本章目录

例程实验与虚实验证

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 6 个教学单元

7.8.1 实验入口与高阶案例
教材对应：第7.3.1–7.3.2节

7.8.2 电机故障验证
教材对应：第7.2.3、7.3.1节

7.8.3 自动测试与事件日志
教材对应：第7.1.5.2、7.3.1节

7.8.4 数据处理与诊断训练
教材对应：第7.1.5.4、7.3.1节

7.8.5 安全评分实验
教材对应：第7.1.5.3、7.3.1节

7.8.6 虚实验证与策略比较
教材对应：第7.1.5.1、7.3.2节

7.8 例程实验与虚实验证

7.8.1 实验入口与高阶案例：实验入口

从离线读图到闭环验证，按证据逐级扩展

层次	真实入口	建议任务
离线入门	0.ApiExps/e10_data_process	核对CSV的时间与单位
单故障接口	1.BasicExps/e4_SensorFault	比较注入前中后三段
批量用例	0.ApiExps/e14_DBExp、e15_CmdExp	区分用例与执行结果
研究拓展	PaperRes/6.IoT-DT-Diagnosis等	复核方法及适用条件

前三行在[安装目录]/RflySimAPIs/7.RflySimPHM/下，PaperRes在RflySimAPIs/下；
定制实验3.CustExps仅限完整版及以上版本。

7.8.1 实验入口与高阶案例：离线实践

最小实验：先用已有记录复核一项结论

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/7.RflySimPHM/0.ApiExps/e10_data_process/
日志CSV在data/中。

运行：双击Python38Run.bat，输入python dataProcess.py；
结果会覆盖processed_data.csv，先另存原文件。

判据：输出712行×49列、无表头；flag列按时间戳阈值生成，阈值之后记为1。

复核与交付：比较flag前后同工况窗口的加速度标准差；
交付带轴和单位的图，并写明标签来源。

常见失败：Readme写作data_process.py，实际脚本为dataProcess.py；
导入报错先补装pandas、numpy；报No file found时查data/中四类CSV是否齐全。

7.8.1 实验入口与高阶案例：成果表达

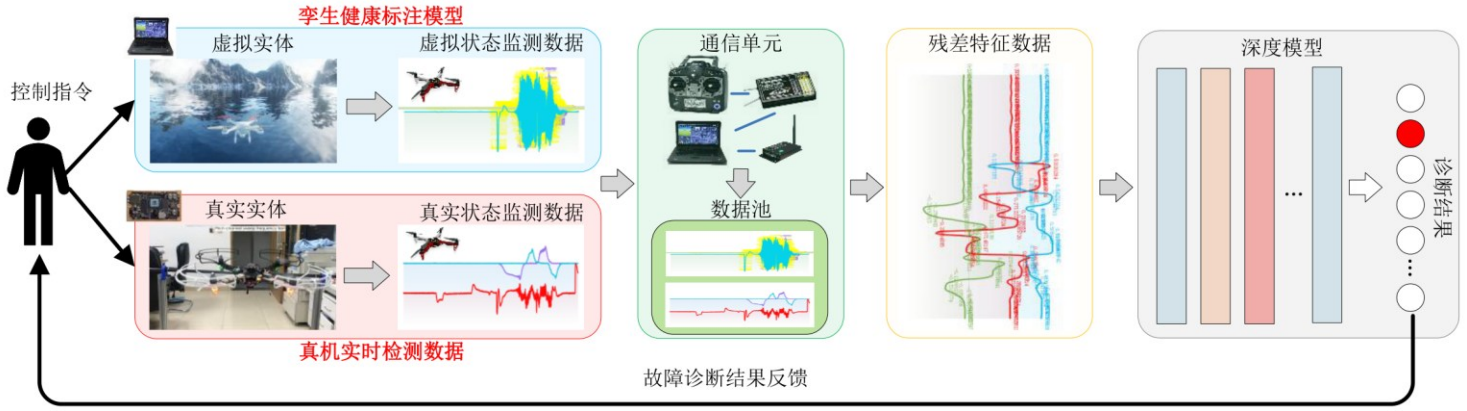
汇报一项结果，要让别人知道怎样复算它

报告部分	最低需要的信息
问题与配置	任务、故障、工况、版本、参数和评价规则
证据与复算	原始数据、时间事件、处理脚本及带单位结果图
对照与统计	健康基准、重复条件、失败轮次和不确定性
结论与下一步	结果支持什么、没有覆盖什么、下一次如何补证据

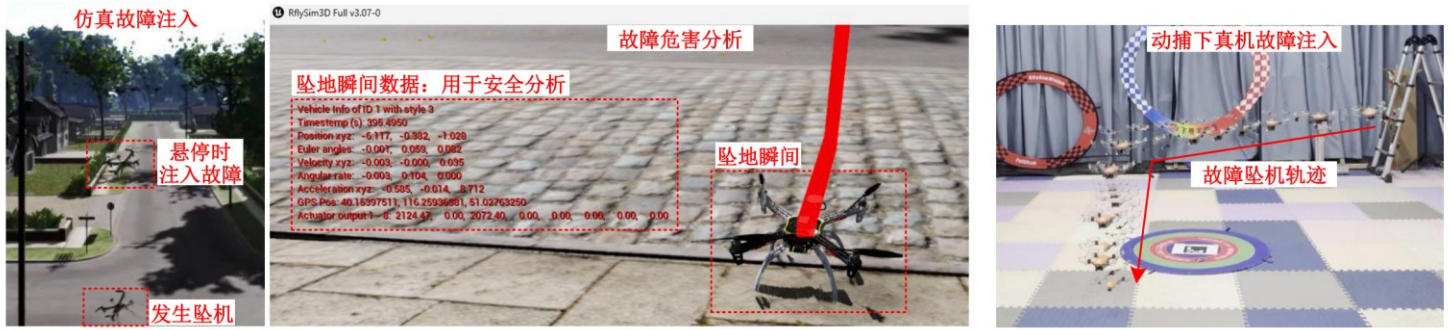
7.8 例程实验与虚实验证

7.8.1 实验入口与高阶案例：高阶案例总览

系统级案例把诊断与虚实验证连成两条研究路径



(a) 基于数字孪生和深度学习的系统级故障诊断



(b) 真机与仿真节点并行运行实验

图7.15 高阶案例展示；分别检查诊断证据与虚实对照证据。

7.8 例程实验与虚实验证

7.8.1 实验入口与高阶案例：高阶诊断案例

路径一：孪生参照与真实观测如何帮助诊断?

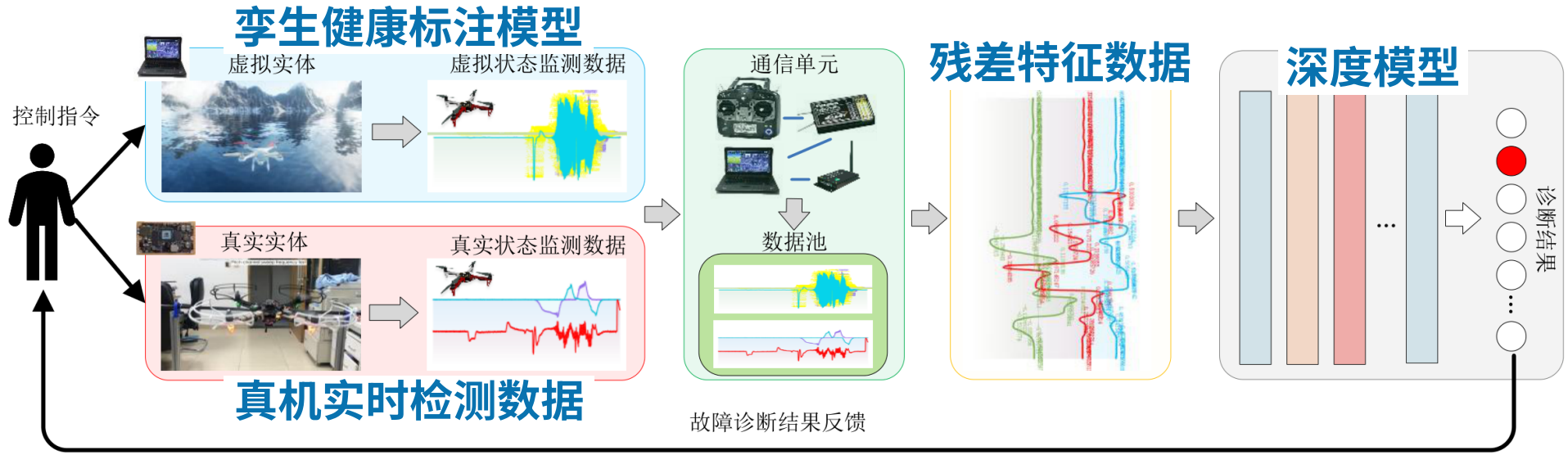


图7.15（a） 基于数字孪生与深度学习的系统级故障诊断

读图：相同控制输入 → 对齐虚实观测 → 提取残差或特征 → 诊断输出。

要点：诊断分类用监督学习即可；结果要连同数据划分与难例解读。
方法细节见课件7.5「论文来源与图符对照」页。

7.8.1 实验入口与高阶案例：高阶验证案例

路径二：比较的不只是轨迹，还包括故障与测量条件

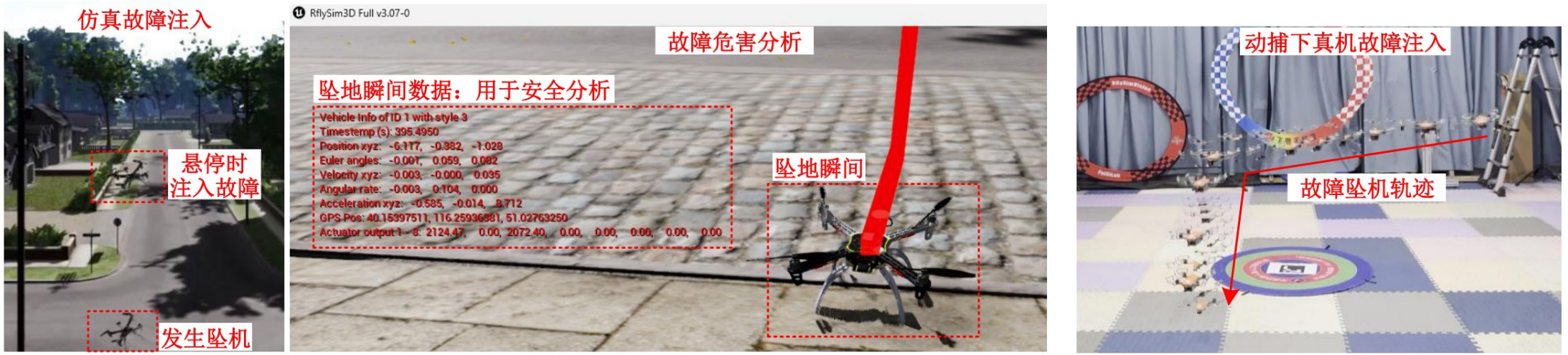


图7.15（b） 真机与仿真节点并行运行实验

对齐： 故障类型与强度、注入时刻、初始状态、任务和采样时间。

比较： 轨迹、姿态、速度与最终后果；说明误差范围和没有覆盖的条件。

延伸： 对齐要求的完整清单见课件7.3.1「虚实结果的可比性」页。

本章目录

例程实验与虚实验证

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 6 个教学单元

7.8.1 实验入口与高阶案例
教材对应：第7.3.1–7.3.2节

7.8.2 电机故障验证
教材对应：第7.2.3、7.3.1节

7.8.3 自动测试与事件日志
教材对应：第7.1.5.2、7.3.1节

7.8.4 数据处理与诊断训练
教材对应：第7.1.5.4、7.3.1节

7.8.5 安全评分实验
教材对应：第7.1.5.3、7.3.1节

7.8.6 虚实验证与策略比较
教材对应：第7.1.5.1、7.3.2节

7.8.2 电机故障验证：例程运行·步骤

两个电机故障例程：先学故障模块，再进软件在环

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/7.RflySimPHM/0.ApiExps/<例程目录>/
要求：MATLAB 2022B及以上与RflySim工具链；步骤与常见问题见各目录Readme.pdf。

e6_UseFaultLib：单独学习故障模块

1 运行Init.m初始化参数
2 打开MotorFault.slx，回到模型最外层
3 故障开关拨到1（0为不注入）
4 调整故障参数后运行仿真

e8_BaseMotorFault：最小模板软件在环

1 运行Init.m
2 打开MulticopterModel.slx，Build Model
3 运行GenerateModelDLLFile.p生成DLL
4 双击MulticopterModelSITL.bat
（Readme中写作SITLRun.bat）

运行影响：e8脚本以管理员权限运行，先把MulticopterModel.dll复制到CopterSim模型目录，再结束已运行的PX4 SITL与CopterSim并重新启动；在PX4窗口按任意键结束，脚本随即关闭CopterSim、QGroundControl（QGC）与RflySim3D。

7.8.2 电机故障验证：例程运行·判据与排查

API例程e8_BaseMotorFault：注入故障后起飞剧烈晃动

先确认初始化与连接，再看故障现象；判据与排查依据两个例程的Readme.pdf。

e8_BaseMotorFault预期现象与判据

启动： QGC、CopterSim、RflySim3D各1个

初始化完成： CopterSim下方日志打印
GPS 3D fixed & EKF initialization finished

连接成功： 出现Enter Auto Loiter Mode!后，在QGC中手动起飞

注入效果： 无法正常起飞，发生剧烈晃动

常见失败与排查

编译报错： 工作路径设为例程目录；MATLAB需2022B及以上

DLL失败： 检查文件路径、MATLAB权限与杀毒软件拦截

看不到故障模块（e6）： 返回模型最外层

无故障现象： 核对开关、参数、仿真时长与注入点连线；e8模块版本不符时从故障模块库替换

e6_UseFaultLib判据： 开关为0不注入、为1注入；可对比两种开关下的输出。

7.8.2 电机故障验证：例程入口

电机例程按生成模型、启动仿真、运行脚本执行

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/7.RflySimPHM/1.BasicExps/e3_MotorFault/

入口（详见Readme.pdf）	操作与判据
Init.m → Build → GenerateModelDLLFile.p	修改模型时重新生成DLL； 已附MulticopterModel.dll，可跳过
MulticopterModelSITL.bat	启动QGC、CopterSim、RflySim3D； 并结束已运行的CopterSim与PX4
初始化判据	CopterSim日志出现 GPS 3D fixed & EKF initialization finished
Python38Run.bat	输入python FaultInjectAPITest.py； 约50 s退出，启动窗口按任意键关仿真

7.8.2 电机故障验证：例程排查

运行失败先查模块版本、连接与参数

编译失败： MotorFault模块与SDK版本不符时，从RflySimLib重新拖入该模块；提示找不到编译器时，在MATLAB中运行mex -setup。

连不上仿真： 以管理员权限运行bat，等初始化日志出现后再运行脚本；检查防火墙是否拦截Python、UDP端口是否被占用。

现象不符： FaultID为123450；系数在0~1；8维整数与20维浮点的类型正确；先解锁（arm）再注入。

部分电机无响应： 系数个数与实际电机数一致，四旋翼写4个。

硬件在环： 运行MulticopterModelHITL.bat，需USB连接飞控，脚本自动识别串口；其余步骤同软件在环。

对照现象： 坠毁与单电机旋转的截图见「预期现象」页。

7.8.2 电机故障验证：原始调用

当前默认脚本让三台电机输出为零

```
silInt = np.zeros(8).astype(int).tolist()
silFloat = np.zeros(20).astype(float).tolist()
silInt[0:2] = [123450, 123450]
silFloat[0:4] = [0.6, 0, 0, 0]
mav1.sendSILIntFloat(silInt, silFloat)
```

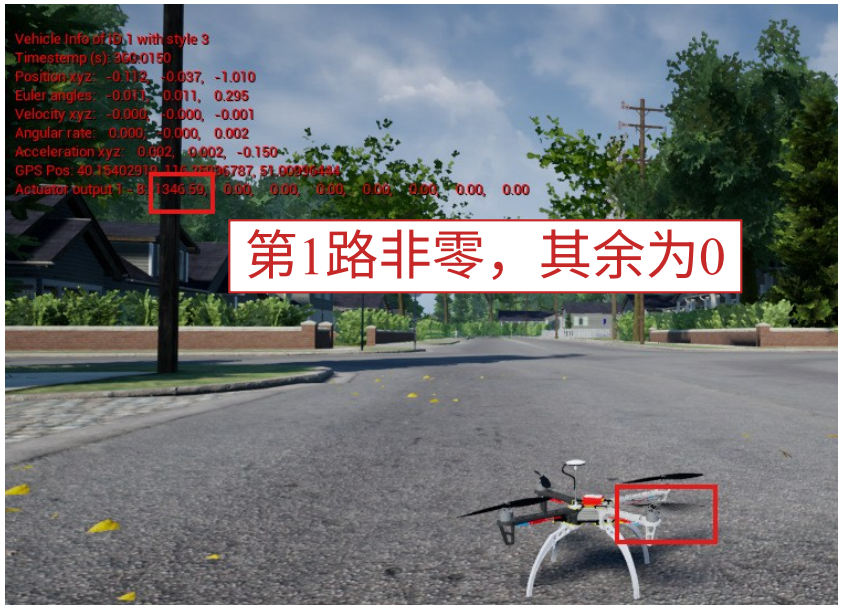
源码时序： 5 s解锁并设10 m高度目标；20 s注入一次；50 s后退出。
预期现象： 注入后飞机坠毁；再次发起飞指令只有1个电机旋转。
数组含义： 0令对应电机控制量为0，后三台电机因此停转。

7.8.2 电机故障验证：预期现象

默认数组注入后坠毁，再起飞只剩1路输出



图：注入后机体坠毁（Readme第6页）



图：再起飞仅1个电机转（第7页）

坠毁：默认数组[0.6, 0, 0, 0]使2–4号通道控制量为0，机体失去升力。

再起飞：需另发起飞指令；信息栏执行器输出只有第1路非零（右图红框）。

本章目录

例程实验与虚实验证

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 6 个教学单元

7.8.1 实验入口与高阶案例
教材对应：第7.3.1–7.3.2节

7.8.2 电机故障验证
教材对应：第7.2.3、7.3.1节

7.8.3 自动测试与事件日志
教材对应：第7.1.5.2、7.3.1节

7.8.4 数据处理与诊断训练
教材对应：第7.1.5.4、7.3.1节

7.8.5 安全评分实验
教材对应：第7.1.5.3、7.3.1节

7.8.6 虚实验证与策略比较
教材对应：第7.1.5.1、7.3.2节

7.8.3 自动测试与事件日志：平台例程主线

四个例程串起用例入库、执行、采集与日志下载

e14 用例入库 ➡ e15 控制序列 ➡ e9 自动采集 ➡ e16 日志下载

e14_DBExp： AutoCase.py 生成用例 JSON，导入 Quadcopter.db 的 TEST_CASE 表。

e15_CmdExp： CmdCtrl.py 解析 db.json 中的控制序列，驱动解锁、飞行与注入。

e9_data_collect： data_collect.py 逐条执行用例并采集数据，结果写入 fault.db。

e16_QGCLoadExp： QGCLogDown.py 调用 ReqQgcLog，自动下载最新飞行日志。

相关例程： 事件写入见 e18，离线处理见 e10；均在 0.ApiExps/ 下。

7.8.3 自动测试与事件日志：用例数据库

用例库的行数与完成测试数分别统计

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/7.RflySimPHM/0.ApiExps/e14_DBExp/

查询对象	行数（V5.01）	能够说明什么
TEST_CASE	175	AutoCase.py 扫描参数生成的设计用例
TEST_RESULT	0	结果表为空，尚无执行记录

计划覆盖： AutoCase.py 按参数起点、终点、步长批量生成用例并入库。

实际覆盖： 按完成且证据齐全的运行记录统计；重复次数单独报告。

7.8.3 自动测试与事件日志：用例 JSON 与参数扫描

AutoCase.py 按起点、终点、步长批量生成用例

例： 123542.json 中 CaseID 346（加速度计噪声，参数 0）

"CaseID": 346,
"Subsystem": "Sensor",
"Component": "Accelerometer",
"FaultID": "123542",
"FaultType": "Accelerometer noise",
"FaultMode": "⋯ interference",
"FaultParams": "0",
"ControlSequence": "⋯;2,6,123542,0;1,1,10",
"TestStatus": "Finished"

扫描： 参数按步长从起点增到终点。
四类传感器：0–30、步长 1，各 31 条。
GPS：0–250、步长 5，共 51 条。
合计 175 条。

序列： 2,1 解锁；1,1,5 等 5 s；
2,3 位置指令；2,4 速度指令；
2,6,123542,0 注入该故障、参数 0。

TestStatus： 生成时统一写为 Finished，执行与否看结果表。

7.8.3 自动测试与事件日志：进阶 e4_SingFramSingleInsExp

进阶 e4 例程按配置执行单机软件在环自动测试

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/7.RflySimPHM/

2.AdvExps/e4_SingFramSingleInsExp/AutoTest.py

```
conf = [['Quadcopter', 'SITL', 1]]
PX4MavCtrler(20100)
```

配置含义：Quadcopter 四旋翼；SITL 软件在环；1 个实例；20100 为通信端口。

入口：AutoTest.py；说明见 Readme.pdf；环境 Python38Run.bat。

运行：先启动 model/Quadcopter/QuadModelSITL.bat 并等初始化完成，再在 Python38Run.bat 中运行 python AutoTest.py。

7.8.3 自动测试与事件日志：进阶 e4_SingFramSingleInsExp 判据与常见失败

初始化完成再运行，结果看报告与每轮日志

初始化判据：QuadModelSITL.bat 启动 QGC、CopterSim 与 RflySim3D；CopterSim 日志出现“GPS 3D fixed & EKF initialization finished”才算完成。

结果判据：data 下的 TestInfo、TestResult 报告（HTML 可用浏览器打开）；各轮 .ulg 与 CSV 在 data/single/sInstance/Quadcopter/TestCase_N/log/。

初始化不足：GPS 未固定时，重新运行 QuadModelSITL.bat，等待至少 30 s 再运行 AutoTest.py。

其他失败：模块导入错误时，确认 Python 路径含当前目录；ulog2csv 报错时，手动把 log 下的 .ulg 转为 CSV。

7.8.3 自动测试与事件日志：e18 事件写入例程

e18 注入故障时向飞控日志写一条事件命令

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/7.RflySimPHM/

0.ApiExps/e18_FaultLogTimestamp/FaultInjectAPITest.py

```
mav1.sendSILIntFloat(silInt, silFloat)
mav1.SendFaultEvent(123450)
```

运行：MulticopterModelSITL.bat 等初始化完成 → Python38Run.bat → python FaultInjectAPITest.py；说明见 Readme.pdf。

影响：20 s 注入电机效能故障（FaultID 123450）并写事件，飞行可能中断或坠毁；50 s 后上锁（disarm）。

日志：ReqQgcLog 请 QGC 下载最新 .ulg 到 log/，再由 ulog2csv 转成各话题 CSV。

7.8.3 自动测试与事件日志：e18 判据与字段

在 vehicle_command_0.csv 中检索 command=31000

判据：vehicle_command_0.csv 中有 command=31000、param1=123450 的行。

日志列	SendFaultEvent 写入	对应事件字段
param1	FaultID，如 123450	fault_id
param2	载具 ID	载具编号
param3	action：1 注入，2 分片续写，0 清除	event_type
param4	seq；小数位是分片号（如 5.01）	同一事件的分片
param5–7	故障参数，每片最多 3 个	parameters
timestamp	飞控接收处理时刻（μs）	timestamp（飞控）

注意：它标的是飞控接收处理时刻；生效时刻仍要看模型或飞控响应。

常见失败：无记录查日志下载与转换；123450系数越低，效能损失越大。

7.8.3 自动测试与事件日志：日志组织

每轮一个日志目录，汇总报告放在上层

进阶 e4 的 data 目录（示意）：上层是汇总报告，下层每轮一个日志目录。

data/	汇总层：报告与索引
TestInfo.csv、TestInfo.html	用例、参数与 DataPath
TestResultInfo.csv、TestResult.html	每轮结果与响应描述
single/sInstance/Quadcopter/	单机单实例的运行目录
TestCase_1/log/、TestCase_2/log/	每轮原始 .ulg 与解码 CSV
e18_FaultLogTimestamp/log/	事件：vehicle_command_0.csv

ULog 是 PX4 的结构化二进制日志；CSV 是带列定义的文本数据表。

7.8.3 自动测试与事件日志：历史报告核对

进阶 e4 历史汇总能读结构，追溯还需补四项

真实字段或现象	安装版 V5.01 中的内容	补齐什么才能解释
两份 CSV	各 6 行；CaseID 重复为 1 或 2	独立 run_id 及结果关联键
Case 1 参数	[1.0, 1.0, 1.0, 1.0]	模型参数语义与故障生效证据
Case 1 响应	Smooth flight / Violent rolling 等	对应每轮的时间序列与初值
DataPath	所指原始日志目录未随安装包提供	日志、事件、配置与哈希

历史报告用于读字段结构；核实故障生效还需运行编号、参数语义与原始日志。

本章目录

例程实验与虚实验证

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 6 个教学单元

7.8.1 实验入口与高阶案例
教材对应：第7.3.1–7.3.2节

7.8.2 电机故障验证
教材对应：第7.2.3、7.3.1节

7.8.3 自动测试与事件日志
教材对应：第7.1.5.2、7.3.1节

7.8.4 数据处理与诊断训练
教材对应：第7.1.5.4、7.3.1节

7.8.5 安全评分实验
教材对应：第7.1.5.3、7.3.1节

7.8.6 虚实验证与策略比较
教材对应：第7.1.5.1、7.3.2节

7.8.4 数据处理与诊断训练：离线实践

只读已有文件也能完成一轮数据检查

1. **定位：**在 Python38Run.bat 环境用 pandas 读 e10 四张 CSV；结果另存。

2. **核对：**按 timestamp 筛选 32–36 s，核对样本数、单位、坐标和事件来源。

3. **复算：**时间戳并集 → 插值 → 10 行均值/标准差 → 34 s 标签；自查：712 行×49 列，flag 0/1 为 343/369 行，首个 1 在 34.004 s。

4. **交付：**曲线、列顺序、原文件哈希、标签说明、分组方案和排除规则。

先把数据说明白，再比较算法；离线复算可以核验处理链。

7.8.4 数据处理与诊断训练：可操作的学习入口

先读已有入口，再确认推理资源是否齐全

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/7.RflySimPHM/0.ApiExps/

目录与入口	读后应能指出
e12_health_basic/ **health_basic.py**	判据：相邻两次高度差＞0.25 m 即判故障；完整评估处为占位。
e13_model_train/ **Model-training.ipynb**	历史训练输出用于核对维度 与分母，不作跨工况成绩。

论文目录：[安装目录]/RflySimAPIs/PaperRes/6.IoT-DT-Diagnosis/
含论文、cases/五个最小案例与Readme.pdf；notebook、数据与权重按其获取。
论文出处与DOI见课件7.5「论文来源与图符对照」页。

7.8.4 数据处理与诊断训练：例程运行与排查

运行前先知道步骤、现象和对其他软件的影响

e12_health_basic/（需启动仿真）	e13_model_train/（离线运行）
入口： Python38Run.bat 打开环境，运行 python health_basic.py。 **步骤：** 在 Off_ctrl_connect_copter.py 第11行选 SITL/HITL 批处理；脚本自行启动仿真。 **现象：** 升至5 m后开始评估，逐拍打印“健康”；出现“故障”即跳出循环。 **影响：** 满30 s 打印“退出测试”，并关闭 CopterSim、QGroundControl（QGC）、RflySim3D。 **排查：** 先确认 CopterSim 显示 GPS 3D fixed & EKF initialization finished。	**入口：** VS Code 打开 Model-training.ipynb。 **步骤：** 逐格运行，读取同目录 processed_data.csv；末格保存 mymodel.model。 **现象：** 输入48维，隐含层56、32维（ReLU），输出2类；0/1为时间阈值标签。 **排查：** 缺 keras、numpy、pandas 时用 pip 安装；内存不足时减小 batch size。 **评价：** 训练输出只用于核对维度与分母，不作跨工况成绩。

本章目录

例程实验与虚实验证

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 6 个教学单元

7.8.1 实验入口与高阶案例
教材对应：第7.3.1–7.3.2节

7.8.2 电机故障验证
教材对应：第7.2.3、7.3.1节

7.8.3 自动测试与事件日志
教材对应：第7.1.5.2、7.3.1节

7.8.4 数据处理与诊断训练
教材对应：第7.1.5.4、7.3.1节

7.8.5 安全评分实验
教材对应：第7.1.5.3、7.3.1节

7.8.6 虚实验证与策略比较
教材对应：第7.1.5.1、7.3.2节

7.8.5 安全评分实验：例程入口与读法

进阶 e8_SafetyAssExp评第二速度分量，输出得分与等级

[安装目录]/RflySimAPIs/7.RflySimPHM/2.AdvExps/e8_SafetyAssExp/
入口：Readme.pdf、Python38Run.bat、SafeAss.py（调用ProfustSA.py，读取truedata_vel.csv）

设置或步骤	作用	输出与判据
Python38Run.bat **python SafeAss.py**	打开集成Python环境， 运行评估脚本	打印“安全得分为” 和“安全等级为”两行
EvalDim=[1] **VelCmd=[0,0,2]**	评第二速度分量， 目标值为0	数组索引[7000,9500)， 共2500条，两点取均值
常见失败	模块导入错误； Python环境无法启动	查ProfustSA.py同目录、 pandas与numpy已安装

FallIndex=0时走未坠地分支；输出等级用Unaffected至Catastrophic五档名称。

练习与讨论

同一故障在三个层面分别作出判断

- **场景题：**单电机效能降至70%，巡检改到输电设施附近。暴露对象和监测量怎样改？增加告警后，S、O、D档位各怎样变化？

- **可靠性题：**故障间隔服从指数分布，$\lambda = 0.004\,\mathrm{h}^{-1}$。计算45 min任务内至少一次故障的概率；它的$\lambda t$是7.4.3算例的几倍？

- **参数题：**把EvalDim改为[2]、VelCmd保持[0,0,2]，选中哪个分量、目标值是多少？若FallIndex取正数，等级输出什么？

答题时分别注明：场景与后果、模型与单位、参数与分支含义。

参考要点

风险变化要能定位到暴露或有效防护

- **需要重写：**暴露对象改为线路与设备，后果含碰线损伤与次生停电；监测补设施间距、风扰与定位误差。
- **措施生效条件：**及时识别故障，剩余能力足以绕离设施或受控降落，动作在安全间距耗尽前完成。
- **档位变化：**告警提高可探测性，D下降；电机故障的发生档位O不变；S只在措施实际限制后果时才改变。
- **排序原则：**先处理严重人员危害，再参考同口径经验得分；按验证后的残余风险更新。

参考要点

任务概率与评分参数的代入参考

$$t = 45/60 = 0.75\,\mathrm{h}, \quad \lambda t = 0.004 \times 0.75 = 0.003$$

$$F(t) = 1 - e^{-0.003} = 0.0029955 \approx 0.2996\%$$

- **倍数对照：** $\lambda t = 0.003$是30 min算例的3倍；$\lambda t \ll 1$时F也约为3倍。
- **分量与目标：** EvalDim=[2]选第三分量（索引从0起），目标值为VelCmd中的2。
- **坠地分支：** FallIndex>0时等级为Catastrophic；FallEnergy=0时得分为0.1。

本章目录

例程实验与虚实验证

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 6 个教学单元

7.8.1 实验入口与高阶案例
教材对应：第7.3.1–7.3.2节

7.8.2 电机故障验证
教材对应：第7.2.3、7.3.1节

7.8.3 自动测试与事件日志
教材对应：第7.1.5.2、7.3.1节

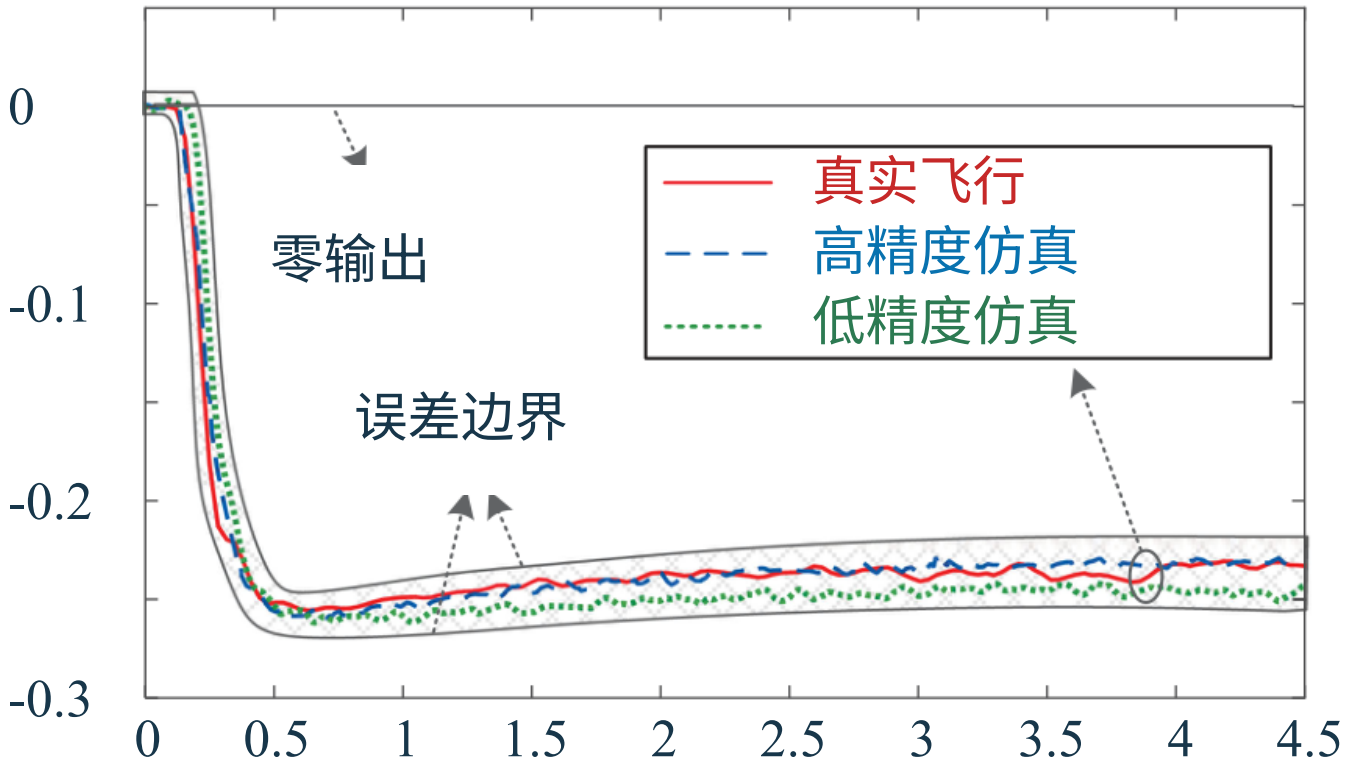
7.8.4 数据处理与诊断训练
教材对应：第7.1.5.4、7.3.1节

7.8.5 安全评分实验
教材对应：第7.1.5.3、7.3.1节

7.8.6 虚实验证与策略比较
教材对应：第7.1.5.1、7.3.2节

7.8.6 虚实验证与策略比较：模型可信度的原始证据

真实、高低精度和零输出对照让误差有含义



红线：真实户外飞行，提供本次基准响应。

蓝/绿线：高/低精度仿真，比较响应差异。

灰色边界：对应指定误差接受线；零输出明显失配。

DOI：10.1109/TIE.2020.2982122

安装版论文目录：
[安装目录]/RflySimAPIs/PaperRes/0.RflySimToolChain/

Dai等（IEEE TIE，2021）Fig.11：纵轴俯仰角/rad，横轴时间/s

7.8.6 虚实验证与策略比较：误差计算一步

均方根误差先回答“两条响应相差多少”

$$e = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_{\mathrm{sim},i} - y_{\mathrm{real},i})^2}$$

n 是对齐样本数；$y_{\mathrm{sim},i}$ 与 $y_{\mathrm{real},i}$ 是同一时刻模型与真实响应。
本例均为俯仰角，单位 rad；e 为均方根误差。

教学样本：0、0.1、0、−0.1 rad；正负偏差不相互抵消。

$$e = \sqrt{\frac{0^2 + 0.1^2 + 0^2 + (-0.1)^2}{4}} = 0.0707\ \mathrm{rad}$$

7.8.6 虚实验证与策略比较：可信度分数映射

容差与接受线决定分数的工程含义

$$\eta = \frac{K_e \varepsilon}{\sqrt{(K_e \varepsilon)^2 + e^2}}$$

$$K_e = \frac{\eta_{\text{pass}}}{\sqrt{1 - \eta_{\text{pass}}^2}}$$

$\varepsilon > 0$ 为同单位容差；$\eta_{\text{pass}} = 0.6$ 时 $K_e = 0.75$。
本例 $\varepsilon = 0.1$ rad 为教学设定；η 是匹配分数，不是安全概率。

误差与容差的关系	本映射的分数	解释
误差=容差	0.600	位于所选接受线
误差=0.707倍容差	约0.728	均方根误差算例，优于接受线
误差=2倍容差	约0.351	超过本用途容差

7.8.6 虚实验证与策略比较：原论文结果解释

论文分数区分模型精度，同时保留适用范围

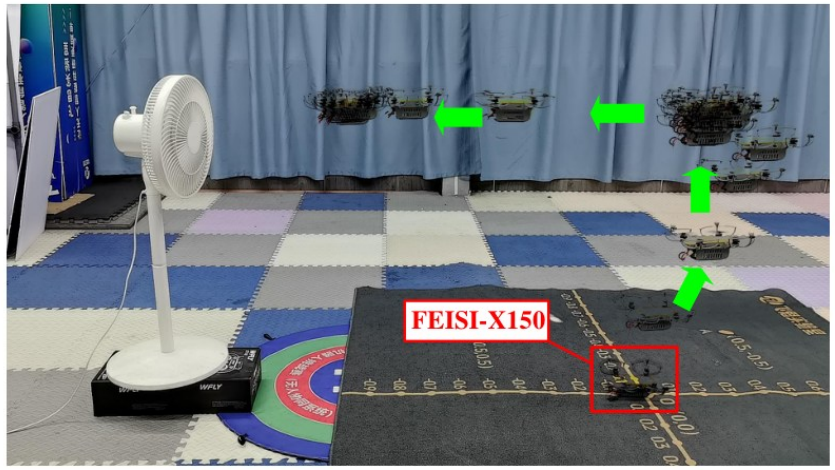
同上论文（Dai等，2021）表II；同一平飞响应、同一容差映射，分数按百分制显示。

比较对象	论文时域分数	在本次评价中的含义
高精度模型	94.4	较接近真实响应
低精度模型	73.8	仍高于所选60分接受线
误差边界	60.0	本例接受线
零输出	1.75	与真实响应明显失配

原论文误差、容差和评价范围：https://rfly.buaa.edu.cn/doc/2020DaiSimulationCredibility.pdf

7.8.6 虚实验证与策略比较：虚实控制比较场景

同一机型、任务与风扰条件下比较四种策略



图：FEISI-X150风扰场景（Fig.14(a)）
Dai等，Unmanned Systems，2025
DOI：10.1142/S2301385027500464
安装版：[安装目录]/RflySimAPIs/PaperRes/2.UAV-DT-Control-Sim2Real/

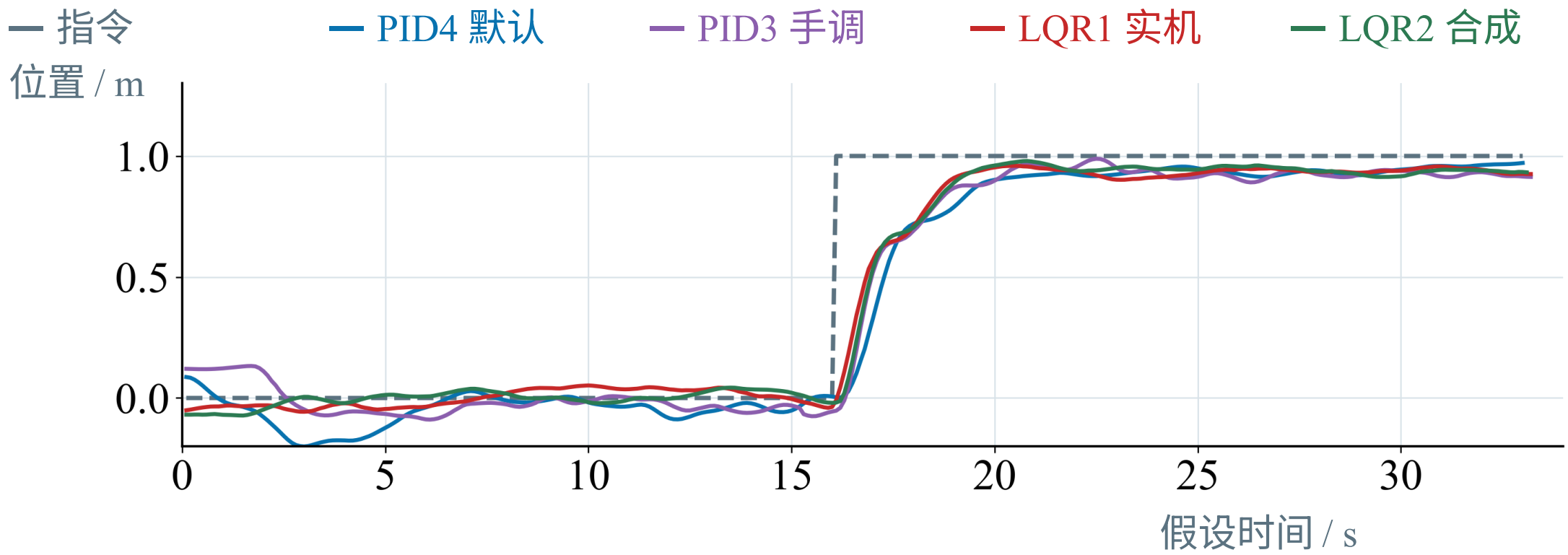
PID：比例-积分-微分反馈。
LQR：线性二次型调节器。

数据标记	论文中的策略
PID4	默认PID
PID3	手调PID
LQR1	实机数据LQR
LQR2	合成数据LQR

合成数据：数字孪生扫频仿真生成，与少量实测合用来设计LQR2。

7.8.6 虚实验证与策略比较：四策略位置记录

位置响应显示起始偏差、跟踪速度与稳态差异

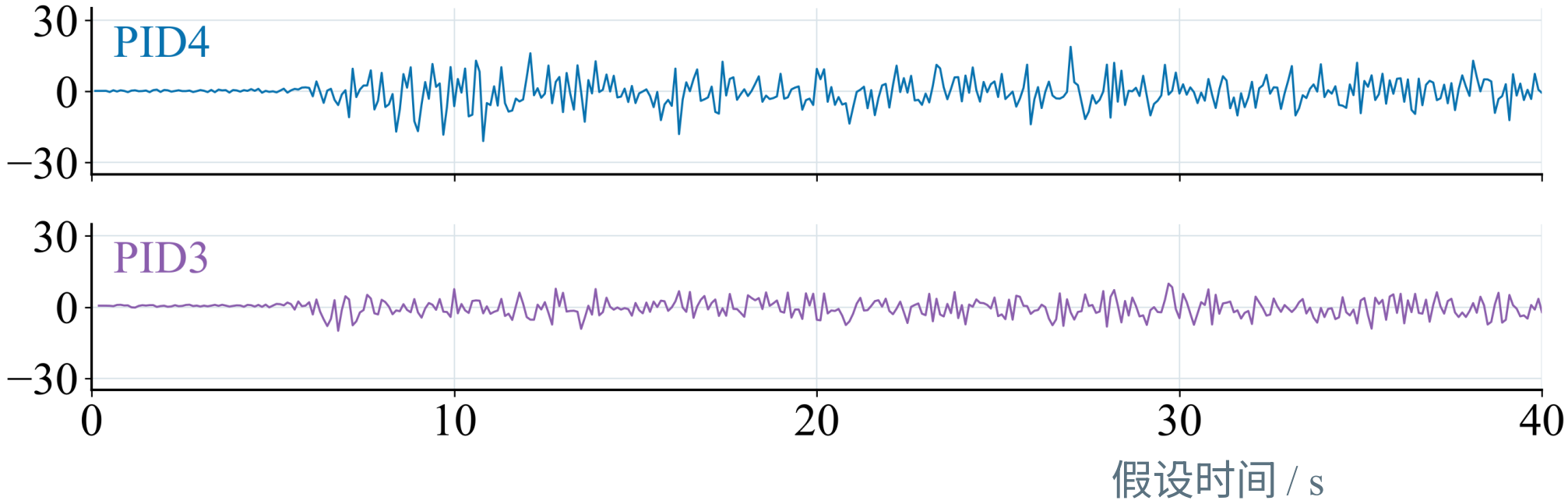


图：四策略位置记录，来自MATLAB数据文件（MAT）；间隔假设0.1 s

7.8.6 虚实验证与策略比较：四策略加速度记录

原始加速度揭示默认与手调PID的幅值差异

机体X向原始加速度，单位 m/s^2；未滤波，显示原记录符号。

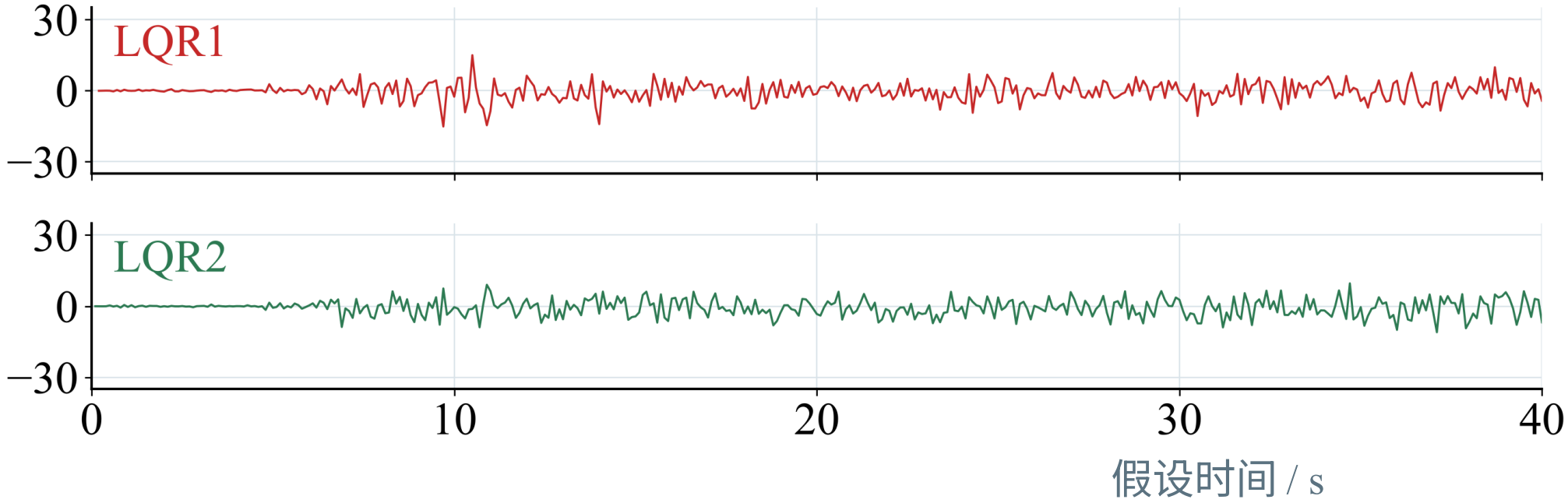


图：PID4（默认）与PID3（手调）加速度记录（MAT数据）

7.8.6 虚实验证与策略比较：四策略加速度记录

两组LQR也需同时检查跟踪与加速度

LQR1为实机数据策略，LQR2为合成数据策略；单位 m/s^2。



图：LQR1（实机数据）与LQR2（合成数据）加速度记录（MAT数据）

7.8.6 虚实验证与策略比较：离线指标与计算口径

误差积分与加速度RMS分别度量不同取舍

$$\mathrm{IAE} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{|e_i| + |e_{i+1}|}{2} \Delta t$$

绝对误差积分（IAE）累计偏差；单位 $\mathrm{m \cdot s}$。

$$\mathrm{ISE} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{e_i^2 + e_{i+1}^2}{2} \Delta t$$

平方误差积分（ISE）更重视大偏差；单位 $\mathrm{m^2 \cdot s}$。

$$a_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} a_j^2}$$

均方根（RMS）描述加速度幅值；单位 $\mathrm{m/s^2}$。

y_i：位置测量；u_i：位置指令；a_j：机体X轴原始加速度。

$e_i = y_i - u_i$；n、M分别为位置/加速度样本数；$\Delta t = 0.1\,\mathrm{s}$（脚本假设）。

7.8.6 虚实验证与策略比较：同窗口的离线结果

孪生合成数据设计的LQR2跟踪最好，手调PID加速度最小

窗口：位置1–330，加速度2–400；间隔0.1 s按脚本假设。

策略 / 数据标记	IAE / m · s	ISE / m^2 · s	RMS / m/s^2
默认PID（PID4）	3.4485	1.2158	5.7373
手调PID（PID3）	3.1953	1.0149	3.5310
实机数据LQR（LQR1）	2.7337	0.8796	3.7532
合成数据LQR（LQR2）	2.4438	0.8661	3.6013

结论：同机型、同风扰下，孪生合成数据设计的LQR2三项指标均不逊于LQR1；在该工况下，孪生数据可替代部分实机数据。

7.8.6 虚实验证与策略比较：离线复算任务

离线复算入口：读取已有MAT，复现同窗口指标

[安装目录]/RflySimAPIs/PaperRes/
2.UAV-DT-Control-Sim2Real/3_Sim2RealCompare/
入口：compare_step_response.m；compare_acceleration.m；data/（8份MAT）

要求： MATLAB R2022a及以上；完整说明见上级目录Readme.pdf第4.4节。

步骤： ①在MATLAB中切到上述目录；②运行下方PID4片段；
③换组时文件名与变量前缀一起换：PID3/pid3、LQR1/lqr1、LQR2/lqr2。

```
load('data/PID4_data.mat'); load('data/PID4_acc.mat');
e=x_pid4_y(1:330)-x_pid4_u(1:330); t=(1:330)'*0.1;
IAE=trapz(t,abs(e)); ISE=trapz(t,e.^2);
RMS=sqrt(mean(pid4_acc_x(2:400).^2));
```

7.8.6 虚实验证与策略比较：离线复算的判据与排查

复算数值与结果表一致，说明数据与计算口径已对齐

预期现象与判据

片段：PID4的IAE≈3.4485、ISE≈1.2158、RMS≈5.7373，与结果表相同。

位置脚本：打印四组IAE、ISE并画阶跃曲线；按完整记录积分，其余三组略大，如PID3的IAE为3.2124。

加速度脚本：打印RMS、方差与峰峰值；RMS与表同取样本2–400。

常见失败与排查

load找不到文件：当前目录不对，先切到3_Sim2RealCompare。

变量未定义：只改了文件名，没改变量前缀（如x_pid3_y）。

数值对不上：核对样本窗口（位置1–330、加速度2–400）与Δt=0.1 s。

运行影响：两个脚本开头执行clc; clear; close all，会清空工作区并关闭已打开的图窗，运行前先保存需要的变量。

练习与讨论

练习：按两类指标选策略，再设计故障回归

课堂自定要求：IAE不超过 $3.3\,\mathrm{m\cdot s}$；加速度RMS不超过 $3.55\,\mathrm{m/s^2}$。
使用本节同窗口结果；要求仅用于比较这组数据。

模型分数：接受线0.6、容差 $\varepsilon = 0.1\,\mathrm{rad}$、误差 $e = 0.05\,\mathrm{rad}$：求分数并解释。

策略取舍：哪种策略同时满足两条要求？若IAE上限收紧到 $3.0\,\mathrm{m\cdot s}$ 呢？

故障验证：这组风扰记录之后，为电机失效处置增加两项具体回归用例。

参考要点

参考：筛选可行项，保留指标与工况的区别

$$\eta = \frac{0.75 \times 0.1}{\sqrt{(0.75 \times 0.1)^2 + 0.05^2}} = \frac{0.075}{0.0901} \approx 0.832$$

分数含义： 0.832高于接受线0.6，误差为容差一半；描述响应匹配，不表示事故概率。

两项筛选： 仅手调PID满足（IAE=3.1953、RMS=3.5310）；收紧到3.0则无一满足。

新增用例： ①同参数电机失效、原/新策略对照；②电机故障＋定位或低电量组合。

本节小结

实验结论要能沿输入、事件和结果复核

入口与配置：确认模型、固件、接口与数据版本，分别核对运行步骤和成功判据。

数据与诊断：保留命令、生效、日志与标签来源，按独立飞行检查处理和训练。

评分与比较：说明分量、单位、窗口和目标；同口径复算指标，再解释策略取舍。

结果交付：保存输入、代码、原始记录与计算结果，写明支持的结论和未覆盖条件。