本章目录

例程体系与综合实践

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 5 个教学单元

4.11.1 发布资源与实践路线
教材对应：第4.3.1节

4.11.2 M0离线基准
教材对应：第4.2.3节

4.11.3 代码部署与接口实验
教材对应：第4.2.3、4.2.4节

4.11.4 辨识与载具实践
教材：4.2.5.1、4.2.5.3、4.3.1–4.3.2节

4.11.5 综合修改与复现交付
四工况复盘、组件替换重算与实验包交付

4.11 例程体系与综合实践

4.11.1 发布资源与实践路线：共同基准与任务分支

建立M0基准后，选择参数辨识、部署接口或载具迁移

共同基准：M0为课件4.9的部署基线Exp1_MinModelTemp.slx（1.515 kg）。

共同M0基准：四工况、两步长；完成后选做一条路线

参数辨识（4.11.4）

资源：教学动态数据。
有Advanced数据时，
再做真实静态拟合。
交付：估计与独立验证。

部署与接口（4.11.3）

资源：DLL / 初态接口。
交付：部署或请求记录；
目标实例的新状态读回。

载具迁移（4.11.4）

资源：载具基线。
交付：输入、约束与
运动响应对照。

各路线保存输入、初态和带时间、单位的日志。

4.11.1 发布资源与实践路线：资源根目录

从自己的安装目录进入第四章例程

- 从[安装目录]/RflySimAPIs/4.RflySimModel进入；先看Intro.pdf、Index.pdf与API.pdf，再按各例Readme.pdf找依赖。
- **复制完整工程：**SLX是结构，初始化M文件是参数，DLL是产物，BAT是启动配置；同名文件须记录完整路径。
- 直接DLL入口：0.ApiExps/12.DllModelImport/4.ModelLoadMannual/ModelLoadApiTest.py，用法见4.11.3。

SLX	结构与端口
M	参数与初态
DLL	编译产物
BAT	启动配置

模型、参数与启动文件对应同次构建，结果才有可追溯来源。

4.11.1 发布资源与实践路线：资源职责

接口、基础、进阶和定制例程各承担什么任务

- 0.ApiExps按接口组织实验，确认接口约定：输入输出、单位、坐标系、频率与时序。
- 1.BasicExps提供最小模板与基础载具，用于读方程、改参数、生成DLL和建立基线。
- 2.AdvExps提供进阶模型；3.CustExps仅完整版及以上提供，部分只含编译产物；依赖按各例Readme确认。

API	确认接口约定
Basic	建立最小基线
Advanced	扩展建模能力
Custom	按项目条件选择

图：四类例程的用途

资源按教学目的分层，目录编号不是强制的执行顺序。

4.11.1 发布资源与实践路线：入门实验包

入门实验包：五个子目录分别完成什么实验

入口：[安装目录]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/1.BasicExps/e6_ModelingLearningLab/Readme.pdf

运行：进入子目录按Readme.pdf操作；结果写入outputs或另传的可写目录。

子目录	实验任务	依赖条件
01_VerticalRigidBody	分阶段运动建模	基础MATLAB
02_ComponentChecks	部件模型自检	基础MATLAB或Python
03_Identification	参数与动态辨识	基础MATLAB；真实静态另需进阶数据
04_VehicleKinematics	车辆运动学对照	基础MATLAB
05_M0Checks	M0四工况离线测试	Simulink与模型库

复制完整入门包，使程序、说明与教学CSV保持配套；参数与数据在各实验内解释。

4.11.1 发布资源与实践路线：固定工况

运行前写出一张工况记录

- 记录源路径、质量惯量与修改值，再写输入维数、单位、初态、风和地面；它们共同确定一次试验。
- 四工况与两步长各保留CSV、比较图和结果说明；结论指向具体列与物理时刻，不只保存截图。
- 扩展只选一项并保留基线；区分无阻力基准、完整模型、合成数据与闭环条件的适用范围。



明确输入、初态和比较量，实验才有可以检验的预测。

本章目录

例程体系与综合实践

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 5 个教学单元

4.11.1 发布资源与实践路线
教材对应：第4.3.1节

4.11.2 M0离线基准
教材对应：第4.2.3节

4.11.3 代码部署与接口实验
教材对应：第4.2.3、4.2.4节

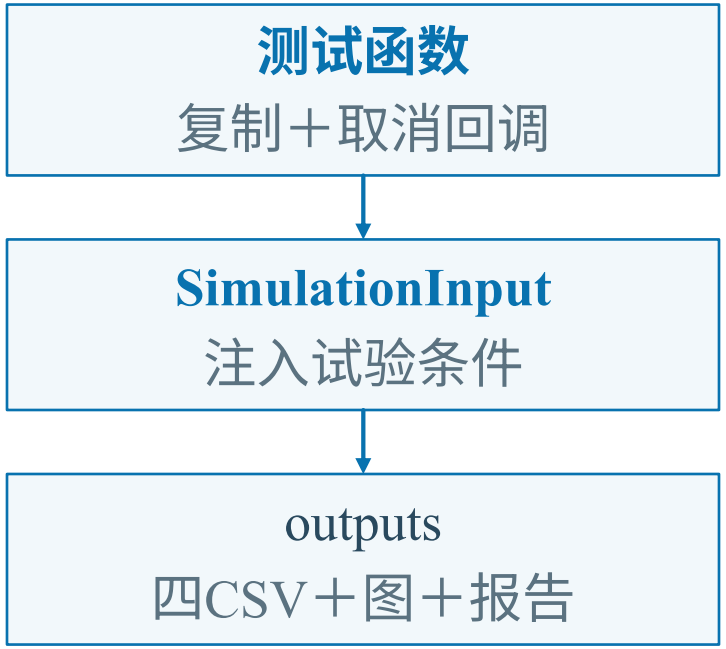
4.11.4 辨识与载具实践
教材：4.2.5.1、4.2.5.3、4.3.1–4.3.2节

4.11.5 综合修改与复现交付
四工况复盘、组件替换重算与实验包交付

4.11.2 M0离线基准：运行入口与结果文件

M0必做实验：打开配套测试函数

- M0即1.BasicExps/e0_MinModelTemp中的Exp1_MinModelTemp.slx；在入门包05_M0Checks运行report = m0_offline_checks。
- 函数建立M0测试副本，再运行zero、balanced、startup和motor1四工况；参数来源及改动保存到report.json。
- outputs保存四CSV、positions.png与report.json；model_copy保存副本，原安装模型保持原样。



一次运行保存四组工况，先读输入与初值，再检查响应。

4.11.2 M0离线基准：初始化只执行一次

测试副本怎样保持初态不被覆盖

- 源模板InitFcn会运行同名初始化文件；直接改工作区初态，可能在启动时被默认值覆盖。
- 配套函数复制SLX并取消副本InitFcn；读取源参数后，用SimulationInput传入工况和根输入。
- 须从m0_offline_checks启动才能传齐工况参数；只打开副本点Run会缺少这些设置。
- 重复运行前关闭此前打开的M0_OfflineLab副本，否则函数开头的检查会报错停止。



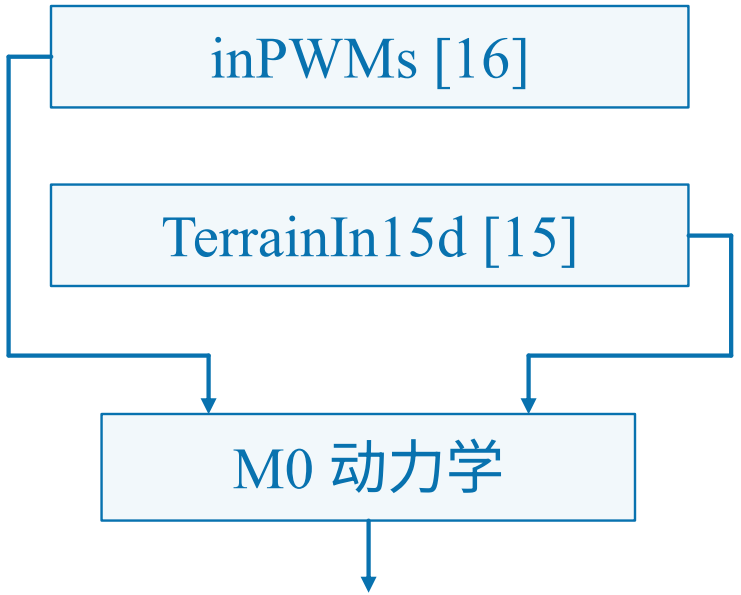
图：副本初始化顺序

启动回调若覆盖工况，结果就不再对应所设初态。

4.11.2 M0离线基准：构造两条根输入

把两个根端口接成可重复的输入

- inPWMs为16维，前四项对应四个电机，其余置零；0.53为归一化指令，不是微秒数。
- TerrainIn15d为15维，首项为地面向下坐标1000 m，其余置零；它不同于机体位置p_D。
- Dataset按根端口顺序装入两条timeseries；首尾均给出恒值，覆盖0到停止时刻。



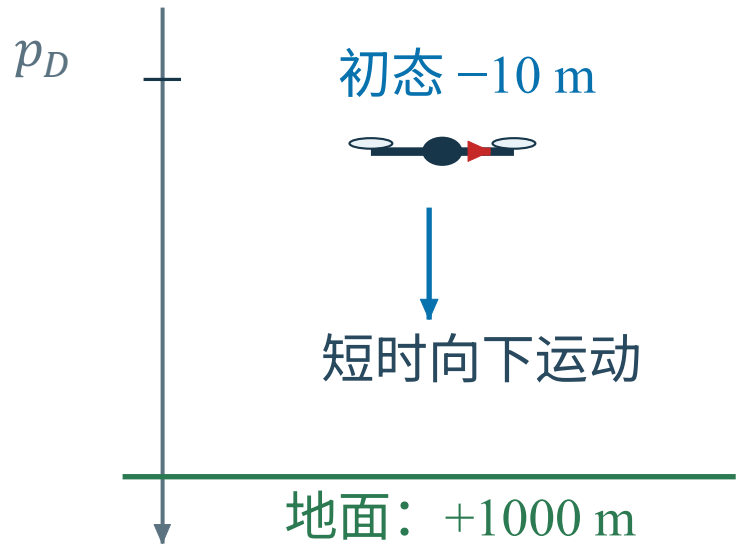
图：M0的两个根输入

归一化执行器输入和地形输入都由时间序列显式提供。

4.11.2 M0离线基准：解析副本的题设

M0基准的参数与物理边界

- M0为1.515 kg、$g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$；初态$[0,0,-10]$ m，速度与姿态均为零。
- 地面设在向下1000 m处；1 s内只下落约4.9 m，接触支路不起作用。
- 阻力与旋转阻尼置零，结果可以解析计算；完整M0仍含阻力与地面支路。



图：解析副本的初态与地面

解析检验采用明确简化的M0副本，完整模型仍保留气动和接触。

4.11.2 M0离线基准：读日志字段

日志中哪些列回答运动问题

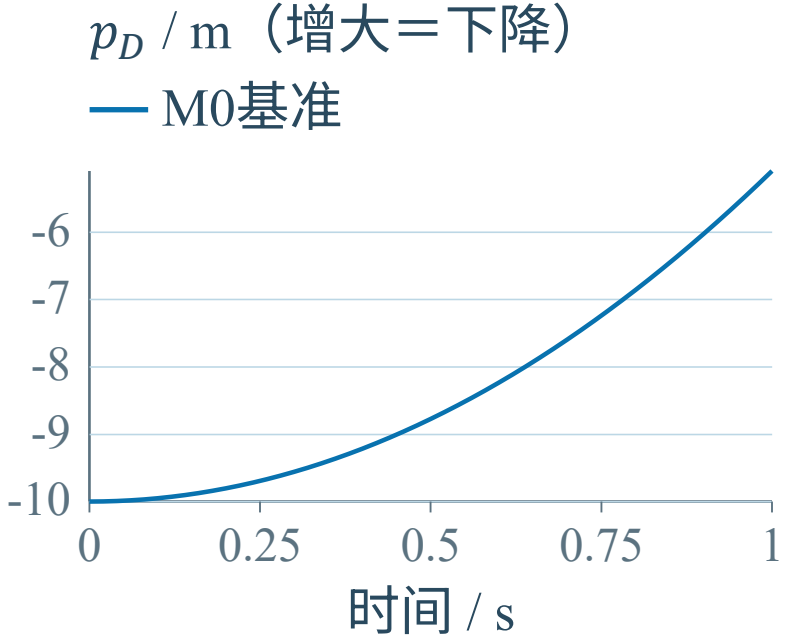
- CSV给出time_s、pN_m、pE_m、pD_m与三个速度分量；p_D增大表示向下运动，曲线上升即下降。
- roll_rad、pitch_rad、yaw_rad为欧拉角；p_rad_s、q_rad_s、r_rad_s为机体系角速度，一般不等于欧拉角导数。
- omega1_rad_s至omega4_rad_s来自MotorRads。ModelInit_RPM虽含RPM，实际也按rad/s传入，不再乘$60/(2\pi)$。
- u1_norm等保存输入；FxB_N等为含重力的机体系合力，MxB_Nm等为合矩。本基准无接触，合力列不是单独推力。

日志说清坐标、单位和物理时刻，曲线才有可检验的含义。

4.11.2 M0离线基准：零输入基准

工况一：零输入得到什么轨迹

- **题设：** 16维输入与电机初态均为零，从$p_D = -10$ m静止释放1 s，重力沿NED向下。
- **预测：** $v_D = gt$，$p_D = -10 + gt^2/2$；$g = 9.81$ m/s²，1 s时$p_D = -5.095$ m。
- **结论：** zero.csv在1 s时速度为9.81 m/s，与解析解的最大位置差约3.2×10^{-14} m，积分实现与解析基准一致。



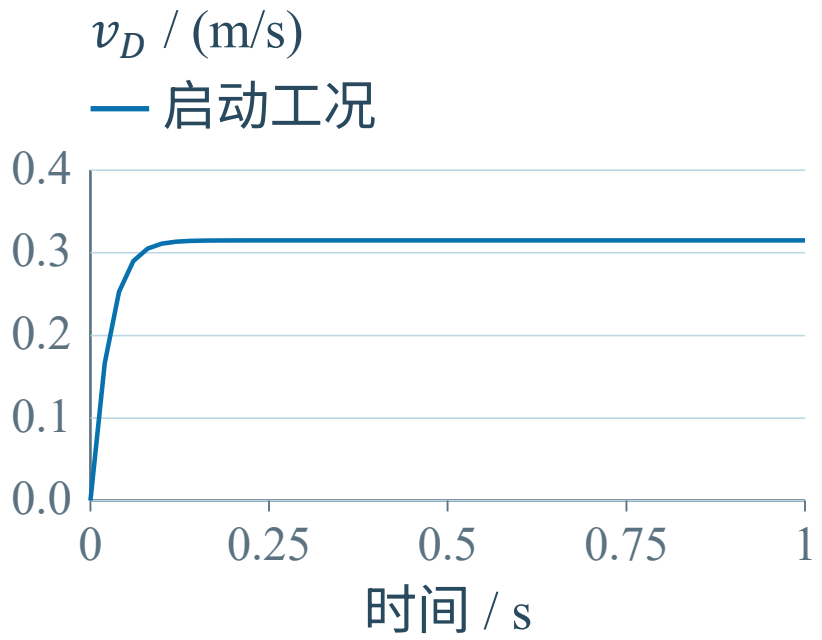
图：零输入下落轨迹

在无接触、无气动和零初速条件下，零推力产生自由落体。

4.11.2 M0离线基准：平衡与启动

同一平衡输入，两种电机初态

- **平衡：** $4c_{\mathrm{T}}\omega_h^2 = mg \Rightarrow$
  $\omega_h = 470.139745$ rad/s，
  $u_h = (\omega_h - 22.83)/842.1 = 0.53118364$。
- balanced以此为初转速，高度保持−10 m；startup初转速为零，推力建立留下下降速度；1 s时 $p_D = -9.692961$ m、$v_D = 0.314901$ m/s。
- 无阻力、无高度控制时，平衡推力保持已有的下降速度；图为startup日志。



图：启动后的下降速度

稳态推力平衡同时要求正确输入和与之匹配的电机初态。

4.11.2 M0离线基准：启动过程的受力与运动

推力恢复平衡后，启动下沉的速度仍会保留

全程结果

$t = 1.000$ s

同一平衡输入 $u = 0.531184$

A：悬停初转速



$T/mg = 1.000$

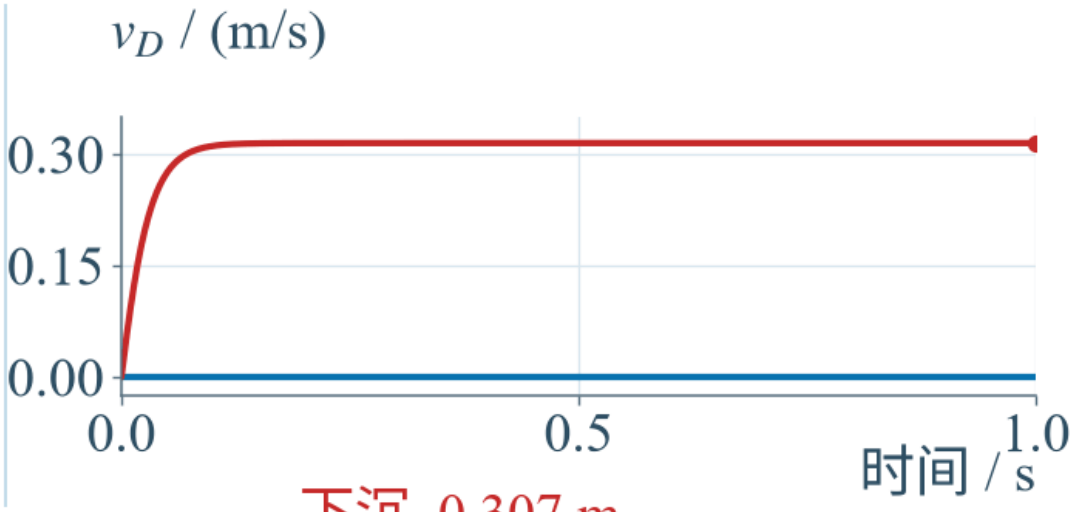
$v_D = 0.000$ m/s

B：零初转速



$T/mg = 1.000$

$v_D = 0.315$ m/s



下沉 0.307 m

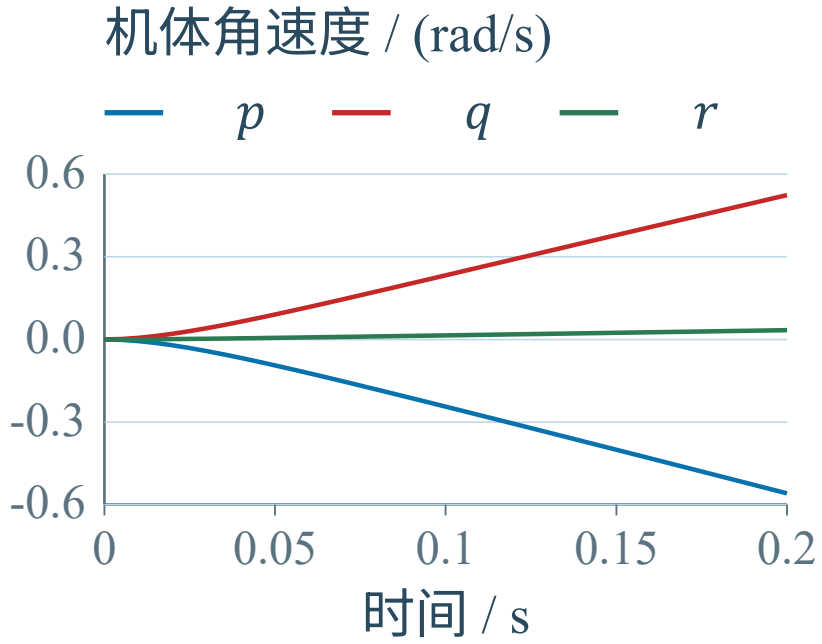
图：按M0参数解析复算；无接触、无阻力、无高度控制

从初始时刻保持悬停，需要平衡输入与匹配的电机初态。

4.11.2 M0离线基准：单电机增量

工况四：给一号电机增加小量

- motor1从平衡转速开始，仅第一路输入加0.03；其余三路不变，观察0.2 s初期响应。
- **0.2 s终值（rad/s）：**
  $p = -0.559288$、$q = 0.523040$、$r = 0.033456$。
- 一号桨在前右方$\boldsymbol{r}_1 = [+, +, 0]$，增推$\Delta\boldsymbol{F} = [0, 0, -\Delta T]$，由$\boldsymbol{r}_1 \times \Delta\boldsymbol{F}$得$M_x < 0$、$M_y > 0$；反扭矩使$M_z > 0$。



图：单桨增量的角速度

单电机增量同时改变总推力与多个轴的力矩。

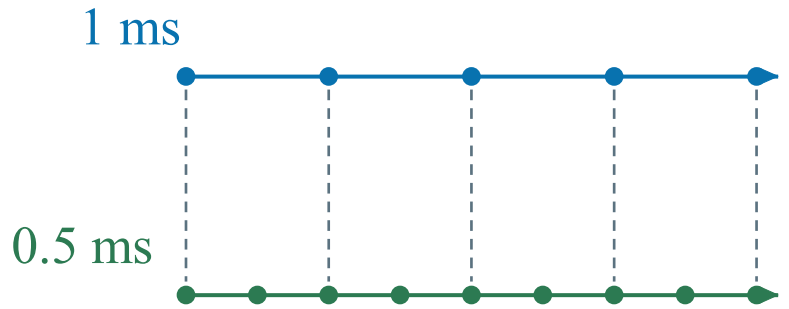
4.11.2 M0离线基准：共同时间比较

换一个步长，比较同一物理时刻

- **两次运行：**只改输出目录与步长
  m0_offline_checks([],'results_1ms',0.001)
  m0_offline_checks([],'results_05ms',0.0005)

- **按time_s对齐：**1 s在两日志第1001与2001条数据，不含表头；相同行号不是同一时刻。

- **结论：**startup在1 s的位置差约1.02×10^{-8} m，motor1在0.2 s的滚转角速差约7.8×10^{-11} rad/s；适用于本短时ode4（四阶龙格—库塔）基准。



竖线连接同一时刻

数值收敛比较必须保持模型、输入和初态相同。

4.11.2 M0离线基准：异常定位

看到异常时，按因果顺序定位

现象	首查环节	检查对象
初态不对	初始化	CSV首行与InitFcn回调
零输入不下落	地面接触	TerrainIn15d首项与接触力
转速异常	输入→转速	门限、尺度与通道顺序
转速对、加速度错	转速→合力	拉力系数、质量与坐标
姿态方向异常	力矩→角速度	桨号、力臂、旋向与机体系符号
两步长结果不同	数值求解	time_s对齐与步长

先排除时间对齐与步长，再查参数或结构；一次只改一个假设，在共同工况重复比较。

输入、执行器、受力和状态逐层核对，可以缩小故障范围。

4.11.2 M0离线基准：保存结果之后怎样检查

从report和CSV重算一项结论

- **来源：** outputs中report.json存参数与来源，zero.csv存带时间的状态；预期输出约−5.095、−5.095和10^{-14}量级的差。
- **复算：** 取1 s样本与无阻力预测比较；初态−10 m，重力从报告读取为9.81 m/s²。

```
R = jsondecode(fileread('outputs/report.json'));
Z = readtable('outputs/zero.csv');
[~, i] = min(abs(Z.time_s - 1));
assert(abs(Z.time_s(i)-1) < 1e-9);
pred = -10 + 0.5*R.gravity_m_s2*Z.time_s(i)^2;
disp([Z.pD_m(i), pred, Z.pD_m(i)-pred]);
```

用报告中的参数和日志中的时间重算结果，才能确认一条曲线的来源与含义。

本章目录

例程体系与综合实践

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 5 个教学单元

4.11.1 发布资源与实践路线
教材对应：第4.3.1节

4.11.2 M0离线基准
教材对应：第4.2.3节

4.11.3 代码部署与接口实验
教材对应：第4.2.3、4.2.4节

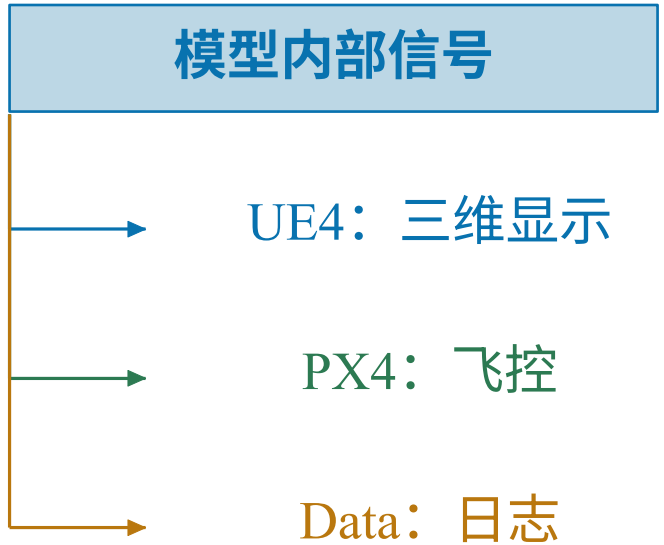
4.11.4 辨识与载具实践
教材：4.2.5.1、4.2.5.3、4.3.1–4.3.2节

4.11.5 综合修改与复现交付
四工况复盘、组件替换重算与实验包交付

4.11.3 代码部署与接口实验：接口数据流

接口例程：先确定数据流向

- **0.ApiExps共12组（编号无5）：** 1.ApiExpsIntro导航；2.UserDefinedC++连接代码；3.ExtCtrlAPI交互；4.InitAPI配置初态。
- **输出三路：** 6.ExtToUE4向虚幻引擎4（UE4）发送显示数据，7.ExtToPX4服务飞控，8.OutCopterData记录自定义内部量。
- 画面只作场景解释，动力学推进看仿真时间；8.OutCopterData的32维输出逐项标单位。



选择接口先问数据从哪里来、由哪个模块消费。

4.11.3 代码部署与接口实验：输入接线

输入接口：数据必须接到模型中

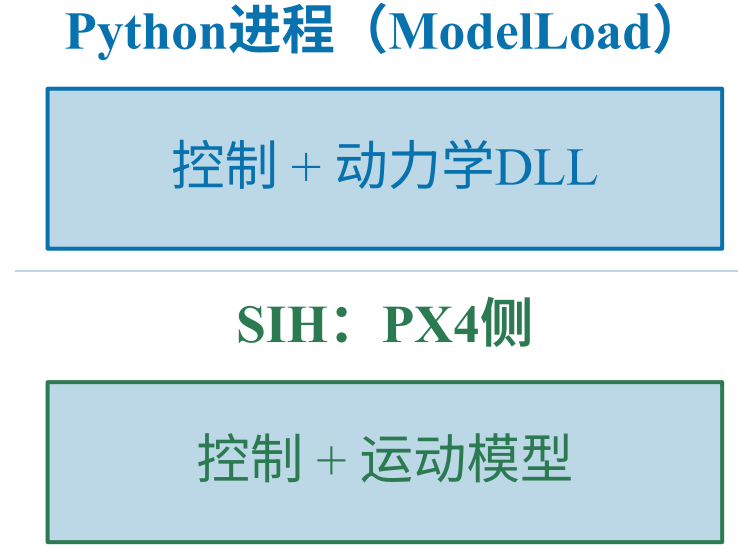
- 9.inCopterData将飞控侧状态、遥控或扩展数据引入模型；10.InCollisionAPI引入碰撞信息，力的形成仍取决于消费模块。
- 11.inSILAPI接收外部整数与浮点数组。当前示例含显示相关连线，不能把首个浮点值直接解释为风速或质量。
- 若要注入风速，先在副本中明确三个字段的NED方向和米每秒单位，再接入风模型；修改前后保存同一输入工况作对照。

收到一组数据与改变一种物理作用之间，还隔着模型连线。

4.11.3 代码部署与接口实验：两类扩展链

直接DLL与SIH是两条不同的扩展链

- 12.DllModelImport含直接加载与CopterSim加载；4.ModelLoadMannual的入口是ModelLoadApiTest.py。
- 硬件内仿真（SIH）让模型在PX4侧执行；13.SIHModelSim含COM、FLY与SITL说明分支。
- 按所选分支Readme核对解释器、DLL位数（32/64位）与初始化；DLL是否含控制器取决于该模型。



图：模型的执行位置

先辨认动力学在哪个进程中计算，再选择启动与记录方法。

4.11.3 代码部署与接口实验：直接DLL输入边界

直接DLL例程怎样读出自己的输入边界

- 进入0.ApiExps/12.DllModelImport/4.ModelLoadMannual，按Readme运行Python38Run.bat，或在匹配环境中执行python ModelLoadApiTest.py。
- 脚本构造MultiCopterDll，调用SendVelNED与ModelUpdate后打印位置和速度；默认MulticopterNOpx4.dll内部含控制环节。
- ModelUpdate参数是要求推进的时长，按DLL步长取整数步；
  若内部速度环正常，打印速度应逐步趋近目标（推断）。
- **排查：**先用Python38Run.bat打开随附的Python环境再运行；加载库报错时，按该例Readme常见问题更新PX4PSP工具箱。

速度命令属于综合模型接口，不是裸动力学的电机输入。

4.11.3 代码部署与接口实验：一次构建的文件一致性

从SLX到DLL：保持一次构建的文件一致

- 用e0_MinModelTemp生成DLL（见课件4.9），保存日志与哈希，再核脚本DLLModel实际加载对象。
- 解析副本关闭阻力与接触，原模板不同；对比SLX/DLL必须统一参数、初态、输入、步长与输出时间。
- 接PX4或综合DLL后输入边界改变；同时记录目标和电机输入，避免把控制响应当成裸动力学。

裸动力学输入

电机量 → 动力学

闭环系统输入

目标 → 控制 → 动力学

同一份参数、模型和构建产物必须成套记录。

4.11.3 代码部署与接口实验：单载具软件在环

按当前脚本启动一架载具

- SITL（软件在环）：进入1.BasicExps/e0_MinModelTemp，运行Exp1_MinModelTemp_SITL.bat，提示时输入载具数量1。
- 脚本选择DLLModel=Exp1_MinModelTemp并复制DLL；启动前保存已有工作，可能重启CopterSim。
- 在CopterSim窗口核对实际模型、实例编号、递增的仿真时间与状态更新；解锁起飞按该例Readme.pdf操作。
- **判据：**CopterSim显示“PX4：GPS 3D fixed & EKF initialization finished.”后再控制；本模型地形高度恒为0，只用平地地图。

先确认当前模型、实例和初态，再施加控制命令。

4.11.3 代码部署与接口实验：初态请求与读回

用一次初态请求检查接口是否接对

- 请求格式与原脚本副作用见课件4.10.3单元「平面初态请求」「例程入口」页；本节只保留一条XYyaw请求，检查目标ID与读回。
- 判据：请求后目标ID读回$x = 2$ m、$y = -1$ m、$\psi = 30°$（约0.5236 rad），且CopterSim中的仿真时间继续递增。
- 请求前后各记录一次目标ID的位置、偏航与仿真时间；两次不同且与请求一致才算接通，“发送成功”的打印不能代替读回。

请求值和回读状态一致，才能确认接口作用于目标实例。

4.11.3 代码部署与接口实验：最小初态请求副本

保留一条请求，明确目标实例与结果判据

- 先启动一架SITL，再在原例程目录复制testReqCopterSim.py为个人副本，只保留：

```
import ReqCopterSim
req = ReqCopterSim.ReqCopterSim()
print(req.getSimIpList())
CopterID = 1; print(req.getSimIpID(CopterID))
req.sendReSimXYyaw(CopterID, [2, -1, 30])
```

目标实例	请求参数	CopterSim读回	时间与状态
仅向已确认的列表内ID发送	[2, -1, 30] x/y：m；偏航：°	x≈2 m，y≈−1 m 偏航≈30°	前后记录时间 确认新时间、新状态

读不到新状态时判未证实，不继续发送其他重设命令。

4.11.3 代码部署与接口实验：停止、复位与重跑

同一工况重跑前先结束旧实例

- SITL：先在QGC降落并上锁，结束启动窗口的PX4运行，按BAT末尾提示退出；脚本清理会关闭同机全部CopterSim、QGC和RflySim3D，不要与其他实验共用会话。
- 初态请求：记录ID、请求参数与前后状态/时间；重跑基线时重启单机BAT，不向旧实例连续重设。DLL脚本结束后重建进程。
- 输出：留存SITL日志路径、截图时间和API读回；ModelLoadApiTest.py仅打印位置/速度，应保存控制台文本。缺日志不报数值验收。

停止旧实例、复位初态、保存带时间记录，才可比较重跑。

本章目录

例程体系与综合实践

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 5 个教学单元

4.11.1 发布资源与实践路线
教材对应：第4.3.1节

4.11.2 M0离线基准
教材对应：第4.2.3节

4.11.3 代码部署与接口实验
教材对应：第4.2.3、4.2.4节

4.11.4 辨识与载具实践
教材：4.2.5.1、4.2.5.3、4.3.1–4.3.2节

4.11.5 综合修改与复现交付
四工况复盘、组件替换重算与实验包交付

4.11.4 辨识与载具实践：辨识例程路线

动力系统辨识：沿数据产生顺序选例程

- e11_PowerSysIdModel按准备、静态、整体/分部、动态辨识组织；静态关系不能确定时间常数。
- e12_ModelTempId含阻力、惯量与D0建模模板，参数与M0不同；e13_CopIdModel含工具与在环扫频。
- dryer2.mat是方法演示数据。处理飞行日志前说明控制器是否在被辨识对象内，区分闭环与部件动态。

静态测试
推力—转速关系
↓
动态测试
时间常数
↓
飞行扫频
对象＋控制边界

先分清数据怎样取得，再决定拟合哪一部分模型。

4.11.4 辨识与载具实践：真实静态与教学动态

数据实践：教学动态与真实静态两条路线

- 在入门包03_Identification运行identification_beginner；Advanced数据存在时读取Static_data.mat上升段91点。
- 缺少静态MAT时跳过真实拟合，仍验证教学动态。右图只展示真实数据的静态训练误差。
- 教学动态对象$K = 1000$ rad/s、$\tau = 0.05$ s；独立验证RMSE为2.1483 rad/s、FIT（拟合度）为98.9168%，只描述该教学对象。

静态训练RMSE / N

$T = c_T\omega^2$



0.3357

$T = a\omega^2 + b\omega$



0.1039

训练更好 ≠ 已独立验证

图：静态训练RMSE（同一记录）

真实静态数据与教学动态对象分别形成各自的证据。

4.11.4 辨识与载具实践：基础例程入口

基础例程：选一个能够读懂的起点

目录	载具	入口模型文件	先观察什么
e0_MBDIntro	说明	Readme.pdf	建模流程背景
e0_MinModelTemp	四旋翼	Exp1_MinModelTemp.slx	接口与求解过程
e1_MinModelTempLib	四旋翼	Exp1_MinModelTemp.slx	库封装与复用
e2_FixWingModelCtrl	固定翼	AircraftMathworks.slx	空速与升力
e5_FixedWingManuscriptMdl	固定翼	FixedWingManuscriptMdl.slx	另一套实现
e3_CarAckermanModeCtrl	阿克曼	CarAckerman.slx	前轮转角与曲率
e4_CarR1DiffModelCtrl	差速车	CarR1Diff.slx	左右轮速差

选前先写问题：气动力看固定翼，转向与接触看地面车，接口与求解看最小模板。

基础模型先服务一个明确问题，再扩展成完整应用。

4.11.4 辨识与载具实践：差动车迁移的模型与场景

默认迁移差动车，按模型、机架和场景成套准备

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/1.BasicExps/　入口：各例程Readme.pdf		
项目	差动车（默认迁移）	阿克曼车（替代）
例程	e4_CarR1DiffModelCtrl	e3_CarAckermanModeCtrl
SITL启动脚本	CarR1Diff_SITLRun.bat	CarAckerman_SITLRun.bat
PX4机架	r1_rover	generic_ground_vehicle

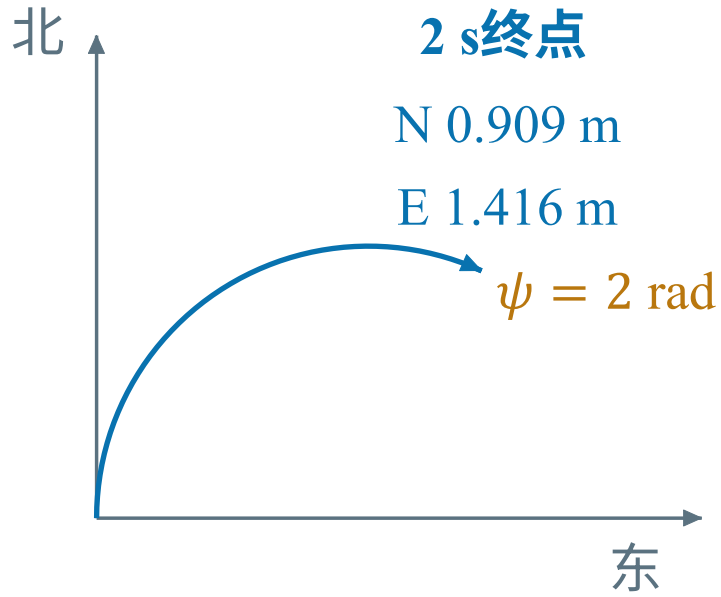
- **步骤：**编译SLX、运行GenerateModelDLLFile.p得到DLL → 运行SITL脚本、输入1 → QGC中解锁，地图上选“Go to location”。
- **判据：**RflySim3D显示“CopterSim/PX4 EKF 3D Fixed:1/1”后车驶向目标点；未设机架时默认按四旋翼启动，v1.14及以上固件另需配置执行器页（见Readme.pdf）。

低速直行与转向应先满足接口和接地条件，再比较运动预期。

4.11.4 辨识与载具实践：车辆离线预期

以理想运动学终点作为车辆迁移的预期

- 理想运动学基准已在课件4.8「离线轨迹对照」页运行（入门包04_VehicleKinematics的vehicle_migration_baseline）。
- 左右轮速12/8 rad/s的2 s终点如图，即迁移预期；推导见课件4.8「差速圆弧的位移计算」页。
- 迁移到e4_CarR1DiffModelCtrl或e6_CarR1DiffCtrl时，先核输入是轮速还是目标；保存实际轮速、偏航和轨迹，解释接触与滑移差异。



图：差速车2 s理想轨迹

先有理想预期，再用完整车辆模型解释接触与动态差异。

4.11.4 辨识与载具实践：六旋翼与八旋翼例程入口

安装例程把六旋翼和平铺或共轴八旋翼分成不同入口

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/2.AdvExps/e2_MultiModelCtrl/			
子目录	机型	SITL（软件在环）启动脚本	PX4机架
4.HexModelCtrl	六旋翼	HexarotorModelCTRL_SITLRun.bat	hexa_x
5.OctoCoxRotor	共轴八旋翼	OctoCoxRotorSITLRun.bat	octo_cox
6.OctoX	平铺八旋翼	OctoX_SITLRun.bat	octo_x

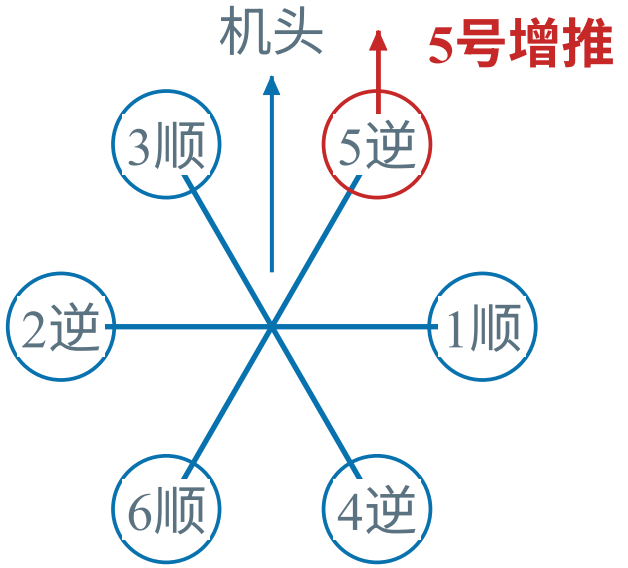
- **步骤：**读子目录Readme.pdf → 运行*_init.m → 改SLX后运行GenerateModelDLLFile.p生成DLL → 管理员运行SITL脚本、输入1 → QGC中起飞。
- **判据与排查：**CopterSim显示已连接UE4、RflySim3D中飞行正常；否则核对bat与初始化文件的电机数和输入编号，HITL（硬件在环）另需飞控与QGC机架设置。

真实模型、输入映射和机架设置应作为一套布局配置。

4.11.4 辨识与载具实践：多旋翼进阶

改变机架结构或控制入口

- e1_MaxModelTemp提供完整模板；e2_MultiModelCtrl含碰撞、六/八旋翼、系留等分支。
- 改桨数要重新核通道、力臂及合力合矩映射；NoPX4分支也可能包含内部控制器。
- 先预测六旋翼单通道力矩方向，再记录输入与响应；换构型与换控制器分别比较。
- **参考要点：**5号桨在前右、逆时针；增推后 $M_x < 0$ 、$M_y > 0$且$|M_y| \approx 1.73|M_x|$，反扭矩使$M_z > 0$。



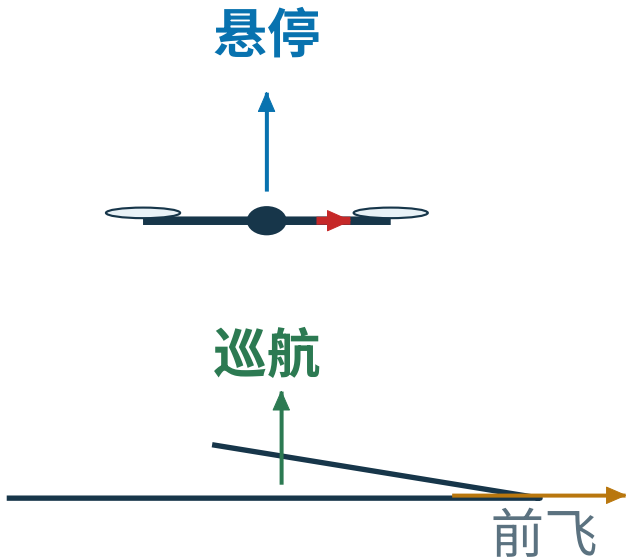
Hexa X编号；顺/逆＝俯视旋向

构型变化与控制入口变化是两种不同的扩展。

4.11.4 辨识与载具实践：空中载具

空中载具进阶：先分清飞行阶段

- e3_FWingModelCtrl适配固定翼；
  e4_VTOLModelCtrl含垂直起降、尾座式和模式切换。
- e8_Helicopter含直升机位置/速度控制；e10_Wing提供飞翼及启动脚本，力源不同于四旋翼。
- 固定翼先看平飞；垂直起降（VTOL）先分别验证悬停与巡航，再看过渡，各阶段分开比较。



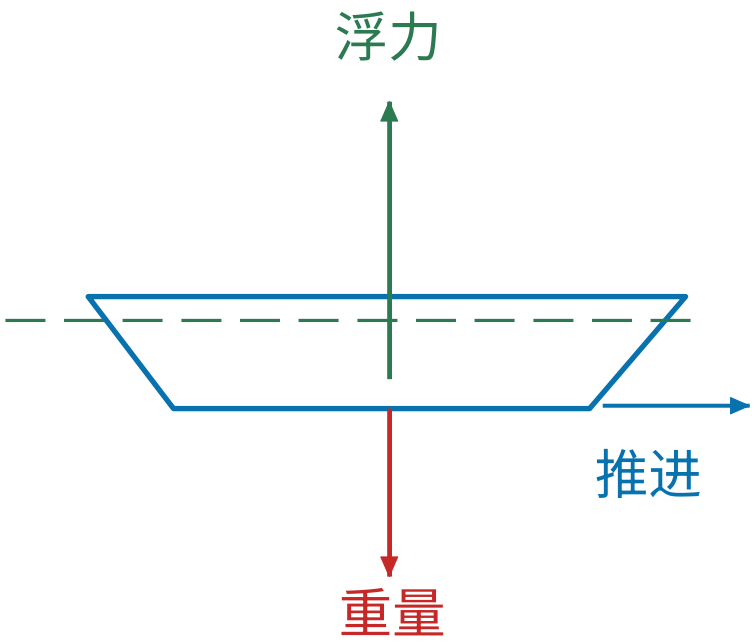
旋翼支撑 → 机翼升力

固定翼、垂直起降与旋翼载具的主要验证工况不同。

4.11.4 辨识与载具实践：地面与水中载具

接触条件与工作介质决定受力模型

- e5_CarAckermanCtrl与e6_CarR1DiffCtrl提供控制分支；e7_TrailerModelCtrl增加牵引约束。
- e9_USV是水面艇，e9_UUV是水下器；两目录都编号e9，运行时必须写全名。
- 车看轮地接触与滑移，艇看浮力、阻力和推进；相同坐标下仍须独立验证外力模型。



跨载具迁移保留状态方程思路，重新解释产生力的机制。

本章目录

例程体系与综合实践

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 5 个教学单元

4.11.1 发布资源与实践路线
教材对应：第4.3.1节

4.11.2 M0离线基准
教材对应：第4.2.3节

4.11.3 代码部署与接口实验
教材对应：第4.2.3、4.2.4节

4.11.4 辨识与载具实践
教材：4.2.5.1、4.2.5.3、4.3.1–4.3.2节

4.11.5 综合修改与复现交付
四工况复盘、组件替换重算与实验包交付

4.11.5 综合修改与复现交付：解释四工况

从实验结果反推模型条件

- 同输入下balanced不落而startup下落：指出不同初态，用转速、合力、速度三层关系解释。
- zero高度不变时先核电机与地面；接触力抵消重力会形成静止，不能据此宣称自由落体失败。
- **把静态辨识的新动力组件用于M0副本：**旧悬停输入是否还可用？重算工作点，提出一个验证工况。
- **参考要点：**①电机初转速不同；②先查初态与地面接触；③见“M0组件替换参考”页。

同输入不同位移

电机初转速?

零输入却静止

地面接触?

换动力组件

悬停工作点?

相同模型下的四个工况分别检验不同环节。

4.11.5 综合修改与复现交付：M0组件替换参考

M0替换组件后如何重算悬停工作点

- **条件：**只把4.6真实静态拟合的拉力系数 $c_T = 2.657299 \times 10^{-5}$ N/(rad/s)²作为M0教学替换件；M0质量1.515 kg、g=9.81 m/s²、四桨对称及其余参数不变。

- **新工作点：**$T_0 = mg/4 = 3.7155375$ N，$\omega_0 = \sqrt{T_0/c_T} \approx 373.930$ rad/s；原M0的 $c_T = 1.681 \times 10^{-5}$ 对应约470.140 rad/s，旧输入需重算。

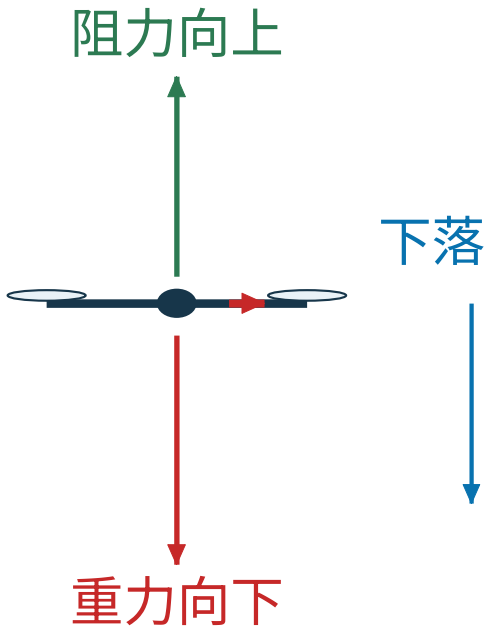
- **新输入：**沿用M0稳态映射 $\omega = 842.1u + 22.83$ 且未触门限或饱和时，$u_0 \approx 0.416934$；以相同初转速短时运行（无接触、无阻力），核对合力约为0、高度不变；更换映射时须重新标定。

组件系数变更后，按M0质量和输入映射重算，不套用2 kg题值。

4.11.5 综合修改与复现交付：恢复阻力

恢复环境项：提出一个有方向的预测

- 复制m0_offline_checks.m，另存为m0_drag_check.m；同步函数名，结果写入results_drag。
- 设params.ModelParam_uavCd=0.055并同步report.test_overrides.uavCd；其他初态和输入不变。
- 替换zero的无阻力解析assert，保留有限值、时长与初态检查；和原zero.csv同一时刻比速度与位置。
- **预测1 s：** $0 < v_D < 9.81$ m/s，$-10 < p_D < -5.095$ m；无风阻力向上，下降比基准慢。



恢复阻力改变受力机制，比较时仍应保持输入与初态相同。

4.11.5 综合修改与复现交付：阻力副本的代码改动

m0_drag_check：三处改动与一段对照代码

- **改动：**①第1行函数名；②平动阻力恢复源值0.055并同步记录；③zero分支删去无阻力解析断言，其余检查保留。
- **对照：**运行m0_drag_check([],'results_drag')后，取两份zero.csv的1 s同一时刻比较。

```
function report = m0_drag_check(apiRoot, outDir, stepSize)   % 第1行改函数名
params.ModelParam_uavCd=0.055;   % 原为0；旋转阻尼uavCCm仍为零
report.test_overrides.uavCd=0.055;   % 写在原test_overrides赋值之后
% zero分支：删去 assert(item.max_pD_error_m<1e-5 && ...) 这一解析断言
Z = readtable('outputs/zero.csv');  D = readtable('results_drag/zero.csv');
[~,i] = min(abs(Z.time_s-1));  [~,j] = min(abs(D.time_s-1));
disp([Z.vD_m_s(i) D.vD_m_s(j); Z.pD_m(i) D.pD_m(j)])
```

派生副本只改阻力一项并保留原基准，差异才能归因于阻力。

4.11.5 综合修改与复现交付：整理可复现的实验包

综合任务：建立一个能复现的M0实验包

任务对象：用安装版M0完成四工况与两步长比较。
记录解析副本的阻力、阻尼和地面设置。

材料	文件与内容	复现检查
源文件	测试函数、来源记录与参数	记录安装版M0来源与修改值
工况	四工况、两步长的输入与初态	输入与初态对应本次试验
日志	CSV与比较图	时间与单位；同物理时刻对齐
结论	报告：每组输入、预测及实际响应	按原基线复算并解释差异

扩展只选一条路线：参数辨识、部署与接口或载具迁移。
保留共同基准，解释修改带来的变化。

自查参考值

M0基准复现后，逐项对照这些数值

对照口径：M0质量1.515 kg、$g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$、步长1 ms，初态与输入不变。

工况	参考值	判读
zero	1 s：$p_D = -5.095\ \mathrm{m}$，$v_D = 9.81\ \mathrm{m/s}$	自由落体
balanced	1 s：$p_D = -10\ \mathrm{m}$，$v_D \approx 0$	高度不漂移
startup	1 s：$p_D = -9.692961\ \mathrm{m}$，$v_D = 0.314901\ \mathrm{m/s}$	起转后下沉
motor1	0.2 s：$p = -0.559288$，$q = 0.523040$，$r = 0.033456\ \mathrm{rad/s}$	负、正、正
两步长	startup在1 s的位置差约$1.02 \times 10^{-8}\ \mathrm{m}$	按time_s对齐

这组数值来自05_M0Checks随包参考结果，属于离线计算；模型或参数版本不同时，以本次report.json为准。

课堂练习

M0加重到1.8 kg：重算悬停点，再判断起转下沉

- **题设：**M0质量改为1.8 kg，其余参数不变（$c_T = 1.681 \times 10^{-5}$，$\omega = 842.1u + 22.83$，电机时间常数$\tau = 0.0214$ s，$g = 9.81$ m/s²）。
- **问题：**①重算ω_h与u_h；②startup工况（电机从零起转，输入取新的u_h）1 s时的下沉量，比1.515 kg时大还是小?
- **参考要点：**①$\omega_h = \sqrt{mg/(4c_T)} \approx 512.456$ rad/s，$u_h \approx 0.581435$。
- ②不变，仍约0.307 m：$a_D = g[1 - (\omega/\omega_h)^2]$，起转时$\omega/\omega_h = 1 - e^{-t/\tau}$与质量无关（输入未饱和时成立）。

改质量须重算工作点；起转下沉由电机时间常数决定，与质量无关。

本节小结

固定基准、追踪数据流、一次只改一项

- **本节方法：**先写工况记录，用M0四工况与两步长建立可复算基准；接入平台时沿代码产物、接口输入和状态读回追踪；扩展只改一项，在共同工况比较。
- **关键判断：**同一平衡输入因电机初态不同而结果不同；两步长结果接近只说明数值收敛；“发送成功”不等于状态已变；直接DLL的速度命令属于综合模型接口。
- **易错点：**NED下p_D增大即下降；ModelInit_RPM实为rad/s；InitFcn会覆盖初态；按time_s而非行号对齐；核对实际加载的DLL；区分裸动力学与闭环输入边界。
- **衔接：**课件4.12用习题与课程设计，综合检验本章的建模、仿真与辨识方法。

基准、数据流和单项修改都可追溯，模型差异才能归因。