

DOI: 10.7652/xjtuxb201710002

低碳制造环境下车间有限刀具多目标调度研究

周光辉^{1,2}, 傅祥璟¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为解决低碳制造环境下刀具在机床之间的调度问题,基于任务的机床分配方案,聚焦于车间内刀具的流转和使用过程,建立了综合考虑生产任务的完工时间、加工成本及加工碳排放的多目标刀具调度模型。针对调度过程中刀具资源数量和寿命受限的问题,在 NSGA-Ⅱ 算法基础上,提出了考虑解个体不可行度的选择算子,并利用不可行阈值的自适应更新方法,维持种群中不可行解在一定的比例,用来提高算法对于优化解的搜索能力。实验验证结果表明,与仅考虑完工时间的模型相比,本模型得到优化方案的加工成本、碳排放分别降低了 21.8%、14%。所建立的多目标刀具调度模型能有效地解决低碳制造环境下车间有限刀具的调度问题,计算得到的帕累托最优解集为刀具的优化调度提供了可行的解决方案。

关键词: 刀具调度;资源约束;碳排放;改进 NSGA-Ⅱ

中图分类号: TH166 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)10-0007-07

Multi-Objective Scheduling Model of Limited Tools in Low-Carbon Manufacturing Environment

ZHOU Guanghui^{1,2}, FU Xiangjing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the scheduling of cutting tools among different machine tools in low-carbon manufacturing environment, a multi-objective model considering job completion time, cost and carbon emission is presented. Based on the machine allocation, the model concentrates on the process of cutting tool use and transportation. Focusing on the constraints of tool number and lifespan, an improved NSGA-Ⅱ algorithm is developed which considers the index of individual infeasible degree. Following the adaptive updating of infeasible thresholds, the infeasible solutions are kept in a certain proportion. Consequently, the search ability of the algorithm for optimization solutions is improved. Experiments verify that the cost and carbon emission obtained by this multi-objective model are reduced by 21.8% and 14%, respectively compared with the model which only considers completion time. The multi-objective model and improved NSGA-Ⅱ algorithm can effectively solve the problem of limited tool scheduling in the low-carbon manufacturing environment. The obtained Pareto frontier set provides a feasible solution to the optimal scheduling of cutting tools.

Keywords: tool scheduling; resource constraints; carbon emission; improved NSGA-Ⅱ algorithm

在新时期发展低碳制造的迫切需求下,优化调度技术以有效减少生产过程资源消耗的特点成为低碳制造体系的重要组成部分^[1]。作为制造过程的关键要素,刀具的多样化满足了多品种生产的需要,也增加了企业资源管理的负荷。关注实际生产,同一任务往往有多把刀具可供选择,不同刀具结构参数及选用切削用量的差异直接影响切削过程的碳排放产生^[2]。同时,在车间资源有限的情况下,刀具的使用寿命限制、在不同机床间的争用等问题容易造成生产等待甚至停滞^[3],引起制造系统运行能耗及排放增加。因此,研究低碳制造环境下的有限刀具资源的优化调度问题显得尤为重要。

高效优化的刀具调度是生产系统有效运作的保证。Veeramani 等通过调研说明了刀具管理在自动化生产过程中的重要性^[4]。Kumar 等运用离散事件仿真模型研究了刀具共享环境下的生产管理问题,并比较了不同的调度规则对于系统运行性能的影响^[5]。边培莹提出了有限刀具可复用策略,通过粒子群算法求解,达到提高资源利用率及经济效益的目的^[6]。周光辉等通过改进遗传算法解决车间单台数控加工中心工件流和刀具流混合调度的问题,实现了任务生产成本的降低^[7]。然而,现有刀具调度模型大多忽略了刀具使用过程中碳排放的综合考虑,难以适应低碳制造的发展需求。同时,如何在刀具资源数量和寿命受限的情况下得到更贴合实际加工情境的调度方案,也值得进一步研究^[8-10]。

本文聚焦于车间内刀具的流转和使用过程,提出了综合考虑任务完工时间、加工成本、加工碳排放的多目标刀具调度模型,并设计考虑刀具寿命约束的改进 NSGA-II 算法对模型求解,得到可行的刀具配置方案,为低碳制造环境下刀具资源、刀具寿命受限的刀具调度问题提供有效的解决方案。

1 资源约束下多目标刀具调度模型

1.1 资源约束下刀具调度问题描述

车间内使用多台机床加工 l 个待加工工件,这批工件的各工序(含 1 道或多道工序)使用的机床及加工顺序在机床分配规划阶段已预先确定。车间内加工同一工步可选刀具存在多把,且使用不同刀具加工在生产时间、成本、碳排放上存在差异。加工整批工件共有 c 把待选刀具,每把刀具可用寿命有限。调度的目标是为每一工步安排合理且优化的刀具,使整批工件的完工时间、加工成本及碳排放协调最优。该问题有如下假设:①工件同一工序的各工步

间为串行加工关系;②每道工序在所用到的刀具均处于目标机床且空闲后开始加工,加工完成后释放该工序所用到的刀具;③对机床换刀过程的考虑包括了换刀前后刀具快速移动及快速进给的过程;④刀具在机床间的运转由运刀小车完成。

1.2 变量符号声明

i : 工件号; j : 工序号; k : 工步号。

l : 工件数。

m_i : 工件 i 包含的工序数。

n_{ij} : 工件 i 的工序 j 包含的工步数。

M^{ij} : 工件 i 的工序 j 对应的加工机床编号。

D^{ijk} : 工件 i 的工序 j 的工步 k 对应的加工刀具号。

$t_m^{ijk}(D^{ijk})$: 工件 i 的工序 j 的工步 k 使用刀具 D^{ijk} 的加工用时。

$t_c(M^{ij})$: 机床 M^{ij} 的平均换刀时间。

$c_t(D^{ijk})$: 刀具 D^{ijk} 单位时间使用成本。

$c_m(M^{ij})$: 机床 M^{ij} 单位时间使用成本。

c_v : 运刀小车单位时间使用成本。

$P_u(M^{ij})$: 机床 M^{ij} 的空载功率。

$P_c(D^{ijk})$: 工件 i 的工序 j 的工步 k 使用刀具 D^{ijk} 加工的切削功率。

$P_a(D^{ijk})$: 工件 i 的工序 j 的工步 k 使用刀具 D^{ijk} 加工的附加加载荷功率。

$P_t(M^{ij})$: 机床 M^{ij} 的平均换刀功率。

P_v : 运刀小车的运行功率。

$L(D^{ijk})$: 刀具 D^{ijk} 的总可用寿命。

$W(D^{ijk})$: 刀具 D^{ijk} 的初始质量。

α_e : 电能消耗碳排放因子。

α_t : 刀具物料碳排放因子。

1.3 多目标刀具调度数学模型

本文考虑的刀具调度是基于待加工工件的工序已预先分配到相关机床,解决工步与刀具间的优化配置问题。综合考虑刀具在机床内的换刀操作及在不同机床间的争用、流转等影响因素,建立刀具多目标调度模型。模型中各目标函数如下

$$f_1 = \min(\max T_c^{ij}) \quad (1)$$

$$f_2 = \min C \quad (2)$$

$$f_3 = \min E \quad (3)$$

各优化目标的具体计算如下

(1) 工序完工时间 T_c^{ij} 的计算

工序的完工时间 T_c^{ij} 的计算式为

$$T_c^{ij} = T_s^{ij} + T_m^{ij} \quad (4)$$

式中: 工序加工开始时间 T_s^{ij} 需满足工艺约束、机床

加工顺序约束及刀具加工顺序约束;工序加工时间 T_m^{ij} 包括刀具切削时间及工序所含工步间的换刀时间。计算公式分别如下

$$T_s^{ij} = \max(T_{sp}^{ij}, T_{sm}^{ij}, T_{st}^{ij}) \quad (5)$$

$$T_m^{ij} = \sum_{k=1}^{n_{ij}} [t_m^{ijk}(D^{ijk}) + t_c(M^j)\psi^{ijk}] \quad (6)$$

$$\psi^{ijk} = \begin{cases} 1, & k > 1 \text{ 且 } D^{ijk} \neq D^{ij(k-1)} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_{sp}^{ij} 表示工件 i 的工序 j 前导工序的完工时间; T_{sm}^{ij} 表示工件 i 的工序 j 所使用机床的前导工序的完工时间; T_{st}^{ij} 表示工件 i 的工序 j 各工步所用刀具的准备完成时间。其中, 刀具 D^{ijk} 的准备时间包括所用刀具前导工序的剩余加工时间 T_{tw}^{ijk} 以及其在机床间进行转运时间 T_{tt}^{ijk} 。

(2) 综合生产成本 C 的计算

对于选择不同刀具对生产成本的影响, 文中综合成本 C 主要考虑加工过程中刀具使用成本 C_t^j 、机床使用成本 C_m^j 及刀具转运过程成本 C_v^j

$$C = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} (C_t^{ij} + C_m^{ij} + C_v^{ij}) \quad (8)$$

式中

$$C_t^{ij} = \sum_{k=1}^{n_{ij}} t_m^{ijk}(D^{ijk})c_t(D^{ijk}) \quad (9)$$

$$C_m^{ij} = T_m^{ij}c_m(M^j) \quad (10)$$

$$C_v^{ij} = \sum_{k=1}^{n_{ij}} T_{tt}^{ijk}c_v \quad (11)$$

(3) 综合生产碳排放 E 的计算

生产碳排放包括与加工过程直接或间接相关的能源及物料消耗碳排放^[11]。本文主要考虑刀具调度对碳排放的影响, 因此综合碳排放 E 包括加工过程能耗碳排放 E_e^j 、加工过程物料碳排放 E_m^j 及刀具转运过程碳排放 E_v^j 。计算公式如下

$$E = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} (E_e^{ij} + E_m^{ij} + E_v^{ij}) \quad (12)$$

式中: E_e^j 由切削能耗碳排放 E_{em}^j 与换刀能耗碳排放 E_{et}^j 构成。切削过程能耗包括空载能耗、切削过程能耗以及附加载荷损耗^[12]。空载功率取机床空载状态下的功率平均值。切削功率由切削力及切削速度确定, 与工步所选刀具及对应的切削参数有关。附加载荷功率与切削功率成近似的线性比例关系(本文取 $P_a = 0.2P_c$)。换刀能耗包括空载能耗与换刀系统能耗, 因机床不同而存在差异。此外, E_m^j 主要考虑刀具磨损碳排放, 与刀具制备消耗的碳排放有关^[13]。运转过程碳排放为运刀小车的电能消耗碳

排放。综上所述, 得出各部分碳排放计算公式如下

$$E_{em}^{ij} = \sum_{k=1}^{n_{ij}} [P_u(M^j) + P_c(D^{ijk}) + P_a(D^{ijk})]t_m^{ijk}(D^{ijk})\alpha_e \quad (13)$$

$$E_{et}^{ij} = \sum_{k=1}^{n_{ij}} [P_u(M^j) + P_t(M^j)]t_c(M^j)\psi^{ijk}\alpha_e \quad (14)$$

$$E_m^j = \sum_{k=1}^{n_{ij}} \frac{t_m^{ijk}(D^{ijk})}{L(D^{ijk})}W(D^{ijk})\alpha_t \quad (15)$$

$$E_v^j = \sum_{k=1}^{n_{ij}} P_v T_{tt}^{ijk} \alpha_e \quad (16)$$

根据车间加工的实际情况, 本文所提出的刀具调度模型受如下约束: ①同一工序的各工步连续加工, 期间不中断; ②一把刀具同一时间只能加工一个工步; ③每一工步只能被一把刀具加工; ④每把刀具的总加工时间不超过其可用寿命。

2 改进多目标遗传算法设计

针对已构建的多目标优化的刀具调度模型, 本文拟采用 NSGA-II 算法求解。由于存在刀具寿命约束导致搜索空间中存在不可行域, 本文在标准 NSGA-II 的基础上引入解的不可行度, 对标准算法的选择算子进行改进, 以提高此约束优化问题的求解效率。同时, 考虑一大类约束优化问题在约束边界附近取得优化解的特性, 临近边界的不可行解对于可行优化解的搜索很有帮助^[14]。因此, 论文设定不可行度的阈值 $B(B > 0)$ 来筛选接近约束边界的不可行解, 采用不可行阈值 B 的自适应调节方法, 维持种群中不可行解在一定比例, 以达到提升算法的寻优性的目的。提出的改进 NSGA-II 算法的具体流程如图 1 所示。

本文定义解的不可行度为解到可行域的距离, 表达式为

$$\Phi(I) = \sum_{d=1}^c [t^d(I)]^2 \quad (17)$$

式中: $t^d(I)$ 为解个体 I 的配置方案得到的刀具 d 的寿命超出时间; c 为所有刀具数目。

2.1 染色体编码

基于多目标刀具调度问题特性, 染色体采取自然数编码, 长度等于待加工工件中总工步的数目, 其编码方式如图 2 所示。由每一工步对应编码位的整数与每一工步的可用刀具编号集合进行对应, 即可确定唯一的加工刀具编号。

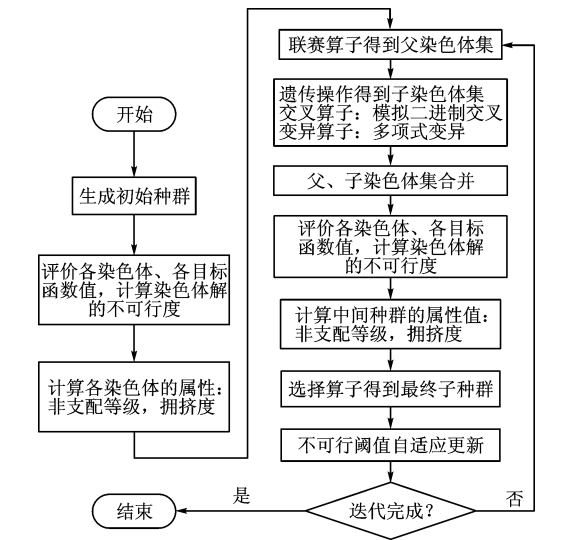


图 1 改进 NSGA-II 算法流程图

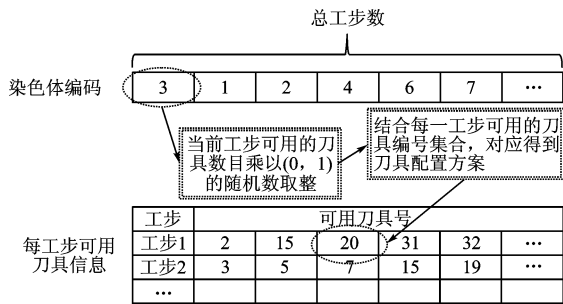


图 2 染色体编码示意图

2.2 交叉与变异算子

交叉与变异操作是 NSGA-II 算法的重要组成部分,用于维持种群多样性,实现对解空间的充分搜索。本文采用文献[15]提出的模拟二进制交叉算子和多项式变异算子来对染色体进行交叉与变异操作。

2.3 遗传选择算子

约束优化问题的最终目的是求得可行的优化解,故算法选择过程需同时考虑解个体的可行性与优化性。基于解个体的不可行度 $\Phi(I)$ 与不可行阈值 B ,给出两解个体 I_1 与 I_2 优劣程度的判断过程如下:①当两解个体 I_1 与 I_2 均不可行时,比较 $\Phi(I_1)$ 与 $\Phi(I_2)$,小者为优;②当解个体 I_1 可行,而 I_2 不可行且 $\Phi(I_2) > B$ 时,则解个体 I_1 为优;③当解个体 I_1 可行,而 I_2 不可行且 $\Phi(I_2) \leq B$ 时,或两解个体 I_1 与 I_2 均可行时,通过解个体的非支配等级 I_{rank} 与拥挤度 I_d 比较选优,个体 I_1 优于 I_2 当且仅当 $I_{1,\text{rank}} < I_{2,\text{rank}}$ 或 $I_{1,\text{rank}} = I_{2,\text{rank}}$ 且 $I_{1,d} > I_{2,d}$ 。

2.4 不可行阈值的自适应更新

通过以上可知,不可行阈值 B 越大,则种群中不可行解的比例就可能越高。为在进化过程中维持

种群中不可行解在一个稳定的比例 P ,对不可行阈值 B 进行如下的自适应更新

$$B = \begin{cases} 1.1B^*, & \text{群体中不可行解比例小于 } P \\ 0.9B^*, & \text{群体中不可行解比例大于 } P \\ B^*, & \text{其他} \end{cases}$$

式中: B 为当前代种群的不可行阈值; B^* 为上一代种群的不可行阈值。

3 实例验证与结果分析

为验证以上刀具调度数学模型和求解算法的有效性,基于西安万威刀具股份有限公司的加工实际情况,设计一加工实例,建立刀具多目标调度模型,并采用改进 NSGA-II 算法求解得到刀具的优化配置方案。

本实例中,包含 6 个工件和 6 台机床,表 1 为各工件工序在各机床上的具体分配情况。表 2 为 6 台机床的运行参数,不同机床的运行参数不同,可通过测量得到。表 3 为刀具在不同机床之间的运转时间。运刀小车功率为 1.5 kW,运行成本为 5 元/h。

车间提供 16 把可选刀具来加工该批零件,表 4 为备选刀具在生产调度前的实时状态信息。表 5 为该批工件的工步与刀具之间的关联信息,从中可以看出,同一工步可采用不同刀具加工,由于刀具不同,对应的加工时间及切削功率也各异,其中切削功率通过切削力与切削速度计算得到。

依据中国公布的 2015 年区域电网排放因子数据,本文电能碳排放因子取 0.945 7 kg/(kW · h) (西北电网)。刀具物料碳排放仅考虑其制造过程中的能耗碳排放^[13],经实验计算,刀具物料碳排放因子取 29.6(制备质量为 1 kg 的刀具产品,生产过程总计排放 29.6 kg 的 CO₂)。

采用改进 NSGA-II 算法的基本参数设置如下:种群规模为 100,迭代次数为 300,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1,种群中不可行解比例设置为 0.1。

表 1 机床加工任务分配表

机床编号	待加工工序序列
1	O(4,1)-O(2,1)-O(4,3)
2	O(3,1)-O(6,2)-O(3,2)
3	O(4,2)-O(6,3)-O(5,2)
4	O(6,1)-O(1,2)
5	O(1,1)-O(2,2)
6	O(5,1)

注:O(a,b)表示工件 a 的第 b 道工序。

表 2 机床信息表

编号	使用成本/元·h ⁻¹	换刀时间/min	空载功率/kW	换刀功率/kW
1	65	1.1	3.0	0.3
2	63	0.9	2.9	0.6
3	69	0.7	2.4	0.5
4	72	0.8	2.7	0.6
5	75	0.9	2.1	0.5
6	77	0.7	2.3	0.4

表 3 刀具在机床间的运转时间表

机床编号	运转时间/min					
	1	2	3	4	5	6
1		4	2	3	2	3
2	4		3	4	2	10
3	2	3		7	4	4
4	3	4	7		4	7
5	2	2	4	4		4
6	3	10	4	7	4	

表 4 刀具信息表

加工刀具编号	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16
使用成本/元·min ⁻¹	1.7	1.4	1.8	2.4	2.6	2.9	1.7	2.7	1.3	1.5	2.5	2.6	3.2	3.0	2.5	2.8
剩余寿命,总可用寿命/min	20,50	16,60	15,50	19,50	15,40	15,60	25,50	25,70	16,60	30,50	30,50	35,50	34,60	36,50	25,60	30,50
质量/g	37	40	45	71	30	46	28	60	58	50	47	55	62	50	55	64

表 5 工步刀具加工关联信息表

工件	工序	工步	加工时间/min,切削功率/kW															
			D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16
1	1	1		7,1.3	4,2.1	4,2.1				8,1								
		2		6,0.8		4,1.2	5,1			6,0.8				9,0.6				
	2	1	5,1.6							7,1.3		7,1.3						6/1.4
		2		9,1.2		8,1.3				10,1.1	13,0.8							8/1.3
		3						9,1.2			15,0.7		10,1.1	9,1.2				
	3	1			12,0.7				13,0.7			9,1			11,0.8		12,0.7	
1		2	4,2.1	7,1.3			7,1.3	4,2.1										
		3					9,0.6			12,0.4		13,0.4			6,0.8			
2	2	1	9,1		5,1.6	5,1.6								9,1				
		2		8,0.6				5,0.8							8,0.6			
	3	1					4,2		5,1.7		4,2			8,1.1		5,1.7		
		2	6,1.1					6,1.1				4,1.5			6,1.1			
3	2	1			9,2				10,1.8		7,2.5			11,1.7	11,1.7	9,2		
		2	4,2.1	7,1.3					9,1					4,2.1				
	4	1				10,1.2				9,1.4			6/2				10,1.2	
		2			8,1		9,0.9	7,1.1										
4	2	1			6,2.6			10,1.9					11,1.7			6,2.6		
		1		8,0.6					8,0.6							7,0.6		
	3	2	9,1.3			8,1.4					5,2.1		6,1.8				8,1.4	
		3							8,0.6	6,0.8		5,1			6,0.8			
	5	1										9,1.3			8,1.4		8,1.4	
		2					12,0.9	15,0.7				10,1.1			10,1.1			
5	2	1					12,0.9	15,0.7				10,1.1			10,1.1			
		2	9,2.1			9,2.1		6,3.4					7,2.8			9,2.1		
	6	1					5,1.9				9,1.2		6,1.7					
		2	1				14,2.1					14,2.1		19,1.2			19,1.2	
6	3	1			5,1.6				6,1.4	9,1						5,1.6		
		2		12,0.6			9,0.8							12,0.6				

算法迭代过程收敛情况如图 3 所示。

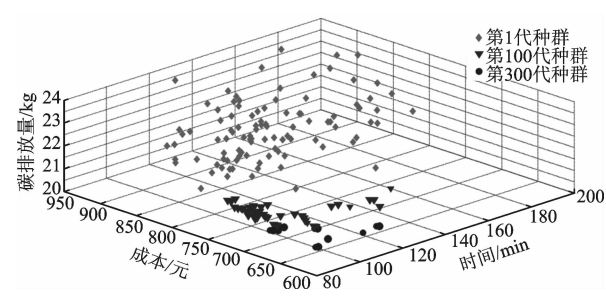


图 3 种群迭代过程目标收敛图

通过计算,得到包含 4 种刀具配置方案的帕累托最优解集。为实现各目标值的协调优化,提出解个体综合评价指标

$$S^{\text{ind}} = \sum_{x=1}^3 \frac{O_x^{\text{ind}} - O_x^{\text{all}}}{O_x^{\text{all}}} \tag{18}$$

式中: O_x^{ind} 为解个体 ind 的第 x 个目标值; O_x^{all} 为最优解集中所有解个体第 x 个目标的最优值。

选择帕累托最优解集中综合评价指标最小的解个体,得到满足寿命约束的刀具调度甘特图如图 4 所示,其中数字分别为工件/工序/工步。由调度甘特图可知,每把刀具的总加工时间均在其可用寿命范围之内。在此优化调度方案下,所有工件的最迟完工时间为 100.3 min,加工成本为 657.7 元,加工过程的综合碳排放为 20.3 kg。

为分析此刀具多目标调度数学模型的协调优化性能,将本文模型得出的最优方案 1 与仅考虑完工时间的计算模型得出的最优方案 2 进行对比,见表

6。相较于方案 2,方案 1 虽然在完工时间上有所延长,但加工成本、碳排放两个指标分别降低了 21.8%与 14%。由此可知,本文提出的刀具调度数学模型和解算方法可有效解决多目标的协同优化问题,实现了综合目标最优。

表 6 两种方案调度结果对比表

方案	完工时间/min	成本/元	碳排放/kg
1	100.3	657.7	20.3
2	72.3	840.6	23.6

4 结束语

刀具的合理利用是制造车间生产管理的关键因素,对其使用过程诸多目标及影响因素进行综合考虑才能产生高效优化的配置方案。本文提出的综合任务完工时间、加工成本及碳排放的刀具调度模型,可以有效解决车间刀具调度问题,贴合低碳制造的发展需求。同时,针对多目标问题求解中的刀具寿命约束,设计了改进 NSGA-Ⅱ 算法,以在种群进化过程中维持一定比例的不可行解,有效提高了对可行优化解的全局搜索能力。实例验证表明,本文提出的刀具多目标调度数学模型和改进 NSGA-Ⅱ 算法,能有效解决低碳制造环境下刀具资源受限的工件、机床和刀具之间的优化配置问题。后期工作将在已有研究基础上,针对数控机床/加工中心,重点引入机床刀库容量、工步并行加工等约束,研究其刀具调度模型和算法,为车间实际生产提供更为有效

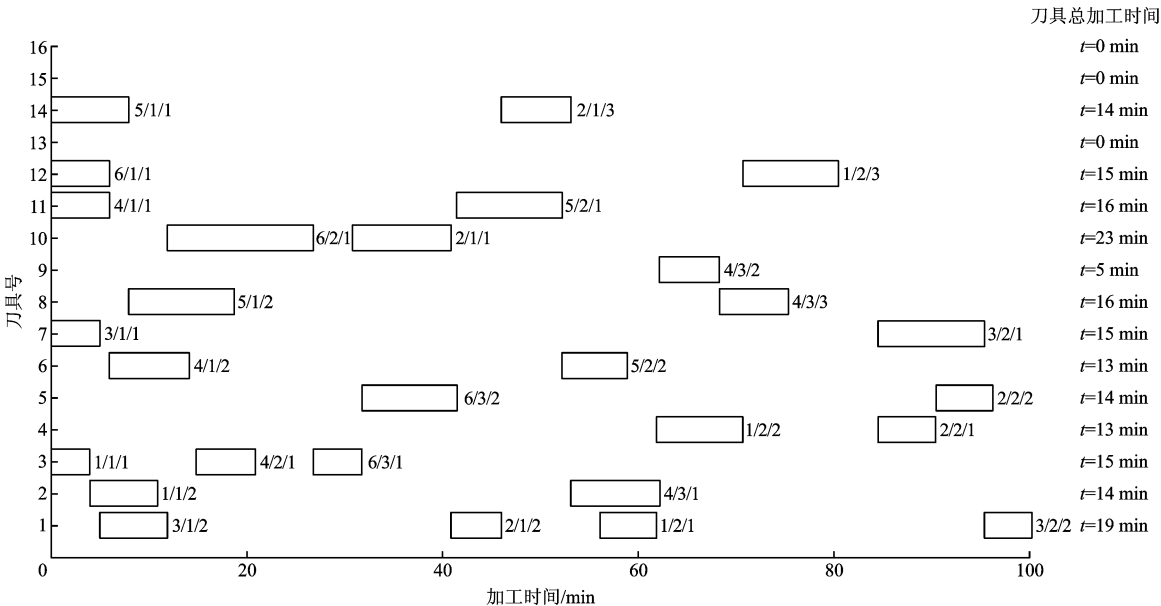


图 4 刀具调度甘特图

的刀具配置方案。

参考文献:

- [1] 刘献礼,陈涛. 机械制造中的低碳制造理论与技术 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(1): 1-8.
LIU Xianli, CHEN Tao. Theory and technology of low-carbon manufacturing in machinery manufacturing [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(1): 1-8.
- [2] LIU Xiaolong, LIU Zhijie, LIN Chengxin, et al. Carbon emission modeling and analysis in manufacturing process for numerical control machine tools [J]. Journal of Donghua University(English Edition), 2014, 31(6): 827-830.
- [3] GONZALEZ F. A methodology for cutting-tool management through the integration of CAPP and scheduling [J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(6): 1685-1706.
- [4] VEERAMANI D, UPTON D M, BARASH M M. Cutting-tool management in computer-integrated manufacturing [J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 1992, 4(3): 237-265.
- [5] KUMAR N S, SRIDHARAN R. Simulation modelling and analysis of part and tool flow control decisions in a flexible manufacturing system [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(4/5): 829-838.
- [6] 边培莹. PSO 算法在 FMS 刀具可复用调度中的应用与仿真 [J]. 机械设计与制造, 2012(3): 76-78.
BIAN Peiying. Application and simulation of PSO in FMS based on tools reusable scheduling [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(3): 76-78.
- [7] 周光辉, 苗发祥, 李彦广. 数控加工中心任务与刀具集成调度模型及改进自适应遗传算法 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(12): 1-7.
ZHOU Guanghui, MIAO Faxiang, LI Yanguang. Job and tool integrative scheduling model in CNC machining center and improved adaptive genetic algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(12): 1-7.
- [8] UDHAYAKUMAR P. Sequencing and scheduling of job and tool in a flexible manufacturing system using ant colony optimization algorithm [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(9): 1075-1084.
- [9] SADRZADEH A. Knowledge-based genetic algorithm for dynamic machine-tool selection and operation allocation [J]. Arabian Journal for Science and Engineer-

ing, 2014, 39(5): 4315-4323.

- [10] SETIAWAN A, WANGSAPUTRA R, MARTAWIRYA Y Y, et al. An FMS dynamic production scheduling algorithm considering cutting tool failure and cutting tool life [EB/OL]. [2017-01-14]. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1141/012052/pdf>.
- [11] 曹华军, 李洪丞, 杜彦斌, 等. 低碳制造研究现状、发展趋势及挑战 [J]. 航空制造技术, 2012(9): 18-23.
CAO Huajun, LI Hongcheng, DU Yanbin, et al. Current situation and development trend of low-carbon manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(9): 18-23.
- [12] 刘飞, 徐宗俊, 但斌, 等. 机械加工系统能量特性及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 20-45.
- [13] 李聪波, 崔龙国, 刘飞, 等. 基于广义边界的机械加工系统碳排放量化方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(9): 2229-2236.
LI Congbo, CUI Longguo, LIU Fei, et al. Carbon emissions quantitative method of machining system based on generalized boundary [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(9): 2229-2236.
- [14] 林丹, 李敏强, 寇纪淞. 基于遗传算法求解约束优化问题的一种算法 [J]. 软件学报, 2001, 12(4): 628-632.
LIN Dan, LI Minqiang, KOU Jisong. A GA-based method for solving constrained optimization problems [J]. Journal of Software, 2001, 12(4): 628-632.
- [15] KALYANMOY D, MAYANK G. A combined genetic adaptive search (geneAS) for engineering design [J]. Computer Science and Informatics, 1996, 26(4): 30-45.

[本刊相关文献链接]

- 李晓娟, 孙文磊, 袁逸萍, 等. 扰动环境下作业车间网络多瓶颈识别方法研究. 2016, 50(12): 64-72. [doi:10.7652/jxtxb201612011]
- 赵博选, 高建民, 陈琨. 求解多目标柔性作业车间调度问题的两阶段混合 Pareto 蚁群算法. 2016, 50(7): 145-151. [doi:10.7652/jxtxb201607022]
- 刘香浪, 张英杰, 李云龙, 等. 面向低碳制造的切削液供给系统优化研究. 2016, 50(2): 91-97. [doi:10.7652/jxtxb201602016]
- 喻明让, 张英杰, 陈琨, 等. 考虑调整时间的作业车间调度与预防性维修集成方法. 2015, 49(6): 16-21. [doi:10.7652/jxtxb201506003]

(编辑 杜秀杰)