



# M1.3 飞行原理

## 修订批准页:

1

版次	修订时间	编写/改版	修订说明	审核/日期	审批/日期
R0	2020.06.16	单展	新编课件	谈海军 /2020.08.01	张玉 /2020.08.06
R1	2021.01.29	单展	修订课件	谈海军 /2021.02.01	张玉 /2021.02.02
R2	2021.7.26	单展	修订课件	谈海军 /2021.07.26	张玉 /2021.07.27
R3	2021.9.13	张玉	修订课件	谈海军 /2021.09.28	张玉 /2021.11.12
R4	2022.5.12	张玉	修订课件	谈海军 /2022.05.19	张玉 /2022.05.19

## 目的与要求:

<b>目的</b>	通过本课程学习, 可以掌握飞行的操作原理, 了解旋翼机的飞行原理。
<b>要求</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 掌握飞机每个操作面的原理。</li><li>2. 掌握飞机每个操作面的稳定性原理。</li><li>3. 掌握操作性和稳定性的关系。</li><li>4. 了解基本的旋翼机原理。</li></ol>

# 课程安排:

A faint, light-colored image of a white commercial airplane is visible in the background, centered behind the table.

序号	内容	课时	试题数量
1	飞机运动基础	4H	4
2	飞机的稳定性	2H	2
3	飞机的操纵性	2H	2
4	旋翼机基本飞行原理	2H	2

# 目 录

1.3.1 飞机运动基础

1.3.2 飞机的稳定性

1.3.3 飞机的操纵性

1.3.4 旋翼机基本飞行原理



## 1.2.1 飞机运动基础 (4H)

目  
录

1

空中运动的自由度

2

飞机运动参数

3

载荷平衡与载荷系数

4

巡航飞行、起飞和着陆

5

等速爬升和等速下滑

6

水平转弯和侧滑

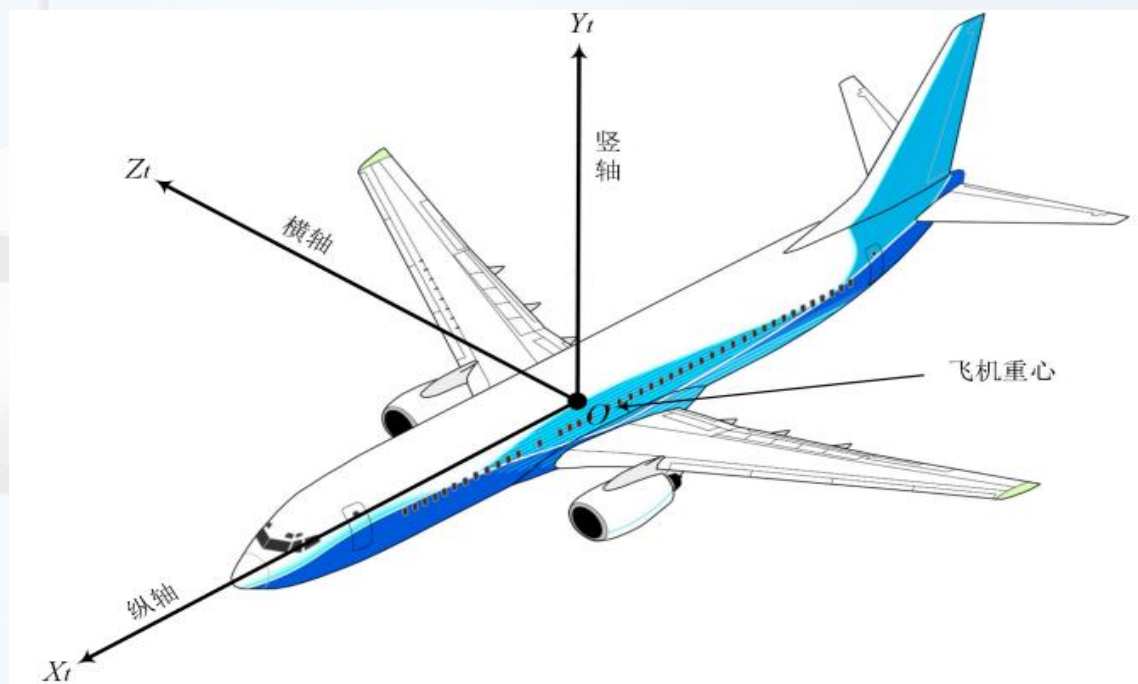
7

增升原理和增升装置

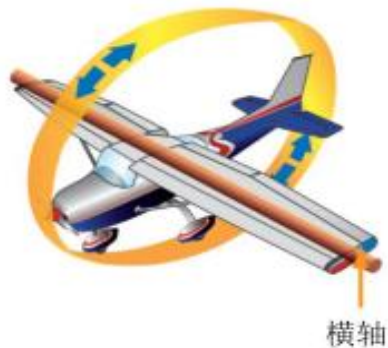
# 1.3.1 飞机运动基础

## 1、空中运动的自由度

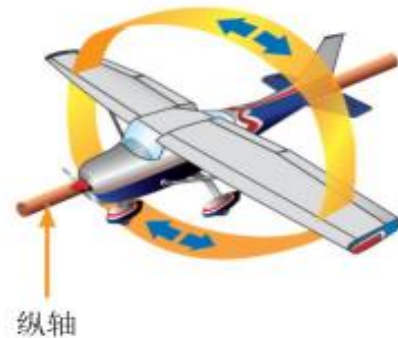
- 重力  $W$ 、重心
- 重心在机体**对称面内**
- 飞机运动轨迹用重心轨迹代替
- 机体坐标
- 六个自由度



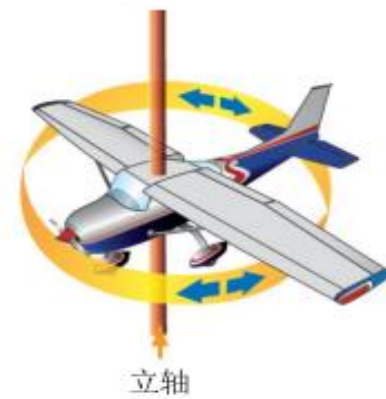
俯仰



滚转



偏航

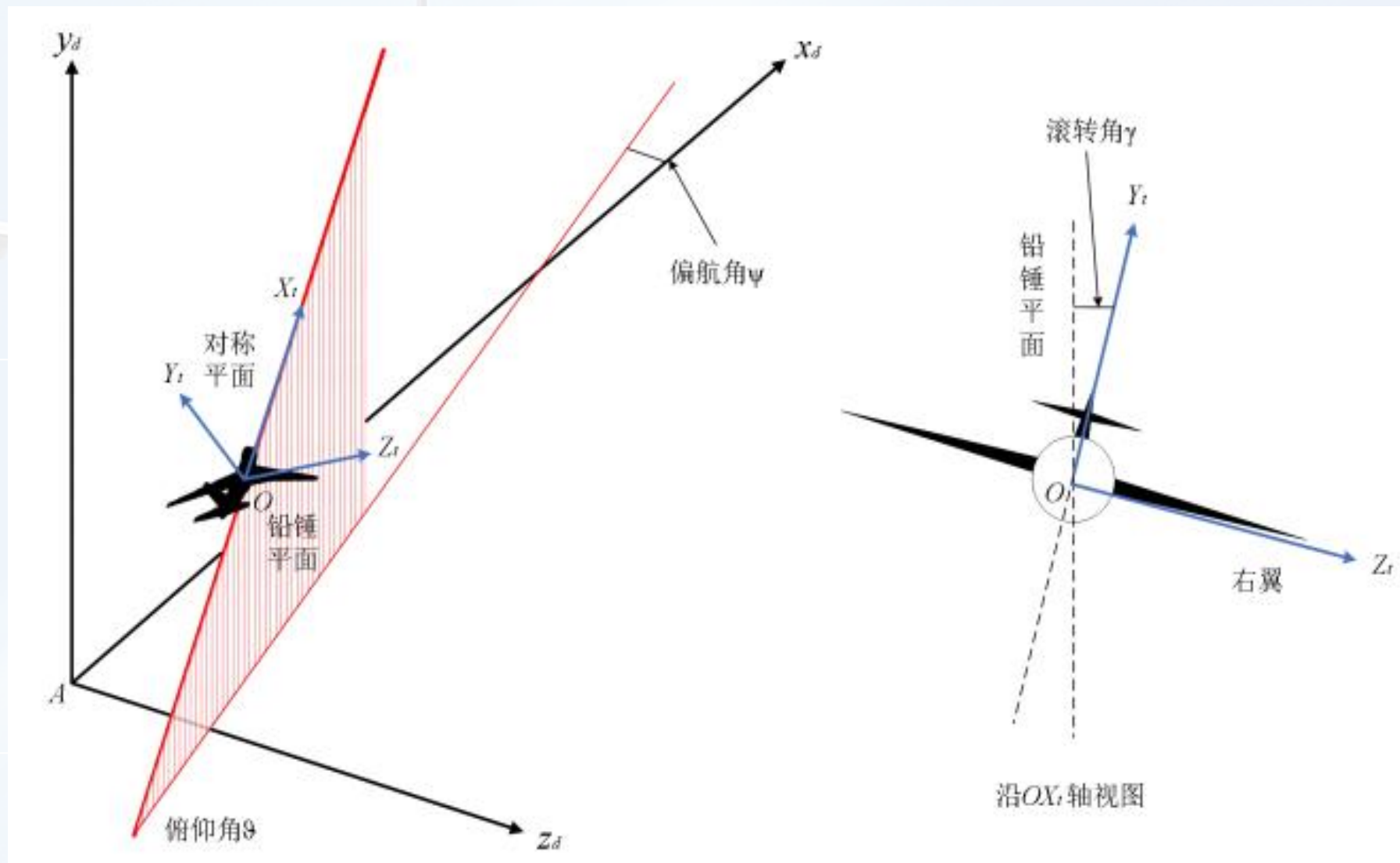


# 1.3.1 飞机运动基础

## 2、飞机运动参数

### 1) 飞机在空间的姿态

- 地面坐标系
- 俯仰角 $\vartheta$ : 上仰为正
- 偏航角 $\varphi$ : 左偏航为正
- 滚转角 $\gamma$ : 右滚转为正



## 2、飞机运动参数

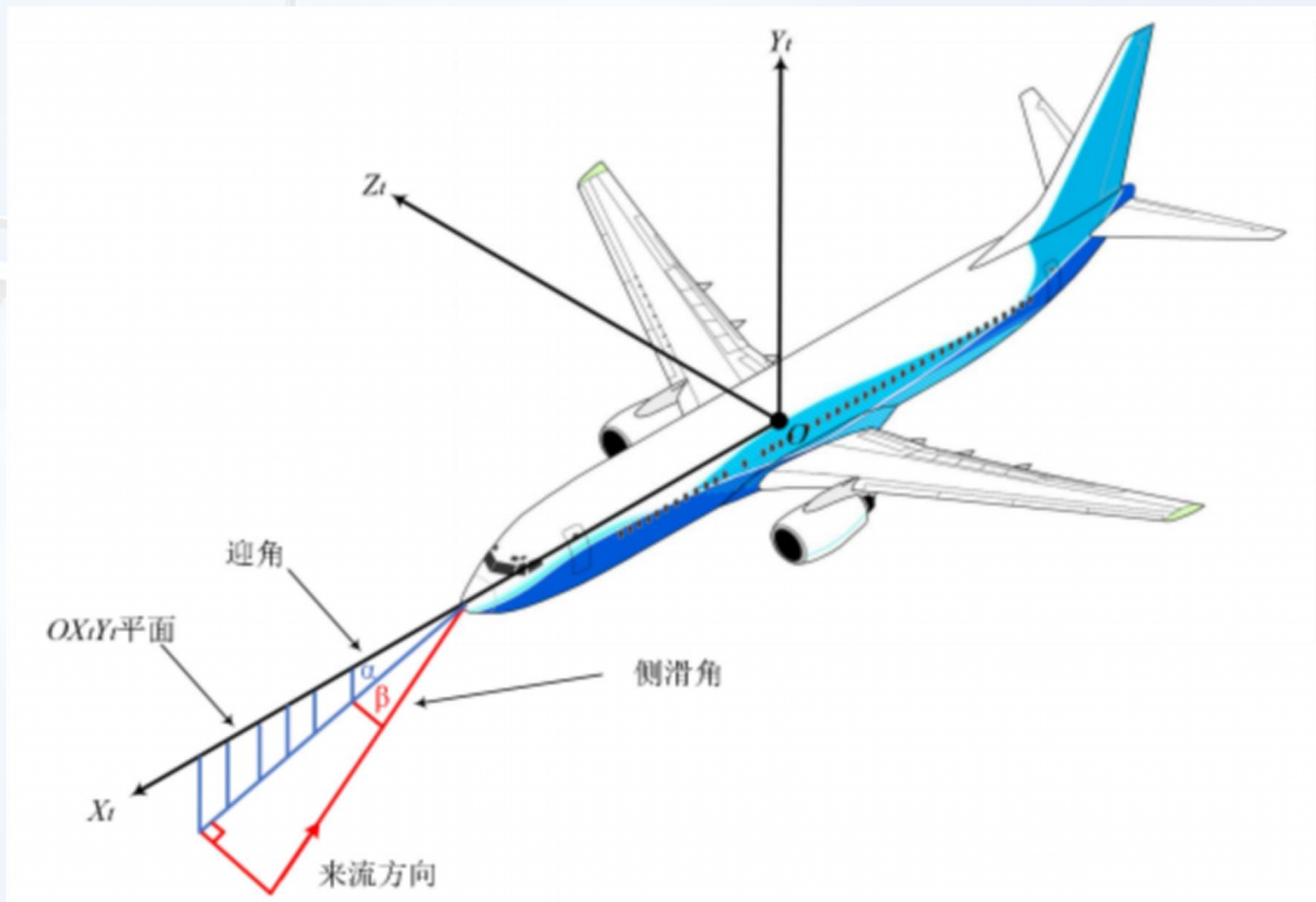
### 2) 空速向量相对机体的方位

□ 迎角  $\alpha$ :

空速向量在下方为正

□ 侧滑角  $\beta$ :

来流偏右侧时为正



## 3、载荷平衡与载荷系数

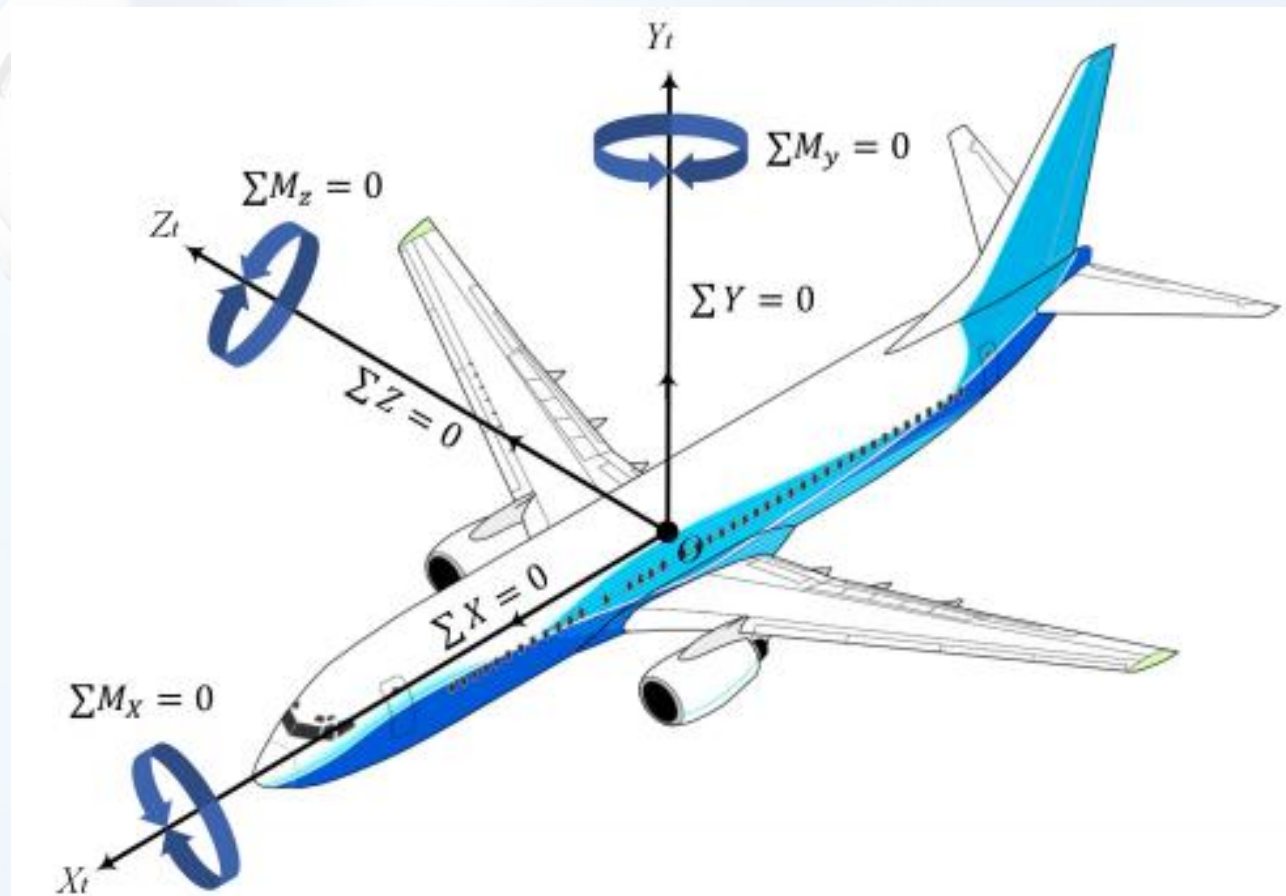
### 1) 飞行时的外载荷及其平衡方程

- 飞行中飞机上的外载荷

- 载荷平衡条件

- 定常飞行

- 3种重要的定常飞行



## 3、载荷平衡与载荷系数

### 1) 飞行时的外载荷及其平衡方程

#### □ 匀速巡航分析

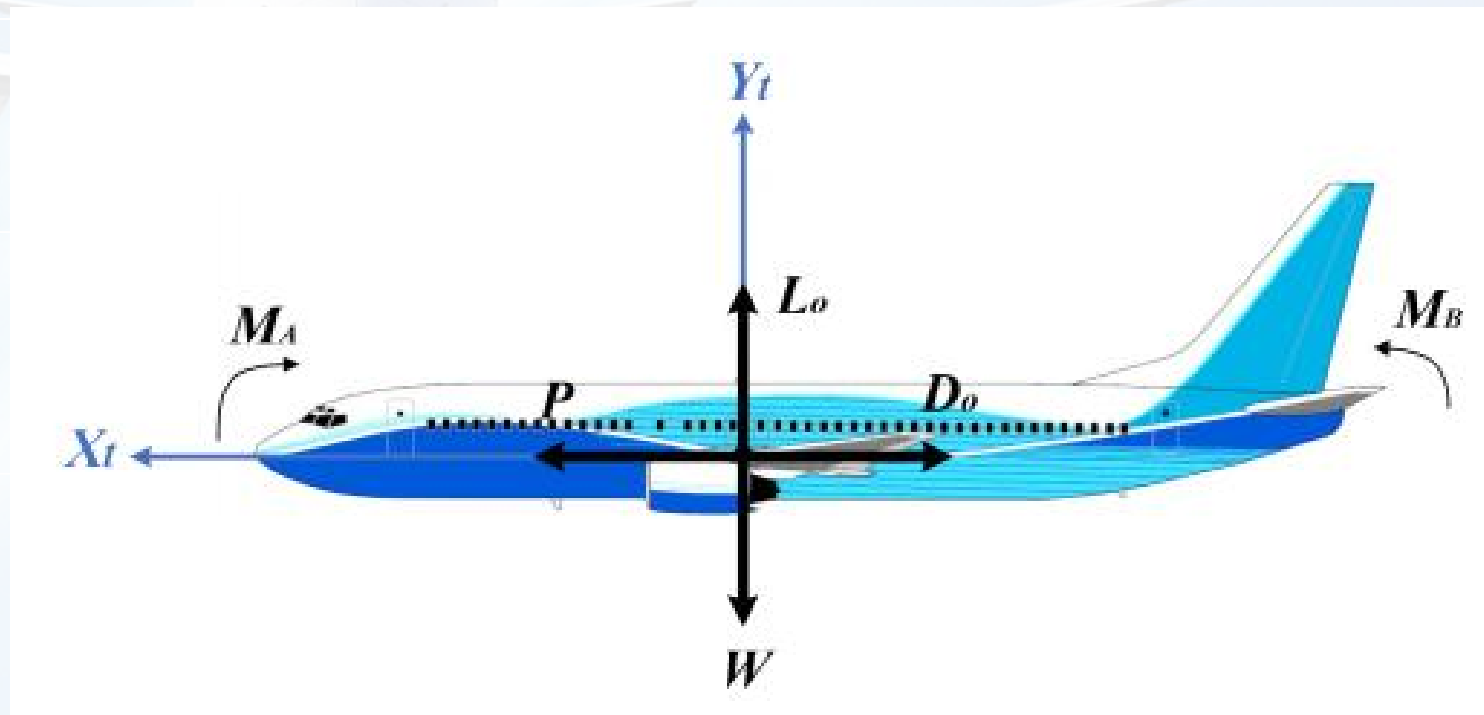
$$\sum Y = 0 \quad L_0 = W$$

$$\sum X = 0 \quad P_0 = D_0$$

$$\sum M_z = 0 \quad M_A = M_B$$

#### □ 变速运动

- ✓ 飞机水平转弯
- ✓ 进入俯冲
- ✓ 俯冲拉起



## 3、载荷平衡与载荷系数

### 1) 载荷系数(载荷因数/过载) $n$

- 反映飞机的受力情况
- 无量纲
- $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$
- $n_y = L/W$
- 代数值，有正负

- 平飞时:  $n_y = 1$
- 俯冲拉起:  $n_y$  比 1 大的多
- 进入俯冲:  $n_y$  小于 1 或为负值

- 机动过载
- 突风过载
- 正过载
- 负过载

### 小结:

- 6个自由度
- 6个方程
- 5个运动参数
- 2种过载(机动/突风或正/负)
- 3种( $n_y$ )情况: ( $> < = 1$ )

## 4、巡航飞行、起飞和着陆

### 1) 巡航飞行

- 平飞所需速度
- 平飞需用推力
- 平飞所需功率
- 最大平飞速度
- 最小平飞速度
- 飞机平飞速度范围
- 巡航性能



下面将逐一介绍：



## 4、巡航飞行、起飞和着陆

### 1) 巡航飞行

#### (1) 平飞所需速度

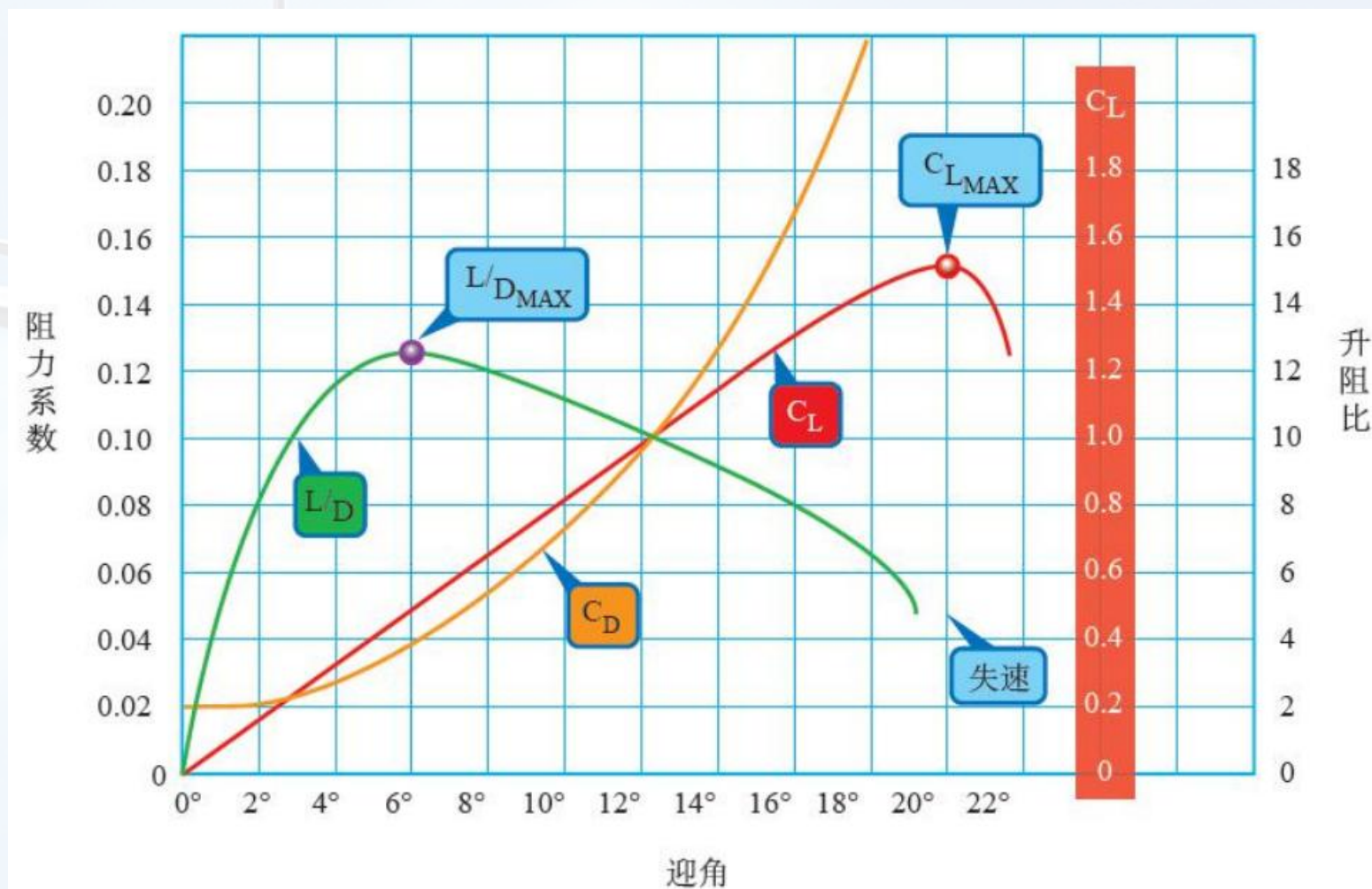
$$v_{\text{平飞}} = (2W/C_L \rho S)^{\frac{1}{2}}$$

#### (2) 平飞需用推力

$$P_0 = D_0 \quad \text{与 } H, Ma \text{ 有关}$$

#### (3) 平飞所需功率

$$N_{\text{平飞}} = P_{\text{平飞}} \cdot v_{\text{平飞}}$$



**迎角增加，速度减小；迎角减小，速度增加**

# 1.3.1 飞机运动基础

## 4、巡航飞行、起飞和着陆

### 1) 巡航飞行

#### (4) 最大平飞速度

- 满油门或额定状态
- 最高稳定平飞速度
- 高度增加，减小
- 受可用推力限制
- 受结构承载能力限制
- **巡航高度上才有意义**

#### (5) 最小平飞速度

- 最低稳定速度
- 受 $CL_{max}$ 限制
- 比失速速度大一些
- 受可用推力限制
- 高度增加，增大

#### (6) 飞机平飞速度范围

- 范围越大，平飞性能越好

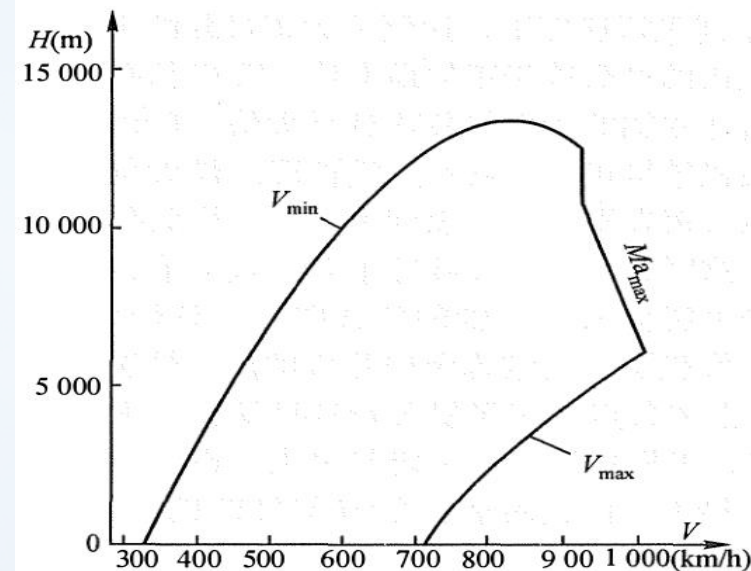


图 3-7 亚音速客机平飞包线

## 4、巡航飞行、起飞和着陆

### 1) 巡航飞行

#### (7) 巡航性能

##### □ 巡航速度

每千米耗油量最小的飞行速度，即达到最大航程对应的飞行速度

##### □ 航程

在无风和不加油的条件下，连续飞行耗尽可用燃油时飞行的**水平距离**

##### □ 航时（续航时间）

指飞机耗尽可用燃油时，能持续飞行的时间



## 4、巡航飞行、起飞和着陆

### 2) 起飞

□ 什么是起飞？

□ 离地速度

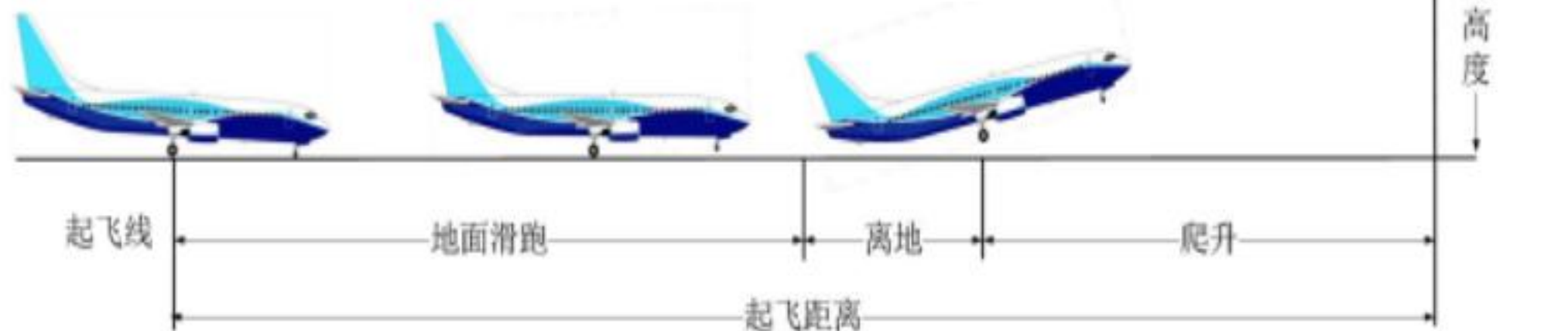
□ 起飞距离

□ 起飞的3个阶段

□ 起飞滑跑距离

□ 起飞距离影响因素

$$v_{离} = ((2W) / (C_{L离} \rho S))^{1/2}$$

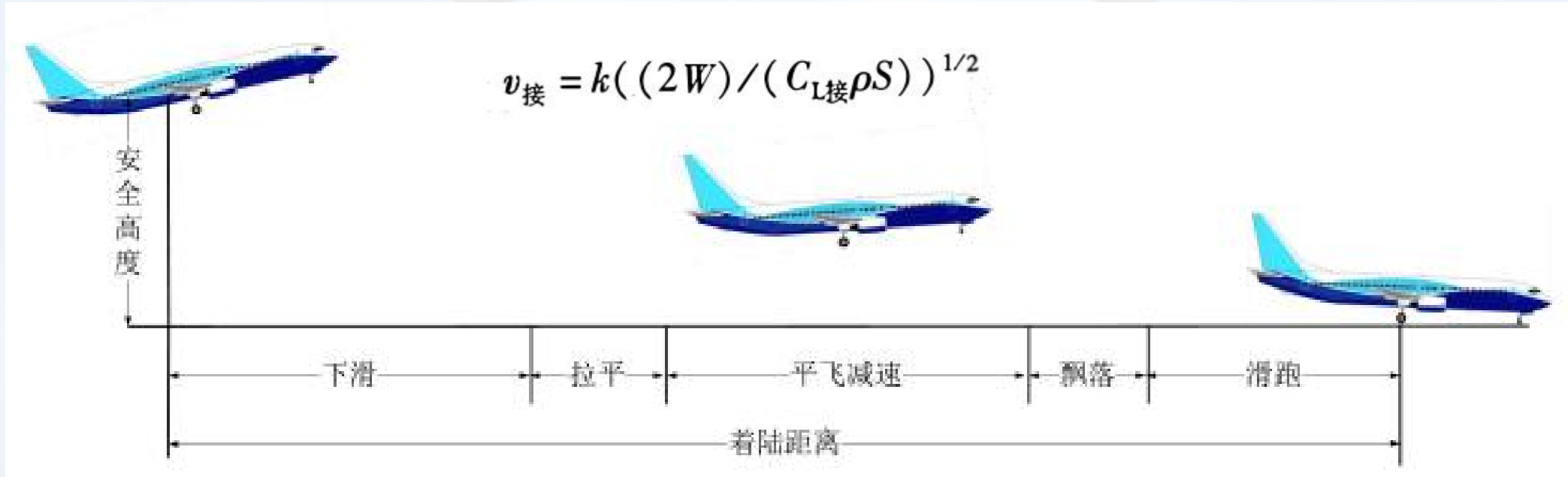


# 1.3.1 飞机运动基础

## 4、巡航飞行、起飞和着陆

### 3) 着陆

- 什么是着陆 ?
- 接地速度
- 接地速度影响因素
- 着陆的5个阶段
- 着陆滑跑距离
- 着陆滑跑距离影响因素



## 5、等速爬升和等速下滑

### 1) 等速爬升

□ 什么是等速爬升?

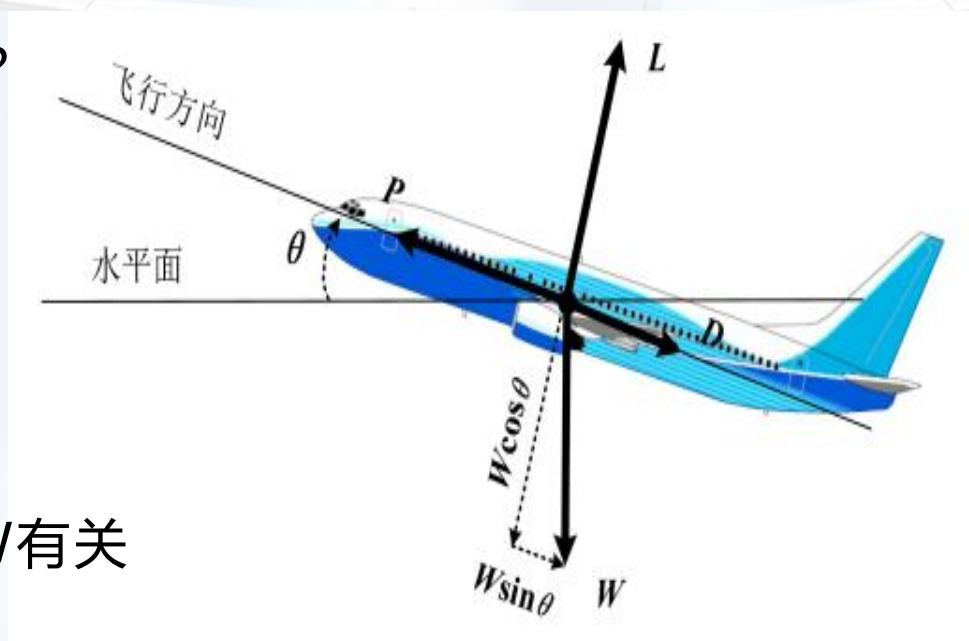
□ 受力分析

$$L = W \cos \theta$$

$$P = D + W \sin \theta$$

$\theta$ 称为爬升角

□  $\theta$ 与**剩余推力**及W有关



□ 等速爬升性能：爬升率

□ 爬升率影响因素： $\theta$ 、V、H

□ 理论升限

□ 实用升限

## 5、等速爬升和等速下滑

### 2) 等速下滑

- 什么是等速下滑？
- 受力分析

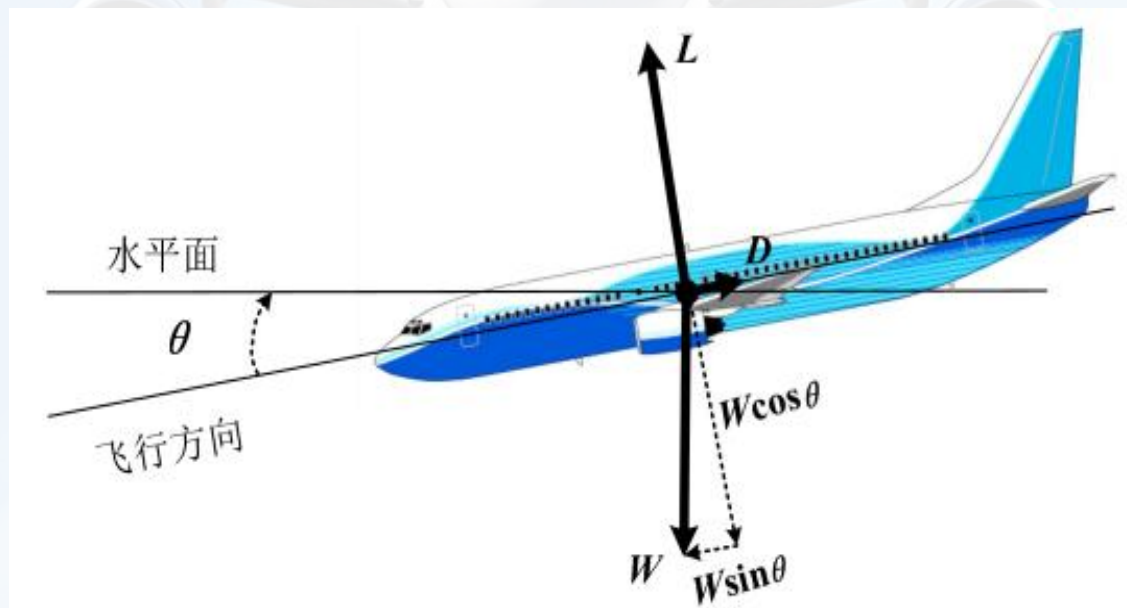
$$L = W \cos \theta$$

$$D = W \sin \theta$$

$\theta$  称为 **下滑角**


$$\text{tg} \theta = 1/K$$

K 是升阻比



- K 越大,  $\theta$  越小
- 下降高度一定时, 下降的距离就越长
- 等速下滑,  $\theta$  和下滑距离与 W 无关

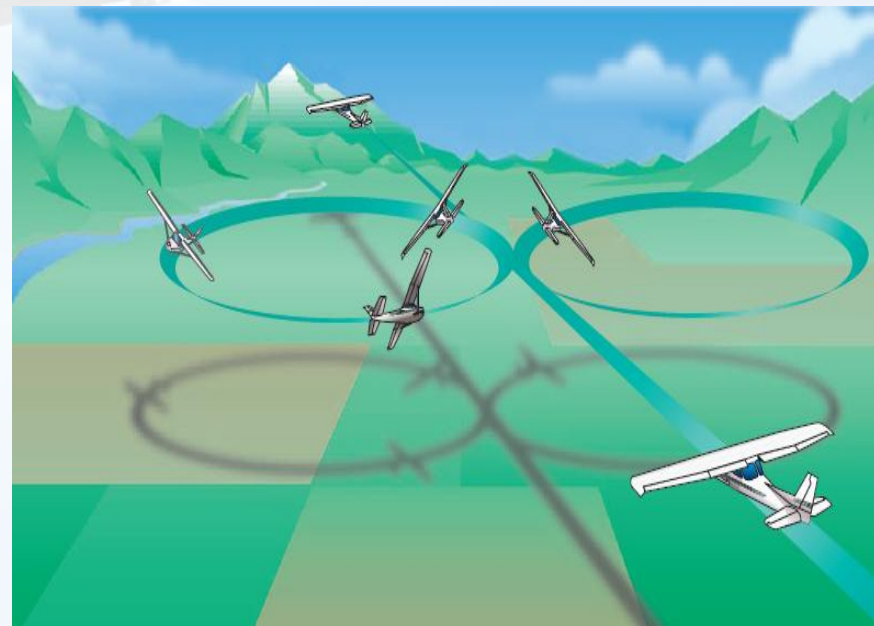
### 小结:

- 
- ① 巡航飞行的平衡条件
  - ② 起飞的三个阶段：地面滑跑，离地拉起、空中加速爬升
  - ③ 着陆的五个阶段：下滑，拉平、平飞减速、接地、着陆滑跑
  - ④ 等速爬升和等速下降是匀速运动

### 6、水平转弯和侧滑

#### 1) 什么是水平转弯

- 飞机在水平面内连续改变飞行方向的曲线运动
  - ✓ 水平盘旋
  - ✓ 水平转弯
- 正常水平转弯是一种无侧滑的，匀速圆周运动，飞行高度也不发生变化



# 1.3.1 飞机运动基础

## 6、水平转弯和侧滑

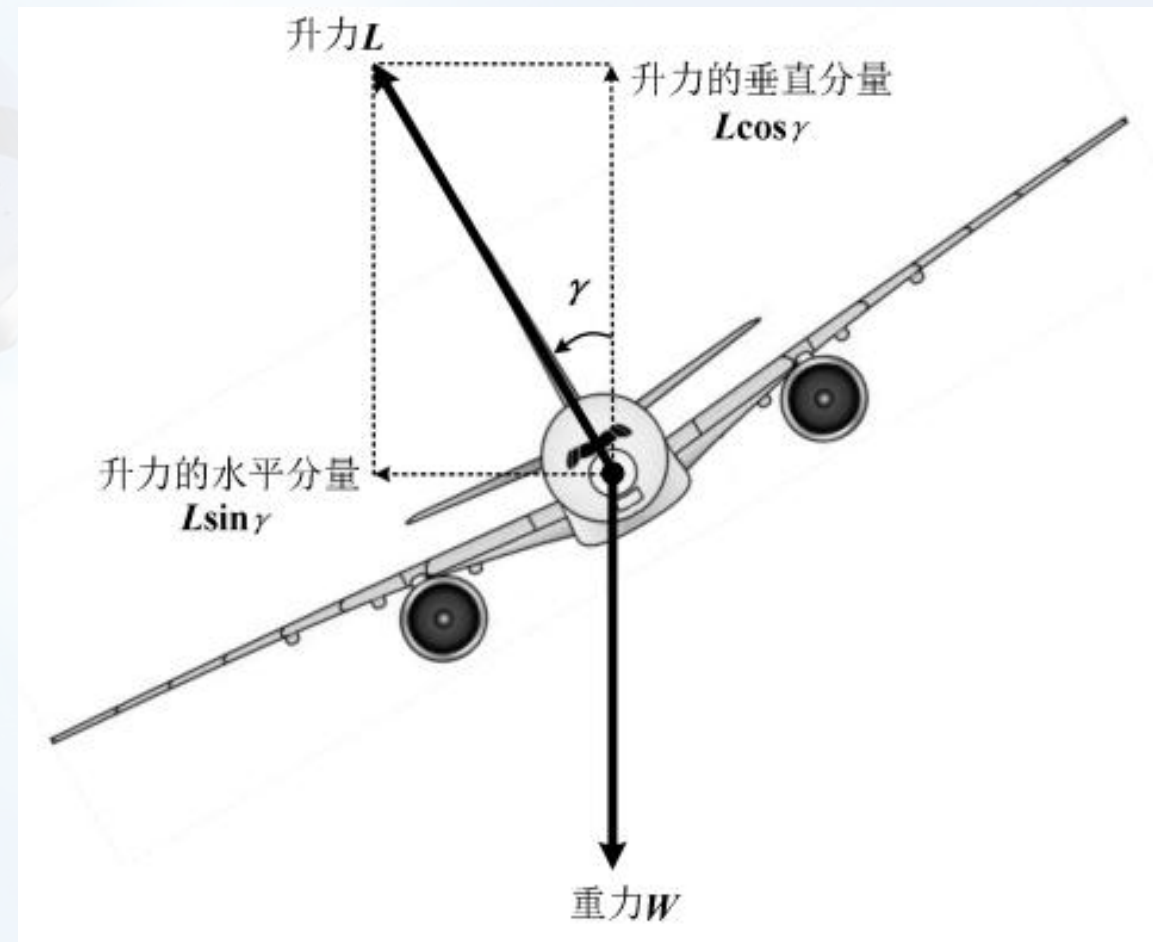
### 2) 作用在飞机上的外载荷

$$\left\{ \begin{array}{l} L \cos \gamma = W \quad \longleftrightarrow \text{高度不变} \\ L \sin \gamma = m \frac{V^2}{R} \quad \longleftrightarrow \text{半径不变} \\ P = D \quad \longleftrightarrow \text{速度不变} \end{array} \right.$$

$$n_y = \frac{1}{\cos \gamma}$$

□ 向心加速度  $a_n = v^2 / R$

□  $\gamma$ , 滚转角也叫做盘旋坡度

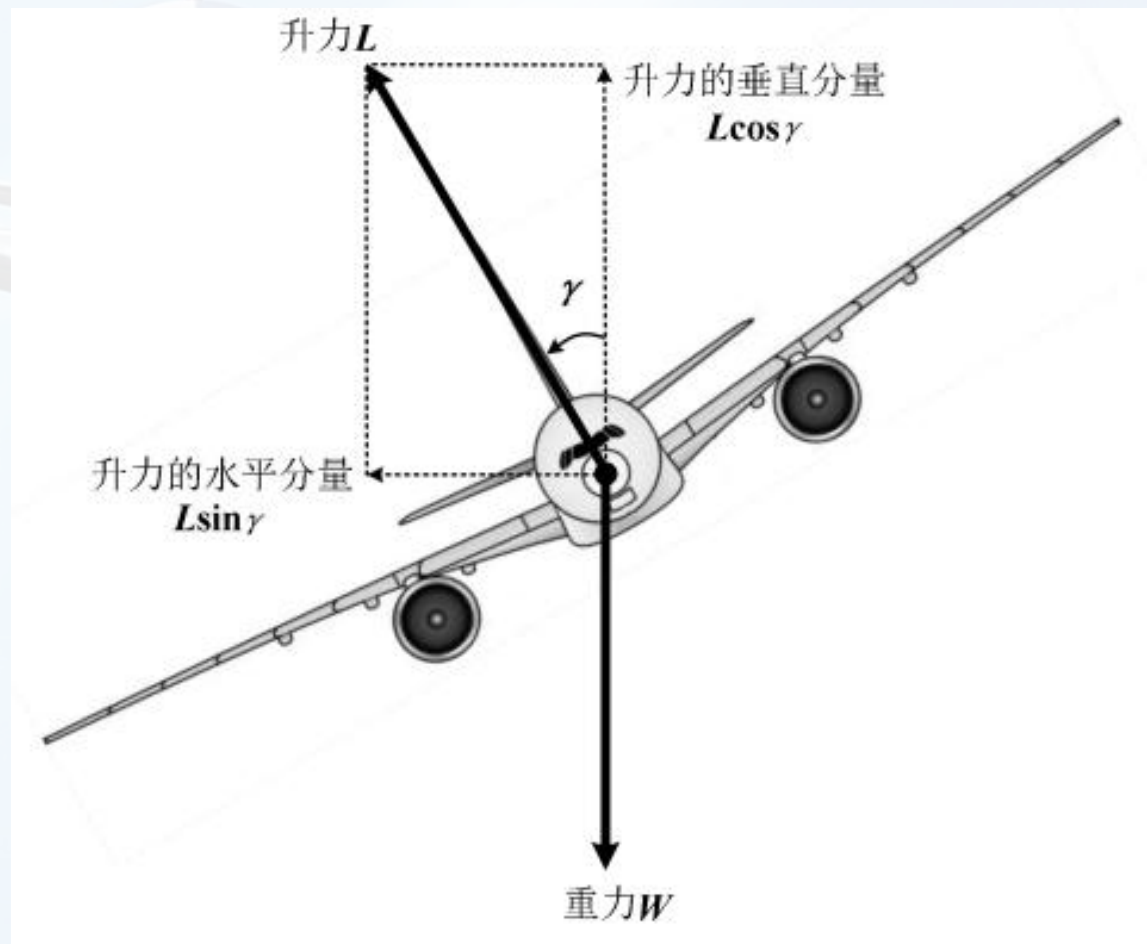


## 6、水平转弯和侧滑

### 3) 载荷系数

$$n_y = \frac{1}{\cos \gamma}$$

- $n_y$ 只取决于  $\gamma$
- $n_y$ 总是大于 1
- $\gamma$ 越大, 所需要升力越大
- $\gamma$ 为 30 度时,  $n_y=1.15$   
 $\gamma$ 为 60 度时,  $n_y=2$



## 6、水平转弯和侧滑

### 4) 飞机水平转弯性能和限制

□ 水平机动性能参数:

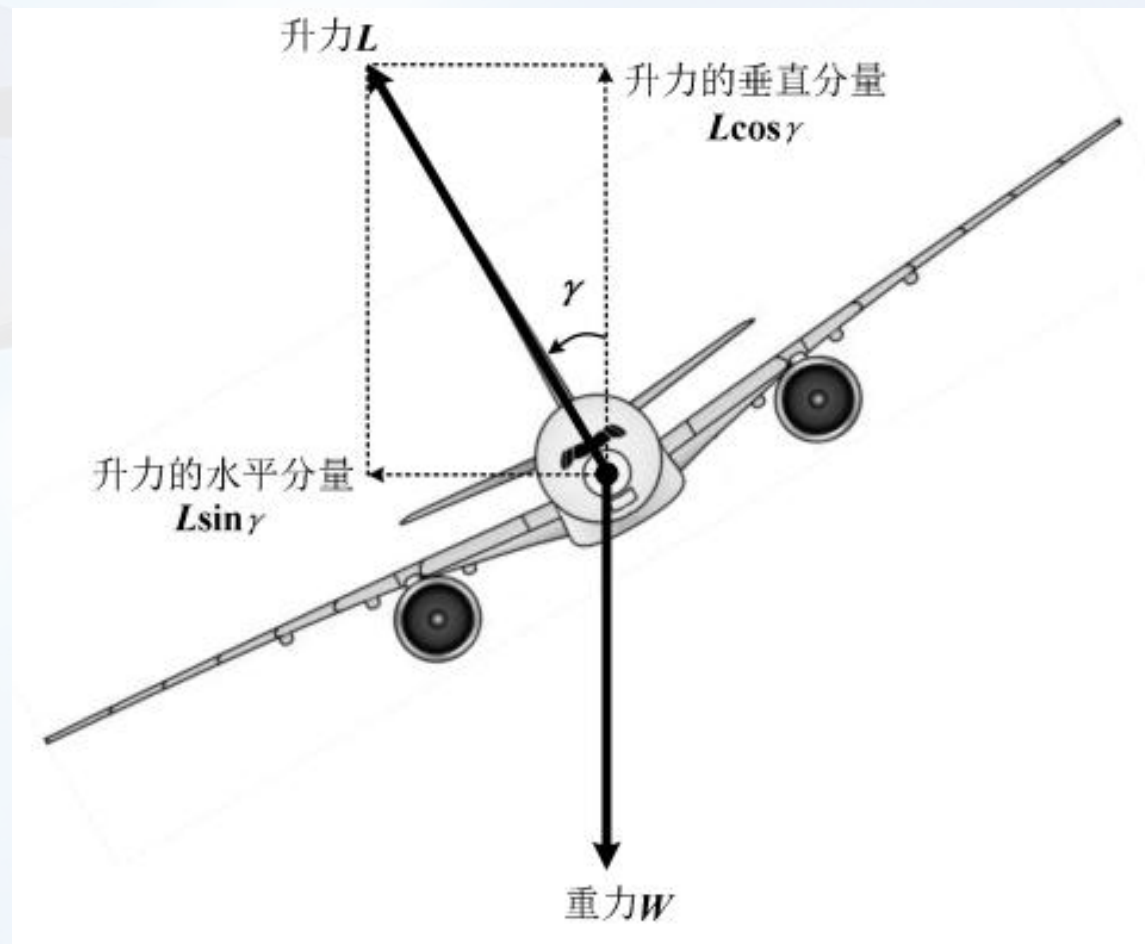
✓ 转弯半径  $R = (v^2/g) \operatorname{ctg} \gamma$

✓ 盘旋一周所需时间  $T = (2\pi v/g) \operatorname{ctg} \gamma$

□  $R$  越小,  $T$  越短, 水平机动性能越好

□  $\gamma$  不变,  $v$  越大,  $R$  越大,  $T$  越长

□  $v$  一定时, 要减小  $R$  和  $T$ , **必须加大  $\gamma$**



## 6、水平转弯和侧滑

### 4) 飞机水平转弯性能和限制

#### □ 加大 $\gamma$ 的限制:

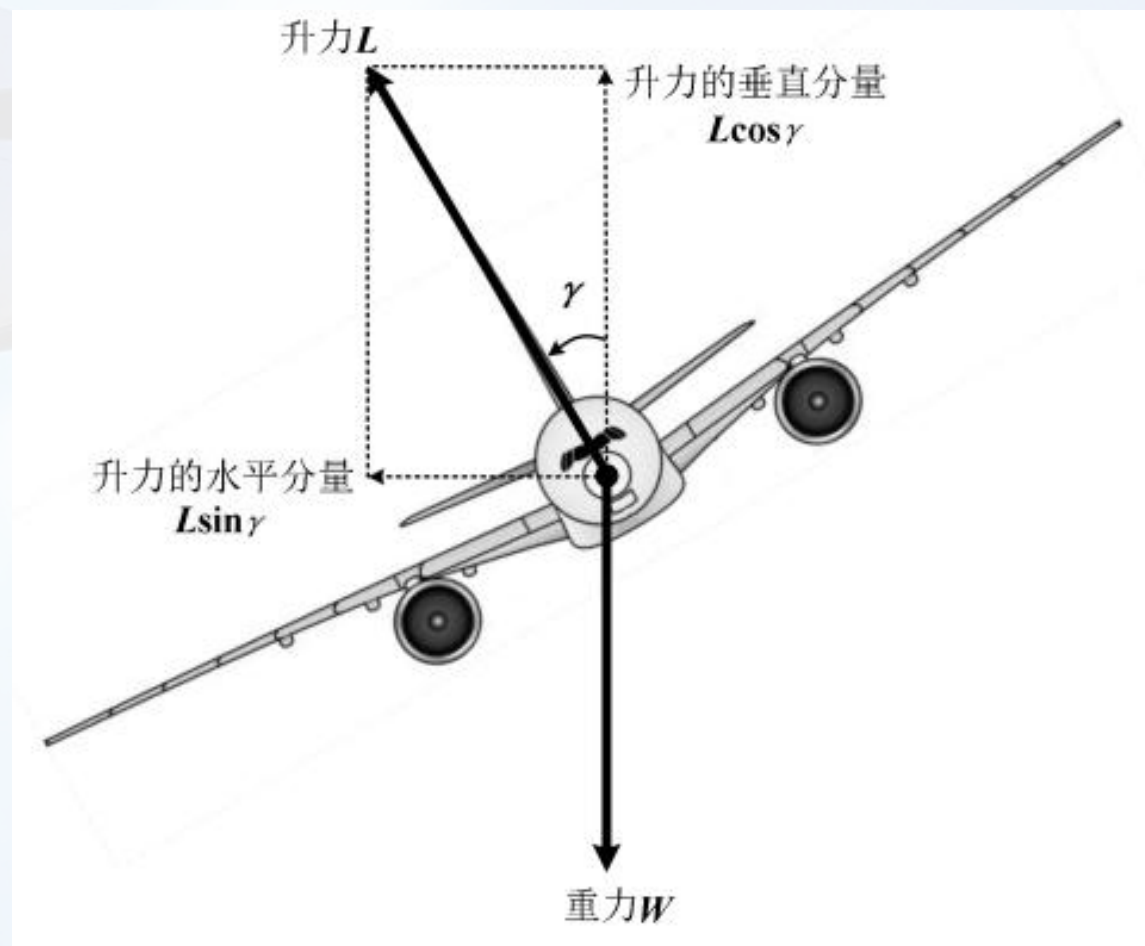
✓ 结构强度

✓ 飞行员生理条件

✓ 临界迎角 (增加 $\alpha$ , 增加L保持H)

✓ 发动机可用推力 (D增加, 增加P保持v)

$$n_y = \frac{1}{\cos \gamma}$$



## 6、水平转弯和侧滑

### 5) 水平转弯时产生的侧滑和防止侧滑的方法

□ 有关概念介绍:

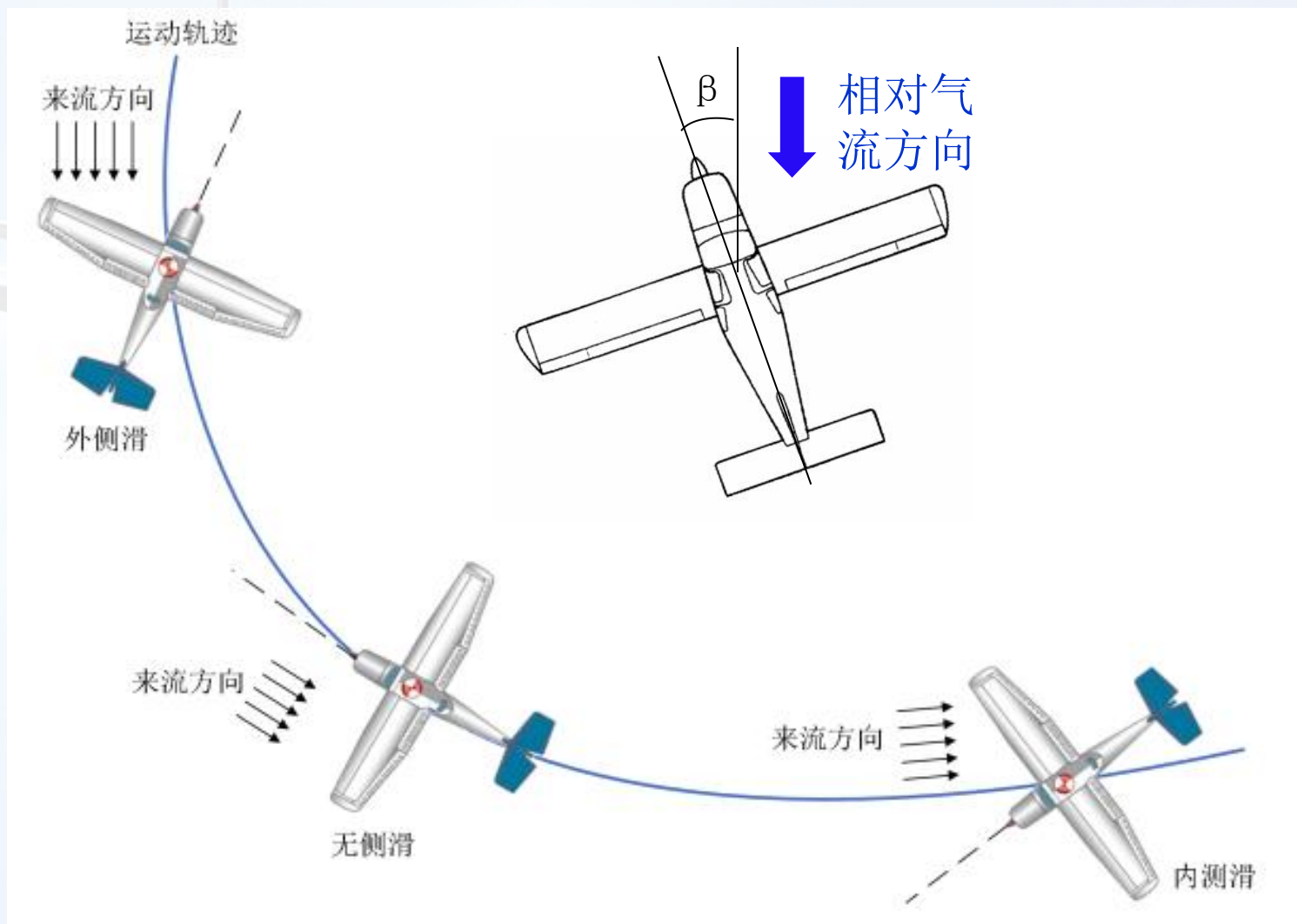
✓ 侧滑、侧滑角 $\beta$

✓ 左侧滑、右侧滑

✓ 内侧滑、外侧滑

□ 只压盘或压盘过多形成内侧滑

□ 只蹬舵或舵量过大形成外侧滑



## 6、水平转弯和侧滑

### 5) 水平转弯时产生的侧滑和防止侧滑的方法

- 侧滑产生的侧向力将引起外载荷和外载荷力矩发生变化，使飞机偏离预定的飞行状态
- 进行正常水平转弯和盘旋必须要防止发生侧滑

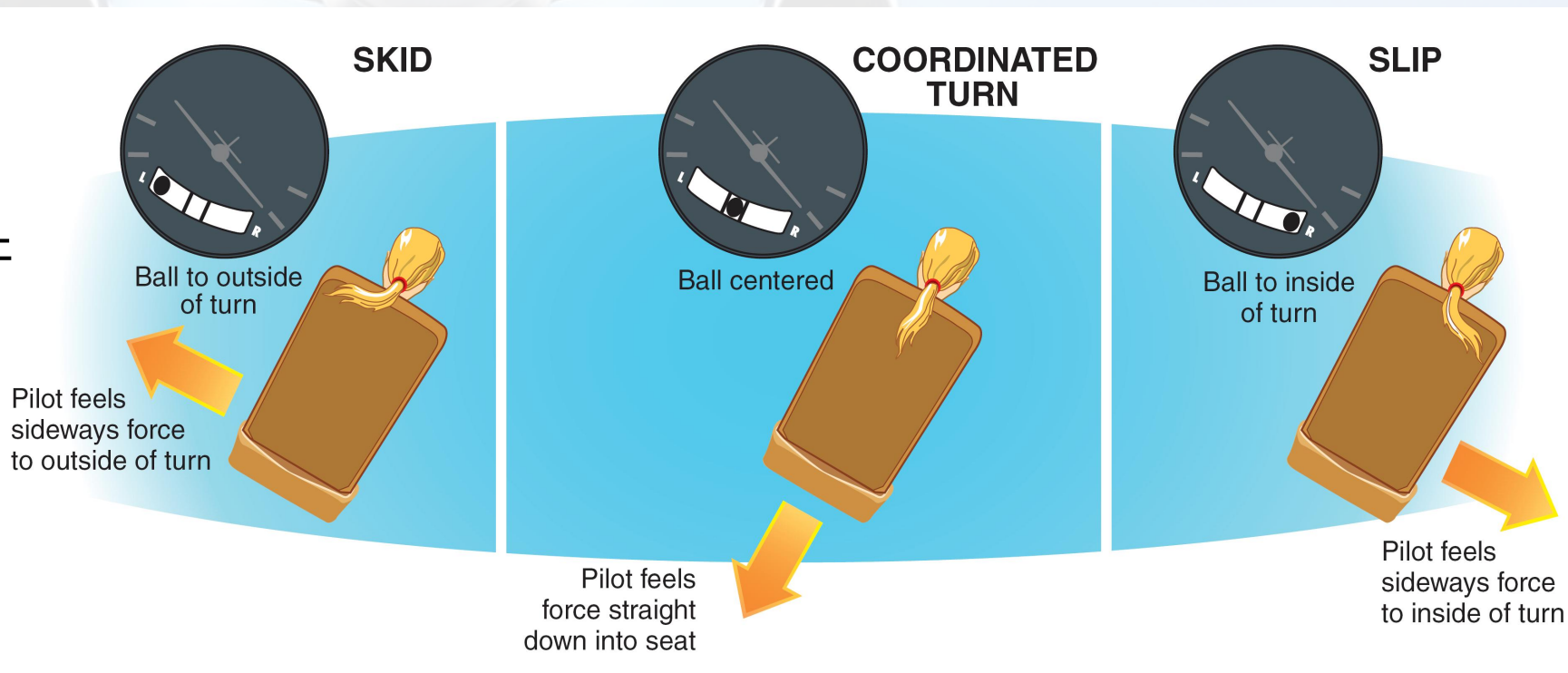
#### □ 防止侧滑的方法：

保持盘舵协调

#### □ 内侧滑：蹬舵，或打开

上偏副翼一侧的扰流板

#### □ 外侧滑：回舵



## 1.3.1 飞机运动基础

### 6、水平转弯和侧滑

#### 6) 飞机水平转弯的操纵

操纵副翼产生滚转角

保持转弯坡度不变，  
升力水平方向分量，  
提供向心力

向后拉杆，增大迎角，  
增加升力，升力垂直  
分量与重力平衡，防  
止掉高度

蹬舵或打开上偏副翼  
一侧扰流板防止侧滑

迎角增大，阻力加大，  
为了保持飞行速度，  
加大发动机推力，平  
衡增大的阻力

### □ 小结:

- 水平转弯需对副翼、升降舵和方向舵进行协调操纵
- 还要配合发动机的油门操纵，保持合适的推力
- 以保证在水平面内完成无侧滑的，匀速的圆周运动(转弯或盘旋)

### 7、增升原理和增升装置

#### 1) 增升装置的重要性

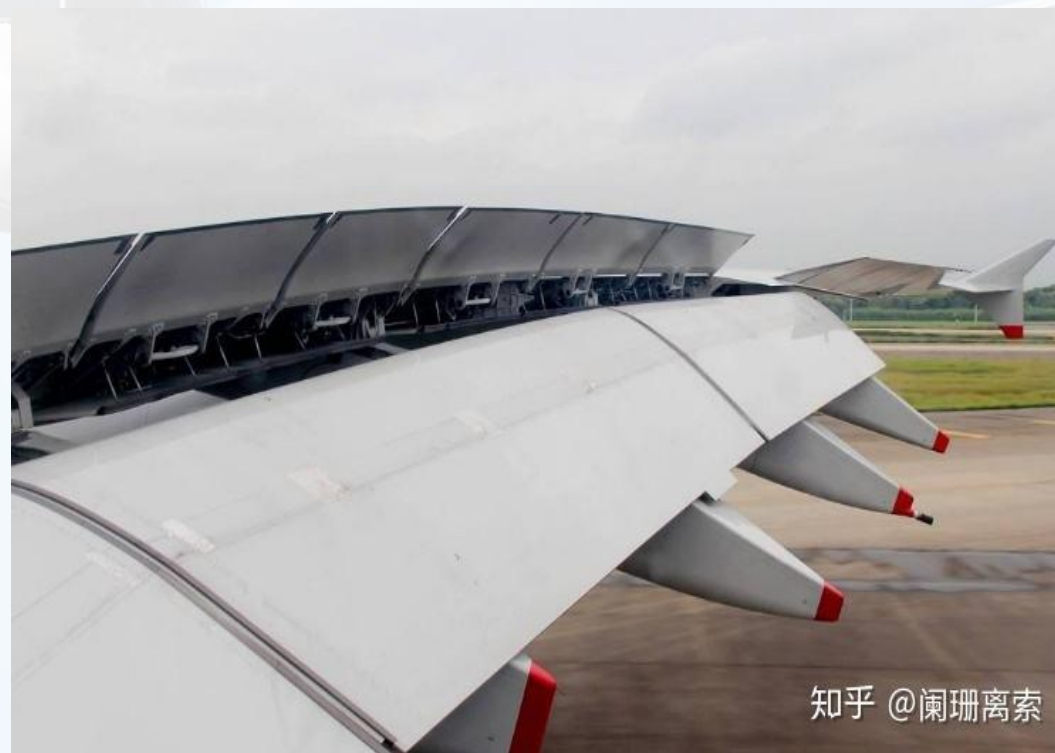
- 现代民用运输机**起飞着陆重量大**
- 高速飞机机翼在**低速下性能不好**
- 起飞离地和着陆接地速度高
- **增升装置**对于提高现代民用运输机起飞着陆安全性尤为重要



### 7、增升原理和增升装置

#### 2) 增升装置的目的

- 在较低速度下，得到较大的升力
- 降低飞机起飞着陆速度
- 改善飞机起飞着陆性能
- 提高飞机起飞着陆的安全性



### 7、增升原理和增升装置

#### 3) 增升原理

$$L=C_L \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot S$$

- 加大翼型的弯度
- 增大机翼面积
- 控制机翼上的附面层，推迟气流分离

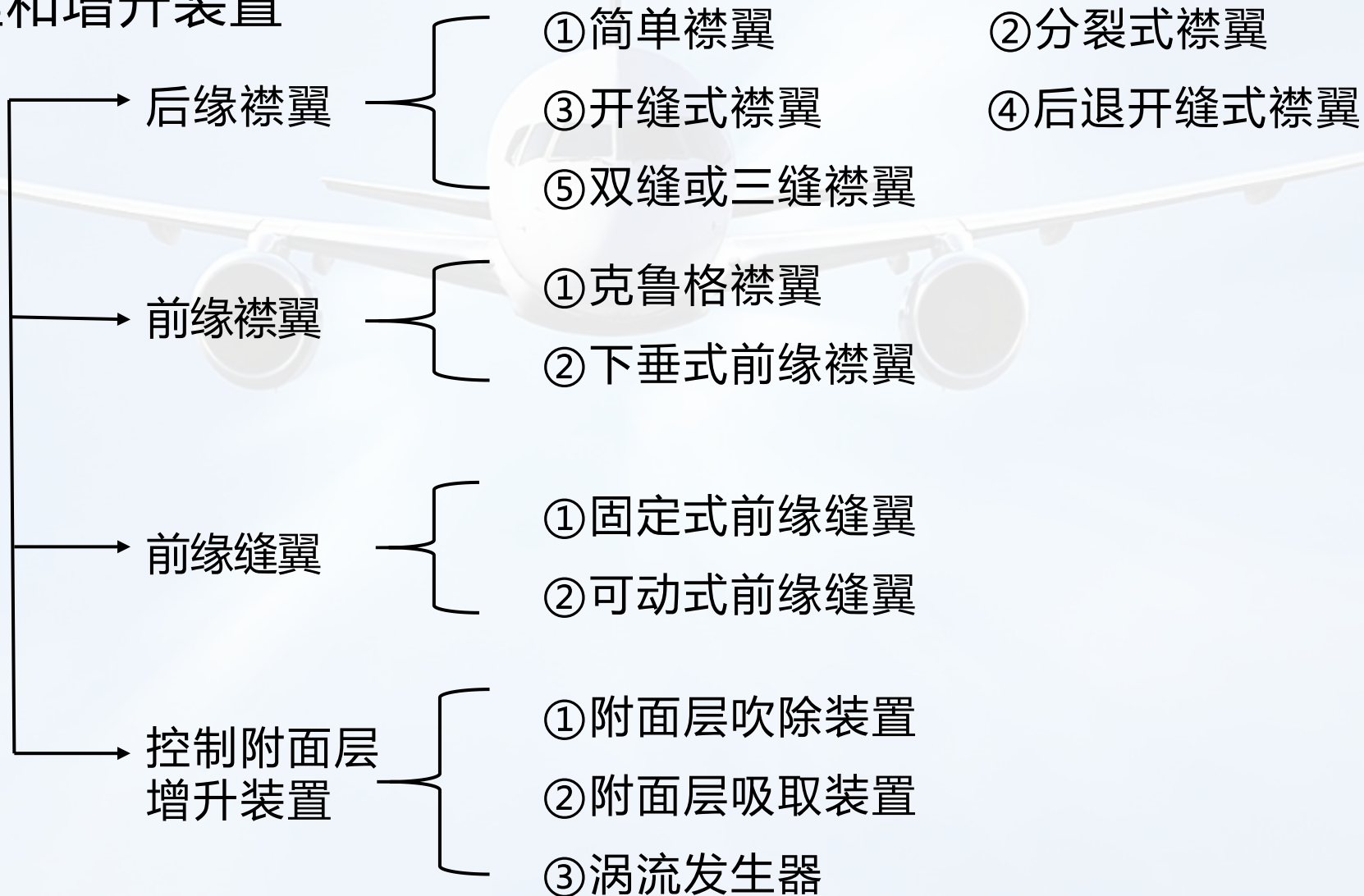


@中国商飞

## 7、增升原理和增升装置

### 3) 种类

#### 增升装置



### 7、增升原理和增升装置

#### 4) 后缘襟翼

##### (1) 简单襟翼

- 机翼后缘可绕转轴转动的小翼面
- 不使用时，闭合成为机翼后缘的一部分
- 使用时绕轴向下偏转
- 增升原理：改变机翼剖面形状，增大机翼弯度



## 7、增升原理和增升装置

### 4) 后缘襟翼

#### (2) 分裂式襟翼

□ 增升原理：增加机翼弯度



← 低压区

□ 低压区，吸引上表面气流更加快流动,增大了升力

## 7、增升原理和增升装置

### 4) 后缘襟翼

#### (3) 开缝式襟翼

- 将转轴移到襟翼前缘下表面
- 原理：
  - ✓ 增大机翼弯度
  - ✓ 形成收敛式的缝隙
  - ✓ 高压气流加速吹向上翼面
  - ✓ 输送动能，防止气流分离
  - ✓ 两种增升原理，增升效果更好



## 7、增升原理和增升装置

### 4) 后缘襟翼

#### (4) 后退开缝式襟翼



□ 也称为富勒襟翼 (Fowler)

□ 襟翼一边向后退，一边向下偏转

□ 形成收敛式的缝隙

□ 增升原理:

✓ 增大机翼弯度

✓ 增加机翼面积

✓ 控制附面层

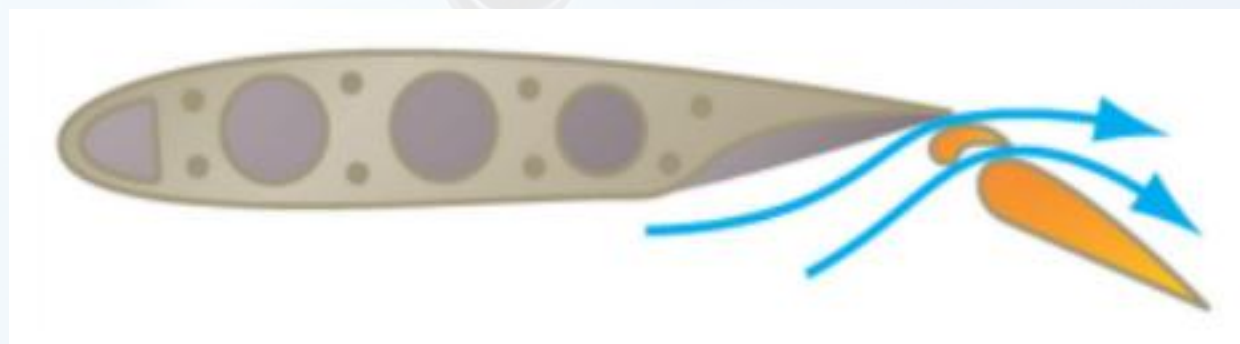
□ 增升效果特别好

### 7、增升原理和增升装置

#### 4) 后缘襟翼

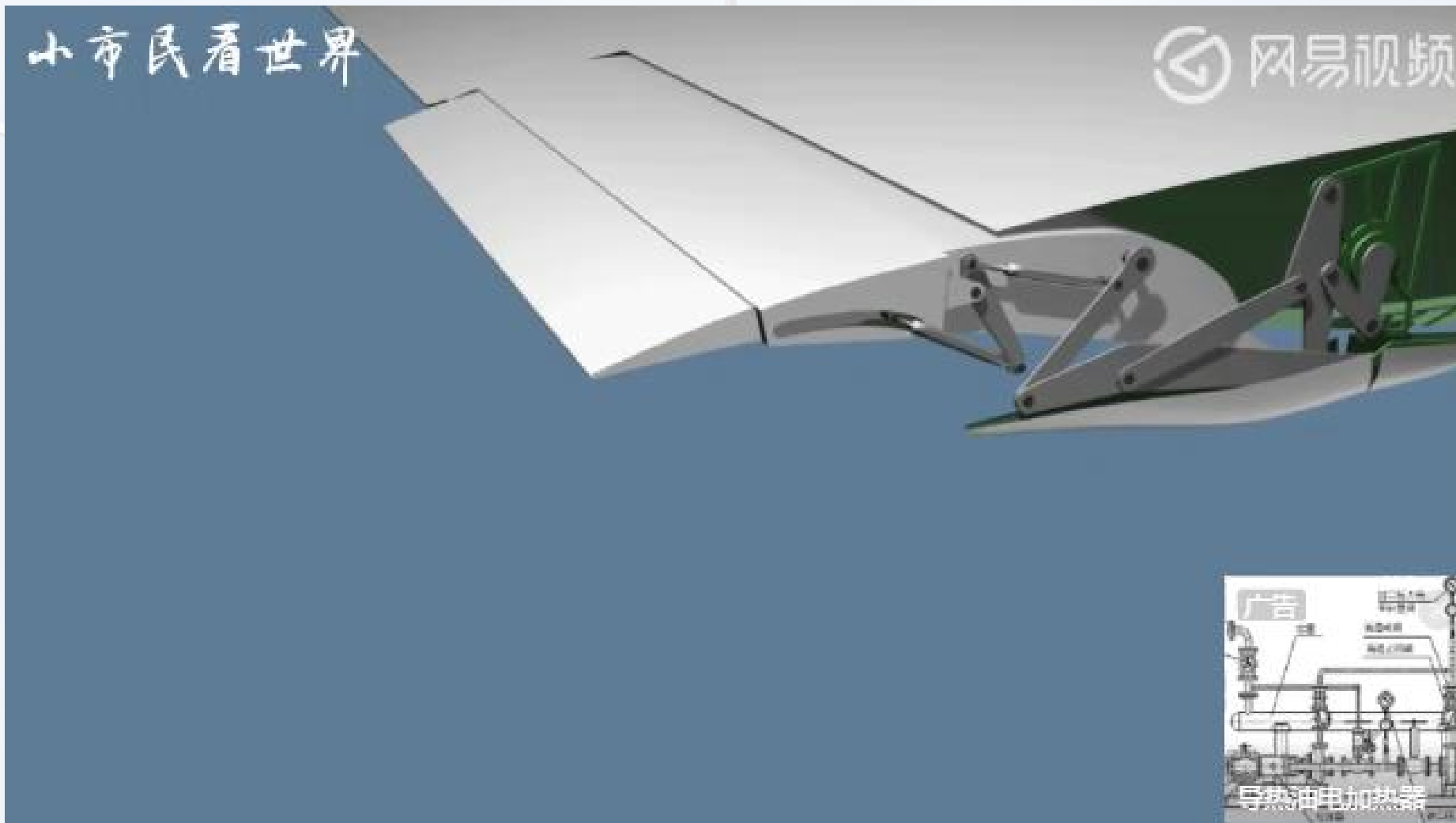
#### (5) 双缝或三缝襟翼

- 在襟翼前缘安装一或两片小翼面
- 形成两或三条收敛式缝隙
- 襟翼偏转更大的角度，也不会发生气流分离和振动
- 增升效果最好



## 1.3.1 飞机运动基础

后缘襟翼运动机构展示

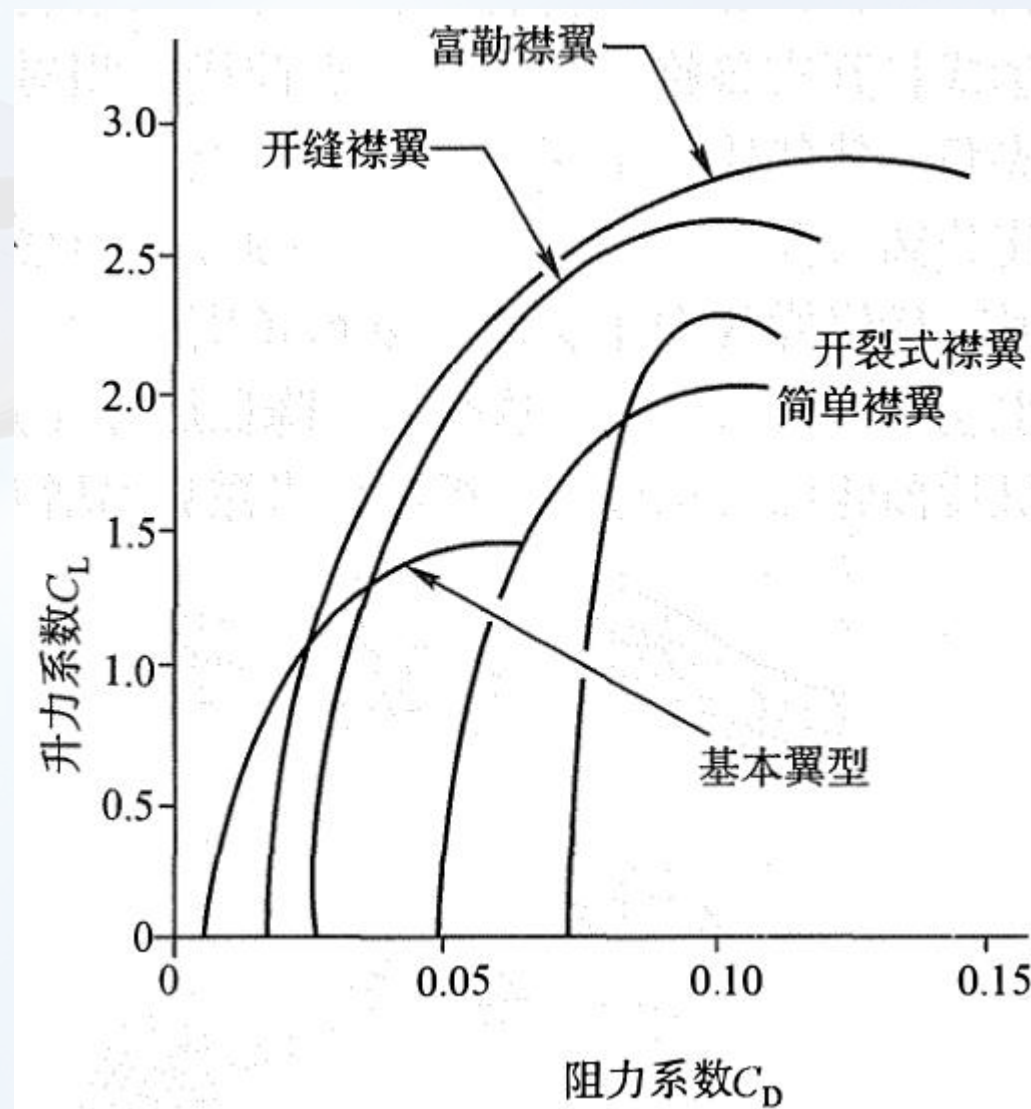


## 7、增升原理和增升装置

### 4) 后缘襟翼

#### (6)使用特点

- $C_L$ 增加 $C_D$ 也增加
- 放下角度较小时,  $C_L$ 增加比例比 $C_D$ 大
- 放下角度较大时,  $C_L$ 增加比例比 $C_D$ 小
- 起飞时, 后缘襟翼放下约20 度
- 着陆时, 后缘襟翼放下约40 度

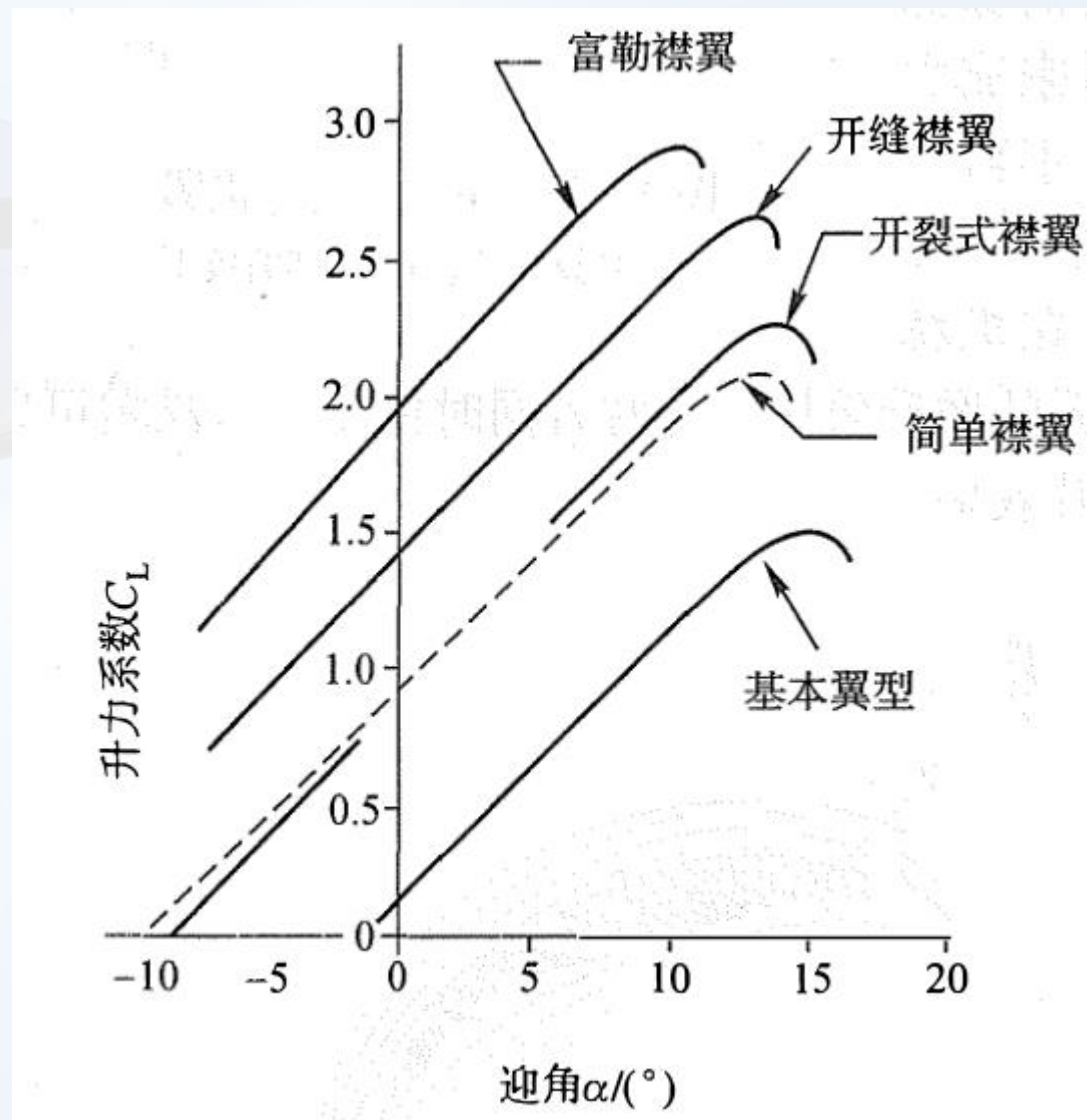


## 7、增升原理和增升装置

### 4) 后缘襟翼

#### (6)使用特点

- $C_L$ 增加，临界迎角却减少了
- 容易造成飞机失速
- 需要与前缘襟翼、前缘缝翼配合使用

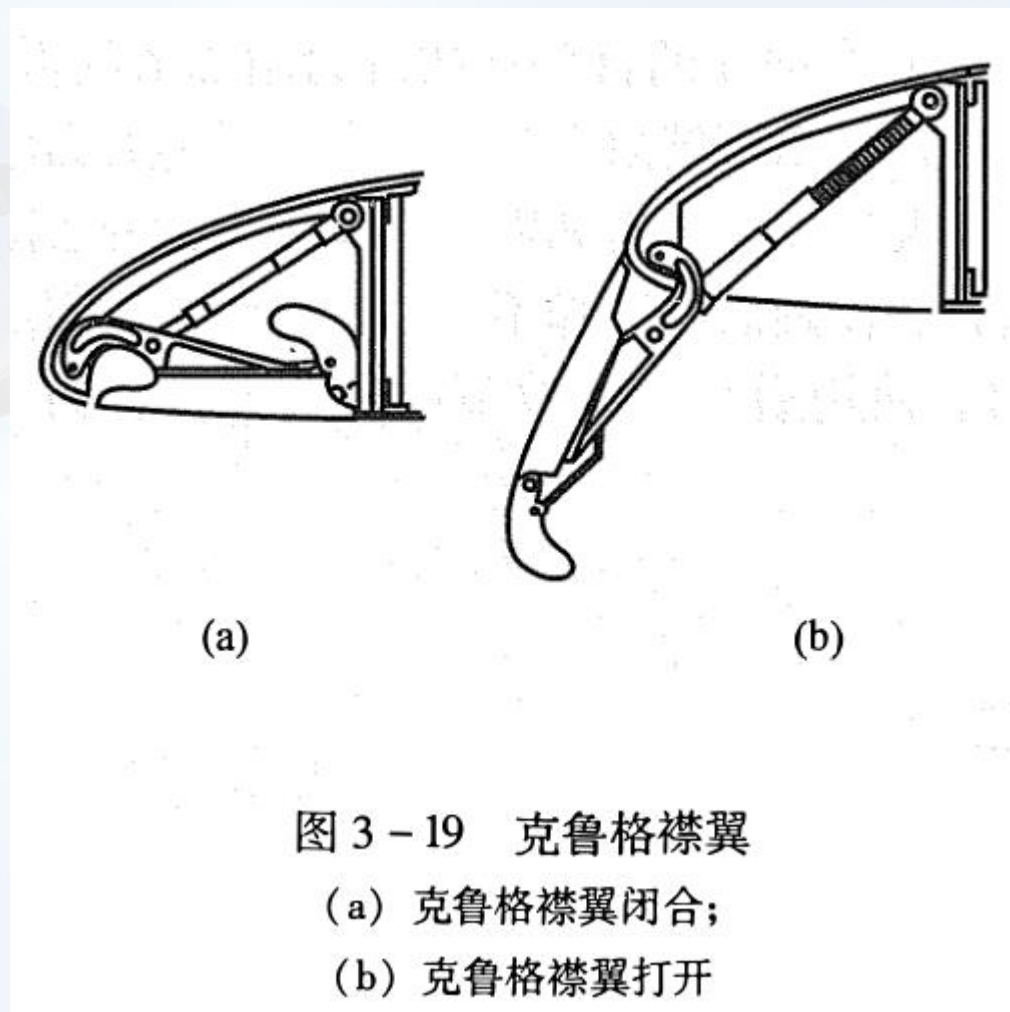


### 7、增升原理和增升装置

#### 5) 前缘襟翼

##### (1) 克鲁格襟翼 (Krueger)

- 使用时作动筒向外伸出推开克鲁格襟翼，使其绕前面的转轴转动，向前下方打开
- 克鲁格襟翼打开后，与机翼前缘之间可根据需要安排成无缝隙或有缝隙的两种



## 7、增升原理和增升装置

### 5) 前缘襟翼

#### (2) 下垂式前缘襟翼

- 可操纵的机翼前缘
- 不使用时，保持机翼前缘原形
- 使用时，在动作筒驱动下，整个前缘向下滑动，形成低垂的机翼前缘

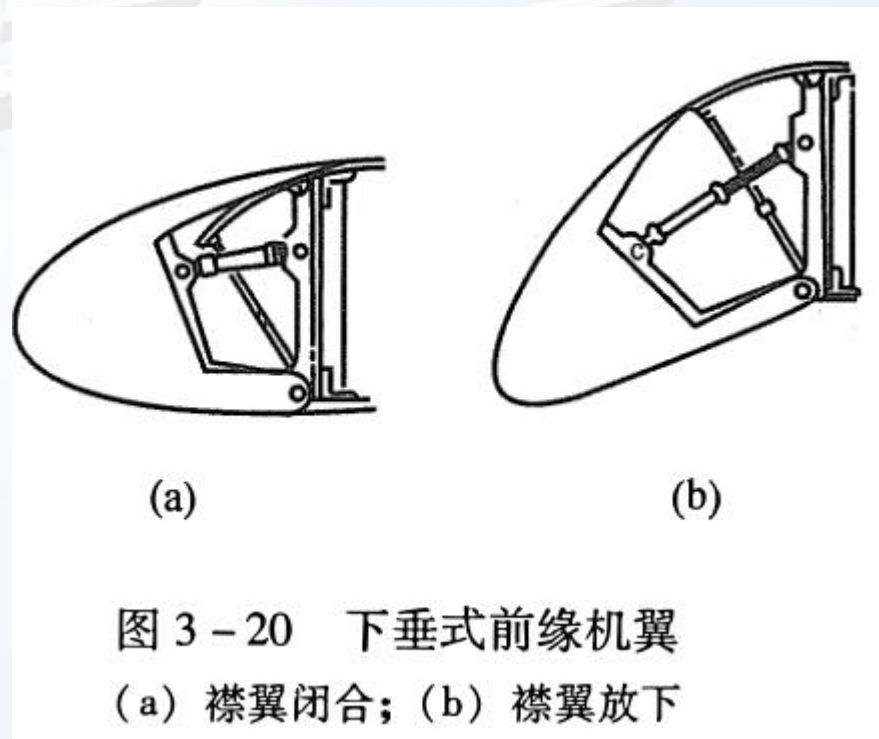


图 3-20 下垂式前缘机翼  
(a) 襟翼闭合；(b) 襟翼放下

# 1.3.1 飞机运动基础

## 7、增升原理和增升装置

### 5) 前缘襟翼

#### (3)前缘襟翼的作用

- 可减少前缘与相对来流之间的夹角，使前缘不再产生气流分离
- 后缘襟翼即使向下偏转角度不大，机翼前缘也会产生气流分离
- 同时使用前缘襟翼可以**消除机翼前缘的气流分离，提高后缘襟翼的增升效果**

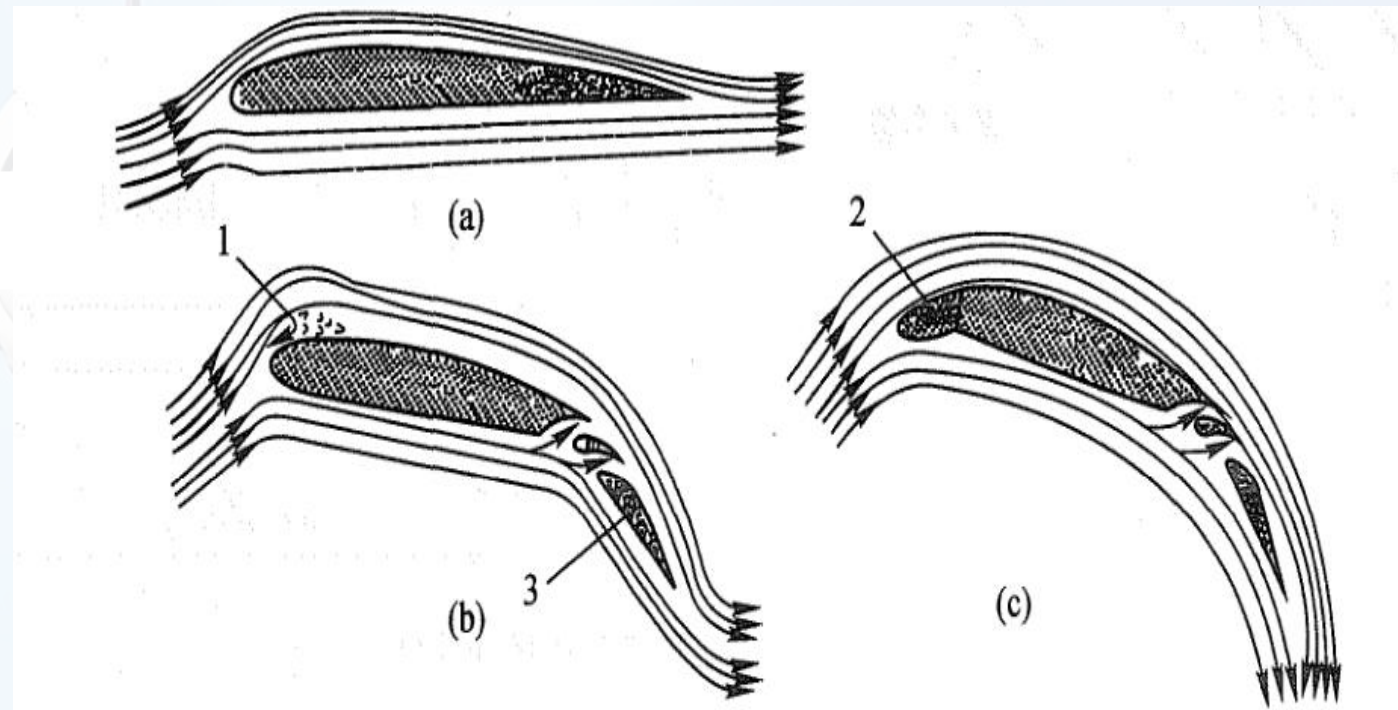


图 3-21 机翼前缘上部的局部气流分离及其消除

(a) 小冲角下的平滑气流；(b) 冲角增大后，放下双缝襟翼在机翼前缘上部发生局部气流分离；  
(c) 放下前缘襟翼，消除局部气流分离

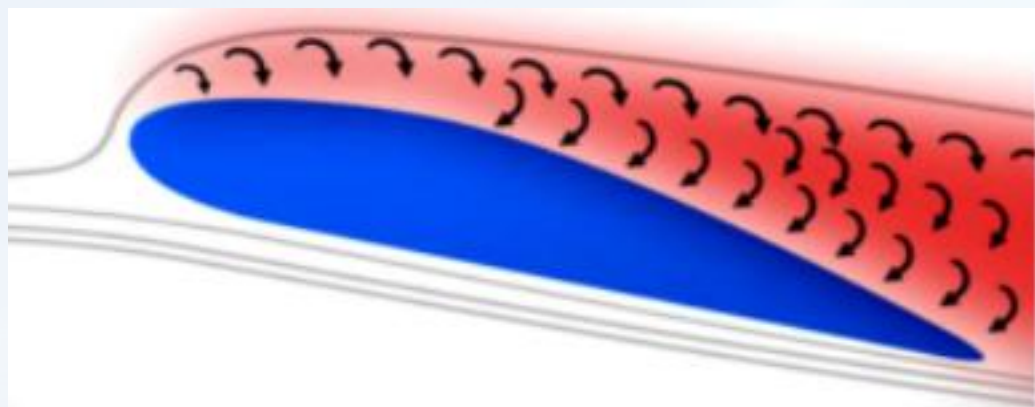
1—机翼前缘上部的局部气流分离；2—前缘襟翼；3—双缝襟翼

## 7、增升原理和增升装置

### 6) 前缘缝翼

(1) 什么是前缘缝翼？

- 安装在机翼前缘的一个小翼面
- 工作时小翼面与机翼前缘之间形成收敛式的缝隙



缝翼闭合，大迎角下气流分离



缝翼打开，恢复气流平滑流动

## 7、增升原理和增升装置

### 6) 前缘缝翼

#### (2)前缘缝翼的作用

**作用：**

**□ 提高临界迎角，降低飞机失速速度**

**□ 提高最大升力系数**

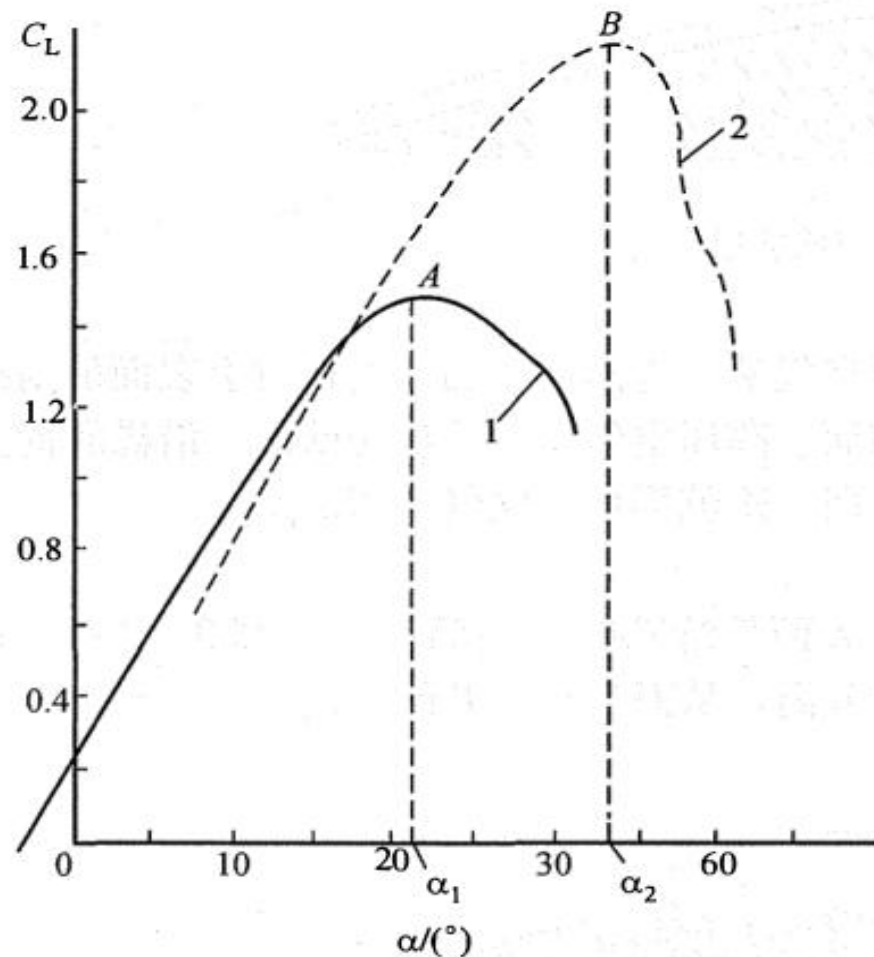


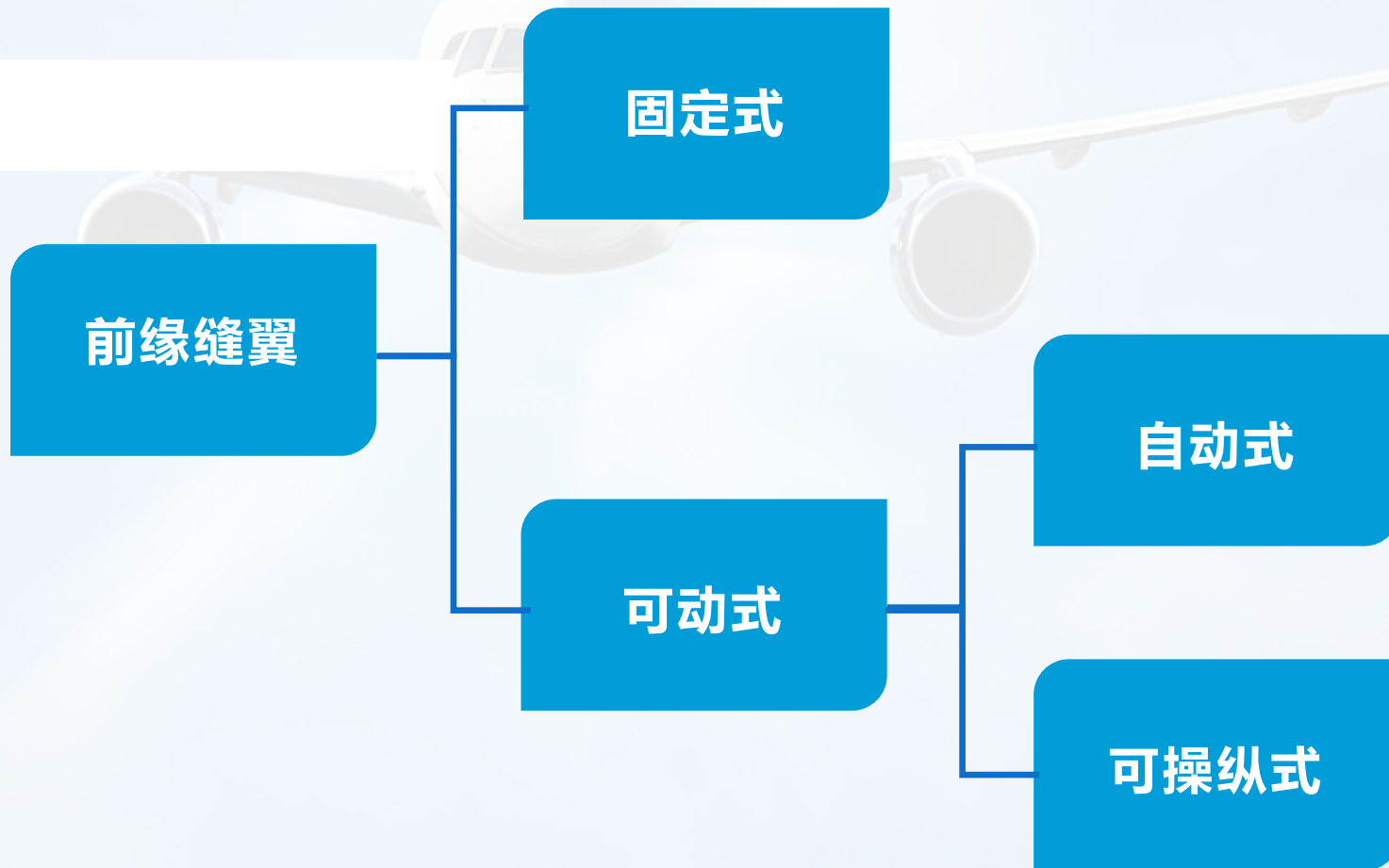
图 3 - 23 前缘缝翼的增升作用

1—前缘缝翼闭合时的  $C_L$  曲线；2—前缘缝翼打开时的  $C_L$  曲线；

## 7、增升原理和增升装置

### 6) 前缘缝翼

#### (3)前缘缝翼的种类



## 7、增升原理和增升装置

### 6) 前缘缝翼

#### (4) 固定式前缘缝翼

- 是用肋板将小翼面固定在机翼前缘上
- 无论是否使用前缘缝翼，小翼面都与机翼前缘之间形成固定的缝隙
- 速度增大时，会使阻力增大
- 应用不多



## 7、增升原理和增升装置

### 6) 前缘缝翼

#### (5) 自动式前缘缝翼

- 小翼面通过滑动机构与前缘相连
- 依靠作用在前缘上的气动载荷使小翼面伸出或收回
- 多用在低空低速飞机上



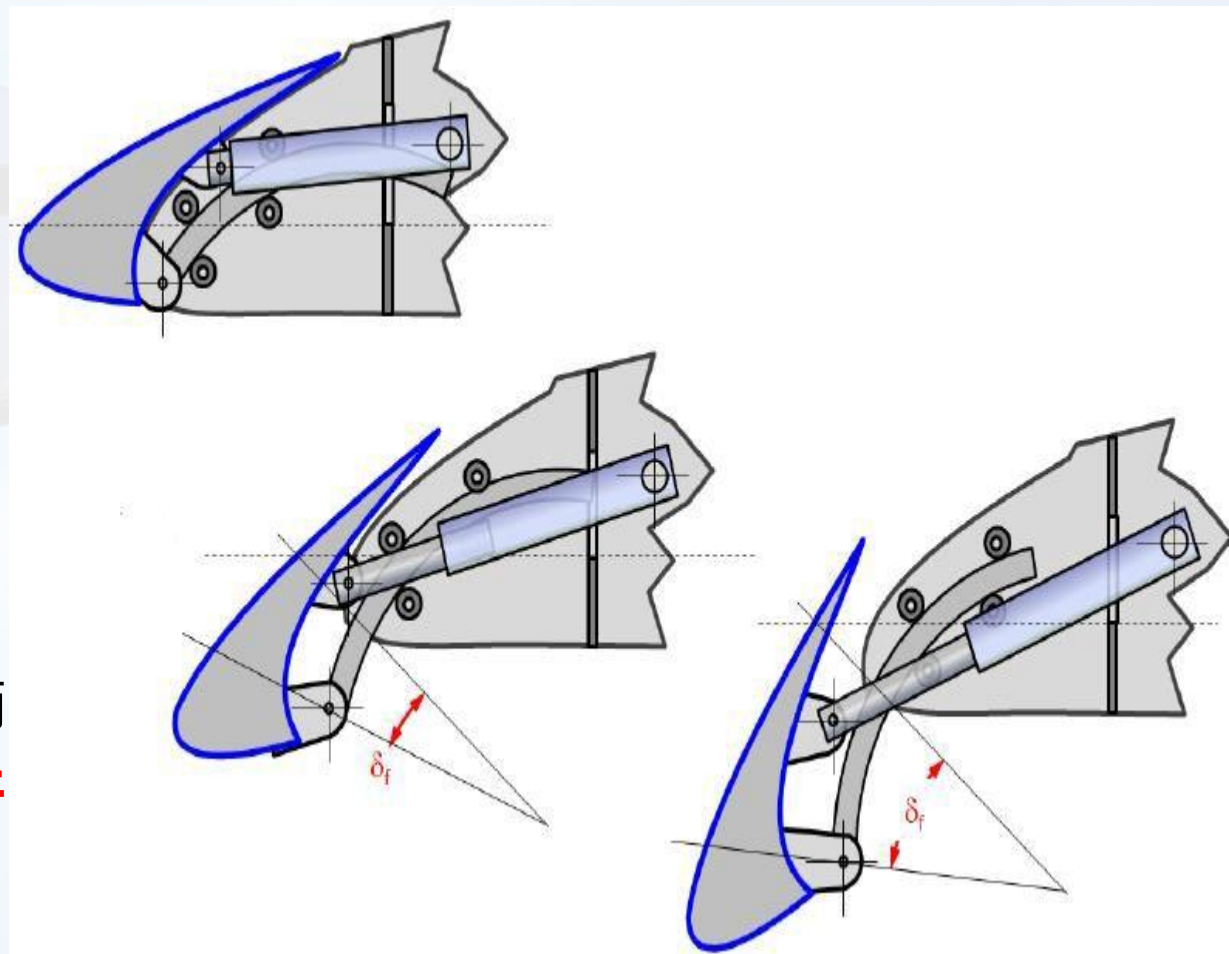
自动式前缘缝翼

## 7、增升原理和增升装置

### 6) 前缘缝翼

#### (6)可操纵式的前缘缝翼

- 由驾驶员或自动驾驶系统操纵
- 通常是与后缘襟翼自动配合动作
- 防止大迎角使用后缘襟翼造成失速
- 有些操纵前缘缝翼与后缘襟翼使用同一个手柄
- **放出时，先打开前缘缝翼到一定角度，再打开后缘襟翼**
- **收回时，先收回后缘襟翼再收回前缘缝翼**



可操纵式前缘缝翼

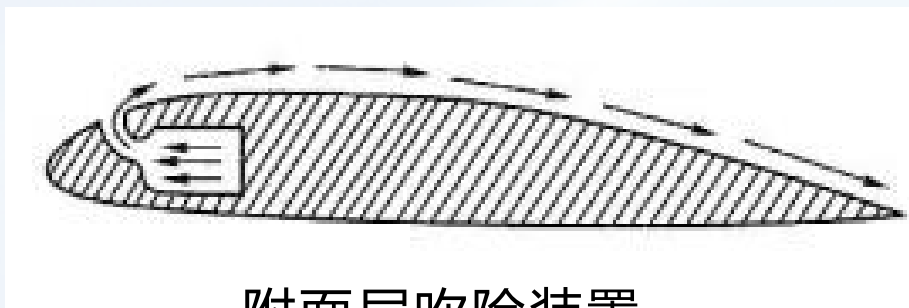
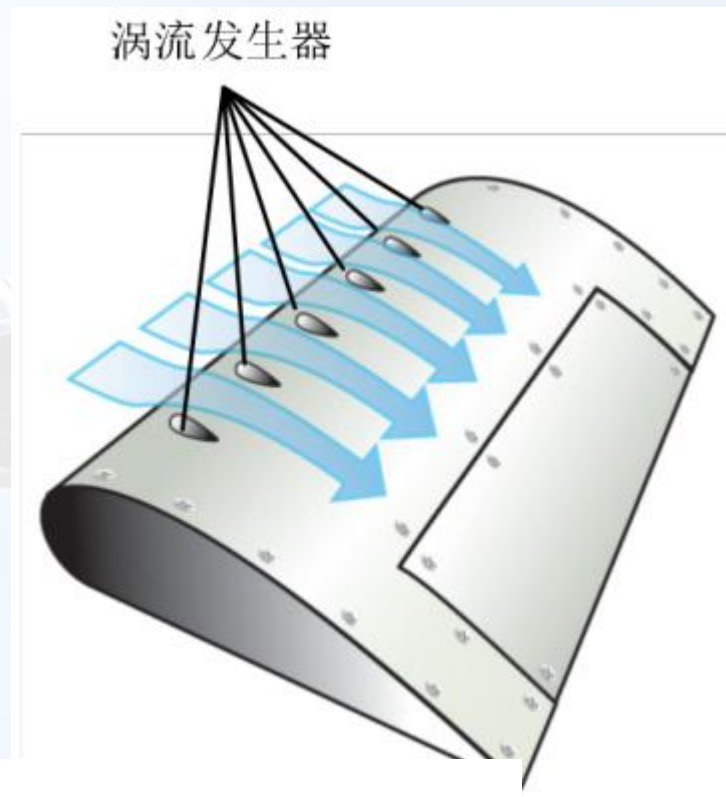
前缘襟翼收起放下过程



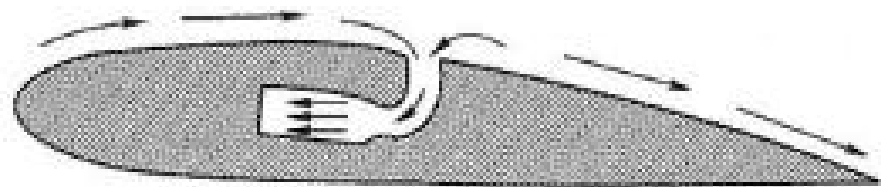
## 7、增升原理和增升装置

### 7) 控制附面层的增升装置

- 附面层吹除装置
- 附面层吸取装置
- 涡流发生器



附面层吹除装置



附面层吸取装置

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

### □ 小结:

- 增升装置的种类
- 增升装置原理
- 前缘襟翼要配合后缘襟翼使用，不会单独使用
- 前缘襟翼和后缘襟翼的收上和放下有一定的逻辑程序
- **哪些能提高临界迎角?**



## 1.3.2 飞机的稳定性(2H)

目  
录

A blue rounded square containing the number 1.

1

稳定性的概念

A blue rounded square containing the number 2.

2

飞机的纵向稳定性

A blue rounded square containing the number 3.

3

飞机的横侧向稳定性

### 1、稳定性的概念



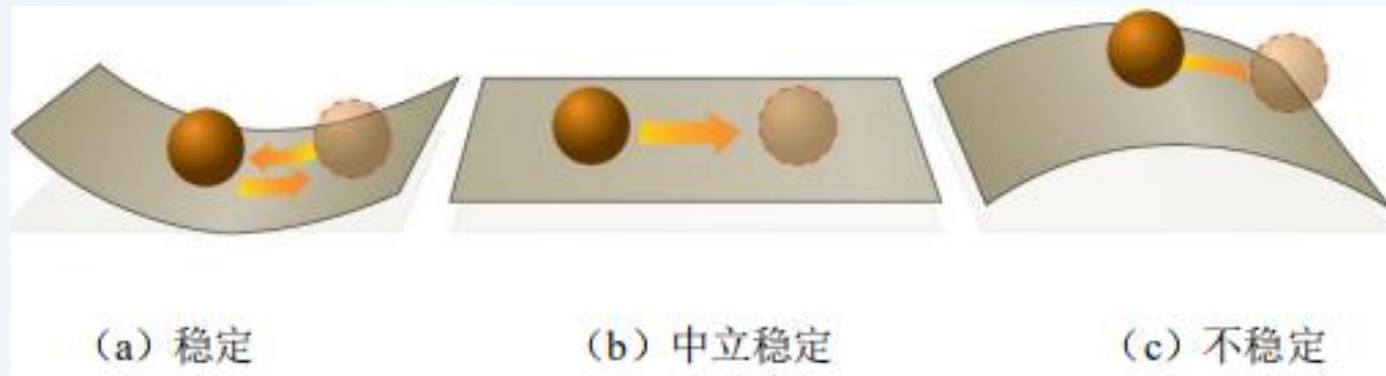
	稳定性	不稳定性	中立稳定性
静稳定性	静稳定	静不稳定	静中立稳定
动稳定性	动稳定	动不稳定	动中立稳定

## 1.3.2 飞机的稳定性

### 1、稳定性的概念

#### 1) 静稳定性

- 静稳定性是当外界扰动消失后
- 物体是否具有回到原始平衡位置的**趋势**
- 是扰动消失后，物体的**瞬间运动**



## 1.3.2 飞机的稳定性

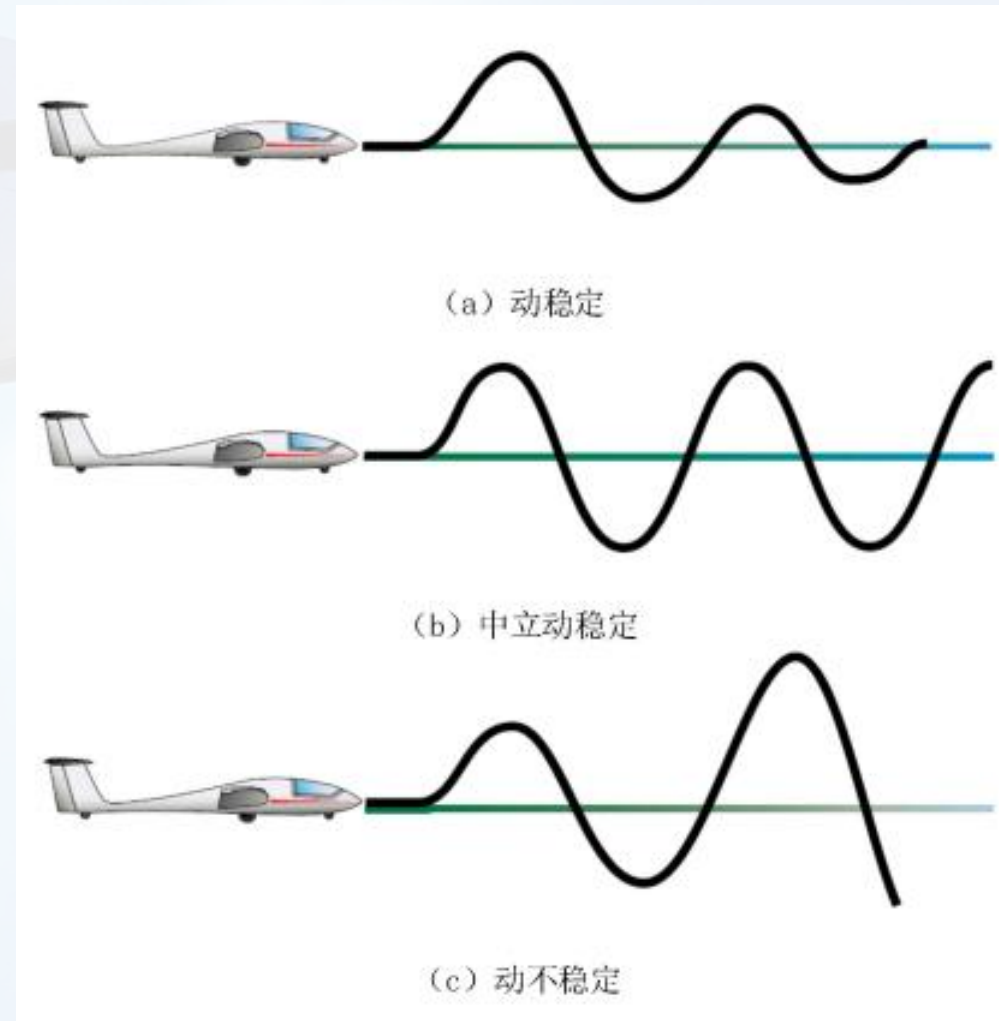
### 1、稳定性的概念

### 2) 动稳定性

□ 研究外界扰动消失后

回到原平衡位置的**运动过程**

- ✓ 扰动运动是**收敛的**
- ✓ 最终**回到原始平衡位置**
- ✓ 平衡状态就具有动稳定性
- ✓ 否则就是动不稳定的



## 1.3.2 飞机的稳定性

### 1、稳定性的概念

### 3) 稳定性、静稳定性、动稳定性之间的关系

- 具有静稳定性是平衡状态具有稳定性的必要条件
- 但并不充分
- 只有具有动稳定的平衡状态才是真正稳定的
- 静稳定性是前提，动稳定性是保证

## 1.3.2 飞机的稳定性

### 1、稳定性的概念

#### 4) 飞机的稳定性

- 扰动消失后，飞行员不施加操纵的情况下，飞机能**自动**回到原平衡状态，这架飞机就具有稳定性，否则就是不稳定或中立的

	纵向稳定性	侧向稳定性	方向稳定性
静稳定性	纵向静稳定性	侧向静稳定性	方向静稳定性
动稳定性	纵向动稳定性	侧向动稳定性	方向动稳定性

## 1.3.2 飞机的稳定性

### 2、飞机的纵向稳定性

#### 1) 飞机的纵向静稳定性

##### (1) 概念

- 飞机受到扰动
- 迎角变大或变小
- 扰动消失后
- 不经飞行员操纵
- 能自动恢复到原飞行状态的能力
- 也称为俯仰稳定性
- 即绕横轴的稳定性

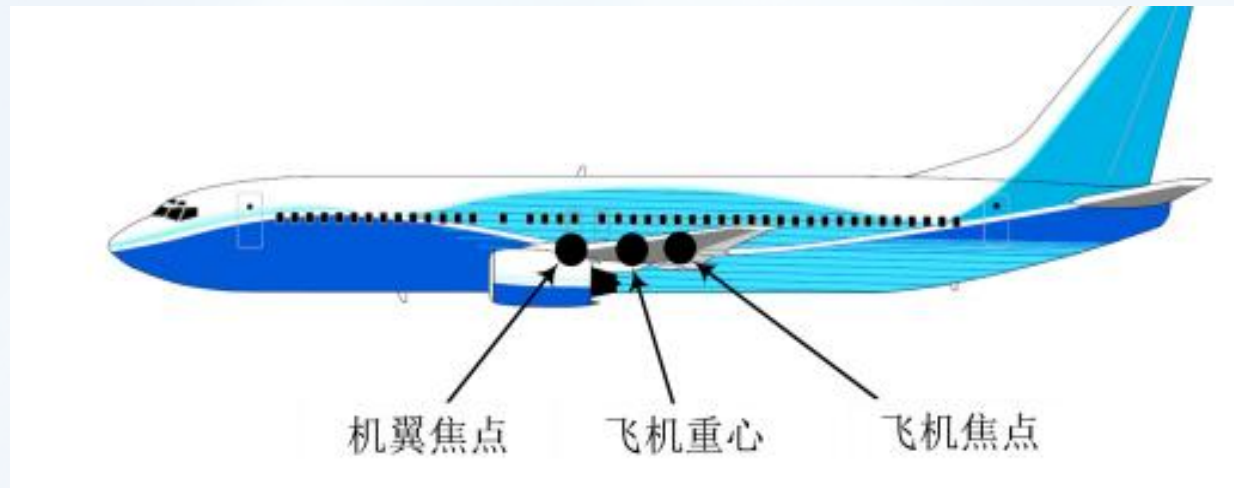
## 1.3.2 飞机的稳定性

### 2、飞机的纵向稳定性

#### 1) 飞机的纵向静稳定性

#### (2) 压力中心和焦点

- 压力中心
- 焦点(25%左右)
- 各自随迎角变化规律



## 1.3.2 飞机的稳定性

### 2、飞机的纵向稳定性

#### 1) 飞机的纵向静稳定性

#### (3) 飞机的纵向力矩和平衡

- $M_z$ : 抬头力矩为正
- 纵向平衡条件:  $M_z=0$
- 纵向上反角
- 纵向配平
- 水平尾翼的一个重要作用:  
纵向平衡

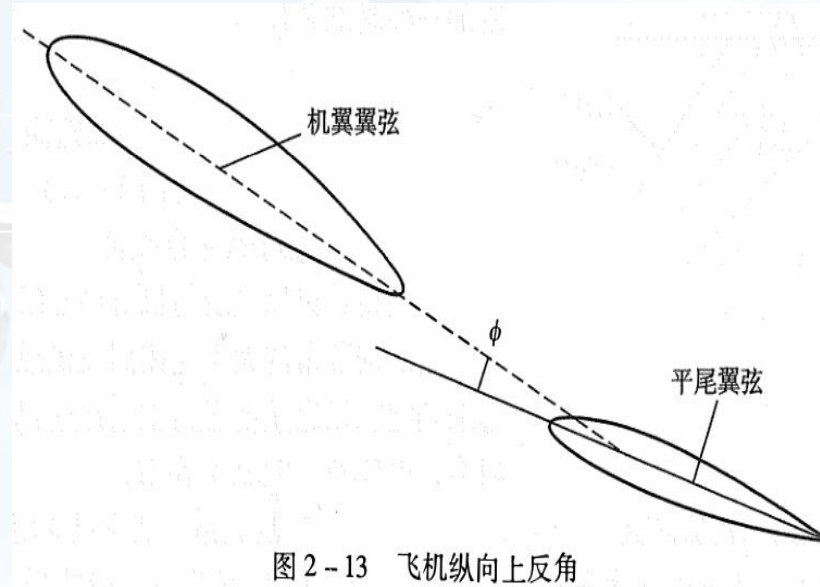
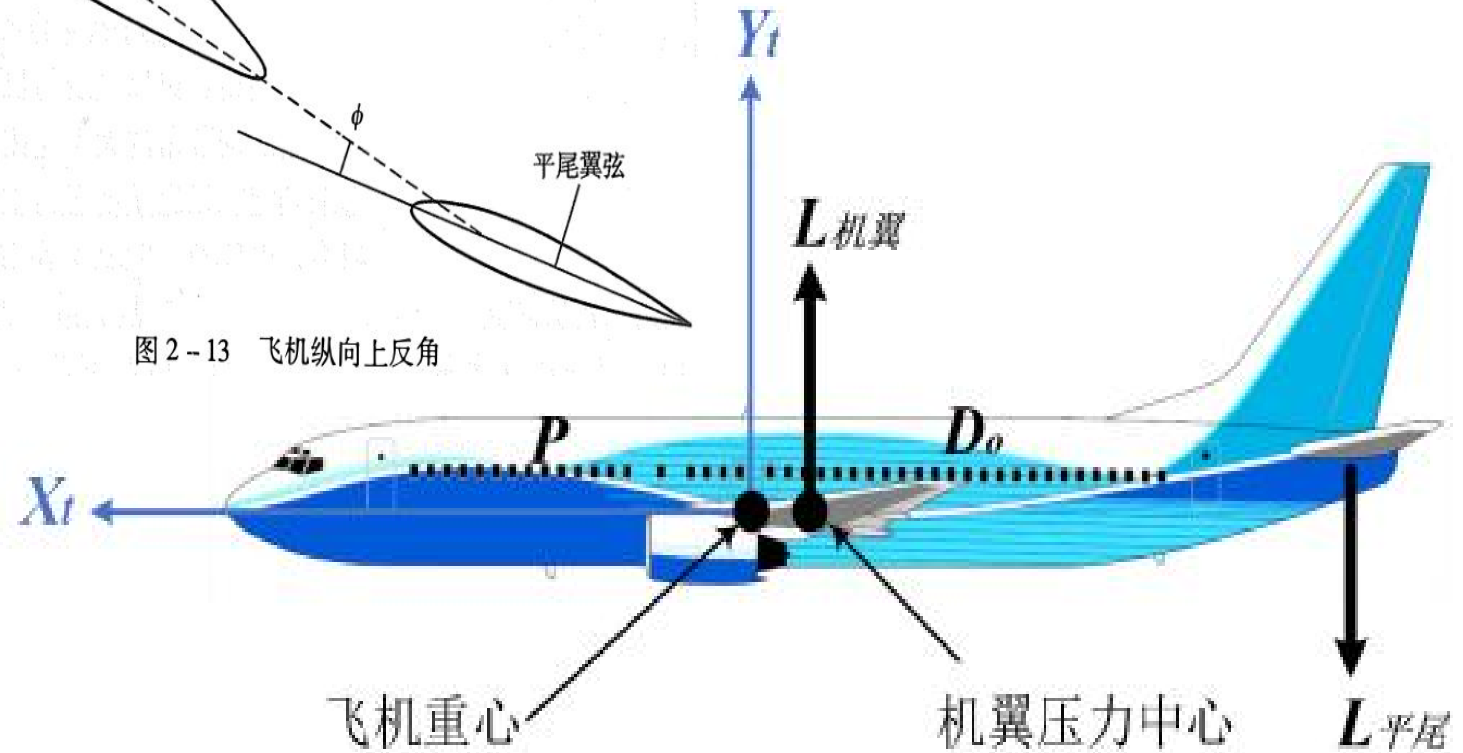


图 2-13 飞机纵向上反角



## 1.3.2 飞机的稳定性

### 2、飞机的纵向稳定性

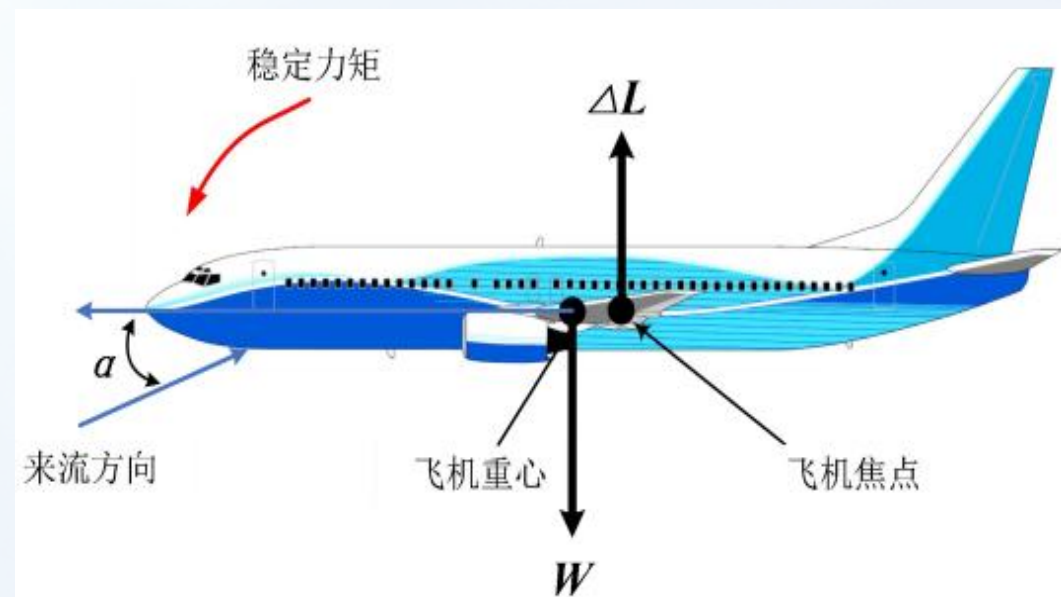
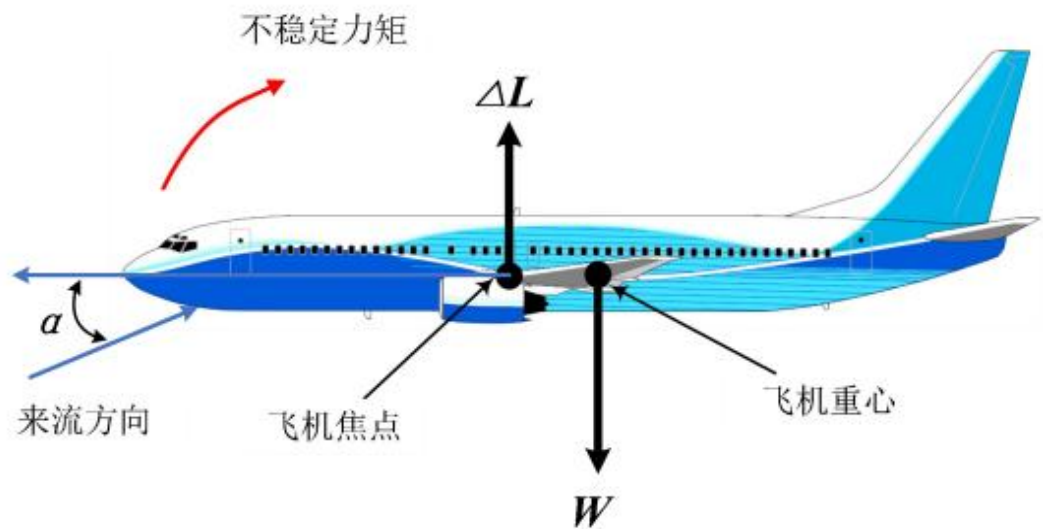
#### 1) 飞机的纵向静稳定性

#### (4) 飞机纵向静稳定性的条件

□ **全机焦点位于重心之后  
飞机是纵向静稳定的**

□ 纵向静稳定裕量(10% - 15%)

□ 水平尾翼为飞机提供了纵向静稳定性

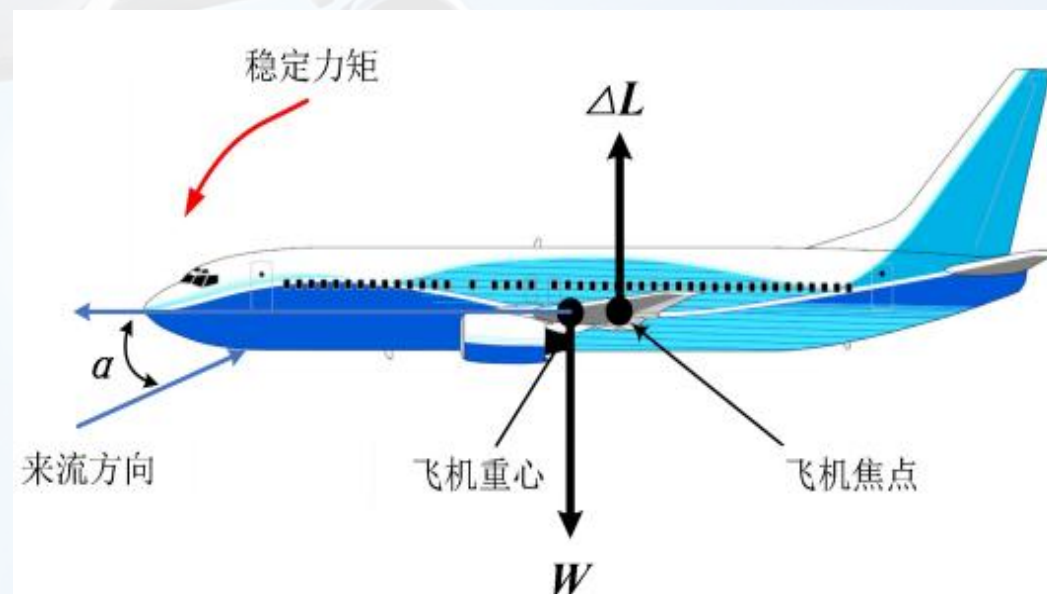


### 2、飞机的纵向稳定性

#### 1) 飞机的纵向静稳定性

##### (5) 影响飞机纵向静稳定性的因素

- 飞机实用重心变化
- 飞机焦点位置的变化
- 握杆和松杆的影响



## 1.3.2 飞机的稳定性

### 2、飞机的纵向稳定性

#### 1) 飞机的纵向静稳定性

##### (5) 影响飞机纵向静稳定性的因素

###### □ 飞机实用重心变化

- ✓ 货物的装载情况
- ✓ 乘客的位置
- ✓ 燃油的数量及消耗情况
- ✓ 飞机的构型等等

###### □ 当焦点位置不变时

- ✓ **飞机实用重心前移，飞机的纵向静稳定性增大**
- ✓ **飞机实用重心后移，飞机的纵向静稳定性减小**

## 1.3.2 飞机的稳定性

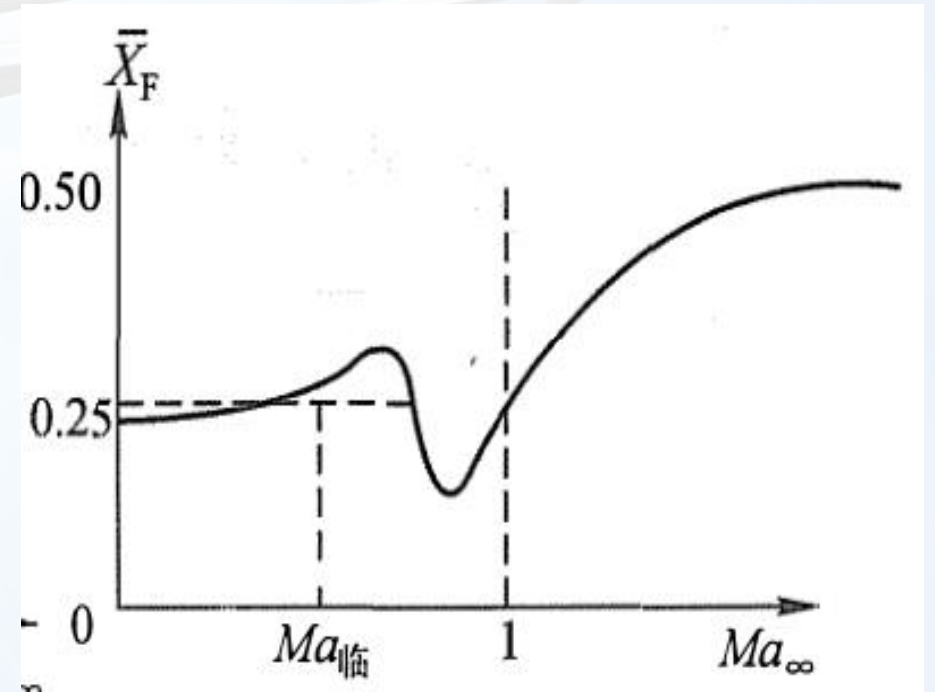
### 2、飞机的纵向稳定性

#### 1) 飞机的纵向静稳定性

#### (5) 影响飞机纵向静稳定性的因素

##### □ 影响飞机焦点位置的因素

- ✓ 飞行马赫数
- ✓ 水平尾翼：升降舵的偏转角和水平安定面的配平角
- ✓ 飞机构型：襟翼、缝翼、起落架等的位置
- ✓ 纵向操纵系统的安装间隙和弹性间隙



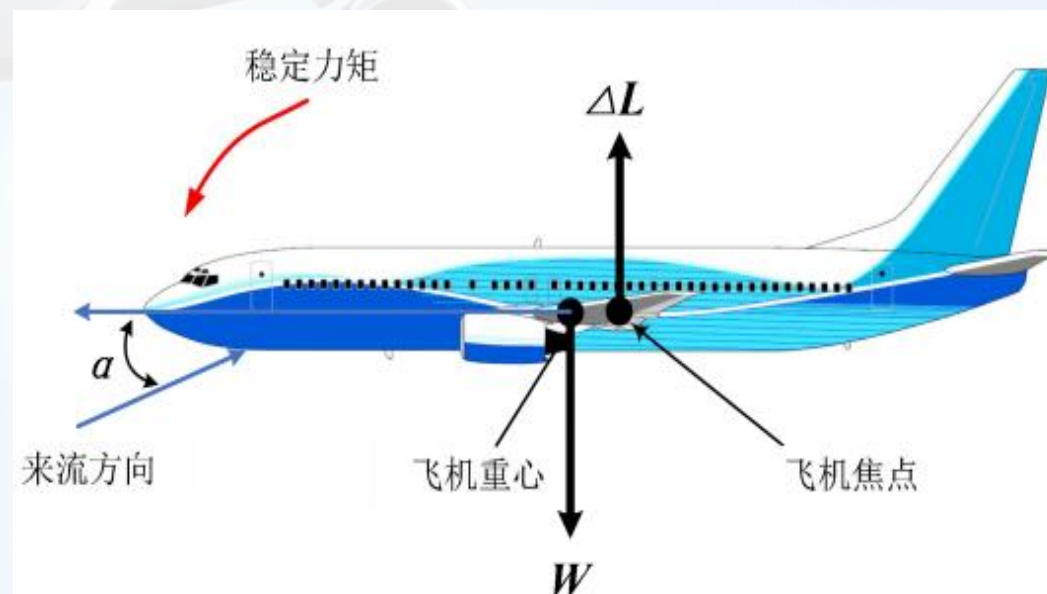
### 2、飞机的纵向稳定性

#### 1) 飞机的纵向静稳定性

#### (5) 影响飞机纵向静稳定性的因素

##### □ 握杆和松杆的影响

- ✓ 与握杆飞行相比，松杆飞行时，全机焦点的位置前移，纵向静稳定性减小了



## 1.3.2 飞机的稳定性

### 2、飞机的纵向稳定性

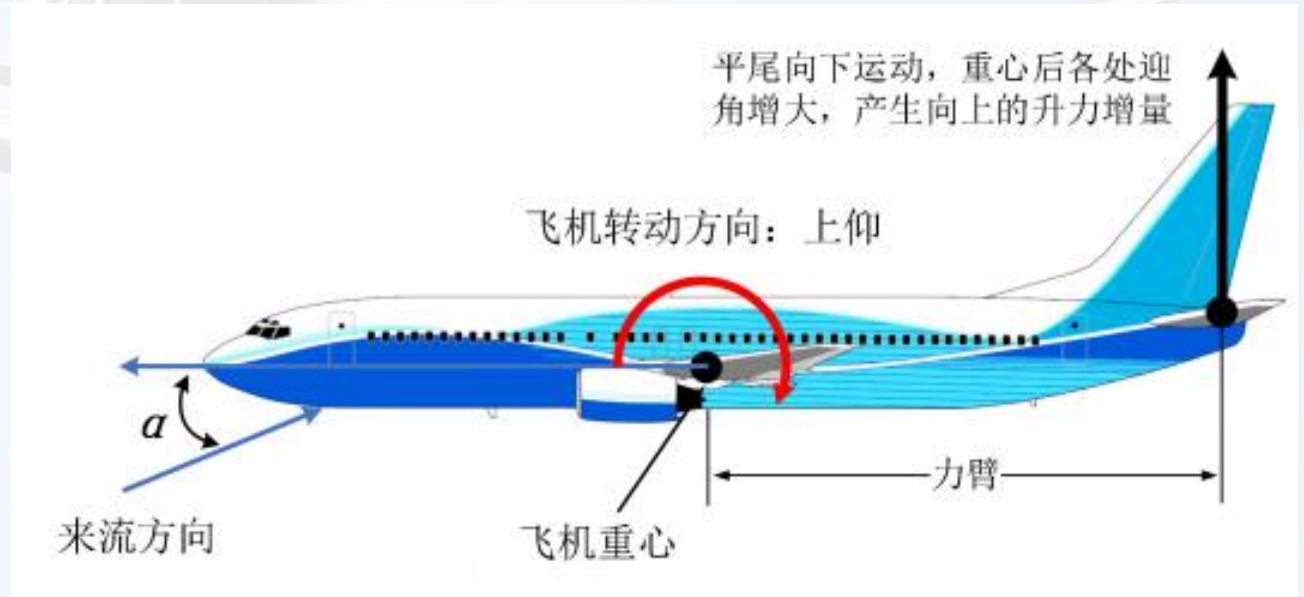
#### 2) 飞机的纵向动稳定性

##### (1) 扰动运动中的力矩

□ 纵向静稳定力矩(平尾)

□ 俯仰阻尼力矩(平尾)

□ 惯性力矩(转动惯量)



扰动运动逐渐**收敛**，最后恢复到原飞行姿态，  
飞机就具有纵向动稳定性

## 1.3.2 飞机的稳定性

### 2、飞机的纵向稳定性

#### 2) 飞机的纵向动稳定性

#### (2) 纵向扰动运动的模态及其特征

- 短周期运动模态
  
- 长周期运动模态

## 1.3.2 飞机的稳定性

### 2、飞机的纵向稳定性

#### 2) 飞机的纵向动稳定性

##### (1) 纵向扰动运动的模态及其特征

###### □ 短周期运动模态

- ✓ 扰动消失的最初阶段
- ✓ 迎角和俯仰角速度周期性迅速变化
- ✓ 较大的俯仰阻尼力矩
- ✓ 头几秒内就基本结束了



短周期模态运动

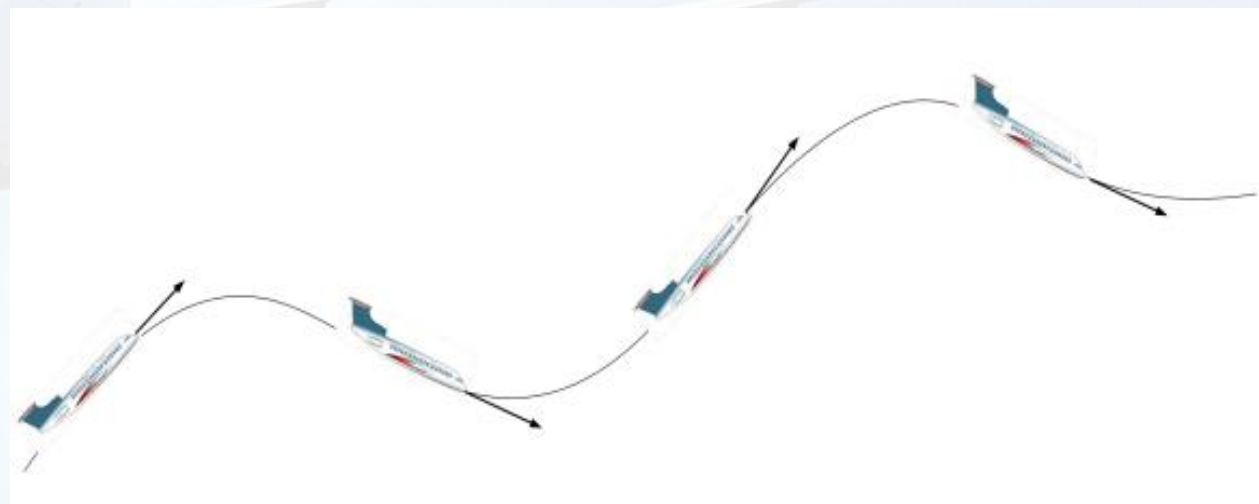
## 2、飞机的纵向稳定性

### 2) 飞机的纵向动稳定性

#### (1) 纵向扰动运动的模态及其特征

##### □ 长周期运动模态

- ✓ 扰动运动的后一阶段
- ✓ 飞机重心运动的振荡过程
- ✓ 飞行速度和航迹倾斜角周期性的缓慢变化
- ✓ **衰减很慢**，形成长周期运动模态



长周期模态运动

### 小结:

- 稳定性分为静稳定和动稳定。
- 物体具有静稳定性是稳定性的必要条件，但是不充分。
- 物体具有动稳定性才是具有真正的稳定。
- 按飞机3个轴来划分，可分为纵向、横向、方向稳定性。
- 纵向稳定性，主要由水平安定面来提供

## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 1) 飞机的横侧向静稳定性

##### (1) 飞机的横侧向运动

- 滚转运动，运动参数：滚转角 $\gamma$ 、滚转角速度和滚转角加速度
- 偏航运动，运动参数：偏航角 $\varphi$ 、偏航角速度和偏航角加速度
- 侧滑运动，运动参数：侧滑角 $\beta$

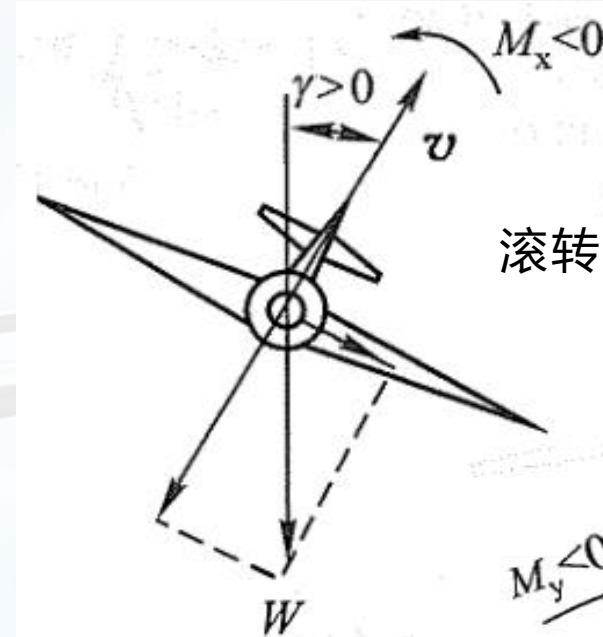
## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

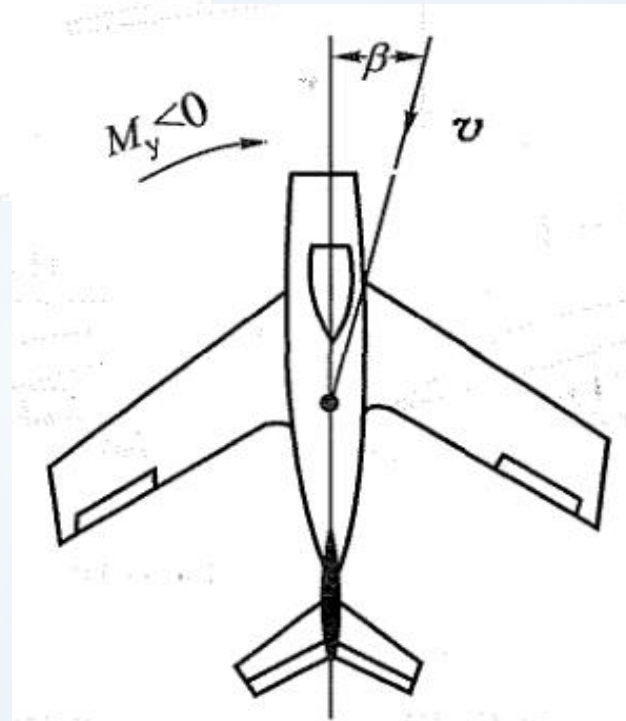
#### 1) 飞机的横侧向静稳定性

##### (1) 飞机的横侧向运动

- 飞机的滚转或偏航都会造成飞机侧滑和侧滑角 $\beta$
- 侧滑和侧滑角 $\beta$ 产生滚转力矩 $M_x$  和偏航力矩 $M_y$
- 侧向和方向静稳定性就不是独立的
- 而是互相影响，互相牵连
- 把侧向和方向静稳定性统称为横侧向静稳定性



滚转偏航造成飞机侧滑



## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 1) 飞机的横侧向静稳定性

#### (2) 飞机的滚转力矩和偏航力矩

□  $M_x$ 、 $M_y$

□ 引起飞机滚转力矩和偏航力矩的有:

✓ 侧滑角

✓ 滚转运动

✓ 偏航运动

✓ 副翼偏转角

✓ 方向舵偏转角

□ 静稳定力矩

✓ 侧滑角 $\beta$ 引起的滚转力矩和偏航力矩

□ 俯仰阻尼力矩

✓ 滚转运动引起的滚转力矩

✓ 偏航运动引起的偏航力矩

□ 操纵力矩

✓ 副翼偏转角引起的滚转力矩

✓ 方向舵偏转角引起的偏航力矩

## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 1) 飞机的横侧向静稳定性

#### (3) 飞机侧向静稳定性的条件

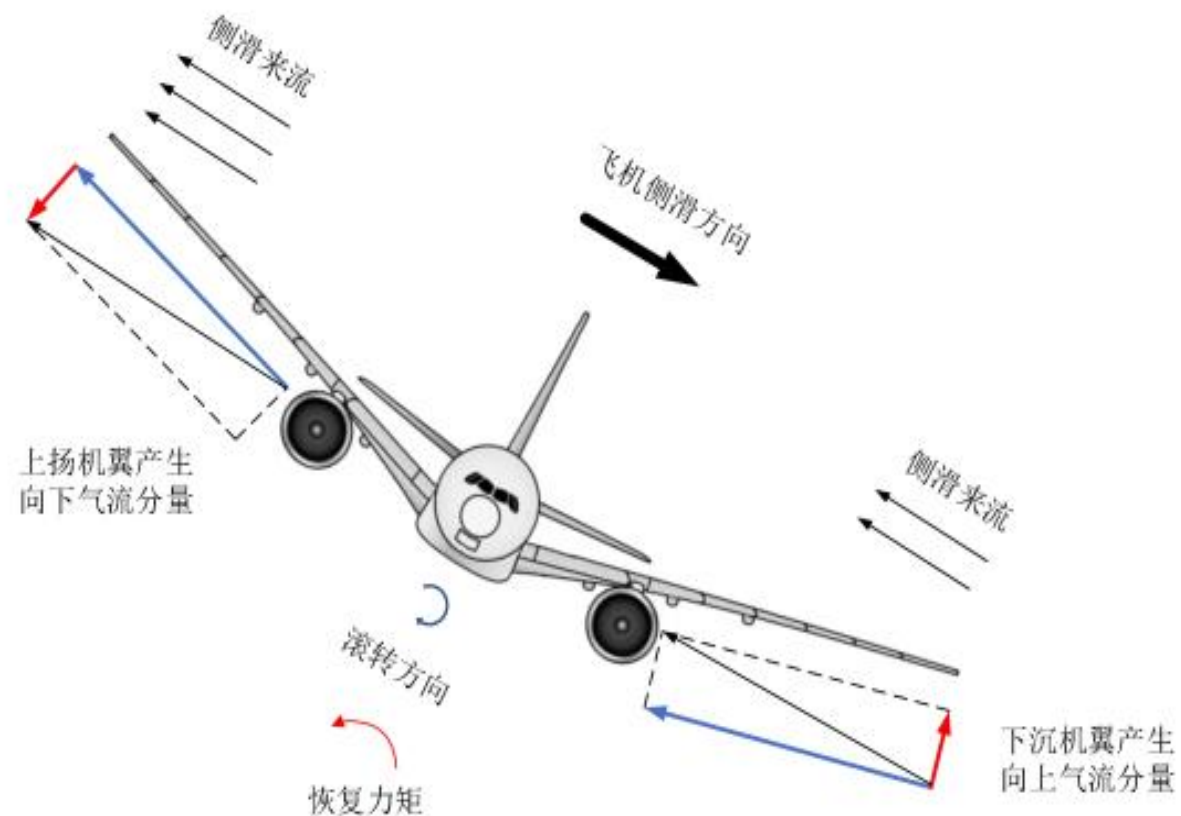
飞机受到扰动，绕机体纵轴转动，产生了滚转角，造成侧滑时，如果侧滑角引起的滚转力矩与飞机滚转的方向相反，飞机就具有侧向静稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 1) 飞机的横侧向静稳定性

#### (4) 机翼上反角对飞机侧向静稳定性的影响

- 侧向静稳定性主要由上反角来提供
- 侧向静稳定性也称为“上反效应”
- 上反角的大小可以反映静稳定性的强弱
- 通过改变上反角的大小，可定量地调整飞机侧向静稳定性的大小



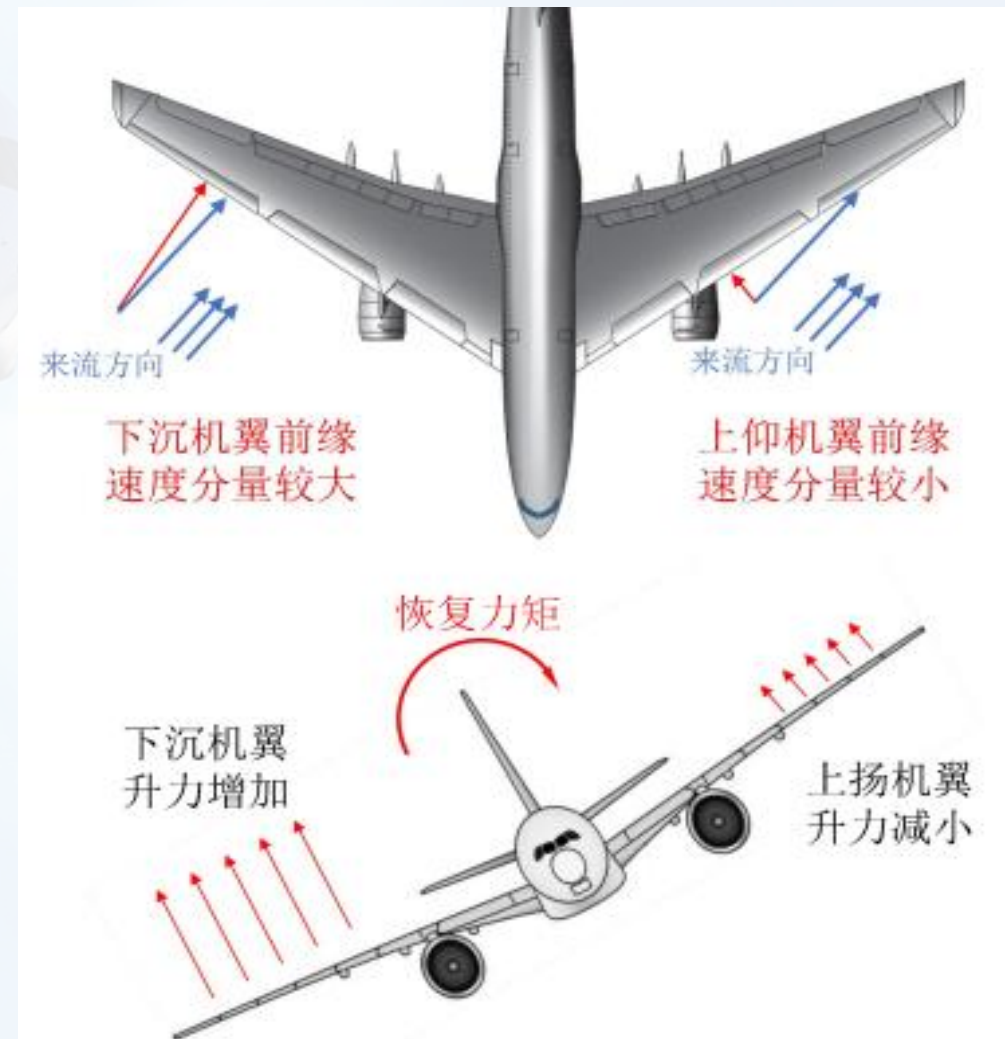
## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 1) 飞机的横侧向静稳定性

#### (5) 机翼后掠角对飞机侧向静稳定性的影响

- 机翼的后掠角也为飞机提供侧向静稳定性
- 纵轴上方的**垂尾**增加侧向静稳定性
- 上单翼起侧向静稳定作用
- 下单翼起侧向静不稳定作用



## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 1) 飞机的横侧向静稳定性

#### (6) 飞机的方向静稳定性

#### □ 飞机方向静稳定性的条件:

飞机受扰动绕竖轴偏转，产生侧滑角时，如果由于侧滑角引起的偏航力矩力图使飞机对准来流，消除侧滑角，飞机就具有方向静稳定性

## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 1) 飞机的横侧向静稳定性

#### (7) 垂尾对飞机方向静稳定性的影响

- 飞机的方向静稳定性主要是由垂直尾翼提供
- 总是让飞机机头对准来流，消除侧滑角

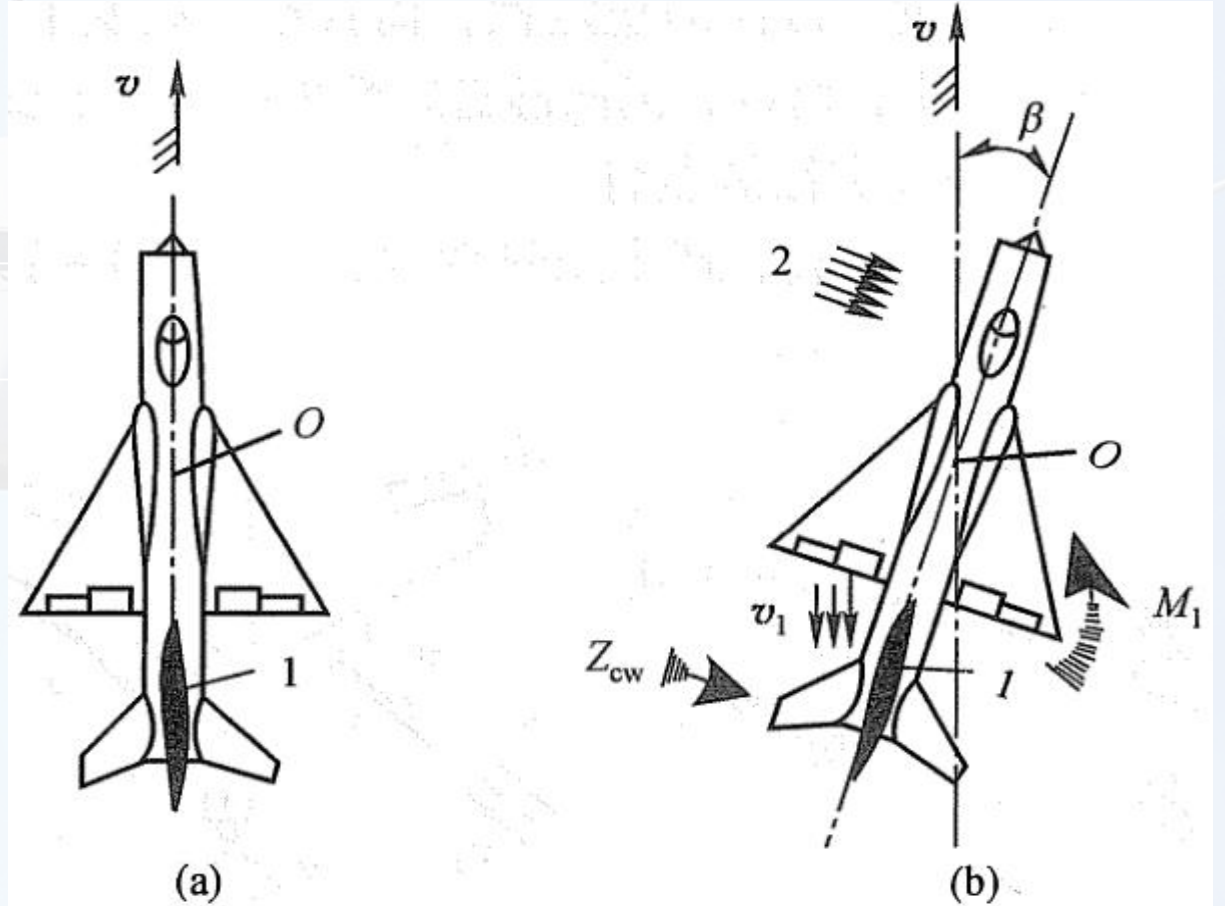


图 4-18 垂直尾翼与方向稳定

1—垂直尾翼；2—阵风； $Z_{cw}$ —附加力； $M_1$ —恢复力矩；

$O$ —飞机重心； $v_1$ —相对风速； $v$ —飞行速度



## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 2) 飞机的横侧向动稳定性

##### (1) 扰动运动中的力矩

- 静稳定力矩：由于侧滑角而产生的恢复力矩
- 阻尼力矩：阻碍扰动运动的力矩
- 惯性力矩：由于飞机的转动惯量而产生的使飞机保持原运动状态的力矩
- 交叉力矩：由滚转运动引起的偏航力矩和由偏航运动引起的横滚力矩

## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 2) 飞机的横侧向动稳定性

##### (1) 扰动运动中的力矩

- 阻尼力矩：阻碍扰动运动的力矩
  - ✓ 由滚转运动引起的气动阻尼力矩中，机翼起主要作用
  - ✓ 由偏航运动引起的气动阻尼力矩中，垂直尾翼起主要作用

## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 2) 飞机的横侧向动稳定性

##### (1) 扰动运动中的力矩

- 交叉力矩：由滚转运动引起的偏航力矩和由偏航运动引起的横滚力矩
- ✓ 滚转运动引起的向滚转一侧的偏航力矩(机翼和垂尾)
- ✓ 偏航运动引起的向偏航一侧的横滚力矩(机翼和垂尾)

**扰动运动中，受到了静稳定力矩、惯性力矩、气动阻尼力矩和交叉力矩的共同作用，扰动运动的情况就和影响这些力矩的各种因素有关**

## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 2) 飞机的横侧向动稳定性

##### (2) 横侧向扰动运动的模态及特性

- 滚转收敛模态
- 螺旋模态
- 荷兰滚模态

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 2) 飞机的横侧向动稳定性

##### (2) 横侧向扰动运动的模态及特性

###### □ 滚转收敛模态

- ✓ 非周期性的、**衰减很快**
- ✓ 滚转角和滚转速度迅速变化
- ✓ 侧滑角和偏航角几乎不变化
- ✓ 滚转惯性较小，滚转阻尼力矩较大
- ✓ 是一种衰减很快的滚转运动
- ✓ 一般飞机都能满足此模态的稳定性要求

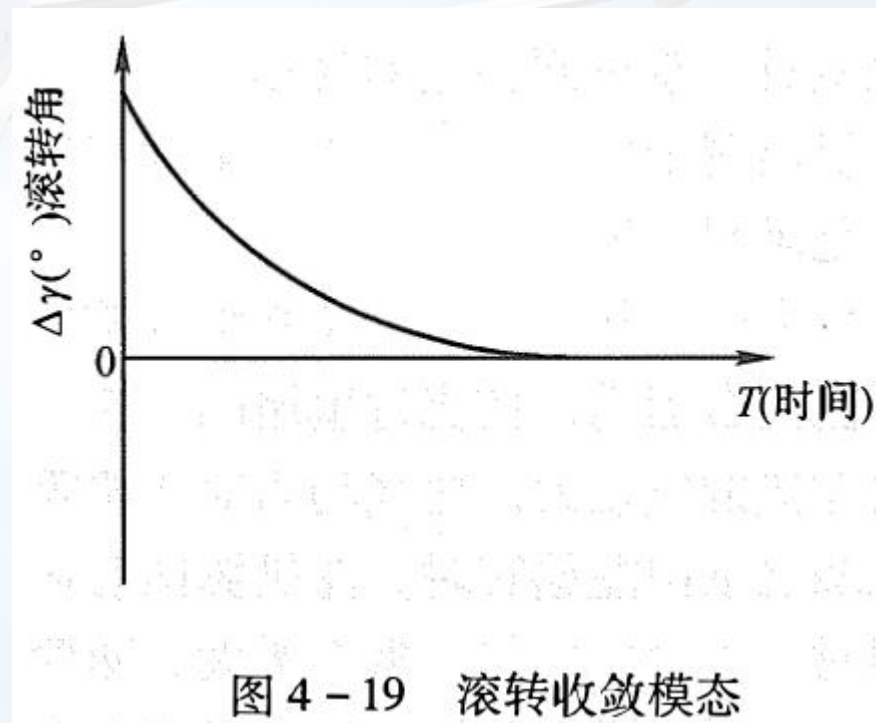


图 4 - 19 滚转收敛模态

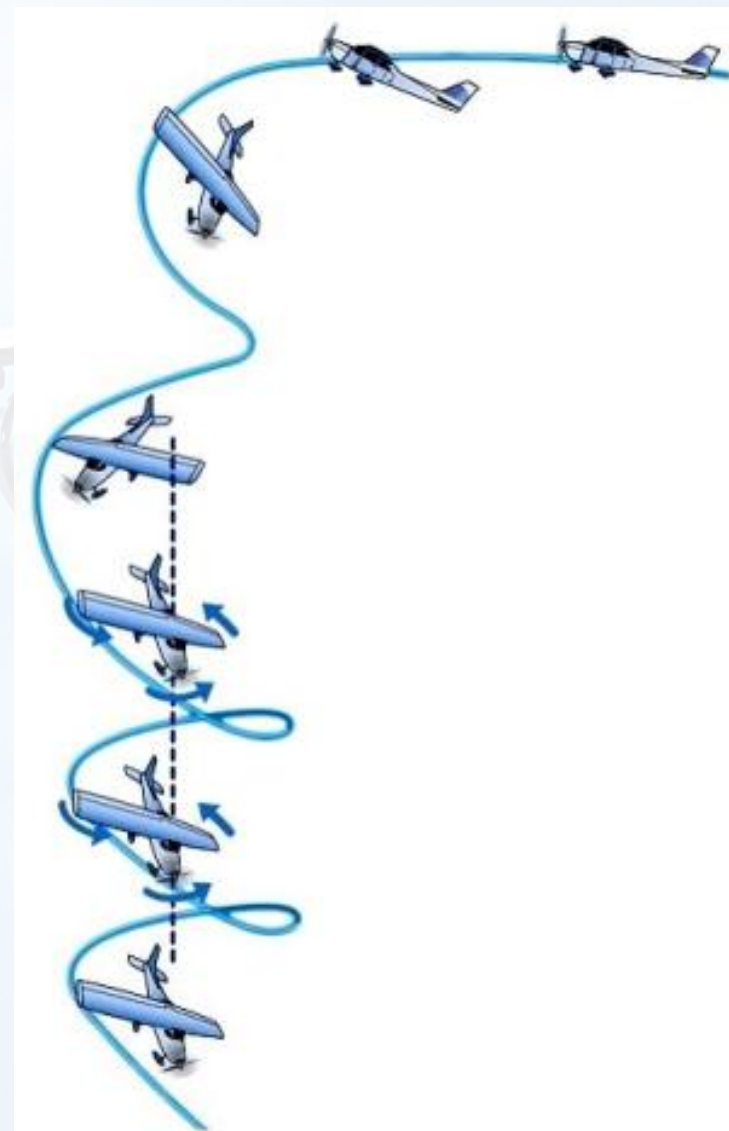
### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 2) 飞机的横侧向动稳定性

##### (2) 横侧向扰动运动的模态及特性

###### □ 螺旋模态

- ✓ 非周期性的、**运动参数变化比较缓慢**
- ✓ 侧滑角近似为零，偏航角大于滚转角
- ✓ 略带滚转，侧滑角近似为零的偏航运动
- ✓ 飞机的**方向静稳定性远大与侧向静稳定性**时，会出现这种不稳定模态
- ✓ 一般都来得及纠正，不会对飞行安全带来重大危害



## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 2) 飞机的横侧向动稳定性

##### (2) 横侧向扰动运动的模态及特性

###### □ 螺旋模态

过程分析：

受到扰动发生滚  
转和侧滑

过大的方向静稳  
定性使侧滑角很  
快得到修正

交叉滚转力矩大  
于侧向稳定力矩

沿螺旋线航迹盘  
旋下降的螺旋发  
散运动

机头继续对准来  
流，向倾斜的一  
侧偏转

滚转不但得不到  
纠正，还会继续  
加大

## 1.3.2 飞机的稳定性

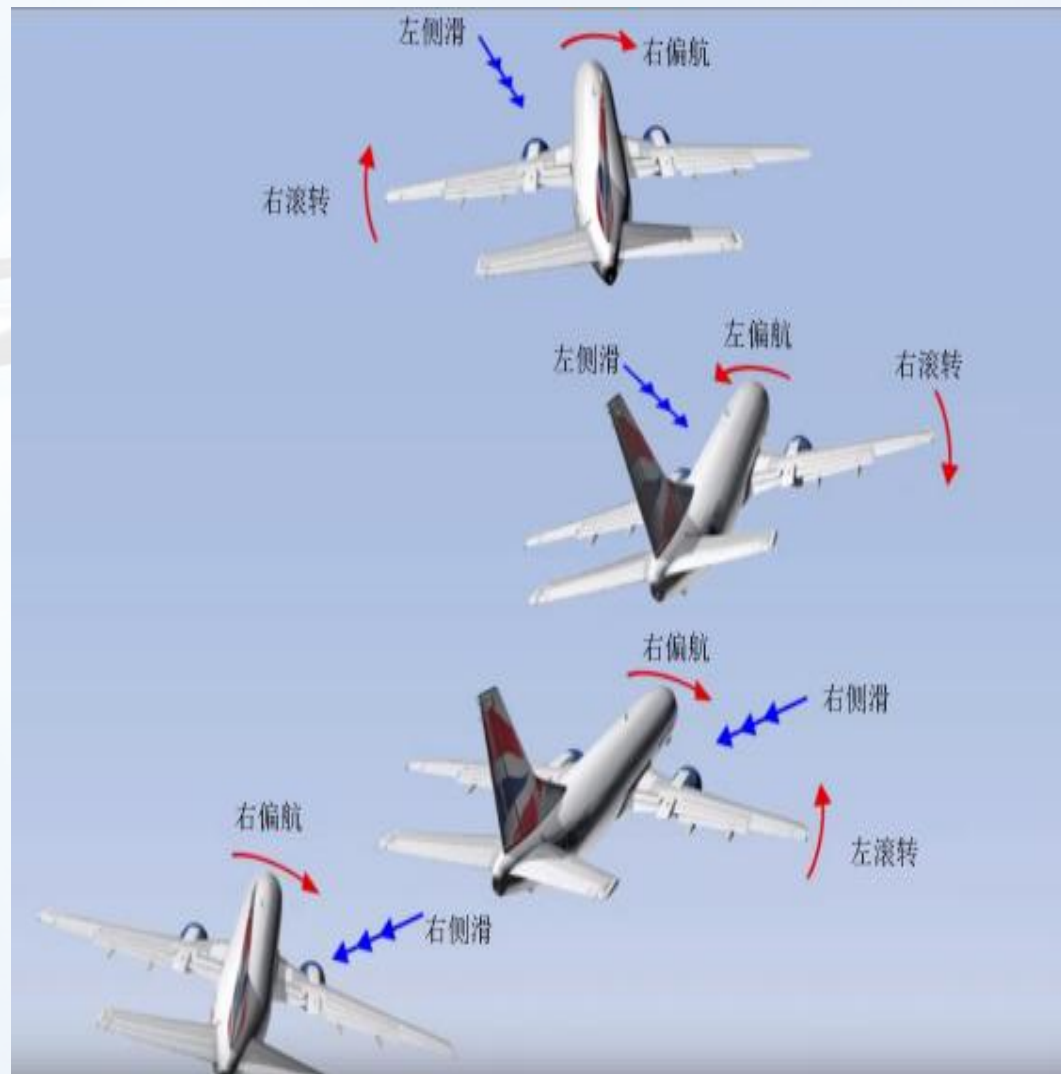
### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 2) 飞机的横侧向动稳定性

##### (2) 横侧向扰动运动的模态及特性

###### □ 荷兰滚模态

- ✓ 频率较快的中等阻尼的横向和航向组合振荡模态
- ✓ 侧滑角、滚转角和偏航角的量级相同
- ✓ 滚转、偏航运动的速度较小
- ✓ 各运动参数都随时间按振荡方式周期变化
- ✓ 形成了飞机一面来回滚转，一面左右偏航，同时带有侧滑的振荡运动，即荷兰滚运动



## 1.3.2 飞机的稳定性

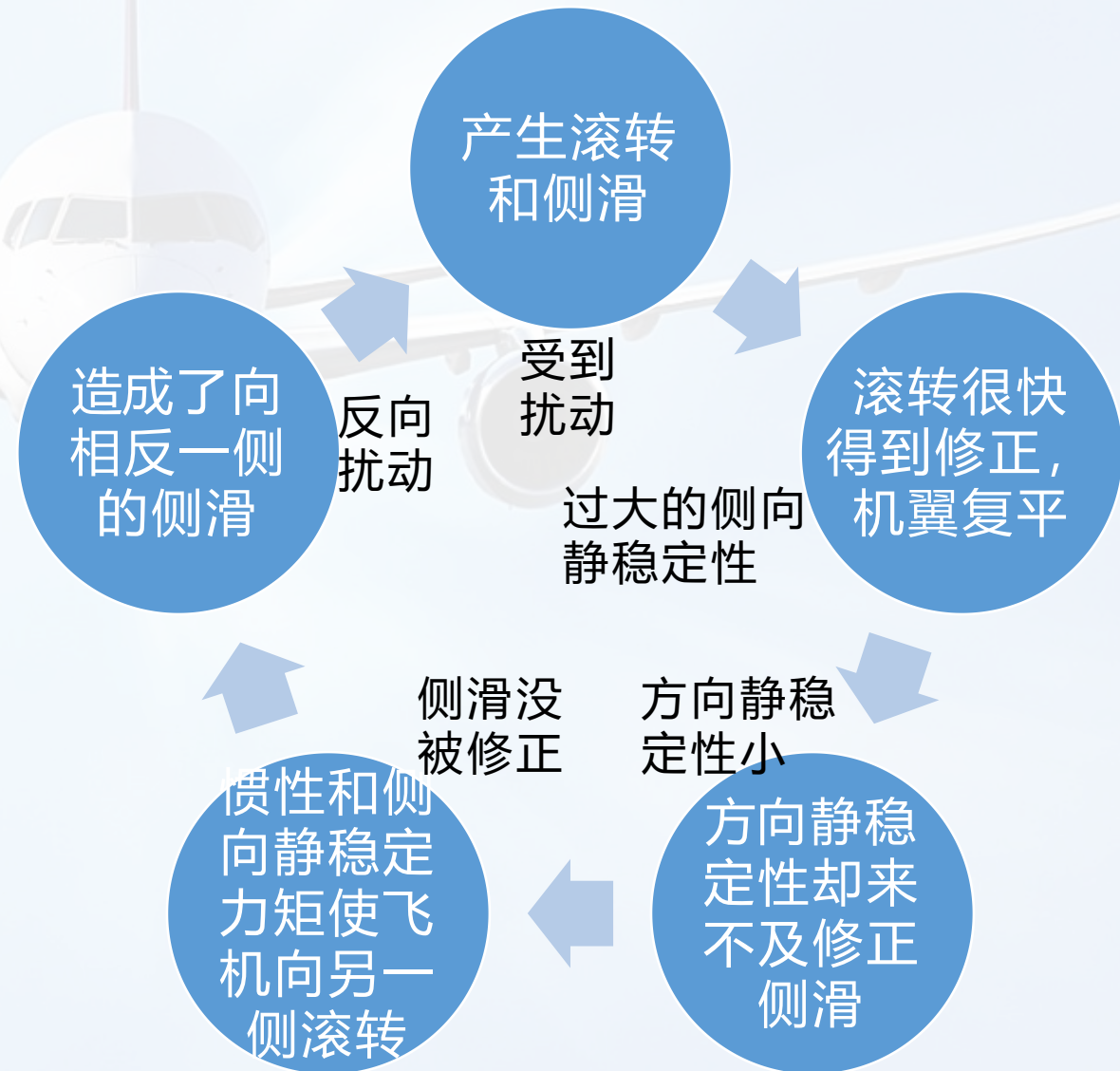
### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 2) 飞机的横侧向动稳定性

##### (2) 横侧向扰动运动的模态及特性

###### □ 荷兰滚模态

- ✓ **侧向静稳定性与方向静稳定性相比较大时，飞机易产生荷兰滚**
- ✓ 荷兰滚会影响飞行安全
- ✓ 在三种模态中最受重视
- ✓ **CCAR-25 部规定：任何横向—航向组合振荡，在操纵松浮情况下，都必须受到正阻尼**



荷兰滚的实例



## 1.3.2 飞机的稳定性

### 3、飞机的横侧向稳定性

#### 2) 飞机的横侧向动稳定性

#### (3) 机的横侧向扰动运动及影响动稳定性的因素

- 初期以滚转运动模态为主
- 后期以螺旋运动模态为主
- 中期是荷兰滚
- **必须使侧向静稳定性和方向静稳定性保持适当的比例**
- 影响飞机侧向静稳定性的主要构造参数是机翼的**上反角和后掠角**
- 影响方向静稳定性的主要是垂尾的**面积**以及到飞机重心**力臂的长度**
- 大型高速飞机易出现不稳定的荷兰滚，在方向舵操纵系统中安装**偏航阻尼器**装置对快速偏航运动起阻尼作用

### 小结:

此节为本章的重点知识点

- 横侧向稳定性中，侧向和方向的稳定性是相互影响、相互共存的
- 方向稳定性远大于侧向稳定性时，出现螺旋运动模态
- 侧向稳定性远大于方向稳定性时，出现荷兰滚运动模态
- 必须使侧向静稳定性和方向静稳定性保持适当的比例



### 1.3.3 飞机的操纵性(2H)

# 目 录

1

操纵性的概念

2

操纵性与稳定性的关系

3

飞机的纵向操纵性

4

飞机的横侧向操纵性

5

飞机主操纵面上的附设装置

# 1.3.3 飞机的操纵性



飞机的操纵性  
能让飞机干什么

## 1.3.3 飞机的操纵性

### 1、操纵性的概念

操纵性是指飞机在飞行员操纵下，从一种飞行状态过渡到另一种飞行状态的特性  
只有具备一定操纵性的飞机才适合飞行

#### 操纵性



反应过于灵敏

反应过于迟钝

很难精确控制飞机

不得不加大操纵量

造成失速或结构的损坏

操纵起来十分的吃力

### 1、操纵性的概念

#### □ 纵向操纵性：

- ✓ 飞机按照飞行员的操纵指令，绕横轴转动，增大或减少迎角，改变原飞行姿态的能力

#### □ 侧向操纵性：

- ✓ 飞机按照飞行员的操纵指令，绕纵轴滚转，改变原飞行姿态的能力

#### □ 方向操纵性：

- ✓ 飞机按照飞行员的操纵指令，绕立轴转动，向左或向右偏转，改变原飞行姿态的能力

## 1.3.3 飞机的操纵性

### 2、操纵性与稳定性的关系

#### 稳定性太大



- 保持原飞行姿态的能力太强
- 操纵起来就很费劲
- 飞机的操纵性就很迟钝

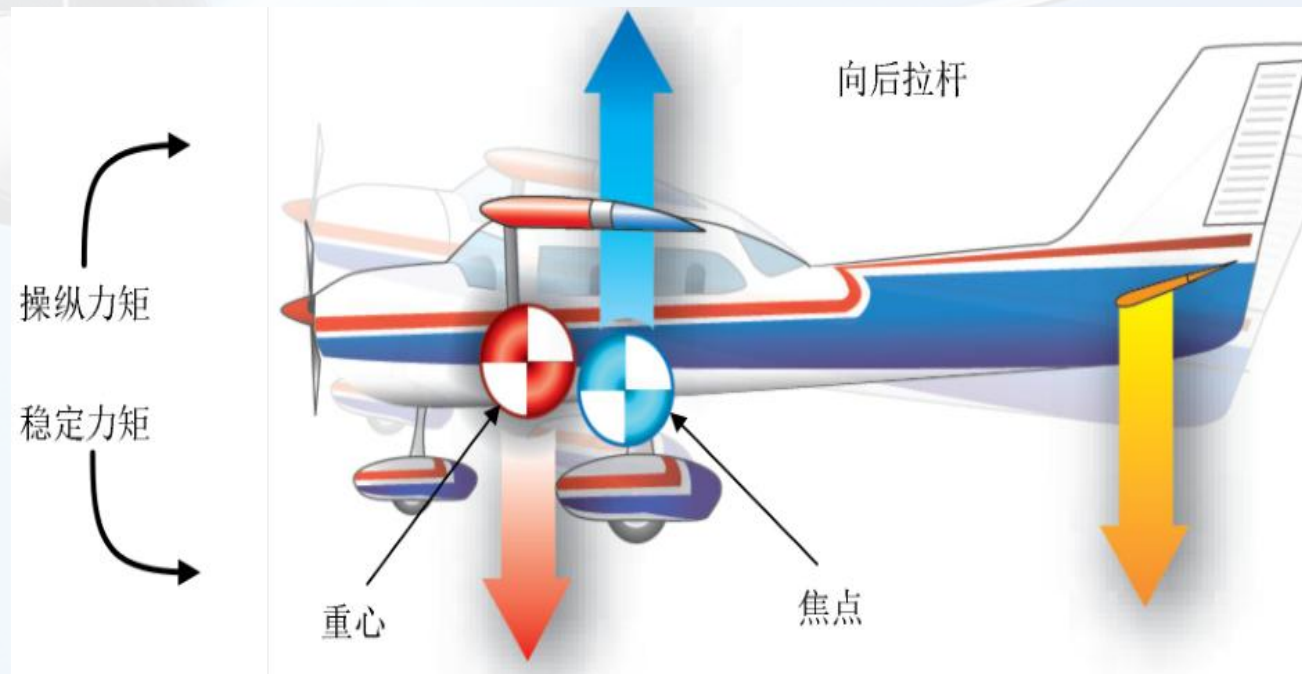
#### 稳定性太小



- 飞机的飞行姿态很容易改变
- 很难掌握操纵的分寸
- 操纵反应过于灵敏

## 2、操纵性与稳定性的关系

- 稳定性大，操纵性能下降
- 稳定性小，操纵性能提高
- 飞机的稳定性和操纵性是互相制约的
- 应在稳定性和操纵性两者之间选取一个平衡点，以使飞机具有足够的稳定性和良好的操纵性**



## 3、飞机的纵向操纵性

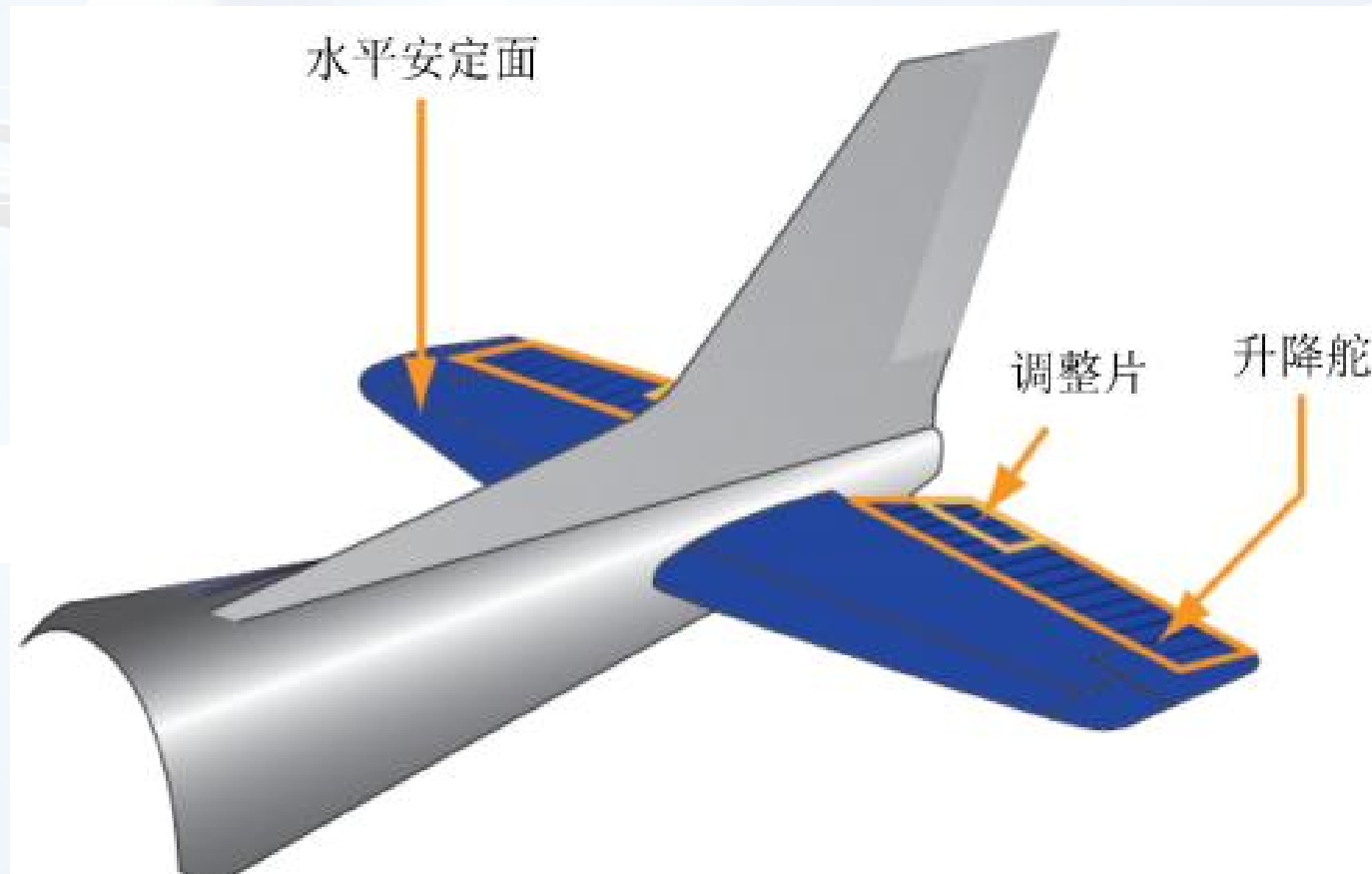
### 1) 水平尾翼

#### (1) 组成

- 由水平安定面和升降舵组成

#### (2) 功能

- 纵向平衡
- 对飞机进行纵向操纵



## 1.3.3 飞机的操纵性

### 3、飞机的纵向操纵性

#### 2) 飞机的纵向操纵

- 由飞行员通过驾驶杆、传动系统等改变升降舵的偏转角来实现的



## 1.3.3 飞机的操纵性

### 3、飞机的纵向操纵性

#### 2) 飞机的纵向操纵

飞行员通过操纵机构改变升降舵的偏转角度，对飞机重心产生的俯仰力矩称为纵向操纵力矩

#### □ 操纵过程分析



### 3、飞机的纵向操纵性

#### 3) 飞机重心范围的确定

- 重心位置对纵向静稳定性和操纵性影响很大
- 为了保证具有足够的稳定性和良好的操纵性
- 必须对飞机重心的变化范围加以限制
- 重心的变化范围是用重心前限和重心后限来确定

### 3、飞机的纵向操纵性

#### 3) 飞机重心范围的确定

##### □ 飞机的重心前限

主要是从纵向平衡和纵向操纵性能要求对重心最靠前的位置进行限制

##### □ 飞机的重心后限

主要是从纵向静稳定性和操纵灵敏度的要求对重心最靠后的位置进行限制

### 小结:

- 操纵性的概念
- 操纵性与稳定性的关系

# 1.3.3 飞机的操纵性

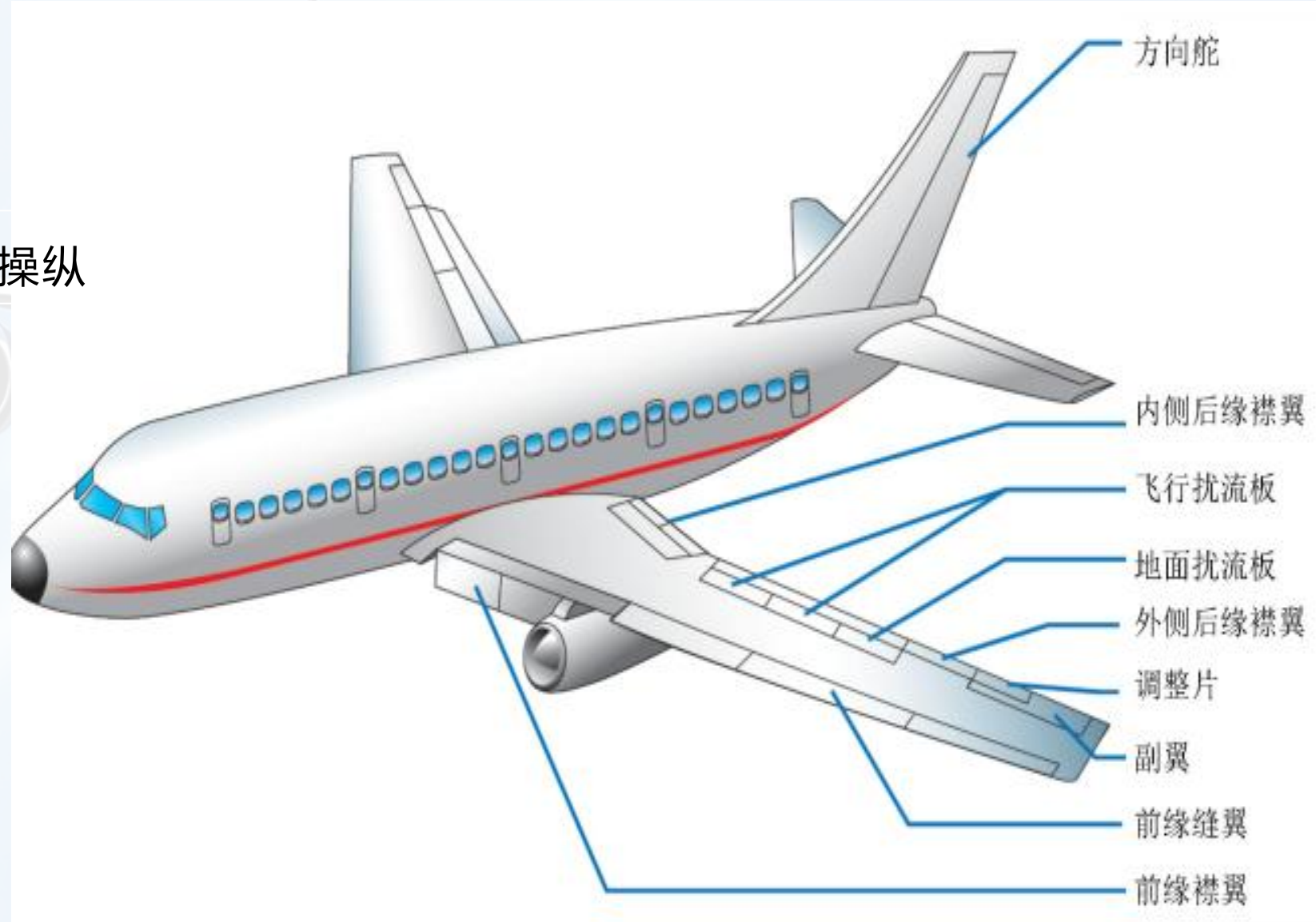
## 4、飞机的横侧向操纵性

### 1) 飞机的侧向操纵

#### (1) 偏转副翼对飞机进行侧向操纵

□ 侧向操纵是通过偏转副翼来完成的

□ 副翼是安装在机翼后缘转轴上的操纵面



## 4、飞机的横侧向操纵性

### 1) 飞机的侧向操纵

(1) 偏转副翼对飞机进行侧向操纵

□ 飞行员通过操纵驾驶杆（驾驶盘）来控制副翼偏转



## 1.3.3 飞机的操纵性

### 4、飞机的横侧向操纵性

#### 1) 飞机的侧向操纵

#### (2) 偏转副翼引起的有害偏航

- 上扬机翼升力大，诱导阻力也大
- 下沉机翼升力小，诱导阻力也小
- 阻力发生变化部位靠近翼梢处，力臂较长
- 引起**有害**偏航



# 1.3.3 飞机的操纵性

## 4、飞机的横侧向操纵性

### 1) 飞机的侧向操纵

#### (3) 有害偏航的不利影响

- 降低了副翼的操纵效率
- 对飞机的水平转弯操纵也不利



# 1.3.3 飞机的操纵性

## 4、飞机的横侧向操纵性

### 1) 飞机的侧向操纵

#### (4) 消除有害偏航的方法

##### □ 采用差动副翼

对于驾驶杆的同一行程，副翼上偏角度大于下偏角度的副翼

##### □ 采用弗来兹 (Frise) 副翼

副翼上下偏转角度是相同的

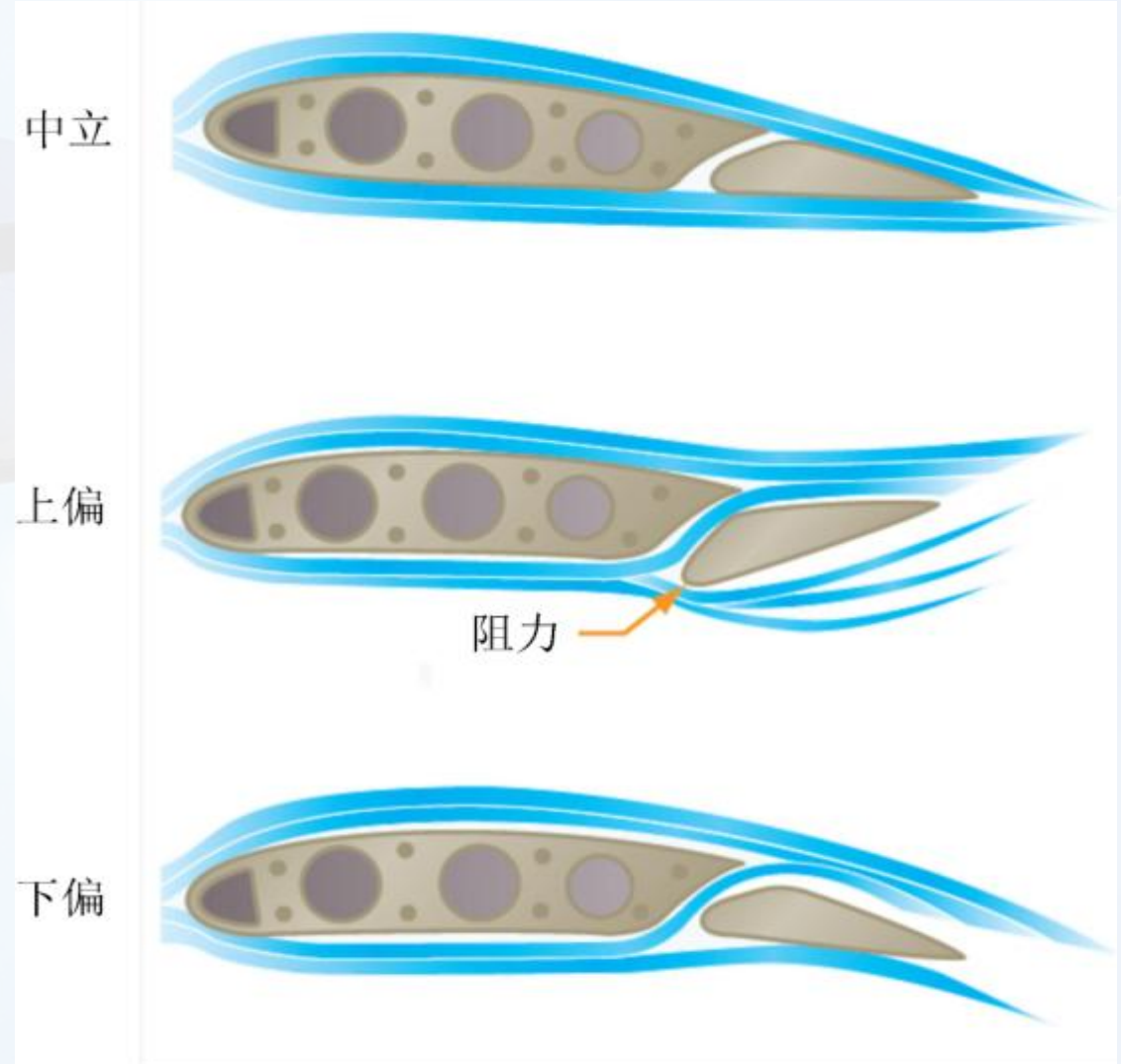


图 3-38 弗来兹副翼

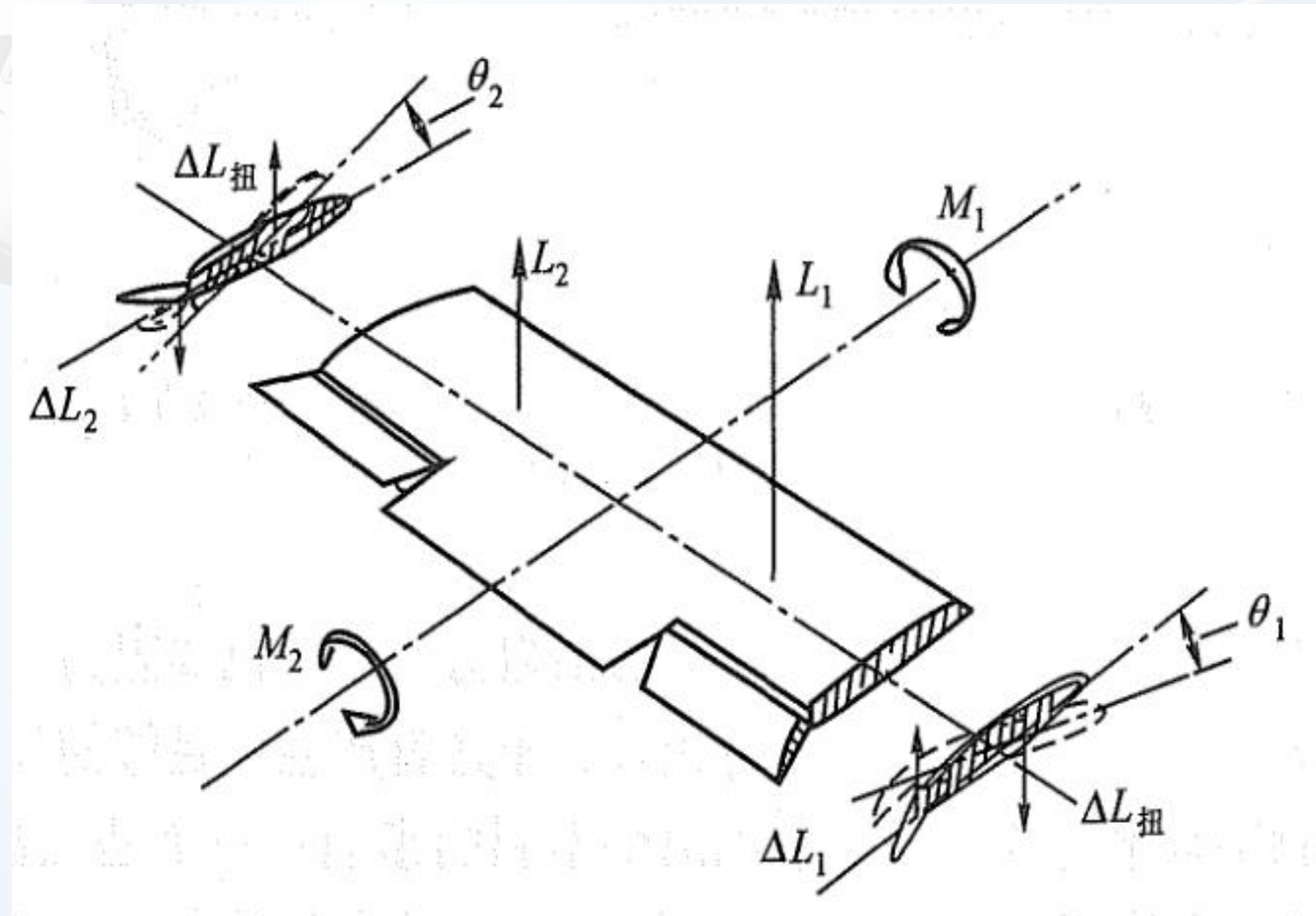
# 1.3.3 飞机的操纵性

## 4、飞机的横侧向操纵性

### 1) 飞机的侧向操纵

#### (5) 副翼操纵的失效和反逆问题

- 副翼完全丧失作用或产生相反作用的现象，称为副翼的失效或反逆
- 机翼是**弹性体**
- 副翼安装在扭转刚度较低的翼梢部位
- 机翼的扭转变形产生力矩 $M_2$ 与滚转操纵力矩  $M_1$ 方向相反
- 降低了副翼的操纵效率



## 4、飞机的横侧向操纵性

### 1) 飞机的侧向操纵

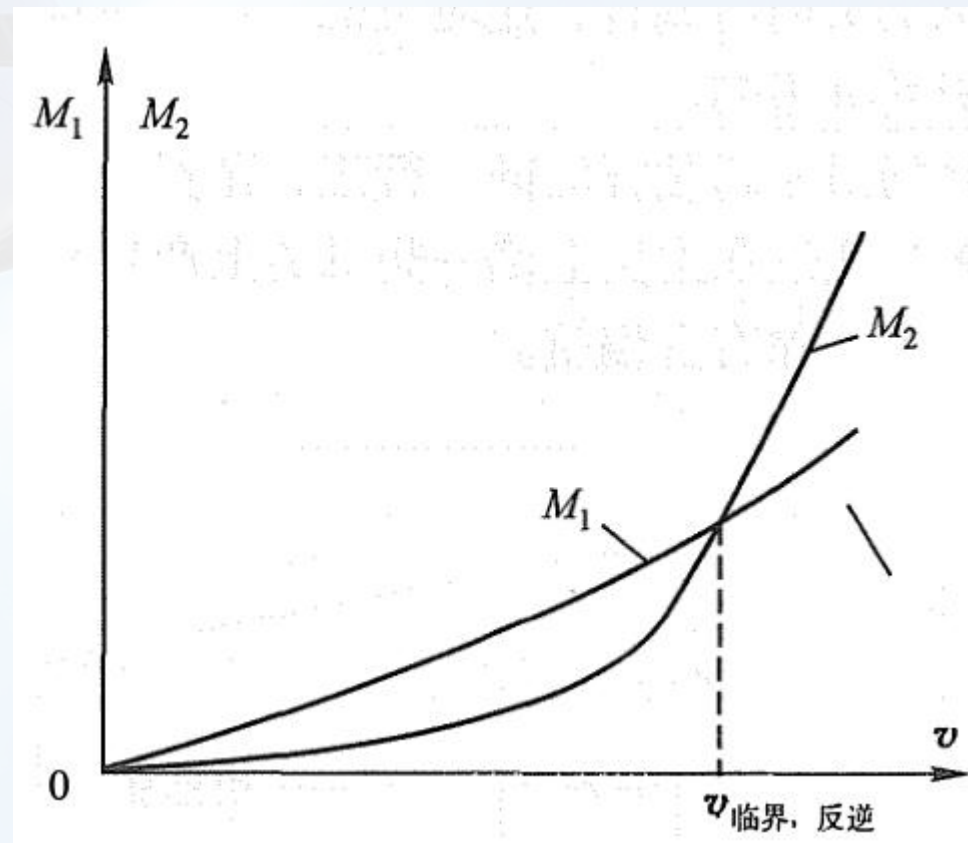
#### (5) 副翼操纵的失效和反逆问题

□ 副翼失效

□ 副翼反逆临界速度

□ 副翼反逆

□ 通常要求飞机的最大允许速度比副翼反逆临界速度低 100 km/h



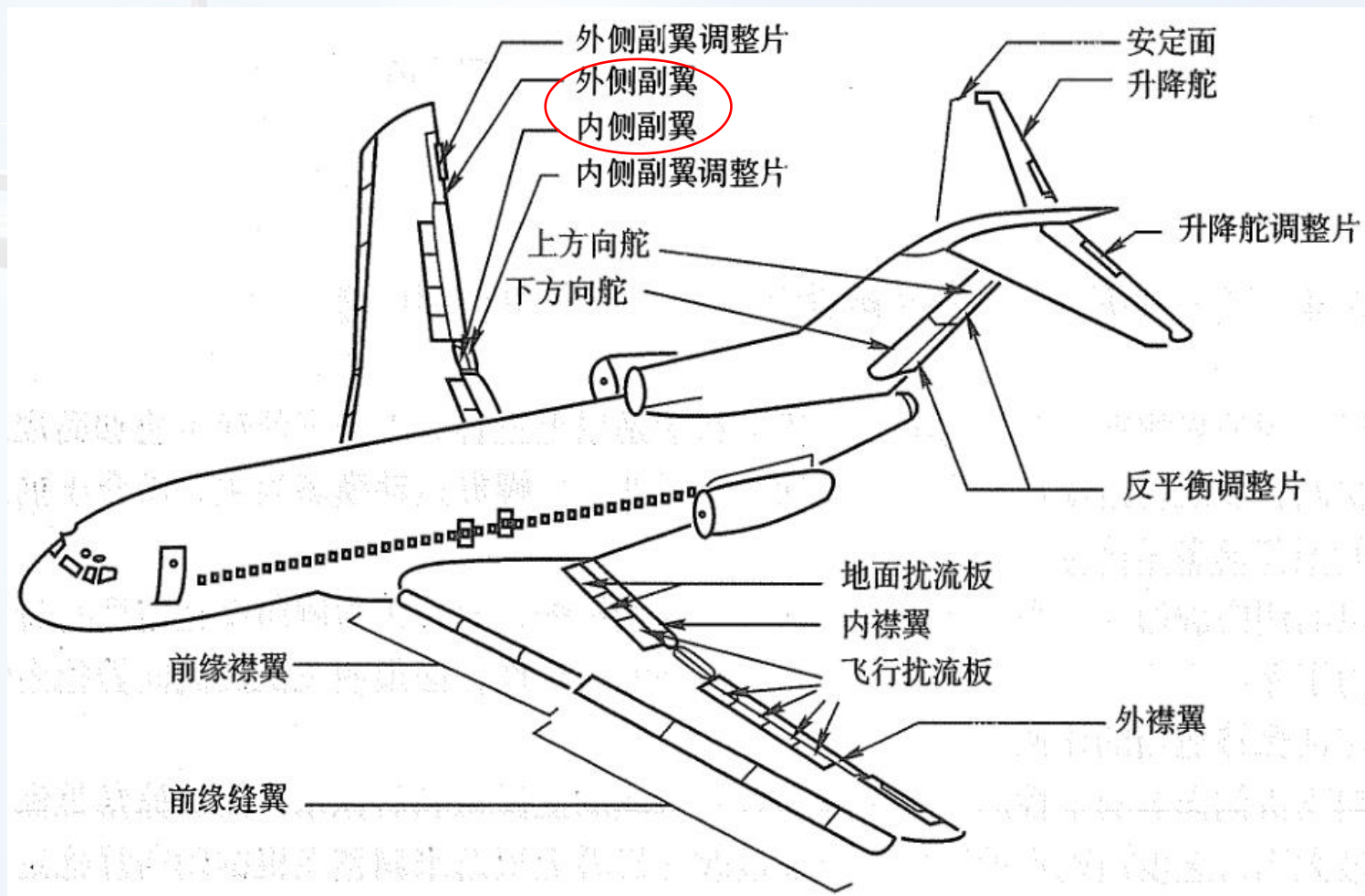
## 1.3.3 飞机的操纵性

### 4、飞机的横侧向操纵性

#### 1) 飞机的侧向操纵

#### (6) 提高副翼反逆临界速度的措施

- 提高机翼的抗扭刚度
- 采用混合副翼的型式
- 内侧副翼也称为全速副翼，  
外侧副翼也称为低速副翼



## 1.3.3 飞机的操纵性

### 4、飞机的横侧向操纵性

#### 1) 飞机的侧向操纵

#### (7) 提高飞机侧向操纵效率的措施

- 扰流板
- 涡流发生器



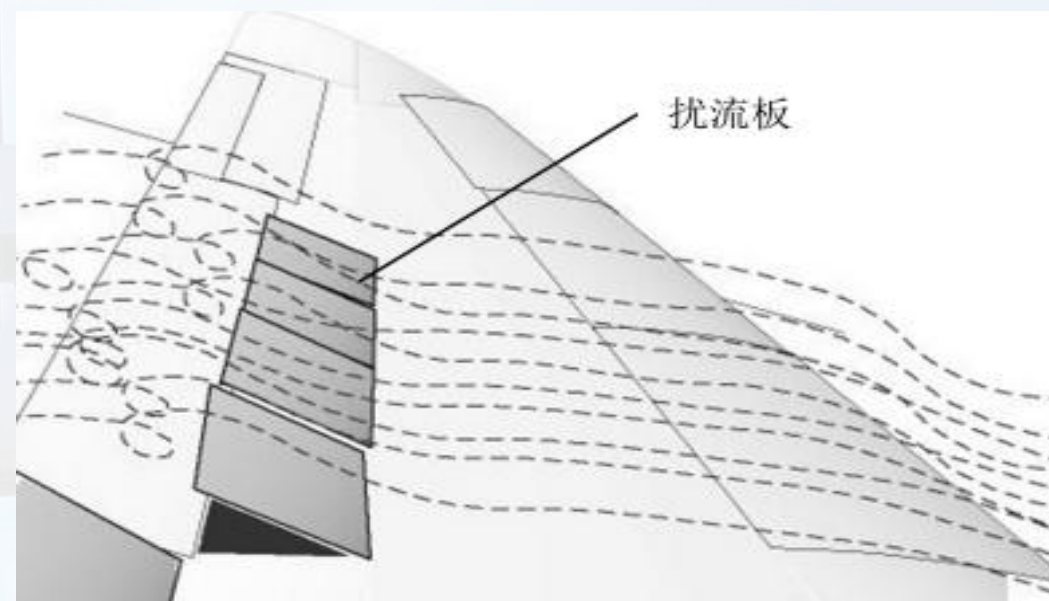
### 4、飞机的横侧向操纵性

#### 1) 飞机的侧向操纵

#### (7) 提高飞机侧向操纵效率的措施

##### □ 扰流板

- ✓ 扰流板是一种十分有效的**辅助操纵面**
- ✓ 飞行时，**地面扰流板**被锁定
- ✓ 飞行中**飞行扰流板**辅助副翼进行侧向操纵或使飞机减速
- ✓ 机轮一触地，地面扰流板开锁，所有扰流板全部打开，减升增阻
- ✓ 副翼先向上偏转一定角度后，联动机构才能将扰流板打开
- ✓ 扰流板打开的角度与副翼偏转角度有一定搭配关系



# 1.3.3 飞机的操纵性

## 4、飞机的横侧向操纵性

### 1) 飞机的侧向操纵

#### (7) 提高飞机侧向操纵效率的措施

##### □ 涡流发生器

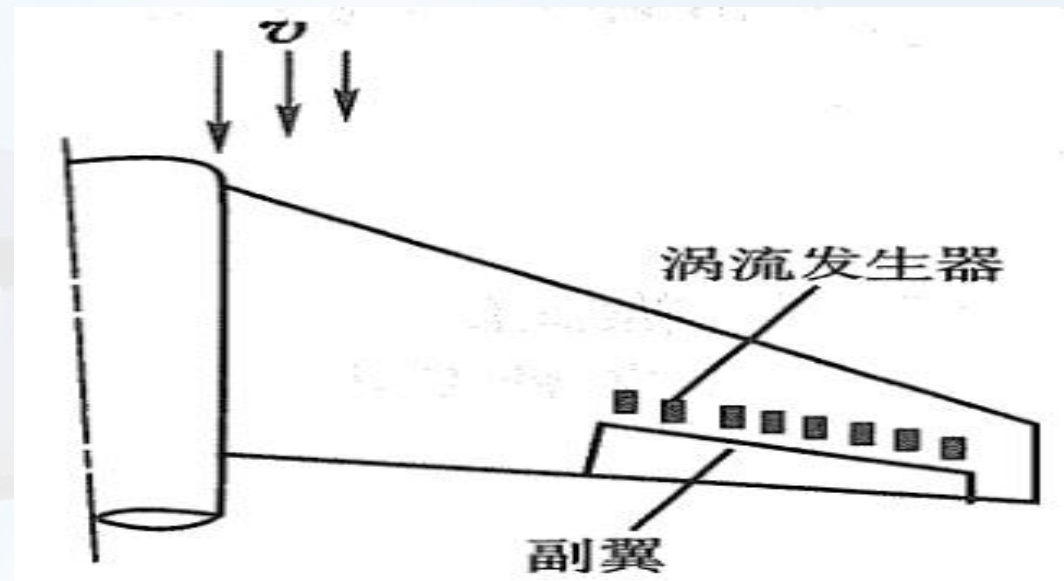
##### ✓ 低速飞机上:

提高临界迎角和增升

##### ✓ 高亚声速和跨声速飞机上:

推迟激波分离

##### ✓ 提高了副翼在大偏转角和高速下的操纵效率

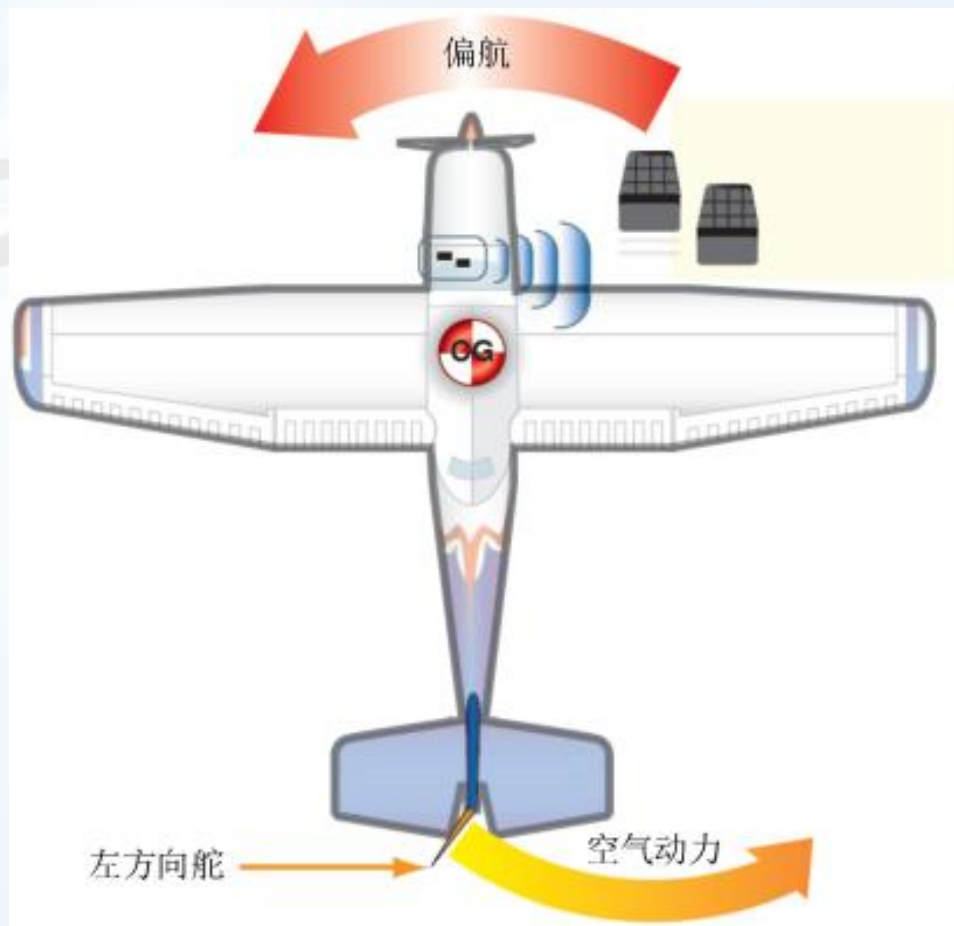


## 4、飞机的横侧向操纵性

### 2) 飞机的方向操纵

#### (1) 偏转方向舵对飞机进行方向操纵

- 垂尾由垂直安定面和方向舵组成
- 通过脚蹬，操纵方向舵左右偏转，实施方向操纵



## 1.3.3 飞机的操纵性

### 4、飞机的横侧向操纵性

#### 2) 飞机的方向操纵

##### (2) 蹬舵反倾斜现象

- 蹬舵时，垂尾产生的侧向力对重心产生的横滚力矩与所希望滚转的方向相反
- 如果侧向力对重心产生的横滚力矩大于侧向静稳定力矩
- **就会出现蹬左舵飞机向右倾斜，蹬右舵飞机又向左倾斜的现象**
- 这种现象叫做**蹬舵反倾斜现象**
- 这种现象的根源在于**飞机侧向稳定性和方向操纵性的搭配不合理**

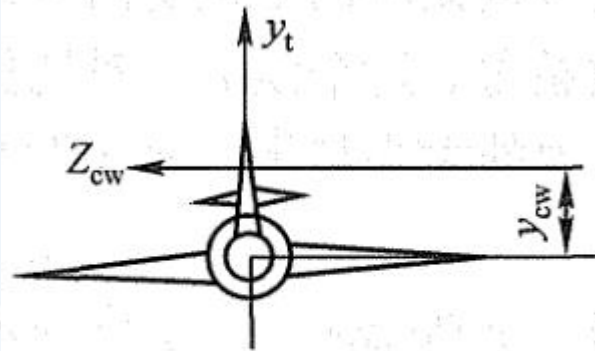
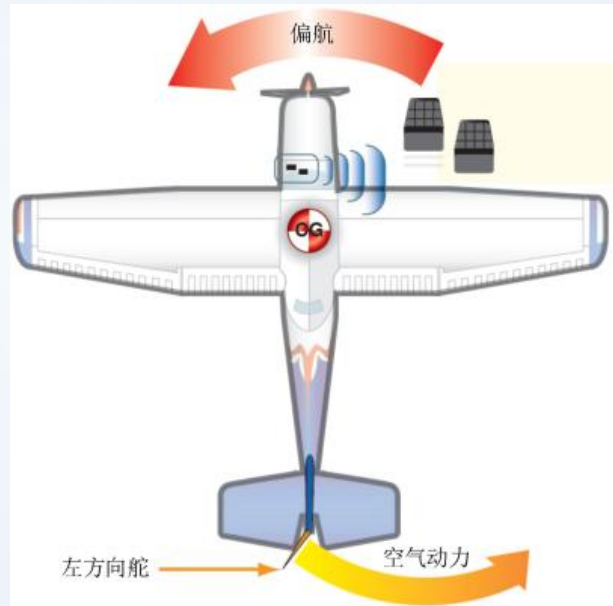


图 4-31 偏转方向舵所产生的滚转力矩



## 1.3.3 飞机的操纵性

### 5、飞机主操纵面上的附设装置

□ 三个主操纵面上的附设装置所起的作用有**质量平衡、气动补偿和气动平衡**

#### 1) 质量平衡

##### (1) 质量平衡的目的

- 质量平衡是在操纵面前缘内部加配重，使操纵面的重心前移到转轴之前
- 目的是防止**颤振**
- 颤振、颤振临界速度

什么是颤震？



# 1.3.3 飞机的操纵性

## 5、飞机主操纵面上的附设装置

### 1) 质量平衡

### (2) 质量平衡的方法

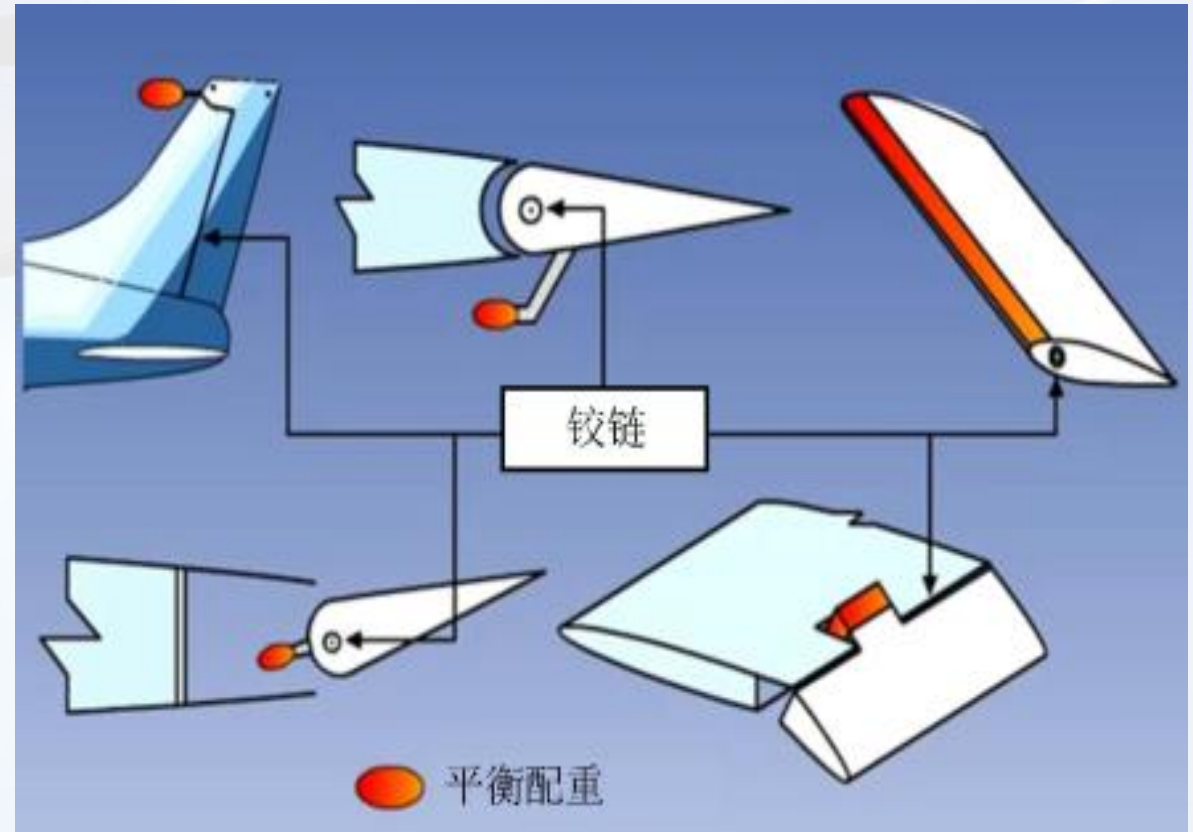
#### □ 集中配重

✓ 效果较差, 破坏气动外形, 阻力增大

#### □ 分散配重

✓ 效果好, 高速飞机上广泛运用

□ 还可以分为: 固定配重、可调配重



# 1.3.3 飞机的操纵性

## 5、飞机主操纵面上的附设装置

### 2) 气动补偿

#### (1) 气动补偿的目的

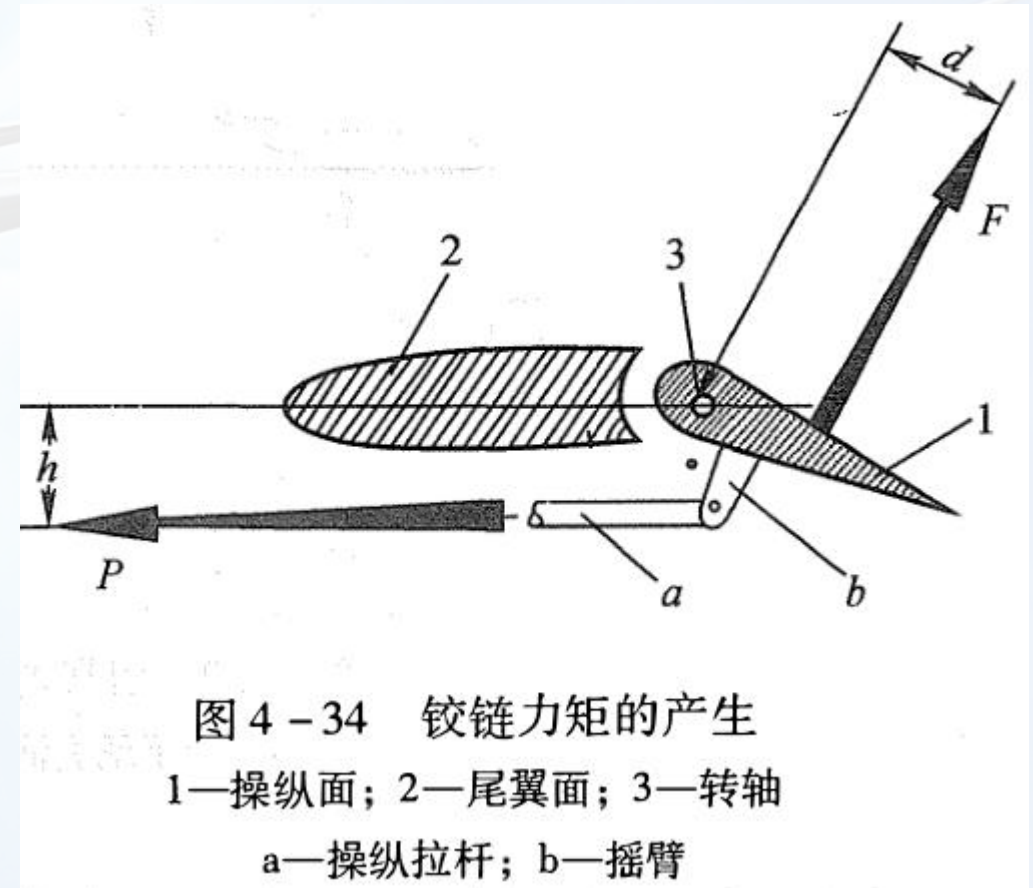
□ 目的就是要减少铰链力矩，减轻飞行员操纵飞机的劳动强度

□ 铰链力矩： $M_j = F \times d$

□ 操纵力矩： $M_c = P \times h$

□  $M_c > M_j$ ，舵面才会偏转

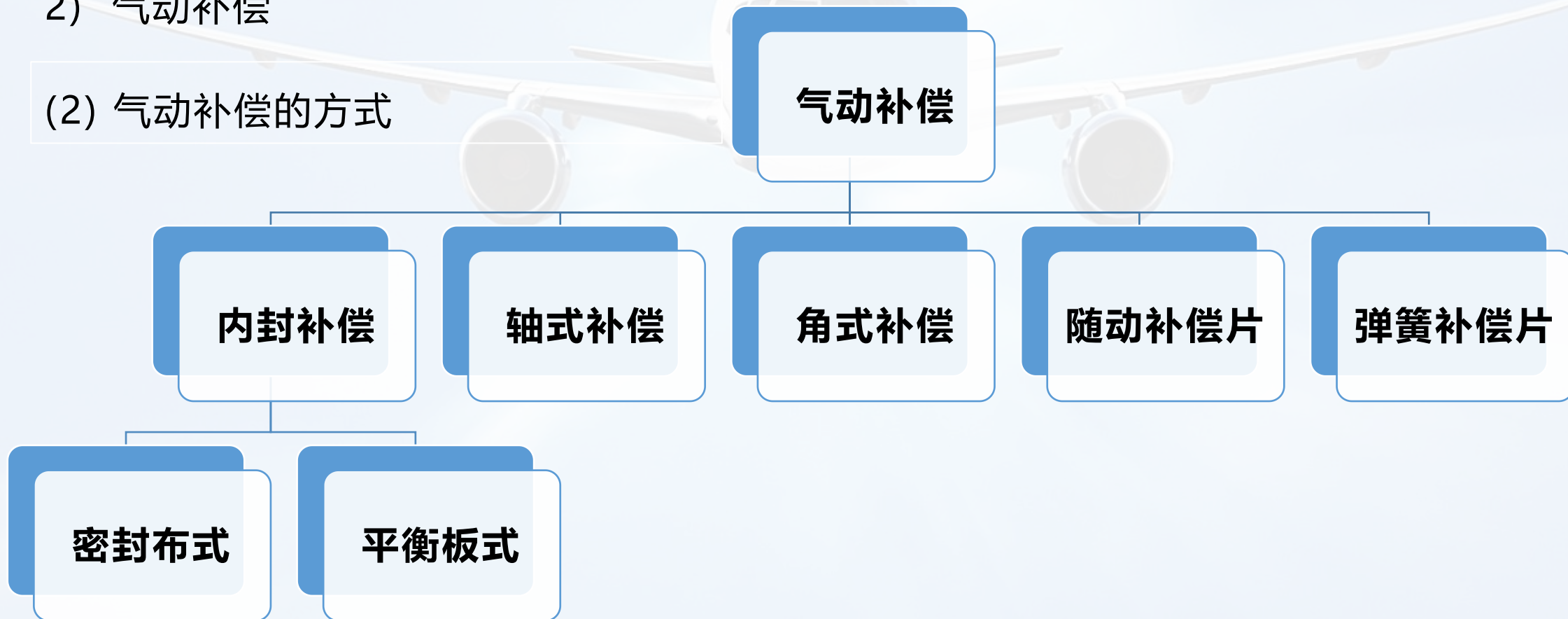
□ 飞行速度的提高和飞机尺寸重量的增加，铰链力矩很快加大



## 5、飞机主操纵面上的附设装置

### 2) 气动补偿

#### (2) 气动补偿的方式



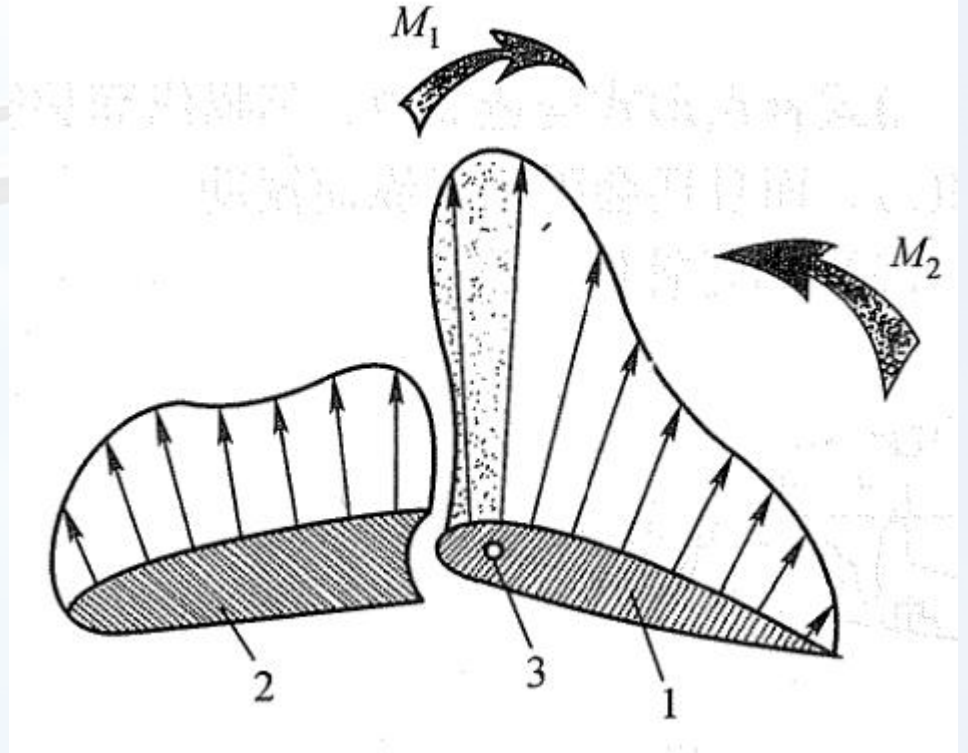
## 1.3.3 飞机的操纵性

### 5、飞机主操纵面上的附设装置

#### 2) 气动补偿

#### (2) 气动补偿的方式

- **轴式补偿**：将操纵面转轴从前缘向后移动一段距离
- 也给操纵面的重力平衡带来有利条件
- 偏转时，它与前面固定翼面之间形成间隙，会使操纵面效率降低
- 要确保在操纵面最大偏角时，其前缘不能突出翼形外表面之外

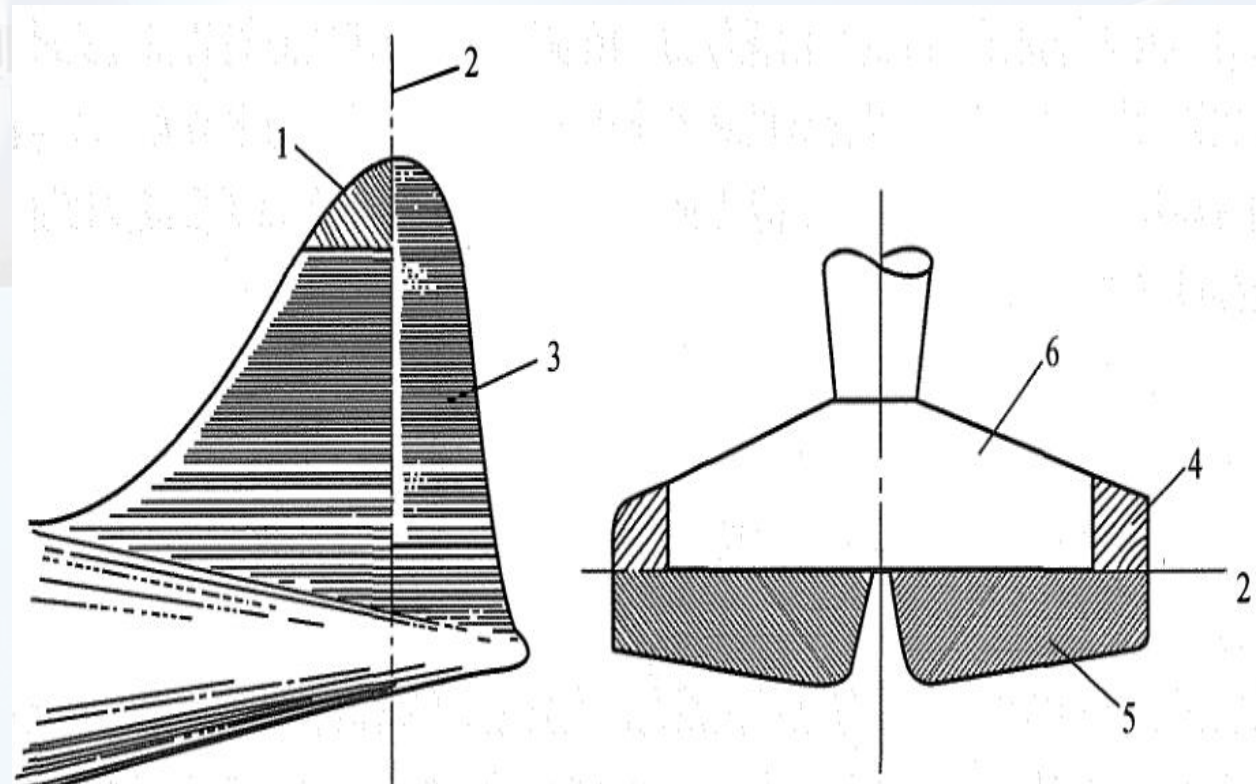


## 5、飞机主操纵面上的附设装置

### 2) 气动补偿

#### (2) 气动补偿的方式

- **角式补偿**：操纵面的一部分向前伸出，伸到操纵面转轴之前，形成一个角
- 偏转时，角部分突出在翼外形之外，将产生涡流，增加阻力，而且还会引起操纵面振动



# 1.3.3 飞机的操纵性

## 5、飞机主操纵面上的附设装置

### 2) 气动补偿

#### (2) 气动补偿的方式

- **内封补偿**：多用于副翼的气动补偿上
- 上下室内压力差形成气动力对副翼转轴的力矩
- 有密封布式和平衡板式
- 可以得到足够的补偿度
- 气动外形好，增加阻力不大
- 使副翼上下偏转角度受到了限制
- 要经常进行检查和维修

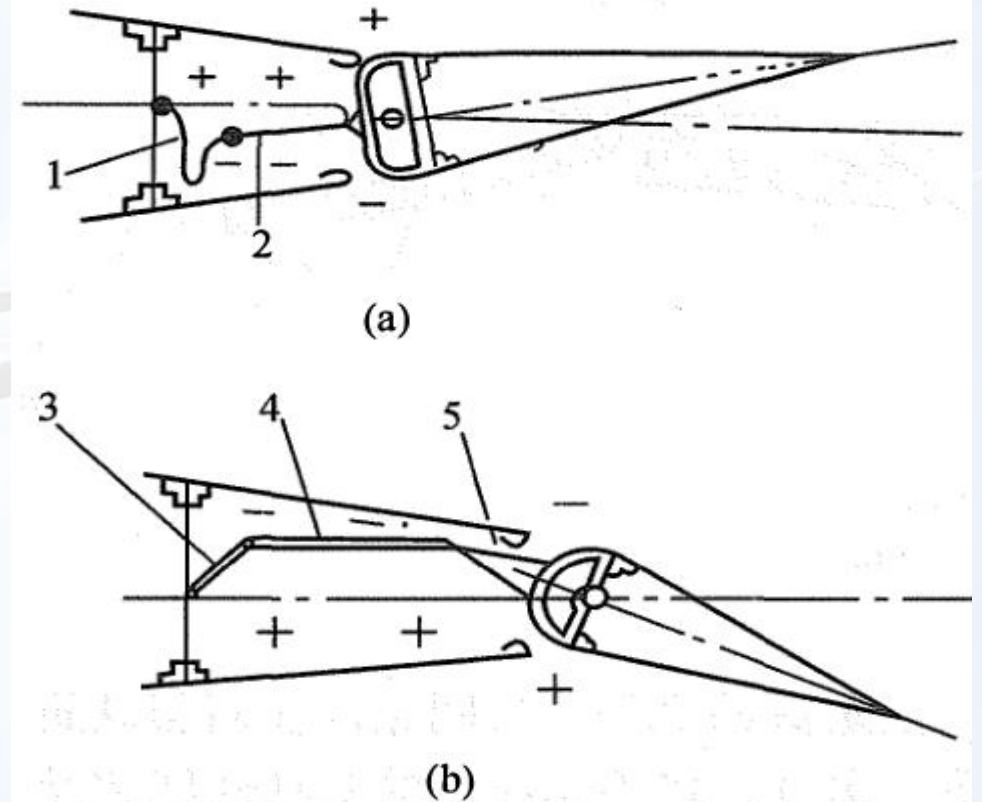


图 4-37 内封式补偿

(a) 密封布式；(b) 平衡板式

1—气密封胶布；2—补偿面；3—摆板；

4—平衡板；5—鸭舌

## 1.3.3 飞机的操纵性

### 5、飞机主操纵面上的附设装置

#### 2) 气动补偿

#### (2) 气动补偿的方式

- **随动补偿片**：又称为伺服补偿片
- 由于刚性连杆的作用，迫使补偿片向相反的方向偏转
- 气动补偿与操纵力大小无关
- 只要操纵面偏转，就进行气动补偿
- 在操纵力比较小的情况下，驾驶员将得不到适当的偏转操纵面的感觉

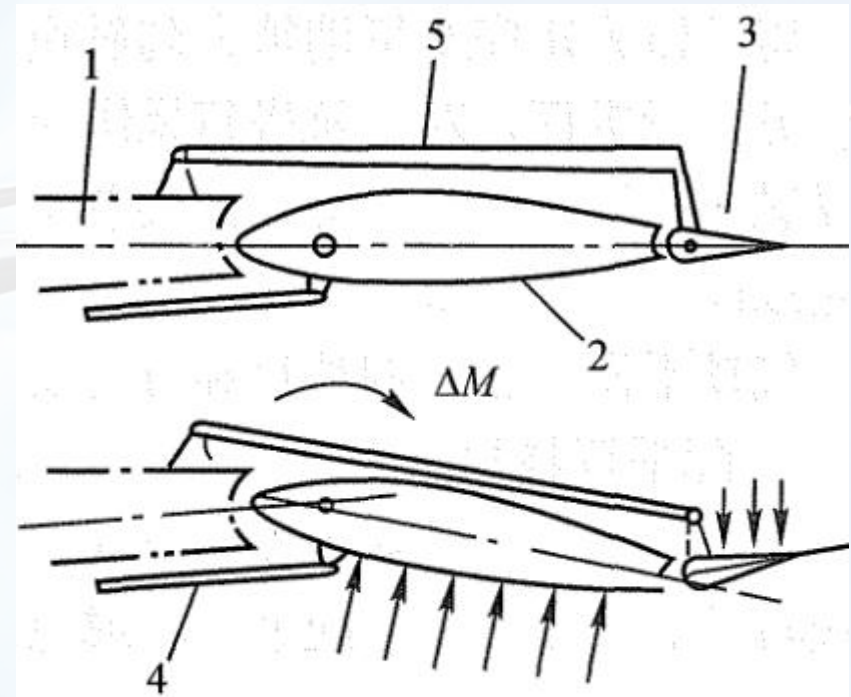


图 4-38 随动补偿片

1—水平安定面；2—升降舵；3—补偿片；  
4—操纵拉杆；5—刚性连杆

## 1.3.3 飞机的操纵性

### 5、飞机主操纵面上的附设装置

#### 2) 气动补偿

#### (2) 气动补偿的方式

#### □ 弹簧补偿片：

- 当操纵力较小时
- 不能将弹簧拉开
- 此时弹簧筒就是一个刚性连杆
- 传动杆带动补偿片同向偏转，不起气动补偿的作用

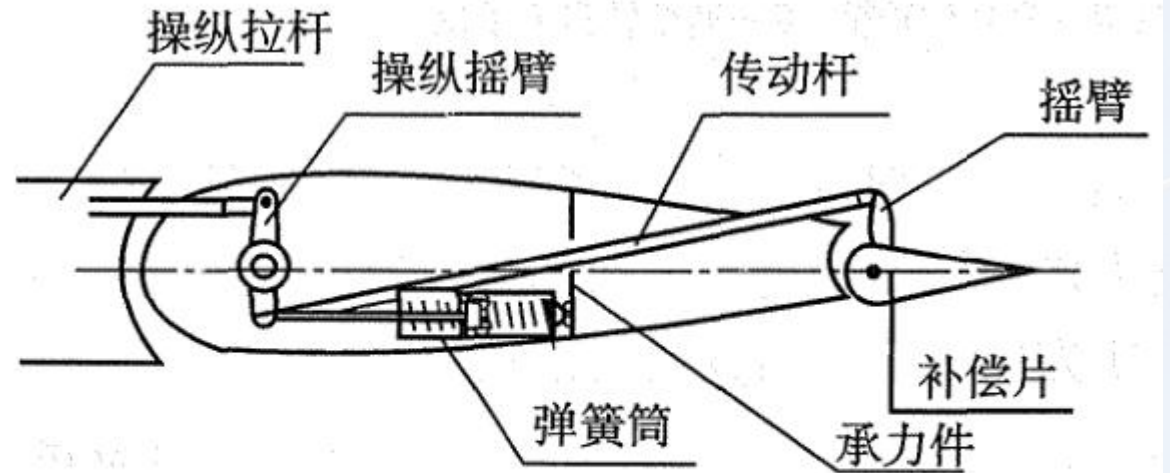


图 4 - 39 弹簧补偿片

- 当操纵力达到一定值时
- 传动杆带动补偿片反向偏转，进行气动补偿
- 通过选定弹簧的初始张力，就可以将气动补偿控制在一定范围内

## 1.3.3 飞机的操纵性

### 5、飞机主操纵面上的附设装置

#### 3) 气动平衡

气动平衡是在飞机处于某一飞行状态时，完全消除驾驶杆力，实现松杆飞行

#### (1) 气动平衡与气动补偿的区别

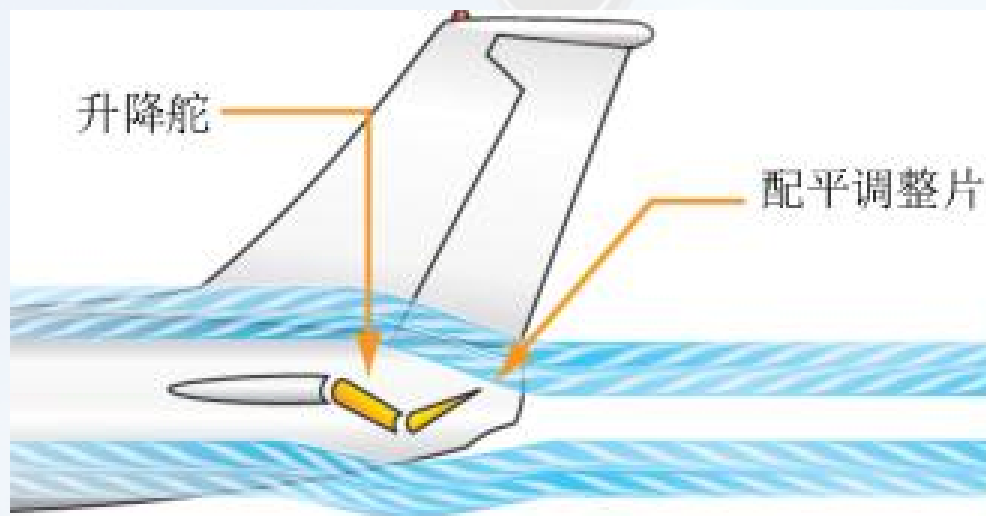
	气动平衡	气动补偿
功能不同	在飞机达到某一飞行状态后	飞行员偏转操纵面，对飞机进行操纵时
	将铰链力矩完全抵消掉	减小铰链力矩
	飞行员松杆，飞机仍保持这一飞行姿态	减轻飞行员操纵飞机的劳动强度
操纵方式上不同	通过独立的配平手轮或配平电门等来操纵	随操纵面偏转来起作用

## 5、飞机主操纵面上的附设装置

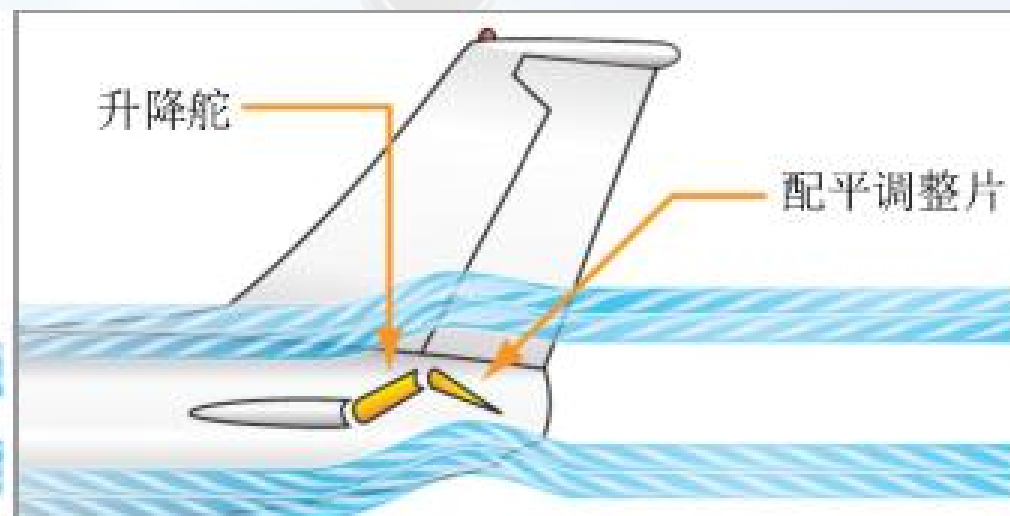
### 3) 气动平衡

#### (2) 配平调整片

- 通过配平手柄或电门偏转配平调整片
- 调整片转动方向与操纵面转动方向相反



升降舵向下，调整片向上，低头配平



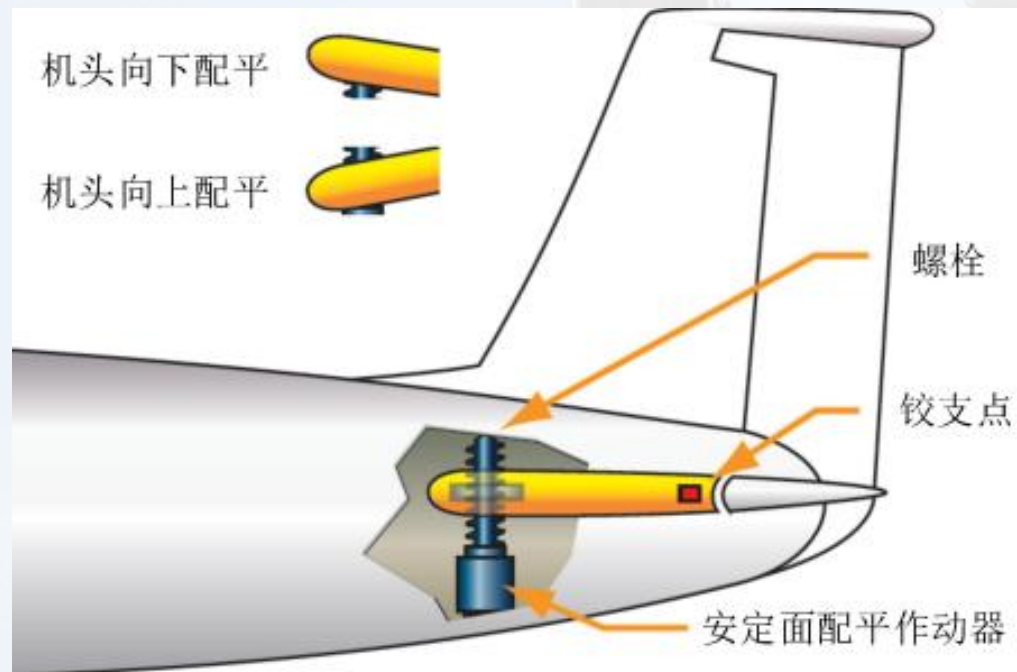
升降舵向上，调整片向下，抬头配平

# 1.3.3 飞机的操纵性

## 5、飞机主操纵面上的附设装置

### 3) 气动平衡


#### (3) 可变安装角的水平安定面



- 若飞机机身过长，重量较大，重心又较靠前，所需要的偏转角度可能就超过了升降舵偏转角度的允许范围
- 起飞前、到达巡航高度后、着陆下滑时用配平手轮将水平安定面的安装角调整到需要值
- 加速到一定的马赫数后全机压力中心会后移，自动飞行控制系统进行马赫配平
- 襟翼尚未收上的爬高过程中，则利用升降舵进行速度配平

### 小结:

- 消除有害偏航的方法
- 克服副翼操纵反逆和失效的方法
- 蹬舵反倾斜现象的根源在于飞机侧向稳定性和方向操纵性的搭配不合理
- 质量平衡、气动补偿、气动平衡，掌握他们不同的作用和原理，明白他们的区别



## 1.3.4 旋翼机基本飞行原理(2H)

# 目 录

1

旋翼升力的产生和反作用扭矩

2

旋翼桨叶运动的基本原理

3

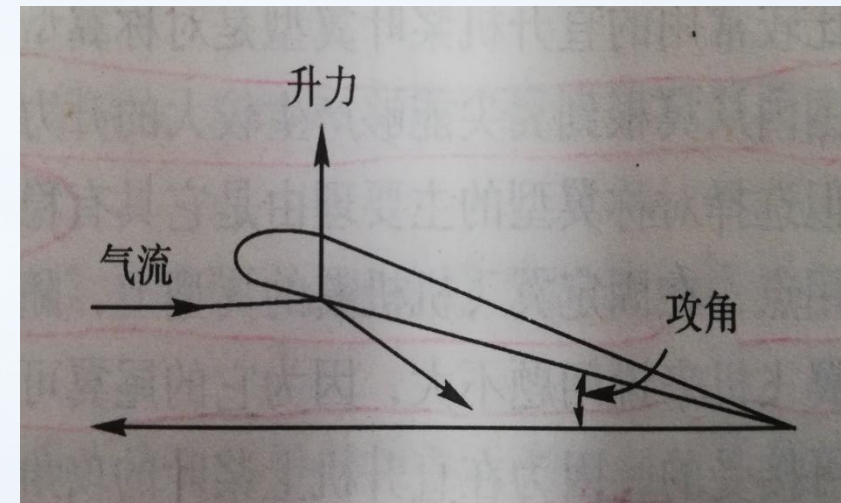
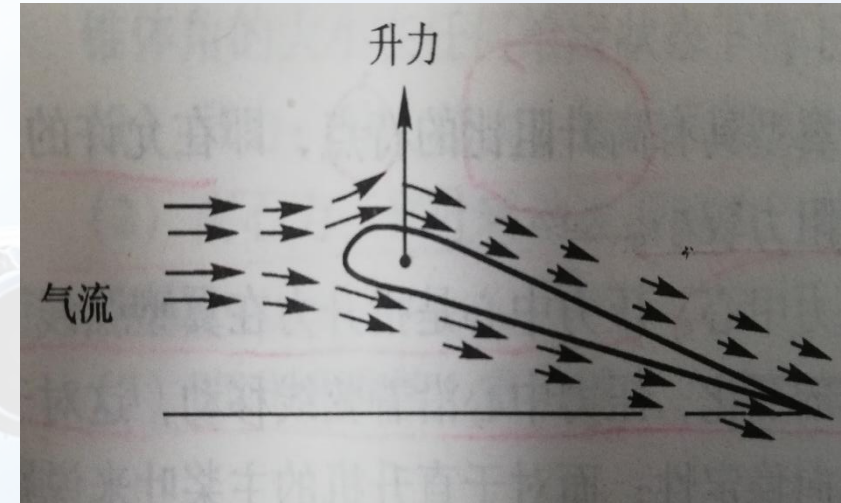
旋翼航空器的基本操纵

## 1.3.4 旋翼机基本飞行原理

### 1、旋翼升力的产生和反作用扭矩

#### 1) 旋翼升力的产生

- 两个升力产生的理论（伯努利原理，牛顿第三定理）
- 旋翼桨叶的每一个截面都相当于机翼的一个翼型
- 弦线与旋转平面的夹角称为**桨叶角**
- 旋翼旋转一周桨上点向前移动的距离称为旋翼的**桨距**
- 旋转旋翼桨叶所产生的**拉力**，不仅**取决于**旋翼的**转速**，而且取决于桨叶的**桨距**

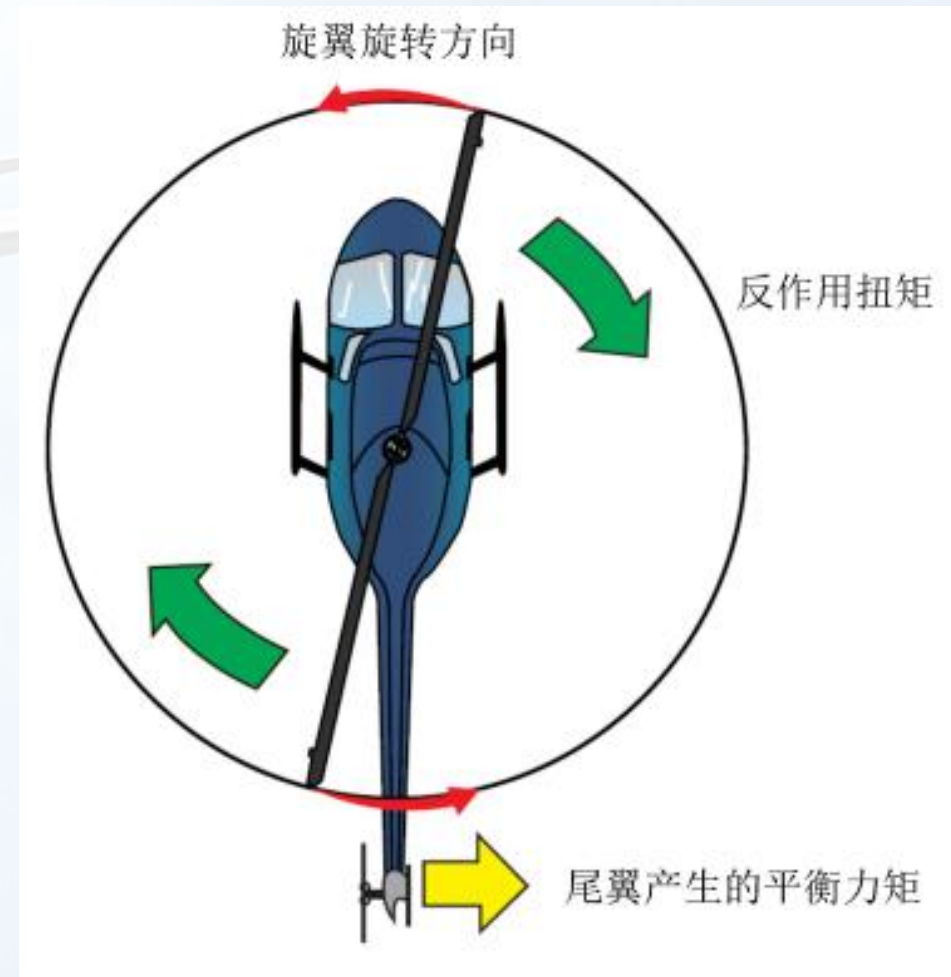


## 1.3.4 旋翼机基本飞行原理

### 1、旋翼升力的产生和反作用扭矩

#### 2)反作用扭矩

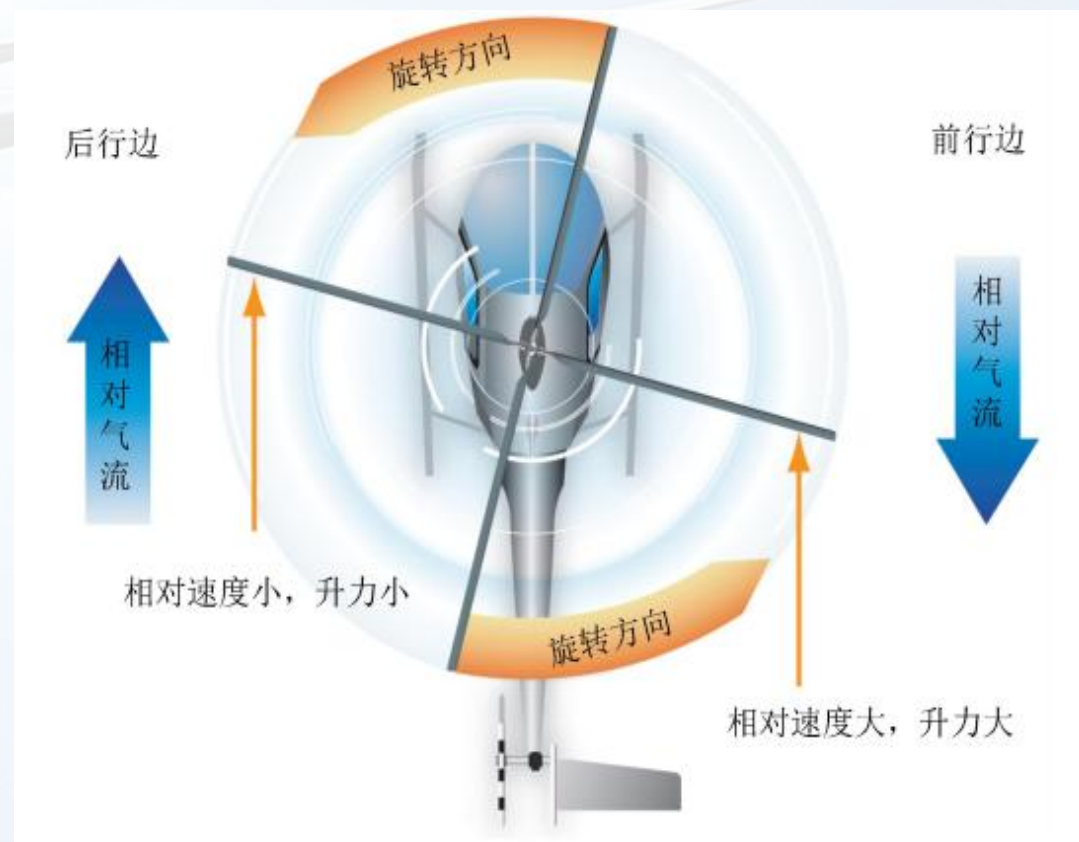
- 随着旋翼旋转，直升机机体会产生方向相反的反作用扭矩(牛顿第三定理)
- 直升机抵消反作用扭矩的方案有很多，最常规的是采用尾桨



## 2、旋翼桨叶运动的基本原理

### 1) 挥舞铰、摆振铰、桨距铰

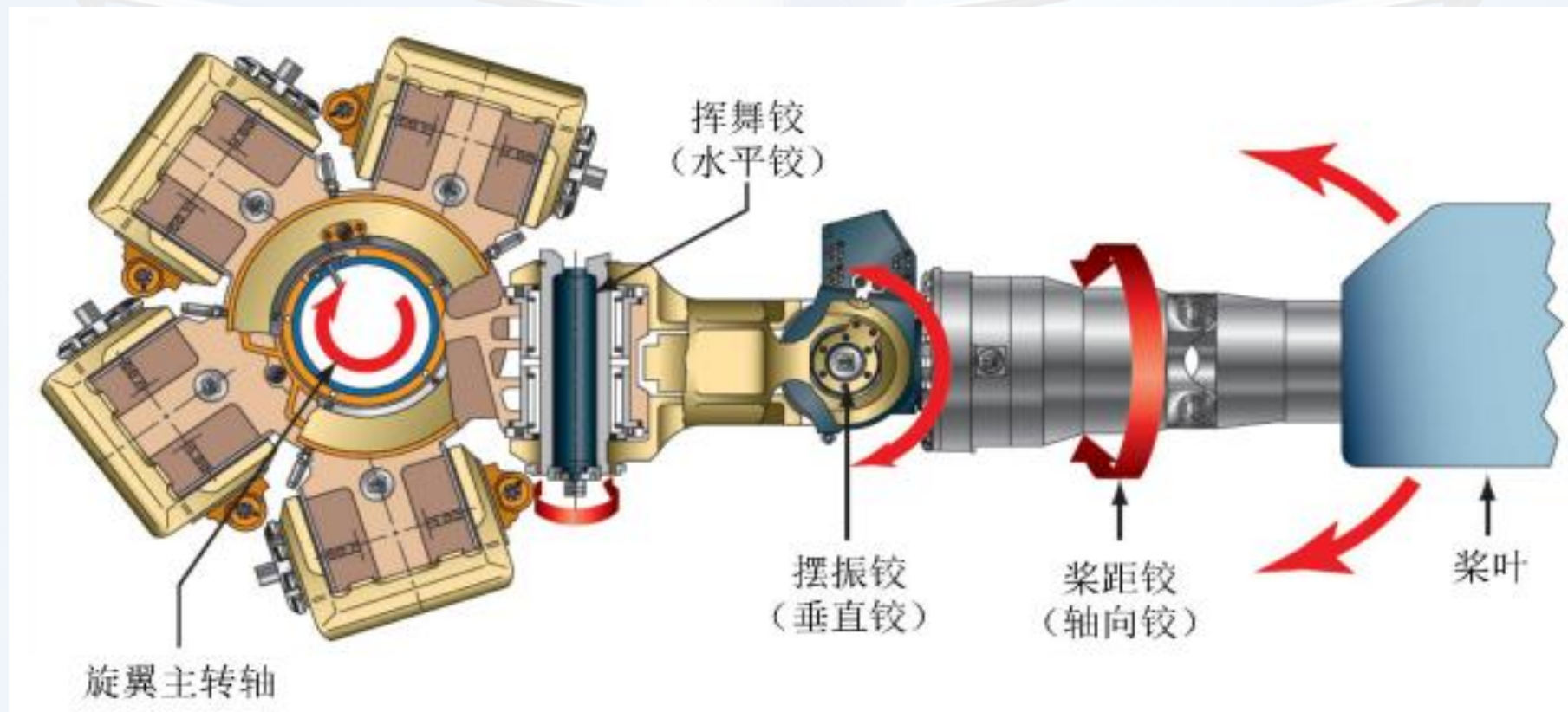
- 使桨叶可上、下摆动，不传递垂直方向的力，从而使两边升力平衡，这个铰链称为**水平铰或挥舞铰**
- 垂直放置的铰链，使桨叶可在圆周方向做少量的前后摆动，这个铰链叫做**垂直铰或摆振铰**
- 挥舞铰和摆振铰是旋翼升力均匀和平稳飞行的关键
- 使桨叶可以绕自身的轴运动，这个铰称为**桨距铰或轴向铰**



## 1.3.4 旋翼机基本飞行原理

### 2、旋翼桨叶运动的基本原理

#### 1) 挥舞铰、摆振铰、桨距铰



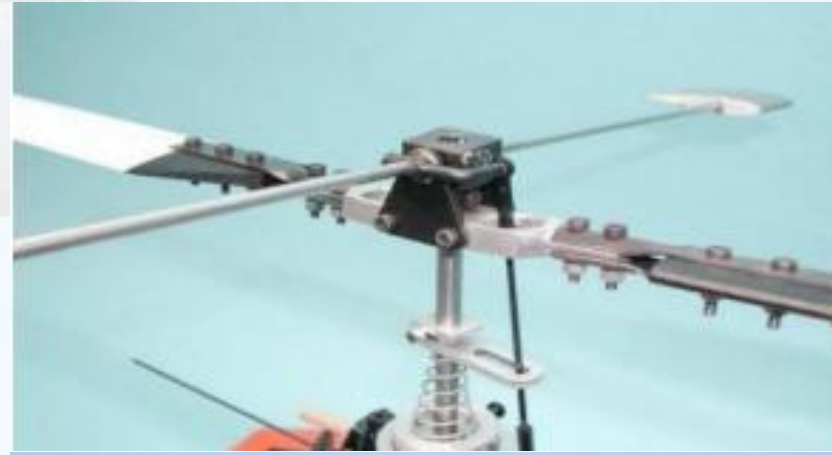
# 1.3.4 旋翼机基本飞行原理

## 2、旋翼桨叶运动的基本原理

### 2)旋翼的四种形式



全铰式



半铰式



无铰式



无轴承式

## 1.3.4 旋翼机基本飞行原理

### 2、旋翼桨叶运动的基本原理

#### 2)旋翼的四种形式

	水平铰	垂直铰	轴向铰
<b>全铰式</b>	√	√	√
<b>半铰式</b>	√		√
<b>无铰式</b>			√
<b>无轴承式</b>	桨叶的运动靠其扭转变形和弯曲变形来实现		

对于直升机尾桨，桨叶与桨毂结构的特点是有轴向铰和水平铰，但没有垂直铰

## 3、旋翼航空器的基本操纵

### 1) 直升机操纵系统组成



## 1.3.4 旋翼机基本飞行原理

### 3、旋翼航空器的基本操纵

#### 2) 油门变距系统

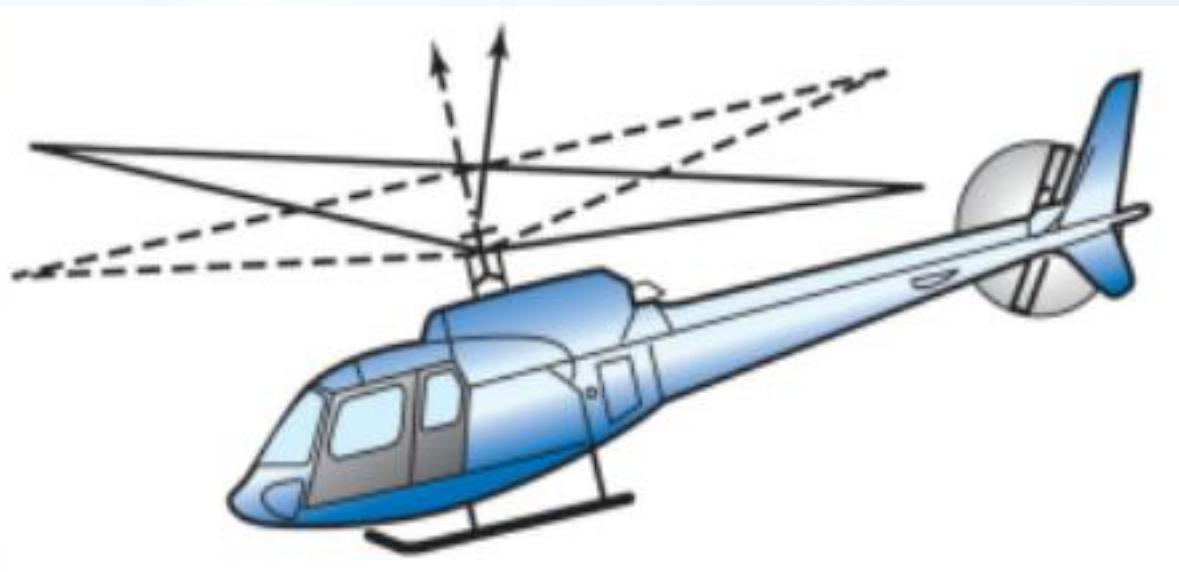
油门变距系统可以**实现总距操纵**还可以**实现油门的控制**



### 3、旋翼航空器的基本操纵

#### 3) 驾驶杆操纵系统

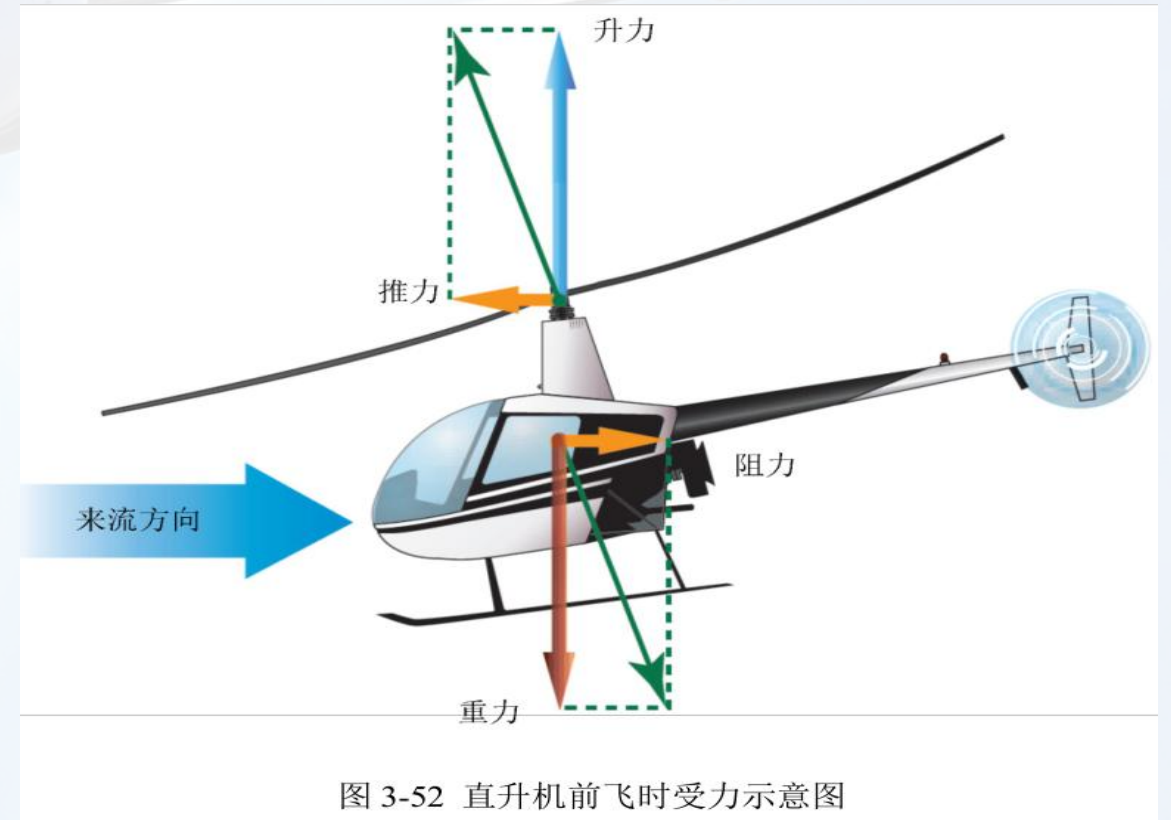
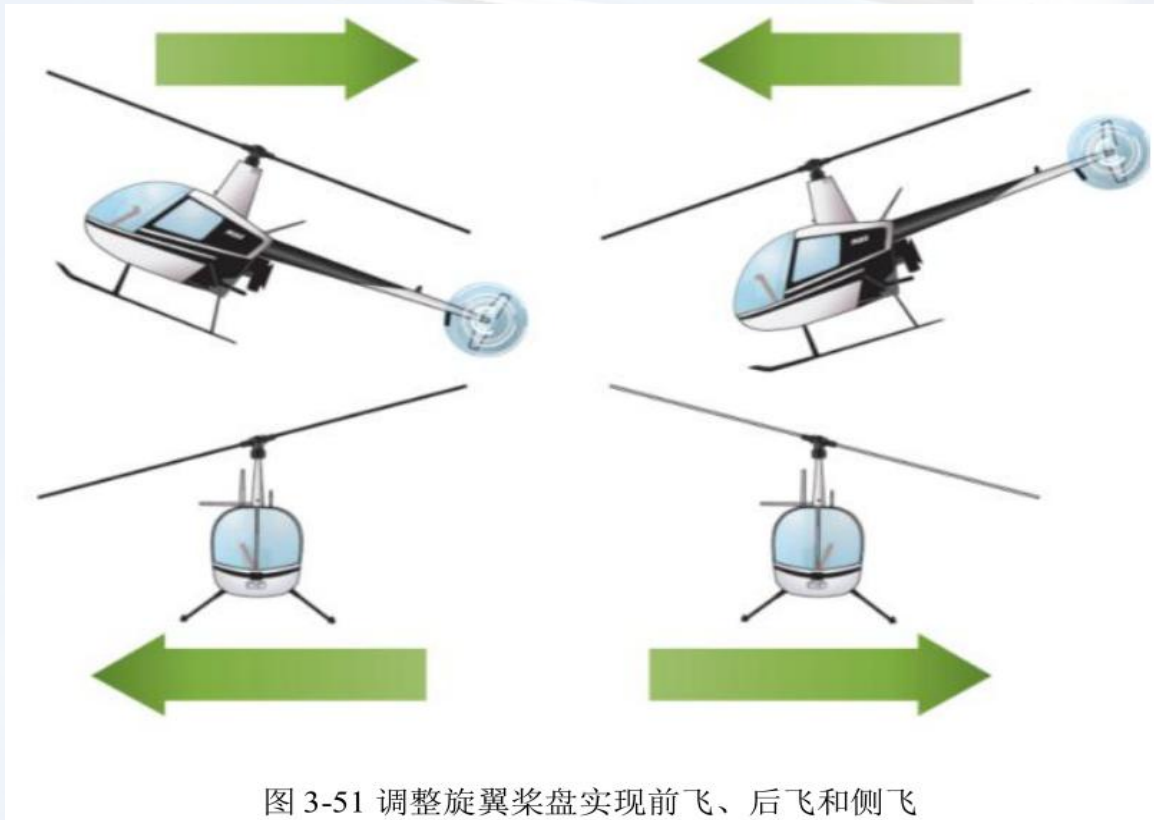
操纵周期变距杆，可以使旋翼桨距产生**周期性变化**，从而旋翼的**旋转平面向某一方向倾斜**，**改变旋翼拉力的方向**



# 1.3.4 旋翼机基本飞行原理

## 3、旋翼航空器的基本操纵

### 3) 驾驶杆操纵系统

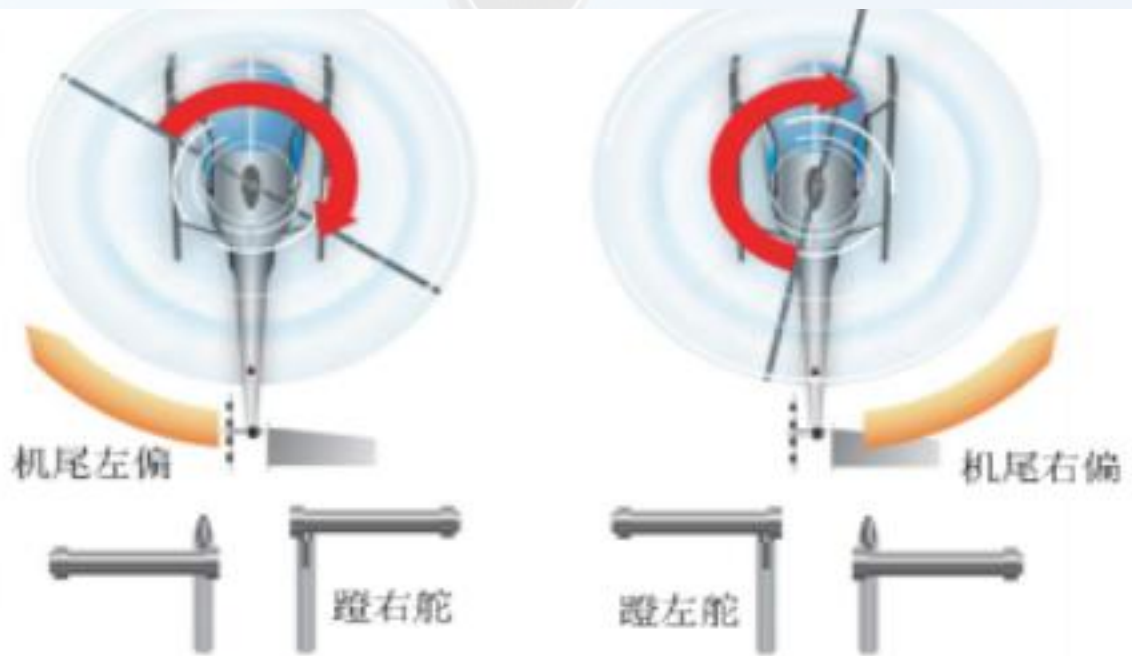


## 1.3.4 旋翼机基本飞行原理

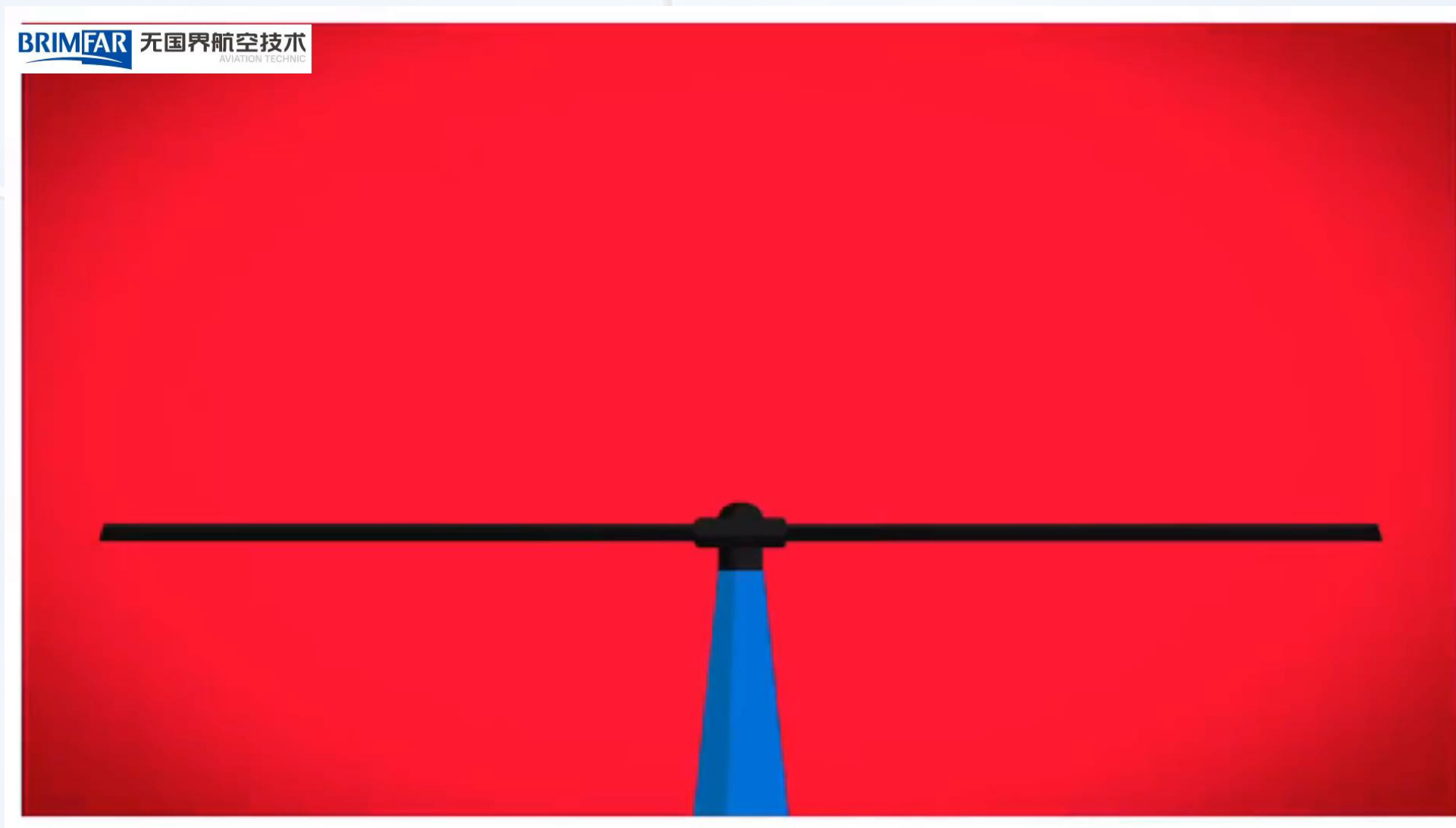
### 3、旋翼航空器的基本操纵

#### 4)脚操纵系统

脚操纵系统实现**脚蹬操纵**。操纵脚蹬，可以**整体改变尾桨的桨距**，从而**改变尾桨拉力**，使直升机机体**改变航向**



## 直升机飞行原理



## 1.3.4 旋翼机基本飞行原理

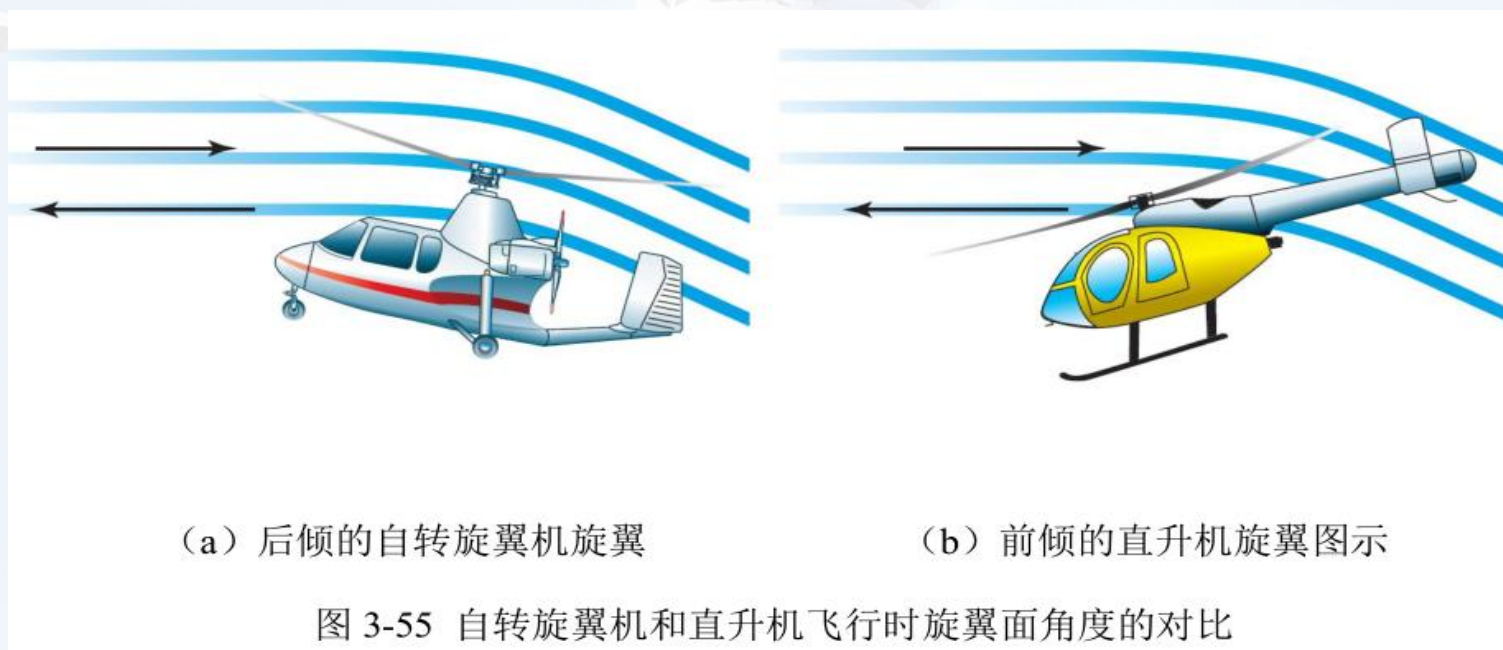
### 3、旋翼航空器的基本操纵

#### 5)自转旋翼机和直升机区别

	直升机	自转旋翼机
<b>相同点</b>	以旋翼旋转获得升力	
<b>不同点</b>	动力驱动旋翼 能垂直起降 能悬停 旋翼前倾 有尾桨(单旋翼) 水平运动靠周期变距 航向操纵靠尾桨(单旋翼)	气流吹动旋翼自转 不能垂直起降 不能悬停 旋翼后倾 没有尾桨 由推进装置提供推力前进 尾翼控制航向

### 3、旋翼航空器的基本操纵

#### 5)自转旋翼机和直升机区别



- 空中失去动力时，自转旋翼机比直升机更容易实现自转下降并降落的功能
- 直升机想通过自转下降着陆，需要很多硬性条件，如高度、速度等

### 小结:

- 旋翼机的升力产生，可以将桨叶看成机翼，便于理解
- 明白反作用桨距的产生，掌握如何克服反扭矩
- 旋翼有四种形式
- 旋翼航空器的操纵:油门变距系统可以实现总距操纵,驾驶杆操纵系统实现周期变距操纵,脚操纵系统实现脚踏操纵

## 全章总结:

序号	本节重点知识要点
1	空中运动的自由度、飞机运动参数、载荷平衡与载荷系数、巡航飞行、起飞和着陆、等速爬升和等速下滑、水平转弯和侧滑、增升原理和增升装置
2	稳定性的概念、飞机的纵向稳定性、飞机的横侧向稳定性
3	操纵性的概念、操纵性与稳定性的关系、飞机的纵向操纵性、飞机的横侧向操纵性、飞机主操纵面上的附设装置
4	旋翼升力的产生和反作用扭矩、旋翼桨叶运动的基本原理、旋翼航空器的基本操纵

序号	思考题
1	对于上单翼飞机和下单翼飞机来说，稳定性和操纵性都有什么特点？
2	飞机操纵面上的配平片和配重片，有何区别？他们是否可以进行调节？如何调节？
3	
4	
5	
6	



**感谢聆听，欢迎指正**