本章目录

故障危害与安全评估

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

7.4.1 场景与危害
教材对应：第7.1.2.2、7.1.2.4节

7.4.2 安全分析方法
教材对应：第7.1.2.2、7.1.2.4节

7.4.3 可靠性与任务指标
教材对应：第7.1.2.4节

7.4.4 风险排序与设计改进
教材对应：第7.1.5.3、7.1.2.5节

7.4.1 场景与危害：健康与安全

飞得稳、能巡检、风险可接受是三个判断

贯穿设定：单电机效能降至正常的70%，其余条件不变；健康与安全的区分见课件7.1。

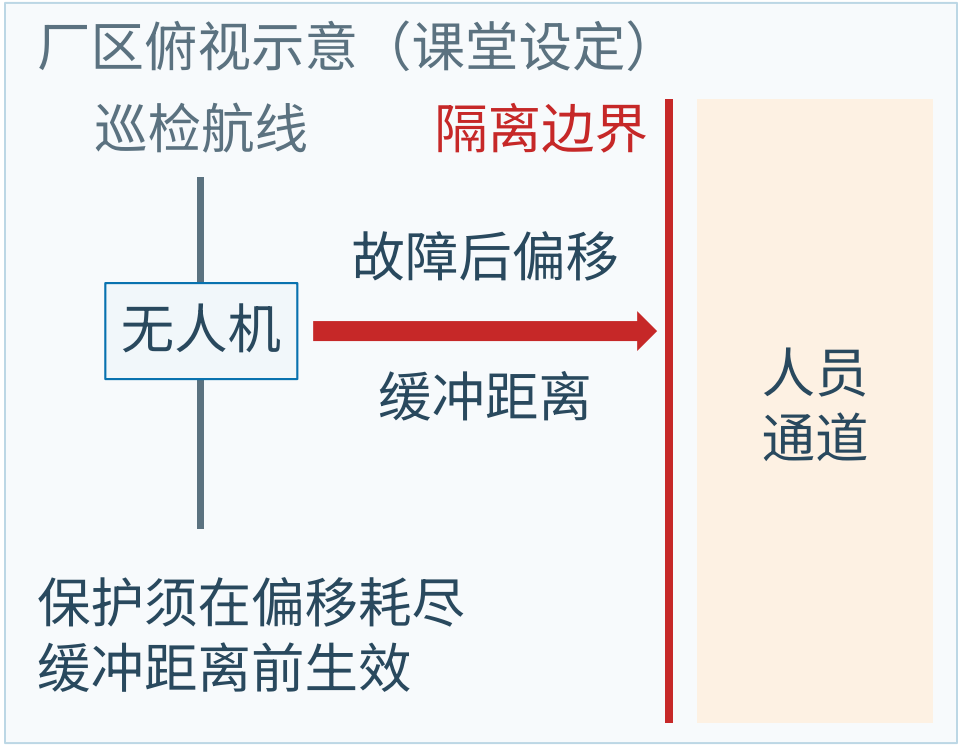
判断对象	具体看什么	巡检案例
健康状态	部件状态和性能是否偏离正常	电机效能下降； 控制补偿可能掩盖运动异常
任务能力	约束内能否获取合格巡检结果	能否保持航迹、拍清目标并返航
安全性	人员、设备与环境的风险 是否可接受	偏航、降落是否伤人 或损坏设施

故障大小描述部件，危害大小还取决于任务与环境。

7.4 故障危害与安全评估

7.4.1 场景与危害：运行场景

相同的推力下降，场景改变后果



空旷试验场

后果： 航迹偏差、任务中止，可受控降落

条件： 隔离区、平坦降落点、剩余推力

厂区人员通道

后果： 进入人员活动区，存在人员碰撞风险

条件： 人员位置、缓冲距离、告警与响应延迟

输电设施附近

后果： 碰撞线路、设备，设施损伤及次生影响

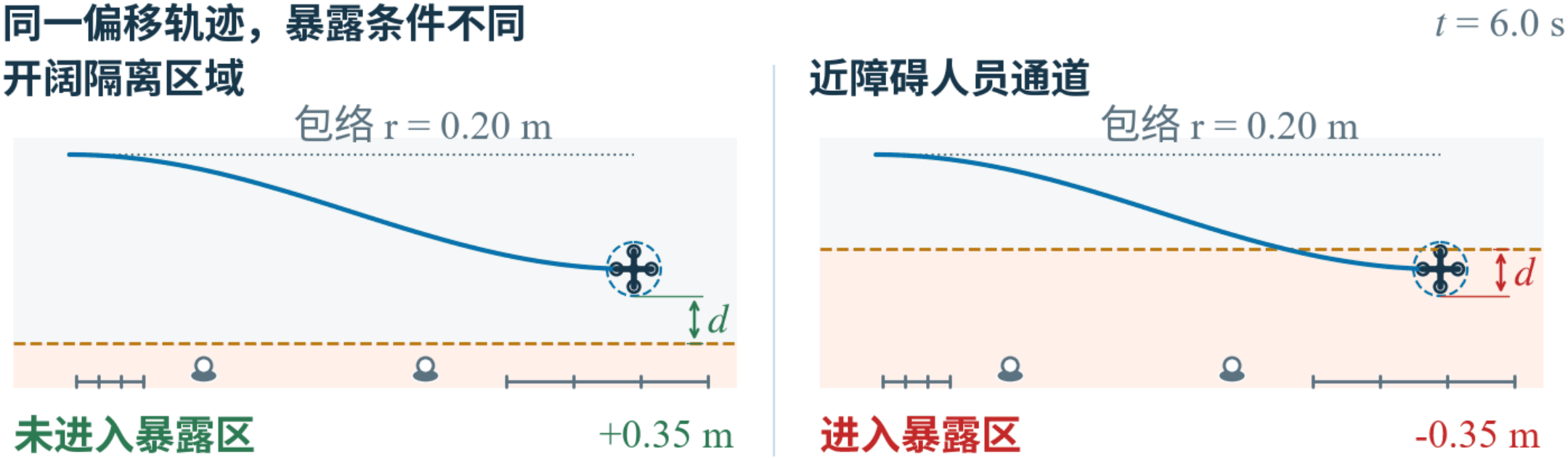
条件： 设施间距、风扰、定位与避障能力

评估对象写成“故障＋场景＋飞行阶段＋防护条件”，才能比较改进前后。

7.4.1 场景与危害：环境暴露

同一偏移轨迹进入不同的暴露区

固定故障与偏移轨迹，只改变环境边界；数值为机体轮廓净距。



图：环境暴露示意；净距为负表示进入暴露区，不代表已发生碰撞。

7.4.1 场景与危害：风险表达

故障通过功能失效和暴露形成危害

电机效能下降
故障原因 → 航迹保持失效
功能后果 → 进入人员活动区
危害情境 → 伤害或设施损失
损害后果

$$风险 = 发生概率 \times 严重程度$$

教材式(7.1)

- **量化后果：**概率无单位；严重程度以损失金额计时，乘积是该事件的期望损失。
- **经验档位：**严重程度为有序档位时，乘积只用于排序比较。
- **数字口径：**写清事件、时段与单位，如每次任务越界、每小时部件失效。

7.4.1 场景与危害：航空分级的适用范围

航空设计保证等级按失效后果规定开发强度

设计保证等级（DAL）：按失效后果规定开发与验证的严格程度。

失效后果	每飞行小时概率要求	DAL	后果含义
灾难性	$<10^{-9}$	DAL A	可能导致失事或人员重大伤亡
危害性	$<10^{-7}$	DAL B	安全裕度严重削弱，乘员受伤
重大	$<10^{-5}$	DAL C	可能导致任务中断或地面损伤
次要／无安全影响	$<10^{-3}$或定性（D）	DAL D／E	影响轻微；E级无概率限制

概率要求针对失效后果，属有人航空器语境；无人机目标按运行条件确定。

7.4.1 场景与危害：无人系统安全适配

无人机的风险目标由具体运行条件确定

工程目标先确定场景、事件与适用依据；特定运行风险评估（SORA）按运行概念评定地面与空中风险，再定所需防护与证据。

教材列举的应用	每飞行小时最大故障率	教材给出的运行特点
航拍／娱乐	$10^{-3}\,\mathrm{h}^{-1}$	低风险场景
工业巡检	$10^{-4}\,\mathrm{h}^{-1}$	有一定任务载荷与飞行时长
城市物流	$10^{-5}\,\mathrm{h}^{-1}$	低空飞行，飞越人口密集区
大型／军用	$10^{-7}\,\mathrm{h}^{-1}$	高安全等级系统

最低合理可行（ALARP）：在合理可行范围内继续降低风险，权衡风险降低与所需时间、成本和难度。

本章目录

故障危害与安全评估

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

7.4.1 场景与危害
教材对应：第7.1.2.2、7.1.2.4节

7.4.2 安全分析方法
教材对应：第7.1.2.2、7.1.2.4节

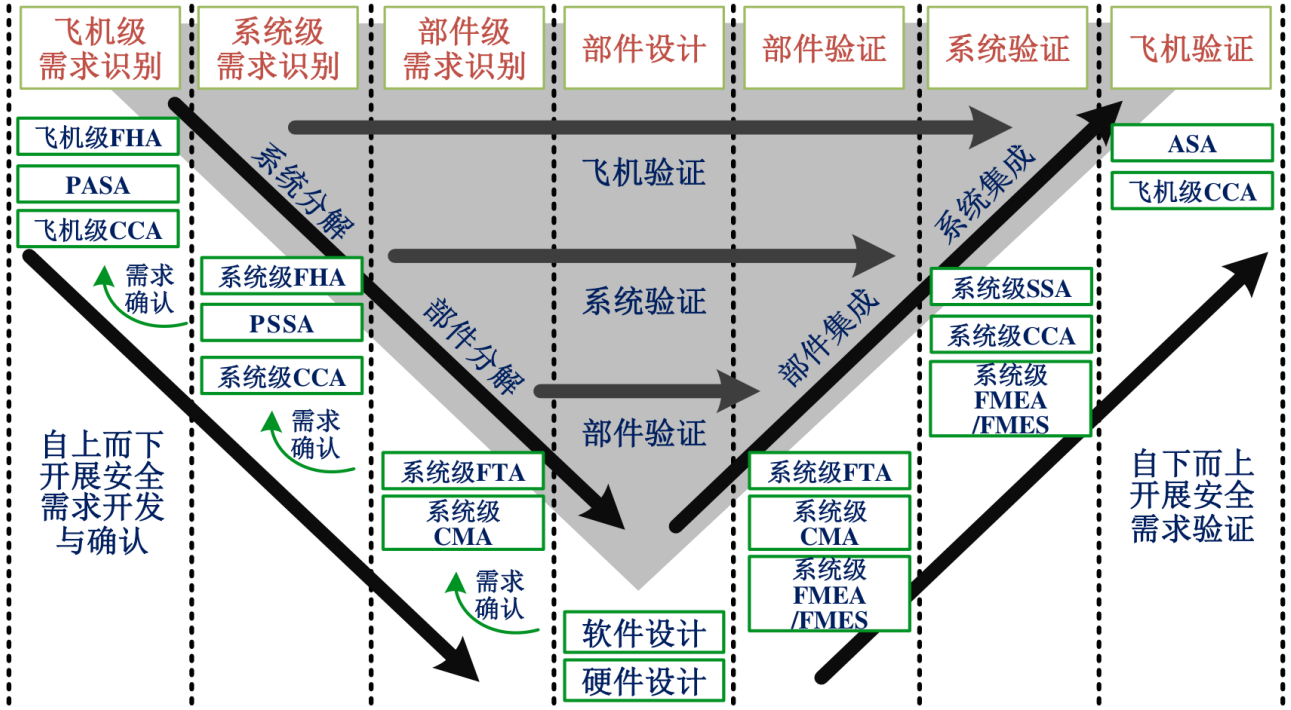
7.4.3 可靠性与任务指标
教材对应：第7.1.2.4节

7.4.4 风险排序与设计改进
教材对应：第7.1.5.3、7.1.2.5节

7.4.2 安全分析方法：安全设计流程

安全需求沿分解与集成过程接受检验

左侧下行：
逐级分解需求



右侧上行：
逐级集成验证

图7.2 载人航空器安全设计流程

绿框标出各阶段的安全分析；局部放大依次看需求、实现与验证三侧。

7.4.2 安全分析方法：需求识别与确认

功能后果决定需要分配的安全要求

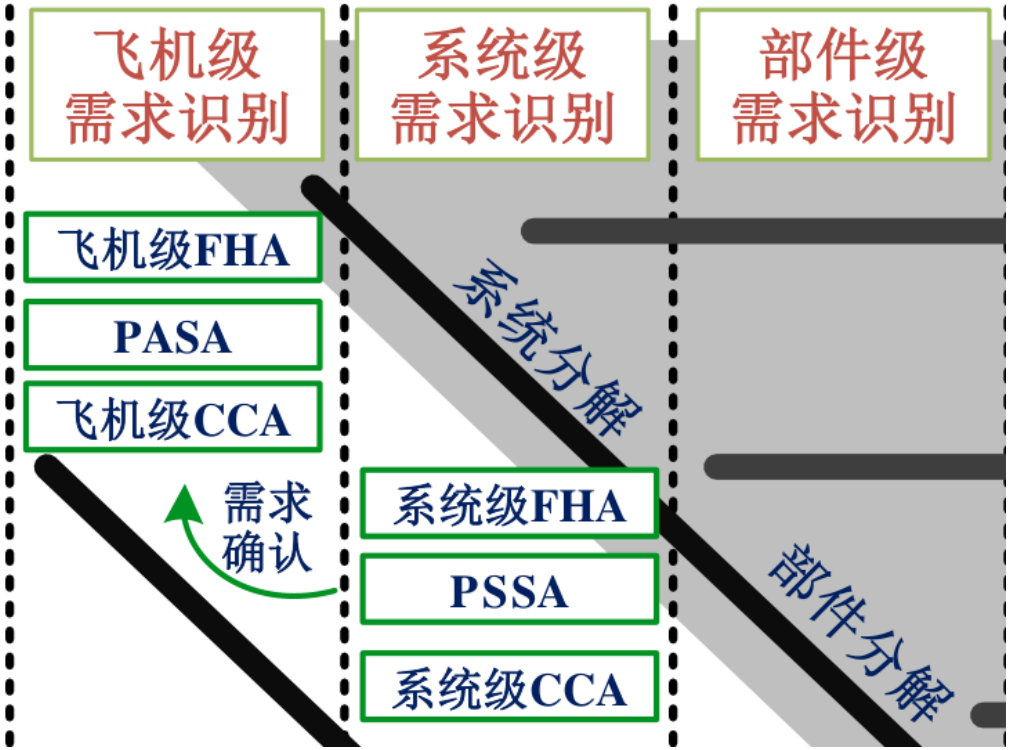


图7.2（需求侧）

功能危害评估（FHA）：
从功能后果提出安全目标。

初步飞机级安全评估（PASA）：早期检查风险分配；
本PPT系统级列已改为PSSA。

共因分析（CCA）：
追查同时破坏多通道的根源。

7.4.2 安全分析方法：部件设计与分析

部件实现需要同时检查传播路径和独立性

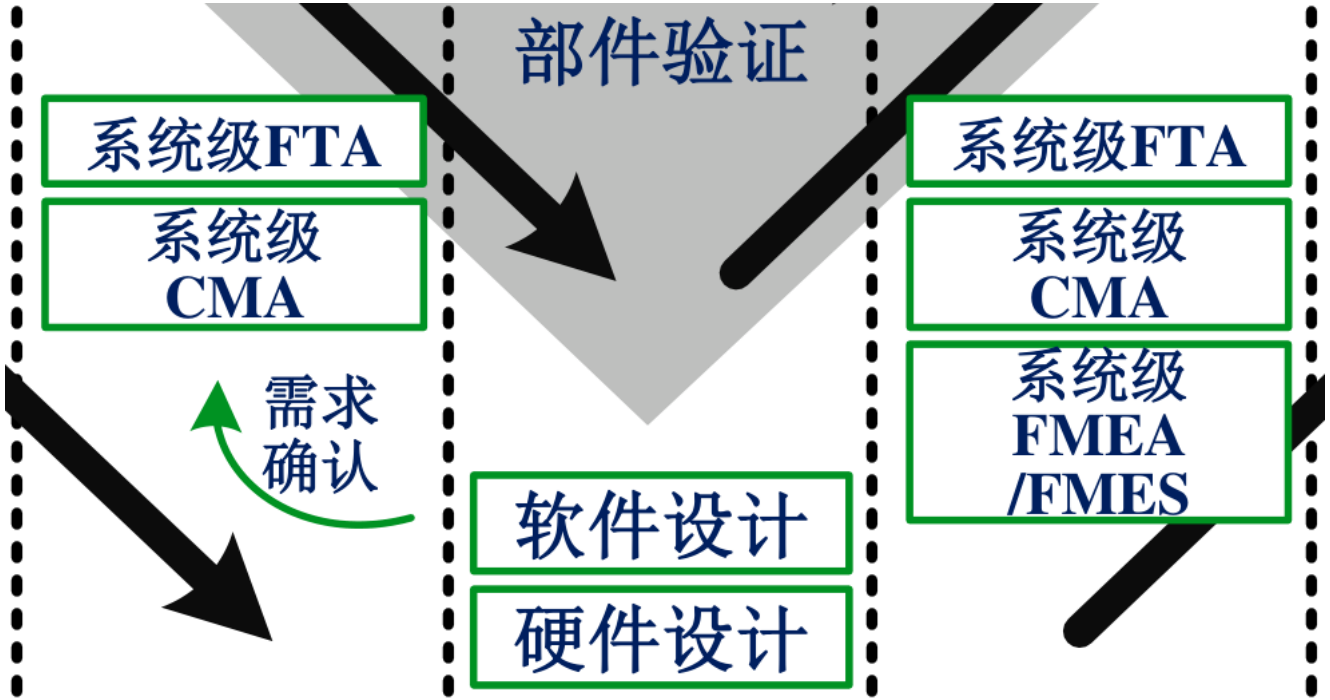


图7.2（实现侧）

故障树分析（FTA）：
从顶层危害展开组合路径。

共模分析（CMA）：
检查冗余通道的独立性。

失效模式与影响分析（FMEA）：
从部件追踪系统影响。

失效模式与影响总结（FMES）：
汇总结果供上层使用。

7.4.2 安全分析方法：集成与验证

验证结果回到系统与整机的安全目标

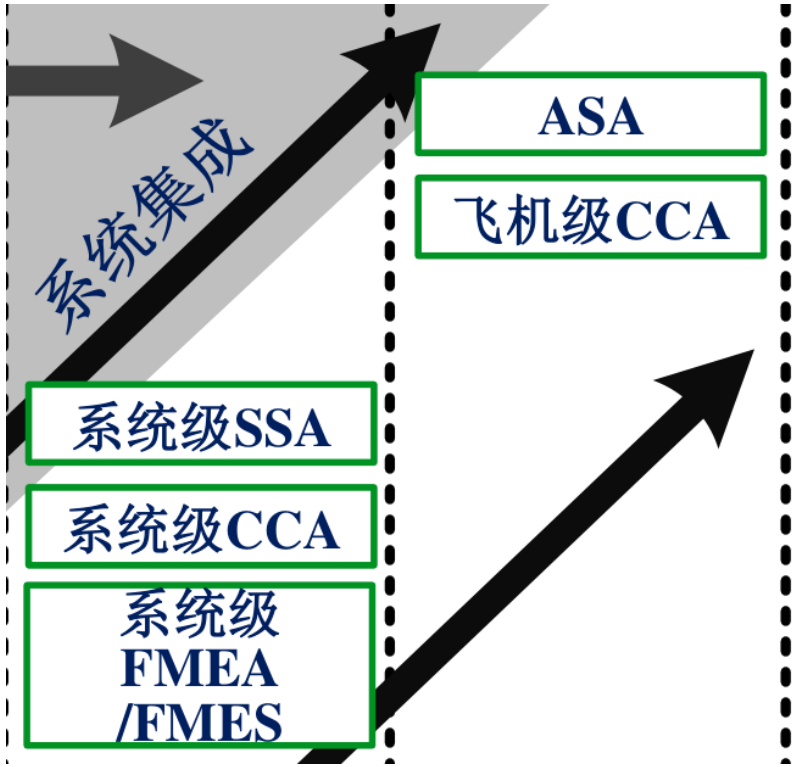


图7.2（验证侧）

系统安全性评估（SSA）：
用架构、概率和试验证据核对系统目标。

飞机级安全评估（ASA）：
审查整机集成的交互影响。

巡检对应：
检查保护动作、隔离距离与整机剩余能力。

7.4.2 安全分析方法：代表方法的衔接

三种分析各回答一个具体问题

方法与方向	巡检中的输入	得到的可审查结果
FHA **功能→后果**	航迹保持失效；厂区人员暴露	越界危害、隔离距离 保护响应要求
FMEA **部件→系统**	单电机效能下降 监测与控制能力	局部与任务影响 措施及责任人
FTA **顶事件→组合**	顶事件：越出人员隔离边界	独立路径、事件组合 共因与防护薄弱点

分析文档的价值，是把危害转成可检验的设计要求。

7.4.2 安全分析方法：功能危害评估

先按功能丧失、错误和意外激活寻找危害

固定场景：厂区边缘巡检，邻近人员通道；功能为“在隔离边界内保持航迹”。

功能失效模式	可信后果	形成的安全要求
丧失航迹保持	侧向漂移可能越入人员通道	保留隔离余量； 在越界前触发有效保护
航迹目标错误	飞错目标，压缩设施间距	核对目标与边界 拒绝不可执行指令
意外激活运动	准备阶段伤及近旁作业人员	建立解锁（arm）条件 与人员隔离联锁

功能级记录确定“要避免什么”，部件级分析再确定“什么会导致它”。

7.4.2 安全分析方法：失效模式与影响分析

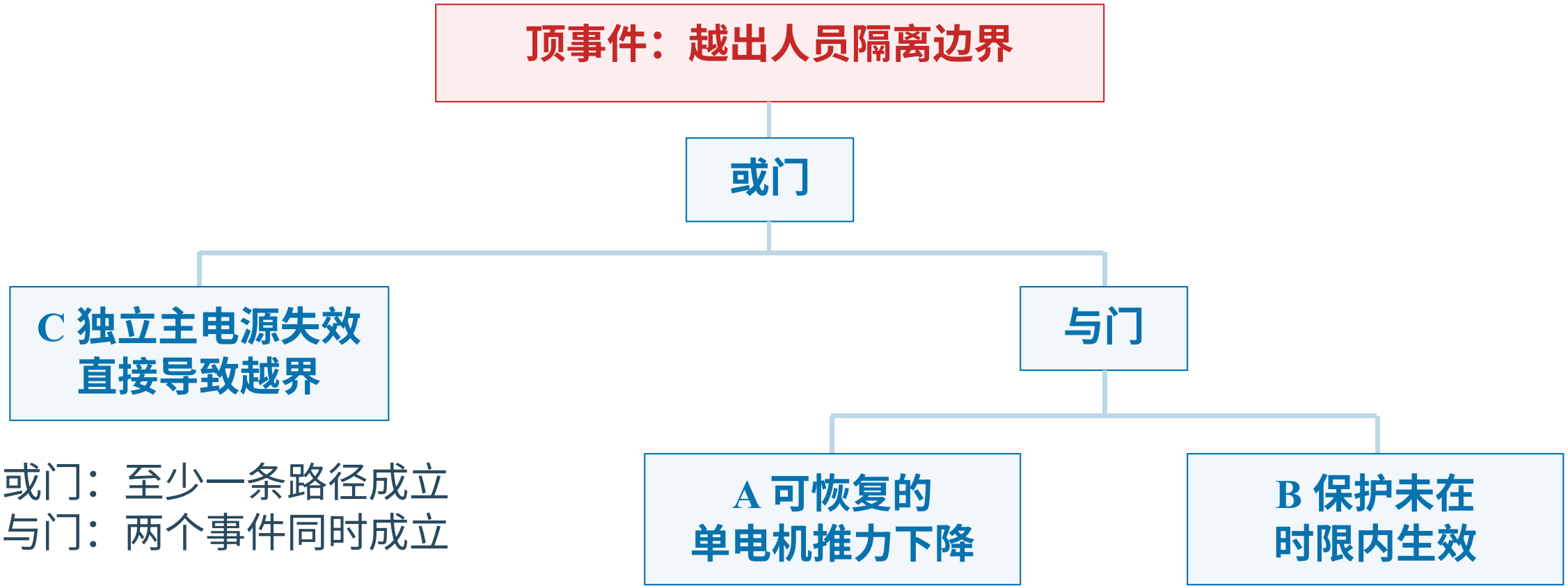
一行FMEA把原因、影响与防护串起来

记录字段	厂区巡检的填写实例
对象／模式／原因	单电机；效能降至70%；绕组损伤为假设原因
局部与系统影响	推力不足 → 其他电机补偿 → 控制余量减小
阶段与场景危害	转弯或阵风中航迹偏移；可能越入人员活动区
监测和改进措施	动力残差、输出饱和、航迹偏差；告警并转向安全降落区
验证与责任记录	记录告警时延、最小隔离距离、动作效果、版本和负责人

先写因果链与防护证据，再填严重度、发生、探测档位（定义见7.4.4）。

7.4.2 安全分析方法：简单故障树

越界顶事件由单独路径或组合路径触发



或门：至少一条路径成立
与门：两个事件同时成立

7.4.2 安全分析方法：故障树算例

组合概率先检查独立性，再做代入

理论算例：每次30 min任务，$P(A)=0.002,\ P(B)=0.1,\ P(C)=0.0001$。

假设：三事件相互独立；概率无单位；仅覆盖图中的两条路径。

$$P(A\cap B)=P(A)P(B)=0.002\times 0.1=0.0002$$

$$P(T)=P(C)+P(A)P(B)-P(C)P(A)P(B)=0.00029998$$

T＝越出人员隔离边界，约0.0300%／次任务；越界与受伤是两个事件。

$$P(A\cap B)=P(A)P(B\mid A)$$

存在依赖时，用条件概率；
冗余硬件也可能有共因失效。

本章目录

故障危害与安全评估

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

7.4.1 场景与危害
教材对应：第7.1.2.2、7.1.2.4节

7.4.2 安全分析方法
教材对应：第7.1.2.2、7.1.2.4节

7.4.3 可靠性与任务指标
教材对应：第7.1.2.4节

7.4.4 风险排序与设计改进
教材对应：第7.1.5.3、7.1.2.5节

7.4.3 可靠性与任务指标：平均故障间隔时间

平均故障间隔时间来自累计运行与故障计数

平均故障间隔时间（MTBF）：
可修复系统在修复后恢复运行，到下次故障的平均运行时间。

$$\widehat{\mathrm{MTBF}} = \frac{T_{\mathrm{op}}}{N_{\mathrm{f}}} = \frac{2000\,\mathrm{h}}{4} = 500\,\mathrm{h}$$

教材式(7.2)

- **统计口径：**T_{op}是累计有效运行时间（h）；N_{f}是同一故障定义下的计数。
- **运行条件：**机型、载荷、环境、维修规则和观察范围一致，结果才便于比较。
- **估计的含义：**500 h是样本均值，不是保证寿命，也不保证每次任务无故障。

7.4.3 可靠性与任务指标：失效率与概率

失效率有时间单位，任务概率没有时间单位

恒定速率算例：故障间隔独立、同分布且服从指数分布；任务内不计维修。

$$\lambda = \frac{1}{\mathrm{MTBF}}$$

λ：恒定失效率，单位h^{-1}；
t：任务时长，单位h。

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$R(t)$：任务期内无故障的概率，无单位。

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$F(t)$：至少一次故障的概率，无单位；
$\lambda t \ll 1$时才有$F(t) \approx \lambda t$。

任务时长改变故障概率；恒定失效率也要有工况依据。

7.4.3 可靠性与任务指标：可靠性代入

五百小时MTBF对应怎样的巡检任务可靠性

$$\hat{\lambda} = \frac{4}{2000\,\mathrm{h}} = 0.002\,\mathrm{h}^{-1}, \quad t = 0.5\,\mathrm{h}$$

$$F(0.5) = 1 - e^{-0.002\times0.5} = 0.0009995 \approx 0.09995\%$$

任务时长	至少一次故障的概率	对应的无故障概率
15 min	0.04999%	99.95001%
30 min	0.09995%	99.90005%
60 min	0.19980%	99.80020%

结论： $\lambda t \ll 1$时，任务时长翻倍，故障概率约翻倍（同一故障定义与工况）。

7.4.3 可靠性与任务指标：任务指标

任务指标回答能否完成、是否匹配、离边界多远

任务完成概率

定义：给定任务目标、运行环境与资源约束下，成功完成预期任务的概率。
综合：健康、环境不确定性、故障风险、任务复杂度。
巡检判据：先定成功判据，如拍清全部目标并返航，再统计同条件任务的成功比例。

任务健康度

定义：实时状态（剩余电量、组件温度、冗余能力）与任务载荷需求的匹配程度。
表示：常用归一化得分，便于跨平台、跨任务比较。
巡检判据：剩余电量与冗余能否撑完剩余航段并返航；不足即调整或中止任务。

任务安全裕度

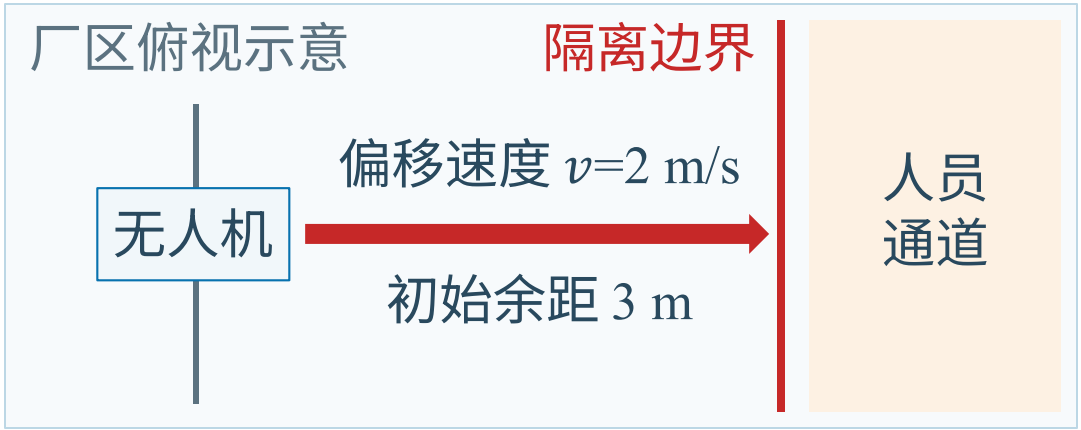
定义：完成任务时，对故障传播、路径偏离等风险的容忍能力。
关注：对地面人员、关键设施引发不安全事件的可能性。
巡检判据：到人员隔离边界的最小余距，单位m，须大于延迟期间的偏移量。

教材的任务指标未指定统一公式；成功判据、任务时段和裕度单位均须明确。

7.4.3 可靠性与任务指标：安全裕度算例

延迟耗掉隔离余量，动能描述撞击条件

延迟耗掉的隔离距离
假设恒速，忽略制动和定位误差。



$$d = v\tau = 2 \times 1.5 = 3\ \text{m}$$

τ=1.5 s后偏移3 m，余距剩0 m。

撞击动能估算
假设质量2 kg，撞击速度5 m/s。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 5^2 = 25\ \text{J}$$

m：质量（kg）；v：速度（m/s）。
坠地时可作e8_SafetyAssExp的FallEnergy。

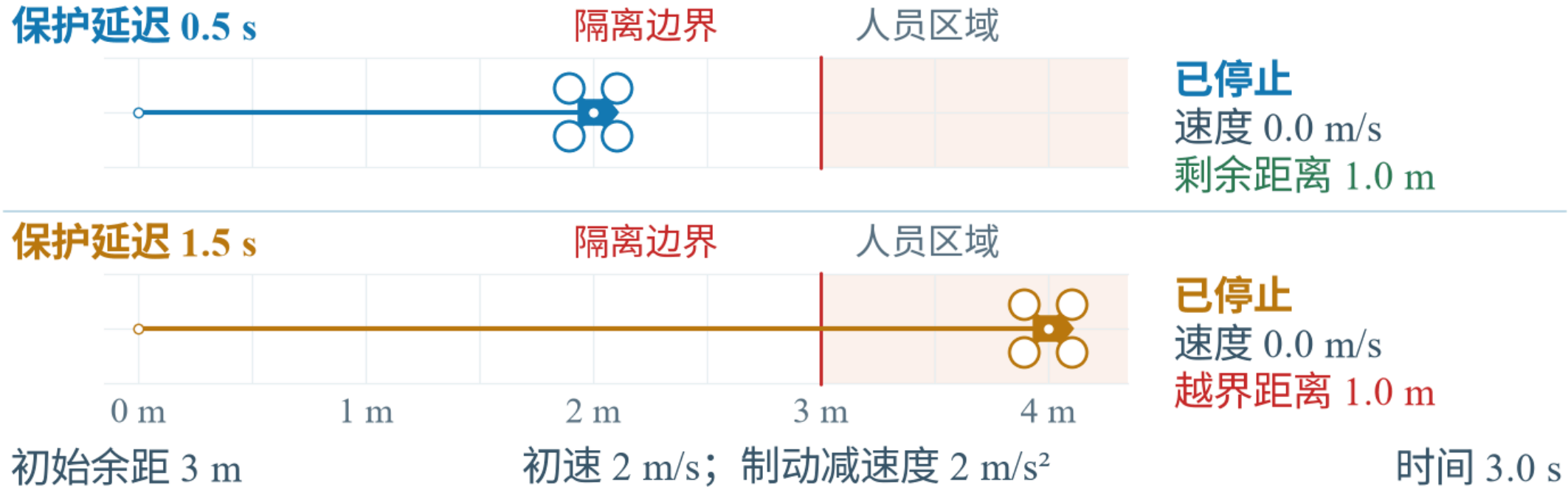
动能描述撞击条件；伤害程度还取决于碰撞部位、结构和防护。

结论：隔离距离须大于$v\tau$，再加制动与定位误差余量。

7.4.3 可靠性与任务指标：安全裕度算例

保护晚一步，留给制动的距离就少一截

同样速度、同样制动，响应晚了就可能越界



图：响应延迟与有限制动共同消耗余距（质点运动学对照）。
实际隔离距离还须考虑机体尺寸与定位误差。

7.4.3 可靠性与任务指标：概率证据与验证

统计、监测与仿真各提供不同证据

证据来源	直接提供什么	影响解释的条件
运行统计	累计运行时间、故障数 以及任务条件	故障定义一致；报告完整 说明统计不确定性
在线监测与保护	机内测试（BIT）；检测、隔离 和恢复（FDIR）的时延及效果	发现故障后，保护动作 须在场景约束内生效
随机仿真	蒙特卡罗：按输入分布抽样后的 事件频率	分布与模型可信；稀有事件需要 足够样本

故障注入比例服务于测试覆盖，真实发生概率需要独立依据。

本章目录

故障危害与安全评估

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

7.4.1 场景与危害
教材对应：第7.1.2.2、7.1.2.4节

7.4.2 安全分析方法
教材对应：第7.1.2.2、7.1.2.4节

7.4.3 可靠性与任务指标
教材对应：第7.1.2.4节

7.4.4 风险排序与设计改进
教材对应：第7.1.5.3、7.1.2.5节

7.4.4 风险排序与设计改进：任务驱动的故障等级

任务后果分类描述还能完成什么

教材任务后果示例	剩余任务与控制能力	巡检中的判断重点
A 灾难性	失控，无法安全迫降	失控路径、人员或设施暴露
B 危险	无法返航或降级，但能可控迫降	迫降区与剩余控制能力
C 严重	任务失败，可返航或执行替代任务	中止任务后的风险和质量要求
D 轻微	任务可完成，质量下降仍可接受	图像质量、航迹与剩余余量
E 无安全影响	预设任务与质量未受影响	仍检查人员、设施与环境风险

A–E是教材任务后果的示例标记，不是DAL；任务成功也需要满足场景安全约束。

7.4.4 风险排序与设计改进：风险优先级

经验优先级数排序时保留严重后果的优先权

风险优先级数（RPN）采用经验档位：严重度S、发生档位O、探测困难度D。
D越大，越难及时发现。

$$\mathrm{RPN} = S \times O \times D$$

课堂假设的后果	S／O／D（1–5档）	RPN与优先规则
人员区越界	5／2／2	20；严重人员危害优先处理
图像质量下降	2／5／4	40；可参考排序安排改进

本课档位含义：S=5为严重人员危害；O=2低、O=5高；D=2较易发现、D=4较难发现。
档位和RPN无概率单位。

7.4.4 风险排序与设计改进：动态排序与改进

有效改进改变风险路径，再按残余风险排序

理论设计比较：任务仍为30 min，保持A、C的概率不变。
假设有效保护使B的失败概率由0.1降至0.02。

设计状态	故障树模型中的越界概率	对应的改进记录
改进前	$0.00029998 \approx 0.0300\%$	A与B组合路径占较多风险
保护改进假设	$0.000139996 \approx 0.0140\%$	待验证告警延迟 动作成功与最小距离

C独立路径仍在：这部分残余风险要靠提高电源可靠性来降低。

初始排序 → 验证改进 → 更新风险数据库 → 重排序 → 补测残余风险

7.4.4 风险排序与设计改进：无人系统安全评估挑战

软件和场景改变后，旧风险结论需要复核

软件定义功能

风险： 同一硬件，控制逻辑改变会改变剩余能力。

措施： 固定状态与输入，检查功能边界。

软件缺陷触发

风险： 极端输入或特定状态触发错误路径。

措施： 异常输入、组合故障与边界回归测试。

学习模型与可解释性

风险： 黑盒模型可解释性差；训练范围外的风、光照或新对象会影响判断。

措施： 跨场景测试；独立监视与可执行回退。

版本与空中升级（OTA）

风险： 新版本更改阈值、动作或接口约束。

措施： 记录版本；复测保护时延与风险表。

传统评估以硬件可靠性为核心；智能系统还要验证行为、鲁棒性与可解释性。

7.4.4 风险排序与设计改进：安全评分机制

SDK将误差经过规则映射成经验得分

窗口与分量指定目标 → 两点均值与平方误差 → 分段映射得到局部得分 → 隶属度与聚合经验得分与等级

$$e_i = (\overline{v}_i - v_{\mathrm{cmd}})^2$$

$\overline{v}_i$：两点均值；v_{cmd}：同分量目标。

代码档位	速度平方误差范围	局部得分
正常（Nomal）	$0 \le e_i < 0.015$	0.999→0.9
轻微（Slight）	$0.015 \le e_i < 0.04$	0.9→0.7
严重（Serious）	$0.04 \le e_i < 0.16$	0.7→0.4
危险（Hazard）	$0.16 \le e_i < 0.5$	0.4→0.1

映射与聚合

隶属度：得分>0.9记为1，其余沿用。
时序修正：下降时乘以(1−降幅)。
聚合：权重1/3/6/9/12加权平均。
$e_i \ge 0.5$：坠地分支，本例得0.1。

速度以m/s输入时误差单位为m^2/s^2；得分是经验排序量，不是事故概率。

7.4.4 风险排序与设计改进：评分算例

按代码规则手算：一个误差值怎样变成得分和等级

步骤	输入	计算	结果
① 定档	e=0.1	严重档[0.04,0.16)	局部得分0.529
② 隶属度	0.529	不大于0.9，沿用	0.529
③ 时序修正	前一时刻0.8	0.8×(1−0.271)	0.583

- ④ **聚合：** 0.8与0.583分属轻微、严重档，按权重3、6加权平均≈0.66。
- ⑤ **等级：** 加权计数以严重档（权重6）最大，输出等级Medium。
- **结论：** 低档权重更大，少数大误差点就能明显拉低得分。

学习资料

定义、方法与适用范围可查阅官方材料

MTBF与恒定故障速率：NIST统计手册

https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr171.htm

FMEA的内容、适用范围与维护：IEC 60812官方简介

https://webstore.iec.ch/en/publication/26359

航空功能危害评估与设计保证：FAA咨询通告AC 25.1309-1B

https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_25.1309-1B.pdf

特定无人机运行风险与SORA公开文件：JARUS

https://jarus-rpas.org/publications/

练习与讨论

把空旷场地的记录改写到厂区人员通道

已知：单电机效能降至70%，航迹暂能维持；空场有隔离区，厂区邻近人员通道。

FMEA字段	空旷场地示例	厂区人员通道：填写
暴露与后果	隔离区内 任务中止、设备损伤	暴露对象：_____ 最坏可信后果：_____
监测与措施	监测控制余量 退出任务并受控降落	监测量：_____ 措施与生效条件：_____
验证判据	隔离区内落地、动作响应可控	响应时限：_____ 人员隔离距离：_____

参考要点

厂区记录增加人员暴露和保护时限

字段	参考填写
暴露与可信后果	人员通道；偏移越界后可能碰撞人员或设备
监测依据	航迹偏差、动力残差、输出饱和；关联故障发生时刻
措施和条件	停止巡检；剩余能力允许时转向无人降落区
响应判据	发现与执行总延迟小于剩余隔离距离允许的时限
证据与更新	记录最小距离、延迟、控制余量和版本；复核残余风险

同一故障的记录可复用，场景危害与保护条件必须随任务重写。

本节小结

评估把故障状态转成场景判断和改进依据

- **场景先行：**健康描述状态；任务能力描述功能；安全评估人员、设施与环境后果。
- **分析分工：**FHA定功能后果与要求，FMEA追踪部件影响，FTA检查组合与共因。
- **数字有条件：**失效率代入任务时长才得任务概率；独立性决定组合算法。
- **改进有证据：**经验评分与RPN支持比较；验证保护及时性与效果，更新残余风险。
- **易错点：**经验得分不是事故概率；MTBF是样本均值，不是寿命；告警改变的是探测档位D，后果被限制时严重度才下降。

识别风险以后，还要选择能够执行并经验证的保护动作。