

图 4 双输入接口设计

为保证量产合格率, 8K-FPC 的布线规则、过孔布局、叠层结构及压合工艺采用柔性电路板的规模化制造窗口, 确保在高密度布线与多层结构条件下实现稳定的电性能与可控的生产良率, FPC 的结构如下:

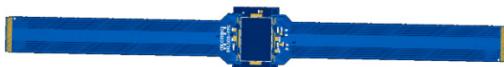


图 5 FPC 结构图

FPC 的结构需适应投影光机内部紧凑的空间布局, 使其能够在有限空间内实现可靠布设与装配, 不干扰光机内部的光学、散热和机械结构。

3 实验验证与性能分析

3.1 高速数据链路

为验证多路数据高达 18Gbps 的数据链路稳定性, 单路需要高达 1.8Gbps 的传输速率的需求, FPC 的测试数据源选用 FPGA, FPGA 使用并行处理架构, 经过 serdes 硬件架构的并串转换功能, 单路接口使用 0.9Gbps 时钟双边沿采样以达到单端时钟 1.8Gbps 的数据传输速率, 经过 fpc 传输点亮面板, 如图所示。

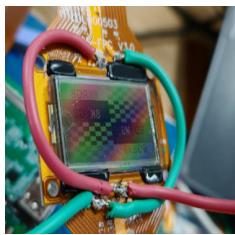


图 6 高清显示屏通信测试图

其中棋盘格部分验证了数据的行场信息通信正常, “8k”字样验证说明行内数据位置像素点基本对齐, 不同的灰度图像说明数据链路之中的每个像素点中 8bit 数据没有错位和出现数据链路没有出现电流不均衡的问题, 从而验证 fpc 的高速通信链路稳定性。

3.2 散热性能分析

在硬件设计之中, 保持器件工作在稳定的温度状态之下尤为重要, 一方面高速传输数据在低温稳定的状态下, 可以使得数据的建立时间和保持时间在时钟的窗口值的中心位置, 另一方面 LCOS 是主体设计是模拟电路, 良好的散热使其积分非线性和差分非线性精度更高, 信噪比质量更好, 常规散热基板和优化设计后的基板的散热效果图如下所示。

本设计采用集成紫铜补强散热结构, 实验测试结果表

明, 本设计的集成散热结构可使器件工作温度从常规方案的 55.6°C 降至 28.3°C, 散热效率较常规结构提升约 57%。

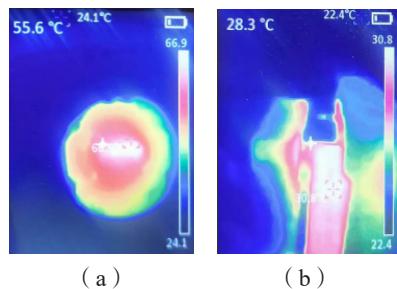


图 7 FPC 原结构散热图 (a) 优化后结构散热图 (b)

4 结语

本文针对 8K 高清显示系统的传输与供电需求, 设计了一种基于 LCOS 芯片的高性能 FPC 方案。通过高速差分传输链路、集成化散热结构、双输入接口与多版本迭代的电源优化, 实现了高速数据传输、180Hz 刷新率及稳定的多电压等级供电。实验结果表明, 该方案有效解决了大电流供电压降、高速信号传输干扰及散热等关键问题, 工艺适配性与可靠性满足工业化应用要求。

参考文献

- [1] 郭恒瑞. 基于 PI 基底溶解控制的线封装液态金属柔性电路 3D 打印技术[D]. 青岛理工大学, 2025. DOI: 10.27263/d.cnki.gqudc.2025.000468.
- [2] McGibney E, Smith L, Cahill D G, et al. The High Frequency Electrical Properties of Interconnects on a Flexible Polyimide Substrate Including the Effects of Humidity[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2011, 1(4): 670-677. DOI: 10.1109/ICEPT.2011.6063073.
- [3] Mitsui R, Matsuo T, Onishi K, et al. Electrical Reliability of a Film-Type Connection During Repeated Bending for Flexible Electronics[J]. Electronics, 2015, 4(4): 827-836. DOI: 10.3390/electronics4040827.
- [4] Xu W J, Xin D J, Yang L, et al. High-Speed Signal Optimization at Differential VIAs in Multilayer Printed Circuit Boards[J]. Electronics, 2024, 13(17): 3377. DOI: 10.3390/electronics13173377.
- [5] 方文宇, 倪洪江, 龚明, 等. 高温热老化对聚酰亚胺复合材料性能的影响[J]. 塑料科技, 2025, 53(07): 14-18. DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2025.07.003.
- [6] 袁帅. 高速 PCB 中传输线与过孔的信号完整性分析与优化设计[D]. 电子科技大学, 2021. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2021.004338.
- [7] 孔善右, 唐德才, 赵紫倩, 等. 柔性电子产业发展文献综述[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(06): 106-110+126. DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.06.026.

Research on Integration and Whole Life Cycle Management of Ship Engine Room Automation System

Jinfei Mo

Shanghai Salvage Bureau, Ministry of Transport, Shanghai, 200090, China

Abstract

This article conducts a systematic study on the integration technology and full lifecycle management strategy of ship engine room automation systems. After analyzing key technologies such as layered architecture, software support platform layer, business application layer, user layer, fieldbus, digital twin, and lightweight data transmission, a full lifecycle management method covering design, operation, repair, and retirement recovery is proposed, and a ship shore integrated intelligent operation platform relying on “two ends and two clouds” is created. Research has found that modular design, predictive maintenance, and intelligent decision support can improve the reliability, safety, and economy of cabin systems. The future development direction is to solve problems such as network security, data quality, and personnel training, and achieve the intelligence and unmanned operation of ship engine rooms.

Keywords

ship engine room; Automation system; System integration; Full lifecycle management; Intelligent operation and maintenance; Digital Twin

船舶机舱自动化系统集成与全生命周期管理研究

莫金飞

交通运输部上海打捞局，中国 · 上海 200090

摘要

本文对船舶机舱自动化系统集成技术和全生命周期管理策略展开系统性研究，经由剖析分层架构、软件支撑平台层、业务应用层以及用户层、现场总线、数字孪生、数据轻量化传输等关键技术之后，给出涵盖设计、经营、修理和退役回收的全生命周期管理方法，并创建起依靠“两端两云”的船岸一体化智能运作平台。研究发现，模块化设计、预测性维护、智能决策支持等手段可以提升机舱系统可靠性、安全性、经济性。未来发展方向是解决网络安全、数据质量、人员培训等问题，实现船舶机舱的智能化、无人化。

关键词

船舶机舱；自动化系统；系统集成；全生命周期管理；智能运维；数字孪生

1 引言

船舶机舱自动化是智能船舶的重中之重，它的发展经历了一个从单机控制到分散控制再到网络化控制的过程，现在正处于迈向智能化、无人化的进程当中。随着机舱内设备越来越复杂，运维成本压力不断增加，传统的依靠人工或者按照固定周期进行维修的方式已经不能满足当前现代船舶高效、安全航行的要求^[1]。本文通过集成现场总线，采用大数据、数字孪生等技术形成分层式体系结构，并且从设计、建造、运营直到退役的全生命周期实施管理，来解决机舱系统“信息孤岛”、运维迟滞这样的问题。研究船岸协同的智能运维模式，给提高机舱自动化系统的可靠性能、经济性与

环境适应性赋予理论支持与现实途径。

2 船舶机舱自动化系统集成技术框架

2.1 系统集成的层次架构

现代船舶机舱自动化系统大多采用分层分布式结构，一般可以分为硬件基础设施层、软件支撑平台层、业务应用层和用户层这四层，分层架构使机舱各个系统之间无缝集成并且达到有效协同管理的目的。硬件基础设施包含计算存储资源池、数据传输和网络交换子系统以及边缘计算节点；其中边缘计算节点负责司机舱侧的数据采集和预处理，分为在线式采集处理单元和离线式采集处理单元两种形态；计算存储资源池同时部署在岸基和船端，双域并行。船岸结合形成一种计算能力，船岸之间数据传输和网络交换系统完成可靠传输。

软件支撑平台层包括虚拟化云平台和大数据平台，其

【作者简介】莫金飞（1972-），男，中国上海人，本科，工程师，从事船舶机电设备研究。

中虚拟化云平台是业务系统的应用底座，按需进行资源的分配与部署；大数据平台则是对多种来源、不同形式的数据进行导入、存储及分析处理的过程，为业务应用提供支撑^[2]。

业务应用层是平台服务子集与机舱业务子集相耦合而成的，其中平台服务子集提供了如信息可视化呈现、智能算法调用以及数据接口访问等功能作为原子能力提供给上层使用；机舱业务功能包含状态监测、状态评估、故障诊断、故障预测、使用决策、维修决策等基本应用。

用户层则是面向岸上维修保障人员，船上机舱人员等各类型用户提供统一操作入口，支持船岸各类型业务协同开展。

2.2 关键集成技术

2.2.1 现场总线与网络通信技术研究

现场总线技术充当着船舶机舱自动化系统的神经脉络，实现了控制器、执行器以及智能仪表这些现场设备间的数字通信功能。CAN 总线是船舶工业应用最广泛的现场总线，具有抗干扰能力强、实时性高、可靠性好等特点，能够适应环境温度恶劣、电磁辐射大、振动剧烈的船舶机舱现场^[3]。除了以上几种，还有 Profibus 总线在船舶上也有一定的应用。

工业以太网用于上层监控网络的构建，主要用来实现集控室和机舱设备控制系统的通信。工业以太网通讯速度快，可以远程诊断工业现场的设备，采用 TCP/IP 协议可以保证信息准确、快速、完整地传递。典型的船舶机舱监测系统，例如 Kongsberg 公司 K-Chief500 系统采用的是 CAN 总线为主、工业以太网为辅的双层网络结构，全分布的网络型监测。

2.2.2 数据集成与处理技术研究

船舶机舱自动化系统要融合许多不同的源头的异构数据，比如实时传感器数据、设备状态数据、修理记录等等。数据轻量化传输技术来解决船岸之间大量的原始数据堵塞网络问题。采用数据压缩、数据特征提取和边缘计算，只有数据特征和诊断结果中的关键数据才被发送到岸上基站，通信负载大大降低。

2.2.3 数字孪生技术

数字孪生技术属于船舶机舱智能化的重要支撑技术。用高保真的虚拟模型去模拟物理机舱，并实现物理机舱和虚拟机舱的双向映射和交互。以机舱设备故障诊断为研究场景，在虚拟空间数字孪生体里预先设定好故障边界条件，从源头到末端对整个系统的故障传播路径及其耦合机制展开追溯分析，从而找出引发机舱设备功能失效的根本原因；其诊断结论能够给物理实体的机舱设备故障排查与维修决策提供一种可解释、可迁移的方法论范式。

数字孪生体的产生依靠多学科耦合建模技术，将设备的设计参数、运行数据、以往的维修记录等综合起来，创建起机舱设备的全数字镜像，给状态监测、健康评定、预知性保养提供基本的平台。模型运行时要依靠异常检测机制保证

数字孪生体和物理实体的一致性，关键在于计算两者重要参数的偏差值

$$D \text{ 偏差} = |P_{\text{实体}} - P_{\text{数字孪生}}|$$

3 全生命周期管理的理论及实施策略

船舶机舱自动化系统的全生命周期涵盖设计、建造、运行、维护、退役回收等众多环节，要在这个过程中实现的主要目的就是使系统一直处于最佳的工作状态，并且还能有效地控制总体拥有成本。

3.1 设计与建造阶段的管理策略研究

设计建造阶段模块化、标准化设计的理念十分重要。该集团研制的第五代机舱自动化产品就像搭积木一样，把船舶“大脑”搭建起来，研发出了 8 类 20 多种“标准化、系列化、模块化”的功能模块产品。模块从外形尺寸、接口到应用软件完全标准统一，可以任意组合拆分，大大缩减了设计维修的时间，降低了设计成本，提高了系统的可靠性。

同时在系统设计上也要考虑系统的可维护性、可扩展性，采用开放系统等方便以后系统功能的增加和升级^[4]。用 OPC 技术构建的系统结构可达到现场设备与操作站 HMI 软件之间的数据共享，方便对系统功能进行扩展。

3.2 运营维护阶段管理策略研究

运营维护阶段是全生命周期中最长、成本最高的一段时期，智能化的运维策略能够显著提高船舶的运营效益。

3.2.1 智能状态监测与健康评估方法研究

船舶机舱设备状态智能化监测是智能运维的基础，利用传感器网络对安装于机舱重要设备上进行实时的采集设备温度、压力、振动、油液等参数来达到对机舱设备运行状态全感知。基于大数据分析的设备健康评估系统能对设备运行状况开展智能分析，尽早识别异常迹象。

中国船级社《船舶智能机舱检验指南（2024）》认为智能机舱应具备状态监测与健康评估系统、辅助决策系统和视情维修系统这三大系统，重点考虑智能机舱的状态监测与诊断技术、数字孪生技术以及人工智能和机器学习等技术。

3.2.2 预测性与视情维护

传统的计划维修模式以固定时间间隔为主，会造成“过维修”或“欠维修”。而预测性维护则是以设备实际状态为基础，通过对设备运行数据的趋势分析来预估设备的剩余使用寿命，在最合适的时机进行维修干预。

视情维修（Condition Based Maintenance, CBM）属于带有前沿性质的维修范式，吸收健康状态管理，大数据深入挖掘，数字孪生创建，数据轻量化传输以及云端分散运算等多种技术特点之后，能够明显改进舰船机舱运维过程中的智能化水平。以美国海军舰船综合状态评估系统（ICAS）及其继任体系 eRM（Enterprise Remote Monitoring）为例，其已经可以对燃气轮机、推进柴油机、主减速齿轮装置、柴油发电机组等关键设备实施视情维修。在剩余使用寿命预测