本章目录

习题案例分析与课程设计

第四章 载具运动建模与仿真

4.1 运动建模基础与运动学
4.2 刚体动力学与运动求解
4.3 动力单元、受力与观测建模
4.4 配平、线性化与动态系统基础
4.5 多旋翼模型逐步编程与仿真
4.6 参数测量与静态模型辨识
4.7 动态系统辨识、验证与模型修正
4.8 典型无人载具建模与扩展
4.9 建模工具、代码生成与模型部署
4.10 API与SDK建模接口
4.11 例程体系与综合实践
4.12 习题案例分析与课程设计

本节 4 个教学单元

4.12.1 概念与原理复核
教材对应：第4.4节 习题1、2、5

4.12.2 计算与近似误差
教材对应：第4.4节 习题3、4、6、8

4.12.3 方案设计与课程项目
教材对应：第4.4节 习题7、9、10

4.12.4 结果讲评与全章总结
教材对应：第4.1.2.2节 图4.6；全章回顾

4.12.1 概念与原理复核：习题与阶段实验的证据要求

改变题设后，先预测结果再选择验证方法

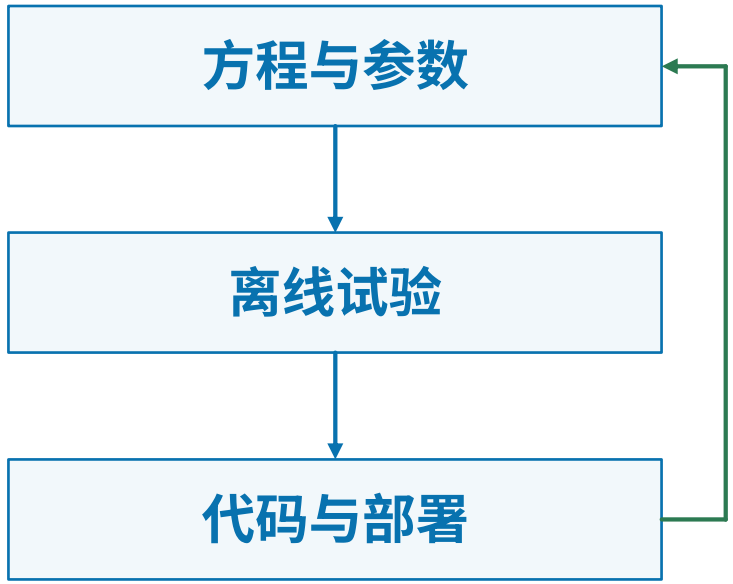
- **衔接：**课件4.11给出了可复现的操作路线；本节改变题设，先预测结果，再独立选择模型、接口和验证方法。
- **题目分布：**教材第4.4节十道习题中，4.12.1讲题1、2、5，4.12.2讲题3、4、6、8，4.12.3讲题7、9、10；计算题保留条件和单位，方案题写出输入输出、实现步骤与能支持的结论。
- **阶段实验：**A4是第四章第四次阶段实验，在4.12.3完成一次有明确目标的模型改动；A1–A4序列见课件4.3「阶段实验A1・执行器与合成」页。

能解释输入、条件、结果与证据，才算完成一次建模。

4.12.1 概念与原理复核：题1·MBD开发流程

教材题1：MBD流程怎样贯穿开发

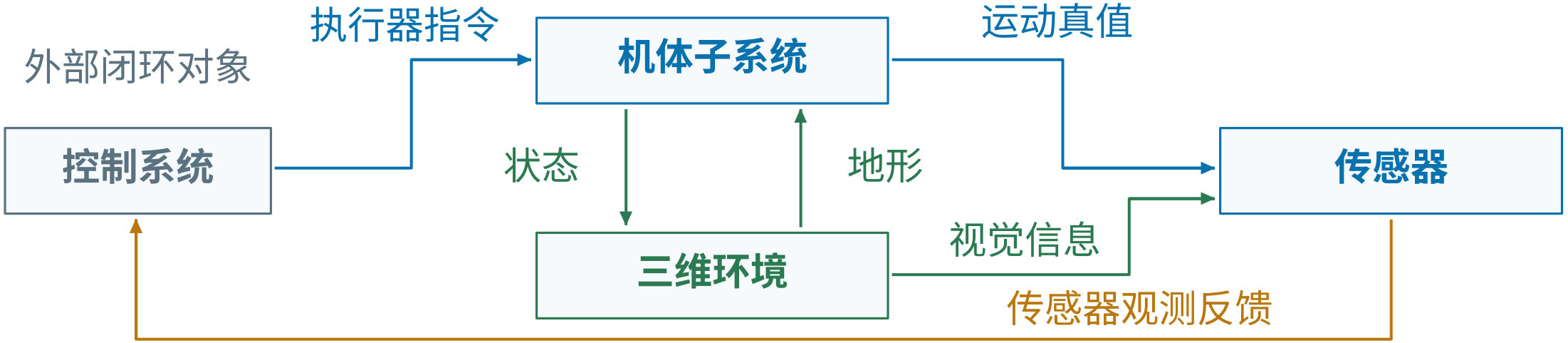
- **教材题1：**简述RflySim工具链的基于模型的设计（MBD）流程及优势（课件4.1；教材第4.1.1节）。
- **六个阶段：**建模与辨识→快速控制原型→数字仿真验证→自动代码生成→硬件在环仿真→系统集成与测试（教材图4.1）。
- **优势与条件：**同一模型生成代码，减少手写偏差，参数与试验可复用、可追溯；复用也会传播错误，须用同初态、同输入、同仿真时刻检验部署一致性。



每个开发阶段都应留下可检查的模型或结果。

4.12.1 概念与原理复核：题2·三级模型层级

教材题2：三个核心子系统怎样连接



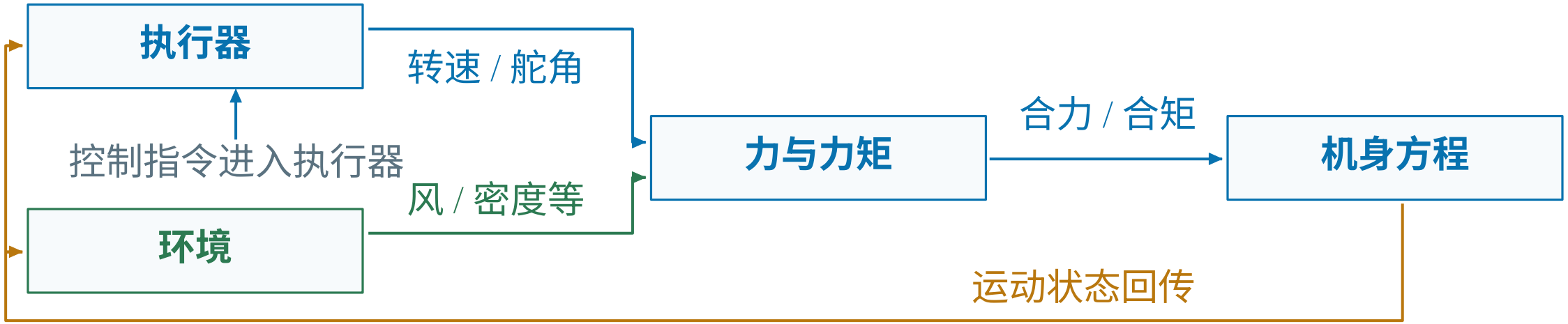
图：运动真值、环境与观测连接成闭环

- **教材题2：**说明统一建模框架中三个核心子系统与四个机体二级分系统的作用与连接关系（课件4.1；教材第4.1.3节）。
- **要点：**核心为机体、传感器、三维环境，控制器在模型外（课件4.1、4.3）。

先辨层级，再把每条信号接到正确的模块。

4.12.1 概念与原理复核：题2·机体分系统输出

题2图解：四个机体分系统各输出什么



图：部件作用汇总后推进状态，状态又影响部件

- 机体分为执行器、环境、力与力矩、机身；图示各自输出。
- 信号须标维数、坐标、单位和更新时间；Acc信号可能是比力（课件4.3）。

合力与合矩由多个来源汇总，机身方程再推进状态。

4.12.1 概念与原理复核：题5·白盒灰盒黑盒

教材题5：白盒、灰盒和黑盒怎样选择

- **教材题5：**简述白盒、灰盒、黑盒模型的差异与适用场景（课件4.1；教材第4.2.2.1节）。

维度	白盒	灰盒	黑盒
已知机理	方程与结构完整	一阶滞后、推力平方结构	不假设内部结构
参数来源	独立测量或手册	数据估计增益、时间常数	全部由输入输出拟合
可解释性	参数都有物理含义	参数对应部件含义	系数未必对应部件
数据需求	数据主要用于验证	激励数据覆盖目标工况	大量数据覆盖使用工况
适用场景	解释机制、设计新部件	结构已知、参数待标定	结构未知或机理复杂

- **共同要求：**三种路线都要说明适用工况，并用独立数据验证。

模型类别反映已知机理与数据的分工，不代表天然精度等级。

4.12.1 概念与原理复核：模型复杂度与适用工况

模型选择题：复杂模型一定更好吗

- 若只研究悬停附近的电机小阶跃，一阶灰盒可能已能解释主要动态；增加高阶环节会引入更多待定参数。
- 若任务包含大电压变化或执行器饱和，原工作点附近的低阶模型可能失效；应扩大数据覆盖或补入相关机制。
- 在相同独立验证集上比较误差、残差形状和计算代价，选择能完成任务且参数可信的模型，不只追求拟合率。

模型是否足够，由目标工况和独立验证共同判断。

本章目录

习题案例分析与课程设计

第四章 载具运动建模与仿真

4.1 运动建模基础与运动学
4.2 刚体动力学与运动求解
4.3 动力单元、受力与观测建模
4.4 配平、线性化与动态系统基础
4.5 多旋翼模型逐步编程与仿真
4.6 参数测量与静态模型辨识
4.7 动态系统辨识、验证与模型修正
4.8 典型无人载具建模与扩展
4.9 建模工具、代码生成与模型部署
4.10 API与SDK建模接口
4.11 例程体系与综合实践
4.12 习题案例分析与课程设计

本节 4 个教学单元

4.12.1 概念与原理复核
教材对应：第4.4节 习题1、2、5

4.12.2 计算与近似误差
教材对应：第4.4节 习题3、4、6、8

4.12.3 方案设计与课程项目
教材对应：第4.4节 习题7、9、10

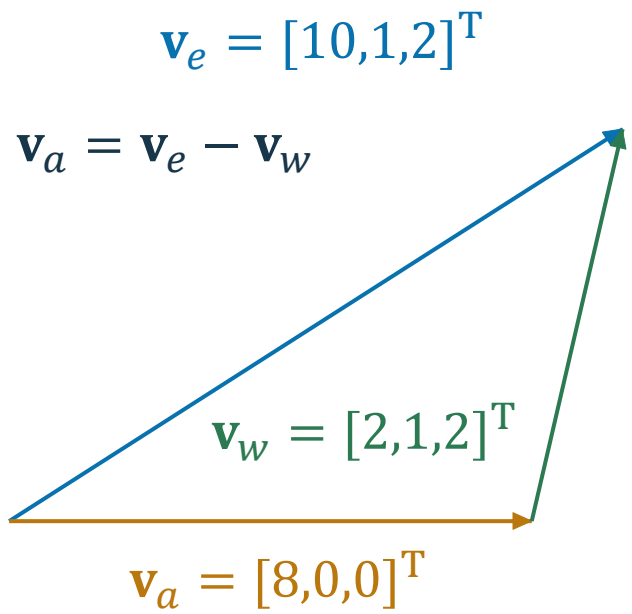
4.12.4 结果讲评与全章总结
教材对应：第4.1.2.2节 图4.6；全章回顾

4.12.2 计算与近似误差：题3·地速风速与空速

教材题3：先统一风速与地速的坐标

- **教材题3：**简述空速、地速与风速的关系及迎角/侧滑角的定义（课件4.3；教材第4.1.4.4节）。
- **课件算例：**机体与NED对齐；无风、地速 $[10,1,2]^T$ m/s时，空速约10.25 m/s。
- 此时迎角11.31°、侧滑5.60°；风改为$[2,1,2]^T$后，空速为$[8,0,0]^T$ m/s，两角为零。
- **定义：**u_a, v_a, w_a为机体系相对空速分量，V_a为空速大小（课件4.3）；空速为零时气流角无定义。

$$\alpha = \mathrm{atan2}(w_a, u_a), \quad \beta = \arcsin(v_a / V_a)$$



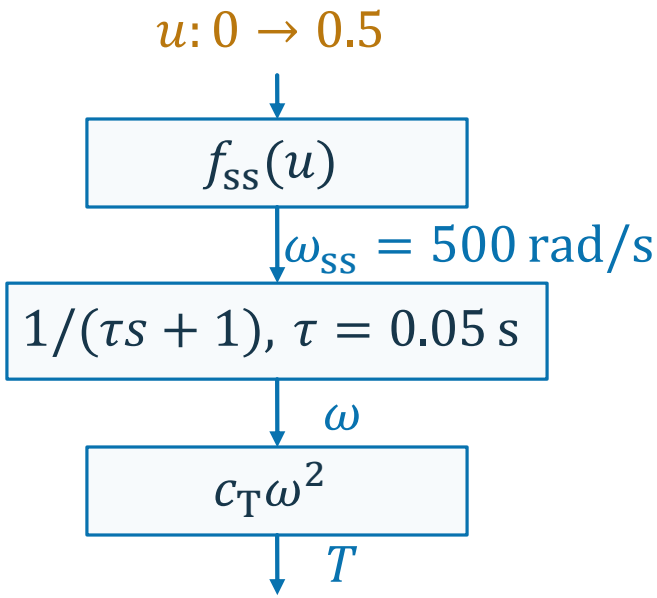
相对空速是同一坐标下的向量差，气流角来自该向量。

4.12.2 计算与近似误差：题4·稳态映射与动态环节

教材题4：稳态函数与动态环节怎样串联

- **教材题4：**简述执行器“稳态函数＋动态传递函数”串联理想化模型的含义（课件4.3；教材第4.1.4.3节）。
- **课件算例：**归一化输入0→0.5，稳态转速500 rad/s，时间常数0.05 s，初转速为零。
- 在0.05 s时转速316.1 rad/s；若拉力系数$c_T = 2 \times 10^{-5}$，推力仅2.00 N，终值为5 N。
- 目标可跳变，转速仍连续；关断后转速和推力衰减，除非另有制动或复位，不会瞬时消失。

$$\omega = 500\left(1 - e^{-t/0.05}\right), \quad T = c_T \omega^2$$



一般形式（教材式(4.12)）：

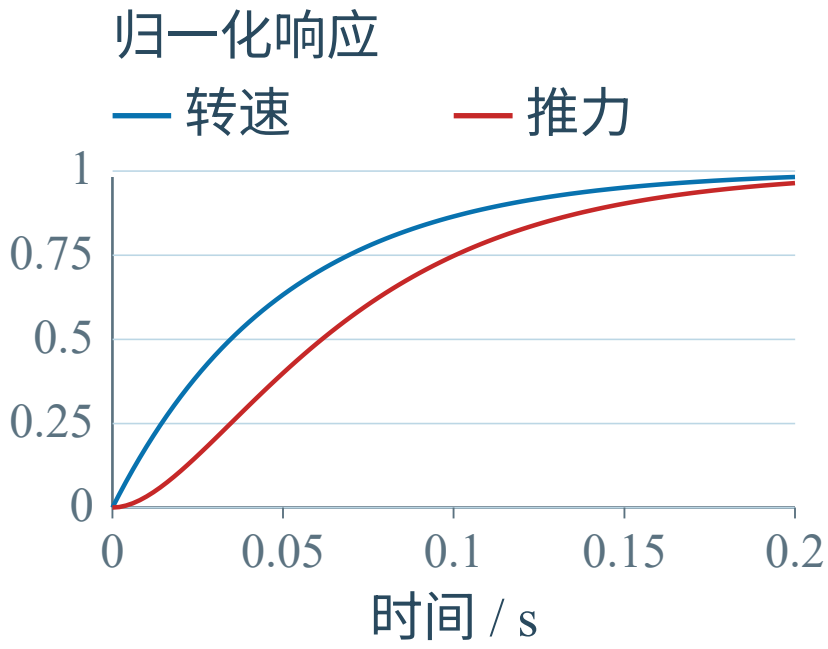
$$\delta_i(s) = G_{ss,i}(s)\, f_{ss,i}(\sigma_i(s))$$

目标转速可以跳变，真实转速与推力仍需时间建立。

4.12.2 计算与近似误差：题4·转速平方与推力

用两条归一化曲线检查平方环节

- 蓝线是转速除以500，红线是推力除以5；两条曲线使用题4课件算例的零初值阶跃。
- 结论：0.05 s时转速达终值的63.2%，推力只达40.0%（0.632^2）；可用来检查自己的部件日志。



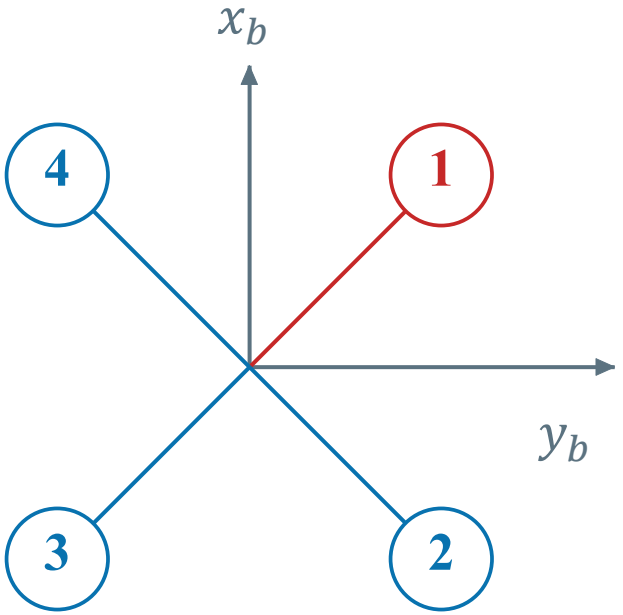
图：一阶转速与平方推力

推力随转速平方变化，过渡期间不能按转速比例估推力。

4.12.2 计算与近似误差：题6·X构型旋翼编号

教材题6：X构型先给编号与符号

- **教材题6：**分析四旋翼“X”型控制分配与逆分配的实现方式（课件4.3；教材第4.1.4.4节）。
  课件算例：前右起顺时针1至4号，$d = 0.25$ m为机臂长，偏航符号$[+,-,+,-]$；$a = d/\sqrt{2}$。
- 1号位置$[a, a, 0]^T$，向上推力$[0,0,-T_1]^T$；叉乘得滚转负、俯仰正。
- **取$\eta = c_M/c_T = 0.02$ m：**1号增加1 N，增量为$[1,-0.1768,0.1768,0.02]^T$；首项N，其余N·m。



FRD俯视：推力向外

合成矩阵的每一列，都必须对应一个明确的旋翼。

4.12.2 计算与近似误差：题6·合成矩阵与逆分配

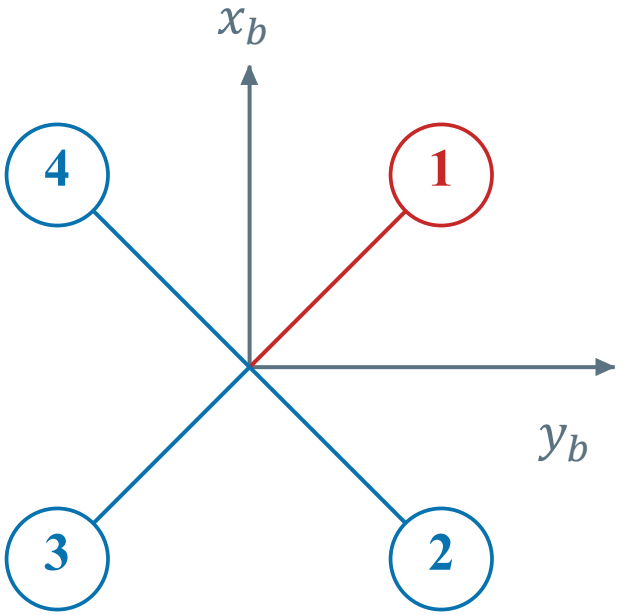
题6推导：写出合成矩阵，再求逆分配

- **推力形式：**教材式(4.35)以ϖ_i^2为输入；代入$T_i = c_{\mathrm{T}}\varpi_i^2$、$c_{\mathrm{M}}\varpi_i^2 = \eta T_i$，并取$a = d/\sqrt{2}$，得：

$$\begin{bmatrix} f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix} = \mathbf{M}_4 \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -a & -a & a & a \\ a & -a & -a & a \\ \eta & -\eta & \eta & -\eta \end{bmatrix}$$

- **逆分配：**四行两两正交，逆矩阵可直接写出：

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_4^{-1} \begin{bmatrix} f \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_4^{-1} = \frac{1}{4}\begin{bmatrix} 1 & -1/a & 1/a & 1/\eta \\ 1 & -1/a & -1/a & -1/\eta \\ 1 & 1/a & -1/a & 1/\eta \\ 1 & 1/a & 1/a & -1/\eta \end{bmatrix}$$



FRD俯视：推力向外

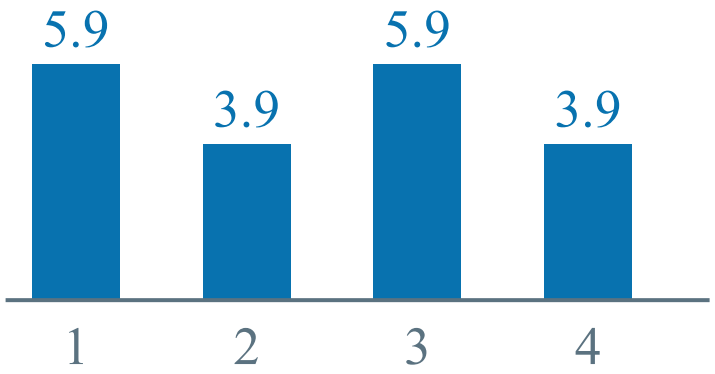
4.12.2 计算与近似误差：题6·逆分配与推力约束

题6讲评：逆解存在，还要检查推力能否实现

- 保持总推力19.6 N（每桨4.9 N），1、3号各增加 ΔT，2、4号各减少同量，可抵消滚转与俯仰矩变化。
- 目标偏航矩0.08 N·m对应$\Delta T = 1$ N，四桨为5.9、3.9、5.9、3.9 N；总推力保持原值。
- 若目标改为0.48 N·m，所需增量6 N，使另一组变成−1.1 N；常规单向旋翼不能实现，应调整目标或分配策略。

$$\Delta T = \frac{\tau_z}{4\eta}$$

可实现：5.9 / 3.9 N



0.48 N·m要求−1.1 N

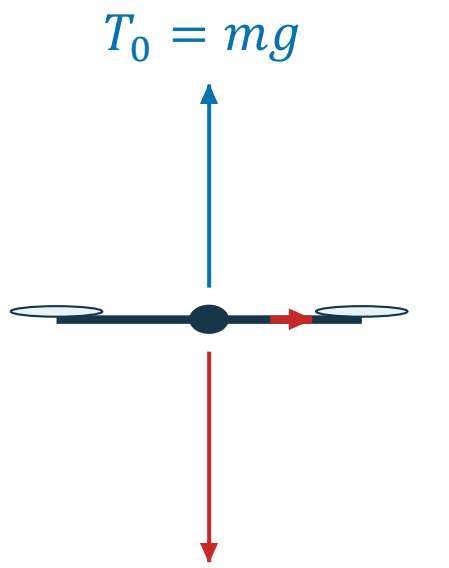
单向旋翼无法反推

负推力和超上限表示目标超出当前执行器的可行范围。

4.12.2 计算与近似误差：题8·悬停配平点

教材题8：悬停线性化从配平点开始

- **教材题8：**给出悬停点线性化与离散化建模流程（课件4.4；教材第4.1.4.5节）。
- 先声明水平、静止、无风与无接触等条件，求满足$f(x_0, u_0) = 0$的配平；电机也应处在匹配的稳态。
- 定义扰动$\delta x = x - x_0$、$\delta u = u - u_0$，求局部系数、选采样周期，并与原非线性模型的小扰动响应比较。



$v = 0,\ p = q = r = 0$

先找到状态不再变化的工作点，再讨论附近的小变化。

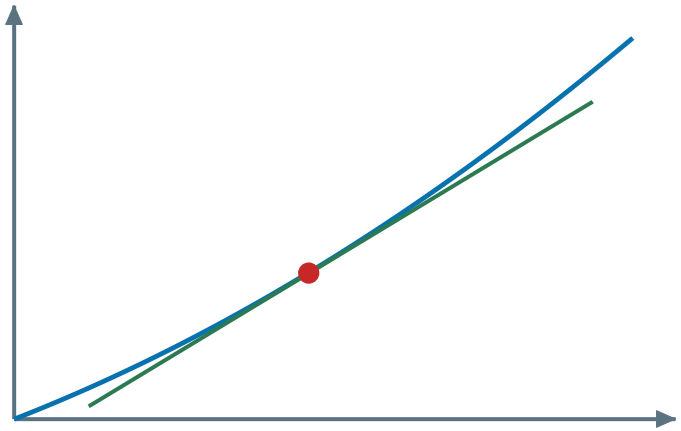
4.12.2 计算与近似误差：题8·扰动线性模型

题8讲评：线性模型描述的是扰动

- 在配平点求偏导得到A, B；系数表示状态或输入的小变化，怎样改变状态导数。
- 姿态用局部三维误差；四元数需处理单位范数约束，四分量不能独立任意扰动。
- 用小阶跃比较原模型和线性模型，再逐渐增大幅度；偏差决定近似的适用范围。

$$\delta\dot{x} = A\delta x + B\delta u, \quad A = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_0, \quad B = \left.\frac{\partial f}{\partial u}\right|_0$$

非线性曲线与局部切线



在配平点附近取δx

矩阵系数是当前工作点附近的敏感度，不是全工况定律。

4.12.2 计算与近似误差：悬停高度与速度状态

悬停算例：只保留向上运动的两个状态

- **为看清离散化，采用独立2 kg理想模型：**高度h向上、速度v_h向上，水平姿态，总推力扰动为δT。
- 在$T_0 = mg$附近、忽略阻力与电机动态时，高度与速度扰动满足下式：
- 若要研究M0（最小模板e0_MinModelTemp，课件4.3起使用）的指令到高度响应，必须再串联电机动态及输入映射；这里的输入已经是实际总推力扰动。

$$\delta\dot{h} = \delta v_h, \qquad \delta\dot{v}_h = \frac{\delta T}{m}$$

净推力先改变速度，再通过积分改变高度。

4.12.2 计算与近似误差：零阶保持的离散计算

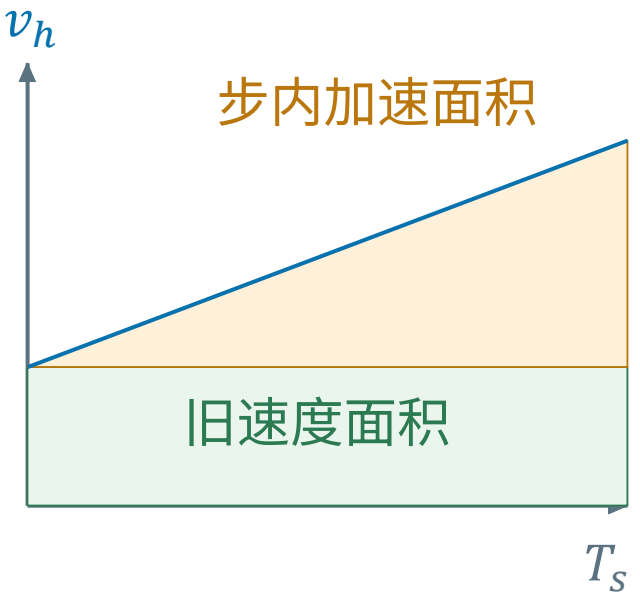
保持一个采样周期，怎样得到下一时刻

- 初值为零；2 kg模型保持$\delta T = 2$ N、$T_s = 0.1$ s，首步速度、高度增量为0.1 m/s、0.005 m。

- **10步后精确保持：**速度增量1 m/s、高度增量0.5 m；欧拉只累积旧速度，得0.45 m。减半步长后为0.475 m。

$$\delta v_{k+1} = \delta v_k + T_s \delta T_k / m$$

$$\delta h_{k+1} = \delta h_k + T_s \delta v_k + T_s^2 \delta T_k / (2m)$$



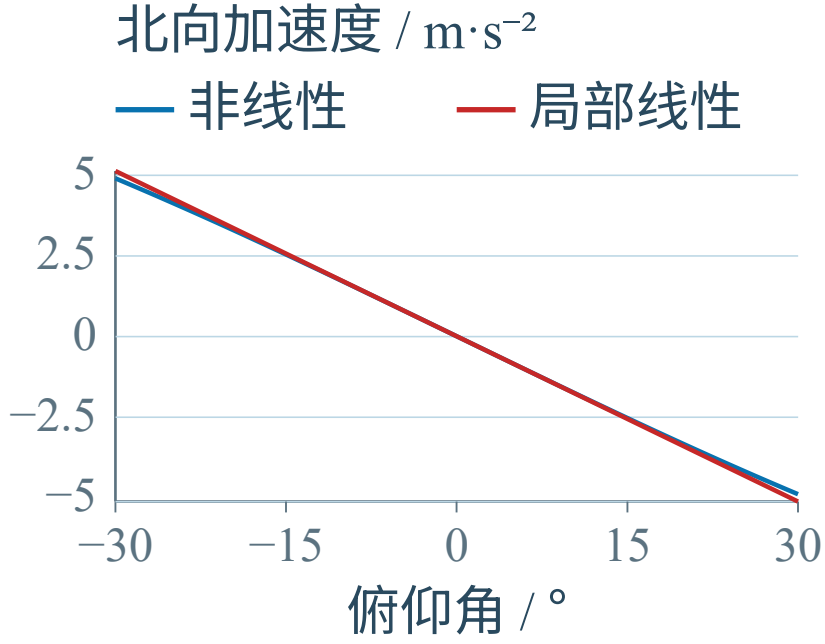
方法见课件4.4
「一阶模型的精确离散化」页。

零阶保持下，恒定输入在步内仍会持续改变状态。

4.12.2 计算与近似误差：小角度近似的误差

小角度近似要在允许误差内使用

- 保持总推力mg，北向加速度为$a_N = -g\sin\theta$；悬停附近用$-g\theta$近似，θ取rad。
- **取$g = 9.8\,\mathrm{m/s^2}$：**10°时两者约−1.702与−1.710m/s²；30°时约−4.900与−5.131m/s²，相对误差约0.5%与4.7%；若允许1%误差，倾角宜在14°以内。
- 推导与数值对照见课件4.4「小角度误差如何随角度增大」页。



图：原投影与小角近似

倾角变大时，局部直线逐渐偏离原始几何关系。

本章目录

习题案例分析与课程设计

第四章 载具运动建模与仿真

4.1 运动建模基础与运动学
4.2 刚体动力学与运动求解
4.3 动力单元、受力与观测建模
4.4 配平、线性化与动态系统基础
4.5 多旋翼模型逐步编程与仿真
4.6 参数测量与静态模型辨识
4.7 动态系统辨识、验证与模型修正
4.8 典型无人载具建模与扩展
4.9 建模工具、代码生成与模型部署
4.10 API与SDK建模接口
4.11 例程体系与综合实践
4.12 习题案例分析与课程设计

本节 4 个教学单元

4.12.1 概念与原理复核
教材对应：第4.4节 习题1、2、5

4.12.2 计算与近似误差
教材对应：第4.4节 习题3、4、6、8

4.12.3 方案设计与课程项目
教材对应：第4.4节 习题7、9、10

4.12.4 结果讲评与全章总结
教材对应：第4.1.2.2节 图4.6；全章回顾

4.12.3 方案设计与课程项目：题7·风场生成与接线

教材题7：风场注入先明确模型与用途

- **教材题7：**给出基于MIL-F-8785C或类似规范的风场注入设计方案（课件4.3；教材第4.1.4.2节）。
- $\mathbf{v}_{\text{wind}} = \mathbf{v}_{\text{turb}} + \mathbf{v}_{\text{cons}} + \mathbf{v}_{\text{shear}} + \mathbf{v}_{\text{gust}} + \cdots$
- 离散Dryden紊流模块（成形滤波，课件4.3）输入高度、速度与地面到机体矩阵 R^T ；风输出已在机体系，接M0的WindDist前先转回NED。
- 四项依次为紊流、常值风、风切变与阵风，均在地面系定义；冻结紊流场要求平均风和紊流强度相对地速较小；记录强度、尺度、采样周期和随机种子。

Dryden：机体系风

↓

$$v_{w,e} = R v_{w,b}$$

↓

M0 WindDist：NED

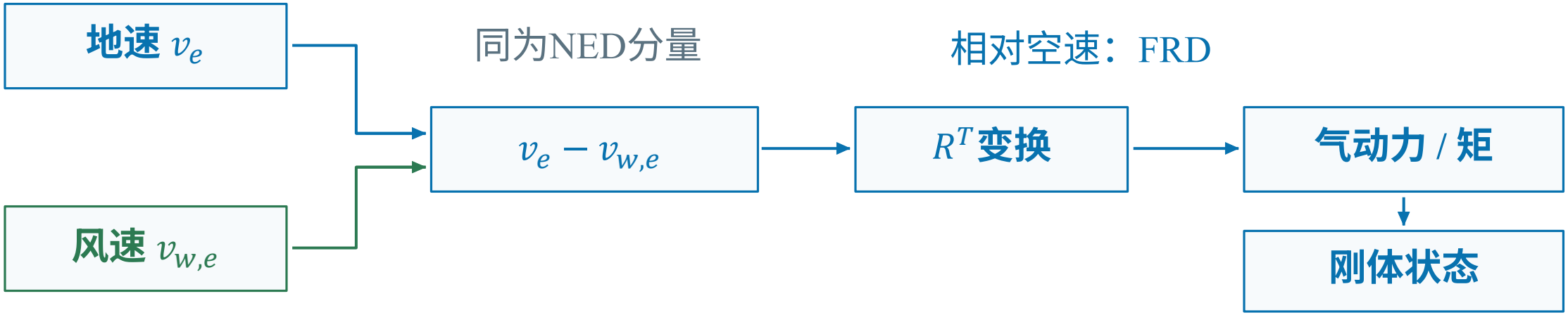
↓

$$v_{a,b} = R^T (v_e - v_{w,e})$$

风场方案包括生成规则、坐标接线与受力验证。

4.12.3 方案设计与课程项目：题7·相对来流与受力

题7图解：风必须改变相对来流与受力



先固定地速与姿态检查方向

图：风进入受力链

- 按接口约定（坐标系与单位）把风接入相对空速，再沿受力和状态检查变化。

显示了风向箭头，不等于动力学已经受到风作用。

4.12.3 方案设计与课程项目：题7·确定性方向自检

题7验收：先做确定性自检，再评价随机风

- 设机体与NED对齐、地速北向5 m/s，分别给北向2和8 m/s风；载具相对空气的北向速度$v_{a,N}$为+3和−3 m/s。
- 用$F_N = -0.055 v_{a,N}|v_{a,N}|$（0.055为教学设定系数）得到−0.495和+0.495 N；日志保存风速、相对空速、气动力与仿真时间。
- 再加入文档化随机风，同参数、同种子复现序列；用样本均值和方差评价统计特性，按样本长度设定容差，不要求与理论值精确相等。



方向和量纲检查通过后，才有意义比较随机响应。

4.12.3 方案设计与课程项目：题9·滚转辨识边界

教材题9：滚转辨识先说明输入在哪里

- **教材题9：**使用系统辨识细化执行器与阻尼参数的步骤（以滚转通道为例）。复习：课件4.6、4.7；教材第4.2.2.4节。



①台架：指令→力矩　　③整体：含执行器动态　　②机体：力矩→角速度

- 已知惯量、初态和工况后，选择可辨识参数并分估计/验证段；执行器时间常数先用台架阶跃单独辨识，台架参数须匹配电机、桨和电压。
- 合成数据检验算法能否找回已知参数；真实载具的精度要用来源匹配的独立实测数据验证。

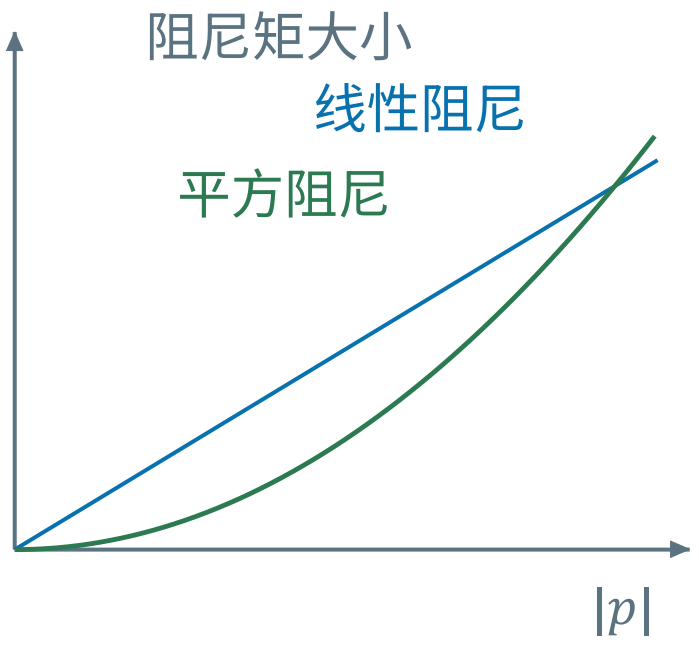
输入边界不同，得到的传递关系就不是同一个对象。

4.12.3 方案设计与课程项目：题9·阻尼结构选择

题9讲评：阻尼形式决定拟合什么参数

- 局部单轴忽略交叉耦合；τ_x不含待估阻尼。若用保留阻尼的M0记录，合矩列已含阻尼，不再重复扣除；课件4.11的解析副本阻尼已置零，不能用来估计阻尼。
- 已知J_x可估计d_p。M0采用$-C_p p|p|$，在零角速处无一阶项，应按平方结构估计C_p。
- 归一化输入还含执行器动态；没有独立惯量或力矩信息时，多个参数未必能唯一分开。

$$J_x\dot{p} = \tau_x - d_p p \quad 或 \quad J_x\dot{p} = \tau_x - C_p p|p|$$



一阶黏性阻尼与平方阻尼是不同模型，系数不能互换。

4.12.3 方案设计与课程项目：题9·估计与独立验证

题9实施：先预处理，再估计，再独立验证

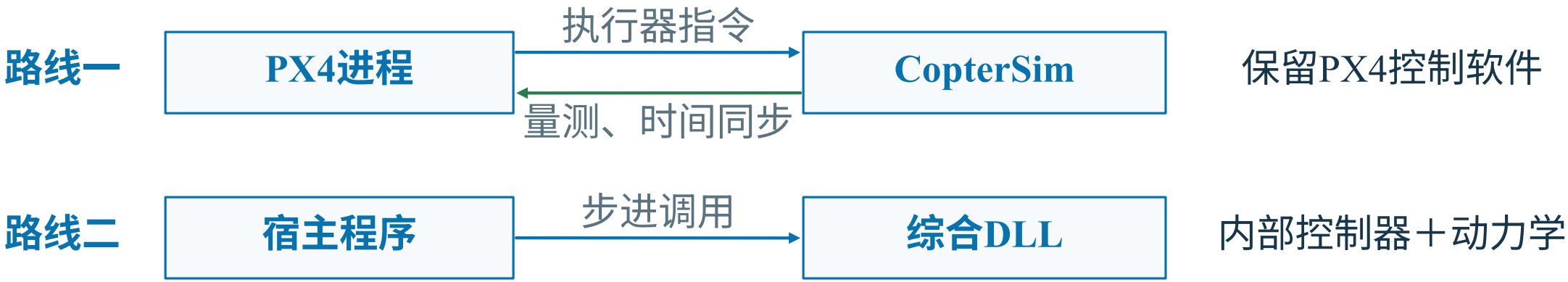
- 先检查时间戳、单位、零偏和饱和，按实际生效时刻对齐输入输出；角速度差分求导会放大噪声，需说明处理方法。
- 用估计段拟合待估参数，记录结构、目标函数和参数约束；使用数值仿真拟合时，初态也应与试验段一致。
- 冻结模型后用独立工况比较峰值、稳态、时延和残差；若据此重新调参，再用另一段未参与调参的数据验证。

验证数据保持独立，才能发现只适合原数据的参数。

4.12.3 方案设计与课程项目：题10·综合模型与加速

教材题10：综合模型怎样支持加速试验

- **教材题10：**基于RflySim构建“综合模型”以实现SITL（软件在环）的加速仿真与训练（课件4.11；教材第4.2.4节）。



- **同任务对照：**路线二的内部控制器与PX4是不同实现，作训练代理时须与PX4链做同任务对照；训练环境至少含复位、动作、观测和终止。

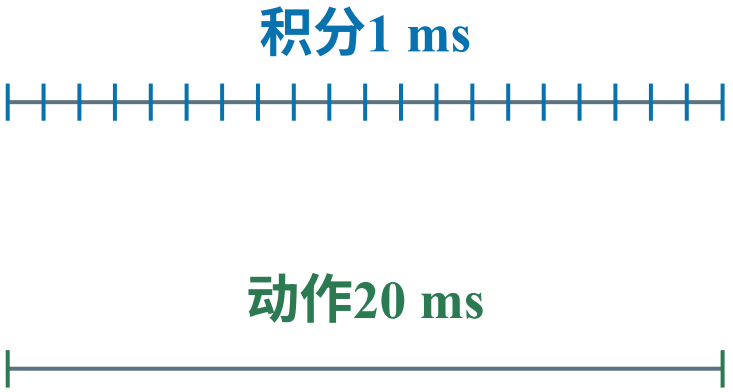
加速训练仍要保持仿真时间含义，并检验与目标系统的行为差异。

4.12.3 方案设计与课程项目：仿真时间与墙钟时间

加速靠时间调度，不靠少等一会儿

- 固定初态、种子和动作序列，每动作保持整数个基本步；ModelUpdate（DLL按时长推进接口，见课件4.10「时间取整」页）丢弃不足一步的余量。
- 同一仿真时刻比较轨迹和终止事件，再统计墙钟耗时；分别记录硬件、并行数、显示与步长。
- 动作限制、观测和碰撞终止须符合目标任务；终点误差小但碰撞，仍不能判成功。

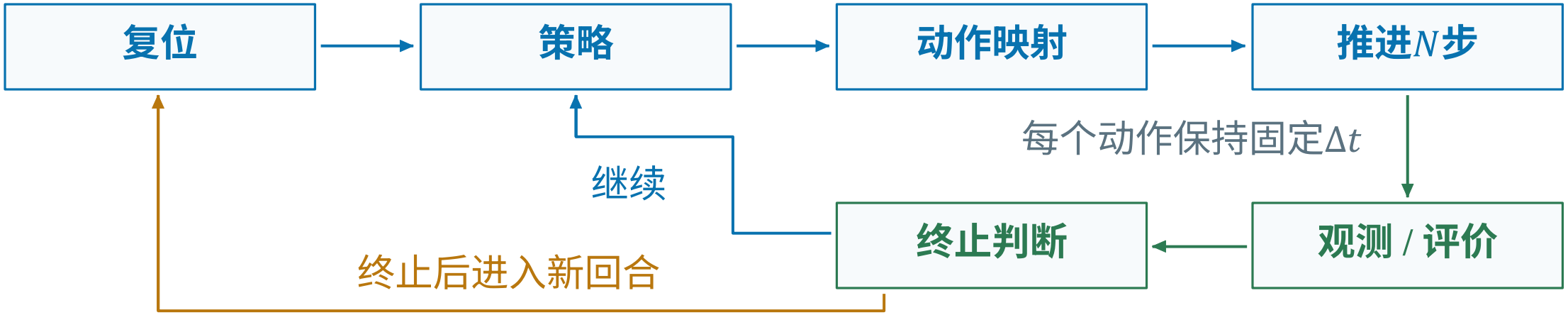
$$\rho = \frac{\Delta t_{\text{sim}}}{\Delta t_{\text{wall}}}, \qquad N = \text{int}(\Delta t / h)$$



仿真时间必须按模型步长推进，墙钟只是性能度量。

4.12.3 方案设计与课程项目：题10·训练回合接口

题10图解：一次训练回合需要哪些接口



图：同一时标上的动作、状态与回合边界

- 每回合固定初态与随机条件，每个动作推进同样的仿真时长。

固定时长步进让动作效果可比较，复位让新回合有明确起点。

4.12.3 方案设计与课程项目：阶段实验A4·模型改动选题

A4选题：一次有解释的模型改动

任选一条路线做完整；起点为01、03、04子目录（读Readme.pdf，课件4.11）：
[安装目录]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/1.BasicExps/e6_ModelingLearningLab/

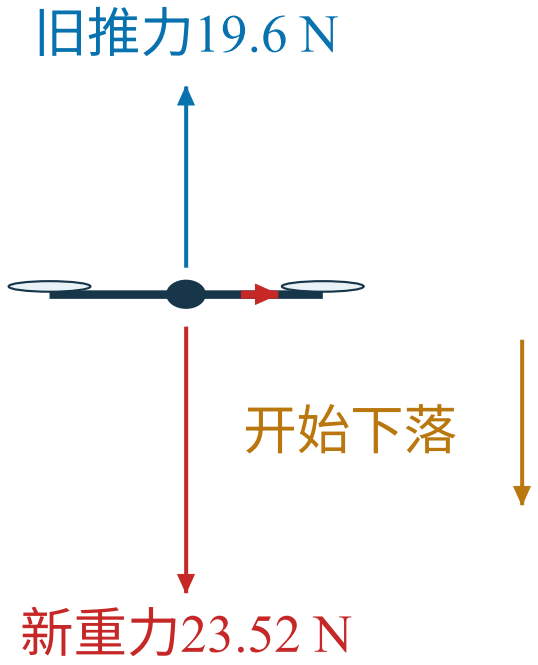
路线	改变什么	预测什么	提交什么
基础	同一多旋翼模型 质量增加20%	悬停推力与 瞬时加速度	修改参数源； 同条件对照
提高	来源匹配的独立动力数据 更新一个执行器子模型	更新前后的 误差变化	保留未调参数据； 解释更新前后误差
迁移	课件4.8/4.11车辆基线 改变几何或阻力参数	改动后的 运动响应	重声明状态、输入、约束； 不套多旋翼推力公式

4.12.3 方案设计与课程项目：阶段实验A4·增载算例

A4基础路线：质量增加20%的可复算锚点

- **独立理想题设：**2 kg、 $g = 9.8$ m/s²，原推力19.6 N；增载到2.4 kg，新平衡推力23.52 N。
- 保持原推力时，离地水平、无其他外力的向下加速度1.633 m/s²；地面支撑会掩盖这个运动。
- 每桨新平衡推力5.88 N；相同拉力系数下，转速乘 $\sqrt{1.2} = 1.0954$，并非增加20%。

$$a_D = 9.8 - \frac{19.6}{2.4} \approx 1.633 \text{ m/s}^2$$



保持同一推力时，质量增加先改变的是加速度。

4.12.3 方案设计与课程项目：阶段实验A4·冻结比较条件

A4实施前先冻结比较条件

- 冻结对象、参数、初态、输入、环境、步长与停止条件，只改变一项；先写解析预测，再定误差量和比较时段。
- 交付模型/脚本、参数源、原始日志、处理代码与运行入口，区分发布DLL和自行生成DLL。
- 至少一次重复试验和独立工况；报告对应问题、假设、预测、结果与局限，使另一人能从文件复现。

条件

参数＋初态＋输入

证据

原始日志＋处理代码

复现

命令＋输出＋判据

先规定问题和判据，再运行模型，避免事后挑选有利结果。

4.12.3 方案设计与课程项目：阶段实验A4·评价证据

A4评价：物理、参数与实现各看什么

评分看证据是否支持项目目标；不按模型复杂度或截图数量评价。

评分项	权重	可检验证据
物理解释	25%	状态、受力、单位和假设逐项对应实现
参数与数据	25%	参数与数据来源、适用工况清楚
接口实现	20%	初态、输入、推进和输出可核对
验证	20%	结论有对应的解析、数值或独立数据证据
复现材料	10%	模型/脚本、参数源、日志、处理代码与入口

声称实物精度须有对象匹配的独立实测；纯敏感性项目按其目标评价。

本章目录

习题案例分析与课程设计

第四章 载具运动建模与仿真

4.1 运动建模基础与运动学
4.2 刚体动力学与运动求解
4.3 动力单元、受力与观测建模
4.4 配平、线性化与动态系统基础
4.5 多旋翼模型逐步编程与仿真
4.6 参数测量与静态模型辨识
4.7 动态系统辨识、验证与模型修正
4.8 典型无人载具建模与扩展
4.9 建模工具、代码生成与模型部署
4.10 API与SDK建模接口
4.11 例程体系与综合实践
4.12 习题案例分析与课程设计

本节 4 个教学单元

4.12.1 概念与原理复核
教材对应：第4.4节 习题1、2、5

4.12.2 计算与近似误差
教材对应：第4.4节 习题3、4、6、8

4.12.3 方案设计与课程项目
教材对应：第4.4节 习题7、9、10

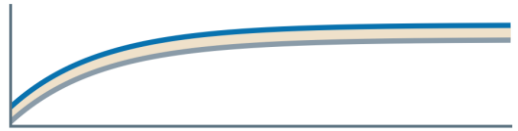
4.12.4 结果讲评与全章总结
教材对应：第4.1.2.2节 图4.6；全章回顾

4.12.4 结果讲评与全章总结：案例讲评·分层判定结果

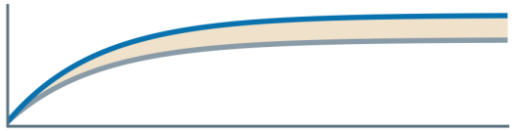
讲评案例：每条证据只回答一个问题

证据	证明什么	还需什么	结论
DLL加载成功，仿真时间按步长递增	接口与推进正常	同初态对照	**通过：接口**
合成验证RMSE 2.148 rad/s（课件4.7，教学合成数据）	能找回已知参数	独立实测数据	**通过：计算链**
历史拟合率82.24%，极点有正实根（课件4.7，历史记录）	短时曲线相近	极点与物理核对	**待查：不可部署**
独立实测：验证误差明显大于估计段	参数或结构失配	按残差定位原因	**待查：参数结构**

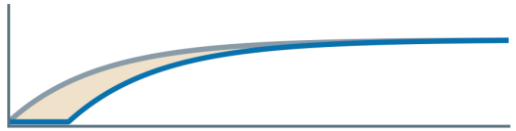
残差示意
灰线：实测
蓝线：模型



偏移：查零偏与工作点



比例：查增益与饱和



延迟：查时标与延迟

成功要按被验证的问题分别判断，不能互相替代。

4.12.4 结果讲评与全章总结：图4.6·模型与实物证据

教材图4.6：模型与实物证据怎样连接

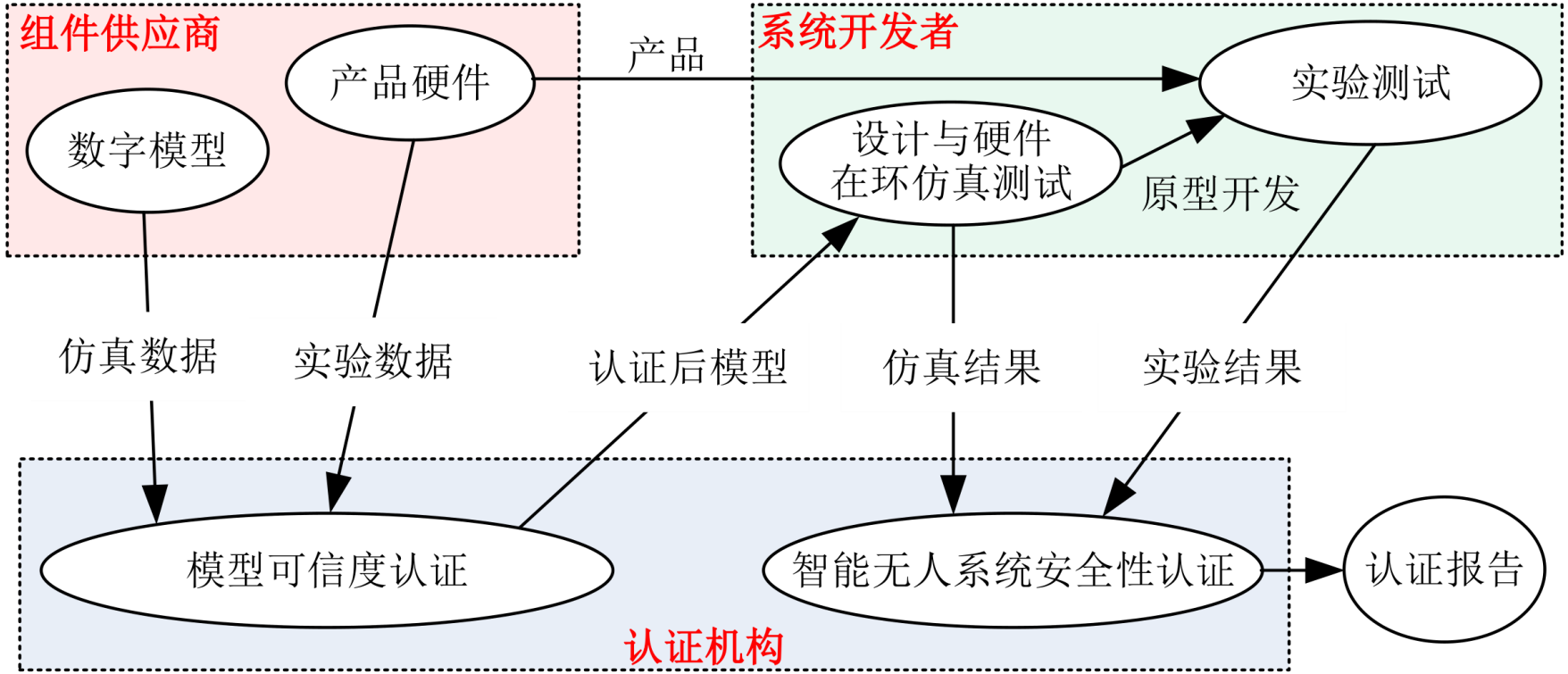


图4.6 统一建模框架下的认证体系（教材第4.1.2.2节）

红框·组件供应商：
硬件＋数字模型
绿框·系统开发者：
在环仿真与实验
蓝框·认证机构：
模型可信度、系统安全性

共享数字模型，需要同时保留来源、验证条件与适用范围。

4.12.4 结果讲评与全章总结：图4.6·参与方的证据职责

图4.6讲评：不同参与方需要不同证据

- 组件方交代接口、参数来源与工况；系统方检验组合后接口和任务，检查组件假设是否仍成立。
- 评价方结合仿真与实验数据，检查模型与实物的一致性及其适用用途。
- **结论写成可检查范围：**例如在所列电压与输入范围，通过独立阶跃验证，可预测该部件转速过程。

组件提供方

接口、参数、工况

系统开发方

组合与任务验证

独立评价方

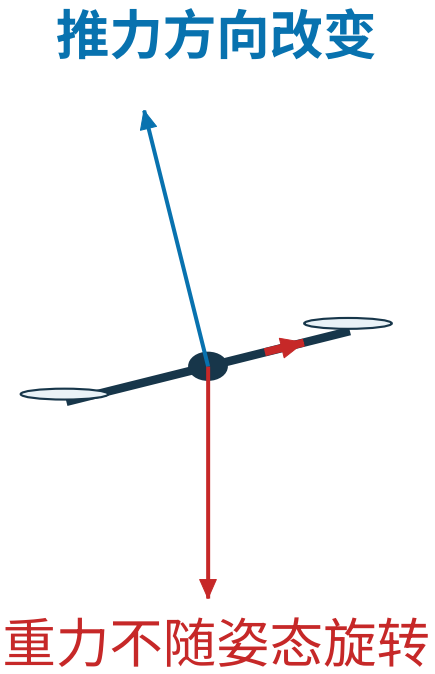
用途与实物一致性

模型说明、系统试验和独立评价应能追溯到同一对象。

4.12.4 结果讲评与全章总结：运动模型与验证链条

全章回顾：从运动方程到可用模型

- 从方程与部件到可运行工程，再落实输入、时间与输出；用数据修参数，在新载具和工况中独立验证。
- 零阻力入门算例（课件4.1、4.2）中，上升后恢复平衡推力仍继续上升：已有速度保留，制动需要反向加速度；同归一化输入也可能因初态、参数或控制边界得到不同轨迹。
- 阶段实验A4把预测、运行和证据连成完整建模；曲线合理还需单位、时间、可比条件和结论范围。

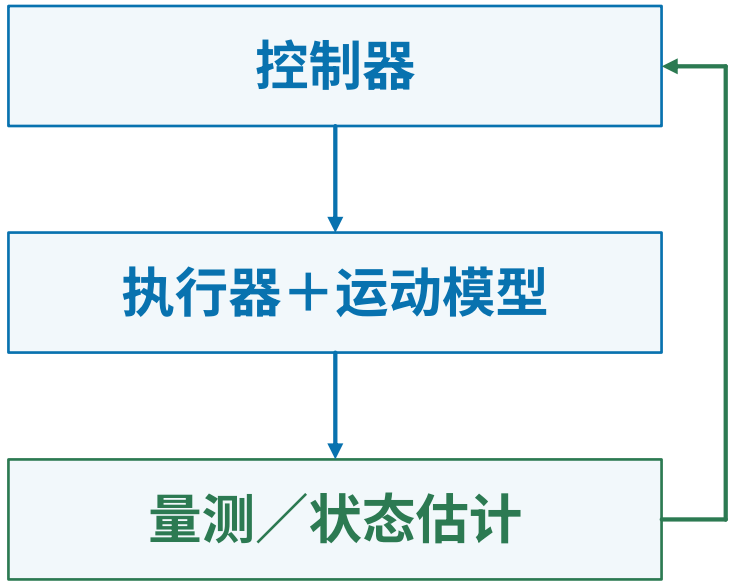


建模把物理关系、计算实现与验证证据连成完整链条。

4.12.4 结果讲评与全章总结：进入第五章的模型边界

带着明确的模型进入第五章

- **带入第五章：**已验证的状态、输入范围、执行器动态、量测及其时延误差，支撑稳定与跟踪控制设计。
- 保留同一模型基准；改变控制器后按共同条件比较，区分控制效果与模型参数变化。
- 让每条运动曲线都能追溯到输入、转速、受力和状态；保存来源与独立验证，使他人能够复现。



先知道模型能描述什么，才能合理设计控制器。

本章小结

本章小结：描述运动的核心概念

- **概念·坐标与姿态（课件4.1）：** NED地面系与FRD机体系；欧拉角与旋转矩阵R描述姿态，R把机体系向量转到地面系；四元数保存姿态，由机体角速度更新。
- **概念·刚体与积分（课件4.2）：** 牛顿–欧拉方程描述平动与转动；数值积分按步长推进状态，步长影响精度与稳定。
- **概念·部件与环境（课件4.3）：** 执行器为稳态函数串联一阶动态，拉力$T = c_{\mathrm{T}}\varpi^2$；风、大气与比力接入受力和观测。
- **概念·动态系统（课件4.4）：** 状态空间与传递函数表达同一局部模型；阶跃响应读时间常数，频率响应读幅值比与相位。

本章小结

本章小结：建模、辨识与复现的方法

- **方法·实现与接口（课件4.5、4.9、4.10）：**逐步编程、代码生成与部署、API／SDK接口，把方程落实为可调用的模型。
- **方法·参数测量（课件4.6）：**台架测参数，用静态辨识得到稳态关系。
- **方法·线性化与离散（课件4.4）：**配平并线性化得局部模型；按零阶保持把连续模型离散为采样更新。
- **方法·动态辨识（课件4.7）：**辨识动态参数，用自由仿真和独立数据验证。
- **方法·迁移与复现（课件4.8、4.11）：**新载具先重新声明状态、输入与约束；用例程体系在同一条件下复现结果。

本章小结

本章小结：模型结论的适用边界

- **局部模型（课件4.4；本节「小角度近似的误差」页）：** 线性化与小角近似只在工作点附近成立；按允许误差定范围，如1%对应倾角约14°。
- **离散化边界（课件4.4）：** 一阶模型前向欧拉的收敛条件为$0 < T_s < 2\tau$；步长等于上限时误差等幅振荡，超过上限则发散。
- **数据来源（课件4.6、4.7）：** 教学合成数据只检验计算链；声称实物精度，须有来源匹配的独立实测。
- **输入边界（课件4.7）：** 指令→力矩、力矩→角速度、指令→角速度是不同对象，结论只对所选边界成立。
- **适用工况（课件4.6、4.8）：** 参数随电压、桨型与载荷变化；结论写明工况、输入范围与验证方式。
- **时间推进（课件4.9、4.10）：** 仿真时间按基本步长推进；加速只缩短墙钟耗时，仿真时间的含义不变。

本章小结

本章小结：常见易错点

- **NED符号：** z_D向下为正，高度$H = -z_D$；向上推力是负的z分量（课件4.1、4.3）。
- **R与R^T：** R把机体系向量转到地面系，反向转换用R^T（课件4.1）。
- **重力只计一次：** 合力只含一次重力；比力是非重力合力除以质量（课件4.2、4.3）。
- **度与弧度：** 三角函数、小角近似和姿态积分一律用rad（课件4.1）。
- **rpm与rad/s：** $\varpi = 2\pi n/60$（n为rpm），c_T按rad/s取值（课件4.3、4.6）。
- **一步预测与自由仿真：** 一步预测每步用实测状态，验证看自由仿真（课件4.7）。
- **闭环数据与裸对象：** 参考值到输出是闭环关系；用实际对象输入、输出及适当方法仍可辨识裸对象（课件4.7）。
- **训练误差与独立验证：** 训练误差只说明拟合；验证数据须未参与估计（课件4.7）。