



M5.1.1 发动机概述

修订批准页:

1

版次	修订时间	编写/改版	修订说明	审核/时间	审批/时间
R0	2020.06.14	谈海军	新编课件	谈海军 2020.08.06	张玉 2020.08.11

目的与要求:

目的	通过本次课程的学习，了解发动机类型及基本组成，发动机原理，发动机参数
要求	<ol style="list-style-type: none">1. 掌握发动机类型及基本组成，2. 掌握发动机原理3. 掌握发动机参数

课程安排:

序号	内容	等级	课时
1	发动机类型及基本组成		2H
2	发动机原理		2H
3	发动机参数		2H

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

5.1.1.1 发动机类型及基本组成

5.1.1.2 发动机原理

5.1.1.3 发动机参数

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


5.1.1.1 发动机类型及基本组成

发动机概述

- 原理** 燃气涡轮发动机是将转动的压气机和涡轮连接在同一根轴上，两者之间装有热源（燃烧室），空气连续不断地被吸入压气机，并在其中压缩增压后，进入燃烧室中喷油燃烧成为高温高压燃气，进入涡轮中膨胀做功
- 优点** 结构简单、重量轻、推力大、推进效率高，推力随飞行速度的增加而增加
- 时间** 1939年9月27日德国首次试飞
- 特征** 高增压比、高涡轮前温度、高涵道比

1.1 燃气涡轮发动机的分类

燃气涡轮发动机的主要特点是：靠高温高速的燃气推动涡轮，涡轮带动压气机对空气进行压缩。

- 
- a. 涡轮喷气发动机
 - b. 涡轮螺旋桨发动机
 - c. 涡轮风扇发动机
 - d. 涡轮轴发动机

a 涡轮喷气发动机（涡喷）

a) 涡轮喷气发动机工作

空气经压气机压缩后，压力提高，进入燃烧室与燃料混合燃烧，燃烧后形成的燃气流入涡轮，涡轮便在高温、高压燃气驱动下而旋转起来，带动压气机工作，燃气最后在喷管中膨胀加速，高速向外喷出而产生推力，靠高温高速的燃气推动涡轮，涡轮带动压气机对空气进行压缩

b) 部件

- ◆ 进气道
- ◆ 压气机
- ◆ 燃烧室
- ◆ 涡轮
- ◆ 喷管



c) 特点

- ◆ 全部推力喷出燃气流的反作用力
- ◆ 迎风面积小，好的速度性能，亚音速经济性差，作超音速战斗机动力

b 涡轮螺旋桨发动机（涡桨）

a) 介绍

结构上，涡桨发动机的基本组成与涡喷相同，但多减速器

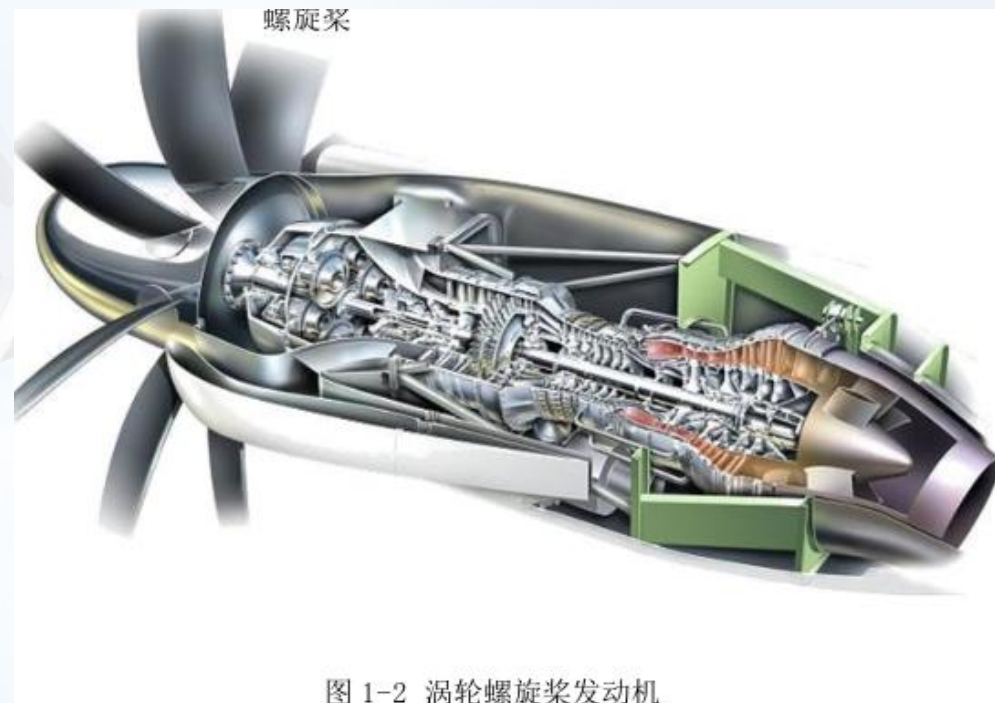


图 1-2 涡轮螺旋桨发动机

- ◆ 螺旋桨可由单转子发动机的转轴驱动
- ◆ 由双转子或三转子发动机的自由涡轮（转轴与发动机内驱动压气机的轴不相连的动力涡轮）驱动

1.1.1 燃气涡轮发动机的分类

b) 特点:

- A. 推力螺旋桨拉力 90%，10%气体动能 发挥螺旋桨中、低速推进效率高
- B. 推力大，起飞性能好 飞行速度的降低，螺旋桨拉力增大
- C. 可负拉力，改善着陆和中止起飞性能
- D. 发动机中、低速经济性好
- E. 发动机功率的输出受到减速器负荷的限制 减速器重量和尺寸的限制

中、低速支线民航机 运七

运输机 C-130

轰炸机 图-95

A 发动机推进力主要来自螺旋桨拉力

(90%左右) 带动螺旋桨，发挥螺旋桨中、低速飞行时推进效率高的优点

(10%左右) 增加气体动能，大大降低了喷气速度，降低了离速损失，提高了发动机推进效率

B 发动机起飞推进力大，飞机起飞性能好

- ◆ 功率一定时，随着飞行速度的降低，螺旋桨拉力增大
- ◆ 飞机起飞时涡桨发动机的推进力大，可有效缩短起飞滑跑距离，改善飞机的起飞性能

C 螺旋桨产生较大负拉力，改善飞机着陆和中止起飞性能

飞机着陆（或中止起飞）时，可使螺旋桨桨叶迎角变为负迎角，从而为飞机提供负拉力，有效缩短飞机滑跑距离，改善飞机着陆和中止起飞性能。

D 发动机中、低速经济性好。

飞机中、低速飞行时，螺旋桨的工作效率高，又喷气速度低，离速损失小，喷气推进效率高，所以涡桨发动机总的推进效率高，经济性好

速度过高时，螺旋桨将产生较大的激波阻力，导致螺旋桨效率急剧下降，发动机性能迅速变差

E 发动机功率的输出受到减速器负荷的限制

减速比可高达 1: 15, 减速器齿轮承受巨大的扭矩, 负荷较重。
所以减速器传递的功率将受到减速器重量和尺寸的限制,

c 涡轮风扇发动机（涡扇） 又称内外涵发动机

a) 介绍

内涵道

压气机

燃烧室

涡轮

外涵道

风扇

推力是内、外涵道力的总和

流量比(B)外涵道空气流量与内涵道之比

高涵道比 ($B = 4-10$) 经济性 民航机, 运输机
低涵道比 ($B = 0.2-0.6$) 超音速战斗机。

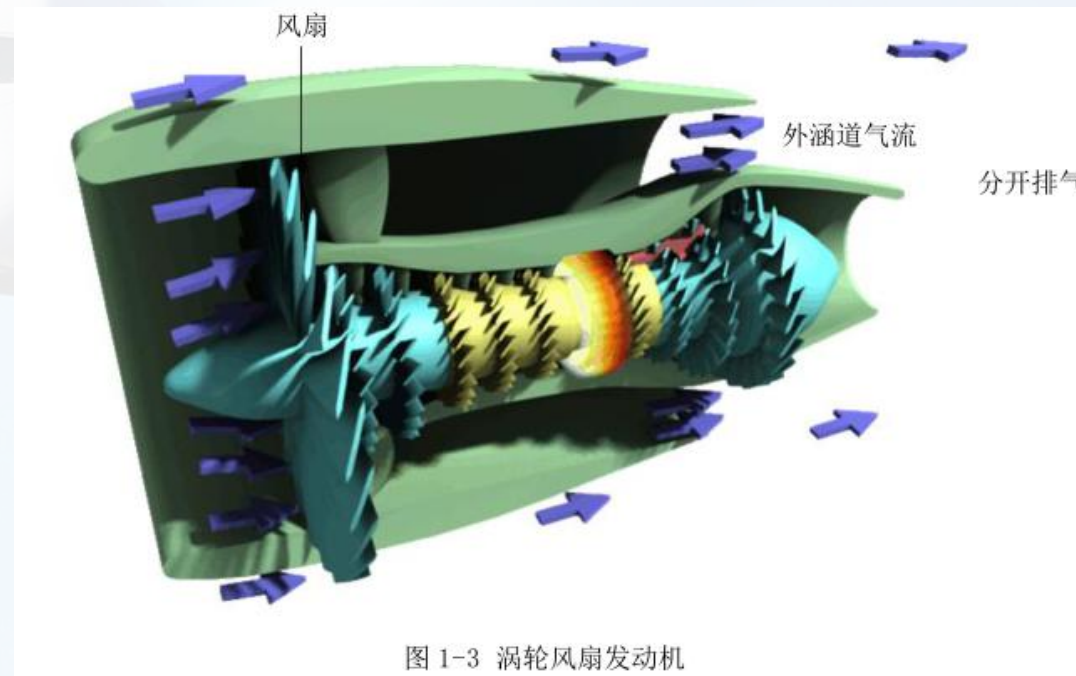
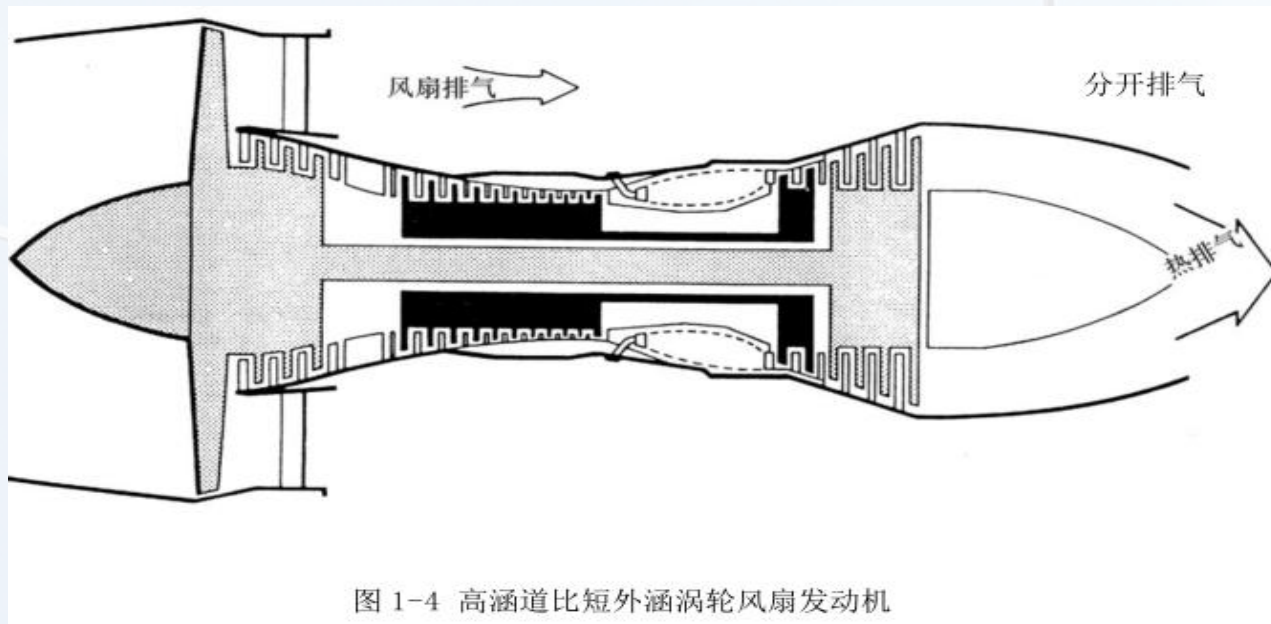


图 1-3 涡轮风扇发动机



高涵道比短外涵
涡轮风扇发动机

图 1-4 高涵道比短外涵涡轮风扇发动机

长外涵涡扇发动机

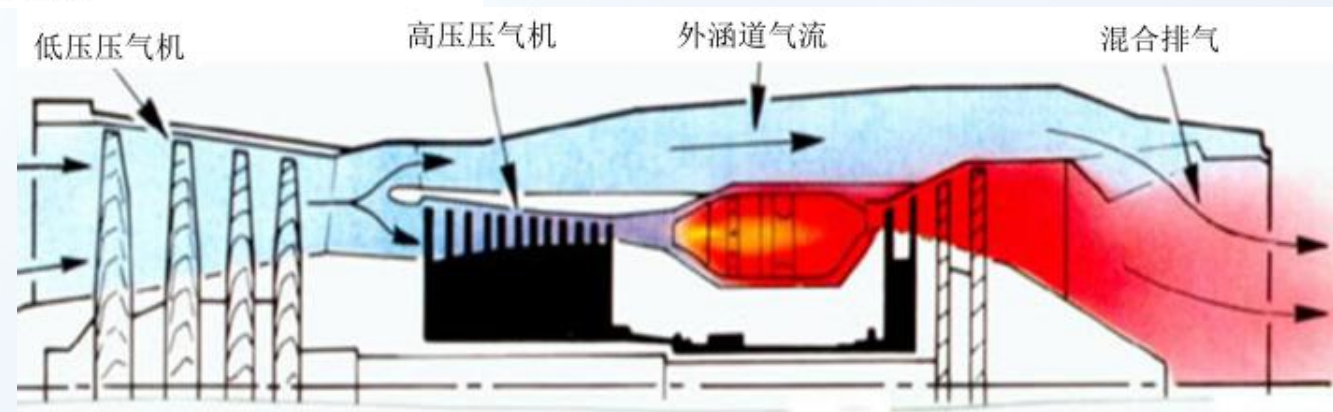


图 1-5 长外涵涡扇发动机

b) 特点

- A. 参与产生推力的空气流量大，推力由内、外涵推力组成
- B. 发动机热效率高
- C. 发动机推进效率较高
- D. 起飞、复飞推力大
- E. 喷气噪音低

A 参与产生推力的空气流量大，推力由内、外涵推力组成

参与产生推力的空气量较多，随着涵道比的增加，参与产生推力的空气量更多

B 发动机热效率高

混合排气的涡扇发动机的热效率较高

- 原因 {
- 压气机防喘好，增压比高，热能利用率高，发动机热效率较高
 - 中间防喘放气时，放到发动机外涵，可产生推力，补偿推力
 - 外涵吸收内涵热量，提高外涵空气温度，提高外涵推力，减小推力

C 发动机推进效率较高

风扇工作效率高，提高发动机推进效率

内涵喷气速度降低，发动机离速损失小，推进效率

D 起飞、复飞推力大

- ◆ 高涵道涡扇，涡轮前温度设计高，可提高发动机推力
- ◆ 低速时，气体动能增量因飞行速度的减小而增加，起飞推力较大




E 喷气噪音低

发动机喷气噪音强度与喷气速度的八次方成正比



c) 缺点

- ◆ 结构较为复杂
- ◆ 涵道比的增加，发动机的迎面阻力增大



d 涡轮轴发动机（简称涡轴）

a) 介绍

涡轮

{ 燃气发生器涡轮，带动压气机，
自由涡轮，带动外界负载

b) 特点

- A. 可用能量通过动力涡轮输出功率
- B. 发动机经济性好
- C. 发动机的工作环境较为恶劣
- D. 应用广泛

A. 可用能量通过动力涡轮输出功率

燃气在涡轴发动机涡轮中过度膨胀，将几乎全部的可用能量通过动力涡轮输出，喷气基本上不产生推力。所以，涡轴发动机基本上已演变成热机

B 发动机经济性好

在低速范围($Ma < 0.3$), 同时因发动机排气速度较低, 气体离速损失很小, 所以推进效率高, 经济性好, 经济性已与航空活塞发动机相当



C 发动机的工作环境较为恶劣

- ◆ 当直升机在起飞、爬高和悬停时，常处在大功率状态，状态多变，机件容易疲劳损伤；
- ◆ 直升机在野外频繁起降，飞行高度较低，发动机容易受到外来物

D 应用广泛

舰船、坦克、机车的动力装置
发电设备、石油及天然气输送设备

优势

功率质量比
转子振动
起动性和加速性
发动机噪声
使用寿命及维护性

c) 涡轴发动机缺点

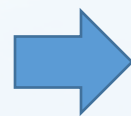
1. 成本较高
2. 小功率的经济性差

e 燃气涡轮发动机总结

共同的特点空气和燃油转变成高温高压燃气，发生燃气的部件，

燃气发生器 {
压气机
燃烧室
涡轮

核心发动机 {
高压转子
燃烧室



工作在高温、高压和高转速状态

1.2 动力装置的组成

a 双转子涡轮风扇部件组成

进气道

低压压气机

高压压气机

燃烧室

高压涡轮

低压涡轮

尾喷管

b 双转子涡轮风扇气流

主气流 进入内涵道的气流
次气流 进入外涵道的气流

主气流流低压压气机和高压压气机压缩，入环形燃烧室被加热，温度提高，驱动高压涡轮和低压涡轮，并通过附件传动齿轮箱驱动发动机和飞机附件，内涵气流和外涵气流产生了向前的推进力量

c 双转子涡轮风扇工作系统

燃油系统 计量燃油量，确保发动机安全、稳定、可靠工作

滑油系统 压力滑油到各摩擦面，润滑和散热作用

防冰系统 防止发动机结冰

防火系统 严重过热或火警时，接通灭火装置

启动系统 静止到慢车，启动过程迅速、可靠

1.3 涡轮风扇发动机的站位

站位（截面）是由发动机生产厂自己规定的

- 0 站位： 环境大气
- 12 站位： 风扇进气口
- 25 站位： 高压压气机进口
- 30 站位： 高压压气机排气口
- 49.5 站位： 第 2 级低压涡轮进口导向器

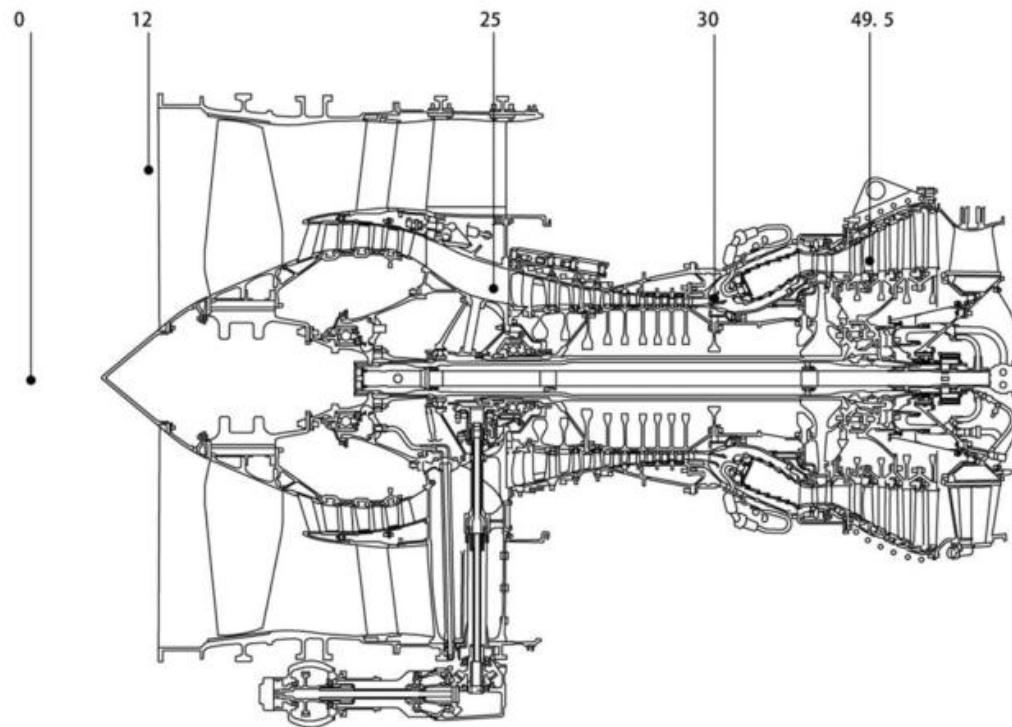


图 1-7 CFM56-7B 发动机站位

0 站位：环境大气；12 站位：风扇进气口；25 站位：高压压气机进口；30 站位：高压压气机排气口；49.5 站位：第 2 级低压涡轮进口导向器。



5.1.1.2 发动机原理

燃气涡轮发动机的功用是通过向后加速空气或燃气产生推进力，简称**推力**。

因此燃气涡轮发动机工作的基本原理涉及到诸多理论

质量守恒定律

牛顿运动定律

能量守恒定律

转换定律

1 连续性定理

稳定地流过管道时，单位时间内，流过任何横截面的气体质量相等，

这原理数学方程为连续方程，它是质量守恒定律应用于流动气体的关系式

一维定常流公式：

$$\rho_1 A_1 c_1 = \rho_2 A_2 c_2 = \text{常数}$$

ρ —— 密度；

A —— 面积；

c —— 速度。

流速与该截面积成反比。截面积增加、流速减少

2 伯努利原理

伯努利方程是能量守恒与转换定律

总压或全压 { 动能 流动速度越大，动能越大 动压
 压力能 质量的空气，具有一定压力 静压

无外界能量加入，无能量的损失，气流流动过程中的总能量不变的

$$p + \frac{\rho c^2}{2} = \text{常数}$$

: p ——静压;

$\frac{\rho c^2}{2}$ ——动压。

在不可压流中S 缩小时，V增大，P下降；S扩大时，V下降，P增高

3 布莱顿循环

a 布莱顿循环假设

- ◆ 略去压缩与膨胀过程中工质与各部件之间的热量交换
- ◆ 忽略实际过程中的摩擦
- ◆ 忽略流动阻力和加热的压力降低，用定压加热代替之
- ◆ 忽略喷入的燃油的质量，定质量的定比热容的完全气体
- ◆ 喷入大气中的燃气与大气定压放热过程

b 布莱顿循环过程

- a) 绝热压缩, 进气道 (0-1) 和压气机 (1-2)
- b) 等压加热, 燃烧室 (2-3)
- c) 绝热膨胀, 涡轮 (3-4) 和喷管 (4-5)
- d) 等压放热, 在外界大气 (5-0)

热效率取决于发动机的增压比, 与加热量无关。增压比越大, 热效率越高

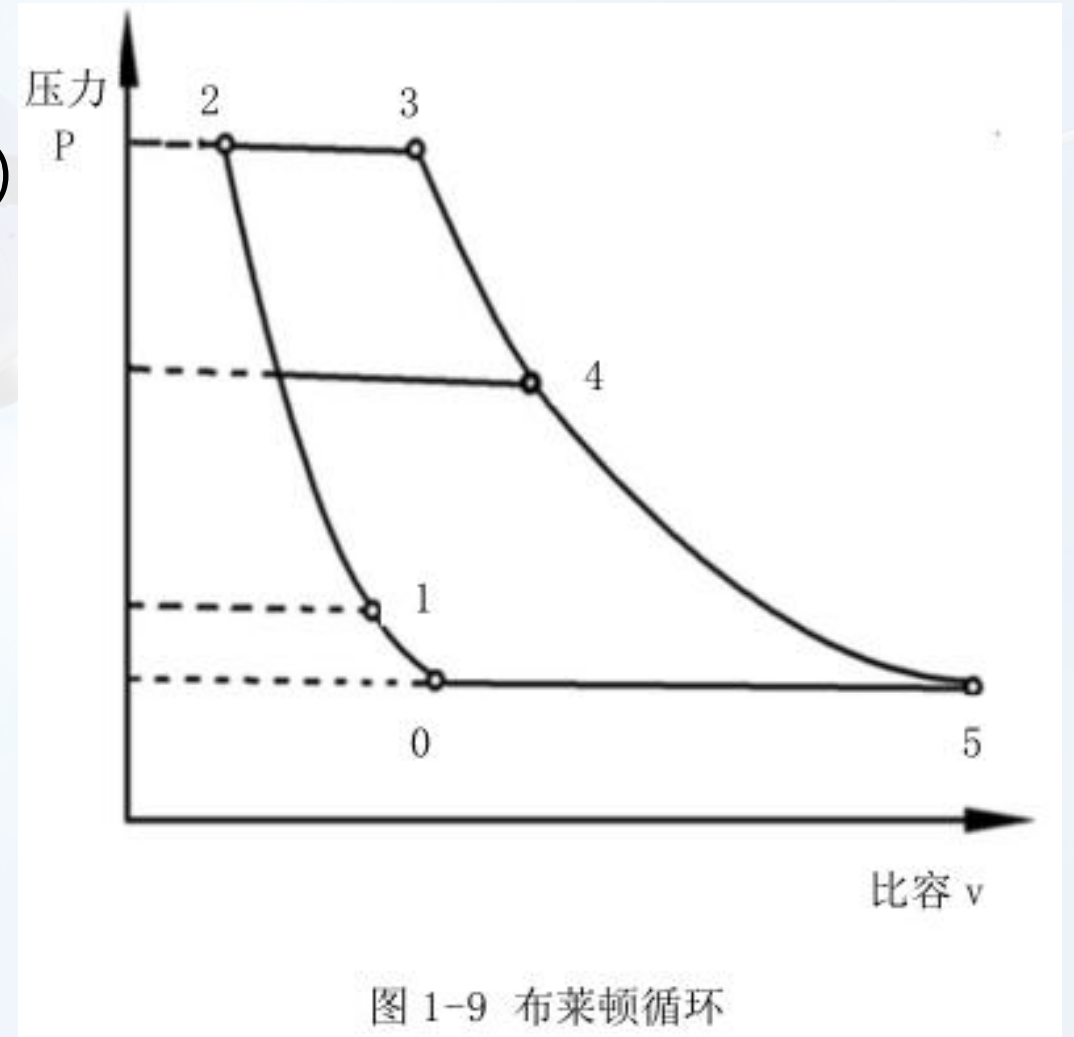
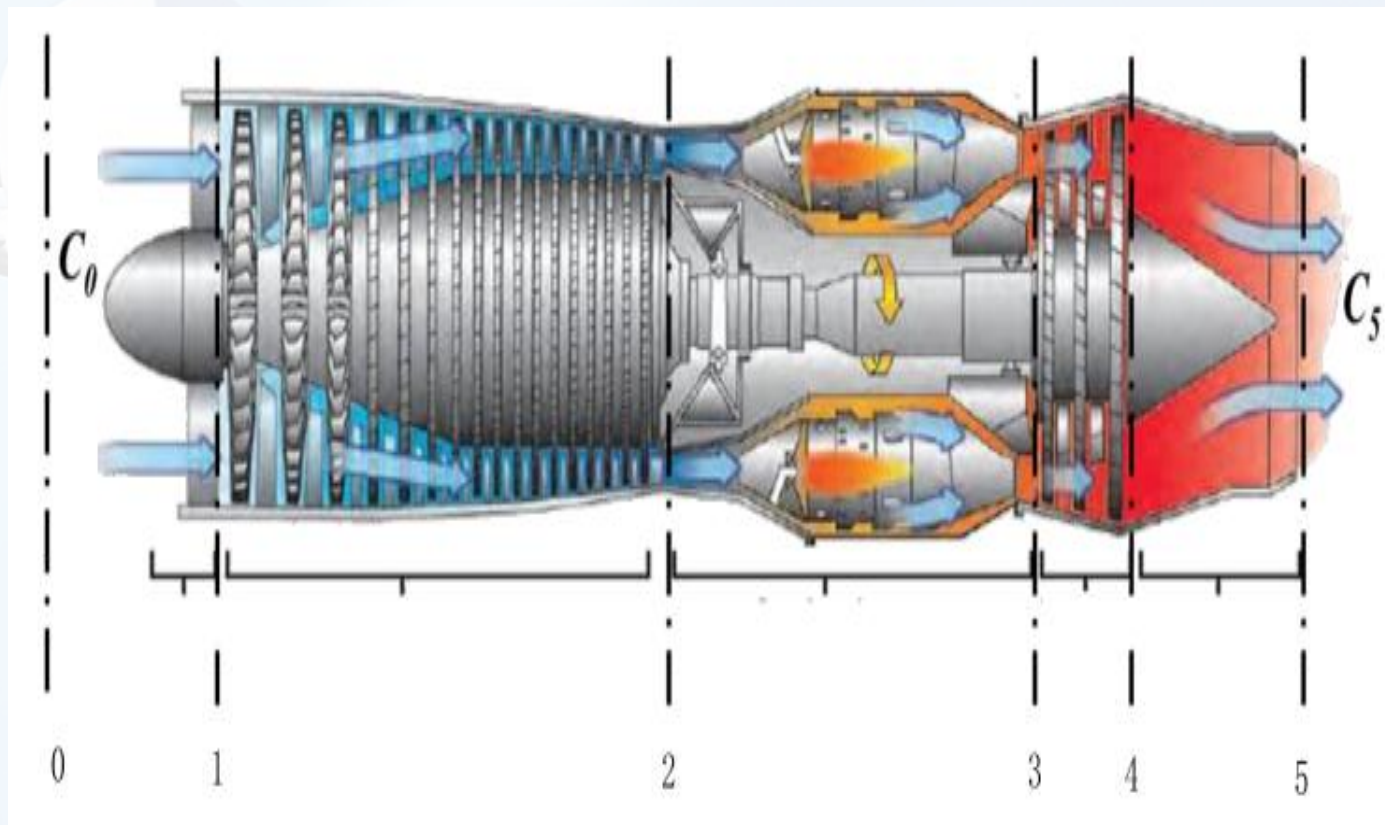


图 1-9 布莱顿循环

4 涡轮喷气发动机的推力的原理

既是热机，又是推进器。作为热机，它把热能转换为机械能

- ◆ 热机转换为机械能，进出口动能之差，表示它的循环功
- ◆ 作为推进器，进出口速度变化，动量差，产生推力



5 飞行速度和飞行高度对推力的影响

燃油消耗率一定，推力受发动机入口的空气温度和压力影响

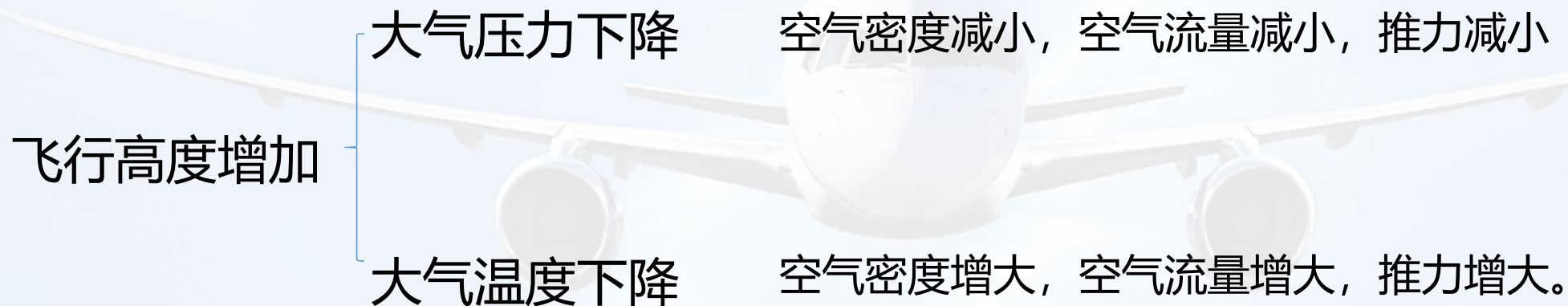
a. 飞行速度的影响

空气流量不变

- ◆ 气体速度增量越大，推力越大
- ◆ 气体速度增量越小，推力越小

气体速度增量增加会使发动机的耗油率增加，发动机经济性变差

b 飞行高度的影响



总体来说, 随着飞行高度增加, 大气密度减小, 空气流量减小, 推力减小

A large, faint, light-colored silhouette of a commercial airplane is centered in the background, facing forward. It shows the fuselage, wings, tail, and two engines mounted under the wings.

5.1.1.3 发动机参数

1 推力及其相关参数

推力是发动机的**最主要性能参数**，转速 N 和压力比 EPR

a 单位推力

发动机的推力与每秒钟流过发动机的空气质量流量之比

给定**飞行条件**，**发动机尺寸和重量**，单位推力越大，发动机的推力也就越大

b 推重比

发动机的推力和发动机的净重之比

涡喷3.5~4,
涡扇10 以上

推重比是一个综合性的性能指标

- ◆ 气动热力循环方面的水平
- ◆ 也体现结构方面的水平

c 转速

a) 推力随转速的增加而增大原因

- ◆ 油门前推，燃油量增加，涡轮前温度增加，涡轮功增加，发动机转速增加，压气机增压比增加，进入发动机的空气流量增加；
- ◆ 燃气的膨胀能力增加，更多能量在喷管中转换成气体的动能，排气速度增加。

发动机推力随着发动机转速的增加而增大

b) 转速表征发动机推力大小原因

- ◆ 转速易测量，测量精度高
- ◆ 发动机转速是影响发动机推力的最主要参数
- ◆ 反映发动机承受的机械负荷的大小
- ◆ 反映发动机的强度和发动机状态

所以转速表征发动机推力大小，**是最基本参数。**

双转子发动机，N1 低压转子转速（即风扇转速），N2 表示高压转子转速。

如 GE90 和 CFM56

d 发动机压力比

a) 概念

涡轮出口总压与压气机进口总压之比。描述了气体在发动机内获得的总压增量

高涵道比涡轮风扇发动机，发动机的推力主要由外涵的风扇产生，一些发动机压力比的测量的是**风扇出口气体总压与风扇进口气体总压之比**，也称为**外涵 EPR**。

b) EPR 反映发动机推力的大小原因

- ◆ EPR 越高，气体获得的机械能增量越大，在喷管内膨胀能力越强，排气速度越高，
- ◆ 推力越大且当发动机转速一定时，其他因素的变化对推力的影响，也可以通过 EPR 值反映出来。

EPR 可准确反映发动机推力变化，反映推力的大小，是最基本参数

PW4000、V2500 内涵EPR来表征推力大小，

RB211外涵道EPR 来表征推力的大小。

2 发动机效率参数

发动机工作时，放出的热能，能量在转换成推进功的过程中损失掉了，能量损失的大小可通过发动机的效率来描述

a 热效率

发动机的热效率是发动机气流动能增量与燃油完全燃烧所放出的热量之比25% ~ 40%

损失的能量

- ◆ 高温燃气带走的热量;
- ◆ 表面的散热和滑油带走;
- ◆ 不完全燃烧和燃烧产物的离解损失

热效率表明作为热机的经济性

b 推进效率

推进功与气流的动能增量之比 约 50% ~ 75%

特点

- ◆ 气体动能增量转变成飞机推进功过程中能量损失大小
- ◆ 表明了涡轮喷气发动机作为推进器的经济性
- ◆ 在空中的动能损失越少，推进效率越大

c . 总效率

总效率=热效率×推进效率

燃油完全放出的热量，有多少转变为推进功 20% ~ 32%

特点

- ◆ 热能转变成推进功过程中的能量损失大小
- ◆ 作为产生推力的动力装置的经济性

3 发动机其它主要参数

a 涡轮前燃气总温 $T3^*$

特点

- ◆ 最重要、最关键参数，也是受限制参数
- ◆ 高低表示了发动机性能的高低，
- ◆ 分布不均，测量难，实际中不进行测量

b 发动机排气温度 EGT

特点

- ◆ 实际使用中的**重要的监控参数**,
- ◆ **多点并列镍铬 - 镍铝**材料热电偶测量EGT
- ◆ EGT反映了发动机涡轮前总温, **红线 EGT**

c. 燃油流量 FF

FF 表示，发动机不同，所消耗的燃油量会略有不同，但发动机顺利工作和测定飞行中正在消耗的燃油量来说，燃油流量可以提供一种很有用的指示。

d. 振动值VIB

VIB 表示，燃气涡轮发动机极低的振动幅度，潜在的或内部故障所引气的振动可能不会被发觉而忽视，装振动指示器，监视发动机的振动水平

4经济性能指标

a 燃油消耗量

发动机单位时间内消耗的燃油量称为燃油消耗量，单位为 kg/s

- ◆ 推力相等的发动机，燃油消耗量小表示经济性好
- ◆ 推力不相等，不表明发动机的经济性，引入单位燃油消耗率，才便于比较发动机经济性能的好坏

b 耗油率

单位燃油消耗率是产生一牛顿（或十牛顿）推力每小时所消耗的燃油量，
是经济性指标

- ◆ 一定飞行马赫数下，单位燃油消耗率和总效率成反比
- ◆ 同速度下比较发动机经济性，单位燃油消耗率合理。

增加 气体动力学基础

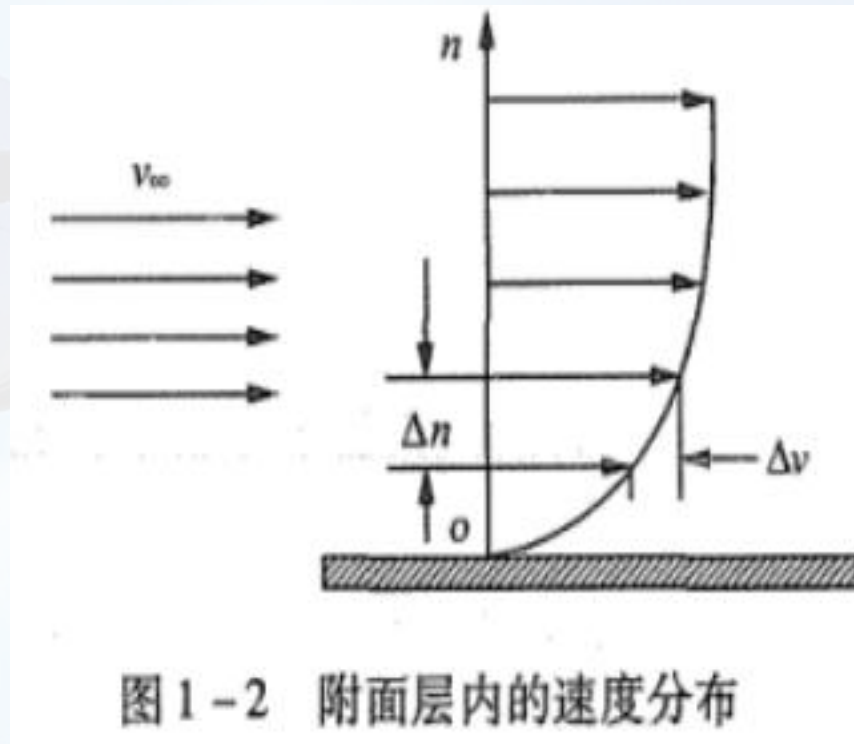
气体压缩性 气体的重要属性

黏性是实际气体物理属性

流动 { 层流
紊流

临界雷诺数

雷诺数 流体惯性力与黏性力之比：雷诺数小，层流；雷诺数大，紊流



总结

发动机类型及基本组成

发动机原理

发动机参数

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

感谢聆听，欢迎指正