

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0520

基于改进 FPPN 的飞控系统故障传播路径分析方法

张晓瑜^{1,*}, 张凤琪¹, 郭润夏¹, 吴军²

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 针对飞控系统多冗余、多闭环的结构特性, 结合有向图模型和模糊 Petri 网 (FPN) 模型, 构建飞控系统故障传播模糊概率 Petri 网 (FPPN) 模型, 以解决飞控系统特定结构下的故障传播路径问题。改进的 FPPN 模型包含飞控系统有向图模型、故障传播特性量化计算模型和故障传播 FPPN 模型 3 个部分。采用面向对象技术分析飞控系统的功能行为和物理结构, 综合复杂网络理论, 构建系统故障传播有向图模型; 引入 Floyd 算法, 开展系统耦合关联分析, 基于节点的度和边介数定义系统故障传播特性; 在有向图模型的基础上, 提出相应的结构映射规则, 构建飞控系统故障传播 FPPN 模型, 融合改进后的参数量化方法, 设定 2 种推理算法对系统多冗余、闭环结构特性下的故障传播路径进行有效分析。通过数值分析与实验验证, 获取飞控系统典型故障传播路径及路径上相关节点的状态值, 验证所提方法的有效性。

关键词: 飞控系统; 复杂网络理论; 有向图模型; 模糊概率 Petri 网模型; 故障传播路径分析

中图分类号: V249

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2024)06-1829-13

随着航空业的不断发展, 飞机系统集成化不断提升。飞控系统作为典型的复杂机电系统^[1], 内部结构通常呈现多闭环、多冗余等复杂特征, 其交错复杂的控制回路构成了复杂网络^[2]。民机的安全评估及故障的排查维修对保障飞机的安全运行具有重要意义。通过研究复杂系统的故障传播机理, 有助于故障排除, 提高维修效率, 提升系统可靠性。在复杂系统中, 由于系统本身的物理结构和系统功能的相互作用, 系统内部组件之间存在直接或间接的耦合关联, 进而为故障的传播提供了可能。根据故障的影响范围, 可以分为局部故障传播和全局故障传播, 全局故障传播会给系统安全运行造成严重后果^[3]。因此, 故障传播分析对保障系统安全具有重要意义, 促使人们对故障传播过程进行了大量研究。为研究复杂网络中故障传播问题, 已经建立了 2 种类型的仿真模型, 即复

杂网络模型和概率模型。

复杂网络模型基于图论定性或定量地表征整个网络的拓扑性质, 能较好地用于建模和描述复杂系统中故障传播的本质^[4]。张宏和吕悦晶^[5]采用复杂网络理论研究车载自组织网络的脆弱性问题; Xu 等^[6]基于小世界网络理论提出了生态产业水网的故障传播特性, 利用节点的度和介数中心性来识别水网的高负荷节点; 文献 [7-9] 提出了节点脆弱性分析模型, 用于识别系统的关键节点和薄弱环节, 同时建立了级联故障传播模型来评估高风险故障传播路径, 并进一步结合 Dijkstra、Floyd、蚁群算法等路径搜索算法对网络中的故障传播进行了分析。以上研究可以看出, 应用复杂网络理论连接具有不同特征节点和边来表示整个系统, 有助于分析系统故障传播特性, 具有实用性。然而, 这些方法在故障传播问题的分析上, 对网络拓扑特性过度关

收稿日期: 2022-06-21; 录用日期: 2022-09-30; 网络出版时间: 2022-10-14 15:10

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221014.1035.001

基金项目: 国家自然科学基金 (62173331, 52005500); 天津市教委科研计划 (2018KJ238, 2020KJ013)

*通信作者. E-mail: xy_zhang@cauc.edu.cn

引用格式: 张晓瑜, 张凤琪, 郭润夏, 等. 基于改进 FPPN 的飞控系统故障传播路径分析方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50 (6): 1829-1841.
ZHANG X Y, ZHANG F Q, GUO R X, et al. A fault propagation path analysis method for flight control system based on improved FPPN [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50 (6): 1829-1841 (in Chinese).

注,从而忽略了实际网络中组件和链路的可靠性特征。

概率模型通常用来描述一个或多个随机变量间不确定性概率关系的数学模型,且不依赖于网络的拓扑特性。Mi等^[10]将动态故障树(dynamic fault tree, DFT)映射为等效贝叶斯网络(Bayesian network, BN),计算相关的可靠性参数和指标;此外,Chen等^[11]基于系统因果结构的BN模型,提出了用核密度估计(kernel density estimation, KDE)方法来估计概率密度函数,以代替传统BN的参数学习;Amrani等^[12]概述了与可靠性建模和评估相关的定量和定性方法,并评估了这些方法对机电系统可靠性分析的意义;此外,混合故障树^[13]、蒙特卡罗^[14]、马尔可夫链^[15]等概率模型也被用于故障传播的分析。

虽然上述方法从多个方面对故障传播进行了研究,但仍存在一些问题。复杂网络理论多用来考虑网络结构的拓扑特性,忽视了系统组件及链路的可靠性特征。现有的概率模型主要集中研究故障数据、故障模式等,对专业知识和历史经验要求较高,忽视了系统内部组件间相互作用关系的影响。因此,将复杂网络模型与概率模型融合用于故障传播机理的分析是当前热门的方法^[16-17]。其中,Petri网作为一种具有良好可视化建模和描述系统并发、异步事件过程的工具,应用于多种领域,并形成了许多扩展形式。Liu等^[18]提出了一种灰色推理Petri网模型,改进了传统模糊Petri网(fuzzy Petri net, FPN)参数量化方法,用于大群体环境下的知识表示和推理;Shi等^[19]提出了一种基于模糊证据推理和FPN的失效模式和影响分析(failure mode and effects analysis, FMEA)方法,以得到更可靠的失效模式风险排序结果;Wang等^[20]定义了一个协同效应合并的FPN,提出了相应的产生式规则、过渡触发式规则和推理算法,进行设备故障风险评估;Petri网与模糊理论、概率理论相结合,以及基于矩阵的推理方式和多样性的参数量化方式,大大提升了Petri网的准确性与实用性,可用于复杂系统的故障传播分析建模^[21-24]。

综合考虑飞控系统自身的结构特性及传统FPN的参数确定依据不充分等问题,本文构建一种改进的模糊概率Petri网(fuzzy probability Petri net, FPPN)模型,用于飞控系统故障传播路径的分析。与现有的故障传播路径建模方法不同,首先,基于有向图模型与复杂网络理论,分析系统网络结构特性,定义系统的故障传播特性。其次,针对系统闭环、多冗余的结构特性,提出相应模糊逻辑映射规则,构建系统故障传播FPPN模型。最后,针对构建的

FPPN模型,提出2种推理算法,用于分析系统闭环与多冗余结构下的故障传播路径序列及路径上相关节点的状态值,并给出相应的约束条件。通过数值实验对本文方法进行实例验证,证明方法的准确性。

1 故障传播有向图模型

1.1 基于有向图分析的飞控系统结构模型

飞控系统作为复杂机电系统的代表,具有闭环、多冗余的特性。在实际操作过程中,飞行员通过侧杆、方向舵脚蹬和手柄向多套飞控计算机输入操纵指令,经计算机计算后转变为控制信号传入液压伺服作动机构,进一步通过机械装置控制舵面偏转来实现飞机的俯仰、横滚或偏航,每个舵面通过传感器监视偏转角度,并将检测数据反馈到相应的计算机,最终每个计算机根据反馈的数据调整输出命令来达到最终稳态。飞机电传操纵系统整体原理如图1所示。

由于A320飞控系统复杂的结构和工作原理,为降低子系统间的耦合,将A320飞控系统分割为方向舵子系统、升降舵子系统、可配平水平安定面子系统、副翼子系统、扰流板子系统等子系统,分别分析每个子系统内组件间的耦合关系,并建立故障传播关系。A320飞控系统的组织架构^[25]如图2所示。

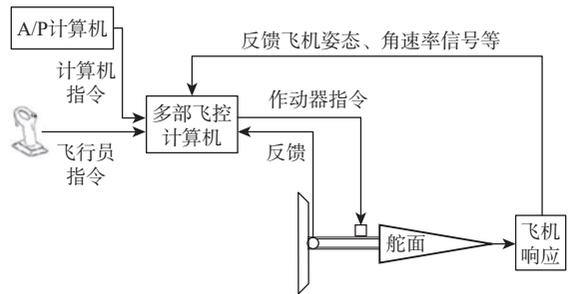


图1 A320电传操纵系统原理

Fig. 1 Fly-by-wire control system principle of A320

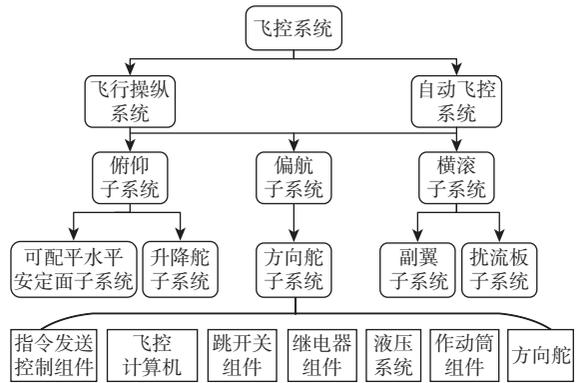


图2 A320飞控系统架构^[25]

Fig. 2 Flight control system architecture of A320^[25]

本文以方向舵子系统为例, 构建故障传播有向图模型(见图 3), 用于描述整个子系统组件间的耦合关系及表征整个网络的拓扑结构特性, 并对其故障传播结构进行学习。以飞机上的组件为单位进行建模, 可以反映一定精度范围内真实飞机的系统结构, 该建模方法可以保证模型较高的可靠性和稳定性。故障传播有向图将子系统各个组件抽象为图中的节点, 将组件之间的因果关系抽象为图中连接 2 个节点的有向边, 从而将子系统的传播关系建模为一个故障传播有向图 $G = \{P, E\}$ 。其中, $P = \{p_1, \dots, p_i, \dots, p_n\}$ 为节点的有限集合, n 为节点的总数; $E = \{e_{12}, \dots, e_{ij}\}$ 为具有因果关系节点的边集合, e_{ij} 为节点 p_i 到节点 p_j 的有向边。

当系统内各个组件无故障时, 方向舵功能可以正常实现, 方向舵正常作动, 当其中一个组件出现故障后, 则导致方向舵功能失效或部分失效, 表现为方向舵的非正常作动。模型中各节点对应组件标号及名称如表 1 所示。

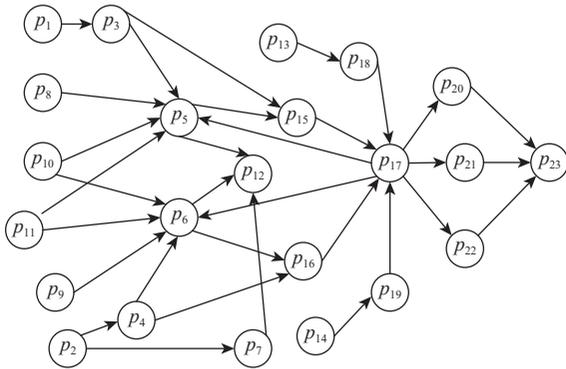


图 3 方向舵子系统故障传播有向图

Fig. 3 Directed graph of fault propagation of rudder system

1.2 基于有向图的故障传播特性分析

通过有向图模型, 可得系统的邻接矩阵和可达矩阵, 邻接矩阵可表示图中各节点间的直接耦合关系。由于邻接矩阵只能表示系统内部组件之间的直接耦合关系, 而单个组件的失效可以通过节点间的故障传播对整个系统造成影响。因此, 分析某组件故障对整个系统的影响, 需要分析组件间的间接耦合关系。本文引入 Floyd 算法计算各组件之间的故障传播路径, 其基本过程为: 直接输入邻接矩阵, 递归更新 n 次, 每次更新引入下一层节点, 直到引入所有节点, 得到系统的可达矩阵, 进而定量描述系统的拓扑结构特性。

复杂网络的拓扑结构决定了故障传播的重要因素。其中, 对于节点的拓扑特性, 主要是节点的聚类系数, 该属性可以影响故障传播的范围。事实上, 节点的聚类属性主要取决于节点的度, 包括节点的入度和出度, 一个节点的度越高, 对应传播路

表 1 系统网络结构中各节点对应的部件编号

Table 1 Part number corresponding to each node in system network structure

节点 p_i	名称
1	直流汇流条 1
2	直流汇流条 2
3	飞行增稳计算机 1 的供电跳开关
4	飞行增稳计算机 2 的供电跳开关
5	飞行增稳计算机 1
6	飞行增稳计算机 2
7	供电跳开关
8	飞行增稳计算机 1 面板控制按钮
9	飞行增稳计算机 2 面板控制按钮
10	方向舵配平复位按钮
11	方向舵配平按钮
12	方向舵配平指示器
13	交流汇流条 1
14	交流汇流条 2
15	方向舵配平继电器 1
16	方向舵配平继电器 2
17	方向舵配平作动筒
18	偏航阻尼作动筒 1 供电跳开关
19	偏航阻尼作动筒 2 供电跳开关
20	方向舵伺服控制器 G
21	方向舵伺服控制器 B
22	方向舵伺服控制器 Y
23	方向舵舵面

径更多, 传播范围更广。根据式 (1) 对节点的度做归一化计算, 可得节点传播特性 s_i , 即

$$s_i = d_i / \sum_{i=1}^n d_i \tag{1}$$

式中: d_i 为节点 p_i 的度; n 为网络中节点的总数; $0 \leq s_i \leq 1$ 。

复杂网络理论中, 每个节点都以其他节点无法替代的方式促进故障传播。然而, 边作为故障传播路径也是关键的元素。给定的网络中, 每一步故障以信息、能量等形式在每对节点之间交换, 沿着连接节点的最短路径传输。边的载荷值越大, 通过该边的节点越容易发生失效。因此, 采用边介数来表征边的拓扑结构特性, 边介数定义为通过其最短路径的个数。同理, 根据式 (2) 将边 e_{ij} 的边介数做归一化计算, 可得边传播特性 S_{ij} , 即

$$S_{ij} = b_{ij} / \sum b_{ij} \tag{2}$$

式中: b_{ij} 为边 e_{ij} 的边介数; $\sum b_{ij}$ 表示所有边介数的总和。

有向图模型能够描述系统基本的传播结构, 分

析组件间的耦合关系,但无法体现飞控系统闭环、冗余的结构特性对故障传播的影响。为更好地刻画系统的故障传播结构,引入FPPN模型,针对系统闭环、冗余的结构特性设定相应的模型映射规则,构建系统故障传播的FPPN模型^[26],进而分析系统内的故障传播行为表达。有向图模型与FPPN模型之间的转换关系为:传统有向图模型的图结构模型、节点集合和有向边集3部分分别对应FPPN模型的网络结构模型、库所集和有向弧集(变迁集)3部分。

2 飞控系统故障传播 FPPN 模型

2.1 基于 FPPN 的故障传播行为规则表达

改进后的FPPN模型定义为一个9元组 $\Sigma = (P, T, F, I, O, \alpha, \Gamma, M, X)$ 。其中, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为有限库所/节点(下文统一表述为节点)集合,每个节点 p_i 对应一个系统组件; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 为有限变迁集合,每个变迁 t_j 对应一种功能实现的过程; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 为有向弧集合,即变迁的输入弧和输出弧; I 为输入矩阵,表示节点到变迁的输入弧权值映射矩阵,对应矩阵内元素为 w ; O 为输出矩阵,表示变迁到节点的输出弧确信度值映射矩阵,对应矩阵内元素 μ ; α 为节点状态值的映射关联函数,是介于0~1之间的实数; Γ 为变迁输出弧的阈值映射矩阵,对应矩阵内元素值为 λ ; M 为节点状态向量; X 为系统整体的状态矩阵。

FPPN模型的建立基于一系列的模糊逻辑规则,基本形式为

$$R: \text{IF } p_i \text{ THEN } p_j \quad (3)$$

式中: p_i 和 p_j 为节点,且 p_j 是 p_i 对应的输出节点。

FPPN模型的基本映射规则如图4所示。

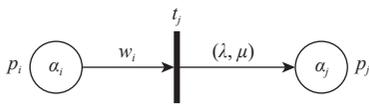


图4 FPPN模型的基本映射规则

Fig. 4 Basic mapping rule of FPPN model

在FPPN模型中,基于推理模式下的变迁发生规则,若满足式(4),则变迁 t_j 可以被激活:

$$\alpha(p_i)w_i \geq \lambda(t_j) \quad (4)$$

变迁 t_j 被激活后,输入节点状态值 $\alpha(p_i)$ 不变,输出节点状态值 $\alpha(p_j)$ 根据式(5)更新,即

$$\alpha(p_j) = \alpha(p_i)w_i\mu \quad (5)$$

基于定义的FPPN模型的基本映射规则,结合飞控系统存在的交互、冗余和反馈关系,构建了输

入组件冗余、输入功能冗余、输出冗余、闭环结构4类FPPN改进结构映射规则,如图5所示。

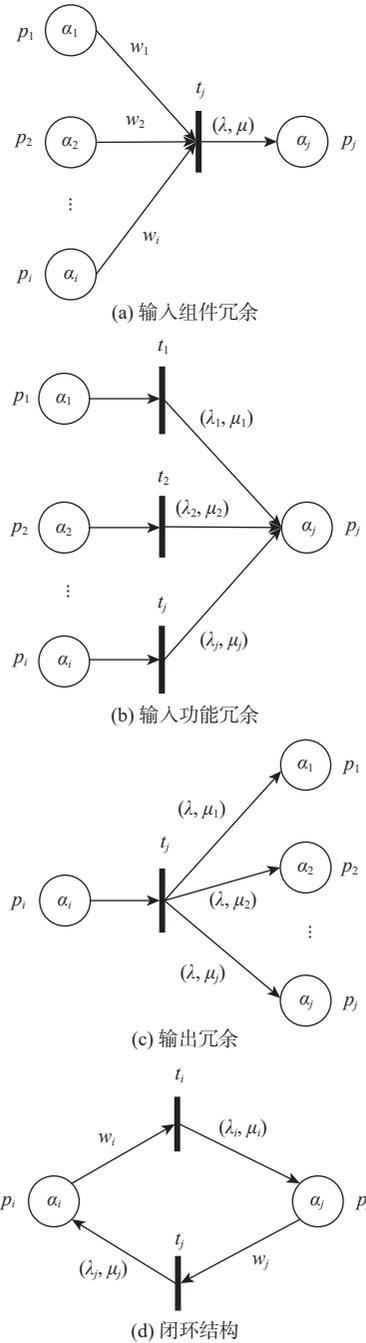


图5 FPPN改进结构映射规则

Fig. 5 Mapping rules of improved FPPN structure

1) 类型1。输入组件冗余映射规则(见图5(a)),表示当存在多个备用组件可实现同一功能,即多个输入节点可触发同一变迁,对应模糊规则的“与”规则,用于描述系统的多冗余结构。设定输入节点权值取均值,且所有输入节点权值和为1,输出节点状态值 $\alpha(p_j)$ 定义如下:

$$\alpha(p_j) = \left(\sum_{k=1}^i \alpha(p_k)w_k \right) \mu \quad (6)$$

2) 类型2。输入功能冗余映射规则(见图5(b)),

表示一个组件受多个组件不同功能的控制, 对应模糊规则的“或”规则。设定输入节点权值均为 1, 输出节点状态值 $\alpha(p_j)$ 定义如下:

$$\alpha(p_j) = \max_{1 \leq k \leq i} \{\alpha(p_k) \mu_k\} \quad (7)$$

3) 类型 3。输出冗余映射规则(见图 5(c)), 表示某个组件的某个功能对不同组件的控制。设定输入节点权值均为 1, 输出节点状态值 $\alpha(p_j)$ 定义如式 (5) 所示。

4) 类型 4。闭环结构映射规则(见图 5(d)), 表示系统内组件的闭环控制。设定输入节点权值均

为 1, 输出节点状态值 $\alpha(p_j)$ 定义如式 (5) 所示。

基于本节定义的 FPPN 改进结构映射规则, 将 1.1 节中方向舵子系统故障传播有向图模型更新为可做定量推理计算的方向舵子系统故障传播 FPPN 模型, 如图 6 所示。基于 4 类改进结构映射规则, 故障传播关系转换为每个节点状态值定量的计算更新, 从而量化表示系统内组件间的控制传播关系。通过该模型可进一步求解系统故障传播中高扩散强度的故障传播路径及其关键节点的状态值, 形成飞控系统闭环、多冗余结构下的故障传播推理模型。

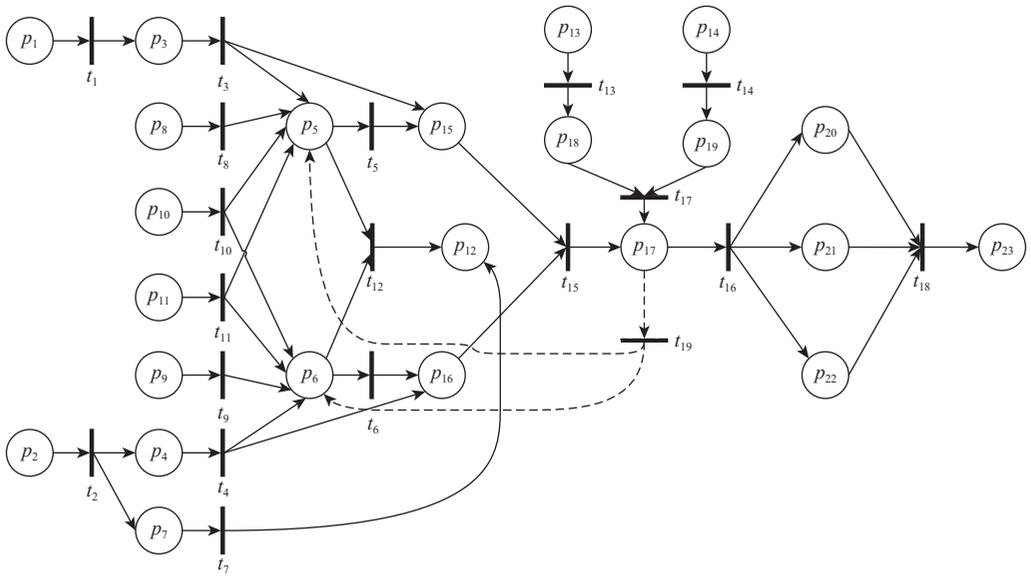


图 6 方向舵子系统故障传播 FPPN 模型

Fig. 6 FPPN model for fault propagation of rudder system

2.2 FPPN 故障传播推理模型

2.2.1 改进模型参数量化方法

现有方法在量化 FPN 模型的参数时, 仅依靠历史积累的故障数据及专家经验知识进行量化, 忽略了系统内部元素之间的耦合关系对故障传播关系的影响。改进后的 FPPN 模型, 先基于复杂网络理论与有向图模型, 对系统的拓扑结构特性进行分析, 定义了故障传播特性, 再与历史故障数据相结合共同量化模型参数, 提高系统故障传播计算的可靠性^[27]。

节点的失效特性采用组件的故障率进行量化。故障率为反映组件功能完整性的直观指标。因此, 组件的失效特性是研究故障传播的重要因素。组件的故障率通常取决于时间, 其随组件的生命周期而变化。定义节点的失效分布函数 h_i 服从指数分布函数, 如下:

$$h_i = 1 - e^{-\varepsilon_i t} \quad (8)$$

式中: t 为时间变量; ε_i 为组件的故障率系数。

在改进的 FPPN 模型中, 以 1.2 节定义的节点传播特性 s_i 与失效特性 h_i 共同表征节点的初始失效状态值 α_i , 根据式 (9) 量化可得 FPPN 模型中节点的初始失效状态值 α_i 如下:

$$\alpha_i = e^{s_i} h_i \quad (9)$$

式中: e^{s_i} 为节点传播特性对故障传播过程的放大效应系数。

边的失效特性基于节点间因果关系作用的结果, 该关系会导致相邻组件之间的损害。本文根据制造商和运营商的数据来统计边的失效特性 H_{ij} , 如下:

$$H_{ij} = \frac{f(ij)}{f(i)} \quad (10)$$

式中: $f(i)$ 为节点 p_i 出现故障的总次数; $f(ij)$ 为节点 p_i 出现故障时, 节点 p_j 受 p_i 影响而发生不正常动作的频率; $f(ij) \leq f(i)$, $0 \leq H_{ij} \leq 1$ 。

在改进的 FPPN 模型中, 结合 1.2 节定义的边传播特性 S_{ij} 与边的失效特性 H_{ij} , 共同量化得到

FPPN 模型中的输出弧的确信度值 μ_{ij} , 如下:

$$\mu_{ij} = e^{S^v} H_{ij} \quad (11)$$

在 FPPN 模型中, 故障传播路径定义为: 当网络中某节点出现故障时, 将按照一定的概率沿着有向边传播, 直到逻辑上最后一个节点。路径越长, 传播能力越弱, 随着传播步长的增加, 故障传播强度会逐级减小。此时, 根据机电系统可靠性相关手册设定变迁的传播概率阈值 $\lambda = 10^{-8}$, 即当传播强度小于阈值时, 节点是安全的, 故障将停止蔓延。当结构中出现闭环连接的复杂情况时, 可能会出现故障不断循环传播的情况。实际上, 很多机电系统都有闭环结构, 为解决闭环故障传播路径问题, 需要重新设定阈值, 用于判定此循环是否会持续发生, 该阈值称为限环阈值, 设定限环阈值 $\lambda = 10^{-6}$ 。

2.2.2 故障传播路径推理算法

本文 FPPN 模型采用 2 种推理算法, 分别对系统多余结构与闭环结构下故障传播路径进行分析。

1) 算法 1。在进行多余结构下的故障传播推理时, 不考虑闭环结构, 即不考虑图 6 中的反馈变迁 t_{19} 的影响, 该算法是一种并行推理算法, 通过式 (12)~式 (18) 的矩阵计算来执行推理过程, 可以有效处理模糊问题。

输入矩阵 $S^{(k)}$ 状态更新计算如下:

$$S^{(k)} = M_{k-1} \times I^T \quad (12)$$

允许矩阵 $H^{(k)}$ 状态更新计算如下:

$$H^{(k)} = \lambda \xi S^{(k)} \quad (13)$$

真值矩阵 $J^{(k)}$ 状态更新计算如下:

$$J^{(k)} = S^{(k)} \otimes (O \circ H^{(k)}) \quad (14)$$

状态向量 M_k 更新计算如下:

$$M_k = J^{(k)} \oplus M_{k-1} \quad (15)$$

允许矩阵 $Q^{(k)}$ 状态更新计算如下:

$$Q^{(k)} = (S^{(k)} * (O \circ H^{(k)})) \xi S^{(k)} \quad (16)$$

影响矩阵 Y_k 状态更新计算如下:

$$Y_k = (X_{k-1} \times I^T) \otimes (O \circ Q^{(k)}) \quad (17)$$

状态矩阵 X_k 更新计算如下:

$$X_k = \text{diag}(M_k) \oplus Y_k \quad (18)$$

在实现算法时, 定义如下运算符:

① 运算符 “ \oplus ”。 $A \oplus B = C$, $A, B, C \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 且对应元素分别为 a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} , 满足 $c_{ij} = \max(a_{ij}, b_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

② 运算符 “ \otimes ”。 $A \otimes B = D$, $A \in \mathbf{R}^{m \times p}$, $B \in \mathbf{R}^{p \times n}$, $D \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 其对应元素分别为 a_{ik}, b_{kj}, d_{ij} , 满足 $d_{ij} = \max_{1 \leq k \leq p} (a_{ik} b_{kj})$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

③ 运算符 “ \circ ”。 $A \circ B = C$, $A, B, C \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 其对应元素分别为 a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} , 满足 $c_{ij} = a_{ij} b_{ij}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

④ 运算符 “ ξ ”。 $A \xi B = C$, $A, C \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 其对应元素分别为 a_{ij}, c_{ij} , $B \in \mathbf{R}^{1 \times m}$, 其对应元素为 b_i , 满足 $c_{ij} = \begin{cases} 1 & a_{ij} \leq b_i \\ 0 & a_{ij} > b_i \end{cases}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

⑤ 运算符 “ $*$ ”。 $A * B = C$, $B, C \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 其对应元素分别为 b_{ij}, c_{ij} , $A \in \mathbf{R}^{1 \times m}$, 其对应元素为 a_i , 满足 $c_{ij} = \begin{cases} 0 & a_i b_{ij} = \max_{1 \leq k \leq m} (a_k b_{kj}) \\ \infty & \text{其他} \end{cases}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

基于以上算子, 定义模糊推理算法 1 的逻辑结构框图, 如图 7 所示。

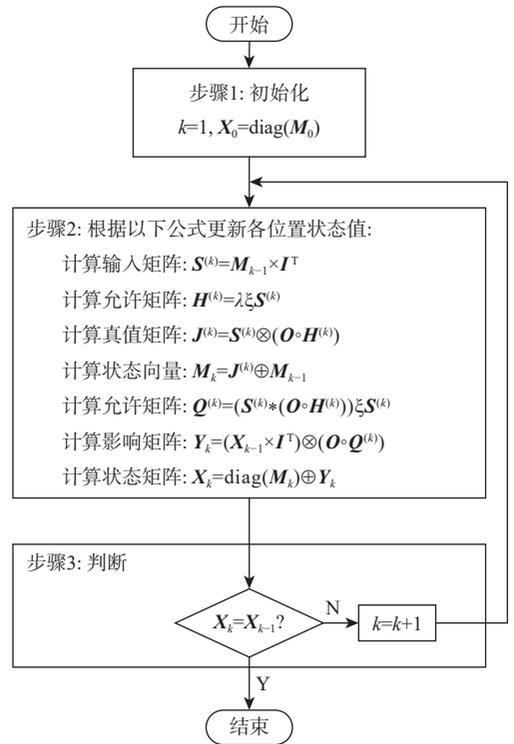


图 7 模糊推理算法 1 流程

Fig. 7 Flow of fuzzy reasoning algorithm 1

该算法通过矩阵运算来执行推理过程, 能有效处理模糊问题。算法的迭代过程主要取决于矩阵和预定义的操作。因此, 该模型可以通过 MATLAB 实现, 具体推理过程如下。

输入: $I, O, \Gamma \in \mathbf{R}^{m \times n}$, $X_0 = \text{diag}(M_0)$ 且 $X_0 \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 是一个对角矩阵。

输出: $X_k \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 其中, 对角线元素表示节点当前状态值, 其他位置元素表示节点间的影响值。

步骤 1 设置迭代次数 $k = 1$ 。

步骤 2 根据推理算法中矩阵和方程之间的关系更新节点状态值, 其中, 影响矩阵 Y_k 反映了第 k 次迭代中不同节点之间的故障影响率。因此, 状态矩阵 X_k 不仅包含状态向量 M_k , 还包含故障节点对其

他节点的影响矩阵 Y_k 。

步骤 3 判断 X_k 和 X_{k-1} 是否相等, 若不相等, 使 $k = k + 1$, 返回步骤 2; 否则, 执行步骤 4。

步骤 4 结束推理, 分析矩阵 X_k 。

2) 算法 2。闭环结构中节点状态值的更新如下:

$$\alpha(p_j) = r \left(\mu_i \frac{\alpha(p_i)w_i}{\lambda(t_j)} \right) \quad (19)$$

式中: 函数 $r(x)$ 定义为

$$r(x) = \begin{cases} x & 0 < x < 1 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

为分析闭环结构下的故障传播问题, 在 FPPN 模型中定义了系统稳定度 $R(\sigma)$ 和变迁发生序列可发生度 $C(\sigma)$ 这 2 个指标, 判断故障是否会持续传播, 如下:

$$R(\sigma) = \min_{1 \leq j \leq n} \left\{ \alpha(p_j), \mu_i \frac{\alpha(p_i)w_i}{\lambda(t_j)} \right\} \quad (21)$$

$$C(\sigma) = \min_{1 \leq j \leq n} \{ \lambda(t_j) \} \quad (22)$$

式中: σ 为闭环结构中变迁发生的序列。若系统中的故障在闭环结构传播过程中有 $R(\sigma) \geq C(\sigma)$, 说明故障在该闭环结构内会持续传播, 该故障将会对系统安全运行造成影响; 否则, 该故障不会对系统造成影响, 系统稳定运行。

3 数值分析与实例验证

3.1 组件故障属性设置

3.1.1 组件失效分布函数

在飞控系统中, 典型的组件包括多种计算机、跳开关、继电器、作动筒等电子组件和机械组件, 飞控系统组件的寿命分布大多服从指数分布或威布尔分布。本文设定组件的初始失效分布函数服从式 (8) 定义的指数分布函数, 在实际问题中, 通过设定不同的故障率系数, 结合式 (8), 可得不同组件的失效分布函数。考虑到简化计算, 后续计算组件故障率系数均以 $\varepsilon = 1 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ 为例, 对应失效分布函数曲线如图 8 所示。

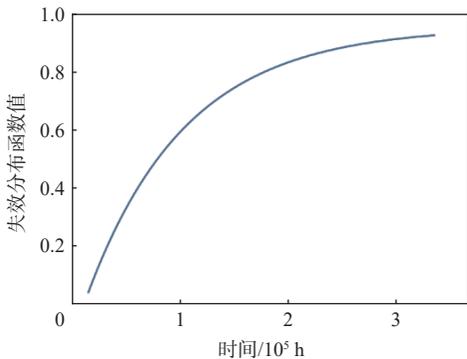


图 8 节点失效分布函数曲线

Fig. 8 Curve of node failure distribution function

3.1.2 组件故障传播属性

通过航空公司的组件可靠性数据采集系统, 统计飞控系统历史运行数据和维护记录, 整理得到方向舵子系统典型的故障事件, 结合式 (10), 利用概率统计分析数据, 计算网络中各有向边的失效特性, 如表 2 所示。

表 2 各边的失效特性

Table 2 Failure characteristics of each edge

e_{ij}	H_{ij}	e_{ij}	H_{ij}
(1,3)	0.008 3	(11,5)	0.007 3
(2,4)	0.008 3	(11,6)	0.007 3
(2,7)	0.009 7	(13,18)	0.008 6
(3,5)	0.008 9	(14,19)	0.008 6
(3,15)	0.009 3	(15,17)	0.007 9
(4,6)	0.008 9	(16,17)	0.007 9
(4,16)	0.009 3	(17,5)	0.006 5
(5,12)	0.007 8	(17,6)	0.006 5
(5,15)	0.008 8	(17,20)	0.009 3
(6,12)	0.007 8	(17,21)	0.009 3
(6,16)	0.008 8	(17,22)	0.009 3
(7,12)	0.010 0	(18,17)	0.008 7
(8,5)	0.007 6	(19,17)	0.008 7
(9,6)	0.007 6	(20,23)	0.009 5
(10,5)	0.006 9	(21,23)	0.009 5
(10,6)	0.006 9	(22,23)	0.009 5

3.2 FPPN 模型参数计算

3.2.1 节点初始状态值

由图 8 可知, 当 $t \geq 2 \times 10^5 \text{ h}$ 时, 失效曲线趋于稳定。因此, 在后续计算中, 取该时刻的失效值作为节点初始状态值。由式 (9) 可得, 节点初始状态值为: $\alpha_i = e^{\varepsilon} (1 - e^{-1 \times 10^{-5} \times 2 \times 10^5})$ 。

3.2.2 确信度值量化分析

结合方向舵子系统故障传播有向图模型, 可得系统组件的邻接矩阵, 基于 Floyd 算法, 通过对迭代过程的分析, 可得所有的故障传播路径及故障传播的可达矩阵, 结合式 (1) 和式 (2), 可计算节点传播特性 s_i 和边传播特性 S_{ij} , 如表 3 和表 4 所示。

根据网络中各节点和边的传播特性, 计算节点和边对应的传播放大效应系数, 如图 9 和图 10 所示。结果表明, 根据所定义的传播特性, 计算网络中节点和边对应的传播放大效应系数, FPPN 模型得到的传播放大效应系数均大于 1, 且随节点和边而变化。例如, 节点 p_{17} 的度数较高, 具有更多的传播路径, 传播范围较广, 其对应的传播放大效应系数为 1.153 5, 相比其他节点较大, 所有节点中传播放大效应系数值最小为 1.016 0; 而边 $e_{15,17}$ 和边 $e_{16,17}$

1 进行迭代计算, 可得到每一次迭代后系统相应的状态矩阵 X_k , k 为模型迭代次数。在实验中, 模型迭代次数为 6 次, 根据最终的状态矩阵, 将所有状态值大于 0 的受影响节点选出, 得到图 12 所示的多节点故障传播路径分析图。图中: p_i (State: 0.966 2) 中的数值为节点状态值, p_j (100%) 中的数值为故障传播贡献率。

根据图 12 实验结果可知, 当设定 p_5 和 p_6 同时作为初始故障节点时, 系统中受影响的节点有 p_{12} 、 p_{15} 、 p_{16} 、 p_{17} 、 p_{20} 、 p_{21} 、 p_{22} 、 p_{23} , 其余节点均不受影响。由于节点 p_{12} 、 p_{15} 、 p_{16} 受初始故障节点 p_5 和 p_6 直接影响, 节点状态值相比其他节点较高, 分别为 0.007 6、0.009 1、0.009 1; 节点 p_{23} 受间接影响且传播路径较远, 因此, 节点状态值最小为

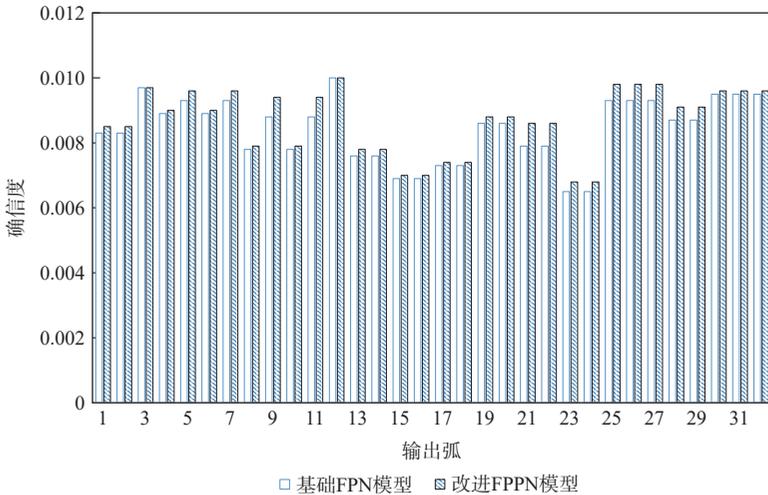


图 11 基础 FPN 模型与改进 FPN 模型确信用度对比

Fig. 11 Comparison of confidence values between basic FPN and improved FPN models

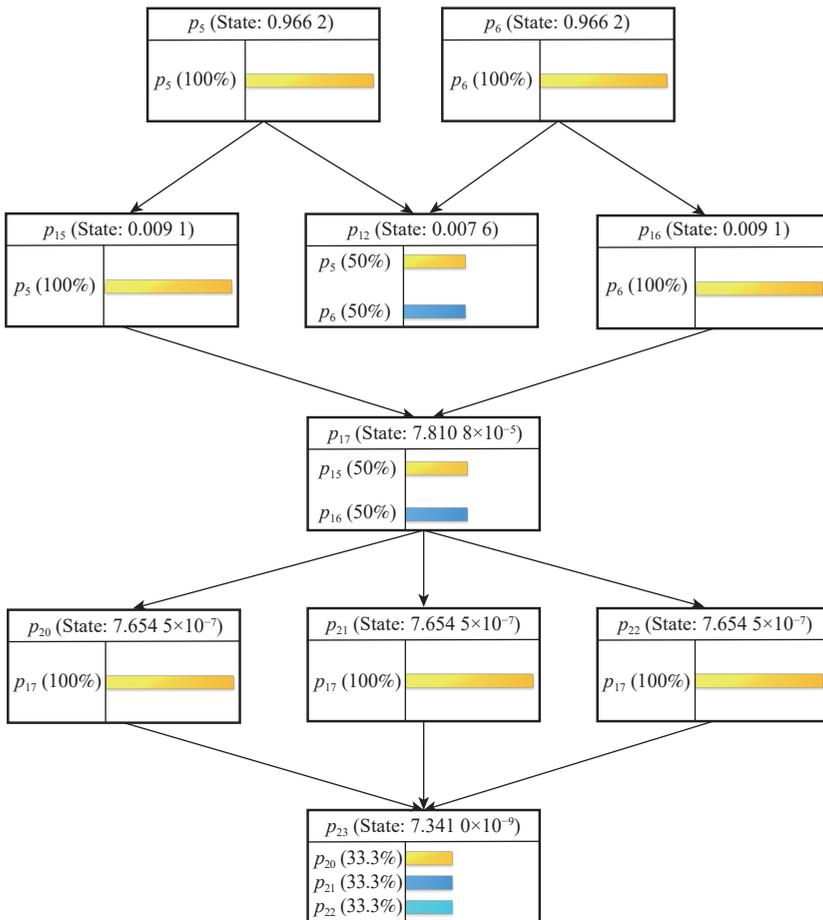


图 12 多节点故障传播路径分析图

Fig. 12 Multi-node fault propagation path analysis diagram

径上节点的状态值如图 15 所示。基于算法 2 计算更新各回路中各节点的状态值, 经过一次迭代后, 闭环 1 中节点 p_{17} 、 p_5 、 p_{15} 的状态值更新为 1, 闭环 2 中的节点 p_{17} 、 p_6 、 p_{16} 的状态值更新为 1, 经多次迭代后, 多闭环系统稳定度 $R(\sigma) = 1$, 且变迁序列可发生度 $C(\sigma) = 10^{-6}$, 因此, $R(\sigma) > C(\sigma)$ 。

通过分析 2 个实验结果可知, 在限环阈值 $\lambda = 10^{-6}$ 的条件下, 基于算法 2 的故障传播推理模型可准确获取受故障节点影响的所有闭环路径, 且与系统实际闭环传播路径一致。通过比较分析系统稳定度和变迁序列可发生度 2 项指标可知, 在系统闭环控制结构中, 任何组件出现故障或不正常作动, 均会导致其所在的闭环结构内的节点受到影响, 且故障会持续传播, 不断积累, 直到闭环结构中所有节点状态值均达到 1, 完全失效, 符合实际传播情况。因此, 增加闭环结构内组件的维护频率, 将会大大提高系统运行的稳定性和安全可靠性的。

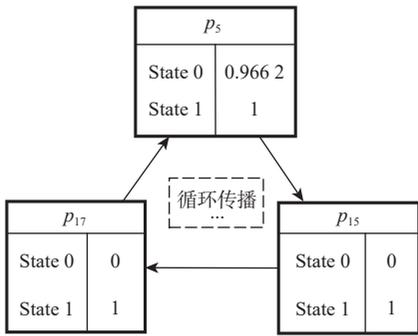


图 14 单闭环结构故障传播分析

Fig. 14 Fault propagation analysis of single closed-loop structure

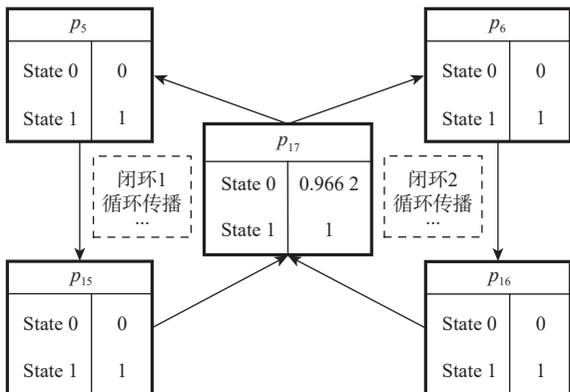


图 15 多闭环结构故障传播分析

Fig. 15 Fault propagation analysis of multiple closed-loop structure

4 结 论

1) 本文构建了一种改进的 FPPN 模型, 用于飞控系统故障传播路径的分析, 能够有效解决飞控系统闭环、冗余结构特性下故障传播的复杂性和随

机性问题。

2) 不同于传统 FPN 模型, 改进 FPPN 模型综合有向图模型、复杂网络理论分析了系统网络结构拓扑特性对故障传播的影响, 改进了模型参数量化的方法, 使得模型中确信度值平均提高 3.15%, 有效解决了网络的拓扑结构特性影响节点和边的传播特性的问题。

3) 设计了冗余结构和闭环结构下的故障传播路径推理算法, 实验结果表明, 本文故障传播路径推理算法可以准确获取受故障节点影响的所有故障传播路径, 且不引入正常节点, 同时能够定量计算受故障影响节点的状态值及节点间故障传播贡献率。

为使本文模型能更好地应用于其他机电系统, 仍需改进模型参数优化算法, 提高系统故障预测的准确性, 为后续系统的维护提供有效的参考指南。

参考文献 (References)

[1] ISERMANN R. Mechatronic systems—Innovative products with embedded control[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(1): 14-29.

[2] 康文文, 李浩敏. 基于模型的飞机系统架构多视图表达方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(11): 3266-3277.

KANG W W, LI H M. Multi-view representation method of aircraft system architecture based on model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(11): 3266-3277(in Chinese).

[3] WANG C N, XING L D, PENG R, et al. Competing failure analysis in phased-mission systems with multiple functional dependence groups[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 164: 24-33.

[4] 管祥民, 赵帅喆. 面向航空网络的机场风险传播网络[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(6): 1342-1351.

GUAN X M, ZHAO S Z. Airport risk propagation network oriented to aviation network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(6): 1342-1351(in Chinese).

[5] 张宏, 吕悦晶. 基于复杂网络的车载自组织网络脆弱性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(8): 1543-1549.

ZHANG H, LYU Y J. Vulnerability of vehicular ad hoc network based on complex network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(8): 1543-1549(in Chinese).

[6] XU Y F, WANG Z, JIANG Y, et al. Small-world network analysis on fault propagation characteristics of water networks in eco-industrial parks[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 149: 343-351.

[7] LIU X F, AN S Q. Failure propagation analysis of aircraft engine systems based on complex network[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Aircraft Airworthiness. Amsterdam: Elsevier, 2014, 80: 506-521.

[8] LUAN L, SHEN G X, ZHANG Y Z, et al. Identification of key components of CNC lathe based on dynamic influence of fault propagation[J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 6187.

[9] 袁健宝, 王政, 徐一凡, 等. 基于复杂网络边负载分配理论的化工

- 过程级联故障风险传播路径[J]. 化工进展, 2019, 38(8): 3525-3533.
- YUAN J B, WANG Z, XU Y F, et al. Risk propagation path of cascading fault in chemical process based on edge load distribution in complex network[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(8): 3525-3533(in Chinese).
- [10] MI J H, LI Y F, YANG Y J, et al. Reliability assessment of complex electromechanical systems under epistemic uncertainty[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 152: 1-15.
- [11] CHEN X L, WANG J, ZHOU J L. Probability density estimation and Bayesian causal analysis based fault detection and root identification[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(43): 14656-14664.
- [12] AMRANI N B, SAINTIS L, SARSRI D, et al. Evaluating the predicted reliability of mechatronic systems: State of the art[EB/OL]. (2016-06-19)[2022-06-19]. <http://arxiv.org/abs/1606.05875>.
- [13] SHARMA R K, SHARMA P. Qualitative and quantitative approaches to analyse reliability of a mechatronic system: A case[J]. Journal of Industrial Engineering International, 2015, 11(2): 253-268.
- [14] KUBO K, JANG S, TAKASHI T, et al. Quasi-Monte Carlo sampling method for simulation-based dynamic probabilistic risk assessment of nuclear power plants[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2022, 59(3): 357-367.
- [15] PICCIALI F, CUOMO S, GIAMPAOLO F, et al. Path prediction in IoT systems through Markov chain algorithm[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 109: 210-217.
- [16] 阎芳, 向晨阳, 董磊, 等. DIMA 架构下飞机全电刹车系统故障传播行为分析与评估[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 324674.
- YAN F, XIANG C Y, DONG L, et al. Analysis and evaluation of fault propagation behavior of aircraft all-electric brake system under DIMA architecture[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 324674(in Chinese).
- [17] 申桂香, 栾兰, 张英芝, 等. 加工中心组件故障传播影响力评估[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(1): 63-69.
- SHEN G X, LUAN L, ZHANG Y Z, et al. Fault propagation impact assessment of machining center components[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(1): 63-69(in Chinese).
- [18] LIU H C, LUAN X, LIN W L, et al. Grey reasoning Petri nets for large group knowledge representation and reasoning[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 28(12): 3315-3329.
- [19] SHI H, WANG L, LI X Y, et al. A novel method for failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning and fuzzy Petri nets[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 11(6): 2381-2395.
- [20] WANG X L, LU F M, ZHOU M C, et al. A synergy-effect-incorporated fuzzy Petri net modeling paradigm with application in risk assessment[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 199: 117037.
- [21] LI W J, HE M, SUN Y B, et al. A novel layered fuzzy Petri nets modelling and reasoning method for process equipment failure risk assessment[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 62: 103953.
- [22] CHENG H B, HE Z Y, WANG Q, et al. Fault diagnosis method based on Petri nets considering service feature of information source devices[J]. Computers and Electrical Engineering, 2015, 46: 1-13.
- [23] LI L, XIE Y F, CEN L H, et al. A novel cause analysis approach of grey reasoning Petri net based on matrix operations[J]. Applied Intelligence, 2022, 52(1): 1-18.
- [24] 刘久富, 张信哲, 汪恒宇, 等. 部分可观 Petri 网故障的量子贝叶斯诊断[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(7): 1125-1134.
- LIU J F, ZHANG X Z, WANG H Y, et al. Partial observable Petri nets fault diagnosis with quantum Bayesian learning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(7): 1125-1134(in Chinese).
- [25] 王国庆, 谷青范, 王淼, 等. 新一代综合化航空电子系统构架技术研究[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1473-1486.
- WANG G Q, GU Q F, WANG M, et al. Research on the architecture technology for new generation integrated avionics system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1473-1486(in Chinese).
- [26] ZHOU J F. A fuzzy Petri-net approach for fault analysis considering factor influences[J]. IEEE Access, 2020, 8: 72229-72238.
- [27] WANG Y H, LI M, SHI H. A method of searching fault propagation paths in mechatronic systems based on MPPS model[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(9): 2199-2218.

A fault propagation path analysis method for flight control system based on improved FPPN

ZHANG Xiaoyu^{1,*}, ZHANG Fengqi¹, GUO Runxia¹, WU Jun²

(1. School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. School of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In view of the multi-redundancy and multi-closed-loop structural characteristics of the flight control system, the directed graph model and the fuzzy Petri net (FPN) model were used, and a fuzzy probability Petri net (FPPN) model for fault propagation of the flight control system was constructed, so as to solve the fault propagation path of the flight control system with a specific structure. The improved FPPN model consisted of three parts: directed graph model of flight control system, quantitative calculation model for fault propagation characteristics, and FPPN model for fault propagation. A directed graph model of system fault propagation was built by analyzing the functional behavior and physical structure of the flight control system through object-oriented technology and utilizing complex network theory. The Floyd algorithm was introduced to carry out the system coupling correlation analysis, and the system fault propagation characteristics were defined based on the two indicators of node degree and edge betweenness. On the basis of the directed graph model, the corresponding structure mapping rules were proposed. The FPPN model for fault propagation of the flight control system was constructed. With the improved parameter quantization method, two reasoning algorithms were set to effectively analyze the fault propagation paths of the system with multi-redundancy and closed-loop structure characteristics. Through numerical analysis and example verification, the typical fault propagation path of the flight control system and the status value of the relevant nodes on the path were obtained, so as to verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: flight control system; complex network theory; directed graph model; fuzzy probability Petri net model; fault propagation path analysis

Received: 2022-06-21; **Accepted:** 2022-09-30; **Published Online:** 2022-10-14 15:10

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20221014.1035.001

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (62173331,52005500); Scientific Research Project of Tianjin Municipal Education Commission (2018KJ238,2020KJ013)

* **Corresponding author.** E-mail: xy_zhang@cauc.edu.cn