

文章编号: 1674-8190(2023)04-149-09

机载系统的智能架构及功能分析

任宝平, 李创

(航空工业第一飞机设计研究院 军机型号总体部, 西安 710089)

摘要: 机载系统正在向着综合化、智能化、自动化的方向发展, 系统的综合化通常采用系统交联的方式实现, 系统之间交联关系复杂, 电缆数量多, 增加了全机的复杂性, 对机载系统硬件资源提出了非常高的要求, 出现了机载系统综合化需求高与硬件资源升级速度慢的矛盾, 机载系统智能化的需求也在不断发展。提出一种机载系统分布式云一边一端智能架构方案, 该架构融合应用云一边一端技术、分布式网络控制技术、分布式综合模块化航电系统技术, 通过云管理平台、边缘控制平台、终端平台三层架构合理搭建, 并配置高速安全实时网络和容器软件技术。本文提出的架构在不增加全机复杂性的同时, 提高了多机载系统的综合化程度, 满足人工智能、信息融合、大数据处理等新技术应用和新功能扩展的需求。

关键词: 机载系统; 云一边一端; 智能架构; 容器; 分布式网络控制

中图分类号: V243

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.04.16

Analysis on intelligent architecture and function of airborne system

REN Baoping, LI Chuang

(Military Aircraft General Department, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Airborne system is developing towards the direction of integration, intelligence and automation. The integration of the system is usually realized by the way of cross-linking of the system. The cross-linking relationship among systems is complex, and the number of cables is large, which can increase the complexity of the whole airborne system. Requirements for hardware resources of the airborne system are very high, and the contradiction between the high demand for the integrated airborne system and the slow upgrade speed of hardware resources appears. The demands for intelligent airborne systems are also developed. A distributed cloud-edge-terminal intelligent architecture for airborne system is proposed, which combines cloud-edge-terminal technology, distributed network control technology and distributed integrated modular avionics system technology. The architecture is reasonably constructed through cloud management platform, edge control platform and terminal platform, and is configured with high-speed secure real-time network and container software technology. The architecture proposed in this paper can increase the degree of integration of the multi-aircraft airborne system while without increasing the whole aircraft complexity. The architecture can meet the requirement of the new technologies application such as artificial intelligence, information fusion, large data processing, and the expansion of new functions.

Key words: airborne system; cloud-edge-terminal; intelligent architecture; container; distributed network control

收稿日期: 2022-07-29; 修回日期: 2022-12-01

通信作者: 李创, 894207159@qq.com

引用格式: 任宝平, 李创. 机载系统的智能架构及功能分析[J]. 航空工程进展, 2023, 14(4): 149-157.

REN Baoping, LI Chuang. Analysis on intelligent architecture and function of airborne system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(4): 149-157. (in Chinese)

0 引言

机载系统是飞机领域对飞行控制、发动机控制、液压控制、航电控制等系统的统称,使飞机具备完成各项使命的能力。国外通常把机载系统划分为飞行器系统、航空电子系统和任务系统^[1]。国内把机载系统划分为航电系统、飞控系统、机电系统和任务系统。随着航空技术的发展,飞机机载系统功能呈指数级增长,子系统间交联关系愈发复杂,电子元器件数量急剧增多,系统升级和维护困难,机载系统之间深度耦合与系统资源竞争的矛盾越来越突出。用智能技术和智能算法在未来飞机的态势感知与评估、任务航迹动态规划、健康管理与预测、智能人机交互等方面解决问题的需求非常急迫。

为了追求更高的技术先进性和更低的成本经济性的飞机设计目标,机载系统正朝着高度综合化、智能化、自动化的方向发展^[2]。范彦铭^[3]分析了飞控系统发展方向,其结论是未来飞机会将气动、结构和控制融为一体,成为一个智能体,智能飞行器管理系统方案是满足未来需求的系统方案;王国庆等^[4]分析了航空电子系统从最初的分立式、联合式、综合式到高度综合的发展过程,其结论是航空电子系统未来将由面向系统应用的任务合成技术、面向系统能力的功能信息融合技术和面向系统资源的物理综合技术构成。

对于机载系统综合化的研究方面,张超等^[5]分析了F-22和F-35等国外先进战斗机的飞行器管理系统,表明飞行器管理系统是随着综合技术的发展而衍生出的一个新系统,在功能综合和物理综合的层次和深度方面的综合度都是逐步扩大的;李红娟等^[6]介绍了波音777飞机通过信息管理系统提高了系统的总体性能、信息交换能力及可靠性,增强了系统耦合故障的诊断能力;周强等^[7]介绍了A380和波音787飞机通过采用航空电子全双工交换式以太网(AFDX)总线互连技术构筑分布式综合模块化航电系统架构(DIMA),综合了航电系统和非航电系统的功能,达到更高层次的

全机资源共享;朱立平等^[8]研究了基于未来机载能力环境(FACE)标准的飞行器管理系统软件架构;吴文海等^[9]分析了机载系统综合化设计促使综合飞行器管理技术的出现,给出了综合飞行器管理系统结构层次和软件体系结构层次,并指出了提升该系统智能水平是其发展的必然趋势。

对于机载系统智能化方面,雷国志等^[10]给出了利用人工智能技术代替飞行驾驶员通信职责的人工智能飞行通信员系统方案,通过在现有集成模块化航电系统(IMA)架构之外增加主机的方式实现;崔德龙等^[11]介绍了基于混合容器技术的虚拟化技术在智能座舱高性能计算机处理单元中的应用,提高了机载系统的综合化和智能化水平;卢新来等^[12]综述了航空人工智能的发展,总结了人工智能赋能航空的速度和程度受到大数据可用性改善、计算机处理能力提高、机器学习方法改进这3个要素在航空领域内积累汇聚的制约;文鹏程等^[13]设计了机载智能计算系统架构,研究了智能加速硬件、智能服务软件、智能开发工具等核心要素,但是没有从全机机载系统的角度进行分析。

以上分析表明机载系统综合化的发展正面临着交联关系越来越复杂的问题,机载系统智能化的应用还存在制约。本文提出一种机载系统通用智能物理架构,首先介绍该架构设计的背景技术,其次给出智能架构方案,最后分析该架构除常规功能之外特有的智能系统功能。

1 背景技术介绍

1.1 云一边一端协同技术

“云”是对云计算服务模式和技术实现的形象比喻。云计算可以充分利用基础设施和软硬件等资源,大幅减少提供同样业务能力的情况下所需的设备数量^[14]。云中心具有强大的处理性能,能处理海量的数据,但是需要有足够的网络带宽,云中心处理数据也需要一定的时间。

由于智能任务需求多样与边缘设备能力单一之间的矛盾^[15],出现了云设备的计算任务需要放

到边缘设备中去执行问题。近年来,在互联网云计算中引入了边缘计算,即在网络的边缘产生、处理、分析数据。在边缘节点处理这些数据将会带来极小的响应时间,减轻网络负载,同时保证用户数据的隐私性^[16]。

云计算通常适用于长周期、非实时数据、业务决策场景;边缘计算更适合实时的数据分析和智能化处理,也更加高效而且安全,边缘计算在实时性、短周期数据、本地决策等场景方面有不可替代的作用^[16-17]。

云一边一端的三层结构基本模型架构简图如图1所示。

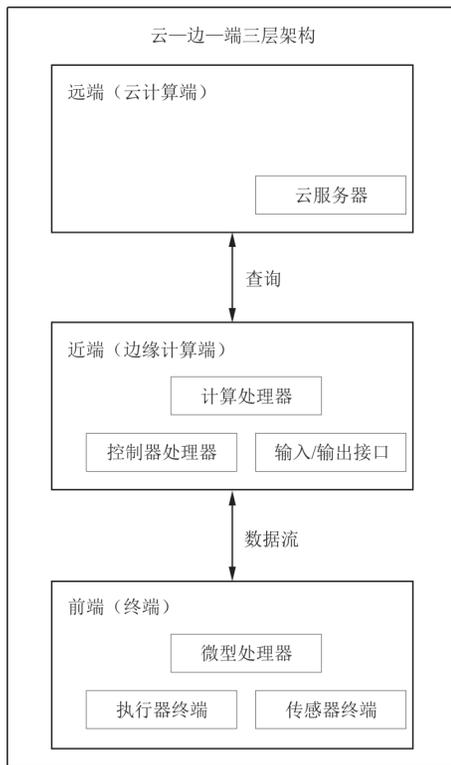


图1 云一边一端基本模型架构简图

Fig. 1 Cloud-edge-terminal basic model architecture diagram

1) 远端(云计算端):主要职责是对大规模数据进行持久化存储以及全局性计算分析。此外,云计算端还对边缘计算端进行资源分配,从而提高边缘节点提供服务的质量^[16]。

2) 近端(边缘计算端):边缘计算端是本架构的核心。边缘计算端一方面对终端原始数据进行

处理分析,另一方面负责定期向云计算端发送清洗后数据,从而实现数据缓存、本地化计算的功能^[16]。

3) 前端(终端):终端是最接近物理环境的一层。由各类传感器、执行器、微型控制器等组成,负责物理特征数据测量采集,并将感测数据传输到近端;负责接收近端的指令,控制物理设备动作^[18]。

1.2 分布式网络控制系统技术

控制技术是支撑国民经济快速发展的最重要的技术之一,其先进与否是一个国家综合国力强弱的有力体现。随着时代的进步,控制系统的结构也变得日益复杂,新的要求和功能也被不断地提出^[19]。

在传统的控制系统中,一般是利用点对点的形式实现系统内各个组件之间的连接,即传感器、执行器和控制器之间是利用有限长的电缆彼此相连的^[20]。

随着总线技术的发展,点对点之间的电缆逐渐被总线代替,同时控制器的功能也进行了分散,传感器信号的采集处理功能迁移到了传感器端,形成了智能传感器终端,执行器伺服控制功能迁移到了执行器端,形成了智能执行器终端,控制器仅保留控制算法的计算功能,这就形成了分布式控制系统。为了追求更好的控制效果,控制算法变得越来越复杂,与此同时,需要的硬件资源也越来越多。

随着网络技术的发展,多个分布式控制系统中的总线被同一个网络代替,控制系统的信号传输路线由一个实时闭环网络实现,而且多个控制系统共用一个实时闭环网络实现控制功能,这就形成了分布式网络控制系统。根据网络技术的不同,分布式网络控制系统又分为分布式有线网络控制系统和分布式无线网络控制系统。

传统式、分布式总线和分布式网络控制系统架构对比如图2所示。

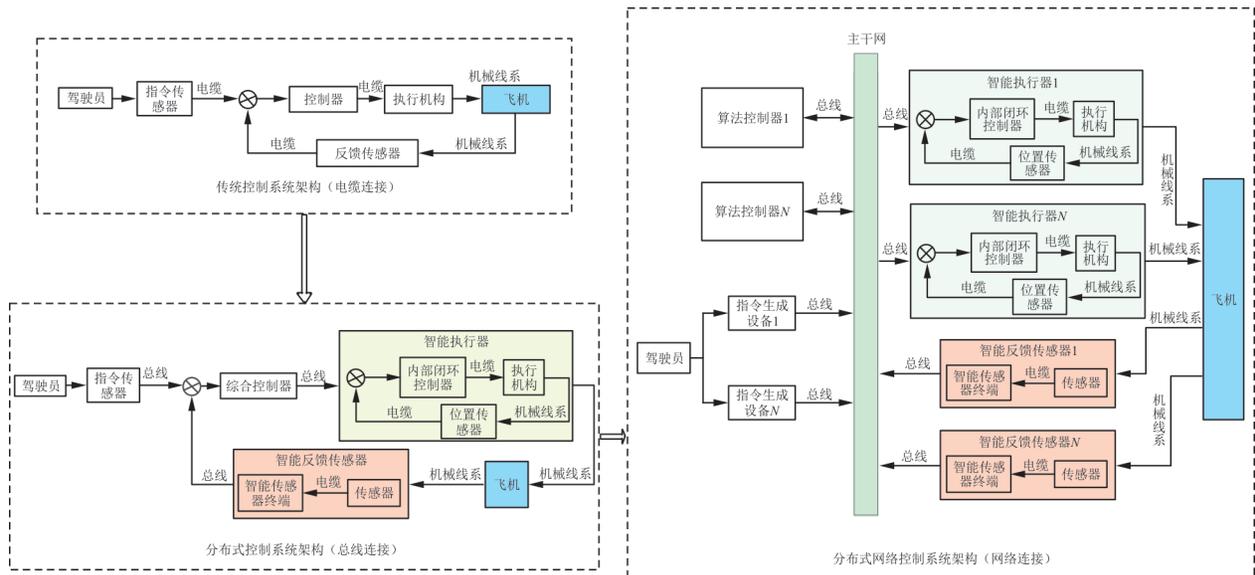
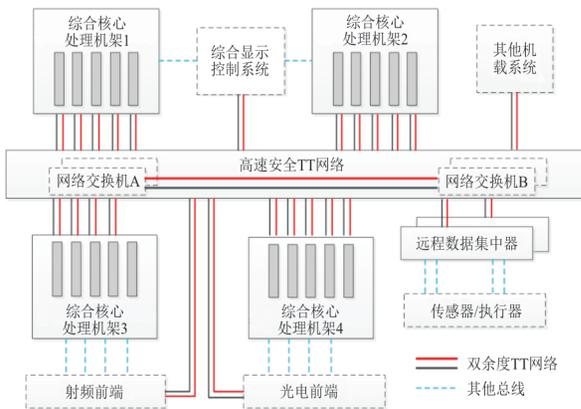


图2 传统式、分布式总线 and 分布式网络控制系统架构对比图

Fig. 2 Comparison of traditional distributed bus and distributed network control system architecture

1.3 DIMA 技术

航电系统经过分立式、联合式、综合模块化(IMA)的发展阶段,正在向分布式综合模块化航空电子系统(DIMA)的技术方向发展。DIMA 又分为硬件映射和软件映射两种阶段^[21],一种典型的 DIMA 系统架构如图 3 所示。

图3 分布式综合模块化航电系统架构^[22]Fig. 3 Distributed integrated modular avionics system architecture^[22]

1) 硬件映射:把各种硬件资源封装成标准化通用型的处理器模块并安装在飞机不同位置,这个阶段称为硬件映射。

2) 软件映射:把飞机功能划分成多个软件模块并加载到特定的通用处理模块上,这个阶段称为软件映射。此阶段软件模块可以实现动态迁

移,达到应用程序(APP)化的程度。

2 机载系统智能架构方案

2.1 机载系统智能架构设计

本文提出的机载系统智能架构融合了云一边一端协同计算技术、分布式综合模块化航电系统架构技术和分布式网络控制系统技术。该智能架构按照云、边、端三类设备构建,详细架构如图 4 所示。

云平台由两台云管理计算机构成,边缘计算平台由四台通用控制器和两台存储计算机组成,端设备由分布式的各类传感器智能终端、执行器终端、特殊任务微智能终端组成。边缘计算平台的构建采用 DIMA 技术,边缘计算平台和端设备一并组成了分布式网络控制系统架构,可以完成飞行控制系统、液压系统、起落架控制系统、环境控制系统、供配电控制系统、燃油控制系统、航电系统等传统机载系统的控制功能,在此基础上增加了云平台,可以完成综合调度和智能管理。按照云一边一端三类设备的特点进行全机任务分工,根据不同飞机的需求灵活配置云一边一端设备并部署对应的任务,可以使该架构适用于多型飞机,包括有人飞机和无人飞机。

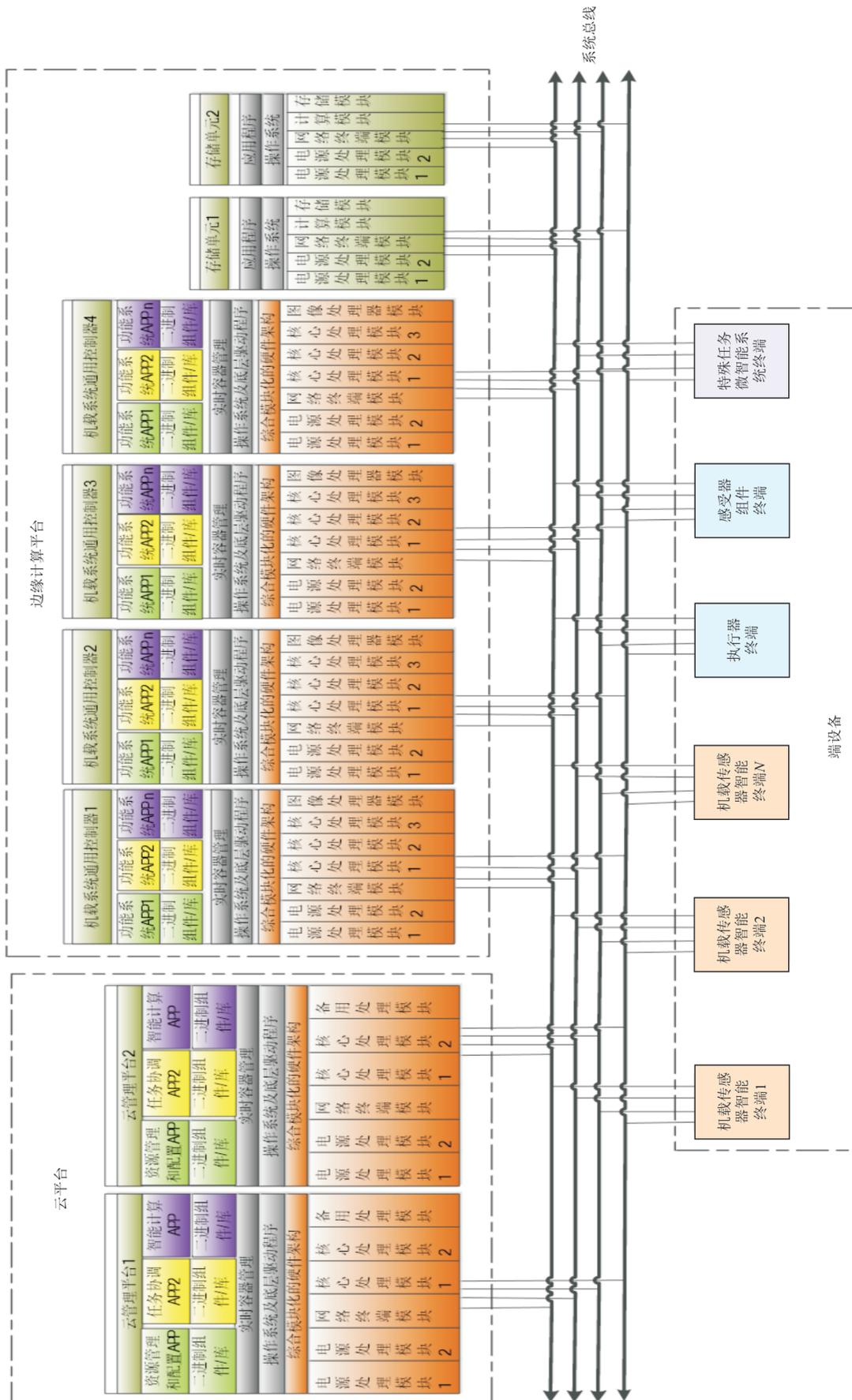


图 4 机载系统分布式云-边缘-终端智能架构图

Fig. 4 Airborne system distributed cloud-edge-terminal intelligent architecture

云平台是智能管理调度平台,负责全机上电逻辑管理、机载软件所需硬件资源分配、软件迁移控制等功能实现。在飞机上电后,从存储计算机中调取机载系统功能 APP 软件分配到不同的通用控制器上运行,并实时监控软件运行的健康状态。

边缘计算平台的四台通用控制器可以构成四余度配置,每台控制器内部又包含三个核心处理模块,其中两个核心处理模块可以组合构成控制/监控余度工作对,另外一个核心处理模块可以单独工作。通用控制器根据云平台的调度指令自由组合,既可以满足飞行控制系统多余度的需要,又可以满足其他非安全关键系统单、双余度的需求。各机载系统的控制律软件和余度管理软件都以 APP 的形式运行在边缘计算平台上。

存储单元负责飞机所有软件的存储、备份,负责系统总线上传的各类数据的存储。两台存储单元互为镜像备份。

终端设备包含传感器智能终端、执行器终端和微智能终端。传感器智能终端对分布在飞机不同部位的传感器进行信号采集、处理,并上传到机载系统总线网络上,供云平台和边缘计算平台使用;执行器终端接收边缘计算平台发来的指令,控制各类作动器、阀、执行器等部件动作。特殊任务微智能系统终端完成独立任务,例如通讯导航任务等。

2.2 总线网络技术选型设计

系统总线网络是连接云一边一端设备的关键,必须选取具有高带宽、高效率、时间确定性、支持拓扑、高安全性、高完整性和容错能力强等特点的总线网络才能满足需求。

从机载系统网络总线的发展及国内外的实际使用情况分析,主干通信网络总线应满足:

1) 严格的时间确定性:满足飞控、机电等系统时间苛刻的要求。

2) 高数据带宽:满足航电、显控等系统音视频传输的要求。

3) 高可靠性:满足飞控、任务等系统关键数据传输的要求。

4) 可扩展性:满足未来扩展节点的要求。

5) 去中心化:为提高任务可靠性和容错能力,避免因总线管理设备故障导致整个总线网络通信功能丧失,总线必须采用去中心化设计。

6) 透明用户访问:针对不同机载业务,用户无需关心具体网络实现。

飞机上可用的网络总线类型包括 ARINC429、MIL-1553B、MIL-1394B、AFDX、TTE、TT-FC、TSN 等。ARINC429 是一种点对点总线,MIL-1553B 总线节点数量和带宽有限制,在先进飞机设计中使用的越来越少。AFDX、TTE、MIL-1394B 总线近年来在飞机上被广泛采用。TT-FC、TSN 总线处于研发阶段,还没有飞机型号正式使用。王琦卉等^[23]对 MIL-1394 总线进行了技术分析;王勇等^[24]、杨军祥等^[25]介绍了 TTFC (Time-triggered Fibre Channel) 网络总线。TTFC 网络总线在确定性、安全性、实时性、可靠性、可扩展性、容错性等方面都具有很显著的优势。罗泽雄等^[26]分析了 TSN 总线网络应用的可行性;谭博^[27]介绍了使用多窗口传输协议仅通过对应用程序进行变更无需改变总线就能够实现大数据传输功能,可以很好地支持航空电子系统后续功能的扩展和更新。

各种总线的性能对比如表 1 所示。

表 1 飞机网络总线性能比较表
Table 1 Comparison of aircraft network bus performance

总线	应用案例	通信方式	触发方式	传输速率	传输介质	拓扑结构	实时性	扩展性	成本	安全性	成熟度
AFDX	A380、B787、C919	双向	事件触发	100、1 000 Mb/s (光)	铜缆、光纤	星形	低	中	中	中	TRL9
MIL-1394	F35	双向	时间触发	100、200、400 Mb/s	铜缆、光纤	树形、环形	中	低	低	高	TRL9
TTE	猎户座载人飞船	双向	时间触发,事件触发	1、10 Gb/s	铜缆、光纤	星形	高	中	引入交换机、光模块,高	中	TRL5
TT-FC	暂无	双向	时间触发,事件触发	1、2、4 Gb/s	铜缆、光纤	星形	高	高	引入交换机、光模块,高	高	TRL5
TSN	暂无	双向	时间触发,事件触发	1、10 Gb/s	铜缆、光纤	星形	高	高	引入交换机、光模块,高	中	TRL3-4

根据表1的对比结果,本文采用TTFC总线作为智能架构中连接云一边一端设备的系统总线。

2.3 软件技术选型设计

机载软件平台是机载应用软件的底层基础,主要采用嵌入式实时操作系统,但随着机载设备向集中化、智能化、灵活化的发展,对基础软件平台提出了新需求。针对集中化提出了应用隔离性和可持续集成需求;智能化的很多智能芯片、智能算法、智能框架软件都需要运行环境支持;灵活化即实现组装灵活、升级灵活、功能灵活增减。单一的嵌入式实时操作系统无法满足上述需求。满足这些需求的软件架构目前有两种,分别是虚拟化软件技术和容器软件技术,如图5所示。

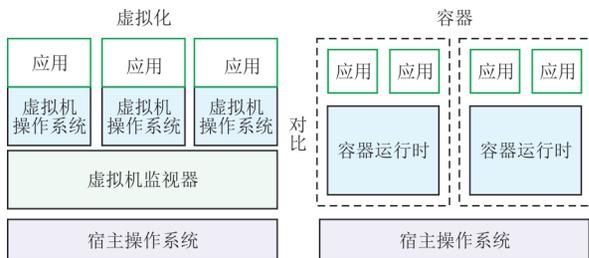


图5 软件架构技术对比图

Fig. 5 Software architecture technology contrast

虚拟化软件技术需要在宿主机中安装系统,系统中安装虚拟机来虚拟出多台计算机,再安装完整的操作系统,并为了应用部署运行环境,然后将服务部署在虚拟系统中。容器软件技术需要在宿主机中安装系统,系统中安装容器引擎,运行服务。容器软件技术支持环境一致的“开发—测试—部署”,资源隔离,快速、安全、低成本的持续集成和部署。

机载系统智能架构选用容器软件技术。容器技术具有大幅提升硬件资源利用率、支持更为复杂的系统综合设计与配置、大幅降低系统软件的重构实现难度等优点^[28]。容器软件架构分为资源层、应用层、服务层。资源层包括操作系统和底层硬件驱动程序;应用层包括实时容器管理程序;服务层采用软件APP技术,实现系统功能软件APP的调用和执行。

容器软件架构如图6所示。



图6 容器软件架构示意图

Fig. 6 Architecture schematic diagram of container software

3 机载系统智能功能分析

机载系统智能架构除了满足机载系统的传统控制功能之外,还具有一些智能功能。具体如下:

1) 机载系统APP自我进化功能:云平台 and 边缘计算平台可以同时从系统总线上获取各种所需的传感器信息,机载软件APP在边缘计算平台实时运行的同时,云平台的智能算法软件在后台进行非实时的算法优化,当有更优化的控制律参数计算出来之后,通过云平台的管理策略把新参数传给机载软件APP,并且备份到存储单元中,完成软件自我进化。飞机飞行时间越长,软件自动进化程度越高。

2) 热维护功能:热维护是指在系统工作的状态下对故障的边缘计算平台进行更换维护。当一台边缘计算通用控制器发生硬件故障,云平台通过软件迁移管理把运行在此控制器上的软件临时迁移到云平台中,当硬件更换完之后,原有软件还可以迁移回去,完成在系统正常工作状态下实现硬件更换维护。

3) 系统软件远程升级:所有的机载系统APP都存储备份在存储单元中,通过云平台统一调度管理。当需要升级某一个软件或者批处理升级APP时,可以把软件直接推送到存储单元,结合未来无线通信技术,实现远程无线一键升级。

4) 易扩展(增量式扩展)功能:该功能体现在新功能的扩展和硬件资源的扩展两个方面。新功能扩展只需要开发一个新的功能APP,通过云平台的管理配置优化直接在边缘计算平台中运行,对原有的机载系统APP无需做任何更改。计算资源扩展通过在通用控制器中增加核心处理器模块或者增加一台通用控制器实现,其他硬件资源扩展通过在系统总线上增加一个新的终端设备实现,原有设备无需更改。

4 结 论

1) 本文提出了一种机载系统的分布式云一边一端智能架构,该架构以分布式综合模块化航电系统架构为基础,融合应用云一边一端技术、分布式网络控制技术、容器软件技术,通过云管理平台、边缘控制平台、终端信号采集和指令执行平台三层架构合理搭建,并配置高速安全实时网络完成多机载系统的物理综合和功能综合。

2) 分析了该架构具有的机载系统 APP 自我进化、热维护、系统软件远程升级、易扩展(增量式扩展)等四种智能功能,并给出了每种功能的定义。

3) 该架构解决了多机载系统高度综合后并不增加机载系统交联复杂性的问题,同时该架构方便智能算法、数据融合、人工智能技术的应用和新功能扩展。

4) 该架构可应用于飞控系统、机电系统、航电系统等多系统内部综合和系统之间的综合。该架构具有一定的通用性,既可以应用于有人运输飞机,又可以应用于无人飞机,可实现“一代机载、多型平台”发展需求。

参 考 文 献

- [1] SEABRIDGE A, MOIR I. Design and development of aircraft systems[M]. 3rd ed. England: John Wiley & Sons Ltd., 2020.
- [2] 方忆平, 杨韧. 国外航空机载系统发展历程及启示[J]. 国防科技工业, 2013(3): 64-65.
FANG Yiping, YANG Ren. Development of airborne system in foreign countries and its enlightenment[J]. Defence Science & Technology Industry, 2013(3): 64-65. (in Chinese)
- [3] 范彦铭. 飞行控制技术与发展[J]. 飞机设计, 2012, 32(6): 33-41.
FAN Yanming. The flight control technology and development[J]. Aircraft Design, 2012, 32(6): 33-41. (in Chinese)
- [4] 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.
WANG Guoqing, GU Qingfan, WANG Miao, et al. Research on the architecture technology for new generation integrated avionics system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1473-1486. (in Chinese)
- [5] 张超, 鲍颖祎, 朱妍, 等. 基于“综合”理念的飞行器管理系统研究[C]// 第九届中国航空学会青年科技论坛. 西安: 中国航空学会, 2020: 842-851.
- ZHANG Chao, BAO Yingyi, ZHU Yan, et al. Research on vehicle management system based on "integration" conception[C]// The Ninth China Aeronautical Society Youth Science and Technology Forum. Xi'an: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2020: 842-851. (in Chinese)
- [6] 李红娟, 马存宝, 宋东, 等. 波音 777 飞机信息管理系统[J]. 民用飞机设计与研究, 2001(2): 1-4.
LI Hongjuan, MA Cunbao, SONG Dong, et al. Boeing 777 aircraft information management system[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2001(2): 1-4. (in Chinese)
- [7] 周强, 熊华钢. 新一代民机航空电子互连技术发展[J]. 电光与控制, 2009, 16(4): 1-6.
ZHOU Qiang, XIONG Huagang. Development of the new generation civil avionics interconnection technology[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(4): 1-6. (in Chinese)
- [8] 朱立平, 陆志东, 张丹涛, 等. 一种基于FACE标准的飞行器管理系统软件架构[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(3): 77-81.
ZHU Liping, LU Zhidong, ZHANG Dantao, et al. A vehicle management system software architecture based on FACE standard[J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(3): 77-81. (in Chinese)
- [9] 吴文海, 郭晓峰, 周思羽. 综合飞行器管理系统(IVMS)研究综述[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(3): 657-667.
WU Wenhai, GUO Xiaofeng, ZHOU Siyu. Overview of integrated vehicle management system[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(3): 657-667. (in Chinese)
- [10] 雷国志, 代红. 人工智能飞行通信员系统方案设计[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 437-442.
LEI Guozhi, DAI Hong. Scheme design of artificial intelligence flight communicator system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 437-442. (in Chinese)
- [11] 崔德龙, 夏曼. 虚拟化技术在航空计算领域的应用[J]. 航空工程进展, 2022, 13(2): 71-77.
CUI Delong, XIA Man. Application of virtualization technology in aeronautical computing field[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(2): 71-77. (in Chinese)
- [12] 卢新来, 杜子亮, 许赟. 航空人工智能概念与应用发展综述[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 251-264.
LU Xinlai, DU Ziliang, XU Yun. Review on basic concept and applications for artificial intelligence in aviation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 251-264. (in Chinese)
- [13] 文鹏程, 白林亭, 高泽, 等. 机载智能计算技术工程实践思考[J]. 航空计算技术, 2021, 51(2): 130-134.
WEN Pengcheng, BAI Linting, GAO Ze, et al. Consideration of engineering practice of airborne intelligent computing technology[J]. Aeronautical Computing Technique,

- 2021, 51(2): 130-134. (in Chinese)
- [14] 中国信息通信研究院. 云计算白皮书[M]. 北京: 中国信息通信研究院, 2012.
China Academy of Information and Communication. Cloud computing white paper[M]. Beijing: China Academy of Information and Communication, 2012. (in Chinese)
- [15] 张星洲, 鲁思迪, 施巍松. 边缘智能中的协同计算技术研究[J]. 人工智能, 2019, 12(5): 55-67.
ZHANG Xingzhou, LU Sidi, SHI Weisong. Research on collaborative computing technology in edge intelligence [J]. AI-View, 2019, 12(5): 55-67. (in Chinese)
- [16] 曹籽文. 边缘计算: 框架与安全[J]. 保密科学技术, 2019(9): 44-48.
CAO Ziwen. Edge computing: frames and security[J]. Secrecy Science and Technology, 2019(9): 44-48. (in Chinese)
- [17] 玉名. 5G时代, 边缘计算带来新变革[J]. 财富时代, 2019(5): 68-73.
YU Ming. In the 5G era, edge computing brings new change [J]. Times of Fortune, 2019(5): 68-73. (in Chinese)
- [18] YU Wei, LIANG Fan, HE Xiaofei, et al. A survey on the edge computing for the Internet of Things [J]. IEEE Access, 2018, 6: 6900-6919.
- [19] 阎延. 无线网络控制系统拓扑结构的优化设计[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2014.
YAN Yan. Optimize and design of topology structure of the wireless networked control system[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2014. (in Chinese)
- [20] 王智. 无线网络控制系统的特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
WANG Zhi. Research on characteristics of the wireless networked control system [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [21] 潘云嵩. DIMA 航电系统资源优化配置研究与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
PAN Yunsong. Research and implementation of optimal allocation of DIMA avionics system resources [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- [22] 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 Junxiang, TIAN Ze, ZHAN Wentao, et al. Research on new generation of distributed IMA core system technology [J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(12): 36-41. (in Chinese)
- [23] 王绮卉, 田泽, 赵彬. 机载 1394 总线技术分析[J]. 航空计算技术, 2018, 48(5): 207-210.
WANG Qihui, TIAN Ze, ZHAO Bin. Analysis of airborne 1394 bus technology [J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(5): 207-210. (in Chinese)
- [24] 王勇, 谭小虎, 褚文奎, 等. 基于时间触发 FC 终端接口的设计[J]. 电光与控制, 2017, 24(12): 75-80, 84.
WANG Yong, TAN Xiaohu, CHU Wenkui, et al. Design of a time-triggered FC terminal interface [J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(12): 75-80, 84. (in Chinese)
- [25] 杨军祥, 韩强, 王纯委, 等. 基于 TTFC 网络的分布式综合化处理系统平台研究[J]. 航空计算技术, 2018, 48(5): 309-314.
YANG Junxiang, HAN Qiang, WANG Chunwei, et al. Research on distributed integrated processing platform based on TTFC network [J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(5): 309-314. (in Chinese)
- [26] 罗泽雄, 崔亮, 谭永亮, 等. 面向民用航电系统的一种确定性的高开放低成本的交换式网络应用可行性分析[C]//2019(第八届)民用飞机航电国际论坛. 上海: 中国航空学会, 2019: 354-360.
LUO Zexiong, CUI Liang, TAN Yongliang, et al. Feasibility analysis of a deterministic high-opening and low-cost switched network application for civil avionics system [C]//2019 (8th) International Forum on Civil Aircraft Avionics. Shanghai: CSAA, 2019: 354-360. (in Chinese)
- [27] 谭博. 多窗口传输协议及其在航空电子系统大数据传输中的应用[J]. 航空工程进展, 2020, 11(2): 272-278.
TAN Bo. Multiple window protocol and its application in large data transfer of avionics system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(2): 272-278. (in Chinese)
- [28] 张军红, 童强. 基于软件虚拟化技术的新一代航空机载软件设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(6): 772-777.
ZHANG Junhong, TONG Qiang. New generation aeronautical airborne software design based on software virtualization technology [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(6): 772-777. (in Chinese)

作者简介:

任宝平(1978—),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞机机载系统设计。

李创(1992—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机飞行控制系统设计。

(编辑:丛艳娟)