

水陆两栖飞机的航电综合验证系统设计与应用

赵红军¹, 王 钰^{2,3}, 陈 亮³, 文 淼⁴, 李 越²

(1. 中航通飞华南飞机工业有限公司, 广东 珠海 519090;

2. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387;

3. 北京华力智飞科技有限公司, 北京 100193;

4. 中国民用航空适航审定中心 成都机载设备审定分中心, 成都 610000)

摘要: 该研究针对水陆两栖飞机航电系统设计和验证的复杂性和集成度问题, 开发了一种基于模块化设计的综合验证设备; 通过系统需求分析确定关键功能和性能要求, 设计并实现了支持 ARINC429 和 ARINC664 等航空接口标准的子系统, 并开发了综合测试设备、配线矩阵和电源管理系统; 研究表明, 该验证设备在数据激励与采集、自动化测试和配置管理方面表现优异, 能有效模拟和测试航电系统的各种操作场景; 自动化测试功能特别优化, 以适应未来技术的快速发展, 而模块化设计提升了测试效率, 确保了系统在实际应用中的快速适应性和整合能力; 该研究成功开发的航电系统综合验证设备显著提高了设计与验证的质量和速度, 为航电系统的进一步发展奠定了坚实基础, 展示了模块化设计在航电系统开发中的强大优势。

关键词: 两栖飞机; 航空电子系统; 模块化设计; 自动化测试; 系统集成

Design and Application of Integrated Avionics Verification
System for Amphibious AircraftZHAO Hongjun¹, WANG Yu^{2,3}, CHEN Liang³, WEN Miao⁴, LI Yue²

(1. General Huanan Aircraft Industry Co., Ltd., AVIC, Zhuhai 519090, China;

2. School of Electronic Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

3. Beijing Huali Zhifei Technology Co., Ltd., Beijing 100193, China;

4. Chengdu Airborne Equipment Center of Airworthiness Certification Center, CAAC, Chendu 610000, China)

Abstract: The avionics system design and validation of amphibious aircraft have the complexity and integration challenges. To address this issue, this paper develops a comprehensive verification device based on modular design, analyzes system requirements to identify key functions and performance criteria, achieves subsystems supporting ARINC429 and ARINC664 aviation interface standards, and develops comprehensive testing equipment, wiring matrices, and power management systems. The results show that this verification device has excellent performances in data stimulation and acquisition, automated testing, and configuration management, effectively simulating and testing various operational scenarios of avionics systems. Particularly optimizing the automated testing system to adapt to the rapid development of future technologies, while the modular design enhances testing efficiency, ensuring the system's rapid adaptability and integration capabilities in practical applications. This paper successfully presents an avionics system comprehensive verification device, significantly improves the quality and speed of design and validation, lays a solid foundation for further advancements in avionics systems, and has the powerful advantages of modular design in avionics system development.

Keywords: amphibious aircraft; avionics system; modular design; automated testing; system integration

收稿日期:2024-06-14; 修回日期:2024-07-23。

基金项目:民航安全能力建设资金项目(适航审定技术标准及符合性方法研究)。

作者简介:赵红军(1982-),男,大学本科,高级工程师。

引用格式:赵红军,王 钰,陈 亮,等. 水陆两栖飞机的航电综合验证系统设计与应用[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(7): 321-329.

0 引言

水陆两栖飞机由于其在水面和陆地上的起降能力,已广泛应用于搜索救援、灾害响应和远程运输等多种任务。这些飞机的多环境操作能力在紧急救援、环境监测和灭火任务中展现出高度的灵活性和实用性。

近年来,水陆两栖飞机的航电系统设计和验证技术得到了显著的发展。加拿大的 CL-415 和俄罗斯的 Be-200 等现代两栖飞机,凭借其先进的航电系统,在多种任务环境中展现了卓越的性能^[1]。文献表明,这些航电系统不仅包括高度精准的导航系统和实时通讯系统,还集成了各种传感器,用于监控飞行状态和外部环境,从而为飞行员提供决策支持^[2]。此外,随着技术的不断进步,航电系统的复杂性和集成度也不断提高,对其可靠性和维护性的要求也相应增加。研究者们通过开发高效、可靠的验证设备来确保航电系统的正常运行和维护。例如,开发了两栖飞机航电与机电交联自动化检测系统,显著提升了系统的测试效率和可靠性^[3-5]。

随着科技的发展,航空系统的复杂性和集成度不断提高,对水陆两栖飞机的可靠性和可维护性提出了更高的要求。因此,开发一种高效、可靠的综合验证设备对于确保水陆两栖航电系统的正常运行和维护至关重要。本研究旨在设计和实现一种水陆两栖飞机航电系统综合验证设备,该设备采用模块化设计,以提升系统架构的清晰性和管理性,并增强项目的时间效率和质量控制。综合验证设备不仅需要满足水陆两栖飞机在各种任务环境中的需求,还必须确保航电系统在复杂操作环境下的可靠性和性能,从而显著提高集成验证效率和准确性。

1 需求分析

需求分析是确保系统设计成功的关键步骤。在本研究中,我们采用了多种方法对水陆两栖飞机航电系统的需求进行了全面分析。首先,通过市场研究、面对面访谈和问卷调查等方式,深入了解了来自飞行操作员、维护工程师及航空系统设计师的详细需求和操作经验。这些信息帮助我们明确了系统应满足的关键功能和性能要求。

基于收集的数据,我们对现有的航电系统进行了技术评估,识别了其存在的局限性和潜在的改进空间。这一评估结果指导了综合验证设备设计的初步方向。在详细的需求规格书中,我们明确了系统组成、功能需求、性能指标及扩展和安全性要求。这些规格书确保了设计的设备能够在多种环境下运行,提供高效、可靠的性能,满足不同的任务需求。针对某型水陆两栖飞机航电系统,综合验证设备的需求分析涵盖了系统的各个组成部分。

1.1 系统组成

某型水陆两栖飞机航电系统综合验证设备主要包括综合测试设备、配线矩阵以及综合电源分配与管理设

备。这 3 个部分分别覆盖了仿真激励、数据采集监控、综合配电配线以及系统结构等功能模块。

1) 综合测试设备:支持 ARINC429、ARINC664 等航空总线接口仿真资源,通过以太网交换机实现与被测航电产品的系统互联^[6-7]。具体功能包括数据激励、自动化测试和配置管理等。

2) 配线矩阵:支持信号的无延迟切换和旁路操作,确保系统的高效连接。其设计要求包括信号切换不能破坏原有电气特性,物理上实现完全切断,且切换过程软件可控制。

3) 综合电源分配与管理设备:具备电源时序管理和不间断电源供应的能力,并能进行远程控制。所有设备设计有足够的冗余,以确保在部分断电情况下设备能持续运行,系统架构支持模块扩展,增强了系统的安全性和灵活性。

1.2 功能需求

水陆两栖飞机航电系统综合验证设备的设计需要满足一系列严格的功能需求,以确保系统的高性能和可靠性。首先,系统主控功能包括系统构型管理、接口控制文档(ICD)管理、综合配线配线以及系统资源监控管理。系统构型管理确保硬件和软件配置的一致性,ICD 管理负责接口配置的准确性和版本控制,综合配线配线保证内部和外部组件的稳定供电,系统资源监控管理则实时监控资源使用情况,并提供优化建议。

在数据激励与监控方面,综合验证设备必须支持多种信号的激励仿真,包括 ARINC664、ARINC429、CAN、ARINC818、ARINC717、离散量和模拟量信号。设备需要提供信号激励仿真、在线监控、自动化测试以及数据采集和存储功能。通过仿真和激励各种信号,系统能够在多种信号环境下进行测试,确保各组件在不同任务场景下的正常运行。

此外,综合验证设备还需要具备自动化测试和配置管理功能。自动化测试功能通过预先设计的测试脚本和流程,能够自动执行各项测试任务,提高测试效率和准确性。配置管理功能则负责导入和解析系统配置文件,并将配置信息下发到各个硬件模块,确保硬件设备能够根据最新的系统配置进行操作。这些功能需求共同构成了一个高效、可靠的综合验证系统,为水陆两栖飞机的航电系统提供了坚实的测试和验证平台。

1.3 性能指标

为了满足航电系统的高性能要求,综合验证设备的各个模块需要满足以下性能指标。

1) ARINC429 板卡:单块板卡提供不少于 12 路发送信号和 12 路接收信号,传输速率可配置为 12.5 kbps 或 100 kbps,支持奇偶校验功能,接收时钟同步指令 IRIG-B 或 IEEE1588,传输报文能够打上时间戳^[7]。

2) ARINC664 板卡: 提供不少于 20 路 ARINC664 双通道网络端口, 支持全双工数据交互功能, 最大传输速率不低于 100 Mbps, 数据延迟时间不大于 10 μ s, 支持端口级、VL 级、ICD 级的统计^[8]。

3) CAN 总线板卡: 每块板卡提供不少于 10 路 CAN 收发通道, 支持 CAN 总线分析软件, 实现数据发送和数据解析^[9]。

4) 商用以太网交换机: 提供不少于 40 个端口, 支持千兆全线速全双工交换, 吞吐量不小于 100 Gbps, 支持静态 MAC 和静态路由^[10]。

5) 时钟同步设备: 提供统一时钟源, 时钟精度不大于 1 ms, 所有采集、记录数据带有时间戳信息^[11]。

6) 其他设备: 如仿真服务器、数据服务器、桌面工作站等, 都需要满足相应的性能要求, 确保系统的整体性能。

通过详细的需求分析, 我们明确了系统各个组成部分的具体需求和性能指标, 为后续的系统设计和实现奠定了坚实的基础。

2 水陆两栖飞机航电综合测试系统设计

系统设计是确保水陆两栖飞机航电系统综合验证设备能够高效且可靠运行的基石。本项目采用了模块化设计策略, 以增强系统架构的清晰性和管理性, 同时提高项目的时间效率和质量控制^[12-13]。

2.1 系统架构总体设计

系统架构的设计是确保水陆两栖飞机航电系统综合验证设备能高效且可靠运行的基石。本项目采用了模块化设计策略, 以增强系统架构的清晰性和管理性, 同时提高项目的时间效率和质量控制。综合验证设备主要由以下关键子系统构成, 如图 1 所示。

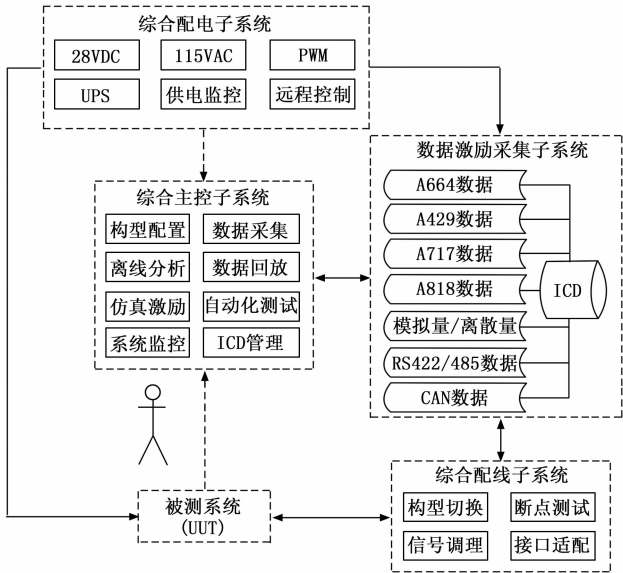


图 1 系统模块关系图设计图

1) 综合主控子系统: 系统的神经中枢, 综合主控子系统包括主控系统软件、上位机、设备安装台架和主控台。它负责整体的系统构型管理、ICD 配置^[14]、数据激励与采集管理、自动化测试以及系统监控。该子系统的设计旨在提供一个统一的操作界面, 通过这一平台, 操作人员可以轻松管理和监控整个系统的状态。

2) 数据激励采集子系统: 包括低速信号和 A664 总线收发系统。此子系统支持 ARINC 429、RS422 以及离散量数据的收发功能, 并实施在线监控、数据解析、存储和数据回放。通过有效管理来自各种传感器和接口的数据, 此模块确保了数据处理的高效性和准确性。

3) 综合配线子系统: 核心为高性能以太网交换机和信号切换设备。该子系统通过以太网实现物理信号通道的映射和接口适配, 支持信号的无延迟切换和旁路操作, 从而确保数据通信的低延迟和高可靠性。

4) 综合配电子系统: 负责管理电源供应并通过 RS485 总线进行远程控制。它配备了电源时序管理和不间断电源供应的能力, 确保系统在各种操作环境下的稳定运行, 即使在断电情况下也能保持功能不受影响。

通过这一模块化的系统架构, 不仅每个组件的功能得到了清晰的定义, 而且各组件之间的协作也更加顺畅。这种设计不仅提高了系统的可维护性和可扩展性, 也便于将来对系统进行升级和维护。整体架构如图一所示, 提供了一个直观的系统模块关系图, 便于理解各个部分的功能和相互关系。

2.2 硬件设计

在本项目中, 硬件设计的关键在于确保每个模块能够高效地承担指定任务, 并通过标准化接口实现模块间的良好互联。以下详细介绍了各硬件模块的功能、接口设计及其在系统中的集成方式。

1) 综合主控子系统: 该子系统采用了高性能的上位机和主控台, 配置了高效的处理器和大容量存储设备。这不仅保证了系统处理能力的需求, 还提供了足够的数据存储空间。接口设计包括了用于数据通信的以太网接口和用于连接外部设备的 USB 接口。主控系统软件通过这些接口负责系统的构型管理、ICD 配置以及数据激励与采集管理, 确保了系统操作的高效与稳定。

2) 数据激励采集子系统: 此系统配备了支持 ARINC429、ARINC664、RS422 等多种信号的收发板卡^[15-16]。板卡提供至少 200 路 ARINC429 发送和接收通道及不少于 48 路 ARINC664 双通道网络端口, 最大传输速率达 100 Mbps, 数据延迟不超过 10 微秒。这些板卡通过标准化接口与系统的其他部分连接, 确保数据的高效传输和精准处理。

3) 综合配线子系统: 核心设备为高性能以太网交换机和信号切换设备, 支持静态 MAC 和静态路由, 实

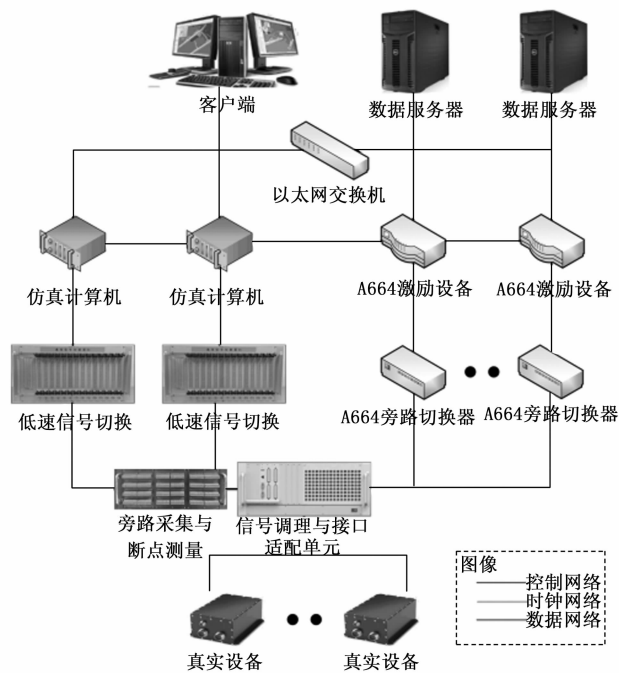


图 2 系统架构图

现千兆全线速全双工交换。该子系统负责实现物理信号通道的映射和接口适配，通过以太网由主控软件控制，实现 ARINC429、ARINC664 等信号的无缝切换和传输，确保了低延迟和高可靠性的数据通信。

4) 综合配电子系统：该系统选用了可靠的电源时序器和不间断电源（UPS）系统，确保在断电情况下设备的持续运行。通过 RS485 总线实现远程监控和控制，保障了系统电力供应的稳定性和安全性^[17]。

所有硬件设备均安装在标准的 38U 机柜中，每个机柜配备电源时序器、UPS 系统和理线柜，确保了系统集成的效率和规范性。这种标准化和模块化的设计不仅提高了系统的可维护性和扩展性，也便于未来的升级和维护。

2.3 软件设计

在本项目中，软件设计采用了三层架构，旨在提升系统的模块化和可维护性（软件架构图如图 3 所示）。以下详细介绍了用户接口层、服务层和硬件接口层的设计及其功能。

用户接口层：基于 Qt 框架开发，提供了统一的图形化操作界面。用户可以通过此界面进行系统配置管理、仿真激励控制和数据监视分析。界面设计旨在使操作直观简便，同时支持高级功能，如加载第三方硬件的动态库和利用视图接口实现其操作界面的自定义。这使用户能够轻松执行试验操作和监控，有效管理各种配置和测试任务。

服务层：位于用户接口层和硬件接口层之间，服务层承担着数据处理和中介服务的关键角色。这一层通过

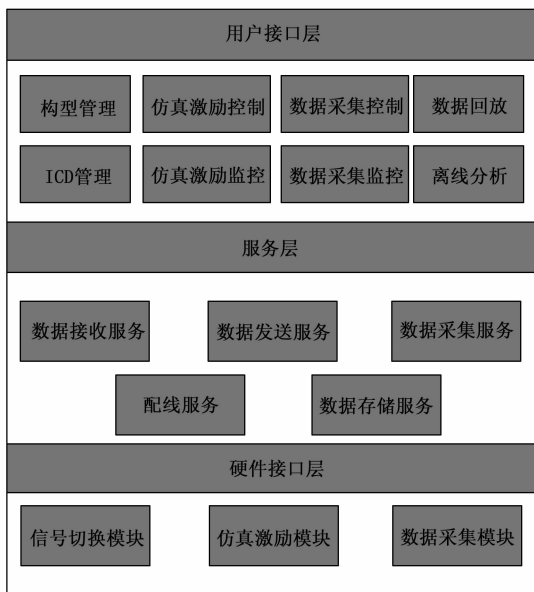


图 3 软件系统架构图

配置管理模块解析用户的配置文件，并将配置信息有效地下发到硬件层。此外，服务层还负责数据采集、存储、传输和监控等功能，确保数据从硬件层到用户界面的流畅传递和处理。

硬件接口层：该层封装了所有硬件设备的驱动程序，并通过标准化接口支持多种总线协议，如 ARINC429 和 ARINC664 等。硬件接口层通过引入硬件抽象层（HAL）（如图 4 所示），屏蔽了不同硬件设备之间的操作差异，提供统一的数据操作接口给上层软件。这种设计极大地简化了硬件设备的集成和维护过程，同时提高了系统的扩展性和维护性^[18]。

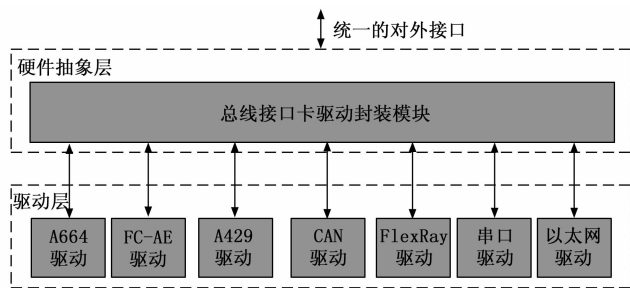


图 4 HAL 层原理示意图

整个软件系统的工作流程设计清晰，确保各层次之间的数据和命令传输高效、准确，支持系统的实时监控和动态调整（图 5 展示了软件工作流程）。

3 水陆两栖飞机机电综合验证系统实现

在硬件实现阶段，本系统对各模块进行了细致的设备选型、接口设计和系统集成，以确保其高性能和可靠性。以下是各主要组件的详细实施方案：

1) 综合主控子系统：该子系统采用高性能上位机

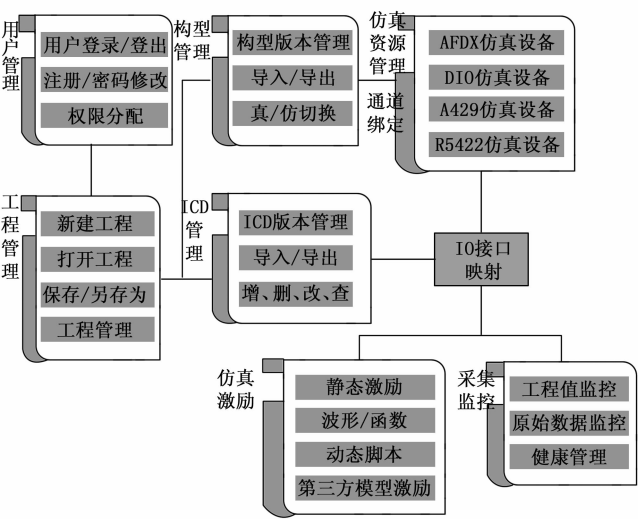


图 5 软件工作流程图

和主控台，配置高效处理器和大容量存储设备。接口设计包括用于数据通信的以太网接口和连接外部设备的 USB 接口。主控系统软件通过这些接口负责系统构型管理、ICD 配置及数据激励与采集管理，确保系统运行的高效与稳定。选用了最新的高性能处理器，如 Intel Xeon 系列^[19]，以满足复杂数据处理的需求；存储设备选用了高容量的固态硬盘（SSD），以确保数据存储的可靠性和高速访问。以太网接口支持千兆速率，确保数据传输的高效性；USB 接口则用于连接各种外部设备，如调试工具、监控设备等，提升系统的灵活性和扩展性。

2) 数据激励采集子系统：此系统配置支持 ARINC429、ARINC664、RS422 等多种信号的收发板卡。板卡提供至少 200 路 ARINC429 发送和接收通道及不少于 48 路 ARINC664 双通道网络端口。板卡设计以确保最大传输速率达 100 Mbps，数据延迟不超过 10 微秒，通过标准化接口与其他系统部分连接，确保数据的高效传输和处理。使用高性能 FPGA（现场可编程门阵列）芯片，实现多种信号的高效处理和转换；板卡材料选用高导热性和高稳定性的 PCB 材料，以确保长时间工作时的稳定性。每块板卡均配备标准化接口，确保与其他模块的无缝对接，同时支持热插拔功能，方便维护和升级。

3) 综合配线子系统：核心设备为高性能以太网交换机和信号切换设备，端口数量不少于 40 个，支持静态 MAC 和静态路由功能，实现千兆全线速全双工交换。该子系统负责实现物理信号通道的映射和接口适配，通过以太网由主控软件控制，实现 ARINC429、ARINC664 等信号的无缝切换和传输，确保低延迟和高可靠性的数据通信。选用高可靠性的工业级以太网交换机，确保数据传输的稳定性和可靠性。采用模块化设计，每个交换机模块可独立更换和升级，确保系统的灵

活性和可扩展性。

4) 综合配电子系统：选用了可靠的电源时序器和不间断电源（UPS）系统，确保在断电情况下设备的持续运行。通过 RS485 总线实现远程监控和控制，保障系统电力供应的稳定性和安全性。UPS 系统则选用具备长时间续航能力的型号，以确保关键设备在断电情况下仍能正常工作。RS485 总线接口设计为双冗余配置，确保在任何情况下都能实现电源管理和控制的高可靠性。

所有硬件设备均安装在标准的 38U 机柜中，每个机柜配备了电源时序器、UPS 系统和理线柜，确保系统集成的效率和规范性。通过这些精心设计的措施，硬件实现阶段不仅满足了水陆两栖飞机航电系统综合验证的严格要求，还确保了系统的稳定运行。

3.2 软件实现

在软件实现过程中，系统被细分为以下关键功能模块，通过这种划分，保证了操作的高效性和系统的灵活性：（模块之间的业务关系如图 6 所示）

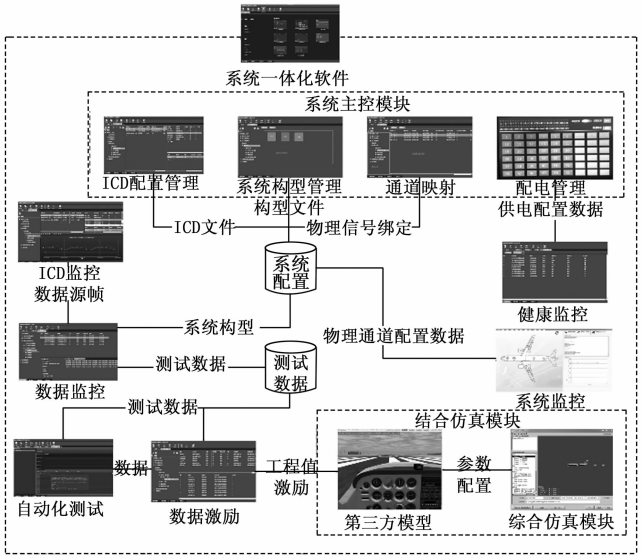


图 6 系统主控模块图

1) 系统主控模块：系统的核心控制中心，该模块提供统一的操作入口，负责系统的配置管理，包括通道映射、ICD 管理与映射、构型管理等如图 7 所示。通过用户友好的界面设计，操作员可以轻松管理整个系统，提高了工作效率。系统主控模块采用多线程设计，确保在高负载情况下仍能平稳运行；界面设计则采用人性化原则，操作简便直观，支持多用户协同工作。

2) 数据激励与采集模块：负责仿真信号的激励和接收，能处理静态和动态数据激励（图八）。根据 ICD 配置在线解析数据帧，并负责数据的存储和回放。该模块确保数据处理的高效性和准确性，支持实时监控和数据分析。数据激励与采集模块内置多种数据处理算法，



图 7 系统主控模块图

如滤波、校正等，确保数据的高精度和稳定性；支持多种数据存储格式，方便后续的数据分析和处理。

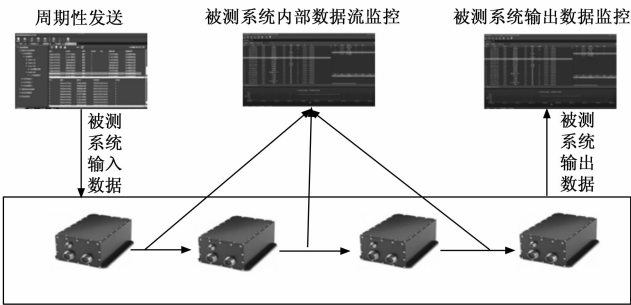


图 8 数据激励与采集模块工作原理图

3) 自动化测试模块：管理自动化测试的整个流程，包括测试的启动、运行监控以及生成测试报告如图 9 所示。通过自动化测试流程，可以显著提高测试的效率和准确性，同时确保软件质量和系统性能符合设计要求。自动化测试模块集成了脚本引擎，支持用户编写自定义测试脚本，灵活配置测试流程；测试报告生成功能支持多种格式，方便不同用户的需求。

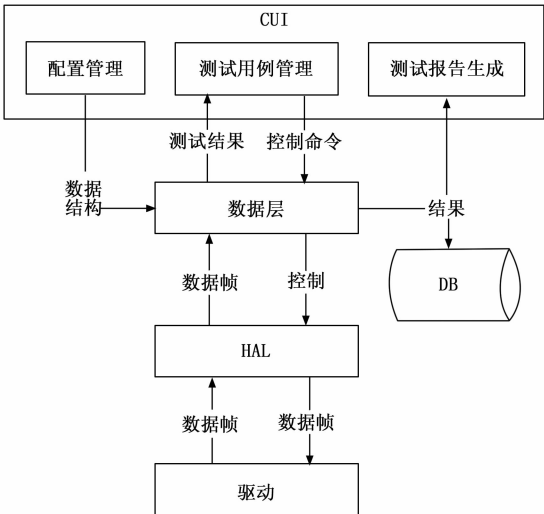


图 9 自动化测试框架图

4) 综合仿真模块：提供外围飞行仿真模型输入激励，并完成基于模型的航电系统闭环测试。图十展示了仿真数据工作原理图。通过模拟实际操作环境测试和验证系统功能，确保各项功能的实际适用性和可靠性。综合仿真模块支持多种仿真模型的集成，如飞行控制、导航等，确保仿真测试的全面性；支持实时参数调整和监控，提升测试的灵活性和精确性。

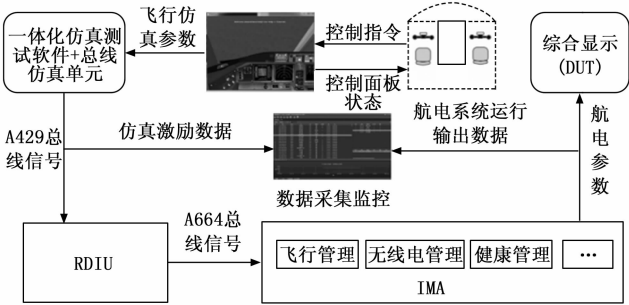


图 10 仿真数据工作原理图

用户接口层：基于 Qt 框架开发，提供统一和直观的图形化操作界面，使用户可以轻松进行系统配置和管理，同时加载和应用第三方硬件动态库。系统提出基于配置的总线适配解决方案，通过组件化技术，使平台软件的中间层和 GUI 界面易于扩展支持第三方硬件。用户可按照接口定义开发动态库，通过配置界面加载，并通过 QML 视图组件实现使用界面动态加载。模块化设计封装功能，组件化设计确保纵向隔离和解耦，提高系统的灵活性和扩展性。

服务层：服务层承担数据处理和服务功能，如数据采集、存储、传输和监控。通过配置管理模块解析用户的配置文件，并将配置信息下发到硬件层，确保数据处理的及时性和准确性。采用基于配置的总线适配解决方案，支持任意数据帧的解析和硬件板卡的适配。通过组件化技术，用户可开发并加载第三方硬件动态库。服务层集成了数据校正和滤波处理算法，支持多种数据存储格式，确保数据的高精度和稳定性，并采用分布式架构提高系统的可用性和扩展性。

硬件接口层：封装所有硬件设备的驱动程序，并通过硬件抽象层（HAL）屏蔽不同硬件设备之间的操作差异，提供统一的数据操作接口给上层软件，简化了硬件设备的集成和维护过程，增强了系统的扩展性和维护性。

这种层次分明的设计结构不仅提升了系统的维护效率和可扩展性，也确保了各层之间的数据和命令传输的高效和准确，为水陆两栖飞机航电系统的综合验证提供了坚实的软件支撑。

4 软件测试

软件测试是确保水陆两栖飞机航电系统综合验证设

备的软件部分功能和性能达到设计要求的环节^[20]。测试视角如图 11 所示。为确保测试的全面性和准确性, 本章将详细描述测试环境、测试内容、测试方法、测试流程和测试结果。



图 11 测试视角界面

4.1 测试环境

测试环境包括高性能上位机、综合主控子系统、数据激励采集子系统、综合配线子系统和综合配电子系统。所有硬件设备均安装在标准的 38U 机柜中, 并配备电源时序器和 UPS 系统, 确保测试过程的稳定性和可靠性。此外, 测试环境还整合了配置管理模块、自动化测试工具和监控系统, 以实现全面的数据采集和监控。

测试内容涵盖功能测试、性能测试、可靠性测试和兼容性测试。其中, 功能测试旨在验证系统主控模块、数据激励与采集模块、自动化测试模块和综合仿真模块的各项功能是否正常运行, 涵盖了系统配置管理、ICD 管理、数据激励与采集、自动化测试执行和仿真测试功能。性能测试则评估系统在高负载条件下的响应时间、数据处理能力和资源利用率, 包括数据传输速率、系统响应时间、CPU 和内存使用情况的检测。可靠性测试通过长时间运行测试和故障注入测试, 评估系统的稳定性和容错能力, 确保系统在各种异常情况下能够稳定运行, 并能快速恢复。最后, 兼容性测试验证系统对不同硬件板卡的适配性及对第三方硬件动态库的支持情况, 确保系统能够灵活加载和管理第三方硬件, 并能正常运行。

4.2 测试方法和流程

测试流程分为测试计划、测试设计、测试执行和测试报告 4 个关键阶段, 其中每个阶段都通过自动化测试工具进行组织和执行。自动化测试按照图 12 所示的测试流程图进行测试工程进行组织和执行:

在测试计划阶段, 制定了详细的测试计划, 涵盖测试目标、测试范围、测试策略、测试环境和资源分配。此阶段还包括创建新的测试工程或打开现有的测试工

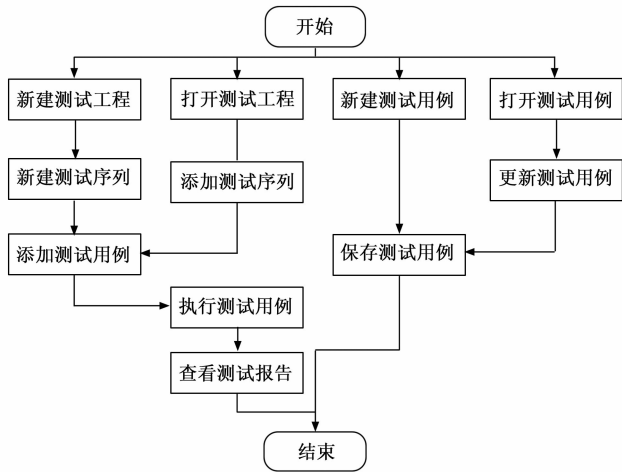


图 12 测试流程图

程, 以确保所有测试活动在统一的环境下进行管理, 从而提高测试的一致性和效率。

测试设计阶段, 重点放在设计详细的测试用例和测试脚本上, 确保涵盖所有功能点和性能指标。这包括创建或修改现有的测试用例, 并添加或更新测试序列。此阶段的核心是确保所有用例都经过精心设计和严格评审, 以提升测试的全面性和准确性。

测试执行阶段, 根据既定的测试计划和详细的测试用例, 逐项执行测试。在此过程中, 需记录测试结果并分析问题, 包括执行手动测试和自动化测试。测试用例执行完毕后, 应立即保存并查看测试结果, 确保所有测试步骤的结果都是可追溯和可验证的。

最后的测试报告阶段负责整理测试结果并编写详细的测试报告。这包括分析测试中发现的问题及提出相应的改进建议。测试报告应支持多种格式输出, 以便于查看和分享, 支持后续产品的改进和质量控制。

4.3 自动化测试设计和测试结果

自动化测试软件基于 Python 框架开发, 确保了测试流程的高度可定制性和灵活性^[21]。以下详细介绍自动化测试的设计:

配置管理: 此部分负责导入端系统的配置文件, 并将其解析为内部数据接口, 再下发到各个硬件板卡中。该步骤确保硬件设备能够依据最新的系统配置进行操作, 从而提高测试的准确性和一致性。

测试用例管理: 用户可选择并运行表格形式 (如 csv 文件) 或脚本形式 (如 py 文件) 的测试用例^[22]。测试脚本直接控制板卡操作, 并从数据层获取返回数据以评定测试结果。测试用例的编写基于 Python, 通过高级应用编程接口 (API) 直接调用硬件抽象层 (HAL) 和数据层的核心功能。每个用例都包含仿真激励的数据源定义、返回值预期及执行结果的判定, 以确保测试的

全面性和准确性。

测试报告生成：测试用例执行完成后，测试结果由数据层配对保存。系统提供默认的报告模板，并支持用户自定义报告格式，以满足不同的测试和报告需求。这种设计使得测试结果的呈现既标准化又具有灵活性，便于用户根据需求调整报告的详细程度和格式。最终的测试报告将如图 13 所示。

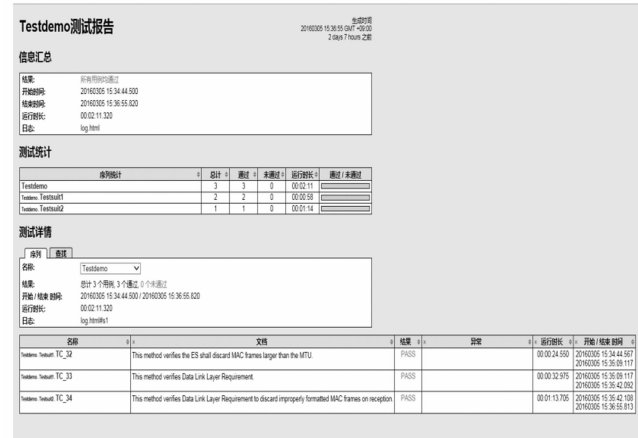


图 13 测试报告图

测试结果表明，系统的各模块功能正常，性能指标符合设计要求，显示出卓越的稳定性和兼容性。具体来看，在功能测试方面，所有测试用例均通过，表明系统主控模块、数据激励与采集模块、自动化测试模块和综合仿真模块均能正常运行，完全符合预期。性能测试中，系统在高负载条件下运行稳定，响应时间和数据处理能力均符合预期，CPU 和内存使用率保持在合理范围内，未出现性能瓶颈，证明系统设计的高效性和资源管理优化。在可靠性测试中，系统通过长时间运行测试和故障注入测试，展现出良好的稳定性和容错能力。即使在异常情况下，系统也能快速恢复并继续运行，确保了系统的高可用性和稳定性。

进一步的兼容性测试结果表明，系统对不同硬件板和第三方硬件动态库具有良好的适配性。所有测试用例均通过，未发现兼容性问题，说明系统能灵活适应多变的硬件环境，保持高效运行。综合上述测试结果，可以看出系统设计和实现的有效性，为系统的进一步部署和应用提供了坚实的基础。

5 结束语

本研究成功实现了某型水陆两栖飞机航电系统综合验证设备的设计与应用，通过系统的需求分析、硬件设计与软件实现，确保了系统的模块化和高可维护性。测试结果表明，该验证设备在数据激励与采集、自动化测试和配置管理等方面表现优越，完全满足了设计要求和

预期目标。这些成果不仅证实了我们设计的合理性，也展示了系统在实际操作中的高效性和可靠性。

尽管取得了显著成效，未来的工作将侧重于提升系统的扩展性和灵活性，以适应新技术和变化的需求。此外，将探索优化自动化测试流程，特别是在测试用例的生成和管理方面，以及引入机器学习和智能算法以提高测试效率和覆盖率。这些努力将有助于进一步完善航电系统的综合验证设备，使其更好地服务于航空行业的发展。

参考文献：

[1] CALBEIX C, STOUKOV A, LEGENDRE R D. Numerical simulation of aerial liquid drops of canadair CL-415 and dash-8 airtankers [J]. International Journal of Wildland Fire, 2023, 32 (11): 1515 - 1528.

[2] 张楠楠, 彭芳, 徐曼, 等. 2017 世界军民两用技术与产品发展展望 [J]. 军民两用技术与产品, 2017 (5): 17 - 19.

[3] 薛凤凤, 赵尚弘, 李勇军, 等. 面向航空骨干网的大型无人机光通信技术应用 [J]. 红外与激光工程, 2023 (1): 208 - 215.

[4] 李燕南, 梁向东, 杨定华, 等. 两栖飞机航电与机电交联自动化检测系统的开发 [J]. 航空科学技术, 2019, 30 (3): 5.

[5] 王峰华, 段旭鹏, 程志航, 等. 船身式水陆两栖飞机起降飞行仿真研究 [J]. 航空工程进展, 2021, 12 (1): 72 - 78.

[6] 李晓颖, 刘航航, 郭彦辰, 等. 基于 FPGA 的 DSP 与 ARINC429 总线控制器接口设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2024 (4): 71 - 76.

[7] 杨高, 彭良福. 多通道 ARINC429 总线的设计与实现 [J]. 传感器技术与应用, 2023, 11 (1): 90 - 100.

[8] 王伟鹏, 张延园, 姚进华. 基于 FPGA 的 ARINC664/AFDX 端系统设计 [J]. 微处理机, 2009, 30 (2): 1 - 4.

[9] 周映虹, 刘剑彬, 陈斌, 等. 多节点 CAN 总线网络的通信设计与测试 [J]. 环境技术, 2018, 36 (3): 78 - 81.

[10] 白雅杰, 丁可, 李岭. 以太网交换机中 MAC 控制器设计与实现 [J]. 中国集成电路, 2023, 32 (11): 75 - 81.

[11] 薛楠, 李斌, 杜建华, 等. 航电网络系统时钟同步原理和实现 [J]. 电脑知识与技术: 学术版, 2019, 15 (7X): 2.

[12] 张永杰, 崔博, 王明振, 等. 水陆两栖飞机着水试验与理论分析方法研究进展 [J]. 航空学报, 2023, 44 (21): 104 - 147.

[13] 马晓晨, 葛声, 相英. 一种通用飞机航电系统的综合处理机设计 [J]. 电子技术, 2023 (3): 64 - 66.

[14] 韩晓东, 翟正军, 陆艳洪, 等. 基于 ICD 配置的航电总线测试软件自动生成方法研究 [J]. 测控技术, 2011, 30

- (11): 84–87.
- [15] PEREZ-MATO, J, PEREZ-JIMENEZ, et al. Optical wireless interface for the ARINC 429 avionics bus: Design and implementation [J]. IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine, 2013, 28 (6): 15–21.
- [16] YUNXIA S. Design of an application circuit featuring cross backup and distributed receiving based on RS422 bus [J]. Fire Control Radar Technology, 2019.
- [17] WU H Z, ZHANG L J, ZHANG C G. Realization of ethernet and RS485 communication gateway based on $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ system [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 39: 416–420.
- [18] 王涛, 张伟良, 冯重熙. 嵌入式系统硬件抽象层的原
(上接第312页)
- [15] TAN J, WANG M, ZHANG J, et al. Determination of the thickness of interfacial water by time-resolved sum-frequency generation vibrational spectroscopy [J]. Langmuir, 2023, 39 (50): 18573–18580.
- [16] 郑境国. 时间分辨和频光谱系统的构建及生物学中动力学过程的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [17] 王洋. 相敏和频光谱方法及在界面研究中的应用 [D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [18] 周达. 氧还原反应模型界面结构与动力学探究 [D]. 北京: 中国科学技术大学, 2022.
- [19] WEI X, HONG S-C, LVOVSKY A I, et al. Evaluation of surface vs bulk contributions in sum-frequency vibrational spectroscopy using reflection and transmission geometries [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2000, 104 (14): 3349–54.
- [20] HELD H, LVOVSKY A I, WEI X, et al. Bulk contribution from isotropic media in surface sum-frequency generation [J]. Physical Review B, 2002, 66 (20): 205110.
- [21] WANG J, CLARKE M L, CHEN Z. Polarization mapping: a method to improve sum frequency generation spectral analysis [J]. Analytical chemistry, 2004, 76 (8): 2159–2167.
- [22] ZHUANG X, MIRANDA P B, KIM D, et al. Mapping molecular orientation and conformation at interfaces by surface nonlinear optics [J]. Physical Review B, 1999, 59 (19): 12632–40.
- [23] CATTANEO S, KAURANEN M. Polarization-based identification of bulk contributions in surface nonlinear optics [J]. Physical Review B, 2005, 72 (3): 033412.
- [24] RICHMOND G. Molecular bonding and interactions at aqueous surfaces as probed by vibrational sum frequency spectroscopy [J]. Chemical reviews, 2002, 102 (8): 2693–724.
- [25] NIU K, WANG H-F, MARCUS R A. Sum rule comparison and realization [J]. 电子技术应用, 2001, 27 (10): 3.
- [19] MORE A. Intel xeon phi coprocessor high performance programming [J]. Intel Xeon Phi Coprocessor High Performance Programming, 2013, 13 (vember): 23–57.
- [20] 刘玉军, 赵创新, 王振华, 等. 一种无人机飞行控制软件自动测试方法 [J]. 计算机测量与控制, 2024 (2): 50–55.
- [21] 蒋崇武, 刘斌, 王轶辰, 等. 基于Python的实时嵌入式软件测试脚本 [J]. 计算机工程, 2009, 35 (15): 64–66.
- [22] 吴立金, 简阳, 张凯, 等. 基于Python语言的GUI自动化测试脚本技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3330–3332.
- son of narrowband and broadband sum frequency generation spectra and comparison with theory [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2024, 121 (19): e2402550121.
- [26] LAN Z, CHEN F, QIANG W, et al. Direct observation of water clusters for surface design [J]. Chemical Engineering Science, 2020, 217: 115475.
- [27] ROGNONI A, CONTE R, CEOTTO M. How many water molecules are needed to solvate one? [J]. Chemical Science, 2021, 12 (6): 2060–4.
- [28] WANG H-F. Sum frequency generation vibrational spectroscopy (SFG-VS) for complex molecular surfaces and interfaces: Spectral lineshape measurement and analysis plus some controversial issues [J]. Progress in Surface Science, 2016, 91 (4): 155–82.
- [29] GHOSH A, SMITS M, BREDENBECK J, et al. Femto-second time-resolved and two-dimensional vibrational sum frequency spectroscopic instrumentation to study structural dynamics at interfaces [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79 (9): 093907.
- [30] WANG H-F, GAN W, LU R, et al. Quantitative spectral and orientational analysis in surface sum frequency generation vibrational spectroscopy (SFG-VS) [J]. International Reviews in Physical Chemistry, 2005, 24 (2): 191–256.
- [31] YANG Y J, PIZZOLATTO R L, MESSMER M C. Internal-external reflection sum-frequency generation spectroscopy at an interface [J]. J Opt Soc Am B, 2000, 17 (4): 638–45.
- [32] PIATKOWSKI L, ZHANG Z, BACKUS E H G, et al. Extreme surface propensity of halide ions in water [J]. Nature Communications, 2014, 5 (1).
- [33] YU C C, SEKI T, CHIANG K Y, et al. Polarization-Dependent heterodyne-detected sum-frequency generation spectroscopy as a tool to explore surface molecular orientation and angstrom-scale depth profiling [J]. J Phys Chem B, 2022, 126 (33): 6113–24.