

引用格式:李健,孙东旭,朱志强.航电FC交换网络可靠性建模与仿真研究[J].电光与控制,2019,26(5):73-76. LI J, SUN D X, ZHU Z Q. Modeling and simulation of avionics FC switched network reliability[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(5):73-76.

航电FC交换网络可靠性建模与仿真研究

李健, 孙东旭, 朱志强

(中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所,西安 710065)

摘要: 针对典型航电FC交换网络的架构,综合考虑了节点、交换机整体故障和各个端口独立故障对网络可靠性的影响差异以及多种冗余数量的分析需求,建立了节点、交换机和链路故障模型、端口-端口网络故障模型以及节点-节点网络故障模型,提供了一种基于矩阵的直观建模思路;给出了基于仿真的故障样本生成方法和网络可靠性计算方法,并结合案例对航电FC交换网络的可靠性进行了定量分析,以上模型和方法可为航电FC交换网络的可靠性设计提供理论数据支持。

关键词: 航电网络; FC交换网络; 可靠性建模; 可靠性分析

中图分类号: V243 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.05.014

Modeling and Simulation of Avionics FC Switched Network Reliability

LI Jian, SUN Dong-xu, ZHU Zhi-qiang

(Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the typical avionics Fibre Channel (FC) switched network, considering the difference between the impact of the overall failure and the independent port failure on the network reliability, and also considering the demand of analysis to different redundancies, we built failure models of the node, the interchanger, the link, the port to port network, and of the node to node network, thus to provide an intuitionistic modeling idea based on matrix. A failure sample generating method and a network reliability calculating method based on simulation were provided, and a quantitative analysis was made to the avionics FC switched network reliability by use of a number of cases. The models and methods above can provide a theoretical support for reliability design of avionics FC switched network.

Key words: avionics network; FC switched network; reliability modeling; reliability analysis

0 引言

FC(Fibre Channel)网络由于具有传输速率快、抗干扰能力强、使用灵活等特点而在航电骨干网络中得到了大量的应用^[1],由于航电FC网络承担了众多航空电子系统的互联任务,因此研究FC网络可靠性具有重要的意义。当前航电FC网络研究主要集中在FC协议研究、FC产品开发和测试等方面^[2-4],而对FC网络的可靠性分析研究较少。文献[5]建立了基于任务的FC可靠性仿真模型;文献[6]基于任务模型进行了航电交换式FC网络的可靠性分析;文献[7]提出了

FC-AE-ASM网络模糊可靠性模型。以上模型为FC网络的可靠性分析奠定了基础,但是还存在不够直观、解析困难的不足,不利于在工程应用中大量推广。近年来,一些研究将建模能力强、应用简单的仿真方法应用于航电FC网络,如:文献[8]采用Petri网络对FC-AE-ASM网络进行了建模;文献[9]采用OPNET工具对FC-1553B网络进行了仿真;文献[10]基于蒙特卡罗仿真对FC-AE-ASM网络的可靠性进行了仿真分析。现有的FC网络可靠性建模分析方法一般将FC节点、FC交换机单端口独立故障和整体故障都简单地作为整体故障来处理,而实际故障情况^[11]表明FC节点、FC交换机不仅存在因故障导致的整体故障失效模式,还存在各个端口独立故障的失效模式,现有方法不能很好地区分端口独立故障和整体故障对网络的可靠性影响

收稿日期:2018-06-29

修回日期:2019-04-11

基金项目:航空科学基金(2014ZC31002)

作者简介:李健(1982—),男,贵州毕节人,硕士,高工,研究方向为机载网络。

导致分析结果和实际情况有较大的差异;其次,现有的 FC 网络可靠性分析方法集中于无余度网络和双余度网络分析,而缺乏更高余度网络可靠性的深入分析。本文针对典型航电 FC 网络的架构,提供了一种基于矩阵的仿真和建模方法,可准确地分析独立故障和整体故障对网络可靠性的影响,并且灵活地适应多种余度数量网络的分析。

1 典型航电 FC 交换网络架构

典型航电 FC 交换网络架构如图 1 所示,网络组成要素为节点、交换机以及相应的物理链路。

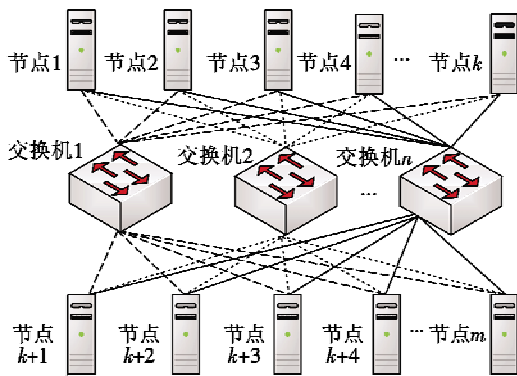


图 1 典型航电 FC 交换网络架构

Fig.1 Architecture of typical avionics FC switched network

由于在实际工程应用中,节点和交换机的故障率大大超过了物理链路的故障率,航电 FC 交换网络普遍采用全网冗余结构,即在具有 m 个节点的 n 余度航电 FC 网络中,每一个 FC 节点具有 n 个余度通信端口,分别用独立的物理链路连接至 n 个交换机上进行通信。

在全网络冗余结构中,不同的节点之间如需完成通信任务,需要在相同的交换网络中存在有效的连接通道。如图 2 所示,在同样有链路失效的情况下,节点 A 和节点 B 可通过交换机 2 建立的有效连接完成通信任务,而节点 C 和节点 D 之间不能建立有效连接。

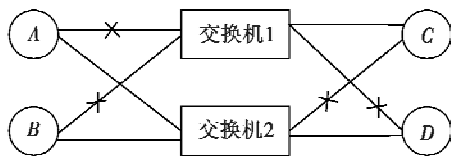


图 2 全网冗余结构连通情况分析

Fig.2 Connectivity analysis of the whole network redundancy structure

2 FC 交换网络故障模型

在具有 m 个节点的 n 余度 FC 网络中,本文建立的交换机故障模型为

$$W(t) = \begin{pmatrix} W_{11}(t) & \cdots & W_{n1}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ W_{1m}(t) & \cdots & W_{nm}(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\text{式中, } W_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & T_{ij}(W) \geq t \\ 0 & T_{ij}(W) < t \end{cases}, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m, W_{ij}(t)$$

表示交换机 i 的第 j 个端口在观测时刻 t 的故障状态, $W_{ij}(t) = 1$, 表示端口处于正常工作状态; $W_{ij}(t) = 0$, 表示端口处于故障状态; $T_{ij}(W)$ 表示该端口故障的工作时间(TTF), 当交换机 i 发生了整体故障, 则所有的端口处于故障状态, 即 $\forall W_{ij}(t) = 0, 1 \leq j \leq m$ 。

节点的故障模型为

$$N(t) = \begin{pmatrix} N_{11}(t) & \cdots & N_{1n}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ N_{m1}(t) & \cdots & N_{mn}(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\text{式中, } N_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & T_{ij}(N) \geq t \\ 0 & T_{ij}(N) < t \end{cases}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, N_{ij}(t)$$

表示节点 i 的第 j 个通信端口在观测时刻 t 的故障状态, 1 表示端口处于正常状态, 0 表示端口处于故障状态, $T_{ij}(N)$ 为该端口的 TTF, 当节点 i 发生了整体失效, 则 $\forall N_{ij}(t) = 0, 1 \leq j \leq n$ 。

链路的故障模型为

$$L(t) = \begin{pmatrix} L_{11}(t) & \cdots & L_{1n}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ L_{m1}(t) & \cdots & L_{mn}(t) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\text{式中, } L_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & T_{ij}(L) \geq t \\ 0 & T_{ij}(L) < t \end{cases}, L_{ij}(t)$$

表示连接节点 i 的第 j 个端口与交换机 j 的第 i 个端口的物理链路在观测时刻 t 的故障状态, 1 表示链路处于正常状态, 0 表示链路处于故障状态, $T_{ij}(L)$ 表示该物理链路的 TTF。

端口 - 端口网络故障模型为

$$G(t) = \begin{pmatrix} G_{11}(t) & \cdots & G_{n1}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ G_{1m}(t) & \cdots & G_{nm}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11}(t) \cdot N_{11}(t) \cdot L_{11}(t) & \cdots & W_{n1}(t) \cdot N_{1n}(t) \cdot L_{1n}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ W_{1m}(t) \cdot N_{m1}(t) \cdot L_{m1}(t) & \cdots & W_{nm}(t) \cdot N_{mn}(t) \cdot L_{mn}(t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, $G_{ij}(t)$ 表示交换机 i 的第 j 个端口与节点 j 的端口 i 在 t 时刻的端口 - 端口连通故障状态, 1 表示这两个端口连接正常, 0 表示连接中断, 只有交换机端口故障状态 $W_{ij}(t)$ 、节点端口故障状态 $N_{ji}(t)$ 以及相应的物理链路故障状态 $L_{ji}(t)$ 都为 1 时, $W_{ij}(t) = 1$, 否则, $W_{ij}(t) = 0$ 。

节点 - 节点网络故障模型为

$$F(t) = \begin{pmatrix} F_{11}(t) & \cdots & F_{1m}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ F_{m1}(t) & \cdots & F_{mm}(t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, $F_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & \exists k \in \{1, 2, \dots, n\}, G_{ki} = G_{kj} = 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$, $F_{ij}(t)$

表示节点 i 和节点 j 在观测时刻 t 的网络连通故障状态, 当至少存在一个交换网络使节点 i 和节点 j 保持了连通, 即在网络要素连通模型 $G(t)$ 中, $\exists k \in \{1, 2, \dots, n\}$ 使 $G_{ki} = G_{kj} = 1$ 时, $F_{ij}(t) = 1$, 否则, $F_{ij}(t) = 0$ 。

3 仿真方法

由于在实际应用中, 各个节点、交换机和链路的故障是随机事件, 而模型 $W(t), N(t), L(t), G(t)$ 和 $F(t)$ 的结果受节点、交换机和链路的 TTF 值支配, 为获取网络可靠性的定量评估结果, 本文基于式(1)~式(5)的模型, 结合蒙特卡罗仿真^[12]的思想, 通过重复仿真观测大量随机样本, 评估航电 FC 网络在指定时刻 t 的网络可靠性。考虑到网络要素中的交换机和节点具有各端口独立故障和整体故障多种失效模式, 因此在仿真时, 按照各个失效模式的分布规律分别抽样, 再将抽样值融合以确定网络要素在指定时刻 t 的故障模式。

以交换机为例, 在第 k 轮的仿真中, 交换机 i 整体 TTF 值 $T_i^k(W)$ 以及第 j 个端口的 TTF 值 $T_{ij}^k(W)$ 的抽样产生方法为

$$T_i^k(W) = \text{generate}(f_{w(i)}(t)) \quad (6)$$

$$T_{ij}^k(W) = \text{generate}(f_{w(ij)}(t)) \quad (7)$$

式中: $\text{generate}()$ 为根据故障分布抽样的函数, 该函数可通过 Matlab, Python 等众多编程语言实现; $f_{w(i)}(t)$, $f_{w(ij)}(t)$ 分别为交换机 i 整体和端口 j 的失效分布函数。失效分布函数可通过可靠性预计、试验或实际故障数据统计获得, 考虑到设备可能存在串并联等网络结构可靠性模型, 为提高网络评估的准确性, 可根据网络结构可靠性模型计算出各个故障模式的失效分布后再进行抽样。

$T_i^k(W)$ 和 $T_{ij}^k(W)$ 的融合方法为

$$T_{ij}(W) = \min(T_i^k(W), T_{ij}^k(W)) \quad (8)$$

式中, 由于交换机整体故障将导致所有端口故障, 因此, 交换机 i 的端口 j 的实际 TTF 值 $T_{ij}(W)$ 为 $T_i^k(W)$, $T_{ij}^k(W)$ 中的最小值。

同理, 节点和物理链路在每轮仿真中的 TTF 可参考式(6)~式(8)生成, 进而根据式(1)~式(5)计算 $W(t), N(t), L(t), G(t)$ 和 $F(t)$ 模型在观测时刻 t 的值, 在第 k 轮仿真中, 记录网络连通性矩阵 $F_{ij}^k(t)$ 结果, 具体的仿真流程如图 3 所示。

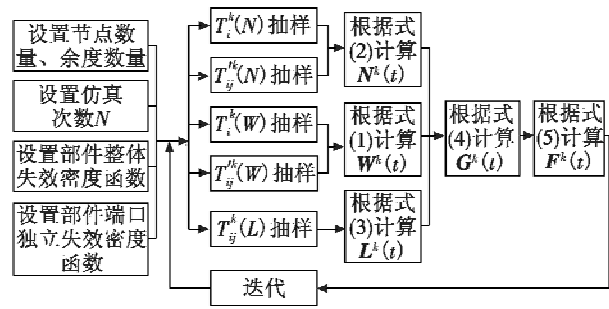


图 3 仿真流程框图

Fig. 3 Flow chart of simulation

在完成了 N 轮仿真之后, 源节点 i 至目的节点 j 在时刻 t 的网络可靠性 $R_{ij}(t)$ 的计算方法为

$$R_{ij}(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N F_{ij}^k(t) \quad (9)$$

式中, $F_{ij}^k(t)$ 为在第 k 轮的仿真中在时刻 t 节点 i 至节点 j 的节点-节点网络连通的状态观测值。

根据式(9)可得出全端网络可靠性计算方法为

$$R_F(t) = \frac{1}{N \times m \times m} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m F_{ij}^k(t) \quad (10)$$

4 案例分析

利用本文所述的模型和方法对图 1 所示的典型航电 FC 交换网络架构进行可靠性分析, 即网络采用全网络冗余结构, 每个 FC 节点具有多个冗余的端口, 通过独立的链路连接到不同的交换机, 并进行通信。网络节点数量设置为 20, 当无余度时, 交换机数量为 1, 采用余度时, 交换机数量与余度数量相同 (如双余度时, 交换机数量为 2), 仿真过程采用 Python 编程语言实现, 设 FC 节点、交换机及链路的故障符合指数分布, 仿真次数为 10^5 。

图 4 所示为节点、交换机的链路的故障率分别为 $2.00 \times 10^{-5}/h, 5.00 \times 10^{-5}/h, 2.00 \times 10^{-8}/h$, 余度数量为 2 时, 节点和交换机整体故障和各端口独立故障频数比例变化时的网络可靠性评估结果。

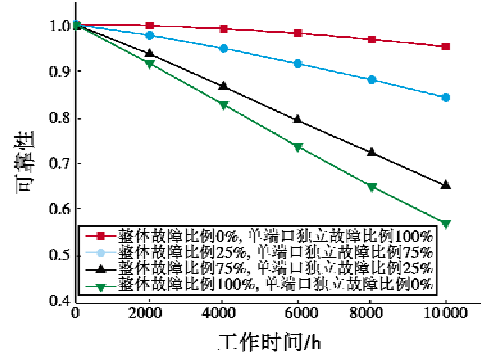


图 4 不同故障比例对网络可靠性的影响

Fig. 4 Influence of different failure rates on network reliability

由图 4 可看出,虽然描述节点和交换机基本可靠性的失效率相同,但是整体故障和单端口独立故障失效模式在总的失效率中所占比例不同的情况下,网络的可靠性表现出很大差异,随着整体故障失效模式占比的增大,网络可靠性逐步降低,以 10000 h 工作时间为例,整体故障占比为 100% 时的网络可靠性整体故障占比 0% 时的网络可靠性低 39.94%。上述结果表明,传统的网络可靠性分析模型和方法简单地将节点和交换机看作一个点,仅根据其整体故障失效模式来评估网络可靠性有较大的偏差,而采用本文方法能更准确地分析整体故障和单端口独立故障对网络可靠性的影响,得出更精确的网络可靠性评估结果;同时可看出,在设计节点和交换机时,不仅要考虑降低产品的失效率,还要设法降低产品的整体故障模式比例。当节点、交换机的链路的故障率分别为 $2.00 \times 10^{-5}/\text{h}$, $5.00 \times 10^{-5}/\text{h}$, $2.00 \times 10^{-8}/\text{h}$, 节点和交换机整体失效及各端口独立失效比例同为 50% 时,不同余度网络的可靠性评估结果如图 5 所示。

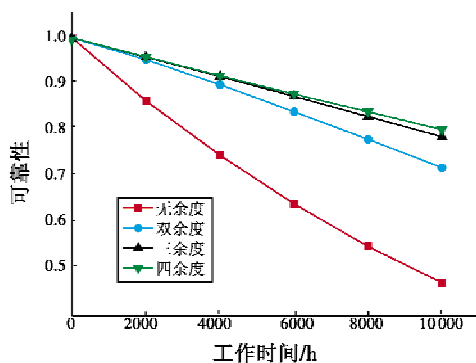


图 5 余度数量对网络可靠性的影响

Fig. 5 Influence of redundancy on network reliability

由图 5 可看出,余度网络能有效提高网络的可靠性,但随着余度数量的增加,网络可靠性的提高效果逐渐降低,以 10000 h 工作时间为例,双余度网络可靠性相对无余度网络可靠性提高了 44.32%,三余度网络可靠性相对双余度网络可靠性提高了 8.22%,而四余度网络可靠性相对三余度网络的可靠性仅提高了 1.77%。由于网络余度的增加需要大量的功耗、体积重量等成本,在网络设计时,采用本文方法对各种余度数量的网络可靠性进行评估能为对余度数量的合理规划进而优化网络设计提供理论数据支撑。

5 总结

本文所提出的基于矩阵的故障建模思路和基于仿真的计算方法对现有的航电 FC 网络可靠性分析方法进行了补充,可定量分析节点、交换机整体故障失效模式和单端口独立失效对网络可靠性的影响,更符合实

际工程应用,此外可灵活地适应多种余度数量网络的分析,为网络余度规划提供支持。在网络结构十分复杂时,根据机载计算平台可用运算能力,调整仿真次数提高在线分析能力,可以根据实际运行状态对设备的可靠性进行实时评估。

参考文献

- [1] 孙东旭,贾世伟,孟玉慈,等. 综合模块化航电系统 FC 网络的机内测试设计[J]. 航空计算技术,2016,46(6):108-112.
- [2] LI C C, ZHOU T. A new topology design and performance analysis for FC-AE based on PON[C]//The 5th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics, 2012:1406-1410.
- [3] 赵长啸,屠晓杰,丁凡,等. 光纤通道网络实时性能分析[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(10):1202-1206.
- [4] 彭国金. 一种飞行试验 FC 航电系统的采集网络时延测试方法[J]. 计算机测量与控制,2015,23(12):3966-3968.
- [5] 徐亚军,张晓林,熊华钢. FC 互连的可靠性建模[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(5):539-543.
- [6] 徐亚军,张晓林,熊华钢. 航空电子系统 FC 交换式网络的可靠性研究[J]. 航空学报,2007,28(2):402-406.
- [7] 翟正军,陈康,焦航. FC-AE-ASM 网络的模糊可靠性研究[J]. 计算机应用研究,2013,30(8):2467-2469,2491.
- [8] LIU B, ZHANG J D, YANG Q M, et al. Modeling and performance analysis of FC-AE-ASM which base on PETRI net theory [C]//International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, 2010:1-4.
- [9] ZHU X L, ZHANG F M, WANG Y. Study and simulation of fibre channel-1553B network in avionics system using OPNET [C]//The 3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics, 2010:456-461.
- [10] 易川,翟正军,羊昌燕. 基于蒙特卡罗法的 FC-AE-ASM 网络可靠性研究[J]. 计算机工程与应用,2014,50(3):59-62.
- [11] 孟玉慈,孙东旭,梁媛. 利用历史故障信息提高机载计算机 FMEA 分析准确性[J]. 航空计算技术,2017,47(4):126-129.
- [12] FAULIN J, JUAN A A, MARTORELL S, et al. Simulation methods for reliability and availability of complex systems [M]. London:Springer, 2012.