

西安电子科技大学

硕士学位论文



AFDX网络数字化仿真平台技术研究

作者姓名 张颖 学校导师姓名、职称 郑雪峰副教授

领 域 软件工程 企业导师姓名、职称 李健工程师

申请学位类别 工程硕士 提交学位论文日期 2015年1月

学校代码 10701

分 类 号 TN4

学 号 1211122931

密 级 公开

西安电子科技大学

硕士学位论文

AFDX 数字化仿真平台技术研究

作者姓名：张 颖

领 域：软件工程

学位类别：工程硕士

学校导师姓名、职称：郑雪峰副教授

企业导师姓名、职称：李健工程师

提交日期：2015 年 1 月

A Study of AFDX Digital Simulation Platform technology

A thesis submitted to
XIDIAN UNIVERSITY
in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master in Software Engineering

By
Zhang ying
Supervisor: Zheng xuefeng Li jian
January 2015

摘要

随着航空电子技术的发展,传统的航空总线技术已经不能满足现代航电系统传输信息种类增多和规模扩大后对数据的传输要求。数据通信的高效性、实时性和确定性已经成为现代航空数据总线技术发展的方向。ARINC664 规范是航空电子委员会(AEEC)通过的新一代的机载数据网络标准,其中协议的第七部分定义了一个具有高实时性和可靠性的全双工交换式以太网 AFDX。美国波音公司和欧洲空中客车公司已经根据该标准研制出了成熟的产品,并且投入了使用。目前我国还没有发布成熟的机载 AFDX 网络设备产品,研究并实现 AFDX 网络的关键技术,对我国研制拥有自主知识产权的大飞机项目具有重要意义。

本论文基于实习单位承担的科研项目“AFDX 数字化平台”,设计实现了符合 ARINC664 规范的 AFDX 网络和数字化仿真平台。AFDX 数字化仿真平台实现了虚链路(VL)的分配带宽、流量管理和时延,冗余管理(RM),完整性检测和数据 CRC 校验等关键技术,保证了网络的确定性和可靠性,可以实现对 AFDX 网络设计的整体评价,具有优良性能。

首先论文对 AFDX 协议规范进行了详细解读,研究了 AFDX 网络的系统特性,分析了虚拟链路调度,冗余性管理和完整性检测等关键技术。AFDX 的关键节点设备网络包括 AFDX 交换机和端系统,其它航空子系统都是通过端系统接入到 AFDX 网络中。论文具体给出了 AFDX 数字化端系统和交换机的功能需求。

其次论文结合 AFDX 数字化端系统和交换机的功能需求,设计出端系统和交换机的功能模块。其中端系统功能模块分解为驱动、传输和通信配置三个子模块进行具体设计实现;交换机功能模块分为发送、接收、过滤警管、调度、端系统和监控六个子模块进行设计,同时完成了交换机的端口缓冲区,数据缓冲区和出入队列的约束设计。

再次,论文在仿真平台 OPNET 上完成了 AFDX 数字化平台的模型建立。依据协议相关标准给出了所设计的网络模型、数据帧结构模型;依据设计的 AFDX 端系统和交换机的功能模块,给出了数字化端系统、交换机的节点模型和进程模型,完成了对 AFDX 网络的行为建模。

最后论文完成了对 AFDX 数字化平台的仿真验证,仿真验证具体包括系统的基本功能测试和性能测试,为评估系统性能奠定了基础。仿真结果表明,本文设计的 AFDX 数字化仿真平台符合协议标准,能够完成设计需求,具有良好性能。

关键词: AFDX, 端系统, VL, 交换机, OPNET

论文类型: 工程设计类

ABSTRACT

With the development of post-avionics technology, the traditional aviation bus technology can not meet modern avionics and increased range of transmission of information to expand the scale of the data transmission requirements. Efficient, real-time and deterministic data communications has become the direction of modern aviation data bus technology development. ARINC664 specification is the next generation of avionics Committee (AEEC) through the onboard data network standard, Part VII defines a full-duplex Switched Ethernet AFDX protocol with high real-time performance and reliability. Both Boeing and Airbus have already developed mature products based on this standard. At present, China has yet to release a mature airborne AFDX network equipment products, Researching and implementing the key technology of AFDX network has great significance to develop our own intellectual property rights owned large aircraft project.

AFDX network and digital simulation platform compliant with ARINC664 specification is presented in this thesis which is based on the practice unit research project “AFDX digital platforms”. AFDX digital simulation platform realizes virtual link (VL) bandwidth allocation, traffic management and delay, redundancy management (RM), data integrity checking, CRC check and other key technology to ensure the certainty and reliability of the network. Also it's able to achieve the overall evaluation of the AFDX network design, with excellent performance.

Firstly, AFDX network protocol standards is thoroughly analyzed and interpretation. The thesis studies AFDX network system characteristics and analyzes the virtual link scheduling, redundancy management and integrity testing, and other key technologies. AFDX network Key node devices includes AFDX End systems and Switch, subsystems are other aviation access to the system by the end of the AFDX network. This thesis gives specific functional requirements of AFDX End system and digital Switches.

Secondly, the thesis combines protocol standards, designs modules End systems and Switches. Wherein End systems function module is decomposed into drive, transport and communication configuration of three submodules specific design and implementation; Switch module is divided into transmission, reception, filtering policing, scheduling,

monitoring of six sub-End system design and implementation .while the Switch port buffers, data buffer and access queues have also been constraints designs.

Thirdly, the paper completed a model AFDX digital platforms on the simulation platform OPNET. According to the agreement related to the standard model it gives the network design, data frame structure model; According to the functional module designs of AFDX End system and Switches, thesis gives node model and process model of the digital End systems and Switch, completed AFDX network behavioral modeling.

Finally, the thesis completes the AFDX digital platform simulation and validation, including its basic functional verification and performance testing of the system. And it lays the foundation for evaluating system performance. The simulation results show that the design of AFDX digital simulation platform complies with protocol standards and completes the design requirements. At the same time that has good performance.

Keywords: AFDX, End systems, VL, Switches, OPNET

Type of Thesis: Engineering design class

插图索引

图 1.1	航空体系结构的演化过程.....	1
图 1.2	AIMS 结构图.....	2
图 1.3	网络层次结构.....	3
图 1.4	国内外总线发展趋势.....	3
图 1.5	A380 飞机的 AFDX 网络结构图.....	4
图 2.1	带宽流量调节控制.....	7
图 2.2	AFDX 冗余网络示意图.....	8
图 2.3	AFDX 端系统完整性检测功能.....	9
图 2.4	AFDX 帧结构.....	9
图 2.5	端系统协议栈与 OSI 模型.....	11
图 2.6	端系统协议栈发送过程.....	11
图 2.7	端系统协议栈接收流程.....	12
图 2.8	AFDX 交换机功能示意图.....	13
图 2.9	OPNET 层次建模特点.....	14
图 2.10	AFDX 网络帧结构模型.....	15
图 2.11	AFDX 网络系统模型.....	16
图 3.1	端系统模块划分图.....	19
图 3.2	队列满示意图.....	20
图 3.3	UDP 报文格式.....	21
图 3.4	IP 数据包文格式.....	22
图 3.5	发送工作过程 (VL).....	25
图 3.6	数据流量整形.....	26
图 3.7	虚拟链路调度示例.....	27
图 3.8	接收工作过程 (VL).....	28
图 3.9	计算 CRC 生成帧校验和序列.....	29
图 3.10	SkewMax 的定义.....	30
图 3.11	端口配置信息.....	31
图 3.12	端系统节点模型.....	34
图 3.13	端系统驱动模块进程模型.....	34
图 3.14	端系统传输模型进程模型.....	35
图 3.15	端系统冗余链路进程模型.....	36
图 4.1	交换机模块划分图.....	37

图 4.2	AFDX 交换机功能模型图.....	44
图 4.3	数字化交换机功能设计图.....	45
图 4.4	交换机完整的阶层性 OPNET 模型.....	45
图 4.5	数字化交换机节点模型.....	46
图 4.6	mac 模块进程模型.....	46
图 4.7	Switch 模块进程模型.....	47
图 5.1	运行仿真参数配置.....	49
图 5.2	端系仿真参数统计操作图例.....	50
图 5.3	网络发送接收数据统计图.....	50
图 5.4	端系统数据收发统计图.....	51
图 5.5	端系统发送数据统计图.....	51
图 5.6	交换机仿真参数统计操作图例.....	52
图 5.7	常数域过滤结果图.....	53
图 5.8	VL ID 错误过滤包测试结果.....	54
图 5.9	帧长小于 64 字节错误过滤帧测试结果图.....	54
图 5.10	帧长超过 1518 错误过滤帧测试结果.....	55
图 5.11	超出最大延时错误过滤帧测试结果.....	56
图 5.12	延迟统计操作图例.....	57
图 5.13	端系统端到端延时统计结果图.....	57
图 5.14	交换机 A 的交换时延统计结果图.....	58

表格索引

表 3.1	分片标志字段标识表.....	22
表 3.2	IP 分片过程数据	23
表 4.1	交换机发送控制信号.....	38
表 4.2	交换机接收控制信号.....	38
表 4.3	VL 配置格式	39
表 4.4	警管配置定义.....	40
表 4.5	入队队列格式.....	41
表 4.6	出队队列格式.....	41
表 4.7	单个数据缓冲区结构.....	43
表 5.1	交换机过滤常数域错误测试说明表.....	53
表 5.2	交换机过滤 VL ID 错误测试说明表	53
表 5.3	交换机过滤帧长小于 64 字节错误测试说明表.....	55
表 5.4	帧长大于 1518 字节错误过滤帧测试结果图.....	55
表 5.5	交换机超出最大延时丢弃帧测试结果图.....	56
表 5.6	场景配置下的端到端时延统计.....	57

符号对照表

符号	名称
μs	微秒
ms	毫秒
bit	位
Byte	字节

缩略语对照表

缩略语	英文全称	中文对照
AFDX	Avionics Full Duplex Switched Ethernet Network	航空电子全双工交换式以太网
AIMS	Anesthesia Information Management System	信息管理系统
IMA	Integrated Modular Avionics	综合模块化航空电子体系
DIMA	Distributed Integrated Modular Avionics	分布式综合模块化航空电子体系
ARINC	Aeronautical Radio Inc	航空无线电通信公司
ES	End system	端系统
OPNET	Operational Tracking Network	网络仿真软件
VL	Virtual Link	虚拟链路
BAG	Bandwidth Alignment	带宽分配间隔
RM	Redundancy Management	冗余管理
TRM	Transmit Redundancy Management	发送冗余管理
RRM	Receiving Redundancy Management	接受冗余管理
CRC	Cyclic Redundancy Check	循环冗余校验码
FCS	Frame Check Sequence	AFDX 数据帧的最后一个字段
SN	Serial Number	序列号
ID	Identity	身份标识号
IP	Internet Protocol	网络互连协议
UDP	User Datagram Protocol	用户数据包协议
TCP	Transmission Control Protocol	传输控制协议
OSI	Open System Interconnection	开放式系统互联
SNMP	Simple Network Management Protocol	简单网络管理协议
TFTP	Trivial File Transfer Protocol	简单文件传输协议
SAP	Service Access Point	服务访问点
FIFO	First Input First Output	先入先出队列

MAC	Media Access Contro	媒体介入控制层
IC	Integrity Check	完整性检查

目录

摘要.....	I
ABSTRACT	III
插图索引.....	V
表格索引.....	VII
符号对照表.....	IX
缩略语对照表.....	XI
目录.....	XIII
第一章 绪论.....	1
1.1 研究的背景及意义	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势	3
1.3 论文内容安排介绍	5
第二章 AFDX 数字化网络系统研究	7
2.1 AFDX 协议研究	7
2.1.1 AFDX 系统特性	7
2.1.2 AFDX 帧结构	9
2.1.3 AFDX 端系统	10
2.1.4 AFDX 交换机	13
2.2 数字化平台 OPNET 研究	13
2.2.1 OPNET 平台的系统结构.....	14
2.2.2 OPNET 平台的建模特点.....	14
2.3 AFDX 数字化系统模型	15
2.3.1 AFDX 帧结构模型	15
2.3.2 AFDX 网络模型	16
2.4 本章小结	17
第三章 AFDX 数字化端系统设计	19
3.1 端系统功能模块设计	19
3.1.1 端系统驱动模块设计	20
3.1.2 端系统传输模块设计	25
3.1.3 端系统通信配置模块设计	31
3.2 运行记录参数和错误警告计数.....	33
3.3 端系统数字化模型的设计	34
3.3.1 端系统节点模型.....	34

3.3.2 端系统进程模型.....	34
3.4 本章小结	36
第四章 AFDX 数字化交换机设计	37
4.1 交换机功能模块设计	37
4.1.1 交换机发送模块设计.....	38
4.1.2 交换机接收模块设计.....	38
4.1.3 交换机过滤警管模块设计.....	39
4.1.4 交换机调度模块设计.....	40
4.1.5 交换机端系统模块设计.....	42
4.1.6 交换机监控模块设计.....	42
4.2 交换机数据缓冲区设计	42
4.3 交换机运行参数统计量.....	43
4.4 交换机数字化模型设计	44
4.4.1 数字化交换机节点模型.....	45
4.4.2 数字化交换机进程模型.....	46
4.5 本章小结	48
第五章 仿真及结果分析	49
5.1 仿真环境说明.....	49
5.2 仿真结果及分析	49
5.2.1 功能仿真.....	49
5.2.2 性能仿真.....	52
5.2.3 延迟统计.....	56
5.3 本章小结	58
第六章 总结与展望.....	59
参考文献.....	61
致谢.....	63
作者简介.....	65

第一章 绪论

1.1 研究的背景及意义

从 20 世纪末到 21 世纪的今天，信息科学技术，微电子技术和通信技术实现了快速的发展，而在它们的推动下，航电系统作为一个逐渐发展起来的新学科和技术领域开始出现在大众眼前。“综合航空电子系统”是航电系统的全称，在国防科技中担当非常重要的地位^[1]。由于飞机实时性、数据量与数据准确性要求的不断提高，意味着对飞机航电设备的性能要求也随之增加，航电系统与飞机性能同步发展，已经成为衡量飞机先进性的重要标准。

为了满足航空电子系统日益增加的需求，航电系统结构的发展，经历了分立式航空电子系统、联合式航空电子系统以及综合式航空电子系统三代^[2]，具体发展了离散式，集中式，集中分布式，综合式和先进综合式五个阶段，如图 1.1 所示。

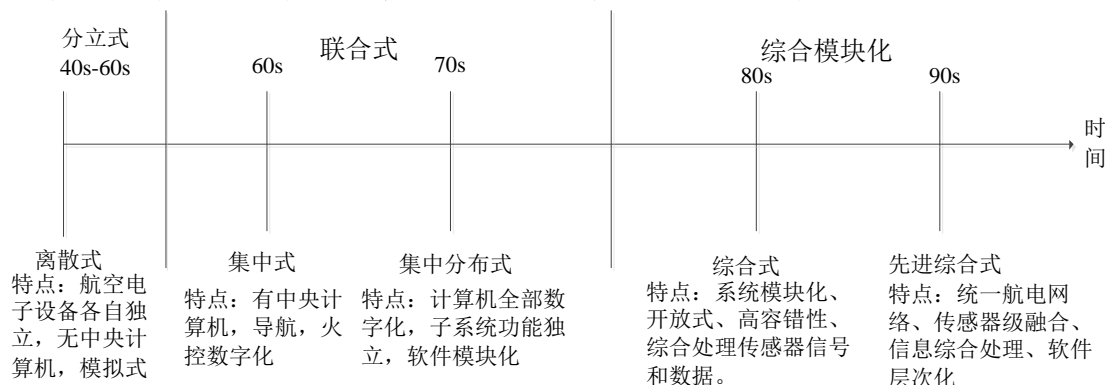


图 1.1 航空体系结构的演化过程

20 世纪 80 年代末期，在信息技术行业产业需求的大力驱动下，商业化成为发展的主流，它带来的性能提升相比于航空航天领域达到了新的高度，同时也促使军用航电系统开发模式实现转变，以 20 世纪 90 年代中期的波音 777 飞机为代表的民机航空电子系统开始出现在大众视野中^[3]。波音 777 飞机最明显的特点就是采用了将飞机的中央维护管理，显示管理和状态监控等基本功能通过航空数据总线综合在一起综合模块化的航空电子（IMA）系统，形成功能强大的飞机信息管理系统（AIMS），如图 1.2 所示^[4]。

先进的集成模块化航空电子（简称 DIMA）不仅具有 IMA 所有的优点，同时支持分布式系统效率系统的高效设计。DIMA 架构克服了 IMA 的不足之处，在以不限制功能的分散和集的中前提下，具体表现为消除了由于整合关键与非关键型功能而引起的冲突隐患，在当今航空航天的电子体系结构快速发展背景下，DIMA 已经成为了主流。

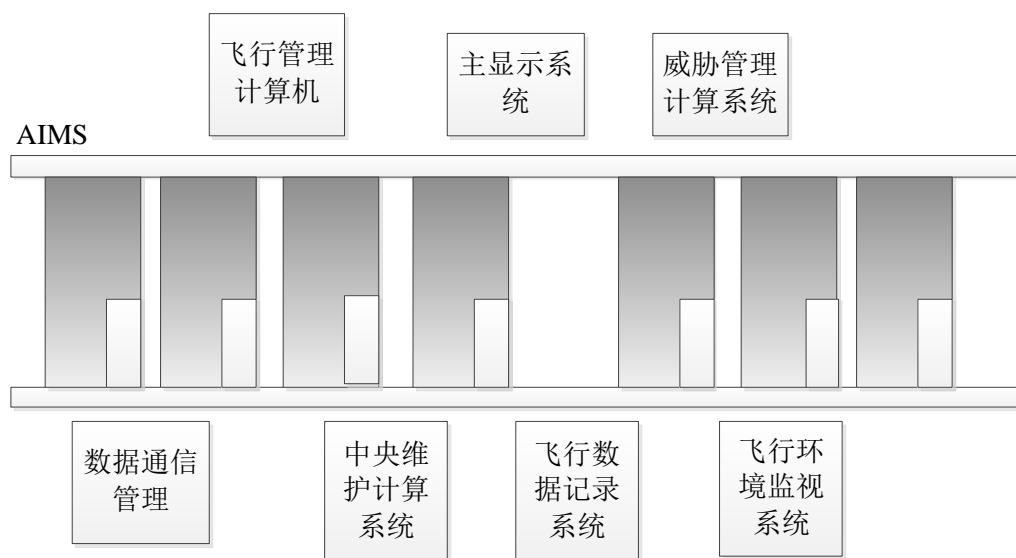


图 1.2 AIMS 结构图

航空数据总线作为航空电子系统的中枢神经，将飞机航电设备的各项功能关联起来实现设备之间的互联通信功能，具体包括传输各种命令、中间结果、状态数据和各类传感器的实时监控数据等。随着现代信息通信技术、微电子技术的飞速发展，航空电子设备的规模程度，智能化程度和电子设备之间信息的共享程度也越来越高。这就对航空电子通信技术传输带宽、网络延时确定、网络传输的可靠性提出了更高的要求。ARINC429 和 ARINC629 作为目前普遍应用的传统航空数据总线虽然具有高可靠性和通讯质量稳定等特点^[4]，但是最大的带宽分别仅为 100Kbps 和 2Mbps，在数据通信方面，已经不再满足新一代的航空电子系统。

目前应用最普遍的局域网通信技术是以太网，以太网的千兆甚至万兆的传输速率成功吸引了波音公司和欧洲空客公司的眼光，它们对基于以太网技术基础上发展起来的新一代航空数据总线进行了探索，而 A380 飞机项目成为这项技术实现的成功代表。随着对以太网进行全面的航电系统改造，“航空电子全双工交换式以太网（Avionics Full Duplex Switched Ethernet Network，简称 AFDX）”实现由交换式以太网技术的成功演化。

ARINC664 规范是航空电子委员会（AECC）通过的新一代的机载数据网络标准，其中 part7 在以太网技术的基础上对网络确定性进行了定义，即航空电子全双工交换式以太网 AFDX，图 1.3 描述了这种网络层次^[5]。ARINC664 标准的第七部分作为 AFDX 协议规范，定义了一个航空子系统间数据通信的协议。AFDX 的应用层、物理层和链路层由 ARINC664 规范的其它部分定义。作为对传统以太网共享传输链路结构的改进，以太网中的路由器、网桥和集线器由网络交换机代替，AFDX 网络成功克服了共享链路造成的信道冲突问题。在大型客机 A380 和 B787 等当代先进的飞机项目上 AFDX 得到了成功推广，飞机互连的规模、综合化程度、

信息带宽和冗余配置的灵活性等方面达到了航空电子的综合化层次，成为了构筑新一代航空电子系统的基础。



图 1.3 网络层次结构

本论文旨在基于 ARINC664 第 7 部分的协议基础上，研究相关关键技术，实现 AFDX 网络的功能模块设计，数字化平台的建模和仿真等工作。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

现代飞机为了实现不同级别的数据传输和信息共享，提高航电系统的灵活性、可靠性、智能性以及可扩展性，广泛采用多种数据总线。机载数据总线强调网络的可靠性和实时性，不仅需要达到各个子功能系统对于实时性的要求，还要实现通过信息的互联达到功能综合的目的。在最近的几十年发展中，航空数据总线同时随着航电系统也有突飞猛进的变化，如图 1.4 所示^[6]。

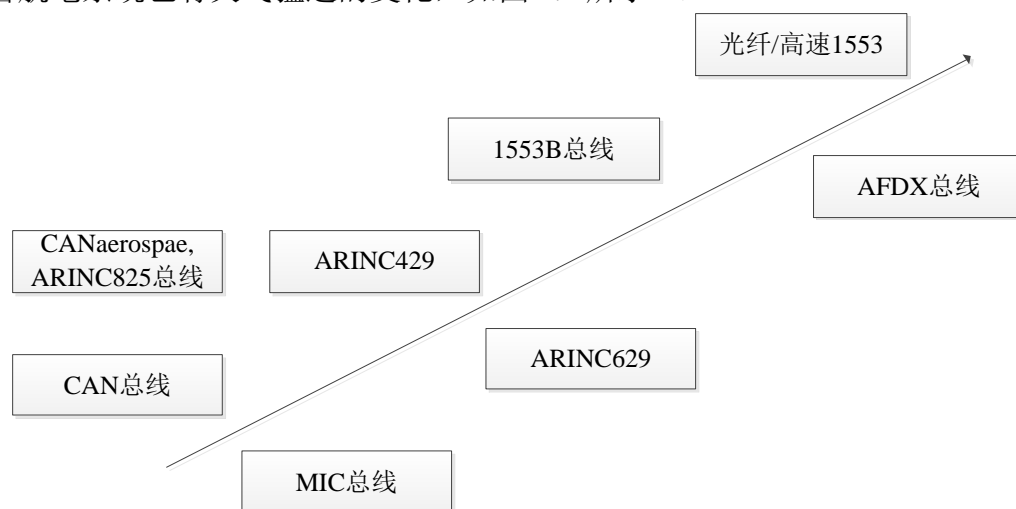


图 1.4 国内外总线发展趋势

国际上，美国罗克韦尔柯林斯国际公司公司和泰雷兹集团公司已研制出成熟的 AFDX 网络产品，并成功应用到 A380、A400M、C-17 和波音公司的 B787 等机型中^[7]。

空中客车的 A380 型飞机采用了 AFDX 互连网络，作为 AFDX 网络应用的典型代表，AFDX 网络在 A380 的应用如图 1.5 所示^[8]，在考虑实际空间位置情况下，

飞行控制系统、动力、驾驶舱以及客舱系统等部分的电子设备的分布满足冗余配置，与多个 AFDX 交换机(Switch)相连通过通信链路实现相连，交换机之间具有多条冗余路径，形成骨干交换网络。每台交换机大约连接 20 个终端设备，这些是 AFDX 的核心设备，被称为端系统。

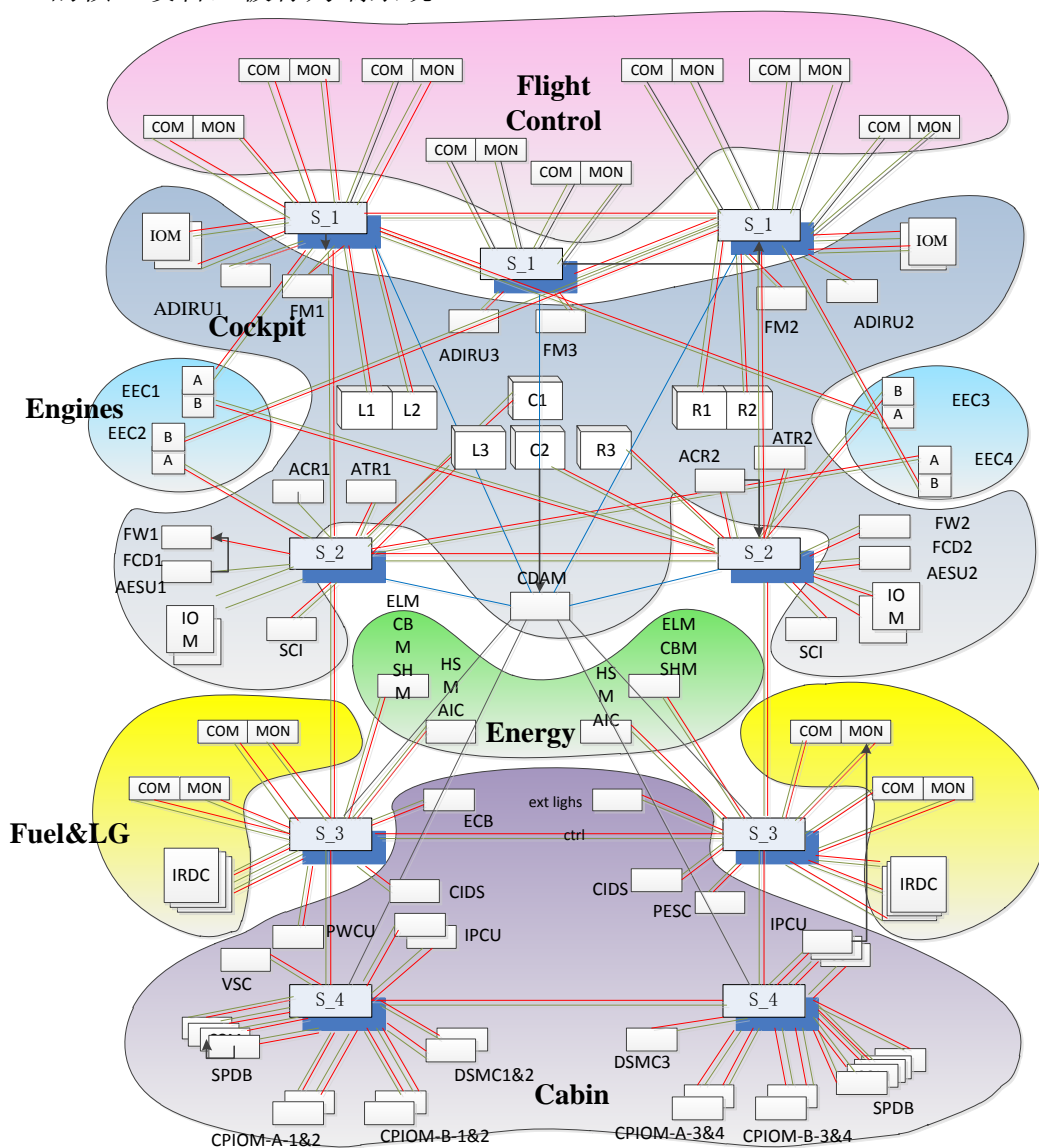


图 1.5 A380 飞机的 AFDX 网络结构图

ARINC429 和 MIL-STD-1553B 总线是我国普遍采用的机载数据总线，但是在过去几年的使用中，发现了这些传统的数据总线各自存在不同程度的缺点。当总线控制器失效时，MIL-STD-1553B 总线也随之失效，系统整个将失效，若增加备用总线控制器，软硬件的复杂程度也会相应增加；对于 ARINC429 来说，虽然没有总线控制器，也不存在 MIL-STD-1553B 由总线控制器失效引起系统失效的情况，但是因为每个信源都对应一条 ARINC429 总线，这对连接器数量以及线缆重量的

要求相应也会增多^[9]。为克服以上问题，AFDX(Avionics Full Duplex Switched Ethernet)网络开始被采用。

目前国内对 AFDX 技术的掌握并不全面，还处于理论研究阶段，部分相关的 AFDX 核心硬件设备和测试软件等也并没有成熟的产品，因此本论文的研究课题为系统开发具有我国自主知识产权的新一代航空电子网络 AFDX 产品具有重大意义。

1.3 论文内容安排介绍

本论文是以 AFDX 数字化平台项目为开端，详细调研了国内外的需求和相关技术，深入学习 ARINC664 第 7 部分 AFDX 网络的规范，理解网络协议中的相关关键技术，设计并实现符合 ARINC664 第 7 部分规范的 AFDX 网络模型，在实现过程中重点研究了冗余管理、虚拟链路调度、流量整形等关键技术，并在 OPNET 仿真工具上进行了功能模型建立和仿真验证。

下面对本论文的章节结构进行介绍，本论文分为六章，各章的组织安排如下：

第一章：介绍了航空电子系统和航空电子总线的发展历程和国内外发展现状，AFDX 协议的研究意义，以及本论文的研究背景。

第二章：深入研究了 ARINC664 第 7 部分,详细对 AFDX 协议的系统特性，帧结构，端系统，交换机等方面进行了探讨，同时介绍了数字化平台 OPNET 的仿真特点和仿真意义，并基于 OPNET 平台实现 AFDX 网络的系统模型。

第三章：在 ARINC664 第 7 部分关于 AFDX 端系统的规范基础上，分析端系统的功能需求，软件设计实现端系统的功能，以及在 OPNET 平台实现 AFDX 网络端系统模型的建立。

第四章：在 ARINC664 第 7 部分关于 AFDX 交换机的规范基础上，分析交换机的功能需求，软件设计实现交换机的功能，以及在 OPNET 平台实现 AFDX 网络交换机模型的建立。

第五章：仿真与验证，描述了仿真的环境，仿真验证的测试项和说明，并给出仿真结果和说明。

第六章：结束语，总结了本文所涉及的工作，提出设计中的不足和更改建议，对今后的发展提出自己的意见。

第二章 AFDX 数字化网络系统研究

2.1 AFDX 协议研究

ARINC664 规范定义了一个以太网数据网络,用于支持飞行器环境中客舱与飞行器平台之间的数据传输需求,其中第 7 部分对 AFDX 网络确定性机制以及全双工特性等相关内容进行了描述与规定^[10],主要有以下几个方面:

- 1) 网络配置: AFDX 网络开发集成者依据协议规定在检测性能前完成对相关参数的配置。
- 2) 物理媒介: 物理层使用双绞线电缆保证完全独立的两对发送与接收信道。
- 3) 确定性: 在链路层采用虚拟链路机制实现链路间流量整形以及固定带宽。
- 4) 交换网络: AFDX 交换机可通过之间的级联来拓展网络,其中每个 Switch 最多可连接的 ES 数量为 24 个^[11],网络的拓扑结构为星形。
- 5) 冗余网络: 以两条完全独立的发送与接收信道确保两个互为冗余的网络实现数据传输,保证了网络的可靠性同时提高了传输效率。
- 6) 网络传输速率要求: 10Mbps 或 100Mbps^[12]。

2.1.1 AFDX 系统特性

AFDX 作为基于以太网发展而形成的交换式网络,既有与其相同的星形拓扑结构,也存在自己独特的优势即通过虚拟链路机制以及冗余机制确保的确定性和高可靠性,实现数据的高效传输。

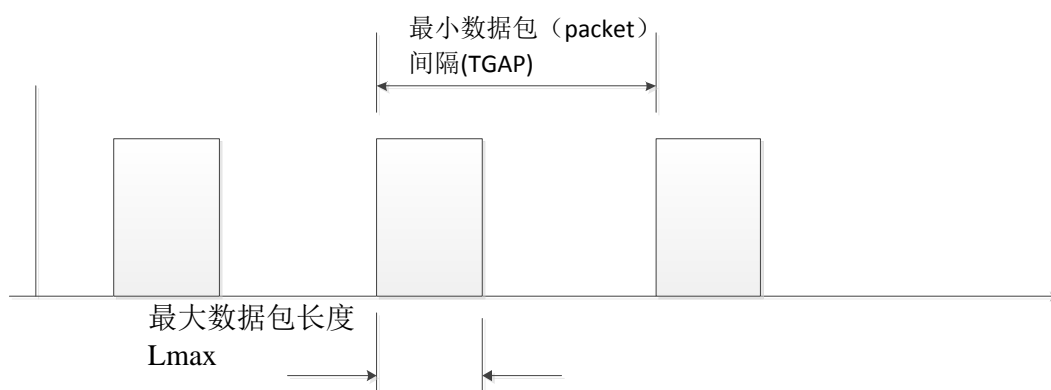


图 2.1 带宽流量调节控制

AFDX 网络的确定性通过虚拟链路 (VL) 机制实现。在 ARINC664 第 7 部分规范中定义 VL 是端系统间的单向逻辑通路,可以是一个端系统到另一个端系统,也可以是一个端系统到多个端系统^[13]。数据传输过程时,虚拟链路机制通过将单个物理链路划分为多个虚拟通路,提供给每个链路间固定带宽的逻辑隔离,实现了虚拟通路的互相隔离,同时排出了各个链路的带宽不受其它虚拟链路占用的可

能性。确定性由虚拟链路 VL 的流量控制和带宽分配保证。

1) 带宽分配是指每个 VL 最大的可使用带宽取决于对应的 BAG 和被允许的 Lmax。对每条 VL 数据传输时分配的固定带宽(BandWidth = Lmax /GBA)^[14], 其中, 定义了最大帧长度 Lmax 和带宽分配间隔 BAG, 定义了同一路 VL 上相邻帧间的最小时间间隔 GBA, 其中 GBA = 2kms(k=0, 1...,7), 如图 2.1 所示。

2) 流量控制功能由抖动和BAG实现, VL的最大抖动服从以下两个公式^[15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_jitter \leq 40\mu s + \frac{\sum_{i \in (VL_1, VL_2 \dots VL_n)} (20\text{bytes} + L_{\max,i} \text{bytes}) \times 8\text{bits/bytes}}{Nbw \text{ bits/s}} \\ \max_jitter \geq 500\mu s \end{array} \right\}$$

根据该公式, Nbw 与 Lmaxi 的单位为 Byte, AFDX 帧在虚链路上的最大长度为 Lmaxi, Nbw 为传输介质的带宽。第一个公式说明了在调度过程中端系统其它 VL 对单路 VL 造成抖动的实际范围, 第二个公式表明了 AFDX 网络上每路 VL 的最大抖动值必须小于 500us。

AFDX 网络的可靠性由冗余管理 (RM), 数据 CRC 校验和完整性检测实现。

1) 冗余管理在虚拟链路技术的支持下确保了不同任务间数据通信时的可靠性以及安全性。RM 原理如图 2.2 所示, 具体指数据在两个完全独立的网络中实现通信, 解决了由交换机单点故障、部分的线路故障所导致的数据通信失效问题。在数据发送过程中, 冗余管理中需要发送的数据帧被复制成完全相同的两个, 发送到两个独立的网络中^[16]。接收数据时, 目的端系统具有 RM 功能, 会从不同网络接收到的数据帧中采用“先到先有效”的原则选取正确的一路数据提交到上层协议处理^[17]。

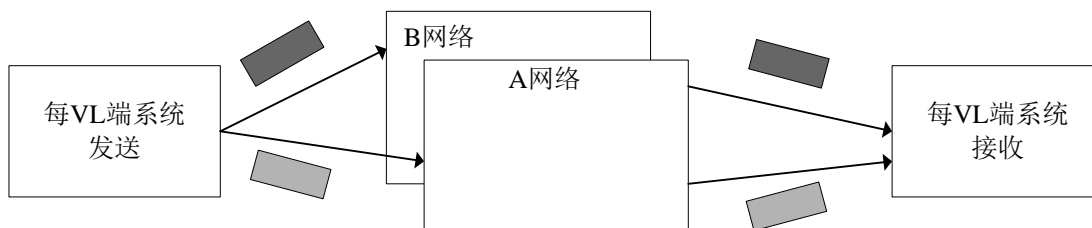


图 2.2 AFDX 冗余网络示意图

2) 数据帧内容的完整性由数据 CRC 校验功能保证。为检查帧内容的正确性, 通过以数据和数据帧尾部的标准校验与计算出的帧校验和完成比较来实现, 同时若出现无效帧则进行丢弃处理。

3) 完整性检测功能通过检测数据帧的序列号是否连续保证通信中数据帧的顺序完整且正确, 并丢弃无效帧。AFDX 数据帧的最大特点是帧结构具有填充 SN 号

内容的字段，SN 的作用在于接收端用来判断帧的有效性，实现有序帧流^[18]。SN 号是在帧在发送前由发送端填入的，以此实现顺序发送。AFDX 端系统的完整性检测功能如图 2.3 所示。

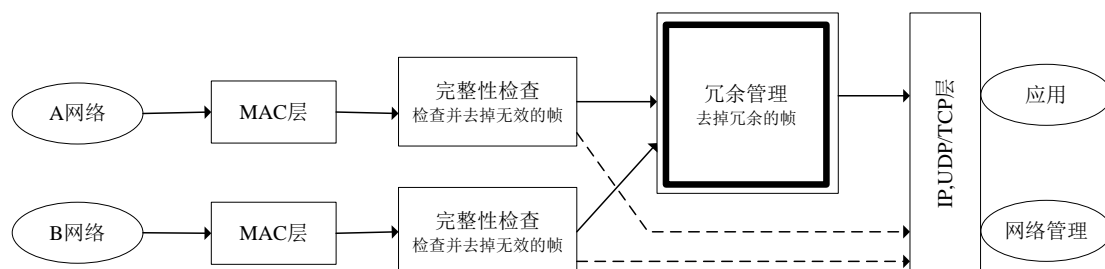


图 2.3 AFDX 端系统完整性检测功能

2.1.2 AFDX 帧结构

AFDX 是在 IEEE802.3 基础上加以确定性的概念而改造形成的，因此 AFDX 帧和以太网帧在帧结构上非常相似，唯一差别体现在 AFDX 帧比以太网帧增加了一个占用一个字节的 SN 字段^[19]，位于帧校验字段之前，AFDX 的 IP/UDP 有效载荷长度相比于标准的以太网帧减少一个字节，如图 2.4 所示。AFDX 协议对数据帧和有效载荷的长度范围作出规定，帧的长度必须在 17~1518（Bytes）范围，Payload 为 17~1471（Bytes）^[20]，需要说明的是，如果 Payload 的实际长度小于最小值，则需要用 0 填充于 Payload 后面。



图 2.4 AFDX 帧结构

下面对 Sequence Number（简称 SN）字段进行分析。

序列号字段占据帧结构的 1Byte 长度，各路 VL 传输的数据都通过帧结构中的作为 Payload 重要内容的 SN 号实现顺序发送，它的取值范围为 0 到 255^[21]。端系统协议栈的虚拟链路层在发送、接收时对帧结构的序列号字段使用不同的处理方法。TRM 功能为每个要发送的 AFDX 帧在帧结构中填充 1Byte 的序列号字段，序

列号依次增加,使同一路 VL 上需要依次发送每个帧的 SN 以 0 到 255 进行排序,到 255 后再返回初始值 1。在接收方面,序列号用来判断数据帧的到达顺序以检查是否存在帧丢失的情况,从而保证了 ES 能够完整的接收到帧序列,同时 RRM 也能以此判定为冗余帧的来源。

2.1.3 AFDX 端系统

ARINC664 第 7 部分规定端系统(End system, ES)的主要功能是为各个分区软件提供一些可靠安全的服务^[22]。AFDX 端系统 ES 的作用是通过连接网络与航电子系统实现消息的传递,由于 AFDX 网络的特点,ES 能够确保数据传输过程中的安全性以及可靠性。

下面对端系统涉及到的关键技术进行简单分析:

1) 端系统协议栈

为了保证网络的确定性,端系统协议栈对 ES 传输的数据帧格式在发送与接收过程中及时高效地实现封装与解析,同时完成传输过程中的调度控制,确保了 ES 的数据通信功能。与 OSI 七层结构模型相比,ES 协议栈的模型结构与之相似,具有一定的对应关系,如图 2.5 所示,AFDX 通讯服务层、传输层、网络层、虚拟链路层以及物理层按照从高层到底层的顺序构成了 ES 协议栈的模型结构^[23],其中的 AFDX 通讯服务层与 OSI 应用层功能相对应,虚拟链路层作用可以完成 OSI 链路层的功能。

应用层:运行航空电子应用等多种业务,以及保障机载网络系统正常运行所需的网络管理(SNMP)和数据加卸载(TFTP)协议等;

表示层和会话层:为上层应用程序提供通信接口,实现了为航电服务 AFDX 通信端口(队列端口,采样端口)以及服务访问点(Service Access Point,SAP)端口等会话服务;

传输层:实现 UDP, TCP 协议。主要工作是根据端口的配置信息填充报文的端口信息以及计算校验和(CRC)等;

网络层:主要实现 IP 协议。完成 IP 数据包关于分片的工作,并实现 ICMP 协议;

MAC 层:主要实现虚拟链路、带宽分配间隔(Bandwidth Allocation Gap)、调度、冗余管理等。数字化端系统设计重点就是分析和确定虚链路的实现方案。虚拟链路层不仅可以实现 OSI 模型链路层的功能,同时也通过引入了虚拟链路的概念实现了流量的管理功能,因此依据功能可以划分为两部分即 MAC 和 VL: MAC 部分以太网的协议标准实现链路层的功能,VL 部分是依据 AFDX 协议通过网络规划设计者预先配置包括抖动、最大帧长以及带宽分配间隔等 VL 属性实现控制 VL 的功能。

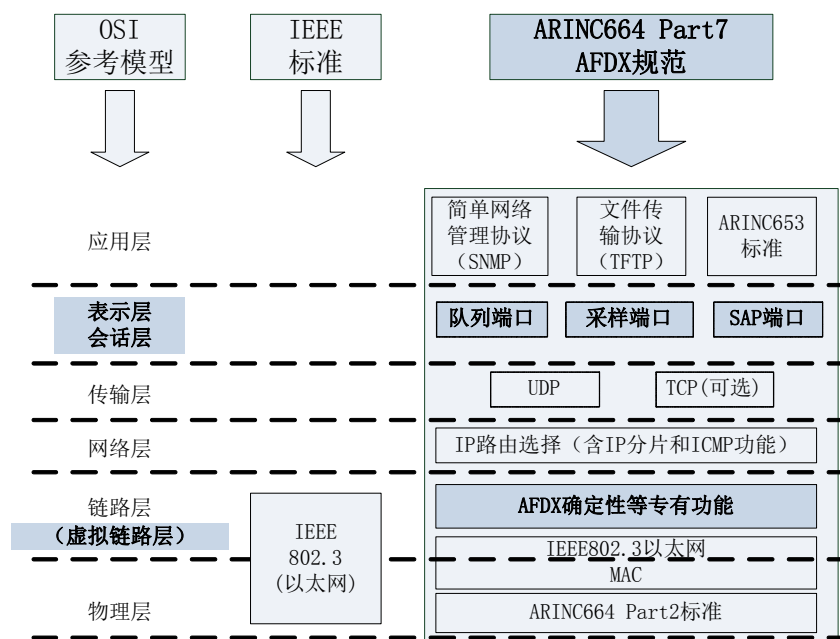


图 2.5 端系统协议栈与 OSI 模型

2) 发送功能分析

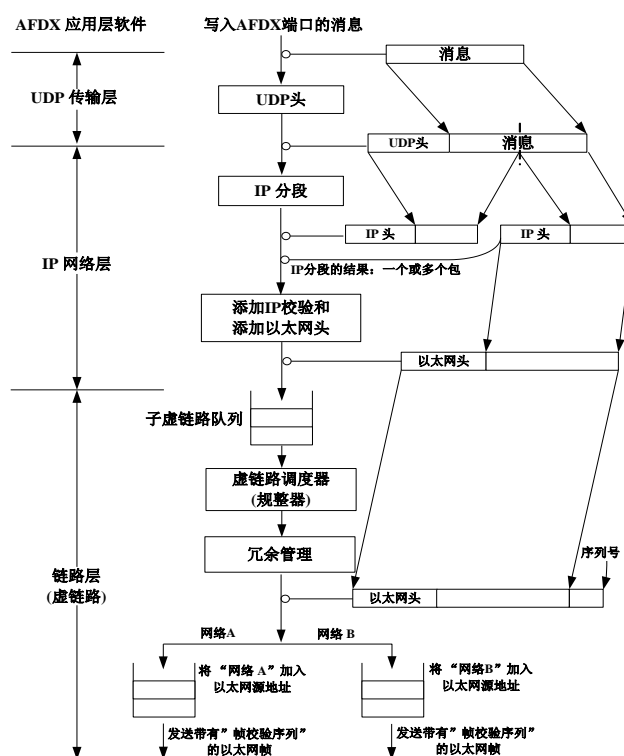


图 2.6 端系统协议栈发送过程

通过分析端系统数据收发的执行过程，界定出各种功能性需求，进而规划并组合出各功能模块。端系统通信软件通过 SAP、队列和采样三类端口为上层的航空电子应用提供数据收发功能^[24]，其中队列、采样端口统称为通信端口。各端口

的特性如下所述:

采样不能使用 IP 分片操作, 每条采样消息的长度要小于或等于所对应的 VL 有效载荷的要求, 采样端口的数据会被新数据覆盖。

队列端口缓存较大, 使用 FIFO 的原则管理数据, 可处理 8k 字节长度的数据, 可进行 IP 分片操作。

SAP 端口作为服务访问点。用来进行 TFTP 的传输, 发送 SAP 端口的目的 IP 和 UDP 端口、接收 SAP 端口的源 IP 和 UDP 端口可由应用程序改动, 而不只由配置表定义; 可处理 8k 字节长度的应用数据, 可进行 IP 的分片。

AFDX 端口由应用程序将消息写入, 消息的 UDP 头由 UDP 传输层负责添加, UDP 包的接收在 IP 网络层进行, 同时决定是否需要进行分组。然后在每一个分组内添加校验码和 IP 头。以太网帧在相应的虚拟链路队列中等待发送之前, 需要添加以太网头 (在 IP 层完成), 以太网帧具体的调度发送工作由数据链路层负责, 接下来添加数据帧的 SN, 放置到 RM 单元, 并在冗余管理单元内对等待发送的数据帧进行复制。数据报文发送的具体处理过程如图 2.6 所示^[25]。

3) 接收功能分析

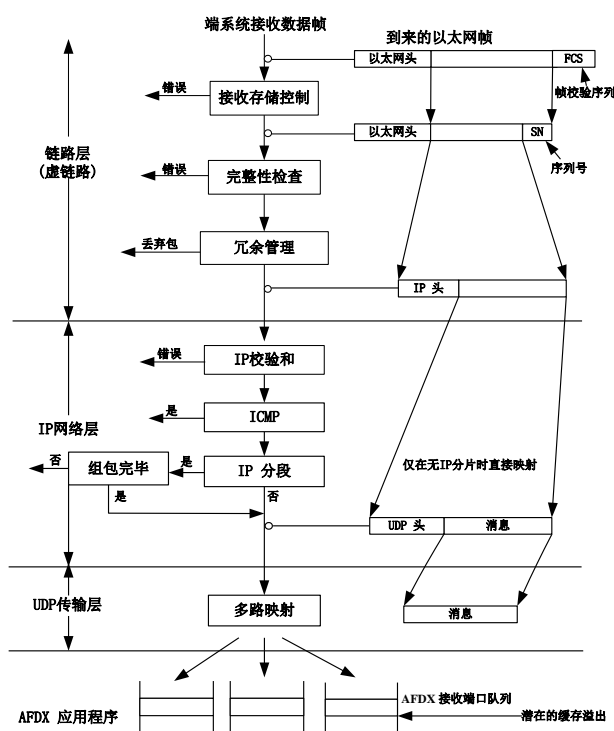


图 2.7 端系统协议栈接收流程

数据链路层完成以太网帧的接收后, 依据帧检测序列检查帧是否正确性。如果结果没有错误, 则删掉 FCS 后接着完成 AFDX 帧完整性的检测和冗余管理, 最后将 IP 数据包正确完整地送到 IP 网络层。网络层实现对 IP 校验码的检测, 同时

进行重组 UDP 数据包的工作。成功接收到完整正确的 UDP 包后, UDP 数据包将被发送到 UDP 传输层。传输层依据 UDP 包包头中的相关端口号信息, 将 AFDX 消息分别发送到相对应的通信端口。数据的具体接收过程如图 2.7 所示^[25]。

2.1.4 AFDX 交换机

AFDX 交换机可通过之间的级联来拓展网络, 其中每个 Switch 最多可连接的 ES 数量为 24 个, Switch 为 ES 提供了进行信息传递的交换通路, 是 AFDX 的核心设备。

根据 ARINC664 第 7 部分关于交换机的要求, 交换机作为 AFDX 网络的完成数据转发的核心设备, 其功能如图 2.8 所示^[26], 主要包括交换功能 (Switching Function), 配置表 (Configuration Table), 过滤警管 (Filtering & Policing Function), 监控功能 (Monitoring Function) 和端系统 (End system) 5 个部分。

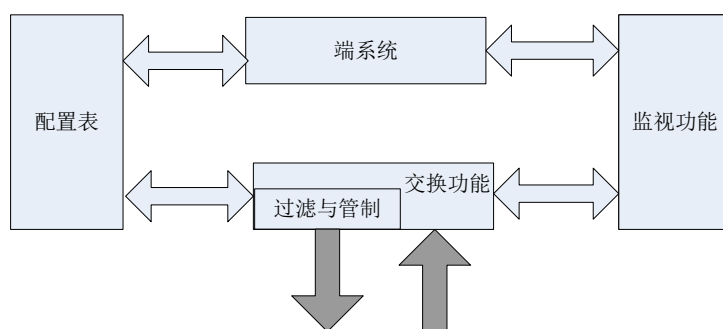


图 2.8 AFDX 交换机功能示意图

1) 交换功能模块 (Switching Function)：为 AFDX 各个 ES 实现转发数据帧的功能。

2) 配置模块 (Configuration Tables)：AFDX 网络设计集成者依据协议标准完成模块相关参数的配置。

3) 过滤警管模块 (Filtering & Policing Function)：对通过交换机的数据帧完成检测以及过滤, 通过减少由无效帧引起的资源浪费来保证网络的故障控制功能。

4) 监控模块 (Monitoring Function)：监控 AFDX 网络上 Switch 的工作状态。

5) 端系统模块 (End system)：AFDX 交换机的 ES 模块与 AFDX 端系统仅有的区别在于除去了数据帧的冗余输出功能。

2.2 数字化平台 OPNET 研究

网络仿真技术不仅能够检验实际的设计方案, 同时也可以通过比较多种设计方案选择适合的模型, 便捷的修改能力使得它非常适合通过模拟网络来预测网络的性能。OPNET 是通信网络建模最常用的工具之一, OPNET 仿真平台采用 Protocol-C (类 C 开发语言) 开发语言, 完全兼容 C 各种接口和类库, 容易入门,

而且具有很好的移植性，考虑到其高精度度，模型库丰富，能够基本保证数字化仿真的最终效果，OPNET 成为数字化平台实现的优先选择。

2.2.1 OPNET 平台的系统结构

OPNET 网络仿真软件是由美国 OPNET Technology 公司开发的一个大型的通信与计算机网络仿真软件包^[27]。它的显著特点是:网络仿真能够为网络的规划设计提供可靠的定量依据。

OPNET 的模拟方式是阶层性的，如图 2.9 所示。以协议的角度来看，模块的模型建立阶段能够实现与 AFDX 协议层次结构的对应关系，从最底层到最高层，依次为：物理层、MAC 层、ARP 层、IP 封装层、IP 层、TCP 层和业务层^[28]。

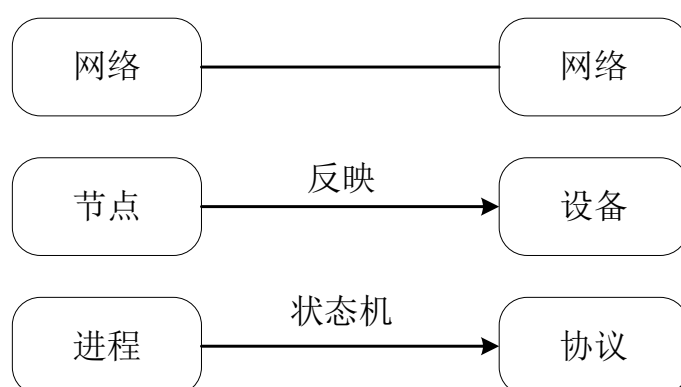


图 2.9 OPNET 层次建模特点

软件采用的网络，节点和进程三层建模架构^[29]，依次与网络、设备、协议完全对应，网络的相关特性能够得到全面呈现。OPNET Modeler 网络仿真软件提供的三个不同层次的模型，从网络的物件层次角度看最底层的是进程(Process)模型，实现对协议内容的说明；中间层次为节点(Node)模型，对应了设备的特性；最上层的是网络(Network)模型，表现出网络的拓扑结构。

2.2.2 OPNET 平台的建模特点

OPNET 数字平台提供了良好的图形化编辑和调试界面，并且具有高效的离散事件仿真引擎，其工作特点主要体现在以下几点：

1) OPNET 的模拟实现过程简单而又易于修改，主要表现在不同的节点只需依据对应的不同对象在初始相同的节点模型上通过设置相应对象的参数完成修改即可，因此，从模拟的方式角度来看，属于面向对象（Object-oriented Modeling）的类别。

2) OPNET 的仿真机制改善了传统的时间驱动所带来的低效问题，采用的是离散事件驱动（Discrete Event Driven）^[30]。使用事件驱动的仿真，可以模拟端口并发、解决仿真时间与真实时间的不一致问题。由于多种不同的设计方案在网络

的设计规划过程中都会出现，而每个设计方案都具有自己的优缺点，在这种情况下，设计者很难做出正确选择。网络仿真的出现解决了这个问题，针对不同方案，监控所建模型的性能参数实现网络的仿真预测，为方案的比较验证可以提供可靠根据。

3) 事件调度器按照事件的发生时间对其中的工作按照优先级进行排序，同时执行事件的顺序也遵循先进先出的准则，主要是维护每个具有优先级属性的队列。仿真模型中的每个模块依靠传递数据包的方式完成模块间的通信功能。离散事件仿真属于非连续时间仿真，其特点是依赖事件驱动实现仿真机制，具体包括事件处理器、事件队列和事件队列处理器三部分。以事件的到达为驱动，以事件的处理为动作，来仿真交换机运行框架。每个数据帧作为事件的子事件到达，将多个事件组合起来进行处理，每个事件对应一个仿真时间和处理时间。事件到达某个模块时，事件携带一个仿真时间，在该模块处理完该事件后，将仿真时间加上该模块处理的仿真时间，然后将事件投到下一个模块处理。当有多个事件同时到达时，事件会存储在事件队列，由事件队列处理器经过调度将事件取出，交由各个事件处理器进行处理。

4) 事件的执行不需要消耗时间，每个事件之间会存在跨越仿真时间的情况，但是不会存在消耗物理事件的情况，事件的执行从开始到结束这一过程需要物理时间，但是不会推进仿真时间，需要说明这个物理时间限制于机器的 CPU。

2.3 AFDX 数字化系统模型

AFDX 网络仿真平台用于仿真航空电子系统，是一种以数字化交换机为中心连接端系统的星型结构网络，网络中包含数字化端系统和数字化交换机两部分。根据 ARINC 664 规范，建立数字化 AFDX 网络功能模型，用于 AFDX 仿真平台的构建，便于早期通过仿真获取端系统、交换机的功能和性能参数，验证端系统和交换机模型，节约研发成本。

2.3.1 AFDX 帧结构模型

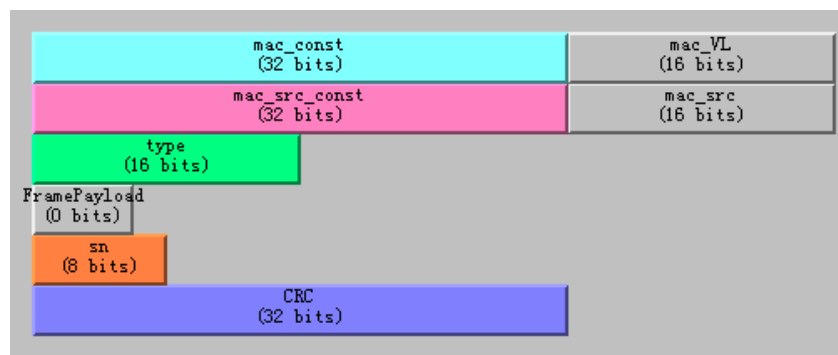


图 2.10 AFDX 网络帧结构模型

AFDX 网络是在以太网的基础上增加了确定性和可靠性的保证发展起来的, AFDX 帧和以太网帧具有高度相似性, 主要差别体现在 AFDX 帧在帧校验字段之前增加了一个 SN 字段, 因此本论文在考虑 AFDX 帧格式模型构建时参考以太网帧的结构, 具体模型如图 2.10 所示。

AFDX 数据包包含目的 MAC、源 MAC、类型、负载、SN 号和 CRC 字段。其中负载采用结构体类型, 长度大小在运行时根据数据帧实际大小设定, 其他字段采用简单数据类型实现。

一般情况下, Frameload 是固定的, 在本项目中可以根据具体业务流量动态设置长度。

2.3.2 AFDX 网络模型

基于以上对 AFDX 协议标准的分析, 论文使用 OPNET Modeler 数字化网络仿真软件搭建了 8 个端系统, 25 端口交换机的 AFDX 网络数字化仿真平台, 并收集相关统计量进行仿真分析说明, 本项目设计的 AFDX 网络数字化系统模型如图 2.11 所示。

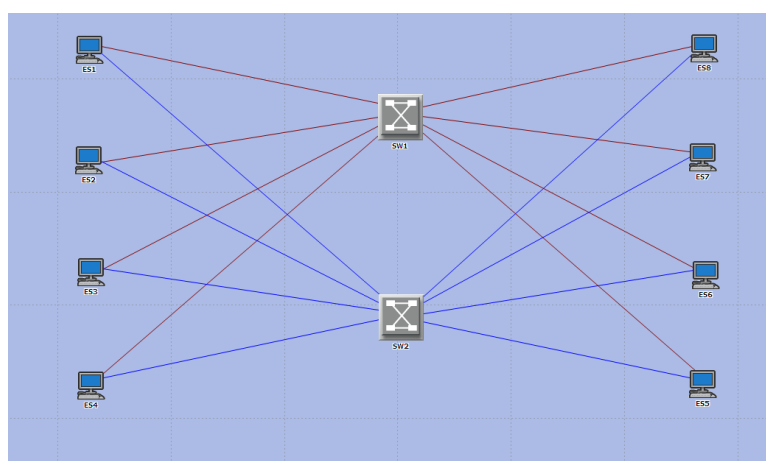


图 2.11 AFDX 网络系统模型

AFDX 网络仿真的星型结构网络包含数字化端系统和数字化交换机两部分。

数字化端系统作为 AFDX 网络仿真平台的一部分, 通过共享数据区与 AFDX 数字化交换机相连。数字化交换机是构建航电系统数据通信主干网络的关键设备, 两台数字化交换机互为备份, 用于仿真航空电子系统各个设备间的高速、可靠的数据交换, 保证航空电子机载网络数据在传输过程的实时性、确定性与可靠性。

数字化交换机作为 AFDX 网络仿真平台的另一部分, 与数字化端系统一起构成 AFDX 网络仿真平台, 用于在硬件研发时仿真交换机方案的功能和性能, 从而得出网络设计的总体评价, 验证硬件设计, 并作为提早进行软件开发的平台, 减少网络规划和设计的成本。

2.4 本章小结

本章主要从网络的系统特性，数据帧结构和核心设备（端系统，交换机）方面研究了 AFDX 协议的主要内容。AFDX 是一个具有确定性和高可靠性的网络，通过虚拟链路带宽分配和流量管理机制确保网络的确定性，通过冗余管理（RM），完整性检测以及数据 CRC 校验来保证网络的可靠性。本章详细分析了这些关键技术，最后基于数字化平台的建模特点，在仿真平台 OPNET 上实现了 AFDX 的网络建模和数据帧结构的行为建模工作。

第三章 AFDX 数字化端系统设计

AFDX 网络的虚拟链路机制保证网络的确定性，冗余管理机制实现数据传输的可靠性。AFDX 端系统协议栈的虚链路层不仅可以实现以太网链路层的功能，同时也支持 VL 机制和 RM 功能。

虚拟链路层不仅可以实现 OSI 模型链路层的功能，同时也通过引入了虚拟链路的概念实现了流量的管理功能，因此依据功能可以划分为两部分即 MAC 和 VL：MAC 部分以太网的协议标准实现链路层的功能，VL 部分是依据 AFDX 协议通过网络规划设计者预先配置包括抖动、最大帧长以及带宽分配间隔等 VL 属性实现控制 VL 的功能。

3.1 端系统功能模块设计

参照 ARINC 664 协议 Part 7 中对端系统的功能性需求并结合第 2 章节数据收发处理流程，本项目将数字化的端系统分解为驱动模块、传输模块和通信配置加载模块三部分，同时监控并记录运行参数。

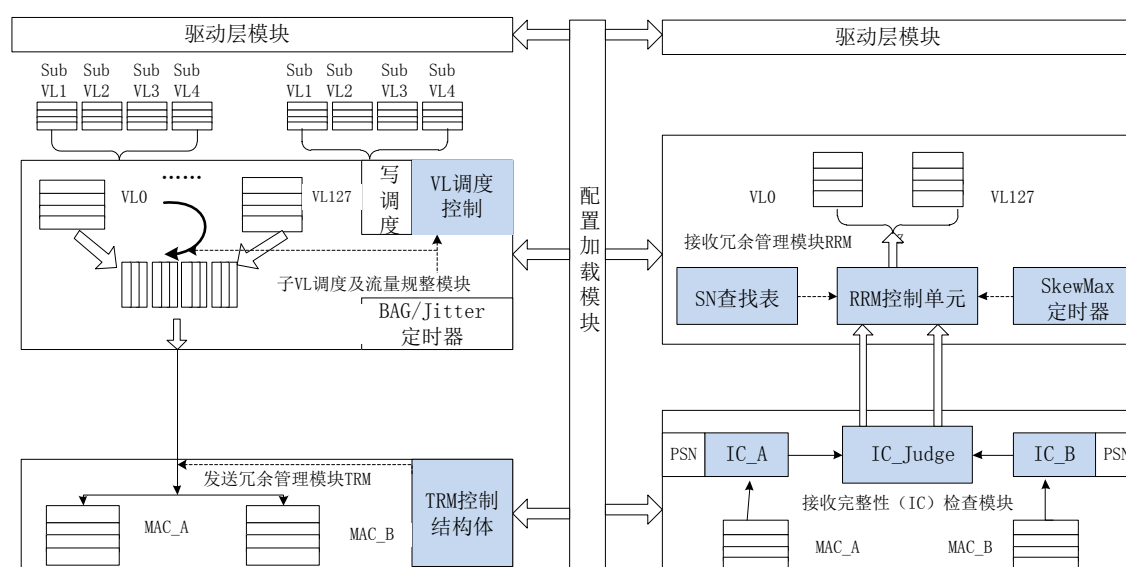


图 3.1 端系统模块划分图

- 1) 驱动模块：提供 AFDX 通信端口（包含队列及采用）和 SAP 端口的会话接口服务；并完成传输层 UDP 头的封装、IP 数据包的分片处理以及 ICMP 服务等；
- 2) 传输模块：提供 AFDX 网络确定性等协议内容。主要完成数据收发时所涉及的子虚链路调度、流量规整、冗余管理以及完整性检查等功能和性能上的需求；
- 3) 通信配置加载模块：通过加载通信配置数据对驱动模块中三类端口的传输特性以及传输模块中虚拟链路特性参数等的配置；建立起传输模块中 AFDX 端口

号与传输模块中的虚拟链路号之间的映射关系。

4) 错误警告计数: 完成对运行过程中的端系统各项监控参数等指标的更新和记录。

3.1.1 端系统驱动模块设计

在发送前, 一个发送 SAP 端口应该和源 UDP 端口、源 IP 地址和目的 VL 绑定, 并在发送时由用户通过发送 SAP 端口指定目的 UDP 端口和目的 IP 地址。

在接收前, 一个接收 SAP 端口应该和目的 UDP 端口、目的 IP 地址和目的 VL 绑定, 并在接收时由用户通过接收 SAP 端口获取源 UDP 端口和源 IP 地址。

当 SAP 端口采用 FIFO 策略发送数据时, 先进入队列端口的应用数据, 先经从 AFDX 交换机物理端口被发送到 AFDX 网络中, 后进入 FIFO 队列端口的应用数据后从 AFDX 交换机物理端口被发送到 AFDX 网络中。当 SAP 端口采用 FIFO 策略接收数据时, 服务端口应该向用户先提交由源端系统先发送的应用数据, 后提交由源端系统后发送的应用数据。SAP 服务端口发送应用数据时, 如果发生缓冲区的溢出情况, 端口服务应该有相应方法进行异常处理。FIFO 缓冲是否溢出是通过比较系统参数配置 FIFO 缓冲的深度、长度与 FIFO 缓冲实际使用情况来判定的。

在 SAP 服务模式, 在应用数据发送过程中如果发生缓存深度溢出的情况, 服务端口应该向用户给出一个缓冲深度溢出的异常指示。并且将该数据丢弃, 如图 3.2 所示。

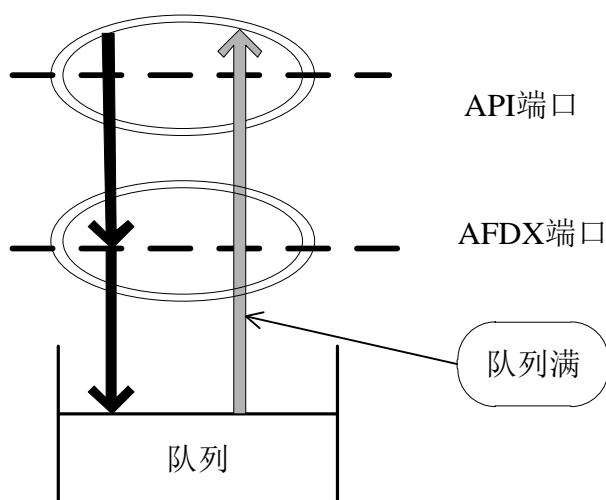


图 3.2 队列满示意图

SAP 端口服务必须保证应用数据正确的发送顺序接收顺序。SAP 端口在发送应用数据时, 应该遵循先入先出 (FIFO) 的准则管理发送应用数据的缓冲。一个给定的数据没被发送之前不允许新数据的覆盖。SAP 端口服务在接收应用数据时,

应该遵循先入先出（FIFO）的原则管理接收应用数据的缓冲。一个给定的数据没被用户取走之前不允许新数据的覆盖。

1) UDP 层

根据 ARINC664-P7 中规定，UDP 的源端口号和目的端口号的取值范围应当在 [0, 65535] 之间。每个 UDP 服务访问点都应该能够处理最大 8192 字节的应用数据。AFDX 通信不允许出现空 UDP 报文。UDP 报文格式中的 UDP 长度占 2 个字节，UDP 的首部长度与 UDP 应用数据字节长度之和为 UDP 长度字段的值。

UDP 协议层作为面向数据报的一个简单传输层协议，通过向上层应用提供协议端口确保进程间的数据通信。发送数据时，UDP 层对应用层递交下来的应用数据进行协议封装，形成标准的 UDP 报文，然后递交至 IP 层；接收数据时，UDP 层对 IP 层提交上来的 UDP 报文进行协议解封装，将应用数据提交给应用层。

由于 UDP 相对效率较高，SAP 服务采用 UDP 通信。ES 协议栈对 TCP/IP 描述的 UDP 协议进行了协议定制。UDP 首部包含 16 位源端口号、16 位目的端口号、16 位的 UDP 长度以及 16 位的 UDP 校验和，如图 3.3 所示。



图 3.3 UDP 报文格式

UDP 校验和覆盖 UDP 首部和 UDP 数据。按照 ARINC664-p7 规范，在数据发送端不需要产生 UDP 数据校验和，在数据接收端不对 UDP 校验和进行检查。UDP 报文中的校验和字段占 2 字节，对应的字段值应为 0x0。

2) IP 层

IP 层作用是处理分组在网络中的活动，IP 协议实现 IP 数据报的封装、数据报的分片、分片以及分片重组控制等功能。

为了保证数据传输的可靠性，ARINC664-P7 使用了较为复杂的 IP 数据报的首部格式，其中诸如服务类型(TOS)和生存时间(TTL)字段不做过多要求，按照常数域进行处理，IP 数据报的格式见图 3.4。



图 3.4 IP 数据包文格式

协议栈软件中 IP 数据报的格式应该符合图 3.4。

IP 首部中的首部长度字段占 4 字节的空间，IP 首部共占 20 字节，IP 首部中的首部长度字段值应当为 0x5。

IP 首部中服务类型（TOS）的字段占 8bit 的空间。其中前 3bit 代表优先权，该字段忽略不用，中间 4bit 代表服务类型，最后 1bit 未使用。其中服务类型四位中，取值时只允许一位为 1，从高到低分别表示最小延时、最大吞吐量、最高可靠性和最小费用。如果全部为 0 则表示为一般服务，AFDX 中使用全部为零的情况。

发送数据时，IP 层对 UDP 层递交下来的 UDP 报文进行封装，形成符合 ARINC664 规范的 IP 数据报。必要时进行 IP 分片操作，将形成的 IP 分组递交给 MAC 层。发送过程是协议栈软件 IP 层进行 IP 封装的过程，协议栈软件会按照 IP 数据报各字段和格式的具体要求进行报文封装。

接收数据时，IP 层对 MAC 层提交上来的 IP 数据报进行协议解封装。必要时通过 IP 分片重组将提取得到的 UDP 报文提交给 UDP 层。

表 3.1 分片标志字段标识表

字段	名称	描述
MF	More Fragment	该位为 3 位控制标志中最低位，MF 为 1 时，表示后面还有分片，该位为 0 时，表示这已经是若干数据报中的最后一个 IP Fragment
DF	Don't Fragment	为 1 时，交换机不再接收数据；为 0 时，交换机接收数据

ARINC664-P7 中规定，发送 VL 能够发送的 AFDX 帧的长度有范围的限制。

其最大帧长是 1518 字节，最小帧的长度为 64 字节。由此得到协议栈允许向 MAC 层提交的 IP 数据报的最大和最小长度分别为 1499 字节和 45 字节。为了满足规范的要求，若 IP 数据报的长度大于 1499 时则应该在数据发送端完成 IP 分片。IP 重组是在数据接收端完成的。IP 首部中的分片控制标志占 3 字节，具体介绍见表 3.1。

若 IP 分片是若干 IP 分片中最后一个分片时，IP 首部中的分片控制标志中的 MF 字段应当置为 0，如果不是最后的一个分片则应当置为 1。

协议栈发送数据时，将 IP 首部中的控制标志中的 DF 字段应当置 0。

表 3.2 IP 分片过程数据

分片过程 相关量值	物理意义	计算方法
Len	待分片 IP 数据包总长度	
VLmax	发送 VL 能够处理的最大真长	
userDataLen	待分片的 IP 数据包中应用数据长度	Len-IP 头长度-UDP 头长度
IPLoadMax	IP 最大负载长度	VLmax - (MAC 帧头和尾长度+IP 头长度+SN 号长度)
maxFragmentDataLength	分片最大长度	IPLoadMax - IPLoadMax%8
N	IP 分片的总个数	$(Len-1)/maxFragmentDataLength + 1$
lastFramentLen	最后一片 IP 分片长度	$(userDataLen + UDP 头长度) - (N-1)*maxFragmentDataLength$
Offset	各 IP 分片中偏移量	maxFragmentDataLength

IP 首部中的片偏移字段占 13bit 的空间，对应字段表示较长的 IP 数据报在被分片之后，某分片在原来数据报中的相对位置，该相对位置的值是从 IP 数据报中的用户数据片段的起点算起。当 IP 数据报被分片时，协议栈软件应该用片偏移来表示对应分片在原分组中的相对位置。

IP 分片规则见表 3.2，以一个长度为 3820 字节的 IP 数据报为例，用来发送的 VL 的最大帧长为 1441 字节，按如上所述的 IP 分片操作规则进行分片，分片相关过程量值表示如下：

- 待分片 IP 数据报长度 Len 是 3820。

- 发送 VL 能够发送最大的帧长为 VLmax 为 1441。
- 待分片的 IP 数据报中应用数据长度 userDataLen 为 $3820 - 20 - 8 = 3792$ 。
- IP 最大负载长度 IPLoadMax 为 $1441 - (18 + 20 + 1) = 1402$ 。
- 分片后 IP 分片最大长度 maxFragmentDataLength 为 $1402 - 1402\%8 = 1400$ 。
- IP 分片的总个数 N 为 $(3820 - 1) / 1400 + 1 = 3$ 。
- 最后一片 IP 分片长度 lastFragmentLen 为 $(3792 + 8) - (3.1) * 1400 = 1000$ 。
- 各 IP 分片中片偏移量 Offset 为:
- 第一片 IP 分片偏移量为 $1400 * (1.1) / 8 = 0$ 。
- 第二片 IP 分片偏移量为 $1400 * (2.1) / 8 = 175$ 。
- 第三片 IP 分片偏移量为 $1400 * (3.1) / 8 = 350$ 。

接收过程是协议栈软件 IP 层进行 IP 解封装的过程，协议栈软件接收到 IP 数据报时会按照 IP 数据报格式和各字段具体物理意义进行有效性检查，并对 IP 分片进行重组。

当 IP 层接收来自 MAC 层 IP 数据报时，如果接收到的是一个原始 IP 数据报分片形成的同系列的 IP 分组，则需要对这些 IP 分组进行重组，得到原始完整的 IP 数据报；如果接收到的一个完整的，原始的 IP 数据报（发送时未分片），则不需要进行数据报重组，需要重组的 IP 分片需要满足如下需求。

- a) 协议栈接收数据时，当 IP 分片中分片标志字段中的 MF 位为 1 时，协议栈软件还应查看下一 IP 分片的数据，直至遇到相同片段标识符的 IP 分片分片标志字段中 MF 位为 0 时，初始 IP 数据报才算被得到，否则将该 IP 分片丢弃。
- b) IP 首部的片偏移字段表示较长的 IP 数据报在被分片后，某个分片在原来数据报中相应的位置，该位置的值是从 IP 数据报的数据载荷的起点算起。
- c) 协议栈接收数据时，协议栈软件接收到的 IP 数据报 IP 首部中片偏移标识（占 13bit 空间）应能正确标识此分片在原 IP 数据报中的相对位置，否则将该 IP 分片丢弃。
- d) 协议栈接收数据时，IP 层收到源自相同 IP 数据报的几个 IP 分片的标识字段应该完全相同，否则协议栈软件对这些 IP 分片进行丢弃处理。
- e) 协议栈接收数据时，协议栈软件接收到的 IP 数据报的目的 IP 应当在协议栈通信配置参数中，否则协议栈软件应该对该 IP 数据报进行简单丢弃。
- f) 协议栈接收数据时，协议栈软件应当支持对接收 IP 数据报数目的统计。注：在统计接收 IP 数据报数目时，不考虑 IP 数据报的合法性。
- g) 协议栈接收数据时，协议栈软件应当支持对 IP 校验和错误的报文数目的统计。

3.1.2 端系统传输模块设计

端系统传输模块完成 AFDX 端系统的数据发送、数据接收、流量规整以及冗余管理等功能^[31]。端系统传输模块由发送与接收功能两部分构成如图 3.5 所示：

1) 端系统发送功能设计

端系统关于数据发送功能所涉及的关键技术如下：

- a) 虚拟链路调度模块（含抖动）
- b) 流量规整
- c) 发送冗余管理
- d) 发送虚链路数据存储
- a) 虚拟链路发送

数据帧经过帧格式封装后被放入 VL 队列中，同时进入虚拟链路层，封装工作由 ES 协议栈虚拟链路层的上层应用完成。虚拟链路层完成对各虚拟链路队列的帧流量整形；调度帧的发送时间完成多路 VL 的复合；需要发送的数据帧完成帧结构中 SN 号的填充后被发送到 RM 单元；依据帧的 VL 配置信息判断该帧是否为冗余帧，是否需要进行冗余发送，若结果为冗余帧则完成帧的复制并将其发动到对应的 MAC 单元，同时更新发送物理端口 ID。

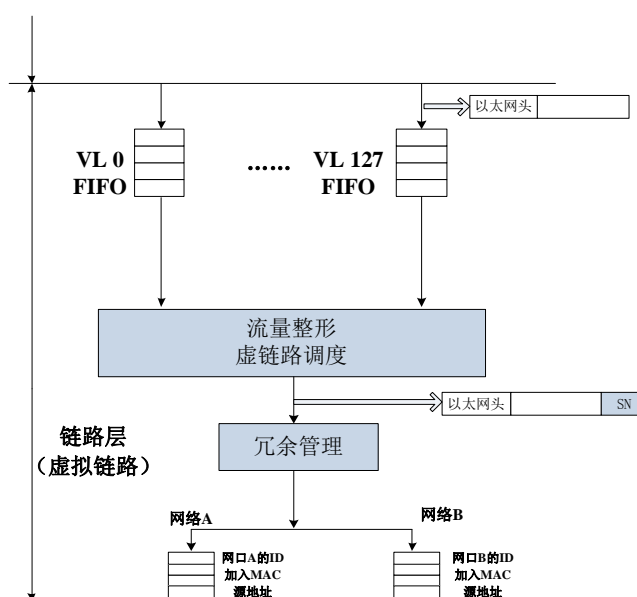


图 3.5 发送工作过程（VL）

b) 流量整形

流量整形意味着在虚拟链路层对进入 VL，即将发送的数据帧的时间间隔由混乱无规则的情况规整为固定的时间。网络集成者对每条虚拟链路的 BAG 等相关参数依据协议进行预先配置，通过在固定的时间间隔内只发送单个帧实现对该路上

传输的数据帧发送时间的规整，如图 3.6 所示。

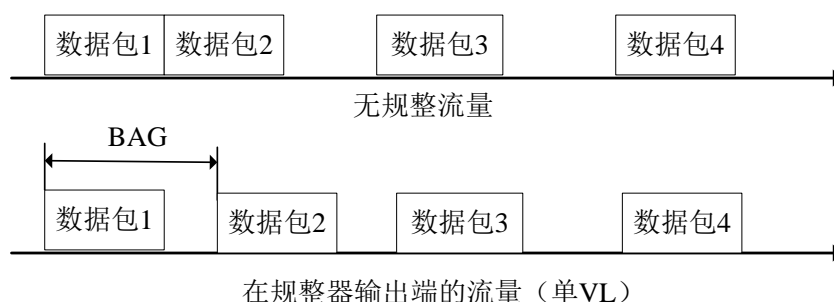


图 3.6 数据流量整形

ARINC664 协议标准对取值范围为 1ms~128ms 的 BAG 规定 AFDX 网络的集成者必须依据实际的应用需求为每路 VL 提前进行配置，BAG 需要同时满足公式： $BAG = 2^n$ ，n 为整数，取值从 0 到 7。因此协议栈虚拟链路层的流量整形功能通过 BAG 将虚拟链路单次数据传输的时间规整为固定值，网络的传输延迟也被控制在一定范围，确保了网络的确定性。

每个抖动窗口拥有固定的间隔（BAG），通过严格控制每个分组的发送在抖动窗口中进行，从而可以确保链路的抖动和有效带宽。因此在每路 VL 都确保自己的抖动 jitter 与 BAG 计时单元的情况下，可依据对 BAG 以及 Jitter 的配置要求从而实现发送判断。

在 AFDX 网络中参数抖动以及 BAG 是确保网络服务质量以及确定性的重要因素，具体由流量整形模块来保证实现。流量整形模块主要包括抖动计时器、BAG 计时器、BAG 配置结构体和整形控制单元，其中模块对应 VL 的 BAG 值保存于 BAG 配置结构体中。

为了使每条虚拟链路能够完成一个流量规整器的作用，同时也为了应用配置更加方便，每条虚拟链路利用一个 BAG 计时器，计时器用来实现 BAG。当每次的计时器值为 BAG 时，如果存在数据须要被发送的情况，则同意发送同时重置计时器开始计时，如果存在数据的时间间隔小于一个 BAG 的情况，需要将时间间隔规整为一个 BAG，这一过程通过规整器实现，同时为了保证网络的确定性，防止其它路 VL 带来额外延迟，确保每路 VL 独立的带宽，每个规整器都通过相互独立的硬件来完成。

c) 发送冗余管理

数据帧是否需要冗余发送取决于网络设计者对 VL 的实际配置情况，在一般情况下，为了提高数据传输的有效性，VL 的配置都应该支持冗余发送。AFDX 协议为了简化数据的接受过程，对相邻帧的发送间隔做出了规范，即最大发送间隔应该控制在 500us 以内。

虚拟链路层的 TRM (Transmit Redundancy Management) 功能即指帧的传输方式需要依据 VL 的 RM 状态来决定, 以网络 A 和网络 B 为例, 即存在只在其中之一传输和同时在两个网络实现传输 (即冗余传输) 这三种方式, 如果判断该数据帧为冗余帧, 需要冗余发送, 则复制该帧同时对帧结构中的 Interface_ID 字段进行修改, 最后由对应的网络传送到目的端系统。

d) 虚拟链路 VL 调度

由于多路 VL 可以在同一个端系统内使用, 但是在同一时间内, AFDX 网络的物理链路层仅允许发送单路 VL 的数据, 所以各路 VL 需要在端系统协议栈的虚拟链路层通过流量整形实现多路复用, 最后进行传输。为了提高传输效率, 实现在一条链路上对多路 VL 上数据的传输, 就需要进行对虚拟链路进行多路复用, 数据在各路 VL 上传输形成了帧数据流, 多路复用就是将 ES 各条虚拟链路的帧数据流复用至一条实现数据的传递。

抖动 (Jitter) 是虚拟链路层在 VL 的调度过程中由于多路 VL 存在发送竞争而引起的。具体原因在于由于每条虚拟链路具有自己固定的发送时间间隔, 在通过一定算法进行多路复用, 会存在各条虚拟链路在某个时间点由不同的 BAG 所导致的发送竞争, 调度是针对单条虚拟链路, 因此其它各路 VL 上数据的传输受到影响, 不能正常完成发送, 也就产生了 Jitter。抖动作为虚拟链路调度进行多路复用导致的一种发送延迟, 其时间间隔是固定值, 从帧结构方面分析, 具体为 BAG 和帧的首位实现发送之间的时间。

在确保每路 VL 的 BAG 的情况下, VL 经过多路复用后, 数据帧的调度是 VL 在一定的抖动范围内完成的, 决定了帧发送的顺序, 图 3.7 为虚拟链路的调度示意图, 有 VL1 和 VL2 两路 VL 参与调度。

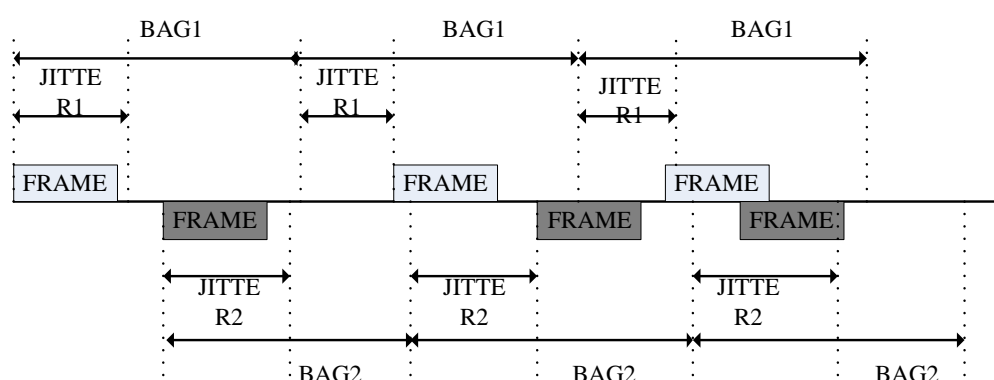


图 3.7 虚拟链路调度示例

2) 端系统接收功能设计:

端系统的接收功能涉及的关键技术如下:

a) 接收虚链路数据存储

- b) 完整性检查
- c) 接收冗余管理
- a) 接收虚链路数据存储

端系统接收到 AFDX 帧时需要对帧格式的最后一个字段进行校验（即 FCS 校验），校验由虚拟链路层的底层应用来完成。通过对帧结构中的 SN 字段进行完整性检查，数据帧完成无效帧的判别，如果被判别为无效，该数据帧将被丢弃，如果该帧序列号正确则有效同时被发送到 RRM 单元；RRM 单元主要负责对完成校验的有效帧传递到上层应用。

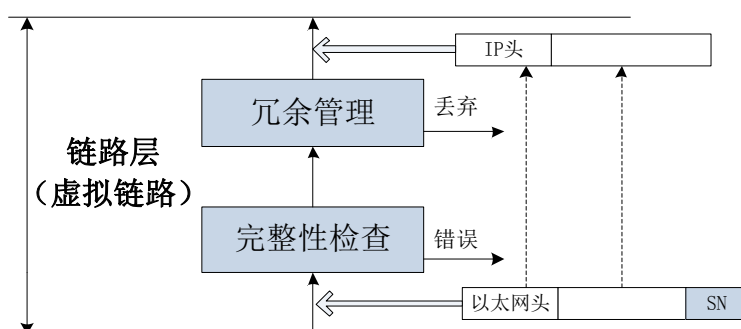


图 3.8 接收工作过程 (VL)

- b) 完整性检查

数据帧的完整性检查包含次序完整性、内容完整性以及源完整性三类，下面分别对其进行介绍。

- 次序完整性

通过序列号 SN 对 AFDX 各路 VL 上传输的帧按照顺序完成编号，因而依据某些特定的算法，端系统接收到数据时，会依据帧结构中的 SN 字段判断对帧序列的完整性和有效性进行判断检查即 IC (Integrity Check)，完整性检查支持冗余链路，对连续接收到的各自相互独立的 VL 上的帧进行各自检查，整个过程不受其它链路的影响。

AFDX 协议标准对 IC 的规则做出规定^[32]，主要包括：

准则 1: $RSN=PSN+1$;

准则 2: $RSN=PSN+2$;

准则 3: $RSN=0$ 或各路 VL 在目的端系统复位后接收到的首个帧。

对于当前接收到帧，定义其序列号为 Received SN（简称 RSN）；同一路 VL 上对于前一个接受到的帧的序列号称为 PSN（Previous SN）；操作符“+”指序列号在 1~255 的取值范围内完成循环的进行加计算，在 SN 大于 255 的情况下，序列号必须回归循环流程的起点，用数学公式表达，则为：若 $PSN=255$, $RSN=PSN+1=1$ 。

准则 1 意味如果接收到的帧为继上一帧后的后续帧，则意味着当前帧的 SN 是与期望相符的序列号。

准则 2 的表达式提高了 IC 的可靠性，在数据的传输过程中，会出现由于单个帧异常或者交换机阻塞导致帧序列流乱序现象，准则 2 有效避免了这种现象。

- 内容完整性

接收端数据的内容完整性由序列（FCS）和 4 字节的帧校验完成。以太网协议标准中规范了 CRC32 码为数据帧的帧校验序列 FCS 方式。作为分组码中的重要线性码，CRC(Cyclic Redundancy Check)用来确定在物理层传输过程中的数据是否有存在产生错误的情况发生。CRC 不仅能依据线性移位寄存器相对简单地完成编码、译码，而且在理论方面同时拥有很好的代数结构，因此编码简单以及误判的低概率性成为其特征。

图 3.9 表示以太网帧的 FCS 计算过程。

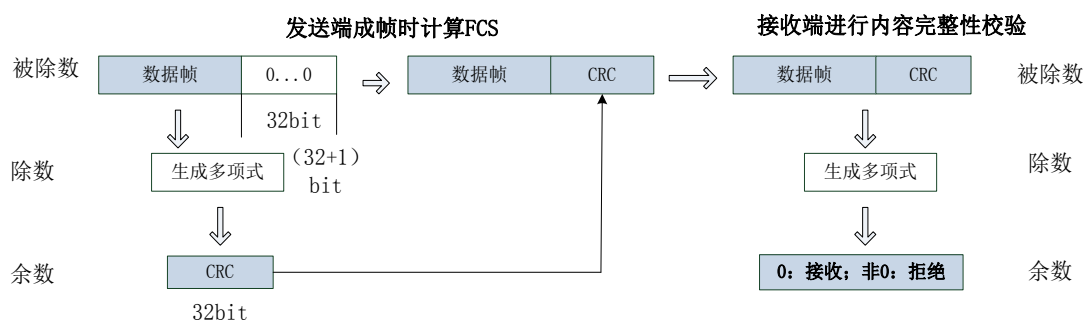


图 3.9 计算 CRC 生成帧校验和序列

在发送端，将 32bit 个 0 附加于数据帧的最后。依据 IEEE 规定生成多项式的长度需为 FCS 长度加 1；

以新添 0 后的数据单元为被除数，提前决定的生成多项式所对应的 33 位二进制序列为除数，进行二进制除法后得到的余数为 CRC；

根据第二步获得的 32 位的 CRC 值代替在数据单元最后附加的 32bit 0。

目前普遍采用以下三种生成多项式：

CRC-CCITT: $X^{16}+X^{12}+X^5+1$ ；

CRC-16: $X^{16}+X^{15}+X^2+1$ ；

CRC-32: $X^{32}+X^{26}+X^{23}+X^{22}+X^{16}+X^{12}+X^{11}+X^{10}+X^8+X^7+X^5+X^4+X^2+X+1$ 。

以太网协议中对 CRC32 的生成多项式做出了规定： $X^{32}+X^{26}+X^{23}+X^{22}+X^{16}+X^{12}+X^{11}+X^{10}+X^8+X^7+X^5+X^4+X^2+X+1$ ，即为计算 FCS 的生成多项式。

- 源完整性

源完整性将根据当前接收帧中的目的 VL 号和目的 UDP 端口号查找该数据帧源端的配置信息（源 MAC、源 IP 和源 UDP 等），并进一步对比所收数据帧的源

MAC、源 IP 以及源 UDP 的与对应配置信息的一致性检测。

c) 接收冗余管理

经过冗余发送的 AFDX 帧以及它的复制帧互为冗余帧，目的接收端接收到会接受到两个完全相同的数据帧，虚拟链路的 IC 机制和 RM 机制是各自独立，互不影响的，对各条虚拟链路上的数据帧的帧序列进行顺序检查并不会影响相应的冗余帧序列，因此在 RRM (Receiving Redundancy Management) 过程中需要链路层按照一定算法丢弃冗余帧。

互为冗余的 AFDX 帧从帧结构、帧内容等方面完全相同，但是在 AFDX 网络经过 Switch 到达同一个目的 ES 的时间间隔是不确定的，这是由于每个交换机的输入输出流量不同引入了交换延迟，交换延迟取决于交换机硬件，不同的交换机导致的交换延迟也不同。在 RRM (Receiving Redundancy Management) 单元用 SkewMax 减少冗余帧的接收时间。

AFDX 帧和互为冗余的数据帧在两个独立的网络传输，为保证数据传输的稳定性，两个帧之间的时间间隔必须进行约束，如图 3.10 所示，将这个时间间隔称为最大偏斜 (SkewMax)，AFDX 协议对每路 VL 的 SkewMax 都做出了规范，即网络设计集成者必须参照 Switch 的数目配置最大偏斜具体数值。以图 3.10 为例说明，数据帧 A1 在 A 网络上传输，数据帧 B1 在 B 网络上传输，当帧 B1 的接收时间和帧 A1 相比大于最大斜率，表示 B1，A1 不互为冗余帧。

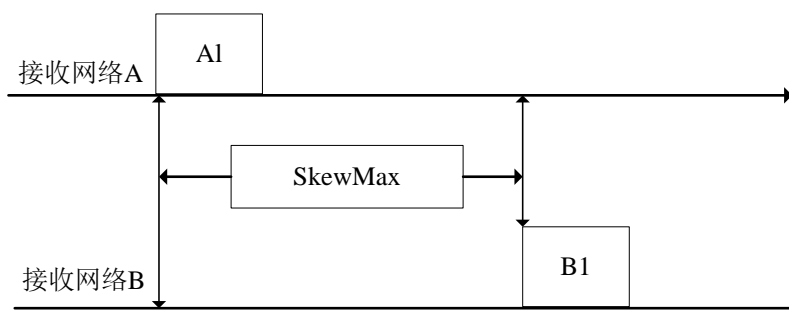


图 3.10 SkewMax 的定义

虚拟链路层的 RRM 功能概括起来为检查判别数据帧是否为冗余帧，若是，则丢弃该帧，若不是则进行正常传输。冗余帧的检查需要依靠帧结构中的序列号，同一路 VL 上的帧数据流依据 SN 编号，因此依据序列号即可判别到达的顺序，为了方面甄别，依照在 RRM 单元被接受的先后顺序定义先到达的为本帧，后来的为复制帧，因此，在序列号和最大偏斜的基础上，论文使用了相关接收冗余管理策略，具体包括了下面几个准则：

准则 1：配置项；

准则 2：本帧和其复制帧使用“先到先使用”的原则；

准则 3：无条件的接收大于最大偏斜 **SkewMax** 的复制帧；

准则 4：完成冗余帧的清除后，本帧的 **SN** 可以循环增加。

准则 1 表示接收冗余管理算法的执行必须依靠 **VL** 包括冗余信息的参数配置，具体表现在 **RRM** 禁止或使能的状态依赖于 **VL** 的配置，以此为标准判断相应的虚拟链路是否需要 **RM.RRM** 算法有效与虚拟链路的 **RRM** 使能意义是相等的，**VL** 的 **RRM** 状态切入禁止时，表示该帧不是冗余帧，**RRM** 算法将其正常传递至应用；准则 2 表示对互为冗余的两个帧的时间间隔进行判断，如果属于最大偏斜的范围，那么处理掉复制帧同时完成本帧的传递；准则 3 表示了准则 2 的另外一种情况即时间间隔在范围外，在这种情况下，复制帧充当本帧的角色被接受并传递至上层应用；准则 4 表示该算法考虑了冗余 **VL** 的数据丢失的情况，传输至上层应用的 **AFDX** 帧对应的序列号与前一帧相比应该更大。

3.1.3 端系统通信配置模块设计

1) 端系统配置

针对 653 分区的航空电子应用以及数据加卸载等业务对端系统信息的依赖，使得端系统 **ES** 需要以下信息：

- 端系统名称：全局唯一用来区分端系统；
- **DomainID**：域标识；
- **SideId**：边标识；
- **LocationId**：位置标识。

2) 端口配置（驱动模块）

端口号
最大消息长度
最大消息数目
端口刷新率
VL 号
子 VL 号
分段标志
端口控制块地址
端口控制块写指针
端口控制块读指针

图 3.11 端口配置信息

- 端口号：端口配置标识，在一个 **ES** 上唯一；
- 端口方向：端口方向，发送或者接收（**SEND, RECEIVE**）；

- 最大消息长度：这个长度不能超过 VL 的最大帧长；
- 最大消息数：采样端口配置成 1；
- 端口刷新率：只对采样接收端口有效；
- VL 号：该端口使用的 VL 号；
- 子 VL 号：子 VL 号；
- 分段标志：标志是否分段；
- 端口控制块写指针：指向当前可以写入的缓冲区；
- 端口控制块读指针：指向当前可以读出的缓冲区。

端口控制块地址：包含两个字段的共用体，当端口为通信端口时，表示是通信端口控制块地址，此时包含的两个字段是存储数据原来长度的数组首地址以及端口缓冲区首地址。为 SAP 端口时，表示 SAP 端口控制块地址，这时包含 3 个字段，端口缓冲区首址，数据长度数组首址，还有存储 UDP、IP 地址的首址；

AFDX 端口分为两种即服务访问（简称 SAP）端口与 SAP，担当与上层应用软件的通信介质角色。通讯端口被分为两类，分别为采样口和队列口。实现端口可以分为两步，配置加载和创建端口。

配置加载主要实现将 AFDX 端口的配置信息完整地下载到它的终端系统。作为具有确定性特点的 AFDX 网络，AFDX 的 VL、通信端口和它们之间相对应的关系等因素可以依据航电系统和 AFDX 终端设备的实际需求预先完成配置。

AFDX 网络集成者依据协议标准通过对 AFDX 端口的加载信息的配置完成端口的创建，这些配置信息存放在一定大小（具体算法为最大与最小消息数的成绩）的内存区域里，因此，从逻辑方面讲，AFDX 端口和存储区域存在一定的对应关系。

3) 虚链路 VL 配置（传输模块）

- VLID 号：在网络中唯一识别一条 VL；
- 类型：VL 是针对于端系统的一个概念，对于源端系统来说，此类型是“发送”；对于目的端系统来说，类型是“接收”；
- 子虚拟链路数：这条虚拟链路允许的子虚拟链路个数，默认为 1；
- BAG；
- 最大帧长度：虚拟链路允许的最大帧长度，单位为字节；
- 最小帧长度：虚拟链路允许的最小帧长度，单位为字节；
- Skewmax；
- 网络选择：参数定义分别为 NetWork_A-网络 A、NetWork_B-网络 B、BOTH-网络 A 和 B；
- 冗余管理：选择此虚拟链路是否需要进行冗余管理，参数定义分别 NO-否、

YES- 是;

- 完整性检测: 是否激活完整性检测, 参数定义分别为 NO-否、YES- 是。

3.2 运行记录参数和错误警告计数

端系统在运行时需要对自身收发数据的统计量和错误警告进行实时的更新, 以便于网络管理软件的查询; 同时这些记录参数和警告计数也可作为软件排故的一种手段。

1) 运行记录参数

- 发送总计数
- 发送 IP 计数
- 发送 UDP 计数
- 接收总计数/余度后接收帧计数
- 接收 IP 计数
- 接收 UDP 计数
- A 端口接收总计数
- B 端口接收总计数

2) 错误警告计数

- A 端口接收 CRC 错误计数
- A 端口接收 VL ID 错误计数
- A 端口接收<64 字节错误计数
- A 端口接收>1518 字节错误计数
- B 端口接收 CRC 错误计数
- B 端口接收 VL ID 错误计数
- B 端口接收<64 字节错误计数
- B 端口接收>1518 字节错误计数
- A 端口 MAC 目的地址固定域错误计数
- A 端口 MAC 目的地址错误计数 (包含固定域和 VL_ID 错误)
- A 端口 MAC 源地址 user_id 错误计数
- A 端口 MAC 源地址 interface_id 错误计数
- B 端口 MAC 目的地址固定域错误计数
- B 端口 MAC 目的地址错误计数 (包含固定域和 VL_ID 错误)
- B 端口 MAC 源地址 user_id 错误计数
- B 端口 MAC 源地址 interface_id 错误计数

3.3 端系统数字化模型的设计

3.3.1 端系统节点模型

根据第2章和第3章对AFDX网络端系统关键技术需求分析,本项目在OPNET平台上设计了数字化端系统的模型,节点模型如图3.12所示。

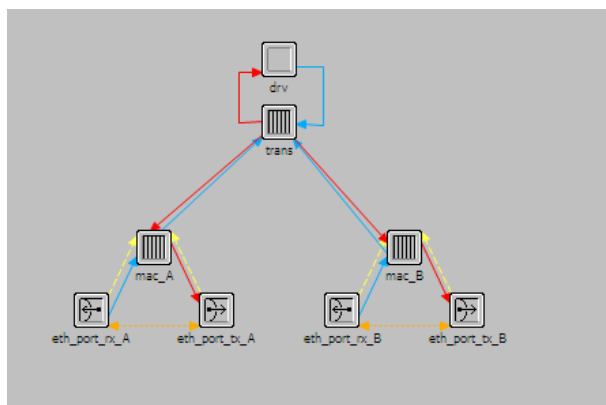


图 3.12 端系统节点模型

数字化端系统节点模型包括三个部分,分别是驱动 (drv) 模块, 传输 (trans) 模块和冗余链路 (MACA,B)。

- 驱动 (drv) 具体实现功能: 配置加载、控制块维护, 协议栈管理;
- 传输 (trans) 具体实现功能: VL 调度、余度管理等;
- 冗余链路 (MAC A、B) 具体实现功能: 完整性检查、相关错误检测等。

3.3.2 端系统进程模型

OPNET 仿真工具的特点是层次建模, 位于最底层的进程模型以状态机的形式来说明协议。

1) 驱动模块 (数据源) 进程

图 3.12 提到过 drv 模块的作用就是发送和接收数据, 所以数据源进程的主要作用就是产生和接收数据, 数据源进程模型如图 3.13 所示。

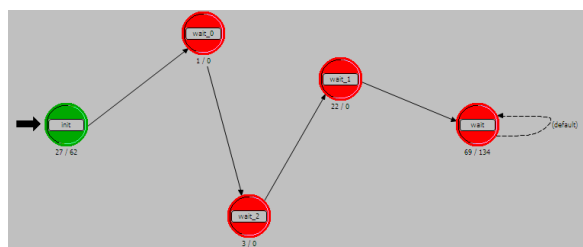


图 3.13 端系统驱动模块进程模型

- init 状态

初始化, 获取产生包的一些参数, 包括生成包的开始时间、结束时间、包格

式、大小、目的地址等等。然后将这些参数写入到一个结构体数组中，用于后面的数据包产生函数中。

- wait_0 及 wait_2 及 wait_1 状态

初始化结束后发送一个简单的包，用于交换机学习地址，配置交换机的端口地址映射表，这个简单的包只用于地址学习，当终端节点接收到这种地址学习的包后，不做任何处理马上销毁这个包。多余的两个 wait 状态是等待交换机地址学习过程完成后，才开始产生数据流量。

- wait 状态

接收中断，判断中断码。根据不同的中断产生不同的流量。数据源产生数据的流程如图 3.13。

2) 传输模块进程：

传输（trans）模块进程模型如图 3.14 所示。

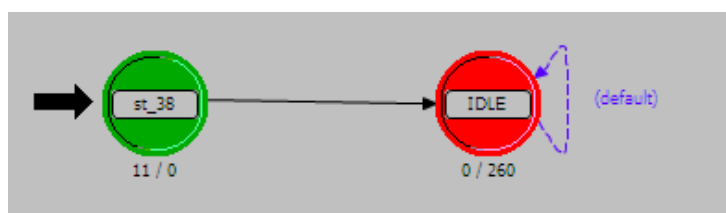


图 3.14 端系统传输模型进程模型

- 初始化状态（st_38）

进程进行初始化，包括数据和本地参数的初始化，进入 IDLE 状态。

- idle 状态

主要用于处理各种中断，即根据接收到的中断的不同类型（自中断，流中断）做出不同的响应。自中断是进程周期性自我产生的中断。流中断，是由 mac 模块触发的，也就是说每当 mac 模块从其它节点接收到一个数据帧，当它发向节点模块时，就会为节点模块产生一个流中断，该中断会由 OPNET 仿真内核添加到节点模块的中断队列中。当节点模块从它的中断队列中取出该中断判断其中断类型为流中断时，就会知道有分组到达，可以取出分组并对分组进行相应的处理。

3) 冗余链路模型：

冗余链路模型如图 3.15 所示，MAC 模块的进程模型的作用是接收来自本节点上层的数据包，封装成 AFDX 数据帧，然后发送出去；或者接收来自接收机的数据解封装再发送到上层。

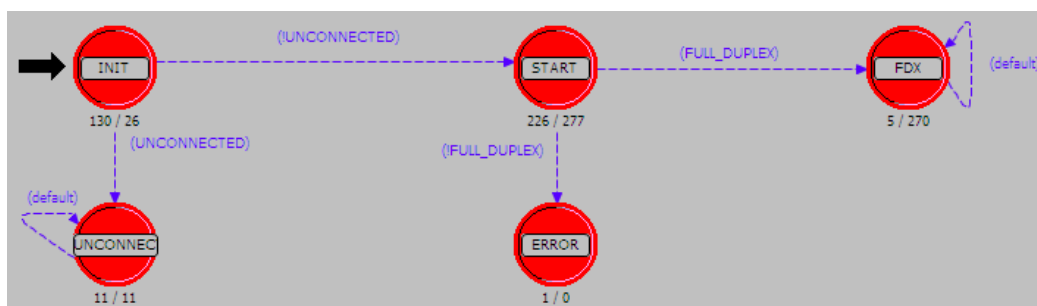


图 3.15 端系统冗余链路进程模型

- 初始化状态 (INIT)

初始化状态主要完成在进程模型中用到的状态变量、临时变量的初始化，以及进程注册等工作。

- 无连接状态 (UNCONNECT)

无连接状态是端口没有链路相连，这样的话，这个端口只会接收到上层来的数据包，但是接收到的数据包也不做任何处理，直接销毁。

- 开始状态 (START)

开始状态的功能是判断此节点是不是网关节点、确定此模块接收的数据包是上层 IP 或者 IPX 层发送下来的。开始状态的出口程序中要判断此端口是不是网桥或者交换机的一个端口，如果是网桥或者交换机的端口的话，那么它接收的数据就不经过解封装直接送到上层中进行处理。此状态的另一个重要的功能是判断与此端口相连的链路是全双工还是半双工的，根据这个判断分别转入不同的状态。

- 全双工状态 (FDX)

全双工状态的功能为处理中断，有流中断和自我中断。如果是流中断，判断是从上层来的数据包还是从物理层来的数据包，依据不同的情况调用不同函数完成处理。

3.4 本章小结

本章是 AFDX 网络数字化端系统功能模块设计和行为建模的完成部分。结合具体协议标准和功能需求，本项目将数字化的端系统划分为驱动模块、传输模块和通信配置加载模块三个子模块，驱动模块提供网络通信端口；传输模块主要完成数据收发，提供 AFDX 网络确定性等协议内容；通信配置加载模块建立传输模块中 AFDX 端口号与传输模块中的虚拟链路号之间的映射关系，最后依据设计思想，在仿真平台 OPNET 实现了端系统的节点模型和底层进程模型的建立。

第四章 AFDX 数字化交换机设计

AFDX 交换机是 AFDX 网络的核心设备，用于实现端系统之间的数据的转发。

数字化交换机仿真平台包含仿真框架和交换机功能模型两部分。交换机仿真框架使用基于事件驱动的框架，即将交换机设计为多个状态，状态之间通过事件进行迁移，每个事件包含仿真运行时间，这样使得数字化交换机可以仿真硬件运行时间，便于时延、抖动等性能参数的评估。

交换机功能模型实现交换机的交换和转发功能，保证交换机在确定的时延和抖动上限内将数据转发或丢弃，是数字化交换机的核心部分。

4.1 交换机功能模块设计

根据 ARINC664 协议，数字交换机实现 AFDX 交换机的交换、过滤、警管、监控和端系统功能^[33]，主要包含对象有接收模块、过滤与管制模块、调度模块、发送模块、端系统模块和监控模块。

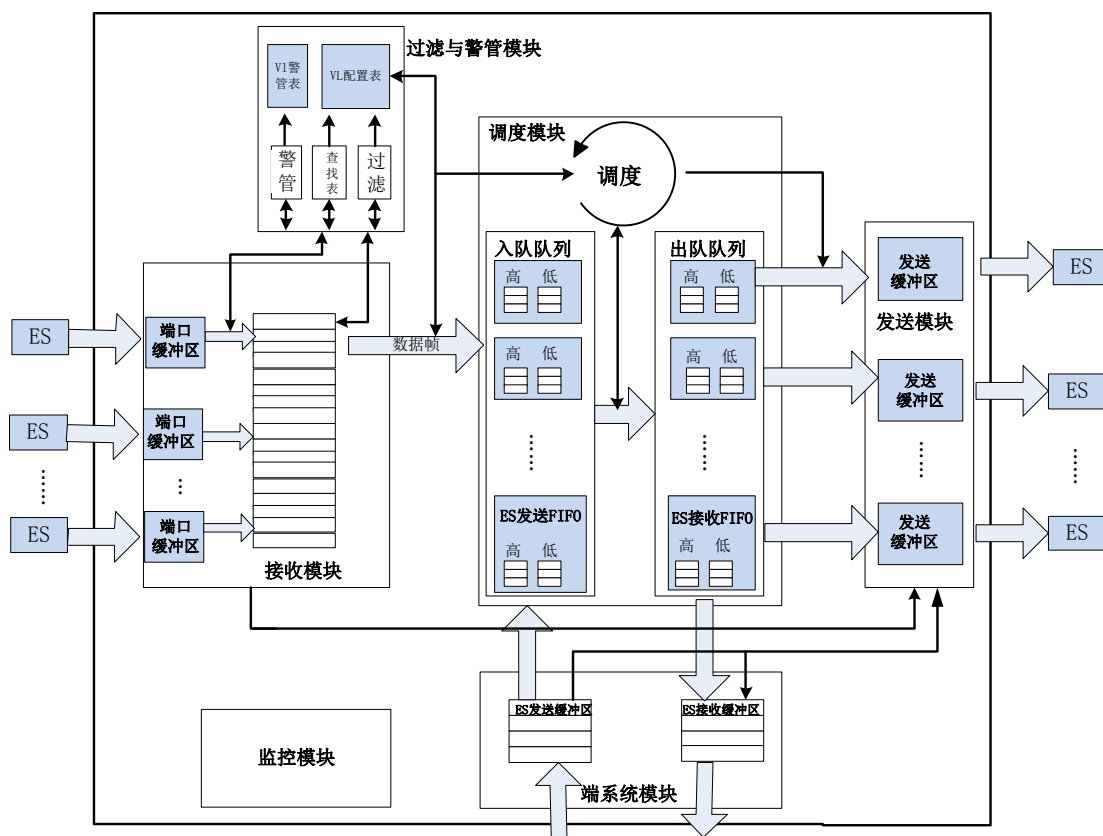


图 4.1 交换机模块划分图

交换机功能模块划分如 4.1 所示，实现交换机的交换功能，每个端口需要对应一个 2048 字节（大于 1518）的接收缓冲区，外置端系统将数据写入接收缓冲区后，

交换机的接收控制模块通过信号量获知数据帧的到达，并将该数据帧接收到交换机的相应端口的数据缓冲区。交换机过滤与管制模块通过查找并获取 VL 配置表信息，根据 VL 配置信息对数据帧进行过滤，并计算该帧是否通过警管。通过过滤以及管制后，将通知调度模块，由调度模块将符合条件的帧进行入队操作。

入队的数据帧信息包含数据帧存放位置、数据帧长度、转发端口、使用的出队队列、是否配置帧等信息。调度模块依据该信息对数据帧进行调度。

在整个操作过程中，监控模块对计数和资源占用进行实时监控和更新。

4.1.1 交换机发送模块设计

交换机的发送模块控制交换机 24 个端口的数据发送。交换机的 24 个端口各自维护一个 1518 字节发送缓冲区，调度模块根据调度算法将某一数据帧调度出去时，通知发送模块从数据缓冲区将数据帧取出，存至相应端口的发送缓冲区。发送模块支持 10Mbps 和 100Mbps 的发送速度。若数据并未被相应端系统取走，则数据在 6.72us（100Mbps 速度下响应时间）后可能会被新数据覆盖。

发送缓冲区维护表 4.1 所示标识量，标明当前交换机工作状态是否允许向外转发数据帧。

表 4.1 交换机发送控制信号

字节	名称	描述
1	Quiet	为 1 时，交换机不再发送数据； 为 0 时，交换机发送数据

4.1.2 交换机接收模块设计

表 4.2 交换机接收控制信号

字节	名称	描述
1	Passive	为 1 时，交换机不再接收交换帧数据；为 0 时，交换机接收交换帧数据
1	Quiet	为 1 时，交换机不再接收数据； 为 0 时，交换机接收数据
4	Monitor	端口监控，0-23 对应位为 1 表示 对应端口监控开启

24 个端口，每个端口有一个端口缓冲区，用于接收外部端系统发来的数据，端口缓冲区是整个交换机交换功能的输入数据源。该缓冲区支持至少 1518 字节长度的数据，结合实际应用定为 2048 字节大小。外置端系统向对应端口的缓冲区发送

数据后，交换机通过信号量获知数据存在，再通过接收缓冲模块将该数据取出，存储到接收缓冲区。

接收模块负责接收端系统发来的数据，并存储该数据帧。接收模块包含端口缓冲区和数据缓冲区，接收缓冲区只有一个储存大小，最大支持以 6.72us 每帧的速度接收数据。接收缓冲区接收到数据后，由接收模块负责将数据存储到数据缓冲区。接收模块需要有表 4.2 所示信号，用于控制交换机当前模式是否具有转发功能。

AFDX 交换机转发数据时，使用的调度机制有发送调度和接收调度两个方面，接收调度实现将存储通过过滤和警管后的数据帧信息放在各个输入缓存队列中，发送调度完成根据输入端口队列中的数据帧信息，将数据帧转发至对应的输出端口。接收调度采用端口轮询机制，将每个端口的数据帧信息以公平的调度机制转发到输入缓存队列。发送调度采用静态优先级调度机制，在端口之间迅速实现合理的分组转发，在队列根据两级优先级进行区分转发。

4.1.3 交换机过滤警管模块设计

交换机需对端口接收到的数据帧完成 CRC 校验、帧长校验、Smax、Smin、MAC 常数域等信息校验，将不符合的帧完成过滤^[34]。

警管功能计算目前的警管值，确定该帧能否以警管来达到流量管制的目的。

表 4.3 VL 配置格式

字节	名称	描述
2	VI ID	VL 号
4	OP	转发端口配置
1	QutQueue	多播队列分配
1	M_P	单多播标志
1	PRJ	优先级标志
1	CFG	配置帧指示
4	Count	常数域设置
2	Smax	配置对应 VL ID 能接收的最大帧长
2	Smin	配置对应 VL ID 能接收的最小帧长
1	Monitor	监控指示
2	MaxDelay	最大允许延迟

在接收过程中数据帧从端口缓冲区进入数据缓冲区之前，会进行一些不需要查找

VL 配置表的简单过滤，包括帧长是否小于 64 字节，大于 1518 字节，CRC 校验等方面的过滤。

若数据帧不符合过滤条件，则不会进入数据缓冲区，仅通知监控模块增加统计量。数据过滤和管制模块对进入数据缓冲区的数据帧，通过查找 VL 配置表，完成检查过滤。

VL 配置信息 24 端口每个最多支持 256 个 VL ID，但交换机支持的总 VL 数量上限为 4096，需对每个 VL ID 进行配置，共需 4096×21 字节，分配情况如表 4.3 所示。

该配置信息由交换机初始化时，经上层软件读取配置文件后进行配置，在交换机端口接收到数据帧，进行过滤和转发时使用。

数字化交换机采取基于帧的管制模式，每个交换端口应具有一个独立的警管配置空间，每个 VL 的警管配置项都要占据 3 个地址空间，每个端口至少应支持 256 个 VL 的配置。警管配置表如表 4.4 所示。

表 4.4 警管配置定义

字节	名称	描述
2	Smax	VL 帧的 Smax
4	AciMax	VL 帧的 AciMax
2	ACi	当前剩余 ACi
4	PCNT	上次警管成功的 VL 帧进入交换机的全局时间值

基于帧管制采用以下算法：

- 1.如果字节 ACi 比 Smax 大，则接收该帧，并且字节 ACi 减去 Smax；
- 2.如果字节 ACi 比 Smin 小，则丢弃该帧，ACi 不变；

VL 当前剩余 ACi 为 Taci,该 VL 的前一次数据帧进入交换机的时间为 T1，如果在 T2 时刻又接收与该 VL 匹配的数据帧，则两次接收数据间隔为 $Ti = T2 - T1$ ；

- 3.如果 $ACi = Ti + Taci > Simax$,则该帧通过警管，将 Taci 更新为 $\min(AciMax, Ti + Taci) - Smax$,将 PCNT 更新为 T2；

- 4.如果 $Ti + Taci < Simax$,则帧未通过警管，目前剩余 Taci 值不发生变化。

其中，Smax 初始值设为 BAG，AciMax 最大值为 BAG+Jitter。

4.1.4 交换机调度模块设计

接收模块接收到数据帧后，若数据帧通过过滤和管制，则过滤和管制模块通知调度模块进行调度，调度模块检查入队队列是否已满，将通过过滤和管制的数据帧进行入队操作，并在数据缓冲区将入队指针后移。若该数据缓冲区入队操作已

处理完，则轮训下一个端口。

数据帧进行入队管理后，调度模块轮询各个端口的入队队列。依照先高优先级后低优先级的原则，对入队队列中的数据帧信息依次出队到出队队列。

1) 入队队列

每个端口有两个入队队列，分别为高优先级队列以及低优先级队列。每个队列均有 10 个缓冲区，用于数据帧的缓冲处理。交换机完成数据帧的接收后需要将数据帧完成入队操作。队列中每个数据帧包含信息如表 4.5 所示。

表 4.5 入队队列格式

字节	名称	描述
4	Position	数据在缓冲区中位置
2	Length	数据帧长度
4	QutPort	数据帧转发端口
1	QQUE	多播队列分配

按照循环队列操作，入队时，首先检查相应优先级的对应对队列是否已满。若队列未满，那么直接将数据添加到入队队列末尾。若出对队列满，则该端口不再接收相应优先级的数据帧，直接将数据帧丢弃，统计相应缓存队列满丢弃帧统计量。

2) 出队队列

出队队列分为高低两个优先级，高优先级队列中数据先于低优先级进行出队。每个队列有 512 个缓冲区，但具体大小需要通过配置信息进行配置。出队队列采取环形队列实现。

表 4.6 出队队列格式

字节	名称	描述
2	Position	数据在缓冲区中位置
2	Length	数据帧长度
1	QutPort	数据帧转发端口
1	CFG	配置帧指示

出队队列区分优先级，按照先高后低的原则，轮询 24 个端口。依次按照 FIFO 原则，将数据帧出队。首先检查待出队数据帧的时延是否超过 MaxDelay,若超时则丢弃，并记录到监控数据中。若未超时，则将接收缓冲区的数据帧以每帧 6.72us 速度 ($84B / (100Mbps/8)$) 转发到指定的端口发送缓冲区并将入队队列的相应数据统计量减除，将该数据缓冲区的标志置为可用。出队队列包含元素如表 4.6 所示。

4.1.5 交换机端系统模块设计

交换机内置端系统用于交换机与外部网络通信,实现交换机信息的维护。交换机端系统功能主要分为 ES 接收模块和 ES 发送模块两部分。

1) ES 配置帧接收模块

ES 配置帧接收模块维护一个 $64*5$ 字节的 ES 接收 FIFO (如表 4.6 所示) 和一个 $64*1518$ 字节 ES 接收缓冲。ES 接收 FIFO 用于 ES 的接收,ES 接收缓冲用于存储外部向 ES 发送的数据帧,与交换机 ES 协议栈软件进行数据交互。因 ES 接收 FIFO 与其他出队队列结构相同,因为也放入出队队列进行管理。

2) ES 配置帧发送模块

ES 配置帧发送模块维护一个 $64*1518$ 字节的 ES 发送缓冲,用于和内置 ES 协议栈软件交互,向外发送 ES 配置帧。此外,ES 配置帧维护一个 $64*7$ 字节的 ES 发送 FIFO,此 FIFO 采用表 5 格式,但是出队时 MaxDelay 域无效,因此 ES 发送 FIFO 与其他入队队列结构相同,因此也放入入队队列进行管理。

4.1.6 交换机监控模块设计

交换机监控模块监控接收模块、过滤和管制模块、调度模块、端系统模块的资源分配和统计量。监控模块包含多个 public 类型成员变量,实时监控其他模块的资源占用,以及交换机上电或监控复位后的统计量信息。

监控模块通过实时监控其他模块资源占用情况,分析交换机当前运行状态和交换机整体性能。监控模块按端口监控资源占用情况,主要监控内容为:

- 接收模块的数据缓冲区大小;
- 接收模块当前未入队的数据;
- 出队队列中当前高优先级资源占用;
- 出队队列中当前低优先级资源占用;
- ES 配置帧接收缓冲区资源占用;
- ES 配置帧发送缓冲区资源占用。

4.2 交换机数据缓冲区设计

24 个端口共同使用同一个数据缓冲区。每个缓冲区可存储多个 1518 字节的数据。另外还包括数据帧接受时间,VL ID 位置等信息。具体见表 4.7 所示。数据缓冲区考虑采用链表方式实现。每个缓冲区维护三个指针。首指针、尾指针和入队指针。首指针用于表示当前缓冲区存储的第一个数据,尾指针用于存储当前数据缓冲区接收到的最新数据帧,入队指针指向当前缓冲区中需要进行入队操作的数据帧。首指针与入队指针之间的数据帧已经入队,等待调度出队进行发送的数据,入队指针和尾指针之间的数据表示收到的等待过滤和管制后进行入队操作的数据

帧。

表 4.7 单个数据缓冲区结构

字节	名称	描述
2	VLPot	VL ID 在 VL 配置表中位置
4	RecvTime	数据帧接收时间
4	PK	数据包结构
4	Length	帧长

当交换机接收缓冲区接收到数据时，接收模块通知过滤和管制模块进行第一次过滤。第一次过滤针对简单的过滤条件，即不需要进行 VL 配置表查找就能进行的过滤操作，包括帧长是否超过 1518 字节，是否小于 64 字节，CRC 校验是否正确。对于通过第一次过滤的数据帧，接收模块将开辟空间存储该帧，并将该数据帧链接到接收模块的尾指针，然后接收模块通知过滤和管制模块将数据帧进行过滤和管制。当入队指针和尾指针不同时，对于通过过滤和管制的数据帧，接收模块会通知调度模块将其入队。无论数据帧是否通过过滤和管制，过滤和管制模块都会通知监控模块统计相关数据。数据帧开始入队操作后，调度模块通知监控模块更新资源信息。

4.3 交换机运行参数统计量

交换机维护多个统计量用于交换机状态管理和性能评估，交换机维护的统计量分为端口统计量和 VL 统计量。端口统计量以 25 个端口（24 个交换端口和 1 个 ES 配置帧端口）为单位统计相关信息，VL 统计量以 VL 为单位统计相关信息。不论是按端口监控还是按 VL 监控，都要在监控使能的情况下才统计信息，若监控关闭，则不做任何统计。统计量统计交换机如下参数：

- 接收总帧数；
- 接收正确帧数；
- CRC 错误帧数；
- 帧长超过 1518 字节帧数；
- 帧长小于 64 字节帧数；
- 帧长超过最大帧长帧数；
- 帧长小于最小帧长帧数；
- 警管异常帧数；
- 数据帧因超过最大时延丢弃帧数；
- 发送总帧数；

- ## 4.4 交换机数字化模型设计

The diagram illustrates the system architecture of the network data frame scheduling system. It features the following components and their interactions:

- External Systems (ES):** Represented by small blue boxes at the far left and far right.
- Receiving Module (接收模块):** A large blue box that receives data frames from the left ES.
- Filtering and Control Module (过滤与管制):** A blue box at the top that receives control signals from the Receiving Module and sends data frames to the Scheduling Module.
- Scheduling Module (调度):** A large blue box in the center containing a circular arrow, representing the core scheduling logic. It receives data frames from the Receiving Module and sends them to the Sending Module.
- Sending Module (发送模块):** A large blue box that sends data frames to the right ES.
- Monitoring Module (监控模块):** A blue box at the bottom left that receives statistical data from the Receiving Module and sends monitoring signals to the Scheduling Module and the End System.
- End System (端系统):** A blue box at the bottom right that receives monitoring signals from the Monitoring Module and sends/receives data frames from the Scheduling Module.

Data Flow and Control Signals:

- Data Frames (数据帧):** Indicated by large white arrows with black outlines. The flow is: ES → Receiving Module → Scheduling Module → Sending Module → ES. Additionally, the Filtering and Control Module sends data frames to the Scheduling Module, and the End System sends/receives data frames from the Scheduling Module.
- Control and Monitoring Signals:** Indicated by solid black arrows.
 - The Receiving Module sends a "过滤与管制" (Filtering and Control) signal to the Filtering and Control Module.
 - The Receiving Module sends "统计" (Statistics) data to the Monitoring Module.
 - The Monitoring Module sends "监控" (Monitoring) signals to the Scheduling Module and the End System.
 - The Filtering and Control Module sends a "监控" (Monitoring) signal to the Scheduling Module.
 - The Scheduling Module sends a "统计" (Statistics) signal to the Monitoring Module.

如图 4.2 所示，交换机将数据帧接收后首先进行存储，经过过滤和管制，转发到相应端口或内置 ES，完成交换机的过滤和存储转发功能。在交换机内部的数据帧，只经过了一次存储，过程中处理的信息均为数据帧信息，而数据帧内容一直在交换机的存储区存储，直到经过调度转发出交换机端口，这样减少了数据多次搬移的时间，节约了时间和空间资源。

- 接收模块：从 ES 接收数据帧，存储到本地存储区；
- 过滤与管制：将存储到本地的数据帧进行过滤和管制，丢弃没有通过过滤或管制的数据帧；
- 调度模块：对完成过滤和管制的数据帧进行调度，实现数据帧转发至相应的端口或内置 ES；

- 发送模块：对完成调度的数据帧经由发送缓冲区发送到相应的 ES 设备；
- 端系统：接收和发送交换机内置 ES 的数据帧；
- 监控模块：监控数字化交换机的资源和统计量，为交换机仿真数据的获取提供接口和手段。

4.4.1 数字化交换机节点模型

根据第 2 章和第 4 章对 AFDX 网络交换机关键技术需求分析，本项目在 OPNET 平台上设计了数字化交换机，设计图如图 4.3，图 4.4 为交换机完整的阶层性 OPNET 模型，分别为节点层、根进程层、子进程层，实际节点模型如图 4.5 所示。

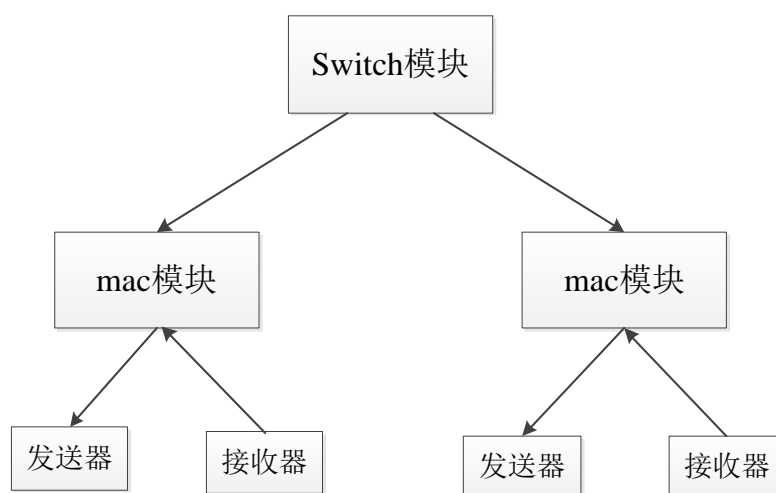


图 4.3 数字化交换机功能设计图

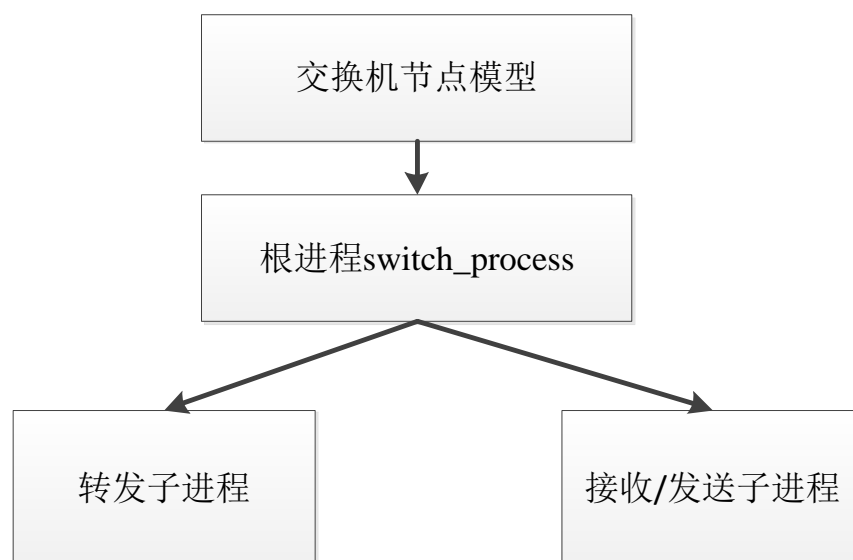


图 4.4 交换机完整的阶层性 OPNET 模型

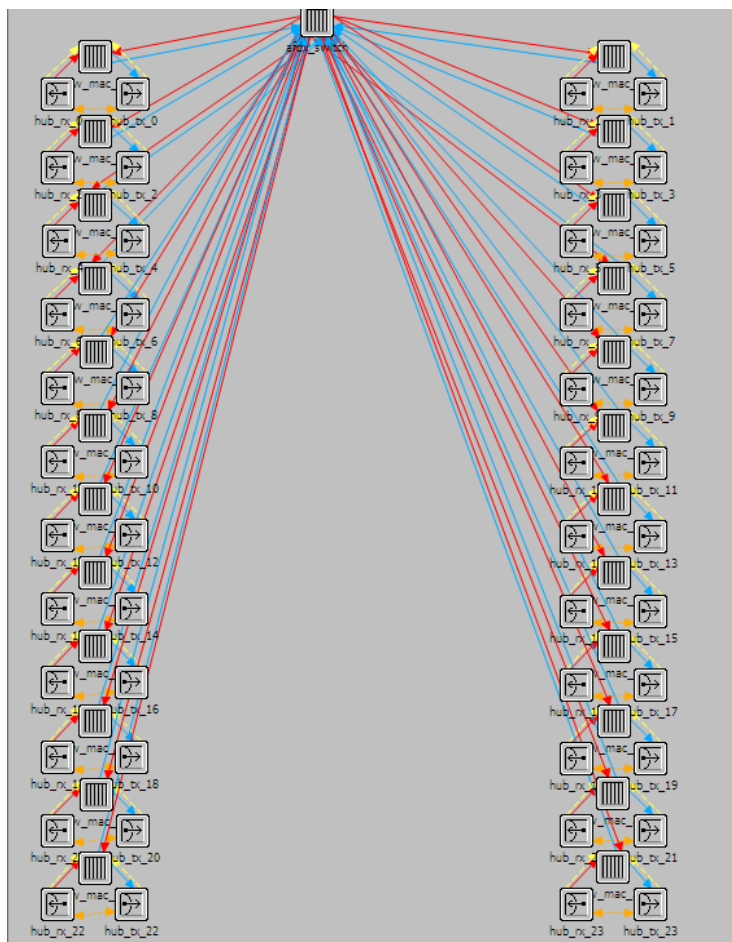


图 4.5 数字化交换机节点模型

在交换机节点中，有两大模块：mac 模块和 Switch 模块。在双层交换机模型中，mac 模块相当于物理层，Switch 模块相当于链路层。交换机拥有 24 个 mac，每个下面各有一个收发器，其中 hub_rx 为交换机接收终端数据接口；hub_tx 为交换机发送数据到终端接口；mac 为接口收发数据处理模块；afdx_Switch 为交换机核心模块，在此模块中进行交换机的数据处理。

4.4.2 数字化交换机进程模型

下面分别介绍交换机 mac 模块和 Switch 模块的进程模型。

1) mac 模块：

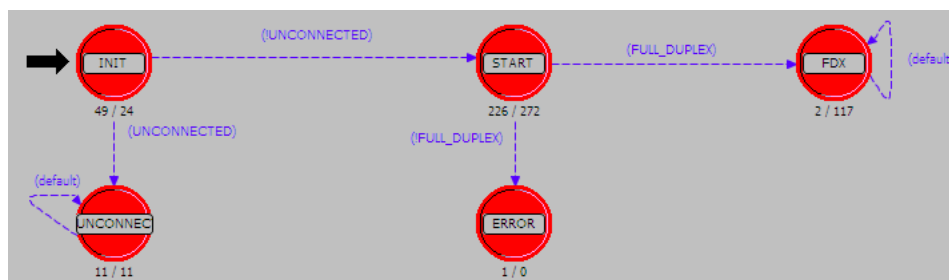


图 4.6 mac 模块进程模型

交换机 MAC 模块的进程模型各状态与端系统 MAC 模块状态类似，这里不再详细说明。

2) Switch 模块

交换机的根进程为 Switch_process，总共有 5 个状态分别为：register 状态、wait 状态、init 状态、spawn 状态和 idle 状态。状态关系图如图 4.7。

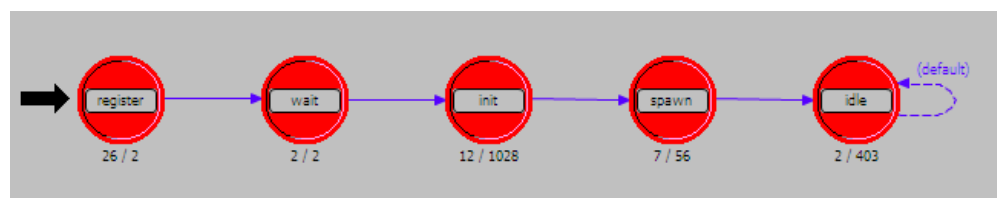


图 4.7 Switch 模块进程模型

根进程主要状态意义和功能：

- register 状态

主要完成进程注册，即得到该模块的 ID 和进程模型的属性，并设置一个预定的自我中断转入到下一个状态。

- init 状态

主要用于根进程的初始化，和一些其它的交换机工作的相关参数，为分组的接收、处理、转发做准备。如创建交换机端口映射表（port map table），来决定哪些端口已使用，哪些端口还没被使用。端口映射表的内容有：端口数目、映射端口号（mapped port number）、MAC 类型信息、标记（用于指明该端口是否已使用）。其中 MAC 类型信息，用于指明和每个端口连接的 MAC 的类型。

- spawn 状态

设置交换机的 ID，并在交换机接收分组和进入到 idle 状态之前创建根进程的子进程。

- idle 状态

主要用于处理各种中断，即根据接收到的中断的不同类型做出不同的响应。处理的中断类型如下：

- ① 流中断（STREAM interrupt）表明某个端口到达一个分组（packet），判断该分组是否是可接收的。如果可接收，则接收该分组并把它插入到网桥协议数据单元（Bridge Protocol Data Unit, BPDU）子队列中，或者分组（packet）子队列中；如果不可接收则销毁该数据。
- ② 故障/恢复中断（FAIL/RECOVER interrupt）表明根某个端口连接的链路的状态。
- ③ 仿真结束中断（ENDSIM interrupt）。

4.5 本章小结

本章完成了 AFDX 网络核心设备交换机的功能模型设计和模型建立。交换机功能模型实现交换机的交换和转发功能，保证交换机在确定的时延和抖动上限内将数据转发或丢弃，依据协议标准，对交换机发送、接收、过滤警管、调度、端系统和监控六个功能子模块进行详细设计，同时对 24 端口共用的数据缓冲区结构也进行了约束设计，最后在 OPNET 上实现了数字化交换机的节点模型和进程模型的设计。

第五章 仿真及结果分析

5.1 仿真环境说明

AFDX 数字化平台项目采用具有高效离散事件仿真引擎的 OPNET Modeler 工具构建仿真网络拓扑,实现网络协议。运行仿真过程中,ODB 调试界面参数设定如图 5.1 所示,需要注意的是仿真核心(simulation kernel)存在 Development 和 Optimized 两种^[35],优化的仿真核心(Optimized)的缺点在于虽然提高了仿真速度,但是以不产生 ODB 信息为代价,并不利于开发初期的调试,因此在这里必须将仿真核心设置为 Development。

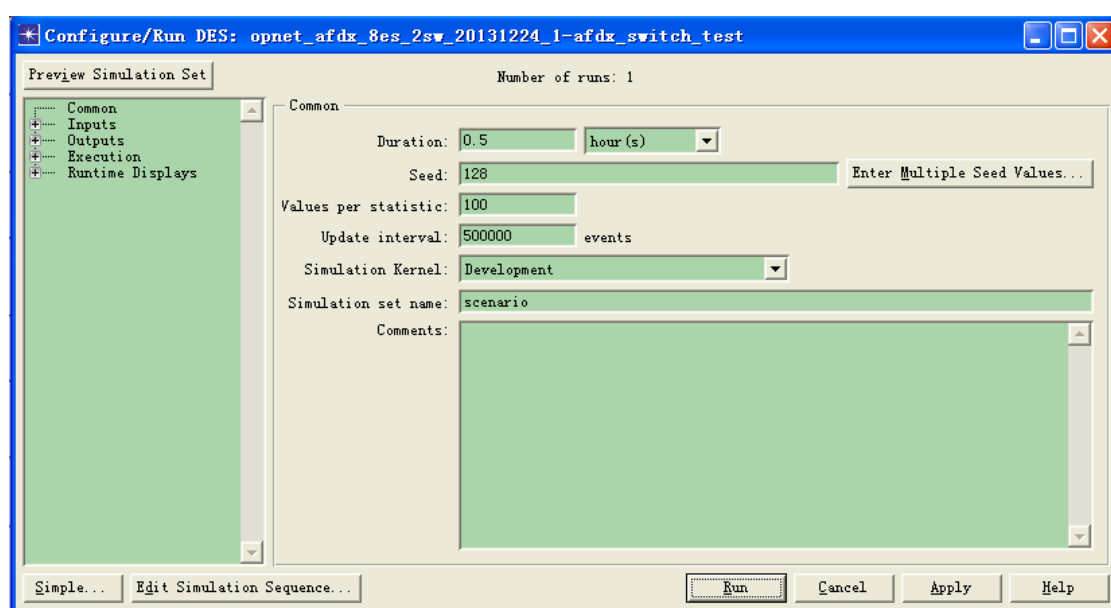


图 5.1 运行仿真参数配置

5.2 仿真结果及分析

本项目是基于网络仿真工具 OPNET,在深入理解 AFDX 网络协议的相关关键技术,建立 AFDX 的数字化平台。平台的核心包含数字化端系统模型和数字化交换机模型两个部分。仿真的目的是测试验证 AFDX 数字化平台的功能实现,仿真测试项目从数字化节点模型功能和数字化网络模型协议技术性能两方面开始,构建测试场景对两个设备的数字模型进行功能、性能上的充分测试。

5.2.1 功能仿真

1) 仿真参数统计

在工程界面右键选择 Choose Individual DES Statistics,出现图 5.2 界面,在 Global Statistics 下选择网络一端口的 CRC error ,Invalid VL ID Frame Count 来统计参数。

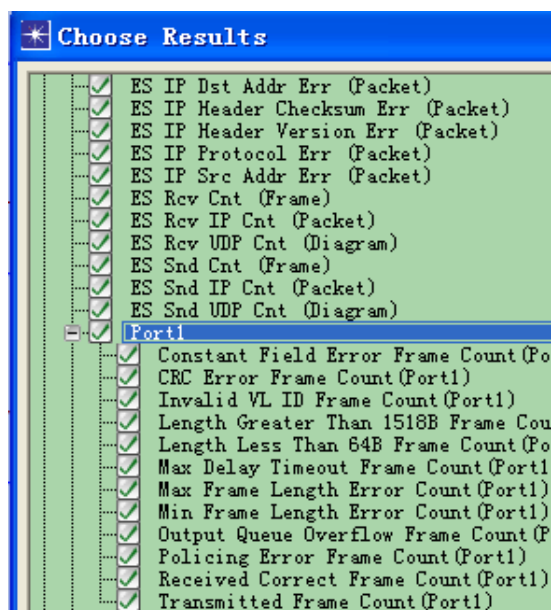


图 5.2 端系仿真参数统计操作图例

2) 仿真结果

系统模型数据收发测试结果如图 5.3 所示，其中接收数据和发送数据数目和变化趋势一致度很高。需要说明的是由于 AFDX 网络对每条链路都进行了带宽分配，链路超过流量范围底层就会丢弃超出的数据包，图 5.4 所示为端系统数据收发图，接收数据随着发送数据数目增加而趋于饱和，但是网络系统的数据收发如图 5.3 能够保持一致，协议对链路流量分配的标准规范也体现了 AFDX 网络不同于以太网的确定性。

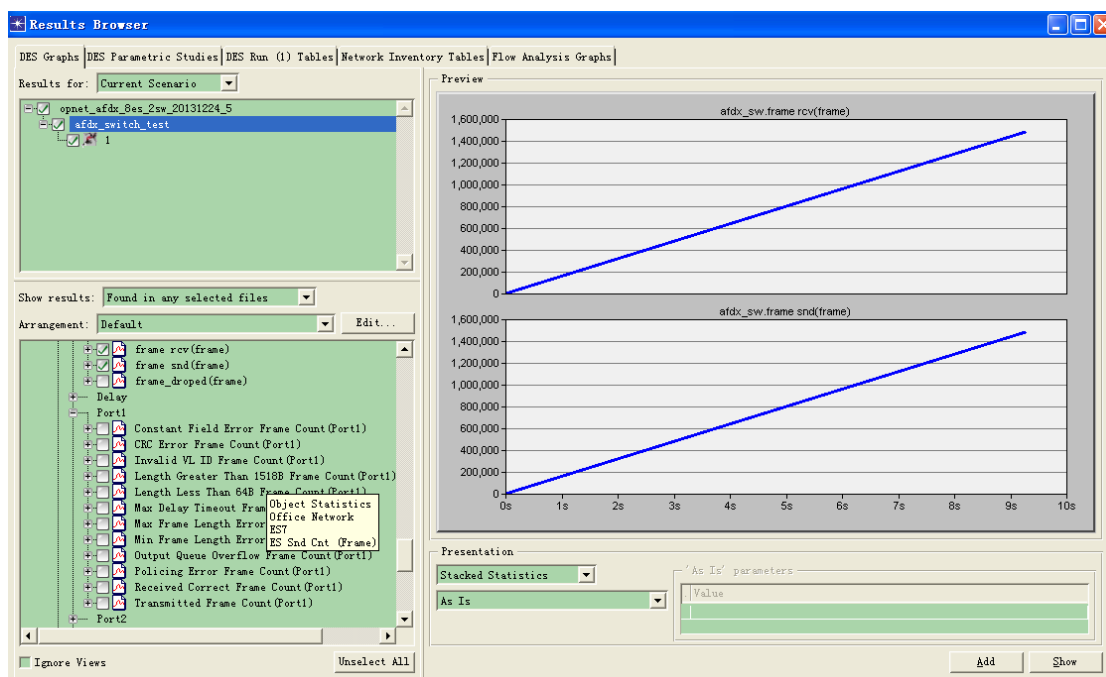


图 5.3 网络发送接收数据统计图

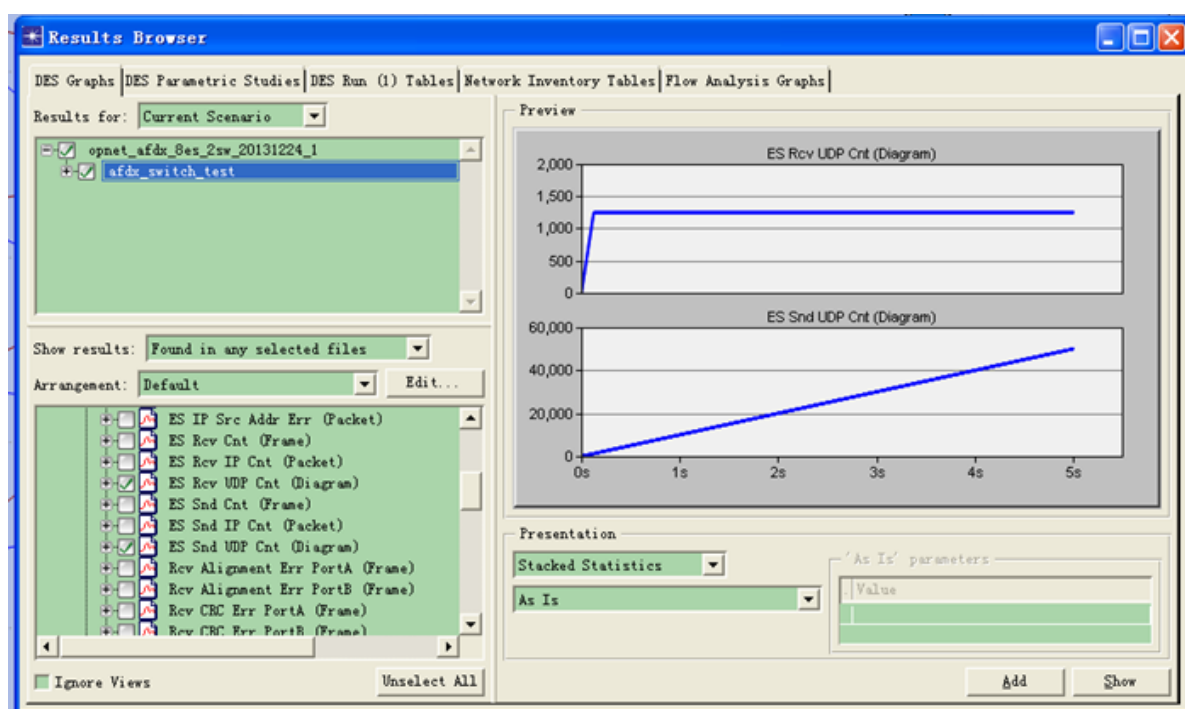


图 5.4 端系统数据收发统计图

图 5.5 详细对比了不同链路 (ES2, ES4) 发送数据包的情况, 如图所示, 斜率高的曲线为 ES2 发送数据图, 斜率小的曲线为 ES4 的发送数据图, ES2 发送间隔为 128ms, 经过交换机过滤 (BAG=256) 后, ES4 接收到的数据间隔为 256ms, 发送数据的速率是 ES2 收到速率 (曲线斜率) 的一半。

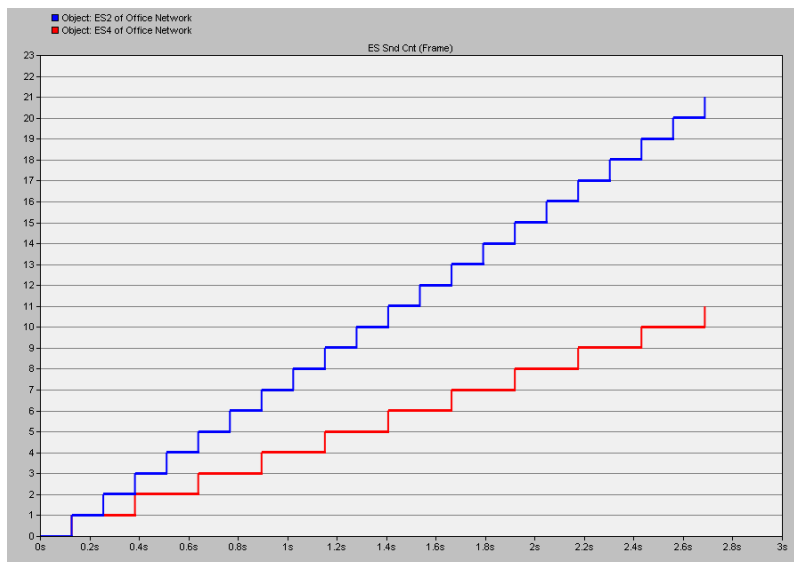


图 5.5 端系统发送数据统计图

ES2 发送数据曲线趋近于横坐标的部分为端系统应用发送的数据, 未经 BAG 调度, 线条长度体现消息的长度; ES4 发送曲线趋近于横坐标的部分为端系统 MAC 发送的数据包, 经过 BAG 规整后的数据流。为了进一步体现 ES 上消息经过 BAG

调度后的时间表现，将消息长度限制在 200~1471，使得应用消息无需分片。

5.2.2 性能仿真

1) 仿真参数统计

性能仿真侧重于通过错误注入验证平台功能的完善性。

在工程界面右键选择 **Choose Individual DES Statistics**，出现下图界面，在 **Global Statistics** 下选择网络收到帧长度小于 64 的数目，长度大于 1518 的数目，VL 错误等统计数目。

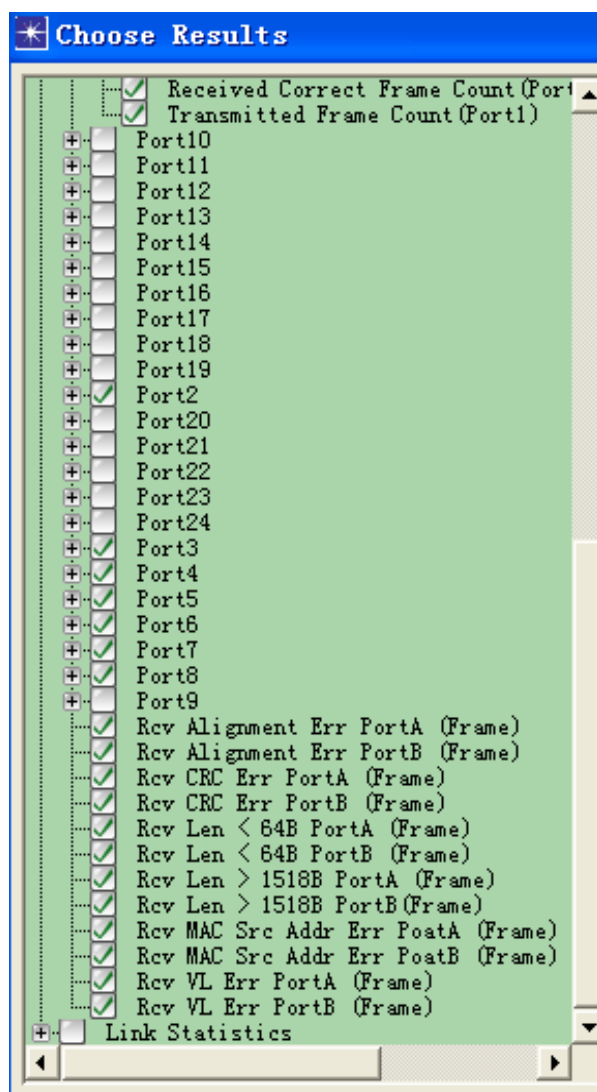


图 5.6 交换机仿真参数统计操作图例

2) 仿真结果

a) 交换机过滤常数域错误测试

表 5.1 交换机过滤常数域错误测试说明表

测试项	交换机过滤常数域错误测试
错误注入	发送数据帧中有 1/3 数据帧常数域字段错误
预期结果	端口转发数据时，1/3 的数据帧常数域字段校验未通过而被过滤，端口转发值为相应端口接收正确包数量，常数域字段丢弃数据包计数为端口接收正确数据总量的 1/2
测试结果	与预期相符，每个端口过滤掉的常数域错误帧和接收到得正确帧计数比例为 1: 2，见图 5.7 所示

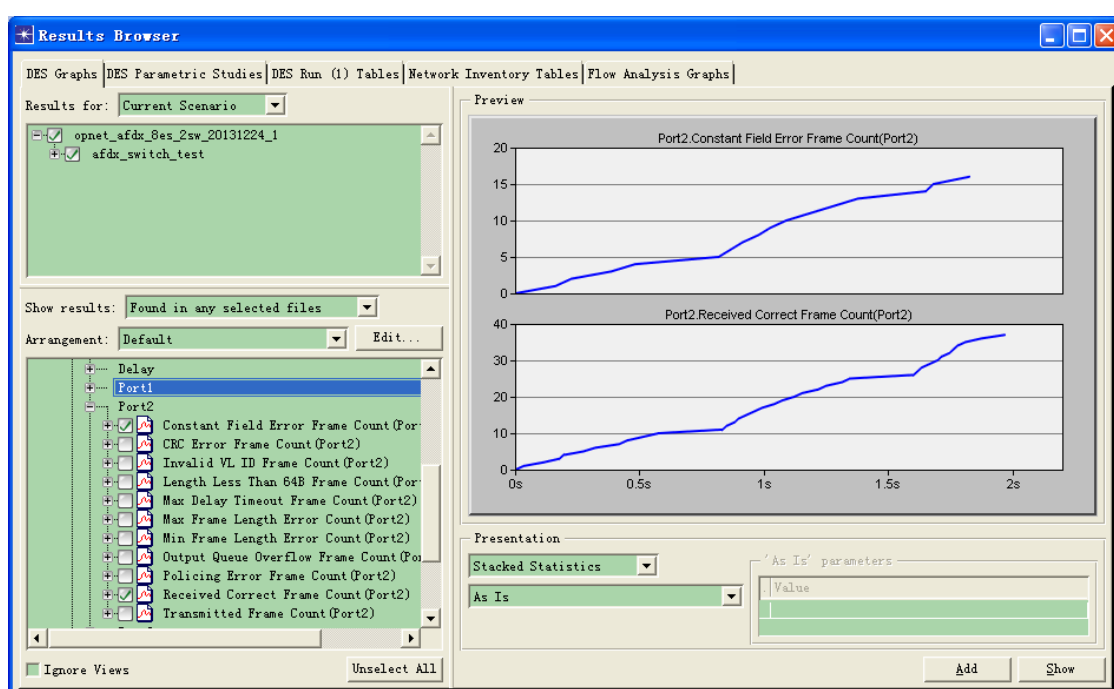


图 5.7 常数域过滤结果图

b) 交换机过滤 VL ID 错误

表 5.2 交换机过滤 VL ID 错误测试说明表

测试项	交换机过滤 VL ID 错误
错误注入	发送数据帧中有 1/3 数据帧 VL ID 错误
预期结果	端口转发数据时，1/3 的数据帧 VL ID 错误未通过而被过滤，端口转发值为相应端口正确接收值，VL ID 错误丢弃数据包计数为端口接收数据总量的 1/3
测试结果	与预期相符，每个端口过滤掉的 VL ID 错误帧和接收到得正确帧计数比例为 1: 2，端口接收正确帧也都已转发到相应端口，见图 5.8 所示

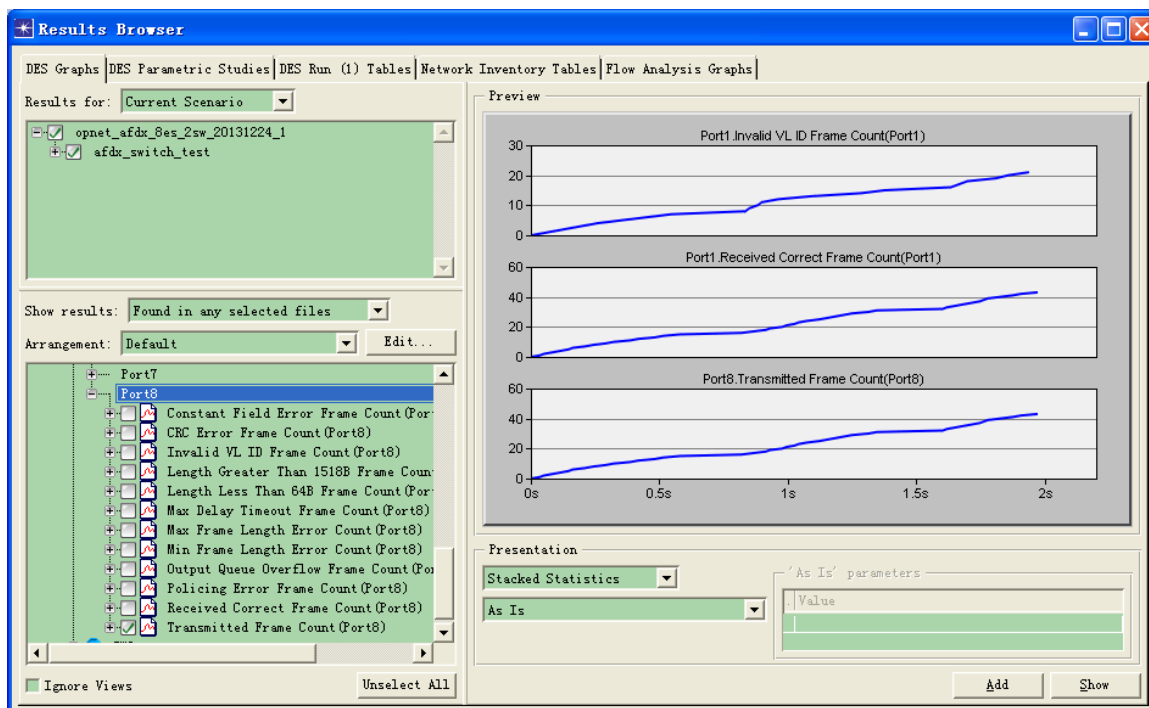


图 5.8 VL ID 错误过滤包测试结果

c) 交换机过滤帧长小于 64 字节错误

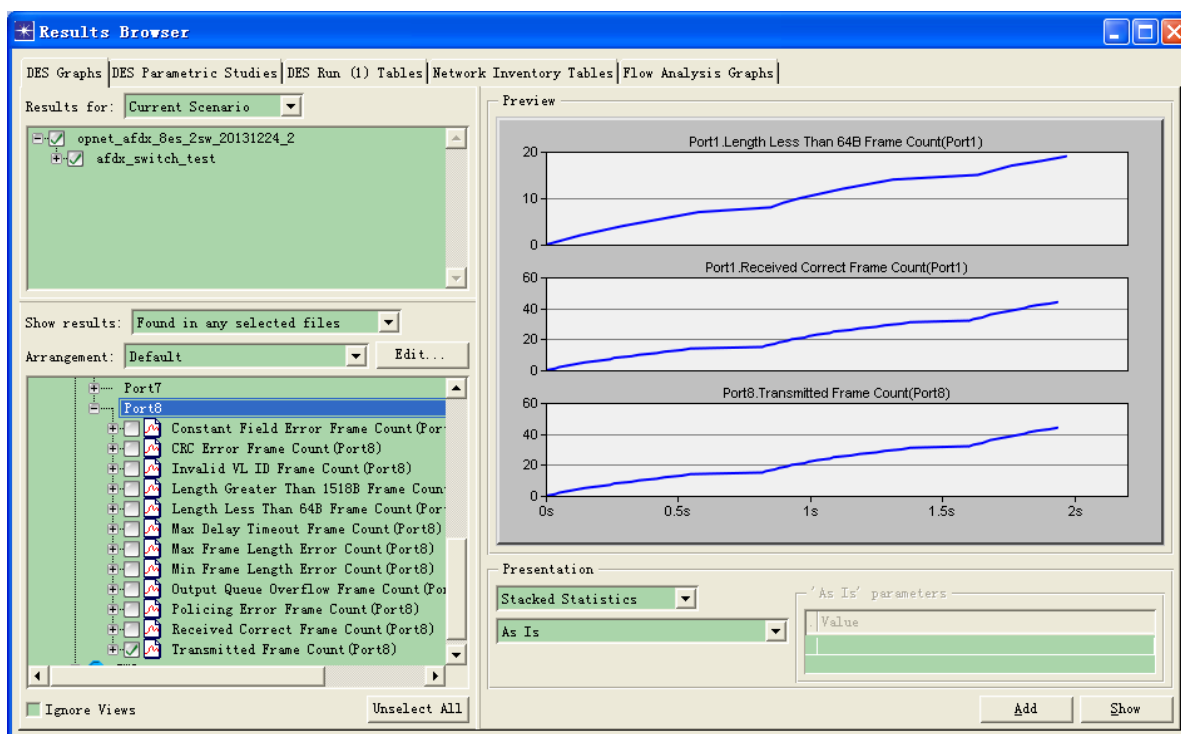


图 5.9 帧长小于 64 字节错误过滤帧测试结果图

表 5.3 交换机过滤帧长小于 64 字节错误测试说明表

测试项	交换机过滤帧长小于 64 字节错误
预期结果	端口转发数据时, 1/3 的数据帧帧长小于 64 字节未通过而被过滤, 端口转发值为相应端口接收值的 2/3, 帧长小于 64 字节丢弃数据包计数为端口接收数据总量的 1/3
错误注入	发送数据帧中有 1/3 数据帧帧长小于 64 字节错误
测试结果	与预期结果一致, 过滤掉数据包约为接收正确数据包的 1/2, 端口接口到数据包与发送数据包一致

d) 交换机过滤帧长大于 1518 字节

表 5.4 帧长大于 1518 字节错误过滤帧测试结果图

测试项	交换机过滤帧长大于 1518 字节错误
预期结果	端口转发数据时, 1/3 的数据帧帧长大于 1518 字节未通过而被过滤, 端口转发值为相应端口接收值的 2/3, 帧长大于 1518 字节丢弃数据包计数为端口接收数据总量的 1/3
错误注入	发送数据帧中有 1/3 数据帧帧长大于 1518 字节错误
测试结果	与预期结果一致, 过滤掉数据包约为接收正确数据包的 1/2, 端口接口到数据包与发送数据包一致

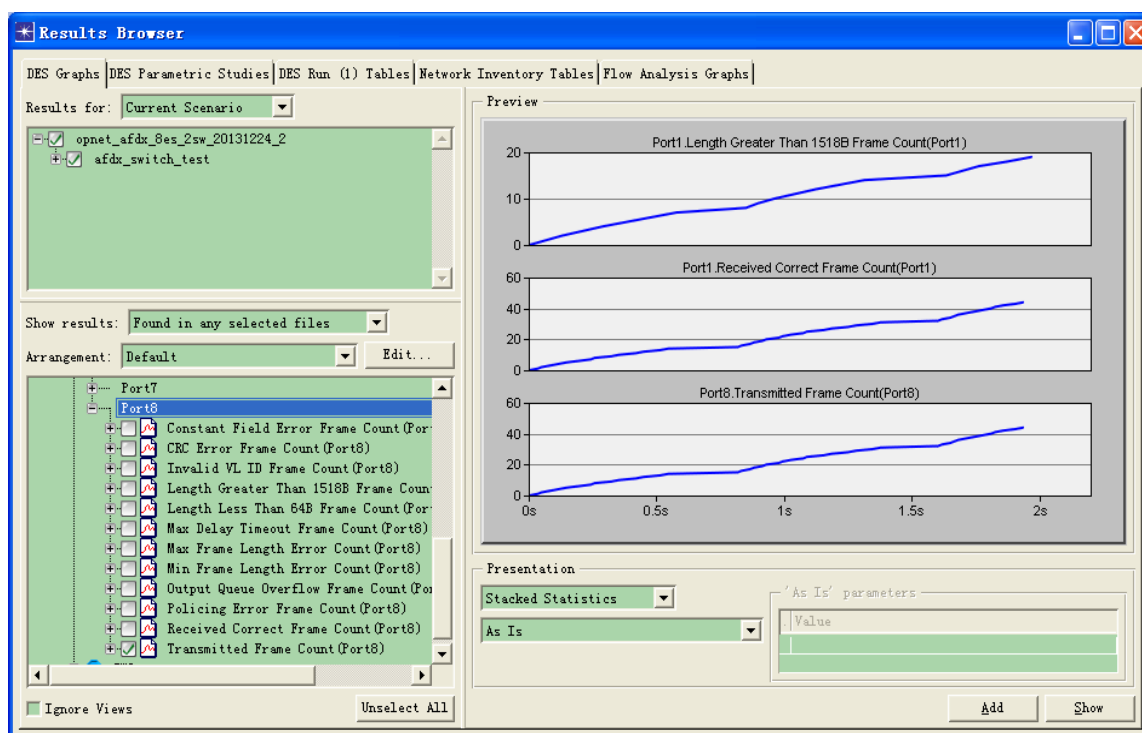


图 5.10 帧长超过 1518 错误过滤帧测试结果

e) 超出最大延时丢弃帧

表 5.5 交换机超出最大延时丢弃帧测试结果图

测试项	交换机超出最大延时丢弃帧
预期结果	端口转发数据时,有一部分低优先级数据帧因超出最大延时而被丢弃
错误注入	将发送数据帧的最大延时值设为 100
测试结果	与预期结果一致,

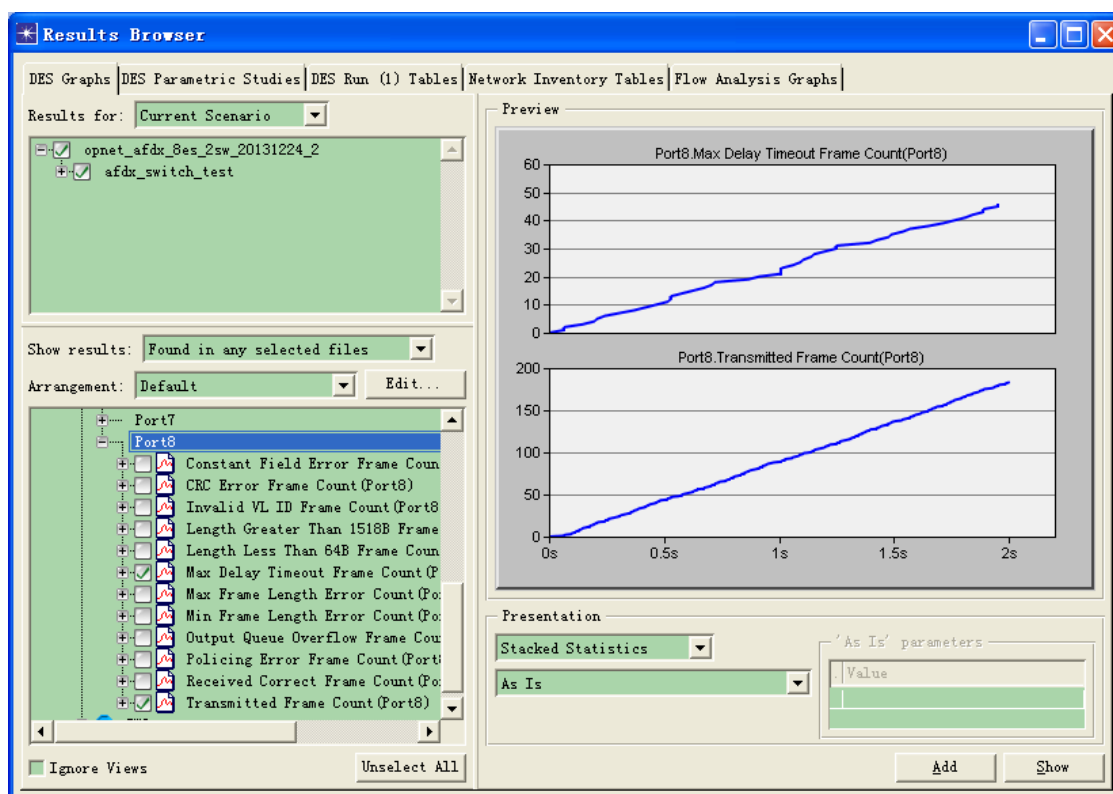


图 5.11 超出最大延时错误过滤帧测试结果

5.2.3 延迟统计

在工程界面右键选择 Choose Individual DES Statistics, 出现下图界面, 在 Global Statistics 下选择实时网络的 delay 和节点模型的 delay 来统计延迟, 如图 5.12 所示。

端系统应用数据流均设置为 2 个周期为 1ms 的采样消息, 消息长度在 200Byte~300Byte 之间服从均匀分布; 8 个事件型消息发送间隔在 1.01~1.1ms 之间服从均匀分布, 与周期型消息类似, 消息长度在 200Byte~300Byte 之间服从均匀分布。ES2 发送间隔为 128 ms, 经过交换机过滤 (BAG=256) 后, ES4 接收到的数据间隔为 256ms。ES2 发送数据的速率是 ES4 收到速率 (曲线斜率) 的 2 倍。

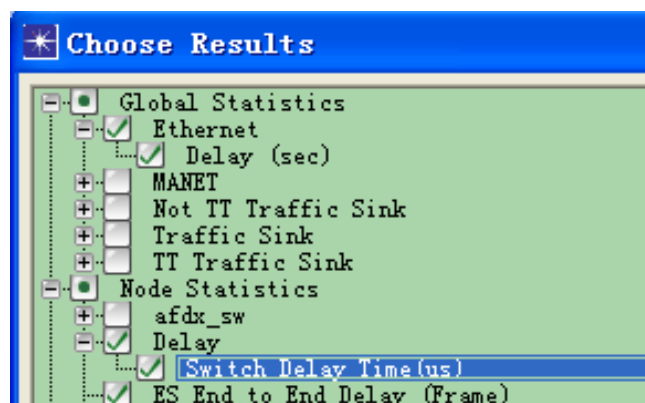


图 5.12 延迟统计操作图例

端到端延时可分解为发送延时、传输延时、交换延时和接收延时。交换延时=端到端延时-发送延时-传输延时-接收延时^[36]。其中，发送延时和接收延时为有界延时，而传输延时与传输距离和传输速率有关^[37]，在传输长度一定时也为定值。因此，交换延时成为影响端到端延时的重要指标。

表 5.6 场景配置下的端到端时延统计

	ES1	ES 2	ES 3	ES 4	ES5	ES 6	ES 7	ES 8
平均端到端时延 单位: μs	50	51	51	51	50	51	51	51
最大端到端时延 单位: μs	59	59	59	59	59	59	59	59

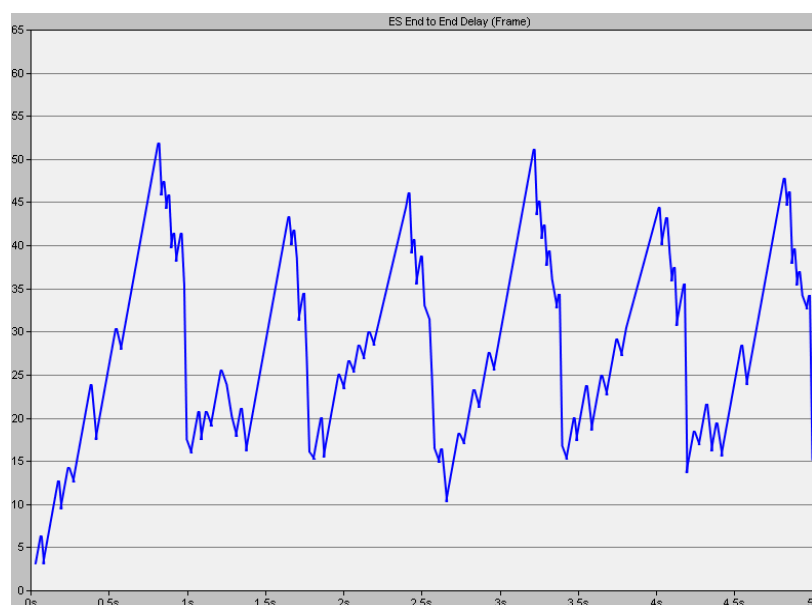


图 5.13 端系统端到端延时统计结果图

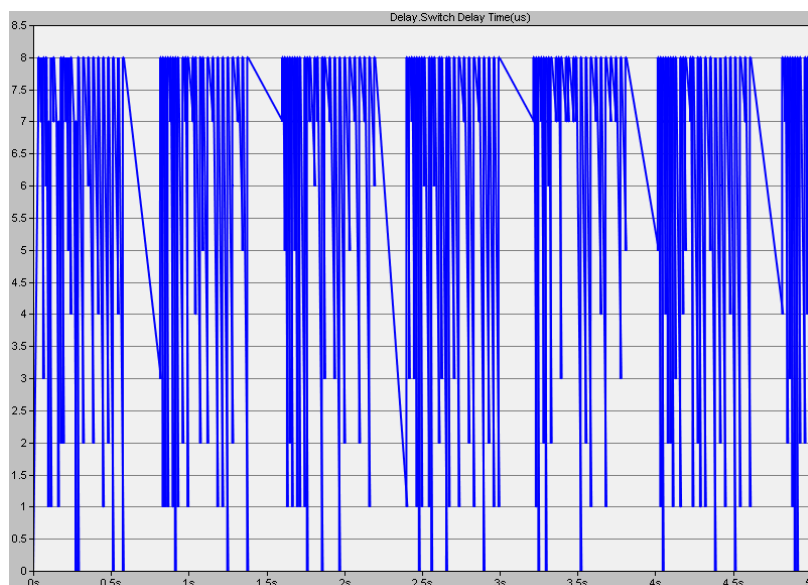


图 5.14 交换机 A 的交换时延统计结果图

数据包在网络传输过程中存在延时的问题，如图 5.13 为端系统端到端时延，图 5.14 所示为交换机 A 的交换时延，数据帧在经过交换机到达对应端系统是存在时间延迟情况，如图所示端系统端到端延时与交换机 A 的交换时延的曲线呈现正向变化趋势，符合预期结果，满足协议标准。

5.3 本章小结

本章是 AFDX 数字化平台项目的仿真验证工作，综合 OPNET 仿真环境，对建立的 AFDX 网络模型，端系统和交换机的节点和进程模型进行系统仿真，对系统功能和性能进行仿真测试，结果表明，AFDX 数字化平台能够满足设计要求，符合协议标准，同时具有较好的完善性。

第六章 总结与展望

本论文在网络仿真平台 OPNET 上实现航空电子全双工以太网网络协议功能的分析设计和仿真研究，主要成果如下：

1) 深入研究理解 ARINC664 第 7 部分关于端系统以及交换机相应规范的基础上，对数字化端系统和交换机的功能需求完成了详细分析，包括采用冗余管理 (RM)，完整性检测和数据 CRC 校验实现 AFDX 网络的可靠性，采用 VL 的带宽分配和流量控制确保了 AFDX 网络数据传输的确定性。

2) 在数字化端系统和交换机功能设计中通过划分模块的设计思想，将整个设计划分为多个子功能模块，完成对端系统功能子模块：驱动模块、传输模块、通信配置模块和交换机功能子模块：发送模块、接收模块，过滤管制模块、监控模块的设计与仿真研究。

3) 基于 OPNET 的层次建模特点，设计实现了 AFDX 数字化平台模型，包括 AFDX 的网络模型，数字化端系统节点模型、数字化交换机节点模型和各子功能模块进程模型。同时将该数字化平台用的网络构架和通讯数据参数应用于网络功能模块的仿真及验证过程。

4) 完成了 AFDX 网络的功能仿真与验证工作，包括端系统以及交换机的功能验证和网络系统的确定性验证。

国外关于 AFDX 的研究已趋于成熟化，并且已经实现了产品的市场化，但国内关于 AFDX 网络的研究仍处于理论研究的起步阶段，可研究学习材料有限，加之研究时间和经历有限，在论文的课题研究中只是初步完成了系统平台的搭建和基本功能的实现，以后还有大量工作要深入进行，包括交换机警管功能，多播转发功能等协议的细节方面还需要进一步细化研究，在今后的工作中还需要继续学习。

参考文献

- [1] ARINC 664.Aircraft Data Network Part3:Internet-Based Protocols and Services[S].2004.
- [2] 支超有, 李振水, 李育.大飞机先进机载数据总线AFDX[J]. 中国航空学会2007年学会.
- [3] 支超有, 唐长红. 机载数据总线技术及其应用(航空科学技术丛书)[M]. 2009,210-212.
- [4] Ian Moir, Allan Seabridge. 民用航空电子系统[M]. 范秋丽等译. 北京: 航空工业出版社, 2009.2~300.
- [5] Brajou F, Ricco P.The Airbus A380-an AFDX-based flight test computer concept[C].Auto Test Conference IEEE 2004.460~465.
- [6] ARINC664. Aircraft Data Network Part7:Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network[S]. 2005.
- [7] 许燕婷. AFDX端系统协议栈虚拟链路层分析及仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.5~18.
- [8] 刘芸, 王红春, 王兵, AFDX 端系统协议软件设计与实现[J]. 电光与控制,2012,19(11):71.
- [9] 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[J]. 测控技术,2008,12.
- [10] Li Qiao, Ge Peng, Xiong Huagang..Effective bandwidth over AVDX[C] //25th IEEE Digital Avionics Systems Confel'ence, 2006.
- [11] 王绮卉, AFDX 核心交换技术的研究与实现[D]. 西安石油大学,2010.
- [12] 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).
- [13] 熊华刚, 李峭, 黄永葵.航空电子全双工交换式以太网标准研究[J].航空标准化与质量, 2008, (223): 25~28.
- [14] Madhukar Anand,Steve Vestal,Samar Dajani-Brown, Insup Lee, Formal Modeling and Analysis of Analysis of the AFDX Frame Management Design.
- [15] 李明江.SNMP 简单网络管理协议[M].北京:电子工业出版社,2007,18-33.
- [16] 楼小强, 田泽. AFDX网络终端系统的确定性分析与实现[J]. 计算机技术与发展, 2010,20(8):57.
- [17] 何晔. AFDX航空通信网络协议研究及FPGA实现[D]. 哈尔滨, 哈尔滨工业大学, 2011.
- [18] 李哲, 田泽, 张荣华. AFDX网络中SkewMax的研究[J]. 计算机技术与发展, 2010,20(6): 249
- [19] Nilsson N J. Principles of artificial intelligence[M].New York:Tioga Publishing Co,1980.
- [20] Abbott E, Powell D. Land-vehicle navigation using GPS[J]. Proceedings of the IEEE, 1999,87(1):145-162.
- [21] 张明. AFDX交换机内嵌ES的设计与验证[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [22] 钟杰, 何民, 王怀胜等. AFDX构架及协议分析[J].电讯技术,2010(1):65-71.

- [23] 刘晓胜,吴瑾,何晔等. 基于AFDX的航空数据网络终端设备设计[J]. 测控技术, 2011, 30 (2): 78.
- [24] 贾卫松,翟正军,牛仕奇.AFDX 端系统设计中的发送调度方法研究与实现[J]. 计算机测量与控制,2010,18(11).
- [25] 陈昕, 周拥军, 万剑雄. AFDX端系统关键技术的研究与实现[J]. 计算机工程, 2009,35(5):1-3.
- [26] 石全峰, 徐东明, 谢庆胜, 张云军, CRC算法在以太网数据帧中的应用及其硬件实现[J]. 广东通信技术, 2010, (3): 32-35.
- [27] 李晓珍, 苏建峰. 循环冗余校验CRC算法分析及实现[J]. 中国科技信息, 2013, (13): 100.
- [28] M. K. Karakayali, G. J. Foschini, R. A Valenzuela. Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems[J]. IEEE Wireless Commun., 2006,13(4): 56-61.
- [29] H. Dai, A. F. Molisch, H. V. Poor. Downlink capacity of interference-limited MIMO systems with joint detection[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2004,3(2):442-453.
- [30] 徐科华.AFDX总线网络数据传输分析[J].民用飞机设计与研究,2009(3):35-40.
- [31] 郑锡平.AFDX 应用分析[J].航空制造技术.2010(3):104-105.
- [32] 石锋.航空电子全双工交换式以太网编址方案设计[J].电讯技术.2009,49 (9):59-62.
- [33] 石改辉,张原.优先级管理的全双工交换式以太网实时通信[J].火力与指挥控制.2009, 34(11):171-174
- [34] 刘增基,鲍民权,邱智亮.交换原理与技术. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003.
- [35] 陈敏, OPNET 网络仿真. 北京:清华大学出版社, 2004
- [36] OPNET Modeler Product Documentations,Release 10.0. OPNET Technologies. Inc, 2003.
- [37] OPNET LAB MANUAL, OPNET Technologies. Inc, 2004.
- [38] 陈芳芳.AFDX 交换机测试系统的原理及方法[J].国外电子测量技术, 2009, 28(6): 79~83.

致谢

首先，我要衷心感谢我的导师郑雪峰老师，本文是在他的精心指导下完成的。在我研究生生涯期间，无论是学习科研、还是日常生活，郑老师一直给予我悉心的指导和关怀。郑老师严谨的学术作风、深厚的学术造诣和平易近人的态度给我留下了深刻印象，使我不仅学到科学的思维方式，同时也学到了很多人生道理，在此向郑老师表示衷心的感谢。

感谢实习单位的老师们，感谢他们在一年多的实习时间里对我科研工作和生活上的照顾，作为专业领域的专家，他们扎实的科学理论、严谨的科学态度以及活跃的科学思维深深的影响着我。同时也感谢科室的其他同事在日常工作中的照顾，感谢和我一起实习的同学们的各种帮助。

感谢我的舍友，我的朋友，我的同学们，陪伴我读过美好的研究生生涯。

最后，感谢我的父母家人们，感谢你们给予我的一切。



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

地址：西安市太白南路2号

邮编：710071

网址：www.xidian.edu.cn