

一种面向绿色制造的多目标车间调度方法

刘清涛,蔡宗琰,刘晓婷,咎杰

(长安大学 工程机械学院,陕西 西安 710064)

摘要:提出了一种新的面向绿色制造的多目标车间调度方法,通过将调度目标分解为竞争性指标和可持续性指标,分别建立了竞争性指标的调度模型和可持续性指标的评价模型,并基于改进的遗传算法求解出多组满足竞争性指标的 Pareto 最优解;然后从这些解中模糊优选出可持续性指标值最好的协调解,即为所求的绿色调度方案。实例研究表明,该方法在保证生产效益的前提下,能够使制造过程的资源消耗和环境影响最小,有效地解决了绿色制造中的多目标调度优化问题。

关键词:机械工程;绿色制造;多目标;遗传算法;模糊优选

中图分类号:TH166 **文献标志码:**A

Multi-objective optimization for job shop scheduling in green manufacturing

LIU Qing-tao, CAI Zong-yan, LIU Xiao-ting, ZAN Jie

(School of Engineering Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: A new multi-objective optimization for job shop scheduling in green manufacturing was put forward. Firstly, the scheduling objectives were decomposed into competitiveness indices and sustainability indices, and mathematical models were established for both of them separately. Secondly, the multi-group Pareto optimal solutions based on improved genetic algorithm were solved to meet the competitive index, from which the best compromise solution of sustainability indices were selected by fuzzy evaluation and the green scheduling solution was finally established. A case study shows that the proposed method not only ensures production efficiency, but also minimize resource consumption and environmental impact in manufacturing process, and can solve multi-objective optimization problem in green manufacturing effectively. 1 tab, 2 figs, 9 refs.

Key words: mechanical engineering; green manufacturing; multi-objective; genetic algorithm; fuzzy evaluation

0 引言

随着资源危机和环境污染问题的日益突出,绿色制造逐渐受到人们的重视,绿色制造是实现经济发展方式转变的重要举措。制造车间作为实施狭义

绿色制造的物理空间系统,能将加工资源转变为成品或半成品,同时产生资源消耗和环境影响。与传统制造相比,绿色制造对制造工程提出了更高的要求,不仅考虑成本、时间和质量等竞争性因素,更加关注资源、环境等可持续性因素。目前,国内外对绿

色制造的研究主要集中在两大方面:制造过程中环境影响和资源消耗的各种因素分析;考虑环境影响和资源消耗的工艺规划,而对于作为生产制造关键技术之一的车间调度研究较少^[1-4]。文献[5]针对连续性制造系统,提出一种综合考虑生产计划和废物流最小化的生产调度优化方法;文献[6]建立了面向绿色制造的 Petri 网模型,并通过遗传算法和模拟退火算法相结合的混合算法对其优化求解;文献[7]提出了面向绿色制造的机械加工系统优化调度模型,并以能量消耗和加工时间为目标对并行的调度问题进行了研究。总结相关文献发现,现有的绿色调度研究是将调度的各目标加权归一为一个目标处理,或者仅选取其中的部分目标作为优化对象,但由于绿色调度考虑的目标较多,而且各目标之间存在复杂的联系,约束条件繁杂,假设又过多,与实际情况的偏差较大,因而在实际生产中很难实施。为此,本文提出了一种实用的面向绿色制造的多目标车间调度优化方法。

1 面向绿色制造的车间调度优化策略

2008 年 9 月, Jovane 等人联合在 CIRP 上提出竞争性可持续制造(competitive sustainable manufacturing, CSM)的概念^[8]。本文借鉴这一思想,将制造的决策目标分为:竞争性指标,如时间、成本和质量等;可持续性指标,如资源和环境等。绿色制造是综合考虑这 2 种指标的新型制造模式。

(1)竞争性指标(生产周期 T 、生产成本 C 、加工质量 Q)。生产周期用工件的最大完成时间来量度;生产成本包括与机床相关的成本,提前完工的库存成本,延期完工的惩罚成本,本文只考虑与机床相关的成本;加工质量通常用加工后的工件废品率来表示,本文假设各机床加工的产品均符合质量要求。生产周期越短,加工成本越低,加工质量越高,企业的竞争力就越强。

(2)可持续性指标(资源消耗 R 、环境影响 E)。已有的研究表明,同一工件在不同机床上加工所消耗的资源是不同的,资源消耗包括切削液消耗、能量消耗和材料消耗等;生产过程中产生的副产品,如废气、废液、噪声、废渣、加工安全性等对环境造成很大影响,对劳动者的身心健康造成很大危害。绿色调度正是通过调度优化使制造过程的资源消耗和环境影响降到最低,从而实现制造业的可持续性发展。

绿色调度追求的目标众多,涉及的约束因素也很复杂,包括零件加工质量约束、各工序间的先后顺序约束、各机床资源环境属性约束、物料运输和工人熟练程度约束等,这些约束之间存在复杂的直接和间接联系,而且很多因素难以量化处理,如加工质量、废气污染程度、加工安全性等。基于此,本文提出基于改进的遗传算法和模糊评价相结合的绿色调度策略:先对竞争性目标进行优化,得到 Pareto 多解方案,然后对其优化结果进行资源环境属性模糊评价,从而得到绿色调度方案,如图 1 所示。

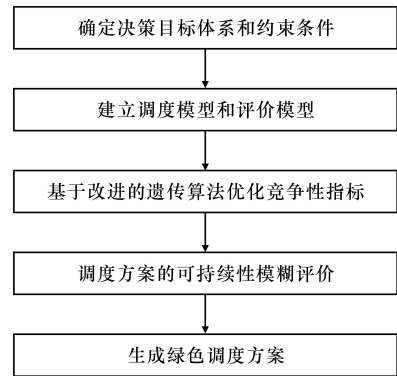


图 1 绿色调度流程

这种异步处理的方法不仅使优化过程复杂性大为降低,而且可以借鉴传统的车间调度研究成果,同时在系统上容易实现(增加资源环境属性评价模块),具有很强的实用价值。

2 绿色调度模型及算法

2.1 绿色调度模型

2.2.1 竞争性目标函数及约束条件

假设备选的加工设备的加工质量均能达到要求,不同工序的加工辅助时间不同,被计入机器加工时间之中,生产周期用工件的最大完工时间量度,生产成本用加工成本和储存成本之和来量度,计算式为

$$\min f_t = \min(\max_{j=1}^{n_j} T_{ijk} X_{ijk})$$

$$\min f_c = \min \sum_k^m \sum_j^{n_j} \sum_i^{n_i} (C_{ijk} X_{ijk} + (T_{Sjk} - T_{Ei(j-1)k}) C_{Sjk} X_{ijk}) \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n_i; j = 1, 2, \dots, n_j; k = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m X_{ijk} = 1, \text{ 且 } X_{ijk} = 1 \text{ 或 } 0 \quad (3)$$

$$T_{Sjk} \geq \max(T_{Ei(j-1)k}, T_{Sk}) \quad (4)$$

利用层次分析法求出 f_t 和 f_c 的权重 ω_t 和 ω_c , 那么最终求出的 Pareto 最优解中第 q 个调度方案的竞争性指标值为

$$C^q = \omega_t f_t^q + \omega_c f_c^q \quad q = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: f_t 为生产周期; f_c 为生产成本; T_{ijk} 为工件 i 的第 j 道工序在机床 k 上的加工时间; T_{Sijk} 为工件 i 的第 j 道工序在机床 k 上加工的开始时间; $T_{E(ij-1)k}$ 为工件 i 的第 $j-1$ 道工序在机床 k 上加工的结束时间; C_{ijk} 为工件 i 的第 j 道工序在机床 k 上的加工费用; C_{Sij} 为工件 i 的第 j 道工序在机床 k 上加工之前的储存费用; T_{Sk} 为机床 k 在加工工件 i 的第 j 道工序前的闲置开始时间; X_{ijk} 为工件 i 的第 j 道工序是否选择机床 k 的决策变量, 当 X_{ijk} 值为 1 时, 表示被选中, 当 X_{ijk} 值为 0 时, 表示未选中; C^q 为第 q 个调度方案的竞争性指标属性值; f_t^q 为第 q 个调度方案的生产周期指标值; f_c^q 为第 q 个调度方案的生产成本指标值。

2.2.2 调度方案的资源环境属性评价

大量研究表明, 多目标优化产生的解并非单一解, 而是一组 Pareto 最优解集, 而最终选择何种决策结果由决策者的偏好决定^[9]。本文提出绿色调度即是按照绿色制造的资源环境属性来决策。

首先, 根据交货期设定一动态阈值 ϵ , 以保证对竞争性目标的调度结果是一组 Pareto 最优或次优解集。假设最终选择的达到阈值要求的竞争性调度方案有 n 个, 那么每一个调度方案都对应一个机床集, 其所有机床消耗的资源环境属性构成调度方案的资源环境消耗矩阵为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} o_{11} & \cdots & o_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ o_{m1} & \cdots & o_{mr} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ m_{m1} & \cdots & m_{mr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathbf{P} 为加工工序矩阵; \mathbf{M} 为加工机床调度矩阵; o_{ij} 为工件 i 的第 j 道工序; m_{ij} 为工件 i 的第 j 道工序选用的加工机床。

资源环境属性又由多重属性值构成, 如环境影响属性包括噪声污染、切削液烟雾和安全性等; 资源消耗属性包括切削液消耗、能量消耗和材料消耗等。故矩阵中的资源环境属性由分指标组成, 表示为: $\mathbf{R}(r_1, r_2, \dots, r_r)$ 、 $\mathbf{E}(e_1, e_2, \dots, e_e)$, 其中, r 、 e 为分指标的数目。根据矩阵中的各调度方案中资源环境消耗数值, 计算每道工序的资源环境属性各分指标消耗值为

$$r_q^h = \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{i=1}^{n_i} r_{ijk}^h \quad h = 1, 2, \dots, r; \quad q = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$e_q^l = \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{i=1}^{n_i} e_{ijk}^l \quad l = 1, 2, \dots, e; \quad q = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中: r_q^h 为第 q 个调度方案的第 h 个资源属性的指标值; r_{ijk}^h 为工件 i 的第 j 道工序在机床 k 上的消耗的第 h 个资源属性的值; e_q^l 为第 q 个调度方案的第 l 个环境属性的指标值; e_{ijk}^l 为工件 i 的第 j 道工序在机床 k 上的消耗的第 l 个环境属性的值。

通过层次分析法计算各目标层的权重 $\omega(\omega_R, \omega_E)$ 、各指标层的权重 $\omega_r(\omega_r^1, \omega_r^2, \dots, \omega_r^r)$ 、 $\omega_e(\omega_e^1, \omega_e^2, \dots, \omega_e^e)$, 那么求出的 Pareto 最优解中第 q 个调度方案的可持续性指标值为

$$S^q = \omega_R \sum_{h=1}^r \omega_r^h r_q^h + \omega_E \sum_{l=1}^e \omega_e^l e_q^l \quad (9)$$

考虑调度方案的可持续性指标和竞争性指标, 最终的综合指标值为

$$f = \omega_c C^q + \omega_s S^q \quad q = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中: S^q 为第 q 个调度方案的可持续指标属性值; ω_c 为竞争性指标权重; ω_s 为可持续性指标权重; 在以上各式中如无明确说明, 各指标均为量纲一处理后的数值。

综合指标最小值对应的调度方案即为预求的绿色调度方案。

2.2 算法设计

在借鉴前人的研究成果基础上, 本文提出的基于改进的遗传算法和资源环境属性评价的方法生成绿色调度方案的具体步骤如下所述。

(1) 基于工序的染色体编码、种群初始化。一个染色体对应一个可行的调度方案, 编码方式是将每个染色体用 $n \times m$ 个代表工序的基因组成, 染色体中的数字代表零件, 数字在染色体中出现的顺序代表工序。设置好染色体后, 初始种群随机产生。

(2) 交叉、变异。变异操作是随机选中染色体中的部分基因互换; 交叉易产生非法染色体, 本文设置了交叉规则, 为便于说明, 以 4 个零件、每个零件 3 道工序为例, 根据上面的编码方法随机产生 2 个父代染色体, P_1 : [441233321241] 和 P_2 : [232341241234]。从左至右, 设前 5 个基因作为交叉基因, 随机将 4 台机器分为 2 组: Set1{1, 3}, Set2{2, 4}, 从左至右依次选择 P_1 中属于 Set1 的基因, P_2 中属于 Set2 的基因,

构成子代 C_1 ;同理,从左至右依次选择 P_1 中属于 $Set2$ 的基因, P_2 中属于 $Set1$ 的基因,组合成子代 C_2 。按照这种交叉规则构成的新一代个体为, C_1 : $[331244321241]$ 和 C_2 : $[132342142134]$ 。显然,新产生的这 2 个染色体均满足要求。

(3)适应度函数计算。首先将各目标的量纲统一,并作相应的协调处理,以使各分目标变化趋势一致,然后将加权求和的倒数作为适应度函数。各权值通过层次分析法来确定。

(4)选择。这里采用最常用的轮盘赌选择法,此处不再详述。

选择出来的适应度高的染色体,重复步骤(2)~(4),直至达到设定的遗传代数或最后的输出结果趋于稳定为止。

(5) 将最终得到的 Pareto 最优解集解码,解码采用优先选择最短加工时间的工序(shortest processing time first, SPT) 的启发式规则,这种规则已经被证实为求解最短生产周期的最佳规则。

(6)按照资源环境评价模型对求得的竞争性调度方案进行资源环境属性评价,生成绿色调度方案。

3 应用案例分析

在以上模型和算法的基础上,现以某工程机械零部件制造企业 4 工件、6 机床的作业调度进行研究,主要的加工数据见表 1。表 1 中资源消耗按照机床消耗的电能计算,机床的电能消耗由空载消耗、切削消耗和附加能耗组成,其中空载能耗占主导地位,这里选用空载能耗作为资源消耗的量度;电能消耗、切削液、噪音等由实际测量得到;切削回收、安全性等难以量化,采用模糊评价术语表示,评价指标见文献[5]。表中的各指标在计算时均经过量纲一处理,采用 Matlab7.0 实现上述算法。

经过多次优化,每次得到的 Pareto 解个数均在 10 个以上,取第 8 次运算结果,根据层次分析法确定的竞争性权重和可持续性权重分别为 0.667 和 0.333。选取 5 个最优竞争性调度方案,对其进行资源环境属性评价,最终得到的满意解为:生产周期 18,生产成本 106,资源消耗 42.95,环境影响 0.76,其对应的绿色调度方案机床调度甘特图如下页图 2 所示。

经过对竞争性调度方案的资源环境属性评价,最终求出的绿色调度方案在没有降低企业竞争力的

表 1 绿色调度信息

工件	工序	机床	竞争性指标			可持续性指标			
			时间	成本		资源消耗	环境影响		
				加工成本	储存成本	电能	噪音	切削回收	安全性
1	1-1	1	9.3	11.0	2	4.05	80.0	0.7	0.7
		2	6.0	8.0	2	3.25	79.8	0.7	0.7
		4	14.6	15.0	2	4.32	84.1	0.7	0.7
	1-2	3	6.0	7.5	1	2.36	79.3	0.9	0.9
		5	7.0	8.0	1	3.56	80.2	0.7	0.7
		6	9.0	9.5	1	2.35	88.5	0.5	0.5
	1-3	3	6.0	8.0	3	3.44	79.4	0.7	0.9
		5	7.0	6.5	3	4.32	78.5	0.7	0.7
		6	8.0	9.0	3	5.05	89.9	0.5	0.5
2	2-1	1	5.5	6.3	2	3.28	82.6	0.7	0.7
		4	7.0	8.5	2	3.55	76.3	0.7	0.7
		5	6.7	8.0	2	3.77	80.8	0.7	0.7
	2-2	1	4.0	6.0	1	4.21	81.2	0.7	0.7
		2	3.6	5.5	1	5.23	79.5	0.7	0.7
		5	6.0	7.0	1	3.21	80.5	0.7	0.7
	2-3	3	4.0	8.5	2	2.33	78.3	0.9	0.9
		4	7.0	8.0	2	3.45	81.4	0.7	0.7
		6	12.0	12.5	2	2.36	88.6	0.5	0.5
3	3-1	1	5.0	6.0	3	3.85	82.5	0.7	0.7
		2	6.0	7.0	3	4.35	81.6	0.7	0.7
	3-2	2	4.5	5.5	3	2.35	80.6	0.7	0.7
		4	3.0	4.5	3	3.35	78.8	0.9	0.9
		5	5.0	6.0	3	4.25	72.6	0.7	0.7
	3-3	3	13.0	14.0	2	2.65	77.8	0.9	0.9
		5	8.0	10.0	2	3.56	75.6	0.7	0.7
		6	12.0	13.5	2	3.25	88.4	0.5	0.5
	4	4-1	1	9.0	10.0	1	3.47	80.5	0.7
3			6.0	8.0	1	4.21	76.5	0.7	0.7
5			10.0	11.0	1	2.69	82.5	0.7	0.7
4-2		2	6.3	8.0	2	4.32	82.6	0.7	0.7
		4	3.0	4.5	2	4.23	80.3	0.7	0.7
		6	7.0	4.2	2	6.22	76.3	0.5	0.5
4-3		1	2.0	3.0	3	2.26	81.5	0.7	0.7
		3	3.5	4.5	3	2.38	76.3	0.9	0.9
		6	5.0	4.2	3	2.45	89.5	0.5	0.5

前提下,节约了资源,减少了环境污染。从优化后的调度方案可以看出,机床 6 因设备陈旧、加工耗时长、环境污染严重和资源消耗大,故在调度方案中并未安排使用;而机床 3 因采用新技术,加工时间短、资源消耗和环境污染小,虽然加工费用偏高,但综合评价后依旧采用较多,设备利用率最高。

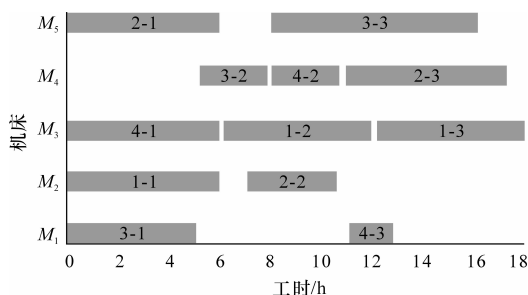


图2 绿色调度甘特图

4 结 语

(1)现有的绿色调度是将质量、成本、时间、资源和环境同时作为优化目标,各目标相互冲突,不能同时达到最优,只能在各目标间进行协调权衡折衷处理,这种方法必然影响竞争性指标的优化,影响企业实施绿色调度的积极性;本文是在竞争性指标最优的基础上,对其进行资源环境属性评价,以产生绿色调度方案,在保证企业经济效益的同时又获得了社会效益。

(2)制造车间的资源和环境属性种类较多,有的难以量化,而且与竞争性指标存在错综复杂的联系,现有的绿色调度方案由于其计算复杂性,使得其对资源环境属性简单化处理,导致与实际生产不符;本文借鉴传统调度方法和模糊评价方法,将二者集成起来,不仅体现现代集成制造的思想,而且更加符合车间实际情况。

(3)实施现有绿色调度方法需要投入大量的物力和财力,重新建立调度模型,制定调度算法,开发相应的系统;而本文提出的方法,只需在原系统中加入调度方案的资源环境属性评价模块即可。

参考文献:

References:

[1] Dahmus J B, Gutowski T G. An environmental analysis of machining[J]. Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo, 2004, 12(42): 1-10.

[2] William F G, Stephen B, Patrick P. Intelligent manufacturing and environmental sustainability[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2007, 23(6): 704-711.

[3] 谭显春,刘 飞,曹华军. 绿色制造的一种工艺路线决策模型及其求解算法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 154-159.

TAN Xian-chun, LIU Fei, CAO Hua-jun. Decision-making model for process route in green manufacturing and its algorithms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 154-159.

[4] Bennett D P, Yano C A. A decomposition approach for an equipment selection and multiple product routing problem incorporation environmental factors[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 15(6): 643-664.

[5] Berlin J, Sonesson U, Tillman A M. A life cycle based method to minimize environmental impact of dairy production through product sequencing[J]. Journal of Cleaner Production, 2005(7): 1-10.

[6] 藩全科,左朝凤,朱剑英. 面向绿色制造模式的 Petri 网模型及优化算法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 48-53.

FAN Quan-ke, ZUO Chao-feng, ZHU Jian-ying. Petri net based model for job shop scheduling problem in green manufacturing and its hybrid metaheuristic search[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 48-53.

[7] HE Yan, LIU Fei, CAO Hua-jun, et al. A bi-objective model for the job-shop scheduling problem to minimize both energy consumption and makespan[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(S2): 167-171.

[8] Jovane F, Yoshikawa H, Alting L, et al. The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2008(57): 641-659.

[9] 吴秀丽,孙树栋,余建军,等. 多目标柔性作业车间调度优化研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(5): 731-736.

WU Xiu-li, SUN Shu-dong, YU Jian-jun, et al. Research on multi-objective optimization for flexible job shop scheduling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(5): 731-736.