

这一过程中，无人机需同时完成“自我感知”与“协同感知”——例如在战场侦察中，若某架无人机遭遇敌方防空火力威胁，自主决策系统需快速判断威胁等级（如是否为防空导弹系统），自动生成规避路径（如爬升高度、改变航向），同时将威胁信息同步至其他协同无人机，避免多机同时暴露于危险区域，保障整体任务安全。

3 信息交互与分发技术

信息交互与分发技术是无人机协同侦察系统的重要组成部分，是实现多机有效交互的前提，其性能直接影响多机协同的实时性与可靠性。在无人机侦察系统中，为确保各架无人机间能顺利、高效地进行信息交互与分发，需设计基于多目标优先级的分布式信息交互与分发机制。

针对多架无人机间的信息交互需求，首先需建立统一坐标系，并对各无人机的位置信息进行坐标系转换——通常采用 WGS-84 世界大地坐标系作为基准，将各无人机的相对坐标（如相对于起飞点的平面坐标）转换为绝对地理坐标（经纬度、海拔高度），确保多机对同一目标的位置描述一致，避免因坐标偏差导致的任务协同失误。例如某无人机发现敌方目标后，其上报的目标坐标需与其他无人机的侦察范围坐标处于同一体系，才能快速判断是否需要其他无人机协同抵近侦察。

其次需对无人机间的相对距离进行测量，为多机协同定位、任务调度及路径规划提供数据支撑，确保多机可按协同需求抵达指定区域。常用的距离测量技术包括全球导航卫星系统（GNSS）定位测距与无线电测距：前者通过多机 GNSS 定位数据计算相对距离，精度可达厘米级至米级；后者包括超短波电台的信号强度测距、脉冲雷达测距等，可在 GNSS 信号受干扰时（如敌方实施卫星信号压制）作为备份，保障距离测量的连续性，避免因单一技术失效导致协同中断。

最后需依托上述统一坐标与距离测量基础，落地基于优先级的分布式信息交互与分发机制——优先级划分通常依据三大维度：任务紧急程度（如发现敌方高价值目标的信息为最高优先级）、信息时效性（如实时威胁信息需优先分发，而历史侦察数据可延后传输）、无人机任务角色（如负责指挥的无人机需优先获取全局信息，负责具体侦察的无人机需优先获取目标位置信息）。通过优先级队列调度算法，可确保高优先级信息优先占用通信带宽，避免因信息拥堵导

致关键信息延迟，同时兼顾低优先级信息的有序传输^[4]。

此外，为确保各无人机能实时获取彼此的任务执行状态，需对无人机任务执行过程中的实时状态进行检测与信息发布——实时状态信息包括无人机的剩余电量、剩余续航时间、传感器工作状态（如是否故障）、当前任务进度（如已完成侦察区域占比）。这些信息需通过高频次（如每秒1次）的心跳包机制发送至协同控制中心或其他无人机，确保各节点能实时掌握全局状态。例如当某无人机剩余电量仅够维持30分钟飞行时，系统可提前调度其他无人机接替其未完成的侦察任务，避免任务中断，保障整体侦察覆盖的完整性。

4 结语

无人机多机协同侦察系统技术的探究涵盖多方面核心内容，包括多机协同任务分配、感知与决策控制及信息交互与分发。这些技术的综合应用不仅为无人机系统赋予了更高效、精准的侦察能力，也进一步推动了无人机技术的整体发展与场景落地。

随着技术的不断演进，无人机多机协同侦察系统的应用场景将进一步拓展：在军事领域，未来可与有人机、卫星构建“空-天-地”一体化侦察网络，实现对战场的全时域、全空域覆盖；在民用领域，可应用于跨区域生态环境监测（如大范围湿地、森林的生物多样性调查）、重大灾害后的多维度救援侦察（如地震后废墟下的生命探测、洪水区域的被困人员定位）。同时，随着人工智能、5G/6G 通信、新型传感器技术的融合应用，多机协同系统的自主决策能力、抗干扰通信能力、侦察精度与效率将持续提升，但仍需解决多机协同的安全性（如防止恶意入侵控制）、多源信息融合的准确性（如不同传感器数据的时空配准）等关键问题。相信通过技术突破与场景验证，无人机多机协同侦察系统将在未来发挥更重要的作用。

参考文献

- [1] 韩统, 李银通, 唐上钦等. 多无人作战飞机协同任务规划技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2021.
- [2] 张晓东, 刘建军. 多无人机协同控制与决策 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2023.
- [3] 王静, 李明杰. 无人机编队协同侦察效能研究 [J]. 火力与指挥控制, 2025, 40 (3): 45-51.
- [4] 王新民, 张安. 无人机协同任务分配与航迹规划 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.

Research on Multi-Domain Collaborative Analysis and Control Methods for Crossing Line Problems in the Trial Production Stage of Automobile Research and Development

Yangang Wang

Quality Management Department, Technology Center, Anhui Jianghuai Automobile Group Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230031, China

Abstract

The trial production stage of automotive research and development is a crucial link for the transformation of new vehicle models from design to mass production. The quality and efficiency of this stage directly affect the product launch cycle and competitiveness. During the trial production process, problems such as frequent design changes, process mismatch, poor consistency of components and lagging supply chain response often occur, resulting in low assembly efficiency and large quality fluctuations. Based on the multi-domain collaboration theory, this paper constructs a problem analysis framework from five dimensions: design, process, manufacturing, quality, and supply chain. It utilizes multi-source data fusion and digital twin technology to achieve collaborative diagnosis and closed-loop control. The research proposes a collaborative control platform integrating PLM and MES systems to achieve dynamic monitoring and problem traceability from design to production. The results show that this method can significantly improve the first-time pass rate of assembly and the efficiency of line passing.

Keywords

Automobile R&D Trial production has passed the production line. Multi-domain collaboration Digital twin Quality control

汽车研发试制阶段过线问题多领域协同分析与控制方法研究

王沿钢

安徽江淮汽车集团股份有限公司技术中心质量管理部, 中国·安徽 合肥 230031

摘要

汽车研发试制阶段是新车型由设计向量产转化的关键环节, 其质量与效率直接影响产品上市周期与竞争力。试制过线中常出现设计变更频繁、工艺不匹配、零部件一致性差及供应链响应滞后等问题, 造成装配效率低、质量波动大。本文基于多领域协同理论, 从设计、工艺、制造、质量和供应链五个维度构建问题分析框架, 利用多源数据融合与数字孪生技术实现协同诊断与闭环控制。研究提出PLM与MES系统集成的协同控制平台, 实现设计到生产的动态监控与问题溯源。结果表明, 该方法可显著提升装配一次合格率与过线效率。

关键词

汽车研发; 试制过线; 多领域协同; 数字孪生; 质量控制

1 引言

在汽车产品开发周期不断压缩、市场竞争加剧的背景下, 研发试制阶段的质量控制与过程协同成为车企提升竞争力的关键。试制阶段不仅是产品设计验证与制造工艺匹配的重要环节, 更是发现潜在设计缺陷、优化工艺流程、验证供应体系能力的窗口。然而, 实践中由于设计、制造、工艺、采购及质量管理环节之间信息壁垒突出, 过线阶段常出现装配干涉、零部件错配、工艺工装偏差、供应交付不稳定等问题。这些问题往往导致试制计划延误、物料浪费及返工率上

升, 对项目开发节奏与成本控制造成显著影响。传统的单领域问题处理模式难以应对复杂的系统性问题, 其根因往往跨越设计、制造与供应链多个环节。为此, 本文从系统工程角度出发, 构建多领域协同分析与控制模型, 以实现试制问题的前馈预防、实时监控与闭环改进, 提升研发阶段整体协同效率与产品质量稳定性。

2 汽车研发试制阶段过线问题的特征与成因

2.1 试制过线问题的系统性特征

汽车试制过线问题具有典型的系统性和耦合性特征。不同领域之间的环节相互制约, 任何一处偏差均可能引发连锁反应。例如, 设计公差定义不合理会导致工装装配偏差, 供应商工艺控制不足又会引起零件精度不稳定, 最终在装配

【作者简介】沿钢(1980-), 男, 中国安徽宿州人, 高级工程师, 从事试制验证质量管理研究。

现场表现为装配干涉或定位偏差。问题的发生往往呈现“多因一果”特征，即表面缺陷背后隐藏多领域交互影响。因此，过线问题的解决需要在全流程视角下进行系统诊断与综合治理。

2.2 设计环节的问题传导机制

设计阶段是影响试制质量的源头。新车型项目中常出现图纸频繁变更、BOM版本不一致及数字模型失配等情况，造成试制阶段信息断层。设计参数定义不完整、三维模型未完全约束或装配公差设定偏宽，均会在后续制造环节中放大误差。部分零部件在数字样机中通过虚拟装配验证合格，但实际加工与材料特性未被充分考虑，导致现场装配干涉或强制装配现象，从而影响过线质量。

2.3 供应链与工艺制造环节的协同不足

试制阶段供应链响应滞后、工艺文件更新不及时等问题十分突出。部分供应商因试制批量小、周期短，采用临时工装和简化工艺，造成零部件尺寸偏差大、表面处理不一致。此外，生产线设备调试与物料交付计划不同步，使得零件缺件、错件现象频繁。由于试制件来源复杂、责任界定模糊，导致过线问题难以及时闭环。

3 过线问题的多领域协同分析框架

3.1 问题分层分类与因果分析模型构建

汽车研发试制阶段的问题呈现出高度复杂性与多领域交互特征，单一维度的分析方法难以揭示问题根因。为此，构建“问题—原因—领域”三维矩阵模型，将试制过线问题系统化、层级化。依据问题表现及数据特征，可将其划分为设计失配类、工艺偏差类、装配干涉类、供应异常类和质量不稳定类五大类别。通过鱼骨图（Ishikawa Diagram）与FTA（Fault Tree Analysis）方法对各类问题的致因进行系统拆解，形成自上而下的逻辑推演链条。结合Pareto分析进一步识别关键影响因素，结果显示，约60%的过线问题源自设计与工艺信息不一致，25%来自供应工艺控制差异，15%源于检测误差与操作偏差。通过分层分类与因果建模，不仅可实现问题的系统归因与优先级排序，还为多部门协同改进提供了量化决策依据，构建了从问题识别到源头控制的逻辑闭环。

3.2 多源数据融合与知识图谱构建

为解决不同领域信息割裂与数据孤岛问题，建立基于PLM（产品全生命周期管理）、MES（制造执行系统）与QMS（质量管理体系）的多源数据融合机制。系统通过API接口实现设计参数、工艺路线、检验结果与供应链状态的自动汇聚，形成跨系统互联的数据中枢。基于语义分析与自然语言处理（NLP）技术，对试制问题文本进行关键词提取与语义聚类，进而构建试制问题知识图谱。知识图谱以节点表示问题对象，以边表示因果与依赖关系，可实现多领域问题的智能关联分析。工程师可通过可视化界面查询问题源头、

历史案例及处理方案，快速实现知识复用与协同诊断。此举显著提升了问题闭环效率与信息透明度，使研发、制造与质量团队在同一数据语义层上实现协同决策，为多维度问题解决提供了智能化支撑。

3.3 基于数字孪生的虚拟验证与预测分析

在试制阶段，为实现问题预测性识别与虚拟化验证，构建基于数字孪生（Digital Twin）的虚实融合模型。该模型以CAD/CAE/BIM数据为核心，集成装配工艺参数、检测反馈与实时传感器数据，实现虚拟环境与物理车间的动态映射。通过有限元分析（FEA）与多体动力学（MBD）仿真，模拟零部件在装配过程中的形变、应力集中与干涉风险。结合机器学习算法，对仿真结果进行偏差趋势预测与风险分级分析，实现从“被动检测”向“主动预警”的转变。模型预测精度经验证达92%，能有效识别潜在过线异常区域并提供优化建议。工程师可通过虚拟平台提前验证不同装配方案的可行性，实现设计调整与工艺修正的前置化，显著提升试制阶段的预警响应与决策效率。数字孪生技术的应用，使过线过程实现了从经验驱动到数据驱动、从静态分析到动态预测的智能化跃升。

4 过线问题的协同管控策略研究

4.1 跨部门协同机制的构建

汽车研发试制阶段的过线问题具有典型的跨领域特征，涉及设计、工艺、制造、质量及供应链多个部门，单一职能线条的管理模式难以形成有效响应机制。为此，应建立以“研发—工艺—质量—供应链”协同为核心的项目型组织架构，推动扁平化、矩阵化管理。通过PLM系统（产品生命周期管理）实现多角色同步审签、设计变更同步发布与数据版本统一，确保从设计源头到制造端信息一致、传递准确。针对试制现场的突发性问题，可构建跨部门协同工作群，采用RACI矩阵（责任划分矩阵）明确责任人、执行人、协助人及审核人，实现问题从发现到验证再到关闭的全过程闭环追踪。该机制不仅提高了跨部门沟通效率，还通过数据共享与实时反馈减少了问题重复发生的概率，形成“问题共识化、决策透明化、执行标准化”的协同管理格局。

4.2 过程监控与动态调整机制

试制阶段的过程波动是过线质量不稳定的主要诱因，需依托数字化系统建立动态监控与实时调控机制。在试制现场引入MES系统（制造执行系统）与物联网传感器，实现装配状态、工装姿态、扭矩曲线及零部件合格率的实时采集与上传。通过SPC（统计过程控制）对关键工艺参数进行趋势监控，借助控制图与Cp、Cpk指标分析过程能力变化，系统在检测到异常波动时可自动触发预警并生成问题清单。管理层通过可视化看板可实时掌握装配节拍、异常工位与物料匹配状态，实现基于数据的动态决策。现场工程师可通过移动终端调整工艺参数或调配资源，实现即时修正与持续优