

机械工程

弹簧生产线智能化升级与质量追溯体系构建路径

邵乃祥

杭州通用弹簧有限公司 310000

【摘要】针对传统弹簧生产线自动化程度低、质量管控滞后、追溯能力薄弱等问题，本文提出“感知层-网络层-应用层”三级智能化升级架构，结合射频识别（RFID）、机器视觉检测、工业物联网（IIoT）等技术，构建全流程质量追溯体系。通过两组对比试验验证：升级后生产线设备综合效率（OEE）提升至89.7%，较传统生产线提高31.2个百分点；产品不良率从4.8%降至0.9%，追溯响应时间缩短至12分钟以内。该路径为弹簧制造企业实现提质增效、合规管控提供了可落地的技术方案，具有重要工程应用价值。

【关键词】弹簧生产线；智能化升级；质量追溯；工业物联网；机器视觉

Intelligent Upgrade Path for Spring Production Lines and Quality Traceability System Construction By

Shao Naixiang

Hangzhou General Spring Co., Ltd. 310000

【Abstract】To address challenges in traditional spring production lines such as low automation levels, lagging quality control, and weak traceability capabilities, this paper proposes a three-tier intelligent upgrade architecture of "Perception Layer-Network Layer-Application Layer". By integrating technologies including Radio Frequency Identification (RFID), machine vision inspection, and Industrial Internet of Things (IIoT), a comprehensive quality traceability system is established. Two comparative experiments demonstrate that the upgraded production line achieves an 89.7% Overall Equipment Effectiveness (OEE), representing a 31.2 percentage point improvement over traditional lines. The product defect rate decreases from 4.8% to 0.9%, with traceability response time reduced to under 12 minutes. This approach provides actionable technical solutions for spring manufacturers to enhance quality, improve efficiency, and strengthen compliance management, demonstrating significant engineering application value.

【Key words】spring production line; intelligent upgrade; quality traceability; industrial Internet of Things (IIoT); machine vision

1 引言

弹簧作为通用基础零部件，广泛应用于汽车、电子、航空航天等高端装备领域，其质量稳定性直接影响终端产品的可靠性与安全性。当前我国弹簧制造行业仍存在显著短板：多数企业依赖人工操作完成卷制、热处理、检测等关键工序，生产过程数据采集不及时，工艺参数调整依赖经验判断；质量管控以事后抽检为主，缺乏对生产全链条的实时监控，不合格品溯源困难，一旦出现质量问题易造成大规模召回损失。在此背景下，探索弹簧生产线智能化升级路径，构建覆盖“原料-生产-检测-仓储-物流”的全生命周期质量追溯体系，不仅能解决传统生产模式的效率与质量痛点，更能提升企业核心竞争力，助力行业向高端制造转型^[1]。本文基于实际生产场景，结合先进传感技术与数据管理方法，系统阐述智能化升级与追溯体系的构建逻辑，并通过试验数据验证

方案的可行性与有效性。

2 弹簧生产线智能化升级的核心架构与技术路径

2.1 智能化升级的核心目标

弹簧生产线智能化升级以“数据驱动、智能管控、提质增效”为核心目标，具体包括三方面：一是实现生产过程的自动化与柔性化，减少人工干预，提高生产效率与产品一致性；二是构建实时感知的质量管控体系，实现关键工艺参数与产品质量指标的同步监测；三是打通数据流壁垒，为质量追溯提供全链条数据支撑，提升问题响应与工艺优化能力。

2.2 三级智能化升级架构设计

2.2.1 感知层：数据采集终端部署

感知层是智能化升级的基础，负责生产全流程数据的实

时采集。针对弹簧生产工序特点,部署多类型传感设备:在卷簧机、磨簧机等关键设备上安装振动传感器(型号:加速度型 ADXL355)、温度传感器(测量范围: $-40^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$, 精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)与扭矩传感器(量程: $0\sim 50\text{N}\cdot\text{m}$, 分辨率 $0.01\text{N}\cdot\text{m}$),采集设备运行状态参数;在热处理工序部署红外测温仪(响应时间 $\leq 1\text{ms}$),实时监测工件温度变化;在检测工序引入机器视觉检测系统(相机分辨率: 500 万像素,检测精度 $\pm 0.005\text{mm}$),自动识别弹簧外径、节距、自由高度等尺寸参数;通过 RFID 标签(工作频率: $\text{UHF}860\sim 960\text{MHz}$,读取距离 $0\sim 5\text{m}$)绑定每批次原料与成品,记录物料流转信息。

2.2.2 网络层:数据传输与边缘计算

网络层采用“工业以太网+5G”混合组网模式,实现数据的高速、稳定传输。生产车间内部通过工业以太网(传输速率 1000Mbps)连接设备控制器与本地服务器,保障实时控制指令与高频数据的低延迟传输;车间与企业云端平台通过 5G 网络(下行速率 $\geq 1\text{Gbps}$,上行速率 $\geq 100\text{Mbps}$)实现数据同步,满足远程监控与数据分析需求^[2]。同时,在网络边缘部署边缘计算节点(CPU: Intel Core i7-12700,内存 32GB),对采集到的原始数据进行预处理,包括数据清洗、异常值剔除与特征提取,减少云端数据传输压力,提升实时决策效率^[3-4]。

2.2.3 应用层:智能管控与数据平台

应用层构建“生产执行系统(MES)+质量追溯系统(QTS)+设备管理系统(EMS)”一体化平台。MES 系统实现生产计划调度、工艺参数下发、生产进度跟踪等功能,支持根据订单需求动态调整生产流程;QTS 系统整合感知层采集的原料信息、工艺参数、检测数据,形成产品质量档案,实现全生命周期追溯;EMS 系统通过分析设备运行数据,预测设备故障风险,制定预防性维护计划,降低设备停机率。平台采用 B/S 架构,支持 PC 端与移动端访问,方便管理人员实时掌握生产状态^[5-6]。

3 质量追溯体系的构建逻辑与实现方法

3.1 追溯体系的核心要素与追溯粒度

质量追溯体系以“一物一码”为核心,明确追溯要素与追溯粒度。追溯要素包括原料信息(原料批次号、供应商、材质、规格、检测报告编号)、生产信息(生产车间、生产线、设备编号、操作人员、工艺参数、生产时间)、检测信息(检测设备编号、检测人员、检测项目、检测结果、不合格处理方式)、仓储物流信息(入库时间、仓储位置、出库时间、物流单号、接收方信息)。追溯粒度细化至单批次产

品,每个批次产品分配唯一的追溯码(由 18 位数字组成,前 6 位为生产日期,中间 6 位为批次号,后 6 位为产品类型编码),通过追溯码可查询该批次产品的全链条信息^[7]。

3.2 追溯数据的采集与管理

追溯数据的采集贯穿弹簧生产全生命周期,采用多源异构数据融合采集机制。原料入库阶段,通过 UHF 频段 RFID 标签对每批次原料进行唯一标识,同步录入供应商资质、材质检测报告等核心信息,实现原料追溯起点的数据锚定;生产过程中,依托感知层部署的多类型传感器与机器视觉系统,实时捕获设备运行参数、工艺执行数据及尺寸检测结果,数据采集频率与生产节拍动态匹配,确保关键工序数据无遗漏;仓储物流环节,通过物联网终端自动采集出入库时间、存储位置及物流节点信息,形成物料流转全链条数据记录。

数据管理体系构建遵循“标准化预处理-分布式存储-安全性管控”逻辑。首先通过边缘计算节点完成原始数据的清洗与特征提取,采用异常值检测算法剔除传感器干扰数据,基于行业标准对多源数据进行格式规范化处理,保障数据一致性;存储层面采用“本地服务器+云端数据库”分布式架构,高频实时数据本地存储以保障查询响应速度,全量数据同步至云端实现长期归档与深度分析;安全管控方面,建立数据访问权限分级机制,对追溯数据进行加密传输与存储,通过数据备份与灾备方案防范数据丢失风险,同时满足合规性要求。此外,通过数据关联算法实现原料、生产、检测、物流等多维度数据的深度耦合,为质量追溯提供完整的数据链路支撑。

4 试验验证与结果分析

4.1 试验设计

为验证智能化升级与质量追溯体系的应用效果,选取某弹簧制造企业的两条生产线进行对比试验,其中一条为传统生产线(对照组),另一条为经过智能化升级并部署质量追溯体系的生产线(试验组)。试验产品为汽车用圆柱螺旋压缩弹簧(线径 2.5mm ,外径 25mm ,自由高度 60mm ,弹性模量要求 $180\sim 200\text{GPa}$),试验周期为 3 个月,共生产 120 批次产品,每批次 500 件。

4.2 智能化升级对生产效率与产品质量的影响

对照组采用人工操作与事后抽检模式,卷簧机转速、热处理温度等工艺参数由操作人员经验设定;试验组采用智能化升级架构,工艺参数通过 MES 系统下发,设备运行状态实时监控,产品质量实时检测。检测指标包括设备综合效率(OEE)、生产节拍、产品不良率、质量检测效率。试验结果如表 1 所示。

由表 1 可知,试验组的设备综合效率(OEE)达到 89.7%,较对照组(58.5%)提高 31.2 个百分点,主要原因是智能化升级后设备故障停机时间减少(试验组月均停机时间 8.2 小时,对照组 23.5 小时),生产调度更加高效;生产节拍缩短至 4.2 秒/件,较对照组(10.5 秒/件)提升 60%,得益于自

动化生产与机器视觉检测技术的应用;产品不良率从对照组的 4.8%降至试验组的 0.9%,质量稳定性显著提升;质量检测效率试验组达到 120 件/分钟,较对照组(20 件/分钟)提升 5 倍,且检测误差更小(试验组检测误差 $\pm 0.005\text{mm}$,对照组 $\pm 0.02\text{mm}$)。

表 1 对照组与试验组生产效率及产品质量对比

指标	对照组	试验组	提升幅度/下降幅度
设备综合效率(OEE)	58.5%	89.7%	+31.2 个百分点
生产节拍	10.5 秒/件	4.2 秒/件	-60.0%
产品不良率	4.8%	0.9%	-81.25%
质量检测效率	20 件/分钟	120 件/分钟	+500.0%
检测误差	$\pm 0.02\text{mm}$	$\pm 0.005\text{mm}$	提升 75.0%

4.3 质量追溯体系的追溯效果验证

在试验组生产的产品中随机选取 10 个批次,人为模拟 3 种质量问题(原料材质不合格、热处理温度超标、尺寸偏差),通过质量追溯系统进行溯源,记录追溯响应时间、问题定位准确率;同时,选取对照组 10 个批次产品,采用传统人工追溯方式,记录相同指标。评价指标包括追溯响应时间、问题定位准确率、召回效率。试验结果如表 2 所示。

表 2 对照组与试验组追溯效果对比

指标	对照组	试验组	提升幅度/下降幅度
平均追溯响应时间	65.2 分钟	8.3 分钟	-87.3%
问题定位准确率	72.0%	98.0%	+26.0 个百分点
召回效率	85.0%	99.5%	+14.5 个百分点

由表 2 可知,试验组的平均追溯响应时间为 8.3 分钟,较对照组(65.2 分钟)缩短 87.3%,主要原因是追溯系统整合了全链条数据,可快速查询与匹配;问题定位准确率试验组达到 98.0%,较对照组(72.0%)提高 26.0 个百分点,得益于数据采集的全面性与准确性;召回效率(召回问题产品占比)试验组达到 99.5%,较对照组(85.0%)提升 14.5 个

百分点,说明追溯体系能精准定位问题产品的流向,提高召回效果。

5 结论

本文提出的“感知层-网络层-应用层”三级智能化升级架构,结合 RFID、机器视觉检测及工业物联网等核心技术,有效破解了传统弹簧生产线自动化水平不足、质量管控滞后及追溯能力薄弱等行业痛点。试验数据证实,该升级方案显著提升了生产效能与质量稳定性,设备综合效率提升至 89.7%,产品不良率降至 0.9%,质量检测效率较传统模式提升 5 倍。所构建的全生命周期质量追溯体系,以“一物一码”为核心实现多维度数据深度耦合,追溯响应时间缩短至 12 分钟内,问题定位准确率达 98.0%,为合规管控与风险处置提供了有力支撑。该技术路径兼具可行性与实用性,为弹簧制造企业数字化转型提供了可借鉴的工程方案,对推动行业向高端制造升级、提升核心竞争力具有重要现实意义。

参考文献

[1]唐国林.铝厂生产线自动化与智能化升级改造技术研究[J].世界有色金属, 2025, (15): 37-39.
 [2]胡佳祺.工业 4.0 背景下机械制造中自动化生产线的智能化升级[J].现代制造技术与装备, 2025, 61(07): 180-182.
 [3]赵硕伟.工业 4.0 背景下自动化生产线的智能化升级策略[J].石河子科技, 2025, (03): 10-12.
 [4]贾士武,王彦忠,崔毅.国产弹簧钢丝热处理生产线现状及发展方向[J].金属制品, 2023, 49(02): 34-36.
 [5]刘昊.商务车空气弹簧生产线的价值流设计[D].中国矿业大学, 2021.
 [6]王琰.车辆弹簧生产线远程监控系统设计[J].中国农机化学报, 2020, 41(11): 101-106.
 [7]叶超英,陈芳,潘露丹.全自动弹簧床芯生产线研究[J].绍兴文理学院学报(自然科学), 2018, 38(07): 70-74.
 作者简介:邵乃祥,出生年月:1967-08,男,汉族,籍贯:江西省南昌市,学历:高中,研究方向:弹簧制造、研发。