

干粉灭火器自动化装配生产线控制系统优化与工艺改良研究

吴民军

京开消防科技(浙江)有限公司 浙江 衢州 324000

【摘要】：干粉灭火器是公共安全与工业消防领域应用最为普遍的基础消防设备，其装配质量的稳定性、生产流程的规范性直接决定产品使用可靠性，关乎各类场景消防安全保障水平。当前国内多数消防器材制造企业所使用的自动化装配生产线建成时间较早，控制系统架构老旧、控制逻辑固化，导致生产线运行稳定性不足、产品装配一致性较差，难以适配新时期消防产品高品质、标准化、精益化的生产要求。本文以干粉灭火器自动化装配生产线为研究主体，依托自动化控制、精益生产、智能制造等相关理论，系统梳理生产线控制系统与装配工艺的现存短板，从系统架构、传感检测、程序逻辑、生产流程、核心工艺等维度开展理论层面的优化与改良研究，通过控制系统与生产工艺的协同升级，破除传统生产线的生产瓶颈。

【关键词】：干粉灭火器；自动化装配生产线；控制系统；系统优化；工艺改良

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.059

1 引言

随着社会公共安全体系不断完善，各行各业对消防器材的质量标准与供给能力提出了更高要求，干粉灭火器作为通用性极强的消防应急装备，其生产制造质量直接影响消防安全防控成效。自动化装配生产线已经成为干粉灭火器规模化生产的核心载体，彻底替代了传统人工装配模式，有效提升了行业整体生产效率。但受制于早期设计理念与技术水平，大量在役生产线的控制系统与装配工艺长期未得到系统性升级，逐渐暴露出控制响应滞后、工位联动不协调、工艺流程烦琐、质量管控薄弱等一系列问题，不仅制约了生产精益化水平的提升，也容易造成产品装配质量波动，不利于消防产品的标准化生产。在制造业全面转型升级、消防行业质量监管日趋严格的背景下，对干粉灭火器自动化装配生产线开展控制系统优化与装配工艺改良，能够从生产核心环节补齐行业发展短板，优化生产运行模式，提升产品质量稳定性，推动消防器材制造行业向智能化、规范化、高质量化方向转型，具备重要的行业价值与现实意义。

2 生产线整体概述与相关理论基础

2.1 生产线整体构成与运行逻辑

干粉灭火器自动化装配生产线是集机械传动、智能检测、自动控制、精密装配于一体的综合性自动化生产系统，整体采用多工位流水线布局模式，能够完成灭火器瓶体预处理、物料灌装、部件装配、密封检测、压力校验、成品整理等全流程自动化作业。整套生产线以可编程逻辑控制器为核心控制载体，依托各类传感检测元件、伺服执行机构与传动输送结构，构建闭环式自动化运行体系，依靠预设控制逻辑统筹各工位有序作业，实现生产流程的连续化、自动化运转。相较于传统半自动化生产模式，自动化生产线能够有效规避人工操作带来的随机性误差，统一装配标准，保障批量产品的一致性，契合消防产品标准化生产的核心要求，是现阶段消防器材规模化生产的主流设备形式。

从整体运行逻辑来看，生产线依托核心控制系统统一调度各工位运行时序，通过实时采集生产过程中的位置信号、状态信号与检测信号，动态调整设备运行状态，实现各工位的有序衔接。各工位各司其职、相互配合，按照固定工艺流程逐级完成装配作业，同时搭载基础异常预警机制，对生产过程中的明显故障进行提示，保障生产线基础运行秩序，能够满足常态化、大批量的生产需求。

2.2 核心理论基础

本次研究主要依托自动控制理论与精益生产理论进行系统性优化改良。自动控制理论是自动化生产线稳定运行的核心支撑，强调通过系统化的控制架构、精准的信号采集与科学的逻辑程序，实现设备运行的自动化、精准化与稳定化，为控制系统架构重构、程序优化、检测体系升级提供核心理论支撑。精益生产理论以消除冗余工序、减少资源浪费、提升生产质量与效率为核心目标，主张通过流程梳理、工艺优化、细节管控，实现生产过程的精益化升级，适配装配工艺改良的研究需求。两类理论相互结合、相辅相成，既能够保障生产线控制系统的稳定精准运行，又可以实现生产流程与工艺的提质增效，为本次生产线整体优化研究提供完整的理论支撑体系。

3 生产线控制系统与装配工艺现存问题

3.1 传统控制系统存在的主要问题

现阶段多数干粉灭火器自动化装配生产线沿用传统集中式控制模式，整体控制架构相对单一，长期运行后逐步凸显各类运行缺陷。首先，集中式控制模式下所有工位的控制指令、数据采集、逻辑运算均由单一控制器完成，工位数量较多时数据处理压力较大，容易出现指令响应滞后、信号传输拥堵等问题，直接导致工位衔接卡顿、设备动作不同步，引发装配定位偏差、部件对接错位等问题。其次，传统生产线配套的传感检测体系精度有限，检测元件灵敏度偏低，仅能识别明显的设备故障与质量异常，对于细微的灌装偏差、密封间隙、压力波动

无法有效捕捉，难以实现精细化质量管控，导致部分瑕疵产品流入后续工序，提升产品不良率。

3.2 传统装配工艺存在的主要短板

与老旧控制系统配套的传统装配工艺，存在流程冗余、衔接不顺畅、精细化不足等诸多问题。传统工艺流程设计较为粗放，部分工序存在重复检测、无效预处理等冗余操作，工序排布不够科学，不仅拉长了单台产品的生产周期，还造成设备空转、能源消耗等资源浪费。同时，各工序的衔接逻辑不够严谨，前后工位作业时序匹配度不足，容易出现工序干涉、提前作业等问题，影响整体装配精度与生产稳定性。

在核心装配工艺层面，干粉灌装、阀门紧固、气密性检测等关键工序的工艺标准较为宽泛，缺乏精细化的动态调控机制。灌装作业多采用静态定量灌装模式，容易受物料流动性、设备残留等因素影响，出现灌装量波动；阀门紧固工序扭矩控制不够精准，容易出现紧固过度损伤部件或紧固不足密封不严的问题；气密性检测判定标准粗放，微小泄漏隐患难以彻底排查，直接影响干粉灭火器的密封性能与使用安全性。

4 生产线控制系统优化研究

4.1 优化前后控制系统整体性能对比

为直观体现控制系统优化升级成效，结合生产线运行特性，从控制架构、响应性能、故障识别、柔性生产、检测精度等核心维度，对传统控制系统与优化后控制系统进行综合对比，明确优化改良的核心突破点。

性能维度	传统控制系统	优化后控制系统
控制架构	单一集中式架构，数据处理压力大，易信号拥堵	分层分布式架构，分级处理数据，工位协同性强
系统响应	指令响应滞后，工位衔接易卡顿	指令传输高效，时序精准，衔接流畅稳定
故障识别能力	仅识别显性故障，无法精准定位、预判隐患	全维度故障识别，精准定位点，可预判隐性异常
生产柔性	程序固化，换产调试烦琐，适配性差	参数自适应，一键换产，适配多品类生产
检测精度	低精度传感检测，细微偏差无法识别	高精度传感体系，动态检测、精准纠偏

4.2 控制架构分层优化

针对传统集中式控制架构的运行短板，本次研究采用分层分布式控制架构对系统进行重构升级，将原有单一控制层级细化为核心控制层、工位执行层、检测反馈层三个层级，实现控

制指令分级处理、数据分层传输。核心控制层保留主控制器，负责统筹生产线整体调度、参数管控、人机交互与故障汇总；工位执行层增设分布式辅助控制单元，各工位独立管控自身设备动作与时序逻辑，有效分担核心控制器的数据运算压力；检测反馈层依托升级后的传感设备，实时采集生产数据并形成闭环反馈，为系统精准调控提供数据支撑。优化后的分层架构彻底解决了传统系统信号拥堵、指令延迟、工位不同步等问题，大幅提升生产线整体运行的稳定性与流畅性。

4.3 传感检测体系升级优化

对生产线全域传感检测设备进行系统性升级，替换原有低精度检测元件，搭载高精度位移、重量、压力与气密性检测模块，全面提升生产过程的精细化检测能力。通过优化传感数据传输通道，规避多设备数据传输相互干扰的问题，保障检测数据实时、精准传输，实现瓶体定位、物料灌装、密封装配、压力检测等关键工序的动态监测与精准纠偏，从硬件层面解决装配精度不足、瑕疵漏检等问题。

4.4 控制程序逻辑优化

结合全新分层控制架构，对原有固化冗余的控制程序进行精简迭代，优化各工位运行时序逻辑，增设工位动作互锁机制，杜绝工序干涉与错位作业问题。精简无效程序代码，提升系统运算效率，同时嵌入多规格产品参数自适应模块，实现不同型号灭火器生产参数的快速切换，提升生产线柔性生产能力。同步优化故障判定逻辑，拓宽故障识别维度，实现显性故障快速报警、隐性隐患预判提示，缩短故障排查与停机时长。

4.5 人机交互与数据管控优化

升级生产线人机交互终端，简化操作流程、优化界面布局，降低设备操作难度。新增全流程数据采集与存储功能，自动记录各工位运行参数、装配数据与检测结果，构建完整的生产数据档案，实现产品生产全流程可追溯。增设参数异常预警机制，当生产数据偏离标准区间时系统自动预警，实现质量问题前置管控，有效降低产品不良率。

5 干粉灭火器装配工艺改良研究

5.1 工艺流程精简优化

依托优化后的控制系统运行特性，对原有烦琐冗余的装配工艺流程进行梳理与重构，剔除重复检测、无效预处理等冗余工序，合并功能重叠的作业工位，平衡各工位作业负荷，解决部分工位拥堵、部分工位空置的不均衡问题。通过重新排布工序时序，优化各环节衔接逻辑，建立标准化、精益化的工艺流程，有效缩短单台产品生产周期，减少设备空转与能源浪费，提升生产线整体作业效率，实现生产流程的规范化与精益化升级。

5.2 核心工序精细化改良

聚焦干粉灌装、阀门装配、气密性检测三大核心质量工序开展精细化改良。优化干粉灌装工艺，采用动态调速灌装与微量补料模式，抵消物料流动与设备残留带来的精度误差，保障灌装量均匀稳定；改良阀门装配工艺，采用定扭矩装配控制模式，根据产品规格匹配紧固力度，避免部件损伤与密封松动问题；优化气密性检测工艺，细化压力判定标准，延长稳压观测时长，精准排查微小泄漏隐患，全方位提升产品装配质量与使用安全性。

5.3 柔性化生产工艺改良

针对传统工艺换产烦琐、适配性差的问题，构建柔性化生产工艺体系，建立多规格产品工艺参数数据库，统一同类工序基础操作标准，简化换产调试、工位校准流程，实现不同型号干粉灭火器的快速换产作业。柔性工艺改良有效打破了传统生产线单一生产的局限，适配市场多品种、小批量的生产需求，大幅提升企业生产灵活性与市场适配能力。

5.4 全流程质量追溯工艺构建

依托控制系统的数据采集功能，搭建全流程质量追溯工艺体系，将产品装配参数、检测数据、设备运行状态与产品编号绑定存储，形成独立的产品生产档案。工作人员可通过产品编号精准溯源生产全流程数据，快速定位质量问题产生的工位与工艺环节，实现质量问题的精准整改。同时依托长期数据积累，总结工艺偏差规律，推动工艺体系持续迭代优化，形成闭环式质量管控体系。

6 优化改良综合成效分析

通过控制系统与装配工艺的协同优化改良，干粉灭火器自动化装配生产线的综合运行效能得到全方位提升。在系统运行层面，分层分布式控制架构彻底解决了传统系统信号拥堵、响应滞后、工位卡顿等问题，设备运行协同性、稳定性显著增强，故障停机频次与故障修复时长大幅降低，设备有效作业率明显

提升。精准的传感检测体系与优化后的控制逻辑，实现了生产过程的动态监测与精准调控，从源头减少装配偏差，杜绝细微质量隐患。

在工艺生产层面，精简后的工艺流程更加高效规范，冗余作业与无效损耗大幅减少，生产节拍更加合理，生产效率稳步提升。核心工序的精细化改良，彻底解决了传统生产中灌装不均、密封不严、漏检误检等常见质量问题，产品装配一致性与可靠性显著提高，有效保障了干粉灭火器的消防使用性能。柔性化工艺体系的构建，让生产线具备多品类快速生产能力，适配多元化市场需求。全流程追溯体系实现了质量管控从事后整改向前置预防、全程管控转变，推动生产质量管控体系规范化升级。

从产业发展层面来看，本次优化改良贴合制造业精益化、智能化的发展趋势，有效破除了传统干粉灭火器生产的技术瓶颈，实现了生产线降本、提质、增效的综合目标，为消防器材制造行业的自动化生产线升级改造提供了成熟的理论思路与实践范式。

7 结论

本文针对干粉灭火器自动化装配生产线存在的控制系统老旧、运行稳定性差、装配工艺冗余、精细化程度不足等行业共性问题，依托自动控制与精益生产理论，开展系统性的控制系统优化与工艺改良研究。通过重构分层分布式控制架构、升级传感检测体系、迭代控制程序、优化人机交互系统，有效解决了传统控制系统响应滞后、精度不足、柔性差、故障排查困难等核心缺陷，全面提升了生产线自动化控制水平与运行稳定性。通过精简工艺流程、改良核心工序、搭建柔性生产体系与质量追溯体系，实现了装配工艺的精益化、标准化升级，显著提升了产品装配质量与生产效率。控制系统与生产工艺的双向协同优化，有效突破了传统生产线的生产瓶颈，实现了设备运行、产品质量、生产效益的多重提升，对消防器材自动化生产领域的提质增效具有重要的指导意义。

参考文献：

- [1] 丁校君.基于 PLC 的工业自动化生产线控制系统优化研究[C]//河南省豫商经济文化交流协会.2026 中国城建经济研讨会论文集(上册).[出版者不详],2026:186-188
- [2] 殷和国,刘文玉,张树齐.MES 系统在干粉灭火器生产中的应用[J].自动化博览,2022,39(12):62-65.
- [3] 李满意.机械设计自动化在灭火器阀门加工中的应用与实践[J].信息记录材料,2022,23(4):246-248.
- [4] 桑凌峰,山村雅幸,甘中学,等.灭火器阀门自动化加工系统的设计与优化[J].机械设计与研究,2020,36(4):133-137.