

无人系统设计

课 程：软件工程专业-专业实践类课程

学 分：3

总课时：48

课程参考教材：

《认识飞行（第二版）》 / 《Understanding Flight, 2nd》

作者： David F. Anderson, Scott Eberhardt

译者：周尧明（2019年） / 韩莲（2011年）

北京联合出版公司2019.07 / 航空工业出版社2011.01

授课教师：王赓

课程助教：李旭辉、蒋李康、方俊杰、张源娣、范文婷、曹恺洋、杨道

课程主要内容

(1) 认识飞行

- ▣ 牛顿力学（作用力与反作用力）
- ▣ 刚体转动（转矩、陀螺、进动） / 大学物理基础

(2) 认识多种多样的无人飞行系统

- ▣ 飞行原理
- ▣ 动力技术（螺旋桨、喷气式）

(3) 控制技术

- ▣ 飞行操纵原理（机翼、襟翼、旋翼、尾桨、自动倾斜器）
- ▣ 作动器（电动机、舵机（PWM调制））
- ▣ 传感器（电子指南针、加速度计、陀螺仪、GPS、高度计、高速相机、全景相机、……）
- ▣ 电子控制器（PID算法、飞行控制原理与算法）

(4) 飞行性能（飞行性能指标体系、稳定性、可靠性、易操作性）

课程主要内容

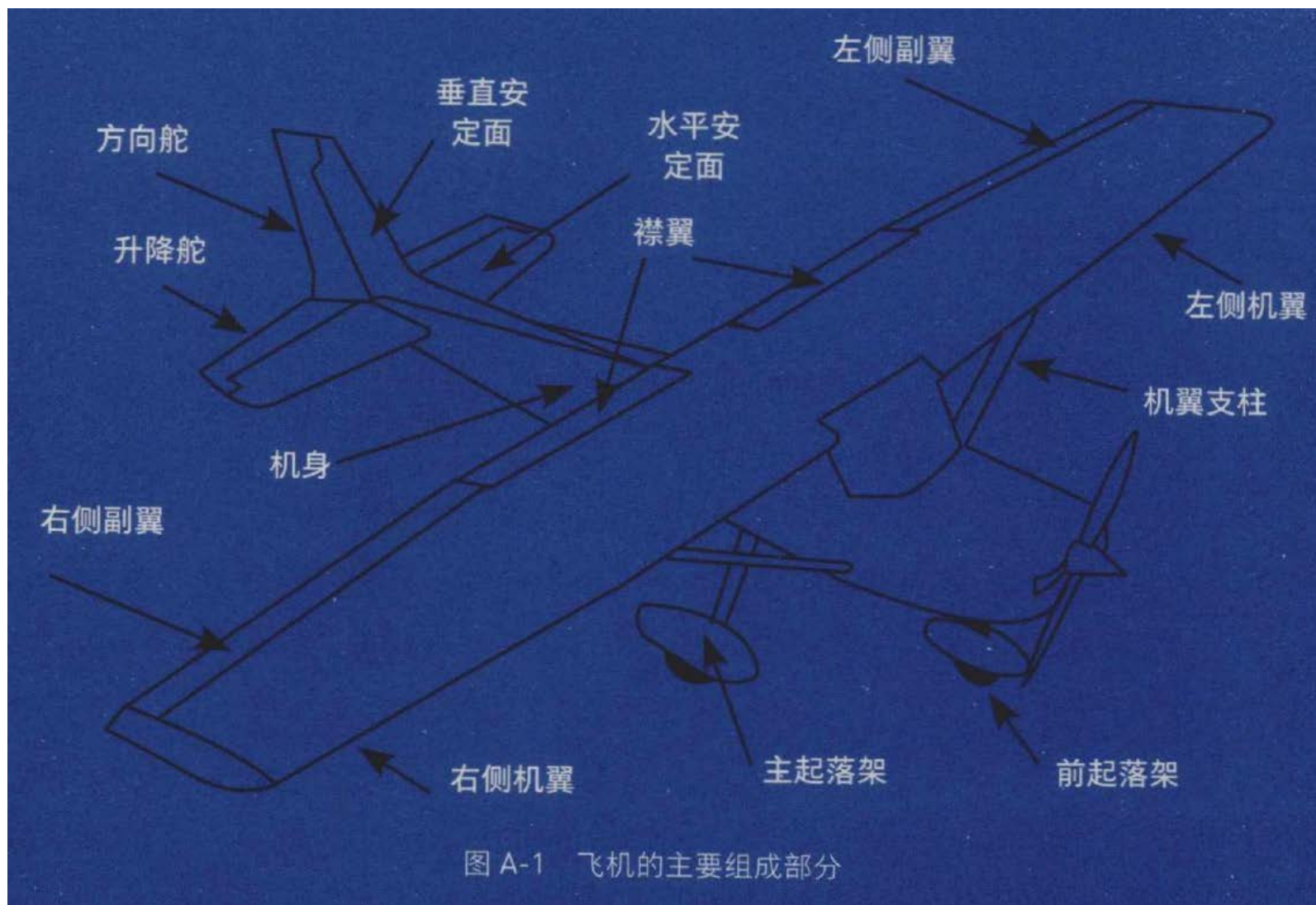
- (5) 基于4旋翼、固定翼模型机的认知验证实验
(含早期自由组合发现学习过程)
- (6) 仿真技术
 - ▣ 飞行器建模 (动力学、运动学) / 大学物理基础、高等数学
 - ▣ 软件技术 (Unity3D、MATLAB/Simulink)
- (7) 仿真技术实践 (半实物)
 - ▣ 无人AI战机模拟格斗对抗系统
 - ▣ 软件技术 (Unity3D、MATLAB/Simulink、图像处理技术、人工智能AI技术、计算加速技术
- (8) 发挥想象力和所学的自由拓展设计 (理论设计/尽量据情实验验证)
- (9) 课程综合设计与答辩

认识飞行

- 认识飞行的目的，是为了控制飞行（AI对抗...）
- 认识飞机（固定翼飞机、直升机（安排在后面）、旋翼机（不同于直升机））
- 飞机的构造及结构称谓
- 飞机的操控
- 了解模拟飞机的控制操纵



飞机的主要组成部分



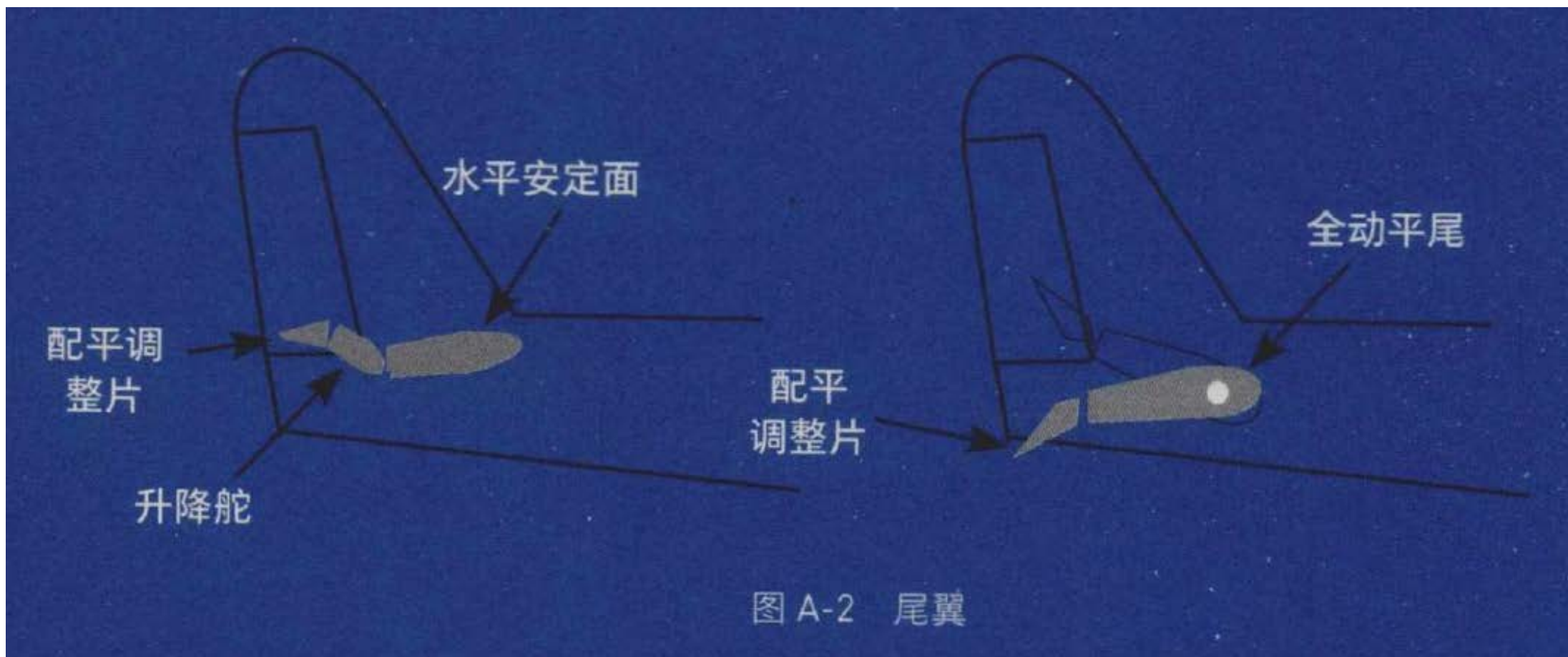
- 机翼
- 副翼
- 襟翼
- 安定面
- 升降舵
- 方向舵
- 机身
- 起落架

飞机的主要组成部分

图 A-1 显示了一架上单翼飞机的主要组成部分。飞机机体 (airframe) 由机身 (fuselage)、机翼 (wings) 和尾翼 (empennage 或 tail feathers) 组成, 其中机身是飞机的主要组成部分。尾翼由水平安定面 (horizontal stabilizer)、升降舵 (elevator)、垂直安定面 (vertical stabilizer) 和方向舵 (rudder) 构成。升降舵用于调整、控制飞机的俯仰 (pitch, 指飞机抬头或低头的姿态)。升降舵与飞机的驾驶盘或驾驶杆相连, 驾驶员通过前后移动驾驶盘或驾驶杆来调节升降舵。在有些飞机上, 整个水平安定面就是一个升降舵, 如图 A-2 所示, 这就是所谓的全动平尾 (stabilator)。方向舵用于修正飞机航向和小角度转向。驾驶舱地面上的两个脚踏板操纵方向舵, 用于方向辅助控制。

- 机翼
- 副翼
- 襟翼
- 安定面
- 升降舵
- 方向舵
- 机身
- 起落架

尾翼



■ 尾翼

■ 升降舵

■ 配平调整片

尾翼

大部分飞机升降舵的后缘处有一个铰接小翼面，有时方向舵后缘处也有，这就是配平调整片（trim tab），如图 A-2 所示。调整片的运动方向与操纵面的运动方向相反，其目的是减小飞行员操纵驾驶盘的力，以使飞行员保持飞机理想的飞行姿态。

■ 尾翼

■ 升降舵

■ 配平调整片（助力）

副翼、襟翼

大多数现代飞机都是单翼机，机翼安装在机身上部或下部。大多数上单翼飞机的机翼由支柱（strut）支撑，采用支柱可以减轻机翼的重量，但其代价是增加了阻力（支柱阻碍了气流的流动）。

机翼后缘外侧的可移动操纵面是副翼（aileron），用于控制飞机的滚转（roll control，绕机身中心轴的旋转运动）。副翼由驾驶盘的转动或者驾驶杆的左右移动来操纵。两侧的副翼是耦合的，当一侧的副翼向上摆动时，另一侧的副翼向下摆动。我们将在下面详细讨论控制面。

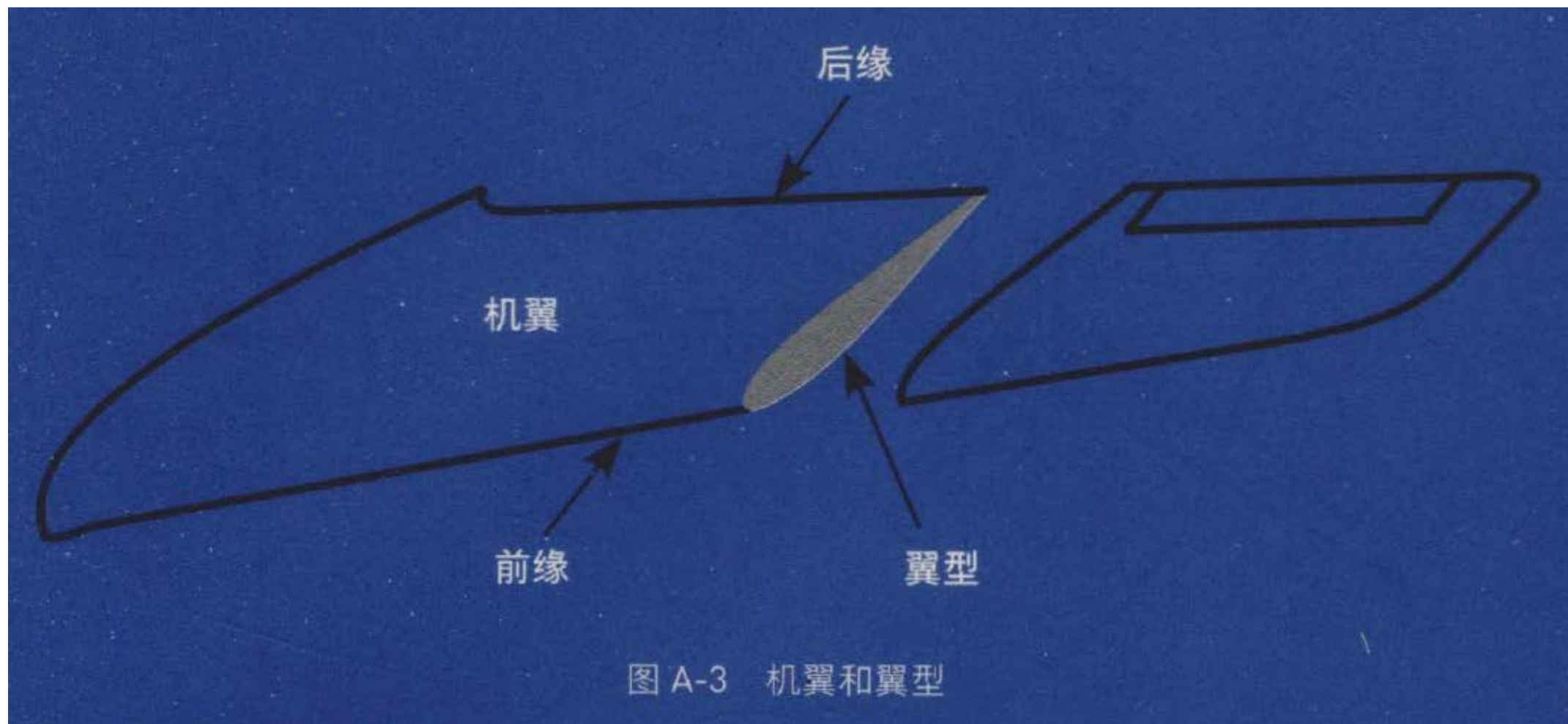
机翼后缘内侧的铰接翼面是襟翼（flap），用于在低速飞行时产生更大的升力，同时在着陆时增大阻力。这部分增大的阻力有助于降低飞机的着陆速度，从而增大着陆进场角度。本书第2章中详细讨论了襟翼。

前、后 三点式起落架

小型飞机有两种起落架布置形式：前三点式起落架（tricycle landing gear）和后三点式起落架（tail dragger）。前三点式起落架的主起落架（main landing gear）位于飞机平衡中心的后侧，前侧有一个可转向的前起落架（nose gear）；后三点式起落架的主起落架位于飞机平衡中心的前侧，后侧有一个小的可转向尾轮（tail wheel）。两种布置形式中的前起落架和尾轮都由方向舵踏板操纵。

- 思考：两种布局分别有何不同的特点？留意过自己乘坐过的飞机的起落架布局吗？见过几种？

机翼与翼型



■ 翼弦线 ■ 中弧线 ■ 迎角 ■ 展弦比 ■ 翼展 ■ 几何弦长

机翼与翼型

翼型（airfoil）是机翼的剖面形状。如图 A-3 所示，翼型可以看作是从横截面上截取的机翼薄片。除了机翼之外，螺旋桨和尾翼也有翼型。航空工程师在讨论时会交替使用机翼和翼型这两个术语，然而翼型仅仅是一个机翼薄片的形状，和机翼不是同一个概念。对于有些机翼而言，在翼展方向的不同位置会采用不同的翼型。

■ 翼弦线 ■ 中弧线 ■ 迎角 ■ 展弦比 ■ 翼展 ■ 几何弦长

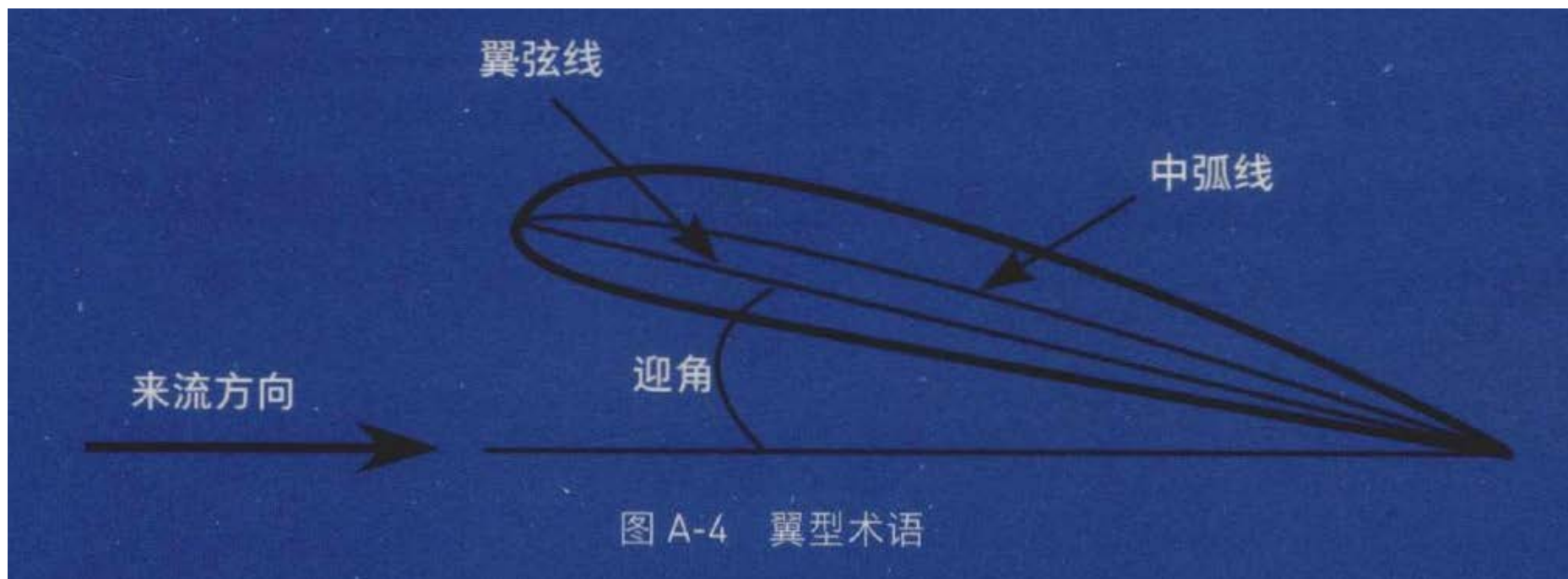
机翼与翼型

如图 A-3 所示，机翼有前缘（leading edge）和后缘（trailing edge）。图 A-4 给出了翼型的详细特征，包括翼弦线和中弧线。翼弦线是一条虚构的连接机翼前缘和后缘的直线，用于确定机翼的几何迎角（geometric angle of attack）和机翼面积。

中弧线（mean camber line）是到机翼上下表面距离相等的一条曲线，机翼弯度就是中弧线的曲率。中弧线曲率很大的翼型的机翼被称作大弯度机翼（highly cambered wing）。对称翼型的弯度为零。

■ 翼弦线 ■ 中弧线 ■ 迎角 ■ 展弦比 ■ 翼展 ■ 几何弦长

机翼与翼型



如图 A-4 所示，能够产生升力的翼型必然有迎角。来流方向是指机翼前方的气流向机翼运动的方向，与机翼的运动方向平行，并且其速度与机翼的速度相同。在航空航天中，几何迎角的定义是翼弦线和前方来流方向的夹角。

■ 翼弦线 ■ 中弧线 ■ 迎角 ■ 展弦比 ■ 翼展 ■ 几何弦长

机翼与翼型

机翼上一个重要的指标是展弦比 (aspect ratio)。展弦比是指机翼翼展 (span) 和平均几何弦长 (mean chord length) 之比，其中，翼展是机翼一侧翼尖到另一侧翼尖的距离，平均几何弦长是沿翼展方向翼弦线长度的平均值。机翼面积等于翼展乘上平均几何弦长。大多数小型通用飞机的机翼展弦比在 $6 \sim 8$ 之间，这意味着机翼的长度是其平均宽度的 $6 \sim 8$ 倍。

■ 展弦比 $6 \sim 8$ 怎么来的？ (观看随后的视频片段)

■ 翼弦线 ■ 中弧线 ■ 迎角 ■ 展弦比 ■ 翼展 ■ 几何弦长

认识飞机

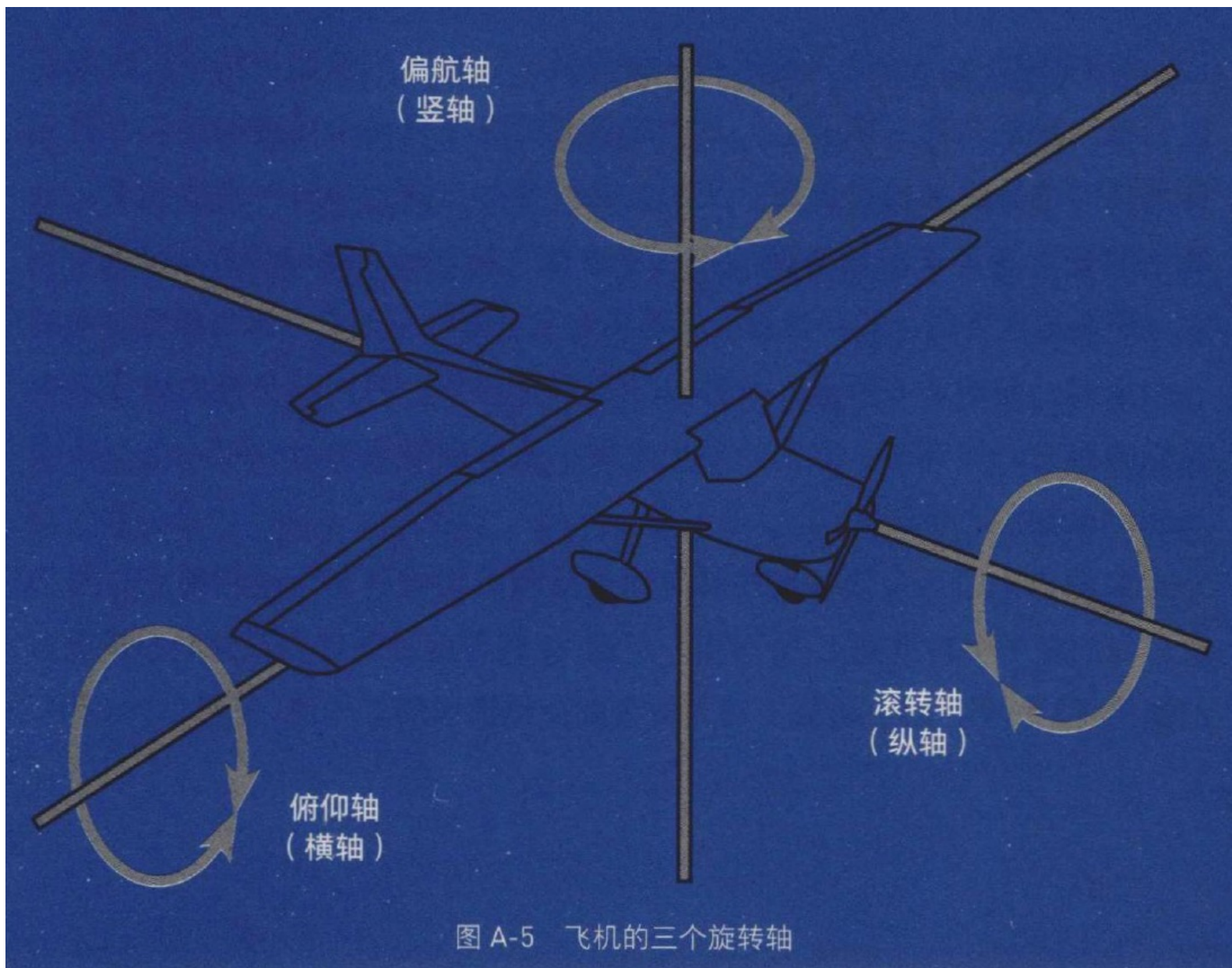
■ 其他更多内容，请仔细阅读教材附录相关内容。

■ 看几段录像：“飞行原理”

关于飞机操控

- FlightGear开源飞行模拟软件
- <https://www.flightgear.org/>
- <http://www.flightgear.org.cn/>





飞机的三个旋转轴

■ 俯仰轴 (横轴)

俯仰/ Pitch

■ 滚转轴 (纵轴)

滚转/ Roll

■ 偏航轴 (竖轴)

偏航/ Yaw

航向 / course
/ heading

飞机的三个旋转轴

如图 A-5 所示，飞机的运动可以在三个维度上分解，分别是滚转 (roll)、俯仰 (pitch) 和偏航 (yaw)。滚转是飞机绕沿机身中心的纵向轴线旋转，由副翼操纵。俯仰是飞机绕横向旋转轴线旋转，这里的横轴平行于机翼翼展方向。俯仰运动由升降舵控制，不过升降舵控制飞机俯仰运动的同时，也控制了机翼的迎角。当飞机抬头时也就增大了迎角，因此这种俯仰控制或迎角控制是调节机翼升力的关键。最后来谈偏航，偏航是飞机绕机体坐标系竖轴旋转，由方向舵控制，其中竖轴垂直穿过机翼中心，垂直于横轴和纵轴。需要注意的是，三个轴都穿过了飞机的重心 (center of gravity，通常缩写为 cg)。重心是飞机的平衡点，换句话说，飞机的所有重量可以被看作集中在这一点上。

■ 俯仰轴（横轴）
俯仰/ Pitch

■ 滚转轴（纵轴）
滚转/ Roll

■ 偏航轴（竖轴）
偏航/ Yaw

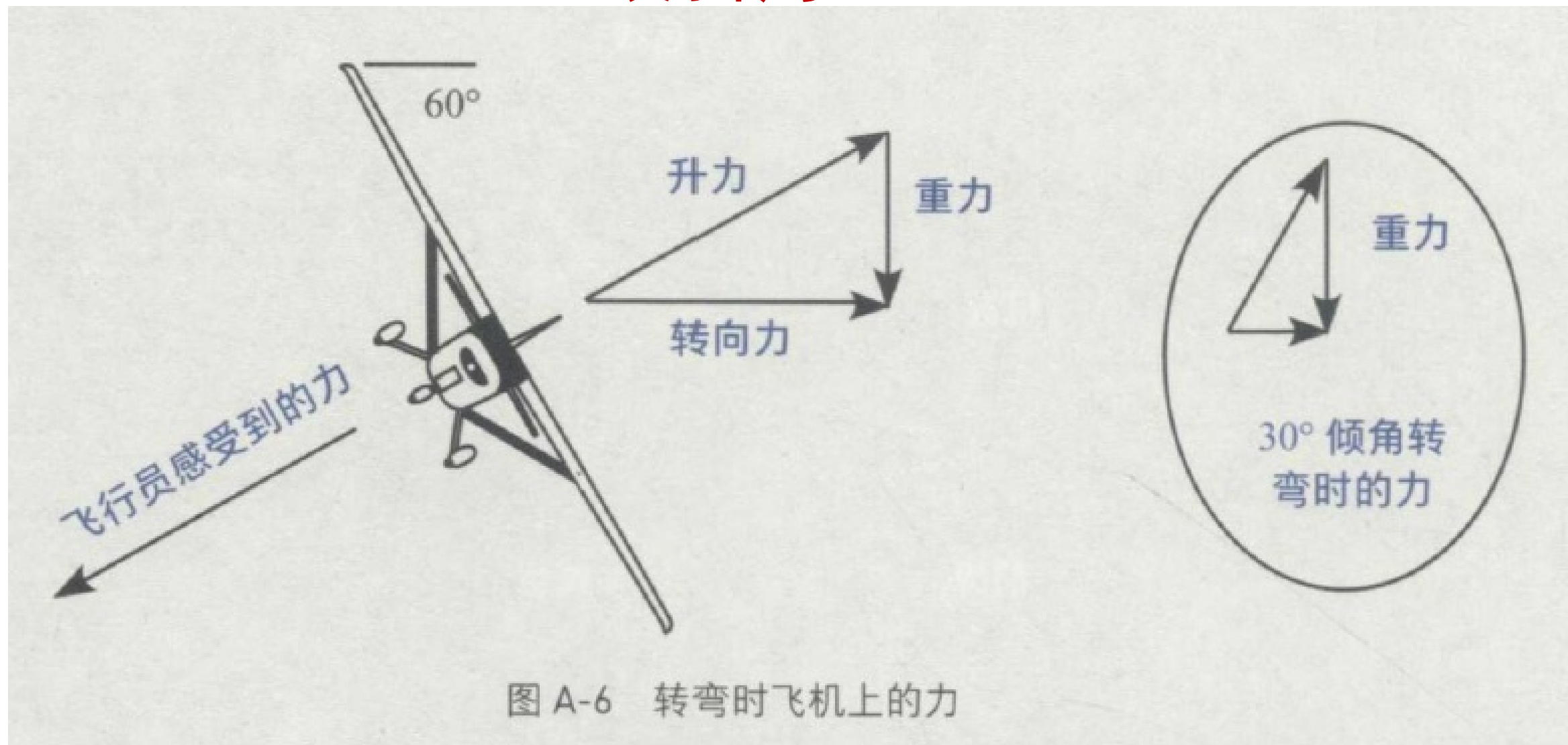
■ 飞机的重心

航向 / course
/ heading

关于转弯

没有做过飞行员的人普遍有一个误解，认为飞机像船一样，由方向舵控制着飞机的转弯。事实上，方向舵只能操纵飞机做小角度的转向，真正负责转向的操纵装置是副翼。飞机会在转弯的方向上滚转一定的角度。机翼上的升力垂直于机翼表面，在水平直线飞行（straight-and-level flight）时，升力是垂直向上的。当飞机滚转了一定角度时，升力方向与铅垂方向成一个角度，如图 A-6 所示。一部分升力用于转弯，另一部分升力用于平衡飞机的重力。转弯时，方向舵只用来做小角度的修正（correction），协调（coordinate）飞机转弯。

关于转弯

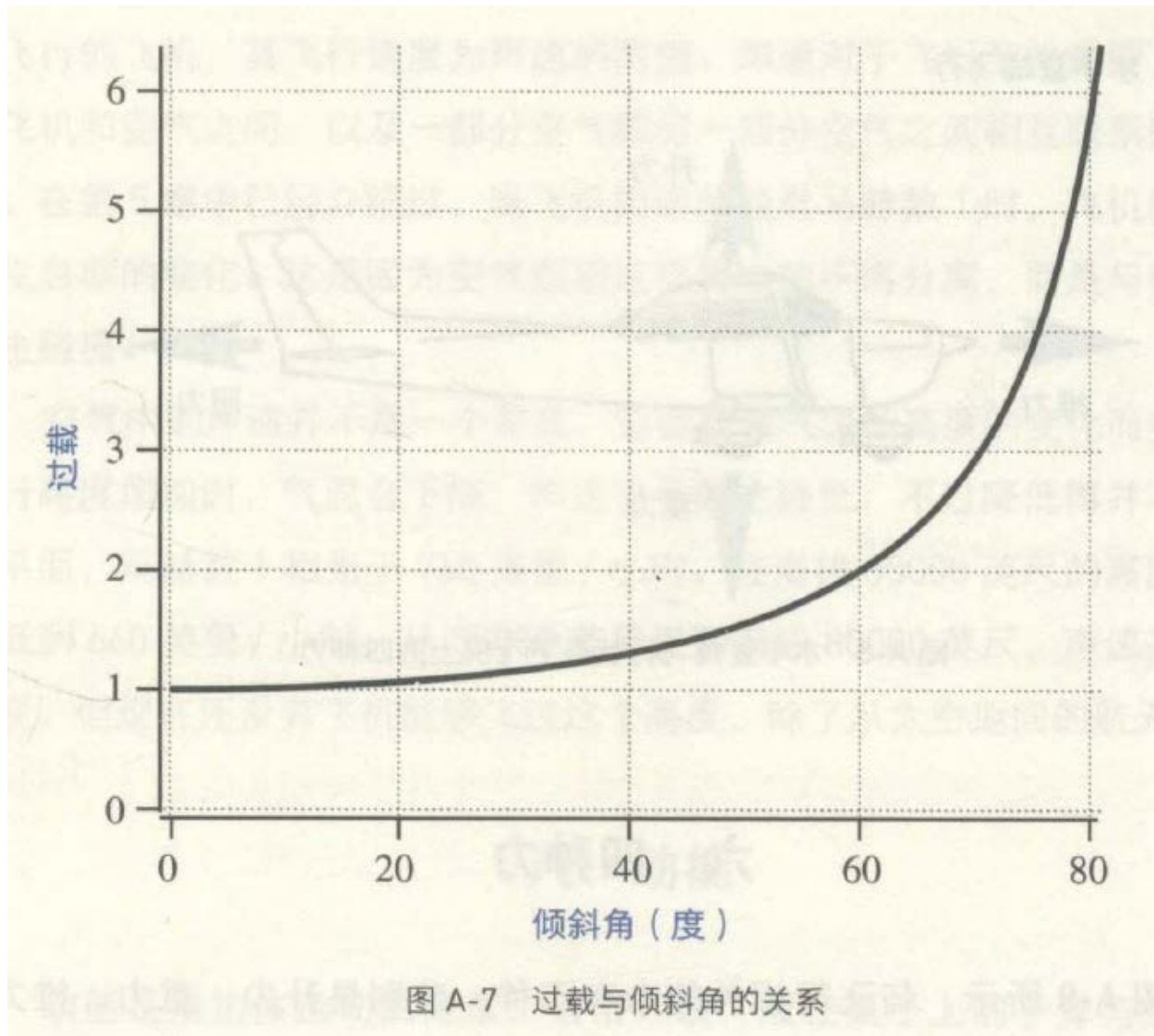


关于转弯

如图 A-6 所示，飞行员在转弯时感受到的力与升力大小相等，方向相反。我们在书中曾提到了 $2g$ 转弯，所谓 $2g$ 转弯就是飞行员感受到的力是重力的两倍(称为两个 g)，机翼上的力或者载荷也都增加了一倍。在航空术语中，过载 (load factor) 是指载荷除以飞机重量， $2g$ 转弯时的过载就是 2。图 A-7 给出了所有飞机在飞行时的过载与倾角 (bank angle) 的函数关系，有一点需要注意的是，飞行员受到的力 (或负荷) 只与飞机的倾斜角有关，也就是机翼和水平线的夹角。在图 A-6 中，飞机的倾斜角是 60 度，如果飞机在转弯过程中高度不变，那么升力的垂直分量必须等于飞机的重力，这被称作水平转弯 (level turn)。因此，倾斜角越大，升力也越大，飞行员的负荷也越大。图 A-6 中的插图显示了 30 度倾角转弯时飞机上的力，和 60 度倾角相比较可以看出，重力没有变化，但另外两个力更小。 $2g$ 的过载会在飞机以 60 度倾角转弯时发生，而与飞机的速度无关。本书第 6 章中详细地讨论了飞机的转弯。



关于转弯



关于转弯



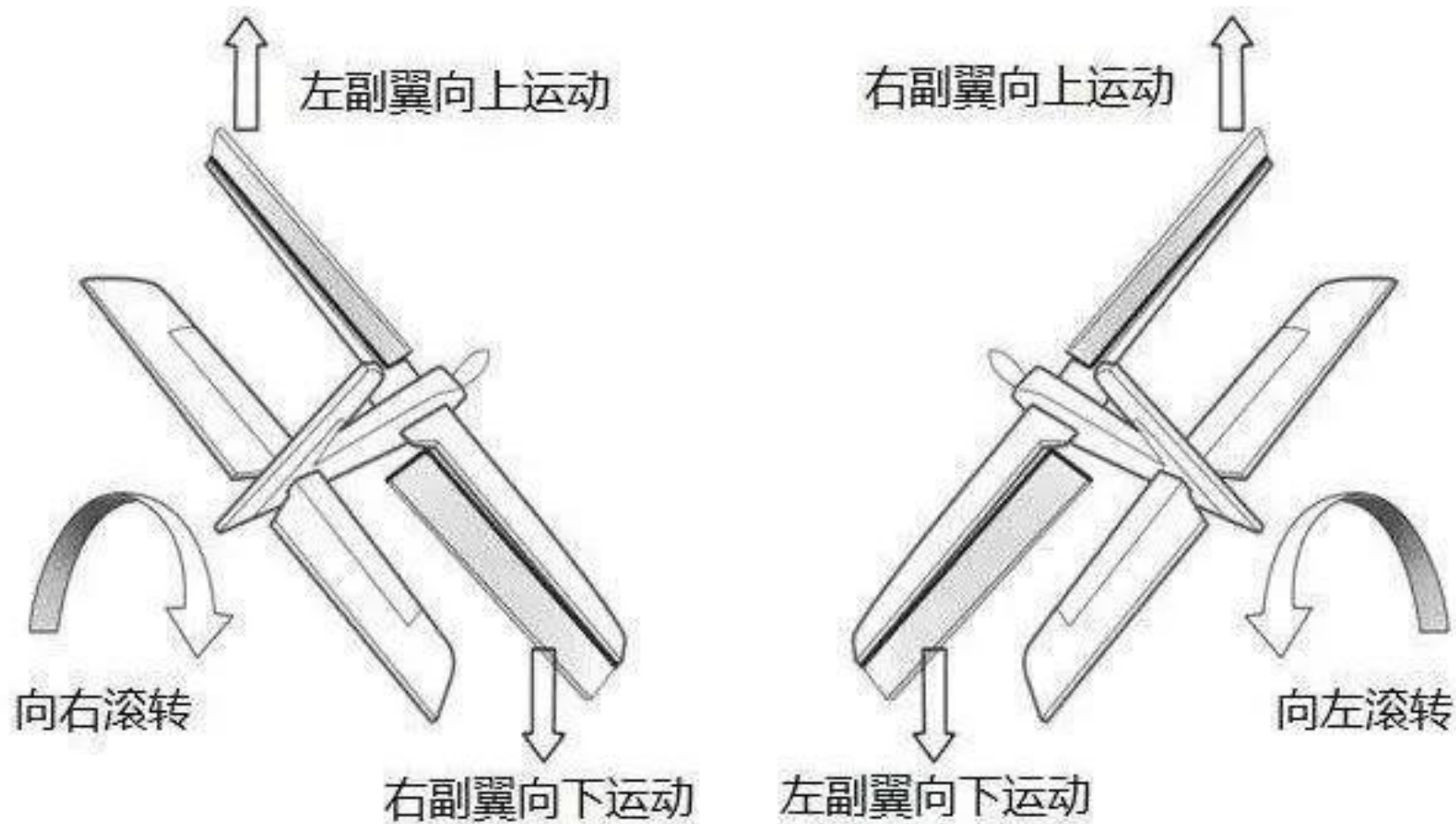
疯狂机械控

关于转弯



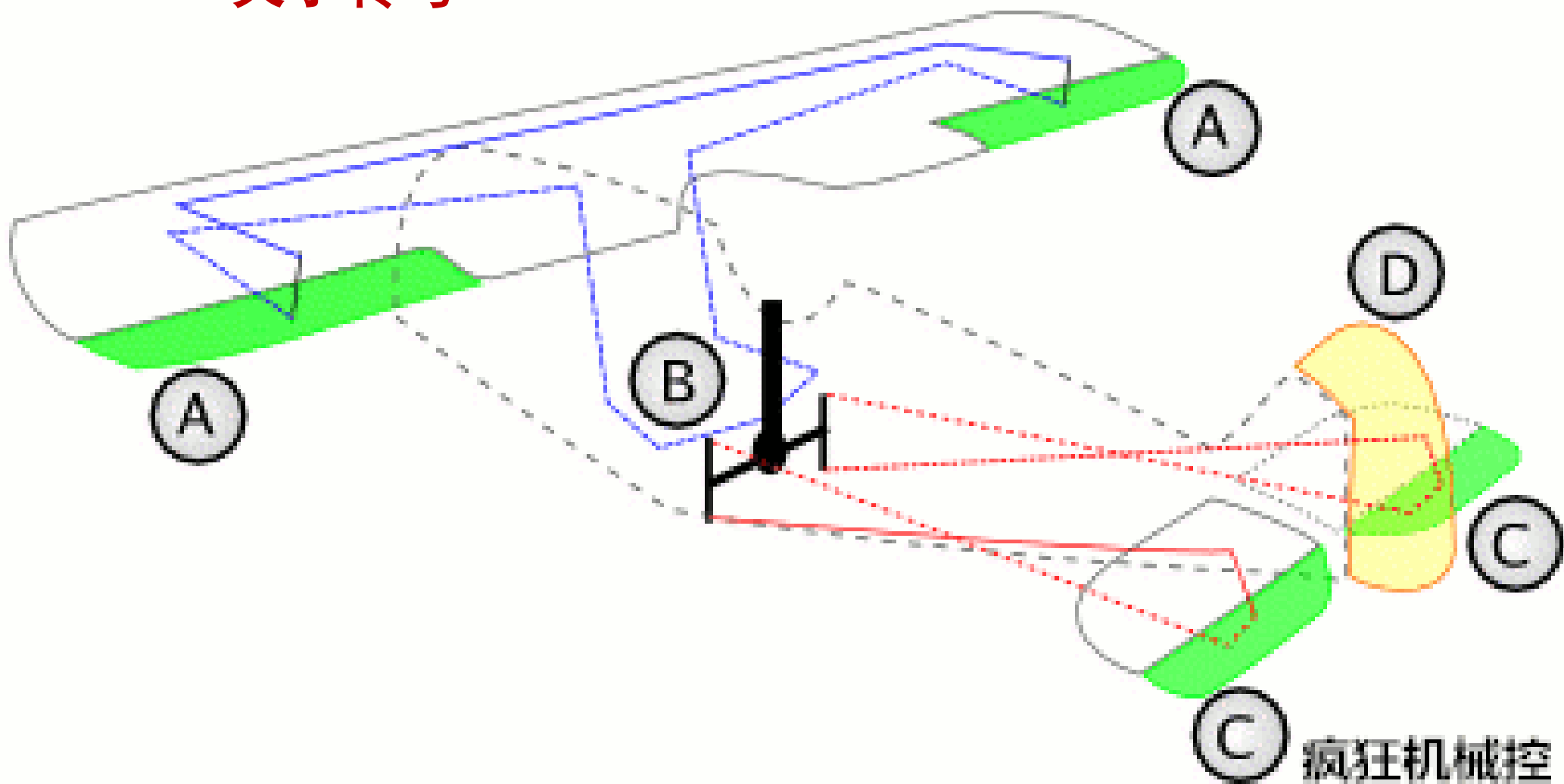
疯狂机械控

关于转弯（以下方法对吗？有疑问吗？）



■ 参考：<http://www.xn--glr604k.com/home/index/article/id/5993>

关于转弯



■ 参考: https://bbs.xianjichina.com/forum/details_171850

关于转弯



- 回顾之前的操纵原理视频片段

转弯 — 需要向心力



■ 回顾之前的操纵原理视频片段

飞机上的力



飞机上的力



水平直线飞行

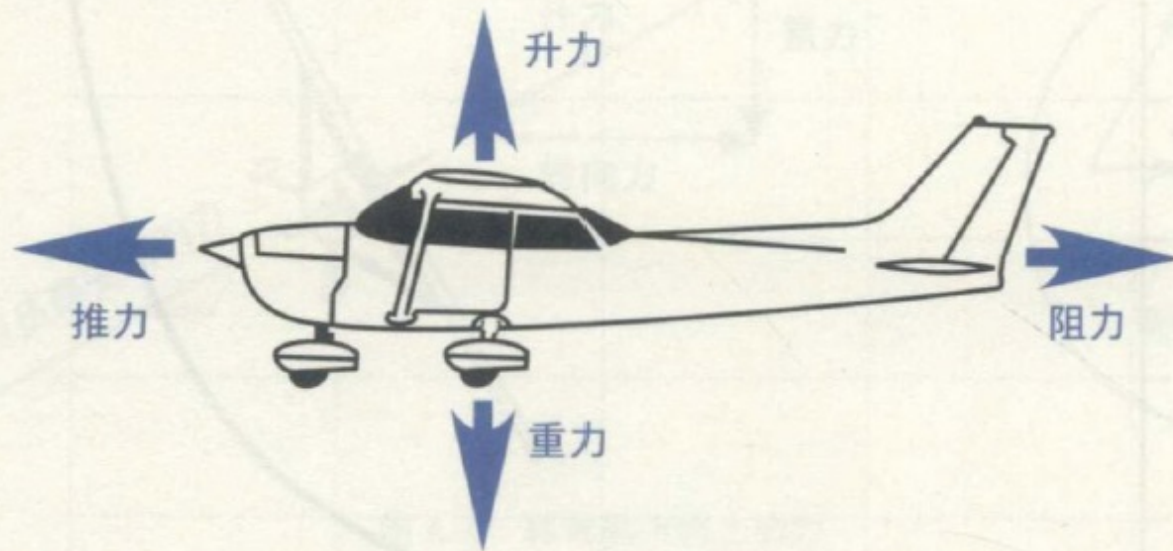


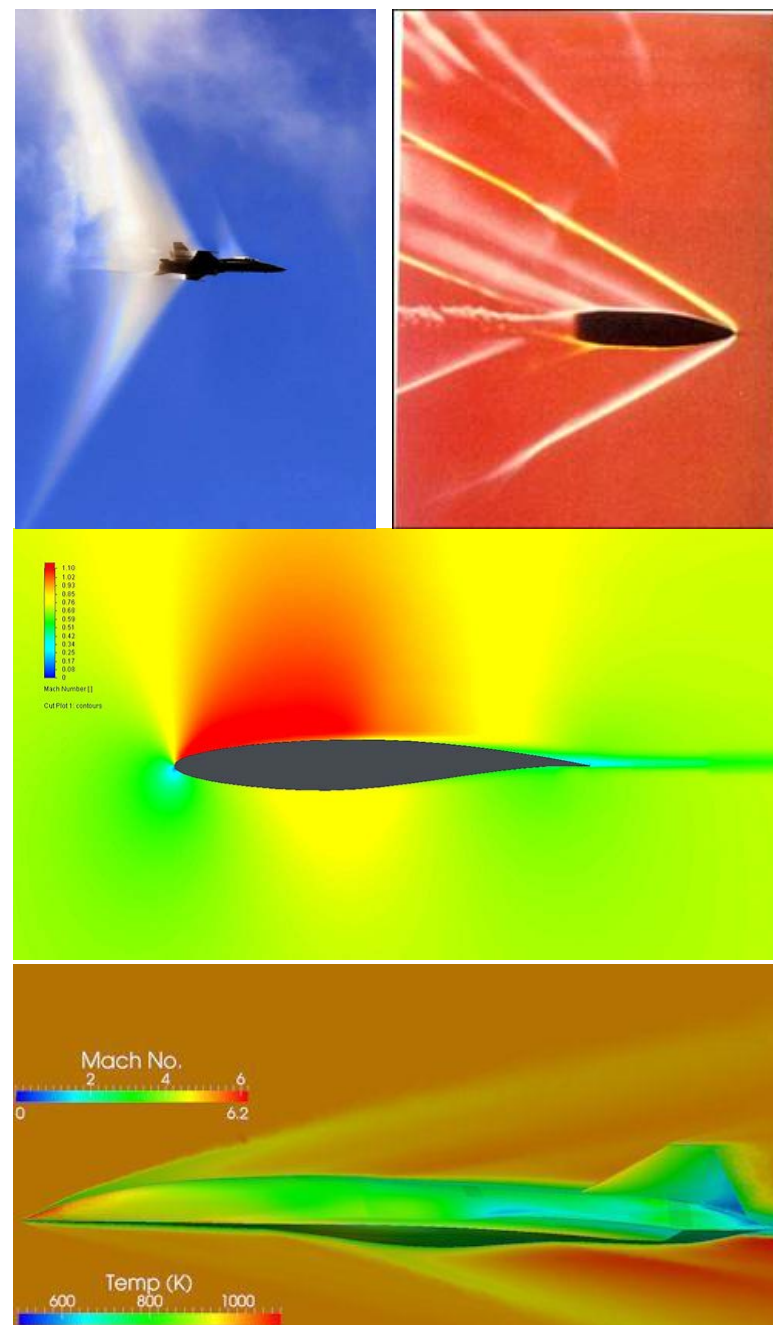
图 A-8 水平直线飞行状态下飞机上的四种力

如图 A-8 所示，与飞行相关的力有四种，分别是升力、重力、推力和阻力。在水平直线飞行（飞行速度、方向和高度不改变）时，飞机的净升力等于重力。之所以称之为净升力，是因为对于传统的飞机设计，水平安定面向下倾斜，会给机翼施加额外的载荷。发动机产生的推力等于阻力（包括空气摩擦和升致阻力^①）。

关于马赫数

描述高速飞行的一个重要参数是马赫数 (mach number)。简单地说, 马赫数就是飞机的速度或者空气的速度与声速的比值, 即以马赫数 2 的速度飞行的飞机, 其飞行速度为声速的两倍。声速对于飞行至关重要, 因为它是飞机和空气之间, 以及一部分空气和另一部分空气之间相互联系的介质速度。在第 5 章中已经介绍过, 当飞机的速度接近马赫数 1 时, 飞机的性能会发生急剧的变化。这是因为空气在接近机翼之前不再分离, 而是与机翼直接发生碰撞。

空气中的声速并不是一个常数, 它会随着气温和高度的变化而变化。当飞行高度增加时, 气温会下降, 声速也会随之降低, 不过降低得并不快。在海平面, 马赫数 1 相当于 760 英里 / 小时。在海拔 35000 英尺的高度, 其值降低到 660 英里 / 小时。从 35000 英尺直到海拔 80000 英尺, 声速基本保持不变。但现在还没有飞机能够飞过这个高度, 除了从太空返回的航天飞机。



关于飞机操控

- FlightGear开源飞行模拟软件
- <https://www.flightgear.org/>
- <http://www.flightgear.org.cn/>

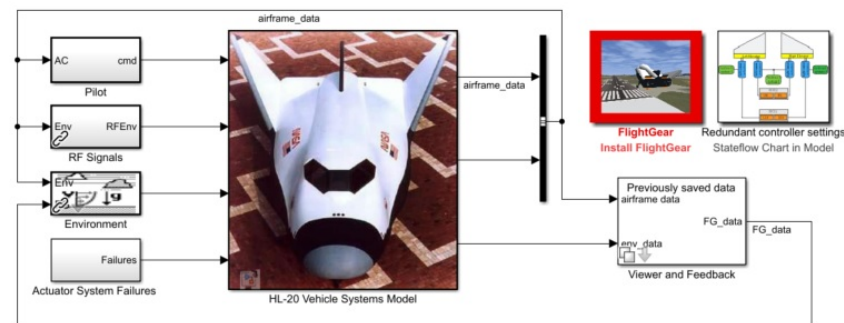


关于Simulink + FlightGear

■ Simulink + FlightGear开源飞行模拟软件

■ 参考：

- <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/hl-20-project-with-optional-flightgear-interface.html>
- <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/introducing-the-flight-simulator-interface.html>
- <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/working-with-the-flight-simulator-interface.html#f3-19773>
-



HL-20 Example,
version 2.0.1-Autolink:435-
Aerodynamic model from
Jackson E. B., Cruz C. L.,
"Preliminary Subsonic Aerodynamic
Model for Simulation Studies of the
HL-20 Lifting Body",
NASA TM4302, August 1992.

How to run the HL20 model:

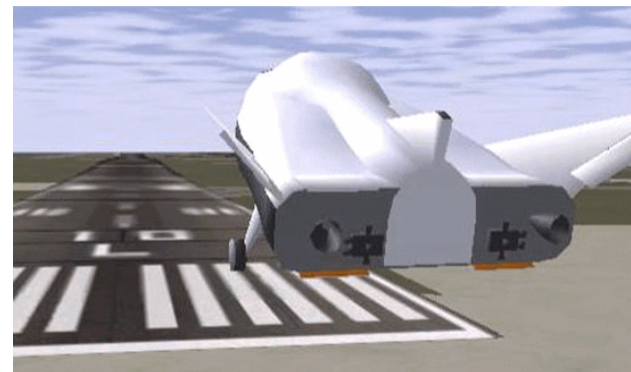
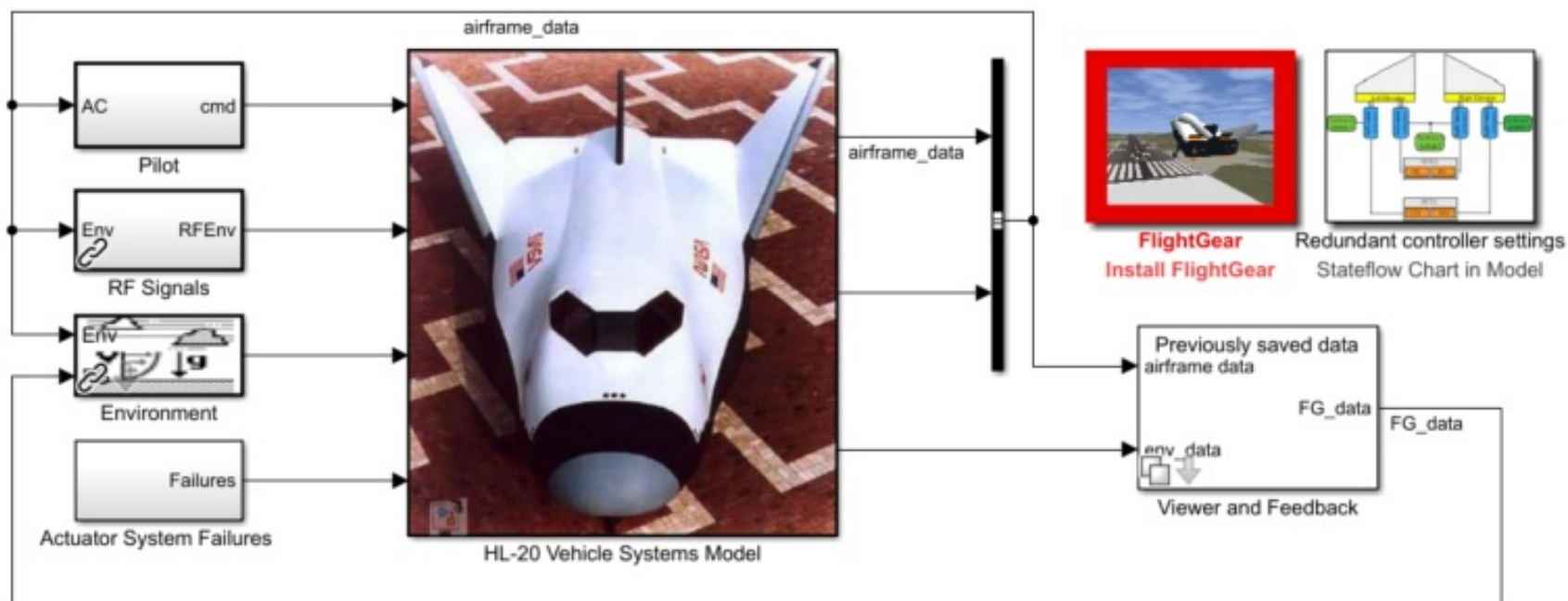
See the Aerospace Blockset User's Guide for instructions to set up FlightGear or click on the "FlightGear" block and follow the instructions.

Note: If FlightGear is not installed, double-click the "Viewer and Feedback" block and select an option:
"Previously Saved Data" (for saved data from a previous simulation with FlightGear in the loop); "Signal Editor" (for an existing and editable signal); "Constants" (for a set of constant values); or "Spreadsheet Data" (for data saved in a spreadsheet from a previous simulation with FlightGear in the loop).

Copyright 1990-2019 The MathWorks, Inc.



关于Simulink + FlightGear



HL-20 Example,
version 2.0.%<AutoIncrement:435>
Aerodynamic model from
Jackson E. B., Cruz C. L.,
"Preliminary Subsonic Aerodynamic
Model for Simulation Studies of the
HL-20 Lifting Body",
NASA TM4302, August 1992.

How to run the HL20 model:

See the Aerospace Blockset User's Guide for instructions to set up FlightGear or click on the "FlightGear" block and follow the instructions.

Note: If FlightGear is not installed, double-click the "Viewer and Feedback" block and select an option: "Previously Saved Data" (for saved data from a previous simulation with FlightGear in the loop), "Signal Editor" (for an existing and editable signal), "Constants" (for a set of constant values), or "Spreadsheet Data" (for data saved in a spreadsheet from a previous simulation with FlightGear in the loop).

Copyright 1990-2019 The MathWorks, Inc.

■ <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/working-with-the-flight-simulator-interface.html#f3-19773>

课程主要内容

- (1) 认识飞行
 - ▣ 牛顿力学（作用力与反作用力）
 - ▣ 刚体转动（转矩、陀螺、进动） / 大学物理基础
- (2) 认识多种多样的无人飞行系统
 - ▣ 飞行原理
 - ▣ 动力技术（螺旋桨、喷气式）
- (3) 控制技术
 - ▣ 飞行操纵原理（机翼、襟翼、旋翼、尾桨、自动倾斜器）
 - ▣ 作动器（电动机、舵机（PWM调制））
 - ▣ 传感器（电子指南针、加速度计、陀螺仪、GPS、高度计、高速相机、全景相机、……）
 - ▣ 电子控制器（PID算法、飞行控制原理与算法）
- (4) 飞行性能（飞行性能指标体系、稳定性、可靠性、易操作性）

课程主要内容

- (5) 基于4旋翼、固定翼模型机的认知验证实验
(含早期自由组合发现学习过程)
- (6) 仿真技术
 - ▣ 飞行器建模 (动力学、运动学) / 大学物理基础、高等数学
 - ▣ 软件技术 (Unity3D、MATLAB/Simulink)
- (7) 仿真技术实践 (半实物)
 - ▣ 无人AI战机模拟格斗对抗系统
 - ▣ 软件技术 (Unity3D、MATLAB/Simulink、图像处理技术、人工智能AI技术、计算加速技术
- (8) 发挥想象力和所学的自由拓展设计 (理论设计/尽量据情实验验证)
- (9) 课程综合设计与答辩

Question & Answer

任何疑问和建议，请不要犹豫！

王 赓: wgeng@sjtu.edu.cn