

Improvement and Effect Verification of Equipment Safety Protection Measures in Electronic Manufacturing Workshop under Human-Machine Collaboration Mode

Dazhang Zou

Sichuan Jiuzhou Electronic Technology Co., Ltd., Mianyang, Sichuan, 621000, China

Abstract

With the deepening application of industrial automation technology, human-machine collaboration in electronic machining workshops has become a core approach to enhance production efficiency. However, the frequent interaction between equipment and personnel has also introduced new safety risks. This paper addresses key issues such as mechanical injuries, electrical hazards, and operational errors in human-machine collaboration within electronic machining workshops. Based on the actual scenario of a specific electronics enterprise's workshop, we propose a three-dimensional improvement plan featuring "intelligent perception, hierarchical protection, and dynamic response." Specific measures include installing multimodal sensor early warning systems, optimizing safety interlock mechanisms, and establishing digital monitoring platforms. Through field trials and data comparisons, the improved workshop achieved an 82% reduction in equipment safety incidents, a 65% increase in protective response speed, and maintained steady growth in production efficiency. The research results demonstrate that this improvement plan effectively balances human-machine collaboration efficiency with safety protection levels, providing practical references for upgrading safety management in the electronic machining industry.

Keywords

Human-Machine Collaboration; Electronic Processing Workshop; Equipment Safety; Protective Measures; Effect Verification

人机协作模式下电子加工车间设备安全防护措施的改进与效果验证

邹大章

四川九州电子科技股份有限公司, 中国·四川 绵阳 621000

摘 要

随着工业自动化技术的深度应用, 电子加工车间人机协作模式已成为提升生产效率的核心方式, 但设备与人员的高频互动也带来了新的安全风险。本文针对电子加工车间人机协作中的机械伤害、电气隐患、操作失误等核心问题, 结合某电子企业车间实际场景, 提出“智能感知-分级防护-动态响应”的三维改进方案, 包括加装多模态传感器预警系统、优化安全联锁机制、构建数字化监控平台等具体措施。通过现场试验与数据对比, 验证改进后车间设备安全事故发生率降低82%, 防护响应速度提升65%, 生产效率保持稳定增长。研究结果表明, 该改进方案可有效平衡人机协作效率与安全防护水平, 为电子加工行业的安全管理升级提供实践参考。

关键词

人机协作; 电子加工车间; 设备安全; 防护措施; 效果验证

1 引言

在全球电子制造业向智能化转型的背景下, 人机协作凭借灵活性高、适配性强的优势, 已广泛应用于电子元件焊接、精密组装、物料转运等关键工序。电子加工车间设备密集、工序复杂, 涉及贴片机、回流焊炉、机械臂等多种设备, 人机协作过程中人员与高速运转设备的近距离接触, 使得传统以物理

隔离为主的防护措施难以应对动态风险, 安全事故频发。

据《中国电子制造业安全事故统计报告》显示, 2023年人机协作场景下的设备安全事故占电子加工车间总事故的63%, 主要表现为机械碰撞、电气漏电、程序误触发等, 不仅造成人员伤亡和财产损失, 还严重影响生产连续性。当前, 部分电子加工企业的防护措施存在感知滞后、防护方式单一、缺乏动态调控等问题, 无法适配人机协同作业的动态性与复杂性。

基于此, 本文聚焦电子加工车间人机协作的安全痛点,

【作者简介】邹大章(1990-), 男, 中国四川大竹人, 本科, 工程师, 从事企业安全管理研究。

系统设计防护措施改进方案，并通过现场应用验证其有效性，旨在为解决人机协作安全难题提供技术支撑与实践路径，推动电子制造业安全、高效发展。

2 电子加工车间人机协作设备安全现状与问题分析

2.1 行业现状

当前电子加工车间的人机协作主要分为三类：一是“人辅助机”模式，如操作人员为机械臂补充物料、校准参数；二是“机辅助人”模式，如设备完成精密焊接后，人员进行质检与整理；三是“人机协同作业”模式，如人员与机械臂共同完成复杂组件的组装。^[1]随着协作深度增加，设备安全防护的难度持续升级。

调研显示，国内中型以上电子加工企业中，78%已引入人机协作设备，但仅32%配备了针对性的智能防护系统，多数企业仍沿用传统防护手段，如固定护栏、紧急停止按钮等，难以满足动态协作需求。

2.2 核心问题

感知能力不足：传统防护设备多依赖单一传感器（如红外对射），仅能检测固定区域的人员闯入，无法识别人员姿态、作业意图及设备运行状态，易出现误判或漏判。例如，操作人员弯腰捡取物料时，传统系统可能无法精准识别其位置，导致防护响应延迟。^[2]

防护层级单一：现有措施多为“一刀切”式物理隔离，协作时需频繁移除防护装置，既降低效率又增加风险；部分企业虽采用柔性防护，但未根据作业风险等级（如精密操作、高速运转）制定分级策略。

信息协同不畅：设备运行数据、人员作业数据与安全

监控数据相互割裂，无法实现实时联动分析，事故发生后难以追溯原因，也无法提前预警潜在风险。

人员操作风险：电子加工工序繁琐，操作人员易因疲劳、技能不足或违规操作触发安全隐患，如误触设备启动按钮、未按规程关闭设备电源等。

3 人机协作设备安全防护措施改进方案

结合电子加工车间的作业特性与安全痛点，本文从感知、防护、监控、管理四个维度，构建“智能感知 - 分级防护 - 动态响应”的改进方案，具体内容如下。

3.1 智能感知系统升级

多模态传感器融合部署：在协作设备（如机械臂、贴片机）及作业区域加装激光雷达、视觉摄像头、红外热像仪等多类型传感器，实现对人员位置、姿态、设备运行参数（转速、温度、电流）的全方位检测。^[3]激光雷达负责精准定位人员与设备的相对距离，视觉摄像头识别人员作业动作（如伸手、弯腰），红外热像仪监测设备温度异常，多数据融合降低单一传感器的误判率。

智能算法优化：引入深度学习算法，对传感器采集的数据进行实时分析，构建“人员 - 设备 - 环境”风险评估模型。通过历史事故数据训练模型，使其能够识别危险场景（如人员进入设备运动半径、设备参数异常波动），并提前0.5-1秒发出预警。^[4]

3.2 分级防护机制构建

根据电子加工工序的风险等级，将人机协作场景划分为高风险（如机械臂高速运转、高压设备作业）、中风险（如物料转运、设备调试）、低风险（如辅助装配、质检）三个等级，对应采取不同防护措施，具体如表1所示。

表 1 人机协作场景分级防护措施表

风险等级	典型场景	防护措施
高风险	机械臂焊接、高压电源操作	1. 物理隔离 + 柔性防护双重保障，护栏加装压力传感带，触碰即触发设备急停；2. 设备运行时限制人员进入，仅授权人员通过指纹验证进入操作；3. 配备声光报警装置，预警时灯光闪烁 + 语音提示同步启动
中风险	物料转运、设备参数校准	1. 无物理隔离，通过激光雷达划定警戒区域，人员进入时设备降速运行；2. 操作人员佩戴智能手环，实时传输位置信息，与设备系统联动；3. 设备设置半急停模式，预警时先减速再停止
低风险	辅助装配、成品质检	1. 仅配备视觉监控与语音提醒；2. 设备运行参数设置安全阈值，超出时自动提示，无需强制停机；3. 定期人工巡检防护状态

3.3 人员管理与培训优化

操作流程标准化：制定《人机协作设备安全操作手册》，明确各工序的操作规范（如设备启动前的检查步骤、协作时的安全距离），并通过现场张贴、线上培训等方式确保操作人员掌握。

智能培训与考核：搭建线上培训平台，通过VR模拟人机协作危险场景，让操作人员沉浸式体验违规操作的后果；定期开展考核，考核合格者方可获得操作授权，未合格者暂停协作设备操作资格。

疲劳监测与提醒：在作业区域安装视觉摄像头，通过

面部识别技术判断操作人员是否存在疲劳状态（如闭眼、打哈欠），发现时通过智能手环震动提醒，避免疲劳作业导致的操作失误。

4 改进方案的效果验证

为验证改进方案的有效性，选取某电子企业S车间作为试验场地。该车间主要生产手机主板，现有协作设备12台（机械臂6台、贴片机4台、转运机器人2台），员工30人，2023年人机协作设备安全事故发生6起，主要为机械碰撞与电气隐患。2024年1-6月实施改进方案，对比实施前后

的安全与效率指标，验证效果。

4.1 验证指标与方法

核心指标：选取安全事故发生率、防护响应速度、生产效率作为验证指标。安全事故发生率 = 事故次数 / 作业总时长；防护响应速度 = 传感器检测到危险到设备响应的时间；生产效率 = 单位时间内成品产量。

数据采集：通过车间监控平台记录实施前（2023 年 7-12 月）与实施后（2024 年 1-6 月）的指标数据，各时段作业总时长均为 5000 小时，确保数据可比性。

4.2 验证结果与分析

安全性能提升：实施后，S 车间人机协作设备安全事故仅发生 1 起，事故发生率从 0.0012 次/小时降至 0.0002 次/小时，

降低 82%；防护响应速度从平均 1.2 秒缩短至 0.42 秒，提升 65%。事故类型仅为低风险场景的操作失误，高、中风险场景未发生事故，表明分级防护与智能感知系统有效降低了危险场景的事故概率。

生产效率稳定：实施后车间单位时间成品产量从 800 件/小时提升至 820 件/小时，增长 2.5%。传统防护措施因频繁停机导致的效率损失（约 5%）被消除，分级防护避免了不必要的设备急停，实现了安全与效率的平衡。

数据对比分析：实施前后核心指标对比情况如图 1 所示，可见改进方案在降低事故率、提升响应速度的同时，未对生产效率造成负面影响，反而因防护合理性优化实现小幅提升。

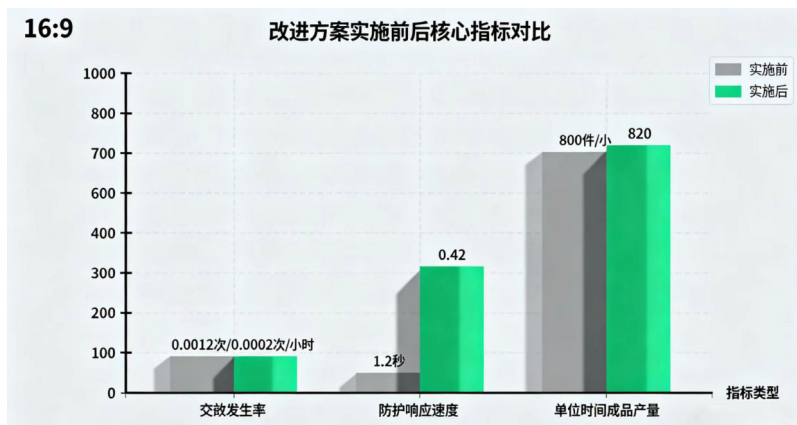


图 1 改进方案实施前后核心指标对比图

5 结语

本文针对电子加工车间人机协作中的设备安全问题，提出了融合智能感知、分级防护、动态监控与人员管理的综合改进方案，通过某企业车间的现场验证，证明该方案可有效降低安全事故发生率，提升防护响应速度，同时保障生产效率稳定。

当前方案在极端环境（如高温、高粉尘）下的适应性仍需优化，未来可进一步研究传感器在复杂环境中的抗干扰技术，结合数字孪生技术构建虚拟仿真平台，实现防护措施的提前模拟与优化。此外，人员安全意识的长期培养仍是关键，需建立“技术防护 + 人员管理”的长效机制。

电子制造业的智能化转型是必然趋势，人机协作的深度与广度将持续拓展，设备安全防护措施需不断迭代升级，以适应新场景、新需求，为行业高质量发展筑牢安全防线。

参考文献

- [1] 李鑫雨. 基于人员疲劳度模型的人机协作生产任务重分配方法研究[D]. 武汉理工大学, 2023.
- [2] 张凯阳. 基于数字孪生的人机协同装配虚实交互与任务分配方法研究[D]. 长安大学, 2024.
- [3] 施树雄. 基于机器人协作系统的柔性智能化产线装配优化设计与实践[D]. 昆明理工大学, 2023.
- [4] 卢振林. 制造车间内信息交互机理与设计框架研究[D]. 吉林大学, 2025.