

AFDX 交换机软件构型分析

许博文¹ 李煜甫¹ 李 航¹
XU Bowen LI Yufu LI Hang

摘要

航空电子以太网在航电系统发挥着越来越重要的作用。网络与设备的演进，是未来航空电子以太网的发展趋势。航空电子以太网的核心设备是 AFDX 交换机，AFDX 交换机被当作一个独立的设备，缺乏与系统平台的交互，这在民用航空的适航认证过程中是难以被认可的。基于此，文章针对上述 AFDX 交换机适航认证软件符合性的缺陷，在软件构型过程的分析中，提出了健康管理 and 状态管理来改进传统的 AFDX 交换机的软件构型。将 AFDX 交换机的信息通过周期性监控报告上报给 IMA 平台，IMA 平台的指令下发给 AFDX 交换机，将 AFDX 交换机作为 IMA 平台的一个 LRU/LRM 来管理，来改进传统 AFDX 交换机的软件构型。

关键词

AFDX 交换机；IMA 平台；软件构型；健康管理；状态管理

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.02.003

0 引言

AFDX 交换机基于 IEEE802.3 以太网，利用商用货架（COTS）网络化、虚拟链路和冗余管理等^[1]技术实现飞行器设备间的数据高速通信，提高数据传输的可靠性和服务质量^[2]，因此 AFDX 交换机已被广泛应用于飞行器网络的通信。在国内，伴随着低空经济的高速发展，有关航空电子技术研究与应用领域的系统集成商和设备制造商对此高度重视，并积极展开该领域广泛的研究^[3]。

AFDX 交换机属于航电系统的网络连接设备，航电系统是飞行器上最重要的子系统之一，关系到飞行器的安全性、可靠性、先进性和成本^[4]。不论是民机、军机^[5]，还是特种任务飞机，航电系统都是保证机组人员安全、高效完成飞行任务的重要基础。空客波音等民用航空巨头公司，均采用以 IMA 为主的综合航电系统。IMA 支持系统持续升级、迭代优化。此项技术对系统提出开放式、模块化以及高度互联互通等要求。此时 AFDX 交换机需要作为 LRU/LRM 与 IMA 平台进行信息交互，为此本文从健康管理和状态管理两方面进行平台与设备交互功能的升级，将系统需求，软件需求、软件实现合理管控，提高了 AFDX 交换机安全性与可靠性。

AFDX 交换机分为内置交换机 NSM 和外

置交换机 RSU 两部分，为 IMA 平台提供网络连接、数据交换及网络管理功能。航电处理资源与外部设备进行网络信息传输的主体由两台基于 ARINC664 网络的外置的远程交换单元组成，可以实现机柜内部各模块与机柜外部各设备节点之间的网络互联。针对平台存在的单点故障，设计了双余度的 A664 通信网络^[6]。远程交换单元作为航电核心处理平台核心交换部件，负责为机柜同外部 ARINC 664 网络接口设备提供数据传输服务。具体连接关系如图 1 所示。

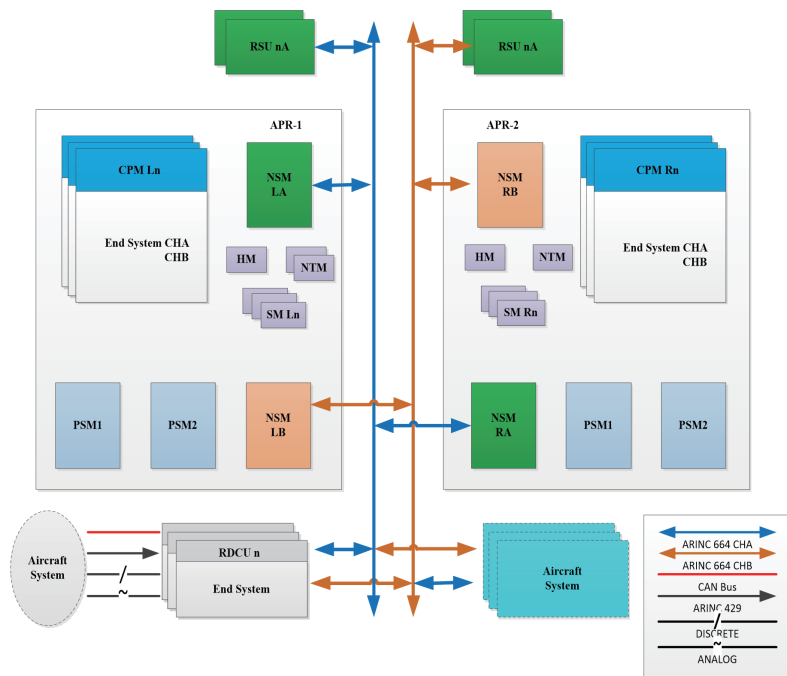


图 1 航电核心处理平台架构图

1. 中航工业西安航空计算技术研究所 陕西西安 710065

1 健康管理功能

交换机健康管理功能是交换机的支持功能，研制保障等级为 A 级。传统的 AFDX 交换机只专注于设备状态的管理^[7]，而民用航电系统需保证系统需求、设备需求、软件需求的追溯与传递，意味着 IMA 平台对 AFDX 的功能接口信息的传递需有效的通信机制。AFDX 交换机健康管理通过 PMR 的形式提供了设备上报平台的接口，通过 PMR 向 IMA 平台上报交换机故障状态。一方面将检测到的故障进行过滤，减少冗余的故障报告；另一方面将检测到的硬故障记录到非易失性内存（NVM）中，形成故障日志。当接收到来自 OHMS 的故障历史检索请求以及 IBIT 请求时，AFDX 交换机应下载故障历史记录，完成 IBIT 检测，并报告 IBIT 状态。具体连接关系如图 2 所示。

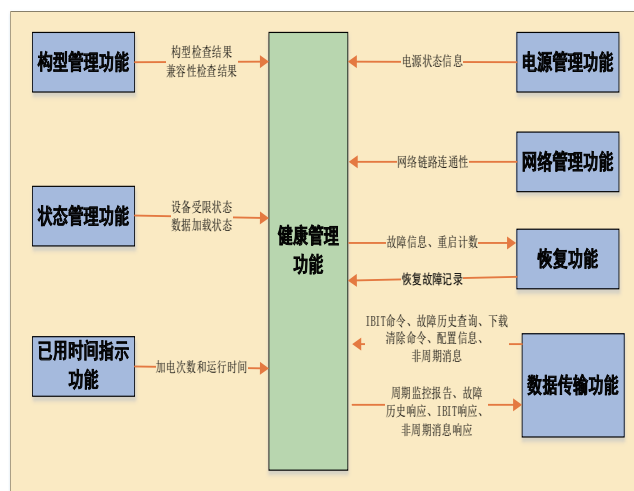


图 2 交换机健康管理功能交互

健康管理功能可进一步分为故障探测与过滤功能、故障记录功能、IBIT 管理功能、故障上报功能、故障历时检索功能。交换机健康管理的主要功能为故障检测与过滤和故障上报与记录功能。二级功能间交互如图 3 所示。

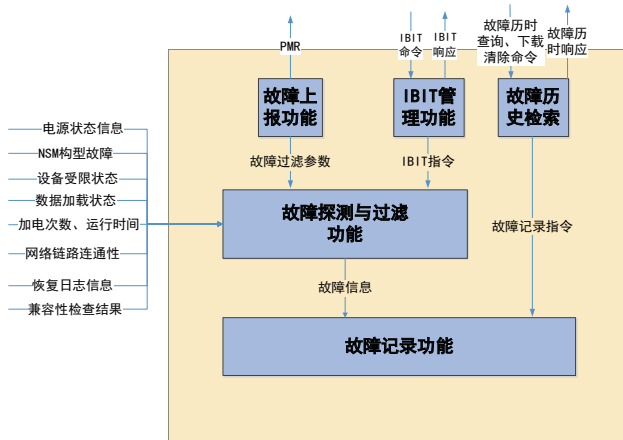


图 3 健康管理功能架构示意图

1.1 故障检测与过滤

交换机健康管理功能使用 BIT 对交换机进行故障检测与监控，对检测到的故障根据配置文件进行过滤后将故障状态上报给 IMA 平台健康管理功能。

交换机支持 3 种类型的 BIT^[8]。上电 BIT：完整上电 BIT（PBIT），在上电期间执行的 BIT（设备处于非受限状态下），用于检测与平台配置、硬件有关的故障，以及无法连续监控等其他故障。精简上电自检，在上电期间执行的 BIT（无论设备处于受限状态还是非受限状态），主要完成和飞行安全相关的关键设备内部测试项；连续 BIT（CBIT）：平台运行过程中连续执行的 BIT，用于监控平台状态；初始化 BIT（IBIT）：由 OHMS 系统发起的 IBIT 测试。

以上 3 种 BIT 可以用于检测和监控设备故障。由于 IMA 平台只报告和记录硬故障，因此各设备健康管理功能针对“硬故障”进行上报。被报告的故障状态应是 3 种状态（Active/Inactive/Latched）。具体的含义如下：

Active：指示当前已检测到的故障。

Inactive：指示当前未检测到故障。

Latched：当由于状态更改（无法进行进一步监视）而不再监视的故障或发生需要维护措施的持续性故障发生时，故障应该被锁定。通常只有在 IBIT 检测到故障不再有效时，才清除锁定的故障。

为保证 IMA 平台健康管理功能能够周期的接收到故障报告，实时的了解交换机的状态，交换机健康管理功能应监测其自身运行状态及参数，得到故障信息并对故障进行过滤后，按周期要求给平台级健康管理功能发送周期监控报告，报告包括：设备状态信息、接口故障信息、有效性检查信息、电源输入故障信息、数据加载功能状态信息、软件配置错误信息、软件兼容性错误信息、R/U 状态信息、NVRAM 状态信息、设备累计运行时间、设备累计上下电次数等。

1.2 故障上报与记录功能

为保证 IMA 平台健康管理功能能够周期的接收到故障报告，实时的了解交换机的状态，交换机健康管理功能监测其实时运行状态及参数，得到故障信息并对故障进行过滤后，按周期要求给平台级健康管理功能发送周期监控报告，报告包括：交换机自身的内部硬件故障、电源丧失故障、电源接口故障、超温故障、交换机接口故障、物理接口故障、兼容性故障、构型故障以及运行状态信息。

交换机健康管理功能将使用故障历史文件中存储的故障日志信息进行交换机设备故障分析和故障趋势可靠性分析活动。只有“硬故障”才会被记录到交换机 NVM 存储的故障日志中。交换机故障历史文件通过 ARINC615A^[9]

数据下载操作获取。交换机“硬故障”，例如：持久的硬件故障、硬件相关故障、软件异常、资源超限故障以及兼容性故障需要连同故障触发时的设备状态信息被记录到故障历史文件中。

交换机故障历史文件应该能够在自身 NVM 中维护并存储 256 个故障日志条目。故障记录日志中还包含故障发生时的民机状态信息，民机状态信息将从 OHMS 系统发出的民机状态消息中获取。

交换机故障日志中的每项故障信息需要记录故障发生时刻的以下民机 / 设备状态信息，包括并不限于：故障代码（由故障检测源提供）、发生次数、交换机设备持续运行时间（由交换机 ETI 功能提供）、日期（由有效的 OMS_Aircraft_Status 消息提供）、UTC 时间（由有效的 OMS_Aircraft_Status 消息提供）、航段（Flight Leg，由有效的 OMS_Aircraft_Status 消息提供）、飞行阶段（Flight Phase，由有效的 OMS_Aircraft_Status 消息提供）、ICAO 代码（由有效的 OMS_Aircraft_Status 消息提供）、注册号（由有效的 OMS_Aircraft_Status 消息提供）、航班号（Flight Number，由有效的 OMS_Aircraft_Status 消息提供）、目的地和出发地机场（由有效的 OMS_Aircraft_Status 消息提供）、交换机温度、LSAP 件号、交换机安装位置。

其中，故障代码经过过滤和上报操作以后，将交换机的关键故障记录在 NVM 中，用于检测交换机的健康状态。故障的过滤机制可以保证 NVM 存储交换机的关键信息，合理的使用交换机的存储资源。

2 状态管理

ARINC 664P7 协议定义了 AFDX 的交换机的内部工作模式，该部分 AFDX 交换机的状态不能满足 IMA 平台管理的需求，本文在参考 P7 协议的同时做出两点改进：引入了 IMA 平台对 AFDX 交换机的管理，改进了交换机内部之间的状态转换。交换机状态管理功能主要负责：获取交换机受限 / 非受限状态，获取交换机数据加载禁止 / 允许状态，管理交换机设备运行模式状态转换。

2.1 DL P/A、R/U 状态管理

R/U：受限 / 非受限状态的确定和管理。

P/A：数据加载禁止 / 允许状态的确定和管理；当交换机接收到 IMA 平台下发的 IMA_STATE 消息时，首先检测交换机的构型检查与兼容性，检查通过后，从接收到的消息按照 FICD 定义的要求，获取状态管理命令字。此时 AFDX 交换机的外部状态确定，该状态仅与平台下发的消息有关，不受内部模式转换的限制。交换机受限 / 非受限状态判断转换关系如图 4 所示。

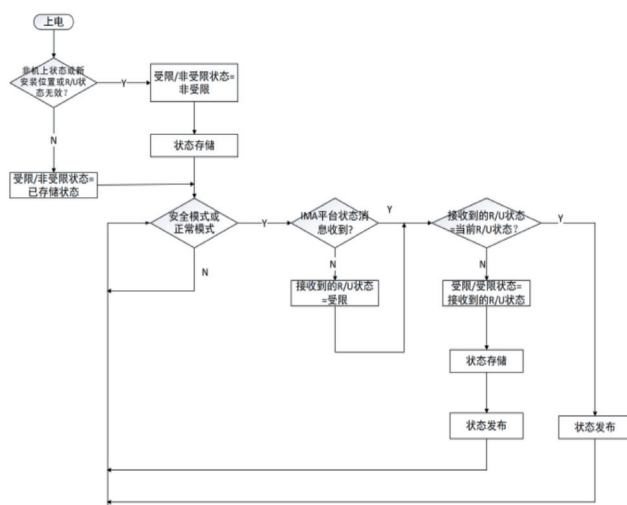


图 4 交换机受限 / 非受限状态判断转换关系

2.2 状态切换功能

交换机在运行工作之后将会进入不同的工作模式，不同工作模式下交换机的行为不同，传统 AFDX 交换机的状态转换，运行模式来源于 ARINC664 P7 规范。本文在 ARINC664 P7 规范的基础上，进行了改进。在状态转换中，引入了安全状态用来进行构型检查。在内部转换的条件中引入了兼容性检查的适配。内部状态包括：初始化模式（INIT State）、内场模式（SHOP State）、安全模式（Safe State）、数据加载模式（机上 / 非机上 DL State）、正常模式（Normal State）、停止模式（Halt State）、有限运行模式。

当交换机处于安全模式状态时，交换机将提供可用但不保证数据完整性的网络传输服务。交换机内部驻留的所有支持功能将正常运行。当交换机处于数据加载模式状态时，交换机将允许通过自身提供的 ADN 接口完成基于 ARINC615A 协议的机上或者非机上的数据加载（数据上载或下载）操作。交换机在此状态下不会执行任何周期性构型或者健康状态报告功能，但可以通过 SNMP 协议获取 / 检索交换机设备的当前状态信息。

当交换机处于正常模式状态下时，交换机将按照预先加载的配置文件的定义为民机第三方驻留功能提供正常的网络传输资源服务。交换机内部驻留的所有支持功能将正常运行。

交换机应符合上电时序相关需求，以提供确定性的网络传输服务。交换机应确保在非受限状态下（未探测到故障）启动初始化之后 10 s 以内进入安全模式；当航电核心处理平台在受限状态下启动时，航电核心处理平台数据传输功能应在 4 s 内提供传输服务。在安全模式下提供不保证数据完整性的网络传输服务。

交换机应通过 PMR 消息上报自身运行状态参数信息。

交换机运行模式状态转换关系如图 5 所示, 关键转换路径描述如下:

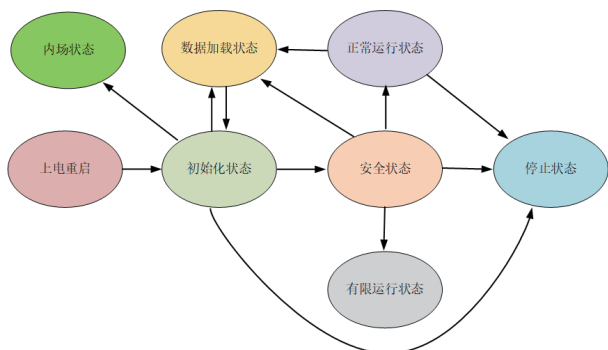


图 5 交换机状态转换图

当以下条件均满足时, 交换机应能从初始化模式状态转换到内场模式状态: (1) 精简 PBIT 测试结果正常; (2) 交换机位置离散量无法获取或者位置离散量显示交换机处于“非机上”安装位置; (3) 已成功加载默认配置文件; (4) 内场模式离散量被激活。

当以下条件均满足时, 交换机应能从初始化模式状态转换到非机上数据加载模式状态: (1) 精简 PBIT 测试结果正常; (2) 交换机位置离散量无法获取或者位置离散量显示交换机处于“非机上”安装位置; (3) 已成功加载默认配置文件; (4) 内场模式离散量未被激活。

在数据加载成功之后, 交换机将自动重启并进入初始化模式状态, 以便新加载的数据 / 软件能够被正常使用; 当以下条件均满足时, 交换机应在完成 PBIT 测试后进入安全模式状态: (1) PBIT 测试中未发现致命错误或故障; (2) 交换机外部位置离散量输入有效; (3) 交换机外部位置离散量未显示交换机处于“非机上”安装位置; (4) 当前有效的机上配置可用; (5) 交换机设备位置属于机上配置范围。

当以下条件均满足时, 交换机应从初始化模式状态转换到机上数据加载模式状态, 同时接受数据加载请求: (1) 精简 PBIT 测试未检测到致命错误或故障; (2) 交换机设备位置离散量被成功识别; (3) 交换机位置离散量识别未处于“非机上”安装位置; (4) 交换机系统配置文件不可用或者与当前交换机设备位置不匹配; (5) 交换机备份配置文件可用并已被成功加载。

在数据加载成功之后, 交换机将自动重启并进入初始化模式状态, 以便新加载的数据 / 软件能够被正常使用。

当以下条件均满足时, 交换机应在 1.5 s 以内从安全模式状态转换到正常模式状态: (1) BIT 测试检测出的故障未识别为致命错误或故障; (2) 交换机 PMR 消息中的软件兼容性故障参数未激活; (3) 在接收到有效的“分发的 IMA 平台构型清单消息”之后, 交换机自身构型检查完成并且交换机 PMR 消息中的构型故障参数未激活。

当交换机处于安全模式状态或者正常模式状态时, 一旦发布的交换机 IBIT 非周期性命令响应消息中包含“In Test”

参数指令, 交换机应进入初始化模式状态, 并开始执行自身的 BIT 测试。

3 总结

不同于传统的 AFDX 交换机的软件实现, 民机机载软件相对于军机领域的软件的主要区别是其开发过程需要遵照相关适航要求并符合 DO-178B/C。在遵循 DO-178B/C 的开发过程中所形成的完整生命周期数据需经历严格的适航审查过程, 符合预期安全水平, 才能获批相关适航批准, 适用于民用航空器机载设备。本文基于适航标准和工程实践, 参考 DO-178B/C 和工程功能实践经验, 按照系统需求, 设备需求, 软件需求的追溯与派生, 明确 AFDX 交换机与 IMA 平台之间的信息交互, 建立复用软件的分类评估方法, 使 AFDX 交换机不再是一个孤立的设备。并针对不同类型的软件复用, 提出针对性的适航符合性方法。该适航符合性方法研究可辅助在项目初期充分评估软件复用的适航风险, 指导相关方制定软件复用过程的适航符合性策略, 降低后期复用软件的开发和适航审定成本。

参考文献:

- [1] 胡锦. 工业以太网与网络控制器 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [2] 刘增基, 鲍民权, 邱智亮. 交换原理与技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [3] 王骥, 杨永田, 徐光. 确定性实时以太网在航空电子系统中的应用 [J]. 航空电子技术, 2006(3):29-32.
- [4] 王鹏. AFDX 交换机及交换芯片中关键模块的设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [5] 王智鸣, 田金文. 三种 IP 核总线接口比较分析 [J]. 军民两用技术与产品, 2003(12):24-26.
- [6] 张勇涛, 黄臻, 熊华钢. 保证速率的 AFDX 交换机实时调度算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(12):1412-1416.
- [7] ARINC. Aircraft data network, part 7, avionics full duplex switched ethernet (AFDX) network [EB/OL]. (2005-09-27) [2024-06-23]. <http://www.doc88.com/p-335760498188.html>.
- [8] 石改辉, 张原. 全双工交换式以太网实时通信研究 [J]. 西北工业大学学报, 2008(4):476-480.
- [9] 武华, 马捷中, 翟正军. AFDX 端系统通信端口的设计与实现 [J]. 测控技术, 2009, 28(3):56-59.

【作者简介】

许博文 (1991—), 男, 陕西西安人, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 机载计算网络等。

(收稿日期: 2024-10-30)