

引用格式:杨军祥,田泽,湛文韬,等. 新一代分布式 IMA 核心系统技术研究[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(12): 36-41.  
[YANG J X, TIAN Z, ZHAN W T, et al. Research on new generation of distributed IMA core system technology [J]. Micro-  
eletronics & Computer, 2019, 36(12): 36-41.]

# 新一代分布式 IMA 核心系统技术研究

杨军祥, 田 泽, 湛文韬, 李成文, 王纯委, 杨 涛  
(中国航空工业集团 西安航空计算技术研究所, 陕西 西安 710068)

**摘 要:** 为提高飞机作战能力和性能, IMA 核心系统将应用于未来飞机的任务组织、功能集成和系统管理. 在 IMA 系统、机载计算研究基础上, 提出了一种以时间触发 FC(TTFC)网络为统一数据网络的分布式模块化综合航空电子系统(DMIA)架构模型, 结合 IMA2G 系统需求和组成特点分析, 进行了新一代 IMA 核心系统的多核处理、TTFC 网络、系统管理与重构关键技术及应用解决方案研究, 并通过原型系统研制和试验进行了验证. 结果表明: DMIA 架构模型及关键技术性能满足系统需求, 为新型飞机 IMA 系统研制奠定基础.

**关键词:** TTFC; 多核处理; IMA 核心系统; 综合核心处理; 分布式模块化综合航电系统架构

**中图分类号:** TP319      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000—7180(2019)12—0036—06

## Research on new generation of distributed IMA core system technology

YANG Jun-xiang, TIAN Ze, ZHAN Wen-tao , LI Cheng-wen,  
WANG Chun-wei, YANG Tiao

(Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** In order to improve the operational capability and performance of aircraft, IMA core system shall be applied in mission organization, functional integration and system management in future aircraft. Based on the studying of IMA system and airborne computing, a Distributed Modular Integrated Avionics (DMIA) architecture model is proposed which takes the Time-triggered FC(TTFC) network as unified airborne network. Combining with analysis of IMA2G requirement and core composition characteristics, The key technologies and applications solutions in IMA core system including mulit-core processing, Time-triggered FC network, system management and reconfiguration are also studied, and the system is verified by prototype system development and tests. The results show that the DMIA architecture model and key technology performance meet the system requirements, and can be taken as a reference for development of IMA system in the future aircraft.

**Key words:** TTFC, mulit-core processing, integrated core processing, Distributed Modular Integrated Avionics (DMIA)

### 1 引言

综合模块化航电系统(IMA)的出现解决了由于功能需求增加而导致的系统尺寸、重量、能耗以及

通信复杂度增加等问题, 克服了联合式体系结构的固有缺陷<sup>[1]</sup>; 实现了飞行器系统的功能综合, 资源共享及性能提升. 但随着飞机的功能数量持续增加和性能不断提升, 传统的 IMA 难以支撑, 如何推进未

来 IMA 系统能力提升,适应下一代机载计算机处理平台向着跨平台、智能化、网络化的方向发展<sup>[2]</sup>,成为了业界和学术界的一个研究热点,其目标是突破可支持全综合化的系统架构、跨平台复用的通用计算环境、多系统共享的自适应组件等关键技术. 欧盟在航电系统框架项目 7 中提出了 IMA2G 概念、可伸缩可重构电子平台及工具链 (SCALable & Reconfigurable Electronics Platforms and Tools, SCARLETT),目标是使核心处理模块(CPM)及平台软件能够更灵活更广泛地服务于飞行器功能需求<sup>[3]</sup>;美国国家航空航天局(NASA)在猎户座飞船电子系统中,为降低研发成本,提出了基于时间触发以太网(TTE)的分布式 IMA 设计<sup>[4]</sup>. 美国海军在下一代开放式航电系统架构探索中与工业界携手,定义了未来机载能力环境(Future Airborne Capability Environment, FACE)参考架构<sup>[5]</sup>,目标是使系统的功能软件及平台服务软件可跨平台复用,并在 C-130 座舱升级项目得到应用. 因此,IMA2G 已成为未来一种主流的航电系统架构,而 DIMA 则是一种属 IMA 范畴的重要改进型架构形式,是用于航空电子平台的最佳解决方案<sup>[6]</sup>.

然而 SCARLETT 架构是基于民机 IMA 理念提出的,在实时性及通信能力方面存在不足,不满足未来军用 IMA2G 应用需求;猎户座分布式 IMA,规模较小且其网络能力欠缺,难以成为主流 DIMA 架构;FACE 框架由于更关注于软件及其复用性,存在局限性问题. 因此为适应未来复杂综合化航电系统发展,本文在文献[4]、文献[5]、文献[6]综合分析基础上,提出了一种基于时间触发 FC(TTFC)网络互连的分布式模块化综合航电系统(DMIA)架构模型,并在此架构模型下进行了综合分析、关键技术提取、总体规划、应用解决方案研究,并进行了原型系统开发和验证,为未来 IMA2G 系统平台研制奠定基础.

## 2 基于 TTFC 网络的 DMIA 架构模型

更加开放、模块化、综合化、可升级可重构的分布式实时安全处理系统是未来 IMA 系统的发展趋势,IMA2G 系统将采用规范化接口、细粒度功能组件、高速高安全数据网络来构建系统,并通过系统配置、资源管理及平台服务来适应未来系统安全性、可维护性和可操作性等应用需求. 机载网络综合

分析表明,目前成功应用于 IMA 系统的数据网络有 FC 网络、AFDX 网络、TTE 以太网等,这 3 种

网络均不完全满足未来 IMA2G 系统需求,其中 FC 网络总体性能占优,可经过协议和冗余改造形成一种时间触发的双冗余星型交换 FC 网络. TTFC 网络主要由 FC 接口单元、交换机和物理链路组成,可为新一代 IMA2G 系统提供安全、实时、可靠的数据传输服务. 参照时下先进的 IMA2G 和 DIMA 架构设计思想,本文以 TTFC 网络为统一数据网络构建了一种全光互连的分布式模块化综合航电系统架构模型,其系统结构如图 1 所示.

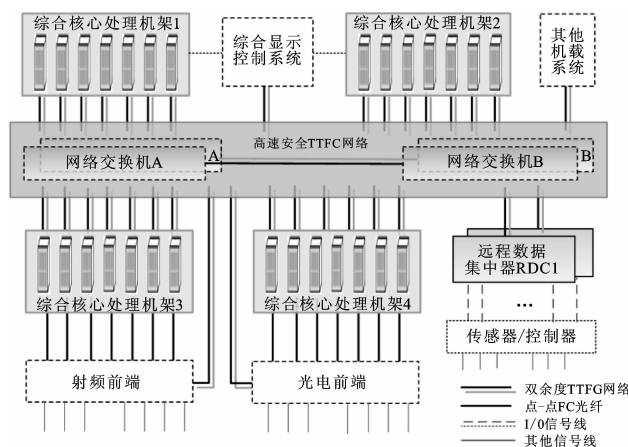


图 1 分布式模块化综合航电核心系统结构

该 IMA 核心系统包括 4 台综合核心处理 (ICP) 机架、1 个高速安全的双冗余 TTFC 网络系统和 2 台冗余式远程数据集中器(RDC). 每台 ICP 机架包含若干个 LRM 模块,为 IMA 核心系统提供可灵活配置的 I/O 与系统管理、数据处理、信号处理、图形处理、数据存储与管理、网络数据交换、电源转换与管理功能.

系统中所有模块、RDC 及其他机载系统,通过以交换机为中心的 TTFC 网络相连接构成一个级联式双子星型网络拓扑结构. 冗余交换机模块 A 与 A'、B 与 B' 互为冗余,分别位于 ICP1 和 ICP2 机架中,并在 ICP 机架内进行网络级联设计,其中网络交换机 A 与 A'、B 与 B' 分别连接到各模块、系统之 TTFC 网络接口单元的端口 A 和端口 B,形成天然隔离的两个独立的物理通道. 这种互连拓扑方法可以在很大程度上提高系统的数据共享、网络通信和故障安全能力,从而提高了系统的安全性和可靠性. 该系统架构模型,基于处理的模块化协同、交换机的星型级联设计,允许航电系统通过 ICP 模块或外置节点、网络交换机数量的不断增加使系统规模可持续扩展;同时提供灵活的 I/O 处理机制,使系统具备强实时响应及远程综合接口能力.

3 IMA 核心系统需求及规划

3.1 系统需求

IMA 核心系统<sup>[8]</sup>实质上是一种由多个分布式主机(模块)、I/O 接口资源组成的,并通过一种安全-关键通信系统连接的实时安全处理系统,为飞机提供通用计算环境和平台服务,主要包括高性能通用处理平台、统一数据网络、可配置 I/O 资源、系统管理与平台服务。

(1)高性能通用处理平台:IMA 系统要求 ICP 平台能够提供足够的计算/处理资源和处理性能,包括数据处理、信息处理、图形处理等模块,并可通过模块数量增加的方法来为未来系统扩展、升级及增长提供持续支持;所有模块应提供基于网络互联的可识别、可配置、可重构设计,支持系统功能“按需配置”;提供高性能处理性能,其中数据处理性能 100 GIPS、信号处理性能 2.5T flops,以及和混合关键应用支持能力,包括高速专用处理性能、高安全通用处理性能,对于高安全处理应在传统的分区管理基础上,进行多安全级别信息处理扩展,满足未来系统安全及信息安全需求。

(2)高速安全统一 TTFC 网络:IMA 系统对机载数据网络的要求是具备高带宽低延时传输性能,支持包括多种业务流传输、时间确定性传输、余度容错传输及高完整性检测在内的高安全网络通信,可支持多协议配置的基于光介质的统一数据网络,并可提供开放式交换架构、可配置、可扩展支持。

(3)可配置自适应 I/O 处理:未来 IMA 系统要求 ICP 平台提供灵活的 I/O 接口能力支持,以提高系统对关键 I/O 的实时响应和非关键接口综合处理能力。尽管传统的 IMA 采取了 RDC 综合化接口设计,实现了传感器/控制器就近安装,提高了系统的可靠性,但由于其 I/O 传输受到网络发送端轮询、网络调度、接收端查询等因素影响,其信号延时大,导致系统实时响应能力下降,这对于混合关键的实时处理系统是无法容忍的。因此系统设计应兼顾 2 种处理模式,即本地 I/O 处理与远程 I/O,并提供可配置、自适应能力支持。

(4)高效优质系统管理与平台服务:系统管理应提供可配置的层次化管理结构及系统初始化/关机、健康管理、故障管理、配置管理、网络管理等功能,其中 AC 级或 IA 级系统管理驻留于系统管理器中,负责全飞机或 IMA 系统的健康、故障及配置管理等,而 RE 级系统管理则分布于系统所有网络节点中,

负责本节点管理工作。系统管理不同层之间、同层功能之间遵循标准的接口协议;ICP 平台应提供优质平台服务,这是实现应用可移植可复用、资源透明化服务及系统管理的重要保证,平台服务应包括系统通信、系统管理、文件管理、数据库管理操作、系统监控等功能,并以软件中间件形式开发。

3.2 系统规划

IMA 核心系统是未来飞机任务组织、功能集成和系统管理的平台<sup>[9]</sup>,是决定作战效能的重要因素。如何从系统层面进行合理规划是系统设计的一个主要研究内容,参照 ARINC653 系统架构和 FACE 能力框架模型,结合 DMIA 航电架构模型,本文从功能、网络及物理三个层面进行系统构建和总体规划。

(1)构建三层式功能架构,包括了应用层、平台服务层及系统资源层,其功能架构如图 2 所示。应用层,是 IMA 系统的最高层,实现飞机的各种功能、任务及操作,主要由若干个与特定飞机相关的应用软件组成,其设计应与平台资源层解耦,并最大化实现可移植可复用;平台服务层,是系统的关键功能层,提供平台级服务、系统管理、资源控制和上下层接口功能,主要包括如文件系统、实时数据库、数据加/卸载等通用服务组件,特定平台服务、系统管理、通信服务等平台服务组件,以及操作系统组件,其核心是采用了中间件技术设计,使应用与平台服务、资源隔离,并遵循相关接口协议。资源层,系统功能的最底层,为 IMA 系统功能及安全运行提供一组通用的硬件模块、软件或算法组件、数据网络、接口等资源。

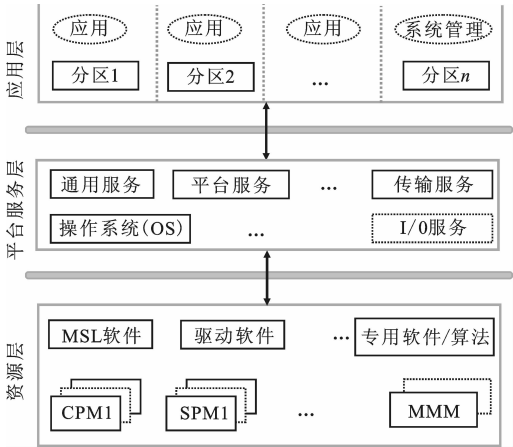


图 2 未来 IMA 系统的功能架构

(2)参照 FC 网络和 AFDX 网络模型,构建一种双星型双余度 TTFC 网络结构模型如图 3 所示,并规划两种网络,即主干 TTFC 和点-点 FC,提供主干网络传输服务和前端信号传输,其中 TTFC 网络可

为未来 IMA 系统互连通信提供所需的网络传输服务,可提供星形交换式网络拓扑、嵌入式网络接口单元(FIU)及 FC 介质. TTFC 协议是借鉴了 TTE 网络的 TT 传输思想、AFDX 的确定性传输管理和余度管理策略,在 FC 协议基础上增加了 TT 传输机制、VL 传输策略和高完整性协议,而形成的一种高速安全 TTFC 网络协议,该网络具有灵活性、实时性、安全性及可持续扩展能力.

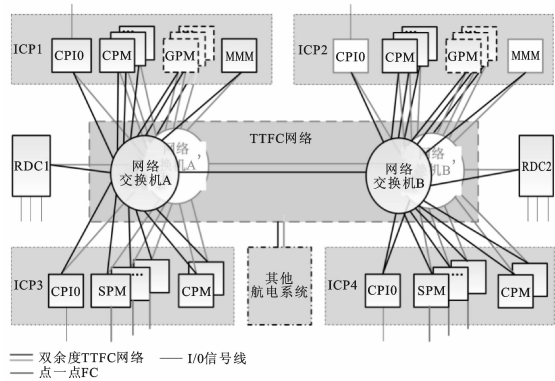


图 3 双余度星形 TTFC 网络架构

(3)基于 DMIA 航电系统模型,构建一种分布式模块化综合处理物理架构,提供计算、网络、I/O 资源物理载体. 在系统层面规划 3-4 台 ICP 机架和 7 种 ASAAC/SEM-E 标准模块,提供核心处理与 I/O、核心处理、信号处理、图形处理、系统管理等平台及服务;2 组双余度网络交换机、若干个嵌入式网络接口单元 FIU,其中网络交换机以模块化形式嵌入在 ICP 机架中;若干台 RDC,提供远程 I/O 接口功能.

4 关键技术及解决方案

4.1 多核处理技术

多核处理由于其资源共享和并行处理的特点,给未来机载综合处理系统设计带来了如不确定性、任务调度、共享管理、多核通信等新的阻碍和技术挑战. 这需要在系统层面给出合理的设计. 多核任务调度是系统设计的一个关注焦点,结合 ARINC653 分区管理和多核并行特征,构建一种任务绑定型多核处理应用模型,如图 4 所示. 多核平台中的所有核和任务由一个多核操作系统(MCOS)统一管理,使系统中的每个任务与特定的处理器核相“绑定”,并以主从式多核并行模式运行,即从管理视角看,所有从核的初始化/运行/重构等都受主核 C0 控制;从任务管理视角看,各核 Ci 又是按照私有的调度表并行

运行的. 多核分区调度由一个操作系统映像管理所有处理器核,各个处理器核上运行着不重叠的分区,并且独立维护各自的私有调度表<sup>[10]</sup>;分区内进程调度则沿用单核分区 OS 的调度策略. 该方案既具确定性,又支持应用组件的多核处理平台移植.

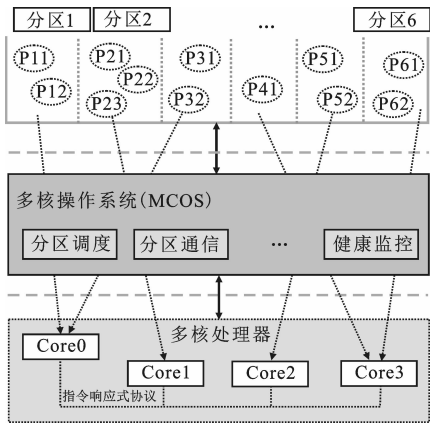


图 4 BMP 式分区并行模型

多核处理平台又一亟待解决的关键技术是共享资源管理,主要包括共享 Cache、共享内存、共享 I/O、共享网络等,其中对于共享 Cache/内存的数据一致性问题,可借助 CPU 硬件机制及 MCOS 保护机制解决;对共享网络、I/O 资源管理,常见解决途径有 I/O 分区、虚拟分区两种机制,其中前者需在多核 CPU 中设置一个 I/O 分区,由其统一管理所有内核的消息收/发和中转服务,其特点是流程确定、实时性开销偏大;后者要求在各核分区中设置一个传输服务段 TSS,系统通信及 I/O 收发依赖 MCOS 仲裁管理,其优点是传输效率高,缺点是要对 MCOS 扩展升级. 基于上述分析,本文建议在满足系统实时性前提条件下采用 I/O 分区机制.

多核处理平台还需重点解决多核间、核心 OS 与核内分区间的通信扩展问题. 核间通信提供核间中断、跨核调用、分区级核间通信方式,至于分区级核间通信类似单核平台的分区间通信,不再赘述;系统设计应提供核心 OS 与核内分区之间的快速通信机制(如虚中断等),确保关键事件的实时响应能力. 综上所述,多核处理的关注焦点转向了 MCOS 工程应用问题,目前国外 WindRiver 公司推出了的多核板 VxWorks653 v3.0,国内航空计算所开发了多核版原型系统,为多核处理应用奠定了基础.

4.2 基于时间触发的 FC 网络技术

常见的 IMA 系统主流机载网络,如 AFDX 网络、FC 网络等. 表 1 综合比较了 4 种机载网络,其中 TTFC 性能最优,其余 3 种数据网络或因带宽不足、

安全性欠缺,或因多业务流传输支持不够都不适宜用作下一代 IMA 系统的统一数据网络,因此需对现行 FC 网络协议、传输机制、管理策略进行综合性改良,以满足未来 IMA 系统对数据网络的高带宽、确定性、安全性、容错能力需求.经多层面技术论证,本文提出一种基于时间触发的 FC 网络解决方案,即在 FC 网络基础上引入 TT 传输机制、VL 流量管制策略、余度控制策略和 EDE 高完整性概念,最终形成一种高速高安全的双余度 TTFC 网络.

表 1 几种机载数据网络性能比较表

| 性能/类别 | AFDX 网络      | FC 网络        | TT 网络 | TTFC 网络      | 比较基本条件               |
|-------|--------------|--------------|-------|--------------|----------------------|
| 确定性   | 中+           | 中            | 高     | 高            | 带宽分配、时间触发            |
| 安全性   | 中+           | 中            | 中     | 高            | 传输介质、安全管理、配置 EDE 性协议 |
| 实时性   | 低            | 中            | 高     | 高            | 强实时/实时、低延时           |
| 可靠性   | 低            | 中+           | 中+    | 高            | 网络传输抗干扰能力            |
| 容错性   | 中+           | 低            | 强     | 强            | 余度支持、传输容错            |
| 可扩展性  | 中            | 高            | 中     | 高            | 规模增加、带宽提升            |
| 流量控制  | 高            | 低            | 中+    | 高            | VL 虚链路带宽机制           |
| 最大带宽  | 100Mbps      | 4Gbps        | 1Gbps | 4Gbps        | 网络的最大传输速率            |
| 有效范围  | 100m         | 500m         | —     | 500m         | 网络有效传输距离             |
| 拓扑结构  | 点一点、<br>星形交换 | 点一点、<br>星形交换 | 星形交换  | 点一点、<br>星形交换 | 网络连接形式及结构            |

参照 ISO 提供的 OSI 参考模型,结合 FC 网络研究,构建五层式 TTFC 网络系统结构,如图 5 所示.具体 FC 改良解决方案如下:(1)物理层,保留物理接口 FC-0 协议、扩展双余度网络拓扑和接口;(2)数据链路层,保留 FC-1 协议的数据编码、信息收发、网络同步等链路控制功能;借鉴 TTE 网络的多业务流传输机制,进行多业务流传输扩展,支持 TT 流、速率受限(RC)流和尽力传输(BE)流三种类型的数据传输,满足未来 IMA 系统的传输需求及实时性;借鉴 AFDX 网络的时间确定性机制、余度控制策略,在 FC-2 协议上增加基于 VL 带宽分配、流量控制机制和余度管理功能,提高网络的确定性、容错能力;(3)网络层,删除 FC-3 公共服务功能,简化网络设计;(4)传输层,精简 FC-4 协议,保留 FC-AE-ASM 等可用协议;引入数据高完整性概念,增添故障编码检测(EDE)功能,并结合其他各层,实现网络传输的数据完整性(源-、顺序-、时间-、位-)检测,进而提高网络的安全性;(5)应用层,提供统一的应用交互接口及网络通信服务,并使传输过程对应用透明.

4.3 系统管理与重构技术

随着未来 IMA 系统的规模不断扩展、功能数量持续增加,系统变得愈加复杂和庞大,引入系统管理

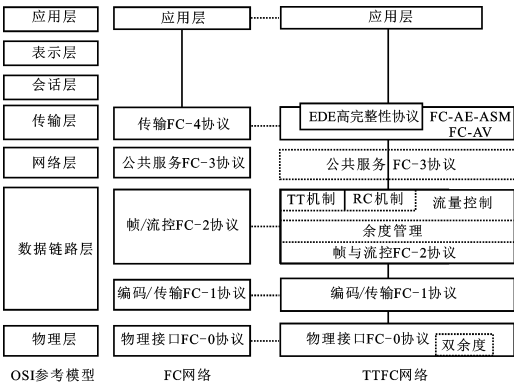


图 5 TTFC 网络结构模型

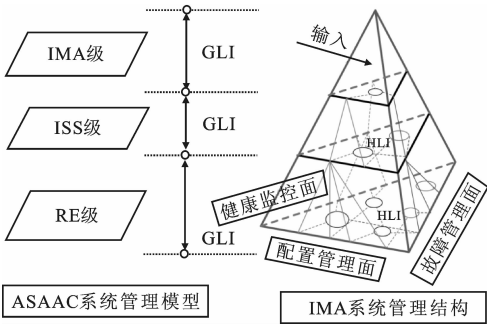


图 6 分层式三面锥体系统管理结构

概念,参照 ASAAC 标准的三层式参考模型,结合系统管理需求,构建分层式三面锥体系统管理模型,如图 6 所示.该模型层次锥体底面构成系统管理的三个层级,即系统(IMA)级,SM 最高层,负责整个 IMA 系统的监视和控制功能,系统仅此一个;综合子系统(ISS)级,SM 中间层,负责 IMA 系统内部各子系统的监视和控制功能;资源元素(RE)级,系统管理的最低层,负责本 RE 节点(模块)的监视和控制功能,驻留于每一模块中.该模型的三个侧面分别构成 IMA 系统的健康监控面、故障管理面及配置管理面.对于涉及多层协同执行的系统管理,则通过相应的锥侧面在不同层级之间进行垂直操作.同层中的 SM 功能各自并行运行,为其 RE 或 ISS 提供正常运行保证.仅当本层无法处理时,才进行多层级协同操作或信息交互,多层协作可为整个 AC 提供正常运行保证.为了组件通用、可移植期间,同层组件之间、不同层级之间的信息交互分别采用规范化接口协议.该模型可为 IMA 系统提供主动式 SM 和被动式 SM 两种技术途径,其中主动式 SM,根据需求变化,而由 IMA 层发起,并逐层向下分解实施,如模式改变等;被动式 SM,根据状态变化,由 RE 或 ISS 层发起,逐层上报和处理,直至最高层,如故障

重构等。

系统重构是 IMA 系统为适应需求改变或状态变化,而进行的一系列自适应控制或处理过程,是系统管理的实例化操作。基于飞机的安全性、任务可靠性需求分析,综合 IMA2G 系统研究,结合 DMIA 架构模型,构建了 3 种系统重构模型,具体解决思路如下:

(1)“1+1”热备份重构,对安全/任务-关键功能,提供双冗余容错结构模型,即 2 个模块以双余度或热备份方式同步运行,当一个故障时,另一模块则通过系统重构进入全状态运行。该重构模型具有实时性强、冗余粒度小特点,最佳适合空中使用。

(2)“N+1”温备份重构,是针对 ISS 内的 N 个重要功能提供 1 个公用备份模块的容错结构模型,备份模块随系统加电,但处于待工作状态。当一个功能组件故障时,系统将提供备份引导运行、备份加载运行两种重构机制,其中前者重构时间较短,但需要大存储容量支持;后者重构灵活,但耗费时间长,且需要网络数据加载支持。这种重构模型容错灵活,资源需求少,适合空中使用。

(3)冷备份重构,是针对全 IMA 系统的备份资源,处于待加电状态,当系统热备份、温备份资源耗尽,仍不满足系统的安全性、任务可靠性需求时,而提供的系统备份资源。该重构模型通过数据加载进行的,其目标是解决系统二次备份、非计划性维修等问题,由重构时间甚大,不适合空中使用。

## 5 验证与分析

参照图 1 搭建了一种 IMA 核心系统的综合验证环境,分别在平台级、网络级和系统级完成 BMP 式多核处理、平台级服务、VLFC/TTFC 机制与网络传输、系统管理与重构等关键技术的原理验证及性能测试。验证结果表明关键技术满足需求,重构时间偏大。结果分析:由于系统重构涉及了 3 个层面的健康监控(故障注入)、故障管理(隔离、上报、处理)、配置管理的交互与操作,处理过程复杂耗时大,同时受到系统任务调度、网络调度、应答式交互等待等因素影响,这是导致系统重构时间偏大的主因;其次是重构处理过于流程化,欠缺响应等级变通支持,后续应对热备份重构模型进行优化改进。

## 6 结束语

在 IMA2G、机载处理平台综合研究基础上,介

绍了一种以 TTFC 网络为统一数据网络的分布式模块化综合航电系统架构模型,基于该模型进行了新一代 IMA 核心系统需求分析、关键技术提取及系统规划,重点剖析和介绍了高性能多核处理、时间触发 FC 网络、系统管理与重构关键技术及应用解决方案,开展了 DMIA 原型系统研制与验证,验证结果满足需求,为新型飞机 IMA 核心系统研制奠定基础。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 牛文生 王乐. 机载计算技术的新进展[J]. 航空科学技术(首席讲坛), 2012, 4: 1-4.
- [3] RUDOLF FUCHSEN. Preparing The Next Generation Of IMA: A New Technology For The Scarlett Program [C]. 28th Digital Avionics Systems Conference, 2009, 978-980.
- [4] 程博文,刘伟伟,何熊文,等. 猎户座飞船电子系统设计特点分析与启示[J]. 航天器工程, 2016, 25(4): 102-107.
- [5] The Open Group, Technical Standard for Future Airborne Capability Environment (FACE), Edition 2. 1 [S]. Burlington: The Open Group, 2014.
- [6] ROLAND WOLFIG. A Distributed Platform For Integrated Modular Avionics [S]. Saarbrücken: Sudwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, 2008.
- [7] 杨军祥,李成文,杨涛,等. 综合模块化航空电子核心系统技术研究[J]. 航空计算技术, 2017, 47(3): 105-111.
- [8] 王国庆,谷青范,王森,等. 新一代综合化航空电子系统构架技术研究[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1473-1486.
- [9] 李运喜,何翔. 符合 ARINC653 的多核操作系统任务调度研究[J]. 航空计算技术, 2017, 47(5): 108-111.

## 作者简介:

**杨军祥** 男, (1963-), 硕士, 研究员. 研究方向为综合模块化航电核心处理平台、综合任务管理系统技术。

**田 泽** 男, (1965-), 博士, 研究员. 研究方向为 SOC 设计方法学、航空专用集成电路设计。

**湛文韬(通讯作者)** 男, (1984-), 硕士, 高级工程师. 研究方向为综合模块化航电核心处理平台。

E-mail: zhanwt1984@qq.com