https://doi.org/10.1051/jnwpu/20234130546

AFDX 网络设备故障诊断技术

胡磊[1], 柳杨[2], 郭卿超[1], 时雨[3], 马春燕[3], 张建东[4], 张涛[3]

(1.沈阳飞机设计研究所 总体气动部, 辽宁 沈阳 110034; 2.沈阳飞机设计研究所 综合航电部, 辽宁 沈阳 110034;
3.西北工业大学 软件学院, 陕西 西安 710072; 4.西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:AFDX 网络作为机载主干通信网络,如果出现故障,将影响整个航电系统的功能。AFDX 网络设备故障诊断对于机载通信的稳定运行和航空子系统故障管理具有重要意义。聚焦网络设备故障诊断技术,研究了一套基于网络演算法的 AFDX 网络设备故障诊断技术。通过设计故障特征参数标识故障类型,给出检测结果和故障特征参数的关联关系;使用被动式采集的方式对关键元器件、通信过程以及设备性能进行状态检测;针对所收集的检测数据,分别给出故障诊断方法并对偶发性异常进行识别和抑制;设计网络故障诊断测试用例,从实时性和并发性 2 个角度进行测试验证,测试用例的通过率达到 98%,且未发生致命、严重级别的 BUG,较小级别的 BUG 不超过 5 个且均已修复,验证结果证明了方法的有效性。

关 键 词:AFDX 网络;网络设备;故障诊断;网络监控
中图分类号:TP393 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2023)03-0546-11

AFDX(avionics full duplex switched ethernet)作为目前大型飞机的主干通信网络,其安全性尤为重要。近年来,故障检测和诊断技术在机载通信设备中已有应用,但 AFDX 网络设备监控诊断方法大多在机上无法快速搭建网络验证环境,更难以实现飞行状态下实时监控,并且需要专门的检测工具,而且诊断工具价格昂贵。本文研究如何在机上已有环境下对 AFDX 网络设备运行状态进行实时监控,同时结合故障检测和诊断技术,提供更加可靠的故障报警依据,以此降低 AFDX 网络设备管理的人力成本、时间成本和维护成本。本文贡献如下:

1) 给出故障和故障类型的定义,为每类故障类型设计合理的故障特征参数标识故障类型,并给出检测结果和故障特征参数的关联关系;

2) 针对检测中的数据采集环节设计一级筛选二级缓存的数据存储管理方法。改进了传统的基于被动式采集故障诊断方法,并进行分析验证;

3) 研制了一套针对 AFDX 网络设备异常状态监控的工具,覆盖每类故障的验证范围,并进行相应的实验验证。

1 相关工作

目前常见的故障诊断方法主要有以下 5 种:

1) 基于解析模型的方法,其思想是利用检测到的信息与解析模型得到的先验信息做残差分析再获取故障诊断的结果[1]。目前仍有许多故障诊断研究使用解析模型中的状态估计法[2]、参数估计法[3]以及等价空间法[4]等;

2) 基于数据驱动诊断方法,其通过采样数据进行建模[5]。基于数据驱动的诊断方法常用的有 3 种。第一种是基于信号处理的方法[6],该类方法通过监测可测信号的输入和输出,分析振幅、相位、方差等特征值的变化,进而诊断出系统中的故障[7]。第二种是基于统计分析的方法[8]。第三种是基于

收稿日期:2022-07-28 **基金项目**:航空科学基金(20185853038,201907053004)资助
作者简介:胡磊(1988—),沈阳飞机设计研究所高级工程师,主要从事飞机总体设计与系统综合设计研究。
通信作者:马春燕(1978—),西北工业大学副教授,主要从事软件自动化测试与故障定位研究。
e-mail:machunyan@ nwpu.edu.cn

机器学习的方法[9];

3) 基于知识的检测方法,根据先验知识,建立所有故障事件的推理模型进行故障诊断[10],领域知识包括专家系统、故障树等。

4) 基于数据挖掘的方法能够在大量的网络流量数据中找到潜在的相关参数之间的关系[11],从而检测异常;

5) 基于网络演算的方法常用于网络性能诊断[12],其原理基于非线性代数确定性排队理论以及最小加代数和最大加代数的计算,能够实时评估设备的性能状况[13]。但由于网络演算能够对节点的性能进行实时分析,该方法也可以运用于网络故障诊断中[14]。

目前,国内外的一些科研团队和科技公司开发了相应故障诊断系统和方案平台,部分产品已进入市场,具有非常大的应用价值。例如,由惠普公司的 OpenView 系统所提供的故障诊断服务[15],通过轮询实现网络设备的运行状态控制,并以此做出故障告警[16];Cabletron 公司的 Spectrum 网络系统,提出了基于案例推理的故障诊断方法[17],检查不同的网络对象和事件,归纳出同一本质或故障[18]。SMARTS 公司提供的产品 InCharge 是基于编码本的诊断方法[19]。美国 IBM 公司开发的 TivoliNetView 是通过对设备进行性能轮询和状态轮询进行诊断,但容易导致故障响应的延迟,且不能找出相关故障的内在联系[20]。北京游龙网网络科技有限公司研发的 SiteView NNM 是基于 SNMP[21] 的网络设备管理软件,它可以管理所有主流厂商的各种设备,能够实时获取网络设备的信息[22]。

近年来,虽说故障检测和诊断技术在机载通信设备中已有应用,但目前为止,AFDX 网络设备监控诊断方法大多在机上无法快速搭建网络验证环境,更难以实现飞行状态下实时监控,并且需要专门的检测工具,而且诊断工具价格昂贵。王竹清等[23]设计了一种采用并联方法进行数据采集监控的方法,通过监控设备、数据汇聚设备和数据分析设备完成网络监控,故障的诊断全部集中到数据分析设备中,提取网络设备中所有通信数据进行分析,该方式存在较大延时且占用大量带宽。景文君等[24]借鉴航电系统向机载维护系统实时上报健康状态并对启动自检命令做出响应的机制,通过 FIDO 软件对机载软件进行监控并实时获取维护数据。中国电子科技集团公司通过机内测试和自动测试装备联合进行故障诊断[25],当设备发生故障时,需要根据机内测试的报告,将异常部件取出,采用自动测试装备继续检测[26],这种离线方法的诊断效率低、成本高、时间长,且机内测试自检覆盖面不够,机载设备的大部分故障不能检测,存在虚警的问题[27]。

本文研究面向 AFDX 网络层面的故障监控和诊断,应用智能化的故障诊断方法和监控机制,解决当前机载网络监控难以保障实时性、额外的检测设备昂贵等复杂问题,设计并实现了 AFDX 网络设备监控诊断工具,用于对机载网络的运行状态、健康状态进行实时的监控、管理和维护。

2　AFDX 网络设备故障监控诊断技术

2.1　故障和故障类型的定义

本文将 AFDX 网络设备常见故障进行分类,给出 5 类故障类型的定义,并在此基础上,总结分析了共计 23 种故障及其故障特性。

定义 1　关键器件故障　该类故障指在网络设备中处于管理控制或通信地位的元器件发生损坏,关键器件共 11 种,主要包括 RTC、FLASH、CPU、SDRAM、DPRAM、硬件端口状态、PCI 总线,针对交换机额外选取管脚编程、默认应用程序及配置表、交换机芯片、引导代码。

定义 2　物理层故障　该类故障是指网络设备本身的接口故障和连接交换机的物理链路故障。当接收端接收数据帧时出现以下 3 种情况时指示物理层故障:①字节非对齐;②CRC 错误;③接收到相同的数据帧。

定义 3　VL 链路层故障　该类故障是指 VL 链路层中提供的虚拟链路技术、流量整形模块、完整性检查模块、冗余管理模块和发送接收控制模块功能失效,导致 VL 虚拟链路层无法或错误提供服务,无法保障 AFDX 网络数据传输的确定性和可靠性。

定义 4　UDP/IP 层故障　该类故障是指 UDP/IP 网络协议的配置或操作错误、IP 分片功能失效等。

本文定义的物理层故障、VL 虚拟链路层故障、UDP/IP 层故障类型的具体故障特性如表 1 所示。

定义 5　设备性能故障　该类故障是指网络设备高负载状态导致存储和处理数据的能力不足、速率下降,进而导致网络拥塞、数据丢包问题。本文探究网络设备性能故障的指标包括 CPU 利用率、内存

占用率、带宽的利用率以及缓冲区满标识。

表 1 物理层、VL 虚拟链路层、UDP/IP 层故障类型标识

故障类型	故障名称	故障特性
UDP/IP 层故障	UDP 地址错误	UDP 端口与 AFDX 配置表中定义不一致
	IP 地址错误	数据帧与配置表中数据帧源端配置信息的 IP 不一致
	数据消息长度错误	端口接收数据帧长度小于 64 字节或大于 1 518 字节
VL 链路层故障	VL 错误	数据帧中采用的 VL 号与 AFDX 配置表中定义不一致
	次序完整性错误	接收的数据帧序号不连续
	冗余管理错误	接收来自 A 网和 B 网的数据帧的时间差值较大或丢失
	警管错误	端口接收的数据包间隔小于交换机配置表定义的最小间隔
	MAC 源地址错误	数据帧中 MAC 源地址与配置表中数据帧源端配置信息中的 IP 地址不一致
	MAC 目的地址错误	数据帧中 MAC 目的地址与 AFDX 配置表中定义不一致
物理层故障	字节非对齐	数据帧长度不是 8 bit 整数倍
	CRC 错误	帧校验号执行 CRC 校验错误
	发送控制错误	接收到 2 个相同的数据帧

2.2 故障检测方法

本节通过被动式采集方式对关键元器件、通信过程以及设备性能进行状态检测,获取当前设备的运行状态数据,设计合理的数据存储管理方案保存获取的数据,并根据数据解析定义指示故障类型的特征参数。

2.2.1 网络设备运行状态检测

本文选取 PBIT 对关键器件的状态进行测试。PBIT 是 BIT 的一种,在设备的工作过程中周期性地进行检测。执行测试项时,根据测试结果将对应的位清零或置 1。表 2 是 BIT 检测项及检测方法的描述,其中 0 表示检测结果正常,1 表示出现故障。

表 2 BIT 检测项及检测方法

BIT 检测项	检测方法
CPU	算术运算功能测试:包含加、减、乘、除 4 项功能测试 逻辑运算功能测试:包括位与、位或、逻辑与、逻辑或、逻辑非 5 项功能测试 跳转功能测试:预先定义一组数并将其两两之间进行比较 浮点数运算功能测试:利用一组已知结果的浮点数执行加、减、乘、除的运算
SDRAM	据总线测试:在一块地址区中按地址线走 1 的方式对内存进行读写测试 地址总线测试:在一块地址区中写入当前地址的值 SDRAM 连续地址数据存储测试:在一片给定的内存空间内按数据线走 1 方式进行内存读写测试 SDRAM 非连续地址总线测试:在一片给定的内存空间内根据给出一组已知数的方式进行内存读写测试 SDRAM 非连续地址数据存储测试:在一块地址区域中按数据线走 1 的方式进行内存读写测试
RTC	连续 2 次读取端系统 64 位实时时钟值(间隔时间不小于 1 ms)
FLASH	对比当前 FLASH 校验和与事先存储的 FLASH 校验和
RPRAM	对端系统/交换机双口 RAM 的数据执行奇校验
硬件端口状态	对所有通信端口 PHY 芯片 ID 进行检测
PCI 总线	在 PCI 总线上运行总线测试程序
管脚编程故障	对交换机 12 位管脚编程离散量进行奇校验
默认应用程序及配置表故障	对交换机默认应用程序及配置表固化地址段中常量域进行检测
引导代码故障	对引导代码(boot code)执行 CRC 校验
交换机芯片故障	对心跳寄存器进行测试(测试交换机逻辑是否正常)
SRAM 故障	对交换机 SRAM 中的数据执行 CRC 检测

2.2.2 通信过程的状态检测

在 AFDX 网络中,与底层关键器件的故障不同,物理层、VL 虚拟链路层、UDP/IP 层构成网络协议、

流量整形、缓冲管理、分组调度等通信网络运行规则,捕获并存储网络设备运行过程中实际发送和接收的原始通信数据,通过有效的协议分析可以反映数据在各层传输的通信过程。对其进行有效性的统计可观测网络的错误,完成网络故障的类型确认。针对 2.1 节所述的故障类型,结合状态检测的方法,本文将关键器件故障的故障特征参数用 0 和 1 表示,0 表示当前检测结果为正常,1 表示当前检测结果为故障。

2.2.3　网络性能状态检测

网络中某一时刻的 CPU 利用率、内存占用率、带宽利用率并不能直接反映网络中某一段时间的网络性能,因此,为体现设备当前的负载状况需要对一段时间内的性能数据进行采样处理。网络状态检测程序对设备该段时间内的网络性能参数进行抽样统计之后,才可以得到网络在本段时间内的性能。

2.3　故障诊断方法

本文设计了基于多链路分组技术的网络演算算法,用于验证机载网络的实时性和确定性。但网络演算的方法并不能明确表明故障的具体问题,因此本文将其运用于异常分析中,提出了一种综合诊断的方法。

2.3.1　设备通信异常诊断方法相关定义及描述

本文基于网络演算理论建立了针对设备通信异常的诊断方法。首先,将 AFDX 网络抽象为有向图 $\boldsymbol{G}=(\boldsymbol{V},\boldsymbol{E})$ 进行建模。其中,$\boldsymbol{V}=\{v\}$ 为网络中的设备集,包括 AFDX 网络中的端系统和交换机。$\boldsymbol{E}=\{e_{ij}\,|\,v_i,v_j\in\boldsymbol{V}\}$ 为设备 v_i 指向设备 v_j 的弧,其中 v_i 称为弧尾,v_j 为弧头。则弧 $v_i\rightarrow v_j$ 表示 v_i 到 v_j 存在数据流。将 $[0,t]$ 时间内的总数据量表示为 $R_{ij}(t)$,则弧尾 v_i 在时间 $[0,t]$ 内的输入过程记为 $R_{i,\mathrm{in}}(t)$,计算过程表达为

$$R_{i,\mathrm{in}}(t)=\sum_{v_j\in\boldsymbol{N}_{i,\mathrm{in}}}R_{ji}(t) \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{N}_{i,\mathrm{in}}$ 为发送数据到弧尾 v_i 的设备集,即 $\boldsymbol{N}_{i,\mathrm{in}}=\{v_i\,|\,e_{ij}\in\boldsymbol{E}\}$。

(1) 式中,输入过程的数据量由设备集 $\boldsymbol{N}_{i,\mathrm{in}}$ 发送数据到 v_i 的所有数据量求和得到。同理,当 v_i 作为弧头时,在时间 $[0,t]$ 内的输出过程记为

$$R_{i,\mathrm{out}}(t)=\sum_{v_j\in\boldsymbol{N}_{i,\mathrm{out}}}R_{ji}(t) \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{N}_{i,\mathrm{out}}$ 为接收来自弧头 v_i 数据的设备集,即 $\boldsymbol{N}_{i,\mathrm{out}}=\{v_j\,|\,e_{ji}\in E\}$。

(2) 式中,与输入过程相反,输出过程的数据量由 v_i 发送数据到设备集 $\boldsymbol{N}_{i,\mathrm{out}}$ 的所有数据量求和得到。

服务曲线是对网络设备的服务能力进行描述,从而对流的输入、输出行为进行限制和描述[28]。

定义 1　服务曲线 $S(t)$

若设备的输入过程为 $R_{\mathrm{in}}(t)$,设备的输出过程为 $R_{\mathrm{out}}(t)$,则当存在函数 $S(t)$ 满足 $R_{\mathrm{out}}(t)\geqslant(R_{\mathrm{in}}\otimes S)(t)$ 时,称 $S(t)$ 为设备的服务曲线。其中,当设备 v_i 正常工作时,为数据流提供的服务曲线函数为[24]

$$S_i(t)=\max(0,r(t-\tau)) \tag{3}$$

式中:$S_i(t)$ 为设备 v_i 的服务曲线函数;r 为设备服务的最低速率;τ 为设备开始服务的最大时延。

(3) 式中,服务曲线 $S_i(t)$ 表示设备服务能力的下界。

不同设备(端系统或交换机)的性能等参数不同,可能导致网络设备的服务曲线形态有所变化,但不影响对其异常情况的分析。

2.3.2　设备通信异常类型及诊断算法

通过上述定义及描述,设备正常服务时输入、输出过程满足为 $R_{\mathrm{out}}(t)\geqslant R_{\mathrm{in}}(t)\otimes S(t)$,发送的数据总量不超过接收的数据总量,即 $R_{\mathrm{out}}(t)\leqslant R_{\mathrm{in}}(t)$。设备正常服务时对于数据积压也有限制,当数据积压过大时,设备性能下降不在正常服务状态范畴。因此需满足在设备正常服务的任一时间段内输入的累计数据量不大于最低服务速率下服务的数据量总和,表示为在时间 $(s,s+t]$ 内有

$$\begin{aligned}&\forall a\in(s,s+t],b\in(a,s+t]\\&R_{\mathrm{in}}(b)-R_{\mathrm{in}}(a)\leqslant r(b-a)\end{aligned} \tag{4}$$

且输入过程 $R_{\mathrm{in}}(t)$ 是严格单调递增的,即

$$\forall s,t>0,\ R_{\mathrm{in}}(s+t)-R_{\mathrm{in}}(s)>0 \tag{5}$$

基于公式(5),设备服务正常时的输入输出过程如图 1 所示。

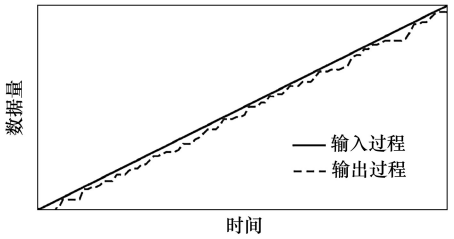

图 1　设备服务正常时的输入输出过程

图 1 中,输入过程与输出过程基本吻合。此时,设备通信异常诊断问题转化为判断检测设备 v_i 的输

入过程 $R_{in}(t)$ 和输出过程 $R_{out}(t)$，即当在时刻 t 不满足公式(4)时，则设备 v_i 在 $[0,t]$ 内存在异常。

在设备通信的异常诊断中，将非正常工作状态分为以下 3 种异常情况：无服务、服务减慢、错误服务，诊断以上 3 种异常的算法时间复杂度均为 $O(1)$。

1) 无服务通信异常类型分析

无服务指设备不再对数据流提供服务，不再向网络系统中发送数据。此时对任意形式的输入过程和任意积压，在无服务 $(s,s+t]$ 期间，均有

$$R_{i,\text{out}}(s+t) - R_{i,\text{out}}(s) = 0 \tag{6}$$

同时，在无服务期间不保存接收的数据。若时刻 $s+t$ 恢复服务则对 $s+t$ 后接收的数据服务。设备无服务时的输入输出过程如图 2 所示。

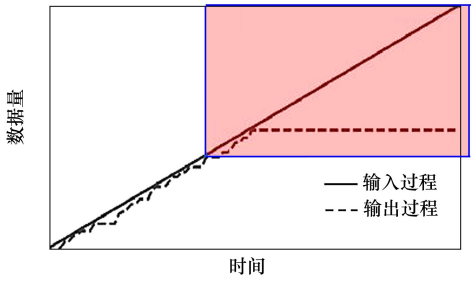

图 2 设备无服务时的输入输出过程

在时间段的中段，输出过程数据量停止增加且保持到该时间段结束，表明设备发生无服务异常，此时的判定条件为：若在时刻 s 出现 $R_{out}(s) < (R_{in} \otimes S)(s)$ 且 $R_{out}(s+t) - R_{out}(s) = 0$ 判定设备在时刻 s 无服务，若在时间 $(s+\tau, s+t]$ 不满足 $R_{out}(t) \geqslant R_{in}(t) \otimes S(t)$ 则判定设备在时间 $(s,s+t]$ 内无服务。

2) 服务减慢通信异常类型分析

服务减慢指设备为数据量服务的速率远小于数据输入速率。此时对任意形式的输入过程和积压，在服务减慢 $(s,s+t]$ 期间，存在 $r_0 > 0$ 满足

$$\forall a \in (s,s+t], b \in (a,s+t],$$
$$R_{in}(b) - R_{in}(a) > R_{out}(b) - R_{out}(a) + r_0(b-a) \tag{7}$$

发生设备服务减慢时的输入输出过程如图 3 所示。

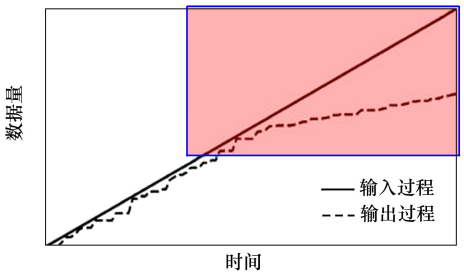

图 3 设备服务减慢时的输入输出过程

图 3 中，在时间段的中段，输出过程数据量增加缓慢，与输入过程的数据量相比，随着时间变化差距变大，表明设备发生服务减慢异常。因此，对于设备服务减慢判定条件为：若在时刻 s 出现 $R_{out}(s) < (R_{in} \otimes S)(s)$ 且 $R_{out}(s+\tau) - R_{out}(s) > 0$ 时判定设备在时刻 s 服务减慢，若在时间 $\left(s + \frac{r\tau}{r_0}, s+t\right]$ 不满足 $R_{out}(t) \geqslant R_{in}(t) \otimes S(t)$ 则判定设备在时间 $(s,s+t]$ 内服务减慢。

3) 错误服务通信异常类型分析

错误服务指设备大量发送与输入过程无关的数据。此时对任意形式的输入过程和积压，在错误服务 $(s,s+t]$ 期间，存在

$$\forall a \in (s,s+t], b \in (a,s+t],$$
$$R_{in}(b) - R_{in}(a) + r_1(b-a) < R_{out}(b) - R_{out}(a)$$
$$R_{i,\text{out}}(s+t) - R_{i,\text{out}}(s) \leqslant C(t) \tag{8}$$

发生设备错误服务时的输入输出过程如图 4 所示。

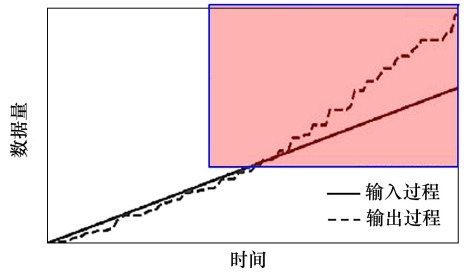

图 4 设备错误服务时的输入输出过程

从图 4 可以观察到，在一定时间段内，输出过程在该时间段某一时刻，输出数据量超过输入数据量，且随时间增长。表明设备发生服务错误异常，判定条件为：若在时刻 s 出现 $R_{out}(t) > R_{in}(t)$ 时判定设

备在时刻 s 错误服务,若在时间$\left(s+\frac{r\tau}{r_0},s+t\right]$不满足 $R_{out}(t)\leqslant R_{in}(t)$ 则判定设备在时间$(s,s+t]$ 内错误服务。

设备输入输出过程都是通过数据包的形式,因此,为了建立连续的输入输出过程模型,本文设置了一个采样周期,该采样周期远大于连续发送 2 条消息的时间间隔,且采样周期保持不变。因此,离散的输入输出过程可以被视为连续的,不影响检测结果。

基于上述 3 种通信异常类型分析,本文使用 type 值表示设备状态,其中,0 为正常,1 为无服务,2 为服务减慢,3 为错误服务。设备通信异常类型诊断算法如 Algorithm 1 所示。

Algorithm 1. Node communication abnormal diagnosis

Input:R_{in}——the input process after sampling

R_{out}——the output process after sampling

δt——sampling period

t_{delay}——after the sample delay

Output:type

1. $l_{lowbound}\leftarrow 0$;
2. $t\leftarrow 0$;
3. type$\leftarrow 0$;
4. $l_{lowbound}\leftarrow \min(l_{lowbound}+r\delta t,R_{in}[t-t_{delay}])$;
5. if ($l_{lowbound}>R_{out}[t]$ and $R_{out}[t]==R_{out}[t-1]$) then
6. type$\leftarrow 1$;
7. else if ($l_{lowbound}>R_{out}[t]$ and $R_{out}[t]>R_{out}[t-1]$) then
8. type$\leftarrow 2$;
9. else if ($R_{out}[t]>R_{in}[t]$) then
10. type$\leftarrow 3$;
11. end if

Algorithm 1 中,输入过程 R_{in} 和输出过程 R_{out} 均为采样后的结果,δt 为采样周期,delay 为采样后的延迟。首先,初始化下界、时间、状态为 0。由于当前 type 类型码为 0,通过公式(9) 更新下界。

$$l_{lowbound}=\min(l_{lowbound}+r\delta t,R_{in}[t-t_{delay}]) \quad (9)$$

式中:$l_{lowbound}$为累积数据下界/bit;r 为设备服务的最低速率。

若更新后的下界大于当前时刻 t 的输出过程且当前时刻 t 的输出过程与前一时刻 $t-1$ 的输出过程相等,则判定状态为 1,即设备服务停止。若更新后的下界大于当前时刻 t 的输出过程且当前时刻 t 的输出过程大于前一时刻 $t-1$ 的输出过程,则判定状态为 2,即设备服务缓慢。当输出过程大于输入过程时,更新 type 类型码为 3,即认为此时发生设备错误服务。若均不满足上述情况,认为当前设备通信状态正常。

2.3.3　异常恢复的诊断算法

由于部分干扰而产生的偶发异常对于设备来说不必进行维护和处理,通过检测出设备从异常恢复正常状态的时间,对比发生异常的时间可获悉偶发的异常现象。

在判定设备通信产生异常后,进入后续的异常恢复检测过程,首先在时刻 s 对输入过程和输出过程进行初始化:

$$\begin{aligned}R'_{in}(t)&=R_{in}(s+t)-R_{in}(s)\\R'_{out}(t)&=R_{out}(s+t)-R_{out}(s)\end{aligned} \quad (10)$$

在设备异常服务恢复的诊断中,分为以下 3 种异常情况:设备无服务恢复、设备服务减慢恢复、设备错误服务,诊断以上 3 种异常的算法时间复杂度均为 $O(1)$。

1) 设备无服务恢复算法

设备从无服务到恢复正常的判定条件为:s 时刻处于服务停止状态,若 $\exists t>0,R_{out}(s+t)-R_{out}(s)>0$ 时,表明设备已开始发送数据,判定设备在时刻 $s+t$ 恢复正常,若在时间$(s+\tau,s+t]$ 满足 $\forall a\in(s+\tau,s+t],R_{out}(s+t)-R_{out}(s)>0$,表明设备恢复服务,则判定设备在时间$(s,s+t]$ 内恢复正常。Algorithm 1 判定后,此时,type 类型码为 1,根据 Algorithm 2 进行恢复正常状态诊断。

Algorithm 2. Node service stopped

Input:R_{in}——the input process after sampling

R_{out}——the output process after sampling

Output:type

1. $l_{lowbound}\leftarrow 0$;
2. $t\leftarrow 0$;
3. type$\leftarrow 1$;
4. if ($R_{out}[t]>R_{out}[t-1]$) then
5. $R_{in}\leftarrow R_{in}-R_{in}[t]$;
6. $R_{out}\leftarrow R_{out}-R_{out}[t]$;
7. $l_{lowbound}\leftarrow 0$;
8. end if

Algorithm 2 中,输入过程 R_{in} 和输出过程 R_{out} 均为采样后的结果,在 1~3 行,对下界、时间、状态分别初始化。当时刻 t 的输出过程大于前一时刻 $t-1$

的输出过程时,分别更新输入过程、输出过程和下界。如 5~7 行所示。

2) 设备服务减慢恢复算法

设备从服务减缓到恢复正常的判定条件为:s 时刻处于服务缓慢状态,若 $\exists t > 0, R_{out}(s+t) - R_{out}(s) > rt$ 时,表明设备发送速率增加,则判定设备在时刻 $s+t$ 已恢复正常,输出过程满足 $\exists a \in (s, s+\tau], b-a, R_{out}(b) - R_{out}(a) > r(b-a)$。此时执行恢复算法如 Algorithm 3 所示。

Algorithm 3. Slow node service

Input: R_{in}——the input process after sampling
R_{out}——the output process after sampling
δt——sampling period
t_{delay}——after the sample delay
T_0——after sampling normal continuous upper bound

Output: type

1. $l_{lowbound} \leftarrow 0$;
2. $t \leftarrow 0$;
3. $t_{con} \leftarrow 0$;
4. type$\leftarrow$2;
5. $l_{lowbound} \leftarrow \min(l_{lowbound} + r\delta t, R_{in}[t - t_{delay}])$;
6. if ($R_{out}[t] - R_{out}[t-1] > r \times t_{delay}$) then
7. type$\leftarrow$1;
8. end if
9. if ($l_{lowbound} < R_{out}[t]$) then
10. if ($t_{con} \geqslant T_0$) then
11. type$\leftarrow$0;
12. $t_{con} \leftarrow 0$;
13. else
14. $t_{con} \leftarrow t_{con} + 1$;
15. end if
16. else
17. $t_{con} \leftarrow 0$
18. end if

Algorithm 3 中,δt 为采样周期,delay 为采样后的延迟。初始化正常持续时间为 0,状态为 2,如第 3~4 行所示。接下来通过公式(11)更新下界。

$$l_{lowbound} = \min(l_{lowbound} + r\delta t, R_{in}[t - t_{delay}]) \quad (11)$$

式中:$l_{lowbound}$ 为累积数据下界/bit;r 为设备服务的最低速率;δt 为采样后周期;t_{delay} 为采样后的时延。

如第 6 行所示,若当前输出过程与前一时刻输出过程的差大于设备服务的最低速率与采样后时延的乘积,则更新 type 类型码为 1。若下界小于当前输出过程且正常持续时间大于正常持续时间上界,更新 type 类型码和正常持续时间为 0。若下界小于当前输出过程而正常持续时间小于等于正常持续时间上界,将正常持续时间加 1。否则,正常持续时间继续保持为 0。

3) 设备错误服务恢复算法

设备从错误服务状态到恢复到正常服务状态应满足:在时刻 s 初始化,若 $\exists t > 0$ 使得初始化后的输入输出过程在 $(s, s+t]$ 内满足 $R_{out}(t) \leqslant R_{in}(t)$ 时,表明设备发送的数据小于接收的数据,从时刻 s 后由错误服务状态恢复为正常服务状态。具体过程如 Algorithm 4 所示。

Algorithm 4. Node error output

Input: R_{in}——the input process after sampling
R_{out}——the output process after sampling
δt——sampling period
t_{delay}——after the sample delay
T_0——after sampling normal continuous upper bound

Output: type

1. $l_{lowbound} \leftarrow 0$;
2. $t \leftarrow 0$;
3. $t_{con} \leftarrow 0$;
4. type$\leftarrow$3;
5. if ($t_{con} == 0$) then
6. $R_{in}[t] = R'_{in}[t]$;
7. $R'_{out}[t] = R_{out} - R_{out}[t]$;
8. $l_{lowbound} \leftarrow 0$;
9. $t_{con} \leftarrow 0$;
10. end if
11. if ($t_{con} > 0$) then
12. $l_{lowbound} \leftarrow \min(l_{lowbound} + r\delta t, R'_{in}[t - t_{delay}])$;
13. if ($R'_{in}[t] < R'_{out}[t]$) then
14. if ($t_{con} \geqslant T_0$) then
15. $R_{in} = R'_{in}$;
16. $R_{out} = R'_{out}$;
17. type$\leftarrow$0;
18. $t_{con} \leftarrow 0$;
19. end if
20. end if
21. end if

Algorithm 4 中,前 3 行与算法 3 一致,初始化下界、时间、正常持续时间为 0,状态为 3。若正常持续状态为 0,则更新输入输出过程。并将下界、正常持续时间重新赋值为 0。若正常持续时间大于 0,通过公式(11)更新下界。在 t 时刻,若初始化后的输入过程小于输出过程,且正常持续时间不小于采样后正常持续时间上界,则使用初始化后的输入输出过程更新输入输出过程。同时,置 type 类型码和正常持续时间为 0。

2.3.4　基于通信数据的异常诊断流程

网络故障诊断不仅仅是检测网络连通与否、当前设备是否通信异常,而需要用更为具体的标准去衡量和判别当前网络的故障问题。在网络设备的运行状态检测中已完成数据帧的捕获和存储,而设备通信异常诊断提供通信异常的时间点,因此故障类型分析就是提取该时间点前后存储的历史数据帧,对数据帧进行校验,通过统计相应特征参数反映当前网络的具体故障问题。本文提出的基于通信数据的异常诊断流程如图 5 所示。

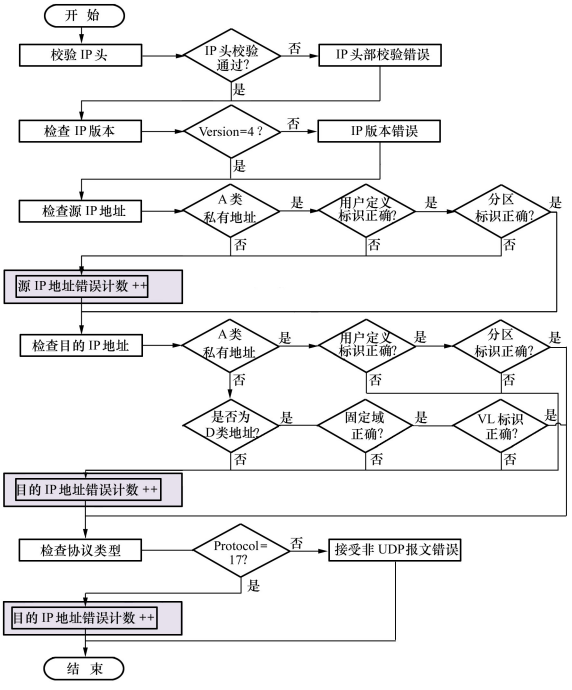

图 5　IP 头部校验和特征参数统计

3　实验验证

3.1　网络设备故障诊断实验流程

故障诊断实验分为发生异常诊断阶段和异常恢复的诊断阶段。故障诊断流程如图 6 所示。首先根据设备的输入输出过程建立设备通信异常诊断,分析设备是否发生异常以及何时发生异常,当发生异常时通过查询历史的通信数据诊断出具体的故障类型。当发生异常后才进入异常恢复诊断流程,重置输入输出过程,根据异常类型进行相应的异常恢复检测,当诊断为异常恢复后可停止故障类型分析过程,降低资源消耗。

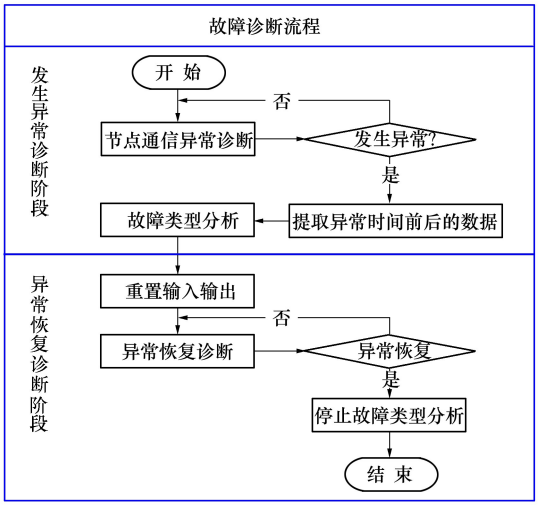

图 6　故障诊断流程

3.2　网络设备故障诊断测试用例设计

3.2.1　状态检测测试用例设计

状态检测测试用例主要测试对注入的关键器件故障、通信过程故障、设备性能故障能否准确进行检测,具体测试用例集如下:

状态检测测试用例集的标识为 NMDF_Test_01,模块名称为状态检测。

测试项分别为:①检测器件功能;②获取设备性能参数;③数据帧捕获;④更新故障参数。

测试输入为系统控制句柄(包括初始化结果和系统状态等信息)。

针对该类用例集合的测试步骤为:①输入系统控制句柄;②调用状态检测主接口,依次启动器件检测线程、数据帧捕获检测线程和获取设备性能参数的线程;③更改系统状态为激活状态;④注入硬件端口故障、FLASH 故障、VL 错误的数据帧、MAC 源地址错误的数据帧;⑤根据检测结果,更新故障参数。

期望的测试结果为:①系统状态为未激活时,状态检测线程挂起,不执行检测操作;②未注入故障之前,所有故障参数均为 0;③注入故障之后硬件端口

故障参数、FLASH 故障参数计数均为 1,缓冲区中 tail 的值+2。

3.2.2 故障诊断测试用例设计

故障诊断测试用例主要测试能否诊断发生异常以及异常恢复,并能在发生异常时进行故障类型的分析。具体测试用例集如下:

故障诊断测试用例集的标识为 NMFD_Test_02,模块名称为故障诊断。

测试项分别为:①加载诊断策略;②异常类型诊断;③异常恢复诊断;④数据帧解析和特征参数统计;⑤诊断结果生成。

测试输入为系统控制句柄、故障参数。

针对该类用例集的测试步骤为:①输入系统控制句柄和故障参数;②将系统状态改为策略加载状态;③调用故障诊断主接口,开启异常诊断线程;④将系统状态改为激活状态;⑤依次注入设备无服务异常、减缓服务异常、错误服务异常,并同时注入 VL 错误和 MAC 源地址错误的数据帧。

期望的测试结果为:①系统状态为策略加载状态时,故障诊断线程挂起,不执行诊断操作;②系统状态为激活状态时,开始异常诊断,检测到异常发生的时间,并生成诊断结果;③故障类型分析正确执行;④诊断结果与累计的故障特征参数与实际注入的故障相符;⑤成功检测到异常恢复的时间,并停止故障类型分析。

3.3 实验结果

为保证 AFDX 网络设备监控诊断工具可以在机载软件系统上正常运行,本文从实时性、并发性等方面对工具进行非功能性测试,以确保工具自身满足机载软件的要求。

1) 实时性测试

实时性是机载软件质量的重要评价指标,本文通过"程序插桩"来计算各功能的运行时间。本文插桩主要记录程序运行时刻,具体测试方案及结果如表 3 所示。

表 3 实时性测试

测试功能	测试输入	实际结果
状态检测	在获取状态参数前后进行程序插桩并测试 100 次,统计平均更新时间;	平均每次消耗时间 0.23 ms
	在数据存储前后进行程序插桩并测试 100 次,统计平均存储时间	平均每次消耗时间 17 ms
故障诊断	在工具开启新的诊断周期前和获取诊断报告后插桩,测试 100 次,统计故障诊断时间	平均每次消耗时间 51 ms

2) 并发性测试

AFDX 网络设备监控诊断工具包含多进程和多线程,本文通过模拟运行时情况来测试工具的并发性,具体测试方案及结果如表 4 所示。

表 4 并发性测试

测试输入	实际结果
同时发送 10 条消息指令	消息管理为指令消息建立队列依次进行编码解码后发送到相应的指令处理程序,并为相应指令的响应消息创建队列,依次发送到数据通信服务
同时发送 50 个数据包	状态检测为数据包创建缓存队列并依次统计相关信息后发送到数据存储服务
同时检测 20 种故障类型	状态检测依次执行相应的检测程序,并周期性更新故障参数

4 结 论

本文是根据机载故障诊断的局限性以及 AFDX 网络故障诊断的复杂性等问题,结合实际的项目需求,研究了 AFDX 网络设备监控诊断技术方案,并设计实现了 AFDX 网络设备监控诊断工具,可以很大程度上拓宽机载维护的范围,能在网络层面上进行监控,降低虚警概率,提高了诊断效率,能够实现对 AFDX 网络的实时监控和诊断。

参考文献:

[1] ZHONG M, XUE T, DING S X. A survey on model-based fault diagnosis for linear discrete time-varying systems[J]. Neurocomputing, 2018, 306: 51-60

[2] PAN M, ZHENG D, LAI X, et al. State estimation based fault analysis and diagnosis in a receiving-end transmission system [C]//2022 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies, 2022: 1107-1112

[3] MD A, FAISAL K, AHMAD I S, et al. A bibliometric review and analysis of data-driven fault detection and diagnosis methods for process systems[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(32): 10719-10735

[4] PULIDO B, ZAMARRENO J M, MERINO A, et al. State space neural networks and model-decomposition methods for fault diagnosis of complex industrial systems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2019, 79: 67-86

[5] PU C, ZHOU F, LI L. Fault diagnosis method based on recursive federated transfer learning under multi rate sampling[C]// 2021 China Automation Congress, 2021: 6502-6507

[6] DAI J, TANG J, HUANG S, et al. Signal-based intelligent hydraulic fault diagnosis methods: review and prospects[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(5): 22

[7] ZHANG M, SU B, ZHAO L, et al. User information intrusion prediction method based on empirical mode decomposition and spectrum feature detection[J]. International Journal of Information and Communication Technology, 2020, 16(2):99

[8] SHANG J, ZHOU D, CHEN M, et al. Incipient sensor fault diagnosis in multimode processes using conditionally independent Bayesian learning based recursive transformed component statistical analysis[J]. Journal of Process Control, 2019, 77:7-19

[9] LAHDHIRI H, SAID M, ABDELLAFOU K B, et al. Supervised process monitoring and fault diagnosis based on machine learning methods[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(5/6/7/8): 2321-2337

[10] CHI Y, DONG Y, WANG J, et al. Knowledge-based fault diagnosis in industrial Internet of Things: A survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(15): 12886-12900

[11] TIDRIRI K, CHATTI N, VERRON S, et al. Bridging data-driven and model-based approaches for process fault diagnosis and health monitoring: a review of researches and future challenges[J]. Annual Review in Control, 2016, 42: 65-81

[12] CHATTERJEE B, MITRA S, LAHA R, et al. Fault diagnosis in vehicular networks using do-calculus[C]//2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, 2019

[13] BONDORF S, NIKOLAUS P, SCHMITT J B. Catching corner cases in network calculus-flow segregation can improve accuracy [C]//International Conference on Measurement, Springer, Cham, 2018

[14] 章子游, 赵千川, 杨文. 基于网络演算的网络故障检测方法[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(11): 1861-1870
ZHANG Ziyou, ZHAO Qianchuan, YANG Wen. Network faults detection based on network calculus[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(11): 1861-1870 (in Chinese)

[15] ZHANG D, WANG J. Analysis on intelligent fault diagnosis technology of industrial control network[C]//2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers, 2021: 384-388

[16] HARLI E. Pemilihan network monitoring system berdasarkan kajian efektifitas sistem informasi dengan pendekatan AHP: Studi Kasus pada "PT. TUV"[J]. Jurnal Edukasi dan Penelitian Informatika, 2016, 2(1): 64-70

[17] DESAI V. TCP/IP network management: a case study[M]. New York: Auerbach Publications, 2020: 209-218

[18] LIU Z. FDM: a network fault diagnosis model based on knowledge and reasoning[C]//2007 International Symposium on Communications and Information Technologies, 2007: 785-789

[19] SUN Y, ZHANG S, MIAO C, et al. Improved BP neural network for transformer fault diagnosis[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 17(1): 138-142

[20] 杜江, 童志华. 用 Tivoli Netview 进行网络管理需解决的问题[J]. 农业发展与金融, 2003(10): 41-42
DU Jiang, TONG Zhihua. Problems to be solved in network management using Tivoli Netview[J]. The Agricultural Development and Finance, 2003(10): 41-42 (in Chinese)

[21] SLABICKI M, GROCHLA K. Performance evaluation of CoAP, SNMP and NETCONF protocols in fog computing architecture [C]//2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, 2016: 1315-1319

[22] 王秀丽, 王海英. 浅析 SiteView NNM 的技术架构[J]. 中国科技博览, 2009(26): 320-320
WANG Xiuli, WANG Haiying. Analysis of the Technical Architecture of SiteView NNM[J]. China Science and Technology Review, 2009(26): 320-320 (in Chinese)

[23] 王竹清, 肖立民, 胡玉其. AFDX 网络系统监控设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(7): 62-65
WANG Zhuqing, XIAO Limin, HU Yuqi. Design and Implementation of AFDX network system monitoring scheme[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(7): 62-65 (in Chinese)

[24] 景文君, 励建东, 崔杰. 基于 AFDX 总线的航电系统监控通信机制的研究与实现[C]//2016 第五届民用飞机航电系统国际论坛, 2016: 202-207
JING Wenjun, LI Jiandong, CUI Jie. Research and realization of monitoring and communication mechanism for avionics system based on AFDX bus[C]//Civil Avionics International Forum 2016, 2016:202-207 (in Chinese)
[25] 陈文豪, 郭子彦, 王立, 等. 复杂机载电子系统故障综合诊断技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(11): 1-4
CHEN Wenhao, GUO Ziyan, WANG Li, et al. Research on integrated fault diagnostic of complex avionic system[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(111): 1-4 (in Chinese)
[26] 宋丽琼, 宋东, 李经委. 基于多信号模型的机载设备综合诊断方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(4): 975-978
SONG Liqiong, SONG Dong, LI Jingwei. Integrated fault diagnostic method research of airborne equipment based on multi-signal model[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(4): 975-978 (in Chinese)
[27] 胡亮, 张尧. 基于 PHM 的机载模块 BIT 设计及故障诊断系统构建[J]. 光电技术应用, 2018, 33(2): 73-78
HU Liang, Zhang Yao. Airborne module BIT design and fault diagnosis system construction based on PHM[J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(2): 73-78 (in Chinese)
[28] 张连明, 陈志刚, 黄国盛. 网络演算理论及应用研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(27): 5
ZHANG Lianming, CHEN Zhigang, HUANG Guosheng. A survey on theory and application of network calculus[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(27): 5 (in Chinese)

AFDX network equipment fault diagnosis technology

HU Lei[1], LIU Yang[2], GUO Qingchao[1], SHI Yu[3], MA Chunyan[3], ZHANG Jiandong[4], ZHANG Tao[3]

(1.General Pneumatic Department, Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110034, China;
2.Integrated Avionics Department, Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110034, China;
3.School of Software, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
4.School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: This paper focuses on the network equipment fault monitoring and diagnosis software, and studies the fault diagnosis of the monitored AFDX network based on the network algorithm. Firstly, the range fault characteristic parameters are designed to identify the fault type, and the correlation between the detection results and the fault characteristic parameters at each location can be obtained. Secondly, the data storage management scheme of the first level filtering and the second level caching mechanism is designed for the data collected in the detection. Then, according to the designed fault classification, fault diagnosis methods are given respectively, and the occasional anomalies are identified and suppressed. Finally, the network fault diagnosis verification module is designed, and the experimental verification is carried out from the perspectives of real-time and concurrency. The verification results prove the effectiveness of the method.

Keywords: AFDX network; network equipment; fault diagnosis; network monitoring

引用格式: *胡磊, 柳杨, 郭卿超, 等. AFDX 网络设备故障诊断技术[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(3): 546-556*
HU Lei, LIU Yang, GUO Qingchao, et al. AFDX network equipment fault diagnosis technology[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(3): 546-556 (in Chinese)