

MASTER THESIS XIDIAN UNIVERSITY

代 号 10701

学 号 1020421192

分类号 TP911.22

密 级 公开

西安电子科技大学

硕士学位论文



题 (中、英文) 目

AFDX 网络关键技术研究

Research of Key Technology on AFDX

作 者 姓 名 姜丽云

指导教师姓名、职务

马建峰 教授

学 科 门 类

工学

学科、专业

计算机系统结构

提交论文日期

二〇一三年一月

西安电子科技大学

创新性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名：姜丽云

日期：2013.3.4

西安电子科技大学

关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属西安电子科技大学。本人保证毕业后离校后，发表论文或使用论文工作成果时署名单位仍然为西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密的论文在解密后遵守此规定）

本学位论文属于保密在____年解密后适用本授权书。

本人签名：姜丽云

日期：2013.3.4

导师签名：马建峰

日期：2013.3.4

摘要

机载通信网络技术是实现航空电子系统间大容量的高速数据交换的枢纽和核心,其功能和性能决定航空电子系统综合化程度的高低。ARINC664 规范标准的第 7 部分规定了一种具有高带宽和确保网络可靠传输的容错机制的航空专用数据交换的确定性网络,即航空电子全双工交换式以太网(Avionic Full Duplex Switched Ethernet, AFDX)。

本文结合科研项目——AFDX 网络系统设计与实现,即设计并实现满足 ARINC664 标准定义的 AFDX 端系统和交换机,对 AFDX 网络的研究如下:

1. 从当前课题研究的背景入手,介绍 AFDX 网络的国内外现状和未来的发展趋势;
2. 概要描述 AFDX 网络,突出 AFDX 网络上数据传输的确定性和完整性、网络的兼容性、实时性、可靠性等优点,介绍网络的基本组成部件以及网络的工作机制;
3. 重点对 AFDX 网络的关键技术从网络架构、协议标准、算法设计以及端系统和交换机的实现方法这四个方面作详细的分析。
4. 对 AFDX 网络做部件级和系统级的测试,对 AFDX 网络采用这些关键技术实现的功能和网络的性能提供客观的评价。

关键词: AFDX 终端系统 交换机 虚拟链路 确定性配置 过滤机制

Abstract

Airborne communication network technology is the hinge and kernel to implement the high-speed,large-volume data exchanges among the avionics systems.The function and performance of the airborne data bus determines the avionics system integration level.AFDX is an implementation of the ARINC 664 Part 7 standard, which provides reliable time determinism, guaranteed bandwidth, and fault tolerance suitable for flight safety.

With reference to the scientific research project “Design of the Avionics Full-Duplex Switched Ethernet(AFDX)”,that is to design and realize an AFDX End system and Switch in accordance with the definition of part 7 of ARINC 664 standards.This paper will be organized as follows :

1. The paper begin by the research background,introduces domestic and foreign status and development trend of AFDX network.
2. Brief description of the AFDX network will be given and it introduces the basic components and how the network works, while giving prominence to the characteristic of the network such as compatibility,real-time,relability,determine the data transmission over the network and the working mechanism of network.
3. This paper will go on to analyze the pivotal technology of the AFDX,we will analyze from four aspects:the network architecture,AFDX protocol,algorithm design and key technology of how to implementate the end system and switch.
4. Some tests of AFDX are performed from the components level and system level,which giving objective evaluation on The function and the performance of network.

**Keywords: AFDX End-System Switch Virtual link Deterministic collocation
Filtering mechanism**

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景	1
1.2 国内外现状及发展趋势	1
1.3 论文主要工作和内容安排	2
第二章 AFDX 网络概论	5
2.1 基本组成	5
2.2 网络特点	7
2.3 工作原理	7
第三章 AFDX 网络关键技术分析	9
3.1 网络架构	9
3.1.1 概述	9
3.1.2 双余度网络	10
3.2 协议标准	10
3.2.1 ARINC664 协议	12
3.2.1 端系统数据流传输协议栈	20
3.3 算法设计	22
3.3.1 端系统主机驱动软件端口重映射算法	22
3.3.2 端系统协议栈软件端口轮询记录算法	23
3.3.3 端系统协议栈软件接收端口查找算法	25
3.3.4 交换机初始化过程检测算法	26
3.4 本章小结	27
第四章 端系统关键技术实现	29
4.1 虚拟链路技术	29
4.1.1 虚拟链路隔离	29
4.1.2 虚拟链路调度	29
4.2 接收帧过滤技术	30
4.2.1 完整性检查	31
4.2.2 冗余管理	31
4.2.3 接收数据帧头常数域检查过滤	31
4.2.4 接收数据帧头校验过滤	32

4.2.5 接收数据与自身配置信息不匹配的过滤.....	32
4.3 区分服务的数据端口技术.....	32
4.4 通信过程中的身份确认技术.....	34
4.4.1 AFDX 网络内通信.....	34
4.4.2 AFDX 网络间通信.....	34
4.4.3 身份确认实例.....	35
4.5 确定性配置信息技术.....	37
4.6 本章小节.....	38
第五章 交换机关键技术实现	39
5.1 接收帧过滤技术.....	39
5.1.1 帧过滤.....	39
5.1.2 基于警管的流量控制.....	39
5.2 运行模式切换技术.....	40
5.3 监视功能实现技术.....	41
5.4 确定性配置信息技术.....	42
5.5 本章小结.....	43
第六章 AFDX 网络测试	45
6.1 端系统测试.....	45
6.1.1 测试平台.....	45
6.1.2 测试原理.....	45
6.1.3 虚拟链路包间隔测试.....	46
6.1.4 帧的传输顺序测试及分析.....	48
6.1.5 接收缓冲区溢出处理测试及分析.....	49
6.2 交换机测试.....	50
6.2.1 测试平台.....	50
6.2.2 测试原理.....	50
6.2.3 过滤错误帧功能测试及分析.....	51
6.2.4 VL 优先级测试及分析	52
6.3 AFDX 网络系统测试.....	55
6.3.1 测试平台.....	55
6.3.2 链路断开时继续传输的测试及分析.....	55
6.3.3 帧的传输转发顺序测试及分析.....	57
6.4 本章小结.....	58

第七章 结束语.....	59
致谢	61
参考文献.....	63
攻读硕士期间参与的科研工作.....	67

第一章 绪论

AFDX 全称为航空电子全双工交换式以太网(Avionics Full Duplex Switched Ethernet),是基于成熟商用以太网基础之上的一种由总线通信协议规范规定的专用于航空子系统之间数据交换的确定性网络。本章从课题研究背景入手,介绍了 AFDX 网络的国内外现状及未来的发展趋势。

1.1 课题研究背景

机载数据总线技术是现代先进飞机电传操纵系统和航空电子综合化最重要的关键技术之一,对航空电子系统起着至关重要的作用^[1]。随着航空电子系统复杂性的增加,无论是飞行关键任务还是乘客娱乐项目,都对机载数据总线的带宽提出了更高的要求。传统的机载数据总线 ARINC429、MIL-STD-1553 等,具有可靠性高、通信质量稳定等特点,在当代航空、航海等军事通信领域得到了广泛应用^[2]。但 ARINC429 最大带宽为 100Kbps, MIL-STD-1553 也只有 1Mbps,虽然近年来提出了具有 10M 带宽的增强型 1553 协议(EBR-1553),但仍然不能满足下一代航空电子系统对数据通信的要求。为此,波音和空客公司对在商业以太网技术的基础建立下一代机载电子设备的数据总线进行了探索。最终,产生了作为应用于要求实时性高、可靠性高和带宽大的新航空总线——AFDX。

AFDX 随着 20 世纪 90 年代空客 A380 项目的研制而发展,具有典型的工业标准特色^[3]。AFDX 网络是一种双余度网络,在原有的协议基础上对不同环境和设备的适应性进行了增强,不仅在传输速度和性能上有很大的提高,同时通过引入虚链路、BAG 等概念实现了数据传输的实时性和可靠性^[4]。AFDX 网络的设计者需要分析系统中相互关联的因素和网络本身存在的潜在的威胁,确保网络系统的服务质量,保障网络中数据的实时性、完整性和正确性,保护网络系统中的软件和硬件和各种数据信息不因偶然或者恶意原因而遭到破坏、更改和泄露^[3]。

1.2 国内外现状及发展趋势

AFDX 网络是从成熟的商业以太网发展而来,在商业以太网基础上针对航空系统的特有的要求提出了相应的约束。AFDX 网络采用网络交换机来代替普通以太网中的路由器和网关,采用加载配置信息机制避免了以太网中由于传输链路共享造成的信道冲突的威胁,网络协议符合 ARINC664 标准的要求,不仅在传输的

速度和性能上有大幅度的改善,而且实现了数据传输的高实时性和可靠性,采用了有效的机制保障了网络中的信息不因偶然或恶意因素而丢失、破坏和泄露^[5]。

国外对 AFDX 总线研究较为成熟^[4],在空中客车公司研制的 A380 客机和 A400M 军用运输机及波音公司研制的 B-787 宽体客机上 AFDX 航空数据总线均已得到成功应用,美国波音和欧洲空客公司已研制出相关的成熟产品并投入使用^[6]。

目前阶段,各大航空公司都在相继加入使用 AFDX 的技术阵营,使用 AFDX 还具有便于航空子系统的扩展和维护、减少系统布线、减轻飞机重量等优点,但相对于航空电子总线系统技术来说它还很年轻,今后它的发展将不会仅仅局限于标准中定义的功能和性能,必然需要会不断的从充满活力的商业应用中汲取养分,进一步保障网络的信息可靠,完善自己的技术标准。

1.3 论文主要工作和内容安排

本论文结合实习单位承担的科研项目----“航空全双工交换式以太网设计与实现”,主要致力于研究航空全双工交换式以太网可靠传输相关的一些关键技术,本文的内容安排如下:

第一章主要结合课题研究的背景,介绍了 AFDX 网络的国内外的现状和发展趋势。

第二章主要对 AFDX 网络进行了概要的介绍。首先介绍了 AFDX 网络的基本组成,网络主要由三部分组成:端系统、交换机和传输链路,然后介绍了网络的特点和优势,最后描述了 AFDX 网络的运行机制,对 AFDX 网络的运行有一个整体的概念,为下一章的关键技术研究准备一定的基础。

第三章作为本论文的重点理论章节,从三个方面研究了网络保证可靠性、稳定的传输的关键技术:网络架构、协议标准和软件算法设计。即从网络的整体架构入手分析,结合 ARINC664 标准协议的理论规定,研究了网络的软件算法方面一些关键算法的设计并对本章节做了整体的总结。

第四章对 AFDX 网络端系统在实现上采用一些关键技术做具体的研究,包括采用的虚拟链路技术、接收帧的过滤技术、通信过程中对身份的确认技术以及采用确定性网络配置信息等。

第五章主要研究了 AFDX 网络交换机在实现上采用一些关键技术。包括采用的接收帧的过滤技术、模式切换技术以及采用确定性网络配置信息等各种技术,并总结了将各种技术融会贯通的策略方法。

第六章测试首先从部件级测试分别测试了 AFDX 网络端系统和 AFDX 网络交换机,然后搭建了 AFDX 网络的系统测试平台,通过对测试原理的阐述和几个测试项实例的分析和测试,证明了 AFDX 网络的各项关键技术可以有效的保障网络

的高效并稳定运行的要求。

第七章进行全文总结，指出本篇论文的主要研究内容以及不足之处。

第二章 AFDX 网络概论

本章首先介绍了 AFDX 网络的基本组成,着重描述端系统和交换机这两个网络中的重要部件,接着介绍了网络的特点和优势,最后从网络系统的整体概念上描述了 AFDX 网络的运行机制,为下一章分析网络的关键技术准备一定的基础知识。

2.1 基本组成

AFDX 网络的三个主要组成部件是端系统(End-System, 缩写为 ES)、交换机(Switch)以及传输链路(Link),端系统之间的数据信息交换是通过虚拟链路(Visual Link, 缩写为 VL)进行的,VL 实现了从一个唯一的源端到一个或多个目的端逻辑上的链接,AFDX 网络内部设备的组成关系如下图 2.1 所示。

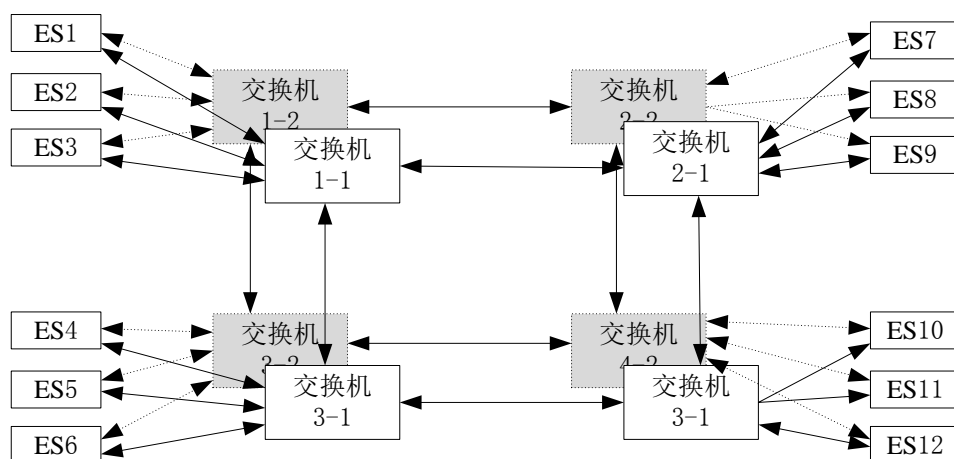


图 2.1 AFDX 网络基本组成

(1) 端系统

端系统是航空电子子系统用于接入网络的接口设备,是构成 AFDX 网络的重要网络元件,它嵌入在每个航空电子子系统中,将子系统与 AFDX 网络连接起来,负责消息的发送和接收。AFDX 的“确定性网络”的特性主要由端系统实现^[7],这些特性主要包括流量整形、完整性检测和冗余管理等。每个端系统都采用两路独立的接口,与端系统一路连接的链路或交换机故障不会导致网络上传输数据的丢失,从而实现双冗余度,保证了端系统之间可靠的数据通信。

(2) 交换机

AFDX 交换机在 AFDX 网络通信中处于重要的核心位置,负责在网络中进行

帧过滤、流量管理以及根据目的地址进行数据转发。与典型的商用以太网比较，AFDX 交换机采用确定性配置信息加载的模式，更侧重于保障网络的可靠性和确定性，因此牺牲了部分网络扩展的。

交换机的基本功能是数据帧的接收和转发^[8]。按照 ARINC664 part7 的要求，交换机应该包括的模块有：配置信息模块(Configuration Tables)、交换功能模块(Switching Function)、端系统模块(End System)、监控功能模块(Monitoring Function)、过滤仲裁模块(Filtering & policing Function)等。

交换机的功能框图如图 2.2 所示：

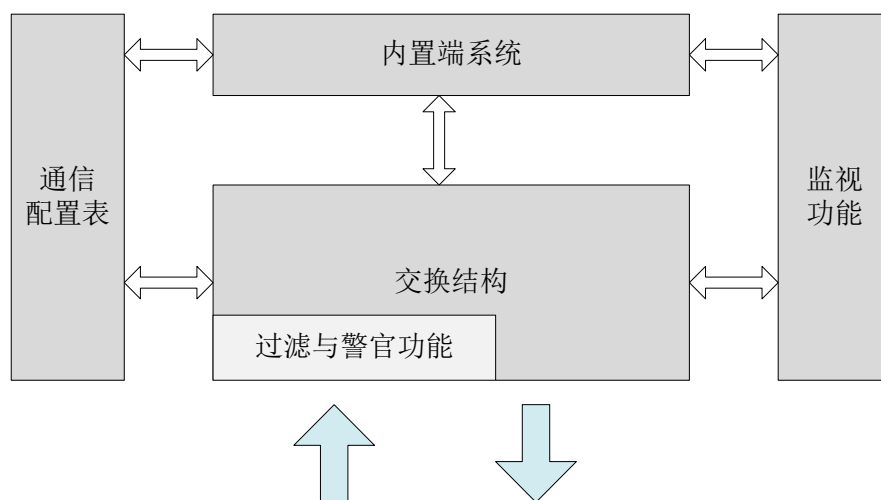


图 2.2 交换机的功能框图

经过链路的传递到达交换机的数据帧，在过滤与警管功能模块需要校验其帧的完整性、帧长度、流量预算、可接受的地址等参数在不同的步骤中被过滤，过滤完成后若没有错误的帧由交换功能模块被转发到合适的物理输出端口，这些确定的转发线路都由有静态配置信息中的配置数据来控制的，帧经过这些端口再次被发送到链路上，离开交换机。内置端系统提供的功能主要用于数据加载以及监视功能的实现，实现了将接收的帧传送给交换机，并允许交换机向外发送帧，即外部设备与交换机通信的方法。以上所有模块的操作均被监视功能模块监视下来以日志的形式记录成事件，例如某个帧到达、帧过滤的状态、CRC 校验的结果等，并且还创建关于内部状态的统计量。由于交换机是网络中的一部分，监视功能与网络管理功能(Network Management Function)通信，通信内容是操作信息和有关于健康状态的信息。

（3）传输链路

链路是用于连接端系统和交换机的物理通路，通常可以使用铜或光纤作为其传输介质。地面测试时可以使用普通RJ45水晶头网线进行连接，在标准的飞机控

制使用同轴4根线进行网络连接,这种连接线采用军用标准接口,确保了飞机在抖动颠簸的情况下连接不受影响,提高了网络数据的稳定性和可靠性。

2.2 网络特点

AFDX 网络针对以太网标准的传输时间不确定性、不能保证数据传输的完整性和正确性等缺点,采用虚链路时间分配机制和余度管理等技术,不仅满足航空电子系统对数据通信带宽的需求,而且满足了航空电子领域应用的高可靠性、高实时性要求。

AFDX 网络是在商用以太网的基础上发展起来的,以太网是目前应用最为广泛的网络技术,技术支持资源丰富,开发工具和环境健全,价格低廉。该网络采用网络交换机代替商用以太网中的集线器、网桥和路由器,采用 MAC 帧交换技术,减少了信道阻塞,提高了传输速率。由于摆脱了共享信道模式,也为更好地实现局域网的可靠提供了技术基础^[7]。

AFDX 网络中由于网络结构相对固定所以在加载配置时就将端系统之间的数据交换路径固定下来,而不是采用典型以太网交换机中“自动学习”算法建立互连路径,保证不会由于路由转发延误或丢失而导致数据传输时间的不可测或是数据包的丢失^[9]。AFDX 网络的交换机和端系统的网络通信严格按照规定的通信参数由系统设计人员配置而形成的统一的交换机配置信息和端系统配置信息,这样有效的确保了网络通信的确定性。在航空电子网络中确保数据的顺序是至关重要的,因此 AFDX 网络采用简单序号策略机制来保证包按顺序传输,其中序号之间存在数字的顺序联系,这样可以保证数据的完整性。

AFDX 网络是一个典型的星型拓扑网络,可以支持分区域构成若干个局域网,每个局域网由功能相近的设备连接构成网络交换机之间支持级联,因此一个终端的接入或拔出不会引起其他终端软件的更改,这样就使得 AFDX 网络具有网络结构灵活、可扩展性强的特点。

2.3 工作原理

AFDX 网络从系统上电开始运行,初始化完成后,会给网络中的交换机和端系统加载通信使用的确定的配置信息,当应用程序发送消息到通信端口时,由于每一个通信端口对应唯一的一条虚拟链路,而虚拟链路所对应的源端系统、目的端系统是事先通过配置信息预设好的,所以该消息可以通过端口对应的虚拟链路传递到正确的端系统的接收端口^[10]。

如图 2.3 所示, 航空电子子系统需要发送消息 **Message**, 首先将消息发送到端系统 1 的端口 1 上, 端系统 1 处理该消息将消息经过协议栈的处理打包成以太网帧, 该帧通过 VLID 为 100 的虚拟链路经过链路发送到 AFDX 网络交换机中。交换机端口接收到帧后查询初始化时加载的配置信息, 查得端口和虚拟链路的转发对应关系, 按照配置信息中制定的虚拟链路对应的转发端口将该帧转发至输出端口, 如图, VLID 为 100 的虚拟链路将帧转发到端系统 2 和端系统 3。端系统链路上接收到帧后, 解析帧的头部信息, 查找加载的配置信息中的接收端口信息, 查找到接收端口后将数据提交给上层应用程序。

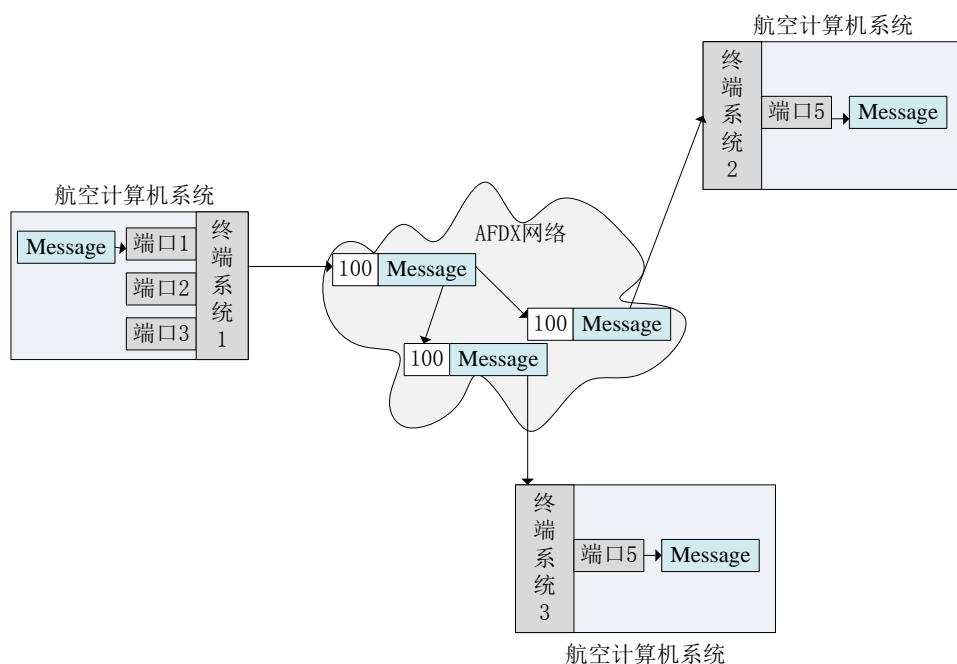


图 2.3 航空电子系统消息传输流程

第三章 AFDX 网络关键技术分析

本章作为本篇论文关键技术理论分析的重点章节,对 AFDX 网络的关键技术从网络架构、协议标准和软件算法设计三个方面进行较为全面的分析。

3.1 网络架构

本节将对 AFDX 网络的架构进行详细的分析,从 ARINC653 协议标准提出分区概念,由不同分区的航空电子子系统的通信需求引入了 AFDX 端系统,然后由端系统连接到 AFDX 网络内部,通过 AFDX 交换机和其他子系统通信。在 AFDX 网络内部重点分析了为保证网络的可靠传输在物理层搭建双余度的网络、端系统在数据链路层接收数据时采取的完整性检查及冗余管理技术等。

3.1.1 概述

AFDX 网络采用采样、队列、SAP 端口服务能够和 ARINC653(航空电子应用软件标准接口)标准完美地衔接。ARINC653 标准主要定义了航空电子系统对操作系统的功能、性能要求等,是一种航空电子系统应用接口的首选的一种标准^[11]。

AFDX 网络与航空计算机子系统的连接主要由端系统完成^[11],端系统是机载系统计算机与 AFDX 网络的接口,端系统宿主在机载计算机系统中,交换机负责机载计算机系统基于 AFDX 网络进行通信时数据的存储转发,连接关系如图 3.1 所示。

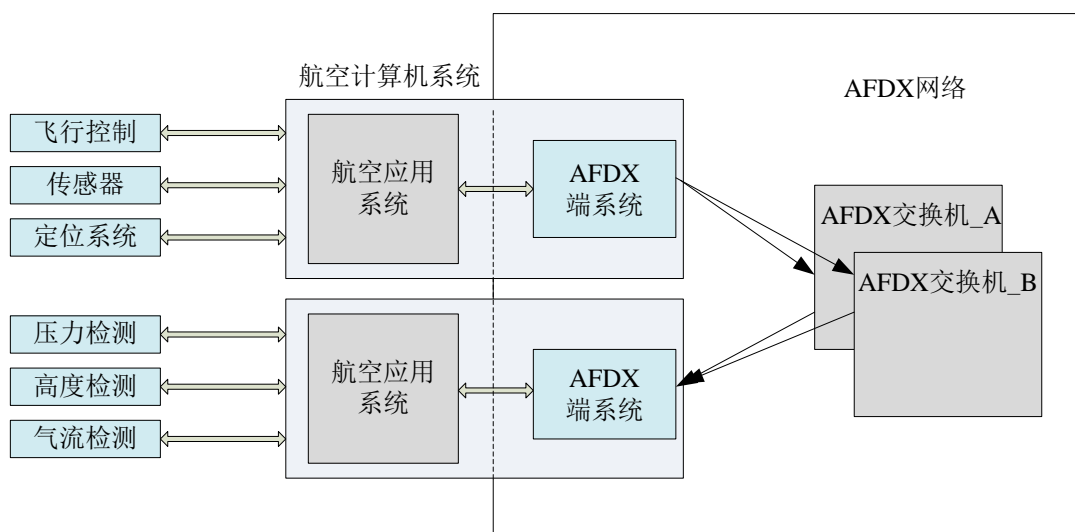


图 3.1 AFDX 网络与航空子系统的连接关系

3.1.2 双冗余网络

AFDX 网络为了保障数据传输的可靠性要求,防止因交换机的意外故障或者链路断开的原因导致系统的崩溃,在实际应用中采用双冗余的备份方案,端系统之间通过多个独立冗余的链路进行相互通信,这样可以大大避免以上的故障对通信造成的影响,也消除了由链路切换造成的延迟对网络数据通信的影响。

一般情况下,AFDX 网络端系统采用双 MAC 的冗余设计保证网络通信的可靠性。每个端系统具有两个独立的物理端口,在航空电子系统中,两个物理端口以互为冗余的方式工作。在 AFDX 系统中有两个独立的交换网络:网络 A 与网络 B,如图 3.2 所示。

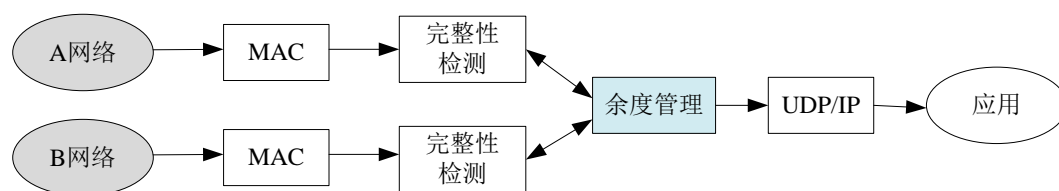


图 3.2 双冗余网络通信

发送数据时,两个物理端口分别通过独立的传输路径发送冗余的数据帧。为了区分数据,AFDX 网络引入了帧序列号(Serial Number,简称 SN)的概念,即在数据帧格式定义时,将数据域中的最后一个字节定义为 SN^[12],用于计数帧的发送顺序,每发送一帧,序列号加 1。当达到上限 255 时,回滚到 1。序列号 0 保留,用来表示源端系统复位。每个 VL 都有自己独立的帧序列计数器。当某个 VL 发送数据帧时,根据 VL 配置的网络选择参数,确定使用端口 A 发送、端口 B 发送、或者两个端口同时发送。如果网络选择参数为两个端口同时发送,端系统会从端口 A、B 同时发送一个数据帧的两个拷贝。数据帧中封装虚拟链路帧序列计数,发送完成后虚拟链路帧序列计数器加 1^[12]。

接收数据时,从链路层传入的数据帧要进行冗余处理。冗余帧处理的基本规则是:首先,进行完整性检查,即检查成功到达帧的帧序号均符合顺序要求;然后,进行冗余处理,端系统确定是接收该帧,还是由于这个帧的一个拷贝已经抵达而丢弃该帧。根据“接收最先收到且有效”(First Valid Wins)的原则重建一个没有副本的单一序列流^[12],即接收终端节点接收到第一个有效的帧,将它传送给应用程序,一旦接收到一个有效的帧后,后面接收的具有相同顺序号的帧就被丢弃。

3.2 协议标准

为了确保网络中信息传递的正确性、完整性和有效性,我们需要采用标准的

的网络协议。ARINC 系列协议是属于 ARINC 公司负责制定的、由工业标准以太网经过适应性改进而成的下一代航空数据网络(Avionic Data Net, ADN)标准,其适应性改进主要体现在对大中型飞机上相对恶劣环境的抵抗、保证信息传输实时性、提高系统可靠性等方面^[13]。ARINC664 协议规范的八个组成部分如表 3-1 所示,其中,ARINC664 协议规范的第七部分定义的 AFDX 网络是一个全双工的、有一定确定性的航空系统使用的可配置数据网络^[13]。

表 3-1 ARINC664 协议规范

序号	名称	主要内容
Part 1	系统概念和概况	总体介绍飞机数据通信网络
Part 2	以太网物理层和数据链路层规范	介绍基于 IEEE802.3 的多种类型物理介质的飞机数据网络的实现
Part 3	基于因特网的协议与服务	描述传输控制协议(TCP)、用户数据报协议(UDP)、网际协议(IP)的功能特点等
Part 4	基于因特网的地址结构与编号分配	定义飞机数据网络的通用地址结构
Part 5	网络互连服务和功能元素	定义开放系统互联参考模型的服务和功能特点
Part 6	保留	
Part 7	全双工交换式以太网网络规范	描述一个确定型网络,重点介绍端系统和交换机规范
Part 8	顶层服务	介绍飞机数据网络在航空导航通信路由和顶层协议等应用上的例子

从 ARINC664 协议各个部分可以看出,该协议是一个完整的协议,与国际标准化组织定义的开放式系统结构(OSI)模型相比,对应关系如图 3.3 所示^{[14][15]}。

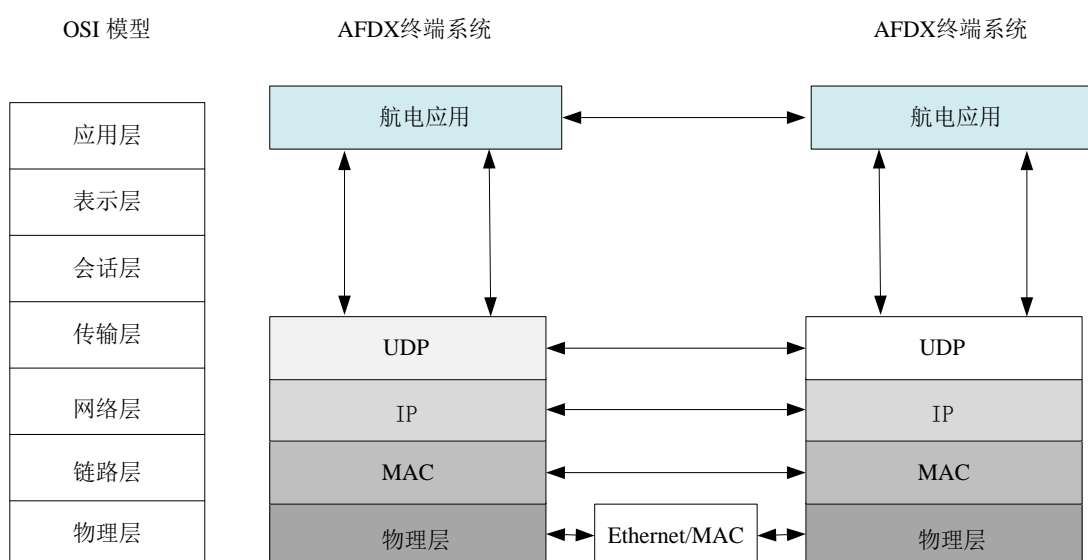


图 3.3 AFDX 协议模型

3.2.1 ARINC664 协议

ARINC664 标准的第 7 部分对 AFDX 网络做了详细的规定，在 AFDX 网络协议部分的研究中，主要分对端系统协议层次部分和交换机协议层次部分这两部分，其中交换通信协议主要实现 MAC 的数据交换，驻留在交换机中的端系统的层次划分与普通端系统一样，因此以下部分研究端系统的协议层次与保障 AFDX 网络可靠传输相关的内容。

端系统通信协议为四层，自底向上依次为物理层、MAC 层、IP 层和 UDP 层，如图 3.4 所示。

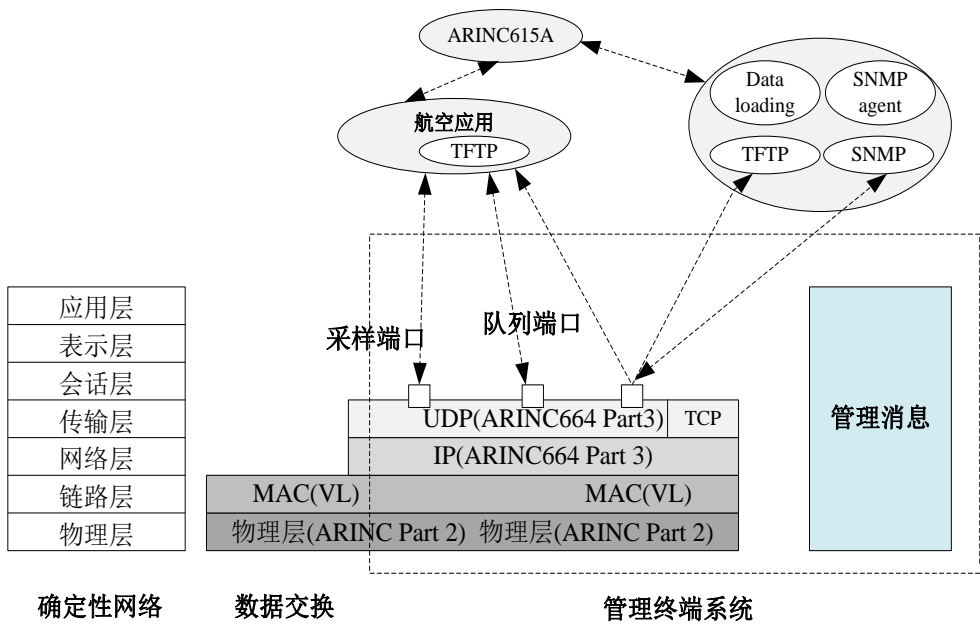


图 3.4 AFDX 端系统通信协议

其中，物理层具体由 ARINC664 第 2 部分规定，为二进制比特流传输提供物理连接。数据链路层主要实现物理链路的虚通道管理和冗余管理功能，虚拟链路作为一个逻辑上的概念，将实际的物理链路划分为多个逻辑链路，更加有利用数据的调度和传输效率^[16]。网络层采用 IP 协议主要完成数据的分片、重组、控制等功能。传输层可以采用 UDP 协议或者 TCP 协议，以 UDP 协议为例，建立在 IP 协议之上，采用无连接的数据包传输机制保证了进程间的数据通信，并提供给主机系统一组标准接口供应用层软件调用，以通信端口或 SAP 端口的机制实现了与应用层的通信。

(1) 物理层

物理层的功能主要包括物理连接的建立与拆除，当数据链路层实体提出建立连接请求时，物理层使用有关的协议完成连接的建立过程，在数据信号传输过程中维持这个连接，等传输结束后再拆除这个连接。在物理层数据单元的传送中，物理层定义了编码的类型、位的同步方式、数据的传输速率，采用的单工、半双

工、全双工的传输方式也要在物理层说明。另外，物理层还包括传输中出现差错后的处理等管理功能^{[13][16]}。

为了保证以上功能能够顺利实现，需要采用可靠地物理设备，还应制定物理层面的管理规范 and 措施以保证网络可靠传输。为适应机载环境条件，AFDX 网络采用加固型的网络组件。

(2) MAC 层

AFDX 网络数据链路层的可靠性主要体现在 MAC 地址的数据段中定义的 VL、InterfaceID 等概念，以及在数据发送时由发送控制器对 VL 的高效调动机制、数据在传输和接收中的冗余管理机制等，最后对 ES 的各个性能指标进行研究，分析如何通过衡量各个 ES 的性能指标，设置一定的约束来降低整个系统构建的工作量同时提高数据传输的高效和可靠性。

a. MAC 地址

MAC 的源地址是符合 IEEE802.3 标准的唯一的本地管理地址。地址结构如图 3.5 所示。

MAC 源地址						
Constant field 24bits	NetworkID 8bits		Equipment ID 8bits		InterfaceID 3	Constant field 5bits
	Constant field 4	4 bits	3 bits	5 bits		
000000100000000000000000	0000					00000

图 3.5 MAC 源地址格式

其中，常数域 Constant field 设置为 “0000 0010 0000 0000 0000 0000”。第一个字节的最低位设置为 0 表示为 individual address。第一个字节的第二最低有效为设置为 1，表示本地管理地址；

Network_ID 高四位置为 0，低四位为填充位；

Equipment_ID 共 8 位，用来标识设备；

Interface_ID 表示 MAC 控制器接入哪一个冗余 AFDX 网络^[13]。

AFDX 帧中的 MAC 目的地址必须是组或本地管理地址，且符合以下格式：

MAC 目的地址	
Constant field 32-bits	Virtual Link Identifier 16-bits
XXXX XX11 XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX	

图 3.6 MAC 目的地址格式

一条 VL 由 MAC 目的地址唯一确认(标识)，其中，每一个 ES 从系统集成商得到一个 “constant field” 以及 “Virtual Link Identifier”，具体的形式 ARINC 664 标准并没有规定。在一个既定 AFDX 网络中，每个 ES 的 constant field 必须相同。第一字节的最低位标识使用组地址(常置为 1)。为了使用标准的以太网帧，MAC 的 group address 必须被用来发送 ES 到 ES 的帧。第一个字节的第二位表示使用本

地管理地址(常置为 1)。

b. 调度算法

在有多个虚拟连接的端系统中, 调度模块复用来自规整单元的不同流, 如图 3.7 所示。

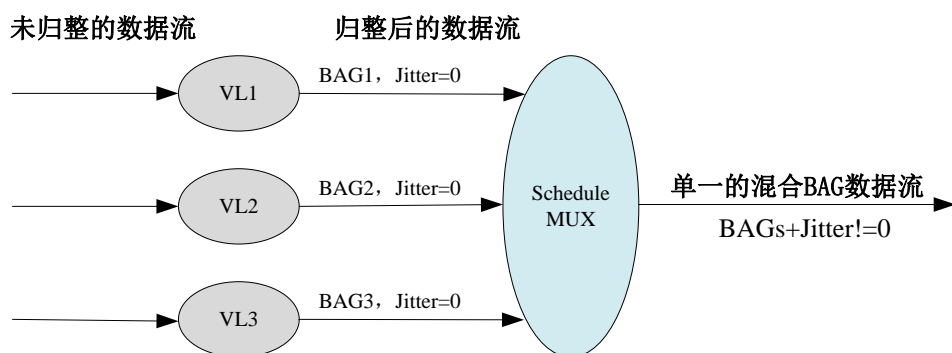


图 3.7 虚拟链路调度控制机制

在调度单元, 对于特定的 VL, 帧在一定的时间段内被输出。这个时间段被称作做最大允许抖动。这里的抖动是由发送 VL 调度器产生, 并非传输流自身特性, 如图 3.8 所示。

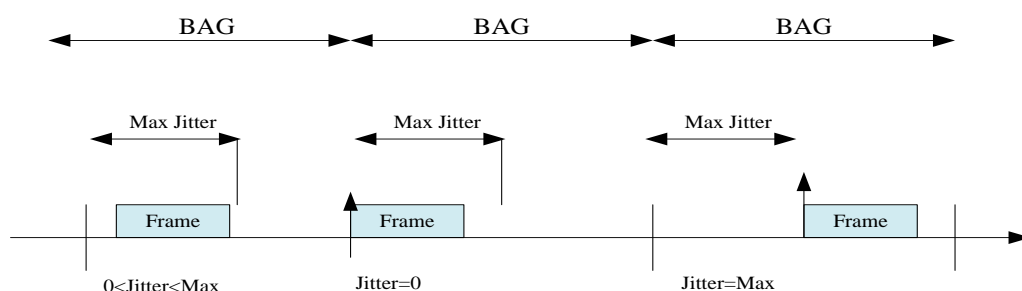


图 3.8 最大带宽数据流抖动影响

ES 配置信息中对每一条 VL 都分配一个 BAG 值, BAG 的取值一般取 2 的幂以简化 ES 的设计, ES 的流量控制能够处理的 BAG 范围从 1ms 到 128ms。每一条 VL 的规整单元在一个 BAG 时间内只能发送一个包, 流量控制的目的是通过分包限制 VL 的发送速率。VL 的最大使用带宽决定于它的 BAG 以及被允许发送的最大 L_{max} 。使用带宽表示为 L_{max}/BAG kbps。

c. 冗余

端系统通过多个独立冗余的网络进行通信, 这样可以避免某个网络由于连接或交换出现的故障, 也是为了避免整个网络的崩溃。

从发送端 ES 到接收端 ES 的通信采用以下的形式: 应用程序使用发送端 ES 准备数据并传输这些数据到通信协议栈。在这个过程中序列号被加入到每一帧, 对于每一条 VL, ES 必须给每一个传输帧加入序列号 SN, 序列号的范围从 0 到 255。帧序列号必须在帧发送的过程中每次递增一, 并且从 1 到 255 一个循环。每次递

增一可以用来检查丢失帧。序列号从 1 到最大值, 并且在复位时为 0, 这种方法提高了帧的完整性检测。帧序列号位于 MAC CRC 域之前, 作为 MAC 传输数据的一部分。序列号的加入使得接受端在发送给接收应用程序之前不需要复制数据就可以按照一定的顺序对数据进行重构^[17], 以下图 3.9 和图 3.10 分别为长度最短和长度最长的 AFDX 标准帧格式的定义。

7 bytes	1 bytes	6 bytes	6 bytes	2 bytes	46 bytes					4 bytes
					20 bytes	8 bytes	1~17 bytes	0~6 bytes	1 bytes	
Preamble	Start Frame	Dest Addr	Source Addr	IPv4	IP structure	UDP structure	AFDX Payload	Padding	SN	Frame Check seq

图 3.9 AFDX 标准帧格式(1~17bytes)

7 bytes	1 bytes	6 bytes	6 bytes	2 bytes	46 bytes					4 bytes
					20 bytes	8 bytes	1471 bytes		1 bytes	
Preamble	Start Frame	Dest Addr	Source Addr	IPv4	IP structure	UDP structure	AFDX Payload		SN	Frame Check seq

图 3.10 AFDX 标准帧格式(1471bytes)

在接收端, 协议栈使用先到先有效的算法。这意味先到的序列号合法的帧在接收端被传递给接受给协议栈再到应用程序。到次到的帧到达时, 将被丢弃掉。

在默认模式下, 完整性检查单元将有效帧传递给 RM^[17]。如果出现错误, 它将去除掉无效帧, 并通知相应的网络管理单元。对于每个网络, 完整性检查单元在一个间隔之内检查每一帧: $[PSNN+1, PSNN+2]$, 这样做会增强完整性检查的鲁棒性。例如, 可以去除掉非正常帧以及降低交换机失灵带来的影响, 因为位传输错误而丢失掉一帧被看做正常情况。

完整性检查单元将以下两种特殊情况接收到的帧看做有效帧, 不满足的帧将被丢弃:

- 接收帧的序列号为 0;
- 接收端复位以后的接收到的帧是第一帧。

冗余管理假定网络是正常运作且确定性可以被保证的。RM(冗余管理)建立在 SkewMax 参数之上, 即两个具有相同序列号的帧的间隔时间。这个值取决于网络的拓扑结构(帧跨越的交换机数量), 以及网络管理者的设置。每条 VL 的 SkewMax(以 ms 为单位)由具体配置决定。对于每条 VL, ES 必须能够接收:

- 冗余的 VL, 并传输某一数据给应用程序(RM 激活, 过滤掉冗余数据);
- 冗余的 VL, 并将所有数据传输给应用程序(RM 被关闭);
- 没有冗余的 VL 或其他冗余数据传输给应用程序(这种情况下 RM 可以被激活使用或关闭)RM 功能必须是可配置的。
- 冗余 VL 表示数据通过网络 A 和网络 B 同时发送;
- 非冗余 VL 数据只通过网络 A 或网络 B 发送。

经过冗余管理算法后只传递给应用程序有效的数据帧, 对异常情况的过滤举

例说明如下。

例 1：异常帧传递



图 3.11 异常帧传递

分析：例 1 中，异常帧不进行前向传递。

例 2：丢失帧

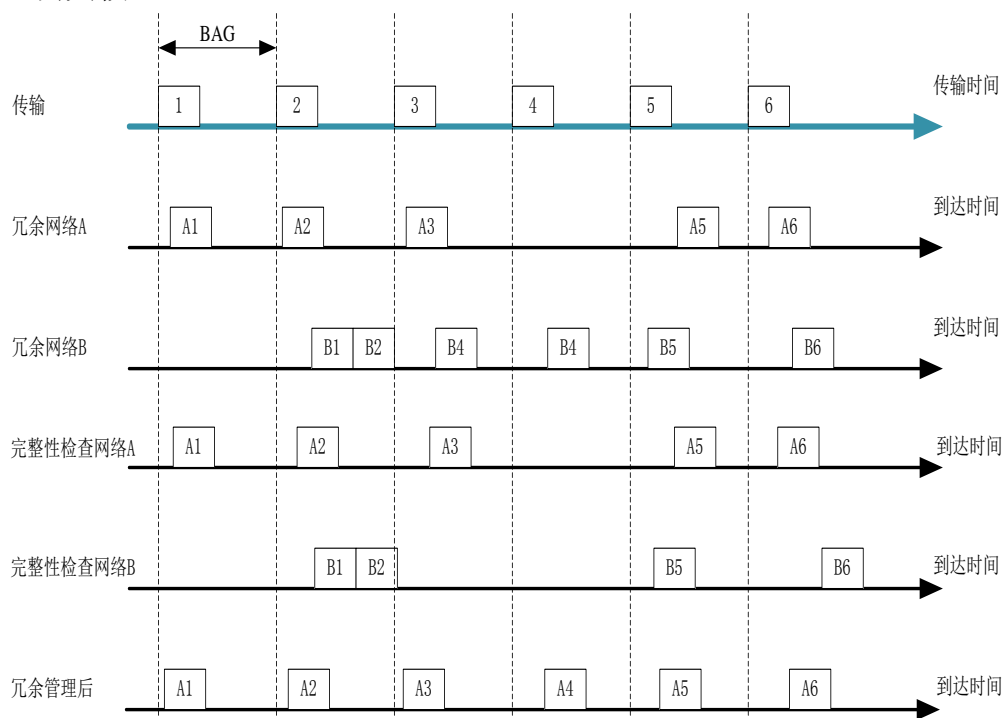


图 3.12 丢失帧

分析：产生位错误，A4 被丢失。在例 2 中，冗余管理单元接受 B 网络传递的帧。

例 3：发送端重置

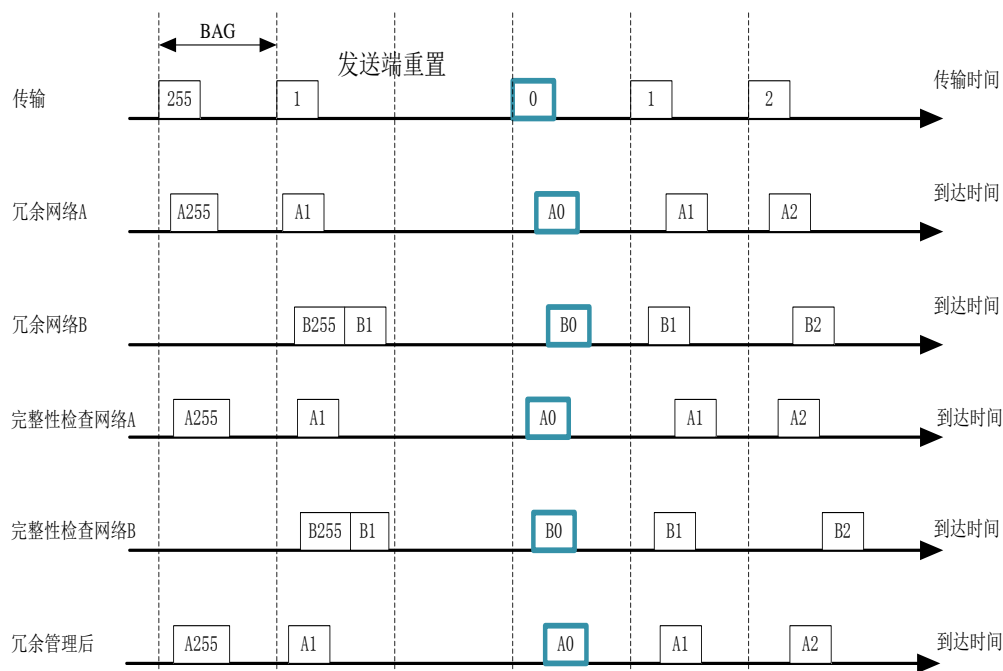


图 3.13 发送端重置

分析：在例 3 中，通过冗余管理单元数据没有丢失。

d. 端系统性能

在对端系统性能的研究中，主要从延迟、抖动、MAC 约束这三个方面来介绍。

延迟是对端系统性能影响的一个重要因素——对延迟的分析从发送延迟和接收延迟两方面来定义。

发送延迟定义：

- 计时开始时间：主机端应用程序传输数据的最末位给端系统服务程序；
- 计时结束时间：相应以太网帧的最后一位发送至物理介质。

这种分析建立在 mailbox 为空且没有资源冲突和 IP 分包的基础上。一般的发送延迟小于 $150\mu s + \text{frame delay}$ 。这里假定 ES 的所有延迟由技术延迟构成(不考虑通信负载)且延时可配置。Frame delay 指发送帧到物理层所消耗的时间^[13]，如 3.2.3.1 节图所示。

接收延迟定义：

- 计时开始时间：从物理介质接收帧的最后一位；
- 计时结束时间：数据的最后一位传输给主机端应用程序。

接收延迟意味 mailbox 为空，无资源冲突，ES 的接收延迟小于等于 $150\mu s$ ，如 3.2.3.2 节图所示。

在 ARINC 664 规范中要求，在终端节点系统输出的虚连接传输抖动的最大值要求满足下面两个公式：

$$\max_{jitter} \leq 40\mu s + \frac{\sum_{i \in \{setofVLs\}} (20bytes + L_{max} bytes) \times 8bits / byte}{N_{bw} bits / s}$$

式(1-1)

$$\max_{jitter} \leq 500\mu s$$

式(1-2)

其中，最大抖动的单位为 us。Nbw 是介质的带宽，以 bits/s 为单位；Lmax 以字节为单位。根据公式，当 ES 的 VL 数量和处理帧长减少时，最大抖动时间也会减小。在所用的情况下，针对全网络，抖动的上限为 500us。对于数据发送比较繁重的 ES，优化调度算法通常可以满足公式 2。选择 ES 配置参数，使抖动小于 500us 是系统集成者的主要责任。

第一个公式表明端系统若具有较少的虚拟链路并且其中待处理的数据帧是短帧，则最大允许的时延抖动将较低。从多个虚拟链路中选择了某个帧后，打上基于虚拟链路号的序列号，然后该数据帧被送到冗余管理模块进行复制，最后发送到链路上。

用算数方式处理 ES 的发送延时，限于以下两种情况：

假定主机端在一条 VL 间隔性的发送数据，而且数据不必分组，那么，当 ES 在这条 VL 上不处理其它数据时，指定 VL 的总允许延时为：

$$MAX_Latency \leq BAGi + Max_jitter + Techonological_Latency_in_transimission$$

主机端应用程序突发传输数据或传输较长需要分片的数据。在这中情况下，这条 VL 需要处理的其他数据将会被延迟发送。对于传输数据的 VL，如果 p-1 个帧已被处理，跟据以下公式，第 P 帧的最大延迟为：

$$MAXLatency(framep) \leq p * BAGi + Max_jitter + Thnological_Latency_intransmission$$

为了避免在突发传输过程中丢失连续帧，以及修正 IFG，ES 的 MAC 层应该完成以下功能：

- 全速处理接受到的帧，针对某一应用可以全速处理某些选定帧；
- 连续发送。

最短帧按照最大传输速率传输的时间：

$$节(帧长) + IFG(12 \text{ 字节}) + Preamble(7 \text{ 字节}) + SFD(1 \text{ 字节}) = 80 \text{ 字节除以 } 100 \text{ Mbits/s, 结果为 } 6.72\mu s \text{ (每秒可传输大越 } 148800 \text{ 帧)}。$$

(3) IP 层

IP 源端地址用来标识与 ES 相关的发送部分，必须是 A 类地址，且属于私有因特网单播地址。(第一个字节为 0000 1010)。IP 单播地址格式如图 3.14 所示。

IP源地址							
Class A 1-bit	Private ID addr 7bits	NetworkID 8-bits		EquipmentID 8-bits		PartitionID 8-bits	
0	0001010	0000	4-bits	3-bits	5-bits	3-bits	5-bits

图 3.14 IP 单播地址

其中, Network ID 由两个域组成, 常数域不含任何意义, 置为 0000。

Equipment ID 由八位组成。

Partition ID 由两部分组成, 常数域 3 位, 被置为 000。

IP 目的地址位于 IP 包的首部, 满足以 IP 单播地址标识接收端或以采用以下多播地址的形式标识接收端的要求。

IP目的地址	
4-bits	28-bits
Class 1110	IP Multicast Identifier
Constant field 0000 1110 0000	
VL Link Identifier 16-bits	

图 3.15 目的地址

(4) UDP 层

端系统在传输层协议中主要规定了端口的概念和区分服务的端口的应用, 主要分为通信端口和服务访问点(Service Access Point, 以下简称 SAP)端口两类, 通信端口按照服务类型分为采样服务端口和队列服务端口, 以下分类研究。

依据 ARINC653 2.3.5.6.1 中的规定, 采样服务对发送端的要求如下^[13]:

- 采样不能用于 IP 分组, 因此采样信息的长度必须小于或等于 VL 的负载。
- 采用服务必须基于多播以及单向通信。
- 采样服务是无链接及无确认的简单服务。它不对发送包进行错误控制, 也不需要发送信息进行流控制。

采样服务对接收端的规定如下:

- 存储在采样端口的最后一个信息必须能够被多个应用程序读取(即多个应用程序定制同一采样端口), 如图所示。
- 每个采样端口都和一个刷新信号相关联。每个应用程序读取信息时刷新必须可用。

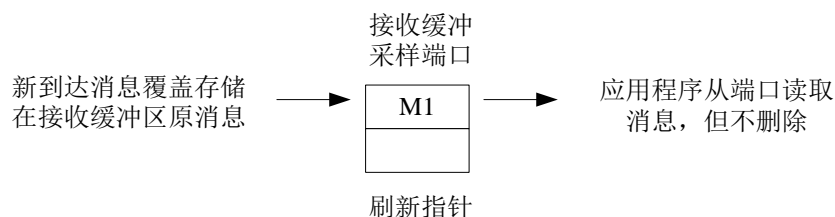


图 3.16 接收端采样端口

由于 AFDX 网络在架构上是一个双冗余的网络, 这样带来帧的丢失率较低的优势, 因此无链接且无确认的使用先进先出的队列服务可以为大规模数据通信提供可靠服务。依据 ARINC653 2.3.5.6.2 中的规定, 队列服务的每个实例必须能够管理多达 8K 字节的数据, 队列服务对发送端的要求如下:

- 当使用分组, 分组按照 AFDX 顺序发送。
- 当发送 buffer 发生上溢时, 错误信号必须发送给发送应用程序, 发送帧被

丢弃，如图所示。

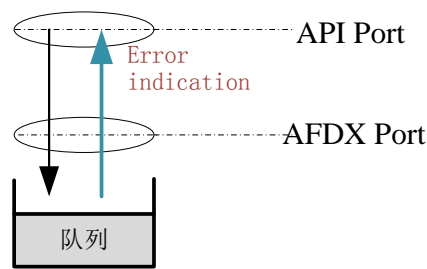


图 3.17 队列服务

队列服务对接收端的要求如下：

- 在分组的情况下，队列 FIFO 中的数据只有经过重组之后才能传递给应用程序。
- 当接受端 buffer 溢出时，出错信息必须被发送给接收应用程序并且接收帧被丢弃。

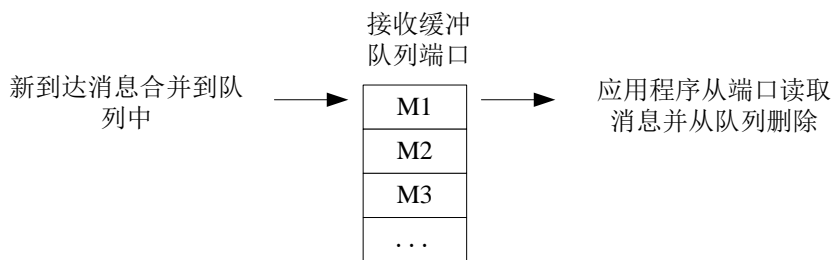


图 3.18 接收端队列端口

端系统的 SAP 端口被用来在 AFDX 网络间进行数据通信，作为端系统设计的一部分，可以通过网关或路由器访问其他网络；端系统可以提供最大支持 8K 字节数据通信的 UDP 服务和兼容网络进行通信；SAP 端口和队列端口的区别在于使用 SAP 端口可是定义 IP 目的地址和 UDP 目的地址，便于和兼容网络进行通信。

3.2.2 端系统数据流传输协议栈

以上章节分层分析了 AFDX 网络端系统和交换机的标准协议，数据在每一层有不同的处理，以下将数据在发送和接收的过程中协议栈处理的整体流程做详细分析，描述 AFDX 网络端系统的通信工作流程。

(1) 数据发送协议栈

AFDX 网络端系统发送协议栈工作过程：发送协议栈首先准备好要发送的数据，存放在主机内存上，调用初始化时加载的确定的配置信息中的发送端口将信息送到 AFDX 端口，在 UDP 传输层负责添加 UDP 首部^[17]。在 AFDX 通信端口作为 SAP 端口使用的情况下，由应用程序动态指定 IP 和 UDP 目的地址。

网络层按照 IP 协议处理数据包，根据虚拟链路中的传输帧的最大值参数 Lmax

来判断是否需要对收到的 UDP 数据包进行分片处理。若数据包长度大于 L_{\max} 则将数据包分解为较小的数据包,再给每一个分解后的包添加 IP 首部,进行 IP 校验和的计算。然后在数据包上添加以太网首部,将帧放入虚拟链路队列中。在数据链路层,虚拟链路负责以太网帧的隔离和调度,添加序列号后将该帧交给冗余管理单元作复制帧的处理最终将该帧发送出去。

数据发送过程如图 3.19 所示。

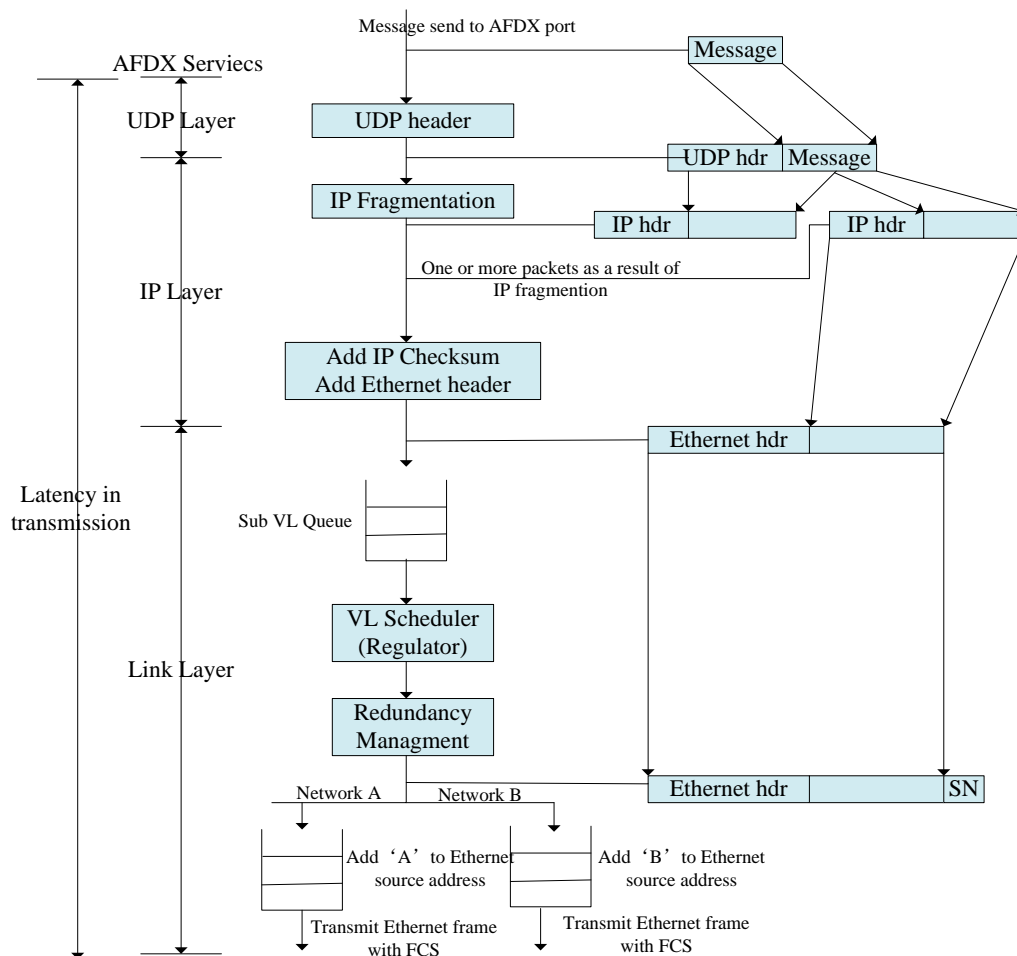


图 3.19 端系统数据发送协议栈

(2) 数据接收协议栈

AFDX 网络端系统接收协议栈工作过程与发送机制工作过程相反,当端系统收到链路上发来的以太网帧,虚拟链路层首先会对帧进行循环冗余校验算法(CRC 算法)检查帧的正确性;如果检验正确,继续将该帧传递给冗余管理单元,作完整性检查;如果完整性检查均正确,该帧继续被传递给 IP 网络层处理,在网络层检查 IP 头校验和是否正确,并判断该帧是完整的数据包还是分片数据包,若有需要还需对分片帧进行重组的处理,处理完后,帧被传递至 UDP 传输层,由对应的端口接收后交给用户,完成接收过程,如图 3.20 所示。

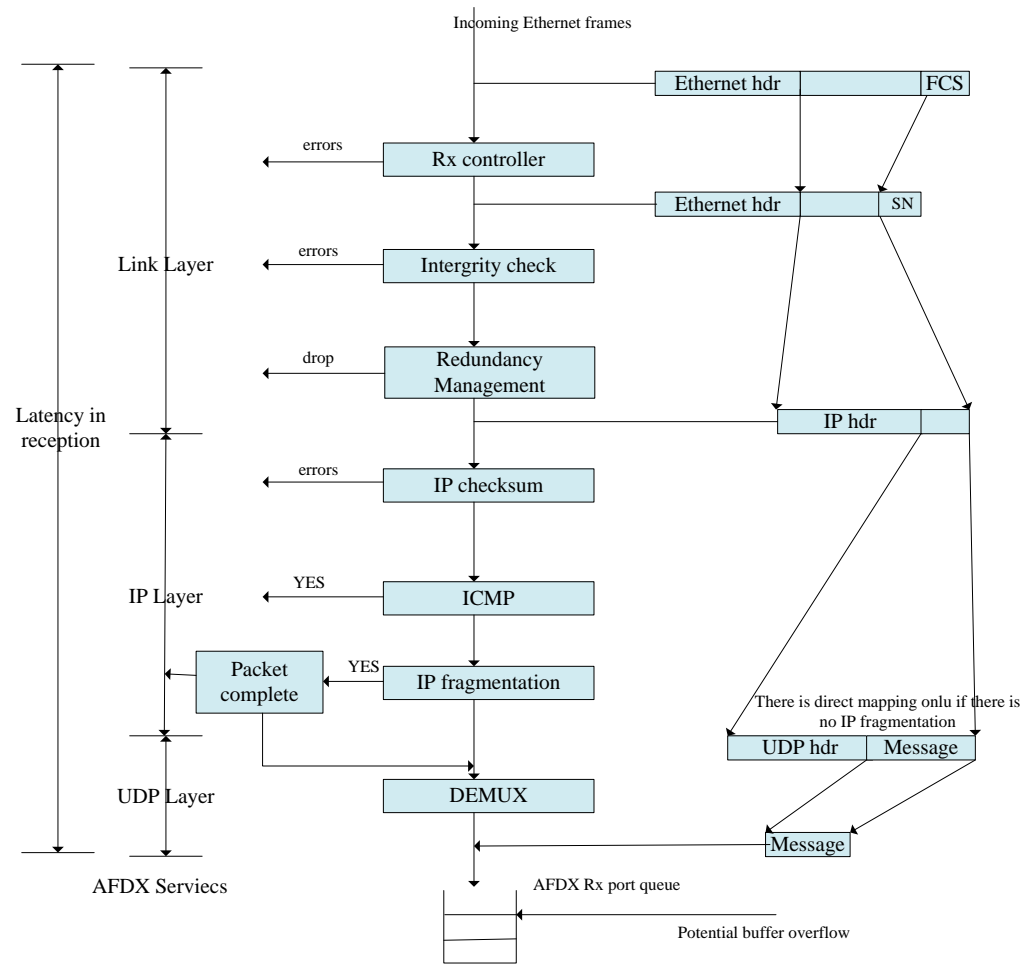


图 3.20 端系统数据接收协议栈

3.3 算法设计

网络中运行的软件的实现算法从很大程度上决定了网络的功能和性能，对保证网络的正常通信和数据的正确处理起到很关键的作用^[18]。本章分析几个关键的软件算法，以下分小节具体介绍每种算法的功能、分析和流程图。

3.3.1 端系统主机驱动软件端口重映射算法

AFDX 网络端系统主机端运行的驱动软件实现了 AFDX 网络配置信息加载和端口内存分配及管理等功能，在端口管理的部分，由配置信息中的相关端口信息计算端口需要的内存空间大小，再根据端口的 ID 作为标识来分配具体的内存空间的机制。理论上端口 ID 的范围在 0~65535 之间，若是不对端口 ID 作任何处理而直接计算需分配的内存空间会引起内存溢出的可能性，而且实际中一般只有 5~10 个端口处于工作状态，若配置信息中端口 ID 不连续，在内存分配时会分配到几个

不连续的内存空间块上，而中间不连续的大部分内存空间会严重浪费，不利于内存的分配和释放。

因此基于以上存在的隐患问题，我们在实际驱动软件中对端口 ID 做了一个重映射的工作。具体流程为在设备初始化完成后，读出配置信息中关于端口的信息，对配置信息中的端口 ID 重新从 1(端口 ID 为 0 时为系统预留)开始连续排列，其对应的端口其他信息需作保存，这样在创建端口分配内存时可以保证端口号均为从 1 开始连续排列的较小的 ID，不会轻易导致内存分配的溢出，而且这样分配的均为连续的内存块，有利于内存的分配和查询、释放等管理操作，同时保证了数据传输的稳定性。

采用这种算法，可以有效的提高端系统主机端内存的分配效率，基本可以保证不会由于端口的分配而导致内存的溢出，进而引起系统的崩溃。而且这种算法会带来连续分配内存的好处，这样在回收内存时也更加方便。

端系统主机驱动软件端口重映射算法的流程图如图 3.21:

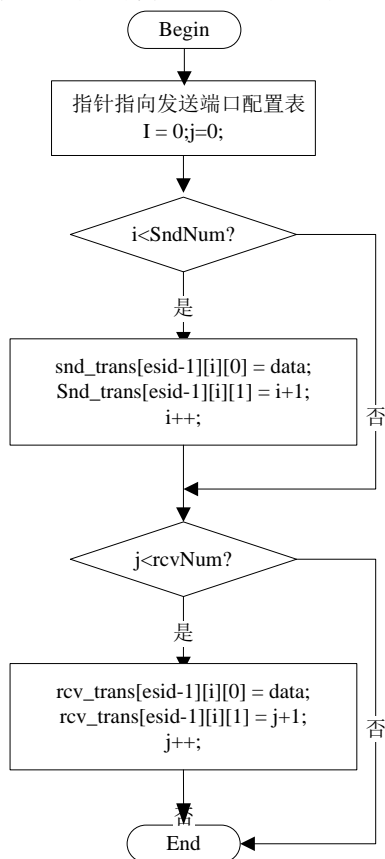


图 3.21 主机驱动软件端口重映射算法流程图

3.3.2 端系统协议栈软件端口轮询记录算法

AFDX 网络端系统协议栈软件实现了 AFDX 系统的网络层、数据链路层和物理层的功能，实现了数据发送和接收的传输流程。在发送数据时协议栈软件采用

无限轮询发送端标志位的机制,等待主机端对发送标志的更新,从理论上 AFDX 端系统能够最大支持 512 个发送端口同时发送数据,但在实际应用中一般只有 5~10 个端口处于正常工作状态,若是轮询全部的 512 个端口信息,等待发送数据,这样会做大量的无用工作,不仅降低了系统发送数据的效率,而且有可能导致有数据的端口不能及时被调度发送,因此 VL 的拥塞,导致链路上的传输失效。

因此基于以上存在的隐患问题,我们在端系统协议栈软件中对轮询的端口做了一遍判断,即第一次轮询全部的 512 个端口,并记录下实际工作的端口,然后无限轮询这些实际工作的端口,而不再关心那些没有工作的端口。

采用这种算法,很大程度上提高了端口的轮询效率,保证有数据的端口能够得到及时的调度,避免了虚拟链路上数据的拥塞,有效提高了端系统运行的稳定性和可靠性。

端系统协议栈软件端口轮询算法的流程图如图 3.22:

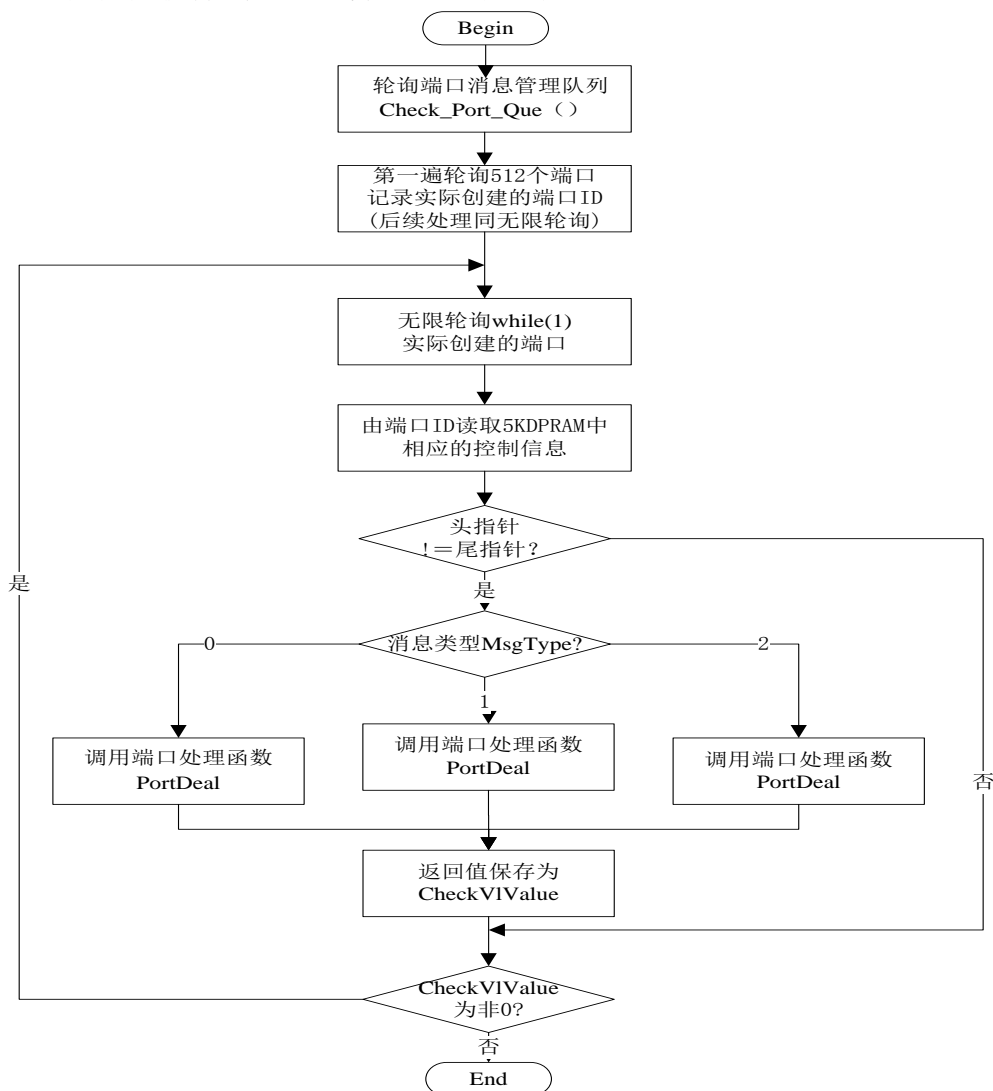


图 3.22 协议栈软件端口轮询算法流程图

3.3.3 端系统协议栈软件接收端口查找算法

AFDX 网络端系统协议栈软件在接收数据时,在 IP 首部和 UDP 首部均校验完成且无误后,为了保证这个数据帧是发给本端系统节点的,避免接收到网络中发给其他节点的数据,需要在配置信息中查找这一帧的接收端口,查找接收端口的索引是这一帧的帧头中的目的虚链路 ID、目的 IP 地址和目的 UDP 地址,由于网络中不同端系统节点在运行时都加载了各自固定的配置信息,因此由以上三个索引信息查找配置信息可以找到唯一的接收端口,若查找到接收端口,则说明这一帧是发给本端系统节点的数据,继续接收;若找不到接收端口,说明这一帧不是发给本端系统节点的数据,将它丢弃。

采用这样的算法保证了接收到数据的有效性,避免接收到网络中其他无效数据,提高了系统运行的效率。

协议栈软件接收端口查找算法流程图如图 3.23:

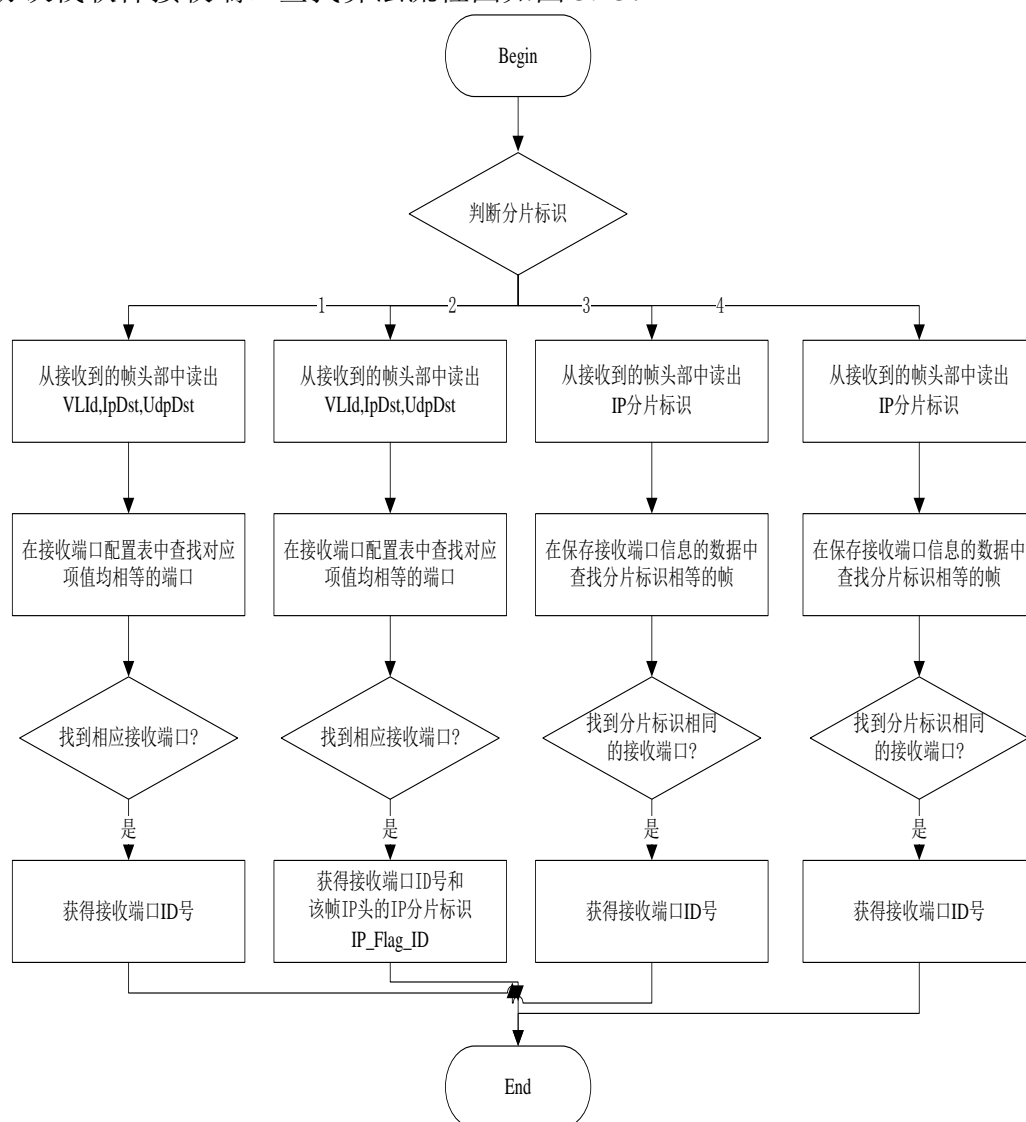


图 3.23 协议栈软件接收端口查找算法流程图

3.3.4 交换机初始化过程检测算法

对于一般的计算机来说, 开机以后的初始化处理等操作是由 BIOS(Basic Input/Output System)完成的, 但对于 AFDX 网络交换机这样的嵌入式系统, 需要由软件人员自行编写所需的上电初始化程序, 即 BootLoader 程序。交换机的 BootLoader 是基于主处理器如 PPC8265 等来实现的引导程序, 这段程序用来初始化硬件设备, 如果 CPU 有内存映射功能还需要建立内存空间的映射关系, 通过这样的映射关系将系统的硬件和软件环境对应起来, 以便于应用程序的正常运行中调用操作系统内核的一些操作。

AFDX 网络交换机应用程序首先需要作最小自动检测, 如果检测结果正确的话继续检测交换机模式, 判断是否在地面上, 如果不在地面上, 需要读取罪行存储的结果, 这些统计结果包括安全性测试结果、兼容性检测结果、管脚编程奇偶校验结果等信息, 当这些信息不正确时控制交换机直接进入 PASSIVE 模式或者 QUIT 模式, 否则继续检测, 获取管脚编程结果判断奇偶校验是否正确, 若正确判断是否需要进入 SHOP 模式, 如果没有进入 SHOP 模式并且兼容性检查结果不正确或者没有加载软件则进入 DL 模式, 如果兼容性检查结果正确进入 OPS 模式。交换机初始化过程的算法流程图如图 3.24 所示。

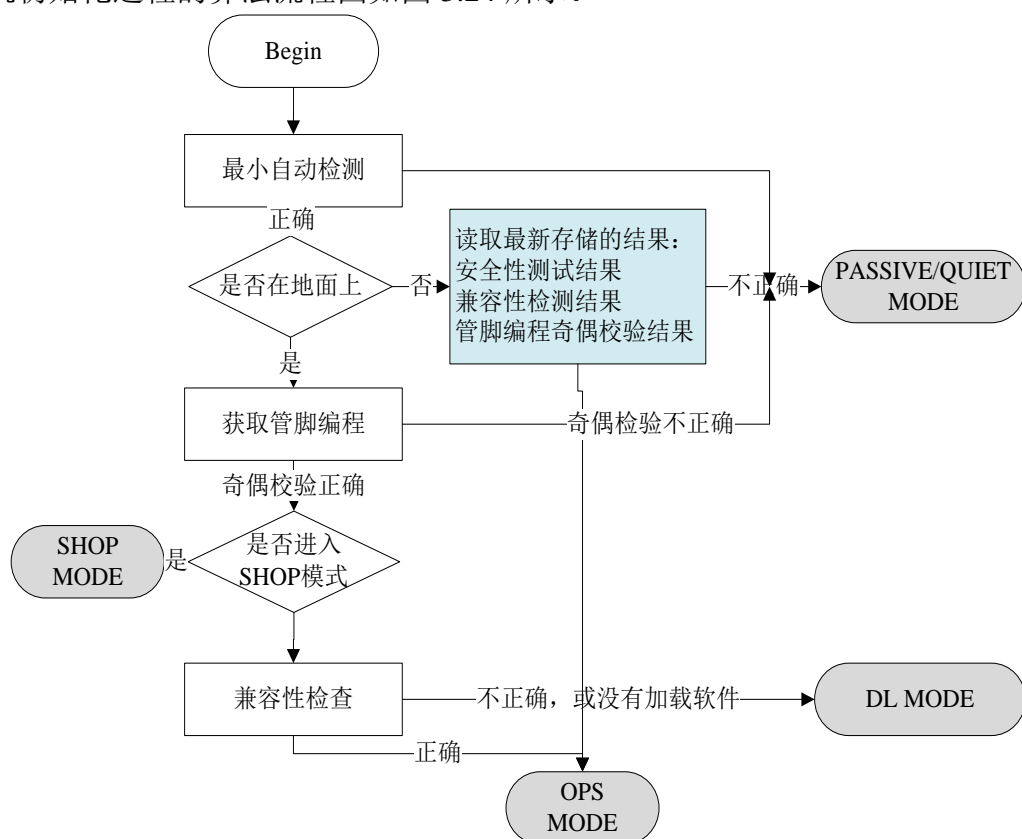


图 3.24 交换机初始化过程

3.4 本章小结

本章先从网络架构的角度，描述 AFDX 采用硬件的冗余路径和基于虚链路的数据冗余管理增强网络的高效传输；接着对 ARINC664 标准的具体规定做了详细分析，提出 MAC 层规定的 VL、完整性检查、冗余管理等都可以有效的保障信息的完整性和系统的稳定性；最后从网络系统的软件设计角度，分析了端系统主机驱动软件端口重映射、接收端口查找策略等可以很大程度的提高系统效率和稳定性的关键算法。本章从理论分析的角度研究了 AFDX 网络在设计上的一些关键策略，为下一章的关键技术的实现打下一定的理论基础。

第四章 端系统关键技术实现

本章将对 AFDX 网络端系统在实现上采用的关键技术做具体的研究, 包括采用的虚拟链路技术、接收帧的过滤技术、通信过程中对身份的确认技术以及采用确定性网络配置信息等。

4.1 虚拟链路技术

4.1.1 虚拟链路隔离

虚拟链路是 AFDX 网络中终端与终端之间的一种逻辑上的通信通道, 用来建立起一个端系统到一个或多个端系统之间的一条单向的逻辑通信路径。为了保证在同一物理连接上的不同虚链路之间不会互相影响, 我们采用限制虚链路通道上传输 AFDX 帧的传输速率以及的干扰限制虚链路通道上所传 AFDX 帧的大小的机制来实现虚拟链路通道之间的隔离^{[19][20]}。

用于描述 VL 的两个关键参数是 BAG 和 L_{\max} 。BAG 指带宽分配间隔(Bandwidth Allocation Gap, BAG), 数值范围从 2 的 1 次幂到 2 的 128 次幂毫秒; L_{\max} 是虚拟链路通道上可传输 AFDX 帧的最大帧长。每条虚拟链路被分配一个 BAG 和 L_{\max} , 这样就限制了每条虚拟链的最大可用带宽(最大可用带宽 = L_{\max} / BAG), 同一源终端的所有虚拟链的最大可用带宽之和不应超过该物理链路的带宽, 规定了每条虚拟链路的 BAG 和 L_{\max} , 就可以使每条虚拟链按照一定的时间间隔和一定的时间延迟进行传输, 避免了虚拟链路之间的碰撞问题。

4.1.2 虚拟链路调度

AFDX 端系统内可以同时有多个 VL 进行数据发送, 多个 VL 之间在数据发送时需要实现 VL 上传输的数据帧的流量规整用来确保每个 VL 的带宽满足一定要求, 即不但要保证对每个虚连接的 BAG 和 L_{\max} 的限制, 而且还要保证所有虚连接传输的有效切换以及由于切换而引起的抖动在可接受的范围内。

虚拟链路调度主要分为两部分: 信息包的规整和多路间切换调度^[21]。

第一部分是信息包的规整。信息包的规整是使用计时器实现, 通过每个 VL 各自的帧长来限制。为方便应用配置, 为每一个 VL 实现一个数据流量规整器, 当一个发送数据包的长度超过了这个 VL 的帧长时, 流量规整器将数据进行分片, 保证每个分片的长度符合要求; 当两个数据之间的时间间隔小于一个 BAG 时,

流量规整器将两者之间的间隔规整为一个 BAG，保证每个 BAG 时间内只允许通过一个分片。流量规整器的处理流程如图 4.1 所示。

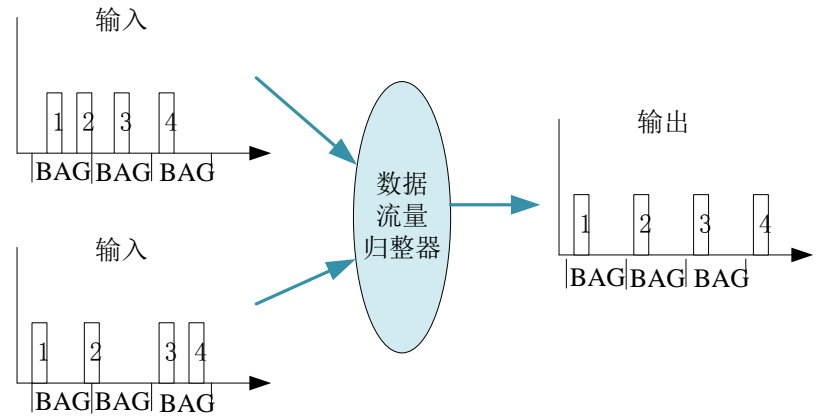


图 4.1 信息包的规整

第二部分是多路间切换调度。多路间切换调度是通过端系统的发送 VL 调度模块来实现的。在端系统的发送 VL 调度模块中，对特定的 VL 帧在由调度器产生的最大允许抖动的时间段内被输出。例如在一个虚连接中包含三个子虚连接，三个子虚连接作为单独的虚连接调度，互不影响，在调度程序未实际选中子连接队列中的信息包前，不为信息包赋予队列号，当调度程序选中了某一条子连接时对以太网帧赋予一个队列号并插入到虚连接队列中，其调度机制如图 4.2 所示。

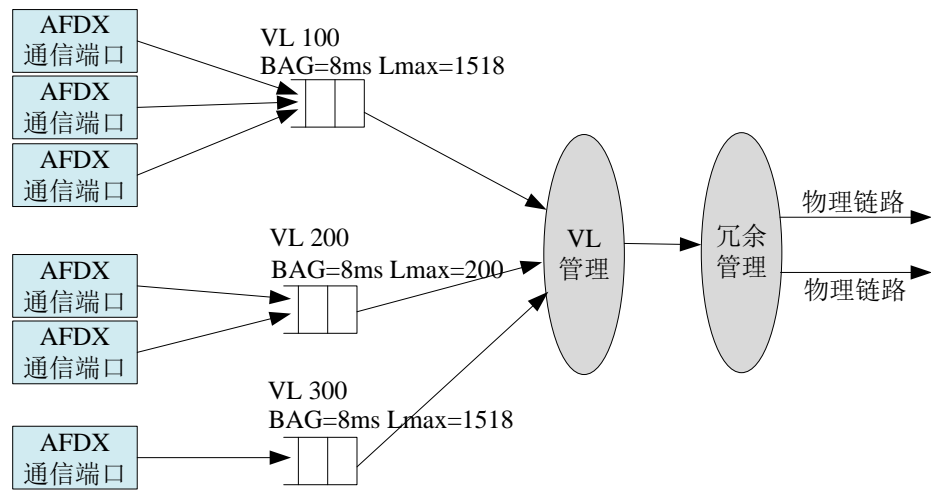


图 4.2 虚拟链接的调度

4.2 接收帧过滤技术

AFDX 端系统作为 AFDX 网络中的重要组件，对接收到的数据帧有对应

的过滤机制,保障在网络中传输的数据都是正确可靠的,并且若收到错误的、无效的、不符合标准协议的、不是发向本节点的数据等均采用过滤的机制,保证了网络数据的正确性和整个网络运行的可靠性。

AFDX 网络端系统的过滤机制包括完整性检查、冗余管理、接收数据帧头常数域检查过滤、接收数据帧头校验过滤、接收数据与自身配置信息不匹配的过滤等,以下分别介绍。

4.2.1 完整性检查

AFDX 网络端系统在接收数据时,数据包在进入端系统后先被递交给完整性检查(IntegrityChecking, IC)模块。IC 模块判断此帧均可以接收。端系统通过完整性检查模块分别对从 MACA、MACB 接收到的帧进行完整性检查,对 CRC 错误的帧、完整性检查没通过的帧直接过滤掉。

具体操作流程描述为在一帧数据接收完后,MAC 接收模块发出完整性检查请求信号,并将 VLID 和 SN 传递给完整性检查模块。完整性检查模块收到完整性检查请求信号后读配置信息,判断此 VL 均有效,若为无效 VL,则直接丢弃该帧,若有效且需要进行完整性检查,则将 SN 与 PSN 比较,若 $SN == PSN+1$ | $SN==PSN+2$ (PSN 是 IC 模块上一次接收到的帧序号;运算符“+”是回滚加,即其值到达 255 后会回滚到 1),则完整性检查通,该帧可以继续处理。

4.2.2 冗余管理

机载航空电子系统由于运行的环境比较恶劣,经常面临长期剧烈震动和温度变化频繁的外部环境,在这样的情况下为了保证数据传输的正确性,网络部件需要具备能够处理飞行过程中各种故障的能力,对于这个问题,AFDX 网络采用了冗余机制,这是因为 AFDX 作为一种实时性要求很高的机载航空电子系统上专用的网络,若采用通常通信系统的“主设备/从设备切换”机制^[21],必然会导致在出现故障时切换设备的时间延迟,这段延迟在 AFDX 中是不被允许的。在 AFDX 网络中存在两个交换网络,称为网络 A 和网络 B,发送端系统在发送时将数据帧复制相同的两份发送到网络 A 和网络 B 中,接收端系统可以同时收到网络 A 和网络 B 上传来的数据,采用先到先有效的算法通过 SN 字段来判断接收最先到达的网络上传过来的帧^{[22][23]}。

4.2.3 接收数据帧头常数域检查过滤

端系统对收到的数据在进行完整性检查和冗余管理处理后,还需要对数据帧头的常数域部分做检查,若不符合标准协议的规定就丢弃掉,具体比较的帧格式

参照 3.2.2 章节协议层次划分的规定,采用这样的机制可以有效过滤掉非标准的 AFDX 数据帧,提高 AFDX 网络通信数据的正确性和可靠性,有效保障了网络的稳定性。

4.2.4 接收数据帧头校验过滤

端系统对收到的数据在进行完帧头常数域的检查后,继续对接收帧的帧头进行校验,包括 IP 头校验和 UDP 头校验,算法为经典的折回两次累加求和,若校验和出错,即该数据帧在传输过程中帧的头部或数据部分出错,就将该帧丢弃掉。这种机制同样提高了 AFDX 网络通信数据的正确性和可靠性。

4.2.5 接收数据与自身配置信息不匹配的过滤

端系统对收到的数据在进行完帧头常数域的检查 and 帧头校验后,即可保证该帧的正确性,但还需要判断该帧是不是发给本端系统的数据,即均需要接收该帧。由于 AFDX 网络在运行时各个端系统都会加载固定的配置信息,配置信息里详细规定了接收端口的目的 IP 地址、目的 UDP 地址和接收 VL 的标识号,因此端系统的底层传输程序会对接收到的帧的帧头内部的目的 IP 地址、目的 UDP 地址和接收 VL 的标识号进行判断,若包含在自己的配置信息里即接收,否则丢弃。这种机制能很好的过滤掉网络中的无效数据,提高数据通信的效率。

4.3 区分服务的数据端口技术

AFDX 网络中需要对不同种类的数据服务对象提供不同要求的实时性和确定性保证,将网络中的数据分为两大类:航空电子数据和服务数据。

航空电子数据通信端口用于航空电子系统内部数据的通信,对数据的实时性和可靠性要求较高。在这类端口中又根据航空电子系统数据的实时性分为采样端口和队列端口。服务数据用于 TFTP 传输以及同兼容网络进行通信,采用服务接入点数据端口。

AFDX 网络中在对不同种类的数据服务对象采用不同的端口操作,这几中端口的协议规定具体在网络协议的章节 3.2 已经描述过,以下研究端口的具体实现过程。端口的实现主要分为三个步骤:加载配置信息、创建端口、端口发送/接收数据。

加载配置信息是指加载 AFDX 网络在初始化时确定的一张配置信息,这张配置信息规定了端系统的发送/接收端口、发送/接收 VL 等各项配置信息,通过中断方式通知端系统板卡,将配置信息从主机端加载到板卡的本地内存上。

创建端口是指在主机端根据配置信息的端口信息给各个端口分配内存空间并管理这些端口的过程。端口缓冲区用来存放需要发送和接收的消息，缓冲区的大小计算如下：

发送缓冲区大小 = (发送端口 1 大小 * 发送端口 1 深度) + (发送端口 2 大小 * 发送端口 2 深度) + ... (发送端口 n 大小 * 发送端口 n 深度)

接收缓冲区大小 = (接收端口 1 大小 * 接收端口 1 深度) + (接收端口 2 大小 * 接收端口 2 深度) + ... (接收端口 n 大小 * 接收端口 n 深度)

总缓冲区大小 = 发送缓冲区大小 + 接收缓冲区大小

分配完内存后还需要保存并管理这些端口 ID 和分配缓冲的首地址之间的对应关系、端口有无数据的标志量等信息，称之为端口控制信息，保存在另一块内存上，最后需要将这些信息告知端系统板卡。

端口发送/接收数据是在端口创建完成之后正常工作状态下，由应用程序调用接口的通信操作。发送数据时驱动程序将用户数据拷贝到端口缓冲区中，通过标志量或中断机制通知端系统板卡，端系统板卡将数据从主机端拷贝到本地内存再发送到链路上。接收数据时端系统板卡将收到本地缓冲中的数据拷贝到主机端的端口缓冲区中，通知主机端有新数据要接收驱动程序再将数据从接收端口缓冲区中拷贝到用户端，完成一次完整的数据收发过程。

下面以队列端口为例，端口实现过程的示意图如图 4.3 所示。

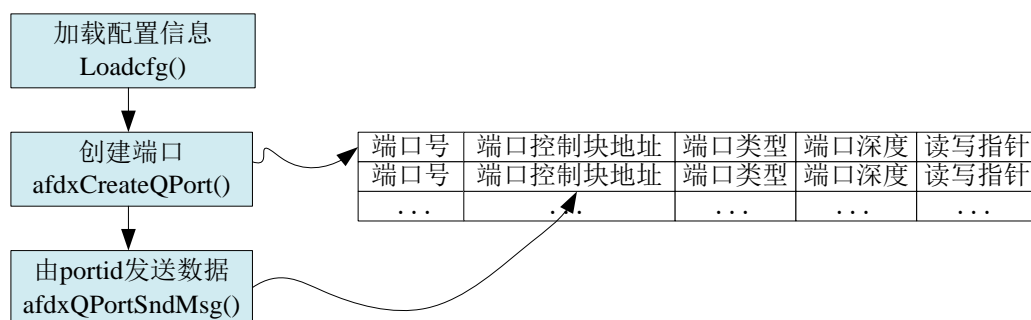


图 4.3 端口实现过程

系统初始化时在板卡初始化完成后首先调用加载配置信息函数 `loadCfg()`，其参数为配置信息的首地址和端系统的标识 ID，需要在主机内存中申请一段空间用来存放配置信息文件，并根据系统的需求做配置信息的备份和对备份的配置信息做端口重映射等操作，之后的通信就依据这张处理后的配置信息，将这张配置信息加载到端系统的板卡上。

创建端口时，根据配置信息中端口类型的不同，调用对应的创建函数。创建采样端口调用 `AFDXCreatSPort()`，创建队列端口调用 `AFDXCreatQPort()`，创建服务访问点端口调用 `AFDXCreatSAPPort()`，创建端口实现的主要功能是以端口 ID 为索引，给端口分配缓冲区空间，并且给下一个创建的端口准备好空间和一些前

导数据。输入参数为 ES 设备编号、要创建的端口 ID、当前未被占用的数据缓存区首地址和创建成功后返回指向当前端口控制块的指针。分配内存完成后还需要将端口控制信息以双口 RAM 或中断的方式告知端系统板卡。成功创建端口完成后,就可以使用端口进行数据的发送和接收了。

通信时,上层应用根据端口类型的不同调用不同的发送/接收函数。采样端口的发送调用 AFDXSPortSndMsg(),接收调用 AFDXSPortRcnMsg(),队列端口的发送调用 AFDXQPortSndMsg(),接收调用 AFDXQPortRcnMsg(),SAP 端口的发送调用 AFDXSAPPortSndMsg(),接收调用 AFDXSAPPortRcnMsg()。以队列端口发送为例,函数的参数为发送数据的端口号、指向数据的指针、发送数据的长度,发送时将数据拷贝到端口缓冲区,可以采用将数据长度存放在数据的第一个字上的机制,采用读写指针配合的机制告知端系统板卡需要发送数据,继而实现了将用户给出的数据由指定端口发出的功能。接收过程则刚好相反。

4.4 通信过程中的身份确认技术

4.4.1 AFDX 网络内通信

AFDX 网络内通信是指 AFDX 网络内部存在的端到端的通信方式,主要特点是对于每条信息,它的地址是静态的。内部通信通信定义了单向通信和双向通信两种模式。对于单向通信,AFDX 通信端口通过 UDP 端口定义,这样的端口可以是发送方也可以是接收方,采样和队列服务成为 AFDX 通信端口的特征;对于双向通信,部分使用 TFTP 协议(或其他在 UDP/TCP 层之上的协议)。可以采用两种使用 SAP 端口或者使用传统的 AFDX 网络通信端口来通信:使用使用 SAP 端口时,在 UDP 或 TCP 端口之间存在链接,每个 SAP 可以做为接收方或发送方。为了建立双向通信,必须使用两个 SAP 端口。使用传统的 AFDX 网络通信端口时,单独 ES 的双向通信需要两个通信端口,一个用来发送,一个用来接收。

4.4.2 AFDX 网络间通信

AFDX 网络间通信主要描述 AFDX 网络和兼容网络之间的通信。通信定义了单向通信和双向通信两种模式。对于单向通信,经常用在一个发送 ES 与兼容网络之间的通信。主要使用拥有 UDP 端口的传统 AFDX 通信端口^{[24][25]}。这意味着 ES 的配置信息中包含目的端 IP 和端口号。对于双向通信,可以采用 SAP 端口服务支持的 TFTP,SNMP,615A 协议,或其他使用 UDP/TCP 的协议,每个 SAP 端口可以作为发送方或者接收方。两个 SAP 端口可以使用构建双向通信。发送方 SAP 可以传递 IP 地址和兼容网络端目的地址的 UDP/TCP 端口标识。

4.4.3 身份确认实例

AFDX 网络在通信时标识一次通信采用源、目的地址匹配的机制^[13]。通过 UDP Source Port + Source IP + Destination MAC(VL identification) + Destination IP + UDP Destination Port 标识此次通信，其中源端 IP，可能来自多个 UDP/TCP 端口。对于目的端 IP，可能会发送给多个目的端 UDP/TCP 端口，对等通信如图 4.4 所示。

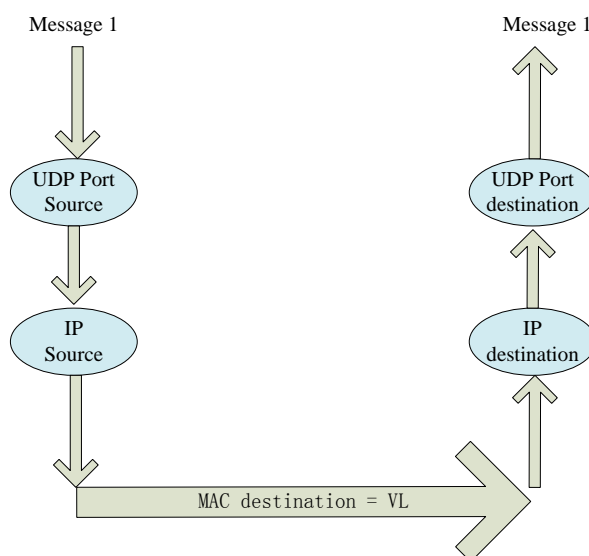


图 4.4 通信流程

模拟举例如下图所示，其中 3 条信息被 3 组上述的五部分所标识。

Message 1 => UDP Source Port x + Source IP + destination Mac + destination IP + UDP destination port n

Message 2 => UDP Source Port y + Source IP + destination Mac + destination IP + UDP destination port m

Message 3 => UDP Source Port z + Source IP + destination Mac + destination IP + UDP destination port v

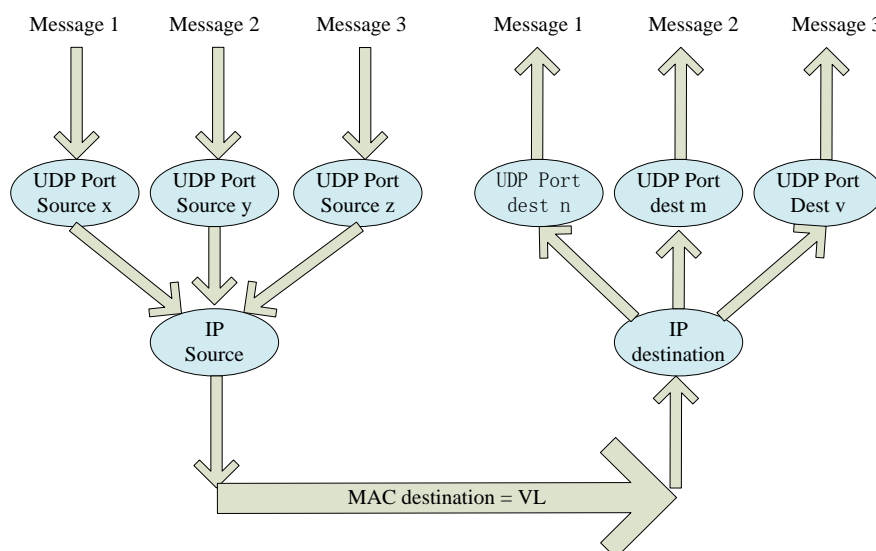


图4.5 单一链路上的消息标识

在实际的 AFDX 网络中，通信示意图如图 4.6:

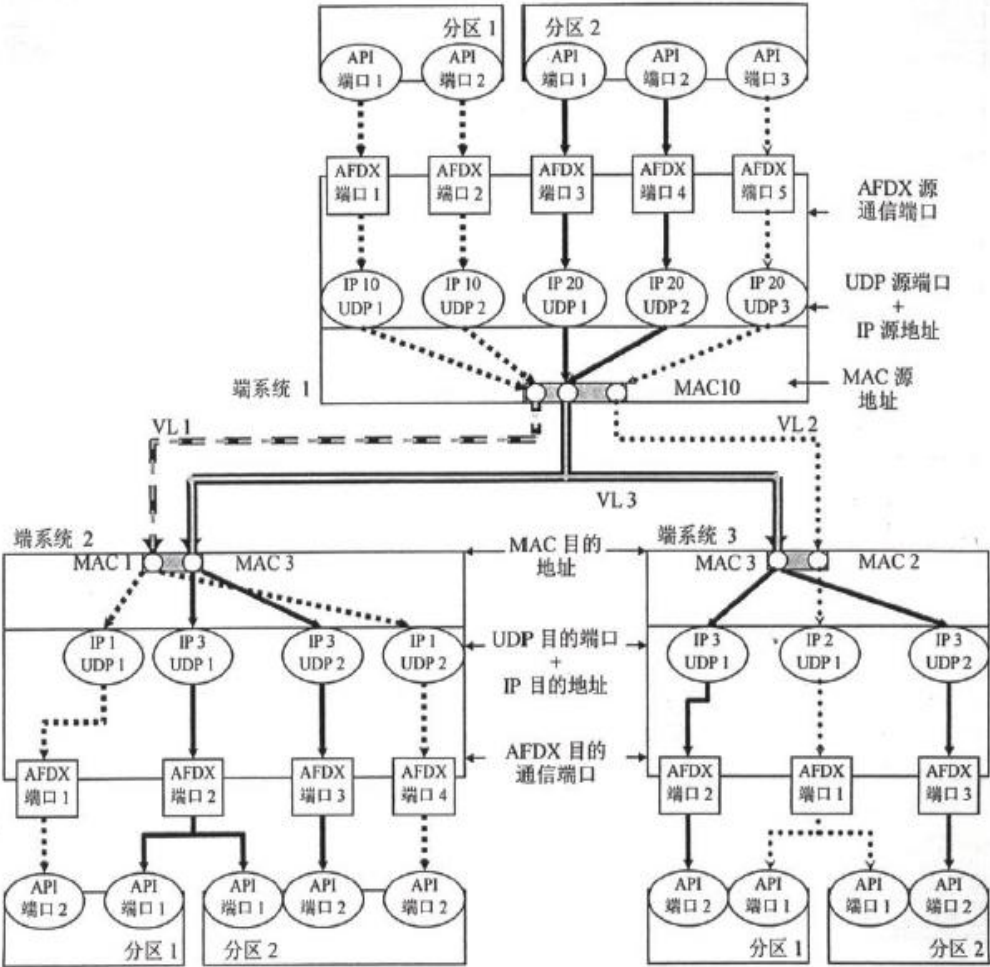


图 4.6 AFDX 网络通信示意图

如图中所示，端系统 1 具有三条虚拟链路：VL1,VL2 和 VL3。
端系统 1 的分区 1 接入一条虚拟链路 VL1。
端系统 1 的分区 2 接入两条虚拟链路 VL2 和 VL3。
以下是每个 ES 的地址表。

表 4-1 端系统 1 的发送表

S	源分区	UDP 源	IP 源	MAC 源	UDP 目的	IP 目的	MAC 目的
端口 1	分区 1	UDP1	IP10	MAC10	UDP1	IP1	MAC1(VL1)
端口 2	分区 1	UDP2	IP10	MAC10	UDP2	IP1	MAC1(VL1)
端口 3	分区 2	UDP1	IP20	MAC10	UDP1	IP3	MAC3(VL3)
端口 4	分区 2	UDP2	IP20	MAC10	UDP2	IP3	MAC3(VL3)
端口 4	分区 1	UDP3	IP20	MAC10	UDP1	IP2	MAC2(VL2)

表 4-2 端系统 2 的接收表

S	源分区	UDP 源	IP 源	MAC 源	UDP 目的	IP 目的	MAC 目的
端口 1	分区 1	UDP1	IP10	MAC10	UDP1	IP1	MAC1(VL1)
端口 4	分区 1	UDP2	IP10	MAC10	UDP2	IP1	MAC1(VL1)
端口 2	分区 12	UDP1	IP20	MAC10	UDP1	IP3	MAC3(VL3)
端口 3	分区 2	UDP2	IP20	MAC10	UDP2	IP3	MAC3(VL3)

表 4-3 端系统 3 的接收表

S	源分区	UDP 源	IP 源	MAC 源	UDP 目的	IP 目的	MAC 目的
端口 2	分区 1	UDP1	IP20	MAC10	UDP1	IP3	MAC3(VL3)
端口 3	分区 2	UDP2	IP20	MAC10	UDP2	IP3	MAC3(VL3)
端口 1	分区 12	UDP3	IP20	MAC10	UDP1	IP2	MAC3(VL2)

在接收器中，仅根据 MAC，IP 目的地址和 UDP 目的地址进行多路复用。图 4.7 展示了这个例子的物理拓扑结构。

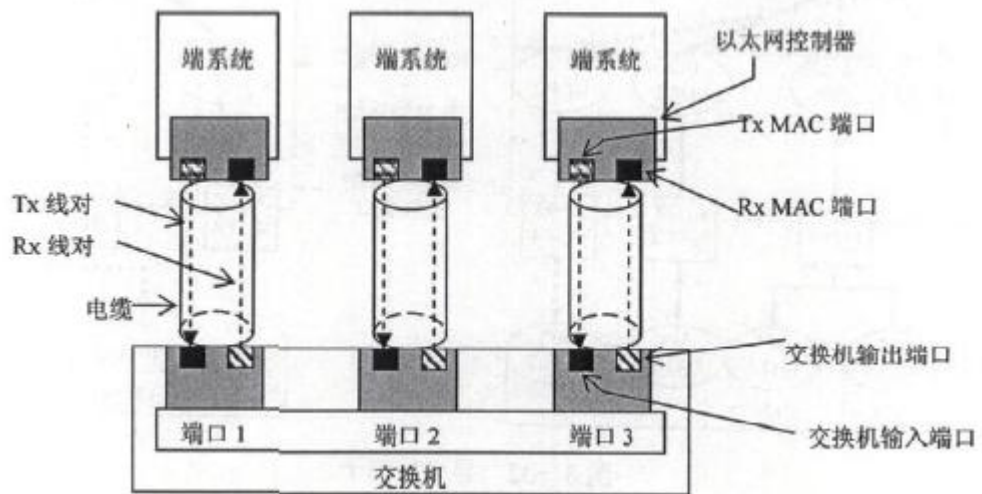


图 4.7 实例物理拓扑

交换机转发表如表 4-4 所示。

表 4-4 交换机转发表

输入端口	接收到的帧的 MAC 目的域	输出端口
1	MAC1(VL1)	2
1	MAC2(VL2)	3
1	MAC3(VL3)	2 和 3

4.5 确定性配置信息技术

AFDX 网络端系统在运行时首先加载静态的配置信息，这样从总体上确保了网络通信的确定性，在收发数据时均按照配置信息的配置，采用确定的端口发送，采用确定的虚拟链路配置。

端系统的发送和接收端口配置信息中规定了 AFDX 通信端口号、源/目的 UDP/IP 地址等，用来控制发送数据的端口和绑定的传输的虚拟链路；发送 VL 配置信息中规定了最大帧长、最小帧长、网络选择等参数，用来控制虚拟链路上的包流量和不同 VL 调度的切换；接收 VL 配置信息中规定了 Skewmax、完整性校验使能、冗余校验使能等参数，可以控制对收到的数据帧的检查和过滤，具体如图 4.9 所示。

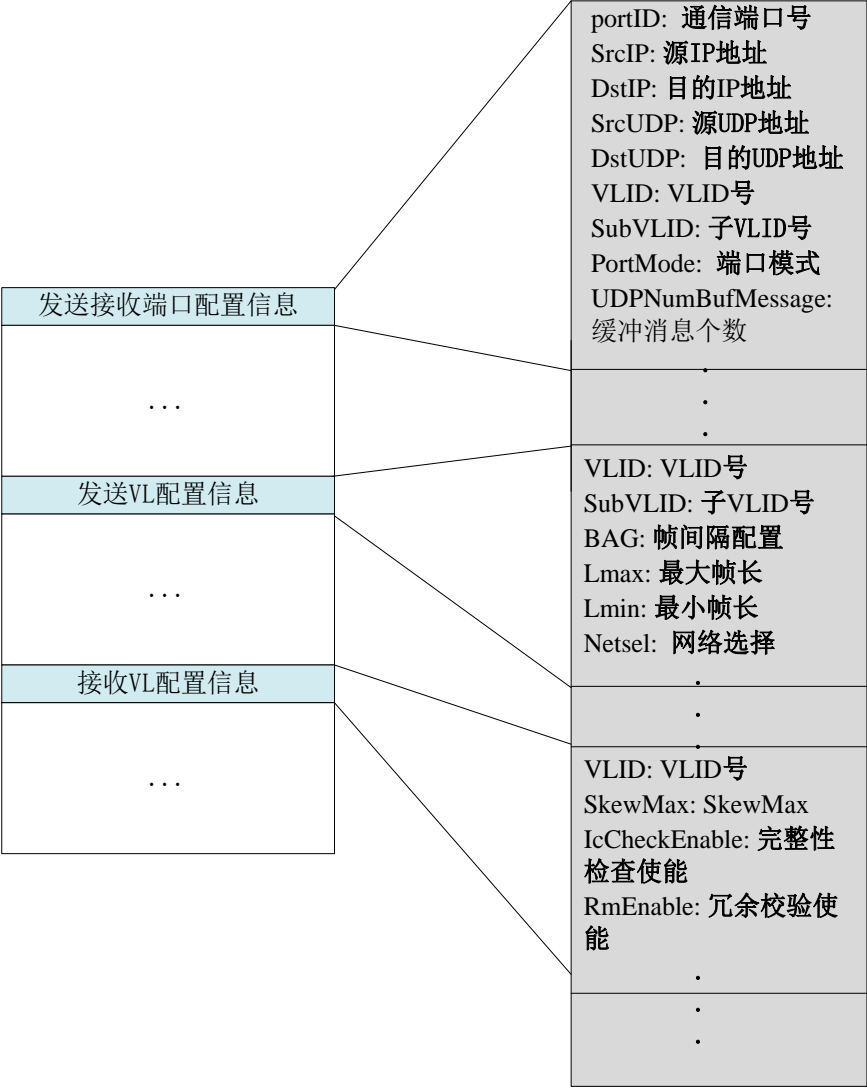


图 4.9 端系统配置信息

4.6 本章小节

本章首先从 AFDX 网络端系统实现的角度，分析了保证队列高效调度和发送的虚拟链路激技术、保证数据传输正确性和可靠性的接收帧过滤技术、确保服务质量的区分类型的端口技术、采用静态配置信息确保系统通信延时的确定和通信端口的确定性等。可以看出，任何单一技术都无法保证 AFDX 网络能够正常稳定并且可靠的运行，因此将多种技术融合才是正确的策略。各种技术的融合能够为用户提供较为完善的解决方案，全方位地应对各种不同的威胁和脆弱性。

第五章 交换机关键技术实现

上一章研究了端系统的一些关键技术，作为 AFDX 网络的另一主要部件的交换机，其在实现上采用的关键技术对网络整体的运行的功能和性能影响也是至关重要的。本章将具体研究几个交换机的关键技术，包括采用的接收帧的过滤技术、模式切换技术以及采用确定性网络配置信息等。

5.1 接收帧过滤技术

AFDX 交换机作为 AFDX 网络中的重要组件，对接收到的数据帧有对应的过滤机制，保障在网络中传输的数据都是正确可靠的，并且若收到错误的、无效的、不符合标准协议的、不是发向本节点的数据等均采用过滤的机制，保证了网络数据的正确性和整个网络运行的可靠性。

AFDX 网络交换机的过滤机制包括帧过滤、基于警管的流量控制等，以下详细介绍。

5.1.1 帧过滤

为了确保整个网络的健壮性，仅传输正确的数据帧是非常重要的。因此，数据帧一旦到达交换机，必须对它进行顺序检查以及循环冗余校验，丢弃掉不满足测试要求的数据帧如下：

- 以太网帧长大于 1518 字节或小于 64 字节的帧。
- 以太网帧长非 8 的整数倍的帧(不满足位对齐)。
- 以太网队列长度大于 VL 允许的最大 L_{max} 的帧，这种帧占用的带宽大于分配带宽。
- 以太网线长小于 L_{min} 的帧。
- MAC 目的地址不正确的帧。
- 输入端 VL ID 错误的帧。

5.1.2 基于警管的流量控制

交换机根据 VL ID 从配置信息项获取到过滤和警管的相关参数^[23]。接收到的每一帧根据配置信息进行过滤和警管，这些参数是通过 VL ID 获取的，具体规定如下：

- 每一条 VL 或一组 VL 共享一个 ACi。流量警管功能模块根据配置信息获取一个 BAG。
- 对于共享 ACi 的每条 VL 或每组 VLS，警管功能应该根据配置信息使用 jitter 的最大值。
- 流量警管可以配置 jitter 从 0 到 10 毫秒，这意味着 Aci 有一个上限，超过这个范围的 jitter 值也是正确的。
- 警管功能至少可以处理一个长度在 64 字节到 1518 字节的以太网帧。
- 每一条 VL 对应的一个 BAG, jitter, 以及最大帧长值。
- 当一个 ACi 被一组 VL 使用时，所有的 VL 使用同一 BAG，同一 Smin 和 Smax。
- 当一个 Aci 被一组 VL 使用时，警管模块使用 VL 中最大的 jitter 做为 ACi 计算的参数。

5.2 运行模式切换技术

AFDX 交换机在 AFDX 网络通信中处于核心位置，完成 AFDX 网络中航空电子系统或设备之间数据通信的网络链路的建立、维护、通信管制及数据交换功能^{[26][27]}。AFDX 交换机提供各个设备端系统之间的数据交换、调度功能，在运行时可以在不同的情况下进入不同的工作模式，各个模式的切换可以有效的保障网络中交换数据的正确性和整个网络运行的可靠性^[28]。

交换机共有 INIT、SHOP、OPS、PASSIVE、DL、QUIET 等六种运行模式，各模式之间的转换关系如图 5.1 所示。

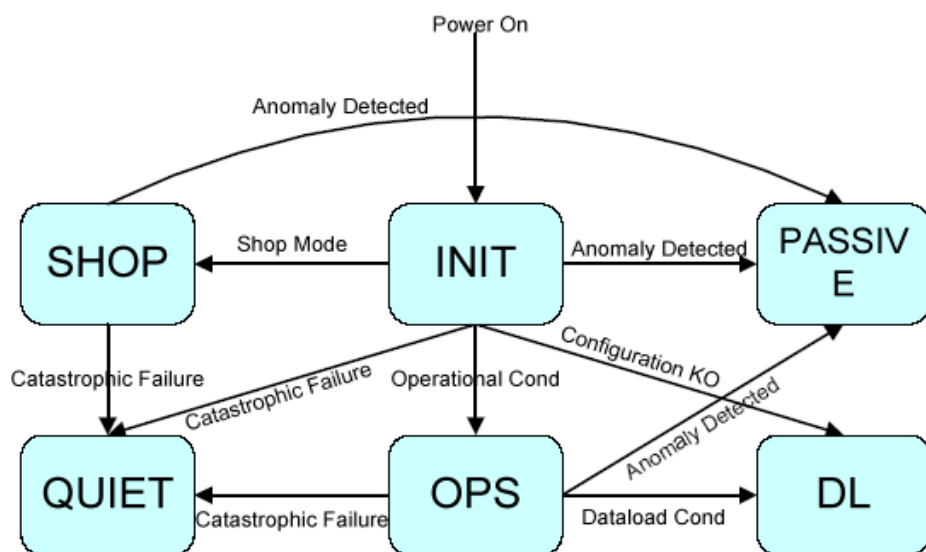


图 5.1 交换机运行模式切换

其中，在 INIT 模式下若发生引脚编程奇偶校验失败或者任何安全检查失败时，

交换机迅速进入 PASSIVE 模式,在该模式下交换机的故障指示器指示故障状态。当任何灾难性错误使得交换机的某些功能不可用时,交换机进入到 QUIET 模式,错误情况例如编程引脚的 CRC 校验失败、导入码 CRC 校验失败、处理器指令检查失败、地址/数据总线监测失败、RAM 监测失败、硬件寄存器检查失败、默认 OPS 软件 CRC 校验失败、默认配置文件 CRC 校验失败等,在 QUIET 模式,交换机的某些功能将被停止。交换机不再转发帧,也不允许和交换机管理模块(SNMP)进行通信。QUIET 模式确保交换机不会再转发信息帧,并保持安静,采用这种模式切换的机制能够有效的保障 AFDX 网络间数据传输和交换的可靠性。

5.3 监视功能实现技术

交换机的监视功能在第二章网络的基本组成中已经提到,交换机应该带有一个故障/健康标志。当至少一个使用汇总的以太网端口处于故障中的时候,故障/健康标志即被设置为“故障”,并且故障/健康标志每隔 100ms 更新一次。

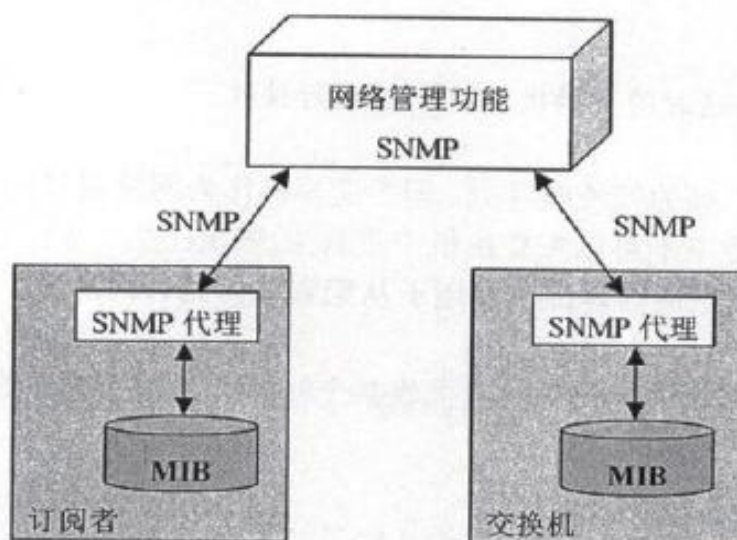


图 5.2 航空电子数据通信网络监视概况

AFDX 网络交换机的监视功能基于:

- (1) 在每一个 AFDX 组建(装置,网络用户和交换机)上实现的 MIB 库 (Management Information Base,管理信息库),用以存储关于这些组件的信息;
- (2) 在每一个 AFDX 组建(装置,网络用户和交换机)上实现 SNMP(Simple Network Management Protocol 简单网络管理协议)与网络管理功能(Network Management Function)通信,SNMP 是提供一种从网络上的设备中手机网络管理信息的方法的一系列协议组和规范,也为设备向网络管理工作站报告问题和错误提

供了一种方法。SNMP 体系结构由管理站，代理， MIB 和通信协议 SNMP 组成。其中管理站提供网络的配置，性能、故障、计费管理等管理功能，代理是配备了 Agent 实体的各类设备，如主机，网桥，路由器，网关等，在 Agent 实体的支持下响应管理站的操作请求，对操作系统中各类资源的被管对象进行访问。

（3）网络管理功能从所有组件收集信息，实现信息的关联，用来检测或者定位失效，并用来分析网络性能。

交换机包含一个 AFDX 端系统，它是一个 AFDX 订阅者。该交换机应实现一个 MIB 库和一个 SNMP 代理。另外，交换机的 MIB 库包含一个唯一的与交换机功能有关的 MIB 对象。故障检测应该可以修改由交换机管理的 MIB 库中的状态对象。

5.4 确定性配置信息技术

AFDX 网络交换机在运行时首先会加载静态的配置信息，这样从总体上确保了网络通信的确定性，在收发数据时均按照配置信息的配置，采用确定的端口发送，采用确定的虚拟链路配置，转发至确定端口等。

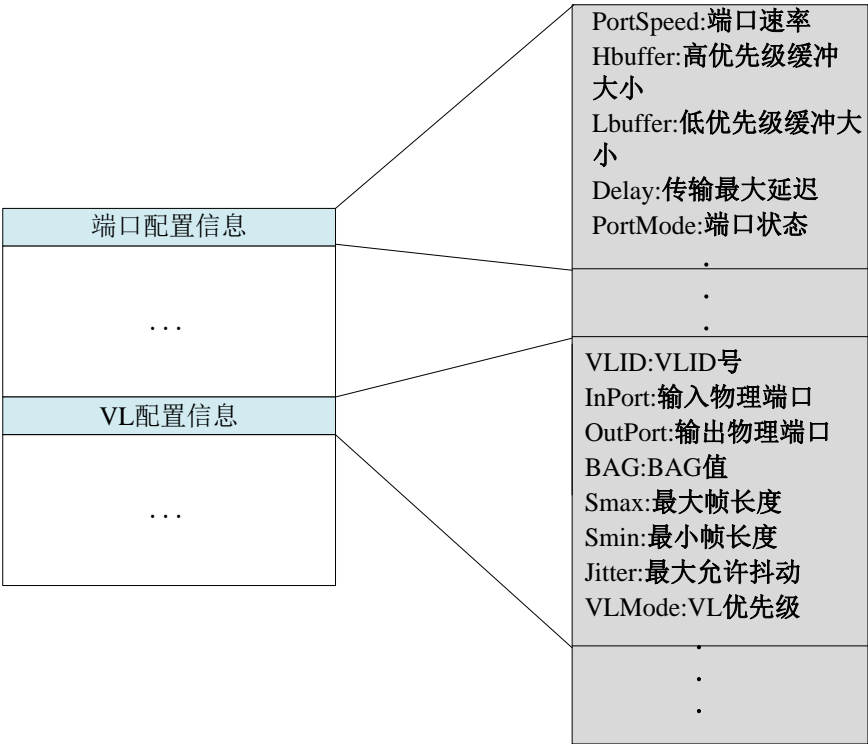


图 5.3 交换机配置信息

交换机的端口信息配置信息中规定了端口的速率、优先级、最大延迟等参数，可以警管超过分配的带宽的帧；VL 配置信息配置信息中规定了该条 VL 上的输入输出物理端口、最大帧长度、最小帧长度、最大允许抖动等参数，如上图 5.3 所示。

5.5 本章小结

本章研究了 AFDX 网络交换机在实现上采用的保证数据传输正确性的接收帧过滤技术、保证可以对各种威胁和错误做出正确及时反映的运行模式切换技术、以及实现了监视功能可以有效的监视所有的操作以便及时的分析和判断、采用静态配置信息策略确保系统通信延时的确定和转发端口的确定性。从整体上来看，和端系统的策略一致，交换机同样需要将各种关键技术融合起来才能有效的确保整个网络的运行。

第六章 AFDX 网络测试

本章将对 AFDX 网络采用技术手段进行测试, 这样不仅可以测试在网络设计过程中采用的关键技术的有效性, 还能发现和及时排除网络数据传输的其他的威胁和隐患, 评估网络中数据传输的实时性和正确性。以下将首先对 AFDX 网络做部件级测试, 即测试网络中端系统和交换机的传输性能, 然后对 AFDX 网络从系统的角度进行测试。具体测试流程从测试平台的搭建、测试原理以及对实际测试用例的分析等方面进行研究, 建立完整的测试体系。

6.1 端系统测试

6.1.1 测试平台

AFDX 端系统测试软件包括五部分, 分别为端系统底层传输软件、端系统驱动软件、应用管理软件、测试分析软件和测试用例。其中底层传输软件实现整个协议栈的功能。端系统驱动软件和应用管理软件均运行在待测设备的主机端, 驱动软件提供一组 API 接口供应用管理软件调用, 应用管理软件完成对待测设备的初始化和解析并回复对应的信息^[29]。测试分析软件用来综合分析被测设备返回的信息以及通过管理软件获取的信息并给出测试结论^{[30][31]}。测试用例用 Python 语言开发的, 用于每个测试项的测试。

AFDX 端系统测试硬件平台包括两台 PC 机、一台 TechSAT 测试设备、一个 TAP 监控模块和一个 ES 模块, 测试平台搭建如图 6.1 所示。

其中, TechSAT 平台是德国 TechSAT 公司开发的测试 AFDX 网络的权威的专用设备, 用来测试 AFDX 网络端系统和交换机以及网络系统的协议符合性^[31]。

6.1.2 测试原理

对端系统的测试首先需要创建被测试设备, 测试台端初始化完后通过 RESET 命令复位被测试设备, 被测试设备重新加载配置信息, 再创建消息端口, 这样被测试设备的初始化工作就已经完成, 可以开始正常的测试工作。测试时通过命令序列的来回传递和解析方式工作, 测试设备通过一些命令序列(诸如: RESET、RRPC、ERPQ、EIPC、TCQR 等)和被测试设备(端系统)进行通信, 测试设备发出

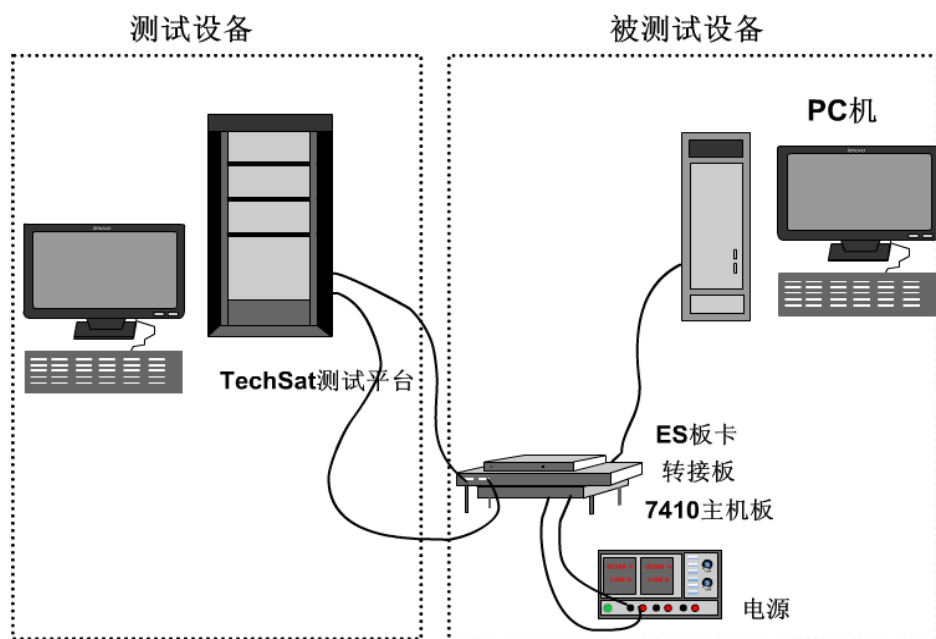


图 6.1 端系统基于 TechSAT 的测试平台

命令序列，ES 对命令序列进行应答(ACK)，最后测试设备对 ES 回复的命令序列以及数据进行正确性判断，包括对数据内容、格式、校验和、响应时间等进行判断，依次给出测试项的测试结果^{[32][33]}。

6.1.3 虚拟链路包间隔测试

(1) 测试目标

测试台和被测试设备之间通过命令传输通信，命令 AFDX 网络端系统向测试台发送一组数据，BAG 值配置分别为 1ms、2 ms、4 ms、8 ms、16 ms、32 ms、64 ms、128ms，TechSat 测试台端校验收到的数据的帧的间隔时间和总时间，测试 AFDX 端系统能够按规定时间和延迟的范围内正确有效的发送出数据帧，保障 AFDX 网络内通信数据传输的延时确定性和数据的可靠性，测试端系统虚链路调度的性能。

(2) 测试步骤

- 测试台端发送命令 Reset，被测试端被复位，重新加载固定配置信息，准备好接收测试台发送的命令；
- 测试台端第一次发送命令 EIPC，被测试端解析该命令，发送数据负载 1280 字节到通信端口，该端口 VL 的 BAG 值配置为 1ms，发送数据；
- 测试台端第二次发送命令 EIPC，被测试端解析该命令，发送数据负载 1280 字节到通信端口，该端口 VL 的 BAG 值配置为 2ms 发送数据；
- 测试台端第三次发送命令 EIPC，被测试端解析该命令，发送数据负载 1280 字节到通信端口，该端口 VL 的 BAG 值配置为 4ms 发送数据；

- e) 测试台端第四次发送命令 EIPC, 被测试端解析该命令, 发送数据负载 1280 字节到通信端口, 该端口 VL 的 BAG 值配置为 8ms 发送数据;
- f) 测试台端第五次发送命令 EIPC, 被测试端解析该命令, 发送数据负载 1280 字节到通信端口, 该端口 VL 的 BAG 值配置为 16ms 发送数据;
- g) 测试台端第六次发送命令 EIPC, 被测试端解析该命令, 发送数据负载 1280 字节到通信端口, 该端口 VL 的 BAG 值配置为 32ms 发送数据;
- h) 测试台端第七次发送命令 EIPC, 被测试端解析该命令, 发送数据负载 1280 字节到通信端口, 该端口 VL 的 BAG 值配置为 64ms 发送数据;
- i) 测试台端第八次发送命令 EIPC, 被测试端解析该命令, 发送数据负载 1280 字节到通信端口, 该端口 VL 的 BAG 值配置为 128ms 发送数据;
- j) 测试台发送 TCRQ 命令, 完成该次命令组。

(3) 测试结果及分析

记录 TechSat 测试台端的测试结果如下:

测试台从发出命令开始到过 5 秒后开始对结果进行校验, 对端系统的网口 A 和网口 B 的信息都需要顺序校验以下信息并记录结果:

- a) 检查 BAG 值为 1ms 的一组帧, 检查确认 MAC 地址、VL 值均匹配, 再判断收到数据的间隔时间范围在 1000~1001um 内, 说明性能达到要求, 返回状态为通过。
- b) 检查 BAG 值为 2ms 的一组帧, 检查确认 MAC 地址、VL 值均匹配, 再判断收到数据的间隔时间范围在 2000~2002um 内, 说明性能达到要求, 返回状态为通过。
- c) 检查 BAG 值为 4ms 的一组帧, 检查确认 MAC 地址、VL 值均匹配, 再判断收到数据的间隔时间范围在 4000~4004um 内, 说明性能达到要求, 返回状态为通过。
- d) 检查 BAG 值为 8ms 的一组帧, 检查确认 MAC 地址、VL 值均匹配, 再判断收到数据的间隔时间范围在 8000~8024um 内, 说明性能达到要求, 返回状态为通过。
- e) 检查 BAG 值为 16ms 的一组帧, 检查确认 MAC 地址、VL 值均匹配, 再判断收到数据的间隔时间范围在 16000~16024um 内, 说明性能达到要求, 返回状态为通过。
- f) 检查 BAG 值为 32ms 的一组帧, 检查确认 MAC 地址、VL 值均匹配, 再判断收到数据的间隔时间范围在 32003~32024um 内, 说明性能达到要求, 返回状态为通过。
- g) 检查 BAG 值为 64ms 的一组帧, 检查确认 MAC 地址、VL 值均匹配, 再判断收到数据的间隔时间范围在 64024~64034um 内, 说明性能达到要求, 返回状

态为通过。

h) 检查 BAG 值为 128ms 的一组帧, 检查确认 MAC 地址、VL 值均匹配, 再断收到数据的间隔时间范围在 128048~128052um 内, 说明性能达到要求, 返回状态为通过。

分析以上测试台端的数据, 从测试结果可以看出 AFDX 端系统能看按照规定的时间和延时的范围内正确有效的发送出数据帧, 保证了 AFDX 网络内部通信数据端到端传输的确定性和数据的正确可靠性, 能够有效的保障了 AFDX 网络通信的性能。

6.1.4 帧的传输顺序测试及分析

(1) 测试目标

测试台和被测试设备之间通过命令传输通信, 命令 AFDX 网络端系统向测试台发送一组数据, TechSAT 测试台端校验收到的数据帧的数目和帧的序列号, 测试端系统能够按顺序发送帧, 保证 AFDX 网络内部通信数据传输的顺序有效性。

(2) 测试步骤

a) 测试试台端发送命令 Reset, AFDX 端系统被复位, 重新加载固定配置信息, 准备好接收测试台发送的命令;

b) 测试台端第一次发送命令 EIPC, 被测试端解析该命令, 发送数据负载 1 个字节到端口 'NORMLTX'; 测试台第二次发送命令 EIPC, 被测试端解析该命令, 发送数据负载到端口 'NORMLTX'; 重复 7 次;

c) 测试台发送 TCRQ 命令, 完成该次命令组。

(3) 测试结果及分析

记录 TechSAT 测试台端的测试结果如下:

测试台从发出命令开始到过 0.5 秒后开始对结果进行校验, 对端系统的网口 A 和网口 B 的信息都需要顺序校验以下信息并记录结果:

a) 检查 TCRQ 命令的回复信息, 报告状态;

b) 检查收到的帧的数目, 判断与实际要发送的帧数目是相等的;

c) 检查收到帧的 SN 号, 判断收到数据帧的 SN 号是顺序递增的, 返回正确状态。

分析以上测试台端的数据, 从测试结果可以看出 AFDX 端系统能够按照顺序发一组数据帧, 这个帧序列号是由标准数据帧定义中数据域中的最后一个字节, 每发送一帧, 该序列号 SN 加 1, 这样可以有效的保障 AFDX 网络中通信数据的顺序完整性, 例如在一个长帧分片传输时可以保证在接收端将该分片帧拼接完整。

6.1.5 接收缓冲区溢出处理测试及分析

(1) 测试目标

测试台和被测试设备之间通过命令传输通信，测试台第一次向 AFDX 端系统发送长度为 8192 字节的数据，检查返回信息；测试台第二次向被测试设备发送长度为(8192+1)字节的数据，检查返回信息；测试 AFDX 端系统在缓冲区溢出的情况下是否能够做出报告错误的响应信息，测试 AFDX 网络在通信数据出现故障情况下能够做出相应的处理而不会影响系统的正常运行。

(2) 测试步骤

- a) 测试台端发送命令 **Reset**，被测试端被复位，重新加载固定配置信息，准备好接收测试台发送的命令；
- b) 测试台端第一次向被测试端发送数据，长度为 8192B，等待被测试端处理；
- c) 测试台向被测试端发 **RRPC** 命令，被测试端解析该命令，向测试台端返回响应信息，测试台来校验收到的返回信息，查看数据长度并记录。
- d) 测试台端第二次向被测试端发送数据，长度为 8192+1 B，等待被测试处理；
- e) 测试台向被测试端发 **RRPC** 命令，被测试端解析该命令，向测试台端返回响应信息，测试台来校验收到的返回信息，看数据长度均正确。
- f) 测试台向被测试端发 **EIPC** 命令，被测试端解析该命令，向测试台端返回响应信息；
- g) 测试台向被测试端发 **TCRQ** 命令，被测试端解析该命令，完成本次测试。

(3) 测试结果及分析

记录 TechSAT 测试台端的测试结果如下：

- a) 测试台第一次发送 **RRPC** 命令，等待被测试端的回复，收到回复后检查收到的包的总长度和实际数据的长度相等，返回成功结果；
- b) 测试台第二次发送 **TCRQ** 命令，检查被测试端的回复信息，检查收到帧的数目和缓冲区未溢出时发送帧的数目是相等的，返回成功结果。

分析以上测试台端的数据，从测试结果可以看出 AFDX 端系统能够在接收缓冲区未溢出时正常收发数据，在接收缓冲区溢出后能够正确识别这种错误，不再进行数据帧的收发，但不会影响系统的正常运行。这样能够保障 AFDX 网络在正常运行中收到错误命令后能够正确处理错误，不会因为数据缓冲区的溢出而导致系统崩溃，可以很好的保证 AFDX 网络的正常稳定运行。

6.2 交换机测试

6.2.1 测试平台

AFDX 交换机测试软件包括四部分，分别为网络管理软件、数据加载软件、测试分析软件和测试用例。其中进程管理软件对测试过程进行计划和管理；网络管理软件与代理进程进行通讯，查询被测设备的 MIB 库，从而实现对被测设备的管理^[34]；数据加载软件加载配置信息文件；测试分析软件用于对被测设备返回的信息以及通过管理软件获取的信息与测试预想进行综合分析，得出测试结果；测试用例使用 Python 语言开发的，用于每个测试项的测试^{[35][36]}。

AFDX 交换机测试硬件主要由以下部件组成：

12 块仿真测试模块，用来产生需要的激励，接收通过被测设备的响应信息；IRIG-B 时间输出模块，用于 12 块仿真测试模块的时间同步；

- (1) 控制工作站，和主控制模块进行通信，进而控制各个仿真测试模块；
- (2) 测试机箱，它是由主控制模块和仿真测试模块组成，进行测试用例的执行和测试结果的分析；
- (3) 以太网 TAP 卡，连接在测试设备接口和被测设备接口之间，不影响线路传输，用来监控链路上的通信数据^[37]。

交换机基于 TechSAT 平台的测试系统硬件图如图 6.2 所示。

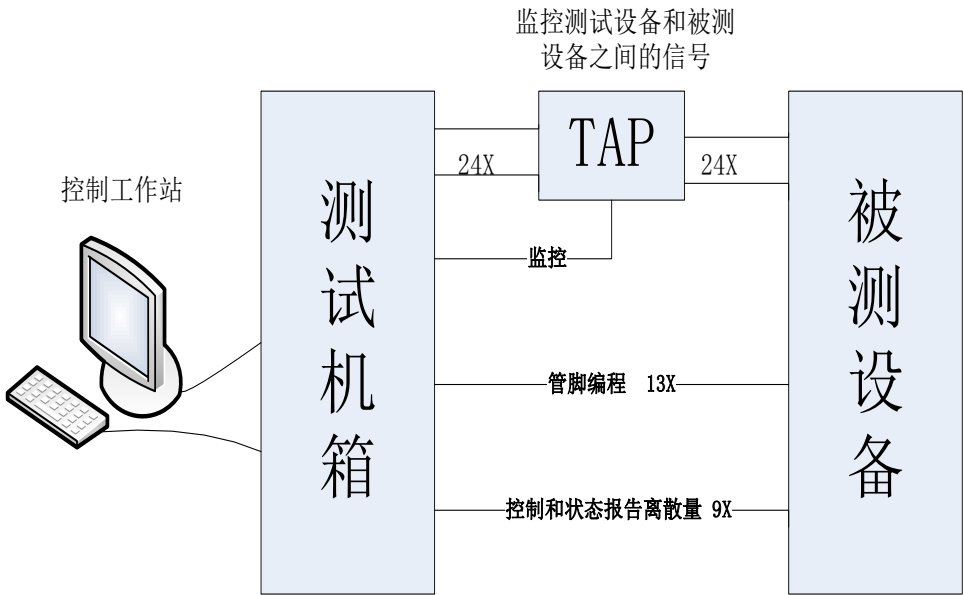


图 6.2 交换机基于 TechSAT 的测试平台

6.2.2 测试原理

被测交换机中不驻留测试响应程序，所有测试用例全部驻留在测试设备中。

测试时, 测试设备执行不同的测试用例, 交换机根据其自身功能对这些测试用例进行相应的处理并进行响应, 测试设备根据交换机的响应情况来判断交换机是否正常^{[38][39]}。

设计和开发好测试系统和测试用例后, 交换机的测试就可以自动进行。交换机每个测试用例的设计虽然不同, 但基本执行流程相同: 测试系统首先向被测交换机加载本测试用例的配置信息, 交换机复位使配置有效, 其次向交换机发送测试数据或驱动离散量信号, 交换机对测试数据进行处理并响应, 然后测试系统向交换机发送 SNMP 请求, 检查 SNMP 应答或离散量信号, 分析测试结果, 生成测试报告。

6.2.3 过滤错误帧功能测试及分析

(1) 测试目标

交换机能够过滤 CRC 错误、VLID 错误、MAC 地址错误、帧长大于 1518 字节和小于 64 字节错误功能测试。

(2) 测试步骤

- a) 构造好预先设计好的配置信息(24 个端口均有配置, VLID0-23, 端口 N 入, 端口 N+1 出, BAG=1ms, Jitter=0.5ms, Lmin=64 字节, Lmax=1518 字节, 常数域=0x0, 不共享 ACI, 高优先级);
- b) 交换机芯片的 24 个端口都配置 100M, 并设置接收使能;
- c) 将 2 块端系统(8245 主机板+HKS664ES 标准 PMC 板卡)的端口也设置为 100M;
- d) 将两个端系统分别链接在交换机的端口 1、2 上;
- e) 测试交换机的 1、2 端口是否显示 “Good Link”状态。
- f) 以一个有效的 VL 为基础, 由端系统 1 发出一个时间间隔和大小都有效的帧序列, 此帧序列包含 10 帧消息, 此帧序列包含 64 字节帧、1518 字节帧、421 字节帧、736 字节帧以及 1508 字节帧, 每种字节帧包含正确帧以及 CRC 错帧两种, 将此序列帧循环 100 次, 然后发送给交换机的端口 1。

(3) 测试结果及分析

结果截图如图 6.3, 可以看出, 交换机端口 1 收到了 1000 帧数据, 转发了 500 帧, MIB 信息库中有 CRC 错误的数据 500 帧。

分析以上测试台端的数据, 从测试结果可以看出 AFDX 交换机能对不符合帧格式和不符合标准协议规定的数据进行过滤, 保证了 AFDX 网络内部通信数据的存储转发数据的正确有效性。

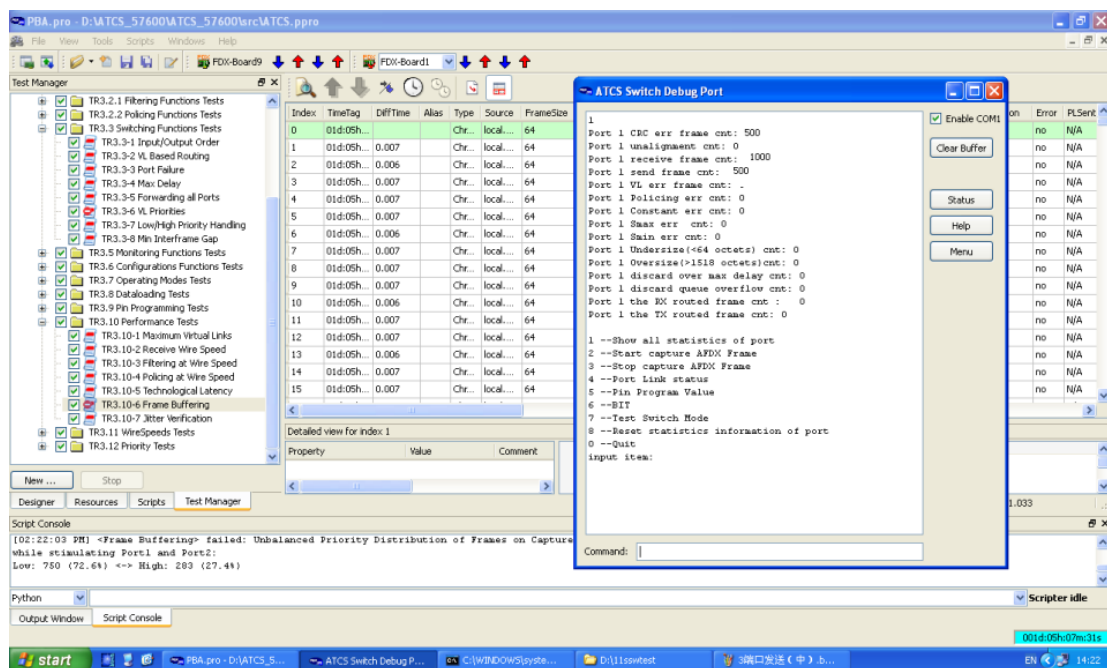


图 6.3 端口统计信息

6.2.4 VL 优先级测试及分析

(1) 测试目标

交换机可以根据 VLID 对优先级进行配置，并且按照优先级进行处理。

(2) 测试步骤

a) 加载配置信息：VLs 的转发端口配置成 $P[n] \rightarrow P[n]$, ($n=0, 1, 2, \dots, 23$), $P[n] \rightarrow P[n-1]$, ($n=1, 3, 5, 7, \dots, 23$), $P[n] \rightarrow P[n+1]$, ($n=0, 2, 4, 6, \dots, 22$), 三类转发路径的 VL 配置成不同的优先级。对于所有的 VL 剩下参数配置一样：BAG=1000us, jitter=0us, Lmax=1518 字节, Lmin=64 字节, AciGroupId=0。交换机端口配置成：MaxDelay=65535us, Speed=100Mbps/s, LowPriorityBufSize=HighPriorityBufSize=512 字节。

b) 测试时使用背靠背帧，是为了完成所需要的数据吞吐量。

配置第一组 6 条 VL 如下：

低优先级：VL(i)... VL(i+2)：交换端口映射： $P(j) \rightarrow P(j)$ ；

低优先级：VL(i+6)... VL(i+7)：交换端口映射： $P(j+1) \rightarrow P(j)$ ；

高优先级：VL(i+8)：交换端口映射： $P(j+1) \rightarrow P(j)$ 。

配置第二组 6 条 VL 如下：

低优先级：VL(i+3)... VL(i+5)：交换端口映射： $P(j) \rightarrow P(j+1)$ ；

低优先级：VL(i+9)... VL(i+10)：交换端口映射： $P(j+1) \rightarrow P(j+1)$ ；

高优先级：VL(i+11)：交换端口映射： $P(j+1) \rightarrow P(j+1)$ 。(j=0,2,4,6, ..., 22)

c) 每个 VL 发送一个单个帧，高低优先级的帧同时发送到交换机。

操作步骤截图如图 6.4,图 6.5,图 6.6。

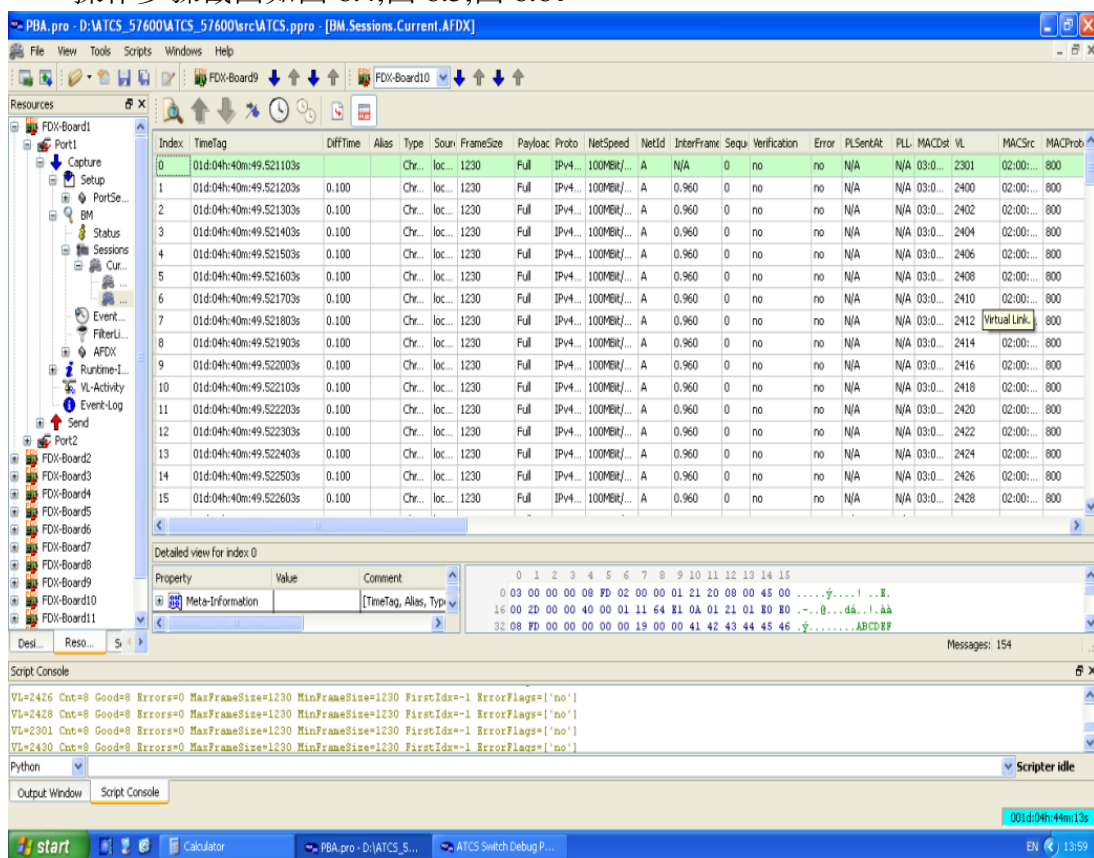


图 6.4 1 端口发送前

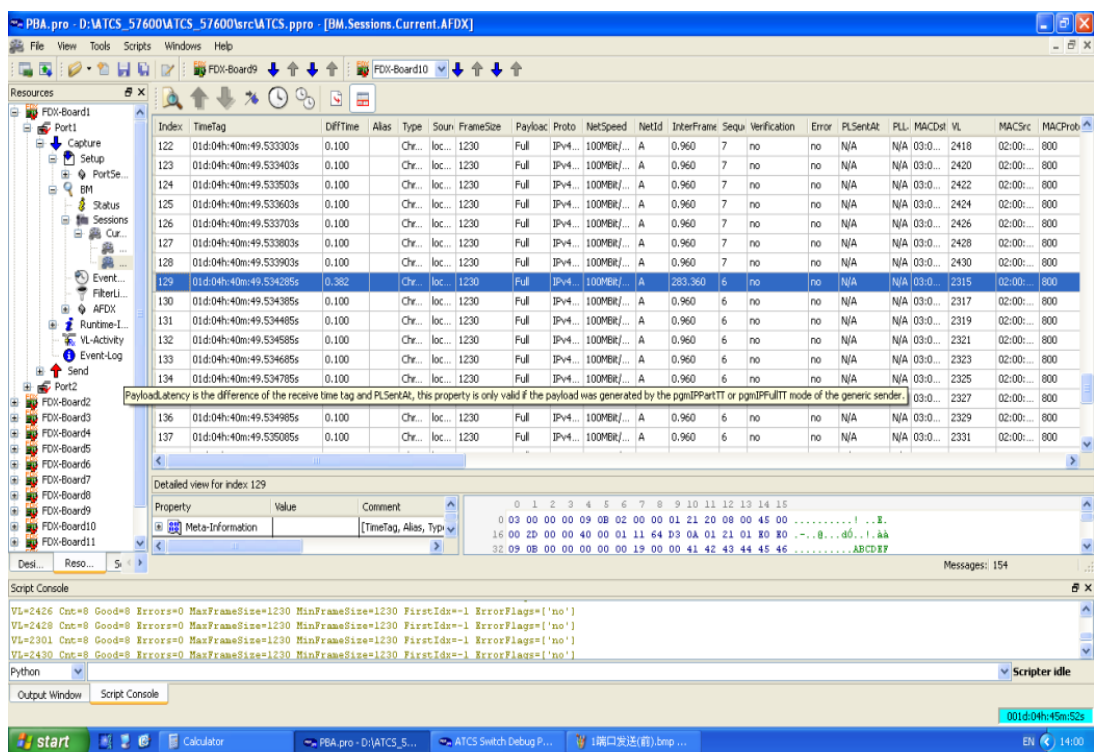


图 6.5 1 端口发送中

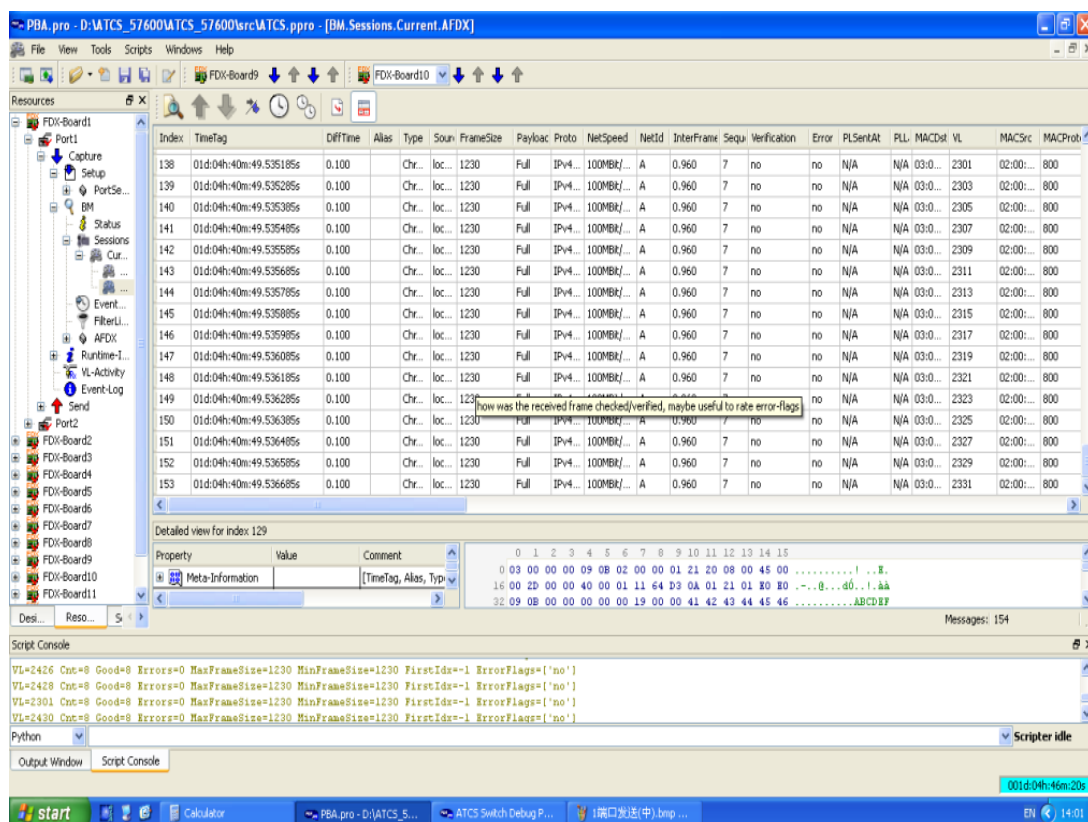


图 6.6 1 端口发送后

(3) 测试结果及分析

结果截图如图 6.7。

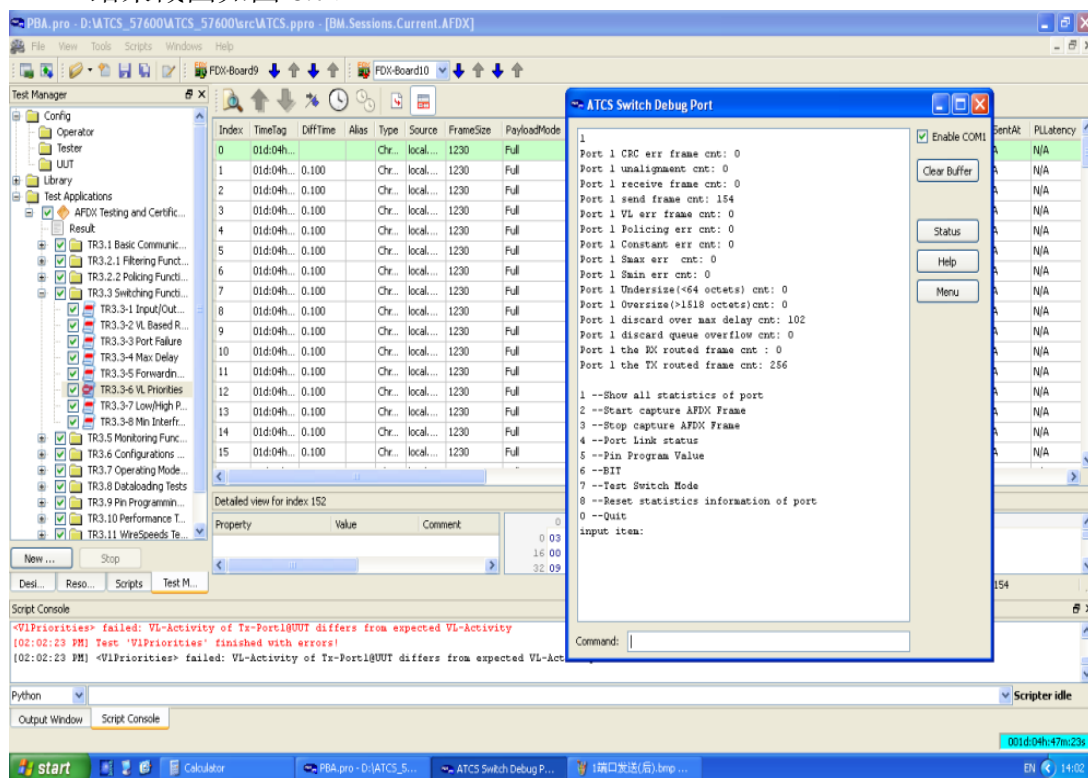


图 6.7 1 端口统计

观察高优先级的帧能够被测试设备接收到。分析结果,从测试结果可以看出 AFDX 交换机可以根据 VLID 对优先级进行配置,并且按照优先级进行处理,保障了网络运行的高低优先级配置功能。

6.3 AFDX 网络系统测试

以上两个章节在对端系统和交换机分别测试后,本节将对由端系统和交换机两大部件组成的 AFDX 网络实例模型进行系统级测试。

6.3.1 测试平台

AFDX 网络系统测试平台是为了模拟基于 AFDX 网络的航空电子网路系统并进行网络测试和性能的评定而构建的测试系统。该系统不仅包含了 AFDX 网络的基本组成元素,还包括 AFDX 网络的相关测试设备。通过 AFDX 网络各个模块之间的通信,利用网络测试设备进行数据的捕获及分析,可以进一步分析 AFDX 网络的特性,从实践的角度测试 AFDX 网络的传输性能^{[38][40]}。

AFDX 网络系统测试平台的主要软件包括网络监控软件、TAP 卡软件、AFDX 网络配置工具、615A 数据加载器、SNMP 网络管理等软件。其中网络监控软件提供用于分析和监控网络的诸多先进功能,包括:网络发现功能,通过监控通信可以重构网络拓扑;具备纳秒级监控网络通信的能力,并显示其所有详细信息;可完全对 AFDX 协议进行解码,包括消息中的数据;监控选定数据内容和网络带宽;发送和回放功能;提供过滤引擎。

AFDX 网络系统测试平台的主要硬件包括:交换机、ES 板卡、8245 主机板、监控卡、TAP 卡、NPort、PC 机。其中网络监控卡是一种网络监控设备,以图形化显示给用户,通过监控网络中的数据以及对监控到的数据进行分析,方便用户观测整个网络中的数据通信是否正常。网络传输卡是一种网络传输设备,以图形化显示给用户完成 AFDX 网络数据传输,包括 3 类端口的创建,配置信息的加载,数据的传输和解析等功能。

网络系统的搭建示意图如图 6.8 所示。

6.3.2 链路断开时继续传输的测试及分析

(1) 测试目标

由于 AFDX 网络是一个冗余网络,如系统测试平台示意图所示,网络内一般有两台交换机互为备份,例如测试当端系统 1 通过交换机转发数据到端系统 4 的

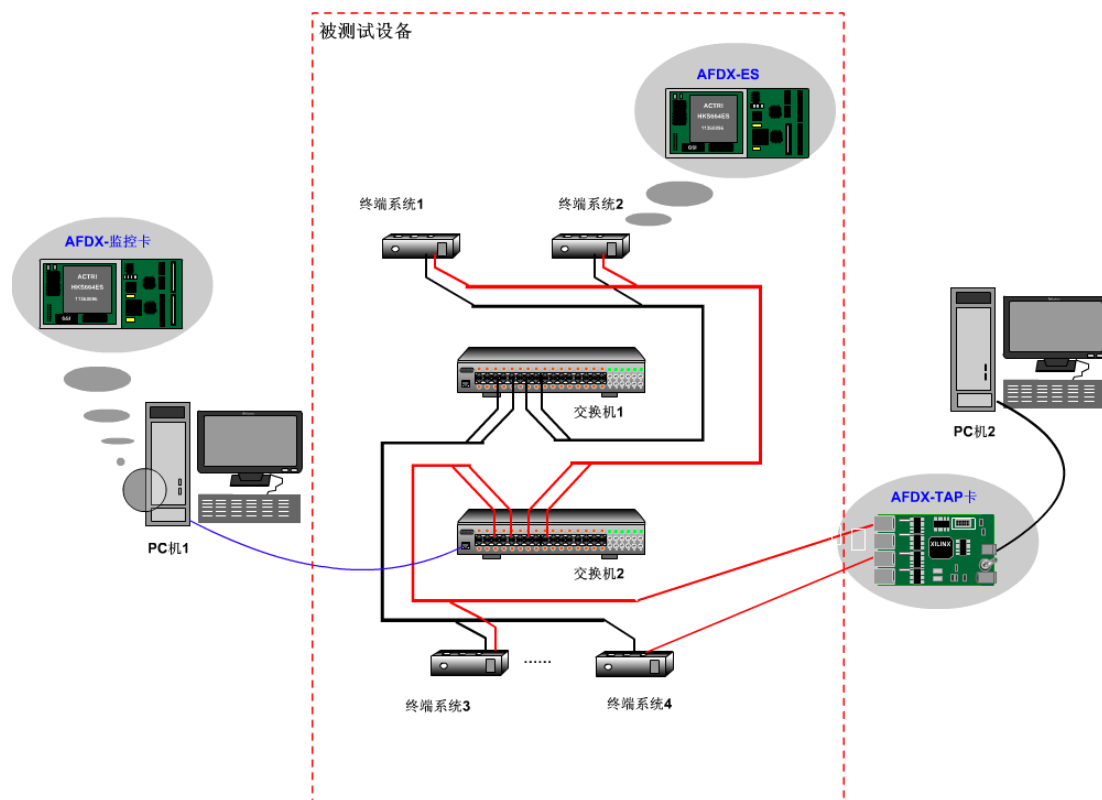


图 6.8 AFDX 网络系统测试平台

通信，当端系统 1 和交换机 1 的连接链路断开时，仍可以通过和交换机 2 的连接链路正常通信转发，即网络中某条链路的断开不会影响系统的正常运行，满足系统的健壮性要求。

(2) 测试步骤

- a) 交换机 1 和 2 控制寄存器写入 0x0000_0001 软复位交换机芯片；
- b) 使用默认配置信息初始化端口；
- c) 使用默认配置信息初始化 MAC；
- d) 将 ES 端口配置成交换机 24 个端口中的 0 号端口(配置端系统发送 VL 配置寄存器为 0x57，此寄存器 OP 位为 ES 端口)；
- e) 配置发送帧控制寄存器为 0x3f0850，即发送帧 VL 为 63，ES 配置帧，帧长为 80；
- f) 当发送 BUFFER 指针控制寄存器的 RDY 位为 1 时，主机向发送 buffer 窗口寄存器中写入符合要求的配置帧，再向发送 BUFFER 指针控制寄存器 ADD 位写 1(将已填充完成的发送缓冲数据提交)，发送 500 帧数据；
- g) 通过 TAP 卡监控网络中的所有数据；
- h) 将端系统 1 和交换机 1 之间连接的链路断开，和交换机 2 之间连接的链路保持不变，重复以上步骤，通过 TAP 卡监控网络中的所有数据；
- i) 恢复端系统 1 和交换机 1 之间连接的链路，重复以上步骤，通过 TAP 卡监

控网络中的所有数据。

(3) 测试结果及分析

通过 TAP 卡监控网络中的所有数据发现, 在端系统 1 和交换机 1 之间连接的链路断开时, 仍然能够通过交换机 2 实现数据的通信, 不会造成通信中断的情况。

6.3.3 帧的传输转发顺序测试及分析

(1) 测试目标

测试发送过程中, 给每个发送帧加上 SN, 端系统复位后, 每条 VL 发送的第一帧 SN 为 0, 随后 SN 递增加 1, 达到 255 后从 1 开始重新开始计数, 这样保证了帧在传输和交换时均按照队列顺序, 不会出现乱序的情况, 能够保证网络中数据通信的顺序完整性。

(2) 测试步骤

- a) 交换机控制寄存器写入 0x0000_0001 软复位交换机芯片;
- b) 使用默认配置信息初始化端口;
- c) 使用默认配置信息初始化 MAC;
- d) 将 ES 端口配置成交换机 24 个端口中的 0 号端口(配置端系统发送 VL 配置寄存器为 0x57, 此寄存器 OP 位为 ES 端口);
- e) 配置发送帧控制寄存器为 0x3f0850, 即发送帧 VL 为 63, ES 配置帧, 帧长为 80;
- f) 当发送 BUFFER 指针控制寄存器的 RDY 位为 1 时, 主机向发送 buffer 窗口寄存器中写入符合要求的配置帧, 再向发送 BUFFER 指针控制寄存器 ADD 位写 1(将已填充完成的发送缓冲数据提交), 发送 500 帧数据;
- g) 检查第一个 SN 是否为 0;
- h) SN 号是否连续;
- i) SN 号是否在 CRC 之前;
- j) 在 255 时是否环回到 1;
- k) 重新配置发送帧控制寄存器 31: 16 位的值, 其他位不变, 即改变发送帧 VL 为 0 到 62, 重复步骤 a 到 j。

(3) 测试结果及分析

步骤 g 中检查第一个 SN 结果为 0, 步骤 h 中 SN 号结果为连续, 步骤 i 中 SN 号在 CRC 之前, 步骤 j 中 SN 在 255 时环回到 1。

从测试结果可以看出, AFDX 网络中的数据能够实现按顺序传输和转发, 能够保证网络中数据通信的顺序完整性。

6.4 本章小结

本章从 AFDX 网络的部件级和系统级对网络进行了测试,采用 TechSAT 综合自动化测试平台能够同时满足 AFDX 网络端系统测试和 AFDX 网络交换机测试的要求。并搭建了 AFDX 网络的仿真系统,设计了测试实例例如测试当网络中某一链路断开时帧能否继续正常传输来测试网络的备份功能,是否能确保网络的稳定性。

当然,本章设计的测试实例只能从几个方面来测试 AFDX 网络性能,要对网络的整体性能测除了以上测试实例外,还包括网络在实际应用系统中的测试,网络应用测试需根据各机载网络的不同设计,进行特定的测试。

第七章 结束语

AFDX 网络从成熟的商业以太网发展而来,最大程度地降低了开发周期和费用,并针对航空系统的特殊要求提出了相应的约束和要求:使用双余度网络,并引入虚链路、BAG 等概念,以满足实时性和可靠性的要求。本篇论文重点分析了 AFDX 航空专用网络的在设计上的一些关键技术,并且对网络的这些关键技术做了相应的测试,对网络性能的评价提供了一定的参考。

本篇论文完成的工作主要有:

(1) 介绍了一些 AFDX 网络的背景和基本知识作为基础;

(2) 从网络架构、协议标准规定、软件算法设计这三个方面对 AFDX 网络的实现做理论论证:从网络架构方面描述 AFDX 采用硬件的冗余路径和基于虚链路的数据冗余管理增强系统可靠性;从协议标准方面对 ARINC664 标准的具体规定做了详细分析,提出 MAC 层规定的 VL、完整性检查、冗余管理等都可以有效的保障信息的完整性和系统的稳定性;从软件算法设计方面,分析了接收端口查找、初始化过程检测等可以很大程度的避免不稳定威胁的关键算法。

(3) 对 AFDX 网络端系统在具体实现上采用关键技术做分析和研究:分析端系统通过虚链路进行带宽的有效隔离和分配,提高通信效率、通过加载静态配置确保系统通信延时的确定等,最后从可靠传输深度防御的策略上,说明了需要将各种技术融合才能最大程度的保证端系统的高效稳定运行。

(4) 对 AFDX 网络交换机在具体实现上采用关键技术做分析和研究:分析交换机通过虚链路进行带宽的有效隔离和分配,提高通信效率、通过静态配置确保数据转发路径的确定性等。

(5) 从 AFDX 网络的部件级和系统级两个层次对网络进行了测试,设计的几个测试用例并不能完整的测试网络的整体性能,只能对网络的功能和性能进行了测试和评价。

文章整体上通过对 AFDX 网络从网络架构、协议标准、算法设计及实现的各方面的研究以及对网络系统测试实例的分析中可以看出,AFDX 网络不仅满足航空电子系统对数据通信带宽的需求,而且满足了航空电子领域应用的数据正确性、高可靠性、高实时性要求。

但 AFDX 网络并不是没有缺陷的,在机载通信网络技术高速发展的今天,其对通信的实时性和可靠性提出的要求也在不断增高。现阶段已经出现了实时性更强的 TTP (Time-Triggered Protocol) 总线和 TTE (Time Triggered Ethernet, TTE) 网络。其中 TTP 总线是由 TTTech 公司首先提出的基于时间触发的确定性网络通信技

术, 它提高了通信数据的时间确定性, 采用分布式系统结构, 在一定程度上简化了先进集成系统的设计, 并且在协议中添加了容错通信层实现了系统的容错机制, 容错机制对应用程序的开发者来说时透明的, 这样可以保证安全关键性子系统高可靠性的运行。TTE 是在普通以太网的灵活性、动态性能以及“尽力而为”的基础上与时间触发技术的确定性、容错机制和实时性能相结合而形成的网络。它适用于各种带宽速率网络, 具有确定性高、延时性低、低成本和可靠性高等特点。因此 AFDX 网络若想要继续适应各种技术的迅速发展, 进一步得到广泛应用, 必须不断改善和优化。

总之, 本篇论文的研究对 AFDX 网络功能和性能分析提供了一定的参考价值, 但由于时间的关系和作者的科研水平有限, 不足和疏漏之处在所难免, 本文的研究仍有大量的可改进之处:

(1) 本文的调度算法设计部分研究并不是最优化的。应该有更加合理、高效、更能兼顾多方面要求的算法待研究和实现。

(2) AFDX 网络从根本上提高了网络带宽、减小了物理连接的复杂度。采用交换机作为网络管理这来对整个网络进行管理并通过固定的 VL 配置信息使得网络按照确定的方式运行, 这些机制虽然大大增强了网络的可靠传输, 但对系统的灵活性有了一定的限制, 这可以作为下一步研究的重点。

(3) 还需要进行更多的测试。在网络的设计和实现过程中需要大量的测试来发现潜在的问题, 解决问题。

致谢

在论文即将完成之际，回首研究生期间的求学和实习经历，我要向关心和支持过我的老师、同学以及实习单位的各位同事致以最诚挚的谢意。

首先，忠心感谢我的导师马建峰教授和田泽研究员。马老师和田老师求真务实的工作作风和为人正直的人格魅力使我受益匪浅，不仅使我扩充了专业知识，还学会了科研工作的方法。在我研究的最初阶段，为我指明了方向。从导师的身上，我看到了始终关注行业前沿的目光，这种眼界和思维方式，将使我受益终身。导师们在百忙之中对我的论文选题及论文写作给予了精心的指导和耐心的教诲，在此，我想向马老师和田老师致以崇高的敬意。

感谢课题组中所有同事的指导、合作和相互支持，尤其是杨峰、夏大鹏、王绮卉、索高华等优秀的同事、老师，他们对我研究方向的正确把握和关键技术的指导使我能顺利完成课题的研究，他们乐于助人和一丝不苟的工作态度也是我学习的榜样。在整个课题研究期间，项目组的同事们都给了我无私的帮助，使我在技术上能迅速地成长起来。

感谢西安电子科技大学陕西省网络与系统安全重点实验室的辅导老师王超老师和实验室的马驰、郑涛、闫石、王辉、范永丹、张成弼、游九龙、张朝辉、贺岩等同学，他们在我校外实习期间对学校的各项事务提供了很大的帮助。

感谢论文答辩评审组的各位专家，谢谢你们在百忙之中投入到繁忙的论文评审工作中，兢兢业业的工作，无私奉献。

感谢我的舍友彭荣华、任洒苗和李佳妮同学在生活上给予我的温暖和关怀，没有你们的照顾和帮助，我是无法顺利的完成研究生学业的。

最后我要感谢我的家人，感谢你们无时无刻的不在的鼓励和支持，你们为我辛劳的付出一直是我努力和学习的动力，你们永远健康开心是我最大的心愿。

参考文献

- [1] 石改辉,张原,李达,全双工交换式以太网研究,信息安全与通信保密,2007.5.
- [2] 张志 等,基于 FPGA 的 AFDX 端系统协议芯片的设计与实现,计算机测量与控制,2010 年.
- [3] 赵国斌,航空电子全双工交换式以太网分析,中国制造业信息化,2011 年 11 月,第 40 卷第 21 期.
- [4] 杜宏伟,马捷中,航空电子全双工交换式以太网及其关键技术研究,测控技术,2008 年第 27 卷第 12 期.
- [5] 叶佳字,陈晓刚,张新家,基于 AFDX 的航空电子通信网络的设计,测控技术,2008 年第 27 卷第 6 期.
- [6] William Stallings,网络安全基础教程:应用与标准(英文影印版),北京,清华大学出版社.
- [7] Hussein Charara and Christian Fraboul, Modeling and Simulation of an Avionics Full Duplex Switched Ethernet, IEEE, 2005.
- [8] 王绮卉,AFDX 核心交换技术的研究与实现,西安石油大学硕士学位论文,2010.5.20.
- [9] 李健,基于 AFDX 总线的端系统测试技术,现代电子技术,2012.4,第 35 卷第 7 期.
- [10] 郭利锋,王勇等,AFDX 交换机的队列整形调度研究,计算机工程,2011.12,第 37 卷第 24 期.
- [11] 赵永库,唐来胜,李贞,AFDX 网络协议研究,计算机测量与控制,2012.20.
- [12] 陈昕,杨杰,周拥军,航空全双工交换以太网冗余管理机制研究,计算机工程与应用,2009,45(2).
- [13] ARINC664 part7-avionics full duplex switched Ethernet network, the Airlines Electronic Engineering Committee, June 27, 2005.
- [14] 田泽,王绮卉,侯锐,AFDX 网协议栈分析和设计,软件导刊,2010 年 4 月,第 9 卷 第 4 期.
- [15] 徐科华,AFDX 总线网络数据传输分析,民用飞机设计与亚军,2009 年第 3 期.
- [16] ARINC664 part2-ethernet physical and data link layer, the Airlines Electronic Engineering Committee, JUNE 10, 2003.
- [17] Henri Bauer, Jean-Luc Scharbarg, Christian Fraboul, Worst-case end-to-end delay analysis of an avionics AFDX network, 978-3-9810801-6-2/DATE10 © 2010 EDAA.

- [18] 徐雅, 计算机网络安全体系研究, 网络技术, 2009 年第 9 期.
- [19] 谢希仁, 计算机网络 第五版, 北京, 电子工业出版社, 2008.
- [20] 校莉, AFDX 在航空通信系统中的应用, 电讯技术, 2010 年.
- [21] 杜亚娟, 航空全双工交换式以太网探究, 计算机工程, 2009.6, 第 35 卷第 11 期.
- [22] Hussein Charara and Christian Fraboul, Modelling and Simulation of an Avionics Full Duplex Switched Ethernet , 0-7695-2388-9/05 \$20.00 © 2005 IEEE.
- [23] 周强, 熊华钢等, AFDX 交换机在强实时条件下的分组调度, 北京航空航天大学学报, 2009.4, 第 35 卷第 4 期.
- [24] 叶佳宇, 陈晓刚, 张新家, 基于 AFDX 的航空电子通信网络的设计, 测控技术, 2008 年第 27 卷第 6 期.
- [25] 王斌文, 航空全双工以太网交换机若干关键技术研究, 西安电子科技大学硕士学位论文, 2008.1.
- [26] 陈昕, 周拥军, 蒋文保等, AFDX 协议性能分析及调度算法研究, 电子学报, 2009.5, 第 5 期.
- [27] 武华, 马捷中, 翟正军, AFDX 端系统通信端口的设计与实现, 测控技术, 2009 年第 28 卷第 3 期.
- [28] 张勇涛, 黄臻, 熊华钢, 保证速率的 AFDX 交换机实时调度算法, 北京航空航天大学学报, 2010.12, 第 36 卷第 12 期.
- [29] 强新建, 田泽, 王泉, 杨峰, 淮治华, AFDX-ES SoC 测试平台的构建与实现, 电子技术应用, 2010 年第 36 卷第 8 期.
- [30] Marc Boyer, Christian Fraboul, Tightening end to end delay upper bound for AFDX network calculus with rate latency FIFO servers using network calculus, 978-1-4244-2350-7/08/2008 IEEE.
- [31] 夏大鹏, 田泽, 基于 AFDX 端系统测试的研究, 计算机技术与发展, 2011.8, 第 21 卷第 8 期.
- [32] 赵永库, 唐来胜, 李贞, AFDX 网络测试技术研究, 计算机测量与控制, 2012.20.
- [33] Ken Bisson & Troy Troshynski, Switched Ethernet Testing for Avionics Applications, IEEE A&E SYSTEMS MAGAZINE, MAY 2004.
- [34] 李浩峰, AFDX 网络测试研究现状分析[J], 一重技术, 2009, (02): 64~66.
- [35] 孙继磊, 何锋, 王昊天等, 航空电子交换节点端口缓冲能力测试方法研究, 电光与控制, 2011 年 9 月, 第 18 卷第 9 期.
- [36] Wind River System Inc. Tornado 2.0 Online Manuals, 1999.
- [37] 陈芳芳, AFDX 交换机测试系统的原理及方法, 中国科技核心期刊, 2009.6, 第 28 卷第 6 期.
- [38] 周强, 熊华钢, 民机航电 AFDX 互连可靠性建模研究, 遥测遥控, 2008 年 7

- 月，第 29 卷第 4 期.
- [39] 姜震，邵定蓉，熊华钢等，实时网络系统可靠性建模研究，航空学报，2004 年 5 月，第 25 卷第 3 期.
- [40] 石改辉，张原，优先级管理的全双工交换式以太网实时通信，火力与指挥控制，2009 年 11 月，第 34 卷第 11 期.

攻读硕士期间参与的科研工作

在硕士研究生期间取得的研究成果如下：

参加的科研项目

1. 航空全双工交换式以太网端系统协议栈软件的设计、开发、测试和维护。参与项目总体软件方案的规划，在端系统协议栈软件的基础上配套驱动软件的开发，并完成整体功能的实现。
2. 航空全双工交换式以太网交换机功能软件的测试，并搭建 AFDX 网络应用系统来对网络做系统级的测试。



西安电子科技大学

地址：西安市太白南路2号

邮编：710071

网址：www.xidian.edu.cn