



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



基于Petri网和人工势场的柔性制造启发式优化方法

伊思嘉, 罗继亮, 李旭航, 李浚, 章宏彬

引用本文:

伊思嘉, 罗继亮, 李旭航, 李浚, 章宏彬. 基于Petri网和人工势场的柔性制造启发式优化方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1977–1985.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0667>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超启发式交叉熵算法求解模糊分布式流水线绿色调度问题

Hyper-heuristic cross-entropy algorithm for green distributed permutation flow-shop scheduling problem with fuzzy processing time
控制与决策. 2021, 36(6): 1387–1396 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1681>

基于参数自适应蚁群算法的高速列车行车调度优化

Optimization of high-speed train operation scheduling based on parameter adaptive improved ant colony algorithm
控制与决策. 2021, 36(7): 1581–1591 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0992>

铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化

Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal
控制与决策. 2021, 36(12): 3063–3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

凸优化与A*算法结合的路径避障算法

Convex optimization and A-star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm
控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

考虑卸载顺序约束的成品油二次配送车辆路径问题

Vehicle routing problem of refined oil secondary distribution considering unloading sequence constraints
控制与决策. 2020, 35(12): 2999–3005 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1756>

基于 Petri 网和人工势场的柔性制造启发式优化方法

伊思嘉^{1,2}, 罗继亮^{1,2†}, 李旭航^{1,2}, 李浚^{1,2}, 章宏彬^{1,2}

- (1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要: 制造系统优化调度是 NP 难组合优化问题, 而自动导引车 (AGV) 路径规划与任务分配紧密耦合, 又极大加剧了问题的复杂性. 基于此, 提出一种基于 Petri 网和人工势场的启发式优化方法. 首先, 将制造系统的工艺工序描述为一个任务 Petri 网, 将 AGV 系统描述为一个路径 Petri 网, 将两个网合成在一起; 然后, 利用 Petri 网的拓扑结构, 为网络结点设计势能参数, 从而为 Petri 网赋予一个人工势场; 接着, 利用人工势场设计制造系统加工时间的启发式函数, 并构建 Petri 网人工势场启发式 A* 算法, 其中包括最大势差启发式函数和总体势差启发式函数, 并验证最大势差启发式函数是可采纳的; 最后, 进行两组数值实验, 实验结果表明, 最大势差 A* 算法能够得到最优解, 且平均计算效率比 Dijkstra 算法提高 57%, 但是无法满足大任务量的调度需求, 而总体势差 A* 算法比最大势差 A* 算法平均计算效率提高至少 1 个数量级, 能够在有限时间内求解 AGV 任务分配和路径规划的联合问题.

关键词: Petri 网; 人工势场; A* 算法; 优化调度; 柔性制造系统

中图分类号: TH166 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0667

引用格式: 伊思嘉, 罗继亮, 李旭航, 等. 基于 Petri 网和人工势场的柔性制造启发式优化方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1977-1985.

Heuristic optimal method of flexible manufacturing based on Petri nets and artificial potential field

YI Si-jia^{1,2}, LUO Ji-liang^{1,2†}, LI Xu-hang^{1,2}, LI Jun^{1,2}, ZHANG Hong-bin^{1,2}

- (1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule, Xiamen 361021, China)

Abstract: The optimal scheduling of manufacturing systems is a NP-hard combinatorial optimization problem, and the tight coupling between the automated guided vehicle (AGV) path planning and task allocation intensifies its complexity. To address this issue, a heuristic optimization method based on Petri nets and artificial potential fields is proposed. First, the processes of a manufacturing system and the AGV system are described as a task Petri net and a path one respectively, which are then combined. Second, the potential energy parameters of the net nodes are designed using the topology of Petri nets, thereby assigning an artificial potential field to the Petri net. Third, two heuristic functions are designed using artificial potential fields, including a maximum-potential-difference heuristic function and a total-potential-difference one, and the corresponding A* algorithm is constructed. Experimental results show that the maximum-potential-difference heuristic function is admissible. Finally, two sets of numerical experiments are performed to show that the maximum-potential-difference A* algorithm can obtain the optimal solution, and the average computing efficiency is 57% higher than that of the Dijkstra algorithm, but it cannot meet the requirements of large task quantity scheduling, while the total-potential-difference heuristic A* algorithm is at least one order of magnitude more efficient on average than the former algorithm that can solve the joint problem of AGV task allocation and path planning in a limited time.

Keywords: Petri net; artificial potential field; A* algorithm; optimal scheduling; flexible manufacturing system

0 引言

柔性制造系统需要配备工业机器人、自动导引车 (automated guided vehicle, AGV) 等智能搬运设备, 面对生产任务的快速变化, 如何灵活高效地为 AGV 指

派任务和规划路径, 是柔性制造系统优化调度面临的关键难题, 其复杂性主要在于任务指派与路径规划的耦合, 往往涉及大量任务和资源设备, 需要在有限时间内从指数增长的状态空间内寻找最优加工路径.

收稿日期: 2022-04-21; 录用日期: 2023-04-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61973130); 福建省中央引导地方科技发展专项项目 (2022L2012).

†通讯作者. E-mail: jlluo@hqu.edu.cn.

Petri网是制造系统的主流建模工具^[1-3],通过在变迁和库所上附加时延,可用于加工效率优化问题的形式化描述^[4],即搜索Petri网可达图,求解初始状态到目标状态的最优事件序列. 此类研究主要包括: 1) 基于特定网结构的行为属性,包括赋时事件图^[5-6]、递归枚举^[7]和晶元组合加工机台的Petri网^[8-9]. 2) 利用结构等效避免状态空间重复探索^[10]. 3) 智能搜索算法,其中启发式搜索策略包括A*、集束搜索和动态窗,难点在于启发式函数的构建:文献[4]将最大操作剩余总时间与最小路径长度作为启发式信息;文献[11-12]将调度策略的操作时间转换为求解状态方程;文献[13]将派发规则纳入解决离线调度和返工重新调度中;文献[14]使用加权允许函数构建启发式函数;文献[15]利用所有资源和非排序作业的剩余占用时间构建启发式函数;文献[16]将剩余任务成本总和作为启发式信息,改进了A*算法. 但是,现有研究只是将AGV抽象为资源,考虑资源分配和任务加工消耗,且AGV路径往往是回路结构,其Petri网模型是全连通的,当出现环形子网时,现有启发式函数均不再适用,亟需设计相应的启发式函数. 此外,制造系统优化调度问题求解规模大,且资源间约束复杂,针对AGV路径规划与任务分配耦合问题的建模极为困难,这些工作并未考虑此类建模问题.

人工势场法近年来成功用于移动机器人路径规划^[17-18],这启发本文在Petri网的拓扑结构上设计人工势场,研究兼顾加工任务和路径规划的启发式优化方法.

本文提出一种通用的制造系统Petri网建模方法,将工艺工序逻辑和AGV路径系统分别描述为任务网和路径网,合并共享结点获得系统完整Petri网模型;为库所设计与其中任务完成时间成正比的势能,构建人工势场. 根据网结构和人工势场设计启发式规则,包括最大势差和总体势差启发式函数,设计Petri网

人工势场A*算法,验证最大势差A*算法是最优的. 数值实验结果表明:其比Dijkstra算法的计算效率平均提高了57%,而总体势差A*算法的计算效率又比最大势差A*算法平均提高了至少1个数量级. 与文献[16]相比,所提出方法能够为一个制造系统构建完整的Petri网模型,而文献[16]只给出了AGV任务模型,无法将任务与AGV路径统一描述为Petri网. 本文在启发式设计中不仅考虑了工艺工序的耗时,还考虑了AGV运行对任务完成的影响,在工序优化时,同步进行AGV路径规划,通过减小搜索产生的状态空间,实现了在有限时间内求解近似最优的可行调度策略.

1 问题描述

对于一个柔性制造系统,多个生产任务与AGV彼此竞争空间、设备等有限资源,而不同的资源分配将导致不同的完工时间. 在满足工艺约束和资源受限的前提下,如何安排工件加工次序、AGV任务指派和AGV路径规划,以最小化加工完成时间,是本文所要研究的优化调度问题.

如图1所示,一个柔性制造系统包含AGV、装卸载站、机械臂、加工机器、待加工工件、AGV道路和站点. 工艺要求: 1) 每台机器一次只能加工一个工件; 2) AGV只能单向移动,且只能运输单个工件; 3) 只有装、卸载站和加工站的输入输出缓存区可容纳多个资源. 当有工件待加工时,AGV选择路径到达工件所处站点,机械臂将该工件装载至AGV,并运输至对应的加工站;完成加工后,AGV将成品运输至卸载站,机械臂将该完成工件从AGV上搬移至卸载站. 图1所示的制造系统中有3种订单产品的生产线,分别按照表1中对应工艺工序完成I型、II型和III型订单的加工. 其中:AGV相邻站点移动的耗时为1 min;装、卸载耗时均为3 min;4台机器单次加工耗时分别为20 min、30 min、50 min和40 min.

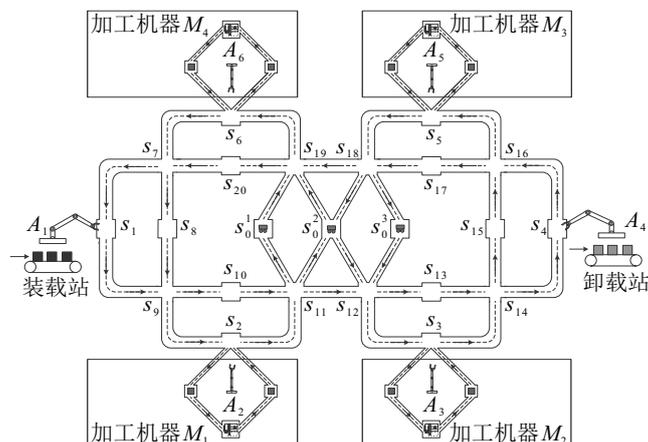


图1 一个柔性制造系统

表1 图1所示制造系统的生产线工艺工序

步骤	I型订单		II型订单		III型订单	
	操作 ¹	资源 ²	操作 ¹	资源 ²	操作 ¹	资源 ²
1	$L_{1,1}$	A_1, s_1	$L_{2,1}$	A_1, s_1	$L_{3,1}$	A_1, s_1
2	$V_{1,2}$	(s_1, s_9, s_2)	$V_{2,2}$	(s_1, s_9, s_2)	$V_{3,2}$	$(s_1, s_9, s_{10}, s_{11}, s_0^1, s_{19}, s_6)$
3	$U_{1,3}$	A_2, s_2	$U_{2,3}$	A_2, s_2	$U_{3,3}$	A_6, s_6
4	$O_{1,4}$	M_1	$O_{2,4}$	M_1	$O_{3,4}$	M_4
5	$L_{1,5}$	A_2, s_2	$L_{2,5}$	A_2, s_2	$L_{3,5}$	A_6, s_6
6	$V_{1,6}$	$(s_2, s_{11}, s_{12}, s_3)$	$V_{2,6}$	$(s_2, s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_{15}, s_{16}, s_5)$	$V_{3,6}$	$(s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}, s_{12}, s_3)$
7	$U_{1,7}$	A_3, s_3	$U_{2,7}$	A_5, s_5	$U_{3,7}$	A_3, s_3
8	$O_{1,8}$	M_2	$O_{2,8}$	M_3	$O_{3,8}$	M_2
9	$L_{1,9}$	A_3, s_3	$L_{2,9}$	A_5, s_5	$L_{3,9}$	A_3, s_3
10	$V_{1,10}$	(s_3, s_{14}, s_4)	$V_{2,10}$	$(s_5, s_{18}, s_0^2, s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_4)$	$V_{3,10}$	(s_3, s_{14}, s_4)
11	$U_{1,11}$	A_4, s_4	$U_{2,11}$	A_4, s_4	$U_{3,11}$	A_4, s_4

注: ¹第*i*条生产线的第*j*道工序记为 $V_{i,j}$ 、 $O_{i,j}$ 、 $L_{i,j}$ 或 $U_{i,j}$,分别表示搬运、加工、装载和卸载操作;

² $A_1 \sim A_6$ 分别为6个机械臂, $M_1 \sim M_4$ 为4台数控机床, $s_0^1 \sim s_{20}$ 为23个AGV站点, (s_i, s_j, \dots) 为按指定的站点顺序执行搬运。

2 制造系统的Petri网建模

柔性制造系统包含AGV路径系统和任务执行系统。本节根据Petri网基础概念^[2],将任务、资源、工序开始和结束等状态或事件描述为库所和变迁,将AGV移动和任务执行时间映射至库所的时延,给出一套柔性制造系统的赋时Petri网建模方法。

定义1 给定AGV路径网络可描述为一个库所赋时Petri网 $G_r = (P_r, T_r, F_r, W_r, d_r, m_0^r)$ 。每个站点或路径*s*描述为一对库所 p_s 和 \bar{p}_s ,分别表示*s*和其空间容量; $m_0^r(p_s)$ 为*s*内空闲AGV数量, $m_0^r(\bar{p}_s)$ 为*s*可容纳AGV的最大容量, $m_0^r(\bar{p}_s) = 1 - m_0^r(p_s)$; $d_r(p_s)$ 为AGV在*s*的路径上行驶时间,其他库所上的时延均等于0;对于每对相邻站点和路径 (s_1, s_2) ,设计一个变迁*t*,构建有向弧 (p_{s_1}, t) 、 (t, p_{s_2}) 、 (t, \bar{p}_{s_1}) 和 (\bar{p}_{s_2}, t) ;所有弧的权值为1。

定义2 给定工件的装载操作 $L_{i,j}$ 和其所需资源集合 $R(L_{i,j})$,其库所赋时Petri网 $G_{L_{i,j}} = (P_{L_{i,j}}, T_{L_{i,j}}, F_{L_{i,j}}, W_{L_{i,j}}, d_{L_{i,j}}, m_0^{L_{i,j}})$ 。其中:库所集 $P_{L_{i,j}} = \{p_{L_{i,j}}, p_{s_k}^{ob}\} \cup \{p_x | x \in R(L_{i,j})\}$, p_{s_k} 和 p_{s_k-u} ($u \in \mathbf{N}^+$)均为站点 s_k , $p_{L_{i,j}}$ 为第*i*条产线第*j*道工序的进行状态, $p_{s_k}^{ob}$ 为 s_k 的存储工件的输出缓存区, p_A 为机械臂*A*;变迁集 $T_{L_{i,j}} = \{t_{L_{i,j}}^s, t_{L_{i,j}}^e\}$, $t_{L_{i,j}}^s$ 和 $t_{L_{i,j}}^e$ 分别为产线*i*工序*j*的开始和结束;有向弧集 $F_{L_{i,j}} = \{(p_A, t_{L_{i,j}}^s), (p_{s_k}^{ob}, t_{L_{i,j}}^s), (t_{L_{i,j}}^s, p_{L_{i,j}}), (p_{s_k}, t_{L_{i,j}}^s), (p_{L_{i,j}}, t_{L_{i,j}}^e), (t_{L_{i,j}}^e, p_{s_k-u}), (t_{L_{i,j}}^e, p_A)\}$;所有弧的权值为1; $d_{L_{i,j}}(p_{L_{i,j}})$ 为完成装载 $L_{i,j}$ 的耗时, $d_{L_{i,j}}(p_{s_k}) = d_{L_{i,j}}(p_{s_k-u}) = d_r(p_{s_k})$,其他库所上的时延均为0; $m_0^{L_{i,j}}(p_{s_k})$ 为 s_k 中空闲AGV的数量, $m_0^{L_{i,j}}(p_{s_k}^{ob})$ 为 s_k 的输出缓存区中*i*型工件的数量, $m_0^{L_{i,j}}(p_{L_{i,j}})$ 为正在装载的工件数量, $m_0^{L_{i,j}}(p_{s_k-u})$ 为 s_k 中运输工件的AGV数量, $m_0^{L_{i,j}}(p_A) = 1$ 表示机械臂*A*空闲,反之则表示被占用。

定义3 给定工件的卸载操作 $U_{i,j}$ 和其所需资源集合 $R(U_{i,j})$,其库所赋时Petri网 $G_{U_{i,j}} = (P_{U_{i,j}}, T_{U_{i,j}}, F_{U_{i,j}}, W_{U_{i,j}}, d_{U_{i,j}}, m_0^{U_{i,j}})$ 。其中:库所集 $P_{U_{i,j}} = \{p_{U_{i,j}}, p_{s_k}^{ib}\} \cup \{p_x | x \in R(U_{i,j})\}$, p_{s_k} 和 p_{s_k-u} ($u \in \mathbf{N}^+$)均为站点 s_k , $p_{U_{i,j}}$ 为第*i*条产线第*j*道工序的进行状态, $p_{s_k}^{ib}$ 为站点 s_k 的存储待加工工件的输入缓存区, p_A 为机械臂*A*;变迁集 $T_{U_{i,j}} = \{t_{U_{i,j}}^s, t_{U_{i,j}}^e\}$, $t_{U_{i,j}}^s$ 和 $t_{U_{i,j}}^e$ 分别为第*i*条产线第*j*道工序的开始和结束;有向弧集 $F_{U_{i,j}} = \{(p_A, t_{U_{i,j}}^s), (p_{s_k-u}, t_{U_{i,j}}^s), (t_{U_{i,j}}^e, p_{s_k}), (t_{U_{i,j}}^e, p_{s_k}^{ib}), (t_{U_{i,j}}^e, p_A), (t_{U_{i,j}}^s, p_{U_{i,j}}), (p_{U_{i,j}}, t_{U_{i,j}}^s)\}$;所有弧上的权值均为1; $d_{U_{i,j}}(p_{U_{i,j}})$ 为完成卸载操作 $U_{i,j}$ 的时间消耗, $d_{U_{i,j}}(p_{s_k}) = d_{U_{i,j}}(p_{s_k-u}) = d_r(p_{s_k})$,其他库所上的时延均等于0; p_{s_k-u} 的初始标识 $m_0^{U_{i,j}}(p_{s_k-u})$ 为站点 s_k 中运输工件的AGV数量, $m_0^{U_{i,j}}(p_{s_k})$ 为站点 s_k 中空闲AGV的数量, $m_0^{U_{i,j}}(p_{U_{i,j}})$ 为正在卸载的工件数量, $m_0^{U_{i,j}}(p_{s_k}^{ib})$ 为站点 s_k 的输入缓存区内的*i*型工件数量, $m_0^{U_{i,j}}(p_A) = 1$ 表示机械臂*A*空闲,反之则表示被占用。

定义4 给定工件的加工操作 $O_{i,j}$ 和其所需资源集合 $R(O_{i,j})$,其库所赋时Petri网为 $G_{O_{i,j}} = (P_{O_{i,j}}, T_{O_{i,j}}, F_{O_{i,j}}, W_{O_{i,j}}, d_{O_{i,j}}, m_0^{O_{i,j}})$ 。其中:库所集 $P_{O_{i,j}} = \{p_{s_k}^{ib}, p_{s_k}^{ob}, p_{O_{i,j}}\} \cup \{p_x | x \in R(O_{i,j})\}$, $p_{s_k}^{ib}$ 和 $p_{s_k}^{ob}$ 分别为站点 s_k 存储工件的输入和输出缓存区, $p_{O_{i,j}}$ 为产线*i*工序*j*的进行状态, p_M 为机器*M*;变迁集 $T_{O_{i,j}} = \{t_{O_{i,j}}^s, t_{O_{i,j}}^e\}$, $t_{O_{i,j}}^s$ 和 $t_{O_{i,j}}^e$ 分别为产线*i*工序*j*的开始和结束;有向弧集 $F_{O_{i,j}} = \{(t_{O_{i,j}}^e, p_{s_k}^{ob}), (t_{O_{i,j}}^e, p_M), (p_{s_k}^{ib}, t_{O_{i,j}}^s), (p_M, t_{O_{i,j}}^s), (t_{O_{i,j}}^s, p_{O_{i,j}}), (p_{O_{i,j}}, t_{O_{i,j}}^e)\}$;所有弧上的权值均为1; $d_{O_{i,j}}(p_{O_{i,j}})$ 为完成加工 $O_{i,j}$ 的耗时,其他库所上的时延均为0; $m_0^{O_{i,j}}(p_{O_{i,j}})$ 为正在加工的工件数量, $m_0^{O_{i,j}}(p_{s_k}^{ib})$ 和 $m_0^{O_{i,j}}(p_{s_k}^{ob})$ 分别为 s_k 的输入缓存区中待加工和输出缓存区中加工完成的*i*型工件数量, $m_0^{O_{i,j}}(p_M) = 1$ 表示机器*M*空闲,反之则表示被占用。

定义5 给定工件的搬运操作 $V_{i,j}$ 和其所需

资源集合 $R(V_{i,j})$, 其库所赋时 Petri 网 $G_{V_{i,j}} = (N_{V_{i,j}}, d_{V_{i,j}}, m_0^{V_{i,j}})$. 其中: 1) 由 $R(V_{i,j})$ 和定义 1, 得到 $V_{i,j}$ 的路径 Petri 网 $G_{r_{i,j}} = (N_{r_{i,j}}, d_{r_{i,j}}, m_0^{r_{i,j}})$, $N_{V_{i,j}} = N_{r_{i,j}}$, $d_{V_{i,j}}(p_s) = d_{r_{i,j}}(p_s)$; 2) $m_0^{V_{i,j}}(p_s)$ 为站点 s 内运输工件的 AGV 的数量.

根据定义 1~定义 5 和 Petri 网合成的思想, 给出了柔性制造系统的 Petri 网建模方法.

首先, 根据路径网络和定义 1, 建立路径 Petri 网 G_r . 然后, 对各操作进行模块化建模并按顺序合成: 对于任意生产线 i ($1 \leq i \leq n$), 初始化任务 Petri 网 $G_{a_i} = (P_{a_i}, T_{a_i}, F_{a_i}, d_{a_i}, m_0^{a_i})$. 若第 i 条产线的第 j 个操作为装载, 则根据定义 2 设计该操作的 Petri 网 $G_{L_{i,j}}$, $G_{a_i} = G_{a_i} + G_{L_{i,j}}$; 若该操作为卸载, 则根据定义 3 设计 Petri 网 $G_{U_{i,j}}$, $G_{a_i} = G_{a_i} + G_{U_{i,j}}$; 若该操作为加工, 则根据定义 4 设计 Petri 网 $G_{O_{i,j}}$, $G_{a_i} = G_{a_i} + G_{O_{i,j}}$; 若该操作为搬运, 则根据定义 5 设计 Petri 网 $G_{V_{i,j}}$, $G_{a_i} = G_{a_i} + G_{V_{i,j}}$. 接着, 合并任务子网得到任务 Petri 网模型 $G_a = \sum_{i=1}^n G_{a_i}$. 最后, 合并路径网 G_r 和任务网 G_a 得到完整系统模型 $G_F = G_r + G_a$.

利用表 1 生产线工艺工序, 根据上述建模方法, 得到图 1 柔性制造系统的 Petri 网 G_F , 如图 2 所示, 包括路径网 G_r 和任务网 G_a , 其中 G_a 包含 3 个产线 G_{a_1} 、 G_{a_2} 和 G_{a_3} . 由于模型中存在较多资源共享, 为了保证模型图的可读性, 对于某些资源库所在图 2 中绘制了多次, 但是仍然表示同一个库所. 其中: 复制的相同库所为浅灰色, 原库所为黑色.

给定一个制造系统 Petri 网模型, 若一个库所 p 内的托肯表示一个成品, 则称为目标库所, 该集合记为 P_o ; 若一个库所 p 属于其路径网, 且在任务网中存在 p 的输出变迁, 则称为出站库所, 该集合记为 P_l ; 若一个库所 p 属于任务网, 且与路径网中的出站库所存在相同的输出变迁, 则称为入站库所, 该集合记为 P_f . 在图 2 的制造系统 Petri 网模型中: $P_o = \{p_{s_{4,1}}^{ib}, p_{s_{4,2}}^{ib}, p_{s_{4,3}}^{ib}\}$, $P_l = \{p_{s_1}, p_{s_2}, p_{s_3}, p_{s_5}, p_{s_6}\}$, $P_f = \{p_{s_{1,1}}^{ob}, p_{s_{2,1}}^{ob}, p_{s_{3,1}}^{ob}, p_{s_{1,2}}^{ob}, p_{s_{2,2}}^{ob}, p_{s_{5,2}}^{ob}, p_{s_{1,3}}^{ob}, p_{s_{6,3}}^{ob}, p_{s_{3,3}}^{ob}\}$.

3 Petri 网人工势场设计方法

为了估算系统中工件的待加工时间, 为 Petri 网模型设计了人工势场, 网络库所结点的势能象征工件在系统中的待加工时间.

定义 6 一个制造系统 Petri 网的人工势场为从库所集映射至非负实数集的一个函数, 记作 $E: P \rightarrow \{0\} \cup \mathbf{R}^+$. 其中: $\forall p \in P, E(p)$ 为 p 的势能.

定义 7 一个制造系统 Petri 网的需求指数 $\eta: P_f \rightarrow \mathbf{R}$, 表示任务网入站库所 $p_f \in P_f$ 所代表的位置对空闲 AGV 的需求程度, 有

$$\eta(p_f) = \sum_{p \in \hat{P}_{a_i}} m(p) \times \frac{\sum_{p \in P_{a_i}} d(p)}{E_{a_i}(p) - E_{a_i}(p_f)}. \quad (1)$$

其中: E_{a_i} 和 P_{a_i} 分别为任务子网 G_{a_i} 的势场和库所集, \hat{P}_{a_i} 为 P_{a_i} 中不表示搬运操作的库所集, $m(p)$ 为在标识 m 下库所 p 的托肯数, $E_{a_i}(p)$ 为 G_{a_i} 中库所 p 的势能.

定义 8 一个制造系统 Petri 网的需求度为从出站库所集 P_l 映射至实数集的一个函数, 记为 $\omega: P_l \rightarrow \mathbf{R}$, 表示路径网中出站库所 $p_l \in P_l$ 所代表的位置对于空闲 AGV 的需求程度, 有

$$\omega(p_l) = \frac{\sum_{p'_f \in P_{f,l}} \eta(p'_f)}{\sum_{p_f \in P_f} \eta(p_f)}, \quad (2)$$

其中 $P_{f,l}$ 为与 p_l 有相同输出变迁的所有入站库所 p_f 的集合.

定义 8 将任务网中工件对空闲 AGV 的需求转化为路径网中对应站点对 AGV 的需求. 由定义 7 和定义 8, 算法 1 给出了人工势场计算方法, 实现柔性制造系统 Petri 网的人工势场的动态计算.

算法 1 制造系统 Petri 网人工势场计算方法.

输入: 标识 m , 制造系统各子网模型 $G_r, G_{a_1}, \dots, G_{a_n}$, 集合 P_o, P_l, P_f ;
输出: 总势场 E 和 n 个任务子网势场 $E_{a_1}, E_{a_2}, \dots, E_{a_n}$.

function Calculate-APF(m) returns E, E_{a_n} or false

```

1  for all  $G_{a_i}, 1 \leq i \leq n$  do
2     $E_{a_i} \leftarrow \text{Design-APF}(G_{a_i})$ 
3  end for
4   $E_a \leftarrow \bigcup_{1 \leq i \leq n} E_{a_i}$ 
5  for all  $p_l$  in  $P_l$  do
6     $E_{r_l} \leftarrow \text{Design-APF}(G_r)$ 
7  end for
8  for all  $p_f \in P_f$  do
9    由式(1)计算需求指数  $\eta(p_f)$ 
10 end for
11 if  $\sum_{p_f \in P_f} \eta(p_f) = 0$  then return false
12 else
13   for all  $p_l \in P_l$  do
14     由式(3)计算  $\omega(p_l)$ 
15   end for
16 end if
17  $E_r \leftarrow \sum_{p_l \in P_l} E_{r_l} \times \omega(p_l), E \leftarrow E_r \cup E_a$ 
18 return  $E$ , 所有  $E_{a_i}$ 

```

function Design-APF(G) returns E


```

1   for all  $p$  in  $P$  do
2     if  $p \in P_o$  or  $p$  为资源的库所
3       库所  $p$  的势能为0
4     else
5       库所  $p$  的势能等于库所时延与其后置
        库所势能和
6     end if
7   end for
8   return  $E$ 

```

算法1为人工势场计算方法,包含初始势场计算函数(design-APF)和势场更新函数(operate-APF)。Design-APF根据各库所到目标库所的时延和计算其势能。Calculate-APF中1~7调用Design-APF计算各任务子网势场 E_{a_i} 和以各出站库所 p_i 为目标库所的路径网分势场 E_{r_i} ,将子网势场合成得到任务网势场 E_a ;8~16为对系统中空闲AGV存在需求的位置进行需求度计算,进一步将路径网分势场按需求度叠加;17将得到的任务网和路径网势场合成,得到全局势场 E 。实现给定标识 m ,计算该状态下的全局势场 E 以及各任务子网势场 $E_{a_i}(1 \leq i \leq n)$ 。

4 赋时Petri网人工势场启发式搜索算法

4.1 赋时Petri网启发式搜索算法框架

基于赋时Petri网的运行规则和人工势场,给出了赋时Petri网的A*算法架构。

算法2 赋时Petri网的A*算法。

输入: Petri网初始标识 m_0 ,启发式函数 h ;

输出: 最优调度策略的变迁激发序列。

step 1: 给定初始结点 $N_0 = (m_0, x_0, g_0, h_0, f_0)$ 。其中: $x_0 = \mathbf{0}^{|P|}$, $g_0 = 0$, $h_0 = h(m_0)$, $f_0 = g_0 + h_0$ 。OPEN表存储待扩展结点,OPEN = \emptyset ;CLOSED表存储已扩展结点,CLOSED = \emptyset 。将初始结点 N_0 存入OPEN表。

step 2: 若OPEN = \emptyset ,则输出false,算法退出。

step 3: 从OPEN表中取出第1个结点 N 并放入CLOSED表。

step 4: 若 N 的标识 m 为目标标识,则输出从 N_0 到 N 的变迁激发序列,算法退出。

step 5: 计算 N 的标识 m 下使能变迁的集合 T^e 。

step 6: $\forall t \in T^e$,计算使能变迁 t 激发的后继结点 N' 的信息,包含 m' 、 x' 、 g' ;调用算法1计算全局势场 E' 和 n 个子任务网的势场 $E_{a_i}(1 \leq i \leq n)$, $h' = h(m')$, $f' = g' + h'$;绘制一条由 N 指向 N' 的有向弧,并在弧上标记变迁 t 。

step 7: 对于 N 的每个后继结点 N' :

step 7.1: 若在OPEN表中存在 $N'' : m'' = m'$ 、 $x'' = x'$ 且 $g'' \geq g'$,则将 N' 存入OPEN表,并将 N'' 从OPEN表中删除;

step 7.2: 若在CLOSED表中存在 $N'' : m'' = m'$ 、 $x'' = x'$ 且 $g'' \geq g'$,则将 N' 存入OPEN表;

step 7.3: 若在OPEN表和CLOSED表中不存在 $N'' : m'' = m'$ 、 $x'' = x'$,则将 N' 存入OPEN表。

step 8: 将OPEN表内结点按照 f 值进行升序排列。

step 9: 返回至step 2。

算法2给出了赋时Petri网A*算法的架构,根据赋时Petri网的运行规则,每次扩展OPEN表中 f 值最小的状态结点,直至搜索到目标,从而得到从初始结点到目标结点的变迁序列,即对应制造系统的调度策略。step 5和step 6计算所有子结点的标识和已等待时间,调用算法1进行全局势场和各子任务网势场的计算,从而获得所有子结点 N' 的启发式函数值 h' 和评估函数值 f' ;step 7和step 8将未出现在搜索树中的结点或已出现但是已消耗代价更小的结点存入OPEN表,并将表中的所有结点按照 f 值升序排列。

4.2 最大势差启发式函数设计

在不考虑AGV行为的前提下,利用任务子网势场,将所有生产线最大势差作为启发式信息。

给定柔性制造系统Petri网的最大势差启发式函数 h_{mpd} ,即

$$h_{mpd}(m) = \max_{1 \leq i \leq n} \frac{\sum_{p \in P_{a_i}} m(p) \times [E_{a_i}(p) - d(p)]}{\sum_{p \in P_{a_i}} m(p)}. \quad (3)$$

其中: P_{a_i} 和 E_{a_i} 分别为任务子网 G_{a_i} 的库所集和势场, $d(p)$ 为库所 p 的时延, $m(p)$ 为 m 下 p 中的托肯数。

定理1 若一个启发式函数是可采纳的,则它的A*算法是最优的^[19]。

定理2 给定柔性制造系统Petri网的最大势差启发式函数 h_{mpd} 是可采纳的。

证明 对于任意状态 m , $h^*(m)$ 包含空闲AGV到达需求位置的预计消耗时间 $h_{AGV}(m)$ 和加工任务完成的预计消耗时间 $h_a(m)$,即 $h^*(m) = h_{AGV}(m) + h_a(m)$ 。由于 $h_{AGV}(m) \geq 0$, $h^*(m) \geq h_a(m)$ 。

各任务子网的加工任务存在并行执行,因此,只考虑总生产时间最大的任务子网,即 $h_a(m) \geq \max_{1 \leq i \leq n} [h_{a_i}(m)]$,其中 $h_{a_i}(m)$ 为第 i 个任务子网的待加工工件全部完成加工的预计时间消耗。因此, $h_{a_i}(m) = \sum_{p \in P_{a_i}} m(p) \times [E_{a_i}(p) - d(p)]$ 。

当第 i 个任务子网的工件数大于0时,全部工件完工耗时不超过工件平均耗时,即 $h_{a_i}(m) \geq [h_{a_i}(m)] / \left[\sum_{p \in P_{a_i}} m(p) \right]$ 。

综上, $h_a(m) \geq h_{mpd}(m)$, 因此

$$h_{mpd}(m) \leq h^*(m). \quad \square$$

定理3 给定柔性制造系统Petri网模型的最大势差A*算法是最优的。

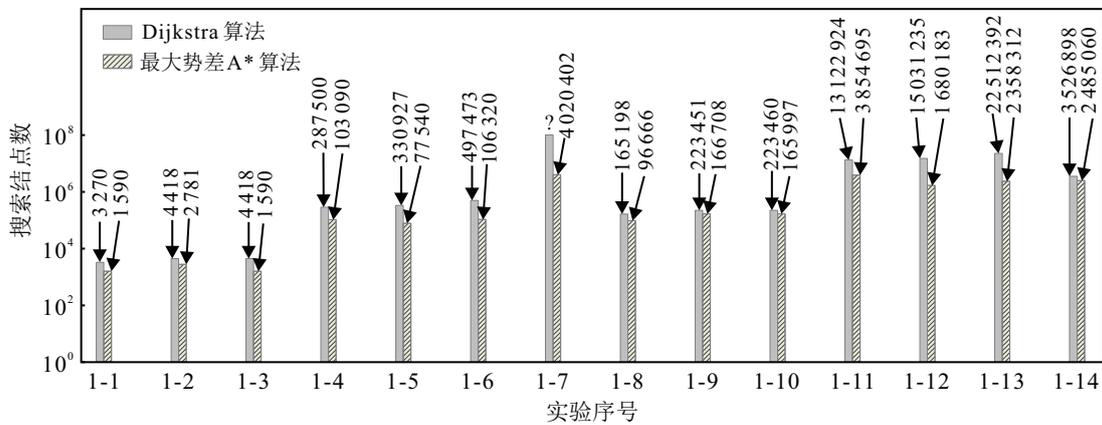
由定理2已知, 给定制造系统Petri网的最大势差启发式函数 h_{mpd} 是可采纳的, 因此, 由定理1可知最大势差A*算法是最优的, 证明略。

为了检验最大势差A*算法的性能, 本文根据算法2编写了Python程序, 其性能结果通过以下硬件规格获得: CPU i7-10 700 2.90 GHz, RAM 16.0 GB, GPU NVIDIA GeForce RTX 2 060 SUPER. 以图1所示制造系统为例, 通过改变加工任务量和AGV数设计了14组实验, 对比Dijkstra算法与最大势差A*算法, 实验安排和结果如表2和图3所示。

表2 最大势差A*算法与Dijkstra算法对比实验

序号	实验安排 ¹	Dijkstra算法		最大势差A*算法	
		加工/min	搜索/s	加工/min	搜索/s
1-1	(1,0,0)-1	83	3.1	83	0.2
1-2	(0,1,0)-1	111	4.2	111	0.2
1-3	(0,0,1)-1	111	4.1	111	0.2
1-4	(1,0,1)-1	127	262.7	127	99.9
1-5	(1,1,0)-1	121	300.6	121	75.2
1-6	(0,1,1)-1	132	457.3	132	100.3
1-7	(1,1,1)-1	—	—	150	4048.1
1-8	(1,0,0)-2	83	151.1	83	95.2
1-9	(0,1,0)-2	111	201.1	111	162.2
1-10	(0,0,1)-2	111	203.5	111	160.9
1-11	(1,0,1)-2	116	40614.2	116	3795.7
1-12	(1,1,0)-2	111	47539.3	111	1604.8
1-13	(0,1,1)-2	116	72670.1	116	2318.8
1-14	(1,0,0)-3	83	3290.3	83	2384.8

注:¹ 任务 (i, j, k) - b 表示 i 个 I 型待加工工件, j 个 II 型待加工工件和 k 个 III 型待加工工件, b 辆 AGV。



注: ~ 表示在现有计算条件下出现了内存溢出, 无法搜索到最优解。

图3 最大势差A*算法与Dijkstra算法实验对比

由表2和图3实验结果可知, 最大势差A*算法能够得到最优策略, 且其平均计算效率比Dijkstra算法提高了约57%。

当AGV数增加时, 相同任务下两类算法的搜索时间都平均增加了至少两个数量级。在工件总数不超过AGV数的前提下, 最优的加工策略没有发生改变, 但是, 搜索时间和结点数出现了指数级增加。这表明多AGV情况下, AGV的路径调度会耗费很高的计算代价, 且当AGV数超过工件总数时, 会造成AGV资源的浪费。面对AGV数或任务总量的增加, 最大势差A*算法搜索产生的结点数仍然会急速增长, 无法保证搜索效率: 如实验1-7, 最大势差A*算法搜索时间需要4048s, 无法满足实际生产的需要, 因此, 接下来将考虑如何设计效率更高的启发式函数。

4.3 总体势差启发式函数设计

为了提高制造系统运行时间估计的准确程度, 考虑人工势场对AGV的导向作用, 根据任务执行对空闲AGV的需求度变化, 实时对空闲的AGV进行路径

规划, 将加工任务耗时和AGV预计路径消耗作为启发式信息, 设计启发式函数。

给定柔性制造系统Petri网的总体势差启发式函数 h_{tpd} , 即

$$h_{tpd}(m) = \sum_{p \in P_F} m(p) \times [E(p) - d(p)]. \quad (4)$$

其中: P_F 和 E 分别为制造系统Petri网 G_F 的库所集和势场, $d(p)$ 为库所 p 的时延, $m(p)$ 为在标识 m 下 p 中的托肯数。

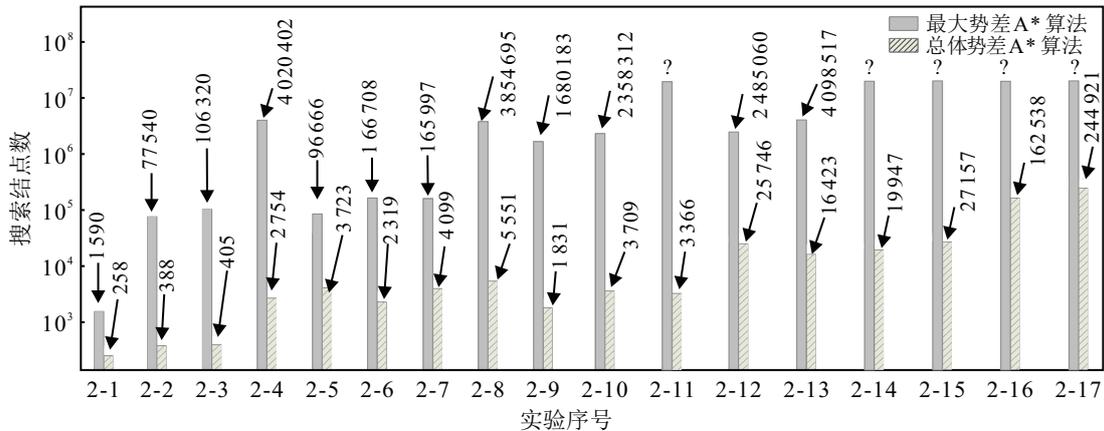
为了检验总体势差A*算法的性能, 本文根据算法2编写了Python程序, 设计了17组实验, 对比最大势差与总体势差A*算法。实验安排和结果如表3和图4所示。相对误差 δ 计算公式 $\delta = [g_{goal} - g_{best}] / g_{best} \times 100\%$, g_{goal} 和 g_{best} 分别为搜索得到和实际最优策略的最小耗时。

由表3和图4(a)可见, 总体势差A*算法的平均计算效率高于最大势差A*算法, 能够有限时间内求解最大势差A*算法无法完成的计算任务。

表3 总体势差A*算法与最大势差A*算法对比实验

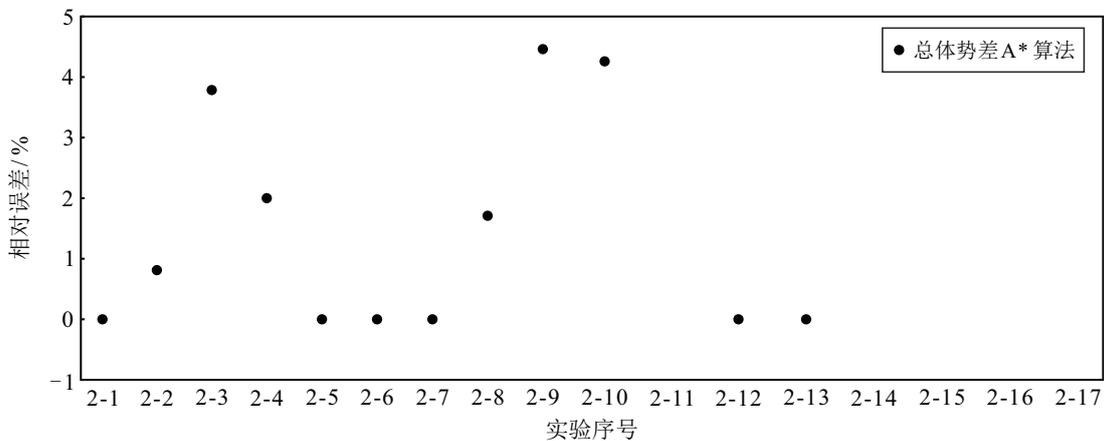
实验		最大势差A*算法		总体势差A*算法		实验		最大势差A*算法		总体势差A*算法	
序号	安排 ¹	加工/min	搜索/s	加工/min	搜索/s	序号	安排 ¹	加工/min	搜索/s	加工/min	搜索/s
2-1	(1,0,0)-1	83	0.2	83	0.3	2-10	(0,1,1)-2	117	2318.8	127	3.4
2-2	(1,1,0)-1	121	75.2	121	0.3	2-11	(1,1,1)-2	-	-	148	3.2
2-3	(0,1,1)-1	132	100.3	137	0.4	2-12	(1,0,0)-3	83	2384.8	83	22.6
2-4	(1,1,1)-1	150	4048.1	153	2.9	2-13	(0,1,0)-3	111	3995.1	111	14.4
2-5	(1,0,0)-2	83	95.2	83	3.3	2-14	(1,1,1)-3	-	-	144	18.4
2-6	(0,1,0)-2	111	162.2	111	2.1	2-15	(2,2,2)-3	-	-	209	23.9
2-7	(0,0,1)-2	111	160.9	111	3.5	2-16	(3,3,2)-3	-	-	297	152.2
2-8	(1,0,1)-2	116	3795.7	118	4.9	2-17	(4,4,4)-3	-	-	391	227.1
2-9	(1,1,0)-2	112	1604.8	117	1.7						

注：¹任务(i, j, k)-b表示i个I型加工工件, j个II型加工工件和k个III型加工工件, b辆AGV.



注：?表示在现有计算条件下出现了内存溢出,无法搜索到最优解

(a) 实验复杂性对比



(b) 最优性对比

图4 总体势差A*算法与最大势差A*算法实验对比

总体势差A*算法得到的策略与最优值间的相对误差随AGV数量和任务总量的增加而增大,如图4(b)所示.如在实验2-4中,总体势差A*算法的平均计算效率比最大势差A*算法提高了3个数量级,搜索时间由4048s缩短至3s,但是,求得调度策略与最优解间相对误差为2%,因此,总体势差A*算法是牺牲部分最优性来实现平均计算效率的指数级提高,以保证实际生产中的动态调度需要.

5 结论

本文针对柔性制造系统AGV任务分配和路径规划的联合问题,提出了一种基于Petri网和人工势场的启发式优化方法.在建立了制造系统Petri网模型的基础上,通过设计网络结点的势能参数,构建了Petri网人工势场启发式A*算法,能够有效求解制造系统的联合调度问题,同步进行工序优化和AGV的动作规划,为实际制造系统的生产有效节省了时间成

本,减少了设备等待时间。

接下来的工作将优化人工势场的设计,保证搜索效率和调度最优性,并研究系统工件数与AGV数的最佳组合问题,考虑AGV运行距离最少、时间最短或能耗最小的约束下的优化问题。

参考文献(References)

- [1] 罗继亮, 张奇. 自动导引车系统防碰撞及死锁的形式化控制方法[J]. 控制与决策, 2017, 32(9): 1628-1634.
(Luo J L, Zhang Q. Collision prevention and deadlock formal control method for automated guided vehicle system[J]. Control and Decision, 2017, 32(9): 1628-1634.)
- [2] 周家忠, 罗继亮, 詹瑜坤. 间歇式化工系统的Petri网优化调度与控制方法[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(6): 809-815.
(Zhou J Z, Luo J L, Zhan Y K. Optimal scheduling and control of batch chemical processes with Petri nets[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(6): 809-815.)
- [3] 李大成, 罗继亮, 孙莎莎, 等. 基于平行Petri网的制造系统调度与控制一体化方法[J]. 自动化学报, 2023, 49(4): 845-856.
(Li D C, Luo J L, Sun S S, et al. The integrated method of scheduling and control for manufacturing systems based on parallel Petri nets[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(4): 845-856.)
- [4] Luo J C, Xing K Y, Zhou M C, et al. Deadlock-free scheduling of automated manufacturing systems using Petri nets and hybrid heuristic search[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2015, 45(3): 530-541.
- [5] Lee T E, Kim H J, Roh D H, et al. Characterizing token delays of timed event graphs for k -cyclic schedules[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(2): 961-966.
- [6] Declerck P. Extremum cycle times in time interval models[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63(6): 1821-1827.
- [7] Karoui O, Chen Y F, Li Z W, et al. On hierarchical construction of the state space of an automated manufacturing system modeled with Petri nets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(10): 3613-3627.
- [8] Zhu Q H, Zhou M C, Qiao Y, et al. Petri net modeling and scheduling of a close-down process for time-constrained single-arm cluster tools[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 48(3): 389-400.
- [9] Xiong W Q, Pan C R, Qiao Y, et al. Reducing wafer delay time by robot idle time regulation for single-arm cluster tools[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 18(4): 1653-1667.
- [10] Baruwa O T, Piera M A. Identifying FMS repetitive patterns for efficient search-based scheduling algorithm: A colored Petri net approach[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2015, 35: 120-135.
- [11] Lei H, Xing K Y, Han L B, et al. Deadlock-free scheduling for flexible manufacturing systems using Petri nets and heuristic search[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014, 72: 297-305.
- [12] Jeng M D, Chen S C. Heuristic search based on Petri net structures for FMS scheduling[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(1): 196-202.
- [13] Mejía G, Niño K, Montoya C, et al. A Petri net-based framework for realistic project management and scheduling: An application in animation and videogames[J]. Computers & Operations Research, 2016, 66: 190-198.
- [14] Huang B, Zhou M C, Abusorrah A, et al. Scheduling robotic cellular manufacturing systems with timed Petri net, A* search, and admissible heuristic function[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2022, 19(1): 243-250.
- [15] Wang X N, Xing K Y, Feng Y X, et al. Scheduling of flexible manufacturing systems subject to no-wait constraints via Petri nets and heuristic search[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(10): 6122-6133.
- [16] Kim Y W, Suzuki T, Narikiyo T. FMS scheduling based on timed Petri net model and reactive graph search[J]. Applied Mathematical Modelling, 2007, 31(6): 955-970.
- [17] 魏立新, 吴绍坤, 孙浩, 等. 基于多行为的移动机器人路径规划[J]. 控制与决策, 2019, 34(12): 2721-2726.
(Wei L X, Wu S K, Sun H, et al. Mobile robot path planning based on multi-behaviours[J]. Control and Decision, 2019, 34(12): 2721-2726.)
- [18] 徐胜, 邢强, 王浩. 解决势场法路径规划中局部极小问题的角度累积法[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 1997-2007.
(Xu S, Xing Q, Wang H. Angle accumulation method for solving local minimum problem in path planning with potential field method[J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 1997-2007.)
- [19] Russell S, Norvig P. Artificial intelligence: A modern approach[M]. The 3rd edition. Upper Saddle River: Pearson Education, 2010: 95-98.

作者简介

伊思嘉(1998—), 女, 硕士生, 从事离散事件系统和Petri网理论与应用等研究, E-mail: yisijia@stu.hqu.edu.cn;

罗继亮(1977—), 男, 教授, 博士, 从事离散事件系统、Petri网、可编程逻辑控制器、智能制造和机器人等研究, E-mail: jlluo@hqu.edu.cn;

李旭航(1997—), 男, 硕士生, 从事离散事件系统和Petri网理论与应用等研究, E-mail: viins_lxh@163.com;

李浚(1997—), 女, 硕士生, 从事离散事件系统和Petri网理论与应用等研究, E-mail: 15096223428@163.com;

章宏彬(1996—), 男, 硕士生, 从事离散事件系统和Petri网理论与应用等研究, E-mail: hopingzhang@foxmail.com.