本章目录

统一故障建模框架

第七章 健康管理与安全评估

7.1 健康管理与安全评估基础
7.2 统一故障建模框架
7.3 虚实安全强化与故障数据方法
7.4 故障危害与安全评估
7.5 故障诊断与健康预测
7.6 安全决策与整机改进
7.7 故障注入接口与算法开发框架
7.8 例程实验与虚实验证
7.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

7.2.1 故障分类与统一描述
教材对应：第7.1.3.1–7.1.3.3节

7.2.2 动力与载荷故障
教材对应：第7.1.3.4节（动力、结构）

7.2.3 传感器与通信故障
教材对应：第7.1.3.4节（传感、通信、环境）

7.2.4 建模方法与健康参考
教材对应：第7.1.3.3节

7.2.1 故障分类与统一描述：建模意义

故障模型把异常变成可比较的条件

同一巡检任务中，动力衰减、定位偏差与链路延迟可能都表现为航迹偏离。

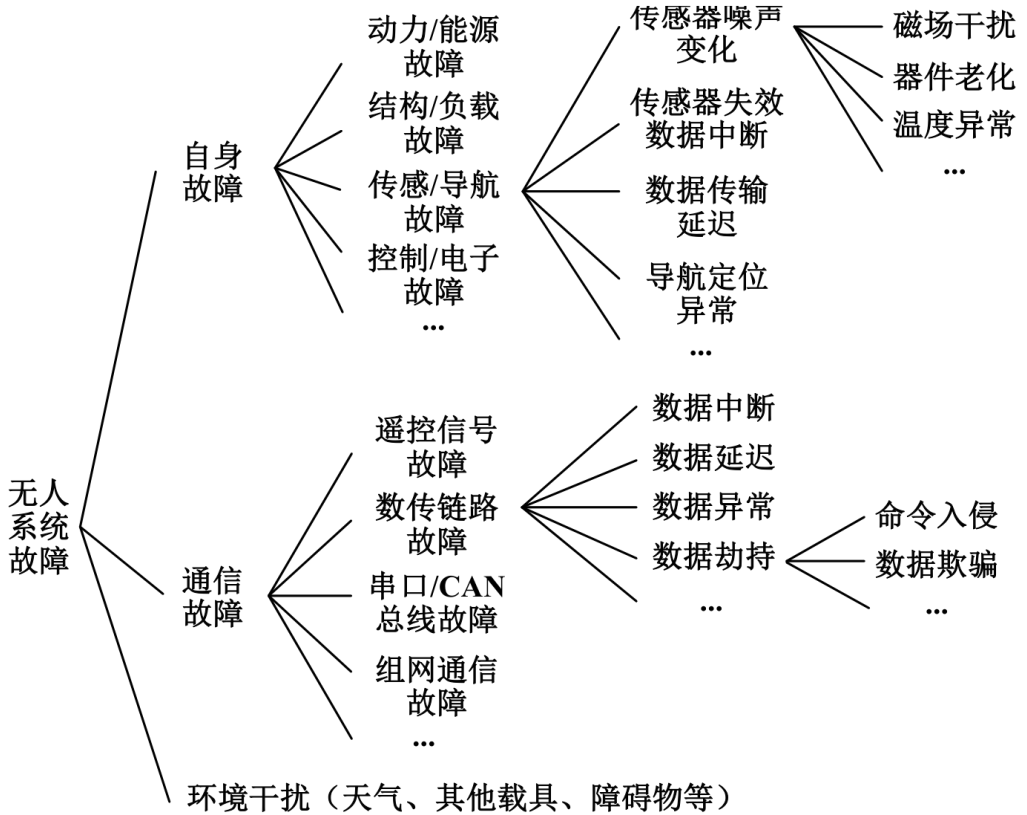
模型要素	需要写清什么	电机案例
作用位置	改变哪个部件或哪条信号	1号旋翼的拉力输出
作用形式	参数变化、模式切换或信号叠加	拉力效能由1降至0.6
触发与恢复	时刻、条件、持续时间和恢复规则	1 s起生效，持续到算例结束
可核对的响应	输入、真实状态、观测怎样改变	固定控制量时总拉力下降

统一描述便于重复比较；故障出现的现实概率来自相应平台的事件数据。

7.2 统一故障建模框架

7.2.1 故障分类与统一描述：故障分类

分类同时回答发生位置与发生原因



自身故障：动力、传感、控制、结构或载荷等部件功能改变。

通信故障：信息在系统之间或内部接口传递时异常。

环境干扰：风、磁场、遮挡、天气和障碍物改变运行条件。

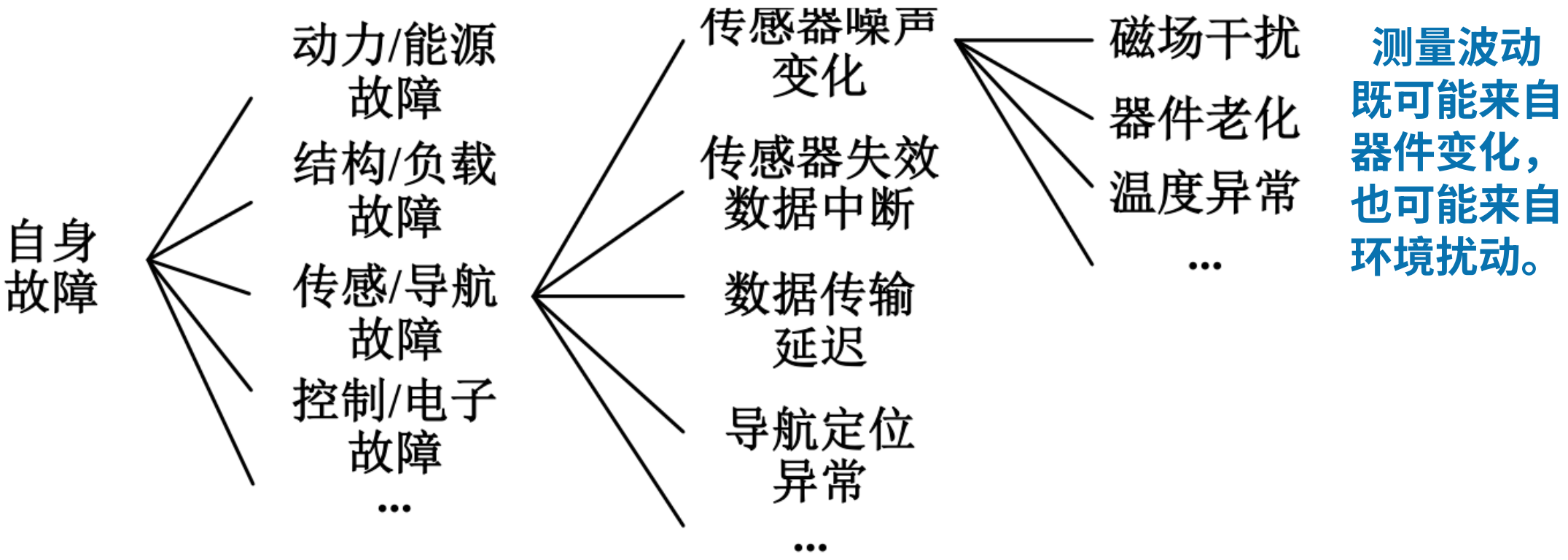
按位置：感知、决策、执行。
按原因：自身、通信、环境。
例：磁场干扰源于环境，表现在感知。

图7.3 无人系统故障分类图

7.2 统一故障建模框架

7.2.1 故障分类与统一描述：自身故障分支

同一种测量波动可能有不同成因

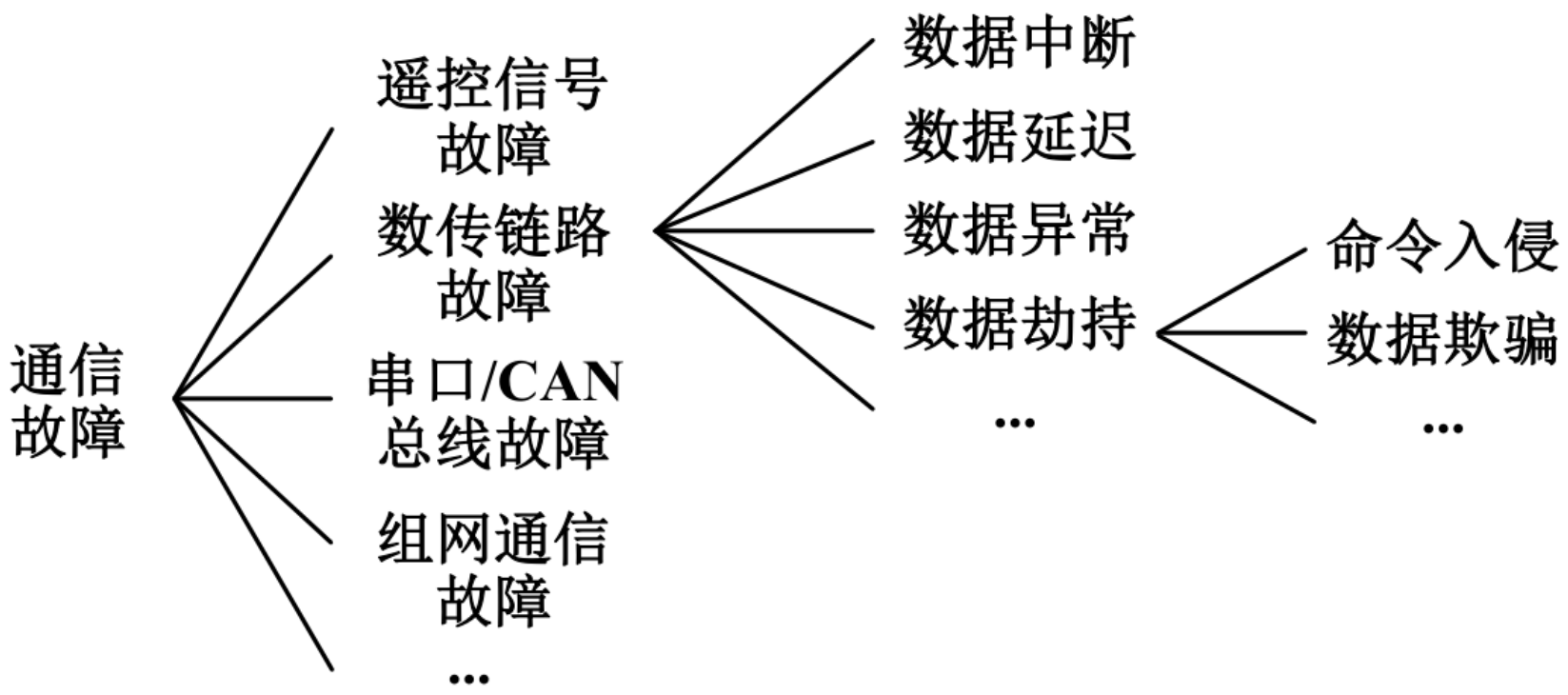


测量波动既可能来自器件变化，也可能来自环境扰动。

图7.3（自身故障局部）动力与结构见本节7.2.2单元，传感见7.2.3单元，控制电子只分类

7.2.1 故障分类与统一描述：通信故障分支

链路异常改变信息的时效或可信性



时效：
中断、延迟
改变到达时间

可信性：
异常、劫持、
入侵、欺骗
改变内容可靠性

图7.3（通信故障局部）CAN为控制器局域网络总线

7.2.1 故障分类与统一描述：组件故障模型

触发决定何时生效，作用模型决定怎样变化

外部触发
类型、时刻、条件 → 内部故障作用
修改参数或信号 → 运动／能耗模型
算出状态与耗电异常

作用形式	模型中的改变	一个最小例子
参数影响	修改已有系数或偏置	拉力系数下降，零偏升高
模态影响	切换计算或输出逻辑	正常更新切为冻结、无效值
叠加影响	给输入、状态或输出加扰动	振动正弦项、随机噪声

统一的是故障描述，具体方程仍由部件机理决定。

本章目录

统一故障建模框架

第七章 健康管理与安全评估

7.1 健康管理与安全评估基础
7.2 统一故障建模框架
7.3 虚实安全强化与故障数据方法
7.4 故障危害与安全评估
7.5 故障诊断与健康预测
7.6 安全决策与整机改进
7.7 故障注入接口与算法开发框架
7.8 例程实验与虚实验证
7.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

7.2.1 故障分类与统一描述
教材对应：第7.1.3.1–7.1.3.3节

7.2.2 动力与载荷故障
教材对应：第7.1.3.4节（动力、结构）

7.2.3 传感器与通信故障
教材对应：第7.1.3.4节（传感、通信、环境）

7.2.4 建模方法与健康参考
教材对应：第7.1.3.3节

7.2.2 动力与载荷故障：动力效能

拉力效能与转速缩放对应不同损失

理论算例：相同螺旋桨、气动条件固定，只比较一个旋翼的拉力。

$$F_0 = c_T \omega^2$$

F_0：正常拉力，N；ω：转速，rad/s。
c_T：拉力系数，单位 $\mathrm{N/(rad/s)^2}$。

$$F_\eta = \eta F_0 = 0.8 \times 5 = 4\ \mathrm{N}$$

η是直接缩放拉力的效能系数，无量纲。

$$F_\alpha = c_T(\alpha\omega)^2 = 0.8^2 \times 5 = 3.2\ \mathrm{N}$$

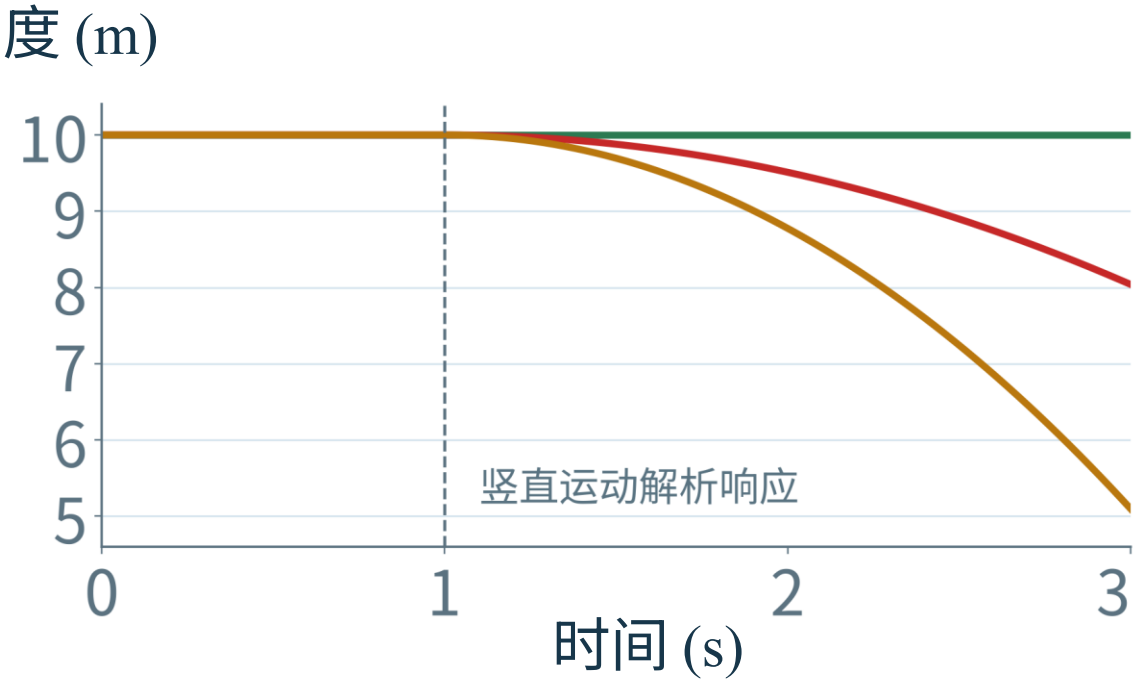
α是转速缩放系数，无量纲。两种“0.8”对应20%与36%的拉力损失。

参数必须连同作用位置解释，单独一个健康系数不够。

7.2.2 动力与载荷故障：一步计算与响应

一个旋翼衰减如何改变竖直响应

理论算例：2 kg四旋翼悬停，初高10 m、速度0；1 s故障，控制量冻结。
每桨正常拉力4.905 N；$g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$；向上为正，忽略阻力与姿态耦合。



$$F_\Sigma = 4.905 \times 3.6 = 17.658\ \mathrm{N}$$

$$a_z = F_\Sigma/m - g = -0.981\ \mathrm{m/s^2}$$

$$v_z(1.1\ \mathrm{s}) = 0.1a_z = -0.0981\ \mathrm{m/s}$$

$$h(3\ \mathrm{s}) = 10 + 0.5a_z \times 2^2 \approx 8.04\ \mathrm{m}$$

7.2.2 动力与载荷故障：结构与载荷

意外载荷脱落同时改变质量、质心与惯量

理论算例：机身1.6 kg、点载荷0.4 kg；机身质心为原点，载荷在机体 $x = 0.2$ m。
x_c为整体质心位置，$J_{y,b} = 0.03\ \mathrm{kg\,m^2}$为机身自身俯仰惯量；忽略释放冲量。

脱落前： $m = 2$ kg

$$x_c = 0.4 \times 0.2/2 = 0.04\ \mathrm{m}$$

$$J_y = J_{y,b} + 1.6x_c^2 + 0.4(0.2 - x_c)^2$$

$$J_y = 0.0428\ \mathrm{kg\,m^2}$$



脱落后

$$m = 1.6\ \mathrm{kg}, \quad x_c = 0$$

$$J_y = 0.03\ \mathrm{kg\,m^2}$$

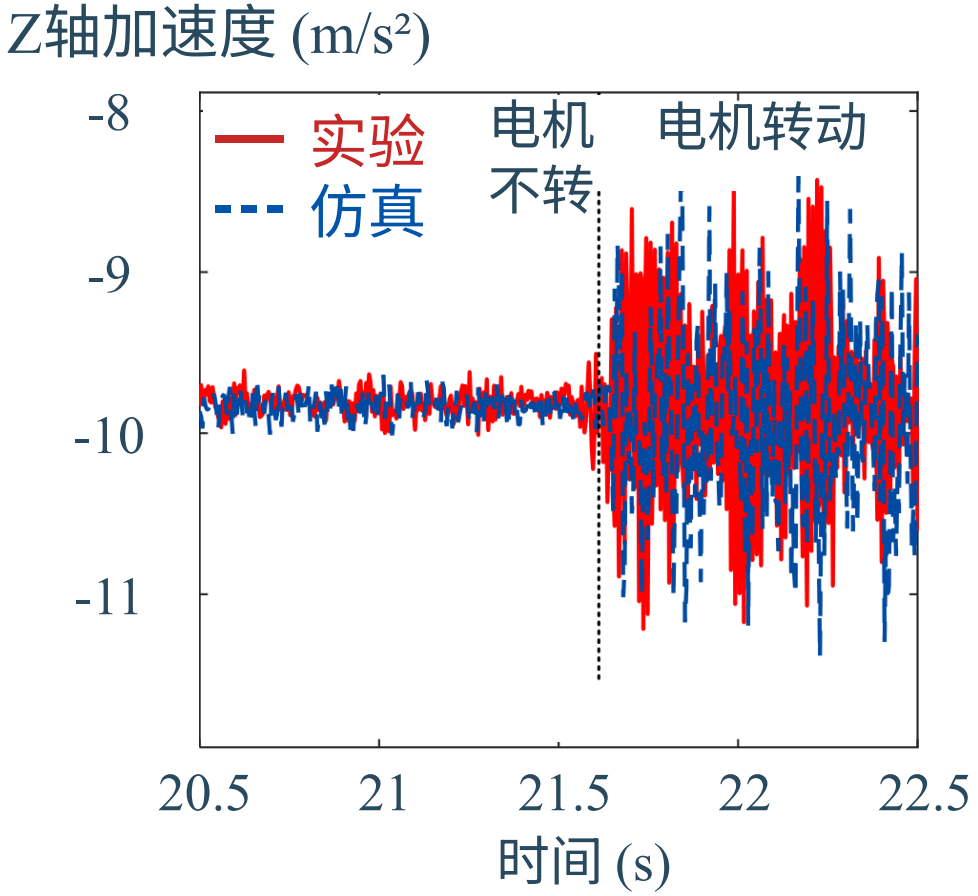
$$a_z = 19.62/1.6 - 9.81$$

$$a_z = 2.4525\ \mathrm{m/s^2}$$

质量、质心与惯量按同一触发更新；阶跃或渐变描述变化速度。
竖直向上为正；悬停拉力19.62 N瞬时不变，取 $g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$。

7.2.2 动力与载荷故障：振动证据·加速度

电机转动后，测量波动明显扩大



观察对象： 同一Z轴的加速度计读数；电机转动后的波动明显增大。

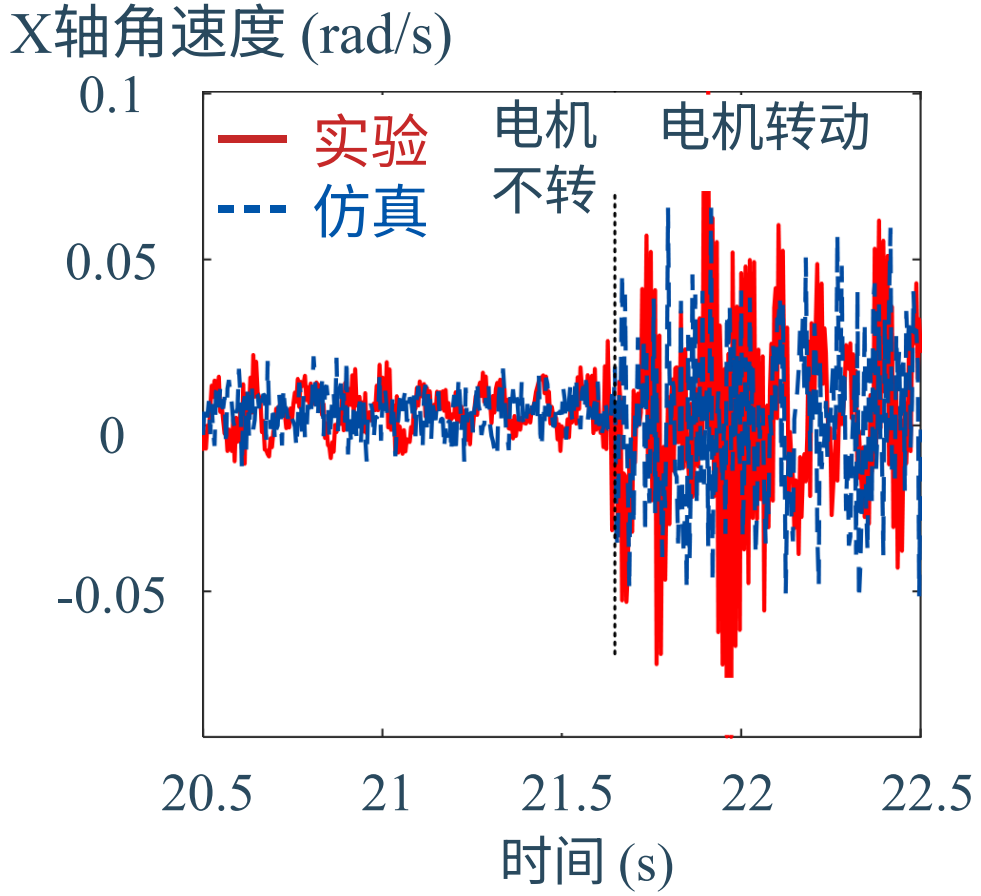
基线含义： 约负9.8 m/s²与重力投影有关；振动幅值看偏离均值的部分。

模型核对： 比较均值、方差与频谱。
同时检查工况和时间是否对齐。
随机样本按统计特征比较。

图7.4(a) 电机振动导致的加速度计噪声波动

7.2.2 动力与载荷故障：振动证据·角速度

振动也会进入角速度测量通道



陀螺仪：测角速度，单位rad/s。
惯性测量单元（IMU）通常同时包含陀螺仪与加速度计。

传播关系：电机与结构振动会传入多个测量通道，产生相关波动。

建模选择：随机项描述宽带起伏；周期项描述窄带成分。参数按各通道均值、方差与频谱确定。

图7.4(b) 电机振动导致的陀螺仪噪声波动

7.2.2 动力与载荷故障：等效信号模型

周期项与随机项表达不同的振动特征

理论算例：给X向理想加速度叠加等效振动；这些参数为课堂给定值。

$$d_a(t) = A\sin(2\pi f t) + \sigma\epsilon(t), \quad \epsilon \sim \mathcal{N}(0,1)$$

$A = 0.2\ \mathrm{m/s^2}$为周期幅值，$f = 5\ \mathrm{Hz}$为频率。
$\sigma = 0.1\ \mathrm{m/s^2}$为随机项标准差，$\epsilon$为无量纲标准正态样本。

$$d_a(0.05) = 0.2\sin(\pi/2) + 0.1 \times 1 = 0.3\ \mathrm{m/s^2}$$

拟合波动幅度之后，还要核对频谱与通道相关性。

7.2.2 动力与载荷故障：实际模型入口

当前例程把故障作用接入电机信号链

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/7.RflySimPHM/0.ApiExps/（下表两个API例程）
带触发的运行见课件7.8.2「例程入口」页（基础例程1.BasicExps/e3_MotorFault）

例程目录	实际模型入口	打开模型后看什么
e6_UseFaultLib	Init.m；MotorFault.slx Readme.pdf	外部触发与MotorFault模块的位置
e8_BaseMotorFault	Init.m；MulticopterModel.slx Readme.pdf	故障模块怎样接入最小载具模板

无噪声分支（未叠加振动噪声项）：y(i) = inPWMs(i) * FaultParams(i);

输入指令 → **故障系数作用** → **电机、桨与动力学**

该系数在当前实现中缩放指令；转速与拉力还取决于后续电机模型。

本章目录

统一故障建模框架

第七章 健康管理与安全评估

7.1 健康管理与安全评估基础
7.2 统一故障建模框架
7.3 虚实安全强化与故障数据方法
7.4 故障危害与安全评估
7.5 故障诊断与健康预测
7.6 安全决策与整机改进
7.7 故障注入接口与算法开发框架
7.8 例程实验与虚实验证
7.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

7.2.1 故障分类与统一描述
教材对应：第7.1.3.1–7.1.3.3节

7.2.2 动力与载荷故障
教材对应：第7.1.3.4节（动力、结构）

7.2.3 传感器与通信故障
教材对应：第7.1.3.4节（传感、通信、环境）

7.2.4 建模方法与健康参考
教材对应：第7.1.3.3节

7.2.3 传感器与通信故障：传感器四级模型

从真实状态到测量，四个环节各有作用

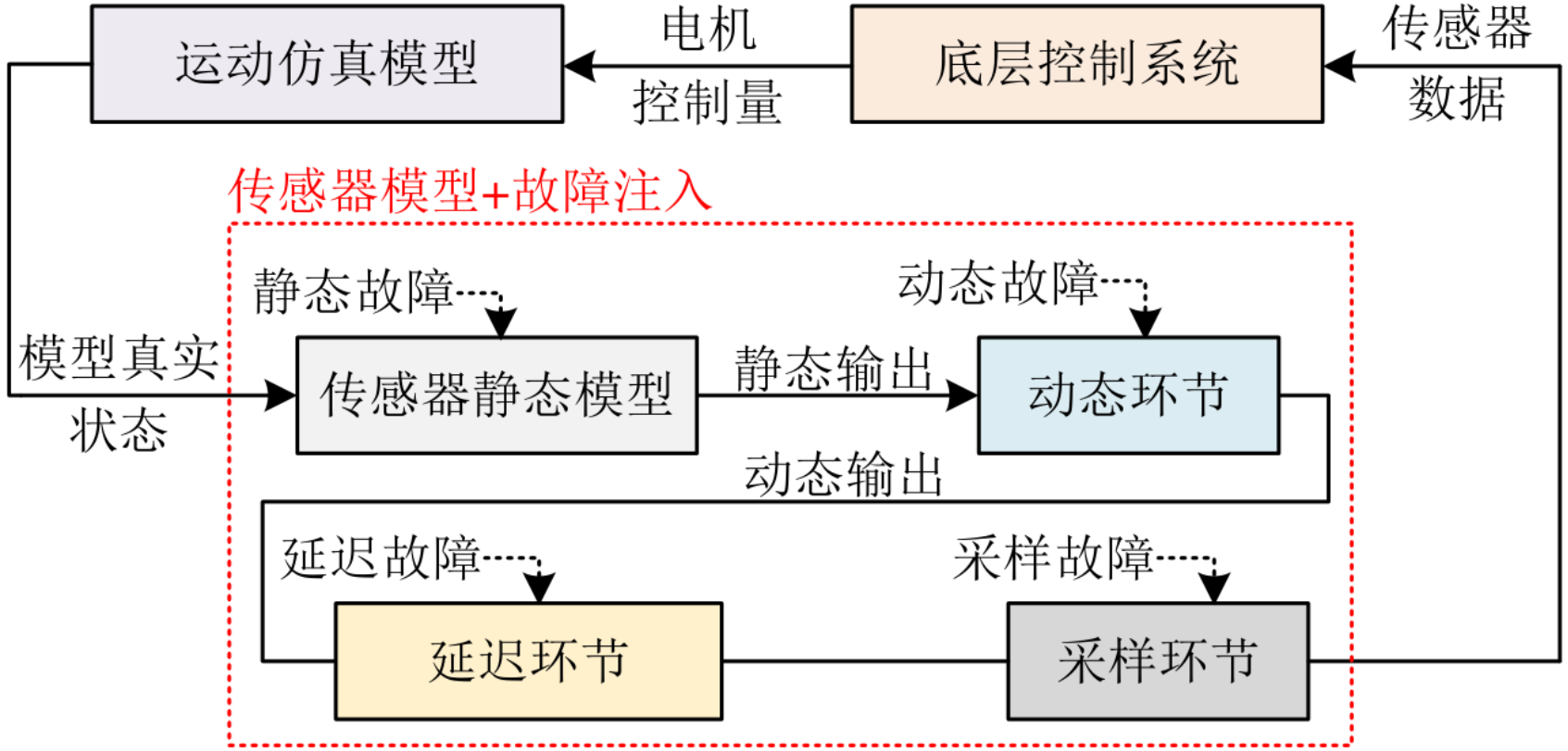


图7.5 传感器故障模型

静态：缩放、零偏与校准。

动态：响应慢或动态失真。

延迟：读到过去状态。

采样：更新周期与保持。

7.2.3 传感器与通信故障：静态与噪声模型

缩放、偏置与噪声分别改变什么

理论算例：X向加速度计，静态作用写在测量输出处。

$$y = s\,a + b + n, \quad n = \sigma\epsilon, \quad \epsilon \sim \mathcal{N}(0,1)$$

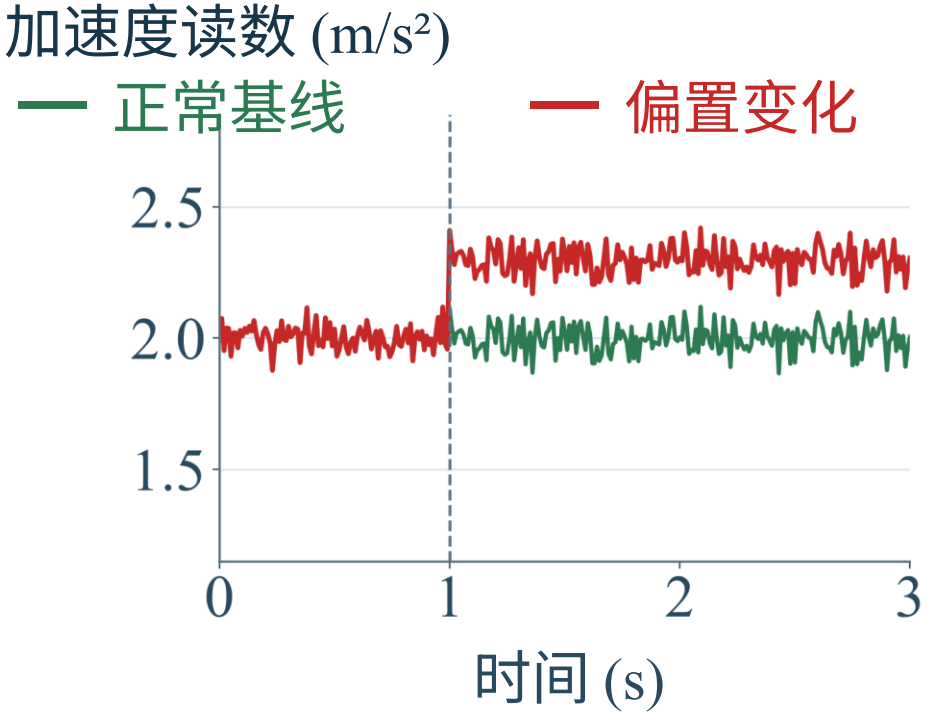
量	含义与单位	本次给定值
$a,\ y$	理想值、测量值，m/s^2	理想加速度2 m/s^2
$s,\ b$	比例因子无量纲；偏置m/s^2	比例1.05；偏置0.3 m/s^2
$n,\ \sigma$	当前噪声、标准差，m/s^2	当前噪声样本0.1 m/s^2

$$y = 1.05 \times 2 + 0.3 + 0.1 = 2.5\ \ m/s^2$$

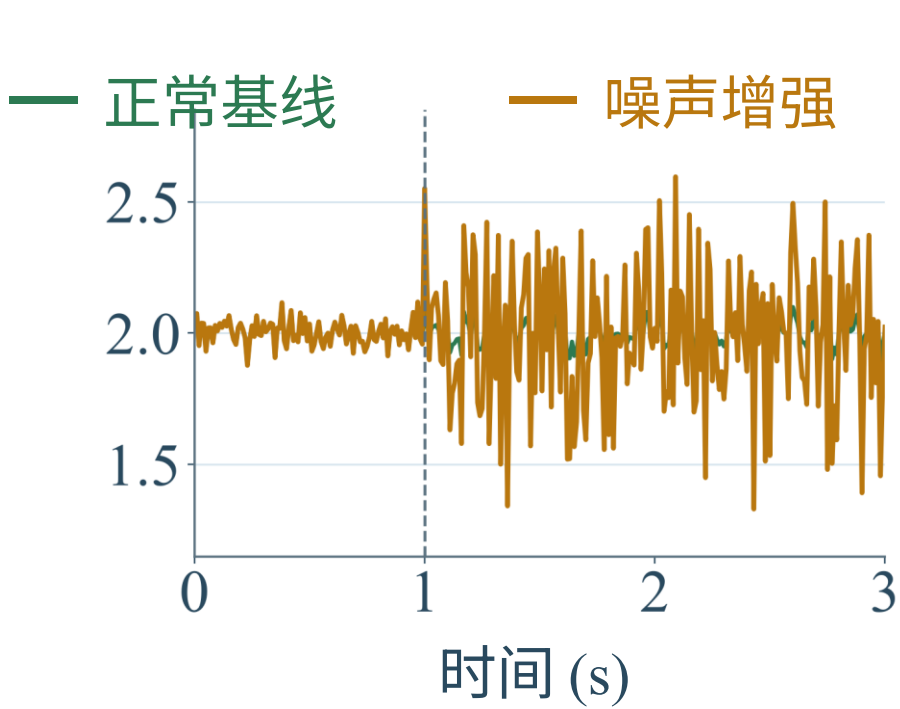
7.2.3 传感器与通信故障：可读响应

偏置使均值移动，噪声使波动增大

恒定偏置：均值上移



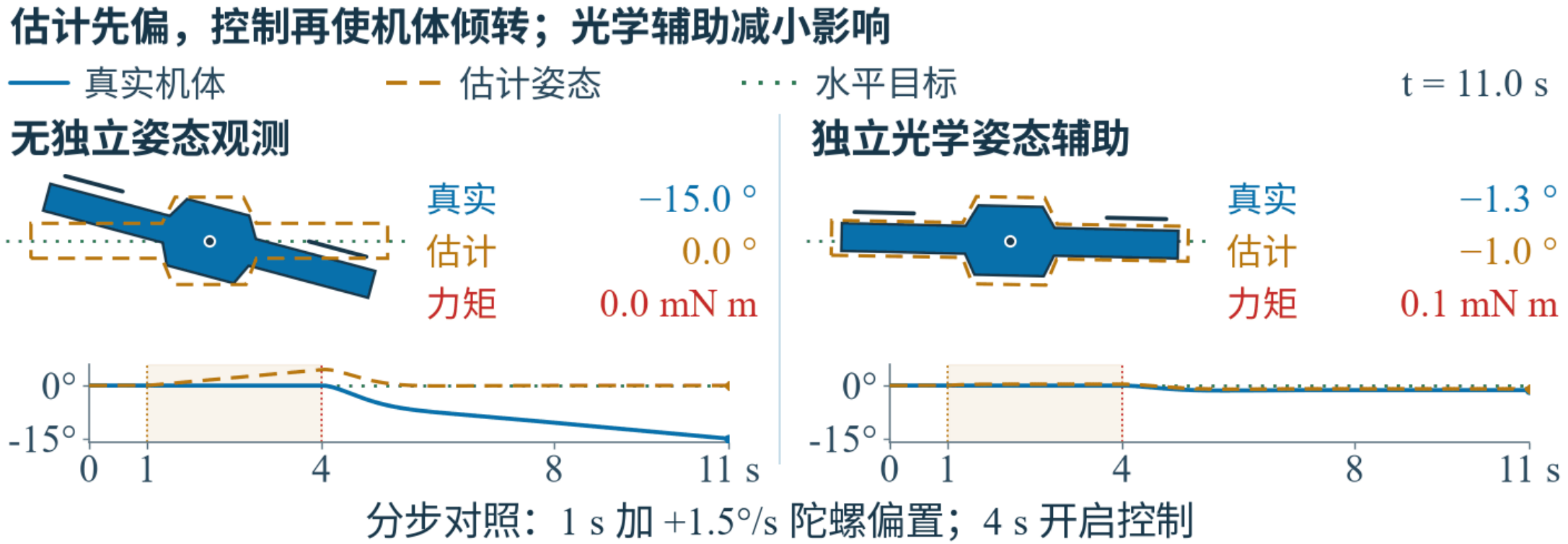
噪声增强：分散扩大



图：给定模型的理论信号，1 s处参数改变（教学算例）

7.2.3 传感器与通信故障：惯性测量偏置

姿态估计偏了，控制器可能把飞机调歪

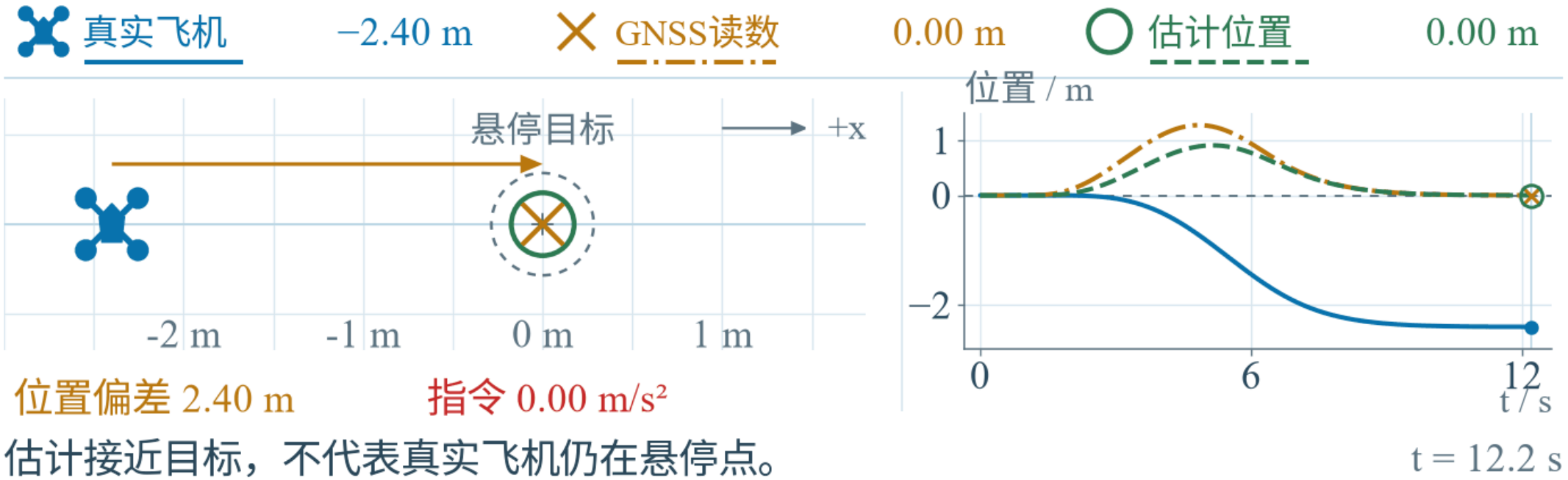


图：陀螺偏置先影响姿态估计，再经控制力矩改变真实姿态（MuJoCo仿真）。
同样偏置下，比较无独立观测与有光学姿态辅助的结果；分步时序见图中标注。

7.2.3 传感器与通信故障：GNSS定位偏置

定位向右偏，飞机可能反而向左飞

偏差被采纳：估计回到目标，真机偏离



估计接近目标，不代表真实飞机仍在悬停点。

图：定位偏置被估计器采纳，控制器以为偏右而向左纠偏（MuJoCo仿真）
实心为真实位置，十字为全球导航卫星系统（GNSS）读数，空心为估计；目标不变。

7.2.3 传感器与通信故障：时序模型·一步计算

动态变慢、纯延迟与采样保持作用不同

理论输入 u：0.25 s时由0变为1 m/s，各输出 y 的初值为0。
每种对照只保留一种时序作用；动态这一步从0.25 s计算到0.35 s。

动态环节
一阶惯性

$$\tau\dot{y} + y = u, \quad y_{k+1} = e^{-\Delta t/\tau} y_k + (1 - e^{-\Delta t/\tau}) u_k$$

时间常数 τ

$$\tau = 0.2\,\text{s},\ \Delta t = 0.1\,\text{s}: \quad y(0.35\,\text{s}) = 1 - e^{-0.5} = 0.393\ \text{m/s}$$

延迟环节
纯时间滞后

$$y_d(t) = u(t - L), \quad L = 0.15\,\text{s}:\ \text{首次变化在 } 0.40\,\text{s}$$

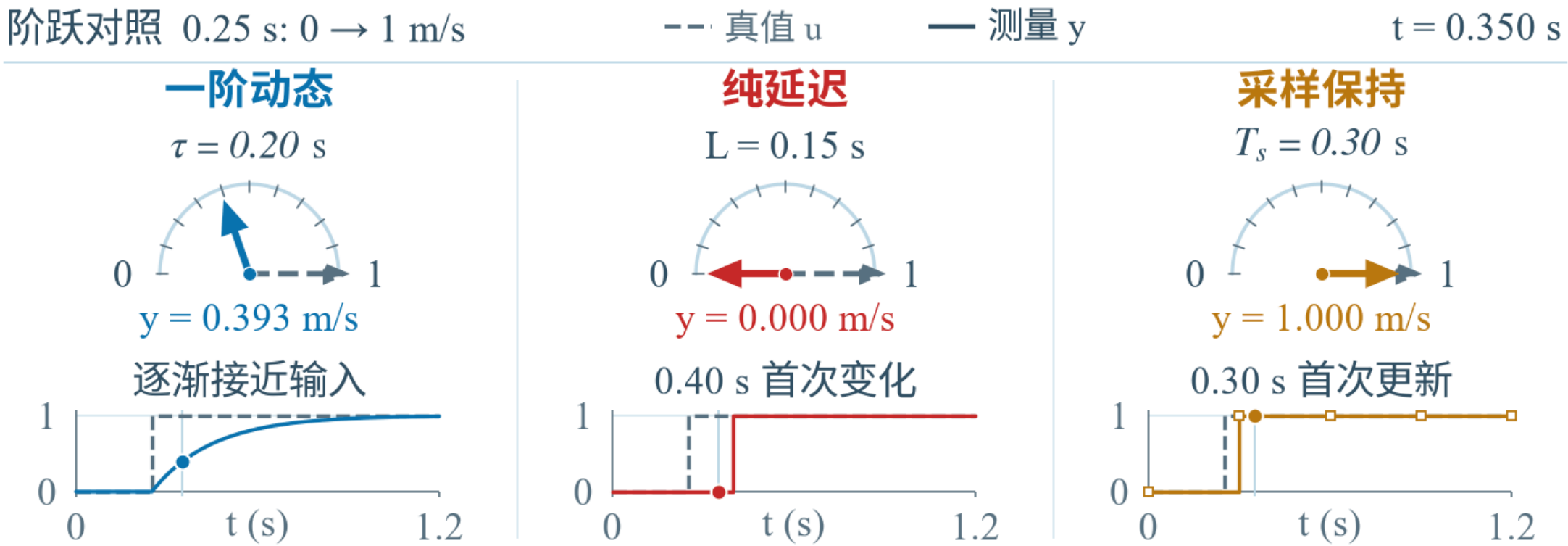
采样环节
零阶保持

$$y_h(t) = u(kT_s), \quad kT_s \le t < (k+1)T_s, \quad T_s = 0.30\,\text{s}$$

采样周期为 T_s；两次采样之间保持前值，0.30 s首次更新。

7.2.3 传感器与通信故障：时序模型·响应

同一速度输入，三种时序响应



图：同一阶跃输入下的一阶动态、纯延迟与采样保持（原理示意）。

7.2.3 传感器与通信故障：通信与中断

丢包后使用旧值，会积累信息年龄

理论序列：每0.1 s发送；缺包时保持最后有效指令，0.4 s恢复接收。
信息年龄＝当前时刻–所用数据的发送时刻。

时刻 (s)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
发送速度 (m/s)	0	1	2	3	4	5
本包是否到达	是	是	否	否	是	是
接收端使用值	0	1	1	1	4	5

在 0.3 s:　信息年龄 $= 0.3 - 0.1 = 0.2$ s,　指令差 $= 3 - 1 = 2$ m/s

保持、置零或无效标志会产生不同后果；中断窗口与恢复策略属于模型的一部分。

7.2.3 传感器与通信故障：其他通信故障形式

误码、乱序与干扰改变内容、顺序与时延

通信故障建模分三类，每类写清作用方式、模型参数与检验目标。

链路中断

作用： 时间窗内阻断上下行指令与状态反馈
参数： 窗口起止、单次或间歇、恢复策略
检验： 保持最后指令、失联保护、悬停或返航

误码与乱码

作用： 随机位翻转、丢包、重复与乱序；关键字段置零、越界或非法编码
参数： 比特误码率、包错误率、重复概率与乱序窗口、字段扰动规则
检验： 数据解析与容错

干扰与攻击

来源： 网络拥塞、电磁干扰，或扫描、洪泛、重放攻击
参数： 随机或突发延迟、抖动、带宽衰减、丢包；强度的时变曲线与频谱
检验： 链路抗扰与稳健性

7.2.3 传感器与通信故障：环境干扰

环境扰动要通过力或测量作用进入模型

时空风场／相对风	➡ 气动附加力与力矩	➡ 运动状态与控制响应
磁场异常／卫星遮挡	➡ 磁力计与定位测量改变	➡ 估计与控制响应改变

$$F_x = 2\ \mathrm{N},\ m = 2\ \mathrm{kg}: \quad a_x = F_x/m = 1\ \mathrm{m/s^2}$$

$$\Delta v_x = a_x \Delta t = 1 \times 0.1 = 0.1\ \mathrm{m/s}$$

理论算例：给定等效风力，忽略控制补偿；实际风速到力的映射依赖气动模型。

本章目录

统一故障建模框架

第七章 健康管理与安全评估

7.1 健康管理与安全评估基础
7.2 统一故障建模框架
7.3 虚实安全强化与故障数据方法
7.4 故障危害与安全评估
7.5 故障诊断与健康预测
7.6 安全决策与整机改进
7.7 故障注入接口与算法开发框架
7.8 例程实验与虚实验证
7.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

7.2.1 故障分类与统一描述
教材对应：第7.1.3.1–7.1.3.3节

7.2.2 动力与载荷故障
教材对应：第7.1.3.4节（动力、结构）

7.2.3 传感器与通信故障
教材对应：第7.1.3.4节（传感、通信、环境）

7.2.4 建模方法与健康参考
教材对应：第7.1.3.3节

7.2.4 建模方法与健康参考：方法比较

机理、数据与混合方法解决不同建模难点

方法	从什么得到模型	典型表达与取舍
机理建模	物理参数、结构 与控制逻辑	力、质量、惯量的传播可解释； 结构未知或参数失准时难准确
数据／信号建模	日志、标定表 振动或响应数据	查表、回归、噪声分布； 适用范围受工况与数据质量限制
混合建模	物理基线 ＋数据拟合补充项	保留传播规律，再补偿失配； 两部分的接口与数据用途须明确

信号叠加描述怎样施加故障；机理与数据方法描述模型怎样获得。

7.2.4 建模方法与健康参考：数据模型·一步计算

查表模型用相邻数据点插值得到中间工况

理论算例：给定同一故障工况的教学数表，用线性插值表示转速到拉力。

转速 (rad/s)	300	400	500
给定拉力 (N)	0.630	1.120	1.750

$$F(450) = 1.120 + \frac{450 - 400}{500 - 400}(1.750 - 1.120) = 1.435\ \mathrm{N}$$

输入依次为	300	350	400	450	500
输出拉力 (N)	0.630	0.875	1.120	1.435	1.750

数表按二次规律给定：线性插值在450处偏大0.0175 N，表越稀误差越大。

7.2.4 建模方法与健康参考：模型与诊断的区别

故障模型、健康参考与诊断各有分工

主要输入	对象	主要输出
已设定的类型、系数 以及触发条件	**故障作用模型**	改变后的力、 参数或测量
控制输入、工况 与正常参数	**健康参考模型**	相同条件下的 健康预期响应
观测、参考差异 与其他证据	**诊断器**	异常判断、类别 或参数估计

例：模型设定 $\eta = 0.6$；诊断器是否能发现、定位并估计该衰减，要用独立观测检验。

7.2.4 建模方法与健康参考：增强数字孪生案例

健康参考误差可以从虚实数据中学习

数字孪生（DT）：以物理模型和实机数据建立对应的数字表示。

1 量化差异

同一输入工况
对齐实机观测与
模型输出 X_{virt}

→

2 学习误差

误差取实机减模型
由误差序列学习
工况相关特征

→

3 重构补偿

重构误差 $\hat{\Delta}$
补到模型输出
修正参考 X_{comp}

$$X_{\text{comp}} = X_{\text{virt}} + \hat{\Delta}$$

流程据原论文Fig.1(b)整理：Tu, Nian, Dai. IEEE TAES, 2026, 62: 2460–2476.
Physics-Aware Multichannel Vector Quantization for Hybrid Digital Twin Modeling of UAV Systems
https://doi.org/10.1109/TAES.2025.3639005
目录：[安装目录]/RflySimAPIs/PaperRes/7.Enhanced-DT/（论文与Readme.pdf）

原方法用实机观测构造误差；参考误差补偿与施加已知故障是不同任务。

7.2.4 建模方法与健康参考：健康参考·一步计算

残差里也包含健康模型的偏差

理论算例：相同输入、同一速度通道；健康基线2.0 m/s，物理参考1.7 m/s。
由正常配对数据得到误差补偿0.3 m/s，另一个时刻观测为1.8 m/s。

$$\hat{y}_{\text{healthy}} = 1.7 + 0.3 = 2.0 \ \text{m/s}$$

$$r_{\text{raw}} = 1.8 - 1.7 = +0.1 \ \text{m/s}$$

$$r_{\text{comp}} = 1.8 - 2.0 = -0.2 \ \text{m/s}$$

残差定义为观测减参考；符号和单位固定。故障识别还需要工况、噪声与多源证据。

出处：同上论文（Tu等，IEEE TAES，2026）；本页数值为课堂设定

7.2.4 建模方法与健康参考：建模交付

可复现的故障描述还要写出时间与基线

描述项	贯穿算例的完整取值
对象与形式	1号旋翼拉力输出；乘性拉力效能系数，无量纲
参数与时序	1 s时由1变为0.6；至3 s结束，无自动恢复
正常对照	质量2 kg、初始高度10 m、速度0，同样控制输入
预期与观测	控制量冻结时总拉力17.658 N；记录真实状态、测量与控制量
模型边界	仅竖直平移；实际闭环另核对姿态、补偿和参数作用位置

模型、触发与观测判据齐全，注入结果才有可核对的预期。

练习与讨论

把参数位置与观测差异算清楚

1 动力参数：正常拉力6 N，系数0.7作用于拉力或转速时，输出与损失各是多少？

2 通信时序：每0.1 s发一包；0.2 s的包（1.5 m/s）到达，0.3 s与0.4 s的包丢失。0.45 s仍保持前值时，使用值和信息年龄各是多少？（忽略传输延迟）

3 模型与诊断：设定电机效能0.7，是否已经得到诊断结果？
物理参考2.5 m/s、补偿−0.2 m/s、观测2.4 m/s：原始与补偿后残差各是多少？

自查：写出代入式、单位、时间条件，并指出哪个值是已设定参数。

参考要点

参考答案区分作用模型、信息与推断

$$F_\eta = 0.7 \times 6 = 4.2\ \mathrm{N}, \quad F_\alpha = 0.7^2 \times 6 = 2.94\ \mathrm{N}$$

1 直接缩放拉力损失30%；缩放转速经平方损失51%。系数所在环节决定损失。

$$u_{\mathrm{used}} = 1.5\ \mathrm{m/s}, \quad \text{信息年龄} = 0.45 - 0.2 = 0.25\ \mathrm{s}$$

2 年龄从最后有效包的发送时刻0.2 s算起，新包到达前持续增长。

$$r_{\mathrm{raw}} = 2.4 - 2.5 = -0.1\ \mathrm{m/s}, \quad r_{\mathrm{comp}} = 2.4 - 2.3 = +0.1\ \mathrm{m/s}$$

3 效能0.7是故障设定，诊断由观测推断；补偿前后残差变号。

练习与讨论

把时序与载荷变化算清楚

4 时序模型：一阶惯性 $\tau = 0.25\ \mathrm{s}$，输入在0 s由0跃变为1 m/s，输出初值为0。
按精确离散公式走一步 $\Delta t = 0.1\ \mathrm{s}$，输出是多少？若换成纯延迟 $L = 0.15\ \mathrm{s}$，此时输出又是多少？

5 载荷脱落：机身1.5 kg、自身俯仰惯量0.03 kg·m²，0.5 kg点载荷位于机体 $x = 0.3\ \mathrm{m}$。
求脱落前整体质心 x_c 与总俯仰惯量 J_y；悬停拉力瞬时不变时，
脱落后竖直加速度是多少？（取 $g = 9.81\ \mathrm{m/s^2}$，向上为正）

自查：写出代入式与单位，注明正方向与平行轴距离。

参考要点

参考答案核对离散系数、平行轴距离与正方向

$$y(0.1\ \mathrm{s}) = 1 - e^{-0.1/0.25} = 1 - e^{-0.4} = 0.330\ \ \mathrm{m/s}$$

4 精确离散系数为 $e^{-\Delta t/\tau}$，一步只到终值的33%；纯延迟下0.1 s输出仍为0。

$$x_c = 0.5 \times 0.3/2.0 = 0.075\ \mathrm{m}$$

$$J_y = 0.03 + 1.5 \times 0.075^2 + 0.5 \times 0.225^2 \approx 0.0638\ \mathrm{kg\,m^2}$$

$$a_z = 19.62/1.5 - 9.81 = 3.27\ \ \mathrm{m/s^2}$$

5 平行轴距离：机身0.075 m，载荷0.3−0.075=0.225 m，精确值0.06375 kg·m²。脱落后质量1.5 kg、质心回到原点、惯量回到0.03 kg·m²；拉力不变，加速度向上。

本节小结

故障建模的核心是可解释、可核对的作用

统一描述：对象、作用形式、参数单位、触发与恢复。
再加正常对照与预期响应，形成完整的故障模型。

方法选择：机理解释传播，数据拟合响应，混合方法用数据补足物理模型的失配。

易错点：指令、转速与拉力系数不可混用；偏置、噪声、动态与时序改变不同特征；
中断改变到达，误码与乱序改变内容和顺序，干扰改变时延与带宽。

模型与判断：设定参数是测试条件，健康参考是正常预期。
诊断输出由观测推断，不能直接读取故障设定。

模型给出故障作用，课件7.7用接口触发并核对实际响应。