

引用格式:周璇,何锋,熊华钢. DIMA 系统网络通信技术解决方案选择[J]. 电光与控制,2019,26(11):25-30. ZHOU X, HE F, XIONG H G. Network communication technology solution selection of the DIMA system[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(11):25-30.

## DIMA 系统网络通信技术解决方案选择

周 璇, 何 锋, 熊华钢  
(北京航空航天大学,北京 100191)

**摘 要:** 分布式综合模块化航空电子系统(DIMA)已成为未来新一代航空电子系统的发展方向。为解决 DIMA 系统网络通信技术解决方案的选择问题,构建了系统体系结构模型,以通信、导航与识别综合系统为切入点讨论了其与联合式系统和综合模块化航空电子系统的区别与联系;基于此,总结了 DIMA 系统的网络通信需求,并通过对比分析光纤通道、航空电子全双工交换式以太网和时间触发以太网,确定了采用时间触发网络实现 DIMA 系统网络互连在实时可靠通信和系统增量升级等方面的优势。

**关键词:** 分布式综合模块化航空电子系统; 网络通信技术; 体系结构; 时间触发网络

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.11.006

## Network Communication Technology Solution Selection of the DIMA System

ZHOU Xuan, HE Feng, XIONG Hua-gang  
(Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Distributed Integrated Modular Avionics(DIMA) system has become the development direction of the next generation of avionics systems. In order to determine the network communication technology of the DIMA system, we built the system architecture model and discussed its difference and connection with the federated system and Integrated Modular Avionics (IMA) system on the Communication, Navigation and Identification (CNI) integrated system. On this basis, the network communication requirements of the DIMA system was summarized. The advantages of using Time-Triggered Ethernet (TTE) to realize DIMA system network interconnection in real-time and reliable communication as well as system incremental upgrade were verified by comparing and analyzing Fiber Channel (FC) and avionics full duplex switched ethernet with TTE.

**Key words:** Distributed Integrated Modular Avionics (DIMA) system; network communication technology; architecture; time-triggered network

### 0 引言

迄今为止,机载航空电子系统的发展已经历了分立式、联合式、综合式和先进综合式四代典型阶段<sup>[1]</sup>。综合模块化航空电子系统(Integrated Modular Avionics, IMA)涵盖了综合式和先进综合式两代特征,是当前航电系统体系结构发展的最高阶段<sup>[2]</sup>,已成功应用于空客 A380、波音 B787 和商飞 C919 大型客机。随着

航电系统规模和功能需求的不断提高,为了缓解 IMA 核心处理系统负担过重、散热困难等问题,业界提出了分布式综合模块化航空电子系统(Distributed Integrated Modular Avionics, DIMA)的概念<sup>[3]</sup>。DIMA 系统继承了 IMA 系统通用硬件模块和开放式结构带来的灵活性、可重用性和互操作性,更加强调系统重配置机制、高性能多核处理以及增量升级认证等,被视为新一代航空电子系统的发展方向。

DIMA 系统分布式部署硬件模块和处理资源,允许异构的处理模块通过互连网络进行功能任务的并行执行,因此对通信网络的确定性、可靠性和容错能力等提出了更高的要求。目前,针对 DIMA 系统的研究集中于系统架构模型<sup>[4-9]</sup>、任务通信调度<sup>[10-12]</sup>、实时性能分

收稿日期:2018-11-20

修回日期:2019-01-03

基金项目:装备预研领域基金(61403120404);国防科技项目基金(0101070)

作者简介:周璇(1994—),女,河北任丘人,博士,研究方向为航空电子综合技术。

析<sup>[13-15]</sup>和动态重构管理<sup>[16-18]</sup>等方面。已有文献多采用时间触发以太网(Time Triggered Ethernet, TTE)实现 DIMA 系统组网以完成相关研究,例如:文献[12]设计了基于 TTE 组循环周期、时间触发消息调度表周期和剩余时间的调度方法,以解决 DIMA 架构下的 TTE 通信调度问题;文献[15]提出了 DIMA 系统中 TTE 网络分区方法,并对网络实时性能进行了分析和验证;类似研究还可见文献[9,11,13-14]等。此外,也有部分文献沿用 IMA 的航空电子全双工交换式以太网(Avicionics Full Duplex Switched Ethernet, AFDX),如文献[10,17]等。然而,尚缺乏相关文献说明 DIMA 系统的网络通信需求,并解决其组网技术方案的选择问题。

为此,本文首先概述光纤通道(Fiber Channel, FC)、AFDX 和 TTE 这 3 种常用的机载网络,然后构建 DIMA 系统体系结构,并以通信、导航和识别(Communication, Navigation and Identification, CNI)综合系统为切入点阐述 DIMA 系统与传统联合式系统和 IMA 系统在综合技术等方面的区别与联系。最后归纳总结出 DIMA 系统以具备时间确定性保障机制为核心的网络通信需求,并分析说明时间触发网络是一种比较适用于 DIMA 系统的组网技术。

### 1 机载网络概述

机载网络负责连接飞机平台上各个设备、模块和部件,是航电系统的重要组成部分。随着航电系统的发展,以 FC, AFDX 和 TTE 为代表的新一代航电系统组网技术受到广泛关注并已应用于实际工程。

FC 是美国国家标准委员会(ANSI)X3T11 小组于 1988 年开始制定的一种高速串行传输协议,目前已形成一个庞大的网络协议簇。FC 技术综合了通道和网络两方面的优点,兼具 I/O 通道的简单高速和基于协议的网络通信的灵活互连,支持多种介质方式、传输速率、拓扑结构、服务类型、流量控制和上层协议映射等,是一种具有高实时性、高可靠性、高带宽和高性价比的开放式通信技术,已成功应用于美国波音公司的 AH-64 Apache, RAH-66 Comanche 型直升机以及美国洛克希德·马丁公司的 F-35 战机。

AFDX 在商用以太网的基础上经过协议改造而来,由 ARINC664 规范进行了标准化定义。AFDX 引入虚拟链路(Virtual Link, VL)的概念,通过最大帧长度和带宽分配间隔(Bandwidth Allocation Gap, BAG)实现流量的带宽隔离和管理,采用固定路由和流量管制增强传输的确定性,并利用冗余机制提高网络的可靠性。AFDX 组

网规模大,拓扑结构具有一定的灵活性,主要应用于空客 A380、波音 B787 和商飞 C919 等大型客机。

TTE 是交换式网络互连环境下的时间触发通信技术,可以有效避免传统事件触发机制下通过大量时间预留来解决多个事件同时发生所导致的资源共享冲突问题。美国汽车工程师学会(SAE)于 2011 年形成并发布了 SAE AS6802 时间触发以太网标准。根据该标准定义, TTE 网络支持时间触发(Time-Triggered, TT)、速率约束(Rate-Constraint, RC)和“尽力传”(Best-Effort, BE)流量的混合关键性通信服务,提供容错、故障封闭、通信监视等完整性保证机制,可实现微秒级的分布式时钟同步。美国航空航天局(NASA)将 TTE 网络作为猎户座多用途载人飞船的骨干网络。

## 2 DIMA 系统体系结构及分析

### 2.1 系统体系结构

DIMA 系统的体系结构呈现物理分布和逻辑分层的特点,如图 1 所示。

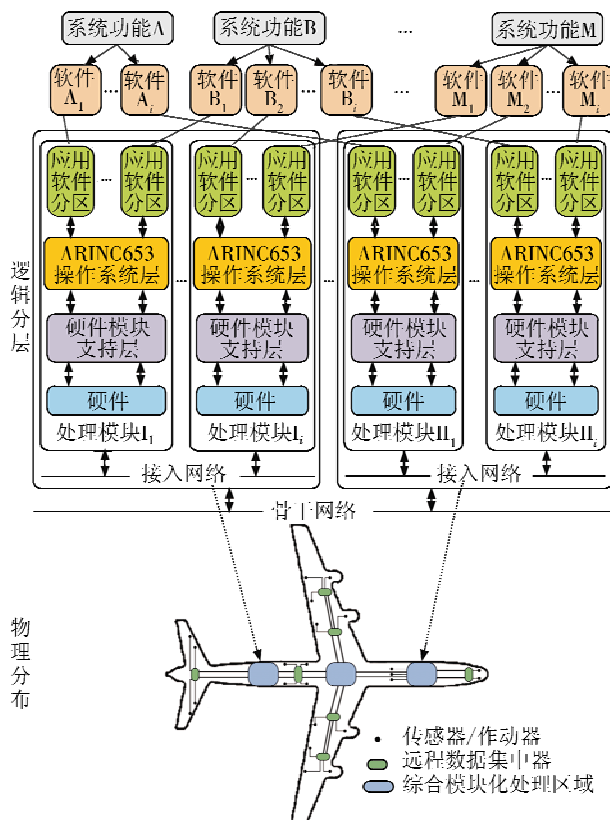


图 1 DIMA 系统体系结构

Fig. 1 The architecture of DIMA systems

其核心处理遵循 ARINC653 所定义的开放式实时操作系统标准;分散放置于机身各处的机架形成若干综合模块化处理区域,每个机架内装载一定数量的通

用处理模块,通过加载不同的应用软件协同实现通信、导航、识别、探测和飞行控制等功能;区域间以及区域内不同模块间分别通过骨干网络和接入网络交互连接。通用处理模块通过全局数据总线与远程数据集中器进行通信;远程数据集中器完成数据在模拟、离散或其他总线格式与全局数据总线格式之间的相互转换,从而将远端传感器和受动器等非核心系统设备接入全局数据总线中。

DIMA 系统融合了联合式和 IMA 的优势,具有模块化、综合化和分布式 3 方面典型特征。首先,核心系统采用外场可替换的通用处理模块,剥离软件加载与硬件基础的关系,易于系统重构和扩展升级;其次,多个子系统的的核心处理功能综合到核心处理系统,并按照功能耦合性将应用软件分组形成若干分区 (Partition) 保证时空隔离,显著减少系统的处理资源;最后,物理上分布飞机功能,就近部署处理资源,并分离应用处理模块和 I/O 处理模块,形成天然故障传播屏障。

### 2.2 航电系统对比分析

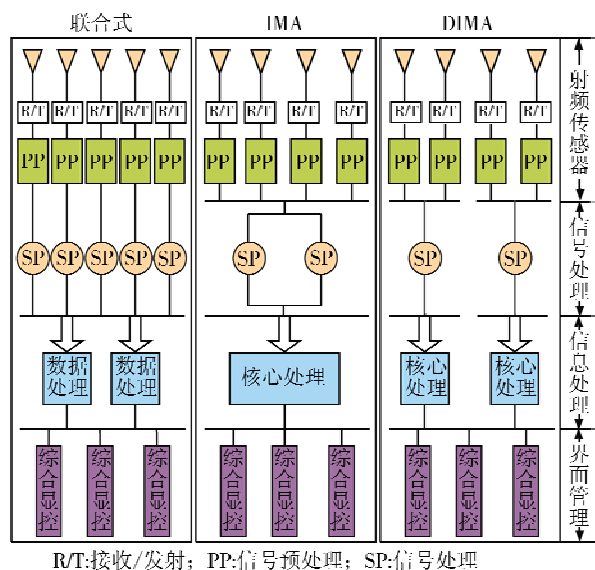
纵观航电系统发展历程,其代次更迭充分反映了航电综合技术的推进演变。无线电通信、导航与识别由于具有相近的电波空间传输、检测与处理特征,自联合式系统以来便被设计为 CNI 综合系统。本节以此为切入点,首先对比分析联合式、IMA 和 DIMA 系统的综合技术。

联合式的 CNI 综合系统是基于设备的集成系统,采用多路传输数据总线将相关系统设备互连起来,并进行综合显示和控制。通信、导航与识别等子系统仍使用专用的硬件和软件资源,仅对显示和控制进行综合,综合化程度较低。

IMA 的 CNI 综合系统是基于模块的结构综合系统,用一种开放式的模块化系统结构取代原先各自独立的 CNI 设备。相较于联合式,IMA 对天线和前端进行综合化设计,并将通信、导航与识别等功能的信息处理集中到核心处理器上综合完成,实现系统资源的高度共享。

DIMA 的 CNI 综合系统是基于模块的分布式综合系统,以分布式小机柜取代 IMA 集中式大机柜,按照飞机区域分布式部署硬件资源和软件应用,保证数据就近接入、信息就近处理以及功能就近执行。DIMA 的通信、导航与识别等功能由分散放置在机身各处的多个核心处理器协同完成,克服了 IMA 核心处理负担过重等问题,进一步提高了系统整体效能。

联合式、IMA 和 DIMA 的 CNI 综合系统结构对比如图 2 所示。此外,3 种航电系统在硬件资源、软件开发以及物理布局等方面也具有明显差异,简单对比如表 1 所示。



R/T:接收/发射; PP:信号预处理; SP:信号处理

图 2 CNI 综合系统结构对比

Fig. 2 The comparison of CNI in federated, IMA and DIMA systems

表 1 联合式、IMA 和 DIMA 的 CNI 系统对比

Table 1 Comparison of the CNI architecture in federated, IMA and DIMA systems

	联合式	IMA	DIMA
综合技术	仅实现显示和控制综合	天线和前端综合、核心处理综合	核心处理分布式综合
硬件资源	专用外场可替换单元	通用标准模块	通用标准模块
软件开发	基于硬件	与硬件模块不紧密耦合	与硬件模块不紧密耦合
物理布局	子系统分布在机身各处	集中式大机柜,布线复杂、不易冷却	分离式小机柜,分布在机身各处
故障隔离	错误隔离在孤立的子系统中	分区时间、空间隔离	兼具物理屏障和分区隔离
可维护性	外场、内场和车间二级维护	支持二级维护	支持二级维护
重构能力	不具备	具备	具备
系统升级	复杂昂贵	模块化设计便于升级	模块化设计便于升级

## 3 DIMA 网络通信技术选择

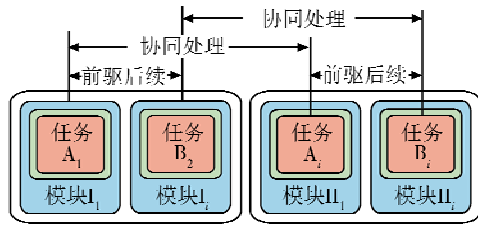
### 3.1 网络通信需求

为了适应 DIMA 系统的体系结构和功能实现,其网络通信技术应满足以下要求。

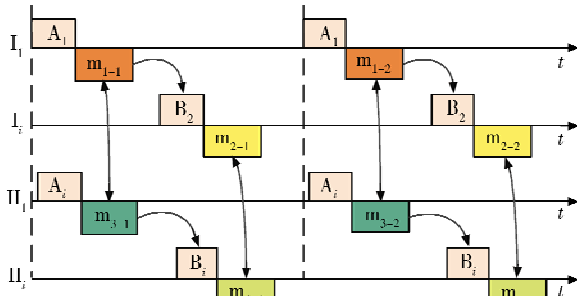
#### 3.1.1 具备时间确定性保障机制

由于 DIMA 系统就近分布式部署硬件资源和软件应用,服务于相同系统功能的传感器信息可能汇聚到跨处理区域、跨交换节点的不同处理模块中,由多个任务依赖网络交联协同完成。为了避免分布式综合过程中关键信息和核心处理的时序错位与失配,有必要引入以时间为基准的同步机制,保证协同处理和信息融

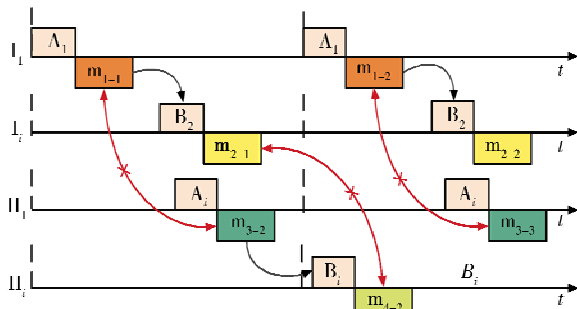
合的正确性。进一步,不同任务间具有前驱和后续的关系,伴随有严格时序性要求;如果模块内分区的轮转激活和任务执行未进行合理调度,前驱任务传递来的消息可能刚好错过后续任务的处理而不得不等待下一轮执行,导致延迟恶化甚至协同处理失配。因此,DIMA 系统需要依赖精准的全局时间同步基准并设计合理以时间触发调度窗口。与之相应,网络通信技术也应具备时间确定性保障机制以匹配系统的分布式协同处理,如图3所示。



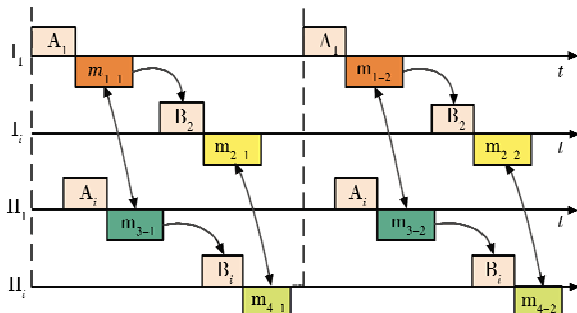
a 根据图1假设的典型任务关系



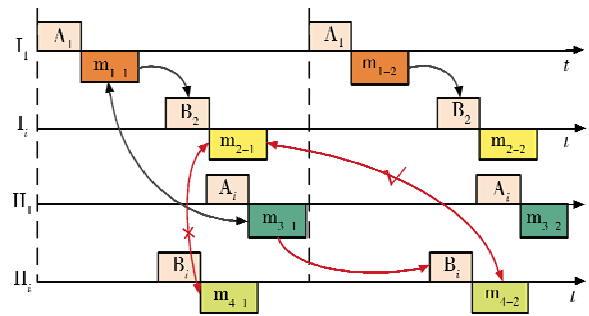
b 时间确定性保障机制下实时正确的处理运行



c 无时钟同步影响协同处理



d 无合理调度导致延迟恶化



e 无合理调度甚至影响协同处理

图3 无时间确定性保障机制可能导致错误的处理结果

Fig. 3 The processing results may be wrong without time deterministic guarantee mechanism

### 3.1.2 具有较高的实时性

DIMA 系统中具有紧耦合关系的软件任务可能迁移到不同处理系统或模块上,通过网络交联完成协同处理,消息必须在可预见的时间内完成不同处理系统或模块间的传输。如果某一信息资源不能及时获取,将导致整个处理任务无法完成,以致降低或损害系统的反应能力。因此,DIMA 系统要求网络通信技术具有较高的实时性,并且消息的传输延迟是可预测和可控制的。

### 3.1.3 支持混合关键性流量

关键性是用来描述系统功能重要程度或其失效后果严重程度的一项重要指标。SAE 颁布制定的民用飞机及系统开发指南 SAE ARP4754A 把失效情况划分为灾难性、危险性、较严重、较轻微和无影响 5 个安全级别。为了适应大规模计算处理需求,同时满足尺寸、重量和功耗等多方面的要求,DIMA 系统在共享资源平台上整合多种不同关键性级别的系统功能,要求网络通信技术支持混合关键性流量传输以满足不同关键性级别系统功能的服务需求。

### 3.1.4 匹配处理隔离保障

DIMA 核心处理系统采用分区管理技术对任务进行时间和空间隔离。处理分区的运行时空分布构成分区内任务执行的边界,并将任务运行故障限制在以分区为单位的故障封闭区域。但是分布式计算机系统的故障结果可能通过故障节点发出的错误消息从故障封闭区域向外部环境传播。为此,需要将分区管理机制带来的故障隔离特性通过互连网络延伸以实现系统级的隔离保障,即网络通信技术应匹配核心处理隔离保障机制。

### 3.1.5 便于系统增量升级

DIMA 系统在其整个生命周期过程中需要集成新的功能以满足不断发展的航电需求,表现为增加新的

通用模块、处理分区、软件任务或通信消息等。采用增量升级手段,可以尽最大可能保持 DIMA 系统原有的设计配置,有效控制系统升级和扩充导致的生命周期成本费用增加。机载网络承担航电系统关键互连和任务通信的重要责任,是工程师进行系统设计时需要考虑的重要部分,其通信技术选择也应满足便于系统增量升级的要求。

### 3.2 组网技术方案分析

系统组网技术方案的选择应服从网络通信需求。本节从是否具备时间确定性保障机制、是否具有较高的实时性、是否支持混合关键性流量、是否匹配处理隔离保障以及是否便于系统增量升级 5 个角度,分别对 FC, AFDX 和 TTE 3 种组网技术进行分析。

首先,是否具备时间确定性保障机制。FC 和 AFDX 标准协议不支持时钟同步,需要依靠协议改造以保证时间确定性。TTE 网络根据节点时钟同步功能安排端系统或交换机担任同步控制器、同步客户端或压缩控制器的角色,利用协议控制帧承载同步信息并进行信息交换,通过周期性调用固化函数和压缩函数可以实现微秒级分布式时钟同步;在全局时钟同步基础上,TTE 支持对通信资源预先规划形成调度表,可以有计划地进行时间触发消息调度,满足具备时间确定性保障机制的要求。

然后,是否具有较高的实时性。FC 在通信带宽上具有明显优势,但其缺乏高级流控机制和相关数学形式上的解析验证方法,网络延迟随拓扑结构和流量规模而变化,不具有通信延迟可预测能力;AFDX 通过端系统整形以及交换机管制过滤保证实时性能,尽管网络通信过程中存在由于数据帧争用物理链路输出而出现的传输延迟问题,但是消息的端到端通信时延存在最坏情形且具有理论上界约束,可应用网络演算、轨迹法和整体法等解析方法计算;TTE 在微秒级分布式时钟同步服务的基础上,利用时间触发通信技术规避数据帧争用物理链路,时间触发流具有更严格的时间确定性。

其次,是否支持混合关键性流量。FC 和 AFDX 采用关键性作为优先级赋值机制,根据任务关键性分配通信消息优先级,当该优先级顺序与最大化资源利用率所需最佳优先级顺序相反时,可能导致低关键性任务消息无法正常传输处理;TTE 提供 TT, RC 和 BE 流量的混合关键性通信服务。其中:TT 流量按照预先规划的调度表时刻发送,适应严格时间确定的关键性任务通信;RC 流量利用剩余时间资源预定义带宽保证传输,由于网络传输不遵循同步时间基准,存在异步流量竞争输出端口造成的排队等待导致流量调度和发送时

间的不确定性,可承载一般关键性任务通信;BE 流量实现传统以太网通信,无相应服务质量保障机制,可应用于对时间确定性无要求的任务间通信。

再次,是否匹配处理隔离保障机制。FC 利用仲裁环拓扑结构的网络集线器或交换型拓扑结构的交换组织隔离故障端口。AFDX 基于 VL 的逻辑隔离,通过交换机的流量管制和帧过滤机制发现不符合流量特性的 VL 并将其与输出端口断开,保护正常工作的 VL 不受违规流量的阻塞。TTE 在此基础上又引入全局时间进行时间维度上的故障隔离,由于处理分区和通信消息按照预先时间规划有序进行,根据故障时间点可以确定故障应用软件,进而由端系统或交换机阻止错误消息的传播;TTE 基于全局时钟的时间隔离和基于 VL 的逻辑隔离可以考虑为网络“分区”实例,与 DIMA 核心处理系统的时空隔离保障机制有机结合可实现系统级故障隔离。

最后,是否便于系统增量升级。FC 和 AFDX 基于松耦合事件关联,集成新功能时系统干扰状态种类庞大、运算复杂,并且会大量呈现非预期的涌现现象;TTE 采用时间触发技术,各异构模块间精确同步、并行处理,可有效避免系统无效状态;其在既有系统设计的基础上尽最大可能利用空闲时间集成新功能,既降低了升级成本又简化了重认证过程。

综上,以 TTE 为代表的时间触发网络是一种比较适用于 DIMA 系统的组网技术。值得注意的是,基于时间触发网络互连的 DIMA 系统在设计过程中不仅要考虑分布式处理的任务分配与资源映射等关系,还需要兼顾互连网络中时间触发通信消息的调度实现,实际是将分布式综合的复杂性转换为系统设计验证的复杂性。工业应用中可以考虑在骨干网络和各分布式区域的接入网络中采用不同的组网技术,例如骨干网络采用 TTE 满足关键流量的实时性传输需求,接入网络采用 AFDX 保持域内应用与消息的松耦合设计;或者骨干网络采用 AFDX 降低系统集成耦合度和设计复杂性,接入网络采用 TTE 照顾域内紧相关任务的协同处理关系。

## 4 结束语

本文针对 DIMA 系统体系结构与网络通信技术展开研究。将 DIMA 系统分为核心处理和非核心处理两部分,构建了物理分布与逻辑分层的系统结构;并以 CNI 综合系统为切入点,讨论了 DIMA 与联合式、IMA 的联系与区别,着重强调了其核心处理分布式综合的特征。在此基础上,归纳总结出 DIMA 系统的网络通信需求,即具备时间确定性保障机制、具有较高的实时性、支持

混合关键性流量、匹配处理隔离保障机制以及便于系统增量升级;通过对比分析 FC, AFDX 和 TTE 3 种航电组网技术,确定了基于 TTE 实现 DIMA 网络互连的优势,并提出了相应的组网建议,为 DIMA 系统设计提供了理论指导与依据。

### 参 考 文 献

- [1] 熊华钢,王中华. 先进航空电子综合技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [2] 何锋. 航空电子系统综合调度理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2017.
- [3] WOLFIG R, JAKOVLJEVIC M. Distributed IMA and DO-297: architectural, communication and certification attributes[C]//IEEE/AIAA the 27th Digital Avionics Systems Conference, 2008:1E4-1-1E4-10.
- [4] WANG Y S, SAVAGE S, LEI H. The architecture of airborne datalink system in distributed integrated modular avionics[C]//IEEE Integrated Communications Navigation and Surveillance, 2016:2D2-1-2D2-8.
- [5] ANNICHOFER B, THIELECKE F. A systems architecting framework for optimal distributed integrated modular avionics architectures[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2015, 6(3):485-496.
- [6] ANNICHOFER B, REIF C, THIELECK F. Network topology optimization for distributed integrated modular avionics [C]//IEEE/AIAA the 33rd Digital Avionics Systems Conference(DASC), 2014:4A1-1-4A1-12.
- [7] ZHANG C, XIAO J L. Modeling and optimization in distributed integrated modular avionics [C]//IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference, 2013:2E1-1-2E1-12.
- [8] WANG T, GU Q F. Research on distributed integrated modular avionics system architecture design and implementation [C]//IEEE/AIAA the 32nd Digital Avionics Systems Conference, 2013:7D6-1-7D6-10.
- [9] 徐黎,庞瑞帆,张怡,等. 攻击直升飞机通信导航识别系统的分布式综合模块化航空电子设备综合技术研究[J]. 上海交通大学学报,2012,46(5):756-761.
- [10] HAN P J, ZHAI Z J, NIELSEN B, et al. A modeling framework for schedulability analysis of distributed avionics systems [C]//arXIV: Software Engineering, 2018, 2681(1):150-168.
- [11] HAN Y, HE F. Design of DIMA scheduling algorithm based on network partition integrating model [C]//IEEE/AIAA the 33rd Digital Avionics Systems Conference, 2014:5C2-1-5C2-9.
- [12] 蒋社稷,卢海涛,史志钊,等. 时间触发以太网在航空电子系统中的应用[J]. 电光与控制,2015,22(5):84-88.
- [13] 许晋瑞,李峭,赵露茜,等. DIMA 系统实时通信流量的时延分析方法[J]. 计算机工程与设计,2015,36(4):879-885.
- [14] LIU X M, CAO C, ZHAO X H, et al. Network performance analysis of Time-Triggered Ethernet based on network calculus for DIMA [C]//IEEE/AIAA the 34th Digital Avionics Systems Conference, 2015:10A3-1-10A3-7.
- [15] 屠晓杰,何锋,熊华钢,等. 分布式 IMA 的网络分区方法及其实时性能分析[J]. 航空学报,2013,34(1):112-120.
- [16] 阎芳,邢培培,赵长啸,等. 基于联合  $k/n(G)$  模型的 DIMA 系统可靠性建模与分析[J]. 航空学报,2018,39(6):190-198.
- [17] GU Q F, WANG G Q, WU J M, et al. Dynamic reconfiguration mechanism for distributed integrated modular avionics system[C]//The 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference,2015:3285.
- [18] ZHOU Q, GU T, HONG R, et al. An AADL-based design for dynamic reconfiguration of DIMA [C]//IEEE/AIAA the 32nd Digital Avionics Systems Conference, 2013:4C1-1-4C1-8.