

智能制造多机器人协同调度优化算法及产线仿真验证

权昊

中芯国际集成电路制造（深圳）有限公司，广东 深圳 518000

DOI:10.61369/ME.2026050028

摘 要： 针对智能制造车间中加工机器人与搬运机器人（AGV）资源耦合、调度效率低的问题，建立了以最大完工时间和系统总能耗为优化目标的多机器人协同调度模型，综合考虑工序约束、加工机器人选择与搬运任务分配。提出一种强化学习引导的自适应混合遗传算法：采用工序-加工机器人-搬运机器人三层编码，引入Q学习算子对交叉与变异概率进行自适应调整，并设计变邻域局部搜索增强寻优能力。基于扩展算例与数字孪生产线仿真平台进行验证，结果表明，所提算法在最大完工时间和总能耗上较NSGA-II、MOPSO分别降低约7%和6%，且收敛性与稳定性更优，可为智能制造产线的高效协同调度提供支持。

关 键 词： 智能制造；多机器人协同；生产调度；混合遗传算法；强化学习；产线仿真

Multi-robot Collaborative Scheduling Optimization Algorithm and Production Line Simulation Verification for Intelligent Manufacturing

Quan Hao

Semiconductor Manufacturing International (Shenzhen) Corporation, Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract： To address the low scheduling efficiency caused by the resource coupling between processing robots and material-handling robots (AGVs) in intelligent manufacturing workshops, a multi-robot collaborative scheduling model is established with the makespan and total system energy consumption as optimization objectives, comprehensively considering operation precedence, processing-robot selection, and transport-task assignment. A reinforcement-learning-guided adaptive hybrid genetic algorithm (AHGA) is proposed: a three-layer encoding of operation sequence, processing-robot selection, and handling-robot selection is adopted; a Q-learning operator adaptively adjusts the crossover and mutation probabilities; and a variable-neighborhood local search is designed to enhance the optimization capability. Verification on extended benchmark instances and a digital-twin production-line simulation platform shows that the proposed algorithm reduces the makespan and total energy consumption by about 7% and 6% respectively compared with NSGA-II and MOPSO, with better convergence and stability, providing support for efficient collaborative scheduling of intelligent manufacturing production lines.

Keywords： intelligent manufacturing; multi-robot collaboration; production scheduling; hybrid genetic algorithm; reinforcement learning; production line simulation

引言

新一代人工智能与智能制造的深度融合，推动制造车间由单机自动化向多机协同方向发展^[1]。在柔性产线中，多台加工机器人与搬运机器人（AGV）的协同作业可显著提升设备利用率与生产效率，已成为智能制造的关键支撑技术^[2]。然而，多机器人协同调度需同时求解工序排序、加工机器人选择与搬运任务分配等相互耦合的子问题，是典型的多目标、多约束NP难问题^[3]；传统方法在求解大规模问题时普遍存在收敛慢、易陷入局部最优、对能耗考虑不足等不足。为此，本文建立以最大完工时间和系统总能耗为目标的多机器人协同调度模型，提出一种强化学习引导的自适应混合遗传算法，并依托数字孪生产线仿真平台对调度方案进行验证，以提升智能制造产线的协同调度水平。

一、多机器人协同调度模型

(一) 问题描述

所研究的多机器人协同调度问题可描述为：n个工件在m台加工机器人上加工，工件i包含 n_i 道工序，各工序间存在固定的工艺先后顺序；同一工序可在多台加工机器人上加工且加工时间不同，需为其选择合适的加工机器人；工序在不同工位间转移时，由r台搬运机器人（AGV）完成运输，运输过程占用相应时间并产生能耗。借鉴双资源约束柔性作业车间调度的建模思想^[4]，将加工机器人与搬运机器人视为两类相互制约的关键资源，需同时决策工序排序、加工机器人选择与搬运机器人分配三个子问题，以在保证工艺约束的前提下实现整体效能最优。为简化建模，作如下假设：每台机器人在同一时刻仅加工或搬运一个工件；工序与运输一旦开始均不可中断；暂不考虑AGV的充电与突发故障。

(二) 优化目标与约束

以最大完工时间 f_1 和系统总能耗 f_2 为优化目标。最大完工时间为所有工件最后一道工序完成时间的最大值，直接反映产线的生产效率，如式(1)所示。

$$f_1 = C_{\max} = \max_{i \in J} \{C_{i, n_i}\} \quad (1)$$

系统总能耗由加工能耗、运输能耗与待机能耗三部分构成，如式(2)所示。加工能耗与运输能耗分别取决于加工时间和运输距离，待机能耗则与机器人的空闲时长相关。

$$f_2 = E = \sum_{i,j,k} x_{ijk} t_{ijk} p_k + \sum_{i,j,g} y_{ijg} d_{ij} e_g + \sum_k p_k^0 \left(C_{\max} - \sum_{i,j,k} x_{ijk} t_{ijk} \right) \quad (2)$$

式中： x_{ijk} 为0-1决策变量，表示工序 O_{ij} 是否在加工机器人k上加工； y_{ijg} 为0-1决策变量，表示工序 O_{ij} 的运输是否由AGV g承担； t_{ijk} 为加工时间； p_k 与 p_k^0 分别为加工机器人k的加工功率与待机功率； d_{ij} 为运输距离； e_g 为AGV g的单位距离能耗。两个目标相互冲突，问题表示为 $\min F = \{f_1, f_2\}$ 。主要约束如式(3)、式(4)所示。式(3)表示每道工序仅能选择一台加工机器人和一台搬运机器人；式(4)表示同一工件的相邻工序须满足工艺顺序，后道工序的开始时间不早于前道工序完成并完成运输的时间，其中 $S_{i,j+1}$ 、 C_{ij} 分别为开始与完成时间， τ_{ij} 为相邻工序间的运输时间。

$$\sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1, \sum_{g=1}^r y_{ijg} = 1 \quad (3)$$

$$S_{i,j+1} \geq C_{ij} + \tau_{ij} \quad (4)$$

二、协同调度优化算法

(一) 编码与解码

针对工序排序、加工机器人选择与搬运机器人分配三个子问题，设计工序层（OS）、加工机器人层（MS）与搬运机器人层（TS）三层实数编码，三层长度均等于工序总数，以保证编码与解码的一致性。OS层元素为工件号，同一工件号出现的次数代表其工序数；MS层元素为各工序所选加工机器人号；TS层元素为各

工序对应的搬运AGV号。解码采用插入式贪婪策略，按OS层确定的顺序逐道处理工序，在满足工艺顺序与运输时间约束的前提下，将工序插入所选加工机器人的最早可用空闲时段，从而压缩机器人待机时间、降低系统能耗。

(二) 强化学习引导的自适应混合遗传算法

标准遗传算法的交叉与变异概率固定，进化后期易出现早熟收敛与寻优停滞。为此，本文提出强化学习引导的自适应混合遗传算法（AHGA），引入Q学习算子根据种群进化状态在线调整算子概率^[5]。以相邻两代种群的解间距变化与超体积（HV）变化构成离散状态集，以增大、减小、保持交叉与变异概率作为动作集，并依据种群多样性与HV的提升程度设置奖励值；Q值按式(5)更新，交叉概率按式(6)自适应调整，变异概率采用同样方式调整，式中 δ 为调整步长， α 、 γ 分别为学习率与折扣因子。

$$Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha [r_t + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)] \quad (5)$$

$$p_c^t = p_c^{t-1} + \Delta_t, \Delta_t \in \{-\delta, 0, +\delta\} \quad (6)$$

为兼顾解集的收敛性与分布性，采用快速非支配排序构造Pareto等级，并结合拥挤距离对同级个体进行筛选以保持分布均匀。进一步设计变邻域局部搜索，依次执行关键工序交换（ N_1 ）、加工机器人重选（ N_2 ）与搬运AGV重分配（ N_3 ）三种邻域结构，对精英个体进行深度寻优。算法整体流程为：混合初始化生成初始种群，经快速非支配排序后，执行Q学习引导的交叉与变异操作，再对精英个体进行变邻域局部搜索，最后通过精英保留更新种群，循环迭代直至达到最大评价次数。

三、产线仿真验证

(一) 仿真平台与算例

数字孪生技术为集群机器人协同制造的虚拟调试与仿真验证提供了集成方案和工具链支撑^[6]。本文在数字孪生产线仿真环境中构建加工机器人、AGV与工位的产线模型，通过虚拟PLC信号驱动多机器人协同运行，在物理产线建立之前即可对调度方案的可达性与无冲突性进行验证^[7]。测试算例在Brandimarte标准算例的基础上扩展，加入AGV数量、运输距离与能耗参数，生成3组规模递增的多机器人协同调度算例，规模分别为 $8 \times 4 \times 2$ 、 $12 \times 5 \times 2$ 与 $16 \times 6 \times 3$ （工件数 $\times$ 加工机器人数量 $\times$ AGV数）。算法采用Python实现，种群规模为150，最大评价次数为 1.5×10^5 ，调整步长 $\delta=0.05$ ，学习率 $\alpha=0.1$ ，折扣因子 $\gamma=0.9$ 。将本文AHGA与NSGA-II、MOPSO在相同算例下各独立运行20次并取平均值进行对比。

(二) 仿真结果与分析

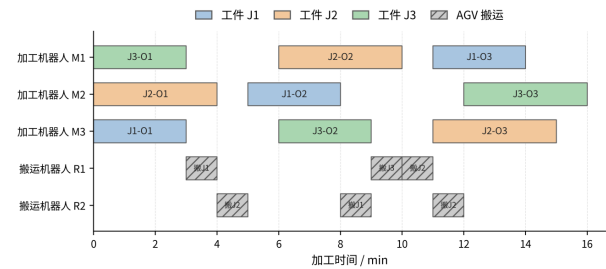
不同算法的求解结果对比如下表所示。

表：不同算法的求解结果对比

算例	规模 $n \times m \times r$	指标	NSGA-II	MOPSO	本文算法
算例1	$8 \times 4 \times 2$	$C_{\max}$	86	84	78
		$E / (kW \cdot h)$	145.2	141.8	133.6
算例2	$12 \times 5 \times 2$	$C_{\max}$	122	119	110

		E /(kW · h)	248.5	243.1	228.7
算例3	16 × 6 × 3	C _{max}	178	171	158
		E /(kW · h)	415.6	402.3	379.5

由表可知，本文算法在3组算例上的最大完工时间与系统总能耗均优于 NSGA-Ⅱ 和 MOPSO。相比次优算法，最大完工时间降低约 7.1%~7.6%，总能耗降低约 5.7%~5.9%，且随算例规模增大，算法优势依然保持稳定，表明其在较大规模问题上仍具有良好的寻优能力。下图给出了多机器人协同调度的甘特图，可以看出加工机器人 M₁—M₃ 与搬运机器人 R₁、R₂ 的任务衔接紧凑、相互之间无冲突，机器人空闲时段较短，加工与搬运实现了有效协同，验证了所建模型与算法的有效性。在此基础上，借助数字孪生工业机器人贯穿设计、制造与运维的全生命周期能力，可进一步实现调度方案的闭环优化与持续迭代^[8]。



图：多机器人协同调度甘特图

四、结论

本文面向智能制造多机器人协同调度问题，建立了加工机器人与搬运机器人双资源耦合、以最大完工时间和系统总能耗为目标的多目标调度模型；提出了强化学习引导的自适应混合遗传算法，通过 Q 学习在线调整算子概率并融合变邻域局部搜索，有效提升了算法的寻优能力与稳定性。扩展算例与数字孪生产线仿真验证表明，所提算法的最大完工时间和总能耗较对比算法分别降低约 7% 和 6%，且调度方案无冲突、可行性良好。后续将结合数字孪生与多智能体强化学习，进一步研究动态扰动环境下的实时协同调度问题。

参考文献

- [1] 国务院. 新一代人工智能发展规划 [Z]. 北京：中华人民共和国国务院，2017.
- [2] 薛建儒，房建武，吴俊，等. 多机协同智能发展战略研究 [J]. 中国工程科学，2024, 26(1): 101-116.
- [3] 张中伟，高增恩，王菁锐，等. 分布式 AGV 调度研究综述与发展趋势分析 [J]. 制造技术与机床，2024(11): 55-61.
- [4] 王玉芳，章殿清，华晓麟，等. 考虑双资源约束多转速的绿色柔性作业车间调度研究 [J]. 控制理论与应用，2025, 42(10): 2019-2027.
- [5] 谭伟华，吴亮红，李哲，等. 改进教学优化算法求解执行器配置与生产调度协同优化问题 [J]. 控制理论与应用，2026, 43(4): 865-873.
- [6] 冯运，童翊轩，王耀南，等. 重大装备集群机器人协同制造数字孪生技术综述 [J]. 自动化学报，2025, 51(7): 1463-1479.
- [7] 李颖，高岚，朱志松. 面向智能制造场景的机器人数字孪生建模与控制 [J]. 系统仿真学报，2024, 36(7): 1536-1545.
- [8] 刘永奎，杨康，脱奔奔，等. 数字孪生工业机器人：概念框架、关键技术与案例研究 [J]. 系统仿真学报，2025, 37(7): 1723-1752.