

# 航空电子航电系统架构设计与船载系统架构设计的对比研究

唐海勇

广州航新航空科技股份有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ETQM.2025090026

**摘 要：** 本文对比分析航空电子航电系统与船载系统。阐述航电系统架构核心要素、硬件设计特性，船载系统的相关标准、硬件配置。比较两者在实时性、架构设计、硬件实现、接口标准等方面差异，探讨系统耦合度控制、容错架构等难题及发展趋势，提及验证方法革新与融合设计方法。

**关 键 词：** 航电系统；船载系统；系统架构

## A Comparative Study of Avionics and Avionics System Architecture Design and Shipborne System Architecture Design

Tang Haiyong

Guangzhou Hangxin Aviation Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

**Abstract：** This paper comparatively analyzes the avionics and avionics system and the shipborne system. Elaborate on the core elements and hardware design characteristics of the avionics system architecture, as well as the relevant standards and hardware configurations of the shipborne system. Compare the differences between the two in terms of real-time performance, architecture design, hardware implementation, interface standards, etc., discuss the difficulties and development trends such as system coupling degree control and fault-tolerant architecture, and mention the innovation of verification methods and integrated design methods.

**Keywords：** avionics system; shipborne system; system architecture

### 引言

随着航空航天和船舶行业的发展，相关系统架构设计受到广泛关注。2022年发布的《航空航天产业发展政策》强调提升航空电子系统性能和可靠性，同时船舶行业也有相关政策推动船载系统优化。航电系统架构涵盖核心要素及硬件设计特点，船载系统在网络、硬件配置等方面有自身要求。两者在实时性、架构设计、标准遵循等多方面存在差异，在联合式架构演进、智能容错架构及验证方法革新等方面面临挑战与机遇，需进一步研究完善相关理论与方法以促进交流融合。

### 一、航空电子航电系统架构设计

#### （一）航电系统架构核心要素

航电系统架构核心要素涵盖多个关键方面。模块化设计原则是基础，它将系统划分为多个功能模块，提高可维护性与可扩展性<sup>[1]</sup>。实时操作系统要求确保系统能在规定时间内对各种事件做出准确响应。航空总线标准在其中起着关键作用，例如 AFDX 和 ARINC429。AFDX 具有高带宽和确定性等优点，能满足航电系统大量数据传输需求；ARINC429 则广泛应用于航空电子设备间的通信。系统安全完整性等级（DAL）的划分依据也至关重要，它根据系统功能对飞行安全的影响程度进行分级，为系统设计和验

证提供了明确的安全目标和要求<sup>[1]</sup>。

#### （二）航电硬件设计特性

航电硬件设计需考虑诸多特性。在 LRU 与 SRU 设计规范方面，应遵循严格标准以确保系统的可维护性与可靠性<sup>[2]</sup>。LRU 需便于在航线中快速更换，以减少飞机停机时间；SRU 则侧重于在车间环境下的高效维修。对于抗辐射加固技术，由于航空环境存在宇宙射线等辐射源，航电硬件必须采用特殊材料和设计方法来抵御辐射对电子元件的损害。在电磁兼容性设计上，飞机内部众多电子设备相互干扰，需通过合理的布线、屏蔽等措施，确保航电系统在复杂电磁环境中正常工作<sup>[2]</sup>。

## 二、船载系统架构设计

### （一）船舶系统架构要求

IEC61162标准对船载网络有诸多约束条件。该标准规定了船载设备间数据通信的接口和协议，确保系统的兼容性和互操作性<sup>[3]</sup>。在船舶动力系统和导航系统中，冗余架构设计至关重要。动力系统关乎船舶运行，采用冗余设计可在部分组件故障时保障动力供应。导航系统的冗余架构则能提高定位和导航的准确性与可靠性，例如采用双套传感器和处理器。分布式架构和集中式架构各有适用场景。分布式架构适用于对实时性要求高、局部故障不影响整体的系统；集中式架构则便于统一管理和控制，适用于对资源集中调配要求高的系统。

### （二）船载硬件配置特点

船载硬件配置需充分考虑海洋环境的特殊性。对于IP防护等级，要依据相关标准确保设备能抵御海水、盐雾等侵蚀<sup>[4]</sup>。在材料选择上，耐腐蚀材料至关重要，以保证硬件在高盐高湿环境下的使用寿命。同时，振动抑制结构设计不可或缺，海洋环境中的船舶会受到海浪等因素影响产生振动，合理的结构设计可减少振动对硬件的损害。与航电系统相比，船载系统在可靠性验证标准上也存在差异，其更侧重于在海洋复杂环境下长期稳定运行的能力验证，这也影响着硬件配置的各个方面，从防护到结构再到材料选择都需围绕此核心要求进行优化。

## 三、系统架构对比分析

### （一）架构特征对比

#### 1. 实时性要求差异

航空电子航电系统与船载系统在实时性要求上存在显著差异。航电系统通常需要 $\mu\text{s}$ 级的响应，这是因为航空操作涉及到高速飞行、复杂的导航和精确的控制，任何微小的延迟都可能导致严重的安全问题<sup>[5]</sup>。而船舶系统的响应时间通常在ms级即可满足需求，其运行环境相对较为稳定，对实时性的要求不如航电系统那么苛刻。在技术实现方面，航电系统为满足 $\mu\text{s}$ 级响应需求，往往采用更高速的处理器、更优化的算法以及更高效的通信协议。同时，航电系统更倾向于使用时间触发机制，以确保任务在精确的时间点执行，满足严格的实时性要求。而船载系统则可能根据具体情况，在一些对实时性要求不是极高的部分采用事件触发机制，以降低系统复杂度和成本。

#### 2. 环境适应性对比

航空电子航电系统与船载系统所处环境差异显著，这对其架构设计产生了不同影响。航电系统面临高空辐射环境，需考虑辐射对电子元件的损害以及温度冲击等因素。例如，在高空温度变化剧烈，要求系统架构能适应这种温度冲击，确保各部件正常工作<sup>[6]</sup>。而船载系统处于海洋腐蚀环境，盐雾腐蚀是关键问题。系统架构需采用抗腐蚀材料和防护措施，以防止金属部件生锈腐蚀，影响系统性能。同时，船舶上还存在电磁干扰，这也需要在架构设计中加以考虑，通过合理布局和电磁屏蔽等手段降低

干扰。

### （二）硬件实现对比

#### 1. 处理器选型差异

航电系统常采用PowerPC架构，而船载系统多选用ARM架构。PowerPC在航电领域应用广泛，因其具有高性能、高可靠性以及成熟的技术支持，能够满足航空电子设备对处理能力和稳定性的严格要求<sup>[7]</sup>。其设计和验证流程遵循DO-178C标准，该标准对处理器的可靠性和安全性有严格规定。而ARM架构在船载系统中受青睐，主要是因为其具有低功耗、低成本和较高的集成度等优势，符合船载设备对能耗和成本的考量。船载系统的处理器验证依据IEC61508标准，该标准在功能安全方面有特定要求，与航电系统的标准有所不同。这些不同的选型依据和标准要求，反映了航电系统和船载系统在不同应用场景下的特定需求。

#### 2. 接口标准对比

在系统架构对比分析中，硬件实现方面，航空电子航电系统与船载系统因应用环境不同而存在差异。航电系统对硬件的可靠性和稳定性要求极高，需适应高空复杂环境；船载系统则要考虑防潮、防盐雾等因素。在接口标准对比上，MIL-STD-1553B总线常用于航电系统，NMEA2000协议则应用于船载系统。MIL-STD-1553B总线传输速率较高，能满足航电系统大量数据快速传输的需求，其拓扑结构多为集中式控制；NMEA2000协议传输速率相对较低，但足以满足船载系统数据传输要求，拓扑结构更为灵活多样。在错误检测机制方面，MIL-STD-1553B总线具备完善的错误检测和纠正能力，以保障航电系统的准确性和安全性<sup>[8]</sup>。

## 四、系统集成挑战与发展趋势

### （一）跨领域技术融合难点

#### 1. 标准化体系冲突

航空电子航电系统主要遵循DO系列标准，而船载系统多依据IEC标准。在认证流程方面，DO系列标准注重航空环境下的特定要求，如高海拔、高速飞行等条件下系统的可靠性认证<sup>[9]</sup>。而IEC标准侧重于船舶运行环境的考量，如海水腐蚀、船舶晃动等对系统的影响。这导致两种标准在认证流程上存在较大差异，难以直接兼容。在测试方法上，DO系列标准可能采用航空专用的测试设备和环境模拟手段，IEC标准则有其针对船舶的独特测试方法。这些不同的测试方法使得在跨领域融合时，难以统一评估系统性能，给系统集成带来了挑战。

#### 2. 系统耦合度控制

在联合式架构向综合模块化架构演进过程中，航电与船载系统面临诸多系统耦合度控制难题。航电系统和船载系统在资源分配上存在差异，航电系统对信息处理的实时性和准确性要求极高，而船载系统需考虑更多的环境因素和设备兼容性，如何合理分配资源以满足各自系统的关键需求，同时又能实现协同工作，是一大挑战<sup>[10]</sup>。故障隔离方面，两者的故障模式和影响不同，航电系统故障可能导致飞行安全问题，船载系统故障可能影响船舶

的航行和作业。在集成过程中，需要建立有效的故障隔离机制，确保一个系统的故障不会扩散到另一个系统，这需要深入研究系统之间的耦合关系和相互影响，以实现高效的系统集成和可靠的运行。

## （二）新型技术应用前景

### 1. 智能容错架构

在智能容错架构方面，无论是航空电子航电系统还是船载系统，都面临着复杂的集成挑战与发展趋势。随着新型技术的不断涌现，其应用前景也为智能容错架构带来了新的机遇与变革。对于航空电子航电系统，其对可靠性和实时性要求极高，智能容错架构需要能够快速准确地检测和纠正故障，以确保飞行安全。而船载系统由于其运行环境的特殊性，如海洋环境的复杂性和不确定性，智能容错架构需要具备更强的抗干扰能力和适应性。基于AI的故障预测与健康管理（PHM）技术在这两类系统中的适配性存在差异，需要根据各自系统的特点进行针对性的设计和优化，以实现高效的智能容错架构。

### 2. 开放式架构演进

在系统集成挑战与发展趋势方面，航空电子航电系统与船载系统均面临诸多难题。新型技术应用前景上，两者都需紧跟时代步伐。对于开放式架构演进，航电系统的FACE标准强调开放性与模块化，通过定义统一接口，促进不同模块的集成与替换，提高系统可扩展性。而船舶系统的NAUTIS架构也注重模块化设计，以实现功能的灵活组合与扩展。然而，两者在技术路线上存在差异。航电系统更关注飞行安全与实时性，其架构演进紧密围绕航空需求。船载系统则需考虑海洋环境的复杂性与任务多样性，NAUTIS架构在满足船舶功能需求的同时，还要兼顾可靠性与适应性。这些异同反映了不同领域系统架构设计的特点与需求。

## （三）验证方法革新方向

### 1. 数字孪生技术应用

随着科技的发展，数字孪生技术在航电系统和船载系统验证

中逐渐崭露头角。在航电系统适航认证方面，数字孪生可构建虚拟的航电系统模型，精确模拟其在各种飞行环境下的运行状态，提前发现潜在问题，减少实际飞行测试的风险和成本。对于船载系统的型式认可，数字孪生能够对船舶的复杂环境和各种设备的协同运行进行模拟，如模拟不同海况下船载系统的性能，优化系统设计。通过数字孪生技术，实现了从传统的物理测试为主向虚拟验证与物理测试相结合的转变，极大地提高了系统集成的效率和可靠性，推动了航电系统和船载系统验证方法的革新。

### 2. 混合验证体系构建

随着航空电子航电系统与船载系统的不断发展，其验证方法面临革新需求。混合验证体系的构建是关键方向之一。在该体系中，需综合考虑硬件在环（HIL）测试与实物台架试验的特点及优势。对于不同系统，其权重分配规律至关重要。要深入分析两类系统在功能、性能、可靠性等方面的验证需求差异，以此确定HIL测试和实物台架试验各自所占比重。同时，要考虑如何将两者有机结合，实现优势互补。例如，HIL测试可在早期对系统的关键部分进行高效验证，而实物台架试验则能在更接近实际工况的条件下对系统进行全面检验。通过合理构建混合验证体系，提高系统验证的准确性和效率，推动两类系统架构设计的不断优化。

## 五、总结

航空电子航电系统架构设计与船载系统架构设计存在多方面差异。在架构设计理念上，航电注重飞行任务需求，船载更关注船舶运行特点。硬件实现路径方面，因航空和船舶环境不同而有别。环境适应策略也因各自所处环境而各异。现有跨领域标准体系存在互认障碍。基于此提出MBSE融合设计方法，但在动态环境模拟和长期可靠性评估存在局限。后续需开展多物理场耦合仿真等研究，以进一步完善跨领域系统架构设计的理论与方法，促进航空与船舶领域在系统架构设计上的交流与融合，提升设计的科学性与合理性。

## 参考文献

- [1] 艾山·白克热. 对高考报名系统架构的研究与设计的分析 [J]. 电脑知识与技术, 2021, (8): 226-227.
- [2] 张志慧, 钟雪涛. 基于SOA架构的电子政务系统集成技术应用 [J]. 电脑与电信, 2010(5): 2.
- [3] 王琨. 航电系统综合诊断数据采集系统设计 [D]. 电子科技大学, 2017.
- [4] 宋扬. 综合航电系统试验环境激励系统的设计与实现 [D]. 西安电子科技大学, 2016.
- [5] 张宇龙. 航电全任务数字仿真系统架构设计与验证 [D]. 电子科技大学, 2015.
- [6] 安康, 侯伶. 对IMA架构航电系统多级故障管理的设计与实现研究 [J]. 军民两用技术与产品, 2018(12): 1.
- [7] 王亮, 王璇, 谢博琳. 基于FACE的航电系统软件架构设计 [J]. 信息技术与信息化, 2021, 000(010): 125-127.
- [8] 刘元斌, 占日新. 航电系统仿真环境通信架构研究 [J]. 中国新技术新产品, 2021(3): 16-18.
- [9] 成燕. 基于系统架构的航电系统技术状态控制方法 [J]. 军民两用技术与产品, 2018(14): 1.
- [10] 朱克植. 面向民用直升机的航电系统架构改进设计 [J]. 直升机技术, 2020(2): 6.