

综合模块化航空电子系统架构设计技术研究

王雪婷

航空工业沈阳飞机工业（集团）有限公司，辽宁 沈阳 110850

[摘要]文中探讨了综合模块化航空电子系统（IMA）的关键技术应用，包括 TTEthernet 的整合与优化，多核处理器的动态分配，以及 AFDX 网络的应用。通过 TTEthernet，系统能够提供高实时性和可靠性，通过多核处理器，实施动态资源分配策略以提高性能和可预测性，而 AFDX 网络则强化了数据传输的安全性和健壮性。这些技术的整合将为未来航空电子系统带来更高的智能化、安全性和性能，为飞行员和乘客提供更出色的飞行体验。

[关键词]航空电子系统；架构设计；模块化

DOI: 10.33142/sca.v6i8.9824

中图分类号: V243

文献标识码: A

Research on Integrated Modular Avionics System Architecture Design Technology

WANG Xueting

Aviation Industry Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110850, China

Abstract: The article explores the key technical applications of Integrated Modular Avionics Systems (IMA), including the integration and optimization of TTEthernet, dynamic allocation of multi-core processors, and the application of AFDX networks. Through TTEthernet, the system can provide high real-time performance and reliability. Through multi-core processors, dynamic resource allocation strategies are implemented to improve performance and predictability, while AFDX networks enhance the security and robustness of data transmission. The integration of these technologies will bring higher intelligence, safety, and performance to future avionics systems, providing pilots and passengers with a better flight experience.

Keywords: avionics system; architecture design; modularization

随着科技的不断演进，航空电子系统的设计与发展也正经历着一场革命性的变革。综合模块化航空电子系统（IMA）作为现代飞机的大脑与神经中枢，扮演着关键的角色。在未来，航空电子系统将迎来更高的要求，包括实时性、可靠性、性能、安全性和智能化。文章将探讨下一代 IMA 系统的关键技术应用，包括时间触发通信、多核处理器、AFDX 网络等，以揭示这一领域的前沿发展，以及它们如何塑造着未来航空业的飞行体验和安全性。

1 IMA 系统架构的设计需求

1.1 实时性和可靠性需求

在综合模块化航空电子系统的设计中，实时性和可靠性需求占据了至关重要的地位。这是因为航空应用领域对任务的低延迟、高精度控制以及数据传输的要求非常严格。

①高实时性需求：航空电子系统通常包括飞行控制、导航、通信等任务，这些任务需要在极短的时间内作出响应。例如，飞行控制系统必须实时监测飞机状态，计算并调整飞机姿态，以确保飞行安全。任何延迟都可能导致严重的后果。为了满足这一需求，综合模块化系统采用时间触发通信技术，这种技术要求整个系统中的所有节点进行时间同步，确保数据交换在预定的时间片内进行，高优先级任务不受其他任务的干扰，从而实现高度的实时性。

②实时调度分析：为了保证任务能够在严格的时限内

完成，综合模块化系统需要进行实时调度分析。这包括对系统中各任务的执行时间和优先级进行评估，以确保高优先级任务能够准时执行，而不会受到低优先级任务的干扰。这种实时调度分析在航空电子系统中尤为重要，因为其中的任务需要在微秒甚至纳秒级的时间尺度内运行，如飞行控制系统的任务^[1]。

1.2 资源管理和性能提升

资源管理和性能提升在航空电子系统的设计中扮演着至关重要的角色。这两个方面的需求都源于对更高性能处理器的迫切需求以满足不断增加的计算任务，同时需要有效的资源管理和分配来避免资源争夺和不可预测性。

①虚拟化技术和资源灵活性：虚拟化技术为航空电子系统带来了资源管理的灵活性，可以更好地利用处理器和内存等硬件资源，提高系统的效率。通过虚拟化，多个应用程序或任务可以在同一硬件平台上运行，实现资源的共享和隔离。但是虚拟化也引入了一些挑战，尤其是在实时系统中。虚拟机监管层可能无法有效地管理上层软件，导致实时性能下降。此外，虚拟化技术需要解决资源分配的挑战，确保安全关键任务能够获得足够的计算资源，以保证高性能和可靠性。

②实时性和资源分配挑战：在多核处理器系统中，实时性仍然是一个关键问题。因为多核系统共享底层资源，

任务之间可能存在竞争,而且这种竞争的行为复杂多样,难以预测。因此实现高性能的同时确保实时任务的低延迟执行是一个挑战。为了解决这个问题,需要开发实时调度分析技术,评估不同任务的执行时间和优先级,并制定相应的调度策略,以确保实时任务能够准时执行。

1.3 安全性与多级隔离

在综合模块化航空电子系统的设计中,安全性是一个至关重要的考虑因素,需要建立多级安全结构以确保系统的稳定和可信性。这种多级安全结构涵盖了多个层面的隔离,旨在确保不同安全级别的任务和信息之间的互不干扰。

①多重独立安全级别:综合模块化系统设计需要引入多重独立安全级别的概念。不同的任务和地被分类为不同的安全级别,并在系统中得到隔离。这种策略可以防止不同安全级别的任务之间产生干扰,确保敏感信息不会被非授权地部分访问。通过精心规划和分配,多重独立安全级别可以建立更加可靠的安全环境。

②安全性策略的实施:多级隔离的设计要求综合考虑多个安全性策略。首先,数据隔离确保分区间资源无法相互访问,防止信息泄漏。其次,周期处理保证每个分区的任务在预定时间内执行,减少任务间干扰。最后,故障隔离策略确保系统内部的故障不会传播,从而提高整体系统的可靠性。

2 下一代 IMA 系统架构设计技术

2.1 引入量子计算技术

引入量子计算技术是下一代综合模块化航空电子系统架构的重要趋势。随着飞机系统复杂性的不断增加,需要更强大的计算能力来支持实时响应和高度计算密集型的任务。量子计算技术的引入将为航空电子系统带来巨大的变革。首先,量子计算的并行性是其突出特点之一。经典计算机使用比特作为信息单位,而量子计算机使用量子比特(qubit)。量子比特具有多重状态,因此能够在同一时间处理多种计算路径。对于需要处理大量数据的应用,如实时飞行数据分析和复杂算法求解,量子计算机将比传统计算机更加高效。这意味着飞行员和地面控制中心可以更快地获取并分析飞行数据,以做出更精确的决策。其次,量子计算机的计算能力远远超越了传统计算机。对于需要高性能处理的任务,如飞行控制、飞机自主决策和环境感知,量子计算机能够以前所未有的速度执行复杂的计算。这将使飞机能够更快地适应变化的环境条件,提高系统的响应速度和可靠性。

2.2 语音与自然语言处理整合

语音与自然语言处理的更深度整合将成为下一代 IMA 架构的关键趋势。这一整合不仅将改善用户体验,还将提高系统的智能性和自动化水平,特别是在飞行员支持和飞行数据管理方面。首先,语音识别技术的应用将使飞行员能够更自然地与飞机系统进行交互。飞行员可以通过

语音命令执行各种任务,从调整飞行参数到获取导航信息,而无须依赖繁琐的物理界面。这不仅提高了操作效率,还减轻了飞行员的工作负担,使其能够更专注于飞行任务。其次,自然语言处理技术的整合将使系统能够理解和处理飞行员的自由文本输入或口头提问。飞行员可以用自然语言提出查询,系统能够迅速解释这些请求并提供相应的响应。例如,飞行员可以简单询问:“当前飞行高度多少?”而系统会自动检索飞行计划并提供相关信息。这种智能的自然语言交互将极大地简化了信息检索和任务执行^[2]。

2.3 强化自主决策能力

未来的 IMA 系统将积极追求强化自主决策能力,通过机器学习和人工智能技术的广泛应用来实现这一目标。这一趋势将为飞机操作和管理带来重大改进,提高了飞行的效率和安全性。首先,机器学习技术可以用于分析大量的飞机状态和环境数据。IMA 系统将不仅能够监测基本的飞机参数,还能够实时收集和分析气象数据、航路信息、空中交通等外部因素,以更全面的方式理解飞机所处的情境。这些数据将被用于预测可能出现的问题,例如气象突变或交通拥堵,从而提前采取必要的措施。其次,人工智能算法将能够为飞行员提供更智能的建议和决策支持。例如,在复杂的天气条件下,系统可以根据实时气象数据和飞机性能特点提供最佳的航线和高度建议,以降低燃油消耗和提高飞行效率。在突发情况下,系统可以通过分析各种情景和应对策略,为飞行员提供快速的决策建议,有助于处理不断变化的局势。

2.4 区块链应用于数据安全

区块链技术作为一种去中心化、不可篡改的分布式账本系统,有望在航空领域应用于数据的安全性和完整性保障,特别是在飞行数据记录和通信中。首先,区块链可以确保数据的不可篡改性。在飞行数据记录方面,航空公司和监管机构需要保证飞行数据的完整性,以进行事故调查和性能分析。传统的中心化数据库容易受到黑客攻击或内部篡改的威胁,而区块链技术通过去中心化的数据存储和加密机制,将每一笔数据都记录在区块中,并形成链式连接。这意味着一旦数据被记录,就无法在后续的区块中进行修改,从而确保了数据的不可篡改性。同时,区块链可以提供数据的分布式存储。在飞行数据通信方面,数据的传输通常涉及多个地点和设备,因此数据的安全传输至关重要。区块链网络中的每个节点都拥有数据的完整副本,而不是集中存储在单一服务器上。这意味着即使某个节点遭受攻击或故障,系统仍然可以继续运行,从而提高了数据的可用性和冗余性。

3 下一代 IMA 系统架构关键技术措施

3.1 TTEthernet 的整合与优化

在下一代 IMA 系统的设计中,整合和优化 TTEthernet (时间触发以太网)技术具有重要意义,以实现高实时性

和可靠性。TTEthernet 作为一项关键技术,为航空电子系统提供了时间触发通信、速度受限和尽力发送等多重服务类型,然而其最大性能的实现需要针对特定应用场景进行定制化配置。

一是针对时间触发通信(TT)消息,系统必须确保严格的时间同步,以实现节点之间精确的数据交换。这可通过在整个网络拓扑中建立一致的时钟同步机制来实现,从而实现高度同步的消息传递。而在速度受限(RC)消息方面,应根据实时性要求不那么严格的任务,合理分配带宽资源,以避免资源争夺和时延问题。尽力发送(BE)消息则应在保障高优先级任务的前提下,合理利用剩余带宽,以满足对传输质量要求较低的应用。二是定制化配置是确保TTEthernet性能的关键。针对不同应用场景,系统应根据任务的实时性和可靠性需求,灵活配置消息的优先级和调度机制。例如,对于需要高度精确的飞行控制任务,时间触发通信将优先考虑,而对于非关键性任务,速度受限或尽力发送消息可能更合适。此外网络拓扑的设计也需要结合具体需求,确保分区、节点之间的通信满足实时性和可靠性要求^[3]。

3.2 多核处理器的动态分配

在下一代IMA系统的架构设计中,多核处理器的动态分配将扮演关键角色。这一技术是为了充分发挥多核处理器的性能潜力,同时确保关键任务的低延迟和高可预测性。以下是多核处理器动态分配的重要方面:

一是实时调度分析是确保多核处理器高性能的基础。航空电子系统对任务的低延迟有严格的要求,因此必须在任务分配和执行上进行实时分析。这包括确定任务的优先级,为其分配核心,以及在运行时对任务进行调度,以确保关键任务及时执行。实时调度分析需要考虑任务的截止时间、执行时间和依赖关系等因素,以创建一个有效的任务调度计划。二是任务并行化技术是实现多核处理器性能提升的关键。在多核处理器系统中,任务可以并行执行,但必须确保资源共享和竞争不会引发不可预测性。任务并行化技术涉及将大型任务分解为更小的子任务,并确定这些子任务的执行顺序和依赖关系。通过有效的任务并行化,系统可以充分利用多核处理器的计算能力,加速任务完成速度,同时保持任务之间的严格隔离,以确保安全性和可靠性。三是动态资源分配还需要适应系统工作负载的变化。航空电子系统可能会面临不同的任务和应用需求,因此需要能够动态地重新分配资源以满足不同情况下的性能要求。这可能涉及任务的增加或减少,以及任务之间的资源竞争动态变化的应对。系统必须能够智能地识别和适应这些变化,以保持性能的一致性和可靠性。

3.3 AFDX 的发展应用

AFDX(Avionics Full-Duplex Switched Ethernet)的应用在下一代IMA系统设计中扮演着至关重要的角色。AFDX是一种基于以太网通信协议的航空电子系统网络技术,它经过改进以满足航空领域对高性能、实时性和可靠性的严格要求。以下是AFDX技术的关键应用和优势:

一是AFDX提供了相对更高的传输速率。其传输速率可达每秒100兆比特,这对于处理大量数据和高带宽需求的航空应用至关重要。在现代飞行中,需要传输大量的数据,包括飞机状态、传感器数据、通信信息等。AFDX的高传输速率确保了数据能够快速、可靠地在各个系统之间传输,满足了实时性要求。二是AFDX基于IEEE 802.3和TCP协议,构建了一个确定性网络。这意味着数据传输是可控的,能够在规定的时间内完成,而不会受到网络拥塞或随机延迟的影响。对于航空电子系统而言,特别是关键任务,如飞行控制系统,这种确定性至关重要。AFDX通过强制实时传输策略,确保数据按照预定的时间表传送,降低了不可预测性,提高了系统的可靠性。三是AFDX还具有内建的健壮性和低延迟。健壮性体现在其能够容忍网络中的故障,例如链路中断或设备故障,而不会导致系统崩溃。这对于航空电子系统的安全至关重要,因为在飞行中不能容忍系统故障。同时AFDX的低延迟确保了数据传输的即时性,使得飞行员和地面控制人员能够快速获取关键信息并做出响应^[3]。

4 结语

综合模块化航空电子系统(IMA)的未来充满了前所未有的挑战与机遇。通过整合创新技术,如TTEthernet、多核处理器、语音识别、区块链和机器学习,下一代IMA系统将实现更高的实时性、可靠性、智能化和安全性。这不仅将提高飞行安全和效率,还将推动航空行业朝着更先进、可持续的未来迈进。在不断演进的技术背后,始终是为了确保飞行员和乘客的安全与舒适。

[参考文献]

- [1]郝玉锴,戴小氏,崔西宁.综合化模块化航空电子架构航电系统飞行管理模块的设计[J].科学技术与工程,2021,21(16):6923-6929.
- [2]马莹莹,刘青春,胡飞等.下一代综合模块化航空电子系统关键技术研究[J].航空电子技术,2019,50(4):1-9.
- [3]丁明.综合模块化航空电子系统重构与验证方法研究[D].西安:西北大学,2019.

作者简介:王雪婷(1987—),女,籍贯黑龙江,航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司,主要从事无线电、仿真、航空电子方向研究。