

# 微小型固定翼无人机飞行控制 设计与实践

## 第1章 绪论

全 权

qq\_buaa@buaa.edu.cn

自动化科学与电气工程学院



北京航空航天大学  
BEIHANG UNIVERSITY



可靠飞行控制研究组

RELIABLE FLIGHT CONTROL GROUP

ni 工业自动化·机器人·无人系统控制·RflySim案例

微小型固定翼无人机  
飞行控制设计与实践

全权 主编  
高文强 刘同清 陈鑫泉 戴训华  
吕书礼 徐琳 李悦 副主编



FIXED-WING UNMANNED  
AERIAL VEHICLE

中国工业出版社 电子工业出版社

# 大纲



- 1. 基本概念**
- 2. 固定翼飞行原理**
- 3. 固定翼飞行器设计理念的发展**
- 4. 本书结构**

## 固定翼飞行器的组成与分类

- 固定翼飞行器是指通过动力装置产生推力，由机身上固定的机翼产生升力，在大气层内飞行的重于同体积空气的一类航空器。
- 图例是商用、军用和通用三种常见的固定翼飞行器。



(a) 商飞C919



(b) 歼20



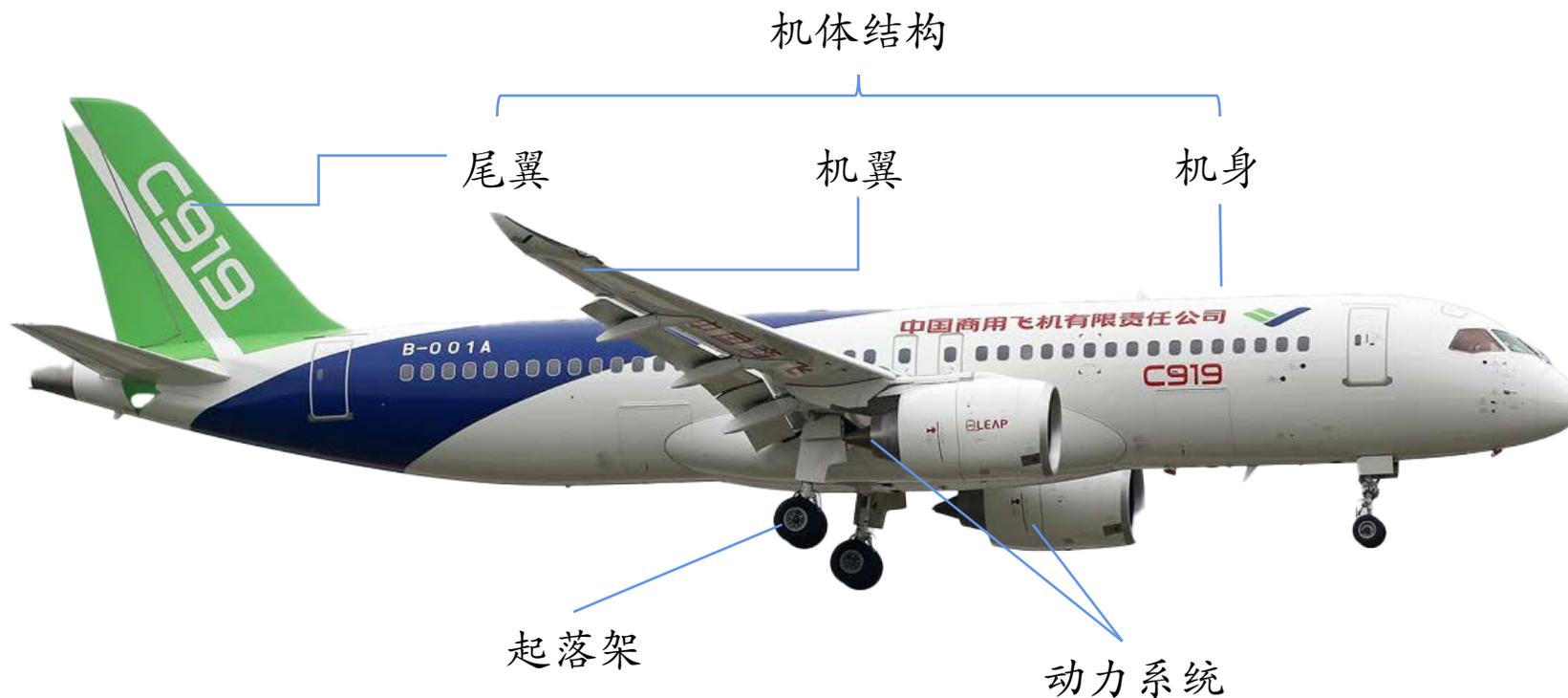
(c) RX4E

# 基本概念



## 固定翼飞行器的组成与分类

典型的固定翼飞行器主要或部分包括**机体结构、起落架、电气、飞行控制、动力、操纵装置、通信、人机环境和载荷**等系统部件。



# 基本概念



## 固定翼飞行器的组成与分类

- 固定翼无人机是一类特殊的固定翼飞行器，其不需要驾驶员在飞行器上进行操作，而是通过遥控器或者地面站**远程遥控**飞行。
- 无人机主要分为**微型、轻型、小型、中型、大型**无人驾驶航空器五类。具体分类标准参照2024年1月1日起实施的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》。



(a) CICADA



(b) Edge-540



(c) CONDOR-300



(d) CW-40



(e) 翼龙无人机



(f) X-47B

微型	轻型	小型	中型	大型
空机重量 $\leq 0.25\text{kg}$	空机重量 $\leq 4\text{kg}$	空机重量 $\leq 15\text{kg}$		
最大飞行真高 $\leq 50\text{m}$	最大起飞重量 $\leq 7\text{kg}$	最大起飞重量 $\leq 25\text{kg}$	最大起飞重量 $\leq 150\text{kg}$	最大起飞重量 $> 150\text{kg}$
最大平飞速度 $\leq 40\text{km/h}$	最大平飞速度 $\leq 100\text{km/h}$			

## 固定翼飞行器的组成与分类

微小型固定翼无人机一般涉及到**微型到小型**的固定翼无人机。其相较于中大型的固定翼无人机主要有以下四点不同：

微小型  
固定翼  
无人机

气动



微小型



大型

结构

机身材料往往采用全复合材料,仅在关键连接部分使用金属材料以**减重**。

动力

往往采用**电动**的螺旋桨电机系统。

控制

需要保证在风中具有较高的**机动性**。

# 基本概念

## 固定翼飞行器的布局



固定翼飞行器的**布局**一般是指平尾相对于机翼在纵向位置上的安排，常见种类如图所示：



(a)常规布局



(b)双翼布局



(c)鸭式布局



(d)飞翼布局



(e)三翼面布局



(f)倾转翼布局



(g)固定翼多旋翼复合型



(h)升力翼多旋翼

# 基本概念

## 固定翼飞行器的布局



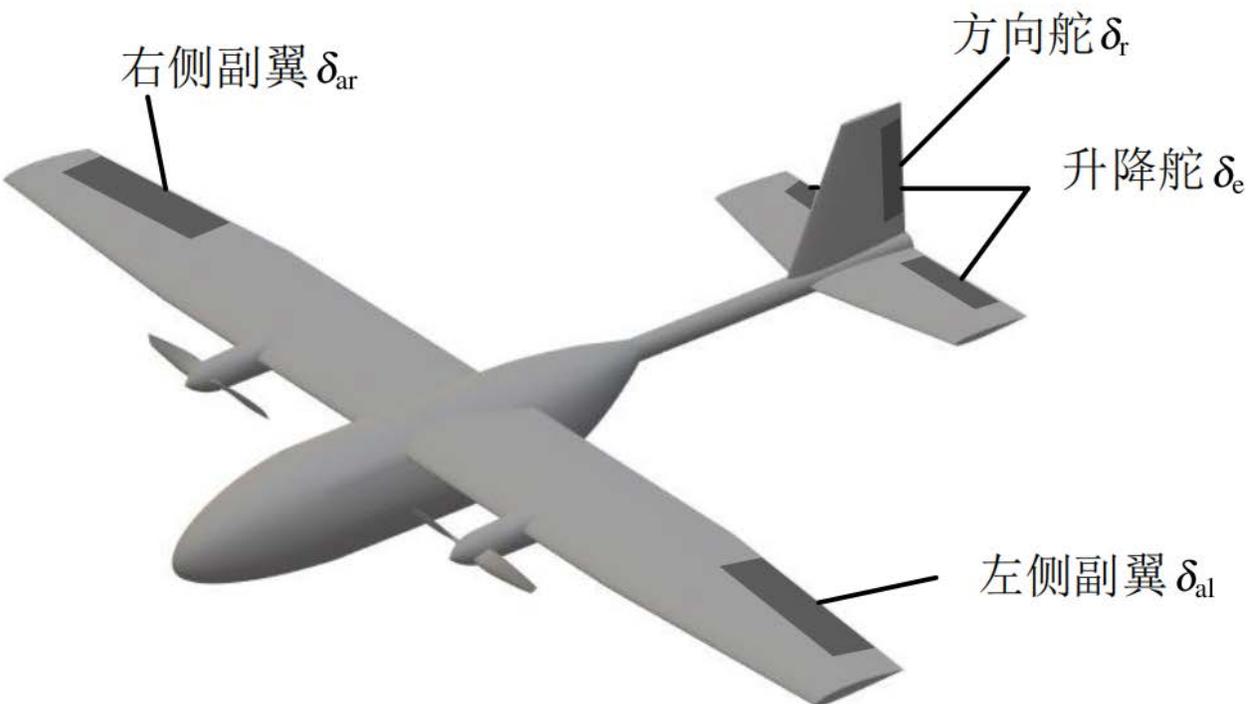
### (1) 常规布局

- 标准常规布局

常规布局的飞行器的操纵舵面包括**副翼**、**升降舵**和**方向舵**。

- 假设副翼偏转角  $\delta_a$ ，升降舵偏转角  $\delta_e$ ，方向舵变化  $\delta_r$ 。操纵面变化的正方向即对应产生负力矩。
- 副翼位于左右机翼对称布置，假设左侧副翼偏转为  $\delta_{al}$ ，右侧为  $\delta_{ar}$ ，副翼变化量可以表示为：

$$\delta_a = \delta_{al} - \delta_{ar}$$



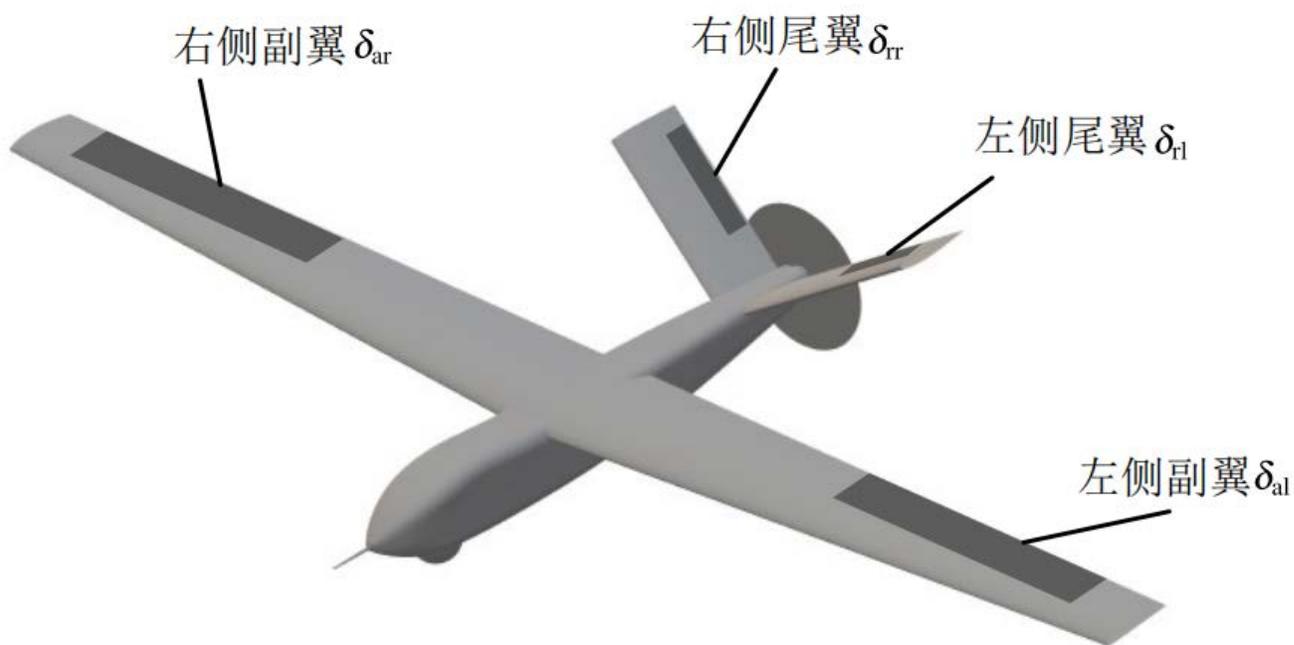
# 基本概念

## 固定翼飞行器的布局



### (1) 常规布局

- “V型”尾翼配置



- “V型”尾翼配置

- 记右侧尾翼舵面变化为  $\delta_{rr}$ ，左侧为  $\delta_{rl}$ 。
- 通过两侧尾翼舵面的同向偏转与差动偏转分别起到升降舵和方向舵的作用。
- 数学表达如下：

$$\begin{bmatrix} \delta_e \\ \delta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{rr} \\ \delta_{rl} \end{bmatrix}$$

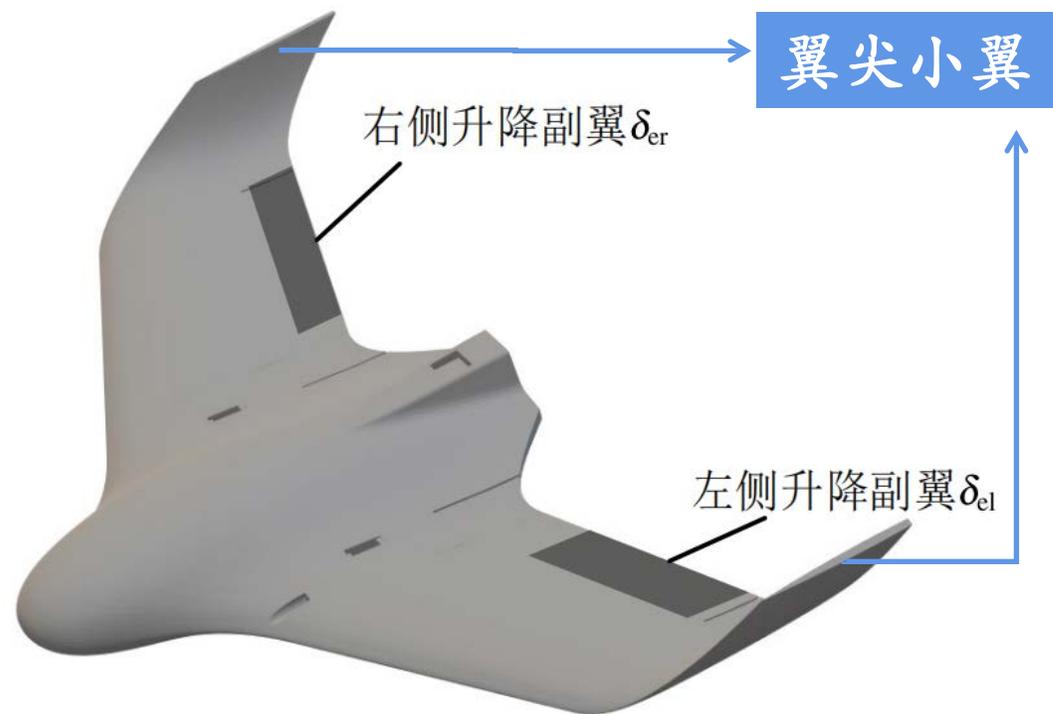
## 固定翼飞行器的布局

### (2) 飞翼布局

机翼和机身一体都按照翼型或接近翼型设计，整个机翼与机身都产生升力。

- 记右侧升降副翼变化为  $\delta_{er}$ ，左侧为  $\delta_{el}$ 。
- 采用**差动偏转**和**同向偏转**的方式分别等效常规布局中的**副翼**和**升降舵**。数学表达如下：

$$\begin{bmatrix} \delta_e \\ \delta_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{er} \\ \delta_{el} \end{bmatrix}$$

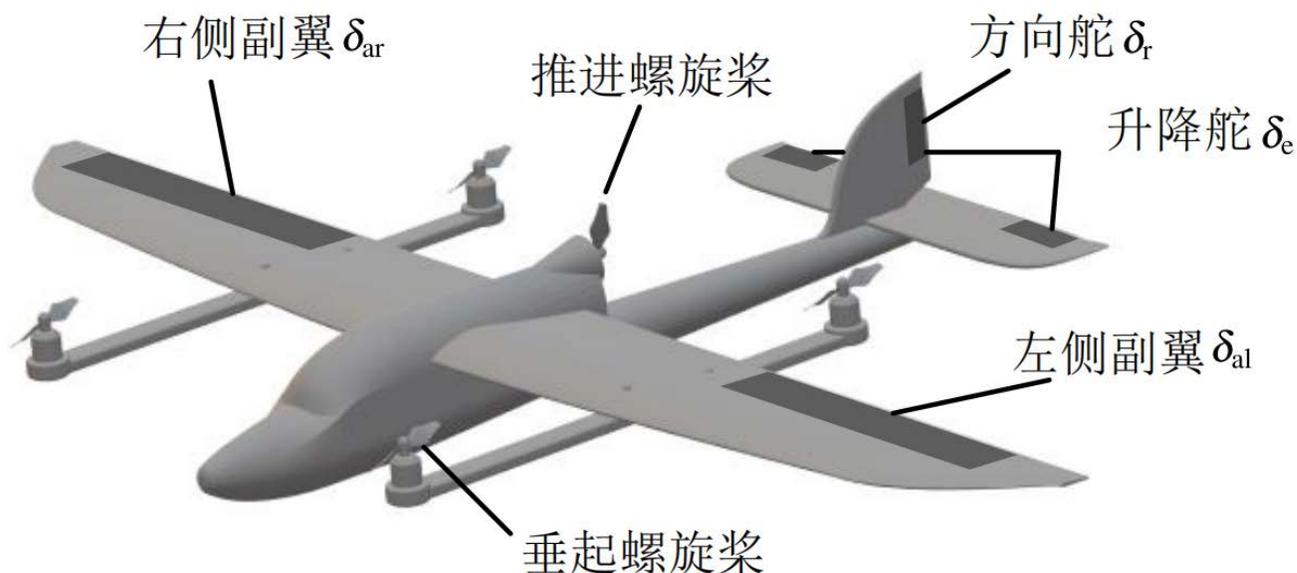


## 固定翼飞行器的布局

### (3) 复合型布局

最常见的是常规布局固定翼无人机与四旋翼直接复合的复合型布局，如图所示：

- 在起飞降落阶段与四旋翼一样，通过周围四个垂起螺旋桨控制飞行；
- 巡航飞行时，垂起螺旋桨停转，由推进螺旋桨产生推力。



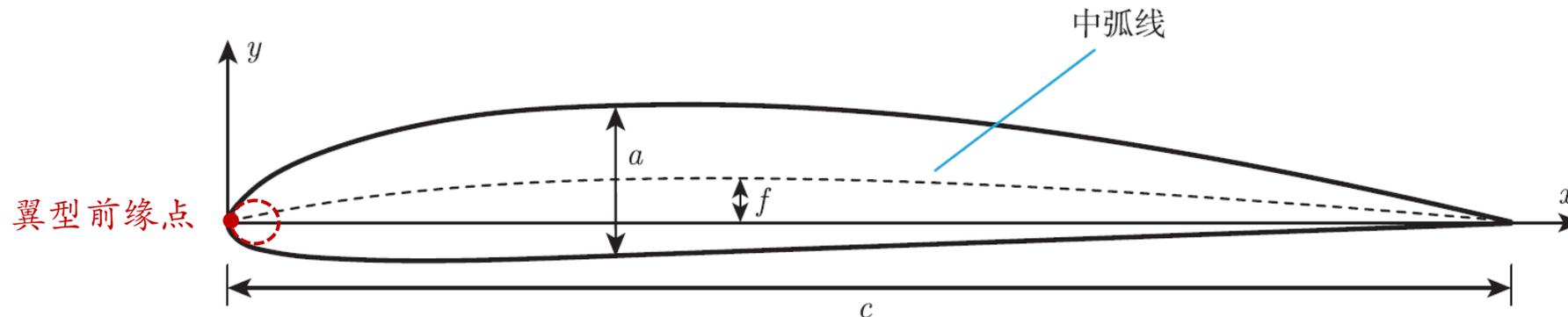
# 基本概念



## 固定翼飞行器的翼型和机翼形状

### (1) 翼型

- 定义：平行于飞行器机身对称面的平面截得的**机翼剖面**，翼型的**前缘**是机翼的**迎流端**。
- 微小型固定翼无人机一般采用**圆头尖尾**的低速翼型。
- 翼型几何参数
  - 在翼型前缘内做一个**内切圆**，恰好与翼型前缘附近曲线相切的圆的半径称为**翼型前缘半径**，两者的切点为**翼型前缘点**。
  - **弦线**：连接翼型前缘点和后缘尖点的直线。

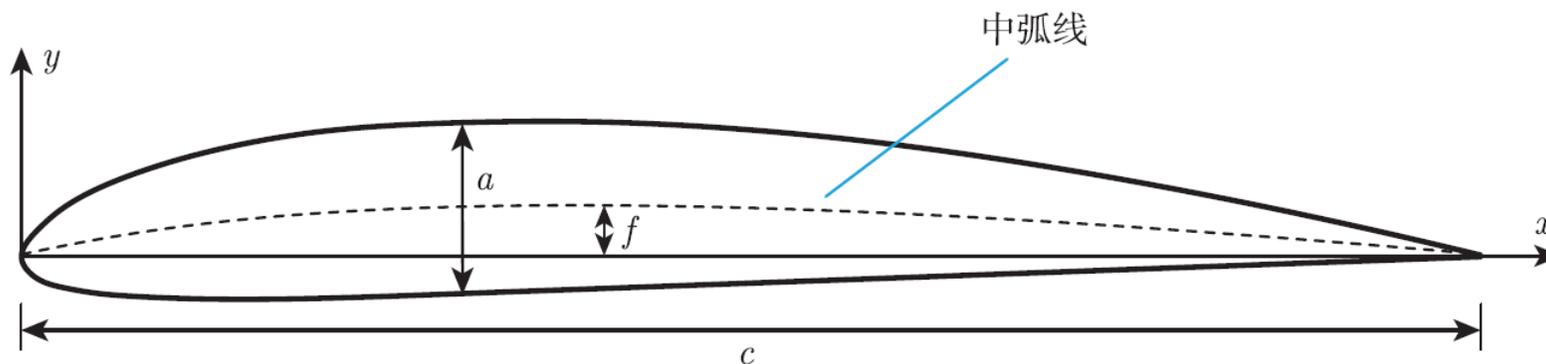


## 固定翼飞行器的翼型和机翼形状

### (1) 翼型

- 翼型几何参数

- 弦长**：翼型的弦线长度，用 $c$ 表示。
- 以翼型前缘点为原点，翼型弦线为 $x$ 轴建立坐标系，沿着 $x$ 轴方向，翼型上下表面 $y$ 方向高度中点的连线称为**中弧线**，在 $y$ 方向上可以找到中弧线和弦线最大距离用 $f$ 表示。
- 弯度**： $f/c$ ，即翼型的相对弯度。
- 翼型上下表面最大 $y$ 方向距离表示为 $a$ ，则翼型相对厚度表示为 $a/c$ 。



## 固定翼飞行器的翼型和机翼形状

### (1) 翼型

- 基准翼型

- 翼型一般分为平凸型(图a)、对称型(图b)、凹凸型(图c)、双凸型(图d)、s型(图e)和超临界型(图f)几类，常见的基准翼型有NACA系列翼型、RAF-6E翼型、Clark-Y翼型、ARA-D翼型、C4翼型、超临界翼型等。



Clark-Y



NACA 63-215



NACA 2412



超临界翼型



NACA 2412



超临界翼型

# 基本概念



## 固定翼飞行器的翼型和机翼形状

### (2) 机翼形状

- 平面几何参数

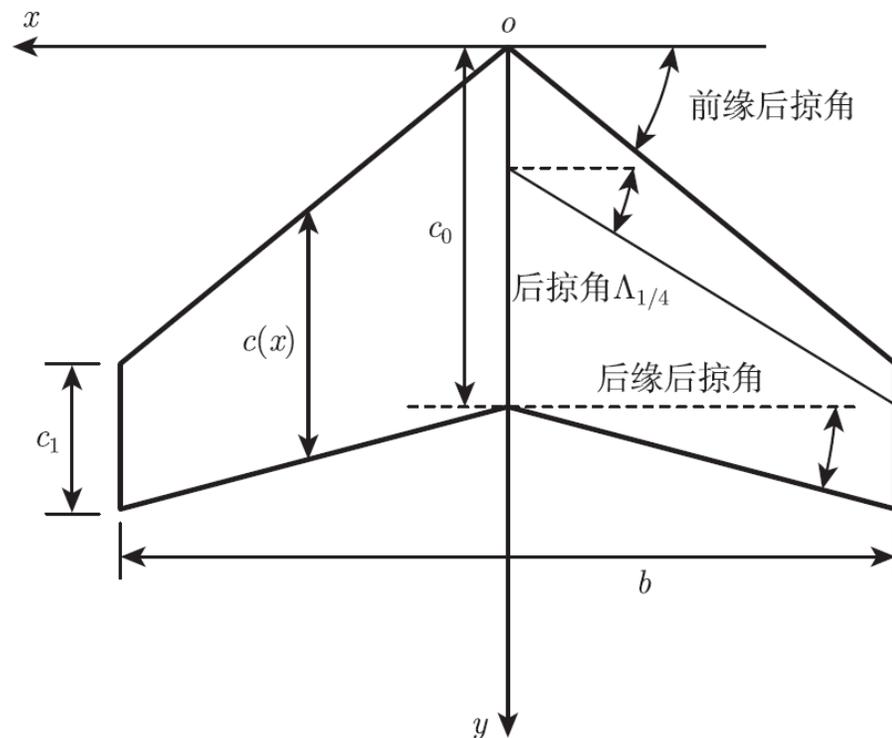
- 主要包括**机翼面积** $S$ 、**展长** $b$ 、**弦长** $c(x)$ 和**后掠角**等。

- 其中**根部** ( $x=0$ ) 弦长表示为  $c_0$  和**尖部** ( $x=b/2$ ) 弦长表示为  $c_1$ 。

- 机翼面积**:  $S = 2 \int_0^{b/2} c(x) dx$

- 平均气动弦长**  $b_A$ :  $b_A = \frac{2}{S} \int_0^{b/2} c^2(x) dx$

- 展弦比**  $\lambda = \frac{b^2}{S}$ ; **根梢比**  $\eta = \frac{c_0}{c_1}$ 。



# 基本概念

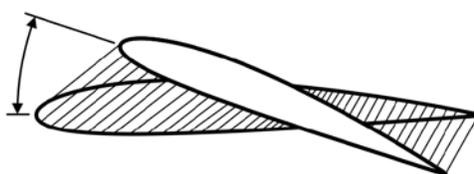
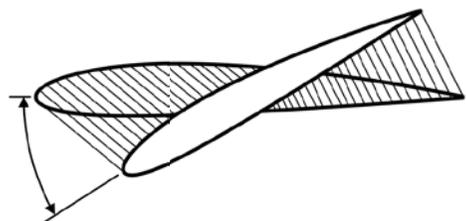


## 固定翼飞行器的翼型和机翼形状

### (2) 机翼形状

- 立体几何参数
  - **几何扭转角**：机翼展向各个剖面翼弦不在一个平面上所成的角度。
    - 可以设计机翼的几何扭转角来调整气动载荷的展向分布(如图(a)(b))，还可以通过**气动扭转**改善气动特性(如图(c))。

负几何扭转角



正几何扭转角



气动扭转

# 基本概念



## 固定翼飞行器的翼型和机翼形状

### (2) 机翼形状

- 立体几何参数
  - **上(下)反角**: 机翼弦平面与机身轴线水平面之间的夹角。
  - 对于低速机翼采用一定的**上反角**可以改善横滚稳定性, 如图所示:



上反翼



无反翼



下反翼

# 基本概念

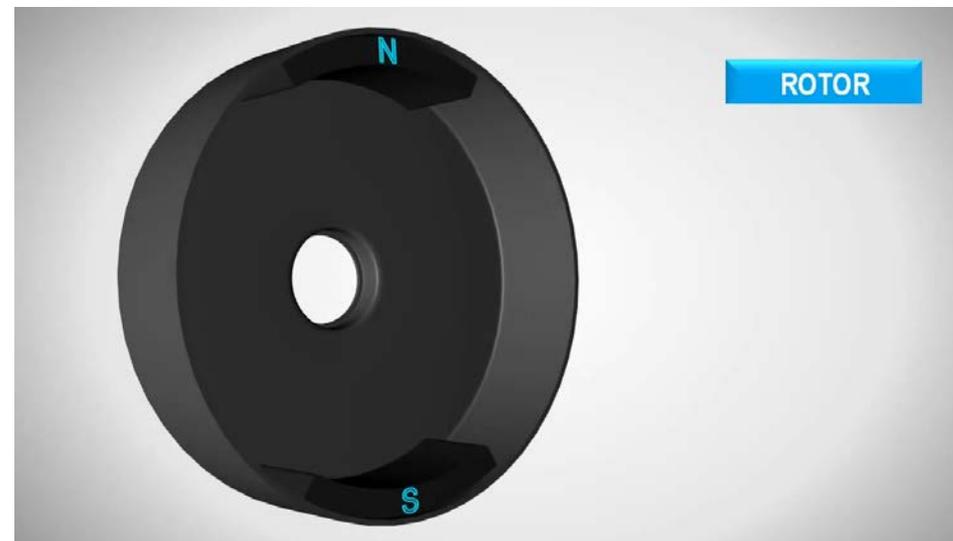
## 固定翼飞行器的动力系统

### (1) 电机

- 功能：电能→机械能
- 无感无刷直流外转子电机因为兼具工作效率高、便于小型化、制造成本低、转速稳定等优点，被广泛运用于微小型固定翼无人机和其他类型的飞行器中。



工作原理



(a) T-motor AT2308

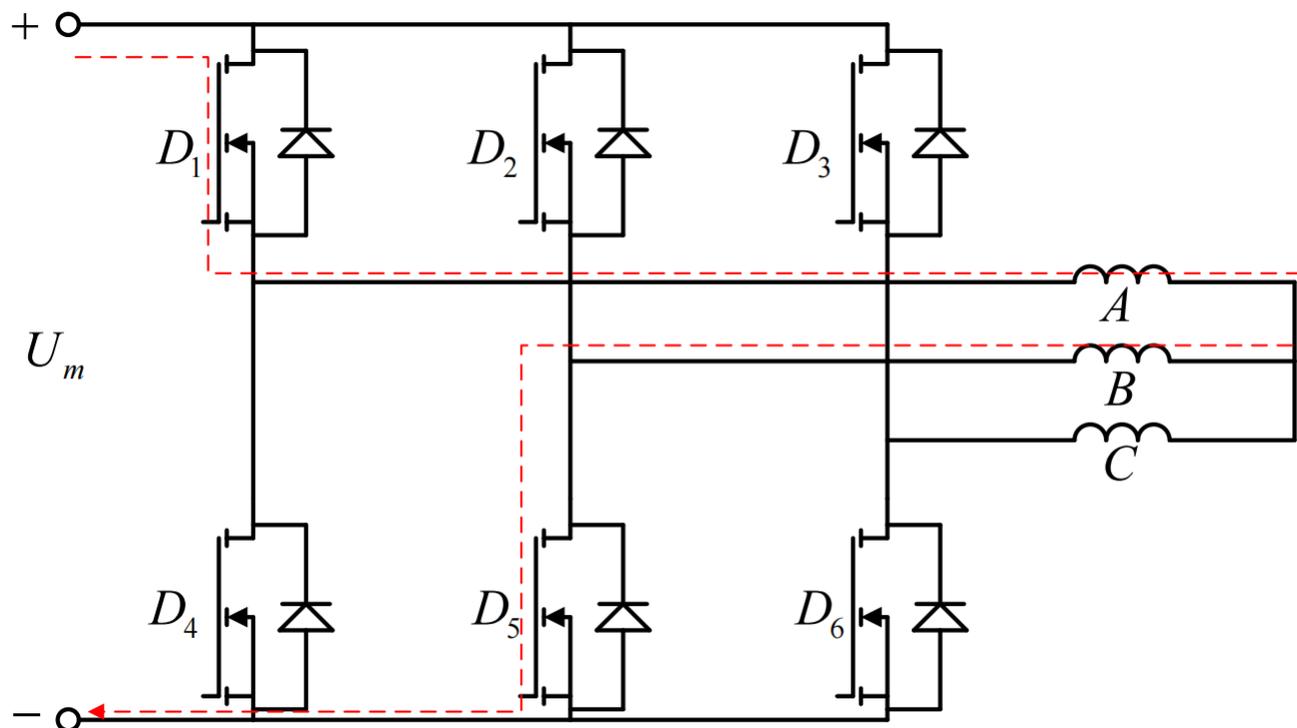


(b) T-motor AT5230-A

## 固定翼飞行器的动力系统

### (1) 电机

- 无感无刷直流电机电路主要有星形连接三相半桥式、星形连接三相桥式和角形连接三相桥式，其中星形连接三相桥式运用较多。



如图所示，打开  $D_1$  和  $D_5$  开关，电流从电感  $A$  流向电感  $B$ ，从而产生相应方向的磁场。

星形连接三相桥式主电路

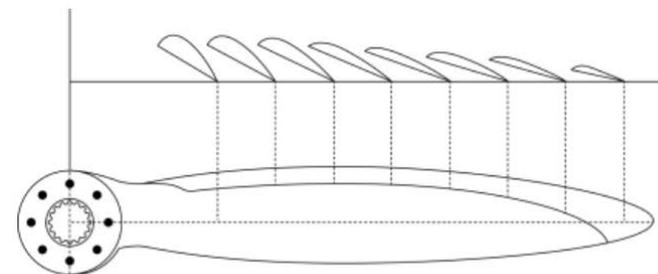
## 固定翼飞行器的动力系统

### (2) 螺旋桨

- 螺旋桨是微小型固定翼无人机直接产生所需推进力的装置，一般分为**定距螺旋桨**和**变距螺旋桨**。如图是一款简单的定距螺旋桨。
- 微小型固定翼无人机的动力系统在**选择螺旋桨时**，主要考虑螺旋桨的**直径**，**螺距**以及**桨叶数**等参数。



(a) T-motor T8542 F3P 4D



(b) 螺旋桨桨叶截面

### (3) 舵机

- 舵机是一种角位置伺服的驱动器，适用于那些需要改变角度实现控制功能的系统。根据输入信号的不同，分为**数字舵机**和**模拟舵机**两种。图(a)是一款电动舵机。



(a)SG90

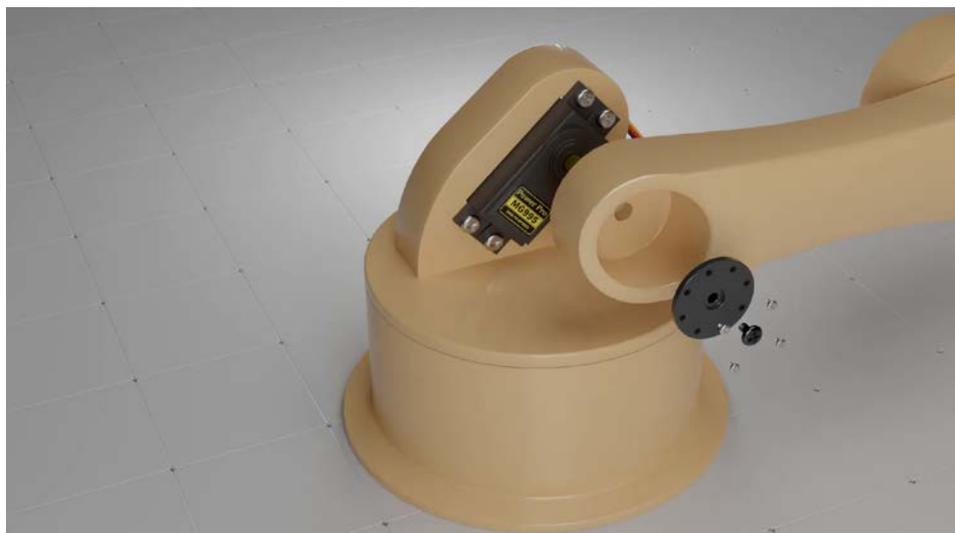
## 固定翼飞行器的动力系统

### (3) 舵机

- 电动舵机
  - 在微小型固定翼无人机中普遍采用。
  - 主要由电机、齿轮减速器、控制板和位置检测元件等部分构成，它的电气接口含有三根线，分别为电源正极、电源负极和信号接口。内部结构如图(b)。



(b)舵机内部结构图



# 基本概念

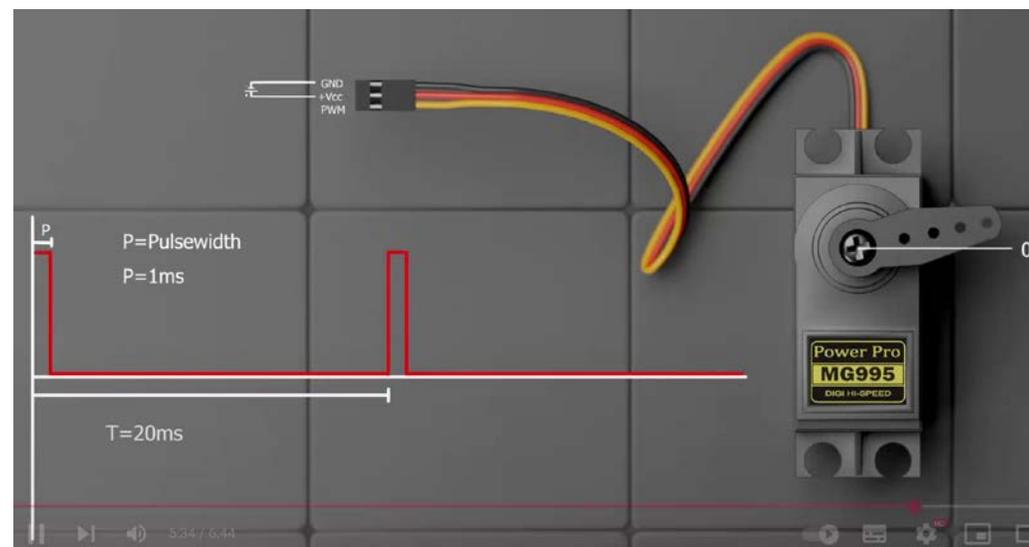
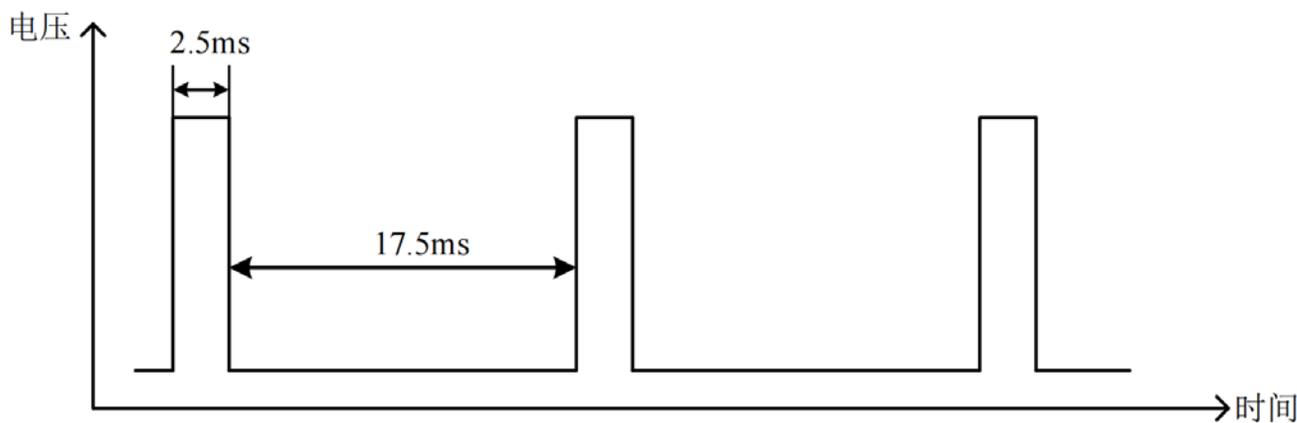


## 固定翼飞行器的动力系统

### (3) 舵机

- 模拟舵机

- 偏转角度是由信号线输入的**脉冲宽度调制波** (PWM 信号) 进行控制，一般是频率 50-400Hz 的**方波**信号，其中舵机的偏转角度和方波的占空比有着对应关系。
- 微小固定翼无人机中动力系统选择舵机时，主要需要考虑舵机能够传递的**扭矩**大小能否保持舵机的**偏转角度**不变。



# 大纲



1. 基本概念

2. 固定翼飞行原理

3. 固定翼飞行器设计理念的发展

4. 本书结构

# 固定翼飞行原理



## 气动规律

### (1) 相对运动原理

- 定义：物体在静止的空气中运动与空气流过静止的物体两者相比，若两者的速度相同，则物体受到的空气动力完全一致。
- 飞行器在飞行过程中，通过与空气之间的**相对运动**产生升力与阻力。

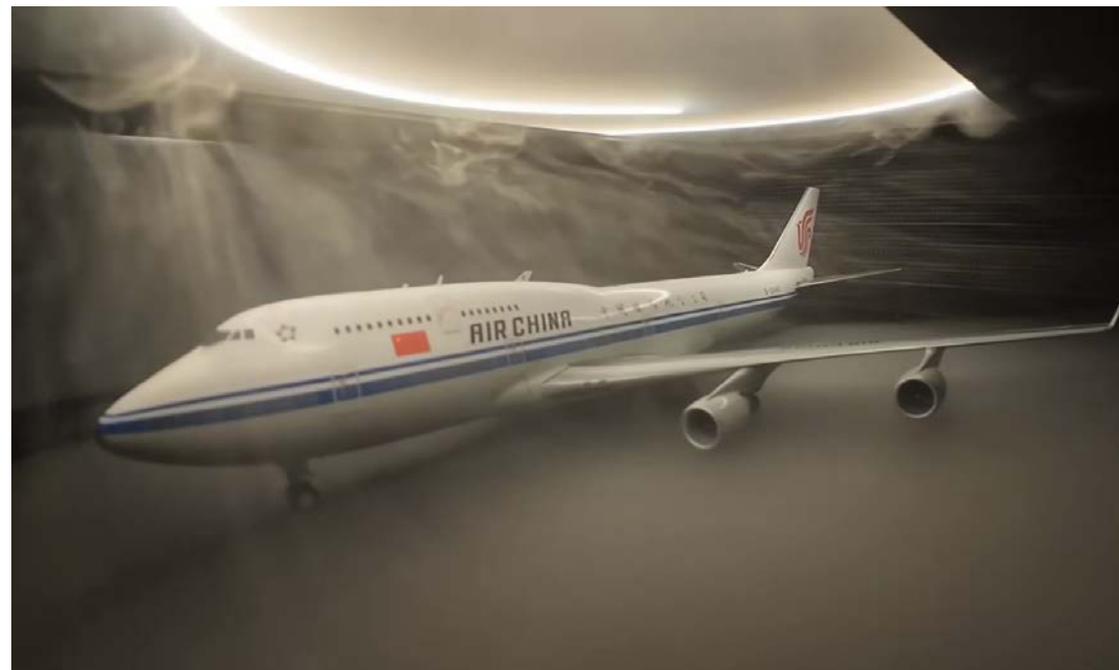
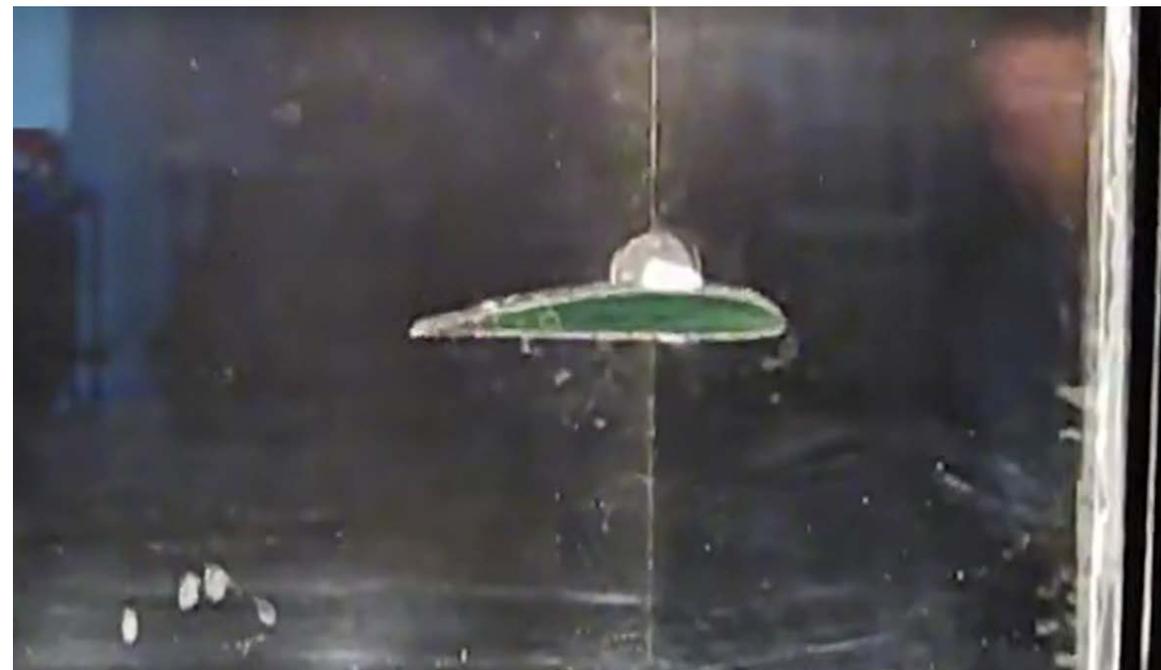


风洞试验

根据**相对运动原理**，保持飞行器静止不动，让空气以相同大小的速度反向流过飞行器来探究飞行器在该速度飞行下的气动特性，这种实验被称作**风洞试验**。

# 固定翼飞行原理

## 气动规律



风洞试验

## 气动规律

### (2) 连续性定理

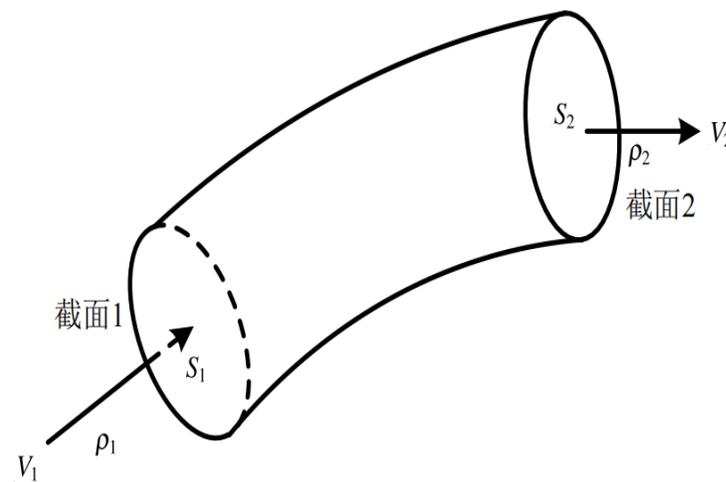
- 推导:

- 当流体流过一个变截面的管道时，因为流体本身是连续流动且不可中断，不可堆积的，所以根据**质量守恒定理**可知在管道的任意截面**单位时间**内流过的**流体质量**都是相同的。

- 定常流动的气体的连续性方程： $\rho_1 S_1 V_1 = \rho_2 S_2 V_2$ 。

- 推广到任意截面： $\rho_1 S_1 V_1 = \rho_2 S_2 V_2 = \rho_3 S_3 V_3$ 。

- 当空气的运动速度小于**0.3 个马赫数**时，将空气视为**不可压缩流体**，此时空气的密度在任意截面都是一样的，则连续性方程可以改写为： $S_1 V_1 = S_2 V_2 = S_3 V_3$ 。



- 结论：管道内低速流动的气体的**速度**和**截面面积**成**反比**。

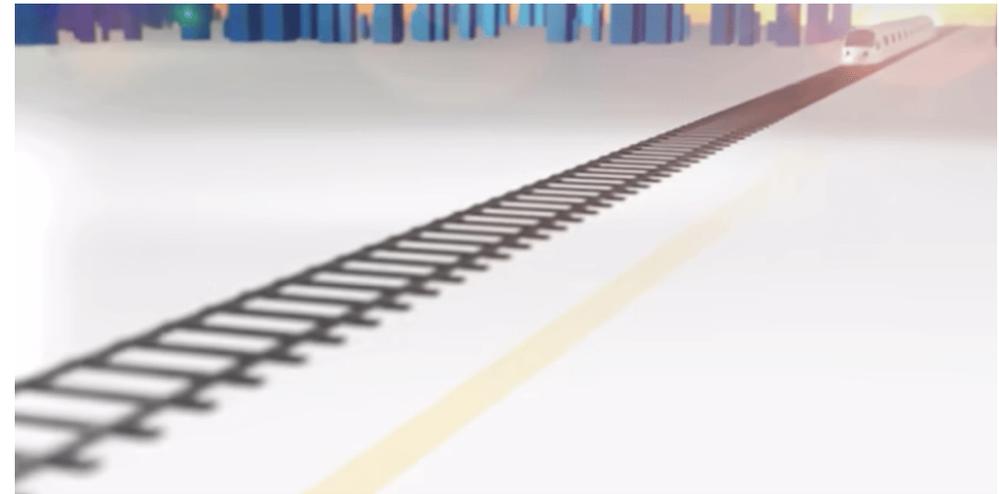
### (3) 伯努利定理

伯努利定理是解释飞行器获得**升力**的原理之一。它根据**能量守恒定理**阐述了流体的**压力能**、**动能**和**势能**之间的关系。简单来说，流体速度越快压强越小。

- 定常不可压流体的伯努利方程表示如下：

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2$$

忽略流体势能变化  $\rightarrow$   $P + \frac{\rho V^2}{2} = P^*$



高速行驶的列车将靠近的人“吸”过去

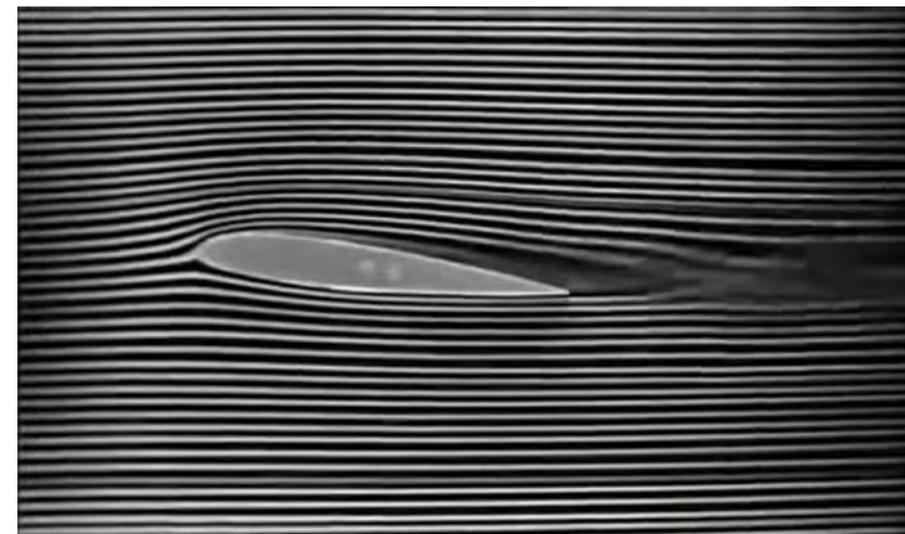
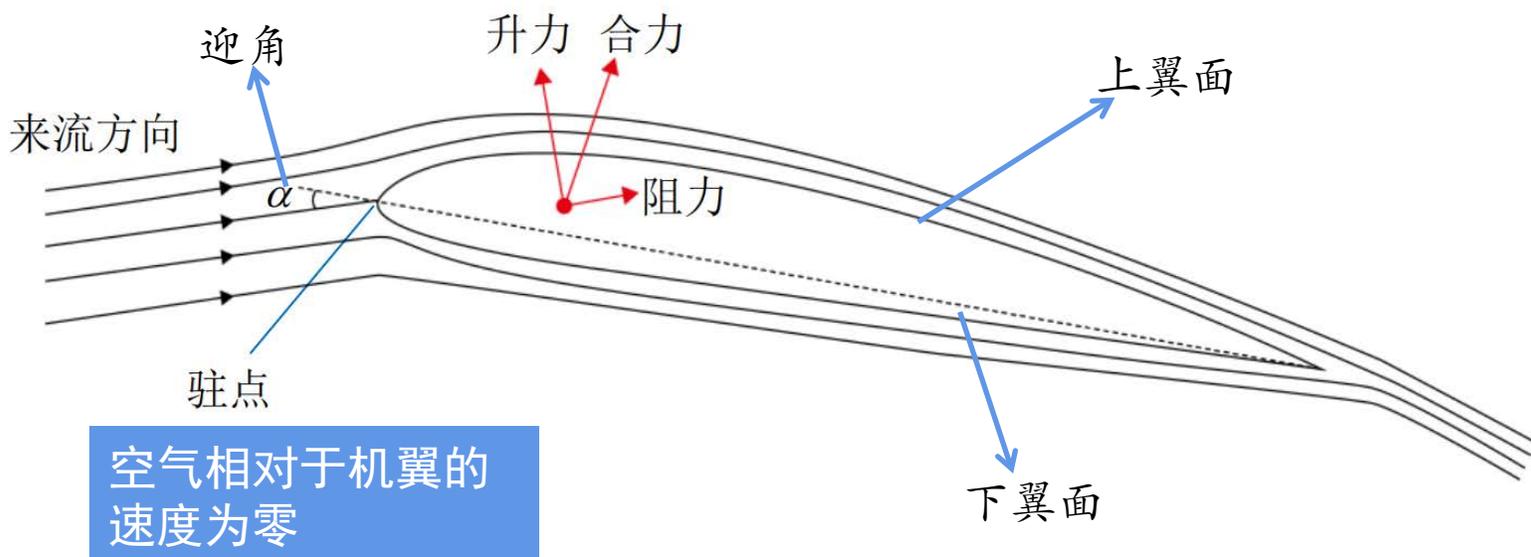
# 固定翼飞行原理



## 气动力简述

### (1) 升力

- 微小型固定翼无人机的升力主要依靠机翼与空气的相对运动产生。



随迎角变大，机翼附近流场变化情况

- 上下表面会产生**压力差**，机翼得到向上的升力。

# 固定翼飞行原理



## 气动力简述

### (1) 升力

- 根据伯努利原理，翼型产生的**升力**可以描述为： $f = \frac{1}{2} \rho V^2 C_f$   
其中 $\rho$ 为低速直线均匀气流的**空气密度**； $C_f$ 为翼型的**升力系数**，主要与**迎角大小**和**翼型参数**有关。
- 用 $C_L$ 表示所有不同截面翼型的**升力系数** $C_f$ 的近似平均值得： $L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$
- **临界迎角**：随着**迎角**的增大，机翼的升力也会增加，但是若迎角过大，在气流逆压梯度和空气粘性的作用下，会出现“**失速**”现象，此时的迎角称为“**临界迎角**”。
- **焦点**：存在一个固定点，翼型所受的空气动力对于此点的合力矩不会发生改变。



### (2) 阻力

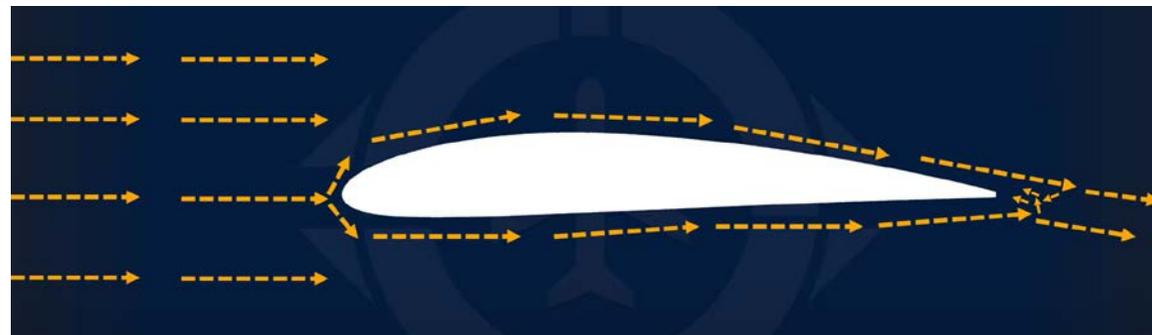
#### 压差阻力

气流逆压梯度和空气粘性的共同作用使得气流发生分离，压强不能恢复到较高的压强，从而产生向后的压强差。

#### 摩擦阻力

当气流流经无人机表面时，由于空气的粘性作用，空气微团会和无人机表面发生摩擦，阻碍空气的流动，从而产生了摩擦阻力。

压差阻力



摩擦阻力



### (2) 阻力

#### 诱导阻力

机翼上下翼面压强差产生了翼尖涡，由此产生下洗速度，使翼尖处机翼来流速度方向向下倾斜，形成的气动力合力向后倾斜，产生了诱导阻力。

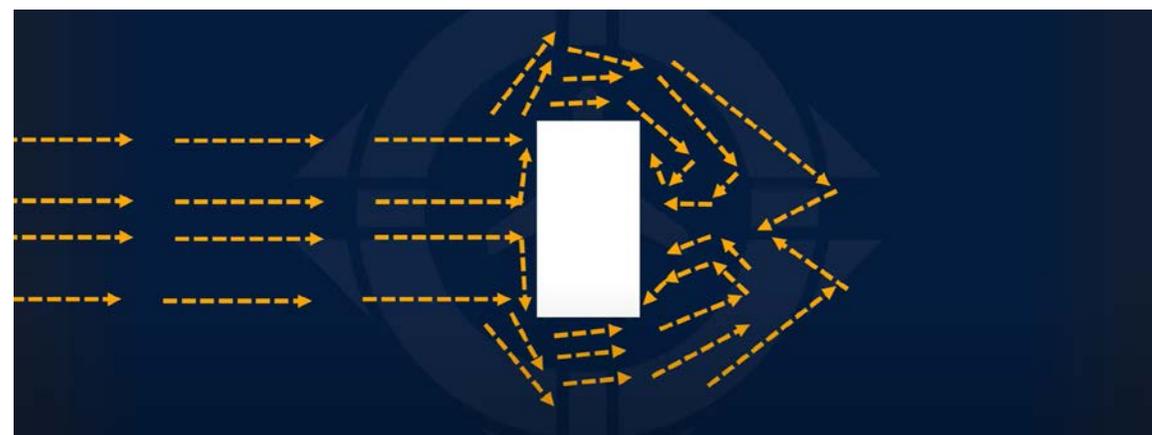
#### 干扰阻力

无人机相邻部件交界处额外产生的阻力。干扰阻力主要和不同部件的相对位置有关。

诱导阻力



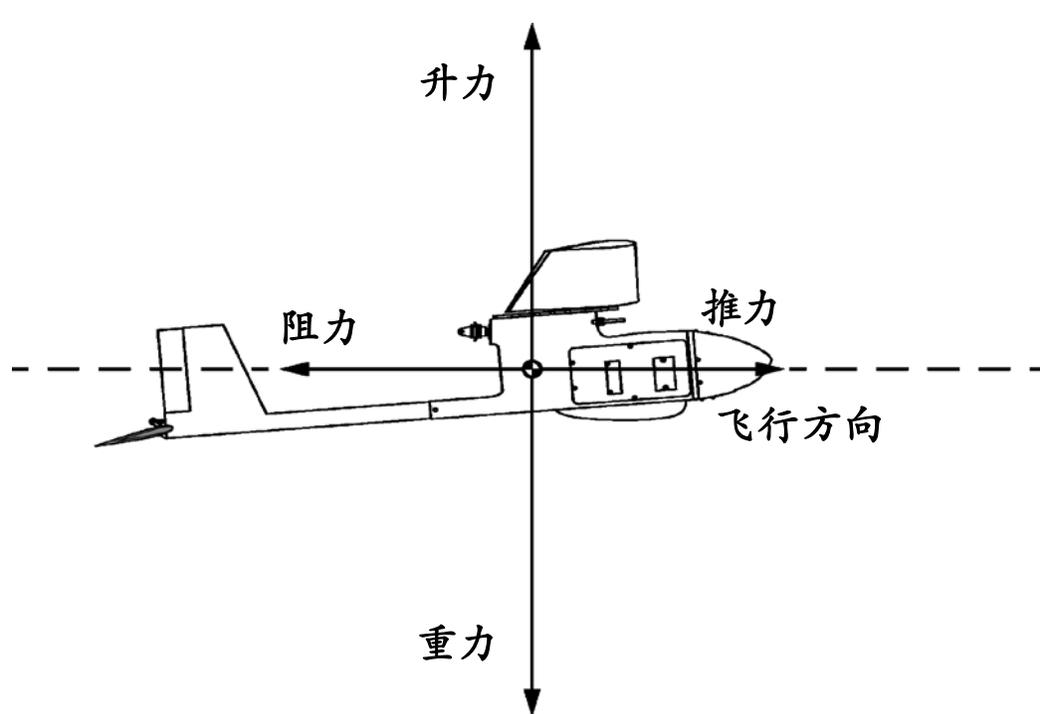
干扰阻力



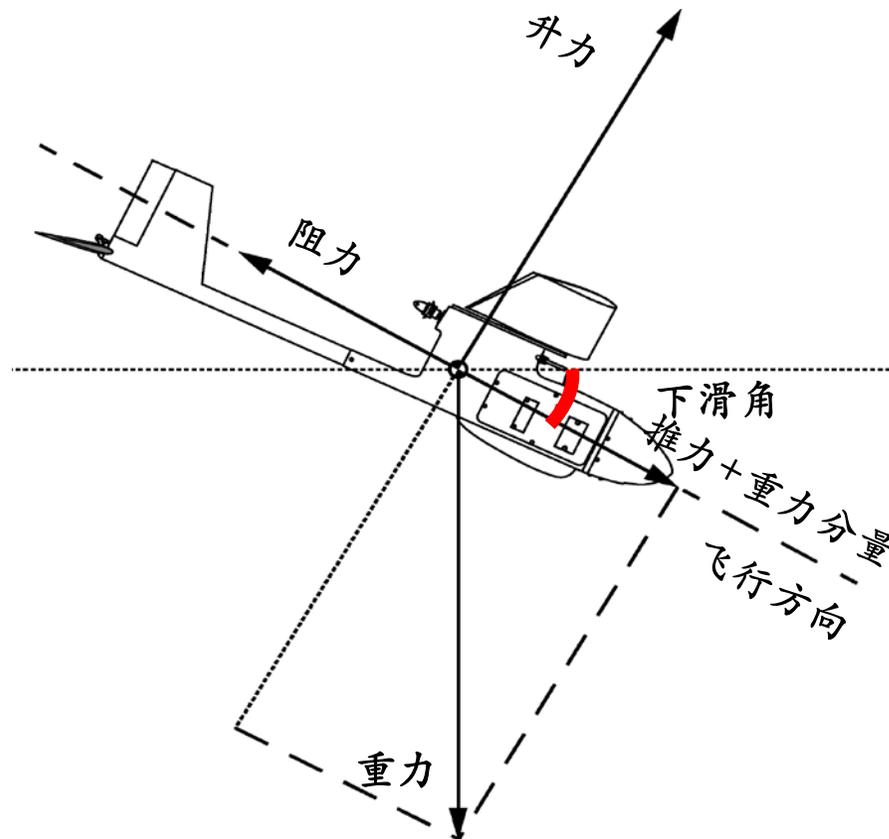
# 固定翼飞行原理

## 气动力简述

### (3) 受力分析



水平飞行受力分析

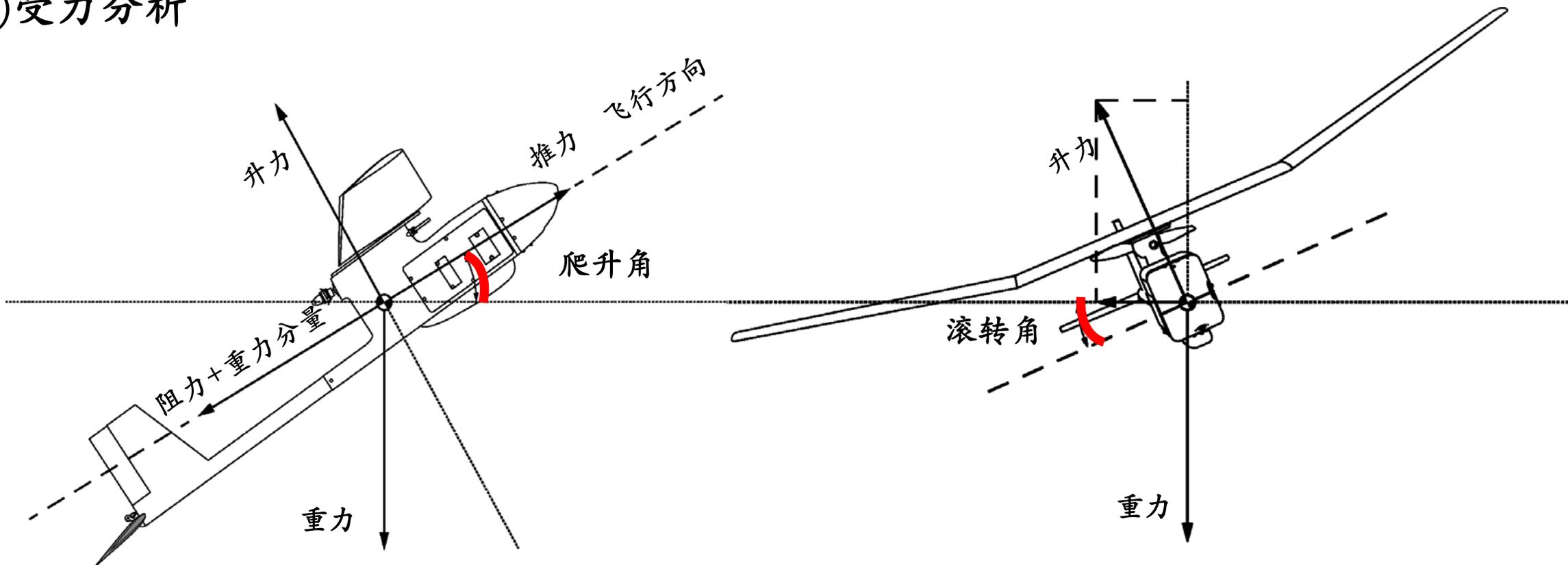


下滑飞行受力分析

# 固定翼飞行原理

## 气动力简述

### (3) 受力分析



爬升飞行受力分析

水平转弯受力分析

# 固定翼飞行原理

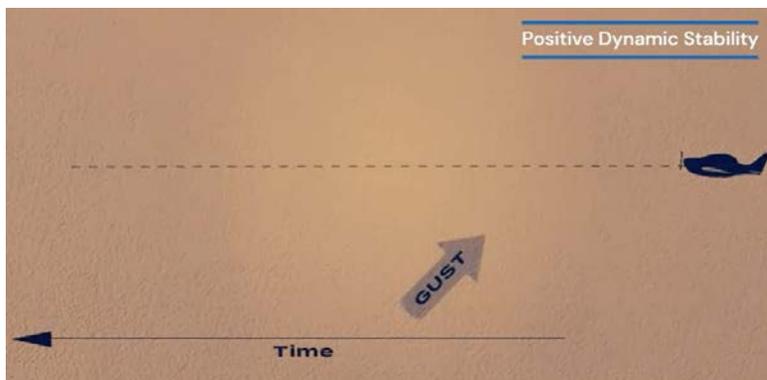
## 气动力简述



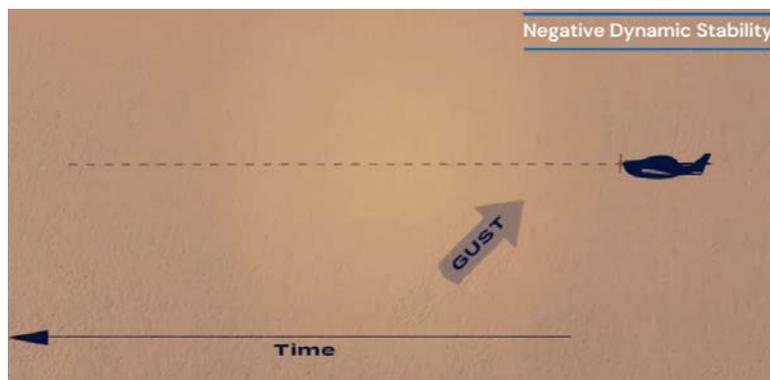
### (4) 稳定性分析

- 动稳定

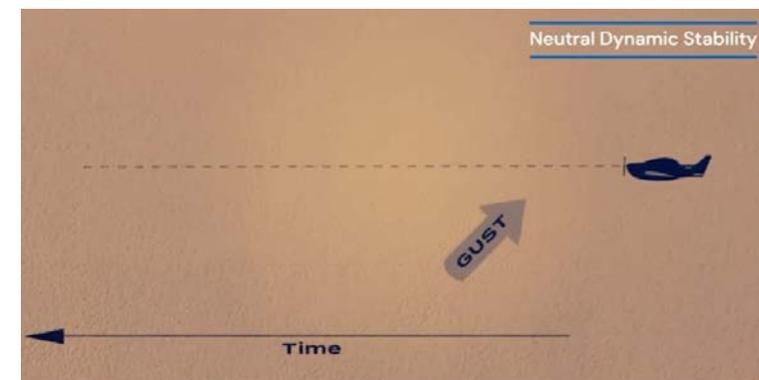
- 考虑无人机从受到扰动后的状态恢复初始运动状态的过程，例如收敛、等幅振荡、发散等。



收敛



等幅振荡



发散

### (4)稳定性分析

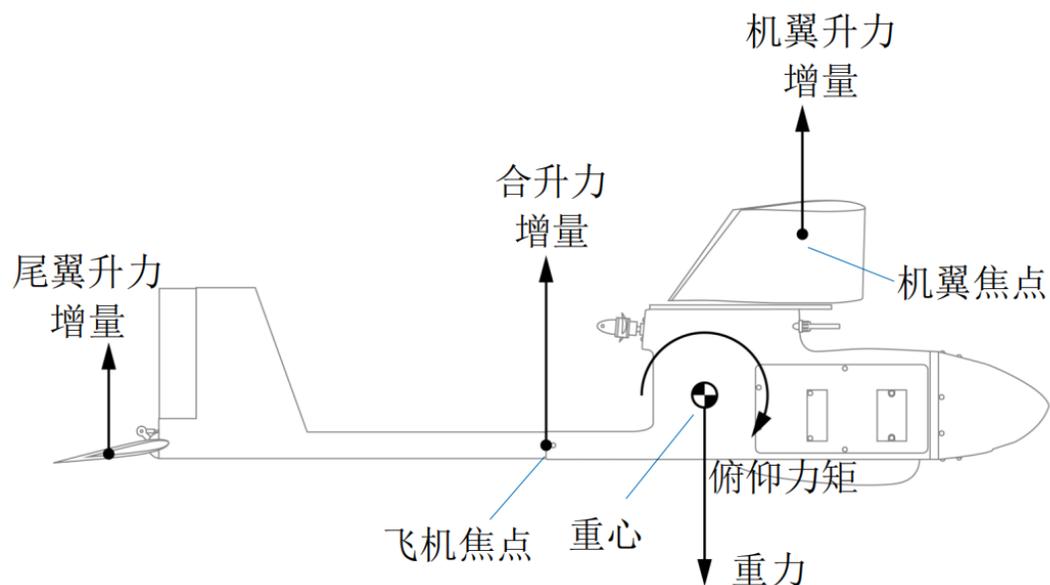
- 固定翼无人机的**纵向稳定性**
  - 微小型固定翼无人机在受到扰动后偏离原来的纵向状态后，能够自动恢复纵向稳定的特性称为**纵向稳定性**，也称**俯仰稳定性**。



## 气动力简述

### (4) 稳定性分析

- 固定翼无人机的纵向稳定性
  - 当重心在飞行器焦点之前，升力增量对重心的力矩阻碍迎角变化的趋势。
  - 无人机的纵向稳定性主要取决于重心和飞行器焦点的相对位置，只有重心在飞行器焦点之前才能保证无人机的纵向稳定性。



# 固定翼飞行原理

## 气动力简述

### (4) 稳定性分析

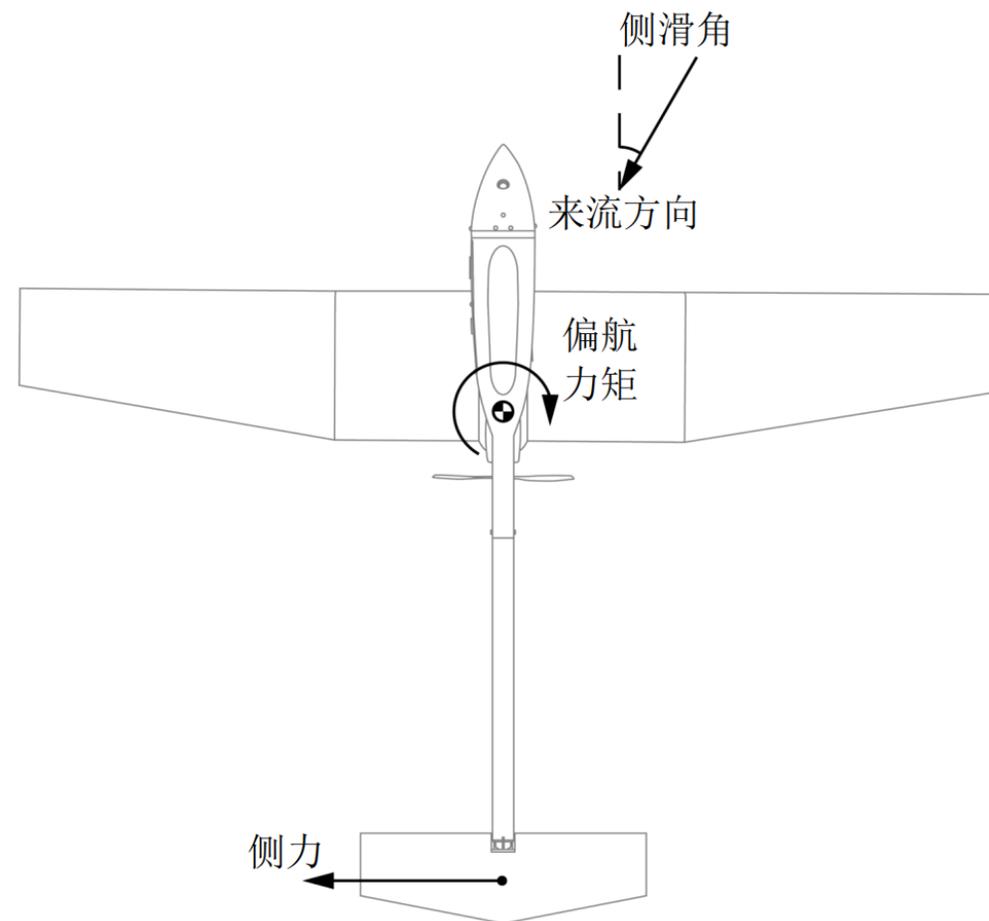
- 固定翼无人机的航向稳定性

- 微小型固定翼无人机主要通过垂直尾翼来保证它的航向稳定性，又称风标稳定性。



### (4) 稳定性分析

- 固定翼无人机的**航向稳定性**
- 微小型固定翼无人机主要通过**垂直尾翼**来保证它的**航向稳定性**。
- 当无人机受到扰动后机身轴线与来流方向不平行时，无人机将产生**侧滑**。
- 无人机运动方向与来流方向的夹角（锐角）称为**侧滑角**。



# 固定翼飞行原理

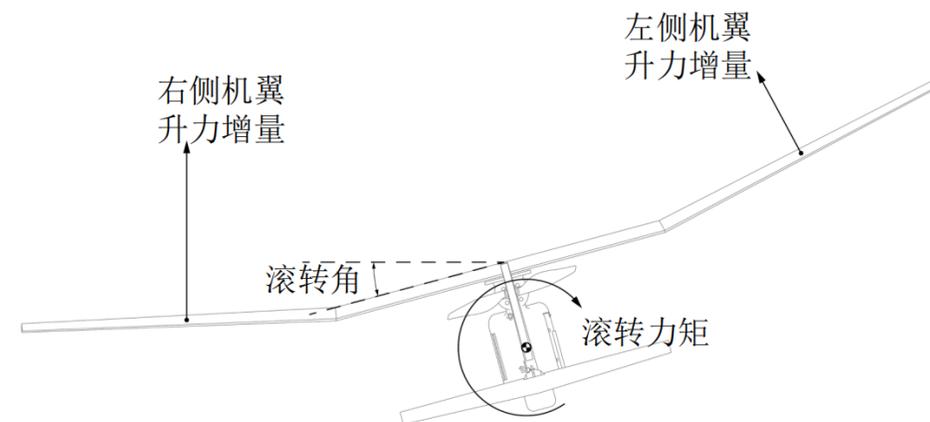
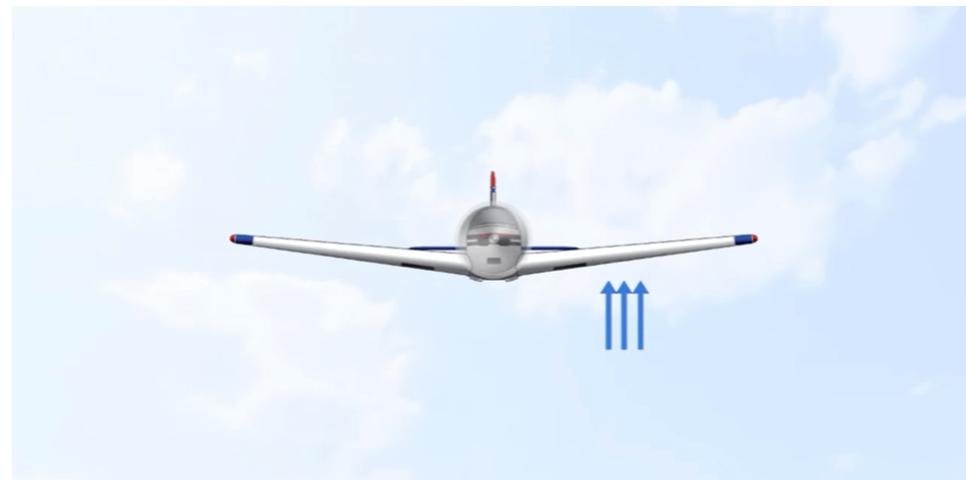
## 气动力简述

### (4) 稳定性分析

- 固定翼无人机的**横滚稳定性**
  - 微小型固定翼无人机在受到**扰动**后偏离原来的水平状态，产生**滚转角**后，能够自动恢复机翼水平状态的特性称为**横滚稳定性**。

无人机主要依靠机翼的**上反角**和机翼**后掠角**产生**滚转力矩**来保证恢复水平状态。

例如若右机翼升力增量大于左机翼，飞行器会产生向左的滚转力矩。



# 大纲



1. 基本概念
2. 固定翼飞行原理
3. 固定翼飞行器设计理念的发展
4. 本书结构

# 固定翼飞行器设计理念的发展



开始年代	设计原则	目标	指令传输	社会因素	硬件因素	控制因素
20 世纪初	手动控制技术	平稳操控飞行器	机械	个人爱好、第一次世界大战	机械陀螺	——
20 世纪 30 年代	自动控制技术	降低飞行控制难度	机械、液压	第二次世界大战	自动驾驶仪	经典控制
20 世纪 60 -70 年代	主动控制技术	提高飞行控制性能和安全性	电传操纵	冷战	数字计算机、飞行管理系统	现代控制
2010 年代	ADA 控制技术	更经济、门槛更低	电传操纵、光传操纵、无线	个人航空兴起、新经济、增长需要、局部战争不断	MEMS 传感器、高性能芯片、高功率密度动力、智能总线	人工智能

# 固定翼飞行器设计理念的发展

## 手动控制技术（开始于 20 世纪初）



1903 年 12 月 17 日，**莱特兄弟**成功进行了世界上首次完全受控、自主动力推动、机身比空气重、能够持续滞空而不降落的飞行，创造了飞行历史上的重要里程碑。



莱特兄弟的首次飞行

**第一次世界大战**期间，固定翼飞行器得到广泛应用，受当时技术限制，主要依靠电子陀螺仪测量飞行器飞行姿态后，由飞行员人工**操纵驾驶杆和脚踏板**来控制飞行器的航向和姿态。

# 固定翼飞行器设计理念的发展

## 自动控制技术（开始于 20 世纪 30 年代）

- 1932 年，波音 247 型飞行器问世，这是第一架全金属无支架机翼客机。
- 1933 年 7 月 15 日至 22 日，威利·波斯特特驾驶“温妮·梅”号环游世界，总飞行时间为 115 小时 3.5 分钟。



波音247型飞行器



探险家威利·波斯特特正站在“温妮·梅”号的驾驶舱上

# 固定翼飞行器设计理念的发展

## 自动控制技术（开始于 20 世纪 30 年代）

- 第二次世界大战对飞行器发展产生了深远的影响，包括更强大的引擎、改进的机翼设计、高级的飞行控制系统和更强大的电子侦察和武器系统。这些塑造了现代军用和民用航空的方向。



P40 战斗机



“野马” 战斗机



P-51D 战斗机



Bf 109 战斗机



喷火式战斗机



零式战斗机



苏联La-7



F4U 战斗机

# 固定翼飞行器设计理念的发展



## 自动控制技术（开始于 20 世纪 30 年代）

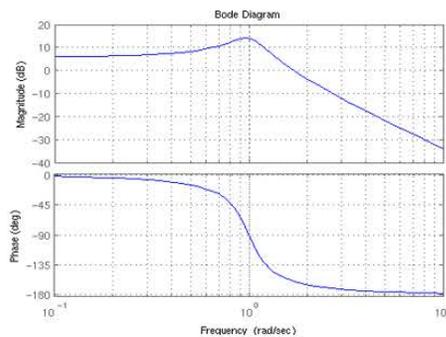
- 这段时间固定翼飞行器主要依靠**模拟电路**制成的全电自动驾驶仪，降低了飞行员的操作负担。
- **自动控制技术**通过使用传感器、计算机和执行机构来监测和调整飞行器的状态和航向，使得飞行器能够**自动稳定、追踪航线、保持高度**等。除了机械传输，对于高速及大型飞行器还需要液压系统进行助力，方便操控。

# 固定翼飞行器设计理念的发展



## 自动控制技术 (开始于 20 世纪 30 年代)

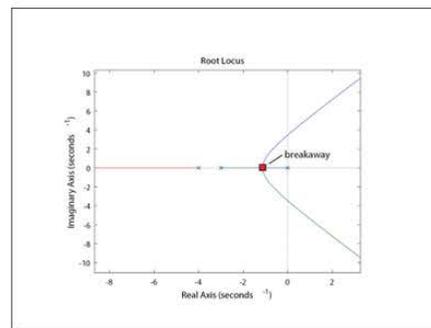
- 围绕自动控制的经典控制技术层出不穷：伯德图、奈奎斯特曲线、根轨迹、尼柯尔斯图等。



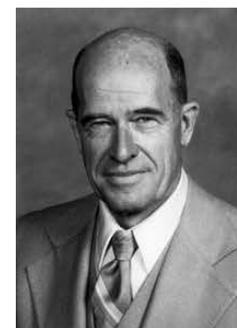
伯德图



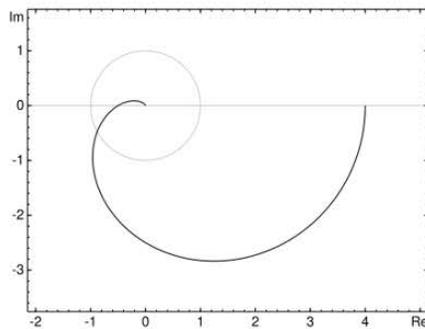
亨德里克·韦德·波德



根轨迹



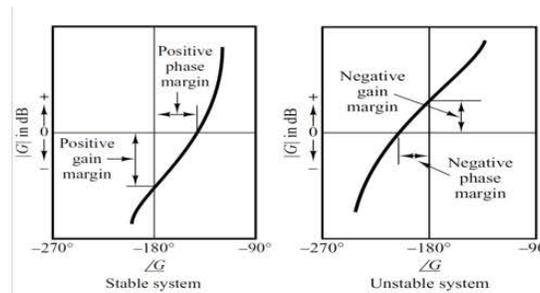
沃尔特·R·埃文斯



奈奎斯特曲线



哈里·奈奎斯特



尼柯尔斯图

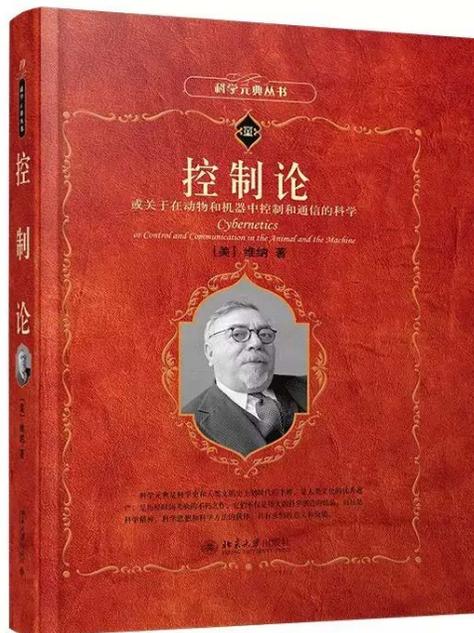


纳撒尼尔·B·尼柯尔斯

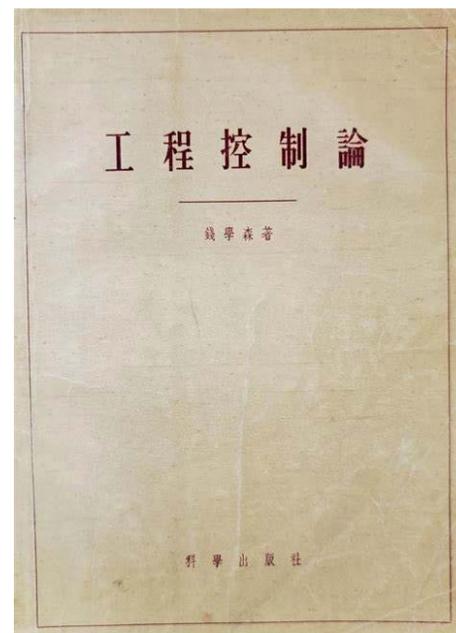
# 固定翼飞行器设计理念的发展

## 自动控制技术（开始于 20 世纪 30 年代）

- 随后，1948 年，维纳出版著作《控制论》，成为控制论诞生的一个标志。之后，中国科学家钱学森于 1954 年出版《工程控制论》，通过总结前期经典控制技术，将控制论推广到工程技术领域。



《控制论》  
维纳



《工程控制论》  
钱学森

# 固定翼飞行器设计理念的发展



## 主动控制技术（开始于 20 世纪 60-70 年代）

- 主动控制技术引入了电传操作，它用电子信号代替了传统的机械连接，以传递飞行器操纵指令。这种技术的主要目的是提高飞行器的操纵性、稳定性和安全性，并减轻驾驶员的工作负担。
- 目前为止，国外的第三代战斗机都广泛采用了主动控制技术，例如 F-16，F-18，Su-27，Mig-29 等等。



(a) F-16



(b) F-18



(c) Su-27



(d) Mig-29

# 固定翼飞行器设计理念的发展



## 主动控制技术（开始于 20 世纪 60-70 年代）

- 这段时期是**现代控制理论**发展的黄金时期，特别是20世纪的60-80年代，卡尔曼、贝尔曼和庞特里亚金的工作对**状态空间模型**和**最优控制理论**的发展起到了关键作用。这些方法在航天、导航和飞行控制等领域得到广泛应用。



鲁道夫·卡尔曼



理查德·贝尔曼



列夫·庞特里亚金

# 固定翼飞行器设计理念的发展



## 主动控制技术（开始于 20 世纪 60-70 年代）

- 之后，多变量控制和鲁棒性理论等成为现代控制理论的一部分。这些理论和技术允许工程师更有效地处理多输入多输出系统，提高了控制系统的性能。
- 与此同时，自适应控制和智能控制也得以发展，其中这时的智能控制通常是指浅层的神经网络控制和模糊逻辑控制等等。

# 固定翼飞行器设计理念的发展

## ADA 控制技术 (开始于 2010 年代)



**ADA** 是自主 (Autonomous), 可信 (Dependable) 和经济 (Affordable) 的简写。

- 近年来飞行器的传感器和功能越发丰富, 导致设计越发复杂, 生产成本居高不下以及维护困难。这些因素导致不少性能优良的飞行器停产, 比如 F-22 猛禽战斗机 (2015 年) 和空客 A380 (2021 年) 等。



F-22 猛禽战斗机



空客 A380

# 固定翼飞行器设计理念的发展

## ADA 控制技术（开始于 2010 年代）



**ADA** 是自主 (Autonomous), 可信 (Dependable) 和经济 (Affordable) 的简写。

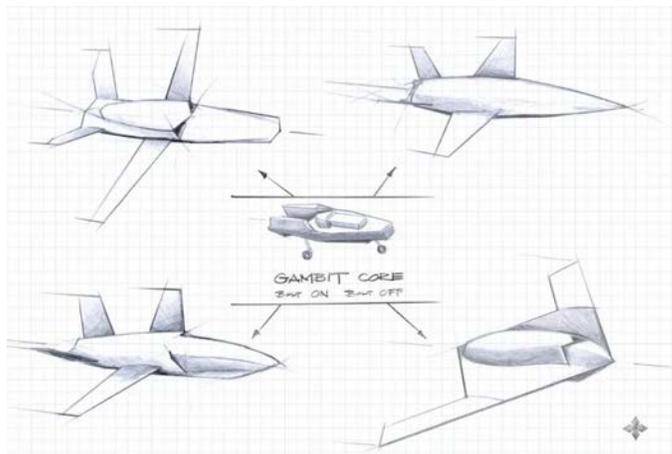
- **自主性**: 飞行器能够在**无需人为干预**的情况下执行各种任务和操作的程度。
  - 飞行器的**自主性**可以分为**手动操控**（对应手动控制技术阶段）、**辅助和协助**（对应自动控制技术阶段）、**半自主**（粗略对应主动控制技术阶段）以及**全自主**。
- **可信性**: 飞行器系统、组件和整体飞行器在特定运行条件下，以及在规定的时间内，能够按照**设计要求**和**性能参数**进行**可靠**和**安全**的运行的能力。
- **经济性**: 飞行器在其整个寿命周期内，包括购买、维护、燃料消耗、运营和终止运营等方面的**成本与性能之间的平衡**，包括购买成本、燃料效率、维护成本、使用寿命等。

# 固定翼飞行器设计理念的发展



## ADA 控制技术 (开始于 2010 年代)

这段时期是**大数据**和**人工智能**发展的黄金时期，海量的数据、深度学习（算法）及高性能芯片（算力）起到了关键作用。比如：美国通用原子航空系统公司公布了其最新的 Gambit 系列无人战斗机汲取汽车行业灵感，并通过类似于商用车装配线的方法制造 Gambit 无人机可转换为四种机型，从而可以降低制造成本并提高开发速度；



Gambit系列无人机的概念草图



# 固定翼飞行器设计理念的发展



## ADA 控制技术 (开始于 2010 年代)

XSpace 公司通过引擎模块化和标准化设计，降低成本；大量的以深度学习为代表的的人工智能技术引入，特斯拉汽车发布端到端学习的“**完全自动驾驶 (FSD, Full Self-Drive)**”汽车据报道不仅可避免人为编程引入的**缺陷**，而且能加速自主性和安全性能的迭代。



特斯拉自动驾驶系统



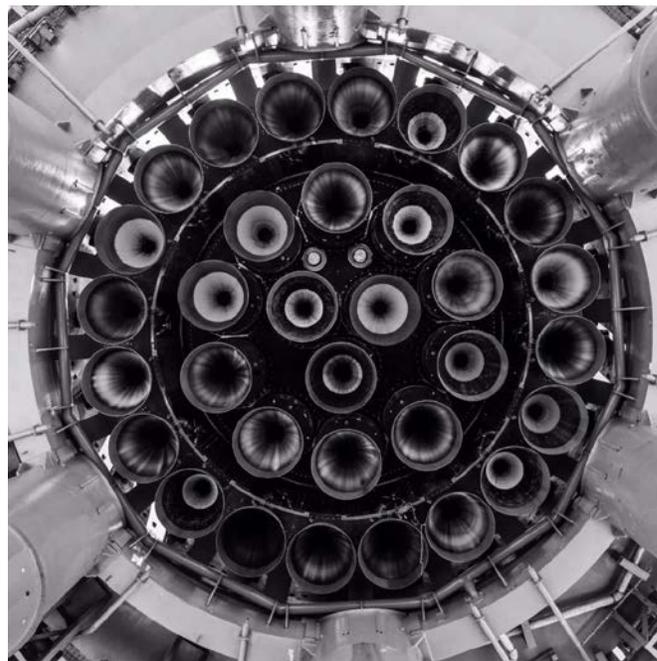
# 固定翼飞行器设计理念的发展

## ADA 控制技术 (开始于 2010 年代)

XSpace 公司通过引擎模块化和标准化设计,降低成本;大量的以深度学习为代表的的人工智能技术引入,特斯拉汽车发布端到端学习的“**完全自动驾驶 (FSD, Full Self-Drive)**”汽车据报道不仅可避免人为编程引入的**缺陷**,而且能加速自主性和安全性能的迭代。



星舰上的33台猛禽V2发动机



# 大纲



1. 基本概念
2. 固定翼飞行原理
3. 固定翼飞行器设计理念的发展
4. 本书结构

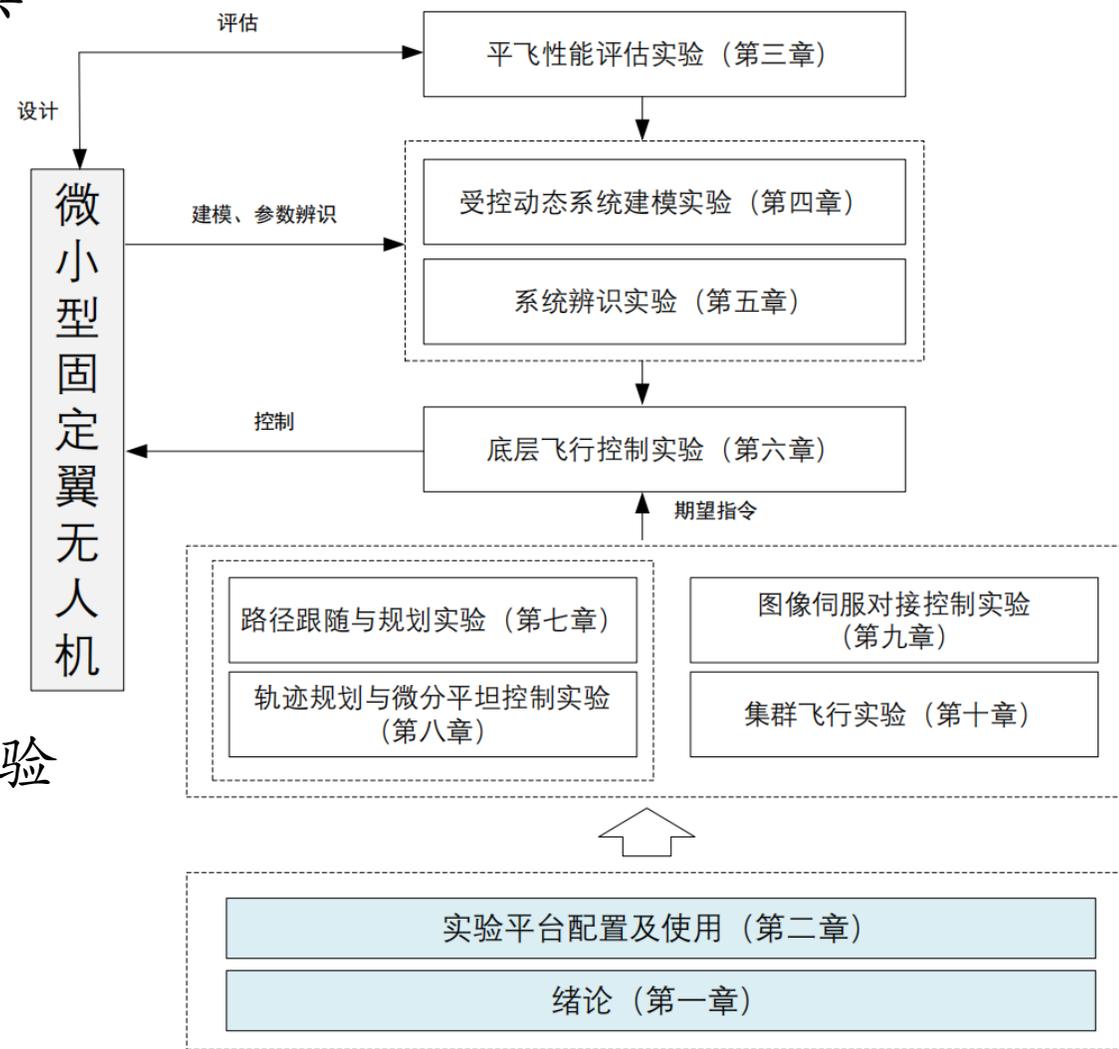
# 本书结构



本书提供建立完成的固定翼无人机数学模型以及基于该数学模型设计的软硬件在环仿真环境等。

包含八个主题实验：

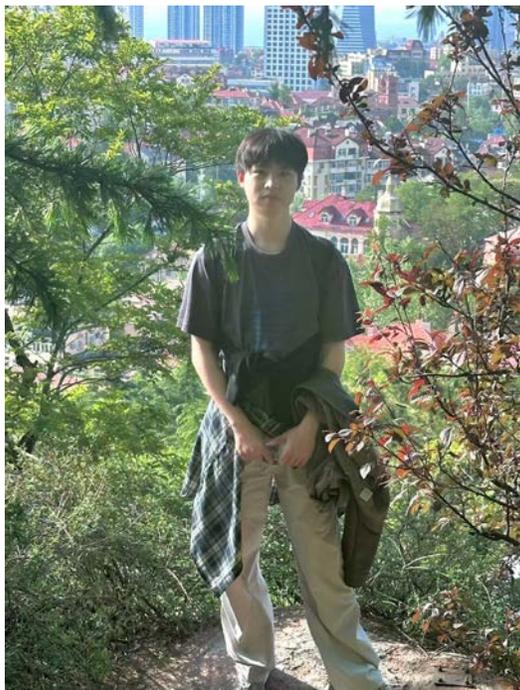
- (1) 实验一：平飞性能评估实验
- (2) 实验二：受控动态系统建模实验
- (3) 实验三：系统辨识实验
- (4) 实验四：底层飞行控制实验
- (5) 实验五：路径跟随与规划实验
- (6) 实验六：轨迹规划与微分平坦控制实验
- (7) 实验七：图像伺服对接控制实验
- (8) 实验八：集群飞行控制实验。



# 致谢



□ 感谢陈鑫泉、陈闻园为本讲PPT准备做出的贡献



□ 更多信息请访问公众号和网站

可靠飞行控制研究组  
RELIABLE FLIGHT CONTROL GROUP



Rfly 官网



研究组公众号



视频号



B站官方账号



优酷账号

[rfly.buaa.edu.cn](http://rfly.buaa.edu.cn)