

分布式航电系统架构研究

董 洋

四川九洲电器集团有限责任公司 四川 绵阳 621000

摘 要：本文围绕分布式航电系统架构展开研究，首先梳理其演进历程，历经集中式到智能化、自适应化架构的转变，并剖析了模块化、分布式计算等核心特征。深入探讨了分布式计算与资源管理、实时通信与网络架构等关键技术。同时指出系统在实时性、复杂度、能耗、安全性等方面面临的挑战。最后提出基于动态优先级调度、分层异构网络、轻量化与集成化设计、智能化故障管理与防御等优化策略，旨在提升系统性能、保障飞行安全，为分布式航电系统发展提供参考。

关键词：分布式系统；航电系统；架构设计

1 分布式航电系统架构的演进与核心特征

1.1 架构演进历程

分布式航电系统架构随航空技术发展而演变。初期采用集中式架构，适用于功能简单时期。但随着航空领域发展，集中式架构因扩展性差、可靠性低及维护困难而受限。因此，分布式架构兴起，初期为总线式结构，提高了扩展性与灵活性，但受总线带宽限制。随后，随着网络技术进步，航电系统转向网络化架构，基于高速

以太网等技术，大幅提升数据传输速率。分布式计算技术的应用减轻了中央处理器负担。近年来，受人工智能、大数据等技术推动，航电系统向智能化、自适应化迈进，能自动感知环境变化并动态分配资源。未来，分布式综合化架构（二级架构）将成为趋势，实现紧密耦合、分布式运算、算力按需分配及功能与硬件解耦，以适应多样化航空需求。

表1 分布式航电系统架构演进历程及特点

年代	架构类型	架构描述	优势	局限
1950s	分离式架构	雷达、通信、导航等模块独立运行，硬件专用	-	缺乏资源共享，各模块独立运作，无法协同，硬件专用导致成本高、灵活性差
1970s	联合式架构	通过1553B总线实现子系统互联，显控初步综合	子系统可互联，信息交互加强，显控初步综合提升操作便利性	总线带宽有限，难以满足大量数据传输需求，扩展性仍不足
1990s	综合化模块化架构（IMA）	以F-22的宝石柱架构为代表，实现硬件模块化，传感器数据融合	硬件模块化便于维护与升级，传感器数据融合提高决策准确性	系统复杂度增加，开发与维护难度上升
2010s-至今	先进综合化架构（集中式综合化架构，如J20、F-35的宝石台架构）	射频传感器与后端数据深度融合	数据深度融合提升系统性能，对复杂任务处理能力增强	对硬件性能要求高，成本高昂
未来	分布式综合化架构（二级架构）	孔径/射频/数字化紧耦合、分布式运算、算力资源按需分配，功能与硬件解耦	高度灵活，适应复杂多变任务，资源利用高效	技术实现难度大，对研发能力要求极高

1.2 核心特征

分布式航电系统架构具备多个显著的核心特征。

（1）射频与天线紧耦合，数字化前移：通过将射频与天线紧密耦合，减少信号传输损耗，提高信号处理效率。同时，数字化前移使得数据在源头即可进行数字化处理，降低模拟信号传输过程中的干扰，提升数据质量^[1]。

（2）大带宽、低延时、高同步通信网络：航电系统对数

据传输的实时性和准确性要求极高。大带宽确保大量数据能够快速传输，低延时保证数据及时到达目的地，高同步则保证各模块之间数据交互的一致性，从而实现系统的高效协同工作。例如，在飞行过程中，飞行控制数据、传感器数据等需要实时准确地传输，该通信网络能够满足这一严苛要求。（3）分布式运算，容器操作系统，功能易升级，功能敏捷重构：分布式运算使系统能

够将复杂的计算任务分解为多个子任务，分配到不同的计算节点（功能模块）进行处理，充分利用各节点的计算资源，提高计算效率。容器操作系统为各功能模块提供了独立的运行环境，使得功能升级和重构更加便捷。当需要新增或升级某项功能时，只需对相应的容器进行操作，而不会影响整个系统的其他部分，实现了功能的敏捷重构，快速响应航空技术发展和任务需求的变化。

（4）高度通用化射频信道：采用高度通用化的射频信道设计，能够兼容多种不同类型的射频设备和信号，减少了硬件的种类和复杂性，提高了系统的通用性和可维护性。例如，在应对不同频段的通信、雷达等信号时，通用化射频信道能够灵活适配，降低了设备成本和维护难度。

2 分布式航电系统架构设计的关键技术

2.1 大带宽、低延时、高时间同步数据网络

大带宽、低延时、高时间同步的数据网络是分布式航电系统正常运行的基础。航电系统各功能模块需实时大量交换数据，如飞行控制模块依赖传感器数据快速计算控制指令。大带宽确保海量数据短时传输，避免拥堵；低延时让数据快速送达，减少处理延迟；高时间同步保证数据时间一致，防止系统错误。时间触发以太网（TTE）技术广泛应用，能精确规划数据传输时刻，实现确定性传输，满足系统对实时性和可靠性的要求。网络拓扑采用混合架构，核心模块用星型结构保障高效稳定传输，次要模块用总线型或环型结构，在保证性能的同时降低成本和复杂度。

2.2 分布式运算资源的管理与敏捷重构

分布式运算资源管理与敏捷重构是提升航电系统性能的关键。航电运行中有复杂数据处理任务，分布式运算将其分解为子任务，分配给不同计算节点并行处理，提高计算效率。资源管理技术统一调配计算、存储、通信等资源，依据任务需求和优先级动态分配调整。如遇紧急情况，优先为关键任务分配资源。敏捷重构技术能在模块故障或功能升级时，快速重新配置系统和分配任务。若计算模块故障，可迅速将任务转移至其他模块，保障系统不间断运行；功能升级时，能快速调整资源分配，使新功能顺利融入，实现系统快速迭代优化^[2]。

2.3 高集成通用化射频信道技术

高集成通用化射频信道技术对分布式航电系统意义重大。传统航电射频信道针对特定功能设计，硬件种类多、结构复杂、维护成本高。该技术将多种射频功能集成在一个信道模块，采用通用化设计，适应不同射频信号和应用场景。运用先进集成电路工艺，把射频收发、调制解调等功能高度集成，减小硬件体积重量。通用化

设计使其兼容不同频段、协议的信号，如通信、雷达等，减少硬件种类数量，降低系统复杂度，提高通用性和可维护性。系统功能扩展或升级时，只需更换或升级相应模块，无需大规模改造，提升系统灵活性和可扩展性。

3 分布式航电系统架构面临的挑战

3.1 实时性与确定性保障

尽管分布式航电系统架构在实时通信和资源管理方面采取了一系列技术措施，但随着航电系统功能的不断增加和数据量的急剧增长，实时性和确定性的保障仍然面临着巨大挑战。一方面，高速、复杂的数据传输和处理需要更高的网络带宽和计算能力，如何确保数据在传输和处理过程中不出现延迟和丢失，是实时性保障的关键问题。另一方面，在多任务并发的情况下，如何合理分配资源，保证各个任务都能在规定时间内完成，实现系统的确定性运行，也是一个亟待解决的问题。

3.2 系统复杂度与可维护性

分布式航电系统架构的模块化和网络化设计使得系统功能更加强大和灵活，但同时也带来了系统复杂度的急剧增加。大量的功能模块、复杂的网络拓扑结构和多样化的通信协议，使得系统的设计、开发和测试难度加大。而且，系统复杂度的增加也给可维护性带来了挑战。当系统出现故障时，由于涉及多个模块和复杂的交互关系，故障诊断和定位变得更加困难，维修时间和成本也相应增加。如何降低系统复杂度，提高系统的可维护性，是分布式航电系统架构发展面临的重要问题。

3.3 能耗与重量控制

在航空领域，能耗和重量是两个非常重要的指标。分布式航电系统架构中大量的计算模块、通信设备和电源系统，会导致系统能耗和重量的增加。高能耗不仅会增加飞机的运营成本，还会对飞机的续航能力产生不利影响。而重量的增加则会降低飞机的性能，如飞行速度、载重量等^[3]。因此，如何在保证系统性能的前提下，降低能耗和重量，是分布式航电系统架构设计需要考虑的关键因素之一。

3.4 安全性与抗干扰能力

随着航空技术的不断发展，航电系统面临着越来越多的安全威胁和干扰源。例如，电磁干扰、网络攻击等都可能对航电系统的正常运行造成严重影响，甚至导致飞行事故。分布式航电系统架构由于其开放性和网络化特点，更容易受到这些安全威胁和干扰的影响。如何提高系统的安全性和抗干扰能力，确保系统在各种恶劣环境下都能安全可靠运行，是分布式航电系统架构面临的严峻挑战。

4 分布式航电系统架构的优化策略

4.1 基于动态优先级的资源调度优化

在分布式航电系统中,实时性和确定性是保障飞行安全与任务顺利执行的关键。为更好地实现这一目标,采用基于动态优先级的资源调度优化策略十分必要。该策略并非一成不变地设定任务优先级,而是综合考虑多方面因素。一方面,依据任务的实时性要求、重要性来初步判断优先级。对于那些直接影响飞行控制、关乎飞行安全的关键任务,以及有着严格时间限制的实时性要求高的任务,赋予较高的优先级,确保它们在资源竞争中能优先获得计算资源和通信带宽,从而及时得到处理。另一方面,实时监测系统的资源使用情况至关重要。系统资源是有限的,若不合理分配,易出现资源浪费和冲突。通过实时监测,根据资源占用情况动态调整任务优先级。当某类资源紧张时,降低对这类资源需求大且非关键任务的优先级,让资源优先满足关键任务需求。如此一来,不仅能避免资源浪费和冲突,还能显著提高系统的整体性能和资源利用率,使分布式航电系统在复杂多变的飞行环境中稳定高效运行。

4.2 分层异构网络架构设计

分布式航电系统面临着系统复杂度日益增加和实时通信要求不断提高的挑战,分层异构网络架构设计成为应对这一挑战的有效方案。该设计将航电网络划分为不同层次,如骨干层、接入层等,每个层次根据其独特的功能需求和性能要求,采用不同的网络技术和拓扑结构。骨干层作为整个网络的核心,承担着大数据量的高速传输任务,因此采用高速、可靠的光纤网络。光纤网络具有传输速度快、抗干扰能力强等优点,能够确保骨干层稳定高效地传输关键数据,为整个系统的正常运行提供坚实的网络支撑。接入层则主要负责各个功能模块的接入,采用灵活、低成本的无线或有线网络。这种设计既方便了不同功能模块的灵活接入,又能有效控制成本。通过分层异构网络架构设计,不同层次的网络各司其职、协同工作,降低了网络复杂度,提高了网络的可扩展性,使系统能够轻松应对未来功能的增加和变化,同时保障了实时通信的需求。

4.3 轻量化与集成化设计

分布式航电系统对能耗和重量有着严格的限制,轻量化与集成化设计策略是解决这一问题的有效途径。在硬件设计方面,首先要精心选用低功耗、高性能的芯片和器件,这些芯片和器件在满足系统性能要求的同时,能有效降低功耗。其次,优化电路设计是关键,通过合理规划电路布局,减少不必要的元器件和线路,不

仅能降低硬件功耗,还能减轻系统重量。同时,采用集成化设计技术,将多个功能模块集成在一个芯片或电路板上,大大减少系统的体积和重量,提高系统的集成度和可靠性。在软件设计方面,优化算法和程序结构是重点。对算法进行优化,去除冗余的计算步骤,提高算法的执行效率;对程序结构进行精简,减少代码冗余,使软件运行更加流畅,从而降低能耗。通过硬件和软件的协同轻量化与集成化设计,能够有效控制分布式航电系统的能耗和重量,提升系统的整体性能和竞争力。

4.4 智能化故障管理与防御

分布式航电系统的安全性和抗干扰能力直接关系到飞行的安全与任务的成败,引入智能化故障管理与防御技术势在必行。利用人工智能和机器学习算法,对系统运行数据进行实时监测和分析是关键的第一步。通过对大量运行数据的深度挖掘,能够建立精准的故障预测模型,提前发现潜在的故障隐患。一旦检测到可能出现的故障,系统可立即采取相应的预防措施,如调整系统运行参数、切换备用设备等,避免故障的发生或降低故障的影响^[4]。开发智能化的故障诊断和修复系统也至关重要。该系统能够快速、准确地定位故障位置,分析故障原因,并自动进行故障修复或系统重构。在故障发生时,能迅速恢复系统正常运行,提高系统的容错能力和自愈能力。另外,加强系统的安全防护机制不可或缺。采用先进的加密技术对数据进行加密处理,防止数据泄露;部署入侵检测系统,实时监测网络攻击和电磁干扰,及时发出警报并采取应对措施,全方位保障分布式航电系统的安全运行。

结束语

分布式航电系统架构作为航空技术进步的核心支撑,在演进历程中成果斐然,从早期集中式架构逐步迈向智能化、自适应化方向。随着技术的持续创新,分布式航电系统架构必将日臻完善,为航空事业的安全、高效发展筑牢坚实根基。

参考文献

- [1]周璿,赵晗碟.纳入分布式电源的配电网供电可靠性分析研究[J].电气自动化,2025,47(02):66-69.
- [2]赵永库,陈晓刚.分布式航电系统架构研究[J].微电子学与计算机,2022,39(7):86-93.
- [3]刘美山,王勃.分布式航电系统通用开放式软件架构设计研究[J].电子测试,2022(4):123-125.
- [4]邢亮.基于AADL的分布式综合模块化航电系统架构建模与分析[J].电光与控制,2020,27(2):64-69,97.