



普通高等教育“十二五”规划教材

航电网络系统性能评价 模型与方法

陈 昕 万剑雄 ◎ 著



中国工信出版集团

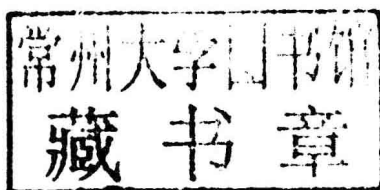


电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材

航电网络系统性能评价 模型与方法

陈 昕 万剑雄 著



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

航空电子系统的综合先进水平是飞机性能的关键之一,综合航空电子系统的实现主要取决于更通用的网络数据传输机制,并要求数据总线网络具有高吞吐率、高实时性和高可靠性等特性。基于此,本书针对新一代先进航空电子网络技术航空全双工交换以太网AFDX的网络数据传输性能评价与调度机制展开研究。

首先,本书概要介绍了本书内容所依托的研究课题背景以及国内外研究现状,详细介绍了主流的航空电子网络协议及其关键技术;其次,介绍了确定性网络演算和系统确定性相关理论,详细介绍了针对AFDX实时性保证的AVLSP调度算法及其性能评价方法;再次,介绍了实时系统建模和时间自动机理论,以及UPPAAL验证技术,详细介绍了AFDX可靠性保证的ESKM算法及其评价方法;最后,详细介绍了AFDX的系统软件仿真与硬件实现,以及在可靠性和实时性等性能指标综合数值分析评价的情况,以期探索构建航电网络系统性能评价通用模型与方法。

本书可供对航空电子系统感兴趣的读者研修,也可供从事相关行业的人员阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

航电网络系统性能评价模型与方法 / 陈昕, 万剑雄著. — 北京: 电子工业出版社, 2015.10

ISBN 978-7-121-27320-9

I. ①航… II. ①陈… ②万… III. ①航空设备—电子设备—网络系统—性能分析 ②航空设备—电子设备—网络系统—模型法 IV. ①V243

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 230296 号

策划编辑: 袁 玺

责任编辑: 袁 玺

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 10.75 字数: 275 千字

版 次: 2015 年 10 月第 1 版

印 次: 2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

航空电子系统是指飞机上所有电子系统的总和,一个基本的航空电子系统由通信、导航和显示管理等多个系统构成。航空电子系统的发展,先后经历了分立式结构、混合式结构、联合式结构和新一代综合航空电子系统结构等重大变革,每一次变革都显著地提高了飞机的性能,并且进一步推动了航空电子技术的发展。综合航空电子系统的实现主要取决于更通用的网络数据传输机制,并要求数据总线网络具有高吞吐率、高实时性和高可靠性等特性。因此,具有更高通用性的高速多路传输网络技术就成为了新一代综合航空电子系统的关键技术之一。此外,高速多路传输网络本身还应具有低成本、高抗干扰的特征,可以极大地降低航空电子系统的研发成本,提高其在恶劣环境中的生存能力和安全性。

《航电网络系统性能评价模型与方法》围绕新一代先进综合航空电子网络技术的性能评价模型与方法,从国际航空电子网络技术标准与发展研究开始,针对新一代先进航空电子网络技术航空全双工交换以太网(Avionics Full Duplex Ethernet, AFDX)的网络数据传输性能评价与调度机制展开研究。首先,通过研究国际上具有代表性且应用较为成熟和广泛的航电网络技术与标准,了解航电网络技术发展的规律和特点。其次,针对新一代先进航空电子网络技术 AFDX,一方面通过网络关键性能指标的理论分析与计算,评价网络数据传输方案的可靠性和实时性;另一方面,通过软件仿真与硬件实现等方法,对 AFDX 的可靠性和实时性等性能指标进行数值分析。最后,以期探索构建航电网络系统性能评价通用模型与方法,实现对新一代先进航电网络系统性能的科学评价与仿真验证体系。

全书由四篇,共 15 章内容组成。第一篇包含第 1 章至第 8 章,概要介绍了本书内容所依托的研究课题背景以及国内外研究现状,详细介绍了主流的典型航空电子网络 MIL-STD-1553、ARINC 429、SCI、FC、CAN、TTE 和 AFDX 协议及其关键技术;第二篇包含第 9 章至第 10 章,介绍了 AFDX 确定性网络演算理论基础和 AFDX 系统确定性相关理论,并详细介绍了针对 AFDX 实时性保证的 AVLSP 调度算法及其性能分析方法;第三篇包含第 11 章至第 12 章,介绍了实时系统建模理论和时间自动机理论,以及 UPPAAL 验证技术,并详细介绍了针对 AFDX 的冗余处理算法及其建模分析;第四篇包含第 13 章至第 15 章,详细介绍了 AFDX 的仿真系统、调度系统、冗余管理系统的设计和实现,从系统整体设计、数据结构设计、功能设计、详细设计及其系统编程实现与仿真评价等方面进行了较为全面的阐述。

《航电网络系统性能评价模型与方法》是作者自 2006 年 7 月进入清华大学计算机科学与技术博士后流动站后,在中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所从事博士后课题“航电高速网络实时通信协议 AFDX 关键技术研究”的研究内容。在课题的研究过程中,作者得到了博士后合作导师林闯教授的悉心指导与关怀。导师在学术研究方面的造诣及其引领与指教,为作者明确研究方向和取得高水平的研究成果奠定了坚实基础。同时,在课题学术研究方面,挪威科技大学的蒋宇明教授给予了作者大力的支持与帮助,其提出的“随机网络演算”理论与方法为作者进行理论分析与建模提供了强有力的支撑工具。该博士后研究课题具有较强的工程应用需求,在项目的研发过程中,中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所总设计师

丁全心研究员给予了作者全方位的指导、支持和帮助，期间也得到了研究所电子部部长周拥军研究员和武静研究员的全力帮助和关怀。在工程仿真过程中，作者的研究生万剑雄、路娟、杨杰和向旭东都给予了大力支持，才使项目取得了研究上的成果，尤其是在工程仿真方面取得了突破性的进展与成果。

本书由北京信息科技大学计算机学院陈昕教授负责撰写。在本书的撰写过程中，本人的合作者内蒙古工业大学信息工程学院万剑雄博士，在工程仿真和验证方面做了大量工作并负责撰写相关部分。同时，作者的研究生王鸿鲁、司远、李龙飞、高潮欣、汪凯、贾玉栋、宋亚鹏、纪建伟和韩友为本书的出版，给予了大力的支持。在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，错误和不足之处在所难免，敬请各位专家和广大读者批评指正。

北京信息科技大学

陈 昕

2015 年 9 月

目 录

第一篇 航空电子网络及 AFDX 概述

第 1 章 概述	2
1.1 课题背景	2
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 航空电子网络	2
1.2.2 航空全双工交换式以太网 AFDX	4
1.3 研究内容	6
参考文献	6
第 2 章 MIL-STD-1553 协议及其关键技术	11
2.1 1553 系统组成	11
2.1.1 传输媒介	11
2.1.2 远程终端	12
2.1.3 总线控制器	14
2.1.4 总线监控器	14
2.2 1553 协议体系结构	15
2.2.1 字结构	15
2.2.2 消息结构	17
2.3 1553 关键技术	19
参考文献	21
第 3 章 ARINC 429 协议及其关键技术	22
3.1 ARINC 429 系统组成	22
3.2 ARINC 429 协议体系结构	23
3.3 ARINC 429 关键技术	25
3.3.1 编址	25
3.3.2 信息编号	25
3.3.3 数据类型	25
3.4 ARINC 429 应用实例	27
参考文献	28
第 4 章 SCI 协议及其关键技术	30
4.1 SCI 系统组成	30
4.2 SCI 协议体系结构	31
4.2.1 SCI 协议栈	31

4.2.2	SCI 报文结构	35
4.3	SCI 关键技术	37
4.3.1	流量控制技术	37
4.3.2	带宽复用技术	40
4.3.3	网络接口技术	42
4.3.4	路由器技术	42
4.4	SCI 应用实例	43
	参考文献	44
第 5 章	FC 协议及其关键技术	45
5.1	FC 系统组成	45
5.2	FC 协议体系结构	46
5.2.1	FC 协议栈	46
5.2.2	FC 报文结构	48
5.2.3	FC 拓扑结构	48
5.3	FC 关键技术	50
5.3.1	流量控制	50
5.3.2	服务类	50
5.3.3	端口	52
5.4	FC 协议应用实例	53
	参考文献	54
第 6 章	CAN 协议及其关键技术	55
6.1	CAN 系统组成	55
6.2	CAN 协议体系结构	56
6.2.1	CAN 协议栈	56
6.2.2	CAN 报文结构	57
6.3	CAN 关键技术	58
6.3.1	仲裁	58
6.3.2	报文类型	58
6.3.3	帧间间隔	60
6.3.4	错误检测和故障隔离	60
6.3.5	比特填充	61
6.3.6	安全	61
6.3.7	开发工具	61
6.4	CAN 协议应用实例	61
	参考文献	62
第 7 章	TTE 协议及其关键技术	63
7.1	TTE 系统组成	63
7.1.1	端系统	63

7.1.2	TTE 交换机	65
7.2	TTE 协议体系结构	67
7.2.1	TTE 协议栈	67
7.2.2	TTE 报文结构	68
7.2.3	TTE 网络拓扑结构	69
7.3	TTE 关键技术	71
7.3.1	网络时钟同步控制策略	71
7.3.2	网络调度机制	73
7.3.3	网络冗余容错控制机制	75
7.4	TTE 协议应用实例	76
	参考文献	77
第 8 章	AFDX 协议及其关键技术	78
8.1	AFDX 系统组成	78
8.2	AFDX 协议体系结构	79
8.2.1	AFDX 协议栈	79
8.2.2	AFDX 报文结构	80
8.3	AFDX 关键技术	82
8.3.1	端系统与航空电子子系统	82
8.3.2	AFDX 端口	82
8.3.3	AFDX 中的路由	83
8.3.4	AFDX 虚电路机制与数据传输实时性	83
8.3.5	AFDX 冗余管理机制与数据传输可靠性	84
	参考文献	86

第二篇 AFDX 实时性研究

第 9 章	AFDX 确定性理论基础	88
9.1	AFDX 网络模型	88
9.2	AFDX 模型分析工具——最小加代数	89
9.2.1	最小加代数系统	89
9.2.2	最小加代数运算	92
9.3	AFDX 流量整形	95
	参考文献	95
第 10 章	AFDX 系统确定性研究	96
10.1	典型 AFDX 系统确定性研究	96
10.2	ASIA 系统集成算法	99
10.3	AVLSP 调度算法及其性能研究	100
10.3.1	AVLSP 调度算法	100
10.3.2	AVLSP 调度算法性能研究	101

10.3.3 AVLSP 算法设计与实现	103
参考文献	104

第三篇 AFDX 可靠性研究

第 11 章 实时系统建模理论基础	106
11.1 实时系统建模理论研究	106
11.1.1 实时系统建模理论背景	106
11.1.2 实时系统模型验证方法	106
11.2 时间自动机理论研究	107
11.2.1 时间自动机理论	107
11.2.2 时间语言	108
11.2.3 时钟约束和时钟解释	108
11.2.4 时间自动机的定义、语法和语义	109
11.3 UPPAAL 验证技术	110
参考文献	112
第 12 章 AFDX 冗余处理算法及其建模分析	113
12.1 冗余帧到达最大时间间隔 SkewMax 取值分析	113
12.2 AFDX 冗余处理算法评价指标	116
12.3 冗余处理算法研究	117
12.3.1 ARINC 664 冗余处理算法	117
12.3.2 逻辑序号冗余处理算法	119
12.3.3 队列缓冲冗余处理算法	126
12.4 ESKM 算法设计与实现	128
12.4.1 ESKM 算法分析	128
12.4.2 基于 ESKM 算法的冗余管理系统建模分析	130
12.4.3 仿真结果评估	132
参考文献	134

第四篇 AFDX 仿真系统实现

第 13 章 AFDX 仿真系统总体设计	136
13.1 基于软件实现的 AFDX 协议栈	136
13.2 AFDX 协议实现架构	136
13.2.1 多任务模式实现方案	137
13.2.2 单任务模式实现方案	137
13.3 整体设计	138
13.4 数据结构设计	139
13.4.1 应用程序数据报 appgram	139
13.4.2 IC 数据报	140

13.4.3	MAC 地址与本地 VL 描述符映射表	140
13.4.4	各层协议数据单元	140
13.4.5	虚电路发送控制块 Tx_VLcblk	141
13.4.6	虚电路接收控制块 Rx_VLcblk	143
参考文献		145
第 14 章 AFDX 调度系统的设计与实现		146
14.1	AFDX 调度系统功能分析	146
14.2	AFDX 调度系统详细设计	147
14.2.1	从总线取得数据	147
14.2.2	成帧入队	147
14.2.3	流量整形/虚电路调度	148
14.2.4	传输冗余控制	148
14.3	以太网卡驱动程序设计	148
14.4	AFDX 调度系统的评价	152
参考文献		154
第 15 章 AFDX 冗余管理系统的设计与实现		155
15.1	AFDX 协议仿真系统冗余管理系统功能分析	155
15.2	AFDX 冗余管理系统的详细设计	156
15.2.1	AFDX 接收端算法设计	156
15.2.2	组播地址检验	157
15.2.3	完整性检验 (IC)	158
15.2.4	冗余管理 (RM)	158
15.2.5	接收端协议处理	159
15.3	AFDX 冗余管理系统仿真评估	161
参考文献		162

第一篇

航空电子网络及 AFDX 概述



第1章 概述

1.1 课题背景

机载高速数据传输网络技术是航空电子（简称“航电”网络）综合化的关键技术之一，直接决定了航空电子系统综合化程度的高低。航空电子系统的研究与发展经历了四个基本阶段：分离式航空电子系统、联合式航空电子系统、综合式航空电子系统和先进的综合航空电子系统。综合航空电子系统的高速网络数据传输协议，作为其核心技术，成为了当前国内外航空电子系统研发的一个热点领域，受到了航空电子领域的广泛关注。

国内外的航空电子系统所采用的高速网络数据传输技术包含多种网络协议与技术的融合，如美国 F-22 战斗机，其航空电子系统结构中包括了七种数据总线网络——指令/响应式网络（1553B）、测试维护网络（TM）、高速数据网络（HSDB）、并行互连（PI）、传感器数据分配网络（SDDN）、视频数据分配网络（VDDN）、数据网络（DN）等。美国提出了更加先进的联合先进攻击技术（JAST）计划，其中对于下一代航空电子综合系统建议采用光纤通道（Fibre Channel, FC）和可变规模一致性互连接口（Scalable Coherent Interface, SCI），使航空电子系统的数据传输效率与系统性能得以较大提高。另外，目前世界上最先进的客机空客 A380 及波音 787，其航空电子系统所采用的核心网络数据传输协议——航空全双工交换式以太网（Avionics Full Duplex Switch Ethernet, AFDX），带宽达到了 100Mb/s，极大地提高了航电系统的综合化程度与性能。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 航空电子网络

早在 20 世纪 40 年代，由于模拟计算机和具有特定功能的航空电子系统的引入，飞机的性能取得了很大改善。此时一般采用模拟通信技术，在各子系统与位于系统中心的计算机之间建立点对点的模拟通信链路。但随着子系统的增加，通信链路急剧增长，这种点对点的模拟通信链路数量和系统的复杂度迅速增加，影响了系统通信的可靠性。然而，随着数字计算机、数字通信方式的出现，这种模拟设备被基于数字计算机的航空电子子系统所代替，同时，这种点对点的模拟通信方式也得到了很大的变革，出现了航空电子数据总线这一新型通信链路^[1,2]。

航空电子总线系统结构是航空电子系统的神经中枢，直接决定着航空电子综合化程度的高低和性能的优劣。航空电子总线系统体系结构是航空电子综合化的关键技术之一，航空电子总线技术是航空电子系统研究、开发的核心问题，航空电子系统的更新换代都是以所采用的总线技术为依据的，可以说航空电子系统是围绕着所采用的总线结构的创新而发展的。航

空电子总线系统结构先后经历了分离式、联合式和综合式三个阶段的发展,现在已经发展到先进综合式航空电子系统结构^[3,4]。

随着计算机技术和网络通信的发展及航天对数据传输新需求的增加,航电总线也得到快速发展。主要的航空电子总线网络规范包括 MIL-STD-1553、STANAG 3910、ARINC 429、ARINC 629, ARINC 664, 以及 AFDX 等几个发展阶段,概括起来核心问题是服务质量、带宽和成本。

1) MIL-STD-1553

MIL-STD-1553 实现了一个总线结构,接入总线的所有设备都能够接收和发送数据。通过接口接入总线的航电子系统,称为远程终端(RT)。总线控制器(BC)管理接收数据设备(RX)和发送数据设备(TX)操作,各个 RT 完全受 BC 的控制,没有主动发言权,在无活动时一直处于监听状态,这种 BC 完全控制的方式确保总线上无两个设备同时发送数据,避免数据冲突,提高了系统的可靠性^[5,6]。

在 MIL-STD-1553 出现的初期,由于传输速率高、可靠性高、实时性好等优点在武器系统中得到了较广泛的应用,正如本章文献所讲述,它也在航天、航空领域也得到广泛应用。但是,随着通信技术的进步,其传输速率相对较慢,比特率为 1Mb/s,采用串行传输,效率较低,所能接入的终端数有限,价格昂贵,限制了其在工业领域的进一步应用^[7,8,9]。

2) STANAG 3910

20 世纪 90 年代初期,北约(NATO)在研制下一代欧洲战机时,提出了一种新的数据总线欧洲标准——STANAG 3910。STANAG 3910 也是一种指令/响应协议,采用双速率传输总线结构。高速通道具有 20Mb/s 的传输速率,以满足现今大多数战机航电子系统之间高速通信的要求,而低速率的 MIL-STD-1553B 通道主要控制高速率的通信。使用相同的传输介质可以连接 STANAG 3910 系统和 MIL-STD-1553B 系统,这样就可以很方便地对 MIL-STD-1553B 系统进行升级改进,具有较好的系统兼容性,并且 20Mb/s 的高速通道既可采用光纤也可采用同轴电缆作为其传输介质。这样很大程度上延长了 MIL-STD-1553B 的寿命。但是,由于同样的技术的发展,这种技术很快被淘汰,只有在欧洲得到应用^[10,11]。

3) ARINC429

ARINC429 总线是民航飞机或军用飞机普遍采用的一种航空标准数据总线,它是符合 AEEC(航空电子技术委员会)标准的异步、串行、广播式数据总线。其主要特点是:单向广播式数据传输,传输介质由双绞屏蔽电缆组成;采用双线、单向、点对点的通信协议,可由两根独立总线实现双向传输;基本信息单元是一个 32 位的数据字,并且大多数信息由单个数据字组成^[12,13,14]。

4) ARINC 629

ARINC 629 总线是波音公司研制的一种与 MIL-STD-1553B 总线相当的民用数据总线,分布式双向传输的 ARINC 629 通信协议是基于 ARINC 429 发展而来的,同 ARINC429 总线一样是无主机的广播式数据总线,依照载波检测/多路存取碰撞回避(CS/MA-CA)协议工作。ARINC 629 总线能在 MIL-STD-1553B 所用的任何一种配置方式上工作,具有更多的灵活性,比特率达到 2Mb/s,可以连接 120 个数据终端,每个终端可以独立监控,提高了网络的可靠性。尽管它的通信线路可以实现双向传输,很大程度上减少了飞机中线路的重量,并将其数据的传输速率提高为 ARINC 429 的 20 倍。但它需要客户端硬件,针对性太强,这就增加了飞机

的总成本。而且它缺乏很好的兼容性,不能满足其他用户的需求,需要专用的硬件,增加了总费用。它已经应用于波音 777^[14]。

5) ARINC 664 与 AFDX

ARINC 664 是 AFDX 的主要参考标准。AFDX 技术由法国空中客车公司提出,并首先应用于大型客机 A380 上。AFDX 以成熟的以太网技术和广泛应用的 TCP/IP 协议为基础,因此其研发、部署与实施相较于传统专用航电总线更加容易,成本更低。而且,由于近年来以太网技术的飞速发展,AFDX 可以将航电数据传输速率提高数十倍,甚至上百倍^[15,16,17]。

1.2.2 航空全双工交换式以太网 AFDX

航空全双工交换式以太网(Avionics Full Duplex Switch Ethernet, AFDX)使用以太网作为传输手段。以太网作为一种民用环境中已经十分成熟的通信技术,有着专用航空网络系统结构无法比拟的优点^[20]:(1)成本低。市面上有众多可供选择,且价格低廉的 COTS 软硬件。(2)集成度高。原航电系统中的各种总线结构都可以通过交换机来实现互连,减少了布线的难度与成本。(3)高带宽。目前千兆以太网 GbE 已经十分普及,10Gb/s 以太网也正在成为未来的发展趋势,这种带宽优势是目前的航空电子网络根本无法达到的。

虽然以太网有种种优点,但是由于其设计之初主要是针对商用市场的,因此不能将其直接应用于航空电子领域。原因主要有三:(1)以太网没有 QoS 控制机制,这使得并行数据流的传输质量无法得到保证。(2)以太网无法保证数据传输的实时性。(3)以太网没有可靠性控制机制,而在航空环境中,数据传输的可靠性是最为关键的技术指标之一。

尽管存在一些不足之处,但是以太网高带宽、低成本的优势仍然吸引了大量研究人员的关注。研究的成果主要体现在:对于早期的广播式 CSMA/CD 以太网,为了解决实时性,主要关注的是如何保证数据流独占地访问网络传输介质。在这个阶段主流的两种解决方法是:(1)基于令牌方案^[21];(2)基于时间槽的方案^[22,23]。在文献[24]中作者对这两种方法进行了综合应用实验,在当时的条件下取得了较好的效果。

随着以太网技术的快速发展,出现了全双工以太网,这就根除了以太网中产生冲突的可能性。这个时期以太网实时性研究的重点有以下几个方面:(1)通过流量限制,来确保网络数据传输的实时性^[25,26,27,28,29,30,31];(2)在网络中间节点交换机采用适当的调度方法,较好地解决了网络数据传输的实时性问题^[32,33,34,35,36,37,38,39];(3)运用缓冲控制机制,实现对数据流的流量限制,从而达到实时性要求^[40];(4)采用时间触发机制,对数据流进行平滑处理,以满足实时性^[41,42,43,44];(5)综合利用流量整形的方式,并结合使用调度算法,进行网络数据传输的实时性控制^[45,46,47],获得了较好的效果。

21 世纪初,法国空中客车公司在以往实时以太网研究的基础上,进行了一系列独立的研究和大量的实验,最终以现行商用交换式以太网标准为蓝本,辅以特殊的控制机制,提出了 AFDX。与传统的以太网相比,AFDX 的主要改进之处在于实时性和可靠性等方面。在大中型运输机和客机的航空电子网络应用中,AFDX 表现出较强的适应性。

AFDX 协议主要有两部分组成:IEEE 802.3 和 ARINC 664 Part.7^[48]。其主要思想是,通过限制每个数据包之间的时间间隔(Bandwidth Allocation Gap, BAG),使得在一条物理链路中同时实现多条虚电路(Virtual Link, VL),且虚电路之间互不干扰。依据网络演算理论可推出,在该标准系统环境下的每个数据包到达目的节点的最大时延是确定的。

AFDX 技术的研究可分为实时性与可靠性两方面。

1) AFDX 实时性研究

文献[49]中对 AFDX 网络仅使用一个交换机的星型拓扑结构进行仿真建模,并运用网络演算理论与方法,对所建立的模型进行分析对比。在所有的虚电路都是同步的,且达到网络允许的最大流量的最坏的情形下,仿真结果与理论计算结果非常相近,相差不到 6%。

文献[50,51]分别采用了网络演算、随机网络演算、队列网络仿真和时序自动机模型检验等方法,对 AFDX 网络的端到端延迟进行评价。研究的核心是:(1)网络中是否会产生拥塞,从而造成传输延迟;(2)交换机端口缓冲队列是否会溢出,从而导致丢包等。该研究将网络延迟和输出端口队列长度作为主要考察指标。

文献[52]指出 AFDX 一般作为民用航电网络技术,其实时性还无法满足军用需要。若要推广到军用航电网络技术领域,需要将航电系统的消息分为四类:(1)非周期性、有极高时延要求的紧急数据,如警报;(2)周期性、有硬性时延要求的数据,如传感器数据;(3)非周期性、有一定时延要求但不紧急的数据;(4)非周期性、也没有时延要求的数据,如文件传输。这四类数据对应着从高到低四种优先级。文章给出了一种保证实时性的方案,即在源端采用流量整形的方法对输出数据流进行规范化,在交换机的输出端口中使用静态优先级队列(SP)和加权公平队列(WFQ)机制进行转发调度。

文献[53]主要围绕实时系统中的端到端延迟问题,分别从实时操作系统(RTOS)中的 CPU、网络和其他资源分配的角度来讨论如何优化系统性能。作者提出了多重资源分配调度框架(MURALS)的解决方案。经过检验,这种方案可以在保证端到端延迟和合理资源分配之间找到较好的平衡点。

针对 AFDX 技术进行分析与建模,主要采用的是网络演算理论^[45,54,55,56,57,58,59, 60,61,62]。这是一种计算网络时延、抖动、队列缓存分配等性能参数指标的理论体系。使用这种理论,可以从数学角度定量地计算 AFDX 网络的各种实时性能参数,从而为研究和评价 AFDX 提供了有力的理论与保证。

2) AFDX 可靠性研究

文献[63]设计了一个模型来验证 AFDX 冗余管理模块的可靠性。为了捕获系统的瞬时状况,采用一个时序自动机进行网络建模,并使用 UPPAAL 工具来进行模型检验。结果发现 AFDX 冗余管理模块存在缺陷。

文献[64,65,66]主要分析了冗余管理系统的各种可能的数据帧的到达情景,利用 TLA 对各种可能的情景进行了模拟,并验证了常用的 13 种冗余算法的在上述各种情景下的可靠性问题。

UPPAAL 工具^[67]是一个对实时系统建模、确认和验证的工具集。它由 Aalborg 大学和 Uppsala 大学于 1995 年联合提出,是一个可以用来描述非确定性并行过程积的系统。UPPAAL 的用户界面包括三个主要部分一个系统编辑器、一个模拟器和一个验证器。系统编辑器用于创建和编辑系统模型,一个系统被描述为一系列过程模板、一些全局声明、过程分配和一个系统定义。模拟器是一个确认工具,用于检查所建系统模型可能的执行是否有错,用以在验证前发现一些错误。验证器通过快速搜索系统的状态空间来检查时钟约束和反应限制性质,它还还为系统要求的规范和文件提供了一个需求规范编辑器。在实际中,UPPAAL 被广泛应用于很多实时系统中^[68,69]。

文献[70,71]使用 Compositional and Symbolic Model-Checking 的方法解决了在对大型实时系

统进行自动机建模分析时所遇到的最主要的问题:控制节点的数量与时钟变量域值空间爆炸。文献[72]作者提出了一种代数系统来描述具有时钟属性的时序过程,并创立了一套相关语言可达性分析的方法。这种代数系统可以用作一种规范描述语言,用于建模分析各种实时通信系统。

3) AFDX 国内研究现状

近年来,国内也开展了针对 AFDX 协议的研究,取得了一定的进展^[73,74,75,76,77,78]。中航一集团 631 研究所、北京航空航天大学 and 西北工业大学等单位在该领域研究处于国内领先。但是,由于 AFDX 标准 ARINC 664 Part 7 只是规定了一些性能指标,在某些关键技术方面并没有明确地给出,国内研究只是处于起步阶段,研究的重点主要是集中在体系结构和标准上,没有针对协议细节的定量分析,也没有实证研究方面的成果。

1.3 研究内容

本书围绕 AFDX 技术的实时性与可靠性问题开展深入研究。

在实时性方面利用网络演算理论对 AFDX 的实时性进行了较为深入的研究。首先,利用网络演算理论对 ARINC 664 Part. 7 中规定的典型 AFDX 协议体系进行建模,从 QoS 的角度对协议的性能进行了定量分析,并提出了 ASIA 系统集成算法。其次,对 AFDX 技术进行了改进,在端系统中使用了 AVLSP 算法,实现了带有优先级的局部先进先出调度器。理论分析与仿真结果均验证了该改进方案的可行性。最后,详细讨论了如何在 VxWorks 操作系统下使用相关硬件实现 AFDX 协议及其调度仿真系统,并给出了部分实现代码。运行结果证明,该软件实现方案完全遵循 ARINC 664 Part. 7 标准,其实时性可以满足航电网络数据传输的需求。

在可靠性方面,利用时序自动机理论,对冗余处理算法进行了较为深入的研究。首先,针对 AFDX 协议的可靠性进行研究,并结合一般系统的冗余处理机制,分析研究了 AFDX 冗余管理系统的实现机制。其次,研究了冗余虚电路的设计方法,给出了冗余管理系统的实现方案,并在综合分析诸多研究成果的基础上,设计具有相对较高可靠性的接收端冗余帧的处理 ESKM 算法。再次,利用形式化方法对应用了 ESKM 算法的冗余管理系统进行研究,并结合时间序列自动机理论和 UPPAAL 工具对其进行建模和模型检验,以验证该系统设计的可行性,安全性和可靠性。最后,利用软硬件平台设计并编写代码实现 AFDX 协议冗余管理仿真系统,对通信的可靠性进行理论分析研究和实验测试。

参考文献

- [1] Zhang J G, Pervez A, Sharma A B. Avionics Data Buses: An overview[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 2003, 18(2): 18-22.
- [2] 郑光威, 赵尚弘, 马涛. 军用航空数据总线研究进展[J]. 现代防御技术, 2006, 34(4): 74-77.
- [3] 熊华钢, 周贵荣, 李峭. 机载总线网络及其发展[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 1135-1144.
- [4] 赵永库. 新一代航空电子总线系统结构研究[J]. 航空计算技术, 2005, 35(1): 99-103.
- [5] 姜震, 熊华钢. 未来航空电子高速数据总线技术的研究[J]. 电光与控制, 2002, 9(3): 18-22.
- [6] Zhang J G, Pervez A, Sharma A B. Avionics Data Buses: An Overview Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Volume 18, Issue 2, Feb 2003 Page(s): 18-22, 2007.

- [7] Kim J, Jung H, Kim B G. Design and Implementation of KSLV-I Telemetry System with MIL-STD-1553B[C]. Aerospace Conference, IEEE, 2005: 1292-1299.
- [8] Kim J, Han J. Development of a Distributed OBDH System with MIL-STD-1553B and Its Application[C]. Aerospace Conference Proceedings, IEEE, 2000: 243-248.
- [9] Jean-Jacques STANAG 3910 :The Data Bus of the Next Generation European Fighters CH3306-8/93/000Q-0152\$ 1.00 0 1993 IEEE.
- [10] ARINC 429 总线接口. Actel 公司.
- [11] 樊莉, 王勇. 基于多线程技术的机载总线仿真系统的研究与实现[J]. 现代电子技术, 2005, 28(13): 26-28.
- [12] 缪学勤. 现场总线标准最新进展与我们的思考[J]. 北京: 中国仪器仪表行业协会, 2000: 207-209.
- [13] ARINC 公司. ARINC429 规范[Z]. 1989.
- [14] ARINC.Specification 664: Aircraft Data Network, Part 7-Deterministic Networks, 2005.
- [15] Actel. Developing AFDX Solutions, March 2005.
- [16] Condor Engineering. AFDX Tutorial, 2005.
- [17] AFDX / ARINC 664 Tutorial (1500-049). support@condoreng.com. <http://www.condoreng.com>.
- [18] Pickles B. Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX)[J]. SBS Technologies, 2006, 15(2): 62-65.
- [19] Boggess T P. Trade Study Report for Commercial Candidates in an Embedded Avionics Unified Network[C]. Digital Avionics Systems Conference, 1997, 16th DASC. IEEE, 1997, 1: 3.3-5-11 vol. 1.
- [20] Venkatramani C, Chiueh T. Supporting Real-Time Traffic on Ethernet[C]. Real-Time Systems Symposium, 1994, Proceedings. IEEE, 1994: 282-286.
- [21] Kopetz H, Damm A, Koza C, et al. Distributed Fault-Tolerant Real-Time Systems: The Mars approach[J]. Micro, IEEE, 1989, 9(1): 25-40.
- [22] Schwarz M. Implementation of a TTP/C Cluster Based on Commercial Gigabit Ethernet Components[M]. na, 2002.
- [23] Pedreiras P, Almeida L, Gai P. The FTT-Ethernet Protocol: Merging Flexibility, Timeliness and Efficiency[C]. 2012, 24th Euromicro Conference on Real-Time Systems. IEEE Computer Society, 2002: 152-152.
- [24] Kweon S K, Shin K G. Achieving Real-Time Communication over Ethernet with Adaptive Traffic Smoothing[C]. Real-Time Technology and Applications Symposium, RTAS 2000, Proceedings, Sixth IEEE. IEEE, 2000: 90-100.
- [25] Caponetto R, Lo Bello L, Mirabella O. Fuzzy Traffic Smoothing: Another Step Towards Statistical Real-Time Communication over Ethernet Networks[C]. Proc. 1st Int. Workshop on Real-Time LANS Internet Age (RTLIA), 2002: 33-36.
- [26] Song Y. Time Constrained Communication over Switched Ethernet[C]. IFAC International Conference on Fieldbus Systems and Their Applications. 2001: 152-159.
- [27] Song Y, Koubaa A, Simonot F. Switched Ethernet for Real-Time Industrial Communication: Modelling and Message Buffering Delay Evaluation[C]. Factory Communication Systems, 2002. 4th IEEE International Workshop on. IEEE, 2002: 27-35.
- [28] Bangolae S L, Jayasumana A P, Chandrasekar V. Gigabit Networking: Digitized Radar Data Transfer and Beyond[C]. Communications, 2003. ICC'03. IEEE International Conference on. IEEE, 2003, 1: 684-688.
- [29] Aditya Maroo, Tarun Banka, Sangeetha L. Bangolae, Anura P-Jayasumana, V, Chandrasekar. Perfclrmance