

doi: 10.7690/bgzdh.2026.03.018

基于 MMDD 的多状态链路系统可靠性分析

袁 帅, 贾向军, 李军亮

(1. 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: 针对某型无人机视距链路系统现行的预防性维修措施存在的问题, 提出基于多状态系统的动态故障树中的优先与门 PAND 和功能相关门 FDEP 等主要的动态门建立多状态多值决策图(multistate multi-valued decision diagram, MMDD)模型。对其链路系统故障产品进行分析, 通过可靠性分析方法制定新的预防性维修策略。结果表明: 该模型能提高装备的可靠度, 实现对无人机链路系统的维修优化。

关键词: 无人机; 可靠性; 维修优化

中图分类号: V279 **文献标志码:** A

Reliability Analysis of Multi-state Link System Based on MMDD

Yuan Shuai, Jia Xiangjun, Li Junliang

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

Abstract: In view of the existing problems of preventive maintenance measures for a certain type of UAV line-of-sight link system, a multistate multi-valued decision diagram (MMDD) model is proposed based on the main dynamic gates in the dynamic fault tree of the multistate system, such as the priority and gate PAND and the functional correlation gate FDEP. The failure products of the link system are analyzed, and a new preventive maintenance strategy is formulated through the reliability analysis method. The results show that the model can improve the reliability of the equipment and realize the maintenance optimization of the UAV link system.

Keywords: UAV; reliability; maintenance optimization

0 引言

以往对可靠性的研究中大多是基于二元状态系统展开的, 系统及其组成元件均被认为只有“正常”和“故障”2种状态。目前, 对二元状态系统进行建模和分析的理论及工具已经非常成熟, 包括故障树、可靠性框图和二元决策图(binary decision diagram, BDD)等方法^[1-3]。然而, 在实际应用中, 大多数系统均为相对复杂的多状态系统; 因此, 对多状态系统的可靠性建模及分析, 已经逐渐成为目前国内外研究的热点。

多状态系统可靠性理论起步于20世纪70年代中期, 由Murchlan和Barton等系统可靠性领域的著名学者率先提出, 到80年代初就已经逐步形成了多态系统比较完整的概念。到目前为止, 经过数十年的研究, 建立了多状态系统可靠性理论, 有许多实际的应用, 包括电力系统、通信和传输网络以及装备保障等领域^[4-6]。

Li等^[7]基于多状态多值决策图(MMDD)模型对不可修复的多状态系统的可靠性进行评估, 但是这

种方法并不适用于可修复的系统。Ren等^[8]提出了一种基于多值决策图(multi-valued decision diagrams, MDD)的多状态GO模型的新算法, 用于对复杂系统可靠性进行定性和定量分析, 但是该方法并不能直观表现多状态系统的结构。

在国内研究多状态可靠性理论的学者中, 方敏等^[9]提出了一种基于动态故障树(dynamic fault trees, DFT)的MDD分析方法, 通过使用多值变量对动态门进行编码, 生成MDD模型来模拟系统的故障行为, 但是该方法只能解决二状态系统动态故障树的模型, 不能用于多状态系统的研究中; 孙超勇等^[10]结合组件之间的逻辑关系建立整个系统的多值决策图, 利用全概率计算公式并结合多值决策图模型对多态系统进行可靠性分析; 齐继阳等^[11]在对多态多值决策图及重要度理论研究的基础上, 进一步研究了综合重要度(integrated importance measure, IIM)的物理意思与计算方法, 分析了以组件分布概率为自变量的系统性能期望函数梯度与综合重要度间的几何关系, 提出基于综合重要度的系

收稿日期: 2024-11-21; 修回日期: 2024-12-25

第一作者: 袁 帅(1992—), 男, 山东人, 硕士。

统性能梯度分析方法；加鹤萍^[12]针对存在运行备用的电力系统，创新性地提出了多状态决策图方法，为多状态系统可靠性研究提供了新思路；朱志伟等^[13]采用 MMDD 方法对系统可靠性进行定量分析，基于概率重要度，评估分接开关各个故障状态下的可靠性，用实例分析结果验证 MMDD 对故障分析具有发现、演绎、计算和解释的优点，并可得出各个故障因素与系统可靠性关系。

通过上述文献资料分析可以看出：针对链路系统的相关研究目前尚处于起步阶段，研究成果较少，想进一步提高无人机系统的可靠性，亟需开展对链路系统的相关研究。动态故障树可以通过转换成多值决策图有效解决计算量和故障树规模增长的问题，多状态多值决策图是在多值决策图的基础上用表示状态的数值将各元素的输出边表示出各元件的多个状态，因此具有与多值决策图相同的优点，可以缓解以往可靠性分析模型中状态空间爆炸的问题，同时对元件与系统的结构关系进行形象描述，借鉴其方法对后文分析提供了理论依据。

1 某型无人机现行预防性维修措施

1.1 现行周期性维护保养工作

根据某型无人机的《维护规程》和实际工作维护经验，该型无人机现行周期性维护保养工作主要包括：

1) 每停放 14~16 d 周期性检查：对长时间停放的无人机进行全系统的外观检查以及全系统通电的功能检查；

2) 每停放 28~32 d 周期性检查：除完成每停放 14~16 d 周期性检查工作外，还需进行起落架收放检查、电气子系统维护检查、飞控子系统维护检查以及漆层的修复等；

3) 每 5、25、50、100 次起落定检：主要针对不同飞行起落数完成相应的对机身、机翼以及起落架的相关维护工作，包括外观检查、力矩检查、收放功能检查等内容；

4) 飞行 90~110 h 定检：主要检查机载设备安装情况、各机翼舵机安装情况以及对液压系统的维护检查；

5) 发动机每 25、100、200、400、600 h 定检：主要针对发动机不同工作时间段完成相应的对发动机的相关维护工作，包括外观检查、清洗、检查有无泄漏以及更换滑油、联轴器等内容；

6) 惯导周年标校：主要完成惯导校准工作，消除长时间工作带来的误差；

7) 小型大气数据计算机每 170~190 d 标定：每半年需要对大气数据计算机进行一次定检，主要检查大气数据计算机的参数精度及其连接通气软管的气密性等工作；

8) 机载 Ku 卫通天线每 180~190 d 检查：每半年需要对机载 Ku 卫通天线进行一次定检，主要检查机载 Ku 卫通天线安装是否变形、参数精度等工作。

上述各项周期性维护保养工作中，针对无人机链路系统工作的预防性维护保养工作只有机载 Ku 卫通天线每 170~190 d 检查，日常通电检查也仅有在装备维护日与飞行前的功能性检查。

1.2 现有维修检测设备

针对无人机链路系统的维修检测设备只有卫通天线地面检测设备，且数量仅有 1 台。

2 视距链路系统存在的问题

2.1 装备使用阶段存在的问题

根据某型无人机外场使用记录，在数据统计期间暴露出以下问题：视距链路系统机载设备发生故障共 8 起，故障设备主要为视距链路收发组合以及 UHF 波段全向天线，除 UHF 波段全向天线因锈蚀影响进行更换，故障主要集中在视距链路收发组合，约占故障总数的 75%，视距收发组合故障现象分类统计如图 1 所示。

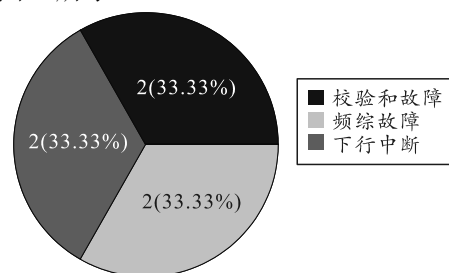


图 1 视距收发组合故障现象分类统计

机载视距收发组合由图像/遥测发射机、主遥控接收机、副遥控接收机、图像压缩单元、同步控制单元、解扩解调单元和保密模块 7 部分功能模块组成，属于高集成设备，任一功能模块发生故障，均会引起视距链路系统通信故障，所以需研究其可靠性提升措施和维修优化方案。

2.2 现行预防性维修措施的问题

通过对上述某型无人机现行预防性维修措施的

梳理，关于链路系统维修工作存在不足：

1) 周期性维护保养工作内容针对性不强。目前按照《维护规程》执行的无人机定检工作中，每 28~32 d 定检等存在内容重复、针对性不强等问题，导致机组工作重复。建议加强与工业部门研究，进一步规划无人机周期性维护保养工作内容，针对不同飞行架次、时间无人机可能存在的风险隐患进行评估，按照评估的等级和内容，有针对性规划定检工作，合理规划定检维护内容。

2) 维护周期制定、翻修寿命依据不够合理。如

机载 Ku 卫通天线跟踪设备仅给定总寿命 10 年，后续结合使用情况给定 180 d 周期维护检查，实际使用过程中发现可靠性指标(可靠度等)达不到实际要求，需要根据实际使用情况进行二次调整。

3) 维护、维修检测设备较为匮乏且设备数量不足，缺乏传感器校验检测设备、线路故障诊断设备、一体化抢修设备等维修检测设备。维修工艺不够系统全面，缺乏系统的维修工艺手册，维修检测、故障排查分析，主要依赖工业部门现场保障。

表 1 为现有维修检测设备统计。

表 1 现有维修检测设备统计

序号	设备名称	型号	数量	主要功用
1	大气数据测控仪	ADTS203D-1	2	用于气密性检查及精度标定
2	大气综合测试仪	ADTS405F	1	用于气密性检查及精度标定
3	卫通天线地面检测设备	TWX-002A	1	用于 Ku 天线调试及维护
4	SAR 综合测试控制设备	TS-S-01	1	用于 SAR 平台地面维护及排故
5	示波器	TDS-2012B	1	测试信号波形及电压
6	北斗用户测试设备	无	1	绑定 IC 卡，检测北斗用户
7	检测及视频处理设备	LXW-002-D	2	数据下载及测试
8	飞参电脑本	J/NB-006B	2	飞参下载及分析、TCU 数据监测
9	超声波测试仪	FZJ-2	2	用于飞参信标检测
10	桨距测量仪	无	2	用于测量螺旋桨的桨距值
11	飞机起落架液压系统综合测试车	AUHT10-21	1	飞机液压系统检测
12	便携式颗粒计数器	PAMAS-S40	1	用于液压油分析
13	综合检测车	DH5102XZJ	2	飞行准备及飞机日常维护
14	综合检测台	JCT	2	飞行准备及飞机日常维护

3 机载视距链路系统可靠性分析

3.1 机载视距链路系统故障树建模

机载视距链路系统 S 的构成包括电源变换器



图 2 机载视距链路系统可靠性

机载视距链路系统工作状态可分为正常、运行失常、完全损坏 3 种状态。其组成模块也可分为正常、运行失常、完全损坏 3 种状态。用状态 1 表示元件的初始状态(正常)，状态 2 表示中间状态(运行失常)，状态 3 表示元件的失效状态(完全损坏)，对机载视距链路系统中的元件故障状态划分如表 2 所示。

表 2 机载视距链路系统元件故障状态划分

元件名称	状态 1	状态 2	状态 3
机载视距链路系统	正常	运行失常	故障
电源变换器	正常	完全损坏	—
C 波段全向天线 1	正常	运行失常	完全损坏
C 波段全向天线 2	正常	运行失常	完全损坏
视距射频前端	正常	完全损坏	—
C 小信号滤波器	正常	完全损坏	—
视距收发组合	正常	完全损坏	—
UHF 波段全向天线	正常	运行失常	完全损坏

(S₁)、C 波段全向天线 1(S₂)、C 波段全向天线 2(S₃)、视距射频前端(S₄)、C 小信号滤波器(S₅)、视距收发组合(S₆)和 UHF 波段全向天线(S₇)，建立机载视距链路系统可靠性如图 2 所示。

根据系统结构的描述及可靠性框图，按照系统编码，建立机载视距链路系统的故障树模型，如图 3 所示。

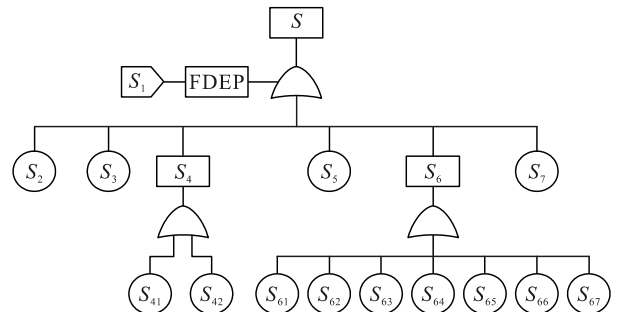


图 3 机载视距链路系统故障树模型

根据表 2，用状态 K₁、K₂ 和 K₃ 表示机载视距链路系统的状态性能，用 S_{ij} 表示元件的状态性能，j 表示各个元件的状态。例如：S₁₁ 表示元件 S₁ 处于

状态 1，即电源变换器处于运行正常的状态。机载视距链路系统为一个串联系统，系统正常运行时，即机载视距链路系统处于 K_1 状态时，必须要每个元件都正常运行，系统才会正常运行。如果系统中有一个元件发生故障，那么系统就会发生故障，就会处于 K_3 状态。除元件完全故障和正常运行以外，元件还有可能处于变形、锈蚀、运行失常等中间状态，元件处于这些中间状态时的组合就会导致机载视距链路系统处于运行失常状态，即状态 K_2 。

3.1.1 机载视距链路系统可靠性定性分析

根据系统的动态故障树模型和性能结构函数可得机载视距链路系统的结构函数为：

$$\varphi(S) = \min\{\text{pand}\{S_1\}, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7\} = \min\{\text{pand}\{S_1\}, S_2, S_3, \min\{S_{41}, S_{42}\}, S_5, \min\{S_{61}, S_{62}, S_{63}, S_{64}, S_{65}, S_{66}, S_{67}\}, S_7\}。$$

建立机载视距链路系统的 MMDD 模型步骤：

1) 分析系统结构，机载视距链路系统是一个串联系统，只要有一个元件故障，系统就会故障，因此，其故障树中所有元件通过或门连接。

2) 按照动态门顺序的优先级高于状态数目优先级的方式进行排序，随后按照各元件状态数量进行排序，元件 1 中存在功能相关门逻辑，元件 2、3、7 均有 3 个状态，且元件 6 数量 > 元件 4 数量 > 元件 5 数量，因此，按照图 4—6 中 $\text{index}(x) < \text{index}(y)$ 的顺序排序为：元件 $S_1 < \text{元件 } S_2 < \text{元件 } S_3 < \text{元件 } S_7 < \text{元件 } S_6 < \text{元件 } S_4 < \text{元件 } S_5$ 的顺序建立 MMDD 模型。

3) 以各元件的状态值表示 MMDD 的弧，分别建立机载视距链路系统处于正常运行状态 K_1 、运行失常状态 K_2 、故障状态 K_3 时的多状态多值决策图 MMDD 模型如图 4 所示。

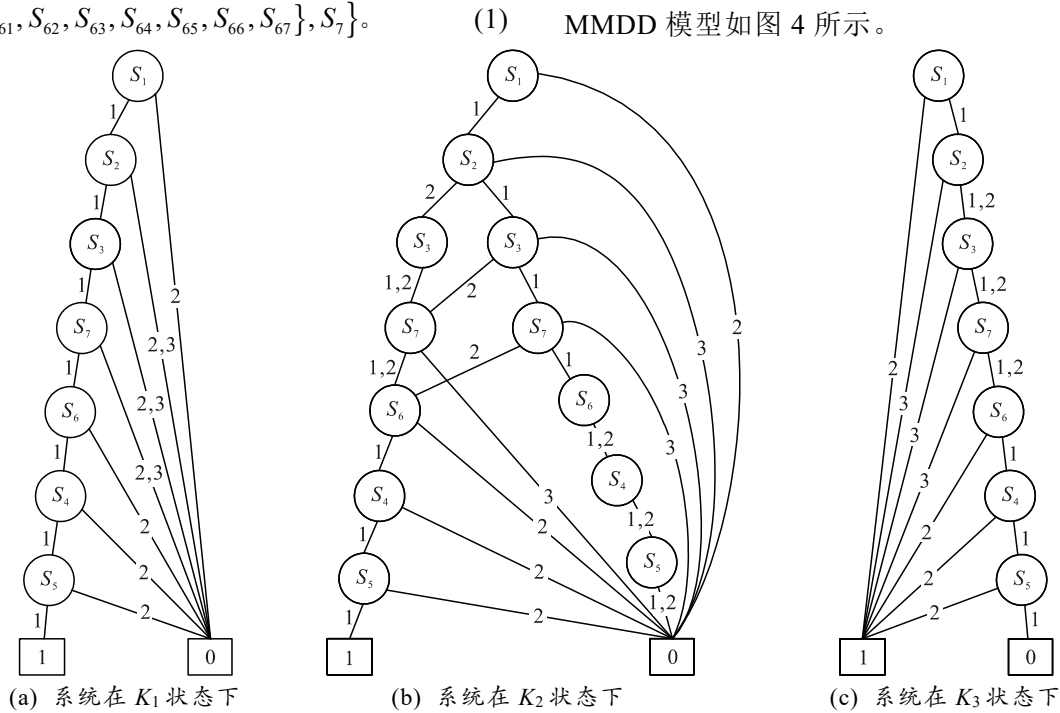


图 4 机载视距链路系统 MMDD 模型

终节点 1 表示机载视距链路系统处于该状态，终节点 0 表示机载视距链路系统不处于该状态。根据图 4 中系统在各状态下的 MMDD 模型图中指向终节点 1 的路径可以得到：

系统在状态 K_1 的最小割集为：
 $\{S_{11} \cap S_{21} \cap S_{31} \cap S_{71} \cap S_{61} \cap S_{41} \cap S_{51}\}。$ (2)

系统在状态 K_3 的最小割集为：
 $\{S_{12}\}; \{S_{11} \cap S_{23}\}; \{S_{11} \cap (S_{21} \cup S_{22}) \cap S_{33}\};$
 $\{S_{11} \cap (S_{21} \cup S_{22}) \cap (S_{31} \cup S_{32}) \cap S_{73}\};$

$$\{S_{11} \cap (S_{21} \cup S_{22}) \cap (S_{31} \cup S_{32}) \cap (S_{71} \cup S_{72}) \cap S_{62}\};$$

$$\{S_{11} \cap (S_{21} \cup S_{22}) \cap (S_{31} \cup S_{32}) \cap (S_{71} \cup S_{72}) \cap S_{61} \cap S_{42}\};$$

$$\{S_{11} \cap (S_{21} \cup S_{22}) \cap (S_{31} \cup S_{32}) \cap (S_{71} \cup S_{72}) \cap S_{61} \cap S_{41} \cap S_{52}\}。$$
 (3)

其余的元件状态组合即为系统在 S_2 状态的最小割集，此处不做描述。

3.1.2 机载视距链路系统可靠性定量分析

通过查阅某型无人机技术说明书以及外场实际

使用数据,机载视距链路系统中的部件电源变换器、C 波段全向天线 1、C 波段全向天线 2 以及 C 小信号滤波器在列装服役期间无任何故障发生,本文中假定其可靠度为 1。得到机载视距链路系统其余元件的故障率及修复率如下:

$$S_4: \lambda_{1,2}^{(4)}=0.25/\text{年}, \mu_{2,1}^{(4)}=4/\text{年};$$

$$S_6: \lambda_{1,2}^{(6)}=1.5/\text{年}, \mu_{2,1}^{(6)}=3.5/\text{年};$$

$$S_7: \lambda_{1,2}^{(7)}=0.25/\text{年}, \lambda_{1,3}^{(7)}=0.01/\text{年}, \mu_{2,1}^{(7)}=12/\text{年},$$

$$\mu_{3,1}^{(7)}=4/\text{年}。$$

可得到机载视距链路系统中 3 个组成元件的柯尔莫哥洛夫微分方程,分别为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_{41}(t)}{dt} &= -\lambda_{1,2}^{(4)}S_{41}(t) + \mu_{2,1}^{(4)}S_{42}(t) \\ \frac{dS_{42}(t)}{dt} &= \lambda_{1,2}^{(4)}S_{41}(t) - \mu_{2,1}^{(4)}S_{42}(t) \end{aligned} \right\}; \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_{61}(t)}{dt} &= -\lambda_{1,2}^{(6)}S_{61}(t) + \mu_{2,1}^{(6)}S_{62}(t) \\ \frac{dS_{62}(t)}{dt} &= \lambda_{1,2}^{(6)}S_{61}(t) - \mu_{2,1}^{(6)}S_{62}(t) \end{aligned} \right\}; \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_{71}(t)}{dt} &= -(\lambda_{1,2}^{(7)} + \lambda_{1,3}^{(7)})S_{71}(t) + \mu_{2,1}^{(7)}S_{72}(t) + \mu_{3,1}^{(7)}S_{73}(t) \\ \frac{dS_{72}(t)}{dt} &= \lambda_{1,2}^{(7)}S_{71}(t) - (\lambda_{2,3}^{(7)} + \mu_{2,1}^{(7)})S_{72}(t) + \mu_{3,2}^{(7)}S_{73}(t) \\ \frac{dS_{73}(t)}{dt} &= \lambda_{1,3}^{(7)}S_{71}(t) - \lambda_{2,3}^{(7)}S_{72}(t) - (\mu_{3,2}^{(7)} + \mu_{3,1}^{(7)})S_{73}(t) \end{aligned} \right\}。 \quad (6)$$

根据式(4)–(6)在 Matlab 中通过求解微分方程数值解的 ode45 函数求解可得元件 S_4 、 S_6 、 S_7 在各个状态下的概率随时间的变化,如图 5–7 所示。

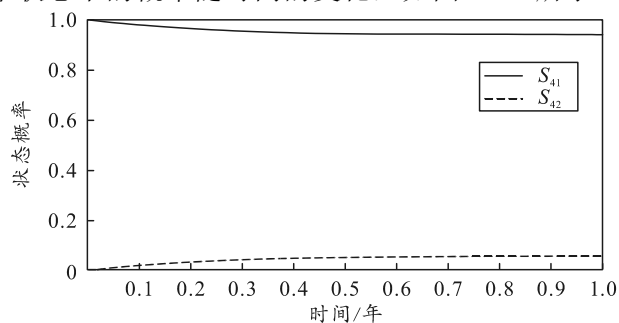


图 5 视距射频前端 S_4 状态概率

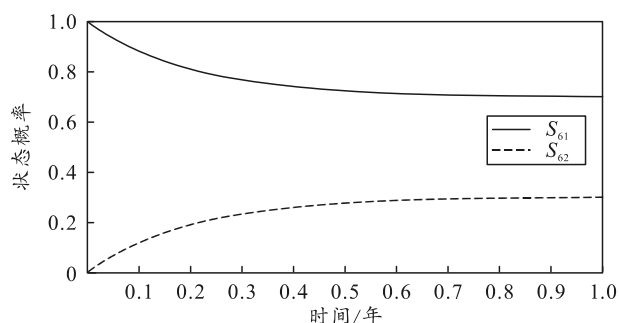


图 6 视距收发组合 S_6 状态概率

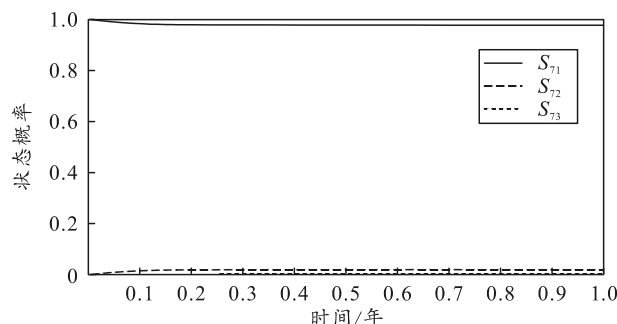


图 7 UHF 波段全向天线 S_7 状态概率

根据某型无人机实际使用需求,机载视距链路系统中 UHF 波段全向天线仅有状态 3 为不可接受态,将其定义为一个吸收态,即状态 0,且所有能使部件由此状态返回可接受状态集的维修都被禁止,可得可靠度函数为 $R(t)=1-p_0(t)$ 。元件 S_4 、 S_6 、 S_7 可靠度函数的微分方程组分别为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_{41}(t)}{dt} &= -\lambda_{1,2}^{(4)}S_{41}(t) \\ \frac{dS_{40}(t)}{dt} &= \lambda_{1,2}^{(4)}S_{41}(t) \end{aligned} \right\}; \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_{61}(t)}{dt} &= -\lambda_{1,2}^{(6)}S_{61}(t) \\ \frac{dS_{60}(t)}{dt} &= \lambda_{1,2}^{(6)}S_{61}(t) \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_{71}(t)}{dt} &= -(\lambda_{1,2}^{(7)} + \lambda_{1,3}^{(7)})S_{71}(t) + \mu_{2,1}^{(7)}S_{72}(t) \\ \frac{dS_{72}(t)}{dt} &= \lambda_{1,2}^{(7)}S_{71}(t) - (\lambda_{2,3}^{(7)} + \mu_{2,1}^{(7)})S_{72}(t) \\ \frac{dS_{70}(t)}{dt} &= \lambda_{1,3}^{(7)}S_{71}(t) + \lambda_{2,3}^{(7)}S_{72}(t) \end{aligned} \right\}。 \quad (9)$$

在初始条件 $S_{41}(0)=1, S_{61}(0)=1, S_{71}(0)=1$ 下求解式(5)–(7),可得可靠度函数 $R_S(t)=1-S_{i0}(t)$,此函数如图 8 所示。

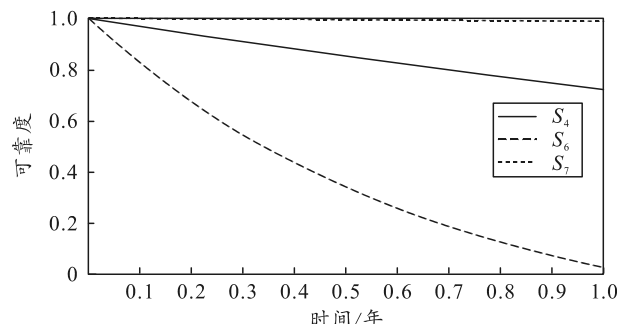


图 8 机载视距链路系统可靠度函数

从图 8 可以看出:随着时间的增长,系统的可靠度值逐渐降低,这符合实际情况中随着时间的增长,系统的寿命值会越来越低;因此,其满足性能

需求水平的可靠度会逐渐降低。且视距收发组合 S_6 的可靠度始终低于视距射频前端 S_4 和 UHF 波段全向天线 S_7 。在针对机载视距链路系统制定预防性维修策略时，应以视距收发组合的可靠性为基础。

3.2 机载视距链路系统预防性维修方案

根据可靠度函数，初步制定机载视距链路系统达到一定可靠度指标的预防性维修方案：

1) 满足可靠度不低于 0.9 的预防性维修方案。

现有技术状态下，若保证机载视距链路系统可靠度 $R_S \geq 0.9$ ，每间隔 25 个自然日需对视距收发组合 S_6 进行检修和维护，结合现行周期性维护保养工作，可将此项工作加入到每停放 28~32 d 周期性检查工作中；每间隔 153 个自然日需对视距射频前端 S_4 进行检修和维护，现行周期性维护保养工作中暂无可结合时间点。经过预防性维修后，可靠度达到 0.9 的机载卫通链路系统可靠性曲线如图 9 所示。

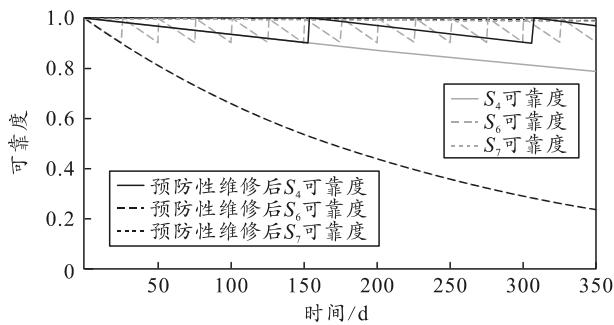


图 9 经过预防性维修可靠度达到 0.9 的机载视距链路系统可靠性曲线

2) 满足可靠度不低于 0.8 的预防性维修方案。

现有技术状态下，若保证机载视距链路系统可靠度 $R_S \geq 0.8$ ，每间隔 54 个自然日需对视距收发组合 S_6 进行检修和维护，每间隔 325 个自然日需对视距射频前端 S_4 进行检修和维护，现行周期性维护保养工作中暂无可结合时间点。经过预防性维修后，可靠度达到 0.8 的机载卫通链路系统可靠性曲线如图 10 所示。

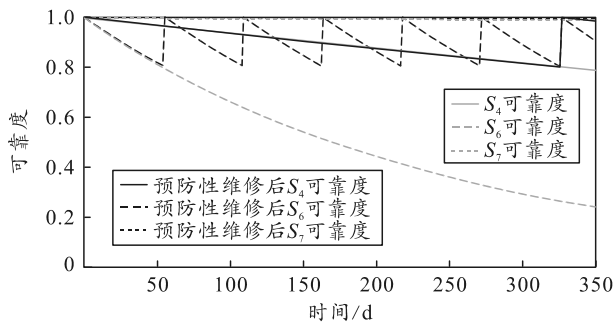


图 10 经过预防性维修可靠度达到 0.8 的机载视距链路系统可靠性曲线

3) 满足可靠度不低于 0.6 的预防性维修方案。

现有技术状态下，若保证机载视距链路系统可靠度 $R_S \geq 0.6$ ，每间隔 124 个自然日需对视距收发组合 S_6 进行检修和维护，现行周期性维护保养工作中暂无可结合时间点。经过预防性维修后，可靠度达到 0.6 的机载卫通链路系统可靠性曲线如图 11 所示。

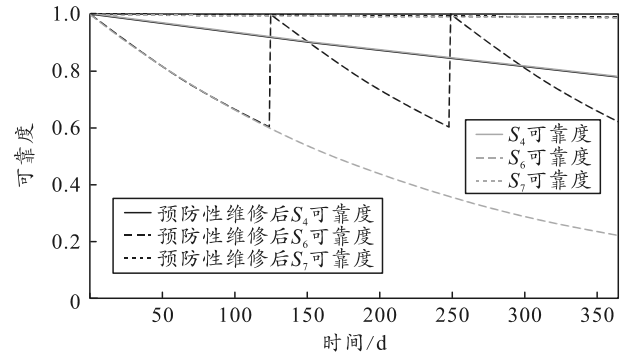


图 11 经过预防性维修可靠度达到 0.6 的机载视距链路系统可靠性曲线

从上述预防性维修方案及计算结果来看：现有技术状态下，通过预防性维修方法提升机载视距链路系统可靠性是有效、可行的。按当前无人机飞行保障模式和训练强度测算，原有的周期性工作并没有对机载视距链路系统进行检修和维护。考虑到机载视距链路系统仅在起飞着陆阶段使用，并且与机载卫通链路系统功能重叠，因此建议每间隔 124 个自然日需对视距收发组合 S_6 进行检修和维护，可使机载视距链路系统可靠度高于 0.6，满足使用要求。

4 结束语

笔者基于元件的失效转移和修复转移矩阵，通过柯尔莫哥洛夫微分方程计算得到元件在各个状态下的概率，然后根据系统的结构函数及 MMDD 模型计算系统的状态概率和可靠度，用于对多状态链路系统的定量分析，针对某型无人机现行的预防性维修措施，其中包括周期性维护保养工作以及现有的维修检测设备，提出一些无人机在使用阶段存在的问题。根据对无人机视距链路系统的定量分析方法，计算出不同可靠度条件下的无人机链路系统维修策略，通过 Matlab 编程实现了该过程的求解，并最终得到了优化后的维修策略。

参考文献：

[1] 孙卓, 胡勇. 基于动态故障树的航空装备系统可靠性评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2022(5): 141-146, 152.

- [2] 吴迪, 黄敬. 基于可靠性框图的舰船电力系统可靠性建模[J]. 船电技术, 2019(S1): 28-31.
- [3] 陈子文, 赵峰, 陈小强, 等. 基于 BDD 考虑共因失效的接触网系统可靠性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019(2): 171-174.
- [4] 李焕, 徐立立, 杜胜杰, 等. 基于边值多值决策图的多状态系统可靠性评估方法[J]. 新型工业化, 2021(3): 234-236, 239.
- [5] 贡冰洲. SDH 数字微波通信技术的特点及其应用[J]. 信息技术与信息化, 2022(10): 164-167.
- [6] 陈志伟, 王靖, 谷长超, 等. 考虑动态重构的装备体系可用性弹性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2021(8): 2347-2354.
- [7] LI X Y, HUANG H Z, LI Y F, et al. Reliability assessment of multi-state phased mission system with non-repairable multi-state components[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 61: 181-199.
- [8] REN Y, ZENG C, FAN D, et al. Multi-state reliability assessment method based on the MDD-GO model[J]. IEEE Access, 2018, 6: 5151-5161.
- [9] 方敏, 周书粤, 陈永梅, 等. 故障树结构调整的多值决策图变量排序方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(6): 20-25.
- [10] 孙超勇, 张永进. 基于 MDD 的高炉炼铁多态系统可靠性分析[J]. 机械工程与自动化, 2019(4): 4-6.
- [11] 齐继阳, 刘菲菲. 滚焊机多态焊接系统重要度分析[J]. 机械设计与制造, 2019(1): 264-271.
- [12] 加鹤萍. 考虑运行备用的多状态电力系统可靠性分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [13] 朱志伟, 史慧革, 田慧敏, 等. 基于多态多值决策图的有载分接开关可靠性评估[J]. 轻工学报, 2021(4): 118-124.

(上接第 96 页)

1) 与传统的滤波方法相比, LSTM-KF 减小了对动力学模型的依赖, 与时间序列法相比, 组合模型对实时数据的适应能力更强。

2) LSTM-KF 较 LSTM 估计误差更小, 可以更好地在保证数据准确度的基础上尽可能减小噪声所带来的影响, 比单一的 LSTM 模型降噪效果更好, 为 QAR 数据降噪提供了新思路。

参考文献:

- [1] 刘莉雯. QAR 数据在中国民航中的应用[J]. 信息与电脑(理论版), 2018(13): 153-154.
- [2] 郑磊, 池宏, 邵雪焱. 基于 QAR 数据的飞行操作模式及其风险分析[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 109-118.
- [3] 程震. 多维时间序列聚类方法及其应用研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
- [4] 俞力玲. 中国民航飞行品质监控回顾与展望[J]. 中国民用航空, 2012(8): 51-53.
- [5] 欧阳舒歆, 王溶钧, 荣垂田, 等. 基于改进 LSTM 的多维 QAR 数据异常检测[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(5): 49-60.
- [6] 钱宇, 王立新. 基于自适应无迹卡尔曼滤波 QAR 数据降噪研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(2): 258-262, 405.
- [7] DEO A V, SILVESTRE F, MORALES M. Flight performance monitoring with optimal filtering applications[J]. The Aeronautical Journal, 2020, 124(1272): 170-188.
- [8] 张鹏, 杨涛, 刘亚楠, 等. 基于 CNN-LSTM 的 QAR 数据特征提取与预测[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(10): 2958-2961.
- [9] 张鹏, 刘贲跃, 段照斌. 改进蝴蝶优化算法在 QAR 数据重构中的应用[J]. 中国民航大学学报, 2021, 39(5): 22-27.
- [10] 王红, 卮秀霞, 王宏伟. QAR 数据仓库中的数据预处理方法研究[C]//2008 年国际应用统计学术研讨会. 烟台: 中国现场统计研究会, 2008: 1-3.
- [11] 王宝安, 张涵璐, 邓富金. 基于拉依达准则的 MMC 子模块开路故障定位[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 116-123.
- [12] 张振慧, 张正江, 胡桂廷, 等. 基于拉依达准则与线性拟合的改进型无迹卡尔曼滤波粗大误差补偿算法[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(11): 153-156, 162.
- [13] 刘建伟, 宋志妍. 循环神经网络研究综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 2753-2768.
- [14] 李磊, 高嵩, 陈超波, 等. 粒子滤波综述[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6): 6-12.