. 点火，试车的注意事项 —NEW M14 P169

发动机工作时吸入大量空气，喷出高温、高速燃气，在飞机前、后都规定了危险区，危险区的大小依发动机的大小、位置、功率而不同，在相应的飞机维护手册中有规定。飞机应迎风放置。启动发动机前检查进气道和喷管内没有松动的物品和碎屑，飞机主起落架用轮档挡住，地面机组人员戴上耳罩，保持和机上驾驶舱通话，准备好灭火器。

试车注意事项？

发动机试车安全规则

- 1、试车人员必须有该机型的机型维护执照，并经过专门的试车培训、考核及得到授权。
- 2、试车前应做好规定的准备工作，如挡上轮挡，移开障碍物，清洁发动机附近的杂物，准备好灭火设备，了解风向和风速，必要时要改飞机停放方向，地面有油、冰、雪时不允许试车。
- 3、发动机试车时机下必须有专人在规定位置负责警戒，注意试车飞机周围环境和飞机、车辆及人员的动态并与试车人保持通信联系，如有异常情况（如飞机滑动、火警或其它不安全因素）应立即通知试车人员停止试车。
- 4、试车过程中试车人员应接通 VHF 并监听塔台通话。试车人员不能离开驾驶舱并注意机下警戒人员的指令，与试车工作无关的人员不准进入驾驶舱。
- 5、试车时试车人员应按该机型维护手册规定的程序进行操作，并熟练掌握各种应急处置措施和程序。
- 6、多发飞机试车时禁止在未开车的发动机上工作，如需要在试车时进行发动机的调节或检查工作，必须在慢车状态并有保护措施，机上、机下联系好。
- 7、试车时发动机未完全停车前，人员和工作梯严禁靠近发动机。
- 8、白天试车必须打开防撞灯，夜间试车必须打开航行灯、防撞灯。
- 9、用易燃液体清洗发动机后必须待其蒸发干才能试车。
- 10、试车采取双试车员制度，人员搭配要合理。
- 11、左座人员负责操作，右座人员负责读检查单并协助左座人员，应在试车准备前，明确各自的工作任务。
- 12、试车时必须读检查单，并严格按检查单操作，做到眼到、手到；充分考虑下一步工作时，受影响的飞机 / 发动机 / 系统状况。
- 13、试车时机上、机下要保持通讯畅通（内话耳机和对讲机）。
- 14、试车人员要分工明确，互相提醒。
- 15、新授权或新晋级试车人员须经过一段时间实践后才可单独执行大功率试车。
- 16、因换发、排故等原因需进行大功率试车时，应有一观察员在驾驶舱。
- 17、人员过度疲劳，不允许试车。
- 18、试车人员必须清楚试车内容的目的。
- 19、试车前通知签派，征得同意后，方可试车。

试车的程序一般如下：（一般表面工作）737 系列

飞机到位，加好油；（如果需要较高功率，俗称：大车，需要超过一定的油量，一般左右主油箱加满即可，有需要可全部加满）

试车前，从飞机左边开始绕飞机一圈检查飞机的外部情况，尤其是发动机前面区域不允许有外物，如有需清除，以免吸入发动机损伤内部结构。其他部件安装好，舱门关闭。轮挡放在机轮前面一般留有大概十几毫米的缓冲空间，因为防止飞机前倾造成轮胎的过度挤压。轮挡不是主要防止飞机前冲的工具，飞机本身的刹车才是主要正常防止手段。检查完毕，登机关好舱门，检查好跳开关和其他开关后，上电，刹车，检查火警，联系地面。

启动 APU，正常后可按试车手册检查飞机系统，并把各种开关打到相应位置。

如果在机场区域，需要联系塔台，经同意后可开始准备启动。联系地面确认可以启动，一般先左发后右发，左发启动完毕再启动右发。启动时，需要关掉空调等其他设备的引气防止引气不足和 APU 的 EGT 超温。

启动过程注意观察 N2，N1，EGT 和滑油压力等关键参数，正常启动机在 N2 到达一定转速会自动脱开，如果超过一定时间不脱开可以人工脱开或者终止启动。（CFM56-3）用 APU 的引气，打开启动机到 GROUND 位，等 N2 达到 24.6%可以提启动杆，要求稳而迅速，手保持在启动杆上，注意观察主要参数：EGT 等。N2 到一定转速（46%左右）后启动机会自动脱开。允许 EGT 最高时稍微进入黄区。直到启动成功手可离开启动杆。然后可再启动右发。启动成功后需要等发动机稳定后才进行功率测试，起飞功率测试时需要按照手册要求操作，其起飞功率及部分功率等由当地场温场压查相关表格得到相应正常数据范围，试车各种数据需要在各种相应的范围之内。比如 737-300 在测试起飞功率（大车）时需要把襟翼放到一定的角度，一方面是飞机和发动机内部设计的要求，其次是安全要求（个人理解）。同时要提醒地面人员注意安全！地面人员要求在安全区域警戒。

部分功率测试时，如果需要安装部分功率销，首先要保持慢车，还需要走安全通道，右侧的可从前面沿飞机中线到机头后贴机身走到功率销孔位置再向发动机走近插销子，左侧的可离飞机外侧较远处由前向后走到和销子孔相平位置后，再横走接近。插好销子后按原路线返回安全警戒区。同时由右侧的人顺便按下电子舱的空地电门。

部分功率测试完毕后，需要保持发动机在慢车功率下五分钟以上再关车，防止发动机出现卡阻现象。

试车完毕，等完全关车后，需要把轮挡放到外侧轮前后，拔下部分功率销和空地电门，并检查渗漏以及相应

时间内检查各种油量指示。盖好包皮以及发动机蒙布。关断 APU，关好舱门，撤离登机梯。带好所有工具离开现场。

7. 如何对压气机进行清洗？

- 清洗可以恢复发动机的性能，降低燃油消耗率。
- 用起动机带动发动机冷转，喷入水或乳化式的表面清洗剂，再加入漂洗溶液，最后用干净的水漂洗并试车烘干，记录数据和评估清洗效果。

8.1.2 维护的一些方法和注意事项

1. 发动机气路清洗

轴流式压气机的发动机外场气路清洗是恢复性能，降低燃油消耗率的好方法之一。这是用在具有性能退化迹象的发动机上，退化是由于外来物在压气机转子和静子叶片上的沉积累积造成的。外场清洗首先做好必要的准备，需要拆掉一些附件设备和飞机管道零件等。封住引气口和其他开口。采用的清洗剂类型取决于特定的发动机型号。在大多数型号的发动机进行水洗是由启动机运转压气机实施的。操作完成后发动机回到它正常的准备运转状态。清洗完成后必须进行试车烘干，记录数据和评估清洗效果。

2. 检查方法

检查发动机是否退化和损坏是飞机维护的重要部分。很多检查技术是非破坏性的，即不需破坏零件就能决定它的适用性。还有各种技术适于检查在翼发动机和适于维修车间检查不分解的单元体零件。孔探检查是重要的目视检查方法。

其他的检查方法则用于检查人的眼睛不能探测的退化。渗透检查包括着色和荧光渗透寻找零件表面存在的裂纹。磁力探伤用于检查可磁化组件上的裂纹。涡流探伤用于测量表面缺陷。此外，还有射线检查和超声波检查。

8. 更换发动机叶片：维护更换发动机叶片应遵循的原则有：

- 1、维修检查后的叶片必须安装在原来的槽内。
- 2、更换叶片时，必须更换与原来叶片动量矩标记相同的叶片。
- 3、如果没有与原来叶片动量矩标记相同的叶片，则当该级有偶数个叶片时，应更换两个动量矩标记相同的叶片，即除了更换已损坏的叶片外，还应将与之相距 180° 的另一个叶片也进行更换。当该级有奇数个叶片时应更换三个动量矩标记相同的叶片，即除了更换已损坏的叶片外，还应将与之相距 120° 的另两个叶片也进行更换。

9.

4. 系统维护注意事项

发动机维护期间必须遵守一些注意事项。点火系统可引起致命的危险，所以对高能点火装置、点火电嘴、点火导线进行任何工作之前，必须断开电源，并至少等 1 分钟后再断开高压导线。

添加滑油时，小心不要溅出滑油。如果不小心溅出滑油应立即清理，因为它会对涂漆面以及电缆中使用的某些橡胶化合物元件造成损坏。若滑油长时间与皮肤接触，还会因渗入而导致中毒。

任何修理、调整或更换部件之后，必须对发动机、进气道和排气系统进行最后检查，确保没有任何杂物留在里边。检查进气道和排气系统之前，必须确保启动系统不工作，点火系统不通电。在发动机不工作时，应装好进气道和排气管堵盖，除非当地有特殊规定。

发动机地面试验的基本目的是确认性能和机械完整性，检查故障，或证实排故期间的纠正措施。地面试车量保持在最低限度。进行地面试车前，必须遵守注意事项和工作程序，防止损坏发动机或飞机及人员。注意发动机前、后危险区。注意遵守接近发动机的安全通路。试车人员确保任何易于吹走的衣物已扣牢，带防护耳罩。

停转时间。发动机停车前，一般允许它以慢车转速运转一小段时间，确保组件的逐渐冷却。从供油活门关闭到发动机到达静止状态的时间称为停转时间。它显示发动机内部的摩擦，风向和风速变化可能会影响发动机的停转时间。

发动机健康管理

1. 健康监控使用的 2 个项目及内容；

发动机仪表可分成两类第 1 类用于监视机械状况的事数，像滑油温度和滑油压力，压气机转速和发动机振动。这组仪表读数在发动机工作的任何时候不得超过规定的限制。

第 2 类仪表用于监视发动机性能参数。性能参数仪表包括发动机压力比、燃油流量、排气温度和转速。在双转子轴流式压气机的发动机，测量高压和低压压气机转速。压气机转速既是机械参数又是性能垂数。

2. 工作状态的检查：在地面对发动机进行慢车检查和起飞（最大）推力的检查。这是因为慢车状态并不是发动机工作状态完全可靠的指示，而且燃油流量和仪表在小读数范围内经常是不准确的，所以还需进行起飞（最大）推力的检查。

3. 监视发动机状况参数的仪表有哪些？

EPR、EGT、燃油流量、发动机转速、滑油压力、滑油温度、发动机振动值。

4. 在地面启动发动机的过程中，特别是要监视的发动机的参数是哪些？

发动机的转速、排气温度、滑油压力、振动值。

5. 什么是监控参数的换算值？为什么要对监控参数进行换算？

- 监控参数的换算值是将飞行状态所测得的数据换算到海平面标准状态下的值。
- 由于发动机的性能通常都是按海平面标准大气状态确定的。
- 因此在对发动机的性能进行检验或对比时，必须将表征发动机性能的参数换算到标准状态。

6. 航空燃气涡轮发动机状态监控系统包括有哪些内容？

性能监控，滑油分析，振动分析，无损探伤，孔探检查等。

7. 发动机状态监视的趋势分析目的是什么？

性能工程师进行趋势分析。目的：

- 识别装在飞机上的发动机和发动机部件的故障，
- 识别指示系统的误差，
- 评估性能保持能力随时间的变化。

8. 发动机监控参数的趋势分析的实质是什么？

对发动机的状态进行诊断，

- 以判明发动机是否有故障，
- 发生故障的可能部位是什么。

8.2.2 发动机状态监视软件

发动机状态监视软件（ECM）能够帮助趋势分析。如果飞机缺少数据自动采集系统，数据则由飞行机组手工记录，然后输入计算机。在现代飞机上，发动机性能数据是由飞机计算机系统自动地采集记录。例如 QAR（快速存取记录器），ACARS（飞机通信寻址和报告系统）等。

8.2.3 发动机健康管理

发动机的可靠工作是飞行安全的保证，发动机的可靠工作取决于发动机的健康状态。航空公司和维修人员每天面对的是进行各种数据证实和趋势分析，发动机状态评估，故障预测和拆发预报，零件和部件可用寿命估计，维修和使用计划等。

发动机健康管理的研究方面：故障检测，故障隔离，预先诊断，寿命预测，性能退化，状态评估，资源管理，决策支持等。健康管理处理数据，数据是收集的事实。充分利用机载数据采集设备，发挥发动机状态监视软件的功能，建立智能诊断和数据库，实现远程监控都是努力的目标。

发动机全寿命管理就是指新发动机从装机使用到翻修后再装机使用，多次循环，直到退役的全过程科学管理。发动机机队管理是指对公司的整个机队进行科学管理，正确地评估各台发动机的状态、性能排序，合理地安排换发、进厂维修及制订维修工作范围，保证安全和提高经济效益。

附加：

维护过程中如何防喘：

1. 防止压气机叶片被外来物打伤或腐蚀。
2. 保证防喘系统正常工作，防止由于防喘机构发生故障而引起喘振。
3. 航前，航后和定检工作完成后，注意清点工具等物，严禁进气道或发动机舱内遗留工具或杂物。
4. 在发动机进行试车前，除应检查进气道有无遗留杂物外，还应检查停机坪周围，避免发动机工作时，将外物吸入发动机。

发动机主要功能？

- 在飞行中提供推力，
- 着陆时帮助飞机减速，
- 飞机使用过程中为空调增压，
- 防冰等系统供气，
- 给电源和液压系统提供动力。

在地面启动发动机的过程中若发生失火，应如何处理？

在启动过程中如发生失火火警警告，则应将：

1. 燃油关断手柄拉至关位，以切断燃油；切断液压油；切断主电源和引气；
2. 不能脱开起动机，让起动机带动发动机转子继续冷转直至完全灭火。

发动机试车有几种形式？(要答：试车台试车，在翼地面试车，在翼空中试车)

正常情况下可以调整发动机的那些部分 高低慢车，部分功率，燃油比重

2 章 3 章 发动机部件

涡扇发动机组成？

冷端部件和热端部件？

燃气涡轮发动机的部件包括进气道、风扇、低压压气机、高压压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮、喷管以及附件传动部分。压气机、燃烧室和涡轮组成核心发动机。从工作环境来看，常常分为冷端部件和热端部件。冷端部件指进气道、风扇、低压压气机和高压压气机；热端部件有燃烧室、高压涡轮、低压涡轮和喷管（见图 2-1）。本章和第三章将分别做

进气道

进气道的作用？什么是进气道总压恢复系数？

畸变指数定义

进气道冲压比的定义，影响冲压比的因素？

冲压压缩、空气流量定义；空气流量的影响因素；

进气道组成？

亚音速气流进气道怎么进行总压恢复？怎么进行进气道的维护？

1. 进气道的作用？什么是进气道总压恢复系数？

- 一是：尽可能多的恢复自由气流的总压并输送该压力到压气机，这就是冲压恢复或压力恢复；
- 二是：提供均匀的气流到压气机使压气机有效地工作。（畸变系数）

进气道出口截面的总压与进气道前方来流的总压比值，叫做进气道总压恢复系数，

➤ 该系数是小于 1 的数值，表示进气道的流动损失的大小，总压恢复系数大，说明流动损失小。

2. 畸变指数定义：

进气道出口处的最大总压与最小总压之差除以出口处平均总压的比值。它是描述流场均匀度的参数。

（进气道出口的流场不均匀对发动机的稳定有很大影响，会导致压气机喘振和燃烧室熄火，因此要求进气道流场应均匀。）

3. 进气道冲压比的定义，影响冲压比的因素？

进气道的冲压比是：进气道出口处的总压与远方气流静压的比值。

冲压比越大，说明空气在压气机前的冲压压缩程度越大，

影响冲压比因素：流动损失，飞行速度和大气温度。（大气密度、高度、发动机转速）：

当大气温度和飞行速度一定时，流动损失大，则冲压比下降；

当大气温度和流动损失一定时，飞行速度越大，则冲压比增加；

当飞行速度和流动损失一定时，大气温度上升，则冲压比下降。

4. 总结知识点

进气道分为：亚音速和超音速。民航主要是亚音速飞机，进气道都采用扩张的亚音速进气道。

1) 亚音速气流进气道怎么进行总压恢复？怎么进行进气道的维护？

亚音速进气道的进口部分为圆形唇口，进气道内部通道为扩张通道，使气流在进气道内减速增压。

在飞机试车前：仔细清楚发动机进气道前的杂物，避免杂物进入损坏进气道和发动机；维护维修时：应检查进气道消音材料是否有破损；拆装叶片时应在进气道上垫上毛毯，避免工作鞋对进气道造成伤害。

2) 进气道唇口和整流锥 都需要 防冰。

2.1.2 亚音速进气道

亚音速进气道是为在亚音速或低超音速范围内飞行的飞机所设计的进气道。它的进口部分为圆形唇口，进气道内部通道为扩张通道，使气流在进气道内减速增压。

进气道由壳体和整流锥组成，整流锥有的分为前整流锥和后整流锥。进来的气流速度与飞行速度大小相等，方向相反。由于进气道前一段的扩张形通道，气流的速度下降，压力和温度升高，即冲压压缩。流经整流锥后气流速度稍有上升，压力和温度稍有下降，使气流比较均匀地流入压气机保证压气机的正常工作。

单位时间流入进气道的空气质量称为空气流量，以 $q_{m,a}$ 表示：

$$q_{m,a} = \rho v A$$

影响流量的因素有：空气密度 ρ ，飞行速度 v 和压气机的转速 n 。空气密度 ρ 越高，进入发动机的空气流量 $q_{m,a}$ 越多。空气密度受温度 T_0 和高度 H 的影响。温度越高，密度越低；高度越高，密度越低。飞行速度 v 越大，进入发动机的空气流量越多。压气机转速 n 越高，进入发动机的空气流量越多。

3) 超音速进气道分为：内压式 (a 图)，外压式 b，混合式 c。

超音速飞机上进气道有固定的或可变的几何形状，从前到后其直径逐渐减小然后增加。这种收敛—扩张形状用于使进来的气流在到达压气机之前减慢成亚音速。

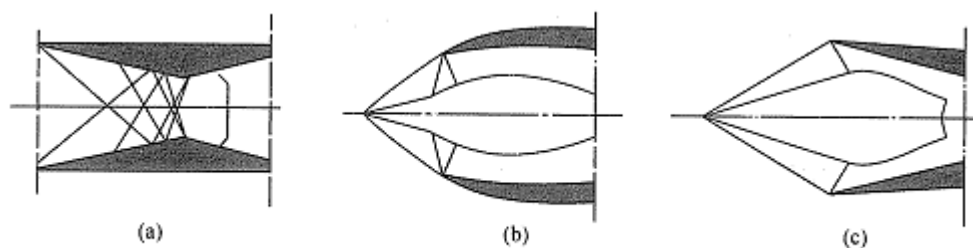


图 2-2 超音速进气道

压气机

压气机分哪两种？目前燃气涡轮发动机中常采用哪一种，为什么？

压气机的作用？（自己加的）

进口导向叶片的功能是什么？决定进入压气机叶片气流攻角的因素是什么？

轴流式压气机的组成，增压原理？（自己加的）

简要说明空气在多级压气机中的流动。

压气机的增压比的定义是什么？它与级增压比是什么关系？

基元速度三角形、气流攻角、影响攻角的因素及物理意义

什么是压气机的流量系数？影响压气机流量系数因素有哪些？物理意义是什么？

发动机压气机的流量特性，喘振边界定义，喘振裕度定义？

失速？堵塞？（自己加的）

旋转失速？

什么是压气机的喘振？导致喘振的根本原因是什么？

涡轮发动机压气机防止喘振的方法和原理？

为什么进入发动机的空气流量突然减少，压气机易发生喘振？哪些情况可以造成空气流量突然减少？

如果发动机在低功率下喘振，如何探测？采取哪些自动恢复正常的措施？

扼要论述导致喘振的原因和排除方法。

轴流式压气机转子的组成

叶片和盘的连接，燕尾型榫头的特点

扩压器

压气机叶片为什么要扭转？如何扭转？

1. 压气机分哪两种？目前燃气涡轮发动机中常采用哪一种，为什么？

离心式和轴流式。目前燃气涡轮发动机中常采用轴流式压气机。

这是因为轴流式压气机具有下述优点：

- 总的增压比高，
- 压气机效率高，
- 单位面积的流通能力高，
- 迎风面积小，
- 阻力小。

缺点：

- 单级增压比低，1.25:1
- 结构复杂

离心式优点：

- 单级增压比高，15:1
- 压气机稳定工作范围宽，
- 结构简单可靠，
- 重量轻，
- 长度短，
- 起动功率小，

缺点：

- 流动损失大，
- 效率低，
- 单位面积的流通能力低，
- 迎风面积大，
- 阻力大

离心式压气机主要：用于 小型涡轴、涡桨发动机 上以及 **APU** 上

2. 压气机的作用？（自己加的）

主要功能是对进气道进来的空气进行压缩，提高压力，为燃烧膨胀做功做准备，来改善发动机的经济性能，增大发动机的推力。

除了提高燃烧和产生推力外，还用于 **引气**：冷却热部件（例如：涡轮叶片）、热空气防冰、客舱增压、空调、发动机启动、水箱和液压油箱增压等。

3. 进口导向叶片的功能是什么？决定进入压气机叶片气流攻角的因素是什么？

有的在第1级工作叶轮前还有一排不动的叶片称为 进口导向叶片。

其功能是引导气流的流动方向产生预旋，使气流以合适的方向流入第1级工作叶轮，**保证压气机工作稳定**，决定因素是：

- 工作叶轮进口处的绝对速度（包括大小和方向），
- 压气机的转速。

（**出口导向叶片**：涡扇发动机在风扇排气通道中的静子叶片。**目的是**：改善风扇后的气流。）

4. 轴流式压气机的组成，增压原理？（自己加的）

压气机机构核心是：转子组件 和 机匣。

转子对空气做功，压缩空气提高空气压力；静子通过扩张的通道，继续提高空气压力。

每一级包括一排转子叶片和 随后的一排静子叶片。每级的压力升高量很小。

5. 在压气机中，什么是预旋和正预旋？说明正预旋的作用？

第一级工作叶轮进口处绝对速度在切线方向的分量称为预旋。

- 若叶轮进口处绝对速度的切向分量与叶轮旋转的圆周速度方向一致，称为正预旋，
- 否则称为负预旋；

目的是改变相对速度的方向，减小气流攻角，避免气流在叶背处发生分离，防止压气机喘振。

6. 压气机的增压比的定义是什么？它与级增压比是什么关系？

压气机的增压比是：压气机出口处的总压与压气机进口处的总压之比。

压气机的增压比等于各级增压比乘积。

7. 简要说明空气在多级压气机中的流动。（结合4题回答）

多级压气机由多个基元级组成，基元级的叶栅通道均是扩张形的。

在基元级的叶轮内：绝对速度增大，相对速度减小。同时，总压、静压和总温、静温都升高；

在基元级的静子内：绝对速度减小；静压和静温升高，总压略有下降，总温保持不变。

由此可见，空气流过基元级时，不仅在叶轮内受到压缩，而且在整流器内也受到压缩。

空气在各个基元级不断压缩，气体的比容减小，密度增加，因此压气机的通道面积是不不断减小的。

（会画基元级、速度三角形。从叶片出来的气流速度是绝对速度 C ；进入转子的气流速度是相对速度 w ；绝对速度等于相对速度和牵连速度 u 向量之和。）

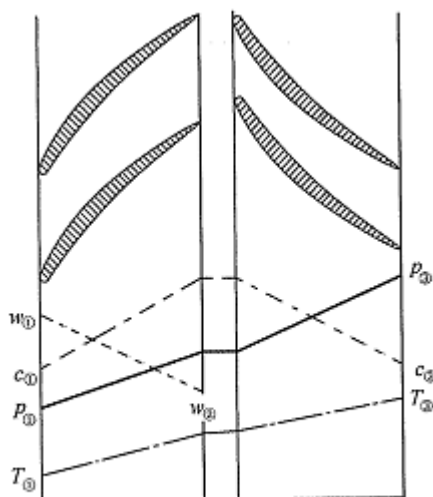
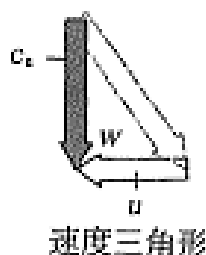


图 2-9 基元级内气流参数的变化



的速度三角形

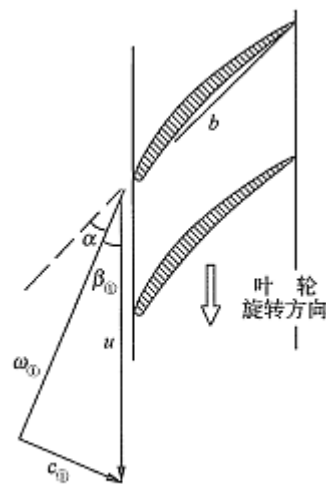


图 2-11 攻角

注意：在静子叶片内没有相对速度的，静子叶片不动。图中 P T 是静压。

8. 基元速度三角形、气流攻角、影响攻角的因素及物理意义

速度三角形：基元级包括一级转子和一级静子。这两排叶栅中动叶叶栅以圆周速度运动，静叶叶栅静止不动。从静叶出来的气流速度是绝对速度。进入动叶的气流速度是相对速度。绝对速度等于相对速度和圆周速度的向量之和。这就是速度三角形。

攻角：工作叶轮进口处相对速度的方向和叶片弦线之间的夹角叫攻角。

影响攻角的因素有两个：一个是转速，另一个是工作叶轮进口处的绝对速度（包括大小和方向）。

物理意义：正攻角过大，会使气流在叶背处分离，而这种气流分离扩展到整个叶栅通道时导致压气机喘振；负攻角过大，会使气流在叶盆处分离，形成涡轮状态。

9. 什么是压气机的流量系数？影响压气机流量系数因素有哪些？物理意义是什么？

压气机的流量系数是：工作叶轮进口处的绝对速度在发动机轴线的分量和在工作叶轮旋转的切向速度之比。

影响流量系数的因素有两个：一个是转速，另一个是叶轮进口处的绝对速度。

物理意义：流量系数比设计值小，呈正攻角，会使气流在叶背处发生分离；

流量系数比设计值过大，呈负攻角，使气流在叶盆处发生分离。

10. 发动机压气机的流量特性，喘振边界定义，喘振裕度定义？

压气机的性能参数即增压比和效率随工作参数即压气机的空气流量、压气机转子转速、进入压气机的空气总温、总压的变化规律称为压气机特性。

在进入压气机的空气总温、总压保持不变的情况下，压气机的增压比和效率随进入压气机的空气流量、压气机转子转速的变化规律称为压气机的流量特性。

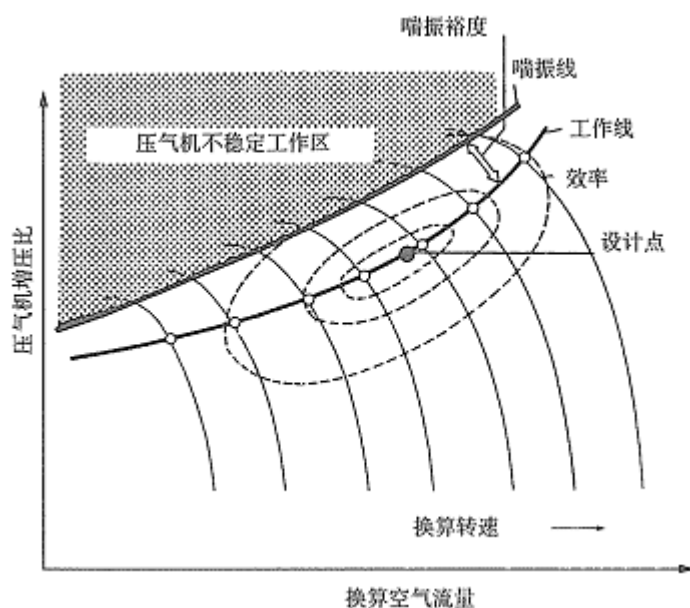
喘振边界：即不同转速下喘振点的连线。

喘振裕度：为了避免压气机喘振，必须保持工作线和喘振线有足够的距离，这个距离用喘振裕度来衡量。

更具体的说，喘振裕度为在同一空气流量下，喘振点和工作点的增压比之差与工作点增压比的比值。

(工作线是工作点即设计点的连线，

对于给定的压力比、转速和空气流量，压气机工作在最佳的工作状态，称为设计点)



11. 失速？堵塞？（自己加的）

转速一定，某种原因压气机流量减少，轴向分量减少，使攻角上升，在攻角过大的情况下，气流在叶背处发生分离，这种在叶背上的现象叫 **失速**。如果这失速范围扩大到整个叶栅通道，就会发生 **喘振**。

转速一定，某种原因压气机流量增大，轴向分量增加，使攻角下降，如果负攻角过大，气流在叶盆处发生分离，使叶片的通道变小，甚至出现喉部通道的 **堵塞**。压气机叶片处于 **涡轮状态**。

12. 旋转失速 ？

当压气机空气流量减小而使动叶攻角增大到临界攻角附近时，动叶中的某几个叶片可能首先发生分离。于是在这些出现分离区的叶片前面出现明显的气流堵塞现象。这个受阻滞的气流区使周围的流动发生偏转，从而引起上面叶片攻角增大并分离。同时，下面叶片的攻角减小并解除分离，分离区相对于叶片向上传播。因此，失速区就朝着与叶片旋转方向相反的方向移动。这种移动速度比圆周速度要小，所以站在绝对坐标罩上观察时，失速区以较低的转速与压气机叶轮做同方向的旋转运动，称为**旋转失速**

13. 什么是压气机的喘振？导致喘振的根本原因是什么？

喘振是气流沿压气机轴线方向发生的低频、高振幅的振荡现象。

导致喘振的根本原因：由于气流攻角过大，在叶背处发生分离而这种气流分离扩展到整个叶栅通道。

14. 涡轮发动机压气机防止喘振的方法和原理？

原理：压气机在非设计状态下通过一些措施也能保持与压气机几何形状相适应的速度三角形，从而使攻角不要过大或过小。

方法：采用放气活门或放气带、压气机静子叶片可调和多转子

- 采用放气活门或放气带：通过改变气流流量即改变工作叶轮进口处绝对速度轴向分量的大小改变其相对速度的大小和方向，使前面的攻角减小，后面的攻角增大，达到防喘目的；
- 压气机静子叶片可调：即改变静子叶片的安装角，通过改变工作叶轮进口处绝对速度的切向分量大小也称预旋量，从而改变进口处相对速度的方向，减小攻角进行防喘；

叶栅通道。此时，压气机叶栅完全失去扩压能力，不能将气流推向后方，克服后面较强的反压，于是流量急剧下降。不仅如此，由于动叶叶栅失去扩压能力，后面的高压气体可能倒流至前面。这样，压气机后面的反压降的很低，整个压气机流路这一瞬间变得通畅。而且由于压气机仍保持原来的转速，大量的气流被重新吸入压气机，流入动叶的气流由负攻角很快增加到设计值，压气机后面也建立起高压气流，这是喘振过程中气流重新吸入状态。然而，发生喘振的流动条件没有改变，随着压气机后面的反压不断升高，压气机流量又开始减小，过

● 多转子 程又重复。 : 通

过改变转子转速，即改变压气机动叶的切向速度来改变工作叶轮进口处气流相对速度的方向，减小攻角而达到防喘目的。

双转子发动机的防喘原理？

双转子或三转子的防喘原理是通过分别改变低压压气机和高压压气机的转速，以减小攻角，达到防喘的目的。

2. 避免压气机喘振

喘振发生的条件有：

- ①发动机转速减小而偏离设计值，相对速度的方向变陡，流量系数变小；
- ②压气机进口总温升高，热空气难以压缩，压气机增压比小于设计值；
- ③发动机空气流量骤然减小，如推油门过快，供油量增加过猛；
- ④发动机进口流场畸变；
- ⑤着陆滑跑速度低时仍用高反推；
- ⑥进气道结冰；
- ⑦发动机翻修质量差，外来物损伤，防喘机构工作不正常等。

为避免压气机喘振，在维修工作中应注意经常按规定进行检查，如防喘机构的状况，反馈钢索的校装；航前、航后和定检工作完成后，清点好工具等物品，严禁遗留在进气道和发动机舱内；发动机试车前应检查进气道以及停机坪周围清洁，避免发动机工作时吸入外来物；操作油门杆动作不要过急过猛，一旦发生喘振，应收油门从喘振中退出。

附加：

1. 为什么进入发动机的空气流量突然减少，压气机易发生喘振？哪些情况可以造成空气流量突然减少？

- 进入发动机的空气流量突然减少，可以使压气机前几级气流轴向速度减少，流量系数减少，相对速度方向变陡，而使攻角变大，气流在叶背上产生分离，导致整台发动机喘振。
- 造成上述情况有：①供油量增加过快过多；②着陆滑跑速度减至小速度时仍使用反推。

2. 如果发动机在低功率下喘振，如何探测？采取哪些自动恢复正常的措施？

通过感受压气机出口压力的下降率可自动探测到。

纠正措施有：

- ①自动打开所有放气活门。
- ②提供高能到两个点火电嘴，以防止燃烧室熄火。
- ③瞬时减少向发动机供油，待恢复后按正常的供油量供油。

3. 扼要论述导致喘振的原因和排除方法。

具体原因是：

- 防喘装置调节不当或失效；
- 场温较高；
- 使用操作不当。

排除方法：应做相应的检查和维修，操作时动作不要过猛过快。

4. 随着大气温度变化，放气活门关闭转速是否变化？为什么？

？随着大气温度升高，放气活门关闭转速应增大。因大气温度升高，压气机进口总温升高，空气难于压缩，压气机增压比减小，就可能进入“前喘后涡”状态，使压气机喘振趋势增大，所以，放气活门关闭转速也应相应增大。

15. 轴流式压气机转子的组成：

- 轴流式压气机转子的三种基本结构型式是：鼓式，盘式，鼓盘式。

➤ 目前广泛使用的是用长短螺栓连接的鼓盘式转子。这是因为鼓盘式转子具有抗弯性好和强度高优点。

16. 叶片和盘的连接，燕尾型榫头的特点：

- 型式有三种：销钉，燕尾型的榫头，枞树型的榫头。
- 压气机叶片常采用燕尾形榫头。这是因为燕尾形榫头
 - 尺寸较小，
 - 重量较轻，
 - 能承受较大的负荷，
 - 加工方便，生产率高。
- 但是榫槽内有较大的应力集中。

17. 扩压器：

扩压器安装在压气机和燃烧室之间。它是一个扩张形的管道。其功用是使气流速度下降，压力提高，为燃烧室内的稳定燃烧创造条件。

18. 压气机叶片为什么要扭转？如何扭转？

压气机叶片的扭转主要是因为转子叶片呈翼型截面形状，通常设计成沿其长度有一压力梯度，以保证空气维持一个比较均匀的轴向速度，向叶尖方向逐渐变高的压力抵消转子作用在气流上的离心作用，为此必须将叶片从叶根向尖部“扭转”，以便在每一点都有一个正确的攻角。

叶片的扭转情况是：

- 在叶尖处叶型弯度小，叶型安装倾斜度大；
- 在叶根处叶型弯度大，叶型安装倾斜度小。

流过压气机的空气在其内外壁面处产生两个边界层，直将气流减慢到滞止的程度。为了补偿边界层中的缓慢气流，在叶片的尖部和根部局部增加了叶片的弯度，叫做“端部弯曲”。

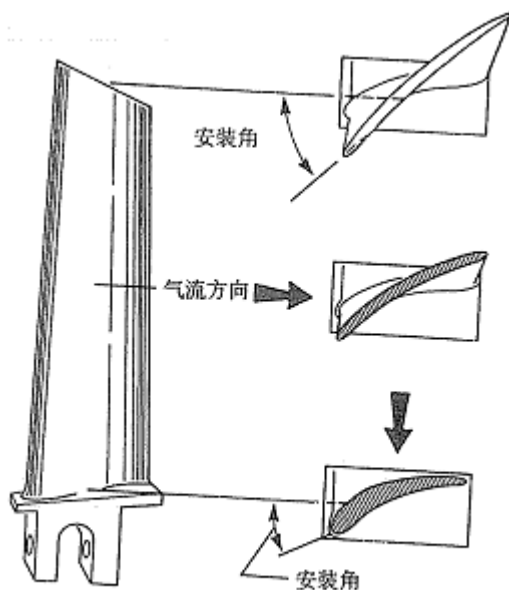


图 2-19 典型转子叶片

压气机出口超温可能的原因及处理方法？

答：原因：涡轮超转。处理方法：收油门。

叶片损坏的原因：

- 发动机振动大，使叶片产生裂纹或断裂。
- 外来物使压气机叶片产生裂纹或断裂。
- 长期使用过程中出现的腐蚀及疲劳裂纹。

燃烧室

发动机燃烧室的特点与要求？（燃烧室的任务？（作用））

燃烧室出口温度分布的要求

燃烧室容积利用程度 参数的定义：

余气系数的定义和物理意义

燃烧室污染物

燃气涡轮发动机的燃烧室三种类型

目前涡轮风扇发动机大多采用什么类型的燃烧室？为什么？

燃烧室中安装旋流器的主要作用？

进入燃烧室的第一股气流和第二股气流各有什么作用？

燃烧室中的主燃区，补燃区，掺混区的主要作用是什么？

燃烧室常见故障是什么？造成这些故障的主要原因是什么？

1. 发动机燃烧室的特点与要求？（燃烧室的任务？（作用））

燃烧室的任务：是将通过喷嘴供应的燃油和压气机供应的空气混合燃烧释放能量，供给涡轮所需的均匀加热的平稳燃气流。这一任务必须以最小的压力损失来完成，并且在有限的可用空间里释放出最大的热量。

特点：

- 燃烧室在高温下工作，条件恶劣。燃烧室工作的好坏直接关系发动机工作与性能；
- 承受燃烧产物造成的腐蚀以及温度梯度产生的蠕变失效和由振动力产生的疲劳。

基本要求是：

- 点火可靠（影响点火可靠的因素是燃油与空气的比例）、
- 燃烧稳定（燃烧的稳定性的指在宽广的工作范围内平稳燃烧和火焰的保持能力，**稳定燃烧的条件**是燃烧时气流速度等于火焰的传播速度）、
- 燃烧效率高（常用来衡量燃烧完成的程度）、
- 压力损失小、
- 尺寸小（意味在单位燃烧室空间中，在单位时间内可用燃烧更多的燃油，常用容热强度来衡量燃烧室容积的利用程度）、
- 出口温度场分布满足要求：（火焰除点火过程的短暂时间外，不得伸出燃烧室；
在燃烧室出口环形通道上的温度分布尽可能均匀；
在径向上靠近叶尖和叶根处的温度应低一些，而距离叶尖大约 1/3 处温度最高）、
- 燃烧完全、
- 排气污染小（碳氢化合物、烟、一氧化碳和氮的氧化物）、
- 寿命长。

2. 燃烧室出口温度分布的要求：

- 在一个圆环上温度分布要均匀，即同一个环上各处的温度相差不能太大。
- 在径向上靠近涡轮叶片叶尖和叶根处的温度应低一些，
- 而在距叶尖大约三分之一处温度最高。

3. 燃烧室容积利用程度 参数的定义：

燃烧室尺寸的大小用容热强度来表示。**燃烧室容积利用程度常用容热强度来衡量。**

- 在单位压力和单位燃烧室容积中，一个小时之内，进入燃烧室的燃油燃烧实际所释放出的热量称为**容热强度**。

容热强度大，表示燃烧室的尺寸小。容热强度小，燃烧室的尺寸大。

4. 余气系数的定义和物理意义？

余气系数(a)：是指进入燃烧室的空气流量 与进入燃烧室的燃油流量 完全燃烧所需要的最少的理论空气量(L)之比。

意义：余气系数表示贫油和富油的程度。

- 余气系数小于 1 时，为富油。
- 余气系数大于 1 时，为贫油。
- 在贫油和富油极限之间，火焰才能稳定燃烧。

（油气比 f 是进入燃烧室的燃油流量与空气流量的比值，与余气系数的关系是： $f=1/aL$ 。）

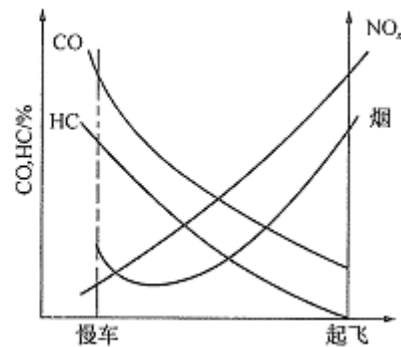
5. 燃烧室污染物:

燃烧室排放的污染物,除了因燃油中含硫而生成的 SO_2 外,通常还有 CO_2 、 CO 、 HC 、 NO_2 、 NO 、烟等。在慢车状态下, CO 和 HC 的含量较多。在高转速下 NO_x 和烟的含量较高。

燃烧产物对大气的污染要小。有 4 种主要污染物是受法规控制的。它们是未燃烧的碳氢化合物(未燃烧的燃油)、烟(碳粒子)、一氧化碳和氮的氧化物。在主燃区的富油区里,碳氢化合物转化成一氧化碳和烟。新鲜的稀释空气可用于在稀释区将一氧化碳和烟氧化成无毒的二氧化碳。污染物的含量随发动机工作状态而变化。一氧化碳和碳氢化合物含量随转速增大而减小。

氮的氧化物随转速增加而增加。烟的含量随转速增加先减小而后增加。这主要是由于局部富油缺氧,形成微粒所致(见图 2-27)。

燃烧室在高温下工作,条件十分恶劣,因此需要经常检查和维修。合理地组织燃烧和冷却,采用高性能的耐热材料等以提高燃烧室的寿命。燃油喷嘴的维护对燃烧室使用寿命的长短是至为关键的。



6. 燃气涡轮发动机的燃烧室三种类型

多个单管燃烧室: 每个燃烧室内有一个火焰筒,有单独的空气机匣。

环管燃烧室: 多个火焰筒装在共同的空气机匣里。

环形燃烧室: 只有一个火焰筒,形状是环形的。

7. 环形燃烧室有哪些类型?

直流式环形燃烧室,折流式环形燃烧室和回流式环形燃烧室。

8. 目前涡轮风扇发动机大多采用什么类型的燃烧室?为什么?

大多采用环型燃烧室。

环型燃烧室的优点有:

环形面积利用率高;

- 迎风面积小,
- 重量较轻;
- 点火性能好;
- 总压损失小;
- 出口温度分布能满足要求;
- 燃烧室的壁面积少,需要的冷却空气量减少,
- 燃烧效率提高,因此实际上是消除了未燃烧的燃油,并将一氧化碳化成二氧化碳,减少了空气的污染。

同一功率输出而言,燃烧室的长度只有同样直径的环管形燃烧室长度的 75%,节省了重量和成本。

- 另外,它消除了各燃烧室之间的燃烧传播问题。

环形燃烧室缺点: 制造成本高,拆卸困难和耗费时间。

管型燃烧室优点: 设计简单,结构强度好,能够单个的拆卸和更换;

缺点: 它们较重和需要更多的空间,还需要复杂的来自压气机的空气供应管路,导致气动损失非常高,并且从一个室到其他室的点火困难。

管环燃烧室优点: 比多管燃烧室尺寸小,重量轻,不需要复杂的空气供应管路,结构强度好,

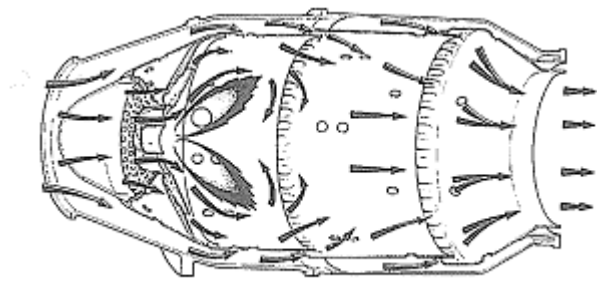
缺点: 气动损失相当高和从一个火焰筒到另一个点火困难)

9. 燃烧室中安装旋流器的主要作用?

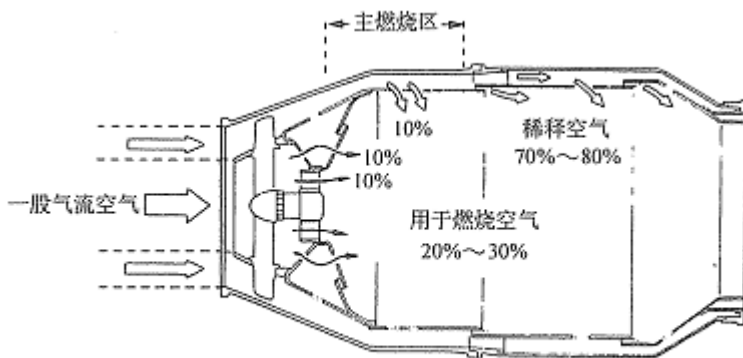
旋流器是由若干个旋流片按一定角度沿周向排列成的。

旋流器安装在火焰筒的前部,当空气流过旋流器时,由轴向运动变成旋转运动,气流被惯性离心力甩向四周,使燃烧室的中心部分空气稀薄,形成一个低压区,于是火焰筒四周的空气及后部一部分高温燃气便向火焰筒的低

压区倒流，形成回流，使气流轴向速度比较小，形成稳定的点火源，提高燃烧效率。



10. 进入燃烧室的第一股气流和第二股气流各有什么作用？



11. 燃烧室中的主燃区，补燃区，掺混区的主要作用是什么？

12. 燃烧室常见故障是什么？造成这些故障的主要原因是什么？

涡轮

带冠叶片的作用？（优点）

发动机涡轮叶片的冷却方式？

涡轮叶片材料

什么是涡轮叶片的蠕变？原因是什么？

涡轮落压比的定义？双转子发动机在什么转速下高压涡轮落压比不变？为什么？

1. 涡轮分哪几种？（优缺点）

涡轮的类型有 径向内流式 和 轴流式（类似于压气机的离心式和轴流式）。现在燃气涡轮发动机主要使用轴流式涡轮。

径向内流式涡轮总是单级（用于小型涡轮发动机，如 APU 上的涡轮）

径向内流式：优点：设计简单、容易制造。

缺点：通过的气体流量小和效率低（这是因为气动损失高和气体通过涡轮流动必须克服离心力）

轴流式：优点：涡轮级数多，可满足压气机，附件和风扇的要求；

允许通过的气体流量高，满足产生高推力的要求。

（涡轮静子叶片也称涡轮喷嘴导向叶片、涡轮喷嘴环 或者 涡轮导向器）

2. 涡轮叶片 冲击式、反力式特点：

- 冲击式涡轮是由于气流方向改变而产生的。冲击式涡轮的工作叶片是前缘和后缘较薄，而中间较厚。
- 反力式涡轮吸收燃气能量产生扭矩是由于气流速度的大小和方向的改变而产生的。反力式涡轮的工作叶片是前缘较厚，而后缘较薄。
- 混合式涡轮叶片综合冲击式和反力式，叶片叶根冲击多反力少，叶尖反力式。

3. 涡轮叶片

涡轮叶片有三种型式，即冲击式（恒压式）、反力式和这两种的组合——冲击反力式。

冲击式涡轮中，推动涡轮旋转的扭矩是由于气流方向的改变而产生的。涡轮导向器内叶片间的流动通道是收敛形的，燃气在导向器（也称喷嘴环）内速度增加，压力下降；而在工作叶片通道内，相对速度的大小不变，只改变气流的流动方向。冲击式涡轮的工作叶片的特征是前缘和后缘较薄，中间较厚（见图 3-5）。

在反力式涡轮中，推动涡轮旋转的扭矩是由于气流速度大小和方向的改变而产生的。燃气在涡轮导向器中只改变流动方向，涡轮工作叶片间的通道是收敛形的，承受燃气膨胀和加速产生的反作用力。燃气的相对速度增加，流动方向改变，压力下降。反力式涡轮工作叶片的前缘较厚，后缘较薄（见图 3-6）。

燃气涡轮发动机多采用冲击反力组合式涡轮。涡轮设计中每一种方式的比例大体上取决于装此涡轮的发动机型别。一般来说，大约冲击式占 50%，反力式占 50%。

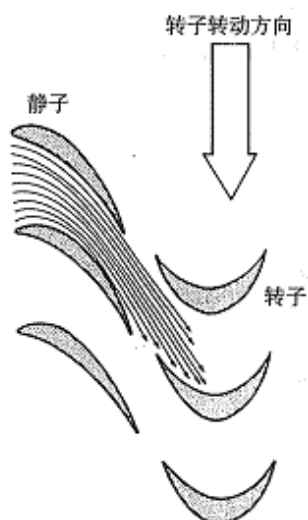


图 3-5 冲击式涡轮

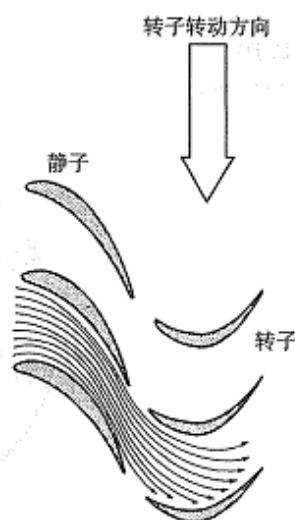


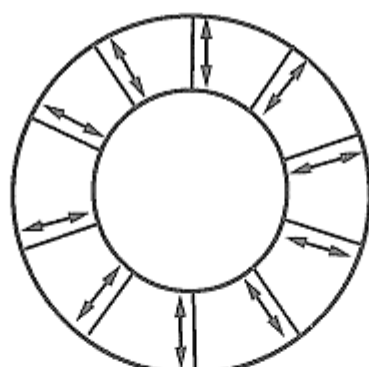
图 3-6 反力式涡轮

2. 组成

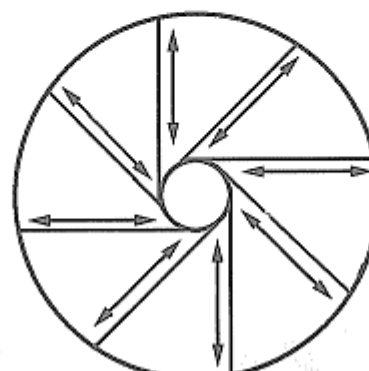
典型的双转子发动机涡轮部分组成有：高压涡轮、低压涡轮和涡轮框架。高压涡轮通常是单级或双级，高压涡轮转子连接高压压气机后轴。低压涡轮轴连接低压压气机转子。涡轮框架在低压涡轮后面，它将低压涡轮后端的轴承负荷传递到涡轮框架上发动机后安装节。

典型的涡轮静子组件有：静子机匣、喷嘴导向叶片、封严和间隙控制空气总管。高压涡轮机匣用螺栓连到燃烧室机匣的后安装边，低压涡轮机匣用螺栓连到高压涡轮的后安装边。高压涡轮和低压涡轮机匣有主动间隙控制系统的冷却空气管，有检查内部状态的孔探孔。高压涡轮转子有：涡轮盘、转子叶片、旋转的级间封严和前、后叶片保持器。

涡轮框架是发动机的主要结构件，支持涡轮转子，提供发动机后安装节的连接点，支持发动机排气部件像喷管和排气锥。典型的涡轮框架由框架毂同轴承支撑、外框架机匣和一组连接毂同外机匣的支柱组成。支柱是气动外型，减少排气阻力。其内部是空心的给出滑油供油管、回油管等的空间和对弯曲和扭转给出较高的结构强度。在燃气涡轮发动机上框架支柱有两种不同的布局，一是径向的，一是切向的（见图3-4）。径向支柱通常设计的尽可能短，支柱的膨胀最小，保持框架毂上的应力低。切向支柱由热膨胀引起的应力最小，因为如果膨胀将使毂轻微转动。



径向支柱



切向支柱

3. 涡轮构造（补充知识点）

轴流式涡轮基本部件：导向器叶片、涡轮盘、工作叶片。

导向器叶片：翼型截面，相邻叶片通道是收敛通道，位于涡轮机匣上。叶片通常是空心，可由压气机出口空气在其内部流过进行冷却。

涡轮工作叶片：设计成翼型截面，安装在涡轮盘上。**高压涡轮**的工作叶片是空心的，由**高压压气机**引气冷却。

涡轮盘：可以和轴制成一体，也可以带边由螺栓连接涡轮轴。轮盘外缘有安装工作叶片的榫槽。每级轮盘的两面都通一股冷气，限制工作叶片对轮盘的热传导。

导向器叶片和涡轮工作叶片都是扭曲的，即叶片处的安装角比叶根处的大。**扭曲的理由是**：使来自燃烧室的

燃气流在沿叶片的长度方向的所有部位都做相等的功，并保证进入排气系统的气流具有均匀的轴向速度。

4. 涡轮工作叶片安装到轮盘上的最佳型式是什么？它的优缺点是什么？

枞树型榫头。

优点：

- 1 重量轻，由于叶片榫头呈楔形，所以材料利用合理；
- 2 强度高；
- 3 高温下工作对热应力不敏感；
- 4 拆装及更换叶片方便。

缺点：1 加工精度要求高，2 容易出现裂纹。

（为了保证载荷能所有的齿分担，这种榫头要做非常精密的机械加工。当涡轮处于静止时，叶片在齿上是活动的，当涡轮旋转时，在离心载荷作用下根部才变成刚性结合。）

5. 影响涡轮间隙的因素

- 有涡轮机匣和涡轮叶片所使用的材料，
- 发动机的工作状态和飞行条件。

（涡轮叶片和机匣之间存在间隙，大间隙会减小涡轮效率；间隙过小会引气工作叶片与涡轮机匣的磨损。

材料：材料的膨胀时间与厚度有关，因此薄的机匣比叶片膨胀快；

工作状态：高速、低速时，离心力的影响。转速增加时，离心力引气的材料膨胀比热引起的膨胀大。当减速或停车时：开始时，离心力引起的叶片收缩快，后来是涡轮机匣收缩的快）

6. 涡轮发动机，在启动，转速增加及停车期间涡轮间隙如何变化？

启动时间隙大，转速增加由于涡轮间隙自动控制（ACC），离心力叶片热膨胀此时间隙最小，停车间隙变大。

发动机启动时高温燃气作用在涡轮材料上，涡轮机匣膨胀的比涡轮转子快，这是因为机匣比转子薄，接触较高的温度和它的直径比转子大。当转子加速时，在转子上的离心力增加，离心力减少间隙，转子盘和叶片伸长。意味着发动机在低转速比高转速叶尖间隙大。当发动机减速或停车时，涡轮间隙的变化是开始时由于离心力减小转子比机匣收缩快，后来是涡轮机匣收缩快。

7. 用于涡轮发动机涡轮叶片的两种结构型式是什么？说明其特点（优点）。

涡轮叶片型式有带冠叶片和不带冠叶片。

带冠叶片：增加叶片刚度；减少叶片振动；减少燃气漏过叶片顶部时的效率损失，提高涡轮的效率。

不带冠的叶片：重量轻，叶尖间隙可以通过涡轮间隙自动控制技术提高涡轮效率。

（带冠的涡轮叶片主要用在低转速的低压涡轮上，工作叶片不带冠的主要用于高转速的涡轮，可以通过涡轮间隙主动控制系统保持间隙最佳。叶冠增加了重量，但可将叶型做的更薄而抵消。）

涡轮叶片带冠的优点？

优点：

- 减少燃气漏过叶片顶部时的效率损失，提高涡轮的效率；
- 增强叶片的刚度；
- 降低叶片的振动。

8. 带冠叶片的作用？

①带冠涡轮叶片可以减小叶片尖部由叶盆向叶背的漏气，降低二次损失，提高涡轮的效率；

②相邻叶片的叶冠抵紧后可以减小叶片的扭曲变形和弯曲变形，增强叶片的刚度，提高叶片的振动频率；当叶片产生振动时，相邻叶冠间产生摩擦，可以吸收振动能量，起到的减振作用。

③带冠涡轮叶片可以采用对气动有利的薄叶型。且有利于叶片与机匣之间的间隙的控制，减少轴向漏气，更有效地提高涡轮效率。

9. 发动机涡轮叶片的冷却方式？

冷却方式：对流、冲击、气膜冷却

涡轮导向器和转子叶片都做成空心的。冷却的作用是一方面增加涡轮的使用寿命，另一方面得到更好的涡轮效率，这是通过冷却外部涡轮机匣实施的，冷却空气来自高压压气机的空气冷却。

对流冷却：是最简单的方法，冷却空气从叶片的底部和顶部的孔进入流经叶片的内部通路最后从叶片后缘流出同热的燃气汇合；

冲击冷却：对于涡轮喷嘴导向叶片和转子叶片是较好的冷却方法。冷却空气首先流进嵌入叶型空心的管，

管内有許多小孔作为喷嘴，冷却空气通过这些喷嘴冲击叶型内壁。冷却空气最后从叶片后缘流出同热的燃气汇合；

气膜冷却：冷却空气经在涡轮叶型上钻的小孔流入热燃气，在涡轮叶片和导向器的外壁形成薄的气膜，该冷却气膜阻止燃气同涡轮材料直接接触，所以冷却效果最有效，但是钻这些小孔非常困难，费用高。

大多数现代燃气发动机上使用组合冷却方式，

- 涡轮第一级喷嘴导向叶片和第一级转子叶片，采用对流、冲击、气膜冷却；
- 第二级喷嘴导向叶片采用对流和冲击冷却。
- 第二级转子叶片仅用对流冷却即可。

（**涡轮的冷却：**涡轮导向器、涡轮转子和外部机匣的冷却。外部机匣可以使用风扇后的空气或者是压气机的不同级。）

10. 涡轮叶片材料

涡轮叶片材料是**铸造**镍基合金和单晶体片，（单晶体叶片片 使用温度大大提高）

涡轮盘是镍基合金或者粉末冶金盘，（镍基合金：镍元素可以提高抗疲劳裂纹的能力）

导向器叶片是镍合金外加陶瓷涂层。（陶瓷涂层加强热阻特性）

11. 什么是涡轮叶片的蠕变？原因是什么？

涡轮叶片超过一定工作期间，叶片在长期的应力作用下，特别是材料经受的温度高，叶片会慢慢的伸长，这种现象称为**蠕变**，这类变形当载荷去掉以后不能回到原始形状。它是由于负荷的长期作用结果产生的塑性变形，与时间和温度相关。蠕变是离心力、材料温度和时间的函数。

涡轮叶片蠕变是由 热负荷和离心负荷 长时间作用引起的。

12. 涡轮落压比的定义？双转子发动机在什么转速下高压涡轮落压比不变？为什么？

涡轮落压比是涡轮**进口**处的总压与涡轮**出口**处的总压之比。

高压涡轮的落压比在**中等转速以上**就保持不变。

涡轮落压比随转速的变化规律：

1. 当涡轮导向器最小截面处处于临界或超临界状态时，涡轮的落压比为常数；
 2. 当涡轮导向器最小截面处处于临界或超临界状态，而喷管处于亚临界状态时，随着转速下降，涡轮的落压比下降；这时涡轮落压比的变化是由最后一级涡轮落压比的变化造成的，而其它各级涡轮的落压比不随转速而变化。
 3. 当涡轮和喷管均处于亚临界状态时，随着转速减小，涡轮的落压比减小。各级落压比都减小，而且越靠后的级落压比减小得越多。
- 由此可以看出，对于多转子发动机的高压涡轮，只要第一级导向器处于临界或超临界状态，则涡轮落压比就保持不变。
 - 双转子涡喷发动机，喷管处于临界或超临界工作状态时，高压涡轮落压比保持不变。

喷管

简述燃气涡轮发动机喷管的功用。

什么叫喷管？喷管分为哪两种基本类型？

简述**收缩喷管**的组成和各部分的功用？

排气锥（排气塞）和外壁之间的通道通常做成扩散形的，为什么？

什么是喷管的实际落压比和可用落压比？它们之间的关系什么？

亚音速喷管的三种工作状态？

1. 简述燃气涡轮发动机喷管的功用。

1. 安装在涡轮的后面，其主要功用是使从涡轮流出的燃气膨胀、加速，以一定的速度和要求的方向排入大气，得到所需的推力；
2. 通过改变排气排出方向的反推力装置可以按需要产生反推力，降低落地后的滑跑速度，缩短滑跑距离；
3. 矢量喷管是能使排气流在一定范围内变化的喷管，这种推力方向的改变主要用来操纵飞机；
4. 设计消音喷管可以减低产生的噪音；
5. 调节喷管临界面积可改变发动机的工作状态。

2. 什么叫喷管？喷管分为哪两种基本类型？

凡是使气流压力下降，速度增加的管道叫喷管。
(安装在涡轮的后面，使从涡轮流出的燃气膨胀、加速，以一定的速度和要求的方向排入大气，得到所需推力的管道，称为喷管)。
喷管分为 亚音速喷管 和 超音速喷管。

- 亚音速喷管是收敛形 的管道，包括排气管（尾管）、排气锥（排气塞）、整流支柱、收敛喷口。
- 超音速喷管是先收敛后扩张形的管道。

3. 简述收缩喷管的组成和各部分的功用？

- 收缩喷管通常是由中介管和喷口组成。中介管又称为排气管，是由外壳，整流锥和支板组成。
- 中介管安装在涡轮的后面，其作用是整流和使燃气减速，以减小损失。
- 整流锥可使气流通道由环形逐渐变为圆形，以减小燃气的涡流。
- 支板可迫使方向偏斜的气流作轴向流动以减小流动损失。
- 喷口是收敛形的管道，使燃气加速，以获得较大的推力。

4. 排气锥（排气塞）和外壁之间的通道通常做成扩散形的，为什么？

降低气流的速度，以减小摩擦损失。
从发动机涡轮流出的燃气进入排气系统，由于燃气速度高会产生很高的摩擦损失，所以气流的速度要通过扩散加以降低，这是通过将排气锥和外壁之间的通道面积不断地加大实现。

5. 什么是喷管的实际落压比和可用落压比？它们之间的关系什么？

实际落压比，简称落压比，是喷管进口处的总压与喷管出口处的静压之比。
可用落压比是喷管进口处的总压与喷管出口外的反压（大气压）之比。
关系：实际落压比可以小于或等于可用落压比，实际落压比不能大于可用落压比，这是因为收敛喷口处的静压可以大于或等于反压。

(总压恢复系数：喷管 出 口处的总压与喷管 进 口出的总压之比。)
(反压因该是指周围环境大气压。喷口静压是指喷出气流静压。实际落压比之所以小于或等于可用落压比，是因为喷出气流可能出现没有完全膨胀，喷口静压比周围环境压力大。)

6. 亚音速喷管的三种工作状态？

亚临界工作状态：当可用落压比小于 1.85 时，喷管处于亚临界状态。这时喷管出口气流马赫数小于 1，出口静压等于反压，实际落压比等于可用落压比，是完全膨胀。
临界工作状态：当可用落压比等于 1.85 时，喷管处于临界状态。这时喷管出口气流马赫数等于 1，出口静压等于反压，实际落压比等于可用落压比，都等于临界压比。是完全膨胀。
超临界工作状态：当可用落压比大于 1.85 时，喷管处于超临界状态。出口静压等于临界压力而大于反压，实际落压比小于可用落压比，是不完全膨胀。

(双转子涡喷发动机，喷管处于临界或超临界工作状态时，高压涡轮落压比保持不变)

状态	可用落压比	实际与可用	膨胀	静压与反压
亚临界	< 1.85	=	完全	相等
临界	= 1.85	=	完全	相等
超临界	> 1.85	<	不完全	大于

轴承、封严、附件传动

什么是转子支承方案？如何表示？
转子上止推支点的作用？一个转子有几个止推支点？
在涡喷发动机上什么是柔性联轴器？什么刚性联轴器？
. 轴承的种类
滚动轴承组成：
挤压油膜式轴承原理 及 功用？
轴承润滑的方法：（自己加的）
燃气涡轮发动机上使用哪些种类的封严件？及其作用？

1. 什么是转子支承方案？如何表示？

发动机中，转子采用几个支承结构（支点），安排在何处，称为**转子支承方案**。

为了表示转子支点的数目与位置，常用两条前、后排列的横线分别代表 压气机转子和涡轮转子，两条横线前后及中前的数字表示支点的数目。如：1-3-0。即压气机转子前一个支点，涡轮转子后没有支点，压气机和涡轮的转子之间有 3 个支点。

（转子上承受的各种负荷由支承结构承受并传至发动机机匣上，最后通过安装节传至飞机结构上，轴承的数目由转子的长度轴和重量决定，一般都采用滚珠轴承和滚柱轴承用于支承发动机的主转子轴，在支承方案简图中，小圆圈表示滚珠轴承，小方块表示滚柱轴承）

2. 转子上止推支点的作用？一个转子有几个止推支点？

转子上的止推支点（固定轴承）除承受转子的 轴向负荷、径向负荷 外，还决定了转子相对机匣的轴向位置。

每个转子只能有一个止推支点（固定轴承）。

（**浮动轴承：仅传递径向力**，在轴向可以动，转子轴和机匣的长度改变是有热膨胀引起的，3 支点系统中，固定轴承在中间，浮动轴在转子的两端，轴膨胀最小，）

3. 在涡喷发动机上什么是柔性联轴器？什么刚性联轴器？

如果允许涡轮转子相对压气机转子轴线有一定的偏斜角，这种联轴器称为**柔性联轴器**。

在 2 支点的支承方案中，联轴器仅传递扭矩和轴向力，且将涡轮轴与压气机轴刚性的联成一体，这种联轴器称为**刚性联轴器**。

发动机转子上的联轴器是连接涡轮转子和压气机转子的组合件。在不同的支承方案中，联轴器有的仅传递扭矩；有的要传递扭矩和轴向力；有的不仅要传递扭矩、轴向力，还要承受径向力。

4. 轴承的种类：

发动机广泛使用滚动轴承，也有滑动轴承。

滚动轴承有滚珠轴承和滚柱轴承。

根据承受载荷方向的不同，滚动轴承可分为向心型轴承和推力型轴承两大类，向心轴承只能承受径向载荷；而推力轴承只能用来承受轴向载荷。

5. 滚动轴承组成：

- 滚动轴承由内圈、外圈、滚动体和保持架组成。
- 内圈装在轴上，与轴一起转动；
- 外圈在轴承座上，起支撑滚动体的作用；
- 滚动体在内圈和外圈间的滚道内滚动，承受载荷，
- 保持架的作用是将滚动体相互隔开，避免互相碰撞和摩擦，并使每个滚动体均匀轮流地承受相等的载荷。

6. 挤压油膜式轴承原理 及 功用？

在某些发动机上，为了尽量减少从**旋转组件传向轴承座**的动力负荷的影响，采用了挤压油膜式轴承。

在轴承外圈和轴承座之间留有很小的间隙，该间隙充满了滑油，并形成油膜。该油膜阻尼了旋转组件的**径向运动及传向轴承座的动力载荷**。因此，减小了发动机的振动及疲劳损坏的可能性。

7. 轴承润滑的方法：（自己加的）

轴承需要滑油润滑和冷却。因为它工作在高负荷、高转速和高温下。有两种方法供应每个轴承必要的滑油量：**直接润滑法和间接润滑法**。直接润滑通过一个标定孔供应一定温度和压力的滑油，孔的尺寸确定了在各种工况下的流量。保持滑油干净十分重要，喷油孔前，供油路上安装有若干油滤过滤滑油。间接润滑是滚道下润滑方法，滑油喷雾在空心转子轴的内壁，由于离心力滑油停留在壁上，然后滑油通过轴和轴承内滚道上的孔向外流动，在保持架离开轴承。这种方法比直接润滑带走较多热量。轴承也有应用润滑脂和固体润滑剂的，固体润滑剂用在高温、高速、重载的情况。

8. 燃气涡轮发动机上使用哪些种类的封严件？及其作用？

萁齿式封严件；浮动环（环形）封严件；液压封严件；石墨封严件；刷式封严件。

- 封严件用于防止滑油从发动机轴承腔漏出，
- 控制冷却空气流和主气流的燃气进入涡轮盘空腔。

（选择何种封严件取决于周围的温度和压力、可磨蚀性、发热量、重量、可用的空间，易于制造及安装和拆卸。高温主燃气流吸入涡轮盘会导致过热和引起有害的膨胀和疲劳。

通过不断的向涡轮空腔供入足量的冷却和封严气流，来阻挡高温燃气的向里流动，从而达到防止燃气吸入的目的。冷却和封严空气的流量和压力由级间封严件控制）

第五章 第六章 发动机系统

一、燃油和控制系统：

燃油系统的功用？

发动机燃油系统主要部件有哪些？

说明发动机燃油加温的目的和方法。？

燃气涡轮发动机燃油加温有什么限制？

发动机燃油泵性能特点、结构特点？

燃油泵分为几类、特点？

什么是被控参数，可控变量，给定值，干扰量？

发动机的开环控制，优缺点？

发动机的闭环控制：？

为什么近代燃气涡轮发动机皆采用复合控制？

在发动机控制中，什么是稳态控制，过渡控制，安全限制？

燃气涡轮发动机控制器的型式有哪几类？主要特征？

说明液压机械燃油控制器的特征？

燃油控制器中哪个部件负责计量燃油？如何计量所需的燃油流量？

燃油控制器中最小压力活门或增压活门的作用？

新型发动机有几个慢车转速？如何转换？

燃油控制器中有哪几个限制器

燃油控制器中的分油活门、喷嘴挡板是什么性质的元件？其作用是什么？

在电子控制中力矩马达的作用是什么？如何实现？

在监控型发动机电子控制中，EEC 的功用是什么？

监控型电子控制器中机械液压控制器的作用

监控型 EEC 是如何实现精确控制？

PMC 的作用？MEC 的作用？

液压机械燃油控制器调整钉外场允许调整的部位有哪些？如何调整？（功率调整插钉—NEW!）

什么是全功能（全权限）数字电子控制？

为什么说 FADEC 是全功能的？

FADEC 的特点？

在 FADEC 系统中，液压机械式装置的作用是什么？

燃油和滑油滤中的压差电门感受什么参数？它是如何工作的？

发动机用双路式喷嘴是如何工作的？

与单油路喷嘴相比双油路喷嘴有哪些优点？

空气雾化喷嘴的优点有哪些？

飞机上使用的燃油可以分为哪几种，现在主要用那一种

1 燃油系统的功用：

燃油系统的功用是在各个工作状态下将清洁的、无蒸汽的、经过增压的、计量好的燃油供给发动机。

2 发动机燃油系统主要部件有哪些？

发动机燃油系统是从飞机燃油系统将燃油供到发动机的燃油泵开始，一直到燃油从燃烧室喷嘴喷出，这中间包括的部件有：

- 燃油泵、

- 燃油加热器、
- 燃油滤、
- 燃油/滑油散热器、
- 燃油控制器、
- 燃油流量计、
- 燃油分配活门或增压和泄油活门，
- 燃油总管、
- 燃油喷嘴。

（它分为燃油的分配、燃油控制和燃油指示 分系统。发动机控制中应避免出现：超温、超转、超压、超扭、喘振、贫油和富油熄火。）

3 说明发动机燃油加温的目的和方法。

目的：防止燃油结冰，堵塞油路。

- 加温燃油通过压气机后的热空气或者用发动机的滑油回油。
- 实现方式是：燃油经过燃油泵初步增压后，离开燃油泵流经燃油加热器（热空气加热）或 燃油/滑油散热器，通过热交换，得到加温。
- 燃油加热有限制，在起飞、进近、复飞这些关键的飞行阶段不能使用引气加温燃油，这是为了防止出现熄火的可能。

4 燃气涡轮发动机燃油加温有什么限制？

在**起飞、进近或复飞**时不应使用燃油加温，过多热量可能引起燃油汽化，有熄火的可能。

5 发动机燃油泵性能特点 结构特点

燃油泵有容积式泵和叶轮式泵两种。

- 容积式泵包含有柱塞泵、齿轮泵、旋板泵（叶片泵）。容积式泵是依靠泵的抽吸元件作相对运动，交替改变元件间的自由容积进行吸油、排油的。供油量取决于元件一次循环运动中自由容积变化的大小。在一定的供油量下，泵根据出口处的液体**流动阻力来建立压力**。
- 叶轮式泵包含有离心泵、汽心泵、螺旋泵。叶轮式泵是依靠叶轮作旋转运动，使经过叶轮的液体增加动能和压力能，在叶轮后的扩压器中再将液体的**动能部分滞止**，转化为压力能。
- 齿轮泵是定量泵，工作容积不可调流量和转速有一一对应关系。当转速不变时，供油量通过旁通回油调节，即齿轮泵的供油量始终高于需油量，超出需要的油量返回油泵进口。
- 柱塞泵是变量泵，柱塞泵的供油量不仅取决于转速还取决于斜盘角度，转速不变时，供油量通过改变斜盘角度容易调节。柱塞泵的调节性好这是它的主要优点，不过结构复杂、工艺要求高、寿命短

6 燃油泵分为几类、特点：

燃油泵有容积式泵和叶轮式泵两种。

- 容积式泵包含有柱塞泵、齿轮泵、旋板泵（叶片泵）。容积式泵是依靠泵的抽吸元件作相对运动，交替改变元件间的自由容积进行吸油、排油的。供油量取决于元件一次循环运动中自由容积变化的大小。在一定的供油量下，泵根据出口处的液体**流动阻力来建立压力**。
- 叶轮式泵包含有离心泵、汽心泵、螺旋泵。叶轮式泵是依靠叶轮作旋转运动，使经过叶轮的液体增加动能和压力能，在叶轮后的扩压器中再将液体的**动能部分滞止**，转化为压力能。

7 什么是被控参数，可控变量，给定值，干扰量？

被控对象：被控制的物体或过程，例如发动机

被控参数：能表征被控对象（发动机）的工作状态又被控制的参数。如 N1，N2，EPR。

可控变量：能影响被控对象的工作过程，用来改变被控参数大小的因素。如燃油流量，螺旋桨的桨叶角。

给定值：驾驶员的指令值。如推力杆角度。

干扰量：引起被控参数发生变化的外部作用量。如飞行高度、速度的变化。

（控制装置：用以完成既定控制任务的机构的总和，又称控制器

控制系统：由 控制对象 和控制装置 组成）

8 发动机的开环控制，优缺点

➤ 控制装置和被控对象同时感受外界干扰，改变可控变量，补偿干扰量引起的被控参数变化，按**补偿原理**工作。

➤ 优点是及时、稳定，缺点是不能补偿所有干扰，精度差。

9 发动机的闭环控制：

➤ 被控对象的输出即为控制装置的输入，控制装置的输出即为被控对象的输入，整个控制系统形成一个闭合的回路，按**偏离原理**工作。

优点是精度高，不仅对外界干扰而且对内部部件性能退化造成的被控参数变化也能修正，缺点是不及时。

10 为什么近代燃气涡轮发动机皆采用复合控制？

（1）近代飞机对控制精度要求不断提高，可靠性要求必须保证。

（2）复合控制是综合了开环和闭环控制的优点而缺点得到相互弥补，从而使控制系统精度高，响应快，而且工作稳定。

11 在发动机控制中，什么是稳态控制，过渡控制，安全限制？

稳态控制：在外界干扰量发生变化时，保持既定的发动机稳态工作点。

稳态工作意味发动机的**转速或推力**保持不变，例如慢车状态或恒速工作。

过渡控制：当发动机从一个工作状态改变到另一个工作状态时，

能快速响应，且又保证稳定可靠的工作，同时又不超出允许的限制。

瞬态工作意味发动机转速或推力在增加或减小，

瞬态是指加速、减速、启动和停车。

安全限制：在各种工作状态及飞行条件下，保证发动机主要参数不超出安全极限。

例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。

12 燃气涡轮发动机控制器的型式有哪几类？主要特征？

液压机械式（包括气动机械式）：包括计量部分、计算部分；

监控型电子控制：液压机械为主控制器，电子控制辅助。

全功能（全权限）数字电子控制：全部计算由 EEC 进行，液压机械为执行机构。

13 说明液压机械燃油控制器的特征？

1. 液压/气动机械式控制器，是航空发动机上使用最多的控制器，它有良好的使用经验和较高的可靠性。
2. 它除控制供往燃烧室的燃油外，还操纵控制发动机可变几何形状，例如可调静子叶片、放气活门、放气带等。
3. 液压机械式控制器，其计算由凸轮、杠杆、滚轮、弹簧、活门等机械元件组合实现的，由液压油源作为伺服油。
4. 液压机械式控制器包括：计算部分和计量部分
5. 它感受功率杆角度输入、高压转子转速、压气机出口压力、压气机进口温度信号通过计算元件进行计算，按油气比控制，保证加速、减速和稳态工作时计量部分的输出。计量活门通过改变通油面积改变供油量，而前后压差有压力调节活门始终保持常数。
6. 慢车电磁活门控制地面慢车和进近慢车。

14 燃油控制器中哪个部件负责计量燃油？如何计量所需的燃油流量？

燃油控制器中 燃油计量活门 负责计量燃油。

从流量公式可以看到要改变燃油流量一般通过 改变计量活门的流通面积和/或计量活门的前后压差 实现。

通常采用 压差活门或压力调节活门 保持计量活门前后压差不变，改变计量活门流通面积来改变供油量。

或保持计量活门流通面积不变，改变计量活门前后压差来改变供油量。

15 燃油控制器中最小压力活门或增压活门的作用？

作用：为保证燃油控制器内伺服机构工作正常以及离开燃油控制器的燃油有足够的压力使喷嘴雾化模型良好，控制器内有最小压力活门或增压活门。

离开控制器计量活门的计量燃油，其压力必须高于最小压力活门的打开压力才能供往喷嘴。

16 新型发动机有几个慢车转速？如何转换？

慢车转速是发动机能够稳定工作的最低转速，慢车转速的控制信号来自驾驶舱推力杆在慢车位。

新型发动机设置有进近慢车和地面慢车。进近慢车转速比地面慢车转速高。以进近慢车（高慢车）进近着陆，可以保证复飞时迅速加速。飞机成功着陆后 4~5 秒改为地面慢车（低慢车）。

燃油控制器上有相应的调整部位。高、低慢车转换由 控制器上慢车电磁活门通电、断电 实现。

17 燃油控制器中有哪几个限制器：

燃油控制器中有

- 最大转速限制器，
- 排气温度限制器和
- 扭矩限制器。

18 燃油控制器中的分油活门、喷嘴挡板是什么性质的元件？其作用是什么？

是液压放大元件。由于敏感元件的输出信号较小，经其放大后再作动执行元件。

19 在电子控制中力矩马达的作用是什么？如何实现？

- 力矩马达将 EEC 的电信号转换成液压机械控制器能接受的液压信号。

力矩马达电流大小改变 挡板开度或分油活门位置，使伺服机构（或活门）动作。

20 在监控型发动机电子控制中，EEC 的功用是什么？

➤ 监控型电子控制是在液压机械式控制器基础上，再增加一个发动机电子控制器 EEC，两者共同实施对发动机的控制。

➤ 液压机械式控制器为主控制器，负责发动机的完全控制，包括启动、加速、减速控制，转速控制。

发动机电子控制具有监督能力，

- 对推力（功率）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，及信号显示和数据储存。
- EEC 通过 力矩马达 与机械控制器联系，实现电/液转换。EEC 计算结果以点信号输出给力矩马达，再转换成液压信号控制燃油流量。
- 在该型控制中，多数的液压控制器的供油计划高于 EEC 的供油计划，EEC 通过减少液压机械控制器的供油达到目标值，即称下调。
- 如果发现 EEC 故障，可以冻结调准在当时位置，同时通知驾驶员，驾驶员可以使 EEC 退出工作，由液压机械式控制器恢复全部控制。
- 如果是双发飞机的一个 EEC 故障，一般是同时使双发的 EEC 都退出，保证推力杆位置没有交错，排成一线。

21 监控型电子控制器中机械液压控制器的作用

它作为**主控制器**，包括启动，加速，减速度控制，转速控制。

当 EEC 故障时，可以由液压控制器恢复全部控制。

22 监控型 EEC 是如何实现精确控制？

HMU 和 EEC，两者共同实施对发动机的控制。

- HMU 为主控制器，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 具有监督能力，对推力进行精确控制，并对重要工作参数进行安全限制。

监控控制由 HMU 完成主要功能，EEC 起监控、限制作用，具有有限功能，即对推力（功率）作有限的控制。

EEC 参与工作时，对于外界条件的变化，它可以精确保证选定的目标值，例如以 EPR 或 n_1 表征推力，EEC 则精确保证 EPR 或 n_1 实际值等于要求值。

EEC 通过力矩马达与 HMU 联系，实现电/液转换。EEC 计算结果以电信号输出给力矩马达，再转换成液压信号控制燃油流量。多数的 HMU 的**供油计划**高于 EEC 的供油计划，EEC 通过减少 HMU 的供油达到目标值。

如果发现 EEC 有故障，可以**冻结调准**在当时位置，可以使 EEC 退出工作，恢复 HMU 完全控制。如果双发飞机，其中一发 EEC 故障，另一发 EEC 正常，一般让两台发动机的 EEC 都退出工作。

EEC 是**双通道**设计，任何一个通道都能控制发动机的工作。为了正确控制各个发动机子系统，EEC 采用**闭环控制**原理。

23 监控型发动机 EEC 如何 精调 推力：

- EEC 输出信号通过力矩马达控制燃油控制器输出的燃油量，来控制 N_2 的转速，
- 进一步调节 N_1 转速。 N_1 传感器将 N_1 转速传给 EEC，
- EEC 再根据反馈的偏差进一步通过燃油控制器控制 N_2 来调节 N_1 ，
- 最终达到精确控制推力。

25 MEC 的作用

发动机主燃油控制，

- 根据油门的指令，并参考其他参数的输入来控制发动机 N_2 转速，

- 并发出指令调整 VBV, VSV 的位置, 设置高压涡轮间隙控制的工作。

26. PMC 的作用

功率管理控制器: 根据油门杆角度, 风扇进口空气压力 (ps12) 和风扇进口温度 (T2) 来输出电信号, 有限度地超控 MEC, 设立正确的 N1 转速, 保证发动机推力。

27. 液压机械燃油控制器调整钉外场允许调整的部位有哪些? 如何调整 ?

燃油控制器由发动机高压转子传动。为保证发动机输出推力, 性能试验期间, 需要检查慢车转速和最大推力。调准正常地在发动机或燃油控制器更换后或发动机没有产生最大推力时进行。燃油控制器外场允许的调整部位有燃油比重, 慢车转速, 部分功率调整钉。

功率调整插钉—NEW!

燃油控制器由发动机高压转子传动。为保证发动机输出推力, 性能试验期间, 需要检查慢车转速和最大推力。调准正常地在发动机或燃油控制器更换后或发动机没有产生最大推力时进行。燃油控制器外场允许的调整部位有燃油比重、慢车转速、部分功率调整钉。

调整的理想情况是无风、低湿度, 标准日的温度和压力, 不是标准日的情况查表。小风天气, 风向对着机头; 大风天气不要做调准。每次调整转动调整钉其最后调准应在增加方向上。在有高、低慢车转速的情况下, 分别有高、低慢车转速调整。在有的监控型电子控制器上? 如 CFM56 -3 发动机的 PMC 上有增益调整。

28. 什么是全功能 (全权限) 数字电子控制?

全功能 (全权限) 数字电子控制即 FADEC 系统包括

- 发动机电子控制器 EEC 或电子控制装置 ECU、
 - 燃油计量装置 FMU 或液压机械装置 HMU、
 - 传感器、
 - 作动器、
 - 活门、
 - 发电机和
 - 互连电缆等。
- 在 FADEC 控制中, 发动机电子控制器 EEC 或称电子控制装置 ECU 是它的**核心**,
- FADEC 系统是管理发动机控制的所有控制装置的总称。
- 所有的控制计算都由计算机进行, 然后通过电液伺服机构输出控制液压机械装置 HMU 及各个活门、作动器等,
- 因此液压机械装置是它的执行机构,
 - 但仍保留了原液压机械控制器的计量部分功能。

29. 为什么说 FADEC 是全功能的?

在发动机控制方面, FADEC 的功能包括

- 输出参数 (推力或功率) 控制,
- 燃油 (启动、加速、减速、稳态) 流量控制,
- 压气机可调静子叶片 (VSV) 和可调放气活门 (VBV) 控制,
- 涡轮间隙自动控制 (ACC),
- 高压压气机、
- 涡轮冷却空气流量控制,
- 发动机滑油和燃油的温度管理,
- 发动机安全保护
- 以及启动和点火控制, 反推控制。
- 此外, 它还具有状态监视, 故障诊断, 存储故障数据, 数据通信显示功能,

故 FADEC 又称**全功能控制**。

30. FADEC 的特点?

- 提高发动机性能,
- 降低燃油消耗率,
- 减轻驾驶员的负担,
- 提高可靠性,

- 降低成本，
- 易于实施发动机和飞机控制一体化，
- 改善维修带来好处为发动机控制的进一步发展提供更广扩的潜力。

31. 在 FADEC 系统中，液压机械式装置的作用是什么？

在 FADEC 控制中，

- 液压机械装置已不再具有计算功能，控制计算全部由中央处理机进行，
 - 但燃油计量功能
 - 以及操纵可变几何形状作动器及活门的伺服油、动力油仍由它提供，
- 即液压机械装置成为 EEC 的执行机构。
- 液压机械装置 HMU，在有的机型上称燃油计量装置 FMU，保留除计算功能以外的原有功能，有的还有超转保护功能。
- FMU 上不再有慢车调整、部分功率调整、燃油比重调整。

32. 发动机用双路式喷嘴是如何工作的？

燃油喷嘴分为雾化型和汽化型（蒸发管）。

雾化型喷嘴已从单油路喷嘴发展到双油路喷嘴和空气雾化式喷嘴。

单油路喷嘴内有一个内腔，使燃油产生漩涡，还要一个固定面积的雾化孔，

这种喷嘴在较高的燃油流量，即在较高的燃油压力时，能够提供良好的雾化质量，

但在低的发动机转速和特别在高空要求的油压较低，这种喷嘴就很不合适。因为燃油流过喷嘴的流量与喷嘴前后的压力降的平方根成正比。

- 双油路喷嘴有中心孔和外圈孔，中心孔较小，处理较低的燃油流量，较大的外圈孔随燃油压力的增加供应较高的燃油流量。
- 这种类型的喷嘴采用**增压活门**将燃油分配到不同的油路，随燃油流量和燃油压力增加，增压活门移动，逐渐使燃油进入外圈油路和外圈孔，给出组合的两个油路供油。

33. 与单油路喷嘴相比双油路喷嘴有哪些优点？

与单油路相比，

- 在相同的最大燃油压力下，双油路喷嘴能够在较宽的流量范围内实现有效雾化。
- 而且在高空条件下如果要求低燃油流量时，也可获得有效的雾化。

它能在从慢车到起飞状态燃油流量变化很大的情况下，保证喷嘴的良好雾化。

34. 空气雾化喷嘴的优点有哪些？

空气雾化喷嘴使喷射的燃油携带一部分燃烧室的一股空气，它用空气的高速代替燃油的高速引起雾化，

- 空气雾化喷嘴使其他种类喷嘴产生的局部富油得以避免，因此减少了积炭和排气冒烟；
- 这种喷嘴燃油雾化要求的压力低，可以采用重量较轻的齿轮泵。
- 为防止发动机停车后喷嘴积碳，在燃油喷嘴中有**单向活门**。**高压切断活门**关闭后当燃油总管压力降低，单向活门关闭，确保没有燃油从总管中因重力进入燃烧室。

35. 燃油和滑油滤中的压差电门感受什么参数？它是如何工作的？

燃油和滑油滤中的压差电门 感受和测量油滤进出口**压差**；**指示油滤堵塞情况**。

其工作情况是：油滤前后压力分别作用在薄膜的每一边，当压差达到预定值时，作动微动电门，该电门与驾驶舱的警告灯相连，灯亮表示油滤堵塞。

36. 飞机上使用的燃油可以分为哪几种，现在主要用那一种

现行最常用的航空煤油，是以煤油为基础的 JET A-1，并根据国际标准规格生产。在美国，另有一种型号的 JET A-1 煤油，称为 JET A。常用的民用航空煤油是 JET B -----jet 解释为喷气发动机的专用煤油

二、启动和点火系统

什么是发动机的启动过程？启动过程分那三个阶段？

简述发动机启动过程？

什么是发动机的冷转和假启动（湿冷转）？各有什么作用？

使用空气涡轮起动机的燃气涡轮发动机是用什么方法关断起动空气活门以停止起动机工作的？

点火系统主要包括哪些部分？通常发动机上安装几个电嘴？如何使用？

燃气涡轮发动机点火系统的特点是什么？

点火装置的高值输出和低值输出各在什么情况下使用？

为什么燃气涡轮发动机需要安装高能点火系统？

燃气涡轮发动机点火系统的功用是什么？点火系统都在哪些情况下工作？

燃气涡轮发动机若在飞行中熄火，如何再点火？

电嘴有两种基本类型

点火及启动装置的维护事项（拆时、安装时）

安装电嘴时，如使用的拧紧力矩超过规定会造成什么危害？

当你从燃气涡轮发动机拆卸电嘴时，你必须怎样做以保证人身安全？

发动机启动常见故障有哪些？

什么是热启动？造成热启动的原因是什么？

什么是启动悬挂？造成启动悬挂的原因是什么？

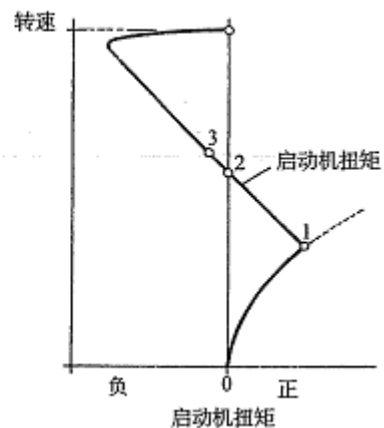
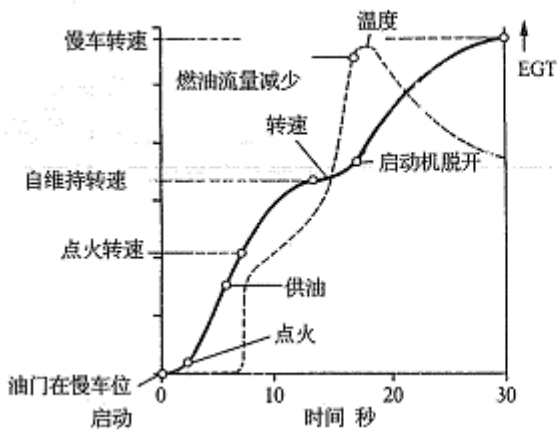
活塞发动机与涡轮发动机在点火上的区别

1. 什么是发动机的启动过程？启动过程分那三个阶段？

发动机启动过程是发动机从静止状态加速到 **慢车转速** 的过程，

根据带动发动机转子加速的驱动力的来源，可将加速过程分为三个阶段：

- 1、从起动机工作带燃烧室喷油点火，
- 2、从燃烧室点燃到起动机脱开，
- 3、仅有涡轮功自行加速到慢车转速。



2. 简述发动机启动过程？

1. 操作发动机启动电门，起动机工作，
2. 起动机带动发动机转子
3. 转动到一定转速，开始点火，
4. 当燃油压力建立足以产生喷雾时燃油喷射出来，点燃混合气体；
5. 涡轮输出功率，由起动机和涡轮共同带动发动机加速到自维持转速，
6. 当发动机功率开始驱动起动机时，起动机传动脱开；
7. 发动机自己加速到慢车转速。

（正常点燃是在到达点火转速时，燃油压力达到标准喷射出来时）

3. 什么是发动机的冷转和假启动（湿冷转）？各有什么作用？

冷转是不喷油，不点火，仅由起动机带动发动机转动，用于排除积油，积液，冷却发动机。例如，启动不成功，再次启动前进行冷转。

假启动（湿冷转）是只供油，不点火，由起动机带动发动机转子到一定的转速，用于检查燃油系统的工作。

4. 使用空气涡轮起动机的燃气涡轮发动机是用什么方法关断起动空气活门以停止起动机工作的？

用感受发动机转速的装置，如**离心电门**，或**电磁活门**断电的方法，关闭起动空气活门，以停止起动机的工作。

5. 点火系统主要包括哪些部分？通常发动机上安装几个电嘴？如何使用？

点火系统包括

- 点火激励器，
- 点火导线，
- 点火电嘴以及
- 相应的冷却系统。

➤ 点火电嘴有 2 个，安装在燃烧室通常位于四点和八点的位置。

➤ 必要时使用双电嘴点火，一般左点火电嘴和右点火电嘴交替使用，延长点火装置的寿命。

6. 燃气涡轮发动机点火系统的特点是什么？

1. 所以喷气发动机均采用高能点火，而且总是装备双套系统，
2. 点火系统是短时间工作的，当燃烧室点燃后，后续的燃油可由燃烧室的热量点燃
3. 每个高能点火装置接受的是来自飞机供电系统的电源，由启动点火系统电路控制，其中有一个是从飞机应急电源系统供电，
4. 在发动机地面启动和空中再启动时使用高值点火，在飞机起飞，着陆和穿过气流不稳定区域时使用低值连续点火，
5. 点火对发动机的性能无影响。

7. 点火装置的高值输出和低值输出各在什么情况下使用？

- 为保证发动机在地面启动和在高空获得良好的再点火性能，需要高值输出。
- 在某些条件下，象结冰或在大雨和雪中起飞及在颠簸中飞行时，点火系统连续工作是必要时的，以便一旦发生熄灭时进行自动再点燃。对于这种情况，采用低值输出有利于延长点火电嘴和点火装置的寿命。

8. 燃气涡轮发动机使用的复合式点火系统各在什么情况下输出低值和高值？

高值输出：

- ①地面起动和空中起动；
- ②**特殊情况**如探测到压气机喘振，则自动输出高值到两个电嘴。

低值输出：

- ①起飞、着陆以及恶劣天气，如大雨、大雪或在颠簸气流中飞行等；
- ②防冰电门在接通位时。

9. 为什么燃气涡轮发动机需要安装高能量点火系统？

因为工作条件差，特别在高空点火时，气体压力低，温度低，空气密度小，气流速度大，点火困难，需要高能量。所以需要高能量点火系统。

10. 燃气涡轮发动机点火系统的功用是什么？点火系统都在哪些情况下工作？

功用是产生电火花，点燃油气混合气。

- 在地面和空中再启动发动机时，点火系统工作提供高值电能输出到电嘴。
- 在起飞，着陆或恶劣天气如雨、雪或在不稳定的气流中飞行，以及防冰活门在接通位时，为避免燃烧室熄火，点火系统需要连续工作，提供低值电能输出，采用低值输出有利于延长点火电嘴和点火装置的寿命。

11. 燃气涡轮发动机若在飞行中熄火，如何再点火？

再点火的能力依据飞行高度和飞行速度的变化。调整再点火的状态到空中点火包线之内。

- 在包线限制内，流过发动机的空气流将转到压气机以满意再点火的转速工作，如果有燃油的话，这时仅使点火系统工作即可。
- 若不在包线限制内，发动机风车转速不够，仍需要起动机帮助，则起动程序与地面起动一样。

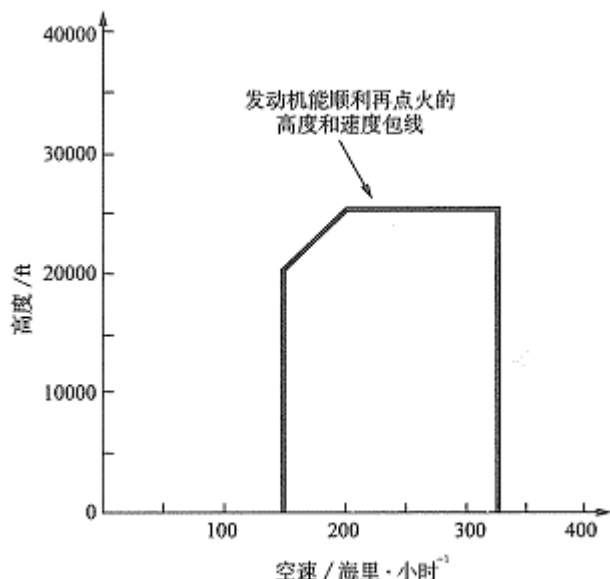


图 5-23 典型的空中再点火包线

12. 电嘴有两种基本类型

收缩或约束空气间隙式 以及 分路表面放电式

13. 点火及启动装置的维护事项

- 电嘴应经常检查是否牢固、损坏、漏气和高压导线连接可靠。
- 在燃烧室中**安装电嘴**必须非常严格地按照维护手册相关的程序进行，检查插入的深度是否正确，这对于安全工作和得到最大的使用寿命是重要的。
- **安装点火导线之前，应检查**
 - 弹簧作用的触点组件是否运动自由和
 - 指定的地方按照相应的维护手册实施绝缘电阻检查。
 - 屏蔽也应检查是否有擦伤和陶瓷绝缘衬套是否有裂纹或其他损伤。
- 当从燃气涡轮发动机上拆卸电嘴时，应首先关断点火开关，并等待一定时间后，使电容器放完电之后，再拆卸，以保证人身安全。
- 当**拆卸电嘴时，应检查**是否有热损坏、裂纹和雷管表面腐蚀。
- 拆下的电嘴应检查中央电极尺寸和壳体电极的烧蚀，并按手册规定决定是否更换。
- 通常电嘴是不清洗的，但是如果积碳使得不可能检查雷管时，可去除积碳，小心不要损坏雷管表面。
- 当必需安装新电嘴时，制造厂有时规定应检查电嘴伸入燃烧室的深度。这可借助类似于空塞子的专用工具实现并通过选择适当厚度的垫片放在电嘴壳体下面做调整。
- 当更换电嘴时必须装新的封严垫圈。正常情况下电嘴螺纹的润滑应按照制造厂的规定来执行，电嘴也应扭到接相关的维护手册中说明的扭矩值。
- 启动机和点火部件应贮存在清洁、干燥，温暖和无腐蚀油雾的条件下。

14. 安装电嘴时，如使用的拧紧力矩超过规定会造成什么危害？

安装电嘴使用力矩过大，将引起：

(1)绝缘体（或绝缘层）损坏;(2) 电嘴间隙改变;(3) 电嘴螺纹变形。

15. 当你从燃气涡轮发动机拆卸电嘴时，你必须怎样做以保证人身安全？

当从燃气涡轮发动机上拆卸电嘴时，应首先关断点火开关，并等待一定时间后，使电容器放完电之后，再拆卸，以保证人身安全。

16. 发动机启动常见故障有哪些？

启动超温、转速悬挂、振动过大、启动机不能自动脱开，发动机的参数摆动、喘振等。

17. 什么是热启动？造成热启动的原因是什么？

- 热启动是指在启动过程中 EGT 上升过快，即将超温或已超过红线限制，这时必须中止启动。

造成热启动的原因

- 是燃油/空气混合比不正确，
- 或者是由于燃油供给发动机太早或太大的速率，

- 或者是由于起动机功率不足，增大的转子摩擦或不正确的空气流量控制，发动机转子加速速率太慢而造成的

18. 什么是启动悬挂？造成启动悬挂的原因是什么？

- 启动过程中发动机的转速不能达到慢车转速，停在某一转速下不上升为启动悬挂。
- 启动悬挂通常刚好再启动机脱开后发生，
- 启动悬挂的原因有：
 - 启动机带转没有到达自加速转速即脱开，
 - 启动机扭矩不足和
 - 贫油的燃油供给，
 - 压气机性能衰减，
 - 气源压力不足，
 - 场温太高和场压过低。
- 如果转速悬挂而 EGT 还高，称**热悬挂**。

19. 活塞发动机与涡轮发动机在点火上的区别

活塞式有：点燃式和压燃式

涡轮：点燃

三、空气系统

发动机空气系统包括哪些？发动机内部空气的作用？

发动机冷却分系统包括？

飞机上的气源有哪几种？有哪些作用？

压气机喘震如何控制？（防止喘振的方法？）

简述发动机防喘活门如何工作？及当大气温度变化时，活门打开或关闭的发动机转速如何变化？

防喘活门怎么控制？

可调放气活门工作原理？

简述可调静子叶片（VSV）工作原理

发动机的防冰

涡扇发动机防冰部位和通常采用的防冰方法？

简述涡轮间隙控制方法？

1. 发动机空气系统包括哪些？发动机内部空气的作用？

发动机空气系统分为：

- 压气机控制分系统、
- 间隙控制分系统、
- 发动机冷却分系统（内部空气系统和外部空气系统），

功能：

- 1) 飞机提供引气，用于飞机空调、增压、启动发动机、机翼防冰、探头加温等
- 2) 压气机防喘，控制涡轮叶片的叶尖间隙，发动机防冰。
- 3) 发动机内部部件和附件装置的冷却，轴承腔封严，控制轴承的轴线载荷，推力平衡

2. 发动机冷却分系统：

- **内部空气系统**覆盖除了通过气路的主气流外的所有发动机内部气流，任务是
 - 内部封严，
 - 压力平衡和
 - 内部冷却。
- **外部空气系统**则用于冷却通风整流罩和发动机机匣的外部区域（主要是核心舱，风扇仓。核心舱通常由风扇空气冷却和通风；风扇舱由外部冲压空气冷却和通风。）

3. 内部空气系统的作用有：

- 发动机内部部件和附件装置的冷却，
- 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，
- 发动机防冰等

4. 飞机上的气源有哪几种？有哪些作用？

主要三种：发动机压气机引气、APU 引气、地面气源引气。

增压空气主要用于：座舱的空调与增压，机翼前缘及发动机进气道前缘的热气防冰，发动机启动气源、饮用水、燃油及液压油箱等系统的增压以及飞机的气动液压泵（ADP）、前缘襟翼气动马达和大型飞机的货舱加热。

5. 压气机喘震如何控制？（防止喘振的方法？）

发动机喘振主要发生在启动、加速、减速、反推阶段，

- 对于双转子的轴流式压气机来说，加速时高压转子容易进入喘振区，减速时低压转子容易进入喘振区，因为高压转子比低压转子轻，状态变化时，相应比低压转子快。
- 为了更好预防喘振，采用了 **放气活门控制装置** 和 **可调静子叶片** 和 **多转子**，
即 **通过**在非设计状态下，改变速度三角形的绝对速度的轴向分量、绝对速度的切向分量和圆周速度，从而使气流相对速度对转子的攻角同设计状态相近，避免喘振。

6. 简述发动机防喘活门如何工作？及当大气温度变化时，活门打开或关闭的发动机转速如何变化？

- 放气活门打开放掉一部分压气机中间级，或低压压气机后高压压气机前的空气。
- 这一般在**低功率**和**迅速减速**时，
 - 一旦脱离喘振区，放气活门关闭。
 - 关闭过早发动机没有脱离喘振范围，仍可能喘振；
 - 关闭过晚，放掉空气，造成浪费。
- 关闭转速还受**大气温度变化**，**大气温度高**，关闭转速应增大。

7. 防喘活门怎么控制？

- ECU 通过接受
 - 转子转速、
 - 飞机高度和
 - 反推信息

计算何时打开和关闭放气活门。

- 当接受到喘振信号时，ECU 通电各自的**电磁活门**，放掉部分空气，防止发动机喘振。当发动机达到安全转速，ECU 使电磁线圈断电，放气活门关闭。

8. 可调放气活门工作原理？

VBV 活门的开度是可变的，根据发动机状态参数计算决定开关和开度大小。

如在 MEC 上依据

- N2 和高压压气机进口温度来计算活门位置，根据反推位置修正。

如在 ECU 上，

- 根据 N2/N1，推力杆角度，VSV 位置进行计算活门位置。然后，
- 燃油压力通到作动器或齿轮马达带动 VBV 主门，主门经同步轴带动其他活门一起开关，将低压压气机后高压压气机前的部分空气放入外涵道。
- VBV 的位置可通过反馈钢索或传感器传回控制器，并与要求位置做比较进行修正。

（VBV、VSV 都有控制部分，作动部分和反馈部分）

9. 简述可调静子叶片（VSV）工作原理。

- VSV 是将 高压压气机的进口导向叶片和前几级静子叶片做成可调的；
- 压气机控制参数包括转速和温度。
- 当压气机转速从其设计值往下降低时，**静子叶片角度逐渐关小**，以使空气流到后面的转子叶片上的角度合适。当压气机**转速增加时**，**静子叶片角度逐渐开大**。
- VSV 的工作状态由 FADEC 或液压机械式燃油控制器控制。FADEC 或液压机械式燃油控制器控制伺服操作 VSV

作动器的移动，再通过摇臂组件、主杆、连杆等传到作动环，**作动环**使连到它上面的所有叶片同时转角。

➤ 叶片实际位置通过反馈钢索传回控制器与要求位置比较。

10 发动机的防冰：

结冰区：发动机进气道前缘处 和 整流锥、压气机的进气导向器 处会结冰。

防止结冰是必要的，因为在这些地方结冰会

- 大大限制通过发动机的空气流量，从而引起发动机性能损失并可能会使发动机发生故障。此外，
- 脱落下来的冰块被吸入发动机或撞击进气道吸音材料衬层时可能造成损坏。

11. 涡扇发动机防冰部位和通常采用的防冰方法？

防冰部位：整流罩、进气导向叶片和整流锥。

防冰方法：从发动机高压压气机引出热空气进行加温。

12. 简述涡轮间隙控制方法？

- 控制涡轮间隙的目的是保证叶尖与机匣之间的间隙，减小漏气损失，提高发动机性能。
- 过去主要是采取膨胀量合适的材料，不做调节的气流冷却涡轮机匣来使状态变化时能够保持间隙，属于被动控制，
- 新型发动机都实施主动控制方法，是根据发动机的工作状态通过引气控制涡轮机匣的膨胀量与叶片不同温度下的伸长量相一致。

四、操作系统 和 排气系统

涡轮发动机机械操纵系统分为几个部分？其主要部件是什么？

推力杆和反推杆如何工作 ？

何时使用反推力装置？反推力装置使用不当会造成什么问题？

当使用反推时，推力杆和反推杆应什么位置？

反推故障灯亮，如何进行排故？以及放行的条件？

涡喷发动机上的噪音抑制器的工作原理？涡扇发动机上为什么很少使用噪音抑制器？

燃气涡轮发动机中，在进气整流罩和风扇机匣内表面安装吸音材料降低噪声的原理是什么？

简述高涵道比涡扇发动机反推力的类型和特点？是如何实现的？（书上 135-139）

涡扇发动机反推系统组成？如何工作？

1. 涡轮发动机机械操纵系统分为几个部分？其主要部件是什么？

分为

- 启动操纵系统、
- 前向推力系统和
- 反推力操纵系统。

主要部件有：油门杆、反推杆、启动手柄、鼓轮、传动钢索、钢索保险、推力控制鼓轮、启动控制鼓轮、推拉钢索到燃油控制器等。

2. 推力杆和反推杆如何工作 ？

- 推力杆和反推杆是铰接在一起的，一个锁定机构防止前向推力杆和反推杆同时作动。每个杆能够运动的能力取决于另一个杆的位置。
- 如果前向推力杆在慢车位，反推杆离开 OFF 位，推力杆不能向前推，增加正推力；
- 如果反推杆在 OFF 位，前向推力杆离开慢车位，那么，反推杆提不起来。
- 此外，使用反推时，反推装置必须展开到位，才能进行拉反推杆增大反推力。
- 它们的运动由操纵系统传到燃油控制器，控制器的设计使得功率杆在慢车域的任一方向运动，供油量都会增加。

3. 何时使用反推力装置？反推力装置使用不当会造成什么问题？

- 发动机着陆，将油门收到慢车位再拉起反推手柄，打开反推力装置，产生反推力。
- 当飞机滑跑速度降低到接近 80 海里 / 小时，关闭反推力装置，不再产生反推力。
- 反推力装置使用不当会造成发动机超温；
- 当飞机滑跑速度很低时，反推力装置仍在工作，则会造成排出的燃气重新被吸入，从而会造成压气机喘振。

4. 当使用反推时，推力杆和反推杆应什么位置？

- 推力杆在慢车位；
- 拉反推杆离开 OFF 位给出信号，解锁，展开反推装置；
- 当反推装置完全展开后，伸出锁定；
- 继续拉反推杆，反推力增大。
- 使用完反推后，反推杆再次推回到 OFF 位，反推装置收起。

反推的作用：反推装置用于飞机触地后，减低飞机滑跑速度，缩短滑跑距离。

5. 涡喷发动机上的噪音抑制器的工作原理？涡扇发动机上为什么很少使用噪音抑制器？

涡喷发动机噪声来源于风扇、压气机、涡轮、排气流或喷口，随相对气流的加大，所以的噪声在不同程度上都有所增加，但是喷气流增加的更大， 涡喷发动机和低涵道发动机的主要噪声来源是尾喷气流，可采用一**迅速或较短的混合区**予以降低，在推进喷管上采用有波纹形或瓣形和多管形的消声器，以增大空气与排气流的接触面积。这样做改变了噪声的模型，**从低频变为高频**，高频易于空气吸收，有些高频是人耳听不到的。

涡扇发动机固有特点是它比任何其他类型的燃气涡轮发动机具有更低的排气速度，因而是一种噪声低的发动机。其噪声主要来源是风扇和涡轮，采用消音垫材料将声能转变成热能，是一种非常有效的抑制噪声技术。在发动机的设计上，除进气道、喷管等部位装有**消音垫**外，

- 选择合理的转子和静子叶片数目的比值，
- 加大每级转子和静子的间距，也有利于减低噪声。

燃气涡轮发动机中，在进气整流罩和风扇机匣内表面安装吸音材料降低噪声的原理是什么？

原理：将声能转变为热。

- 吸声衬垫由**蜂窝底板支撑的多孔面板**组成；
- 面板的声学特性和衬垫的厚度与噪声特性相匹配，有效地抑制噪声。

6. 简述高涵道比涡扇发动机反推力的类型和特点？是如何实现的？（书上 135-139）

控制反推装置有两种动力源。

在涡轮喷气发动机上实现反推力的方法有若干种，见图 6-27，如哈壳形折流门将排气流反向就是其中的一种。在有低涵道比的老式喷气发动机上，采用过哈壳门型反推装置，通常由高压压气机的引气气动操作。铲斗门型反推装置也在老式低涵道比喷气发动机上用过，通常由飞机液压系统操作。高涵道比涡扇发动机是用阻流门将风扇气流反向，也称风扇反推器。驾驶舱的反推杆用于选择反推力。反推工作状态由驾驶舱的指示灯显示。选择反推力时，液压作动器使反推整流罩的移动套筒后移，带起阻流门，露出格栅段，风扇气流向后流的通路被堵住，而转向从格栅流出，产生反推力，此外还有驱动马达气动操作的反推，原理

气动型：

1. 部件包括引气供应管、控制活门（压力调节和切断活门）、一或两个气动驱动装置（空气马达和方向控制活门）、软驱动轴、齿轮箱、球螺旋作动器。
2. 引起来自高压压气机靠后级，控制活门打开，引起进入气动驱动装置空气马达，方向控制活门控制空气马达的作动方向，空气马达旋转经软驱动轴和齿轮箱操作球螺旋作动器，移动反推。
3. 整流罩移动速度开始快，接近终点时减慢最后停下来，空气马达的转速由反馈机构控制，它安装在整流罩上。
4. 气动操作的反推器由气动驱动装置的制动锁住，一种是方向控制活门的反馈机构操作的，另一种是分开的气动制动作动器实施的。
5. 反推不工作方法：
 - 第一种是人工关闭并锁住压力调节和切断活门，
 - 第二种是中断到压力调节和切断活门或方向控制活门的电源，
 - 第三种也是最有效的方法是机械地固定可动的反推部件到固定的反推整流罩上。

液压型：

1. 部件包括反推控制器活门组件、展开和收藏反推装置的液压作动器、同步软轴。

2. 推拉反推杆，作动电门给液压控制活门组件的准备/伸展/收藏电磁线圈通/断点，作动伸展/收藏液压到反推液压作动器来移动反推装置。
3. 液压作动的反推装置的锁定：一种是单个的液压操作的锁销，另一种是反推作动器的一体锁，有些机型组合使用。
4. 反推不工作方法：

- 第一种是机械的锁住可动的反推部件，
- 第二种是断开到反推作动器的液压供应。

工作：高涵道比涡扇发动机由于大部分推力是由风扇产生的，其反推是将通过风扇的气流反向而实现的。反推整流罩上可移动套筒一般由液压作动器或空气马达带动球螺旋作动器推动向后，露出格栅段，带起阻流门进入阻流位置，堵住风扇气流向后的通道，迫使风扇气流转向，通过格栅排出，或者利用枢轴门排出，产生反推力。

7. 反推故障灯亮，如何进行排故？以及放行的条件？

根据手册进行排故，不能及时排除时，按故障隔离手册要求，对反推锁定，贴不可用标签，告知机组成员。查故障隔离手册，按要求锁定故障反推，告知机组成员，保留此故障。代航后或 A 检或 C 检时，排出故障。

8. 涡扇发动机反推系统组成？如何工作？

反推系统由控制系统、作动系统和气流转向系统组成，还包括有电门和传感器指示反推的工作。控制系统用于作动反推装置和增加反推力，主要部件是反推杆，在地面操作反推杆时，控制系统作动反推控制电门，发出作动反推装置信号，作动系统按照该信号，通过液压或气动部件移动气流转向机构。气流转向系统引导气流到产生安全反推力的最佳方向上。

3. 反推系统

典型的反推系统有 3 个分系统：控制系统、作动系统和气流转向系统。控制系统用于作动反推装置和增加反推力。作动系统有气动或液压的部件，按控制系统信号移动气流转向机构。气流转向系统引导气流到产生安全反推力的最佳方向上。

控制系统的主要部件是驾驶舱的反推杆。拉反推杆作动反推控制电门，用于开始反推操作和控制反推装置运动的方向。反推控制系统由空地信号逻辑保护，在飞行中不能展开反推。但在 B737 飞机，还用无线电高度表信号作为替代，其优点是当飞机接地前飞行高度低于 10 ft（英尺）时，反推能够展开。反推互锁确保反推装置仅在展开后反推力能够增加。

作动系统通过液压作动大的阻流门，象在枢轴型反推装置，阻流门有单独的液压作动器；在有移动套筒和格栅叶片的反推装置，液压作动器更复杂，因为它们必须同步工作。液压的反推作动系统通常有控制活门组件，接受控制系统来的信号供应液压油到作动器，展开或收藏反推装置。气压反推作动系统仅仅用在有移动套筒的格栅型反推装置。它们通常是供应发动机引气到空气马达，空气马达经驱动轴和齿轮箱用球螺旋作动器操作移动套筒。

所有反推装置必须有锁机构确保反推在安全收藏位不能随意移动。液压系统在作动器上有锁组件或分开的锁闭机构。当反推收藏时，锁闭机构的钩子固牢阻流门在收藏位。气动反推系统通常在空气马达有制动作为锁定组件。

气流转向系统部件在反推整流罩中，有固定部分和可动部分。阻流门连在固定的整流罩和移动套筒之间。当反推收藏时它们同风扇排气通道齐平。阻流门随移动套筒的运动而进入阻流位置。格栅叶片用螺栓连接到反推整流罩的固定部分。每段格栅引导气流的方向是不同的，更换格栅或反推整流罩时要记住，对于每个发动机位置，确保有正确的格栅布局。

反推系统有电门和位置传感器指示反推装置的工作。反推开锁信息说明反推不在收藏位，信息是琥珀色的，当反推移动到展开位或收藏位时可以看到信息。有的飞机由绿色反推灯指示反推完全展开和油门互锁释放，发动机能够增大反推力。

五 指示系统

推力和功率、转速、温度、压力、流量测量、振动测量的方法及原理？

附加知识点：

1. 发动机的参数指示

发动机的参数需要测量，用于控制计算和状态监视。仪表读数用来告之驾驶员有关各个发动机系统的功能是否正确，以及报警任何可能发生的故障。驾驶员仪表板上的许多盘式和指针式仪表可以由一个或几个阴极射线管来取代，用来显示发动机的各种参数。这些小型视屏能够显示使发动机安全工作所必须的所有信息。

发动机仪表指示系统已发生许多重大的变化，直读仪表已由远距指示的电的仪表取代，机械系统仪表正由数字电子系统取代。测量部分或传感器在发动机舱，显示仪表或指示器在驾驶舱。模拟式仪表是以指针和表盘形式给出发动机参数的模拟值来表示连续变化的量；数字式仪表是由传感器感受信息转换成一序列电信号输给计算机，处理后送给指示器，由液晶或发光二极管显示数字，即以离散的数字，而不是以指针的位置来表示。

驾驶舱指示仪表的最新发展是：电子指示系统将发动机的参数指示、系统工作的监视、以及向驾驶员告警的功能组合在仪表板安装的阴极射线管上，以刻度盘、指针、数字、文字显示，各种颜色的标志使机组清楚当前状况。如波音公司的 EICAS 系统，空中客车公司的 ECAM 系统，设置多种页面，方便进行查看。

装有 FADEC 系统的发动机，传感器首先将数据传送到 FADEC 系统计算机，计算机然后送数据到指示器或显示系统，同时控制发动机。

2. 指示分类

发动机参数指示有性能指示，也称主要指示；有系统指示，称为次要指示。还有第 3 组指示是用于发动机状态的趋势监控，通常不在驾驶舱示出。性能指示用于监视发动机性能和限制。系统指示用于监视发动机各系统的工作，便于迅速检测故障。发动机趋势监控在地面进行，分析探测发动机的问题，它使用由飞机状态监视系统（ACMS）自动记录的发动机参数。

例如，性能指示参数有 EPR、EGT、 n_1 、 n_2 、燃油流量等。滑油系统指示参数有滑油量、滑油压力和温度。振动指示示出在发动机旋转部件发生的任何不平衡。当有热空气泄漏在发动机舱时，机舱温度指示就会有增加。

推力和测量：

3. 推力和功率

发动机的推力总是在指示系统最上端显示。发动机的推力在试车台上由推力计精确测量。发动机装在飞机上推力需要由其他参数表征。对于轴流式压气机，发动机压力比（EPR）即低压涡轮出口总压与压气机进口总压之比代表发动机推力。对于高涵道比涡扇发动机，风扇转速（ n_1 ）亦能很好表征发动机的推力。排气压力也可以推算发动机的推力或功率。

发动机压力比表既可以由电机械式，也可由电子式传感器来指示。传感器输入压气机进口、风扇出口或低压涡轮出口的压力。电机械式系统采用传感器膜盒、线性可变差动变压器等，转换压力信号成电信号，放大后作用在伺服马达的控制绕组上。电子式通过两个压力传感器，依据振动的频率，计算出发动机压力比的电信号，输入发动机压力比表和电子式发动机控制系统。新型发动机 EPR 计算在 FADEC 计算机进行，使用电子式压力传感器，它比电机械式传感器更可靠和精确。

转速测量：

目前燃气涡轮发动机常用的转速传感器有哪两种类型？

(1) 转速表发电机。(2) 变磁阻式转速传感器。

可由发动机驱动的一个小型发电机经电路传给指示器。转速发电机供应三相交流电，其频率取决于发动机被测转子转速。发电机的输出频率控制指示器中同步马达的转速，进而转动指示器的指针。转速指示器一般示出最大转速的百分数。新型飞机转速表发电机送三相交流电信号到 FADEC 计算得到转速信号，同时它也是 EEC 的电源，又称专用交流发电机。

变磁阻式转速测量。转速测量也可采用可变磁阻式转速探头，它与一个音轮相对，产生感应电流，经放大后送入指示器或测量感应脉冲的频率，显示转子转速。转速探头位于机匣的固定器中，与被测轴上的音轮对齐，转子每转一圈音轮外缘上的齿通过探头一次，改变探头中线圈磁通量而诱导出一股电流或发出脉冲，与发动机转速直接相关。脉冲频率与转速成正比（见图 6-13）。风扇叶片可用来代替音轮改变传感器磁场，也可用附件齿轮箱的齿轮起音轮的作用，无论何种情况都是从传感器脉冲计算转速。

温度测量：（包括 EGT、滑油和燃油的温度）

涡轮燃气温度有时用排气温度（EGT）指示，它是发动机工作中的关键参数。理想情况是测量涡轮进口温度，但是因为这里温度高，温度场不均匀，测量困难。由于涡轮中温度降是按已知的方式变化的，所以测量并限制排气温度不超限，目的是保证涡轮前温度不超出允许值。当然，也可以测量并限制涡轮中间级温度。不少机型 EGT 是从低压涡轮中间级测量的，也叫排气温度。排气温度与允许极限值之差值称为 EGT 裕度，它是代表发动机性能衰退的参数。

在热电偶安装中不能随意剪短导线，以免影响测量精度。

1. 涡轮发动机中，哪一个温度是最关键的温度？燃气温度一般在什么部位测量？

涡轮前的温度是最关键的温度。燃气温度一般在涡轮出口处测量。

2. 详述如何测量发动机燃气排气温度？

- 排气温度测量普遍使用热电偶，它可以侧量较高的温度。
- 为测量平均温度，常常多个热电偶并联连接，探头深入气流的长度不同。
- 热电偶原理是两种不同金属端点相连，位于排气流中的是热端或测量端，指示器端的是冷端或基准端。电路中产生的热电势和两端温度差成正比。为使冷端补到摄氏零度，在电路内装有自动温度补偿器。
- 热电势的大小还取决于回路中的电阻，该电阻在热电偶出厂时已经调好。
- 不少机型 EGT 是从低压涡轮中间级测量的，也叫排气温度。
- 排气温度与允许极限值之差值称为 EGT 裕度。它代表发动机性能衰弱的参数。

3. 两种温度传感器：

1、低温一般用电阻式温度传感器，工作原理是：金属材料的电阻随温度而变化（纯金属的电阻值随着温度的增加而增加）。温度的变化导致金属电阻值的变化，进而相应的改变指示器的电流。指示器的指针按温度的变化偏转。这就是电阻式测温元件的测温原理。（滑油和燃油的测量方法）

2、高温一般用热电偶温度传感器，工作原理是：两种不同金属丝，一端相连是热端，指示器的是冷端，当两端有温差时，在电路中产生电动势，电动势与温差成正比。（EGT 测量的方法就是使用热电偶，看上题）

4. 在安装或修整热电偶中，为什么不能剪短热电偶导线？（结合热电偶的原理回答）

因为在热电偶安装中导线电阻值是关键，剪短导线改变了电阻值，影响测量精度。

5. 温度的非电测量是依据什么原理进行的？举例说明。

当吸收或放出热量时，通过测量物体发生的物理变化。如：

- 充填式：利用充填易挥发液体受热后蒸汽压力的变化反映温度。
- 双金属式：利用两种不同金属受热后线膨胀系数不同而产生的变形。

充填式测量温度方法是测量元件中装有易挥发的液体或蒸汽或气体，放在被测介质中，测量由于温度变化引起的位移或压力变化，反映温度的高低。这就是充填式。例如，CFM56-3 发动机的风扇进口和高压压气机进口空气温度测量使用充填氮气的传感器，气流温度变化引起压力改变，用压力差反映温度的高低。

双金属式温度测量元件常用做温度补偿元件，利用两种金属线膨胀系数的不同，受热后变形，补偿温度变化带来的影响。例如，装在液压机械式燃油控制器里压力调节活门弹簧下面的双金属片，用于补偿油温变化对弹簧力带来的影响。

压力测量：

测量从真空或零压力计起的压力是绝对压力；从现存的大气压力开始计量，即实际加到流体的压力值是表压力。传感器可以是直接压力式，也可以是压差式。例如燃油滤和滑油滤装有压差电门，感受和测量油滤前、后压差，指示油滤堵塞情况。油滤前、后压力分别作用在薄膜的每一边，当压差达到预定值时，作动微动电门，该电门与驾驶舱的警告灯相连，灯

广泛采用的压力机械测量方法是波登管式压力表。波登管是薄壁、扁平、椭圆的青铜管，弯成半圆形。被测压力流体从一端进入波登管，当管内流体压力增加时，试图改变横截面的形状，椭圆变圆，半圆试图伸直，连到管另一端的指针移动，指示波登管内压力。波登管压力表需要定期校准（见图 6-16）。

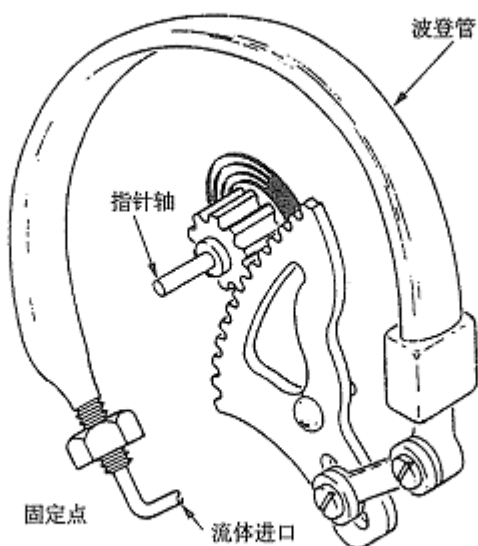


图 6-16 弹簧管（波登管）压力表

压力电测方法使用晶体振荡器，它应用某些晶体（石英晶体、压电陶瓷），受力后表面产生电荷的压电效应，测量频率反映压力高低。

波登管？

波登管是薄壁，扁平，椭圆形的青铜管，弯成半圆形。工作原理是：被测流体从一端进入波登管，当管内流体压力增加时，波登管的椭圆截面试图变圆，半圆试图伸直，带动连到另一端的指针转动，指示出流体的压力。需要定期校准。

流量测量：

简述质量流量传感器的工作原理？

一种流量传感器中，叶轮由三相交流马达恒速转动，燃油通过叶轮，叶轮对燃油施加一个旋转运动。从叶轮出来的旋转燃油再通过传感器涡轮，并试图转动涡轮。但涡轮有校准弹簧的限制，它只能偏转一个角度。**涡轮偏转量取决于燃油的质量流量。**永久磁铁装在传感器的一端，涡轮的偏转带动永久磁铁的偏转，改变线圈中磁场，在指示器中有与传感器对应的线圈，两个线圈之间点连接，指示器中线圈磁场的改变，是其中的永久磁铁也偏转，同传感器的永久磁铁的偏转是同步的，然后通过指示器的指针显示流量大小。

另一种新型燃油流量传感器，包括涡旋发生器、转子、涡轮、壳体等。燃油经整流器到涡旋发生器，涡旋发生器旋转，从涡旋发生器出来的燃油到转子，使转子旋转，从转子出来的燃油再到涡轮，试图使涡轮旋转。涡轮的转动受到弹簧力约束，只能偏转一个角度，偏转角的大小取决作用于涡轮叶片的动量。自由转动的转子前

部和后部各有一个磁铁，前部磁铁的外面壳体有一个小线圈，称起始线圈，当前部磁铁对向起始线圈时，产生起始脉冲。在涡轮外部壳体上有一个大线圈，称停止线圈，连在涡轮的信号叶片和涡轮一起转动，当对上后部磁铁时产生停止脉冲。如果没有燃油流动转子旋转，起始脉冲和停止脉冲同时发生。当有燃油流过时，涡轮上的信号叶片沿旋转通道偏转，停止脉冲晚于起始脉冲，起始脉冲和停止脉冲的时间间隔大小和燃油的质量流量多少成正比。

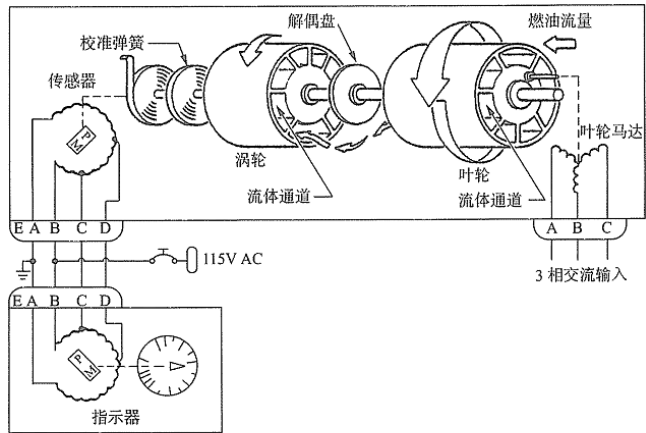


图 6-17 燃油质量流量测量

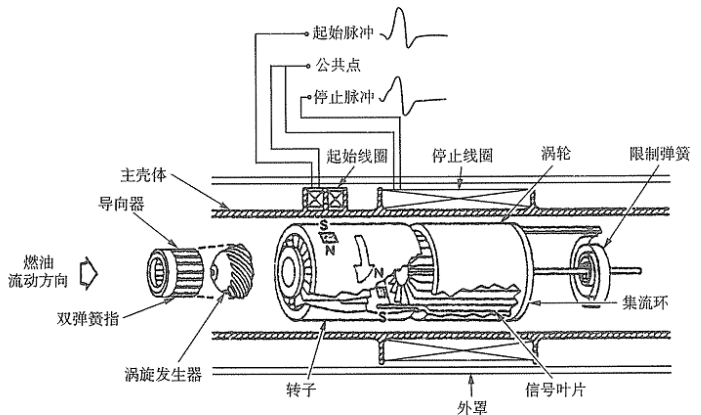


图 6-18 燃油流量传感器

燃油流量指示不仅告诉驾驶员到发动机喷嘴的实际燃油流量，还可以知道用过的燃油总量。正常显示每台发动机的燃油流量，驾驶舱上燃油流量指示控制电门可以选择显示用过的燃油量，也可选择复位使用过的燃油量记数回零，再开始累计。FADEC 系统计算机可以完成计算工作。

振动测量：

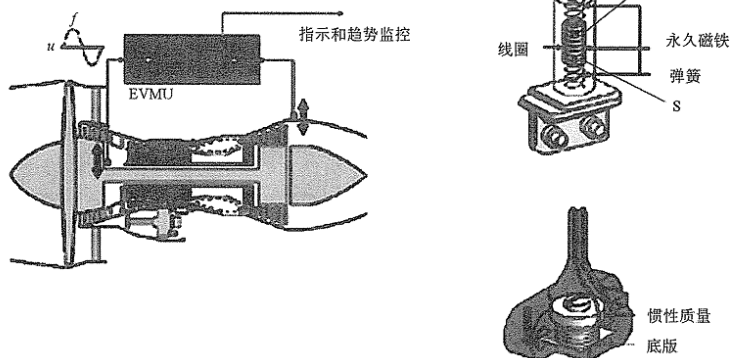
更换发动机叶片后振动值大，如何处理？

再次配平，在风扇叶片根部使用配平螺钉，波音 737-300 是根据数据人工计算，800 是依据机载震动监视器 AVM 给出的结果配平

说明发动机振动指示器的工作原理。

- 振动传感器位于压气机端和涡轮端，
- 发动机的振动传感器是加速度计量，测量发动机的径向加速度。
- 常用的两种加速度计类型是**电磁式**和**压电晶体式**。振动传感器将发动机的机械振动转换为交流电压信号，传送到发动机振动监控组件 EVMU 或机载振动监控器 AVM，振动信号经过过滤调制分析，依据转速信号计算出振动的最高值，然后送到指示器或 EICAS/ECAM 指示振动趋势。

发动机振动传感器是加速度计，测量发动机的径向加速度。发动机上采用两种不同类型的加速度计，一种是电磁式，一种是压电晶体式。电磁式传感器上永久磁铁被两个弹簧保持在中心，固定线圈围绕在磁铁上。当存在振动时，线圈同传感器壳体一起上下移动，磁铁由于惯性力几乎总是静止的，线圈和磁场之间的不同运动在线圈中导致交流电压，如同发电机一样。压电晶体式当对晶体有作用力时产生电压。传感器感受加速时，作用压电晶体到底板的惯性质量在传感器上产生力。振动传感器给出信号到监视组件，其电压与加速值成比例，频率等于振动频率。监视组件滤波和分析加速度计这些信号用于指示和趋势监控。见



仪表颜色：一般绿色弧段表示正常范围；黄色弧段表示警戒范围；红色径向线表示不能超越的最大或最小允许值。

仪表的颜色标记可以使驾驶员知道仪表指示值是安全的还是危险的。一般绿色弧段表示正常范围；黄色弧段表示警戒范围；红色径向线表示不能超越的最大或最小允许值。例如某机型，EGT 表上红线是 EGT 允许的最大值；琥珀色示出对于最大连续推力的 EGT 值，它仅允许在发动机起飞或复飞时短时间超过琥珀色线。新型驾驶舱公共显示系统的显示组件上，白色指针表示参数的变化；灰色阴影区域表示进程；琥珀色表示警戒区域；红色是超限警告；绿色代表目标值。如果 EGT 高于最大连续限制值，但低于 EGT 红线值，指针、读数、阴影区域变成琥珀色。如果 EGT 超出红线值，指针、读数、阴影区域变成红色。

六 滑油系统

发动机滑油的功用、种类、性能和选择？

1 发动机滑油系统的功用？

- 滑油系统是向轴承和附件齿轮箱
 - 提供循环的滑油，
 - 减少各摩擦面的摩擦降低磨损，
 - 降低摩擦面的温度，使发动机机件得到冷却，
 - 将磨损的金属屑、灰尘、碳粒子等水分杂质一起带走，并且清洁各摩擦面。
 - 滑油油膜覆盖金属表面，阻止氧接触金属，起防腐作用。
- 滑油还在金属零件之间形成缓冲层，起到隔振、封严、密封作用。
- 滑油还是螺旋桨调速器、测扭泵的工作介质。

滑油如何防止飞机发动机里面的腐蚀？

滑油油膜复盖金属零件表面，阻止氧接触金属而造成的氧化和腐蚀。

2 涡轮发动机滑油特点

燃气涡轮发动机使用**合成滑油**，即从动物、植物、矿物基滑油提炼人工合成的。

优点是**不易沉淀**而且高温下**不易蒸发**，有较好的热稳定性、粘度、压力阻值高。

缺点是不管溅到什么地方，都可能产生**气泡和掉漆**；合成滑油有添加剂，易被皮肤吸收，有高毒性，应避免长时间暴露和接触皮肤。

3 表示滑油性能的指标主要有哪些？

- 黏度；
- 黏度指数；
- 流动点；
- 闪点；
- 燃点；
- 抗氧化性；
- 热稳定性；
- 滑油的压力阻力能力；
- 滑油中各种金属及硅含量、
- 酸值等。

什么是滑油的黏度指数？黏度指数高指的是什么？

- 滑油黏度指数是指黏度随温度改变的测量。
- 在温度变化范围内，滑油黏度指数高说明滑油黏度随温度的变化小。

4 如何选择发动机的滑油？

- 选择黏度适当的滑油，既承载能力强又有良好的流动性；
- 选择高闪点的滑油，闪点低、燃点低的滑油易于挥发，引起滑油消耗量高，容易引起火灾；
- 滑油应有较高的抗泡沫性、抗氧化性，
- 低的碳沉积，
- 黏度指数高。

滑油流动的阻力由滑油黏度表示。滑油流动慢，说明黏度高。黏度随温度变化，在冬天，一些牌号的滑油几乎变成固体。温度低，滑油黏度大，流动性变差，造成润滑、冷却、散热效果不良，启动困难。温度高，滑油变稀，黏度小，不能形成一定厚度的油膜或者油膜可能被破坏，使润滑、冷却、散热效果不良。

滑油黏度是由赛波特通用黏度计测量。根据 60cm^3 (mL) 的滑油在指定的温度下流过校准孔的时间多少来划分黏度等级。

滑油能够流动的最低温度，称为流动点，2 型滑油流动点 -57°C 。滑油面上出现闪燃蒸气的温度称为闪点，2 型滑油闪点高于 250°C 。滑油面上有足够可燃蒸气的温度称为燃点。

滑油黏度指数是指黏度随温度改变的测量，在温度变化范围内，黏度变化小的滑油其黏度指数高。此外，表示滑油理化性能的还有滑油中各种金属及硅含量、酸值等。

滑油的压力阻力能力对于运动部件之间滑油油膜是一个重要因素。例如，发动机轴承上的滑油膜抵抗轴承载荷和防止运动部件之间接触。如果载荷比滑油的压力阻力高，金属轴承的表面接触，产生严重的材料磨损。

抗氧化性。氧化是滑油和氧气之间的反应，增加滑油黏度。当滑油温度增加高于一定值时，滑油开始同氧反应。因此抗氧化性是滑油的重要特性。2 型滑油的抗氧化滑油温度直到 220°C 。

热稳定性指滑油在高温下抵抗化合物分解的能力。在高温下滑油分子分裂成化学成分，滑油的润滑能力改变。2 型滑油抗化学分解的温度直到 340°C 。

我们要选择黏度适当的滑油，既承载能力强又有良好的流动性。选择高闪点的滑油。闪点、燃点低的滑油易于挥发，引起滑油消耗量高，容易引起火灾。滑油应有较高的抗泡沫性、抗氧化性、碳沉积低、黏度指数高。

系统部件及工作原理

大多数涡轮增压发动机是：再循环式润滑系统。再循环式 按循环性质分为：调压活门式 和 全流式。

全耗式润滑系统：滑油润滑后便溢出发动机。

1. 调压式活门的原理（调压活门式润滑系统）

- 在该系统中将供油路中的滑油压力限制到给定的设计值，来控制向轴承腔供应的滑油流量。滑油压力由调压活门控制。当超过设计值时，它允许滑油从增压泵出口回油。在所有发动机正常工作转速下，它都提供恒定的供油压力。
- **优点：**调压活门式的恒压系统保持相对低的滑油压力，功率减小后没有增加滑油温度
缺点：但是恒压系统复杂，维护期间需要调整，此外，压力活门常常是故障源。

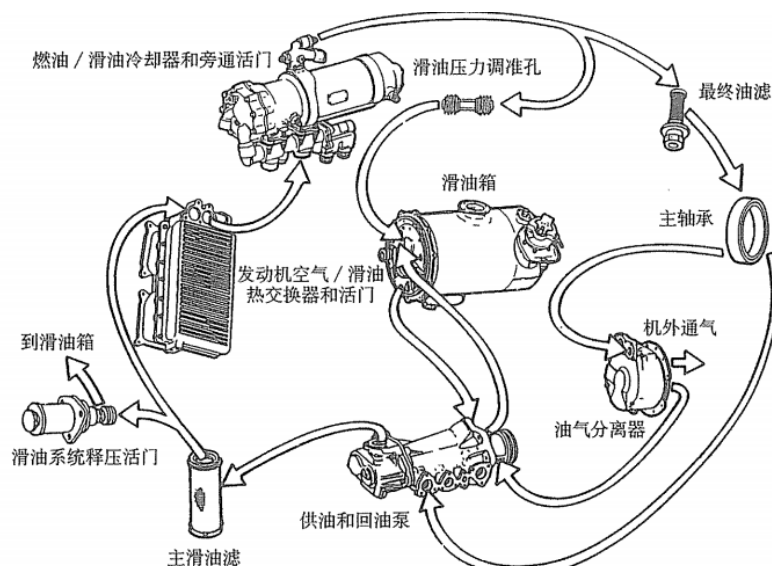
2. 简述全流式润滑系统的特点。

- 该系统可以在整个发动机转速范围内达到要求的滑油流量，滑油压力随工作状态变化而改变，保证发动机各个状态下滑油压力和流量要求，特别是高功率状态的要求。它不用调压活门，但有释压活门。滑油压力由增压泵转速、滑油喷嘴尺寸、轴承腔压力决定。
- **优点：**全流式系统简单，发动机维护期间不需要调整；主要**缺点**是该系统需要一个大的供油泵或相对高的供油压力，功率减小后该系统有相当的滑油温升。

3. 滑油系统主要包括哪些部件？

- 滑油系统一般分为几个分系统：
增压系统、回油系统、通气系统，有的机型还有余油系统，此外还应该有 工作指示（参数和警告灯）
- 主要部件包括：
 - 滑油箱、
 - 滑油泵（供油和回油泵）

- 滑油滤、
- 释压活门、
- 滑油冷却器、
- 滑油喷嘴和最终油滤、
- 磁屑探测器（磁性堵塞）
- 油气分离器、
- 滑油参数传感器/指示器/指示灯等。



1) 滑油箱？

滑油箱（见图 6-34）通常安装在发动机上，有独立外部油箱的滑油系统称为干槽式。如果滑油存在于发动机内集油槽或集油池中，称为湿槽式。不过，现在燃气涡轮发动机绝大部分是干槽式。滑油箱加油可以是重力式或压力式加油。加油口应标注“Oil”和油箱容量。滑油系统的热箱冷箱是什么？各有什么优缺点？

- 如果滑油由散热器装在回油管路上，冷却后的滑油回油箱，称**冷箱系统**。冷箱系统进入油箱的滑油温度比系统低，滑油膨胀空间小，可以用尺寸较小点的油箱；
- 散热器位于增压系统，热滑油直接回油箱称**热箱系统**。热箱系统流入滑油散热器时的温度比系统中的最高温度低，滑油中含有的气体少，可以用尺寸较小散热器的。空气滑油冷却器作为散掉滑油过多热量的第二冷却器。

单路正向循环式滑油系统，单路反向循环式滑油系统分别怎样？

[1]单路正向循环式滑油系统:将热交换器安装在回油路上的滑油系统叫**正向式滑油系统**。(冷油箱)

[2]单路反向循环式滑油系统:将热交换器安装在供油路上的滑油系统叫**反向式滑油系统**。(热油箱)

滑油箱为什么要留有膨胀空间？膨胀空间有多大？

- 滑油箱留有膨胀空间，这是因为润滑过的滑油温度高，体积有一定的膨胀，而且流动过程中会产生泡沫，也使滑油体积变大。
- 所留的膨胀空间应为油箱容量的 10%或 0.5 加仑两个数值中大的那个值。

2) 滑油增压泵和回油泵，哪一个有较大容量？为什么？

滑油**回油泵**。因为滑油回油温度高，体积膨胀；另外由于滑油温度高，回油中含有大量的泡沫。

（**齿轮泵**是最常用的增压泵和回油泵；增压泵和回油泵通常安装在润滑组件中，装在附件齿轮箱上。）

3) 滑油冷却器：

包括：燃油/滑油热器、空气/滑油散热器（主要用于 APU，因为 APU 燃油流量低，需要散掉热量高）

燃油/滑油散热器包括：主燃油/滑油热交换器（大翼燃油箱内）、燃油/滑油热交换器（用于 IDG 滑油散热。

IDG 滑油用的就是附件齿轮箱的滑油）、伺服燃油加热器（用的发动机的滑油加热）

简述燃油/滑油热交换器何时进行热交换及如何工作？

- 散热器上的温度控制活门决定滑油是否流过散热器。
- 当滑油温度低时，不需要散热，温度控制活门打开，滑油旁通绕过散热器；
- 当滑油温度高时，温度控制活门关闭，迫使滑油同燃油进行热交换。

4) 滑油滤

发动机滑油滤的油滤旁通活门的作用是什么？

- 一旦油滤堵塞使油滤进出口压差达到一定数值时，旁通活门打开，未过滤滑油绕过油滤而不使供油中断。
- 与此同时，滑油滤压差电门接通，警告灯亮，表明滑油堵塞，应清洗油滤。

滑油滤。在供油路和回油路上都装有滑油滤以保证滑油清洁。油滤有旁通活门，一旦油滤堵塞，为了不使供油中断，旁通活门打开，未过滤滑油绕过油滤。监视油滤是否堵塞，可用油滤压差电门。当油滤前、后压差过大时，给驾驶舱信号，指示油滤堵塞。有的发动机油滤上装有堵塞伸出指示器，当油滤堵塞时，指示器红头跳出给予告示。维护人员检查时知道油滤堵塞，应及时清洗或更换。过滤元件有丝网式滤、螺纹式油滤等。纸质过滤元件使用后报废。螺纹式油滤（见图 6-37）常作为滑油喷嘴前的最终油滤，防止喷嘴堵塞。由于最终油滤在里面，它只能待发动机翻修时更换。

5) 磁屑探测器（磁性堵塞）

磁屑探测器安装在什么部位？磁屑探测器的作用是什么？

- 磁屑探测器装在滑油回油路上，探测金属粒子，用来检测发动机内部机件的工作状态，判断轴承和齿轮的磨损情况。

拔出磁堵后，没有油漏出来？（磁堵、自封活门）

磁屑探测器作用，自封活门作用？

磁屑探测器又称磁性堵塞（见图 6-38）装在回油路上，探测金属粒子，判断发动机内部机件工作状态。其内部的永久磁铁和滤网吸附含铁及不含铁的粒子、碎块。磁屑探测器应定期拆下检查，在高倍放大镜下观察分析。磁屑探测器有自封活门，防止磁性堵塞拆下时滑油流出。它们还可能接通驾驶舱的告警系统，提供飞行中的指示。

6) 油气分离器

滑油系统中为什么要安装油/气分离器？

- 将油和气分离并去除油蒸汽和气泡，防止供油中断或破坏油膜（油膜破裂），减少滑油消耗；
- 防止滑油箱、齿轮箱和轴承腔内的压力过高。

滑油系统通气装置主要功用是什么？

- ①平衡滑油腔压力，以保证轴承腔封严。
- ②保证滑油系统工作正常。
- ③减小滑油消耗。

使用，空气通到机外。某些发动机上，油气分离器装在齿轮箱上由齿轮箱轴驱动。空气/滑油油雾进入分离器通过旋转的径向管道到转子中心。油滴由转子离心力向外甩，收集在壳体底部经回油泵返回滑油箱，空气从转子中心经通气出口到大气。

4. 滑油系统工作指示包括监视滑油系统工作的有哪些指示？

- 滑油压力、
- 滑油温度、
- 滑油量
- 警告指示：滑油滤旁通、低滑油压力警告。

滑油系统有哪些探测：（油量，温度，压差，磁堵）

滑油压力传感器连接到滑油供油管和油箱通气管，传感器感受的压力是供油路上滑油压力和油箱通气压力之间的压力差（见图 6-41）。滑油压力传感器的两个主要类型是波登管型和应力表型。压力电门也连接到滑油供油管和油箱通气管，给出滑油压力低警告。

滑油温度传感器在滑油系统中的安装位置取决于发动机类型。它可装在回油系统，感受滑油冷却器上游的热滑油温度；它也有装在供油系统，感受冷却后的滑油温度。滑油温度传感器有两个主要类型，热电偶和热电阻。温度信息送到驾驶舱显示。

5. 为确定发动机内部状况，对滑油实施哪些检查？

- ①检查滑油滤；（供油滤和回油滤）
- ②检查磁性堵塞；
- ③滑油取样，进行光谱、铁谱分析。

6. 为了对滑油进行分析，什么时候取油样？取油样时应注意什么？

在发动机停车后 30 分钟内，尽快取油样。

- 取油样时要注意不要发生烫伤，因为这时滑油温度是很高的，同时
- 要注意当滑油溅到皮肤上时，要尽快地用干净水将滑油冲洗掉，这是因为滑油有毒，易被皮肤吸收。

7. 发动机滑油量何时检查，检查方法以及主要事项？

不能单说发动机停车至少 5 分钟后检查滑油量，还得分长航程，中程，短程飞机而言说明何时检查滑油。远程飞机每次飞行后检查发动机滑油量。中程和短程飞机，在维修计划规定的间隔检查滑油量。

必须等发动机停车至少 5 分钟后（**我公司规定在 5-30 分钟内**），才能打开加油口盖，打开滑油加油口盖时，观察滑油气味，如果有燃油气味说明燃油/滑油散热器有漏油，需要进一步排故。加油之前必须检查使用正确型号的滑油，始终观察滑油面防止溢流（**看驾驶舱指示，估计加几罐，一罐一夸脱**）。每次加油量记录在技术日记本上。

填加滑油可在加油口重力加油，也可由泵经压力加油口和溢流口压力加油。（**航后都是重力加油**）

8. 燃气涡轮发动机润滑系统的滑油压力过高、过低会造成什么后果？

滑油压力过高：

- （1）易引起滑油泄漏，造成滑油消耗量过大；
- （2）会使系统中散热器薄壁结构部件损坏而影响系统正常工作。

滑油压力过低：

- （1）造成流量小，对机件冷却和润滑不利，特别是涡轮轴承等会过热。
- （2）如果滑油压力低于允许的最小值，则应停车

9. 滑油温度高的原因及修理方法

- 1、滑油的一个功用就是用来冷却发动机的轴承或是其他部件，要是滑油量少的话会造成温度过高，或是其内部磨损较大产生大量的热
- 2、滑油的热交换器坏了或是脏了堵住了，起不到热交换的作用了，肯定也会导致滑油温度高。

10.滑油系统中通风系统的作用？怎么通风？

油气分离器。

为防止滑油箱、齿轮箱和轴承腔中的压力过高，在滑油系统中有通大气的通风口。在空气通往机外之前，空气中的油滴将被油气分离器分离出来。通过油气分离器，去除气泊、蒸汽，防止供泊中断或破坏油膜，减少滑油消耗。滑油继续循环使用，空气通到机外。

附加题

1

发动机监控四个参数一起变判断故障：

若所有的监控参数偏差值具有相同的变化趋势，则可能是 EPR 指示系统的故障或是 TAT 指示系统的故障。若同一架飞机上各台发动机都是这样，就是 TAT 指示系统的故障，只有一台发动机是这样，则是该发动机的 EPR 指示系统的故障。

发动机在稳态下工作，燃气涡轮前温度与转速的关系（低转速时、高转速时）：

- 低转速和高转速时涡轮前温度高，
- 中转速时涡轮前温度低。??????

发动机 EGT 升高，燃油消耗率上升，N2 下降，是什么故障？

1. 一是发动机本体的性能衰退；
2. 二是附件驱动系统有问题；

- 3. 三有可能是空气系统有问题；
- 4. 四还有其它的一些问题。具体是何问题：那要对发动机试车并结合 QAR(快速存取记录器)发动机状态监控曲线进行具体的分析来排除故障。

EGT 超温的原因

首先启动超温，类似于发动机的热悬挂，就是发动机的 EGT 温度升高了，而发动机的转速没有提高，这个时候只能对发动机采取停车的方法。照成热悬挂的原因：

- A 起动机带转没有达到自加转速即停止带动。
- B 燃油供油不当，富油
- C 压气机性能衰减 气源压力不足 场温太高和场压过低。

如果燃气涡轮发动机在所有工作状态下排气温度高、燃油流量大和发动机转速低，可能原因是什么？

- 涡轮损坏或涡轮效率降低。
- 由于涡轮的问题，不能有效地将燃气的热能转变成有用功，造成排气温度高，转速低。燃油控制器监视到转速低则增加燃油流量，所以，燃油流量大。

燃气发生器为什么是合金的

合金的优点是密度小、比强度、比刚度高,抗震能力强,可承受较大的冲击载荷；合金的硬度大于其组成的金属。

燃气发生器的组成：

由发动机中间的压气机、燃烧室、涡轮组成的装置叫燃气发生器，也称为核心机。

燃气发生器为什么是发动机的核心机：

- 燃气发生器可以完成将热能转变为机械能的工作。
- 燃气发生器产生的功按其分配方式不同而形成不同类型的燃气涡轮发动机，
 - 即涡喷，涡扇，涡桨，涡轴发动机。
- 风扇、螺旋桨和旋翼所需的功率均来自燃气发生器。

为什么排气系统检查时不能使用含铅的工具和使用铅笔做标记？

因为排气系统的金属在受热时，铅，碳，锌痕迹将被吸收，使金属分子的将结构产生变化，这种变化将使痕迹区域的金属膨化，引起裂纹最终导致故障。

燃油消耗率，其与发动机效率的关系？

- 产生单位推力每小时所消耗的燃油质量称燃油消耗率。
- 飞行马赫数一定时，涡喷发动机的燃油消耗率与总效率成反比

加力式涡轮喷气发动机：

- 加力燃烧室位于涡轮和喷管之间，
- 其功用是用来提高喷管前的燃气温度，增大排气速度，从而加大发动机的推力。

涡轮喷气发动机的最佳增压比和最经济增压比：

最佳增压比是使循环功达到最大值时的增压比。

最经济增压比是使实际循环的热效率达到最大值时的增压比。

加速性：在中转速以下工作时压气机稳定工作裕度的限制。在高转速范围内涡轮强度条件的限制。在高空燃烧室稳定工作要求的限制。

风扇凸台的作用：

增加风扇的刚度，减小震动。??????????

2

点火电嘴插入发动机燃烧室的尺寸必须正确，为什么？如何测量？

不正确的安装影响发动机安全工作和电嘴的使用寿命。测量：借助类似于空塞子的专用工具实现并通过选择适当厚度的垫片放在电嘴壳体下面做调整。

发动机空中熄火的操作程序？

倘若飞行中燃烧室中的火焰熄灭，发动机需要再点火。然而，发动机再点火的能力将依据飞机的高度和飞行速度变化。再点火包线将示出发动机得到满意的再点火情况的飞行状态。在包线限制之内，流过发动机的空气流将转动压气机以一满意再点火的转速工作。因此，如果有燃油供应的话，下面要做的事就是使点火系统工作，这由一个分开的仅仅使点火系统工作的开关来完成。如果发动机空中熄火，转子风车转速不够，仍然需要启动机帮忙，则启动程序同地丽启动一样。

在什么情况下对燃油控制器进行外场调准？怎么调准？在什么部位调准？

为保证发动机输出推力，性能试验期间，需要检查慢车转速和最大推力。调准正常地在发动机或燃油控制器更换后或发动机没有产生最大推力时进行。燃油控制器外场允许的调整部位有燃油比重调整钉、慢车转速调整钉、部分功率调整钉。调整的理想情况是无风、低湿度，标准日的温度和压力，不是标准日的情况查表。小风天气，风向对着机头；大风天气不要做调准。每次调整转动调整钉其最后调准应在增加方向上。

什么情况下需要在外场校准液压机械燃油控制器？可以调整哪些部位？调整需要注意事项有哪些？

允许调整的部位有：燃油比重，慢车转速，部分功率调整钉。注意：无风、低湿度，标准日的温度和压力，不是标准日的情况查表。小风对机头，大风不调。调整钉的最后方向在增加方向上。有高、低慢车转速分开调。有的监控型电子控制器上有增益调整。

什么时候对发动机进行地面试车？

发动机安装之后；

为了确认发动机故障；

检查飞机系统；

调整或部件更换后检验（使用FADEC 的发动机更换后可不试车检查）；

发动机闲置一段时间后检验发动机。

APU 防喘的工作原理求解？

APU 压气机也可能喘振，特别是当引气负荷改变时。防喘措施有两种。没有负载压气机的 APU 上使用防喘系统，当可能喘振时，防喘活门放掉空气。飞行期间防喘活门正常打开防止喘振，由于没有发生喘振时，空气也放掉，这种方法是耗费燃油的。有负载压气机的 APU 使用的防喘方法较好。喘振保护系统监视负载压气机出口管道的空气流量，如果压气机喘振，打开喘振控制活门。作为一般的规则，如果负载压气机后空气流量减少或停止，喘振控制活门打开。在一些 APU 上，空气流量信号送到作为喘振控制活门一部分的气动控制组件。现代 APU 空气流量信号转换成电信号，送到 APU 控制组件。APU 控制组件将打开信号送到喘振控制活门力矩马达，并接受实际活门位置反馈信号。在某些 APU 上，APU 引气活门和喘振控制活门功能组合于一个活门。这种类型的引气/

喘振活门能从负载压气机供应所有空气到飞机或者使所有空气通至 APU 排气管。APU 控制组件也接受进气温度和进气压力，使用这些信号进行喘振保护，因为负载压气机在高空，空气密度低容易喘振

APU 防喘？

当流量减少或者停止时，喘振控制活门（SCV）打开

旋转失速与喘振的区别？

燃油添加剂有几种？ 5种

简述压气机？（说明压气机的通道横截面积，叶片数量，压力，温度，速度）

发动机吊舱的作用？如何接近？

吊舱包括吊架或安装支架和短舱两部分。

密闭发动机，使其形成流线型的罩壳，以改善飞机的空气动力性

能；支撑和保护发动机及其附件；引导气流进入发动机；承受发动机的载荷并将其传递到机翼结构。

进气道防冰的气路走向？

飞机在发动机启动，运转，停车时涡轮间隙都怎么变化

材料受热会膨胀，材料伸长量主要取决于受热的温度差和材料的尺寸。材料膨胀需要的时间取决于材料的厚度。薄的材料比厚的材料膨胀的较快。发动机启动时高温燃气作用在涡轮材料上，涡轮机匣膨胀的比涡轮转子快，这是因为机匣比转子薄，接触较高的温度和它的直径比转子大。然而，当转子转速加快时，在转子上的离心力增加，离心力减少间隙，转子盘和叶片伸长。注意到由离心力引起的材料膨胀大于由热引起的膨胀，这意味着发动机在低转速比高转速叶尖间隙大。如果发动机减速或停车，涡轮间隙的变化是开始时由于离心力减小转子比机匣收缩快，后来是涡轮机匣收缩快，因为机匣材料薄。

启动时间隙大，运转时间隙少。减速时间隙先大（离心力）后小（离心力，机匣收缩）薄的材料膨胀快，收缩慢。

VSV和VBV随发动机转速和进气温度怎么变化？

VSV 是将高压压气机的进口导向叶片和前几级静子叶片做成可调的；

压气机控制参数包括转速和温度。

当压气机转速从其设计值往下降低时（相当于温度升高），静子叶片角度逐渐关小，以使空气流到后面的转子叶片上的角度合适。当压气机转速增加时，静子叶片角度逐渐开大。

VSV 和 VBV 作动相反

还可以提一下:

VBV 和 VSV 防喘。书中提到 VBV 和 VSV 的目的是一致的, 都是防止压气机由于失速而产生喘振, 因此二者工作必须协调, 即对应每一转子转速有 VSV 和 VBV 的相应位置。如 VSV 在关位时, VBV 在开位。

VBV 是通过改变绝对速度的轴向分量来改变相对速度的方向和大小, 即放气时, 绝对速度的轴向分量增大, 流量系数增大, 攻角减小。VSV 是通过改变静子叶片的角度来改变绝对速度的切向分量来改变相对速度的方向和大小, 即静子叶片角度逐渐减小, 绝对速度的切向分量减小, 轴向分量增大, 流量系数增大, 攻角减小。因此当压气机喘振时, VBV 打开, VSV 角度减小。

压气机通道截面是什么样的? 叶栅通道的形状是什么样的? 两者是否矛盾?

离心式是扩张型的。

轴流式压气机的通道截面积逐渐减小, 呈收敛形, 压气机出口截面积比进口截面积要小得多。

叶栅通道是扩张型的。

压气机通道截面是: 通道中任一点的截面形状, 是径向的

叶栅通道的形状是整个通道长度上的切面, 是轴向的

活塞式发动机与涡轮发动机点火方式的区别?

按书上说的:

空气以环境状态下进入发动机进气道 (0), 空气经过进气道和压气机, 压力、温度上升。现代燃气涡轮发动机起飞时压气机出口压力超过 580lb/in^2 (磅/平方英寸), 温度近似 600°C (2), 空气速度略有减小 (空气经过压气机各级转子和静子的速度变化见压气机部分)。在燃烧室中空气和燃油混合燃烧, 温度和体积增加, 现代燃烧室出口温度大约 1300°C (3)。燃气离开燃烧室通过涡轮, 压力、温度下降, 体积增加, 速度在涡轮转子和涡轮导向器中是改变的 (见涡轮部分)。燃气离开涡轮通过喷管, 压力和温度继续减少, 速度增加, 排入大气 (5)。

活塞式发动机的压缩、燃烧在气缸内进行, 是等容加热循环, 或称奥托循环。在活塞式发动机中, 空气是间断的进入气缸, 气体的压缩、燃烧和膨胀过程发生在同一气缸中。活塞式发动机把气体膨胀产生的功率转变为曲轴转动的功率。航空用的活塞式发动机必须使用减速器和螺旋桨才能使发动机获得推进力。在涡轮喷气发动机中, 空气是连续的进入发动机, 空气的压缩、燃烧和膨胀过程分别发生在进气道、压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管中, 气体在涡轮中产生的膨胀功通过轴传递给压气机, 气体在尾喷管中产生的膨胀功则转变为燃气本身的动能, 燃气高速喷出, 使发动机产生反作用推力。

1 2 3 推力的产生

AIRACM.COM

活塞式发动机每个冲程都点火, 气缸循环包括吸气、压缩、点燃、排气四个冲程, 而每个循环都要点火燃烧一次。

而涡喷的话是一次点火后稳定燃烧, 靠火焰系留保持火焰持续燃烧, 不用持续点火, 只有在恶劣环境下或爬升时为了可靠的燃烧采用持续点火 (此时采用低能点火)

