本章目录

第一章复盘与练习

第一章　绪论

1.1　概念分类与应用

1.2　发展历程与趋势

1.3　组成与架构

1.4　坐标系与控制原理

1.5　装配与调试

1.6　RflySim工具链

1.7　学习路线与实验案例

1.8　习题与课堂讨论

本节 3 个教学单元

1.8.1 全章复盘

概念、原理、装调与平台复盘

1.8.2 习题要点

教材对应：第 1.7 节

1.8.3 课堂讨论

自主避障的跨载具迁移与验证

1.8 习题与课堂讨论

1.8.1 全章复盘：共同主线

从任务理解到开发验证

- **概念与发展：**按身体交互、自主程度和载具类型辨析系统，再结合机器人、无人机与集群的发展理解能力演进。（课件1.1–1.2；教材第1.1节）
- **架构与原理：**六层架构把感知、决策与执行组织成闭环；统一坐标与姿态表示后，才能分析合力与力矩。（课件1.3–1.4；教材第1.2节）
- **装配与调试：**接对三类线路，自驾仪朝向、电机编号与旋向和配置一致；无桨验证通过，再装桨试飞。（课件1.5；教材第1.3节）
- **平台与学习：**RflySim贯通装配测试、算法开发、半实物仿真和真机部署；学习时借统一入口复现并改动例程。（课件1.6–1.7；教材第1.4–1.6节）

先明确任务与系统关系，再用模型、实验和实机结果检验方案。

本章目录

第一章复盘与练习

第一章　绪论

1.1　概念分类与应用

1.2　发展历程与趋势

1.3　组成与架构

1.4　坐标系与控制原理

1.5　装配与调试

1.6　RflySim工具链

1.7　学习路线与实验案例

1.8　习题与课堂讨论

本节 3 个教学单元

1.8.1 全章复盘

概念、原理、装调与平台复盘

1.8.2 习题要点

教材对应：第 1.7 节

1.8.3 课堂讨论

自主避障的跨载具迁移与验证

1.8.2 习题要点：概念与架构

第1–2题：概念关系与系统分工

题1：四类概念的关系与差异（课件1.1；教材第1.1.1节）

具身智能经身体参与环境闭环；离身智能只处理信息，不直接形成物理交互闭环。

智能无人系统自主感知、决策并执行；其中以载具为核心的是智能无人载具系统。

交互方式、自主程度与载具类型是不同维度，可以交叉，不能排成单一等级。

题2：统一架构的六层职责与数据、控制流向（课件1.3；教材第1.2.1节）

机体结构层承载，感知定位层估计状态，控制决策层生成指令，驱动执行层产生力。

环境交互层：风、光照和地形等影响观测与受力；集群协作层：多机通信与配合。

闭环：测量→估计→决策是数据流，指令→执行→运动是控制流，运动再被测量。

1.8.2 习题要点：坐标系

第3题：两套坐标系怎样对应

比较轴向、场景和右手定则，说明跨接口要转换什么。（课件1.4.2；教材第1.2.3.2节）

对照项	NED / FRD	ENU / FLU
地面系轴向	北、东、下	东、北、上
机体系轴向	前、右、下	前、左、上
常见场景	航空自驾仪	机器人与ROS接口

换算：地面系NED(x, y, z)→ENU$(y, x, -z)$；机体系FRD(x, y, z)→FLU$(x, -y, -z)$。

右手定则：拇指指向x，食指指向y，中指指向z；拇指沿正轴时，四指卷曲方向为正。

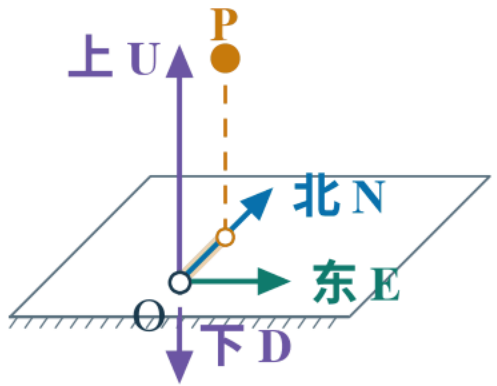
两套坐标系都遵循右手定则，接口转换必须同时对齐轴向与旋转符号。

1.8.2 习题要点：坐标系

第3题：同一位置，分量随坐标约定改变

NED→ENU：换北东，反竖直

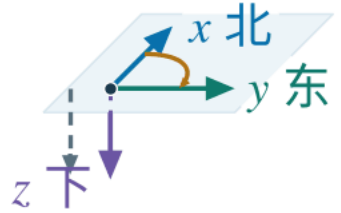
P：北 1 m，上 2 m



P (m)	x	y	z
NED	1.0	0.0	−2.0
ENU	0.0	1.0	2.0

拇指 x · 食指 y · 中指 $x \times y$ 对准 z

NED



✓ 右手系

俯视顺时针

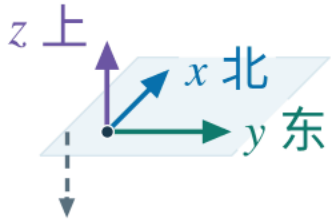
ENU



✓ 右手系

俯视逆时针

只反 z



✕ 左手系

中指↓，z↑

图：同一点的两套分量与右手性检查（示意）

交换北东分量并反转竖直分量，NED与ENU仍保持右手性。

1.8 习题与课堂讨论

1.8.2 习题要点：姿态与欠驱动

第4–5题：表示约束与控制约束

题4：万向节锁的实例与姿态表示取舍（课件1.4.3；教材第1.2.3.3–1.2.3.4节）

- **奇异实例：** $\theta = 90°$时，$[\phi\ \theta\ \psi] = [0°\ 90°\ 0°]$与$[90°\ 90°\ 90°]$表示同一姿态。
- **表示取舍：** 四元数无奇异、便于平滑插值，但需单位长度且q与$-q$表示同一姿态；旋转矩阵便于连乘和变换向量，但有9个元素并需保持正交。

题5：欠驱动的含义与外部指令组合（课件1.4.5；教材第1.2.3.6节）

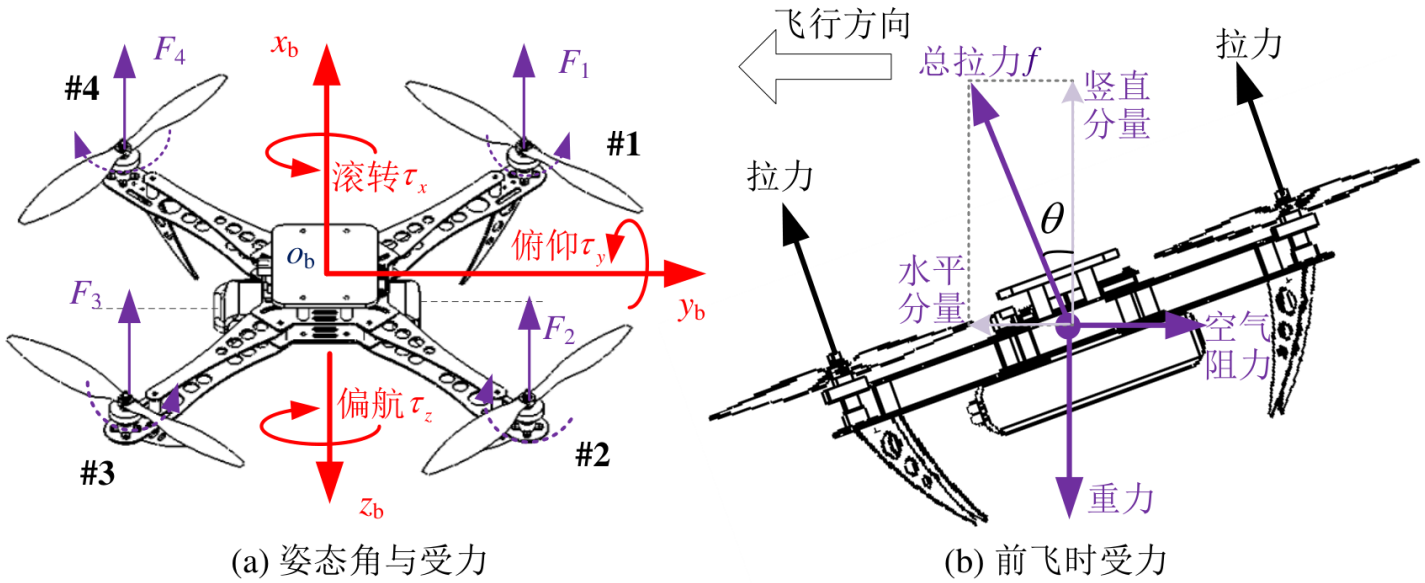
- **欠驱动：** 独立控制输入少于自由度。四旋翼有6个自由度，但只有总拉力和三轴力矩共4个独立输入，水平移动须先倾斜机体。
- **指令组合：** 凑足4个目标，如姿态＋油门、速度＋偏航角速度、位置＋偏航角。

姿态表示的奇异来自参数化，欠驱动的限制来自独立控制作用不足。

1.8.2 习题要点：前飞受力

第6题：定高匀速前飞的条件

质量m、总拉力f，俯仰θ前倾为负。求定高匀速条件、速度耦合及风险。



(a) 姿态角与受力　　(b) 前飞时受力

图1.12 多旋翼无人机受力模型

姿态稳定、无滚转，v为空速

$$G = mg, \qquad D(v) = kv^2$$

原图几何倾角记为α

$$\alpha = -\theta, \quad 0 \le \alpha < 90^\circ$$

$$f\cos\alpha = mg$$

$$f\sin\alpha = kv^2$$

$$v^2 = \frac{mg}{k}\tan\alpha$$

$$f = \frac{mg}{\cos\alpha}$$

前倾增大拉力需求，动力饱和可导致掉高并增加姿态失稳风险。

1.8.2 习题要点：前飞受力

第6题：倾角越大，速度与拉力怎样变化

代入第6题两式$v^2 = (mg/k)\tan\alpha$、$f = mg/\cos\alpha$：
拉力以重力mg为单位，速度以45°时的稳态速度为1。（课件1.4.4；教材第1.2.3.5节）

倾角α	总拉力（mg）	相对速度
15°	1.04	0.52
30°	1.15	0.76
45°	1.41	1.00
60°	2.00	1.32

- **速度耦合：**倾角越大速度越高；
45°→60°时速度增约32%，拉力却增约41%。
- **动力余量：**设拉力上限$2mg$，则α最大60°；
再前倾，竖直分量小于mg而掉高。
- **控制余量：**拉力接近上限时，
调节力矩的余地变小，难抗阵风等扰动。

倾角越大所需拉力越大；最大拉力的竖直分量小于重力时才会掉高。

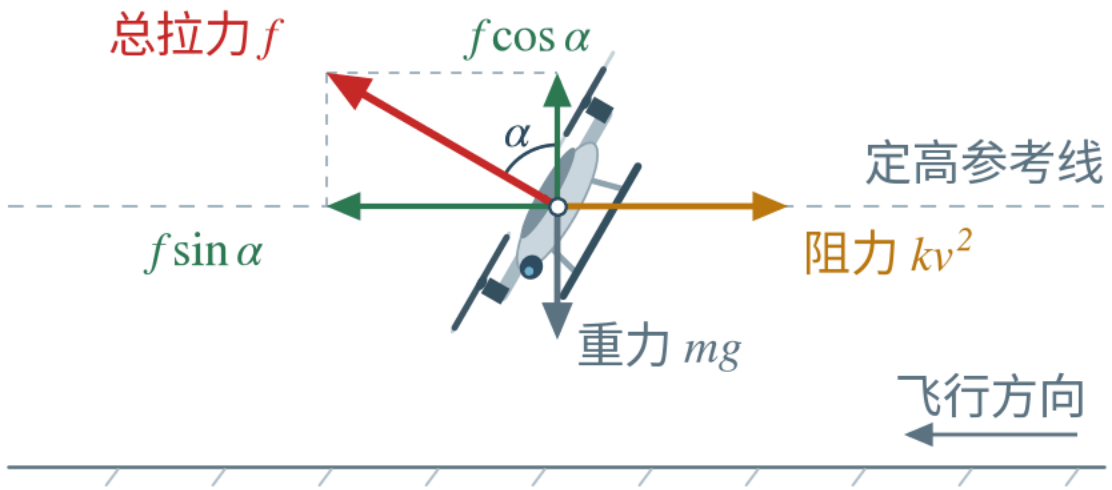
1.8 习题与课堂讨论

1.8.2 习题要点：前飞受力

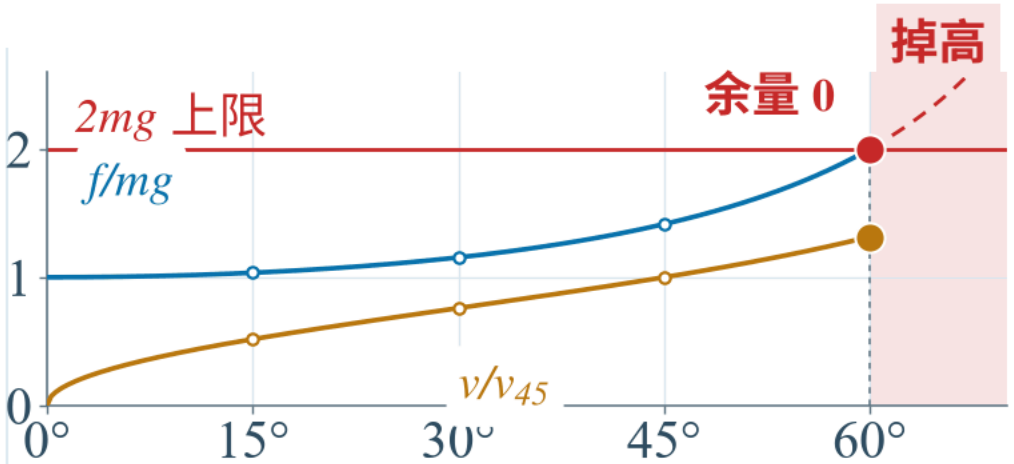
第6题：增大前倾角，何时开始掉高

α 60°　　v/v_{45} 1.32　　f/mg 2.00　　Δh 0.00 m

$f\cos\alpha = mg$：定高　　$f\sin\alpha = kv^2$：匀速



离线求解 · $v_{45} = 7$ m/s



45° → 60°　空速 +32%　　拉力 +41%

拉力增幅已超过空速增幅

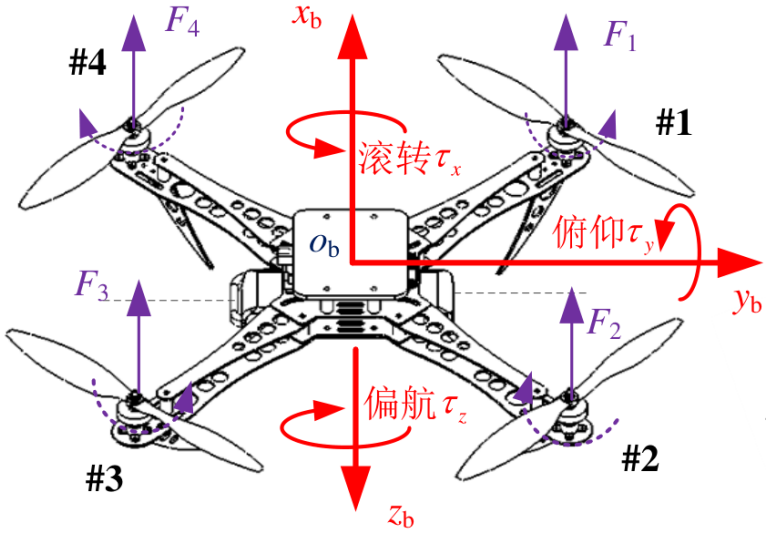
图：前倾角、稳态空速与拉力上限（简化模型离线仿真）

拉力达到上限后再前倾，竖直分量不足以平衡重力，载具开始掉高。

1.8.2 习题要点：偏航差动

第7题：机头右偏时怎样调转速

俯视：1、3号逆时针，2、4号顺时针。总拉力不变时，给出机头右偏的差动策略。



(a) 姿态角与受力

图1.12（a）姿态角与受力

1、3加速，2、4减速

逆时针桨对机身产生顺时针反扭$c_M\omega^2$。

$$f_i = c_T\omega_i^2, \quad f = \sum_{i=1}^{4} f_i$$

$$\omega_1^2 = \omega_3^2 = \omega_0^2 + \delta$$

$$\omega_2^2 = \omega_4^2 = \omega_0^2 - \delta$$

$$\Delta f = 0, \tau_z = c_M(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) = 4c_M\delta > 0$$

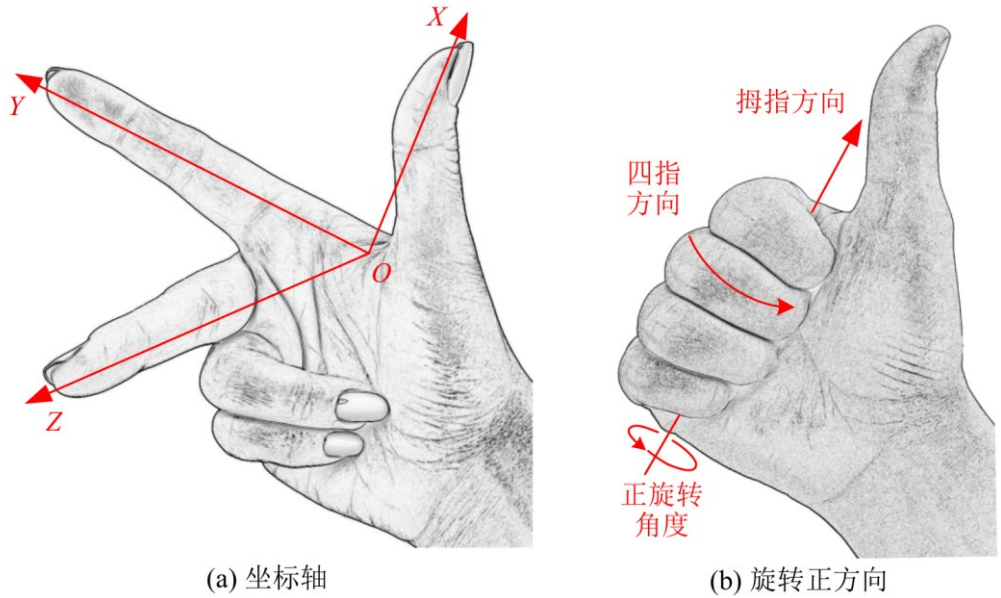
ω_0为等速基准，$\delta > 0$且不触及转速限幅。

增大1、3号桨的转速平方，等量减小2、4号，保持总拉力并产生右偏力矩。

1.8.2 习题要点：旋转约定

第8题：机体系到地面系的变换

给定Z-Y-X欧拉角，写出机体b到地面e的旋转矩阵，并用右手定则判断正方向。



(a) 坐标轴　　(b) 旋转正方向

图1.10 右手定则下的坐标轴与旋转正方向

- **向量约定：** $\mathbf{v}_e$、$\mathbf{v}_b$为同一向量的分量。
- **旋转顺序（内禀）：** 先绕z偏航ψ，再绕新y俯仰θ，最后绕新x滚转ϕ。
- **正方向：** 拇指沿正轴，四指卷曲为正向。

$$\mathbf{v}_e = R_b^e \mathbf{v}_b$$

$$R_b^e = R_z(\psi) R_y(\theta) R_x(\phi)$$

先约定向量方向、轴序和角度正方向，旋转矩阵才有明确含义。

1.8.2 习题要点：旋转矩阵

第8题：先写出三个基本旋转矩阵

$$R_z(\psi)=\begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\quad R_y(\theta)=\begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix},\quad R_x(\phi)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi & c_\phi \end{bmatrix}$$

$c_\beta=\cos\beta,\quad s_\beta=\sin\beta,\quad \beta\in\{\phi,\theta,\psi\}$　**组合：** $R_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}=R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi)$

读法：转轴所在的行和列只有对角元为1、其余为0；另两轴由cos、sin混合，
每一列是转动后的坐标轴在原坐标系中的方向；组合式从右向左作用于列向量。

单轴例子：只绕y轴抬头30°

$\theta=30°,\quad \psi=\phi=0°$

第1列即机头方向：仍朝北，z为负表示向上。

$$R_y(30°)\begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix}_{\mathrm{b}}=\begin{bmatrix}\sqrt{3}/2\\0\\-1/2\end{bmatrix}_{\mathrm{e}}$$

三个基本矩阵按Z-Y-X次序相乘，得到机体系到地面系的旋转矩阵。

1.8.2 习题要点：旋转矩阵

第8题：完整表达式与数值验算

$$R_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}=\begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\phi - s_\psi c_\phi & c_\psi s_\theta c_\phi + s_\psi s_\phi \\ s_\psi c_\theta & s_\psi s_\theta s_\phi + c_\psi c_\phi & s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix}$$

$$c_\beta=\cos\beta,\quad s_\beta=\sin\beta,\quad \beta\in\{\phi,\theta,\psi\} \qquad R_{\mathrm{e}}^{\mathrm{b}}=(R_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}})^{\mathsf{T}}$$

双角度验算：机头朝东并抬头30°（NED）

$$\psi=90^\circ,\quad \theta=30^\circ,\quad \phi=0^\circ$$

$$\begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix}_{\mathrm{b}} \longmapsto \begin{bmatrix}0\\\sqrt{3}/2\\-1/2\end{bmatrix}_{\mathrm{e}}$$

第1列即机头方向：朝东，z为负表示向上。

双角度验算能检查旋转次序，反向变换使用原矩阵的转置。

1.8.2 习题要点：旋转次序

第8题：交换旋转次序会得到另一姿态

Z-Y-X：先偏航90°，再绕新y轴抬头30°

$$R_z(90°)R_y(30°)\begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix}_{\mathrm{b}}=\begin{bmatrix}0\\\sqrt{3}/2\\-1/2\end{bmatrix}_{\mathrm{e}}$$

机头朝东并上仰30°。

颠倒次序：先抬头30°，再绕新z轴转90°

$$R_y(30°)R_z(90°)\begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix}_{\mathrm{b}}=\begin{bmatrix}0\\1\\0\end{bmatrix}_{\mathrm{e}}$$

机头水平朝东，机身右倾30°。

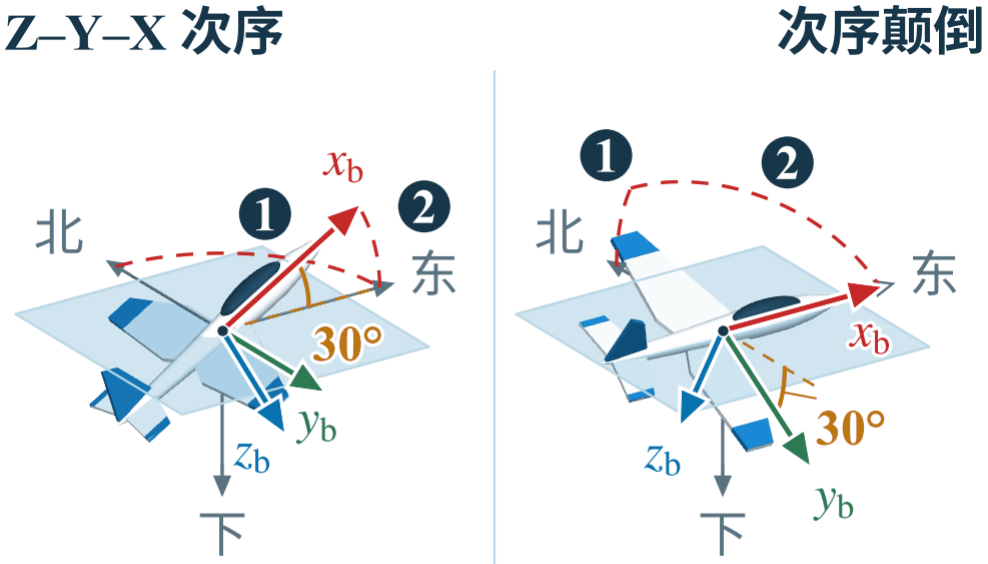
- **分量顺序：**列向量按北、东、下排列，z为负表示向上。
- **验算方法：**选两个非零角，看第1列能否同时体现朝向与抬头；
  只用一个角时，两种次序结果相同。

同样的角度按不同次序旋转会得到不同姿态，验算要用两个非零角。

1.8.2 习题要点：旋转次序

第8题：用机头与机翼方向检查旋转次序

- **共同起点：**机头朝北、机翼水平；
  每一步都绕当时的机体轴旋转。
- **先偏航后抬头：**机头朝东后，
  绕新y轴抬头30°，机头具有向上分量。
- **先抬头后偏航：**绕倾斜的新z轴转动；
  末态机头水平朝东，机身右倾30°。
- **向量验算：**红色机头向量为矩阵第1列；
  分量按北、东、下排列。



$x_b = [0, \sqrt{3}/2, -1/2]^T$
朝东，抬头 30°

$x_b = [0, 1, 0]^T$
机头水平，右倾 30°

图：两种内禀旋转次序（示意）

内禀旋转使用随动作改变的机体轴，因此交换次序会改变最终姿态。

1.8.2 习题要点：任务选型

第9题：山谷测绘的机型取舍

在狭小山谷中垂直起降并完成长距离巡航测绘，比较三类机型，给出推荐与取舍。

机型	起降条件	巡航与测绘	主要代价
多旋翼	原地垂直起降	悬停测绘方便 旋翼承重，能耗高	续航一般几十分钟 长航程需核算电量
固定翼	常规需跑道 或弹射、伞降	机翼承担重力 续航可达数小时	起降场地条件 限制部署
复合翼	可垂直起降	巡航时机翼承重 能耗低、续航长	多一套旋翼动力 载荷降低、过渡复杂

任务倾向复合翼方案，最终选择还取决于航程、载荷和过渡飞行条件。

1.8.2 习题要点：线路装配

第10题：三类线路的要点与风险

以多旋翼为例，列出装配要点及常见风险。（课件1.5.1–1.5.2；教材第1.3.1节）

线路	装配要点	常见风险
动力供电	核对极性、线径与接头 焊点牢靠，固定并绝缘	反接或短路 虚接发热、压降过大
器件供电	核对额定电压与稳压能力 保证供电余量和地线连接	过压损坏、欠压重启 电源过载或共地不良
控制信号	匹配协议、端口与信号地 远离动力线，固定线束	接错端口、协议不符 干扰丢包或输出异常

按电压、电流和信号用途分别接线，防松、绝缘与共地保证连接可靠。

1.8.2 习题要点：首飞前检查

第10题：从无桨验证到首飞

给出首次实飞前的必备调试与安全检查清单。（课件1.5.3–1.5.4；教材第1.3.3节）

- **固件与机架：**烧录与硬件匹配的固件，选择与实物一致的机架预设和电机布局。
- **无桨上电前：**核对结构紧固、重心、接线极性和绝缘，清除松散物。
- **状态与输入：**核对朝向、姿态显示、遥控方向和模式，完成传感器与遥控器校准。
- **无桨输出验证：**逐路核对电机编号与旋向，检查解锁、失联和低电量保护动作。
- **断电后装桨：**确认检查通过，匹配桨型与旋向并紧固，清场后复核。
- **首次实飞：**设好地理围栏与返航条件，约定中止条件，核对电池、定位、场地空域和天气；先短时低空起降，落地后复查机体和日志。

无桨验证通过后再装桨，确认环境和退出条件后才进入首次实飞。

本章目录

第一章复盘与练习

第一章　绪论

1.1　概念分类与应用

1.2　发展历程与趋势

1.3　组成与架构

1.4　坐标系与控制原理

1.5　装配与调试

1.6　RflySim工具链

1.7　学习路线与实验案例

1.8　习题与课堂讨论

本节 3 个教学单元

1.8.1 全章复盘

概念、原理、装调与平台复盘

1.8.2 习题要点

教材对应：第 1.7 节

1.8.3 课堂讨论

自主避障的跨载具迁移与验证

1.8.3 课堂讨论：跨载具迁移

自主避障从无人机迁移到常规前轮转向车

哪些模块可复用？哪些模型或接口需改变？怎样验证迁移有效？

- **可复用部分：**障碍感知、地图与路径规划的思路，以及消息格式和实验评价指标。
- **需要调整：**运动模型、可达路径、转弯与制动约束，传感器安装及执行器接口。
- **约束差异：**四旋翼有6个自由度、4个独立输入，可悬停、侧移或爬升越障；常规前轮转向车在平面内有3个自由度，以驱动和转向控制，不能直接横移，须按转弯半径绕行。
- **验证方法：**按相同任务指标复现基准，依次比较仿真、半实物和实机的响应差异。

例如：绕过同一障碍物时，分别比较碰撞率、最小间距和任务完成时间。

跨载具可复用任务方法，运动约束、控制接口和验证工况必须随对象调整。

本章小结

第一章收束与第二章准备

- **本章方法：**从任务与概念出发，用架构组织模块，用运动模型和实验解释行为。
- **易错点：**只改z符号做坐标转换；混淆欧拉角次序与变换方向；未做无桨验证就装桨；差动按转速而非转速平方调整。
- **课后习题：**完成教材十题；概念题讲关系，计算题写假设与验算，应用题写取舍。
- **问题回查：**课件1.4（教材第1.2.2–1.2.3节）讲坐标与控制，课件1.5（教材第1.3节）讲装调，课件1.6–1.7（教材第1.4–1.6节）讲平台与例程。
- **第二章准备：**整理电脑环境和入门例程，用统一入口查工具、资料与环境检测。

理解系统关系、完成习题推理，再通过平台配置和例程复现检验理解。