

# 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, 2<sup>nd</sup>》

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

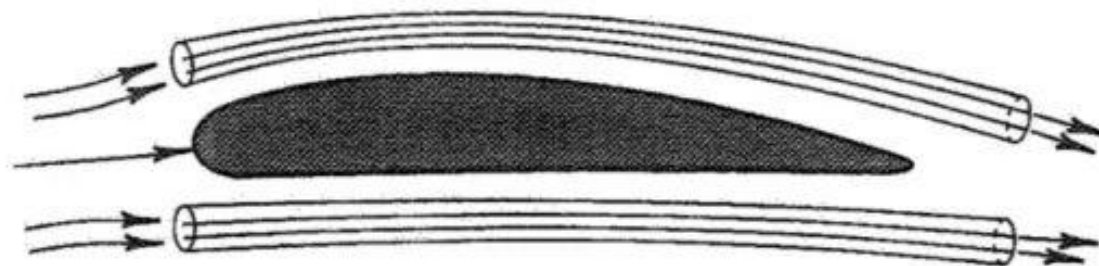
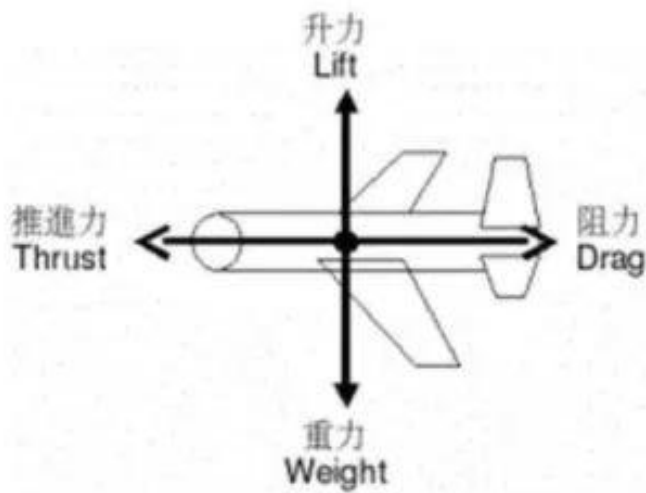
## 飞行器建模（动力学（dynamics）、运动学（kinematics））

- 认识计算机中的飞行对象，是为了控制飞行对象、AI对抗飞行对象...
- 建模的目的是为了仿真，仿真的目的是为了设计验证...
- 飞行器仿真和其它系统仿真一样，按照仿真试验系统的组成，划分为数学仿真、半实物仿真和物理仿真三种类型



## 关于动力学（ dynamics ）

- 动力学是理论力学的一个分支学科，它主要研究**作用于物体的力与物体运动的关系**。
- 动力学的研究对象是运动速度远小于光速的宏观物体。
- 动力学是物理学和天文学的基础，也是许多工程学科的基础。
- 许多数学上的进展也常与解决动力学问题有关，所以数学家对动力学有着浓厚的兴趣。





## 关于动力学

- 动力学的研究以牛顿运动定律为基础。
- 牛顿运动定律的建立则以实验为依据。
- 动力学是牛顿力学或经典力学的一部分。
- 但自20世纪以来，动力学又常被人们理解为侧重于工程技术应用方面的一个力学分支。
- 动力学的基本内容包括**质点动力学**、质点系动力学、**刚体动力学**，达朗贝尔（D'Alembert's principle）原理（非惯性系，所谓惯性力）等
- 参考阅读索引：<https://baike.baidu.com/item/动力学>  
<https://baike.baidu.com/item/艾萨克·牛顿>



### 牛 顿

(1642-1727)

英国物理学家、数学家和天文学家。他在自然科学领域最杰出的贡献是：创立了经典力学体系，发现了牛顿运动定律和万有引力定律。他用三棱镜分析日光，奠定了光谱分析的基础。在数学领域中，他建立了二项式定理，并创立了微积分的理论。在天文学方面，他创制了反射望远镜，并考察了行星运动规律，解释了潮汐现象。他的《自然哲学的数学原理》是科学史上的巨著，提出了作为经典力学基础的三个运动定律，实现了人类对自然认识的巨大飞跃，为世界科学作出了卓越贡献。

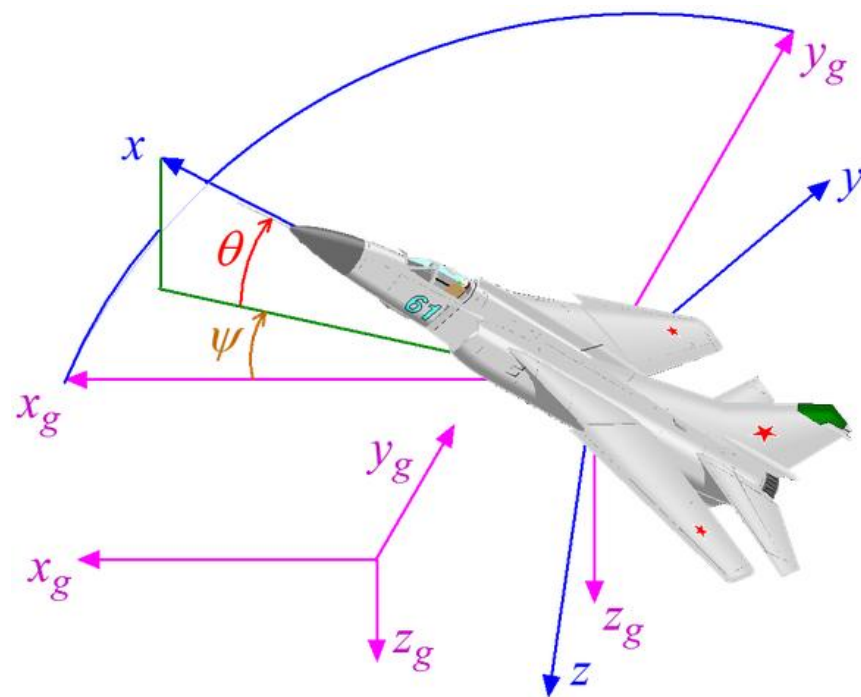
Baidu 百科

昵图网 www.nipic.com BY: liuhaocomkm

ID: 2010030009530081727

## 关于动力学

### ■ 动力学中的质点动力学、刚体动力学



$$a = F/M$$

$$F = M \times a$$

$$w' = \frac{T}{I}$$

## 关于动力学

- 牛顿质点动力学有两类基本问题：一是已知质点的运动，求作用于质点上的力，二是**已知作用于质点上的力，求质点的运动**。
- 求解第一类问题时只要对质点的运动方程取二阶导数，得到质点的加速度，代入牛顿第二定律，即可求得力；
- 求解第二类问题时需要求解质点运动微分方程或求积分。
- 所谓质点运动微分方程就是把运动第二定律写为包含质点的坐标对时间的导数的方程。

■ 参考阅读索引：<https://baike.baidu.com/item/动力学>



## 关于动力学

- 动力学普遍定理是质点系动力学的基本定理，它包括动量定理、动量矩定理、动能定理以及由这三个基本定理推导出来的其他一些定理。
- 动量、动量矩和动能是描述质点、质点系和刚体运动的基本物理量。
- 作用于力学模型上的力或力矩与这些物理量之间的关系构成了动力学普遍定理。

■ 参考阅读索引：<https://baike.baidu.com/item/动力学>

## 关于动力学

- 刚体区别于其他质点系的特点是其质点之间距离的不变性。
- 推述刚体姿态的经典方法是用三个独立的欧拉角。
- 欧拉动力学方程是刚体动力学的基本方程，刚体定点转动动力学则是动力学中的经典理论。
- 在目前所研究的力学系统中，需要考虑的因素逐渐增多，例如，变质量、非整、非线性、非保守还加上反馈控制、随机因素等，使运动微分方程越来越复杂，可正确求解的问题越来越少。
- 许多动力学问题都需要用数值算法近似地求解，微型、高速、大容量的电子计算机技术的应用，逐步解决了计算复杂的困难。
- 参考阅读索引：<https://baike.baidu.com/item/动力学>

## 关于运动学 (kinematics)

- 理论力学通常分为三个部分：静力学、运动学与动力学。
- 理论力学是研究物体机械运动的基本规律的学科，是力学的一个分支，它是一般力学各分支学科的基础。
- 静力学 (statics) 研究作用于物体上的力系的简化理论及力系平衡条件。静力学在工程技术中有着广泛的应用，例如对房屋、桥梁的受力分析，有效载荷的分析计算等。
- 运动学只从几何角度研究物体机械运动特性而不涉及物体的受力。
- 动力学则研究物体机械运动与受力的关系。

■ 参考阅读索引：<https://baike.baidu.com/item/理论力学>

## 关于运动学 (kinematics)

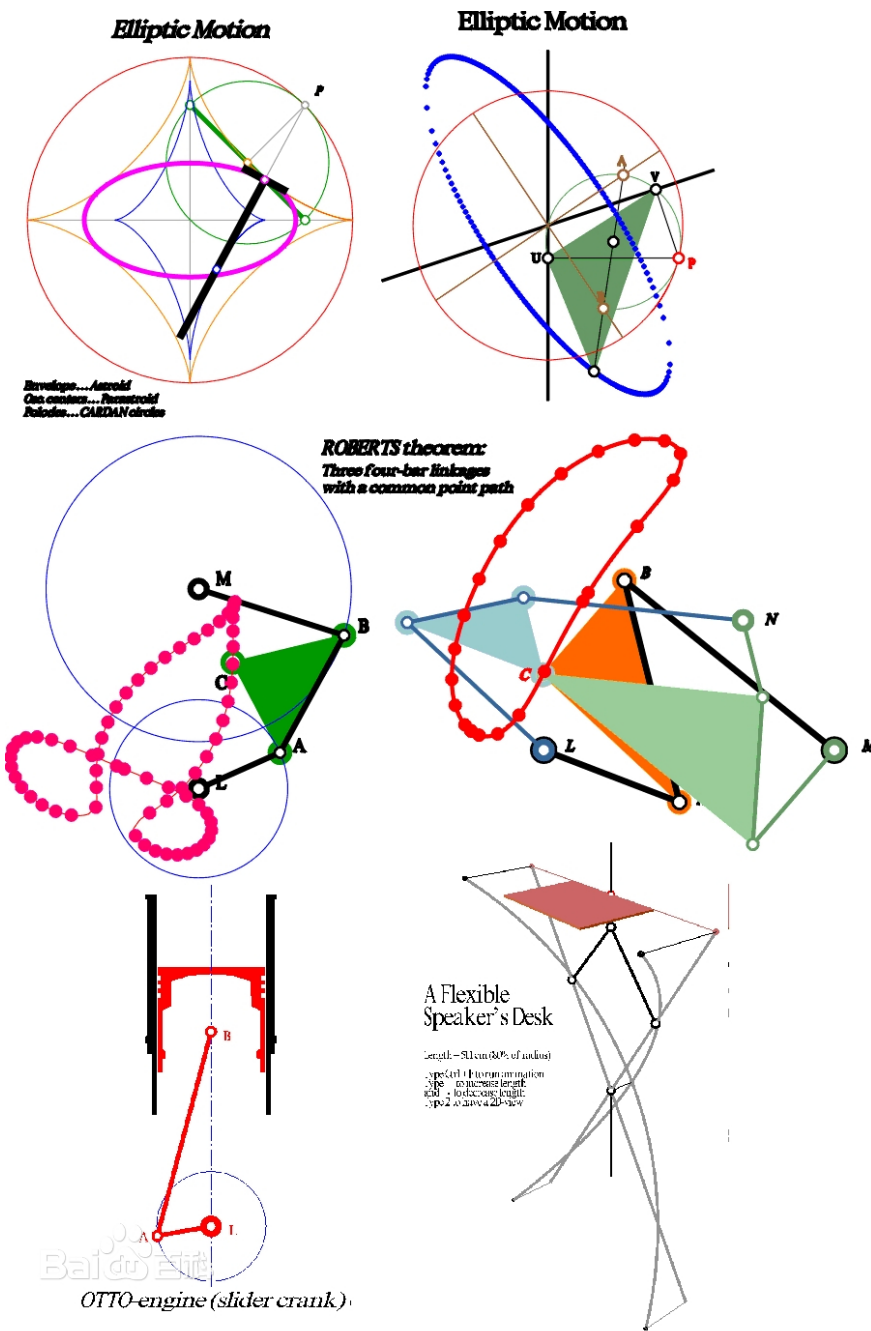
- 运动学是研究物体机械运动的几何性质而不涉及运动的原因（物体的受力）的力学分支。
- 运动学的首要任务是描述物体相对所选参考系的运动，重点研究物体的**轨迹**、**位移**、**速度**、**加速度**等运动特性。（**你的AI观测到或计算得到的...**）
- 运动学中只研究位置变化，不需要考虑质量。
- 描述物体运动的一般方法是首先建立描述运动的运动方程，然后通过数学上对时间求导数获得速度、加速度与运动特性。

■ 参考阅读索引：<https://baike.baidu.com/item/运动学>

## 关于运动学 (kinematics)

- 质点的运动学研究点的运动方程、轨迹、位移、速度、加速度等运动特征，都会随所选参考系的不同而不同。
- 刚体运动学研究刚体本身的转动过程、角速度、角加速度等更复杂的运动特征。

■ 参考阅读索引: <https://baike.baidu.com/item/运动学>



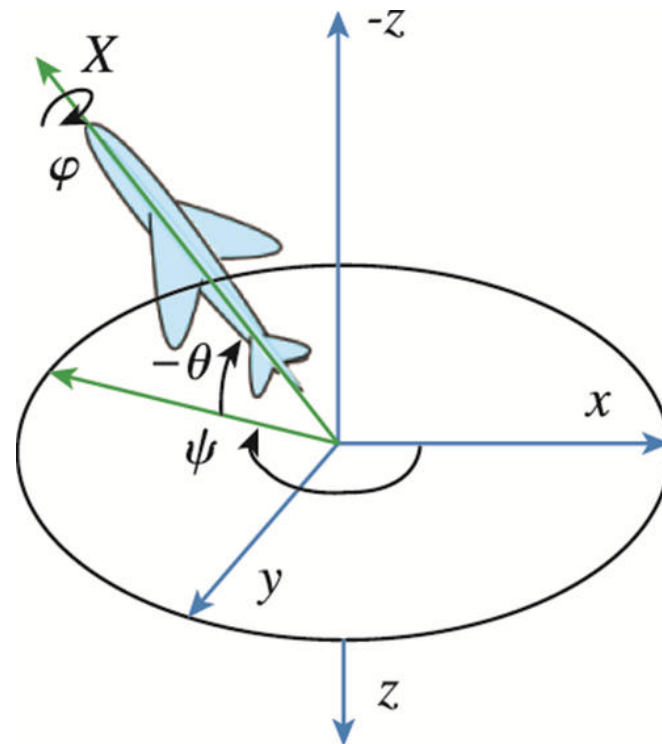


## 问题：关于飞行器位姿（位置和姿态）的表示方法

- 飞行器在空中有6个自由度（6DOF, Degree of Freedom）
- 分别为：

表示刚体质点位置的3个位置坐标  
+ 表示刚体空间姿态的3个朝向角度

该如何有效表示？



## 问题：关于飞行器位姿（位置和姿态）的表示方法

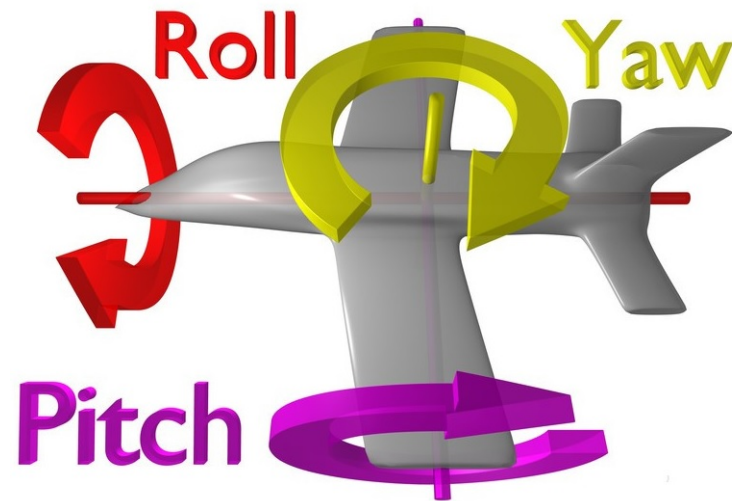
- 飞行器在空中有6个自由度（6DOF, Degree of Freedom）
- 分别为：

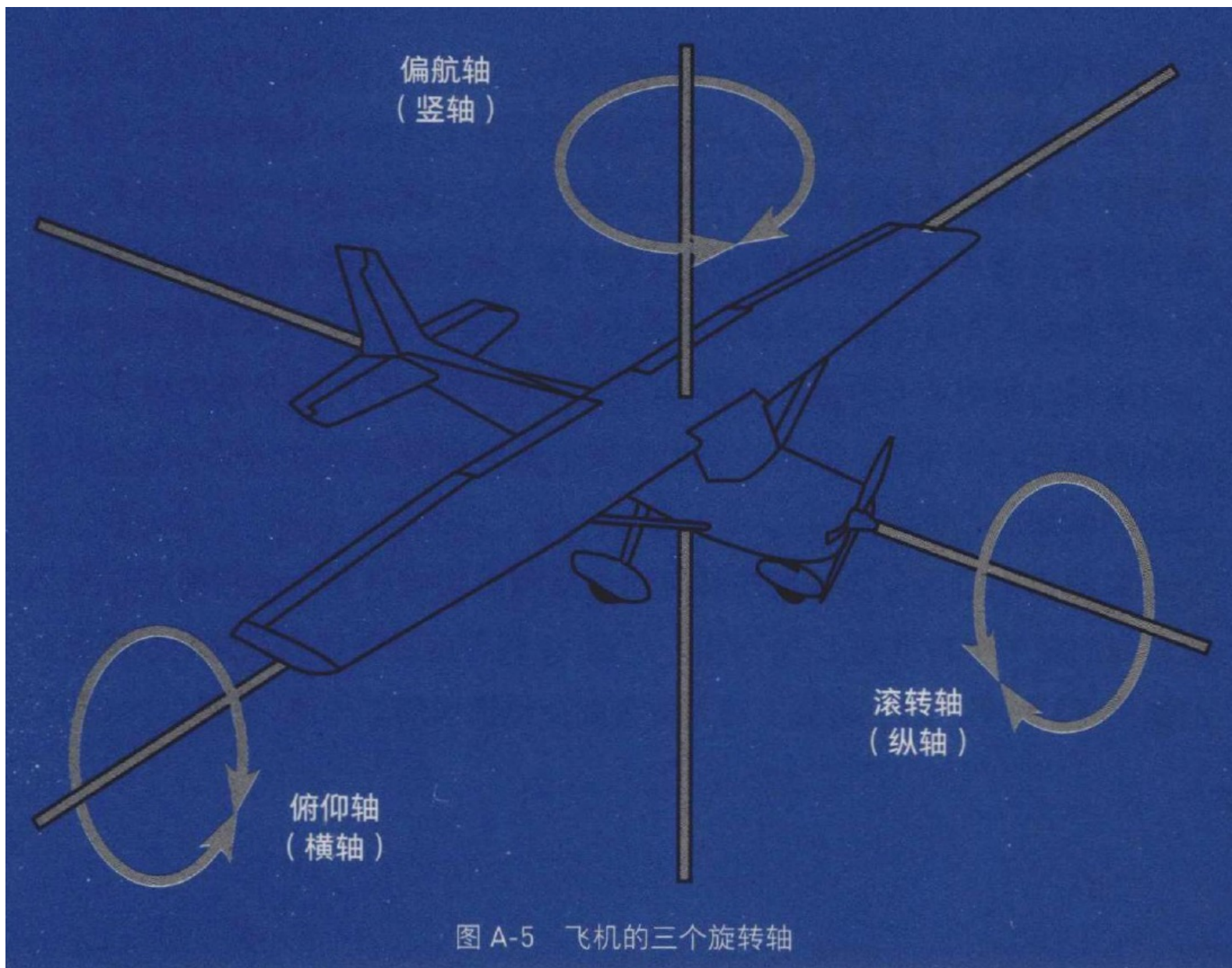
表示刚体质点位置的3个位置坐标

+ 表示刚体空间姿态的3个朝向角度

该如何有效表示？

Unity3D中是如何表示的？





## 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

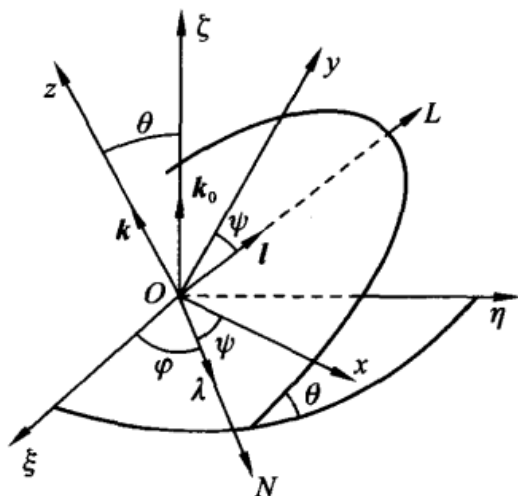
航向 / course  
/ heading

## 关于欧拉运动学方程 (Euler kinematical equations)

- 欧拉运动学方程是描述刚体运动的微分方程，在刚体绕定点运动中，反映角速度和欧拉角关系的方程。
- 该方程在刚体绕定点运动的研究中具有重要地位。
- 刚体定点运动的自由度为3，如何选择3个变量，使它们**既能简单、明确、单值地确定刚体位置，又能独立变化**，这对简化定点运动的描述是非常重要的。
- 刚体力学的奠基者欧拉 (Leonhard Euler, 1707—1783) 成功地、巧妙地解决了这个问题，他选择3个角度，即著名的欧拉角(Euler angles)作为描述刚体定点运动的变量。
- 参考阅读索引：<https://baike.baidu.com/item/欧拉运动学方程>

## 关于欧拉运动学方程 (Euler kinematical equations)

- 下式即为著名的欧拉运动学方程：
- 其中  $w^i$  表示绕地面惯性质心坐标系  $ox^i$  轴的旋转角速度
- $\phi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$  即为欧拉角



Baidu 百科

欧拉角

Baidu 百科

$$\begin{cases} w^1 = \dot{\phi} \sin \theta \sin \psi + \dot{\theta} \cos \psi; \\ w^2 = \dot{\phi} \sin \theta \cos \psi - \dot{\theta} \sin \psi; \\ w^3 = \dot{\phi} \cos \theta + \dot{\psi}. \end{cases}$$

- 参考阅读索引：<https://baike.baidu.com/item/欧拉运动学方程>



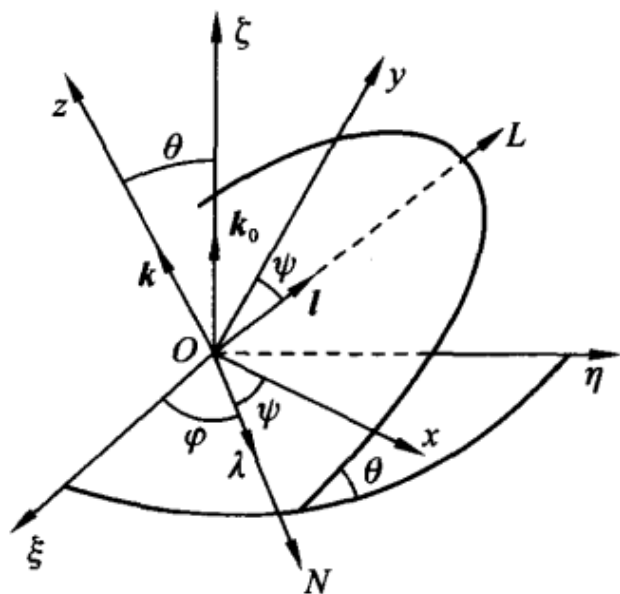
## 题外补充：关于希腊字母 $\Phi$ $\Theta$ $\Psi$ 的读音

字母名称	国际音标	大写字母	小写字母	字母名称	国际音标	大写字母	小写字母
alpha	/ˈælfə/	A	α	nu	/nju:/	N	ν
beta	/ˈbi:tə/ 或 /ˈbeɪtə/	B	β	xi	希腊 /ksi/; 英美 /ˈzaɪ/ 或 /ˈk saɪ/	Ξ	ξ
gamma	/ˈgæmə/	Γ	γ	omicron	/əuˈmaɪkrən/ 或 /ˈamɪˌkrən/	Ο	ο
delta	/ˈdeltə/	Δ	δ	pi	/paɪ/	Π	π
epsilon	/ˈepsɪlən/	E	ε	rho	/rəʊ/	Ρ	ρ
zeta	/ˈzi:tə/	Z	ζ	sigma	/ˈsɪgmə/	Σ	σ, ς
eta	/ˈi:tə/	H	η	tau	/tɔ:/ 或 /taʊ/	Τ	τ
theta	/ˈθi:tə/	Θ	θ	upsilon	/ˈɪpsɪlən/ 或 /ˈʌpsɪlən/	Υ	υ
iota	/aɪˈəʊtə/	I	ι	phi	/faɪ/	Φ	φ
kappa	/ˈkæpə/	K	κ	chi	/kaɪ/	Χ	χ
lambda	/ˈlæmdə/	Λ	λ	psi	/psaɪ/	Ψ	ψ
mu	/mju:/	M	μ	omega	/ˈəʊmɪgə/ 或 /oʊˈmegə/	Ω	ω

■ 参考阅读索引: <https://baike.baidu.com/item/希腊字母>

## 关于欧拉运动学方程 (Euler kinematical equations)

- 欧拉运动学方程： (其存在的问题，也呼唤了后续汉密尔顿的四元数方法)
- 其中  $\Phi$ 、 $\Theta$ 、 $\Psi$  为欧拉角



Baidu

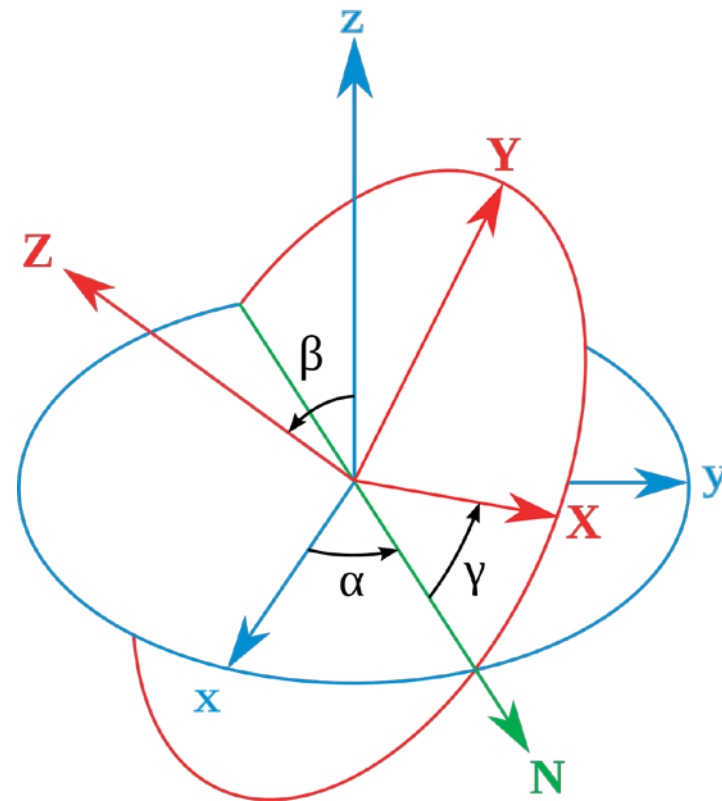
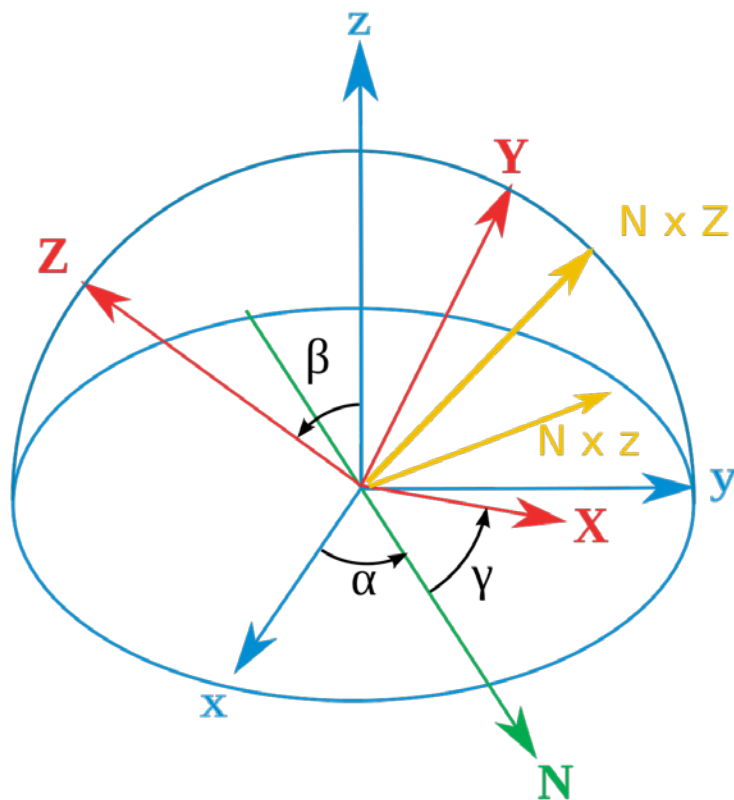
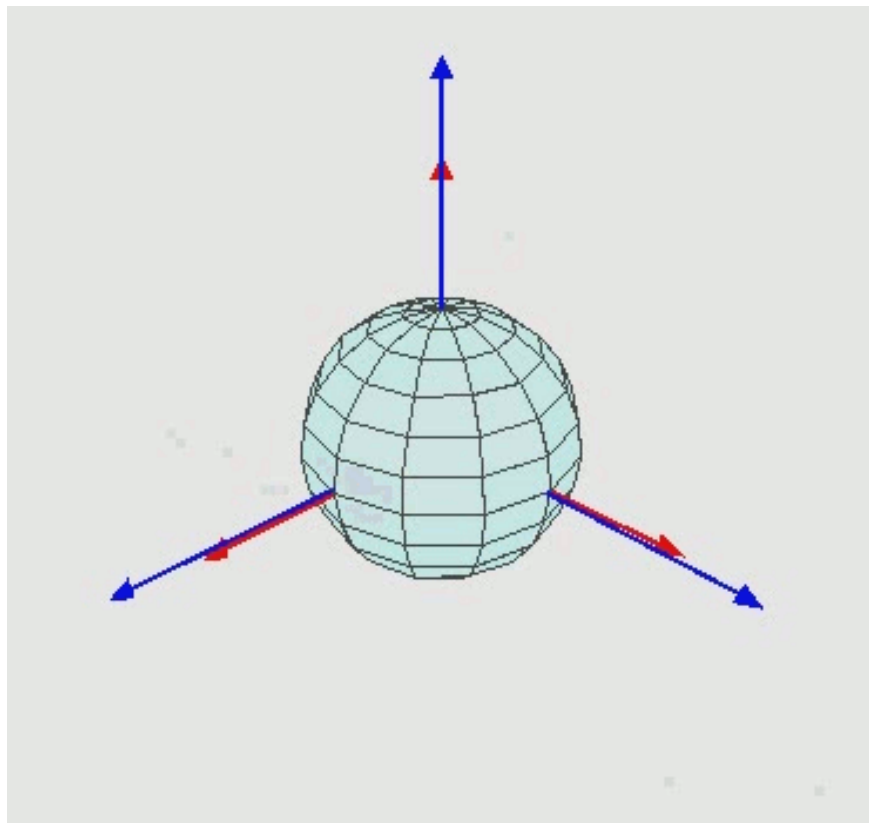
欧拉角

$$\dot{\phi} = (\omega_x \cos(\psi) - \omega_y \sin(\psi)) / \cos(\theta)$$

$$\dot{\theta} = \omega_x \sin(\psi) + \omega_y \cos(\psi)$$

$$\dot{\psi} = \omega_z + \tan(\theta)(\omega_x \cos(\psi) - \omega_y \sin(\psi))$$

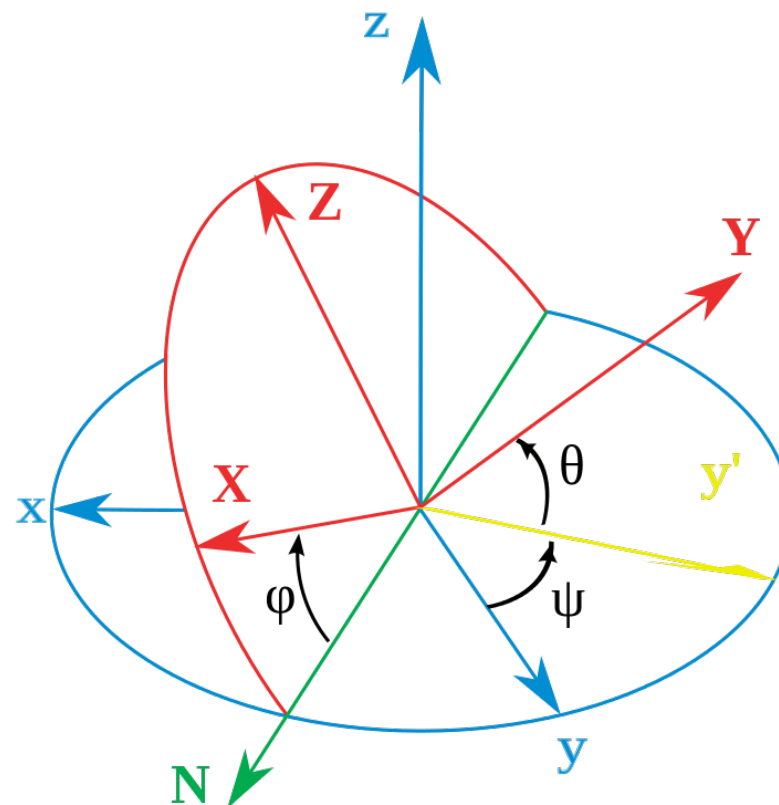
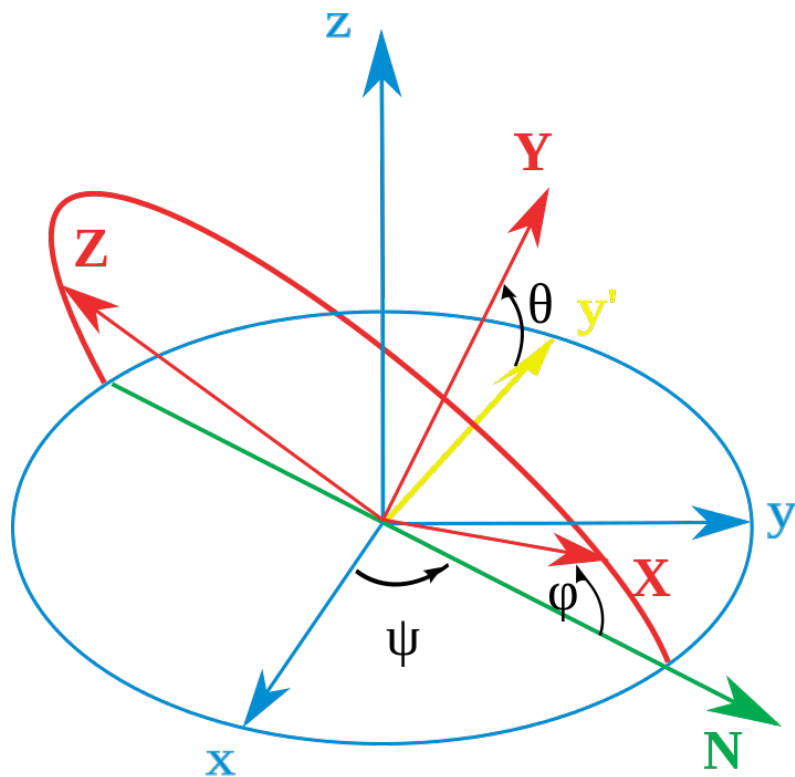
## 关于理解欧拉角



■ 左侧为动图，和右侧2图均来自参考链接

■ 参考阅读索引: [https://en.wikipedia.org/wiki/Euler\\_angles](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_angles)

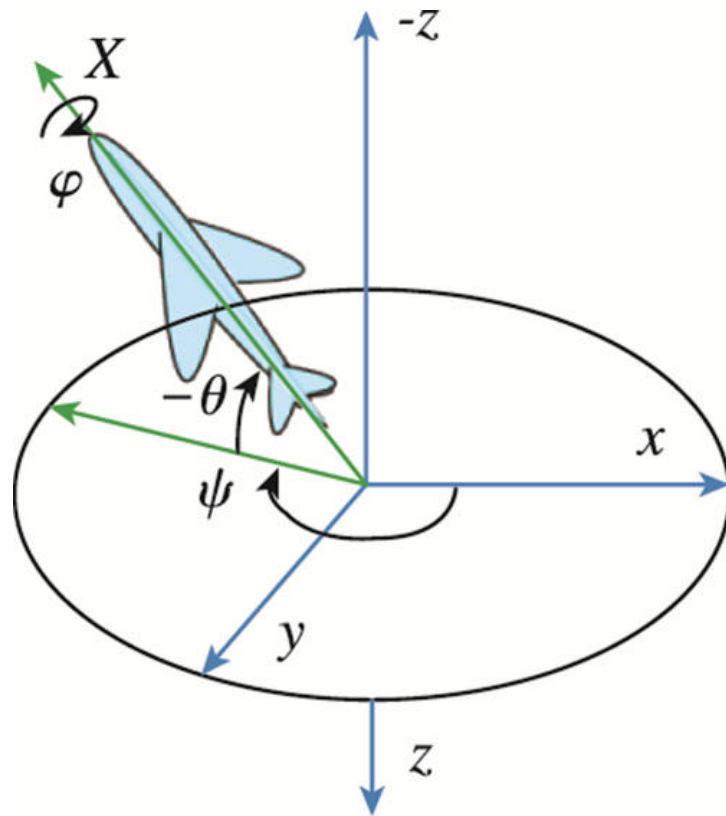
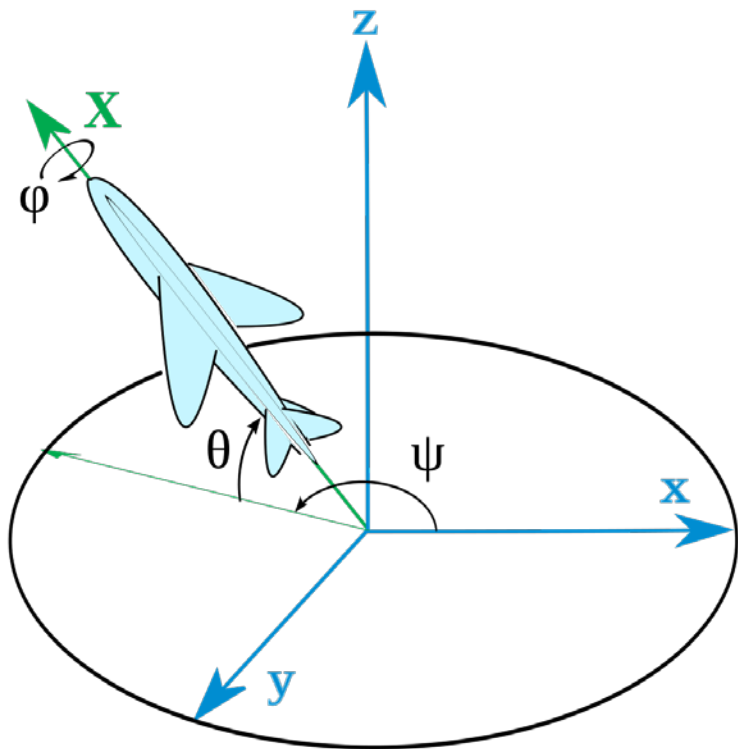
## 关于理解欧拉角 $\Phi$ 、 $\Theta$ 、 $\Psi$



■ Tait-Bryan angles. z-x'-y'' sequence (intrinsic rotations; N coincides with x')

■ 参考阅读索引: [https://en.wikipedia.org/wiki/Euler\\_angles](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_angles)

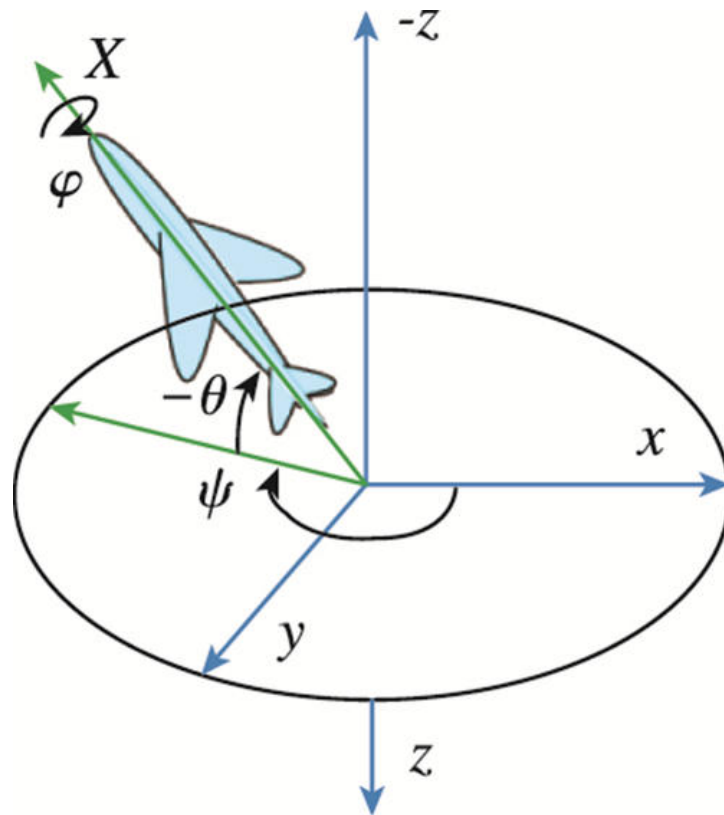
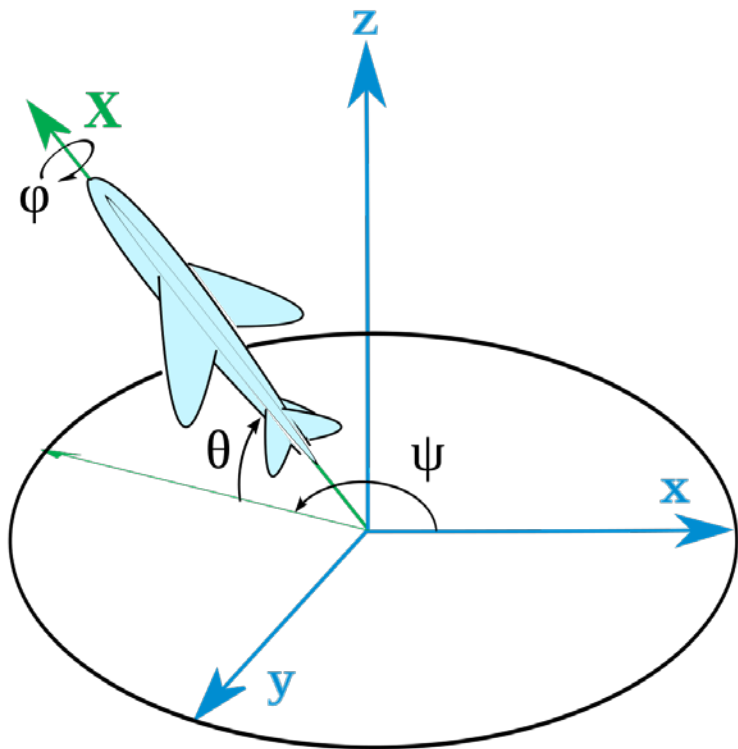
## 关于飞行器欧拉角 $\Phi$ 、 $\Theta$ 、 $\Psi$



■ 参考阅读索引: [https://en.wikipedia.org/wiki/Euler\\_angles](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_angles)



## 关于坐标系定义



- 根据需要确定后，各方含义和符号保持一致即可

## 后续：关于飞机动力学作用力分析



- 请同学们思考：飞机上有哪些导致飞机位姿发生变化的作用力，他们是怎么产生的？

## 飞机上的力



## 飞机上的力



水平直线飞行

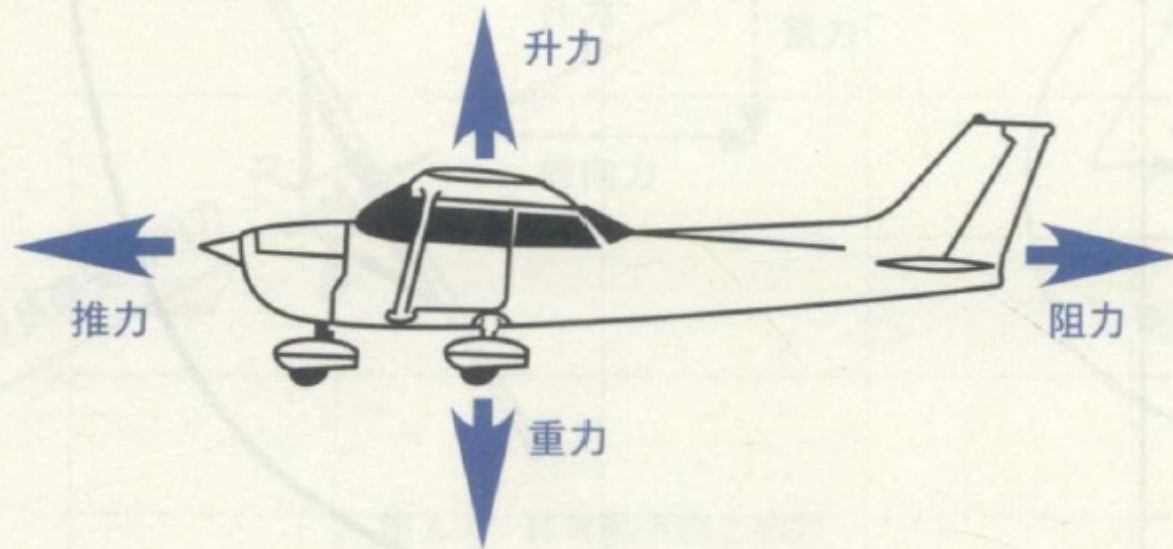
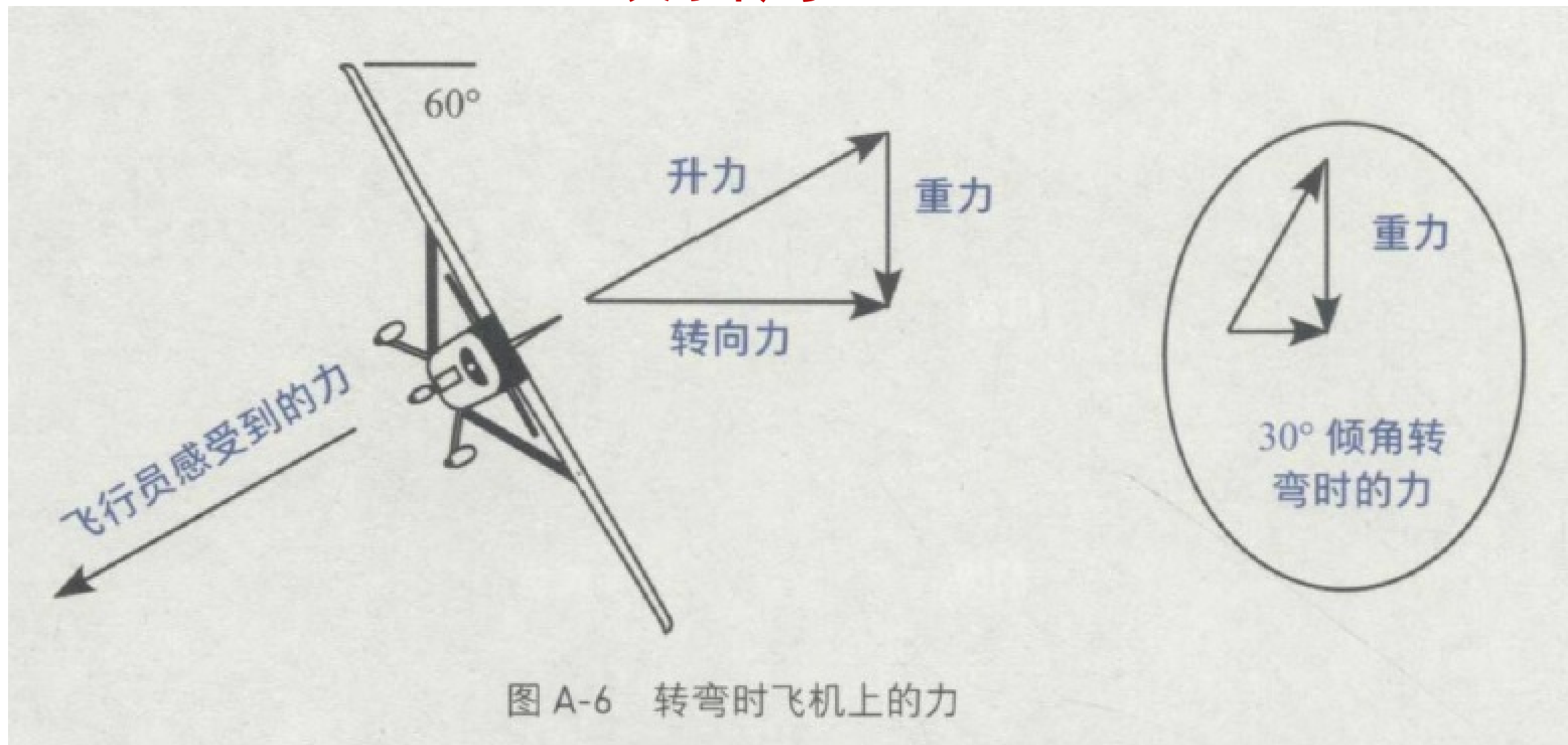


图 A-8 水平直线飞行状态下飞机上的四种力

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<sup>①</sup>）。

## 关于转弯





## 转弯 — 需要向心力



■ 回顾之前的操纵原理视频片段

## 后续：关于飞机动力学作用力分析



- 请同学们思考：飞机上有哪些导致飞机位姿发生变化的作用力，他们是怎么产生的？
  - **升力**是怎么产生的？与哪些因素有关系？数学模型公式会怎样表达？
  - **阻力**是怎么产生的？与哪些因素有关系？数学模型公式会怎样表达？
  - **推力**是怎么产生的？与哪些因素有关系？数学模型公式会怎样表达？

## 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](mailto:wgeng@sjtu.edu.cn)