

文章编号: 1673-9469 (2019) 02-0091-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.02.021

基于 GASA 的柔性作业车间动态调度研究

曹庆奎, 张晓丽, 任向阳

(河北工程大学 管理工程与商学院, 河北 邯郸, 056038)

摘要: 针对柔性作业车间调度在机器故障扰动情况下的动态性及工件交货期模糊的情况, 研究采用基于事件与周期混合驱动的滚动窗口再调度策略, 并运用线性加权和方法, 以最大完工时间最小、能耗最小、客户满意度最大为目标, 建立多目标柔性作业车间动态调度模型, 并设计了遗传算法与模拟退火算法结合的 GASA 算法。将算例仿真结果与遗传算法取得的结果进行对比, 验证算法的有效性。

关键词: 柔性作业车间动态调度; 遗传算法; 模拟退火算法; 混合驱动策略; 模糊交货期

中图分类号: TH186

文献标识码: A

Research on Dynamic Scheduling of Flexible Job Shop Based on GASA

CAO Qingkui¹, ZHANG Xiaoli¹, REN Xiangyang¹

(Management Engineering and Business School, Hebei University of Engineering, Handan, 056038, Hebei, China)

Abstract: In view of the dynamic characteristics of flexible job shop scheduling under machine fault disturbance and the ambiguity of job delivery time, this paper adopts a rolling window rescheduling strategy driven by event and cycle, and uses the method of linear weighted sum to establish a multi-objective flexible job shop dynamic scheduling model with the objective of minimizing the maximum completion time, minimizing energy consumption and maximizing customer satisfaction. A GASA algorithm combining genetic algorithm with simulated annealing algorithm is designed. The effectiveness of the algorithm is verified by comparing the simulation results with those obtained by genetic algorithm.

Key words: flexible job shop dynamic scheduling; genetic algorithm; simulated annealing algorithm; hybrid driving strategy; fuzzy delivery date

制造业企业在实际生产过程中, 各种动态干扰事件, 机器故障是最常见的。此外, 在实际调度过程中交货期一般不是精确数值。因此, 在柔性作业车间动态调度中考虑模糊交货期更加符合生产实际。动态调度的概念最早由 Jackson^[1] 在 1957 年提出, 用于解决生产调度中的随机性干扰问题。吴秀丽^[2] 采用多目标免疫遗传算法求解优化动态调度问题。Shen^[3] 等提出了基于多目标进化算法(MOEA)的动态调度优化模型, 将操作排序和机器分配结合在一起。并且为了快速适应新环境, 将启发式动态优化策略引入到动态调度中。汪双喜等^[4] 针对工件随机

到达的干扰情况以及不同的再调度周期情况, 采用基于 Pareto 优化的多目标差分进化算法对柔性作业车间动态调度问题进行求解。刘爱军^[5] 在求解模糊柔性作业车间调度问题, 考虑了客户满意度及最大完工时间两个目标, 运用多种群遗传算法对模型进行求解。刘晓冰等^[6] 考虑了最大完工时间、成本及惩罚值三个目标, 并提出了混沌量子粒子群算法。对于考虑能耗的柔性作业车间调度问题, 蒋增强等^[7] 提出了基于血缘变异的改进非支配排序遗传算法, 考虑了能耗、最大完工时间、加工成本、加工质量四个目标。包哲人等^[8] 采用改进离散蝙蝠算法, 考

收稿日期: 2018-12-09

基金项目: 河北省社会科学基金资助项目(HB17GL022)

作者简介: 曹庆奎(1963-), 男, 河北唐山人, 教授, 博士, 研究生导师, 从事物流与供应链管理方面的研究。

虑了能耗、最大完工时间、成本三个目标。李聪波等^[9]在求解柔性作业车间调度问题时,考虑了能耗和完工时间,运用模拟退火算法对模型进行求解,验证算法的有效性。陈超等^[10]针对柔性作业车间动态调度问题,能耗只考虑加工能耗,并且考虑了平均流经时间,并采用GASA对模型进行求解。

综上,国内外学者对柔性作业车间调度相关问题研究颇为丰富,理论、模型以及算法的研究都取得了很大的进步。在现有的文献中,在模糊柔性作业车间动态调度问题中未考虑能耗,而考虑能耗的柔性作业车间动态调度中交货期是确定的。本文在机器发生故障的情况下,考虑能耗和模糊交货期的柔性作业车间动态调度更加符合生产实际,并设计了GASA算法对问题进行求解,验证了算法的有效性。

1 问题描述及模型建立

1.1 问题描述

柔性作业车间调度指将 n 个工件分配到 m 台机器上进行加工,每个工件不只一道工序,每道工序可以在指定的几台机器上加工。在实际的车间加工过程中经常会受到动态事件的干扰,本文考虑的动态干扰事件是机器故障。柔性作业车间动态调度包括两个子问题,即机器分配和工序排序问题。柔性作业车间动态调度应该满足以下条件:

- (1) 一台机器一次只能加工一个工件。
- (2) 工件的加工工艺确定,不同工件的优先级相同。
- (3) 加工时间包含各工件准备时间。

(4) 工件的各个工序之间存在先后顺序,即前一个工序完成后才能开始下一道工序。

(5) 当机器发生故障,需要重调度时,对正在加工的工件工序放入当前工件窗口,调度后此工序重新开始加工。

本文涉及到的相关符号及变量分别定义如下:

n : 工件数量,单位:个;

m : 机器数量,单位:台;

l, k : 机器序号, $l, k=1, 2, 3, \dots, m$;

a, i : 工件序号, $a, i=1, 2, \dots, n$;

b, j : 工件 i 的工序号, $b, j=1, 2, 3, \dots$;

O_{ij} : 工件 J_i 的第 j 道工序;

h_i : 工件 i 的工序总数;

m_{ij} : 工件 i 的第 j 道工序可以选择的加工机器数,单位:台;

L : 一个足够大的正数;

P_{ijk} : 工件 J_i 在机器 k 上的加工时间,单位: min;

S_{ijk} : 工件 J_i 在机器 k 上的开始时间,单位: min;

T_{ijk} : 工件 J_i 在机器 k 上的完工时间,单位: min;

C_i : 每个工件 J_i 的完工时间,单位: min;

E_a^{ijk} : 工件 J_i 在机器 k 上标准时间内的平均加工能耗,单位: J/min;

E_b^k : 机器 k 空载时的平均能耗,单位: J/min;

E_c^k : 机器 k 启动时的平均能耗,单位: J/min;

t_{bk} : 机器 k 的空载时间,单位: min;

t_{ck} : 机器 k 启动一次的时间,单位: min;

t_D : 机器故障时刻,单位: min;

$\mu(C_i)$: 工件 J_i 的客户满意度;

X_{ijk} : 决策变量,其中 $X_{ijk}=1$ 表示工序 O_{ij} 在机器 k 上加工,否则 $X_{ijk}=0$;

R_{ijabk} : 决策变量,其中 $R_{ijabk}=1$ 表示在机器 k 上工序 O_{ij} 先于 O_{ab} 加工,否则 $R_{ijabk}=0$ 。

1.2 模型建立

本文研究的调度目标包括最大完工时间的最小化、最小能耗、最大客户满意度,其中 C_{max} 表示最大完工时间, E 表示能耗, f 表示客户满意度。表示如下:

1.2.1 目标函数

(1) 最大完工时间最小:

$$\min C_{\max} = \min \left[\max \left(\sum_{i=1}^n C_i \right) \right] \quad (1)$$

(2) 能耗最小:

根据文献[9]的设备状态-能耗分布曲线,机械设备有四个运行状态,即启动、加工、空载、停止,每个状态的能耗特征都不同。能耗包括所有设备的加工能耗 E_a 、空载能耗 E_b 、启动能耗 E_c ,表示如下:

$$\min E = \min \left(\sum E_a + \sum E_b + \sum E_c \right) \quad (2)$$

(3) 客户满意度最大:

$$\max f = \max \left(\sum_{i=1}^n \mu(C_i) \right) \quad (3)$$

在实际生产中,很多企业都不能获得精准的交货期,对于考虑模糊交货期的情况,可以通过满足模糊隶属函数的梯形交货期窗口反映。

$$\mu(C_i) = \begin{cases} 0 & x \leq d_i^a, x \geq d_i^d \\ \frac{x - d_i^a}{d_i^b - d_i^a} & d_i^a < x < d_i^b \\ \frac{d_i^d - x}{d_i^d - d_i^c} & d_i^c < x < d_i^d \\ 1 & d_i^b \leq x \leq d_i^c \end{cases} \quad (4)$$

企业和客户的目标是不同的。企业希望工作的完成时间和能耗最小，客户希望得到最大的满足。这三个目标是矛盾的，因此根据目标的重要性，利用线性加权法和法将三个目标优化问题转化为单目标优化问题。 α 、 β 、 γ 分别代表最大完工时间、能耗、客户满意度系数。

$$\min F = \alpha C_{max} + \beta E - \gamma f \quad (5)$$

1.2.2 约束条件

$$S_{ijk} + X_{ijk} \times P_{ijk} \leq T_{ijk} \quad (6)$$

$$T_{ijk} \leq S_{i(j+1)l} \quad (7)$$

$$C_i \leq C_{max} \quad (8)$$

$$S_{ijk} + P_{ijk} \leq S_{abk} + L \times (1 - R_{ijabk}) \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{m_{ij}} X_{ijk} = 1 \quad (10)$$

$$S_{ijk} \geq 0, X_{ijk} \geq 0 \quad (11)$$

$$T_{ij} = \begin{cases} S_{ijk} + P_{ijk} \times X_{ijk} & X_{ijk} = 1 \text{ 且机器 } k \text{ 可用} \\ \max(t_D, T_{abl}) + X_{ijl} \times P_{ijl} & t_D \text{ 时刻 } k \text{ 不可用且 } X_{ijl} = 1 \end{cases} \quad (12)$$

其中 O_{ab} 为机器 l 上 O_{ij} 的前一道工序。

- 式 (6) 及 (7) 表示同一工件工序间的先后约束；
- 式 (8) 表示工件的完工时间不能超过最大完工时间；
- 式 (9) 则表示同一台机器只能加工一道工序；
- 式 (10) 表示了同一道工序仅能由一台机器加工；
- 式 (11) 表示变量必须为正；
- 式 (12) 表示重调度时刻对正在加工工序的处理对策。

2 FJSP 动态调度策略研究

动态调度策略主要包括周期驱动、事件驱动及混合驱动再调度 3 种，都可用于解决柔性作业车间动态调度问题。周期性驱动调度策略，是指把整个加工过程划分成若干个时间段，每隔一个时间段进行调度一次。事件驱动调度策略，即在执行原调度方案时，系统状态发生变化立即启动再调度，对剩余未加工工件进行重排序及重分配。混合驱动策略是将两者策略结合在一起。本文采用混合驱动的滚动窗口再调度策略，既能维持系统的稳定性，又可以积极应对突发动态事件。基于事件与周围的混合驱动调度策略如图 1 所示。

3 GASA 算法设计

遗传模拟退火算法 (GASA) 是一种混合算法，

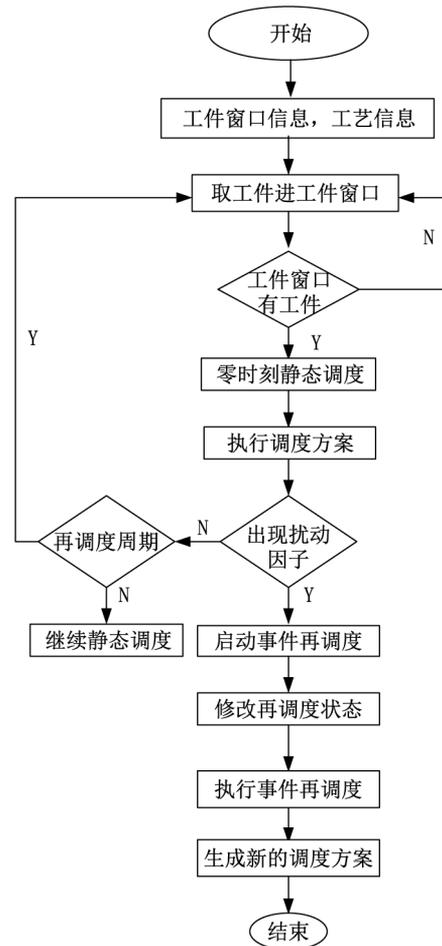


图 1 基于事件和周期驱动的动态调度流程
Fig.1 Dynamic scheduling process based on event and driving period

由遗传算法和模拟退火算法结合而成。遗传算法运用比较广泛主要得益于它的全局搜索能力强、收敛速度较快，能够对搜索方向进行自适应地调整。固体退火原理是模拟退火算法的来源，其原理是将固体加热到充分高的温度，让固体进行冷却。实施步骤如下：

第一步：初始化参数， N ， MG ， t_0 ， λ ，对参数 T_0 (初始温度)、 M (迭代次数)、 T_{end} (最低温度)、 $K(0 < K < 1)$ (温度衰减系数)进行设置；并且给出适应度函数；

第二步：生成初始种群及初始温度 p_0 ，令 $i=0$ ， $k=0$ ；

第三步：由适应度函数计算个体适应度；

第四步：采用遗传算法对个体进行选择、交叉及变异操作；

第五步：采用模拟退火操作产生子代种群；

第六步：修改参数 t ，令 $t_{k+1} = \lambda t_k$ ， $\lambda \in (0, 1)$ ，然后令 $i=i+1$ ， $k=k+1$ ；

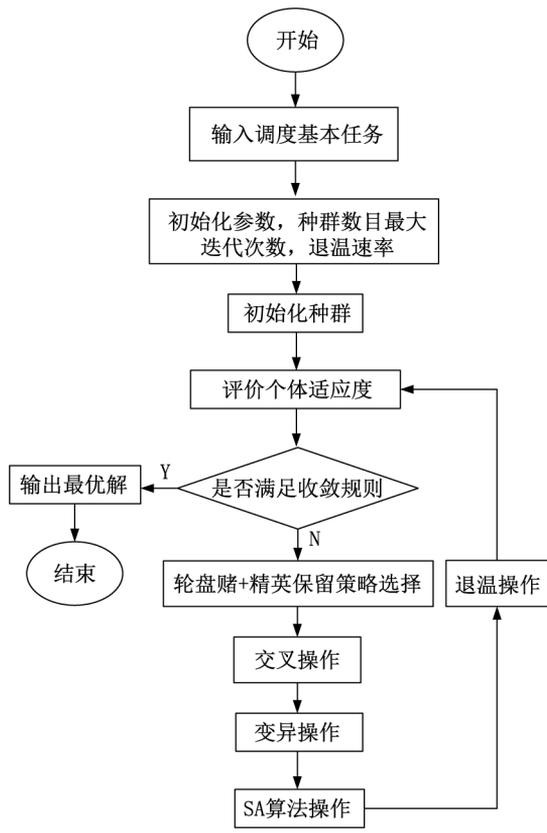


图2 GASA 算法流程图

Fig.2 GASA algorithm flow chart

第七步: 如果收敛规则满足, 算法结束, 输出最优解, 否则转第三步, GASA 算法如图 2。

4 仿真分析

随机选取两台机器, 重调度周期时间为 25 min, 运用 GASA 算法对柔性作业车间动态调度

问题进行算例仿真, 得出最优调度方案。

4.1 参数设置

本文的仿真算例是 6×10 的柔性作业车间调度问题, 每个工件有 6 道工序, 参考文献 [13] 设计的算例数据, 如表 1 所示。

关于算法的参数, 种群规模 $N=36$, 最大迭代次数 $MG=200$, 交叉概率 $P_c=0.6$, 变异概率, $P_m=0.1$ 初始温度 $T_0=100$, 终止温度 $T_{end}=1$, 冷却系数 $K=0.9$ 。

4.2 仿真结果

本文主要针对柔性作业车间调度中出现的机器故障动态事件, 设定能耗、客户满意度、最大完工时间的权重分别为 1、60、4, 运用 GASA 算法对模型进行求解。

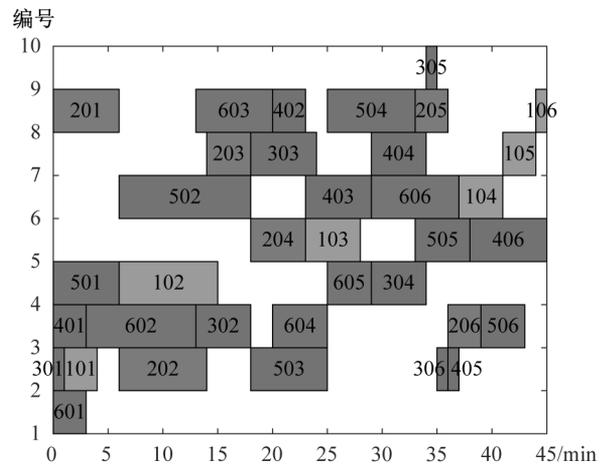


图3 第 1 台机器故障时的甘特图

Fig.3 Gantt chart of the first machine failure

表 1 仿真数据

Tab.1 Simulation data

工件		1	2	3	4	5	6
机器约束	工序 1	(3, 10)	(2, 9)	(3, 9)	(4, 6)	(5, 9)	(2, 3)
	工序 2	(1, 5)	(3, 1)	(4, 7)	(1, 9)	(2, 7)	(4, 7)
	工序 3	(2, 6)	(5, 8)	(6, 8)	(3, 7)	(3, 10)	(6, 9)
	工序 4	(4, 7)	(6, 7)	(1, 5)	(2, 8)	(6, 9)	(1, 4)
	工序 5	(6, 8)	(1, 9)	(2, 10)	(5, 3)	(1, 6)	(5, 8)
	工序 6	(5, 9)	(4, 10)	(5, 3)	(6, 1)	(4, 8)	(3, 7)
加工时间	工序 1	(3, 5)	(4, 6)	(1, 4)	(3, 7)	(6, 8)	(3, 4)
	工序 2	(10, 9)	(2, 8)	(5, 7)	(4, 3)	(10, 12)	(10, 11)
	工序 3	(9, 5)	(1, 4)	(5, 6)	(4, 6)	(7, 9)	(8, 7)
	工序 4	(5, 4)	(5, 6)	(6, 5)	(3, 5)	(8, 8)	(9, 5)
	工序 5	(3, 3)	(5, 3)	(9, 1)	(1, 1)	(1, 5)	(4, 5)
	工序 6	(10, 1)	(3, 3)	(1, 9)	(3, 7)	(4, 7)	(9, 8)

随机假设 M_1 在零时刻发生故障，将在第 1 台机器上的未加工工件转移到工件对应机器集合的机器上加工，选取再调度周期时刻为 25，调度后的甘特图如图 3 所示。调度后没有工件在第 1 台机器上加工，工件的最大完工时间为 45 min，并且工件大部分都集中在第 1 台之后的机器上进行加工，总能耗为 456.74 J/min，客户满意度为 4.05。

再假定 M_3 发生故障，再调度周期不变，动态调度仿真结果如图 4 所示，从图中可以看出，不管是在再调度时刻之前还是之后，第 3 台机器后面的机器承担了大部分的加工任务。调度的最大完工时间为 44 min，总能耗为 466.47 J/min，客户满意度为 4.65。

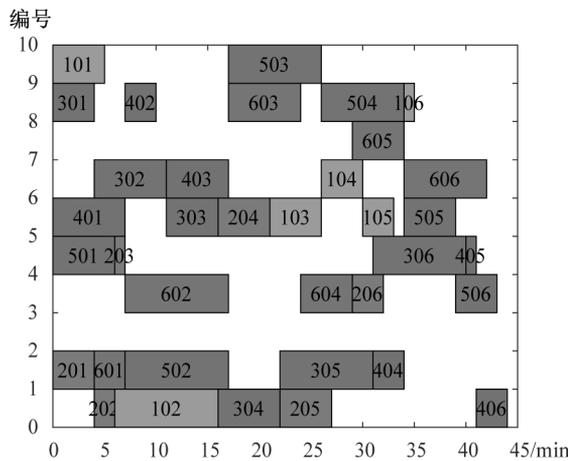


图 4 第 3 台机器故障时的甘特图
Fig.4 Gantt chart of the third machine failure

本文对以上 10 台机器发生的故障情况，运用 GASA 算法，对这 10 台机器分别进行 10 次试验，三个目标值的平均仿真结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出，不同的机器发生故障时，对

表 2 仿真平均数据统计
Tab.2 Simulated average data statistics

故障机器	总能耗 / (J·min ⁻¹)	客户满意度	最大完工时间 /min
1	456.74	4.05	45
2	472.83	4.08	46
3	466.47	4.65	44
4	499.86	4.31	44
5	479.20	3.87	49
6	508.75	5.02	44
7	426.47	6.00	41
8	451.88	5.91	40
9	453.64	4.33	45
10	455.37	5.50	39

应的总能耗、客户满意度及最大完工时间也会不同。与其他机器相比，第 7、8、10 台机器发生故障时，总体目标函数较优，总能耗都较小、客户满意度较大、最大完工时间较小，即这些机器比较节能、加工工件效率较高，能获得客户的认可。而第 4、6 台机器故障下的总能耗较大，第 5 台机器的客户满意度较小，最大完工时间较大。其余 4 台机器故障下的总能耗、客户满意度、最大完工时间的值都处于中等水平。因此，在 10 台机器中，比较关键的机器是第 7、8、10 台机器，应该重点保养和维护这 3 台机器。企业实际柔性作业车间调度中要尽量避免关键机器发生故障。

假设第 7 台机器发生故障，采用遗传算法 (GA)、GASA 算法对柔性作业车间动态调度模型求解，表 3 为算法运行 10 次的综合最优解。

从表 3 中可以看出，GASA 算法与 GA 算法相比，综合最优解的性能最优，验证了算法的有效性。

表 3 综合最优解性能比较
Tab.3 Performance comparison of comprehensive optimal solutions

优化目标	GASA		GA	
	最优解	平均解	最优解	平均解
最大完工时间	41	44	45	47
能耗	426.47	465.78	486.72	524.32
客户满意度	6.00	5.67	5.21	4.93

5 结论

1) 本文采用的基于事件与周期混合驱动的滚动窗口再调度策略，既维持了系统的稳定性，又能很好地应对突发动态事件。

2) 本文算例仿真，得出了某些机器故障下的能耗较小、客户满意度较大、最大完工时间较小，验证了 GASA 算法的有效性。结果表明应该重点保养这些机器，避免其故障。

3) 在实际的柔性作业车间调度中，动态事件不仅仅是机器故障，还有紧急工件到达、订单取消、原材料短缺等动态问题。另外，工件不只有模糊交货期，还有模糊加工时间。这些问题有待进行深入研究。

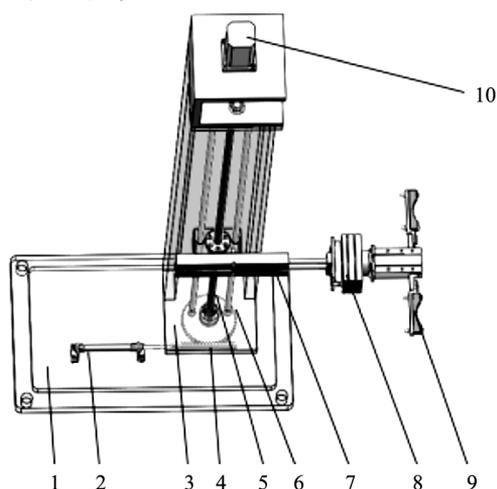
参考文献:

[1] JACKSON J R. Simulation research on job shop

- production[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1957, 4(4): 287-295.
- [2] 吴秀丽. 柔性作业车间动态调度问题研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(14): 3828-3832.
- [3] SHEN X N, YAO X. Mathematical Modeling and Multi-objective Evolutionary Algorithms Applied to Dynamic Flexible Job Shop Scheduling Problems[J]. Information Sciences, 2015(298): 198-224.
- [4] 汪双喜, 张超勇, 刘琼, 等. 不同再调度周期下的柔性作业车间动态调度[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(10): 2470-2478.
- [5] 刘爱军, 杨育, 邢青松, 等. 多目标模糊柔性车间调度中的多种群遗传算法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(9): 1954-1961.
- [6] 刘晓冰, 焦璇, 黄明, 等. 用混合量子算法求解模糊柔性作业车间调度问题[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(3): 8-13.
- [7] 蒋增强, 左乐. 低碳策略下的多目标柔性作业车间调度[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(4): 1023-1031.
- [8] 包哲人, 徐华. 面向能耗机制的多目标柔性作业车间调度[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(12): 3617-3622.
- [9] 李聪波, 沈欢, 李玲玲, 等. 面向能耗的多工艺路线柔性作业车间分批优化调度模型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 12-23.
- [10] 陈超, 王艳, 严大虎, 等. 面向能耗的柔性作业车间动态调度研究[J]. 系统仿真学报, 2017(9): 2168-2174.

(责任编辑 李新)

(上接第90页)



1. 底座; 2. 气缸; 3. 转向架; 4. 转向齿条; 5. 丝杠; 6. 转向齿轮; 7. 伸缩气缸; 8. 旋转气缸; 9. 手抓; 10. 电机
图7 下料机械手三维实体图

Fig.7 3D solid figure of the blanking robot

度将辊体移动至下一个工位夹具上方。电机反转, 机械手向下移动将辊体放置在下一个工位夹具上, 实现了穿轴装配的下料以及下一个工序的上料。

3 结语

陶瓷托辊专用穿轴装配上下料系统的研发实现了辊体和转轴的同时储料、整料、上料和下料。目前该系统已投入使用, 其操作简单, 工作可靠, 加

工装配速度快、质量高, 对于提高企业的生产效率有很好的价值。

参考文献:

- [1] 蔡雪晴, 鲍久圣, 阴妍, 等. 带式输送机托辊性能测试技术研究进展[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 271-274.
- [2] 张海旺. 新型耐磨托辊在选矿厂的推广应用[J]. 矿山机械, 2016, 44(12): 88-89.
- [3] 赵明侠, 杲春芳. 电机壳端子自动上料机构的设计[J]. 焊接, 2017(5): 57-59.
- [4] 郭琳娜, 郑天池, 孙小刚, 等. 基于PLC的L形镍片自动上料机的设计[J]. 现代制造工程, 2017(11): 115-119.
- [5] 朱家诚, 蒋正顺, 朱文义. 气门导管自动上料机的研制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(3): 151-153.
- [6] 彭海军, 刘继展, 居锦. 散体物料堆自动上料机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(9): 177-182.
- [7] 刘江, 齐风华, 徐世昌. 倒置式车铣复合加工中心自动上料装置的设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(6): 91-93.
- [8] 龚肖新, 张卫国, 汤伟平. 烫金机自动上料装置电气动控制系统设计[J]. 液压与气动, 2011(3): 63-66.
- [9] 尹成龙, 牛多青. 基于SolidWorks的挖掘机虚拟样机设计及工作装置运动仿真[J]. 机械制造, 2009, 47(4): 15-17.
- [10] 迟玉伦, 李郝林. 切入式外圆磨削接触刚度与固有频率研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(10): 1294-1298.

(责任编辑 李新)