

# 基于数字孪生技术的民爆自动化 生产线机电一体化控制方法

何静<sup>†</sup>

(云南锐达民爆有限责任公司, 云南 曲靖 655000)

**摘要:**受到生产过程中物料性质的特殊性及工艺流程的复杂性影响,民爆生产线难以实现精准高效实时控制。为提高生产线的智能化控制水平,提出了基于数字孪生技术的民爆自动化生产线机电一体化控制方法。结合数字孪生技术,从生产设备几何属性、生产要素物理属性、制造设备生产能力属性、生产行为属性各不同维度进行生产线建模。将民爆自动化生产线的机电一体化控制问题转化为强化学习问题,通过定义状态空间以及动作空间等,对生产线控制问题进行描述。利用DQN算法对民爆自动化生产线的机电一体化控制问题进行求解,实现高效的自动化生产和优化控制。在实验中,对提出的方法进行了控制效果的检验。最终的测试结果表明,采用提出的方法对生产线进行机电一体化控制后,设备利用率较高,具备较为理想的控制效果。

**关键词:**数字孪生;民爆;生产线;机电一体化;控制方法

**中图分类号:**TH16

**文献标识码:**A

## Electromechanical Integration Control Method for Civil Explosives Automated Production Line Based on Digital Twin Technology

HE Jing<sup>†</sup>

(Yunnan Ruida Civil Explosive Co., Ltd., Qujing, Yunnan 655000, China)

**Abstract:** Affected by the special nature of the materials in the production process and the complexity of the process, it is difficult to realize accurate and efficient real-time control of the civil explosion production line. In order to improve the intelligent control level of the production line, the electromechanical integration control method for civil explosives automated production line based on digital twin technology is proposed. Combined with digital twin technology, the production line is modeled from the different dimensions of production equipment geometric attributes, physical attributes of production factors, manufacturing equipment production capacity attributes, production behavior attributes hood. The electromechanical integration control problem of the automated production line of civil explosives is transformed into a reinforcement learning problem, and the production line control problem is described by defining the state space and action space. The DQN algorithm is used to solve the mechatronics control problem of the civil explosion automated production line to achieve efficient automated production and optimal control. In the experiment, the control effect of the proposed method is tested. The final test results show that after the proposed method is used for the electromechanical integration control of the production line, the utilization rate of the equipment is high, and it has a more ideal control effect.

**Key words:** digital twin; civil explosion; production line; mechatronics; control method

生产线作为工业自动化体系中的核心组成部分,其高效、灵活与智能化运行直接关系到企业的生产效率和经济效益。然而,民爆(民用爆炸物)生产因其特殊性和高风险性,对生产线的安全性、稳定性和智能化水平提出了更为严苛的要求<sup>[1]</sup>。因此,探索并实践基于数字孪生技术的民爆自动化生产线机电一体化控制方法,成为当前工业界与学术界关注的热点。

目前已经有较多学者针对工业生产线一体化控制方法进行了研究。例如,文献[2]通过构建数字孪生模型,实时映射物理生产线的运行状态,实现了生产流程的精确模拟与预测。然而,尽管数字孪生技术显著提升了生产线的可视化与可预测性,但实际应用中,模型复杂性与实时数据同步的局限性导致在高速动态变化的生产环境中,控制精度难以持续保持在理想水平。文献[3]通过为生产线的每个关键组件分配独立的 Agent,实现了局部决策与全局协调的有机结合。但此方法在追求高度灵活性的同时,也暴露出了控制精度方面的不足。各 Agent 间信息交互的延迟与不一致性以及复杂任务分配与冲突解决中的计算复杂度,导致整体控制策略在实时性和准确性上难以达到最优,特别是在高精度要求的微组装过程中,这种局限性尤为明显。文献[4]利用 Petri 网模型对机床座类柔性生产线的调度进行了建模与优化。该方法有效解决了生产过程中的资源冲突与路径规划问题,提高了生产线的整体效率。但模型在面对实际生产中的微小扰动与不确定因素时,其静态分析与优化能力有限,难以实时调整控制策略以应对这些变化,从而影响了最终产品的加工精度与一致性。文献[5]通过集成物理生产线与虚拟模型的双向反馈机制,显著提高了生产调度的智能化水平。尽管数字孪生技术为生产调度提供了强大的数据支持与仿真验证能力,但在实际执行过程中,由于物理设备性能差异、环境参数波动以及人为操作失误等多种因素的影响,导致控制指令的精确执行面临挑战。

本文通过结合数字孪生技术,对生产线整体动态操作流程进行描述,并结合建模结果,将控制问题转化为强化学习问题,实现民爆自动化生产线机电一体化控制。

## 1 方法设计

### 1.1 基于数字孪生技术的民爆自动化生产线建模

由于民爆产品的特殊性质,生产过程中的精度要求极高,任何微小的偏差都可能导致产品质量问题或安全隐患。因此为实现一体化控制,本文首先

结合数字孪生技术,对生产线进行建模处理。

考虑到民爆自动化生产线涉及多个工艺环节和复杂的设备系统,包括原料处理、混合、压制、装药、封装等多个步骤,通过构建一个多维度的智能体,来对生产线的可重构性质进行描述<sup>[6]</sup>。智能体维度包括生产设备几何属性、生产要素物理属性、制造设备生产能力属性、生产行为属性等。

首先采集民爆自动化生产线的几何数据、物理参数、生产能力指标、生产流程信息等。在设备几何属性方面,混合机、压药机等设备的尺寸和部件尺寸 GS、各设备之间的相对位置关系 GP 等均可作为几何参数参与建模<sup>[7]</sup>。其几何模型 GM 描述表达式如下所示。

$$GM = \{GS, GP, GSA, \dots\} \quad (1)$$

式中, GSA 代表生产设备的内部结构几何形状。物理属性可以按照可变以及不可变特性进行划分与建模,其具体物理模型 PM 描述表达式如下所示。

$$PM = \{IPP, VPP, AE, \dots\} \quad (2)$$

式中, AE 代表生产线关联的生产设备, IPP 代表包括设备质量、设备密度以及设备材料属性在内的不可变物理属性, VPP 代表包括温度以及速度在内的可变物理属性<sup>[8]</sup>。能力属性 CM 涵盖车间设备的额定制造能力以及动态制造能力,具体属性描述表达式如下所示。

$$CM = \{MC, RMC, MMC, CU, \dots\} \quad (3)$$

式中, MC 代表车站设备额定制造能力, CU 代表车间生产能力循环率, RMC 代表设备在正常工作条件下长期运行所能承受的最大功率, MMC 代表设备在短时间内能够输出的最大功率<sup>[9]</sup>。生产行为 BM 涵盖设备的当前加工状态 PDS 以及产品生产的上下游信息。具体表达式如下所示。

$$BM = \{PDS, APM, SNM, \dots\} \quad (4)$$

式中, APM 和 SNM 分别代表上一个设备的产品生产信息以及当前设备向下一台设备发送的产品生产信息。为对生产线整体过程进行动态描述,基于上述的属性建模结果,本文引入协商模型 NM 对其进行协调,具体表达式如下所示。

$$NM = \{RC, SS, FS, SA, \dots\} \quad (5)$$

式中, RC 代表民爆车间系统的重构条件, SS 代表车间系统的总运行状态, FS 代表各个生产单元下的运行状态,该运行状态涵盖了上述四个建模属性, SA 代表重构函数。

通过上述方式,可以将孪生模型下不同属性进行耦合调整,从而实现生产线建模。

## 1.2 民爆自动化生产线控制问题转化

本文将民爆自动化生产线的机电一体化控制问题转化为强化学习问题,通过定义状态空间以及动作空间等,对生产线控制问题进行描述。

首先明确民爆自动化生产线的控制目标为提高生产效率,在此基础上对状态空间进行定义。状态空间应包含能够全面反映生产线当前运行状况的信息<sup>[10]</sup>。在机电一体化控制中,这可能包括设备的运行状态(如开/关、速度、温度等)、在制品的位置和数量、原材料库存、产品质量指标以及安全状态等<sup>[11]</sup>。其状态向量为  $s = [s_1, s_2, \dots, s_n]$ , 其中  $s_i$  代表第  $i$  个维度的状态信息。

控制策略  $\pi$  是从状态空间到动作空间  $A$  的映射,在民爆自动化生产线中,调度动作包括任务分配、安排设备维度、调整设备工作参数以及优先处理紧急订单<sup>[12]</sup>。由此可以将动作空间定义为  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ , 其中  $a_j$  代表第  $j$  个控制指令。

基于上述定义,本文将提高生产效率这一目标具体量化为最大化机器利用率,其具体计算公式如下所示。

$$U = \frac{1}{M} \cdot \sum_{m=1}^M \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ijm}}{C_{\max}} = \frac{1}{M} \cdot \frac{T}{C_{\max}} \quad (6)$$

式中,  $M$  代表车间机器数量,  $T_{ijm}$  代表机器完成某工序所需要的加工时间,  $C_{\max}$  代表给定一系列加工作业中,最后一个任务的完工时间,即最大完工时间,  $n$  和  $m$  分别代表状态向量总数以及动作向量总数,  $T$  代表设备完成某个产品的总加工时长<sup>[13]</sup>。将这一指标作为奖励函数  $R$ , 由此可以得到函数表达式如下所示。

$$R = \frac{1}{M} \cdot \frac{T}{C_{\max}} \quad (7)$$

上述构建出的奖励函数可以反映生产线机电一体化控制目标的达成程度,从而评估控制策略的实际性能表现。

## 1.3 民爆自动化生产线机电一体化调度与控制

本文利用 DQN 算法对民爆自动化生产线的机电一体化控制问题进行求解,实现高效的自动化生产和优化控制。

DQN 网络结构中的神经网络拟合  $Q$  函数  $Q(s, a; \theta)$  用于预测在给定状态下采取某一动作后能够获得的未来累积奖励,从而帮助生产线找到最优的控制策略,其中  $\theta$  代表网络参数<sup>[14]</sup>。对此,首先将生产线重置到初始状态  $s_0$ , 然后以  $\epsilon$  概率随机选择一个控制动作  $a_t$ , 并执行该动作,观察即时奖

励  $r_t$  以及新状态  $s_{t+1}$ , 并将状态转移  $(s_t, a_t, r_t, s_{t+1})$  存储到经验池  $D$  中。在民爆自动化生产线的控制过程中,每一次的调度决策和随后的结果(如生产效率、能耗、安全状况等)都会被记录并存储在经验池  $D$  中。如果  $D$  的规模足够大,则可以从  $D$  中随机采样一个批量  $\{(s_i, a_i, r_i, s_{i+1})\}_{i=1}^M$ 。对于采样结果中的每个样本,计算其目标  $Q$  值  $y_i$ , 具体公式如下所示。

$$y_i = r_i + \gamma \max_{a'} Q(s_{i+1}, a'; \theta^-) \quad (8)$$

式中,  $\theta^-$  代表目标网络的参数,  $\gamma$  代表折扣因子,  $a'$  代表在给定当前状态下通过目标网络预测出的最优动作。DQN 的训练目标是使  $Q$  网络的输出接近目标  $Q$  值。对此,本文所选用的损失函数表达式如下所示。

$$L(\theta) = \frac{\sum_l (y_l - Q(s_l, a_l; \theta))^2}{2} \quad (9)$$

式中,  $Q(s_i, a_i; \theta)$  代表  $Q$  网络的预测输出。在经过一定数量的训练周期,将  $Q$  网络的参数  $\theta$  复制到目标网络  $\theta^-$ , 以此可以对状态进行更新<sup>[14]</sup>。通过不断重复上述步骤进行训练, DQN 能够学习到一种策略,该策略能够根据当前生产线的状态选择最优或接近最优的动作,以实现一体化控制的优化目标。将本节内容与上述提到的生产线建模以及控制问题转化等相关内容进行结合,至此,基于数字孪生技术的民爆自动化生产线机电一体化控制方法设计完成。

## 2 实验论证

设计了一套遵循严格对比测试原理的实验方案。该方案强调对实验条件的精细调控与严格管理,旨在消除外部变量对实验结果的潜在干扰,从而确保所得评估结果不仅具备高度的客观性,而且能够精准反映所提出控制方法在实际应用场景下的效能表现。

### 2.1 实验说明

为了确保对本文提出的生产线机电一体化控制方法效能的评估既全面又具备高度的客观性,本文挑选了两种在领域内具有广泛认可度的基准技术——即基于多 Agent 系统(MAS)的生产线控制策略与基于 Petri 网模型的生产线调控方法,作为本次实验中的关键对比对象。通过对比分析,本研究力图清晰揭示在相同或相似实验条件下,不同控制算法之间的性能差异与各自的优势与劣势。

## 2.2 实验对象

本次实验聚焦于某中型规模的民爆自动化生产线,该生产线专门用于生产多种类型的民用爆炸物,以满足建筑、采矿、地质勘探等领域的需求。生产线全长约 120 m,宽 30 m,高度根据设备布局有所不同,最高处可达 10 m。整条生产线采用高度集成化的设计理念,集成了原料预处理、混合搅拌、压制成型、干燥固化、质量检测及包装入库等多个工序。

实验采用 Plant Simulation 软件,根据实际生产线布局与设备特性进行高度逼真的环境构建。确保仿真平台能够支持多 Agent 系统与 Petri 网模型的集成与运行。具体建模参数如表 1 所示。

表 1 生产线建模参数

参数类别	参数名称	具体数值/范围
生产线速度	正常工作速度	20 m/min
	加速测试速度	30 m/min
	减速测试速度	10 m/min
产品种类	种类 A(炸药类)	占比 40%
	种类 B(雷管类)	占比 30%
	种类 C(其他类)	占比 30%
故障率	预期设备故障率	0.1%/h
	突发故障模拟	随机触发(模拟实际生产中不可预测故障)
原材料供应稳定性	稳定供应状态	供应速度±2%波动
	不稳定供应模拟	供应速度±10%波动,偶发断供
初始条件设置	生产线状态初始化	所有设备处于待机状态,无故障记录
	原材料库存初始化	各类原材料库存量均为最大容量的 80%

在上述生产线建模过程中突发故障模拟与不稳定供应模拟等参数,旨在模拟实际生产中的复杂多变情况,评估控制系统在实际应用中的适应性与鲁棒性。并对供应速度进行调整,从而模拟生产线在供应链中断或原料短缺情况下的真实生产情况。结合 Plant Simulation 软件,本次实验所模拟的民爆自动化生产线网络拓扑结构如图 1 所示。

图 1 展示了一条模拟的民爆自动化生产线的网络拓扑结构,该生产线集成了原料预处理、混合搅拌、压制成型、干燥固化、质量检测及包装入库等多个工序,实现了高度的自动化与集成化。图 1 中:

①主控中心是整个自动化生产线的核心,负责

监控整个生产线的运行状态,接收来自各个生产环节的数据,并进行处理与分析,可以实现数据采集与监控、生产调度、数据分析与优化、故障诊断与维护等功能。

②自动输送控制系统是连接各生产工序的关键,负责原材料、半成品和成品的输送。

③原料库存储生产所需的原材料,保证生产线的连续供料。

④混合工序设备负责将原材料按照一定比例混合均匀,装药设备负责将混合好的炸药装入指定的容器中,而包装设备则负责将成品进行包装和标记,确保产品的可追溯性。

⑤抽样检测设备在生产过程中随机抽取样品进行检测,以确保产品质量符合标准。

⑥上位机是生产线的控制中枢,负责接收来自主控中心和其他传感器的数据,实现生产线的自动化控制和智能化管理,提高生产效率和产品质量。

⑦PLC 是生产线中的关键控制设备,负责执行上位机发出的指令,控制各生产设备的运行。通过精确的控制和逻辑判断,确保各生产设备按照预定的程序和步骤运行,实现生产线的自动化和高效化。

基于上述模拟的自动化生产线,实验结合实际生产需求,对生产任务进行了设定,以供不同算法对其进行机电一体化控制与调度。具体任务分配情况如表 2 所示。

表 2 生产任务分配情况

任务编号	产品种类	生产件数	计划开始时间	计划结束时间	优先级
T001	种类 A(炸药类)	500	08:00	10:00	高
T002	种类 B(雷管类)	350	10:15	12:00	中
T003	种类 A(炸药类)	400	12:15	14:00	高
T004	种类 C(其他类)	200	14:15	15:30	低
T005	种类 B(雷管类)	300	15:45	17:30	中
T006	种类 A(炸药类)	600	09:00	11:30	高

在上述任务分配结果中,任务 T006 为并行任务,意味着它与其他任务(如 T001)在时间上部分重叠,用于测试控制系统在并行处理多任务时的能力。同时,优先级分为高、中、低三档,用于指导生产任务的调度顺序。在资源有限的情况下,高优先级任务将优先获得资源与执行权。

针对模拟出的生产任务,分别采用不同方法对生产线进行机电一体化控制,从而完成全部的生产

任务。在控制过程中,利用仿真软件的数据记录功能,实时采集实验过程中的关键数据,如生产效率、能耗、故障率、响应时间等。

### 2.3 控制效果对比

本文方法下,民爆自动化生产线机电一体化控制结果如表 3 所示。

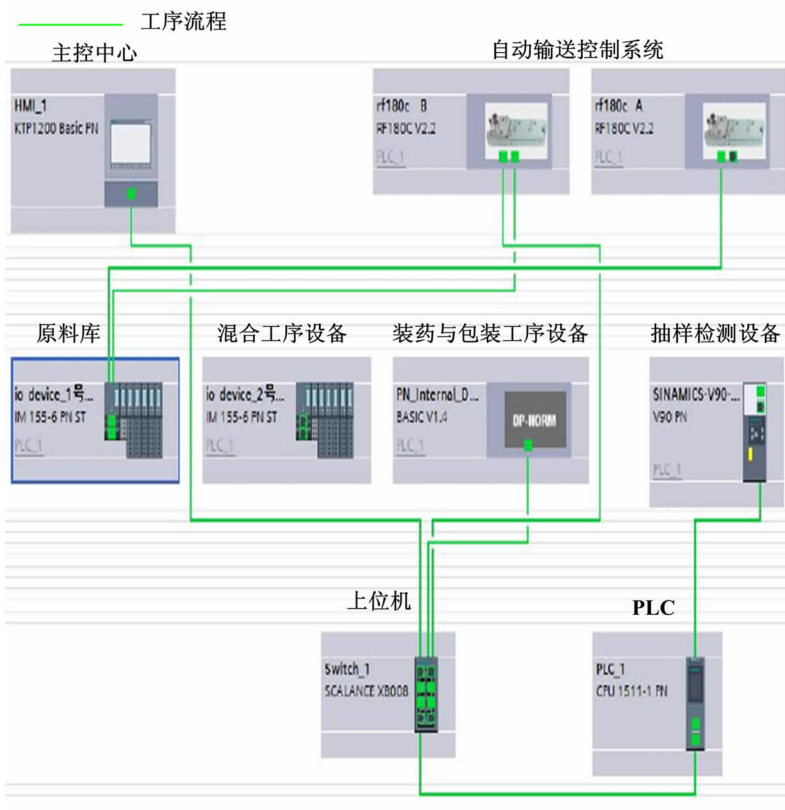


图 1 民爆自动化生产线网络拓扑结构

表 3 本文方法下的生产线机电一体化控制结果

生产任务编号	实际开始时间	实际结束时间	完成件数	偏差率	能量消耗/kWh	故障次数	停机时间/min
T001	08:00	09:55	500	0%	1200	0	0
T002	10:15	12:05	350	0%	950	0	0
T003	12:15	14:02	400	0%	1000	0	0
T004	14:15	15:32	200	0%	550	0	0
T005	15:45	17:30	300	0%	800	0	0
T006	09:00	11:28	600	0%	1400	0	0

从表格中可以看出,所有生产任务(T001至T006)均按照计划完成了指定数量的产品生产,且完成数量与计划数量完全一致,偏差率为0%。这表明无论是面对单一任务还是并行任务,控制系统都能够保持稳定的运行状态,确保生产任务的顺利进行。为提高实验结果的可靠性,实验以不同控制方法下生产线的设备利用率为对比指标,对实际控制效果进行衡量。具体实验结果如图 2 所示。

从上述实验结果可以看出,本文方法的平均设备利用率达到了 87.5%,而常规方法的平均设备利用率为 75.0%。这表明本文方法通过优化生产流程、减少设备空闲时间和提高设备协同作业能力,有效提升了生产线的整体效率,其控制效果明显优于两种常规的控制方法。

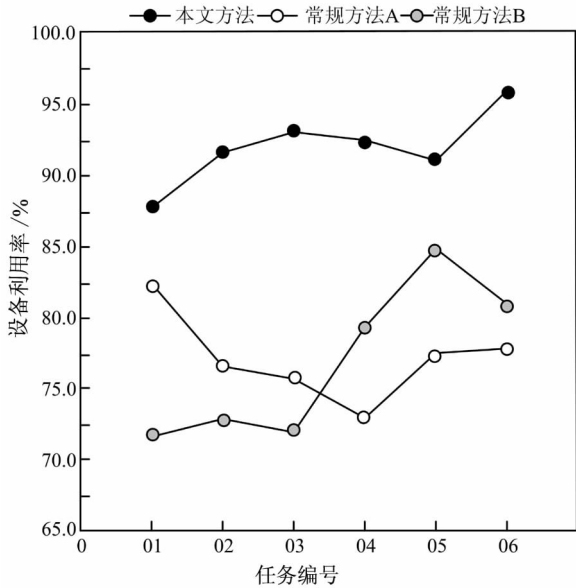


图2 不同控制方法下的生产线设备利用率对比结果

### 3 结论

深入探讨了基于数字孪生技术的民爆自动化生产线机电一体化控制方法,这一研究不仅是对传统民爆生产模式的一次革新性尝试,更是智能制造与工业安全深度融合的重要体现。通过构建精准映射物理生产线的数字孪生模型,本文实现了对生产线运行状态的实时感知、动态仿真与智能控制,极大地提升了生产线的安全性、稳定性和效率。

### 参考文献

- [1] 张丽杰. 工业大数据建模方法及生产线运行状态监控技术研究 [J]. 无线互联科技, 2024, 21 (12): 115-117+124.
- [2] 马桂潮. 基于数字孪生技术的小型自动化生产线机电一体化概念设计与控制仿真 [J]. 机电信息, 2024(12): 52-55.

- [3] 秦丽娜. 基于多 Agent 技术的混合微组装生产线协同控制方法 [J]. 制造业自动化, 2022, 44 (3): 176-179.
- [4] 贾云富,张凯. 基于 Petri 网的机床座类柔性生产线调度模型 [J]. 机电工程, 2022, 39 (10): 1470-1476.
- [5] WANG Y, WU Z. Digital twin-based production scheduling system for heavy truck frame shop[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(4): 1931-1942.
- [6] 杨洋. 基于人工智能的预制梁场环形生产线智能加工管控方法 [J]. 智能制造, 2023, (6): 98-102.
- [7] 邓文顺,刘强,赵荣丽. 基于数字孪生的生产线分布式近物理集成调试方法 [J]. 工业工程, 2023, 26 (5): 124-130.
- [8] 曹荣祥. 基于数字孪生的船舶管件加工生产线柔性管控系统 [J]. 造船技术, 2023, 51 (4): 88-92.
- [9] 曹锦江,黄家才,陈道庆. 面向机械加工的智能制造生产线控制设计与实现 [J]. 制造业自动化, 2023, 45 (7): 70-74.
- [10] 徐磊,林晓青,刘金山,等. 基于数字孪生的卫星结构生产线管控实践 [J]. 军民两用技术与产品, 2023, (4): 11-15.
- [11] 唐健钧,金筑云,石芹芹,等. 基于数字孪生的飞机总装生产线管控模式探索与实践 [J]. 航空制造技术, 2023, 66 (6): 34-41+65.
- [12] 耿蒙,曹良方,张立新. 基于部件装配专业化生产线的成本管控模式优化研究 [J]. 航空财会, 2023, 5 (1): 37-41.
- [13] 张晓萍,窦金生,宋天麟,等. 基于数字孪生的生产线监控系统研究 [J]. 包装与食品机械, 2022, 40 (4): 73-78.
- [14] 庞博,杨辉,于荣荣,等. 基于数字孪生技术的航天器机构生产线平衡研究 [J]. 图学学报, 2024, 45 (2): 332-338.
- [15] 赵霖,于成龙,王崑声,等. 基于手动/半自动装配线智能管控方法研究 [J]. 航空制造技术, 2022, 65 (7): 64-69.