

doi: 10.7690/bgzd.2026.02.020

基于 FMECA 的无人机链路系统可靠性分析

袁 帅, 贾向军

(海军航空大学青岛校区航空装备保障指挥系, 山东 青岛 266100)

摘要: 为提升无人机系统的维护水平, 对其机载链路系统进行故障模式、影响及危害性分析 (failure mode, effects, and criticality analysis, FMECA)。分析整个机载链路系统的组成、结构和功能, 进而分析机载链路系统的功能和结构原理。将需要分析的机载链路系统分为机载卫通链路和机载视距链路 2 个子系统。明确层次划分, 定义机载链路系统和 2 个子系统的故障判据, 根据系统技术说明书等资料以及实际工作情况对 2 个子系统分别进行了失效分析。完成机载链路系统的 FMECA 表格, 并确定机载链路系统的薄弱环节。结果表明, 该研究可为后续的基于多状态动态故障树的建模优化工作提供基础。

关键词: FMECA; 可靠性分析; 无人机系统

中图分类号: V279 **文献标志码:** A

Reliability Analysis of UAV Link System Based on FMECA

Yuan Shuai, Jia Xiangjun

(Aeronautical Equipment Support Command Department, Qingdao Campus,
Naval Aviation University, Qingdao 266100, China)

Abstract: In order to improve the maintenance level of unmanned aerial vehicle (UAV) system, failure mode, effects and criticality analysis (FMECA) is carried out for its airborne link system. The composition, structure and function of the whole airborne link system are analyzed, and then the function and structure principle of the airborne link system are analyzed. The airborne link system to be analyzed is divided into two subsystems: airborne satellite communication link and airborne line-of-sight link. The fault criteria of the airborne link system and the two subsystems were defined, and the failure analysis of the two subsystems was carried out according to the system technical specifications and the actual working conditions. Complete the FMECA form of the airborne link system and identify the weak link of the airborne link system. The results show that this study can provide a basis for the subsequent modeling and optimization work based on multi-state dynamic fault tree.

Keywords: FMECA; reliability analysis; UAVS

0 引言

相比有人飞机, 无人机具有无人员伤亡、低成本、部署灵活等优点, 但其使用方式决定它必须将侦察、感知信息实时传输回地面控制中心, 链路系统实现了控制站与无人机之间的实时信息交换以及地面控制站与无人机之间的数据收发和跟踪定位。无人机数据链路系统的主要任务是实现连接地面站与无人机之间的通信系统, 是连接地面指控系统和远端的无人机系统的信息传输设施, 按照一定的消息格式和通信协议, 通过无线信道由上行链路和下行链路实时传输格式化数字信号的无线通信信息链路, 从而使无人机系统中的任务平台、控制平台、监测平台以及传感器平台之间的数据可以得到传输和处理, 是无人机完成任务的必要保障, 使得无人机数据链路在整个无人机系统中起着至关重要的

作用。

故障模式、影响及危害性分析 (FMECA) 是分析产品所有可能的故障模式及其可能产生的影响, 并按每个故障模式产生影响的严重程度及其发生概率予以分类的一种归纳分析方法, 是属于单因素的分析方法。目前, FMECA 广泛应用于武器装备、机械工业和电子行业的安全性和可靠性评估, 陈富军等^[1]基于传统的 FMECA 方法, 结合液力机械综合传动装置设计研制特点, 采用了分阶段、分层次的分析流程, 并以综合传动装置典型故障模式对“4 类 5 维”的故障原因分析法进行了详细说明; 孔雷星等^[2]针对现有 FMECA 方法存在无法有效指导设计改进和接口分析不到位的缺陷, 改进产品功能和结构分析方法, 完善 FMECA 分析表格和增加发生可能性的级别, 并以分流调节器为例进行了逐

收稿日期: 2024-11-18; 修回日期: 2024-12-20

第一作者: 袁 帅 (1992—), 男, 山东人, 硕士。

一分析。

近年来, FMECA 理论也被广泛应用在无人机系统中。吴景泰等^[3]应用基于 FMECA 的模糊贝叶斯网络可靠性分析方法对无人机起落架系统进行可靠性分析, 找出关键子系统, 为决策者提供决策依据, 减少故障发生概率, 保证无人机安全完成飞行任务; 贾占强等^[4]结合典型无人机测控系统组成及工作原理, 构建了无人机测控系统的多层次多信号流程图模型, 在此基础上开展了测试性预测和测试性优化设计, 总结后给出了工程设计中的关键注意事项; 魏昌全^[5]对故障部件进行故障模式、机理影响分析, 确定故障模式和影响, 找出故障发生的根本原因和故障机理, 提出改进措施, 提高无人机回收系统的可靠性。

上述基于 FMECA 理论在无人机系统领域取得了一定进展, 但还缺少对无人机链路系统的针对性分析, 笔者结合某型无人机功能结构特点, 通过近 5 年的外场实际使用数据, 进行 FMECA 分析。

1 某型无人机机载链路功能结构

图 1 为远程无人机数据链路系统, 控制站到无人机指令的发送和接收称为上行链路, 无人机到控制站的数据发送和接收称为下行链路。

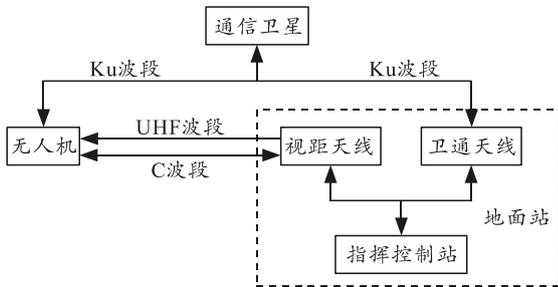


图 1 链路系统

无人机机载链路系统是某型中高空远程无人机系统的重要组成部分。机载链路系统与地面测控与信息传输设备配合使用, 完成视距及超视距范围对无人机及其任务载荷的遥控、遥测和任务数据的实时传输。某型无人机机载链路由机载视距链路子系统和机载卫通链路子系统 2 部分组成, 其中机载视距链路子系统完成视距范围内无人机的跟踪定位功能, 实现对无人机和链路的操纵、监视及任务数据实时分发的功能; 机载卫通链路同时具有向舰船或岸基站传送目标指示信息的功能。

卫通链路机载站(卫通机载站)是与卫通链路地面站一起构成卫星中继数据链路子系统(简称卫通链路系统)。卫通链路系统为地面控制站提供了超视

距数据传输通道, 主要用于实现对无人机飞行状态和机载任务设备工作状态的超视距实时遥控、遥测和无人机侦察图像信息的超视距实时传输等功能。无人机活动范围处在卫星天线波束有效覆盖范围内, 则可实现无人机与地面控制站之间远距离可靠的数据传输, 不受地理位置的限制。

视距数据链路子系统由视距地面站设备和视距机载设备组成, 主要用于实现对无人机飞行状态和机载任务设备工作状态的实时遥控, 对无人机飞行状态和机载任务设备状态的实时遥测, 视距范围内对无人机的跟踪定位, 完成无人机侦察图像信息的实时传输等功能。在地理位置良好, 无信号遮挡条件下, 视距数据链路子系统工作范围不大于 200 km。

1.1 机载卫通链路系统功能结构

机载卫通链路系统的构成包括机载收发组合、机载功放组合和机载 Ku 天线组合等模块。主要实现的功能: 1) 采用 Ku 波段为主传输链路, 实时传输侦察情报信息; 2) 卫通机载站接收并解调卫通地面站通过卫星转发来的上行遥控信息, 将下行遥测信息和侦察图像数据进行调制, 通过卫星转发发送到卫通地面站; 3) 机载 Ku 波段天线系统具有对卫星自动捕获、自动跟踪和遮挡保护的功能, 能实时跟踪和指向所使用卫星, 可短时间内重新捕获卫星。图 2—3 分别为机载卫通链路系统组成以及卫通链路信号传输。

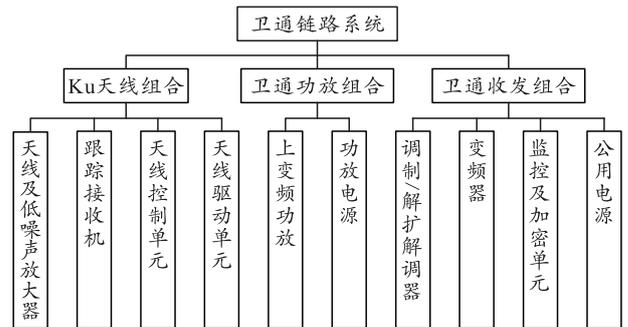


图 2 机载卫通链路系统组成

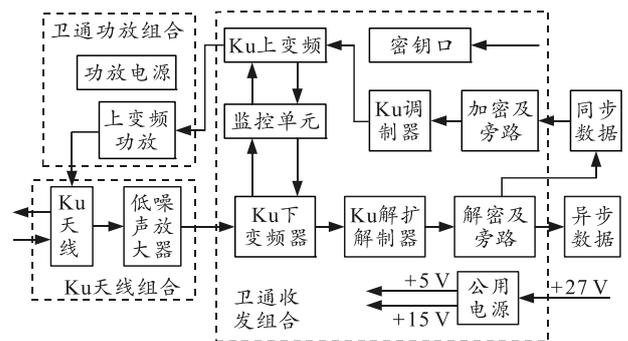


图 3 卫通链路信号传输

1.2 机载视距链路系统功能结构

机载视距链路系统包括收发组合、射频前端、电源变换器、C 小信号滤波器、C 波段全向天线 1、C 波段全向天线 2 和 UHF 波段全向天线等模块。视距数据链路子系统包括 C 波段主链路和 UHF 波段备份链路，C 波段主链路用于传输遥控信息和图像/遥测信息，UHF 波段备份链路仅传输遥控信息。

视距数据链子系统采用扩频“4 合 1”测控与信息传输体制，即上行遥控指令加密直接序列扩频传输，下行侦察数据与遥测复合共信道传输，直接接收下行宽带信号进行单脉冲跟踪测角，综合利用上行遥控和下行遥测信息帧进行测距。实现的主要功能：1) 视距机载设备接收到地面站发来的上行遥控信号，经放大、解扩、解调后，取出遥控指令送飞控计算机；2) 将侦察及遥测信息复接，经图像遥测发射机发往地面。图 4、5 分别为视距链路系统组成以及视距链路信号传输。

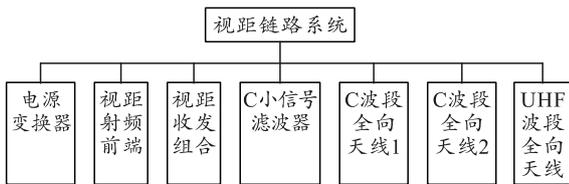


图 4 视距链路系统组成

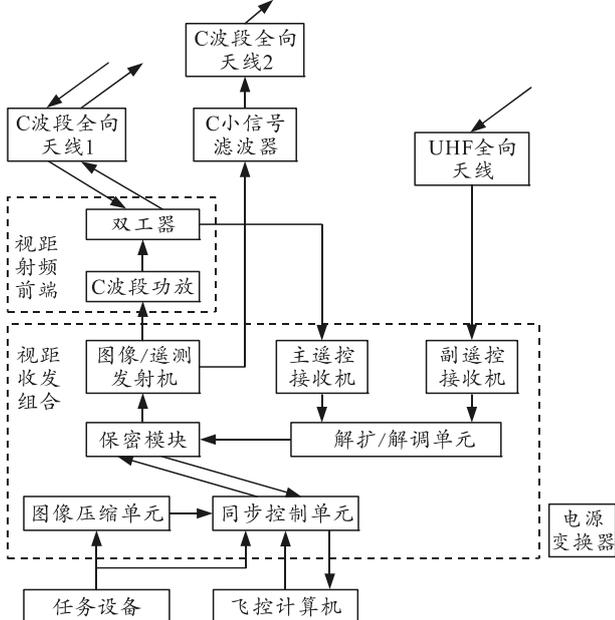


图 5 视距链路信号传输

2 链路系统 FMECA 分析的相关定义

2.1 约定层次

根据 FMECA 的需要，按产品的功能关系或硬件结构进行功能层次或结构层次进行划分。在

FMECA 中的约定层次，划分为“初始约定层次”“其他约定层次”和“最低约定层次”，其中初始约定层次为要进行 FMECA 产品所在的约定层次中的最高层次，是 FMECA 最终影响的对象；其他约定层次为相继的约定层次(第 2、3、4 等)，这些层次表明了较简单的组成部分的有顺序的排列；最低约定层次为约定层次中最底层的产品所在的层次，决定了 FMECA 工作深入、细致的程度^[6-7]。

根据上述无人机机载链路系统的特点，划分的约定层次为：

- 1) 初始约定层次：无人机机载链路系统；
- 2) 其他约定层次：无人机机载链路子系统(机载卫通链路系统、机载数据链路系统)、机载链路系统设备；
- 3) 最低约定层次：系统设备中的最小可更换模块，如天线控制单元、变频器、主遥控接收机等。

2.2 可靠性框图

可靠性框图是描述产品整体可靠性与其组成部分的可靠性之间的关系。它不反映产品间的功能关系，而是表示故障影响的逻辑关系。如果产品具有多项任务或多个工作模式，则应分别建立相应的任务可靠性框图。

根据图 1 的描述，无人机机载链路系统中，机载卫通链路与机载视距链路都承载信号传输任务，且相互之间并无故障影响。任务可靠性框图如图 6 所示。

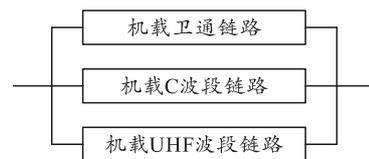


图 6 无人机机载链路系统任务可靠性框图

根据图 3 所述，无人机机载卫通链路系统任务可靠性框图如图 7 所示。

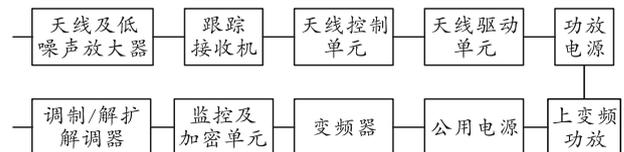
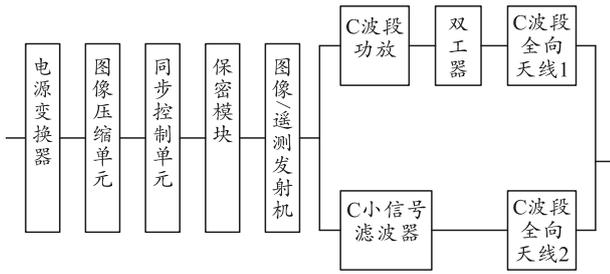


图 7 机载卫通链路系统任务可靠性框图

根据图 5 所述，无人机机载 C 波段链路系统任务可靠性框图如图 8 所示。



(a) 机载 C 波段上行遥控链路系统任务可靠性框图



(b) 机载 C 波段下行遥测链路系统任务可靠性框图

图 8 机载 C 波段链路系统任务可靠性框图

根据图 5 所述,无人机机载 UHF 波段链路系统任务可靠性框图如图 9 所示。

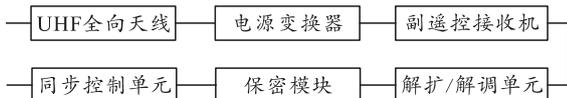


图 9 机载 UHF 波段链路系统任务可靠性框图

2.3 假设条件、故障判据

1) 假设条件。

假设 FMECA 中各种故障模式是相互独立的^[8-9]。

2) 故障判据。

参考 GJB/Z1391-2006,结合某型无人机机载链路系统在工作过程中的特点,制定以下故障判据(机载链路系统出现以下情况之一的,即认为该系统发生了故障):

- ① 无人机机载链路系统及其子系统信号中断;
- ② 无人机机载链路系统及其子系统信号失常且不稳定;
- ③ 无人机机载链路系统及其子系统空中出现信号中断,但后续地面检查中该情况不复现。

2.4 系统编码、风险优先数评级

1) 系统编码。

参考 GJB/Z1391-2006,对无人机机载链路系统的各子系统和设备进行编码,如表 1 所示。

表 1 机载链路系统编码

分类	名称	编码
子系统	机载卫通链路系统	W
	机载视距链路系统	S
设备	Ku 天线组合	W ₁
	卫通功放组合	W ₂
	卫通收发组合	W ₃
	电源变换器	S ₁
	C 波段全向天线 1	S ₂
	C 波段全向天线 2	S ₃
	视距射频前端	S ₄
C 小信号滤波器	S ₅	

2) 机载链路系统风险优先数(RPN)评级。

风险优先数方法是对产品每个故障模式的 RPN 值进行优先排序,并采取相应的措施,使 RPN 值达到可接受的最低水平^[10]。产品某个故障模式的 RPN 等于该故障模式的严酷度等级(ESR)和故障模式的发生概率等级(OPR)的乘积,即:

$$RPN=ESR \times OPR. \quad (1)$$

式中:RPN 数越高,则其危害性越大;ESR 和 OPR 的评分准则参考 GJB/Z1391-2006。

参考 GJB/Z1391-2006,结合某型无人机机载链路系统的技术状态,将风险等级优先数 RPN 分为 5 级,如表 2 所示。

表 2 机载链路系统 RPN 分级

RPN 范围	危害性等级	建议措施
RPN > 49	I (非常大)	系统存在很大的隐患,需要对薄弱环节加以改进,并对改进后的系统重新评价,直到系统的可靠性满足要求
25 < RPN ≤ 49	II (大)	系统存在较大的隐患,需要对薄弱环节加强监测,并采取相应的纠正措施,降低事故发生的概率及其影响程度
16 < RPN ≤ 25	III (中等)	系统存在一定的隐患,需要对薄弱环节加强监测,并适当采取一些纠正措施,从而预防事故的发生
9 < RPN ≤ 16	IV (小)	系统存在较小的隐患,需要对相应部分加强监测和维护
RPN ≤ 9	V (非常小)	系统状态良好,无需采取特殊的措施

3 机载卫通链路系统 FMECA

3.1 机载卫通链路系统 FMECA 的相关定义

1) 约定层次。

约定层次:机载卫通链路系统;

最低约定层次:机载卫通链路系统的可更换模块(跟踪接收机、功放电源等)^[11]。

2) 故障判据。

参照整个机载链路系统的故障判据,机载卫通链路系统出现下列情况时,即认为该系统出现故障:

- ① Ku 天线无法锁定或跟踪卫星;
- ② 卫通链路上行遥控链路无法通信;
- ③ 卫通链路下行遥测链路无法通信;
- ④ 单元模块功能丧失或损坏等。

3) 系统编码。

根据表 1 中定义的系统编码,对机载卫通链路系统各功能模块进行编码,得到的编码结果如表 3 所示。

表 3 卫通链路系统功能模块编码

分类	名称	编码
子系统	卫通链路系统	W
设备	Ku 天线组合	W_1
	卫通功放组合	W_2
	卫通收发组合	W_3
功能模块	天线及低噪声放大器	W_{11}
	跟踪接收机	W_{12}
	天线控制单元	W_{13}
	天线驱动单元	W_{14}
	上变频功放	W_{21}
	功放电源	W_{22}
	调制/解扩解调器	W_{31}
	变频器	W_{32}
	监控及加密单元	W_{33}
	公用电源	W_{34}

3.2 机载卫通链路系统故障模式分析

1) Ku 天线组合的故障模式分析。

Ku 天线组合包括天线及低噪声放大器、跟踪接收机、天线控制单元和天线驱动单元。对其故障模式分析如下：

- ① 变形；

- ② 无法搜索且锁定卫星；
- ③ 无法精准跟踪卫星；
- ④ Ku 天线组合对指令信号无反应；
- ⑤ Ku 天线组合运转不畅。

2) 卫通功放组合的故障模式分析。

卫通功放组合包括上变频功放和功放电源。对其故障模式分析如下：

- ① 功率输出异常；
- ② 卫通功放组合状态灯异常。

3) 卫通收发组合的故障模式分析。

卫通收发组合包括调制/解扩解调器、变频器、监控及加密单元以及公用电源。对其故障模式分析如下：

- ① 变形；
- ② 卫通密钥注入失败；
- ③ 卫通收发组合状态灯不亮；
- ④ 地面站卫通变频器指示灯变红；
- ⑤ 地面站显示接收帧失锁、解调器失锁。

最终得到的机载卫通链路系统 FMECA 表格如表 4 所示。

表 4 机载卫通链路系统 FMECA

编号	项目	功能	故障模式	故障原因	故障影响			ESR	OPR	RPN	检测方法	改进措施
					局部	上层	最终					
W_1	Ku 天线组合	接收上行遥控载波并放大, 输出下行遥测和侦察图像信息载波	变形	产品的制造问题或安装问题导致	运行失常	丧失部分功能	性能下降	3	4	12	外观检查 阻力判定	更新工艺或装配调整检查
			无法搜索且锁定卫星	跟踪接收机的损坏或功能丧失	完全损坏	通信中断	丧失部分功能	6	5	30	人工检测	增加监控及报警装置
			无法精准跟踪卫星	跟踪接收机参数漂移	运行失常	丧失部分功能	性能下降	4	7	28	人工检测	增加监控及报警装置
			对指令信号无反应	天线控制单元的损坏或功能丧失	完全损坏	通信中断	丧失部分功能	6	5	30	人工检测	增加监控及报警装置
			运转不畅	天线驱动单元异常	运行失常	性能下降	性能下降	3	2	6	人工检测加分析 振动信号判定	增加监控及报警装置
W_2	卫通功放组合	将射频载波信号进行功率放大	功率输出异常	上变频功放模块功能异常	运行失常	丧失部分功能	性能下降	4	5	20	BIT 检测	设计改进
			状态灯异常	不亮 红色	功放电源异常 零组件故障	完全损坏	通信中断	丧失部分功能	6	8	48	人工检测
W_3	卫通收发组合	将信号进行调制解调、变频、加密解密等	变形	安装或材料选取不当	部分损坏	性能退化	性能下降	3	1	3	外观检查	更换材料或更新工艺
			卫通密钥注入失败	监控及加密单元内部插头松动、损坏或整体功能异常	完全损坏	丧失部分功能	性能下降	5	5	25	人工检测	更新工艺
			状态灯不亮	公用电源模块损坏或功能异常	完全损坏	通信中断	丧失部分功能	6	4	24	人工检测	增加监控及报警装置
			地面站显示卫通变频器指示灯变红	变频器模块损坏或功能异常	完全损坏	通信中断	丧失部分功能	6	5	30	BIT 检测	设计改进
			地面站显示接收帧失锁、解调器失锁	调制/解扩解调器模块损坏或功能异常	完全损坏	通信中断	丧失部分功能	6	6	36	BIT 检测	设计改进

由表 4 可知，机载卫通链路系统危害程度最高的失效模式为卫通功放组合的状态灯异常。为了减少该失效模式带来的损害，应当在设计时更新其内部的构造工艺，或者是在使用中增加监控及报警装

置，让该设备有机内自检的过程，使维修人员对故障定位能够进行预判并及时采取相应的维护措施。同时，机载卫通链路系统中 Ku 天线组合的无法精准跟踪卫星、卫通收发组合的地面站显示接收帧失

锁、解调器失锁等失效模式是发生频率最高的几种模式，在设计改进以及日常使用维护保养中应当重点关注。

4 机载视距链路系统 FMECA

4.1 机载视距链路系统 FMECA 的相关定义

1) 约定层次。

约定层次：机载视距链路系统；

最低约定层次：机载视距链路系统的可更换模块(电源变换器、C 波段功放、主遥控接收机等)。

2) 故障判据。

参照整个机载链路系统的故障判据，机载视距链路系统出现下列情况时，即认为该系统出现故障：

- ① 视距 C 波段链路上行遥控链路无法通信；
- ② 视距 C 波段链路下行遥测链路无法通信；
- ③ 视距 UHF 波段链路上行遥控链路无法通信；

通信；

- ④ 单元模块功能丧失或损坏等。

3) 系统编码。

根据表 1 中定义的系统编码，对机载视距链路系统各功能模块进行编码，得到的编码结果如表 5 所示。

4.2 机载视距链路系统故障模式分析

机载视距链路系统包括电源变换器、C 波段全向天线 1、C 波段全向天线 2、C 小信号滤波器、视距射频前端以及视距收发组合。其中视距射频前端包括双工器和 C 波段功放，视距收发组合包括组遥控接收机、解扩/解调单元、保密模块、同步控制单元、图像/遥测发射机、图像压缩单元以及副遥控接收机。对其故障模式分析如下：

- ① 天线锈蚀；
- ② 视距链路通信全部中断；
- ③ 视距链路系统上行遥控信号通信中断；
- ④ C 波段链路下行遥测链路信号弱且上行遥控通信正常；
- ⑤ C 波段链路下行遥测链路信号弱且上行遥控通信中断；
- ⑥ C 波段链路下行遥测链路小信号通信中断；
- ⑦ C 波段链路下行遥测链路无法通信；
- ⑧ C 波段链路上行遥控链路无法通信且 UHF 波段链路通信正常；
- ⑨ UHF 波段链路无法通信且 C 波段链路通信正常；
- ⑩ 视距秘钥注入失败。

表 5 视距链路系统功能模块编码

子系统		设备		功能模块	
名称	编码	名称	编码	名称	编码
视距链路系统	S	电源变换器	S ₁	无	无
		C 波段全向天线 1	S ₂	无	无
		C 波段全向天线 2	S ₃	无	无
		视距射频前端	S ₄	双工器	S ₄₁
				C 波段功放	S ₄₂
		C 小信号滤波器	S ₅	无	无
		视距收发组合	S ₆	主遥控接收机	S ₆₁
				解扩/解调单元	S ₆₂
				保密模块	S ₆₃
				同步控制单元	S ₆₄
图像/遥测发射机	S ₆₅				
图像压缩单元	S ₆₆				
副遥控接收机	S ₆₇				
UHF 波段全向天线	S ₇	无	无		

最终得到的机载视距链路系统 FMECA，如表 6 所示。

表 6 机载视距链路系统 FMECA

编号	项目	功能	故障模式	故障原因	故障影响			ESR	OPR	RPN	检测方法	改进措施
					局部	上层	最终					
S ₁	电源变换器	为视距链路系统的设备提供电源	视距链路通信全部中断	损坏或功能丧失	完全损坏	通信中断	丧失部分功能	6	1	6	功能检测	增加监控及报警装置
S ₂	C 波段全向天线 1	上行遥控信号和下行图像遥测大信号的收发	锈蚀	产品的老化或表面材料选取不合理且未及时维护导致	部分损坏	性能下降	性能下降	3	1	3	外观检查	添加涂层
S ₃	C 波段全向天线 2	用于图像遥测小信号的发射	锈蚀	产品的老化或表面材料选取不合理且未及时维护导致	部分损坏	性能下降	性能下降	2	1	2	外观检查	添加涂层
S ₄	视距射频前端	遥测信号进行功率放大，接收地面遥控信号	C 波段链路下行遥测链路信号弱且上行遥控通信正常	C 波段功放模块损坏或功能异常	完全损坏	丧失部分功能	丧失部分功能	5	1	5	功能检测	增加监控及报警装置
			C 波段链路下行遥测链路信号弱且上行遥控通信中断	双工器模块损坏或功能异常	完全损坏	丧失部分功能	丧失部分功能	5	1	5	功能检测	增加监控及报警装置

继表 6 机载视距链路系统 FMECA

编号	项目	功能	故障模式	故障原因	故障影响			ESR	OPR	RPN	检测方法	改进措施
					局部	上层	最终					
S ₅	C 波段小信号滤波器	过滤 C 波段下行遥测链路信号的杂波	C 波段链路下行遥测链路小信号通信中断	损坏或功能异常	完全损坏	性能下降	性能下降	4	4	16	功能检测	增加监控及报警装置
			视距链路通信全部中断	同步控制单元模块损坏或功能丧失	完全损坏	通信中断	丧失部分功能	6	1	6	功能检测	增加监控及报警装置
			视距链路系统上行遥控信号通信中断	解扩解调单元损坏或功能丧失	完全损坏	丧失部分功能	丧失部分功能	6	4	24	功能检测	增加监控及报警装置
S ₆	视距收发组合	将信号进行调制解调、变频、加密解密等	C 波段链路下行遥测链路无法通信	图像压缩单元模块或图像/遥测发射机模块损坏或功能丧失	完全损坏	丧失部分功能	丧失部分功能	5	4	20	功能检测	增加监控及报警装置
			C 波段链路上行遥控链路无法通信且 UHF 波段链路通信正常	主遥控接收机模块损坏或功能丧失	完全损坏	丧失部分功能	丧失部分功能	5	5	25	BIT 检测	设计改进
			UHF 波段链路无法通信且 C 波段链路通信正常	副遥控接收机模块损坏或功能丧失	完全损坏	丧失部分功能	丧失部分功能	5	4	20	BIT 检测	设计改进
			视距密钥注入失败	保密模块损坏或整体功能异常	完全损坏	丧失部分功能	丧失部分功能	5	1	5	人工检测	增加监控及报警装置
S ₇	UHF 波段全向天线	接收上行副遥测信号	锈蚀	产品的老化或表面材料选取不合理且未及时维护导致	部分损坏	性能下降	性能下降	2	1	2	外观检查	添加涂层

由表 6 可知，机载视距链路系统危害程度最高的失效模式为 C 波段链路上行遥控链路无法通信且 UHF 波段链路通信正常。为了减少该失效模式带来的损害，应当在设计时更新其内部的构造工艺。根据功能结构分析以及 FMECA 可以发现：机载视距链路系统虽然存在不同波段的多余度设计，但在其系统设备内部存在同一模块单元分管不同波段功能的情况。这既是设计的不合理，又对提高可靠性毫无作用。尤其是机载视距链路系统中的视距收发组合，既是危害程度最高，又是发生频率最高的设备，在设计改进中应当重点关注。

5 结束语

笔者对在无人机链路系统中可靠度要求更高的机载链路系统进行了 FMECA 分析，可为后续的基于多状态动态故障树的建模优化工作提供基础。

参考文献：

- [1] 陈富军, 米洁, 张胜伦, 等. 针对液力机械综合传动装置的 FMECA 方法[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2022, (4): 52-56.
- [2] 孔雷星, 冷学敏, 马季军, 等. 改进 FMECA 在空间电

- 源分系统中的应用[J]. 上海航天(中英文), 2021(1): 142-149.
- [3] 吴景泰, 王莲莲. 基于 FMECA 模糊贝叶斯网络的无人机起落架可靠性分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2018(6): 90-96.
- [4] 贾占强, 梁保卫, 王江辉, 等. 基于多信号流图模型的典型无人机测控系统测试性优化设计方法研究[J]. 测控技术, 2022(6): 26-32.
- [5] 魏昌全. 无人机回收系统故障分析[J]. 科技资讯, 2018(12): 56-57.
- [6] 常海, 田薇, 陈卓, 等. 无人机电载光电任务载荷可靠性试验方案设计[J]. 现代信息科技, 2019(13): 54-56.
- [7] 王春晖, 李晓钢, 陈皓晖, 等. 无人机贮存环境监测系统可靠性分析[J]. 环境技术, 2022(2): 34-40.
- [8] 苏续军, 吕学志. BP 神经网络模型在无人机系统故障预测中的应用分析[J]. 计算机应用与软件, 2019(9): 70-75.
- [9] 曾亮亮, 朱江雷, 张杰. 大型察打一体无人机系统级测试性试验技术与应用[J]. 测控技术, 2021(2): 25-31.
- [10] 罗润. 一种基于 FMECA 和 FTA 的产品可靠性增长方法[J]. 现代制造技术与装备, 2021(11): 142-146.
- [11] 康京山. FMECA 对于装备通用质量特性的作用分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020(5): 62-66.