本章目录

典型无人载具建模与扩展

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

4.8.1 多旋翼无人机
教材对应：第4.2.5.1节

4.8.2 固定翼无人机
教材对应：第4.2.5.2节

4.8.3 地面无人车
教材对应：第4.2.5.3节

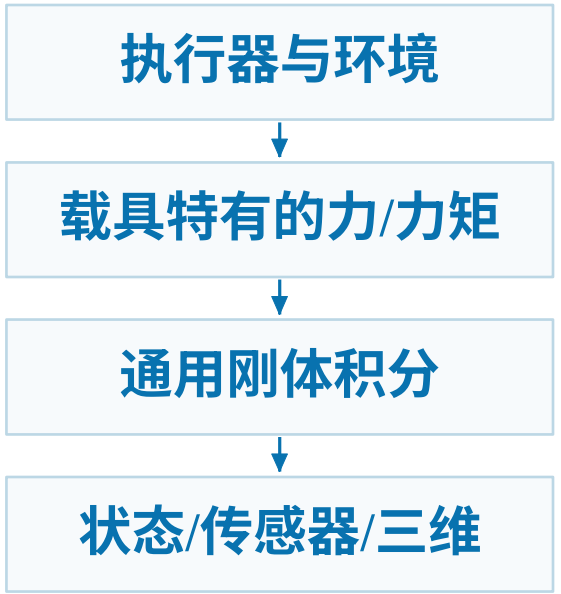
4.8.4 其他载具与模型选型
教材对应：第4.2.5.4节、第4.3.2节

4.8 典型无人载具建模与扩展

4.8.1 多旋翼无人机：对照固定翼与车辆的受力来源

换载具先换受力来源，外形编号不决定动力学

- 四旋翼、固定翼和车辆可复用刚体积分；旋翼推力、机翼气动力与轮地作用分别产生不同的合力和合矩。
- 迁移须对应执行器、受力、质量惯量、初态和环境。三维显示编号（ClassID，课件4.9介绍）只决定外形，动力学由受力模块决定。
- 沿输入追到受力模块再判断模型身份；uav、rotor、MotorRads等旧变量名只是名称，物理含义与单位以计算关系为准。



图：可复用框架与需替换的受力来源

通用刚体求解器可以复用，受力、执行器和约束必须适配。

4.8 典型无人载具建模与扩展

4.8.1 多旋翼无人机：对照其他载具的控制通道

不同载具的控制通道先与实体部件对应



图4.14 不同无人载具的控制通道

- **读图：**上排看多旋翼的桨数与布局；下排通道框见“图4.14的通道对照”页。

通道的物理含义来自执行器和布局，而不是一个通用编号。

4.8.1 多旋翼无人机：图4.14的通道对照

同一通道号在不同机型中对应不同执行器

机型	通道与执行器（作用）
常规布局固定翼	舵机1 副翼（滚转）、舵机2 升降舵（俯仰）、舵机3 方向舵（偏航）、舵机4 襟翼（增升）、舵机5 起落架；电机1 油门
飞翼布局固定翼	舵机1、2 左右副翼，兼顾滚转与俯仰；电机1 油门
复合布局固定翼	主控（旋翼模式）：电机1–4 前左、前右、后左、后右； 辅助（固定翼模式）：舵机1–4 副翼、额外副翼、升降舵、方向舵， 电机5 油门
阿克曼底盘	电机1 油门；舵机1 转向
差速底盘	电机1 左侧轮速；电机2 右侧轮速

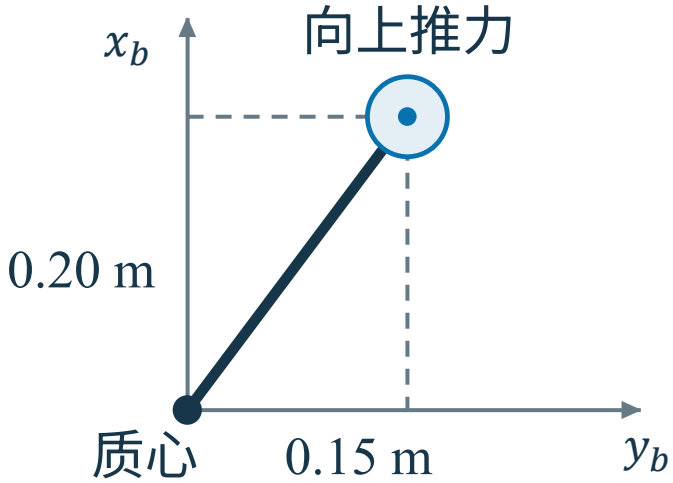
- **读图：**固定翼的通道分给舵面与油门，车辆的通道分给驱动与转向。

表：图4.14下排通道框的文字整理；编号以所选例程的映射为准

4.8.1 多旋翼无人机：单桨力矩与力臂

位置与叉乘一起决定单桨力矩

- 质心为FRD机体系原点。教学旋翼位置 $[0.20,0.15,0]^T$ m，向上推力 $[0,0,-5]^T$ N，先不计反扭矩。
- 同坐标叉乘得到 $[-0.75,1.00,0]^T$ N·m：右侧上升为负滚转，机头抬起为正俯仰，与物理方向一致。
- 斜机臂长度不等于前向、侧向投影；位置改变杠杆，电机重新编号只改变排列。反扭矩需另外相加。
- 方法同课件4.3「叉乘算例」页，这里换成前后与左右力臂不等的桨位。



俯视：推力朝纸外

图：位置投影决定力臂

位置向量决定同样推力能产生多大的滚转与俯仰力矩。

4.8.1 多旋翼无人机：逐桨合力与合矩

逐桨合成受力，再比较旋翼分担

- 各桨沿负z_b推力，$T_i = c_{\mathrm{T}}\omega_i^2$；滚转、俯仰贡献分别为$-y_iT_i$、$x_iT_i$。
- 反扭矩系数为c_{M}，$s_i = \pm 1$按机体所受反扭矩方向取号；每一列对应一个真实电机，系数不同时逐桨取值。
- 对称、同质量2 kg、g=9.8 m/s²时，总推力19.6 N：四桨各4.9 N，六桨各3.2667 N；推力比例还要经各电机的输入—推力关系才换算成油门。

$$[T, M_x, M_y, M_z]^{\top} = \sum_{i=1}^{n} [c_{\mathrm{T}},\ -y_i c_{\mathrm{T}},\ x_i c_{\mathrm{T}},\ s_i c_{\mathrm{M}}]^{\top} \omega_i^2$$

布局改变的是力矩映射，刚体运动方程仍接收合力与合矩。

4.8.1 多旋翼无人机：布局与控制分配

同一桨位矩阵如何正向合成与逆向分配

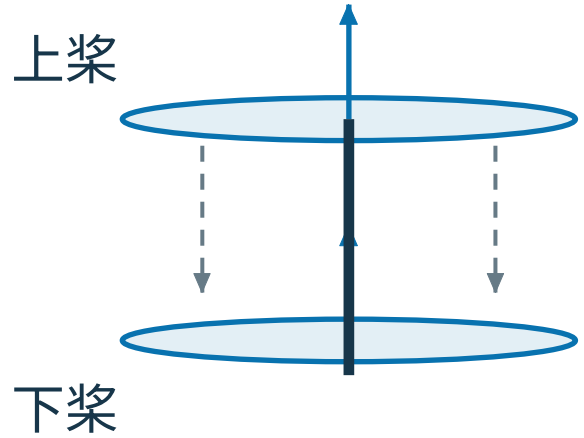
- **布局：**十字构型机臂沿机体前后、左右轴；X构型沿对角线，前向视野开阔、便于布置相机，是当前主流。同一臂长下两者的力臂和电机编号不同。
- **正向：**桨轴近竖直、刚性、未饱和且推力平方律有效时，$v = Bq,\ q_i = \omega_i^2$；$B$各列由桨位、旋向和$c_{\mathrm{T}}$、$c_{\mathrm{M}}$决定，$v$为总推力和三轴力矩。
- **逆向：**自驾仪给目标v_d，求满足$Bq = v_d$且各桨输入有界的q，再经电机标定映射到指令；满秩、可达且未饱和时才能精确实现。统一归一化尺度下，B的条件数越小，分配对扰动越不敏感。可行域判断见课件4.3「逆映射与可行域」页。
- **模板：**RflySim多旋翼模板按机型参数适配3–8旋翼常规构型；自定义构型要同步修改模型映射矩阵与自驾仪控制分配。

正向算受力，逆向算桨输入；布局变更必须重建分配矩阵。

4.8.1 多旋翼无人机：共轴旋翼的尾流干扰

四轴八旋翼的共轴布置增加了气动相互作用

- 同一机臂上下放置旋翼，横向力臂接近；下桨处于上桨尾流中，两桨不一定保持独立单桨的推力规律。
- 教材10%–20%为效率损失估计；推力损失须结合效率定义、转速或功率条件及成对台架数据确定。
- 共轴可缩小横向尺寸，效率、噪声、结构和失效余量则要逐项评价后再选型。



上桨尾流改变下桨来流

图：上下旋翼与尾流干扰

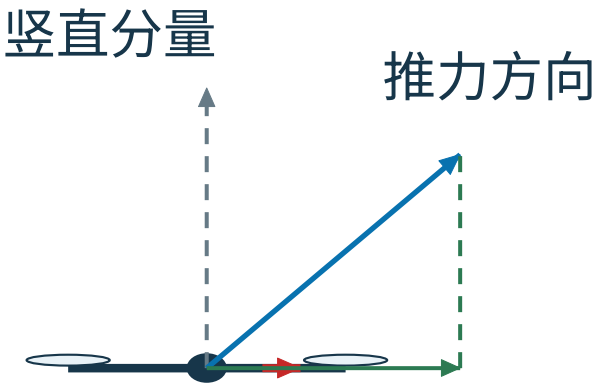
共轴旋翼的横向位置接近，却不一定保持独立单桨的推力规律。

4.8.1 多旋翼无人机：倾斜旋翼的推力方向

倾斜旋翼需要同时计算推力方向与作用点

- 单位向量$\mathbf{a}_i$给出旋翼推力方向，$\mathbf{F}_i = T_i\mathbf{a}_i$。倾转后竖直支撑和前向分量同时变化。

- 可倾转结构还需舵机角度、动态和限位；每步更新方向，再加力臂矩与反扭矩$\mathbf{Q}_i$。



图：同一推力改变方向

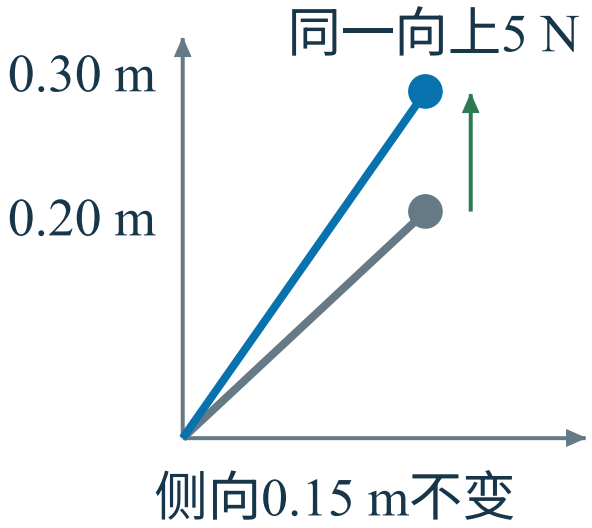
$$\mathbf{F}_b = \sum_i T_i\,\mathbf{a}_i, \qquad \mathbf{M}_b = \sum_i \left(\mathbf{r}_i \times T_i\mathbf{a}_i + \mathbf{Q}_i\right)$$

轴向变化会把推力分到多个方向，也改变合力矩。

4.8.1 多旋翼无人机：移动旋翼的力矩变化

布局迁移练习：只移动一个旋翼，预测哪项力矩改变

- 保持向上5 N及侧向位置0.15 m，把旋翼前向位置从0.20 m改为0.30 m；其他旋翼和输入不变。
- 滚转仍为−0.75 N·m，俯仰从1.00增为1.50 N·m，总推力不变。只改几何即可改变合矩。
- 记录前后位置向量、力矩和转动预期；若另行配平，把输入改变作为第二个条件单独记录。



图：只改变前向力臂

同一输入下的合力可不变，合力矩却因力臂变化而改变。

本章目录

典型无人载具建模与扩展

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

4.8.1 多旋翼无人机
教材对应：第4.2.5.1节

4.8.2 固定翼无人机
教材对应：第4.2.5.2节

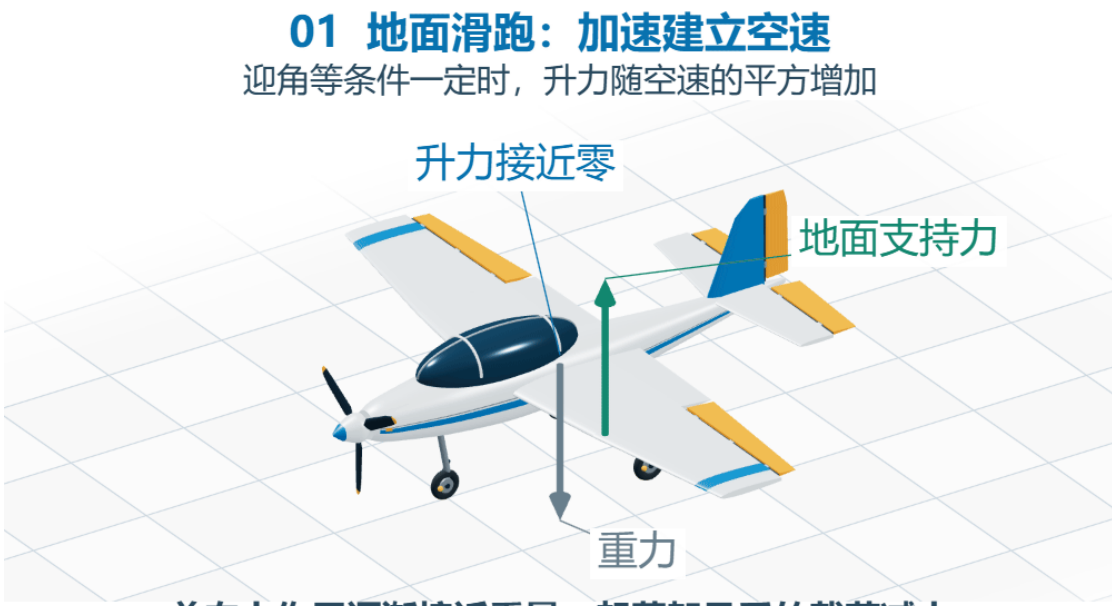
4.8.3 地面无人车
教材对应：第4.2.5.3节

4.8.4 其他载具与模型选型
教材对应：第4.2.5.4节、第4.3.2节

4.8.2 固定翼无人机：机翼承重与前向推进

固定翼靠机翼承重，靠推进维持相对空气运动

- 常规固定翼靠机翼在相对气流中承重，推进主要克服阻力；舵面改变局部气动力，形成姿态力矩。
- 油门先改推进，再经空速改变机翼受力；抬头先改姿态，航迹还取决于空速与当前受力。
- **观察滑跑、离地和转弯：**支撑力在离地后消失，升力方向随飞行状态变化。这是无风教学示意。



图：从地面支撑到空中承载

推进、机翼与舵面通过空速耦合，不能用四个竖直推力替代。

4.8.2 固定翼无人机：相对空速与气流角

由相对空气速度计算空速、迎角和侧滑

- **相对速度：** 地速$[15,0,0]^{\mathrm{T}}$、风速$[5,2,0]^{\mathrm{T}}$ m/s，在NED中相减得$\mathbf{v}_{a,e}=[10,-2,0]^{\mathrm{T}}$ m/s，模长10.198 m/s。
- **转到机体系：** 取$\phi=\psi=0$、俯仰$\theta=5.71^\circ$，$\mathbf{v}_{a,b}=R^{\mathrm{T}}\mathbf{v}_{a,e}=[9.950,-2,0.995]^{\mathrm{T}}$ m/s，旋转不改变模长。
- **气流角：** $V_a=10.198$ m/s，$\alpha=\mathrm{atan2}(0.995,9.950)=5.71^\circ$，$\beta=\arcsin(-2/10.198)=-11.31^\circ$；无滚转且来流水平时，迎角等于俯仰角。

- 内部三角函数用弧度；零空速时角度无定义，要改用低速分支以避免除零。

$$\mathbf{v}_{a,b}=R^{T}(\mathbf{v}_{e}-\mathbf{v}_{w,e}),\quad \alpha=\mathrm{atan2}(w_a,u_a),\quad \beta=\arcsin(v_a/V_a)$$

气动力取决于相对空气速度，必须先在同一坐标系做减法。

4.8.2 固定翼无人机：动压与承重系数

动压降为四分之一，承重所需升力系数变为四倍

- 动压$\bar{q}=\rho V_a^2/2$。教学条件$m=2$ kg、$S=0.5$ m²、$\rho=1.225$ kg/m³、$g=9.8$ m/s²，近似由机翼水平承重。
- 15 m/s时$\bar{q}=137.8125$ Pa、所需$C_L=0.2844$；7.5 m/s时为34.4531 Pa、1.1378。能否达到、是否失速，还要查机翼的最大升力系数。
- S为参考面积，$\bar{c}$为气动弦长；C_L, C_m无量纲。相同系数时力和力矩随动压减小，舵面限幅使补偿能力有限。

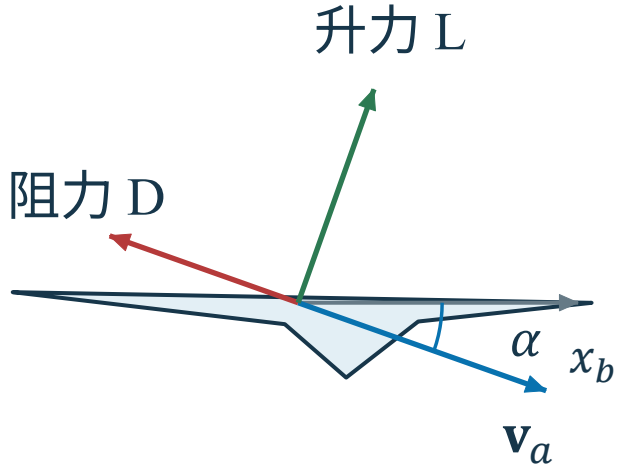
$$L=\bar{q}SC_L,\quad M_y=\bar{q}S\bar{c}C_m,\quad C_{L,\mathrm{req}}=mg/(\bar{q}S)$$

动压由速度平方决定，是机翼和舵面受力的共同尺度。

4.8.2 固定翼无人机：升阻力的坐标转换

升阻力先在气流方向定义，再转换到机体方程

- 阻力沿相对空气速度反向，升力在气流平面内垂直于速度；机头与气流不对齐时，要先旋转才得到机体轴分量。
- 从空速、角度与舵偏求气动力矩，再旋转到FRD，与推进及其他非重力作用相加，送入刚体方程。
- 重力按统一约定只计一次；若旧模板已在合力端加入重力，迁移时调整该边界，避免重复叠加。



侧视：力随气流定义

图：升力与阻力随相对气流方向定义

气动力坐标与机体系一致后，才可和推进力、力矩合成。

4.8.2 固定翼无人机：气动系数的输入与尺度

气动系数把迎角、舵偏和角速度的作用分开

- 在局部工况可写$C_L = C_{L0} + C_{L\alpha}\alpha + C_{L\delta_e}\delta_e + \cdots$，常数项、迎角项与升降舵项分别表达不同来源。
- 令b为翼展、$\bar{c}$为平均气动弦长，用它们与空速将机体角速度p, q, r归一化；无量纲角速度参与气动阻尼项，计算时保留尺度因子。
- 初始化文件InitData.m给出几何、惯量和气动系数，要连同产生系数的公式一起读；动压$\bar{q}$、俯仰角速度q与无量纲$\hat{q}$含义和单位不同。

$$\hat{p} = \frac{bp}{2V_a}, \qquad \hat{q} = \frac{\bar{c}q}{2V_a}, \qquad \hat{r} = \frac{br}{2V_a}$$

系数模型决定各输入怎样改变受力，所用单位和范围必须一致。

4.8.2 固定翼无人机：常规翼与飞翼的舵面

常规机翼和飞翼把控制需求交给不同舵面



常规布局固定翼

舵机1 副翼→滚转
舵机2 升降舵→俯仰
舵机3 方向舵→偏航
电机1 油门→推进



飞翼布局固定翼

舵机1、2 升降副翼
同向→主要俯仰
差动→主要滚转
电机1 油门→推进



复合布局固定翼

主：电机1–4 旋翼
辅：舵机1–4 舵面
辅：电机5 巡航油门
过渡时两组协同

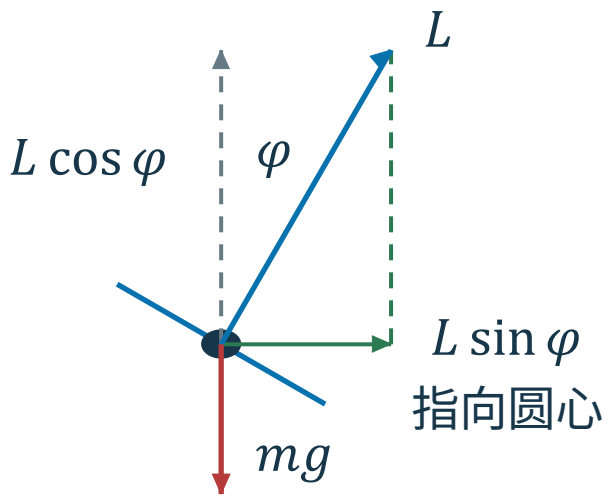
图4.14（局部）固定翼的控制通道；编号以所选例程的映射为准

通道混合由布局决定，相同控制意图不保证相同舵面动作。

4.8.2 固定翼无人机：盘旋与协调转弯

固定翼靠盘旋定点，协调转弯靠倾斜升力提供向心力

- **定点任务：**常规固定翼须保持前向空速，通常绕圈盘旋，而非原地悬停。
- **协调转弯：**滚转角φ使升力倾斜，$L\sin\varphi$提供向心力，$L\cos\varphi = mg$维持高度；阻力随之增大，要加推力补偿。
- **算例：**$V = 15$ m/s、$\varphi = 30°$时，$L/(mg) = 1/\cos\varphi = 1.155$，盘旋半径$R = V^2/(g\tan\varphi) = 39.8$ m。



图：协调转弯的升力分解（后视）

滚转角越大，盘旋半径越小，所需升力和推力也越大。

4.8.2 固定翼无人机：空速测量与飞翼起降

空速计测相对气流，飞翼起降要靠弹射、滑降等方案

- **空速计：**测相对气流而非地速，与姿态、气压和风估计共同约束迎角和动压；低空速时舵效与气动系数不可靠，读数要考虑安装和校准。

- **换算：**空速计测得动压$\bar{q}$，$V_a = \sqrt{2\bar{q}/\rho}$。$\bar{q} = 137.8$ Pa时按$\rho = 1.225$ kg/m³得15.0 m/s；若当地$\rho = 1.0$ kg/m³，实际约16.6 m/s。

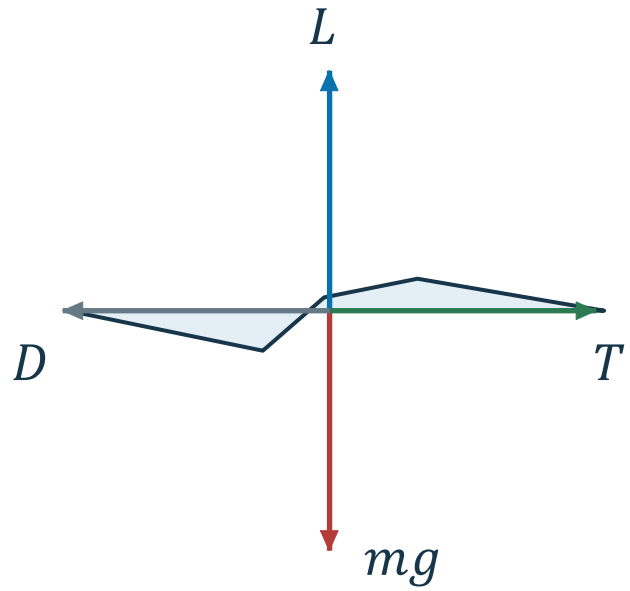
- **飞翼起降：**左右升降副翼混合俯仰与滚转；起飞需弹射或抛投达到足够空速，回收可用滑降或伞降，方式取决于机型设计与场地条件。

测空速与起降方式都受有效气动工况约束。

4.8.2 固定翼无人机：巡航初态与配平

初始化给出起点，巡航还须另求配平

- 无风直线水平巡航近似要求$L = mg$、$T = D$，各轴合矩为零；应联立求相容的迎角、舵偏与油门，位置仍随时间前进。
- 两个固定翼模板（e2、e5）的当前参数为：质量8.16466266 kg、前向初速0.001 m/s、位置姿态为零；这是起始设置，15 m/s巡航配平需另求。
- 微型模板e5还需参数脚本、MavLinkStruct总线（根端口的MAVLink数据结构定义）和航空航天模块集；地面起飞另含接触与加速。



图：巡航的力与矩平衡

给一个前向速度只是初态，满足平衡还需要合适的姿态和输入。

4.8.2 固定翼无人机：固定翼模型的方程模块

现成固定翼模型把哪些公式放在哪些模块

- 例程1.BasicExps/e2_FixWingModelCtrl的AircraftMathworks.slx含执行器映射、Actuator Model、Motor Model与Small Fixed Wing UAV Dynamics。
- 动力学内部由Compute Air Data计算空速和角度，Aerodynamic Forces and Moments计算气动力矩，再通过旋转与6DOF推进状态。
- 输出链把状态送往传感器与三维显示。沿输入、受力、状态逐段定位，可区分气动误差与传感器或显示误差。



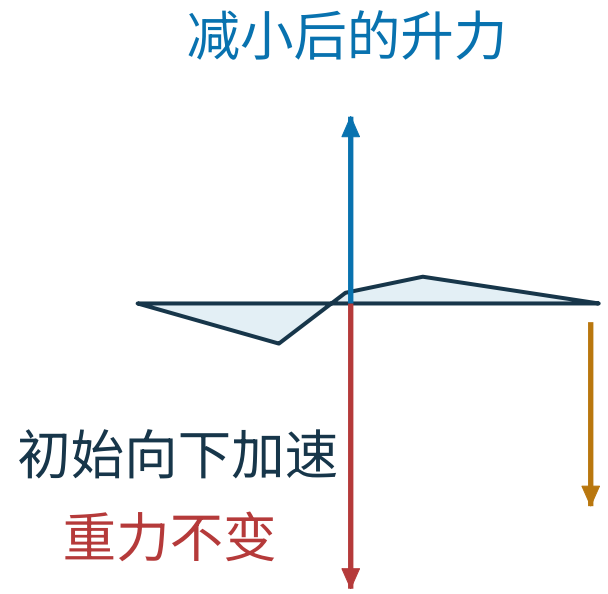
图：固定翼模型中的方程职责

气动状态、力矩合成与运动积分在真实模型中各有位置。

4.8.2 固定翼无人机：固定翼迁移的可观测预期

固定翼迁移先提出可观测预期，再进入综合运行

- 在已声明配平点保持密度、质量、输入和初态，先预测减小升力系数后的瞬时竖直合力，再启动完整模型。
- 记录空速、迎角、舵偏、姿态和高度；控制器随后会改变舵面，气动参数的作用要看瞬时响应。
- 交付表列：参数｜端口｜初态｜预期值｜实测值，运行步骤见课件4.11。课件4.11综合任务若选载具迁移，固定翼与车辆任选一种。



图：配平后减升力的瞬时作用

把参数变化、受力变化和输出变化连起来，迁移结果才可解释。

本章目录

典型无人载具建模与扩展

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

4.8.1 多旋翼无人机
教材对应：第4.2.5.1节

4.8.2 固定翼无人机
教材对应：第4.2.5.2节

4.8.3 地面无人车
教材对应：第4.2.5.3节

4.8.4 其他载具与模型选型
教材对应：第4.2.5.4节、第4.3.2节

4.8.3 地面无人车：接地约束与平面运动

地面接触产生约束，理想运动学给出低速预期

- 地面支撑承重，轮胎接触形成驱动力和侧向约束。平坦、低速、小侧滑时，可简化为位置与航向运动学。
- 两车模型都含Ground Model、Force and Moment和6DOF：驱动与转向先产生接触力，再积分出速度。
- 动画中轮式转向、履带滑移和全向轮是不同机制；动画按前左上坐标显示，转向正负以本章NED约定为准。



图：不同轮系依靠不同接触机制

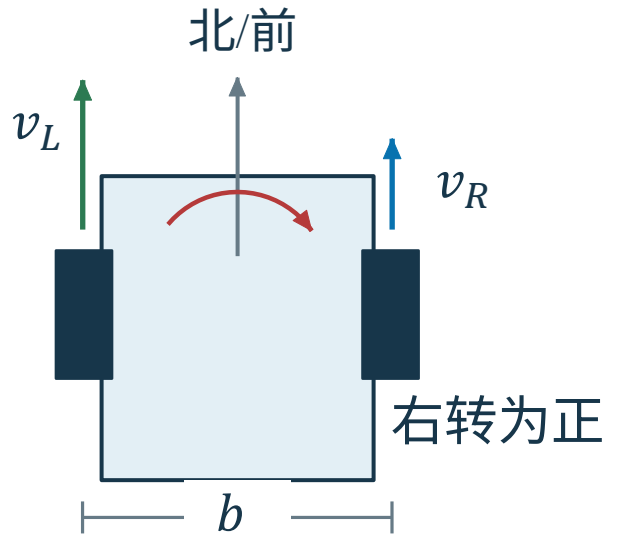
平面运动来自接触条件，不是把六自由度方程中的高度简单删掉。

4.8.3 地面无人车：差速轮速与航向

差速的平均轮速给前进，左减右给正航向

- NED/FRD下，从上看右转为正；两轮速度均以前进为正。轮距b、轮半径r_w，无滑移时$v_L = r_w\omega_L$、$v_R = r_w\omega_R$。
- 前向$v = (v_L + v_R)/2$，航向角速度$r = (v_L - v_R)/b$；左轮更快使车头向右。轮距不是前后轴距。
- 按航向把前向速度投影到北、东再积分。轮速在此作为已知量；电机滞后和摩擦需在动力学层另算。

$$\dot{x}_N = v\cos\psi, \quad \dot{y}_E = v\sin\psi, \quad \dot{\psi} = r$$



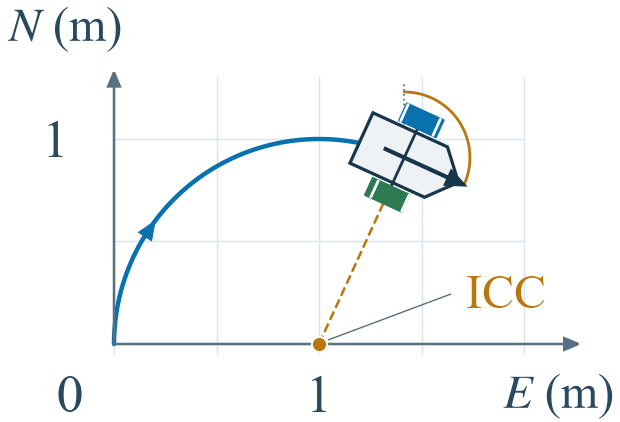
图：轮速差与NED航向

本章航向从北转向东为正，因此左轮更快产生正航向角速度。

4.8.3 地面无人车：差速圆弧的位移计算

由两侧轮速计算两秒后的圆弧位移

- 轮距0.4 m、轮半径0.1 m。
  左轮12、右轮8 rad/s；
  初始位置与航向为零，
  得$v = 1$ m/s、$r = 1$ rad/s。
- 恒定轮速使$\psi = rt$，右式给出轨迹。
  2 s：北0.9093 m、东1.4161 m、航向2 rad，
  路程2 m不等于直线位移。
- **$r = 0$须走直行分支：**北向vt、东向0，
  避免除零。图示无滑移；实际驱动与侧
  滑另行建模。



$t = 2.00$ s
$N = 0.9093$ m
$E = 1.4161$ m
$\psi = 2.00$ rad

左 12 rad/s
右 8 rad/s

图：左轮较快，小车沿圆弧右转

$$x_N = (v/r)\sin(rt)$$

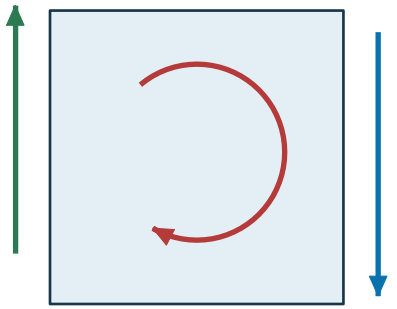
$$y_E = (v/r)[1 - \cos(rt)]$$

先积分航向，再积分随航向变化的北向和东向速度。

4.8.3 地面无人车：反向轮速与原地转向

原地转向来自大小相同、方向相反的两侧轮速

- $v_L = 0.2$ m/s、$v_R = -0.2$ m/s、$b = 0.4$ m时，平均前向速度为0，航向角速度为1 rad/s。
  - 两侧一进一退，理想中心保持不动。实际四轮差动车常伴随轮胎侧滑、摩擦耗散和电机负载变化。
  - 原地转向适合作功能试验；真实轮胎力、功耗和响应建立时间要由动力学模型或实测给出。



$$v = 0, \quad r = 1$$

图：两侧反向，中心不平移

平均速度为零时仍可有非零航向变化。

4.8.3 地面无人车：快速转弯与侧滑

低速无侧滑假设会在快速转弯时失效

① 侧向需求

$a_{\text{lat}} = v^2/R_c$；同一半径下速度加倍，侧向需求变为四倍。

② 摩擦上限

教学$\mu = 0.5$、$g = 9.8$ m/s²、$R_c = 2$ m：$v \le \sqrt{\mu g R_c} = 3.1305$ m/s。

③ 比较判断

5 m/s超过上限，所需侧向力超过接触能力，理想无侧滑圆弧不再成立。

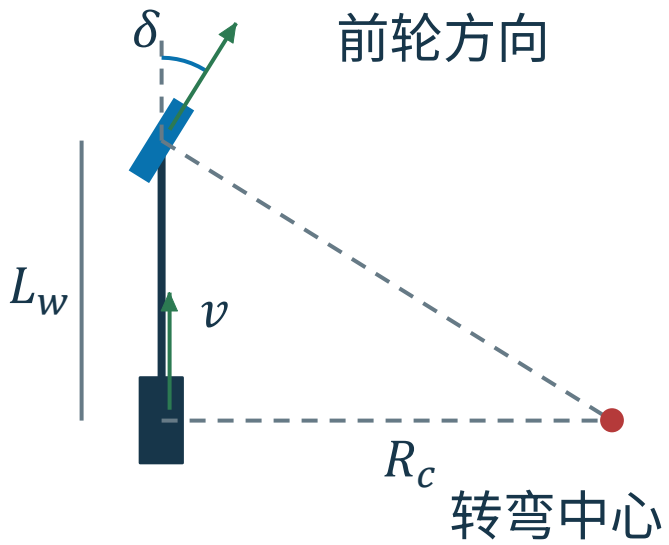
- **假设：**忽略载荷转移、纵向驱动和轮胎细节，只说明无侧滑条件何时可能失效；全工况还要看轮胎特性。

转弯所需侧向力超过接触能力时，理想圆弧不再成立。

4.8.3 地面无人车：阿克曼等效自行车

阿克曼转向可用一个等效自行车描述低速几何

- 等效前轮转角δ向右为正，轴距L_w；
  低速无侧滑时$r = v\tan\delta / L_w$，v取后轴中心前向速度。
- 内轮所在圆半径较小，因此转角较大；等效自行车以中心线概括两侧几何，省略轮胎和侧滑细节。
- 速度为零时航向角速度也为零：阿克曼车不能原地转向、转弯半径较大，但贴近汽车行驶方式，适合较高速度的轨迹跟踪。



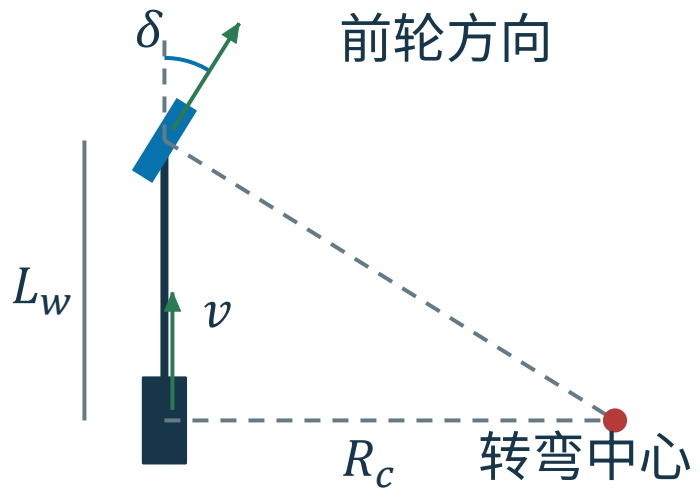
图：前轮转角、轴距与转弯半径

前轮指向决定曲率，后轮轴中心的速度决定沿圆弧前进的快慢。

4.8.3 地面无人车：轴距转角与转弯半径

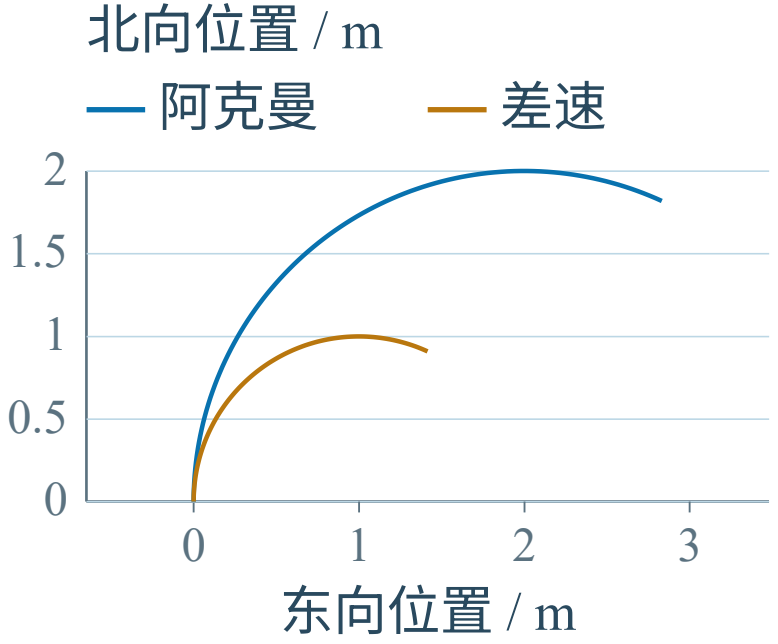
阿克曼算例：给定轴距和转角，先求转弯半径

- 教学$L_w = 1$ m、右转$\delta = 26.565°$、后轴$v = 2$ m/s，初态为零，$\tan\delta = 0.5$。



转角定曲率；同一半径下速度定航向快慢

半径2 m，
角速度1 rad/s。
2 s后北1.8186 m，
东2.8323 m，
航向2 rad。
角速度相同时，
半径加倍，
位移也加倍。



图：两组已声明参数的解析圆弧

- 曲线差别来自题设速度与几何。

4.8.3 地面无人车：离线轨迹对照

运行教学脚本，先得到一份可重算的迁移预期

- **目录：**[安装目录]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/1.BasicExps/e6_ModelingLearningLab/04_VehicleKinematics/，入口Readme.pdf。
- **运行：**只需基础MATLAB；当前目录切到该文件夹，输入metrics = vehicle_migration_baseline;，结果写入outputs，图窗不弹出时直接打开其中的PNG。

- **判据：**PNG对照解析与欧拉轨迹；vehicle_migration_results.json中差速终点约北0.9093 m、东1.4161 m，步长0.02与0.01 s的position_error_m约0.0168与0.0084 m，error_ratio约为2。
- **边界：**结果来自离线平面运动学计算，轮胎与执行器响应在平台模型中另行比较。

解析轨迹和离散积分共同提供进入平台前的数值基准。

本章目录

典型无人载具建模与扩展

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

4.8.1 多旋翼无人机
教材对应：第4.2.5.1节

4.8.2 固定翼无人机
教材对应：第4.2.5.2节

4.8.3 地面无人车
教材对应：第4.2.5.3节

4.8.4 其他载具与模型选型
教材对应：第4.2.5.4节、第4.3.2节

4.8.4 其他载具与模型选型：高阶案例新增的物理机制

从高阶案例先识别新增的物理机制与验证层级

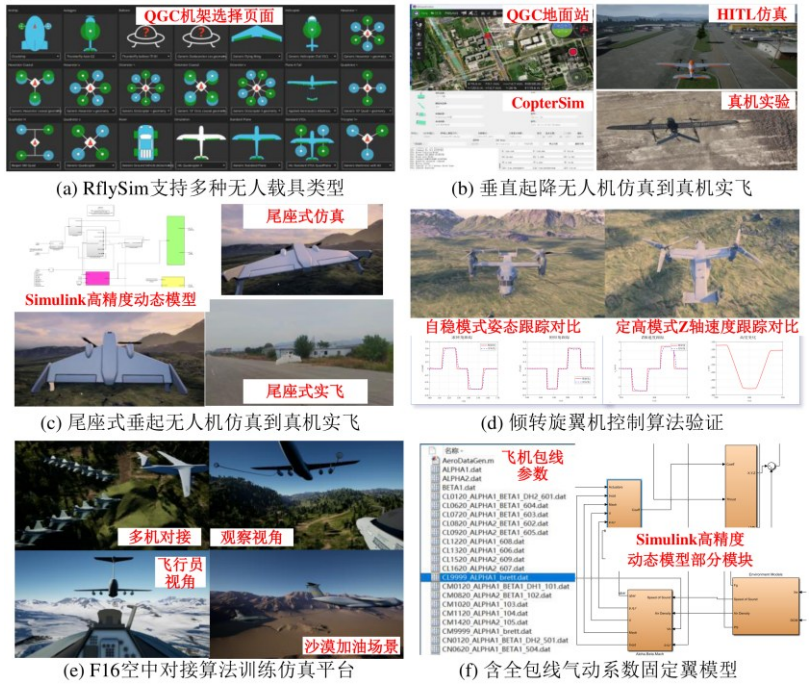


图4.15 高阶案例展示

(a) 多种载具与控制机架

(b) 垂直起降（VTOL）：仿真与实机

(c) 尾座：机体大角度过渡

(d) 倾转：机构角与跟踪验证

(e) F16：任务与观察视角

(f) 气动模型：数据与适用范围

后续：复合翼过渡、尾座与倾转、F16与全包线气动，再看水域浮力、直升机桨距和吊载拖车约束。

外观和任务不同，新增状态、受力与验证条件也随之改变。

4.8.4 其他载具与模型选型：图4.15（a）（b）局部

平台覆盖多种载具，VTOL从仿真逐级走到实飞



图4.15（a）RflySim支持的多种载具（局部）



图4.15（b）垂直起降无人机仿真到实飞（局部）

- **子图(a)**：QGC机架选择页列出多旋翼、固定翼、VTOL与车辆等机架；选定机架就确定了PX4的执行器配置。
- **子图(b)**：同一VTOL依次经QGC地面站、CopterSim、HITL仿真到真机实验；过渡受力见“复合翼的承重过渡”页。

4.8.4 其他载具与模型选型：复合翼的承重过渡

复合翼在过渡中同时依赖旋翼与机翼承重

- VTOL低速主要靠旋翼；推进建立空速后机翼逐渐承重，巡航时旋翼和支架增加阻力。
- 近水平、准稳态时 $T_{\mathrm{rotor},\uparrow} + L \approx mg$ ；这是共同承载，不是两套运动状态轮流生效。
- 升力桨承重，巡航推进建空速；低速舵效弱，过渡时连续分配推力与舵面，并验算力矩和余量。



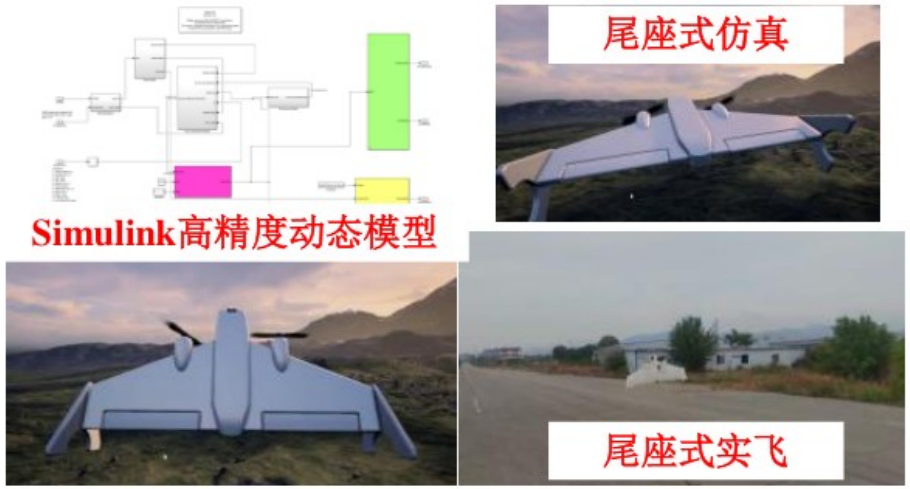
图：过渡中旋翼与机翼共同承载

过渡是受力连续变化的过程，不能只切换两个互不相关的模型。

4.8.4 其他载具与模型选型：尾座与倾转的状态差别

尾座式改变整机姿态，倾转式还改变执行器轴向

- 尾座式让整个机体从近竖直转到前飞，机翼和传感器一起旋转，姿态模型必须覆盖大角度。
- 倾转式还增加相对机身的机构角，影响推力方向并带入舵机动态、限位和耦合；不能只改变整机姿态。
- 教材尾座图并列仿真与实机；比较须统一输入与工况，过渡区精度要用全过程数据评价。



(c) 尾座式垂起无人机仿真到真机实飞

图4.15 高阶案例展示（尾座式局部）

不同过渡结构决定哪些角度属于机体状态、哪些属于机构状态。

4.8 典型无人载具建模与扩展

4.8.4 其他载具与模型选型：图4.15（d）倾转旋翼跟踪验证

倾转旋翼用姿态与速度跟踪曲线检验控制算法

自稳模式 **定高模式**

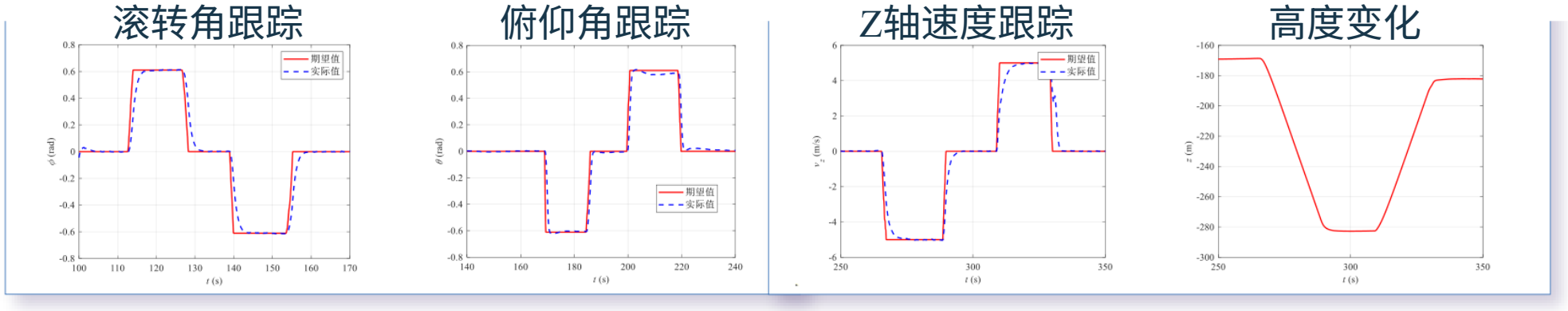


图4.15（d）倾转旋翼机控制算法验证（跟踪曲线局部）

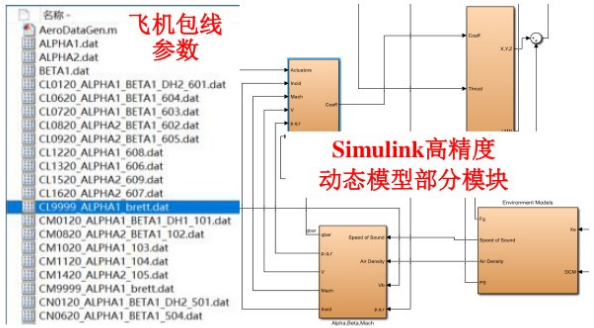
- **读图：**红实线为期望值，蓝虚线为实际值；纵轴依次为滚转角、俯仰角（rad），Z轴速度（m/s）与高度z（m），横轴为时间（s）。
- **对照：**姿态跟随方波指令、略有滞后；Z轴速度跟随±5 m/s阶跃，z变负表示上升。机构角含义见“尾座与倾转的状态差别”页。

4.8.4 其他载具与模型选型：F16场景与全包线气动

F16场景和全包线气动模型提出了不同的模型要求



(e) F16空中对接算法训练仿真平台



(f) 含全包线气动系数固定翼模型

图4.15 高阶案例展示（F16与全包线模型局部）

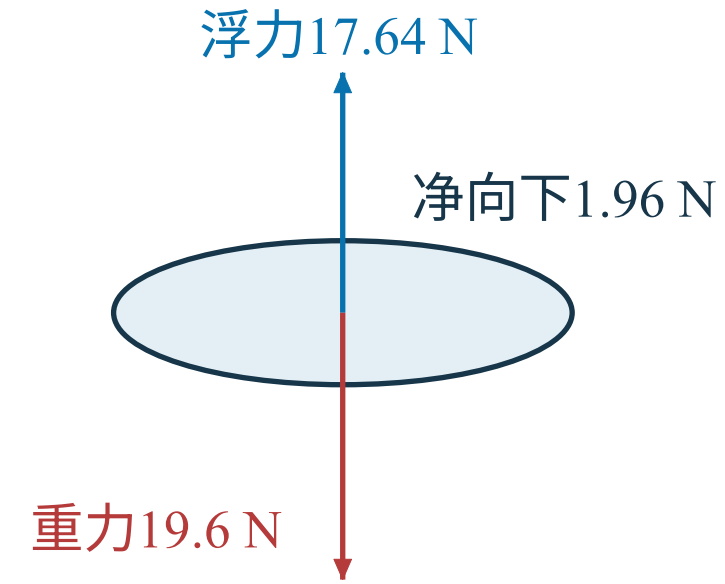
- F16场景支持任务交互和观察，全包线气动数据决定特定状态下的受力；画面复杂度不等于气动精度。
- 气动表按迎角、侧滑、马赫数和舵偏查询，须核对插值、参考尺度及表外行为；宽范围仍需独立工况验证。

任务画面与物理精度需分别评价，气动数据范围决定可支持的机动范围。

4.8.4 其他载具与模型选型：水面与水下的流体作用

水动力还需要浸没、浮力与附加质量

- 水面船艇用相对水速度计算阻力；浸没体积和浮心影响浮力与恢复力矩，周围流体随动还带来附加质量。
- **水下无人潜航器（UUV）算例：** $m = 2$ kg、$V = 0.0018$ m³、$\rho_w = 1000$ kg/m³、$g = 9.8$ m/s²，浮力$B = \rho_w g V = 17.64$ N。
- 忽略附加质量与阻尼，$a_D = (mg - B)/m = 0.98$ m/s²。中性浮力只保证竖直平衡，姿态仍取决于浮心和重心。



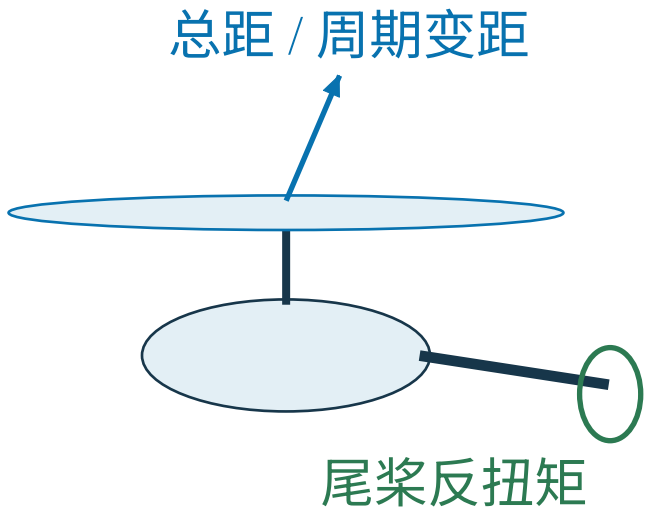
图：独立潜航器升沉算例

水域载具运动需要同时描述推进、浸没和姿态恢复。

4.8.4 其他载具与模型选型：直升机桨距与旋翼受力

直升机通过桨距改变旋翼受力，不能只视为一台大电机

- 总距共同改变叶片桨距；周期变距随方位改变桨距，调整旋翼盘受力方向，转速调节只是其中一部分。
- 尾桨或其他机构提供反扭矩和偏航作用。挥舞、诱导气流和机构动态按任务所需频段决定是否保留。
- 例程2.AdvExps/e8_Helicopter提供模型与控制示例；低频航迹可先用低阶近似，再用目标频段数据检验。



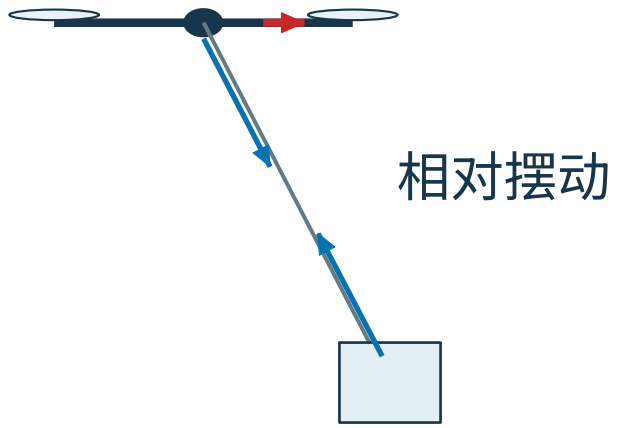
图：总距、周期变距与尾桨

总距、周期变距与尾桨使旋翼内部气动和机构状态进入模型。

4.8.4 其他载具与模型选型：吊载系留与拖车约束

吊载、系留和拖车把多个物体通过约束连接起来

- 固定载荷可并入质量、质心和惯量；吊载会相对摆动，需载荷位置或摆角，并以绳张力耦合机体。
- 理想柔绳只能拉不能推，松弛和绷紧的约束不同；系留还可能有固定端、变长度和绳自身质量。
- 拖车引入铰接角、第二物体速度及轮地接触。选择刚性、柔性或理想几何约束，由待研究任务决定。



图：绳张力连接两个运动物体

连接关系增加状态与约束力，不能只把载荷质量加到一个刚体上。

4.8.4 其他载具与模型选型：扩展机型的目录与依赖

扩展机型从已发布目录进入，工具和硬件条件分别核对

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/2.AdvExps/　入口：各例程Readme.pdf			
e3_FWingModelCtrl	常规固定翼	e8_Helicopter	直升机
e10_Wing	飞翼	e9_USV、e9_UUV	水面、水下
e4_VTOLModelCtrl	复合翼、尾座	e7_TrailerModelCtrl	拖车
e5_CarAckermanCtrl、 e6_CarR1DiffCtrl	阿克曼车、 差动车	e2_MultiModelCtrl/ 15.TetheredModelCtrl	系留

- **对应：**教材引用上表进阶例程，课件主线用1.BasicExps的最小模板e2、e5（固定翼）与e3、e4（车辆）。
- **选题：**课件4.11综合任务若选载具迁移，固定翼或车辆任选一种；复杂机型按可编辑源码、工具库和飞控条件作为扩展。

可读取示例不等于所有源码、工具箱与硬件条件已经齐备。

4.8.4 其他载具与模型选型：机制与验证层级

按任务选择模型层级，并给出可检验的迁移结论

比较项	显式方程	物理组件	引擎接触
适合	追踪参数和受力	机械、电气与流体连接	场景交互与接触
示例	本节运动学、 固定翼方程模块	Simscape物理组件 （教材第4.2.2.3节）	MuJoCo（4.9.2选学）
需核对	推导与符号约定	组件参数与求解器	接触参数与积分步长

- 低速巡检先核转向与接地，吊载抑摆须保留相对运动和张力。新增机制由任务敏感性决定，不按模型块数评高低。
- 报告复用、替换和新增的状态、受力、参数及接口，给出可计算预期和失效工况；运行见课件4.11，独立判断在课件4.12考查。

模型层级的价值在于保留任务敏感的机制，并能取得验证证据。

课堂练习

用新数据检验差速、承重、阿克曼与迁移判断

- **差速车：** $b = 0.5$ m、$r_w = 0.1$ m，$\omega_L = 10$、$\omega_R = 14$ rad/s。按本章NED约定求v、r、转向与转弯半径；若误用“右减左”，结果有何不同？

- **固定翼承重：** $m = 3$ kg、$S = 0.6$ m²、$\rho = 1.225$ kg/m³、$g = 9.8$ m/s²，分别求$V = 12$与10 m/s时的动压$\bar{q}$和所需C_L。

- **阿克曼：** $L_w = 1.2$ m、右转$\delta = 20°$，求转弯半径R_c；后轴$v = 1.5$ m/s时航向角速度r是多少？

- **迁移判断：** 任选系留无人机或水面船之一，列出相对四旋翼新增的状态、受力与参数，并给出一个可解析的验证工况和一个边界工况。

参考要点

先定符号约定与适用条件，再代数检查

- **差速：** $v_L = 1.0$、$v_R = 1.4$ m/s，$v = 1.2$ m/s，$r = (v_L - v_R)/b = -0.8$ rad/s，左转，半径1.5 m；按“右减左”得+0.8，转向判反。

- **承重：** 12 m/s时$\bar{q} = 88.2$ Pa、$C_L \approx 0.556$；10 m/s时61.25 Pa、0.80。速度降为5/6，所需C_L增为1.44倍，还要查最大升力系数。

- **阿克曼：** $R_c = L_w / \tan\delta \approx 3.297$ m，$r = v\tan\delta / L_w \approx 0.455$ rad/s，为正即右转。

- **迁移：** 以水面船为例：新增浸没体积、浮力与附加质量，水动力阻尼替代气动力；验证工况取静水漂浮的吃水平衡，边界工况取大幅横摇或出水。

本节小结

换载具保留刚体框架，逐项替换受力、执行器与约束

- **方法：**沿“执行器→受力→刚体积分→传感器”逐段替换；
  先用解析特例给出预期，再进平台对照；
  解析特例如单桨力矩、动压承重、差速圆弧、阿克曼半径。

- **边界：**理想运动学只适用于低速、无侧滑；气动系数有适用范围，
  失速要查最大升力系数；初态不等于配平；复杂机型按任务选择模型层级。

- **易错点：**NED右转为正，差速航向为左减右，“右减左”会反号；
  共轴两桨推力不能直接相加；归一化输入不等于轮速或转角；
  两套固定翼模板的端口名称与顺序不同；重力只计一次。

先用解析特例给出预期，再逐项对照平台；符号与接口顺序最易出错。