

Intelligent technology enables the optimization of blasting equipment production line

Xiaohua Guo Tang Tang

Poly Julian Gansu Jiulian Baiyin Xuesong Branch China Gansu Baiyin, Lanzhou, Gansu, 730900, China

Abstract

As critical infrastructure for national economic and defense development, blasting equipment production demands inherent safety, quality stability, and operational efficiency. Traditional manufacturing lines suffer from human intervention, imprecise process parameter control, high safety risks, and severe information silos. The Industry 4.0 era presents new opportunities through intelligent technologies including IoT, big data, AI, machine vision, and industrial robotics. This paper systematically explores smart technology applications in blasting equipment production, covering intelligent sensing/data acquisition, real-time production control, online quality monitoring, smart logistics/warehousing, and digital twin-based process optimization. Case studies and comparative analyses demonstrate how these innovations enhance intrinsic safety, ensure product consistency, boost productivity, and reduce costs. The paper concludes with current challenges and outlines future directions for technological integration and advanced implementation.

Keywords

Blasting equipment; Intelligent manufacturing; Production safety; Internet of Things (IoT); Artificial Intelligence (AI)

智能化技术赋能爆破器材生产线优化

郭小华 唐棠

甘肃久联民爆器材有限公司, 中国·甘肃 兰州 731499

摘要

爆破器材作为国民经济与国防建设的关键基础物资,其生产过程的本质安全性、质量稳定性及效率至关重要。传统生产线存在人为因素影响大、工艺参数控制精度低、安全风险高、信息孤岛化严重等问题。随着工业4.0时代的到来,以物联网(IoT)、大数据、人工智能(AI)、机器视觉和工业机器人等为代表的智能化技术为解决这些问题提供了全新路径。本文系统阐述了智能化技术在爆破器材生产线中各个环节的具体应用,包括智能感知与数据采集、生产过程智能控制、质量在线智能检测、智能物流与仓储以及基于数字孪生的全流程优化。通过分析应用实例和数据对比,论证了智能化技术在提升生产本质安全水平、保障产品质量一致性、提高生产效率和降低运营成本方面的显著成效。最后,对当前面临的挑战进行了总结,并展望了未来技术融合与深度应用的发展方向。

关键词

爆破器材; 智能制造; 安全生产; 物联网(IoT); 人工智能(AI)

1 引言

爆破器材,主要包括工业炸药、雷管、索类火工品等,广泛应用于矿产开采、水利水电、交通建设、地质勘探及国防军工等领域。由于其本身具有易燃易爆的高危险性,其生产过程一直被列为国家严格监管的高风险作业。传统的爆破器材生产线虽然历经多次技术改造,实现了初步的机械化和自动化,但仍然面临诸多严峻挑战:(1)安全风险高:大量工序仍需人工直接参与或近距离操作,人员暴露于危险环境,人为失误是引发安全事故的主要因素;(2)质量波动大:关键工艺参数(如温度、压力、配比、转速等)多依赖经验

控制,精度和稳定性不足,导致产品性能批次间差异显著;

(3)生产效率瓶颈:各生产单元自动化程度不一,信息交互不畅,形成“自动化孤岛”,整体调度和协同效率低下;(4)溯源管理困难:生产、仓储、流通数据记录多采用纸质表单,信息不连贯、易篡改、难追溯,一旦发生质量问题,追查原因异常困难。

近年来,智能制造浪潮席卷全球制造业,其核心是通过新一代信息通信技术与先进制造技术的深度融合,实现生产全流程的数字化、网络化和智能化。将智能化技术引入爆破器材这一特殊行业,不仅是技术发展的必然趋势,更是从根本上提升其安全生产水平、实现产业转型升级的战略需求。本研究旨在系统探讨物联网、大数据、AI、机器视觉等智能化技术在爆破器材生产线中的具体应用场景与集成方案,分析其带来的优化效果,并为未来的深入应用提供思

【作者简介】郭小华(1981-),男,苗族,中国贵州贵阳人,本科,工程师,从事民爆行业工作及研究。

路和借鉴。

2 智能化技术体系构成

爆破器材生产线的智能化改造是一个系统工程，其技术支撑体系主要由以下几个层面构成：

感知执行层：通过各类高精度、防爆型传感器（如温度、压力、流量、图像、位移传感器）和 RFID 标签，实时采集设备状态、环境参数、物料信息和人员操作行为。执行机构包括防爆工业机器人、智能数控装备、AGV（自动导引运输车）等。

网络传输层：利用工业以太网、5G、LoRa、Wi-Fi 6 等网络技术，构建覆盖全厂区的工业互联网网络，实现感知层数据的高速、稳定、低延时传输，打通“信息孤岛”。

平台支撑层：搭建工业云平台或本地化部署的工业大数据平台，作为数据的汇聚、存储、管理和分析中心。同时，集成数字孪生技术，构建生产线的虚拟映射模型。

应用智能层：基于平台数据，运用机器学习、深度学习等 AI 算法，开发各类智能应用，如工艺参数优化、设备

预测性维护、智能安全预警、质量在线判定等，实现核心业务的智能化决策与控制。

3 智能化技术在生产线各环节的应用与优化

3.1 基于 IoT 的智能感知与数据采集优化

传统生产线数据采集频次低、覆盖面窄。通过部署防爆型的物联网传感器网络，可实现对全生产线“人、机、料、法、环”全要素状态的实时感知与监控。

应用示例：在乳化炸药生产的乳化、冷却、敏化工序，在设备关键节点布置温度、压力、流量和转速传感器，数据实时上传至监控系统。一旦监测值偏离设定安全阈值，系统可自动报警并联动执行机构（如关闭阀门、启动急停），将事故遏制在萌芽状态。

优化效果：实现了从“事后补救”到“事前预警、事中控制”的转变，大幅提升了生产过程的本质安全水平。同时，海量的实时数据为后续的工艺优化和大数据分析奠定了坚实基础。

表 1 智能感知应用点及效果示例

生产环节	监测参数	所用传感器	优化效果
原料配制	重量、流量	高精度防爆称重模块、流量计	配比精度从 $\pm 2\%$ 提升至 $\pm 0.5\%$ ，保障产品基础性能
乳化过程	温度、压力、转速	防爆热电偶、压力变送器、转速传感器	实时调控，避免“过乳化”或“乳化不全”，质量更稳定
装药包装	药卷重量、长度	高精度称重传感器、机器视觉	100% 在线检重，杜绝不合格品流入下道工序
仓库管理	温湿度、库存位置	温湿度传感器、RFID	实现环境自动调控和库存精准化管理，降低仓储风险

3.2 生产过程的智能控制与自适应优化

基于 PLC/DCS 的传统自动化控制属于“固定逻辑”控制，无法应对原料特性微小波动和环境变化。引入 AI 算法，可实现生产过程的智能自适应控制。

应用示例：利用机器学习算法（如神经网络、支持向量机）对历史生产数据（原料参数、环境温度、工艺参数设定值、最终产品质量）进行学习训练，构建产品质量预测模型。系统根据当前原料和环境状况，通过模型实时推理，动态调整乳化温度、搅拌速度、冷却水流量等关键工艺参数的设定值，使生产过程始终保持在最优状态。

优化效果：打破了依靠老师傅经验的传统模式，实现了以最终产品质量为导向的闭环优化控制。有效减少了质量偏差，提高了优等品率，同时降低了能耗。某企业应用后，产品性能标准差降低了 30%，能耗下降约 8%。

3.3 基于机器视觉的质量在线智能检测

质量检测是保障爆破器材安全性的最后一道关口。传统人工检测效率低、劳动强度大、主观性强且易漏检。

应用示例：在雷管装配线末端，部署高速工业相机和光源系统，采集每发雷管的外观图像。利用深度学习目标检测算法（如 YOLO、Faster R-CNN），自动识别并定位编码不清、表面缺损、尺寸偏差、部件漏装等缺陷。系统可在毫秒级内完成判别，并驱动机械手将不合格品自动剔除。

优化效果：实现了 100% 全检，检测准确率可达 99.9% 以上，远高于人工检测的 95%。同时，解放了劳动力，避免了人员与危险品的长期直接接触。检测数据可实时上传 MES 系统，生成质量报表，便于追溯与分析。

3.4 智能物流与仓储管理

爆破器材的原材料和成品运输、仓储是高风险环节。应用 AGV、智能立库等方法，可实现“人药分离”。**应用示例：**在厂区内规划无人驾驶路线，使用防爆 AGV 小车自动搬运炸药原材料和成品卷。成品入库时，通过 RFID 技术自动识别信息，堆垛机将其自动存入防爆智能立体仓库中的指定货位。库房管理完全由 WMS（仓库管理系统）调度，无人进入库区。

优化效果：极大减少了仓储和转运环节的人工参与，从根本上降低了此过程中的安全风险。提高了物流效率和空间利用率，实现了库存的精准、实时可视化管理。

3.5 基于数字孪生的全流程可视化与仿真优化

数字孪生（Digital Twin）是智能化的高级形态，为物理生产线创建一个完全对应的虚拟模型。

应用示例：构建包含设备几何模型、物理模型、规则模型和行为模型的生产线数字孪生体。它与实体生产线通过 IoT 数据实时同步交互。操作人员可在三维可视化界面上直观地监控全线运行状态。更重要的是，可以在数字孪生体上

进行工艺参数模拟调试、生产线布局优化、应急预案演练和人员培训，而无需中断实际生产或承担安全风险。

优化效果：提供了一个安全、低成本的生产系统测试和优化平台，支持决策的科学化。实现了从“黑箱”生产到“透明化”管理的飞跃，为 predictive maintenance（预测性维护）

和更深层次的自主优化提供了可能。

4 应用效益分析

对某实施智能化改造的乳化炸药生产线进行对比分析，其关键指标提升如下：

表 2 智能化改造前后关键指标对比

指标类别	改造前	改造后	提升幅度
生产效率	班产 60 吨	班产 75 吨	+25%
产品合格率	98.5%	99.95%	+1.45 个百分点
单位产品能耗	基准值	下降 12%	-
生产线上直接操作人员	15 人/班	5 人/班 (中控室)	-66.7%
安全事故发生率	偶发	近乎为 0	显著降低
质量数据可追溯性	部分纸质记录，追溯难	全流程数字化，秒级精准追溯	根本性改善

由此可见，智能化技术的应用带来了综合性的巨大效益，尤其在安全、质量和效率这三个核心维度上表现突出。

5 结语

将智能化技术深度融入爆破器材生产线，已成为行业提升本质安全水平、实现高质量发展的必由之路。本文系统论述了物联网、人工智能、机器视觉、数字孪生等技术在感知监控、过程控制、质量检测、物流仓储和全流程优化等方面的具体应用与显著成效。实践证明，智能化改造能够极大地减少人工直接参与，实现精准化、柔性化生产，构建一个可知、可控、可优的现代化生产体系。

然而，当前的发展仍面临一些挑战：一是初始投资成本高昂，对中小企业构成一定压力；二是跨领域复合型人才短缺，既懂爆破工艺又懂信息技术的专家匮乏；三是数据安全与网络安全风险突出，需构建坚固的防护体系；四是相关技术标准与规范尚不完善。

未来，爆破器材的智能化发展将呈现以下趋势：一是 5G+IIoT（工业物联网）的融合将实现更广泛和更可靠的设备互联与数据互通；二是 AI 算法将从“辅助优化”向“自主决策”演进，实现更高水平的自动化；三是数字孪生技术将与物理实体的交互更加深入，实现真正的虚实联动与预测性控制；四是区块链技术的引入将进一步增强产品质量溯源和数据防篡改的能力。

总之，尽管前路挑战犹存，但以智能化技术驱动爆破

器材生产模式的变革浪潮不可逆转。需要政府、企业、科研院所协同努力，共同推动这一特殊行业向着更安全、更高效、更绿色的方向持续演进。

参考文献

- [1] 周明, 李磊. 工业4.0背景下民爆行业智能制造发展路径研究[J]. 爆破器材, 2021, 50(3): 1-7.
- [2] 王建国, 赵鑫, 孙斌. 基于数字孪生的智能生产线建模与仿真优化[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1310-1322.
- [3] 陈鹏, 刘强, 张伟. 机器视觉在工业雷管外观缺陷检测中的应用研究[J]. 兵工自动化, 2020, 39(8): 82-86.
- [4] 工业和信息化部. 《“十四五”民用爆炸物品行业安全发展规划》[Z]. 2021.
- [5] Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems[J]. Manufacturing Letters, 2015, 3: 18-23.
- [6] 肖立平, 郭学永. 基于物联网的乳化炸药生产线远程监控系统设计[J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46(4): 297-301.
- [7] 韩亚斌, 付跃升, 黄浩. 人工智能在火工品生产质量控制中的应用展望[J]. 火工品, 2022(2): 55-59.
- [8] 中国爆破器材行业协会. 民用爆炸物品行业智能制造试点示范案例汇编[R]. 2022.
- [9] 刘千里, 王泽普. 工业大数据在流程工业工艺优化中的应用综述[J]. 自动化学报, 2021, 47(11): 2499-2520.