



M5.1.2 发动机特性

修订批准页:

1

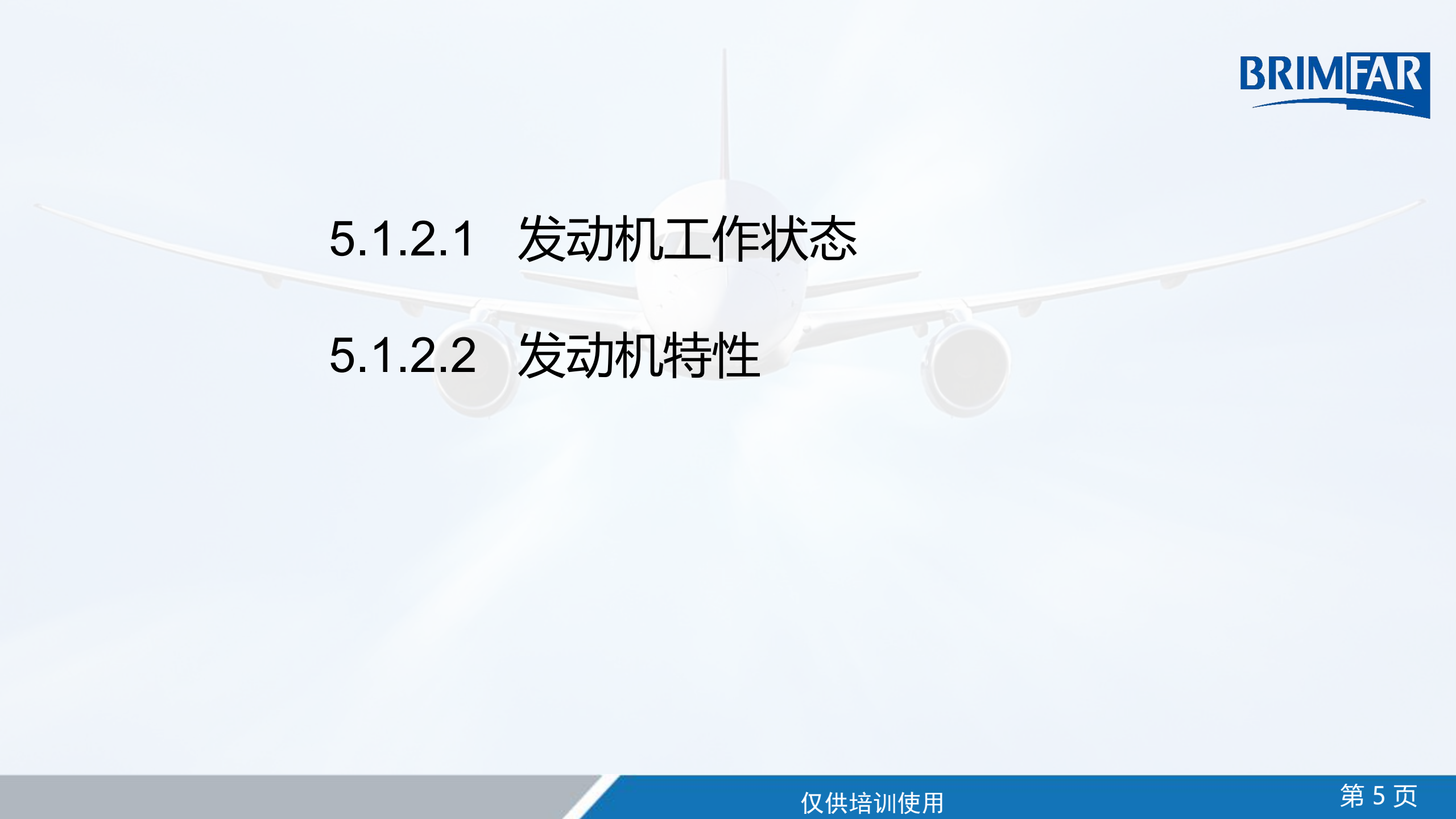
版次	修订时间	编写/改版	修订说明	审核/时间	审批/时间
R0	2020.06.14	谈海军	新编课件	谈海军 2020.08.06	张玉 2020.08.11

目的与要求:

目的	通过本次课程的学习，了解发动机工作状态和发动机特性
要求	<ol style="list-style-type: none">1. 掌握最大状态、额定状态、最大连续状态、巡航状态和慢车状态2. 掌握压气机和涡轮共同工作，转速特性、高度特性、速度特性

课程安排:

序号	内容	等级	课时
1	发动机工作状态		1H
2	发动机特性		1H

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

5.1.2.1 发动机工作状态

5.1.2.2 发动机特性

A faint, light-colored illustration of a commercial airplane in flight, viewed from a front-quarter perspective, centered in the background.

5.1.2.1 发动机工作状态

1.1 发动机的状态

概述

发动机的推力（功率）有不同要求，因而发动机对应有不同的工作状态。实际飞行中，油门杆在不同的位置，对应了发动机不同的转速，给定了不同的发动机状态，由发动机推力和燃油消耗率随发动机转速变化曲线，可以得到常见的几种发动机状态

a .起飞状态

最大转速和最高涡轮前温度时的状态，发出最大推力（功率），
一般不超过5min。防止超温、超转、超时。

使用条件

- ◆ 紧急起飞
- ◆ 短跑道起飞
- ◆ 高温、高原机场起飞时
- ◆ 飞机复飞时，为了获得最大上升率

b 最大连续状态

可长时间连续工作时批准使用的工作状态

- ◆ 没有工作时间限制
- ◆ 延长发动机的在翼寿命，正常不用，特殊使用。双发飞机单发飞行

c 爬升状态

爬升时，发动机所允许使用的最大推力状态

d 巡航状态

- ◆ 发动机的转速和涡轮前燃气总温离最大限制值较远
- ◆ 工作时间不受限制，用于飞机长时间和远距离飞行

e 慢车状态

a) 特点

稳定、连续工作的最小转速工作状态

- ◆ 飞机着陆
- ◆ 快速下降
- ◆ 地面滑行
- ◆ 发动机冷转

涡轮前总温较高，发动机的使用时间也受限制

b) 分类

- ◆ 慢车推力小，改善飞机的着陆及滑行性能
- ◆ 慢车转速过小，影响飞机及发动机的性能

- ◆ 大雨飞行，容易熄火；
- ◆ 引气不足，影响飞机和发动机防冰的可靠性



- ◆ 进近慢车（或高慢车） 在空中，油门收到最后时，保持飞行慢车
- ◆ 地面慢车（或低慢车）状态。主轮着地后，自动转换成地面慢车状态，

f 总结

状态	定义	特点	使用时间
起飞状态	发动机在最大转速和最高涡轮前温度时的状态	转速和涡轮前温度最高， 一般不超过 5min。 防止发动机超温、超转、超时	紧急起飞，短跑道起飞 高温、高原机场，复飞
最大连续状态	可长时间连续工作时批准使用的工作状态	没有工作时间限制 延长寿命，一般不使用	双发飞机单发飞行时
爬升状态	爬升时，发动机所允许使用的最大推力状态		
巡航状态	巡航飞行时所使用的发动机状态	转速和涡轮前燃气总温离 最大限制值较远 时间不受限制	用于飞机长时间和远距离飞行
慢车状态	是发动机稳定、连续工作的最小转速工作状态	涡轮前总温较高，发动机的使用时间也 受限制	飞机着陆，快速下降 地面滑行，冷转

1.2.1.2 额定平功率和排气温度裕度

a . 额定平功率

a) 设定原因

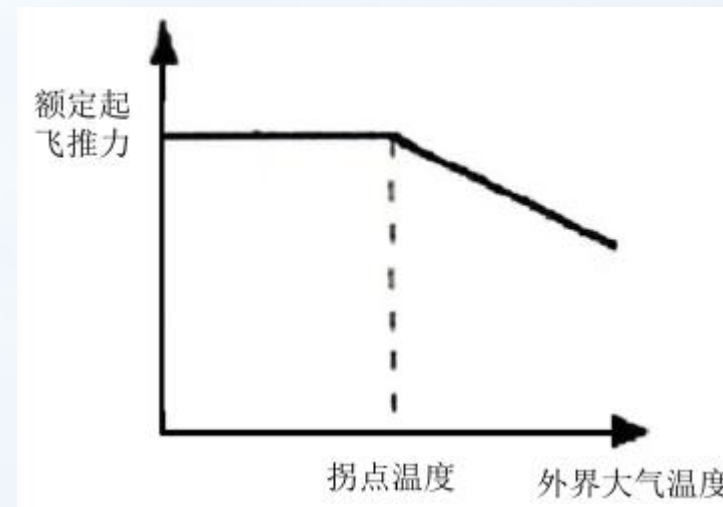
转速、温度和压力都不要超过发动机结构所允许的极限值，规定了其额定起飞推力（功率）。控制系统不让发动机超过此额定推力

1.2 额定平功率和排气温度裕度

a . 额定平功率

a) 设定原理

- ◆ 推力随外界温度变化，温度升高，进气量下降，推力下降。
- ◆ 不使推力下降，多供油，提高转速，排气温度升高。
- ◆ 排气温度是受热端部件限制的，只能到允许的最大值
- ◆ 排气温度到最大值，大气温度再升高，发动机控制系统控制供油量保持EGT最大值，进气量的下降，发动机的推力下降



1.2.1.2 额定平功率和排气温度裕度

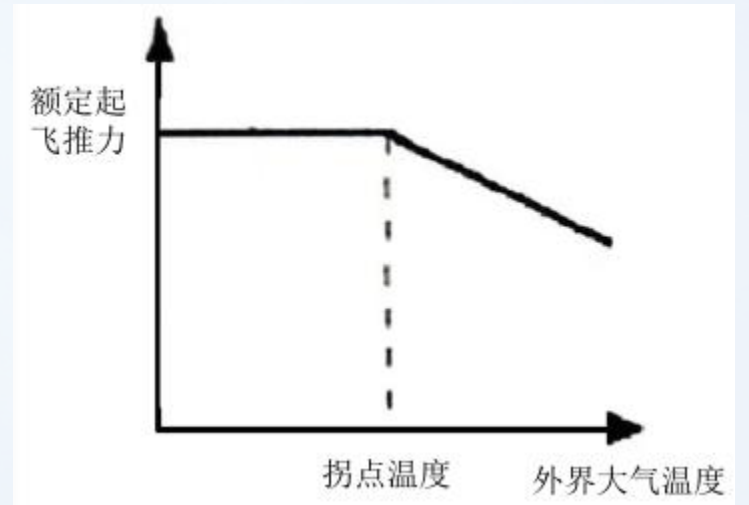
a . 额定平功率

b) 定义

拐点温度（平功率温度）：把发动机额定起飞功率开始下降的温度

额定平功率：拐点温度前，大气温度升高，发动机额定功率保持不变

民用涡扇发动机，拐点温度在 30°C 左右

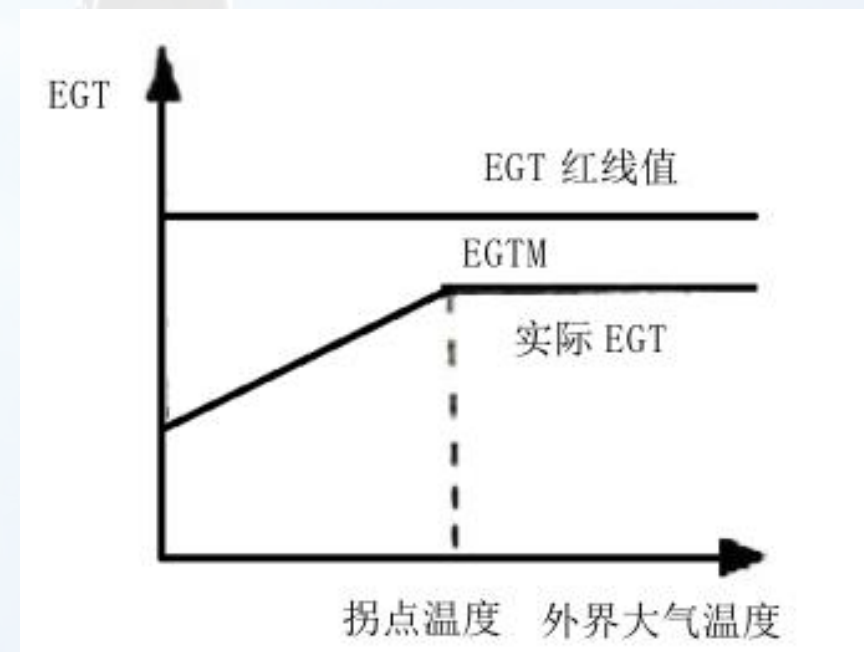


b. 排气温度裕度

海平面标准气压，在拐点温度时，额定平功率状态时的实际燃气温度与规定的限制值（红线值）之间的差值，**排气温度裕度EGTM**（Exhaust Gas Temperature Margin EGT 裕度）**是发动机性能衰退的一个重要标志**

发动机性能衰退，EGTM 降低，为零或负值时，使用额定平功率起飞时排气温度可能超过最大允许极限值，从而损坏发动机

- ◆ EGTM作为执飞航线选择和性能换发依据
- ◆ 执飞高高原航线
- ◆ 双发延程飞行航线 ETOPS



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

5.1.2.2 发动机特性

2 压气机和涡轮的共同工作

介绍

单轴涡轮喷气发动机

进气道

压气机

涡轮

燃烧室

喷管

燃气发生器

把**燃气发生器**的共同工作，称为**压气机和涡轮的共同工作**

发动机的工作分

- ◆ 稳定 转速恒定不变的状态
- ◆ 过渡

2.1 发动机稳态下的共同工作

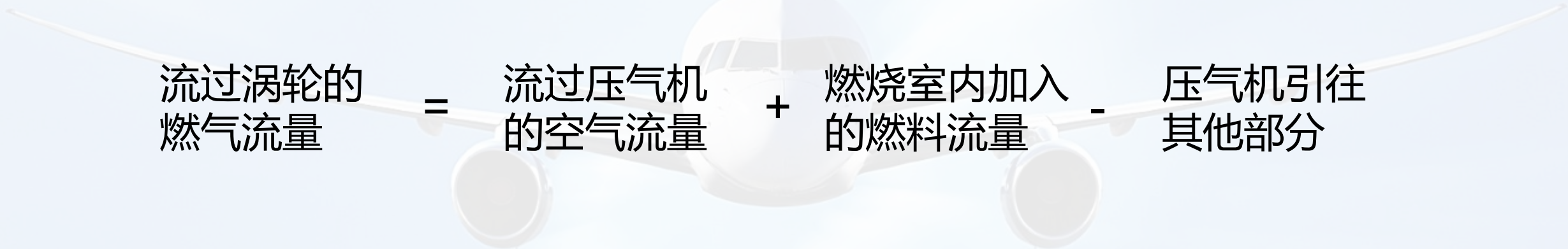
稳定工作状态是指发动机在某一转速连续工作，即转速恒定不变的状态

a 稳定工作的条件

a) 转速一致

压气机和涡轮用一根轴相连接，压气机和涡轮转速一致

b) 流量连续



流过涡轮的
燃气流量 = 流过压气机
的空气流量 + 燃烧室内加入
的燃料流量 - 压气机引往
其他部分

一般认为加入的燃料流量与扣除的空气流量近似相等



流过涡轮的燃气流量与流过压气机的空气流量相等

c) 压力平衡

涡轮进口总压=压气机总压×燃烧室总压恢复系数

d) 功率平衡

涡轮发出功率用来转动压气机和其它附件，附件消耗的功率很小
(1.5 ~ 2.0%)，忽略不计



转子功率的供需平衡，使涡轮功率等于压气机功率

b 如何保持稳定工作状态的共同工作

外界变化或某一部件的几何参数变化，涡轮与压气机功率变化不同，涡轮功率与压气机不平衡，转速变化

$H \uparrow$, $\rho \downarrow$, 空气流量 \downarrow , 压气机功率和涡轮功率要 \downarrow 。供油量保持不变，涡轮前燃气温度 \uparrow , 涡轮功率小得少一些, 涡轮功率 $>$ 压气机功率, 转速 \uparrow , 不能继续原转速稳定地工作
所以, $H \uparrow$, 减小供油量, 控制涡轮前燃气温度, 使涡轮功率等于压气机功率

目的: 必须随着发动机工作条件的变化, 调节供油量来控制涡轮前燃气温度, 使涡轮功率等于压气机功率

2.2 发动机过渡态下的共同工作

过渡工作状态（即动态）一个稳定态过渡到另一稳态，转速在变化着的工作状态

稳态过程 不考虑发动机转速和它的工作过程参数与性能参数随时间的变化

动态过程 随
时间的变化

- ◆ 加速过程 转速增大
- ◆ 减速过程；转速减小
- ◆ 启动过程速 从 0 加速到慢车转速 也有叫过渡工作状态

a. 加速状态下压气机与涡轮的共同工作

a) 定义和方法

涡轮功率大于压气机功率叫**剩余功率** 是发动机加速的必要条件

改变发动机转速的最好方法是，借操纵供油量，**来实现改变涡轮前燃气温度，以改变涡轮功率。**

b) 加速性

加速性是发动机转速快速上升的能力，

以慢车转速上升到最大转速的时间来表示加速性的好坏

加速时间越短，越好。对**飞机的安全着陆具有重要的意义**

c) 限制供油原因

打破平衡工作的因素是**加油**

供油量增加，涡轮前燃气温度高，剩余功率大，发动机的加速性好

限制供油三个原因：

- A. 涡轮前燃气总温不能超温
- B. 不能引起压气机喘振
- C. 不能引起富油熄火

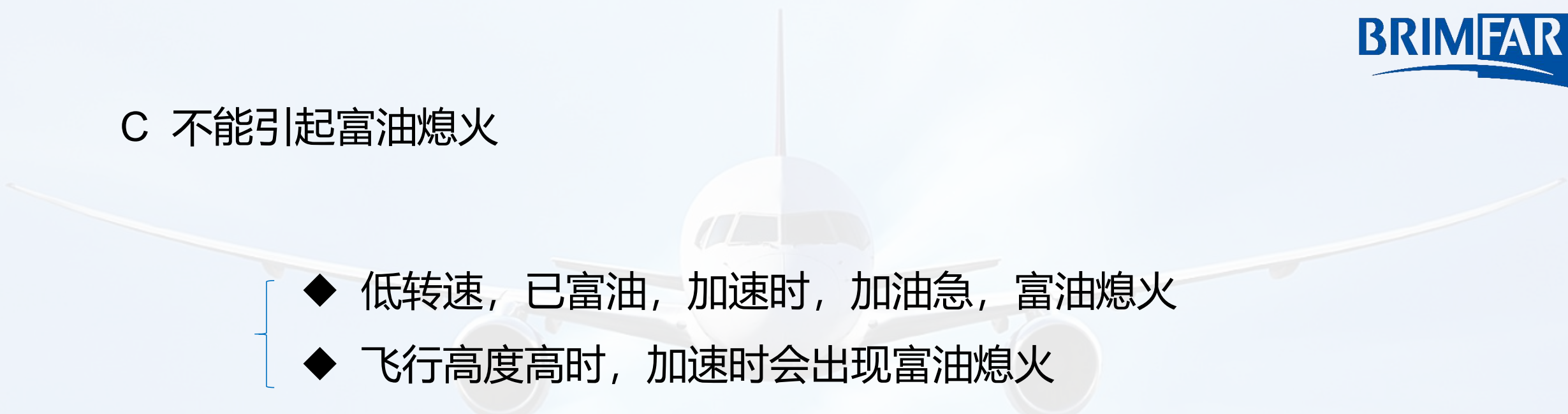
A 涡轮前燃气总温不能超温。

涡轮前燃气总温不能超温烧坏涡轮叶片的危险

B 不能引起压气机喘振

过高的涡轮前燃气总温会使曲线穿过压气机的喘振边界曲线，**不允许**

C 不能引起富油熄火

- 
- ◆ 低转速，已富油，加速时，加油急，富油熄火
 - ◆ 飞行高度高时，加速时会出现富油熄火

d) T,P,V改变加速性变化规律

T降低

P升高

V增大

→ 空气流量增大 → 剩余功率大 → 加速时间短 → 加速性好

T升高

P降低

V减小

→ 加速性变差

e) H改变加速性变化规律



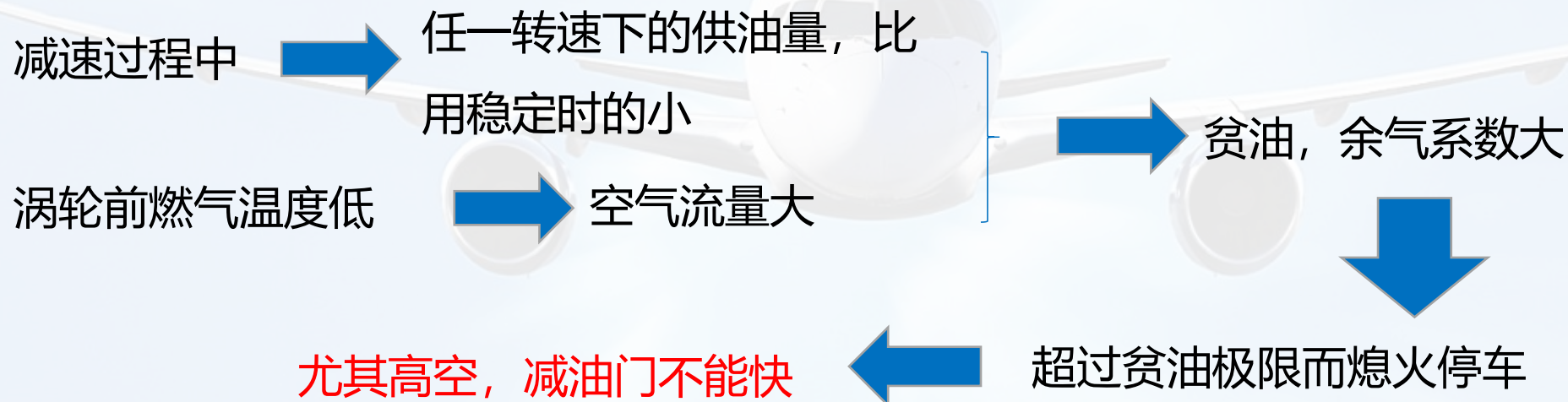
f) 结论

发动机加速性

- ◆ 高空比低空差
- ◆ 低速飞行比高速飞行差
- ◆ 夏天比冬天差

b. 减速状态下压气机与涡轮的共同工作

涡轮功率小于压气机功率



3 发动机特性

发动机特性:

发动机的推力和燃油消耗率随着转速、飞行速度和飞行高度的变化规律

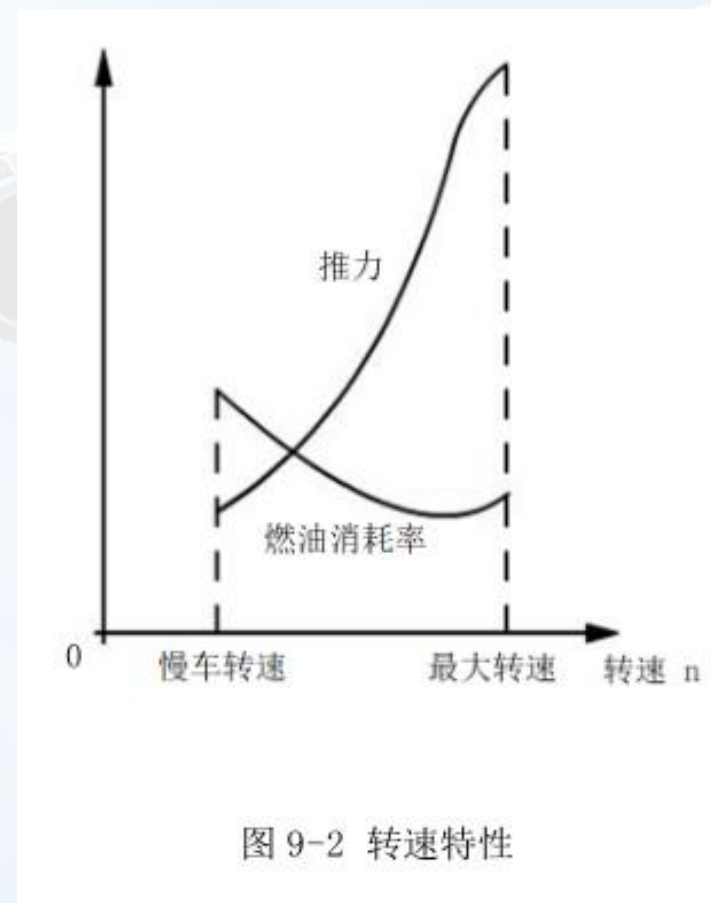
- ◆ 转速特性
- ◆ 高度特性
- ◆ 速度特性

3.1 转速特性

a 转速特性定义

高度和速度不变，推力和燃油消耗率随转速的变化

- 图示：
- ◆ 推力随转速增大增大，转速越大，推力增长的越快
 - ◆ 燃油消耗率随转速的增大而减小，接近最大转速，又略有增大



b T、P及大气湿度对转速特性影响

- ◆ T上升, ρ 减小, 同转速, 空气流量减小, 压气机增压比下降, 使发动机推力减小, 使燃油消耗率增加。
- ◆ P上升, 使总压上升, 造成流量和沿流程各截面上的总压增加, 推力增加, 但燃油消耗率不受影响
- ◆ 大气湿度上升, ρ 下降, 推力下降。
- ◆ 大气湿度上升, 燃油消耗率上升。

3.2 高度特性

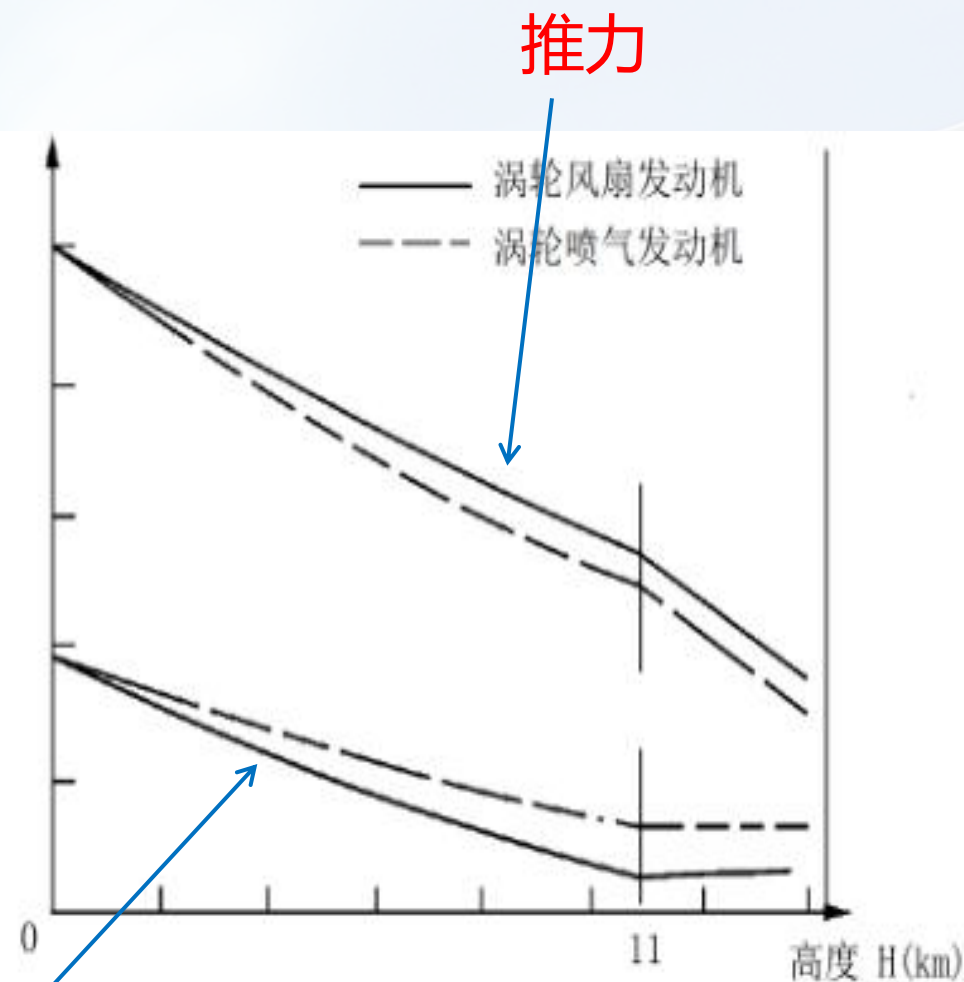
a H变化, P、T和 ρ 变化

- ◆ 11,000m以下, 随着H增加, P、T和 ρ 都下降
- ◆ 11,000m以上同温层, T不随H而变化, P和 ρ 随H的增加而继续下降

b 高度特性定义

转速和飞行速度不变，推力和燃油消耗率随高度变化

- ◆ 在对流层 $H \leq 11,000$ 米时，飞行高度的增加，推力下降，燃油消耗率下降。
- ◆ 同温层 $H > 11,000$ 米时，飞行高度的增加，推力随高度的增加而下降得更快一些，燃油消耗率保持不变。



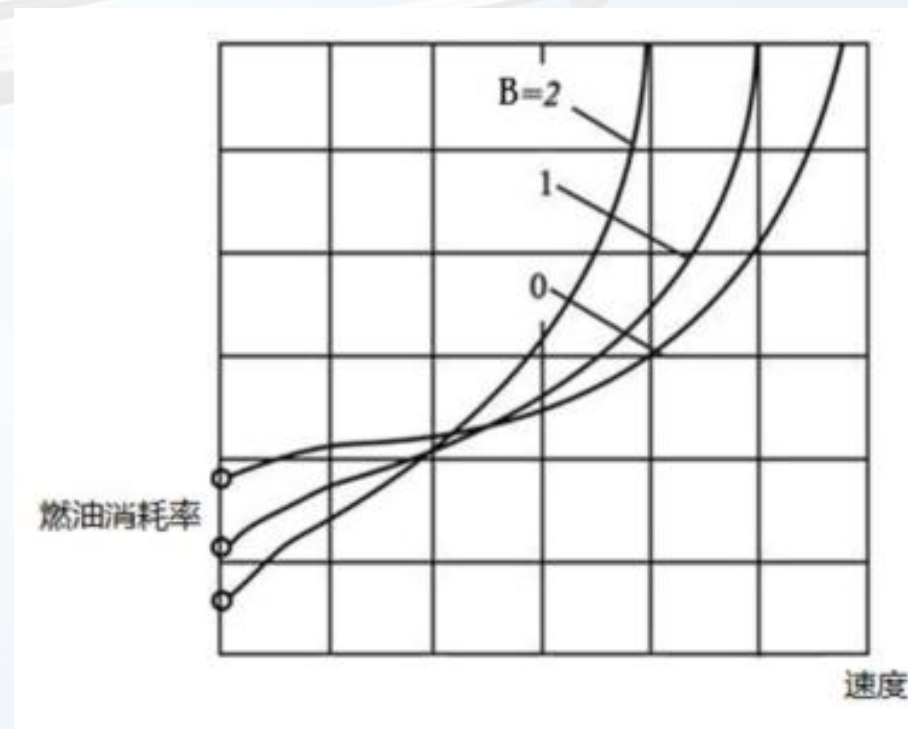
燃油消耗率

3.3 速度特性

转速和飞行速度不变,推力和燃油消耗率随飞行高度的变化

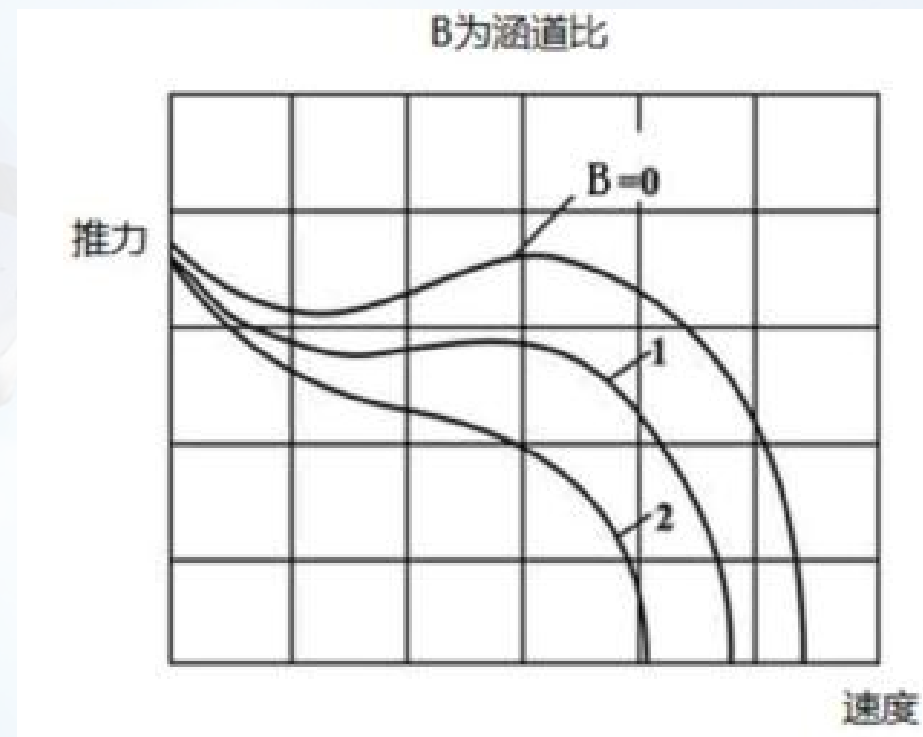
a 燃油消耗率的变化

随马赫数的增大而增大, 且在高马赫数范围增加得更为急剧




b 推力的变化

马赫数的增大，发动机的推力开始略有下降或缓慢增加，而在超音速范围内增加较快，当马赫数继续增加时，推力转为下降，直至推力为零



涡扇发动机推力随飞行速度与涵道比的大小有关系，
先推力减小，后推力增大，呈**马鞍形**



序号	思考题
1	发动机工作状态
2	发动机特性

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