

---

# 目录

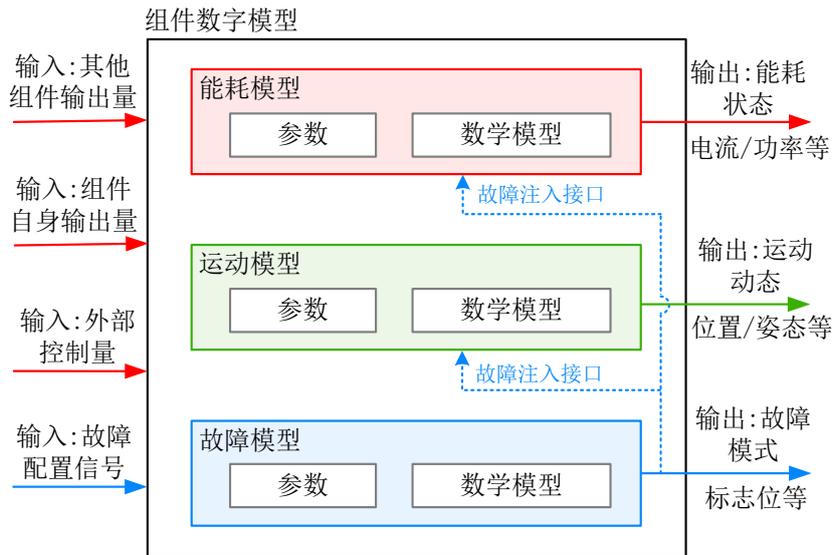
统一故障建模框架.....	1
支持无人系统多种组件故障注入.....	1
无人系统机体故障注入.....	1
无人系统通信故障注入.....	2
无人系统环境故障.....	2
无人系统故障测试与安全评估框架.....	2
健康评分与故障诊断框架.....	3
分布式部件级健康评估.....	4

# 外部控制与轨迹规划

智能无人系统属于典型的复杂系统，而“复杂系统”一般指规模较大、结构复杂、功能繁多、故障模态多样、外部环境未知多变的一类系统，其往往具有非线性、动态多变、规模大、层级多、去中心化等特性，如人体、各类载具系统、精密数控机床等机械或电气系统等等，都是复杂系统的典型代表。随着系统的复杂程度越来越高，发生故障的组件和概率都会越来越大，如何降低故障概率和减小故障后产生的后果，是系统健康和评估需要考虑的内容。

## 统一故障建模框架

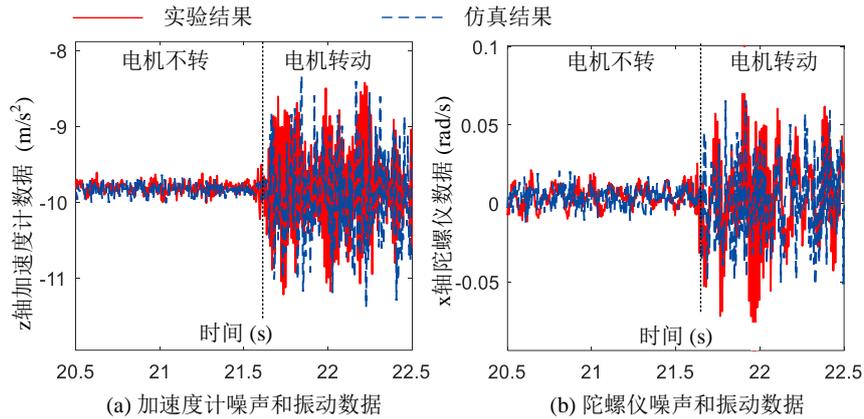
任何无人系统可以分为若干个组件（或子系统），其中包括电机、螺旋桨、陀螺仪等实体组件，也包含风、气压、障碍等虚拟组件。任何一个组件都可以认为包含三类模型：能耗模型、运动模型和故障模型。首先是运动模型负责描述组件的瞬态规律，其次是能耗模型用于描述组件的长态规律。运动模型和能耗模型共同描述了组件的正常的短期和长期运行规律，而故障模型则描述了组件因各种内外因素导致的偏离正常运行状态的规律。



## 支持无人系统多种组件故障注入

### 无人系统机体故障注入

机体故障可以按照子系统的拓扑分解和组建的类型归属分为动力系统故障、能源系统故障、传感器故障、机身结构故障、控制系统故障等。

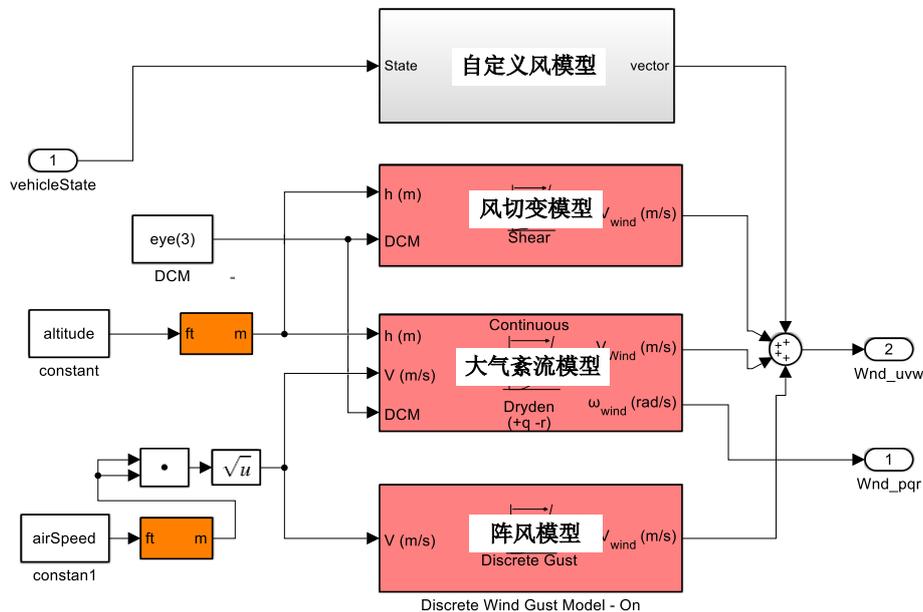


## 无人系统通信故障注入

通信故障主要是指遥控器、无线数传、图传模块、自组网模块等无人系统之间或与地面通信时存在的故障异常。可实现数据未校准、数据传输中断、数据干扰、数据错误、数据拦截、破解、伪造等故障注入，均可通过对实际系统相应故障情况下的数据特征进行分析，然后通过离散或者逻辑的方法进行编程实现。

## 无人系统环境故障

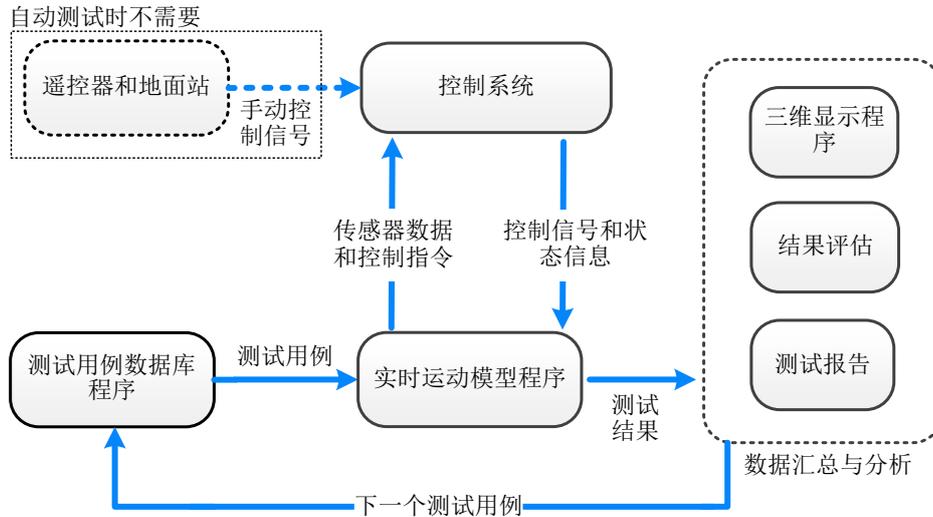
环境故障通常包括风干扰、磁场干扰、温度突变、三维场景中的障碍物或者其他无人机等，其中以风干扰最为普遍。下面主要介绍风干扰模型的建立。如无人机飞到复杂风场中，可以看作若干个简单风场干扰的叠加，包括阵风、紊流、风切变和常值风等。



## 无人系统故障测试与安全评估框架

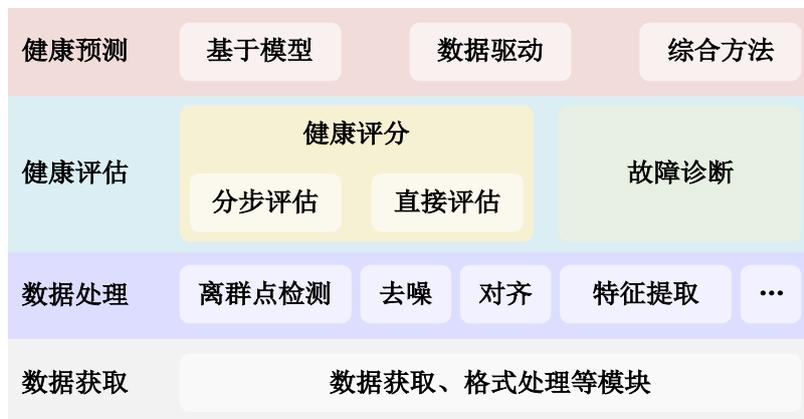
由于实验的方法具有成本高、空域受限、难以重复、无法获取状态真值等缺点，利用实验测试的方法来获取等效安全水平指标是不可行的。RflySim平台中以多旋翼无人机为典型例子，如果要通过实验方法来测量某个故障情况下飞机的坠地速度，意味着每次实验都

需要损毁一架飞机，这在成本和地面安全等因素考虑下是难以接受的。基于 RflySim 平台的硬件在环仿真测试功能，可以搭建如下图所示的全自动化的安全测试平台。

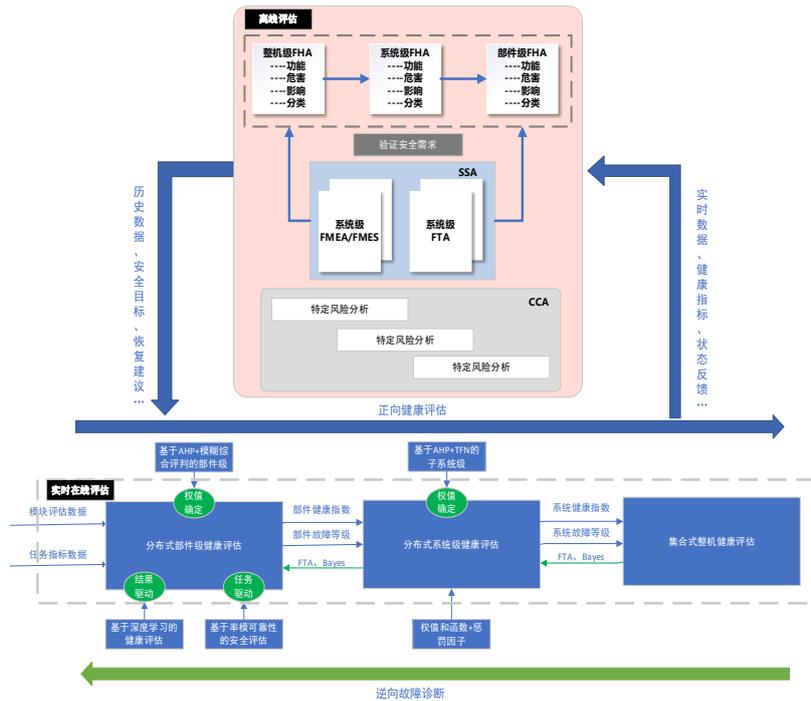


## 健康评分与故障诊断框架

无人系统的安全性定义与有人系统的安全定义是存在较大区别的，因此上文中重点介绍了无人系统安全性的定义与安全评估方法的扩展。而无人系统作为典型的复杂系统，其健康性的定义和有人系统的健康性的定义没有本质区别，只不过无人系统更为复杂，需要考虑的因素通常更多，且流程更为复杂。



RflySim 平台首先做离线评估、建立初步的故障模式与影响分析表格以及历史数据库；其次根据离线评估的输出，做实时的在线评估，一次飞行任务结束后，收集实时数据，将各子系统的健康指标、安全状态等，对故障模式与影响分析表格和历史数据库进行更新，如此反复迭代形成一个离线到在线的评估评估。



## 分布式部件级健康评估

通过 AHP（层次分析法）和专家经验确定部件级之间的权重关系，再根据深度学习方法对各个子部件进行健康评估，输出每个部件的健康得分,并通过基于率模可靠性的安全评估方法对故障影响和程度进行量化，并将其作为子系统级健康评估的输入。

