基于综合评分法的托盘机器人柔性调度算法研究

靳开轩[1]，张宏岩[2]，王鹏翔[2]，张　峰[2]，张迩瀚[2]，陈　涛[2]

（1. 宁夏巨能机器人股份有限公司，宁夏 银川 750021；2. 通用技术集团大连机床有限责任公司，辽宁 大连 116600）

摘要：在传统的柔性制造系统（Flexible Manufacturing System，FMS）中，通常采用轨道引导车（Rail Guided Vehicle，RGV）作为物料运输工具。然而，由于RGV仅具备单一的储存工位，导致在机床完成加工任务后，必须先进行下料操作，将托盘转移至其他设备的空闲位置，随后才能进行新物料的搬运并送入机床进行再次加工。这种作业模式导致机床在等待过程中耗费大量时间，进而影响了设备的开动率。为解决这一问题，本研究设计了一种工业机器人配合随行托盘的物料搬运方案，并对柔性调度算法进行了深入研究。通过调度机器人进行物料的快速换料操作，显著减少了机床的等待时间，增强了生产线的灵活性，并有效提升了生产效率。

关键词：柔性制造系统；工业机器人；综合评分法；实时调度

中图分类号：TP242；TH165　　**文献标识码：**A

Research on Flexible Scheduling Algorithm for Pallet-Handling Robots Based on Comprehensive Scoring Method

JIN Kaixuan[1]，ZHANG Hongyan[2]，WANG Pengxiang[2]，ZHANG Feng[2]，ZHANG Erhan[2]，CHEN Tao[2]

（1.Ningxia Juneng Robotics Co.，Ltd.，Yinchuan 750021，China；2.China General Technology Group Dalian Machine Tool Co.，Ltd.，Dalian 116600，China）

Abstract：In traditional Flexible Manufacturing Systems (FMS)，Rail Guided Vehicles (RGV) are commonly used for material transportation. However，due to RGVs' single storage station limitation，completed machining tasks require a sequential process：first unloading pallets to idle positions of other equipment，then transporting new materials to machine tools for subsequent operations. This workflow causes significant machine idle time during waiting periods，reducing equipment operational rates. To address this，we propose a material handling solution combining industrial robots with pallet-following systems and develop an advanced flexible scheduling algorithm. By scheduling robots for rapid material changeovers，this approach significantly reduces machine waiting time，enhances production line flexibility，and effectively improves manufacturing efficiency.

Keywords：Flexible Manufacturing System (FMS)；industrial robots；comprehensive scoring method；real-time scheduling

1　引言

在柔性加工生产线的传统模式中，以自动引导车（RGV）作为主要的物料搬运工具，其运动方式遵循直角坐标系统。该系统因其低成本和高负载能力而被广泛采用，如图1所示。生产线左侧配置了一排双层托盘库，具备存储50个托盘的能力。当机床下达装载指令时，RGV依据软件调度系统的指令，将指定库位上的托盘运输至机床进行加工；反之，当机床发出卸载指令，RGV

则将加工完成的托盘搬回至原库位，从而实现多品种、小批量的混合生产线加工模式。

图 1　国外某知名 FMS 生产线

该方法存在一定的局限性：在 RGV 取走并返回托盘后，机床需等待 RGV 再次放置托盘，此过程可能会降低机床的运行效率。为缓解此问题，目前存在两种主流的解决方案：一是将机床改造成具备双交换工作台的结构，要求机床必须具备相应的改造条件；二是于机床旁设置缓存工位，占用机床旁的空间而导致空间利用效率降低。

采用机器人配合随行托盘的方案能够有效解决上述问题：首先确保机器人和随行托盘上均无托盘。在机床完成加工前，机器人先前往其他设备取回一个托盘，将其放置在随行托盘工位 1 中待命，随后前往机床进行下料作业，将托盘放置在随行托盘工位 2，再将工位 1 的托盘移至机床中，如图 2 所示。由于运输设备由 RGV 转变为具有六个自由度的关节机器人，并且引入了随行托盘，因此相关的算法模型也需做出相应的调整。

图 2　机器人带随行托的方案

2　算法场景

本研究中所涉及的算法需满足柔性车间调度的约束条件 [1]：在任意时刻，同一台机器仅能对单一工件进行加工；同一工件的同一工序在同一时刻仅能由单一机器进行加工；工件的工序一旦启动，则加工过程不得中断；各工件间具有相同的优先级，工序之间不存在严格的先后顺序约束，但同一工件内部的工序间存在严格的先后顺序约束；所有工件均可在零时刻开始加工。

针对本研究对象，本研究增加了机器人及随行托的约束条件：机器人一旦启动，其任务执行过程中不得中断；机器人一次仅能执行一项任务；随行托具有两个工位，每个工位最多可缓存一个托盘；随行托的两个工位能够运输任意托盘；机器人需完成从随行托取料和放料的操作，且该过程会消耗一定时间；机器人在轨道移动过程中可对随行托进行作业；在初始状态下，机器人本体无托盘，随行托最多可缓存一个托盘。

根据上述条件，当机器人处于地轨与机器人本体异步运动时，满足

$$t = \max\left(t_{\mathrm{p}}, t_{\mathrm{r}}\right) \tag{1}$$

式中，t 为机器人带随行托运输总用时，t_{p} 为本次随行托作业用时，t_{r} 为本次地轨移动用时。

同时满足

$$h_i = \begin{cases} 1, & \text{随行托第}i\text{工位有托盘} \\ 0, & \text{随行托第}i\text{工位无托盘} \end{cases} \tag{2}$$

式中，h_i 为随行托有无工件；i 为随行托的工位号，$i = 1$ 或 2。

3　设备状态分析

3.1　机床

机床状态分为两类，一类是无托盘，需要机器人搬运 1 个托盘进机床加工。另一类是有托盘，完成加工后，需要机器人搬走托盘。则有

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} f_1, t_1, p_1, l_1, u_1 \\ f_2, t_2, p_2, l_2, u_2 \\ f_3, t_3, p_3, l_3, u_3 \\ \cdots \\ f_n, t_n, p_n, l_n, u_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$f = \begin{cases} 1, & \text{机床有托盘} \\ 0, & \text{机床无托盘} \end{cases} \tag{4}$$

式中，$\boldsymbol{M}$ 为机床状态矩阵；n 为产线内的机床总数；i 为

第 i 台机床，$1 \leqslant i \leqslant n$ 且 i 为整数；f 为机床有无托盘标识，t 为机床剩余加工时长，$t \geqslant 0$，当 $f_i = 0$ 时，$t = 0$；p 为机器人为机床服务时停留的地轨位置；l 为机器人为机床上料用时；u 为机器人为机床下料用时。

3.2 机器人

根据初始条件，已知机器人运动属性及当前位置，同时对各机床的服务用时，则有：

$$S = |l_s - l_e| \tag{5}$$

$$t_r = \begin{cases} 2\sqrt{\dfrac{S}{a}} & S \leqslant \dfrac{2V_{max}}{a} \\ \dfrac{S}{V_{max}} + \dfrac{V_{max}}{a} & S > \dfrac{2V_{max}}{a} \end{cases} \tag{6}$$

式中，l_s 为起始位置；l_e 为结束位置；S 为地轨起始位置和结束位置距离；t_r 为机器人地轨移动用时；a 为机器人地轨移动加速度，$a>0$；V_{max} 为机器人地轨移动最大速度，$V_{max}>0$。

3.3 托盘库

在此场景中，托盘库满足

$$\boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} f_1, t_1, p_1, l_1, u_1 \\ f_2, t_2, p_2, l_2, u_2 \\ f_3, t_3, p_3, l_3, u_3 \\ \cdots \\ f_n, t_n, p_n, l_n, u_n \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{W}$ 为托盘库状态矩阵，n 为库位总数，i 为第 i 个库位，t 常为 0，p 为机器人为托盘库服务时停留的地轨位置，l 为机器人为托盘库上料用时，u 为机器人为托盘库下料用时。

4 调度方案

4.1 基本思想

在文献 [2-6] 中提出的算法策略中，未将机器人的移动及换料时间纳入考量，这导致了计算结果的不精确性。此外，这些算法策略亦可能引发 NP-hard 问题 [7]。

本研究采纳了一种综合评分法，该方法虽无法确保最优解，但能够实现较优解。机器人的评分受到多种因素的影响，包括任务类型、总时长、等待时长及是否满足加工要求等。鉴于机器人在某一时刻可能产生多种可行解，为确定最佳解，本研究引入了评分机制。

4.2 机器人任务类型

本研究旨在探讨机器人在自动化生产线中的两种典型任务：上料与换料。在机床未配备托盘的情形下，机器人需完成上料任务，具体操作为从托盘库、机床或随行托中取用一个托盘，并将其置入待服务的机床内。反之，当机床已配备托盘时，机器人则应执行换料任务。换料任务执行前，需确保随行托中仅存在一个待换料的托盘。机床加工完成后，机器人将进行换料操作，即将机床内的托盘移至另一随行托工位，并将待加工的托盘置入机床。

在机器人执行换料任务的过程中，随行托可能出现两种状态：无托盘或含有一个托盘。若随行托内含有一个托盘，机器人将面临两种选择：若该托盘为待上料托盘，则机器人直接前往机床进行换料；若该托盘无法上料，则需先将其送回料库，随后执行随行托无托盘时的换料分支。

4.3 机器人任务得分计算步骤

初始状态下 $i = 1$，机器人任务得分计算步骤为：

1）从 i 个托盘开始，$j = 1$，如果 i 大于托盘数量 m，则退出循环，寻找最高得分对应的任务，如果存在大于 0 分的任务，则执行任务，否则等待 1s 再次计算；

2）判断当前托盘能否进入第 j 台机床加工，如果不能则 $j + 1$，返回第 1 步；如果没有托盘，则计算机床上料任务及得分；如果有托盘，则按照机床换料任务及得分，如果 j 大于机床数量 n，则 $i + 1$，同时 $j = 1$，返回第 1 步。

4.4 机器人任务得分算法

使用综合评分法来评估机器人任务的适应度 [3]，机器人基础得分表见表 1，机器人任务的基础分需要从得分表获得，然后再减去等待损失分数和总用时损失分数。

表 1 基础得分表

序号	任务类型	设备类型	得分
1	上料	机床	100
2	上料	随行托	90
3	上料	托盘库	50
4	换料	机床	80
5	换料	托盘库	30
6	换料	随行托	70

以上得分表为参考基础得分表，如序号 1，当待移动的托盘在机床中（下料设备），则如果该托盘能够满足移动至上料设备（机床）的条件，则会得到 100 分的基础分。

对于一次上料服务，则有

$$t_{wu}=\begin{cases}0,\ (t_i-t_{mu}\leqslant 0)\\ t_i-t_{mu},(t_i-t_{mu}>0)\end{cases} \tag{8}$$

$$t_{wl}=\begin{cases}0,\ (t_j-t_{mu}-t_{wu}-u\leqslant 0)\\ t_j-t_{mu}-t_{wu}-u,(t_j-t_{mu}-t_{wu}-u>0)\end{cases} \tag{9}$$

$$S_{i,j}=S_b-\left(t_{mu}+t_{wu}+u+t_{wl}+t_{ml}+l\right)K_s+t_wK_w \tag{10}$$

$$t_w=t_{wu}+t_{wl} \tag{11}$$

$$S_i=\mathrm{Max}\left\{S_{i,1},S_{i,2},S_{i,3},\cdots,S_{i,m}\right\} \tag{12}$$

式中，t_{wu} 为机器人等待下料设备完成加工的用时；t_{wl} 为机器人等待上料设备完成加工的用时；t_{mu} 为机器人移动至下料点用时，通过式（6）获得；t_{ml} 为机器人移动至上料点用时，通过式（6）获得；$S_{i,j}$ 为第 i 个托盘对于第 j 台机床的得分；S_b 为基础分，通过表 1 获得；K_s 为机器人总服务用时分数损失系数，一般取一个较小值，如 0.1；t_w 为机器人总等待用时；K_w 为机器人总等待用时分数损失系数，一般取 1，即机器人每等待 1 秒，扣除 1 分；s_i 为当前托盘对应所有机床设备的得分最大值。

对于一次换料服务，则需要根据托盘位置来拆分动作，例如托盘在托盘库中，则动作拆分为：机器人移动至托盘库，将托盘从托盘库取出，将托盘放进随行托 1，同时移动至机床，等待机床完成加工，将机床中的托盘取出，将托盘放到随行托 2，将随行托 1 托盘取出，将托盘放入机床。最终得到

$$S_{max}=\mathrm{Max}\left\{s_1,s_2,s_3,...,s_n\right\} \tag{13}$$

式中，s_i 为当第 i 个托盘的得分最大值，s_{max} 为所有托盘的得分最大值。当 s_{max} 大于 0 时，说明存在可行解，机器人按照 s_{max} 绑定的机器人任务进行，否则说明没有可行任务，或者 K_s 系数设定过大，还需调节系数。

5 实验测试

本次实验场景设有 4 台机床，3 种产品，每种产品数量分别为 5 个、3 个、2 个；初始状态分别处于托盘库中、10 个托盘、10 个托盘库，每种产品有 3 道工序，工序表见表 2。

表 2 工序表

工件	数量 / 个	工序	机床 M1 加工时长 /s	机床 M2 加工时长 /s	机床 M3 加工时长 /s	机床 M4 加工时长 /s
J1	5	O_{11}	200	150	—	—
		O_{12}	—	—	180	160
		O_{13}	—	160	—	—
J2	3	O_{21}	—	—	120	130
		O_{22}	180	180	—	—
		O_{23}	100	—	—	140
J3	2	O_{31}	—	140	—	—

机器人最大速度 2m/s，加速度 1m/s^2，机器人导轨长度 30m，机器人初始位置 0，设备坐标与上下料用时表见表 3。

表 3 设备坐标与上下料用时

设备	X 坐标 /m	上料用时 /s	下料用时 /s
机床 M1	3	5	5
机床 M2	11	5	5
机床 M3	19	5	5
机床 M4	27	5	5
托盘库 W1	1.5	4	4
托盘库 W2	4.5	4	4
托盘库 W3	7.5	4	4
托盘库 W4	10.5	4	4
托盘库 W5	13.5	4	4
托盘库 W6	16.5	4	4
托盘库 W7	19.5	4	4
托盘库 W8	22.5	4	4
托盘库 W9	25.5	4	4
托盘库 W10	28.5	4	4

经过测试，机器人在将 4 台机床填满工件后，前往托盘库提前取托盘，然后继续为机床换料，以实现机床最大换料效率，最终能够将所有托盘加工为成品，现场应用如图 3 所示。

图 3　现场应用照片

6　结论

1）当得分表与分数损失系数设定得当时，该算法能够实现对调度机器人的柔性生产调度；

2）该算法展现出卓越的实时性和灵活性，用户能够通过调整得分表来改变策略；

3）尽管该算法在实时调度场景中表现出色，具有高度的灵活性，但其在实现全局最优解方面仍存在一定的局限性。IM

参考文献

[1]　牛樱清．基于混合 Jaya 算法的复杂制造系统调度问题研究 [D]．西安：长安大学，2023．

[2]　高亮，张国辉，王晓娟．柔性作业车间调度智能算法及其应用 [M]．武汉：华中科技大学出版社，2012．

[3]　彭炀炀．基于 Petri 网的柔性制造系统死锁控制 [D]．保定：河北大学，2024．

[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]　洪良，王艺翔，南恺恺，等．柔性制造系统时延 Petri 网模型排产优化研究 [J]．机械设计与制造，2022 (4)：262-265，269．

[6]　陈哲意．基于模糊 Petri 网的柔性制造系统故障诊断 [D]．上海：上海应用技术大学，2021．

[7]　郑景文．考虑预防性维护的分布式柔性作业车间调度问题研究 [D]．青岛：青岛大学，2023．

作者简介：靳开轩（1991—），男，硕士，工程师，主要研究方向为机器人柔性调度。

收稿日期：2025-06-24