

## 4 试验台搭建与性能测试

### 4.1 试验台设计

为模拟焊管产线实际工况，搭建纯机械气动缓冲性能试验台，核心组成包括：

1. 负载模拟系统：可更换 3~68 kg 配重块，精准模拟不同规格钢管；
2. 速度驱动系统：基于焊管产线速度表，实现 2.0~3.5 m/s 的可调撞击速度；
3. 被测装置：自主设计的缸径 63 mm 纯机械气动缓冲装置，配套 F1、F2 节流阀；
4. 数据采集系统：位移传感器（精度  $\pm 0.01$  mm）监测缓冲行程与回弹量，加速度传感器（量程  $\pm 50$  m/s<sup>2</sup>）采集缓冲加速度，采样频率 10 kHz。

### 4.2 试验方案

试验严格遵循焊管产线工况，分为静态特性测试、广谱适配性测试与对比测试，全程不调整溢流阀，仅通过 F1、F2 开度匹配完成控制：

1. 静态特性：测试 0.3 MPa 气源下缓冲锤的位置稳定性，验证气动平衡效果；

2. 广谱适配性：覆盖 3~68 kg 全质量区间，每个质量对应 2.0、3.0、3.5 m/s 三种速度，共 21 组工况，每组完成 40 次循环测试；

3. 对比测试：与原有 100 mm 缸径装置对比，重点评估小质量钢管的缓冲效果。

### 4.3 试验结果与分析

#### 4.3.1 静态特性

缓冲锤在 0.3 MPa 气源下，静态位置漂移量  $\leq 0.2$  mm，无机械限位下实现稳定气动平衡，满足产线待机要求。

#### 4.3.2 广谱适配性结果

典型工况的试验结果如表 2 所示，核心性能指标均满足设计要求：

1. 缓冲加速度：全工况下最大加速度 24.0 m/s<sup>2</sup> (68 kg、3.5 m/s)，最小加速度 8.2 m/s<sup>2</sup> (3 kg、2.0 m/s)，均  $\leq 25$  m/s<sup>2</sup> 的钢管损伤阈值；
2. 回弹量：所有工况回弹量控制在 0~200 mm 设计区间，小质量钢管回弹量  $\leq 120$  mm，大质量钢管  $\leq 189$  mm；
3. 缓冲行程：最大缓冲行程 98 mm，未达到 100 mm 限位，无刚性撞击。

表 2 典型工况试验结果

钢管质量/kg	撞击速度/(m·s <sup>-1</sup> )	F1 开度 (全开占比)	F2 开度 (全开占比)	缓冲行程/mm	最大加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	回弹量/mm
3	2.0	1/3	1/4	19	8.2	12
10	3.0	1/3	1/2	35	12.3	38
30	3.0	1/4	2/3	54	18.7	85
68	3.5	1/5	3/4	98	24.0	189

#### 4.3.3 对比测试结果

与原有 100 mm 缸径装置相比，3~10 kg 小质量钢管的缓冲性能提升显著：缓冲加速度波动从  $\pm 3.2$  m/s<sup>2</sup> 降至  $\pm 1.5$  m/s<sup>2</sup>，回弹量离散度大幅降低，完全控制在设计范围内，彻底解决了小质量钢管缓冲过度的问题<sup>[8]</sup>。

## 5 结论

1. 自主设计的缸径 63 mm、活塞杆直径 40 mm 的纯机械气动缓冲装置，通过 F1、F2 双手动节流阀的开度匹配，摒弃电控元件，溢流阀仅作压力保护，实现了焊管产线的广谱式缓冲控制。

2. 基于动量守恒与理想气体等温过程理论，建立了缓冲过程动力学模型，推导了节流阀开度与缓冲特性的关联公式，明确了 0~200 mm 回弹量的可控临界条件，为开度匹配提供了理论支撑。

3. 试验验证表明，该装置在 3~68 kg 钢管、2.0~3.5 m/s 输送速度的全工况下，缓冲加速度  $\leq 24.0$  m/s<sup>2</sup>，回弹量稳定在 0~200 mm 设计区间，无刚性冲击，相比原有装置，小质量钢管缓冲效果提升 40%，完全满足焊管产线的精密缓冲需求。

后续研究可进一步优化节流阀的结构设计，实现开度

的分级标定，提升现场调试的便捷性，拓展至其他多规格工件输送缓冲场景<sup>[9]</sup>。

### 参考文献

- [1] 陈文. 钢管气动过程仿真分析及缓冲器设计[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2020.
- [2] 郎靖雅. 负载对气缸缓冲性能影响的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [3] 气动缓冲和液压缓冲器的原理和特性研究[J]. 液压与气动, 2015(8): 112-115.
- [4] 王海涛. 基于压力反馈的机械式高速气缸缓冲装置研究[J]. 机床与液压, 2018, 46(12): 78-81.
- [5] 姜晶. 高速气缸缓冲稳定阶段运动特性[J]. 机械设计与制造, 2016(5): 234-236.
- [6] 王丽平. 高速气缸自适应缓冲系统结构设计[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(3): 421-425.
- [7] 张伟东. 基于SOLIDWORKS的高速气缸仿真分析[J]. 制造业自动化, 2019, 41(7): 102-104.
- [8] 高速气缸缓冲性能分析与试验研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(18): 2478-2482.
- [9] 高速气缸缓冲系统缓冲能力研究[J]. 流体机械, 2013, 41(9): 37-40.

# Research on Construction of Digital Workshop and Production Efficiency Improvement in Mechanical Manufacturing

Juntian Liu Sai Li Junde Yue Wei Tang Liangjun Yang

Xinjiang Bosiran Intelligent Agricultural Machinery Co., Ltd. Jiaxing Branch, Jiaxing, Zhejiang, 314000, China

## Abstract

Driven by the demands for intelligentization, flexibility, and high-quality development in the machinery manufacturing industry, digital workshops have emerged as a pivotal tool for industrial transformation. These digital workshops not only serve production command and resource scheduling functions but also achieve process optimization, equipment coordination, and closed-loop quality management through data-driven approaches, providing technical support for enterprises to establish efficient, transparent, and controllable production systems. This paper investigates the overall architecture of digital workshops, core technology integration pathways, manufacturing resource model construction, and intelligent production operation mechanisms, exploring the implementation logic for enhancing production efficiency under conditions of multi-variety, small-batch, and complex processes. Through systematic analysis of information flow, material flow, process flow, and energy consumption flow in workshops, the study proposes a systematic methodology for digital workshop operations and constructs efficiency improvement mechanisms based on typical manufacturing scenarios. The research aims to provide theoretical foundations and practical references for the digital transformation and continuous improvement of machinery manufacturing enterprises.

## Keywords

Digital workshop; Mechanical manufacturing; Information integration; Intelligent manufacturing; Production efficiency improvement

## 机械制造数字化车间构建与生产效率提升研究

刘钧天 李赛 岳俊德 唐伟 杨亮君

新疆钵施然智能农机股份有限公司嘉兴分公司, 中国·浙江 嘉兴 314000

## 摘要

机械制造行业在智能化、柔性化与高质量发展需求的推动下, 数字化车间逐步成为制造转型升级的重要抓手。数字化车间不仅承担生产指挥与资源调度职能, 更通过数据驱动实现工艺优化、设备协同及质量闭环管理, 为企业构建高效、透明、可控的生产体系提供技术支持。本文围绕数字化车间的总体架构、核心技术集成路径、制造资源模型构建与智能生产运行机制展开研究, 探讨在多品种、小批量与复杂工艺条件下提升生产效率的实现逻辑。通过对车间信息流、物料流、工艺流与能耗流的协同分析, 提出数字化车间运行的系统化方法, 并结合典型制造场景构建效率提升机制。研究旨在为机械制造企业的数字化建设实践与持续改进提供理论依据与路径参考。

## 关键词

数字化车间; 机械制造; 信息集成; 智能制造; 生产效率提升

## 1 引言

机械制造行业长期依赖经验主导的生产组织方式, 其生产状态透明度不足、工艺传递不稳定、设备协同效率偏低等问题影响整体竞争力。随着工业互联网、云计算、边缘计算与智能传感技术的发展, 制造系统逐渐具备实时数据采集、过程分析与动态决策能力, 使数字化车间成为传统制造向智能制造迈进的关键阶段。数字化车间以车间级生产要素数字映射为基础, 通过设备互联、业务协同与工艺模型驱动, 实现对生产过程的实时可视化调控, 支撑企业在复杂制造环

境下保持高效率与高质量。本文将基于机械制造的工艺特征与组织模式, 构建数字化车间技术体系, 分析其提升生产效率的作用机制, 以推动数字化车间在行业中的落地应用。

## 2 机械制造数字化车间建设的系统架构与实现逻辑

### 2.1 数字化车间总体架构的形成逻辑与功能分层

机械制造数字化车间的构建依托多层结构协同, 在设备层、控制层、执行层、管理层与决策层之间形成稳定的信息通道, 使生产现场具备可感知、可分析与可优化的能力。设备层以智能传感器、数控设备与机器人主体, 通过实时数据采集网络实现运行状态、加工参数与工件信息的快速读取。控制层依托 PLC、运动控制系统与嵌入式工业控制器

【作者简介】刘钧天(1988-), 男, 中国甘肃张掖人, 本科, 工程师。

构成设备逻辑控制基础,使设备能够在工艺流程要求下进行自动化运行。执行层承担生产调度、工艺执行与物料配送指令落地任务,通过MES、WMS等系统的协同工作实现生产计划与现场作业的映射。管理层以ERP、PLM等系统为载体,负责订单解析、产品结构管理、成本核算与资源计划,为车间运行提供经营层面的数据支持。

## 2.2 制造资源数字化建模技术在车间构建中的作用

制造资源数字化建模是数字化车间的基础,其目的是将设备、刀具、工件、工艺路线、人员能力与物流单元等信息以统一模型描述。建模过程中,需对设备的动态能力参数、运动行为、加工特性以及能耗特征进行标准化抽象,使其能够与工艺模型和流程模型互操作。同时,为适应多品种加工条件,应构建模块化与可重构的工艺模型库,通过加工特征与设备能力的匹配实现工艺路径的智能生成。在物流与仓储领域,数字化模型需描述物料属性、批次关系、配送规则与库存动态,实现物流与信息流同步。人员模型则应涵盖技能等级、作业权限与排班状态,使生产计划能够与人员资源动态适配。

## 2.3 数字化车间构建中的信息集成机制与数据治理体系

数字化车间的信息集成呈现多源异构特点,包含结构化、半结构化与非结构化数据。为保证数据贯通的可靠性,需要建立统一数据标准体系,使MES、ERP、PLM、SCADA等系统之间形成一致的数据接口协议。数据治理体系包括数据质量管理、权限管理、主数据管理、过程数据标定与异常数据清洗,确保系统间数据传输与调用的准确性。在信息集成过程中,可采用工业互联网平台作为系统枢纽,实现跨网络、跨设备与跨系统的数据交互,使规上制造企业能够打破信息孤岛,实现业务链、工艺链与供应链的深度融合。

## 3 数字化车间核心技术集成与运行机制研究

### 3.1 设备互联技术在复杂制造环境中的应用

设备互联是数字化车间落地的关键,其目标在于实现数控机床、工业机器人、检测设备与物流装备的在线监控与协同运行。在实际应用中,可通过工业以太网、OPC UA协议、MTConnect协议或定制化通信网关实现异构设备的互联,使设备运行状态、加工参数及工具磨损信息能够实时采集并上传。在复杂工艺条件下,设备网络需具备自适应通信能力,确保在设备高频运行时仍能够保持数据采集的稳定性。此外,通过在设备内部嵌入边缘计算模块,可在本地完成部分数据分析,提高设备响应速度,降低系统整体通信负荷。

### 3.2 工艺数据驱动的过程优化机制

机械制造工艺具有流程复杂、参数众多、影响因素交互性强的特点,传统依赖经验调整的方式难以保证过程稳定性。数字化车间通过工艺数据驱动实现过程优化,使加工过

程能够在可控范围内稳定运行。基于工艺特征的数据库可通过采集切削力、温度、振动、能耗与机床几何误差等数据建立加工行为模型,通过统计分析与机器学习算法识别影响质量与效率的关键变量。在此基础上,工艺优化可通过参数联动调整、进给路径优化、刀具寿命预测与干涉分析等方式实现,使加工过程逐步逼近最佳状态。同时,利用虚拟调试平台可在数字环境中预演工艺路径,验证设备动态能力与加工仿真模型的一致性,为实际生产提供可靠参考。

### 3.3 智能调度系统在柔性生产中的作用

柔性生产对调度系统提出高度要求,其目标在于在多订单叠加、工序耦合与资源约束条件下保持生产节奏稳定。智能调度系统基于制造资源模型与实时数据,构建动态调度算法,通过对设备状态、工序优先级、刀具可用性与物流路径进行综合分析,实现整体生产效率的最优解。在实际应用中,调度算法需具备快速响应能力,使系统能够应对突发订单、设备故障与物料短缺等情况,实现生产节拍的平滑调整。智能调度能够依据车间运行状态动态选择调度策略,使资源利用效率提升,设备等待时间降低,生产流程整体连贯性得到增强,为企业应对多品种小批量生产提供支撑。

## 4 数字化车间运行中的质量管控与闭环管理机制

### 4.1 质量在线监测体系的构建与数据驱动策略

质量管理是数字化车间的重要组成部分,通过在线监测体系,可在生产过程中实时捕捉质量偏差,使质量问题在萌芽阶段得到控制。监测体系包括在线测量设备、光学检测系统、视觉识别单元与自动检测夹具,可实现对尺寸误差、表面缺陷与装配精度的实时检测。监测数据可通过统计分析与方法识别建立质量趋势模型,使系统能够预测质量波动并给出调整建议。在加工链条中,质量数据需与工艺模型、设备模型与刀具模型关联,通过数据关联分析识别质量缺陷的根本来源,使质量管控从结果管理转向过程管理,实现质量偏差的实时闭环调节。

### 4.2 异常诊断与预测性维护机制

设备故障往往对生产效率带来显著影响,数字化车间通过异常诊断与预测性维护机制,使设备能够在故障发生前获得维护机会。异常诊断系统通过采集振动、噪声、电流、温升等多维数据,结合模型分析与特征识别方法,判断设备是否存在潜在异常。在此基础上,可通过预测性维护模型对设备未来状态进行推演,使企业能够合理安排维护计划,减少突发停机造成的生产冲击。预测性维护机制的核心在于基于数据进行寿命预测,实现设备从定期维护向状态维护的转变,使设备利用率与维修资源配置效率显著提升。

### 4.3 生产过程闭环控制机制的构建

闭环控制是数字化车间提高效率的重要方式,体现为计划、执行、监测与反馈的循环。在执行阶段,系统依据实