



RflySim 底层飞行控制算法开发系列课程

第十二讲 失效保护逻辑设计实验



大纲

1. 实验原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 小结



实验原理

在多旋翼起飞前、飞行中都存在影响多旋翼安全的问题，这些安全问题与多旋翼决策存在着紧密的联系。在这里，主要考虑以下三个方面：

1. 通信故障(Communication Breakdown)
2. 传感器失效(Sensor Failure)
3. 动力系统异常(Power System Anomaly)



□ 安全问题

(1) 通信故障

通信故障主要是指遥控器（Remote Controller, RC）与多旋翼之间、地面站（Ground Control Station, GCS）与多旋翼之间无法正常通信。该类故障主要分为三个方面：

1) **遥控器未校准**

遥控器未校准是指多旋翼在第一次飞行之前，飞控手未对遥控器进行校准，即没有让多旋翼“**知道**”遥控器每个摇杆和开关的具体作用。若未对遥控器进行校准，则在多旋翼飞行过程中其飞行控制系统无法识别用户的指令，甚至可能识别错误的指令导致飞行事故。



□ 安全问题

(1) 通信故障

2) 遥控器失联

遥控器失联是指在多旋翼起飞前或飞行过程中，遥控器和机载信号接收器无法正常通信。若使用遥控器控制多旋翼飞行，遥控器失联将导致多旋翼不受控制，产生安全问题。

3) 地面站失联

地面站失联是指在多旋翼起飞前或飞行过程中，地面站与多旋翼无法正常通信。若多旋翼需要完成设定任务，则地面站失联将导致多旋翼无法获取任务点，导致任务无法完成。



□ 安全问题

(2) 传感器失效

传感器失效主要是指多旋翼上机载传感器测量不准确，无法正常工作，等等。这里介绍四种传感器失效。

- 1) 气压计(Barometer)失效
- 2) 电子罗盘(Compass)失效
- 3) 电子罗盘(Compass)失效
- 4) 惯导系统(Inertial Navigation System)失效



□ 安全问题

(3) 动力系统异常

动力系统异常主要指**电池**失效，以及**电调**、**电机**和**桨**的硬件故障导致飞行控制系统执行环节的失效。

- 1) 电池失效。通常是由于电池电量不足或者电池寿命减少导致的多旋翼供电不足。
- 2) 电调故障。主要表现在两个方面：①电调无法正确识别自驾仪给出的PWM指令；②电调无法给电机提供正确的输出电压。
- 3) 电机故障。主要表现在一定的输入电压下，输出不正确的转速。
- 4) 螺旋桨失效。桨的故障主要表现在桨叶松动，桨叶磨损和折断等。



实验原理

□ 任务决策设计过程

(1) 定义飞行器的飞行模式

1) 手动飞行模式

手动飞行模式可以让飞控手手动控制多旋翼。

2) 返航模式

这里将返航模式定义为正常返航模式，此时是飞控手通过遥控器手动给出返航指令。在该模式下，多旋翼会从当前位置返回到飞机起飞位置，并且在此处悬停。

3) 自动着陆模式

在该模式下，多旋翼通过调整油门指令，在原水平位置实现自动着陆。



实验原理

□ 任务决策设计过程

(2) 事件定义

多旋翼事件定义是多旋翼状态和飞行模态的切换的根据，是多旋翼决策的重要基础。在这里，我们主要定义两种事件：**人工输入事件**和**飞行器自触发事件**。

1) 人工输入事件主要是指飞控手利用遥控器或者地面站发出的指令，并基于此改变多旋翼状态和飞行模态的输入事件。

a.解锁和锁定动作定义为MIE1。MIE1=0 时为定锁，MIE=1 时为解锁。**b.人工操作指令**定义为 MIE2。MIE2=1 时切换到手动飞行模式，MIE2=2 时切换到返航模式，MIE2=3 时切换到自动着陆模式。该指令通过遥控器上（如图）的通道 5（三段拨动开关）进行切换操作。

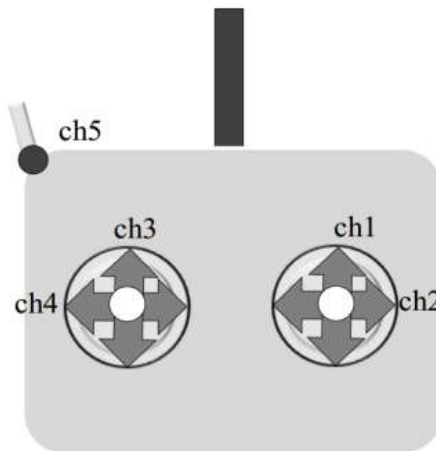


图. 遥控器示意图



实验原理

□ 任务决策设计过程

(2) 事件定义

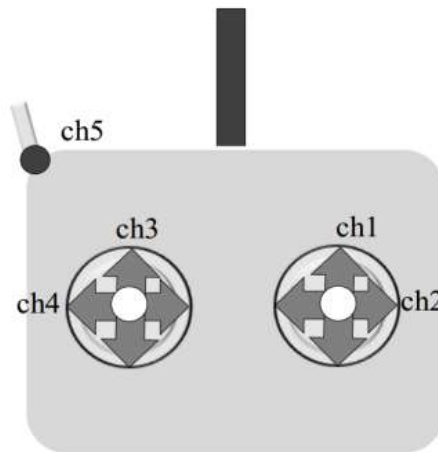


图. 遥控器示意图

多旋翼事件定义是多旋翼状态和飞行模态的切换的根据，是多旋翼决策的重要基础。在这里，我们主要定义两种事件：**人工输入事件**和**飞行器自身事件**。

2) 飞行器自触发事件 (ATE)：飞行器自触发事件与飞控手操作无关，主要取决于机上各部件的工作状态及多旋翼状态。

在基础实验中假定遥控器连接正常，即不把飞行器自触发事件作为判断条件，仅仅以人工输入事件作为条件进行考虑。



实验原理

□ 任务决策设计过程

(3) 状态定义

以基础实验为例，状态转移如下图所示

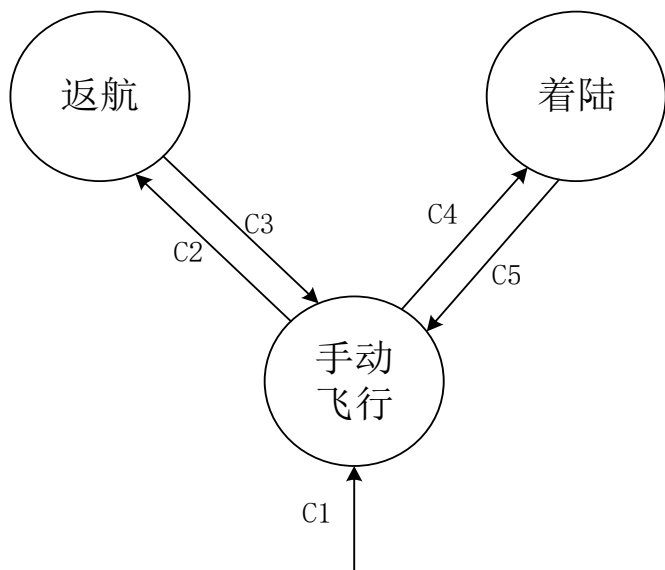


图. 基础实验状态机

图中 C_i 表示相应的转移条件:

$C1: MIE1=1;$

该条件描述多旋翼的成功解锁条件，多旋翼必须满足：飞控手发出解锁指令 ($MIE1=1$)

$C2: MIE2=2;$

该条件描述的是多旋翼从手动飞行模式到返航模式，多旋翼必须满足：飞控手利用遥控器手动将多旋翼切换到返航模式 ($MIE2=2$)

$C3、C5: MIE2=1;$

该条件描述的是多旋翼从返航到手动飞行和从着陆到手动飞行的条件，多旋翼必须满足：飞控手利用遥控器手动将多旋翼切换到手动飞行模式 ($MIE2=1$)

$C4: MIE2=3;$

该条件描述的是多旋翼从手动飞行到着陆的条件，多旋翼必须满足：飞控手利用遥控器手动将多旋翼切换到着陆模式 ($MIE2=3$) .



□ 任务决策设计过程

(4) 控制器指令

在模型根据输入事件不同进行判断后产生状态转换后，还需要根据不同的状态对控制器施加相应的指令以使多旋翼达到不同状态的要求：

- 1) **手动飞行状态**：飞控手手动控制多旋翼。
- 2) **返航状态**：返航状态要求多旋翼返回起飞点，这属于定点位置控制，故这时姿态控制器输入需要接入位置控制器输出接口。故这时的位置控制指令为 $p_{x_d} = 0, p_{y_d} = 0$ ，即给控制器加入返回原点的指令。**同时高度通道上，若当前高度高于设定的安全高度，则 $p_{z_d} = \hat{p}_z$ ，即控制多旋翼高度不变；若当前高度低于设定安全高度，则多旋翼先上升到设定高度再返回起飞原点。**
- 3) **着陆状态**：着陆状态要求多旋翼保持原来的水平位置，而调整油门指令实现降落。此时姿态控制器输入需要接入位置控制器输出接口，同时，给位置控制器的控制指令为水平期望速度 $v_{x_d} = 0, v_{y_d} = 0$ ，使多旋翼维持原来的水平位置不变；高度通道上 $p_{z_d} = 0$ ，使多旋翼实现降落。



□ 实现软硬件

(1) Stateflow

状态机可以在Stateflow 工具箱内实现，Stateflow 是 MathWorks 开发的利用状态机和流程图用于对响应系统进行建模的工具。它是一种图形化的设计工具，能够实现有限状态机，实现各个状态间的转换。它和 Simulink 同时使用时可以接收 Simulink 的输入，同时给 Simulink 输出，实现和 Simulink 中模型的联系。将设计好的状态机在Stateflow 中实现。



实验原理

□ 实现软硬件

(2) 遥控器

模式切换中的手动飞行模式需要遥控器来发送控制指令，故添加指令时模拟遥控器实际发送的信号值，如右图所示，遥控器的端口中，通道 1 控制遥控器的前后运动，通道 2 控制其左右运动，通道 3 控制油门，通道 4 控制偏航角，通道 5 发送对模态的控制指令，通道 5 是三段拨动开关，刚好可以满足三种模式。

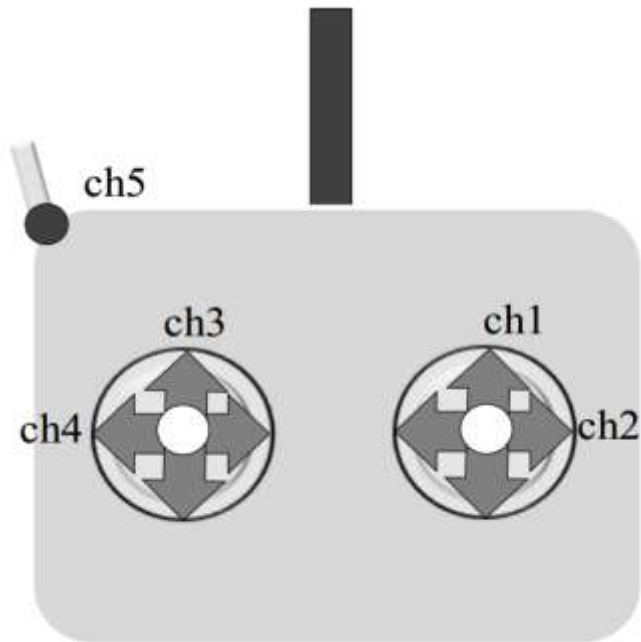


图. 遥控器示意图

在实际操作中，这五个通道的值都在 1000-2000 范围内，这里为了更加接近真实情况，仿真时也输入 1000-2000 的值，同时这些信号在进入控制器前要对其进行归一化处理，使它们变成 0-1 之间的值。对于通道 5，将其设置为它的值在 1000-1400 时，模态切换中的人工输入事件 MIE2 为 1，对应为手动飞行模式；值在 1400-1600 时，模态切换中的人工输入事件 MIE2 为 2，对应返航模式；值在 1600-2000 时，MIE2 为 3，对应着陆模式。



实验原理

以上原理可以详细参考“Quan Quan. *Introduction to Multicopter Design and Control*. Springer, Singapore, 2017”或者“全权著. 杜光勋, 赵峙尧, 戴训华, 任锦瑞, 邓恒译. 《多旋翼飞行器设计与控制》, 电子工业出版社, 2018.”的第14章。



基础实验

□ 实验目标

■ 已知

- (1) 硬件：Pixhawk自驾仪系统，多旋翼硬件系统；
- (2) 软件：MATLAB 2017b或以上的版本，基于Simulink的控制器设计与仿真平台，硬件在环仿真平台，实验指导包“[RflySim3D\Exp02_FlightControl\e8-FailsafeLogic\e8.1](https://rflsim.com/course)”（下载地址：<https://rflsim.com/course>）。

■ 目标

- (1) 在Simulink仿真环境中，在手动模式下，实现飞行器的返航与着陆，并记录和分析仿真结果；
- (2) 完成硬件在环仿真。



基础实验

□ 实验步骤

见：“[RflySim3D\Exp02_FlightControl\e8-FailsafeLogic\e8.1\readme.docx](#)”



分析实验

□ 实验目标

■ 已知

- (1) 硬件：Pixhawk自驾仪系统，多旋翼硬件系统；
- (2) 软件：MATLAB 2017b或以上的版本，基于Simulink的控制器设计与仿真平台，硬件在环仿真平台，实验指导包“[RflySimAPI\Exp02_FlightControl\e8-FailsafeLogic\e8.2](https://rflsim.com/course)”（下载地址：<https://rflsim.com/course>）。

■ 目标

- (1) 在基础实验的基础上，添加相应的状态转移，在手动模式下，实现飞行器的返航和着陆，并且返航和着陆之间可以相互切换。
- (2) 实现硬件在环仿真。

□ 实验设计

本实验在基础实验的基础上增加返航和着陆之间的切换，其对应的状态机如下图所示。

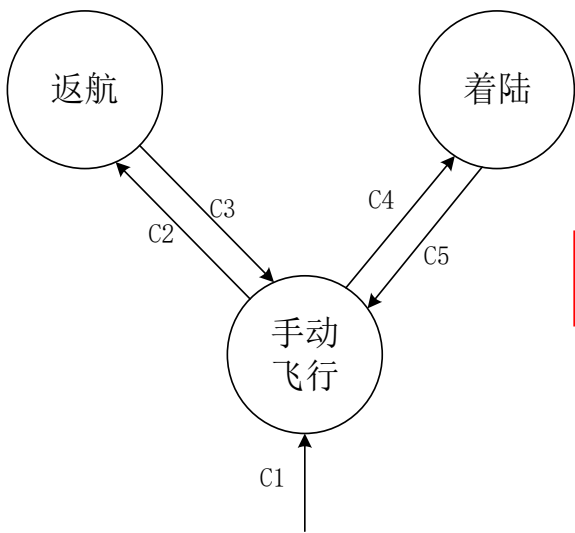


图. 基础实验状态机

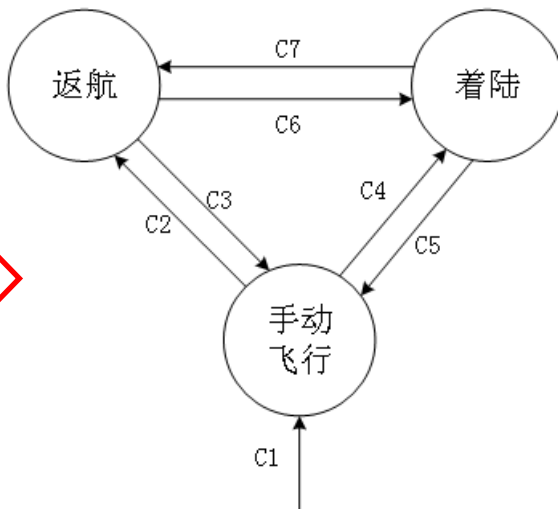


图. 案例分析实验状态机

新增的两个状态的转移条件为：

■ C6: MIE2=3

该条件描述的是多旋翼从返航模式到着陆模式，多旋翼必须满足：飞控手利用遥控器手动将多旋翼切换到着陆模式（MIE2=3）

■ C7: MIE2=2

该条件描述的是多旋翼从着陆模式到返航模式，多旋翼必须满足：飞控手利用遥控器手动将多旋翼切换到返航模式（MIE2=2）



□ 实验步骤

见：“[RflySim3D\Exp02_FlightControl\e8-FailsafeLogic\e8.2\readme.docx](#)”





□ 注意事项

- (1) 多旋翼在返航和着陆的过程中需要一点时间，在仿真过程中应该空出足够的时间让多旋翼保持稳定，以保证出现和实际情况相符的仿真结果，最终达到良好的仿真效果。
- (2) 在更改状态机时，要特别注意状态转移之间的关系和转移实现的条件，按照已有的状态机的设计例程，完成新的转移条件的添加，并且进行相应的仿真。



□ 实验目标

■ 已知

- (1) 硬件：Pixhawk自驾仪系统，多旋翼硬件系统；
- (2) 软件： MATLAB 2017b或以上的版本，基于Simulink的控制器设计与仿真平台，硬件在环仿真平台，实验指导包“[RflySim3D\Exp02_FlightControl\e8-FailsafeLogic\e8.3](#)”和“[RflySim3D\Exp02_FlightControl\e8-FailsafeLogic\e8.4](#)”（下载地址<https://rflysim.com/course>）。

■ 目标

- (1) 在前面实验的基础上，增加遥控器断电失联事件，完成新的模态和切换设计，即加入失效返航和失效着陆两个状态，完成状态机的设计。此外还需加入如下功能：如果飞行器离基地很近，直接着陆；而如果飞行器离基地有一定距离，先进行返航，在进行着陆；
- (2) 完成硬件在环仿真实验和实飞实验。



□ 实验设计

(1) 步骤一：四旋翼的飞行模式

为了方便逻辑设计，四旋翼从飞行到着陆分为五种飞行模式，添加了两
种失效的模式：（定义同基本原理）

1) 手动飞行模式

2) 返航模式

3) 着陆模式

4) 失效着陆模式：遥控器断电时自动着陆

5) 失效返航模式：遥控器断电时自动返航



□ 实验设计

(2) 步骤二：定义事件

1) 人工输入事件 (MIE)：该事件主要是指由飞控手利用遥控器发出指令。

① MIE1：解锁和锁定指令； ② MIE2：人工操作指令。

2) 飞行器自触发事件 (ATE)：飞行器自触发事件与飞控手操作无关，主要取决于机上各部件的工作状态及多旋翼状态。（增添ATE3的判断条件）

① ATE1：遥控器连接状态是否正常。

ATE1=1:正常, ATE1=0: 异常。

② ATE3:旋翼到原点位置的距离与设定阈值的比较。

ATE3=1: 距离低于设定阈值; ATE3=0: 距离高于设定阈值。



□ 实验设计

(3) 步骤三：设计状态机

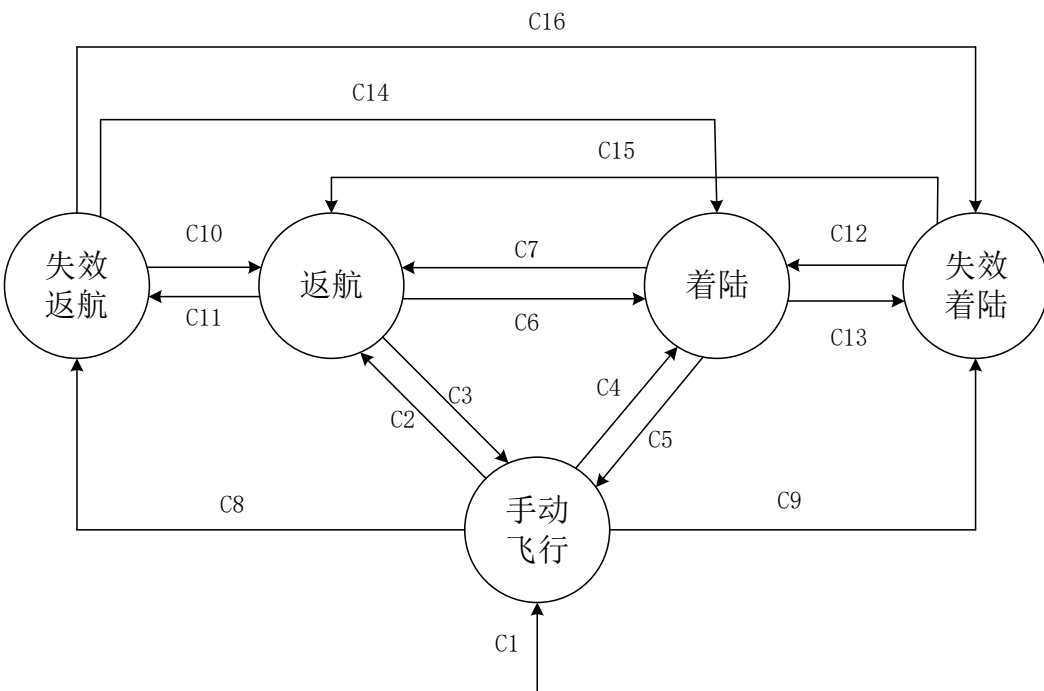


图. 状态机

图中 C_i 表示相应的转移条件：

■ $C1: MIE1=1$

该条件描述多旋翼的成功解锁条件，多旋翼必须满足：飞控手发出解锁指令 ($MIE1=1$) ；

■ $C2、C7、C10、C15: ATE1=1 \& MIE2=2$

该条件描述的是多旋翼从手动飞行模式到返航模式 ($C2$)、着陆到返航 ($C7$)、失效着陆到返航 ($C10$) 以及失效着陆到返航 ($C15$) 的转移条件，多旋翼必须满足：遥控器连接正常 ($ATE1=1$) 且飞控手利用遥控器手动将多旋翼切换到返航模式 ($MIE2=2$) ；

■ $C3、C5: ATE1=1 \& MIE2=1$

该条件描述的是多旋翼从返航到手动飞行 ($C3$) 和从着陆到手动飞行 ($C5$) 的条件，多旋翼必须满足：遥控器连接正常 ($ATE1=1$) 且飞控手利用遥控器手动将多旋翼切换到手动飞行模式 ($MIE2=1$) ；

■ $C4、C6、C12、C14: ATE1=1 \& MIE2=3$

该条件描述的是多旋翼从手动飞行到着陆 ($C4$)、返航到着陆 ($C6$)、失效着陆到着陆 ($C12$) 以及失效返航到着陆 ($C14$) 的条件，多旋翼必须满足：遥控器连接正常 ($ATE1=1$) 且飞控手利用遥控器手动将多旋翼切换到着陆模式 ($MIE2=3$) ；



□ 实验设计

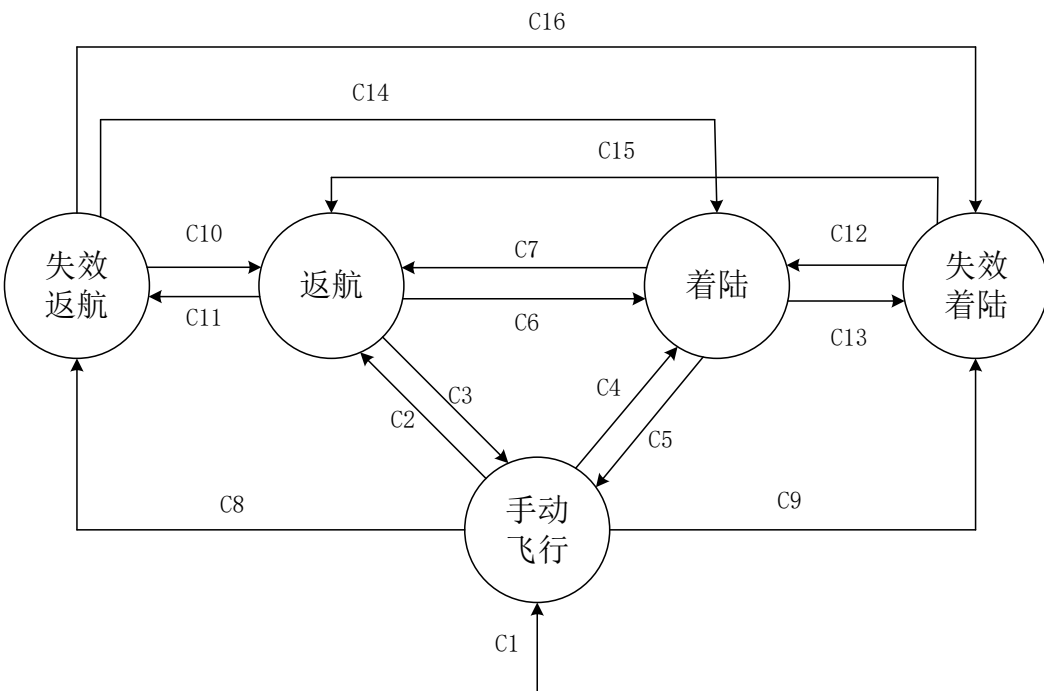


图. 状态机

图中 C_i 表示相应的转移条件:

■ C8: $ATE1=0 \& ATE3=0$

该条件描述的是多旋翼从手动飞行到失效返航的条件，多旋翼必须满足：遥控器连接异常 ($ATE1=0$) 且旋翼到原点位置的距离高于设定阈值 ($ATE3=0$)

■ C9: $ATE1=0 \& ATE3=1$

该条件描述的是多旋翼从手动飞行到失效着陆的条件，多旋翼必须满足：遥控器连接异常 ($ATE1=0$) 且旋翼到原点位置的距离低于设定阈值 ($ATE3=1$)

■ C11、C13: $ATE1=0$

该条件描述的是多旋翼从返航到失效返航(C11)以及着陆到失效着陆(C13)的条件，多旋翼必须满足：遥控器连接异常 ($ATE1=0$)

■ C16: $ATE1=0 \& ATE3=1$

该条件描述的是多旋翼从失效返航到失效着陆的条件，多旋翼必须满足：遥控器连接异常 ($ATE1=0$) 且旋翼到原点位置的距离低于设定阈值 ($ATE3=1$)，此时多旋翼飞行器才可以实现着陆

□ 实验设计

2) 修改遥控器通道输入

在原有模型上增加一个遥控器通道模拟遥控器失联事件，其输入值前10s为0，然后为1，以模拟遥控器正常连接10s后，连接失效事故。

3) 保存模型

将模型保存到“e8\e8.3\sim\e8_3.slx”。

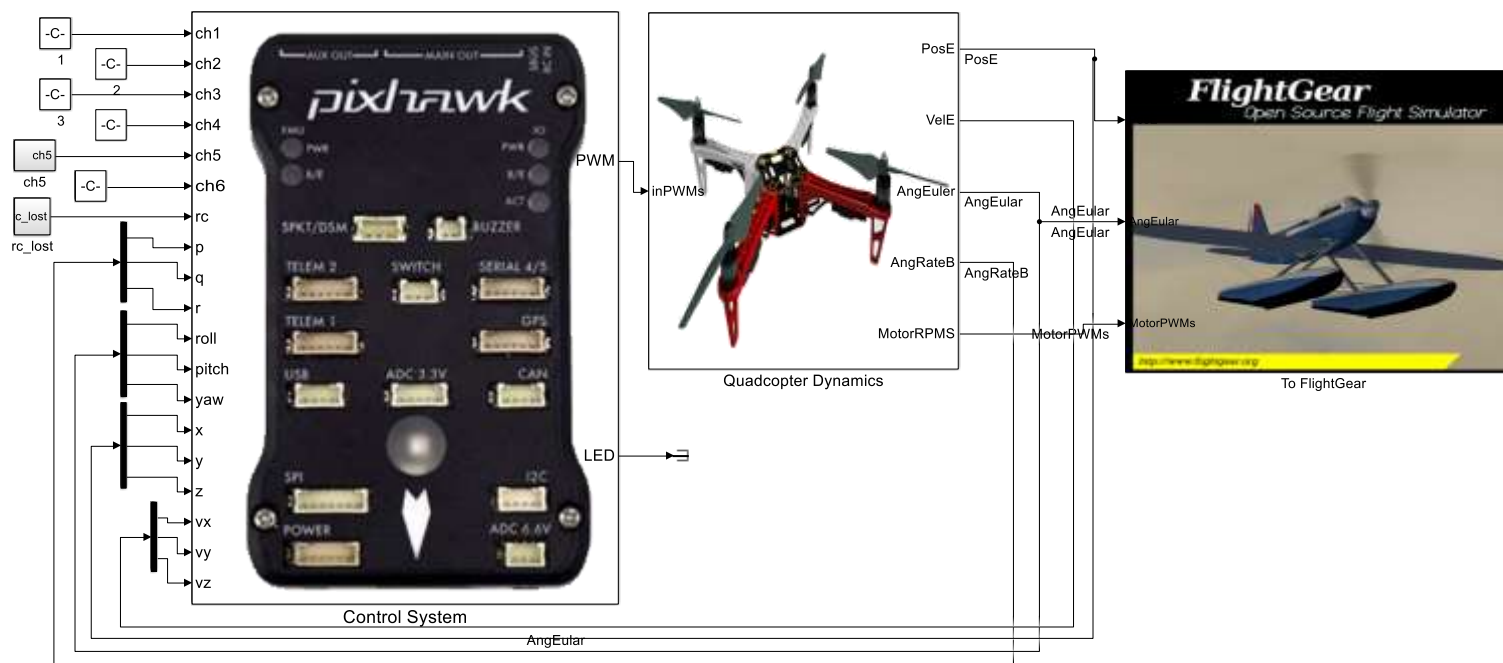


图. e8_3. slx截图



设计实验

□ 仿真实验步骤

见“[RflySim3D\Exp02_FlightControl\e8-FailsafeLogic\e8.3\readme.docx](#)”

见“[RflySim3D\Exp02_FlightControl\e8-FailsafeLogic\e8.4\readme.docx](#)”



□ 实验结果

读取飞控的log数据，如图所示。前335s是自稳模式，如图中“a”阶段所示，在这个阶段四旋翼在飞控手操控下自由飞行。在335s左右遥控器失联，如图中“b”阶段所示，在这个阶段四旋翼高度升至5m，同时水平位置回到起飞点，完成返航。最后四旋翼进行着陆，如图中“c”阶段所示，在这个阶段四旋翼水平位置保持在起飞点，高度降为0. 实际飞行效果和实验数据都表明四旋翼能够实现失效保护。

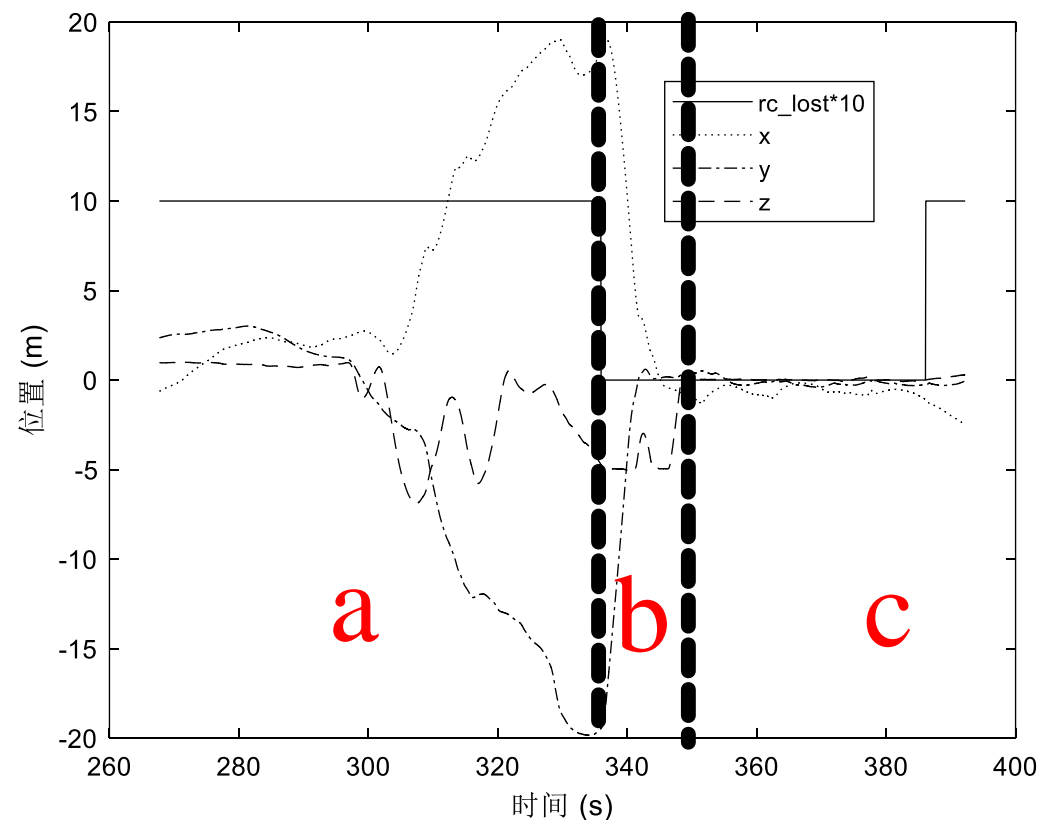


图. 失效保护室外飞行数据





小结

- (1) 根据实际情况，可以设计状态机的模式和事件来简化对飞行的控制。
- (2) 在本章节，还要注意的是对三种飞行模态的理解。返航模态中多旋翼返回到出发时的水平位置，并保持在一定的高度；而着陆模态中多旋翼保持水平位置不变，降低高度以回到地面，这两者是不同的。这两种模态是由自驾仪控制，而在手动控制模式，遥控器和自驾仪同时起作用。
- (3) 在此次实验中，主要考虑的是遥控器的连接情况，以及高度和水平位置的限制条件，在实际情况中，则需要在现在的基础上，添加其他的失效事件以及考虑健康评估（包括起飞前和飞行中），从而完善已有的状态，使得设计满足实际状况下的可靠飞行。

如有疑问，请到<https://doc.rflysim.com>查询更多信息。



谢 谢！