

DOI:10.13196/j.cims.2015.04.017

低碳策略下的多目标柔性作业车间调度

蒋增强, 左 乐

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘 要:为解决低碳策略下多目标柔性作业车间调度问题,在深入分析柔性作业车间多目标调度研究现状和不足的基础上,结合基于设备状态—能耗曲线的低碳策略,提出包括能源消耗、最大完工时间、加工成本和成本加权加工质量的多目标柔性作业调度模型。针对上述模型,设计了基于血缘变异的改进非支配排序遗传算法,该算法根据计算交叉染色体的血缘关系确定变异率,优化了交叉和变异策略,解决了算法的早熟问题。针对具体实例,构建了调度模型和算法,计算结果验证了算法的可行性和有效性。

关键词:多目标调度;柔性作业车间;改进非支配排序遗传算法;低碳策略;血缘变异

中图分类号:TH18 **文献标识码:**A

Multi-objective flexible job-shop scheduling based on low-carbon strategy

JIANG Zeng-qiang, ZUO Le

(School of Mechanical, Electronic & Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To solve multi-objective Flexible Job-shop Scheduling Problem (FJSP) under low-carbon strategy, by analyzing the current research status and insufficiency, a multi-objective FJSP optimization model based on low-carbon strategy of equipment state-energy-consumption curve was put forward, in which the energy consumption, makespan, processing cost and cost-weighted processing quality were considered. According to above model, a modified Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) with blood variation was designed. In this algorithm, the chromosome mutation rate was determined after calculating the blood relationship between the two cross chromosomes, the crossover and mutation strategy of NSGA-II was optimized and the prematurity of population was overcome. The performance of the proposed model and algorithm were evaluated through a case study, and the results demonstrated the efficiency and feasibility of the proposed model and algorithm.

Key words: multi-objective scheduling; flexible job-shop; non-dominated sorting genetic algorithm; low-carbon strategy; blood variation

0 引言

随着生产力的不断发展,人类的生活水平不断提高,但是也导致能源消耗不断增加和自然环境破坏日益严重。为了实现可持续发展,在努力提高生产效率的同时必须考虑生产对自然环境的破坏,其中能耗是一个重要的方面。在实际生产中,调度是影响制造业生产效率、质量、成本等的关键因素^[1],

调度方案会对加工过程中的资源消耗和环境排放等产生影响^[2]。因此,车间调度要求在保证产品加工质量、时间和成本的同时,还要合理配置加工设备,优化设备运行方案,最大限度地减少能耗。

柔性作业车间调度问题(Flexible Job shop Scheduling Problem, FJSP)对传统的作业车间调度问题进行了扩展,更符合实际的生产环境^[3]。FJSP通常涉及多个目标的同时优化,并且优化目标不一

收稿日期:2014-02-18;修订日期:2014-05-26。Received 18 Feb. 2014; accepted 26 May 2014.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012JBM090)。**Foundation item:** Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China(No. 2012JBM090).

致,因此多目标优化的结果往往不是一个最优解,而是符合 Pareto 最优解概念的一组解,称为 Pareto 最优解^[4]。

多目标优化模型一般采用单目标转化法、随机权重目标法以及基于 Pareto 的优化方法^[5-9]。其中基于 Pareto 的优化方法能够在一次优化过程中得到近似 Pareto 最优解集,与实际调度决策问题一致,因此受到研究者的青睐^[10-11]。具有代表性的算法包括:①遗传算法代表,例如,FONSECA 等^[12]提出的多目标遗传算法(Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)、HORN 等^[13]提出的小生境遗传算法(Niched Pareto Genetic Algorithm, NPGA)、SRINIVAS 等^[14]提出的非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA)以及 DEB 等^[15]提出的改进的非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II);②进化算法类,例如,KNOWLES 等^[16]提出的 Pareto 存档进化策略(Pareto Archived Evolutionary Strategy, PAES)、ZITZLER 等^[17]提出的强度 Pareto 进化算法(Strength Pareto Evolutionary Algorithm, SPEA)和 SPEA2、曾三友等提出的正交多目标进化算法(Orthogonal Multi-object Evolutionary Algorithm, OMOEA)^[19]以及郑金华提出的基于密度的多目标进化算法(Density based Multi-object Evolutionary Algorithm, DMOEA)^[4];③包络选择算法类,例如,CORNE^[18]提出的 Pareto 包络选择算法(Pareto Envelope-based Selection Algorithm, PESA)和 PESA-II。其中,NSGA-II 由于具有良好的分布性和较快的收敛速度被广泛应用,但存在运算复杂度高、易早熟等不足。

传统的 FJSP 研究的优化目标一般涉及生产时间和生产成本等。如张超勇等^[1]考虑最大完工时间、交货拖期、生产成本和设备负荷等目标,鞠全勇等^[8]考虑生产时间、生产成本和设备利用率等目标;吴秀丽等^[9]考虑最大完工时间、交货期满意度、生产成本和设备利用率等目标;李俊青等^[10]考虑最大完工时间和设备负荷等目标。然而随着社会节能环保意识的加强,降低能耗、实现低碳生产也逐步成为调度优化的目标,如 Fang 等^[20]提出同时考虑调度生产周期、最大功耗和碳排放量的数学规划模型,实现了优化调度;Luo 等^[21]针对流水车间,提出考虑分时电价的优化算法;Dai 等^[22]提出流水车间平衡时间和能耗的优化算法。然而上述研究鲜有基于设备

能耗分布特征的调度研究。

综上所述,本文在考虑设备状态—能耗分布曲线的低碳策略的基础上,根据现实生产环境,建立有利于降低能耗的设备配置和运行策略,构建以加工时间、成本、质量和能耗为指标的多目标优化调度模型;针对所构建的模型,建立基于血缘变异的 NSGA-II 解算法,优化了 NSGA-II 的交叉和变异策略,避免了算法的早熟。

1 问题描述

多目标优化的 FJSP 可以描述为:设有 m 台机器和 n 个工件,每个工件包含若干工序,工件 i 包含 q_i 道工序;每道工序可在若干台机器上加工, a_{ij}^k 取 0 或 1,表示工件 i 的第 j 道工序能否在机器 k 上加工, O_{ij}^k 表示工件 i 的第 j 道工序在设备 k 上加工, b^k 取 0 或 1,表示设备 k 是否必须停机更换工件; ST_{ij}^k 和 UT_{ij}^k 分别表示工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上进行加工前后的装夹和卸夹持续时间;各个工序的加工成本、时间、质量与机器性能相关, S_{ij}^k 为工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上的开始加工时间(即开始装夹的时间); T_{ij}^k 为工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上加工的持续时间; F_{ij}^k 为工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上结束加工的时间(即结束卸夹的时间), $F_{ij}^k = S_{ij}^k + ST_{ij}^k + T_{ij}^k + UT_{ij}^k$ 。调度目标是在满足以下约束条件的基础上,确定工件的加工顺序和加工机器,并使各个调度指标达到整体最优^[23-25]:

- (1) 每台机器一次只能加工一个工件。
- (2) 所有机器在零时刻均可用。
- (3) 加工过程不能中断。
- (4) 工件加工工艺均确定,所有工件的优先级相同。
- (5) 相同工件的工序间存在先后约束,工序 $j-1$ 完成后才能开始工序 j ^[23-26]。

2 基于设备状态—能耗分布曲线的低碳策略

机械加工设备根据其运行状态分为停止、启动、空载和加工四个状态,不同状态的能耗特征不同,文献^[27]经过大量实验,得出一般机械加工设备的状态—能耗分布曲线,如图 1 所示。由图 1 可知,特定设备的能耗均可以用以下参数表示: e_s^k 表示设备 k 启动阶段的平均能耗, t_s^k 表示设备 k 的启动时间, $E_s^k = e_s^k \times t_s^k$ 表示设备一次启动的能耗; e_k^k 表示设备 k 空载时的平均能耗; e_{ij}^k 表示设备 k 加工第 i 个工件

第 j 道工序的平均能耗, t_{ij}^k 表示其时间消耗, $E_{ij}^k = \bar{e}_{ij}^k \times t_{ij}^k$ 表示设备 k 加工工件 i 第 j 道工序的能耗。

因此, $E_{\text{total}} = \sum E_s + \sum E_b + \sum E_e$ 表示整个生产过程的能耗总量, 即所有设备启动能耗、加工能耗与空载能耗之和, 故在完成最终加工任务的基础上, 要想最小化能耗, 必须合理安排以下两方面工作:

(1) 工序的加工机器, 因为不同机器加工不同工序, 所以消耗的能源也不同。

(2) 设备的启停, 假设设备 k 在加工不同工序间存在间隔时间 T_v , 在此时间内采用空载运行还是停机处理将直接影响能源的消耗, 当 $T_v \leq \bar{e}_s^k \cdot t_s^k / \bar{e}_e^k$ 时, 采用空载运行比较节能, 当 $T_v > \bar{e}_s^k \cdot t_s^k / \bar{e}_e^k$ 时, 采用停机处理比较节能。

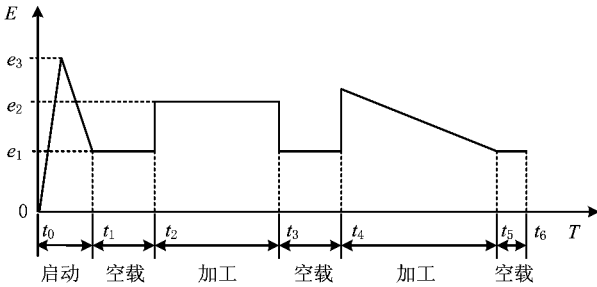


图1 设备状态—能耗曲线

3 调度模型

调度模型考虑生产成本、时间、质量和能源消耗四个调度优化目标集 (T, C, Q, E) , 其优化目标可以表示为

$$\min(T, C, Q, E). \quad (1)$$

式中 T, C, Q 和 E 分别表示所有工序总的加工时间、成本、质量和能源消耗。

下面分别给出实际生产中各优化目标的计算方法。

(1) 加工时间 加工时间用最大完工时间表示: $T = \max(F_{ij}^k) = \max(S_{ij}^k + ST_{ij}^k + T_{ij}^k + UT_{ij}^k)$ 。

(2) 加工成本 加工成本包括材料成本和加工工序费用, 该费用与调度方案直接相关^[25]。其中:

1) 材料成本 $MC = \sum_{i=1}^n mc_i$, mc_i 表示第 i 个工件的原材料成本。

2) 工序费用 $PC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} O_{ij}^k (ST_{ij}^k + T_{ij}^k + UT_{ij}^k) pc_k$, pc_k 为设备 k 单位时间的加工费用, 包括

人员成本。

因此, 最终加工成本为 $C = MC + PC = \sum_{i=1}^n mc_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} O_{ij}^k (ST_{ij}^k + T_{ij}^k + UT_{ij}^k) pc_k$ 。

(3) 加工质量 一台机器上加工一道工序的加工质量高低可由该工序的不合格品率来反映。不合格品率越高, 表明工序加工质量越不稳定。另外, 随着工件加工的不断进行, 工件的成本也不断增加, 如果产品在后期出现加工缺陷, 则损失的成本高于前期。因此, 在表征工序加工质量时, 采用工序质量成本加权不稳定指数 L_{ij}^k 来表示。

第 i 个工件的前 H 道工序总的加工费用

$$PC_i^H = \sum_{j=1}^H O_{ij}^k (ST_{ij}^k + T_{ij}^k + UT_{ij}^k) pc_k, \\ L_{ij}^k = (mc_i + PC_i^j) q_{ij}^k.$$

式中: q_{ij}^k 为 k 设备加工第 i 个工件的 j 道工序的不合格品率; $mc_i + PC_i^j$ 为质量不稳定指数的成本权重, 表明工件成本越大, 其质量越重要, 产品加工工序越靠后, 其加工质量也越重要。

调度方案质量成本加权不稳定指数

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} O_{ij}^k L_{ij}^k.$$

(4) 能源消耗 不同的设备能耗标准不同, 完成相同工序的能耗也不同。因此, 能源消耗采用能耗综合指数 E 表示, $E = \sum E_s + \sum E_b + \sum E_e$, 即完成加工任务所需的所有设备启动能耗、加工能耗与空载能耗之和。

4 基于血缘变异的 NSGA-II 调度算法

NSGA-II 是在 NSGA 的基础上, 对非支配解排序、精英选择策略等进行改进形成的多目标问题求解算法, 具有较快的收敛速度, 被广泛应用, 但也存在种群多样性不足的问题^[3]。本文通过改进 NSGA-II 的交叉和变异策略, 根据计算染色体的血缘关系确定变异率, 提出血缘变异 NSGA-II, 避免算法提前收敛于局部最优解。

4.1 编码和解码

FJSP 的编码一方面要给出工序加工的先后顺序, 另一方面还需要为各个工序选择合适的机器, 因此仅采用基于工序的编码难以得到问题的解。

如图 2 所示, 编码由两部分组成: ①基于工序的编码, 用来确定工序加工的先后顺序; ②基于机器的

编码,用来选择每道工序的加工机器。因此,图 2 中的染色体表示有 3 个工件共 8 道工序,在 5 个设备上加工,该染色体表示的加工序列为 $O_{21}^1, O_{11}^1, O_{31}^1, O_{12}^2, O_{32}^2, O_{22}^2, O_{13}^3, O_{23}^3$ 。

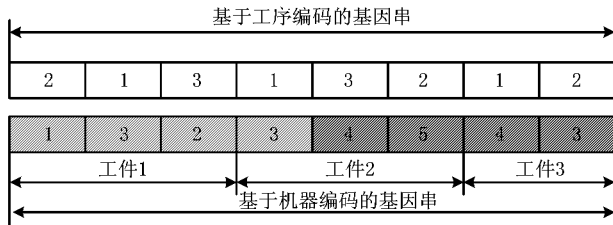


图2 基于工序和机器的双层整数编码

解码是根据个体染色体基于工序的编码得到实际的加工顺序,并根据个体基于机器的编码找出相应工序对应的加工设备。通过解码,图 2 所示的染色体表示设备 1 加工 O_{11} ,设备 2 加工 O_{13} ,设备 3 依次加工 O_{21}, O_{12}, O_{32} ,设备 4 依次加工 O_{31}, O_{22} ,设备 5 加工 O_{23} 。图 3 所示为图 2 表示的染色体通过解码后生成的甘特图,图中 R_1, R_2 和 R_3 分别为工件 1、工件 2 和工件 3 的物料到达时间。其解码过程包括以下步骤:

(1)根据到达时间确定第一道工序的加工时间,即设备 1,3,4 分别在 R_1, R_2 和 R_3 时间点开始加工工件 1,2,3。

(2)根据工序间的约束关系,安排其他各工序的加工时间和加工机器。

(3)根据设备状态—能耗曲线与设备装夹、卸夹时间,合理安排设备启停,以实现调度方案能耗最小化。

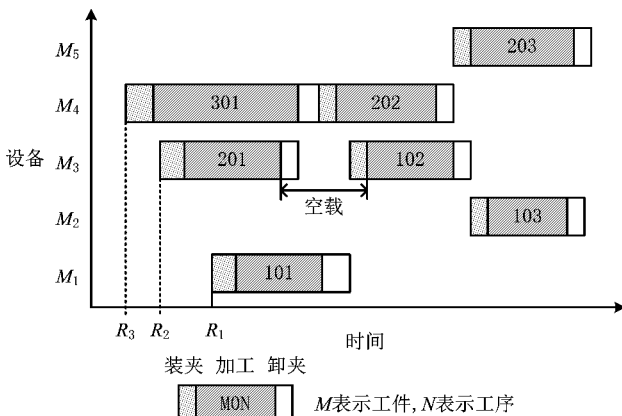


图3 解码所得甘特图

4.2 选择操作

相对于单目标优化问题,多目标优化问题的选择操作更加复杂,它一般包括个体的等级排序和相

同等级非支配解的选择策略。

4.2.1 个体的等级排序

目前 NSGA 研究中得到普遍认同的 Pareto 排序法主要有递归的排序方法^[28]和改进的快速排序方法^[4]两种。针对这两种方法,文献^[4]做了大量的比较实验,结果表明:当目标数为 2 时两者的运行时间没有多少差异,但当目标数大于 2 时,后者具有最少的 CPU 时间。因此,本文采用改进的快速排序算法。

4.2.2 同等级非支配解的选择策略

对于非支配排序后等级不同的个体,优先选择等级较低的个体参与进化。当需要从同一等级下选择个体时,需要采用一定的策略来选择个体,以保证进化群体的多样性。目前,比较常用的策略有小生境技术、信息熵、聚集密度、网格和聚类分析等。本文采用聚集密度策略,虽然该策略的计算复杂性略高,但从宏观上表征群体的多样性和分布性,也能很好地体现个体之间的相互关系,可以在进化过程中对群体进行调控^[4],该选择策略可以通过计算个体之间的聚集距离来表示个体之间的聚集密度。设 $P[i]_{distance}$ 为个体 i 的聚集距离, $P[i]^{fx}$ 为个体 i 在子目标 fx 的函数值,则一般情况下,当有 r 个子目标时个体 i 的聚集距离为

$$P[i]_{distance} = \sum_{k=1}^r (P[i+1]^{fx_k} - P[i-1]^{fx_k}) \quad (2)$$

为维持种群的多样性,聚集距离大的个体参与繁殖和进化的计划概率较高。

4.3 交叉和变异操作

血缘变异 NSGA-II 对 NSGA-II 的交叉策略进行改进,即在基因进行交叉之前,首先计算进行交叉的两个染色体的血缘关系,然后根据计算的血缘关系计算新产生染色体的变异率,最后根据该概率对交叉后的基因进行变异操作,从而避免算法的早熟。

4.3.1 基因近亲指数和变异概率的计算方法

近亲交叉容易使算法过早收敛,因此本文采用对不同血缘关系的子代染色体选择不同变异率的策略进行变异操作,假定待交叉的两个染色体的基因集合为 P_1 和 P_2 , n 为染色体中基因的总数, l 为两个染色体中相同基因位子基因值相同的基因个数, $s = l/n$ 为近亲指数, $v = s \times V_0$ 为变异指数,其中 V_0 为设定的初始变异率。

4.3.2 加工顺序的交叉策略

图 4 所示为加工顺序基因段的交叉过程,若 P_1

和 P_2 为两个父代染色体, 则 P'_1 和 P'_2 为交叉后产生的子代。具体交叉步骤如下:

步骤 1 将工件分成两个集合 J_1 和 J_2 , 假定分组结果为 $J_1 = \{1, 3\}, J_2 = \{2\}$ 。

步骤 2 将 P_1 中包含在 J_1 的工件复制到 P'_1 , P_2 中包含在 J_2 的工件复制到 P'_2 , 同时不改变基因的位置。

步骤 3 将 P_2 中包含在 J_2 的工件复制到 P'_1 , P_1 中包含在 J_1 的工件复制到 P'_2 , 同时不改变它们的次序。

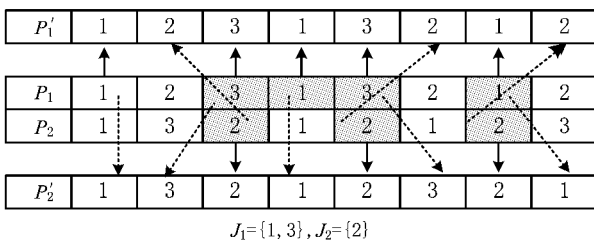


图4 加工顺序基因的交叉

4.3.3 机器分配的交叉策略

图 5 所示为机器分配的交叉操作, 假设 P_1 和 P_2 交叉形成 P'_1 和 P'_2 。具体交叉步骤如下:

步骤 1 产生由 0, 1 组成且与染色体等长的集合 R , 假定 $R = \{0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0\}$ 。

步骤 2 依次在 P_1 和 P_2 中选出与 R 中 1 元素对应的工序, 如图 5 所示的灰色部分。

步骤 3 将灰色部分基因的机器相互交叉, 其他部分保留到子代, 产生子代 P'_1 和 P'_2 。

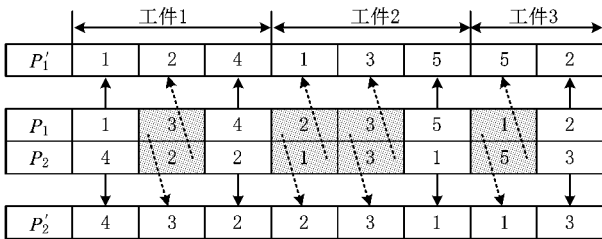


图5 机器分配的交叉策略

4.3.4 变异操作

本文采用的变异操作包括两部分:

(1) 加工顺序基因段的变异操作如图 6 所示, 选择一个工件的一个加工顺序基因(假设为图中灰底的 2), 将其插到随机的一个位置。

(2) 机器分配基因段的变异操作如图 7 所示, 随机选择机器分配基因段的一个机器基因, 在该基因对应的工序加工机器集中选取其他机器替换该

机器。

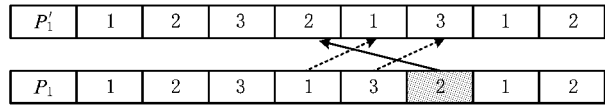


图6 加工顺序的变异操作

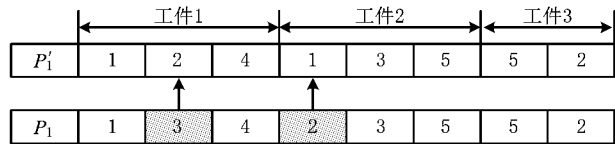


图7 机器编码的变异操作

4.4 算法流程

基于血缘变异的 NSGA-II 算法流程如图 8 所示, 首先从父种群 P_t 中随机两两选择种群个体, 计算两两交叉个体的血缘关系指数, 并以该指数计算交叉所得子个体的变异概率, 再对交叉后得到的子个体根据相应的变异率进行变异, 最终形成子种群 Q_t ; 接着合并父种群 P_t 和子种群 Q_t , 并通过非支配排序和拥挤距离计算确定种群中个体的排序, 然后根据排序结果对种群进行修剪, 形成新的种群 P_{t+1} , 并对新产生的种群进行上述操作, 直到满足算法的终止条件。算法终止后所得结果为一个包含多个个体的 Pareto 最优解集, 所有个体均为互不支配的优化解。决策者根据生产实际情况, 通过层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 确定不同目标权重, 并采用以下公式计算最优解集中各个解相应的 Obj_i , 对 Obj_i 进行排序, 最终得到决策者满意的解。

$$Obj_i = w_T \frac{T_{\max} - T_i}{T_{\max} - T_{\min}} + w_C \frac{C_{\max} - C_i}{C_{\max} - C_{\min}} + w_Q \frac{Q_{\max} - Q_i}{Q_{\max} - Q_{\min}} + w_E \frac{E_{\max} - E_i}{E_{\max} - E_{\min}}$$

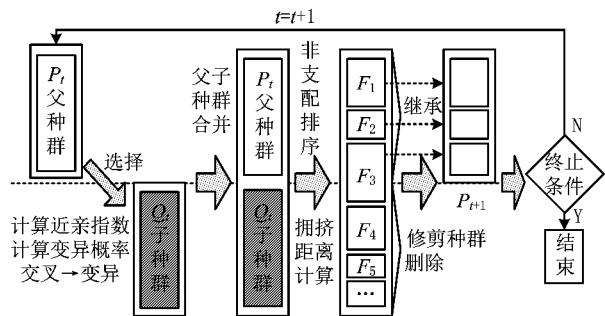


图8 基于血缘变异的NSGA-II流程

5 实例仿真与分析

表 1 所示为某机械加工车间的 FJSP 实例,数据为工件到达时间、各工序加工时间、加工质量、原

材料成本、设备单位时间加工成本和能耗。算法的相关参数设置为:种群规模 50,最大进化代数 100,交叉率 100%,初始变异率 10%。

表 1 实例数据

工件 J_i	工序 O_j	工件 到达 时间 R_i	装夹时间 ST_{ij}^k /加工时间 T_{ij}^k /卸夹时间 UT_{ij}^k /加工质量 q_{ij}^k /平均加工能耗 \bar{e}_{ij}^k						原材料 成本 mc_i
			M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	
J_1	O_{11}	6	1/10/1/0.1/3	2/15/1/0.2/2.5	—	2/14/2/0.05/2.7	—	1/14/1/0.15/1.5	120
	O_{12}	—	—	1/6/1/0.1/3	1/4/1/0.11/2.1	2/16/2/0.06/2.5	3/15/2/0.04/3	—	
	O_{13}	—	—	2/5/1/0.15/2.4	—	—	1/16/1/0.1/2.5	1/8/1/0.2/1.7	
	O_{14}	1/12/1/0.16/2	—	1.5/13/1.5/0.08/2	2/13/1/0.1/2	—	—	—	
	O_{15}	1/6/1/0.18/3.1	1/6/1/0.2/3.1	1/8/1/0.12/1.5	1/8/1/0.15/2	2/4/1/0.22/2.1	1.5/9/1.5/0.02/1.4	—	
	O_{16}	—	—	2/16/2/0.1/1.8	—	2/13/1/0.2/2	1/16/1/0.15/1.6	—	
J_2	O_{21}	2	2/15/1/0.2/2.5	—	1/6/1/0.1/1	2/16.5/0.5/0.06/2.2	1.5/11/1.5/0.12/2.5	—	100
	O_{22}	—	—	2/15/1/0.08/2	1.5/10/0.5/0.09/1.5	1/7/1/0.11/2.1	—	2/12/1/0.06/1.5	
	O_{23}	1/5/1/0.12/2.3	—	2/16/2/0.11/1.8	1/10/1/0.15/2.3	2/14/2/0.2/2.3	—	—	
J_3	O_{31}	2	2/14/2/0.13/2.9	3/15/2/0.15/2.7	1.5/6/0.5/02/1.7	1/5/1/0.06/2.8	1/4/1/0.1/3.1	—	65
	O_{32}	—	—	1/5/1/0.11/2	1/6/1/0.12/2	—	3/16/1/0.2/2.2	—	
	O_{33}	1/5/1/0.23/2.8	1/8/1/0.12/2.3	—	2/11/1/0.07/2.9	—	2/15/3/0.02/2	—	
	O_{34}	—	1/6/1/0.15/2.5	2/17/1/0.01/2.1	1/14/1/0.1/2.5	1.5/12/1.5/0.11/2	—	—	
	O_{35}	2/17/1/0.05/2.5	—	2/14/2/0.15/2.4	2/7/1/0.1/2	2/7/1/0.2/2.8	2/11/2/0.13/2.1	—	
J_4	O_{41}	5	1/20/1/0.01/3	—	2/19/2/0.1/2	2/13/1/0.11/2.5	3/15/2/0.1/2.3	—	100
	O_{42}	—	—	2/10/1/0.21/2.5	2/7/1/0.2/1	2/14/2/0.15/2.8	2/7/1/0.17/3	1.5/15/1.5/0.2/2	
	O_{43}	1/4/1/0.25/2.8	1/8/1/0.13/2	—	—	—	2/16/2/0.01/2	—	
	O_{44}	2/9/1/0.12/3.2	—	1/6/1/0.18/1.6	—	1/6/1/0.1/2.5	—	—	
	O_{45}	2/16/2/0.02/2.9	2/9/1/0.15/2.3	2/16/2/0.1/2.1	1/13/1/0.18/2	—	—	—	
J_5	O_{51}	10	—	1/6/1/0.2/2.2	—	2/7/1/0.15/2.8	2/12/1/0.11/2	1/8/1/0.1/0.9	150
	O_{52}	2/8/2/0.2/3	—	2/12/1/0.15/2.7	2/16/2/0.08/2.7	—	1/6/1/0.24/1	—	
	O_{53}	2/13/1/0.12/2.5	2/12/2/0.12/2.3	—	—	2/16/2/0.08/1.8	1/8/1/0.21/0.7	—	
	O_{54}	—	1/4/1/0.25/2	1/6/1/0.15/2	1/5/2/0.2/3	1/12/2/0.04/1.5	—	—	
	O_{55}	1/13/1/0.08/3.2	—	—	1/8/1/0.09/2.5	—	2/9/1/0.08/1.2	—	
	O_{56}	1/11/1/0.06/2.8	1/3/1/0.26/2.5	2/10/1/0.1/2.5	2/12/1/0.08/2.4	2/16/2/0.01/2	1/5/1/0.2/0.9	—	
J_6	O_{61}	4	—	2/11/1/0.2/1.2	—	—	1/7/1/0.2/1.9	1/8/1/0.22/0.8	85
	O_{62}	—	—	2/8/2/0.17/2	2/12/1/0.15/3	—	2/6/1/0.2/1	—	
	O_{63}	1/10/2/0.03/2.4	1/5/1/0.1/1	—	2/13/1/0.02/2.1	2/6/1/0.17/2	—	—	
	O_{64}	2/16/2/0.01/2.2	—	3/8/2/0.09/1.7	—	—	3/12/2/0.06/1.1	—	
加工成本 pc_k			0.6	0.8	0.7	0.4	0.5	0.6	
平均空载能耗 \bar{e}_k^0			0.5	0.4	0.35	0.41	0.36	0.25	
平均启动能耗 \bar{e}_k^1			1.52	1.75	1.55	1.68	1.71	1.45	
启动所需时间 t_k^1			2.2	1.4	3.1	1.6	2.2	1.5	
是否停机更换工件 b^k			1	0	0	1	1	0	

进化过程中各目标值的变化如图 9 所示, 随着代数的增加, 各目标函数的最优值均在逐渐优化, 表明算法具有良好的收敛性。

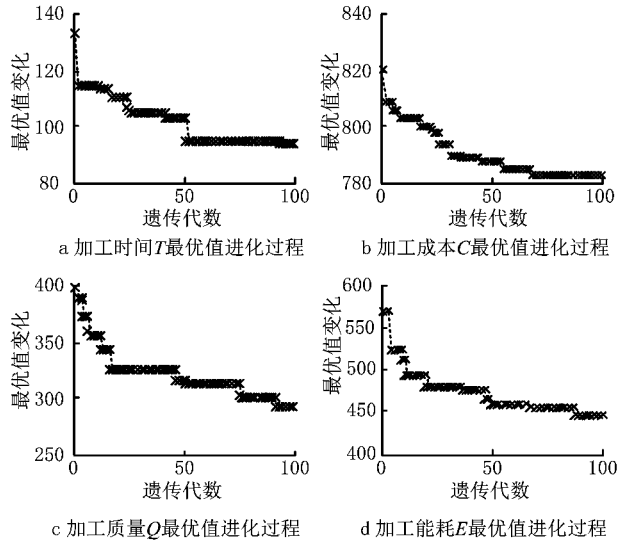


图9 各目标函数最优值的进化过程

算法最终得到具有 50 个个体的 Pareto 解集, 通过修剪冗余个体, 最终得到如表 2 所示的 41 个个体的 Pareto 优化解集。

表 2 最终代的 Pareto 最优解集

序号	完工时间 T	加工成本 C	加工质量 Q	加工能耗 E
1	124.2	782.4	518.51	479.09
2	135.0	792.5	511.62	444.65
3	226.6	835.3	301.11	801.36
4	98.4	789.0	547.65	466.67
5	128.4	795.4	467.73	511.97
6	166.0	843.2	292.38	821.61
7	118.6	809.3	416.02	560.25
8	268.0	794.6	427.07	617.82
9	110.4	808.9	540.23	455.93
10	123.8	801.7	446.86	562.38
11	242.8	831.0	315.82	694.09
12	93.8	788.4	526.59	467.84
13	201.4	807.8	378.09	602.95
14	186.6	830.8	330.53	715.56
15	133.6	836.1	366.72	705.07
16	150.0	785.1	501.41	540.67
17	209.0	828.0	311.44	743.62
18	174.8	811.0	432.57	533.29
19	126.6	802.9	459.73	500.61
20	143.6	827.7	371.87	646.98
21	216.2	814.0	355.66	688.88
22	165.6	848.1	304.15	783.77
23	106.6	788.0	506.33	490.68
24	245.8	789.9	466.17	574.54

续表 2

25	187.0	828.8	334.74	613.09
26	175.4	799.1	391.00	631.71
27	121.6	808.7	413.20	550.86
28	185.6	831.5	321.77	749.32
29	168.2	803.3	433.63	541.85
30	122.8	789.8	476.71	500.54
31	156.2	829.5	404.96	590.16
32	178.6	836.2	304.03	756.01
33	156.6	793.9	453.07	542.70
34	204.4	811.9	365.91	639.99
35	190.6	810.4	382.58	672.72
36	219.4	789.1	474.56	570.50
37	197.8	814.2	368.79	583.71
38	104.0	793.4	501.72	511.14
39	149.4	796.9	420.42	583.33
40	152.0	834.8	345.28	702.13
41	233.6	806.6	364.29	681.13

算法的最终结果为生产调度提供了一系列可行的优化解。实际生产过程中, 决策者根据生产实际情况, 通过 AHP 确定不同的目标权重, T, C, Q 和 E 的权重 w 分别为 0.5, 0.3, 0.1, 0.1, 计算最优解集中各个解相应的 Obj_i 。对 Obj_i 进行排序, 最终得到第 12 组为最优解, 其甘特图如图 10 所示。其中, 斜纹部分为装夹操作, 阴影部分为加工操作, 空白部分为卸夹操作, 最终满意解的最大完工时间为 89, 总加工成本为 786, 质量不稳定总指数为 501.948, 总能源消耗为 483.24。为验证能耗优化策略的有效性, 在相同初始条件下, 分别对考虑能耗和不考虑能耗的调度模型进行求解, 重复 20 次, 所得各优化目标的平均值如表 3 所示。

表 3 结果对比

调度目标	考虑能耗	不考虑能耗	相对增幅/%
T (时间)	97.45	106.59	9.38
C (成本)	789.10	787.99	-0.14
Q (不稳定指数)	537.19	491.30	-8.54
E (能耗)	484.89	559.07	15.30

由表 3 可知, 在不考虑能耗的情况下得到的调度结果在加工成本和质量指数上略优, 但将导致更频繁的启动机器, 反而使最大完工时间有所增长。总能源消耗则是明显高于考虑能耗所得的优化结果。因此, 在调度过程中, 根据设备状态—能耗曲线合理安排加工设备和设备启停操作, 可有效优化调度结果, 降低能耗。

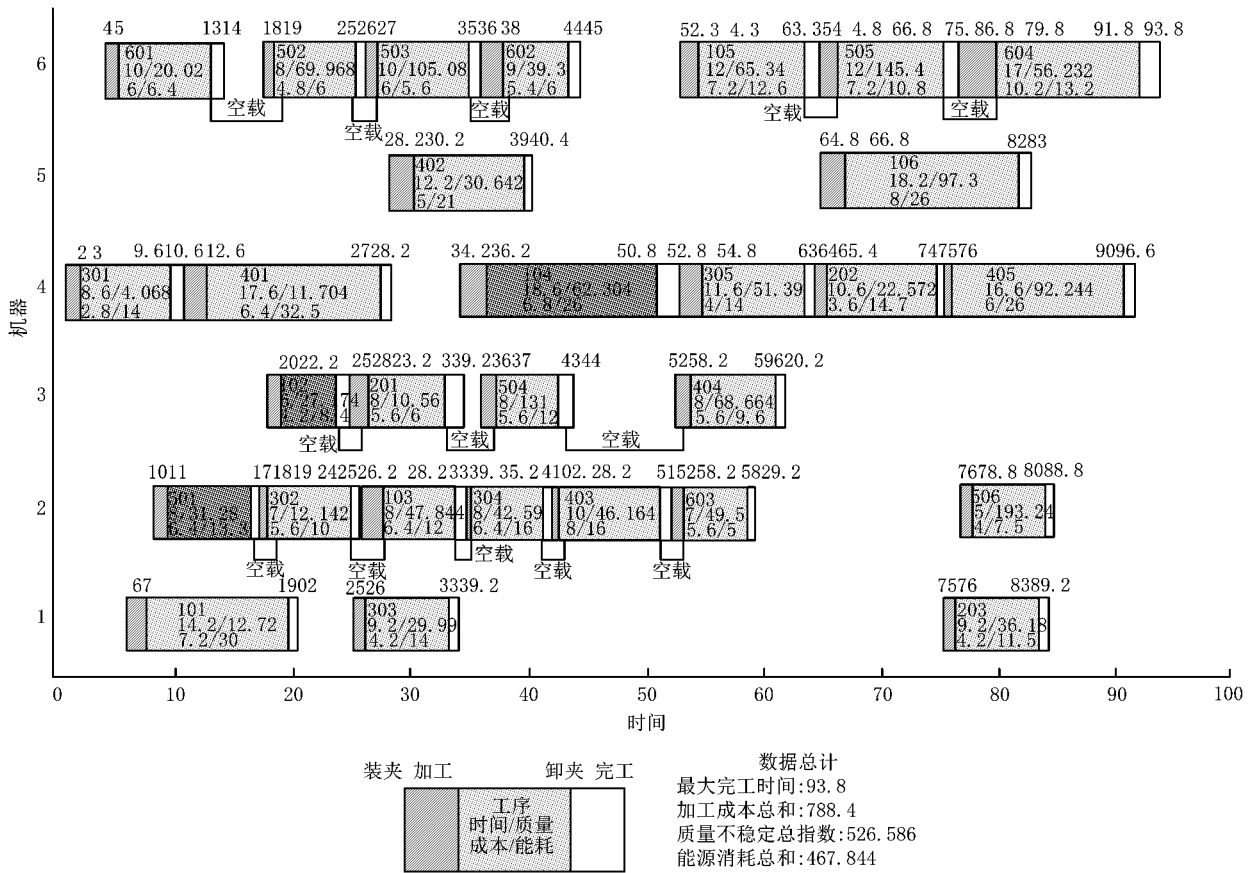


图10 最优解的甘特图表示

6 结束语

本文结合设备状态—能耗曲线,建立了以能耗、时间、成本和质量为指标的调度模型,从最大完工时间、加工成本、成本加权质量和加工过程的能耗等方面对加工过程进行优化调度;提出基于血缘变异的NSGA-II算法,改善了传统算法非支配解易于收敛到第一等级非支配曲面的问题,该算法通过计算交叉染色体的血缘关系来确定变异率,优化了NSGA-II的交叉和变异策略,避免了算法的早熟问题;最后针对实际问题,建立了多目标调度模型,设计了具体算法,计算结果证实了模型和算法的有效性。然而,实际生产过程是在不确定环境下进行的,笔者下一步将在本文研究的基础上,针对作业车间生产环境的不确定性问题,研究低碳策略下损益模型驱动的多目标柔性作业车间动态重调度。

参考文献:

[1] ZHANG Chaoyong, DONG Xing, WANG Xiaojuan, et al. Improved NSGA-II for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(11):156-164(in Chinese). [张超勇,董星,王晓娟,

等.基于改进非支配排序遗传算法的多目标柔性作业车间调度[J].机械工程学报,2010,46(11):156-164.]

[2] HE Yan, LIU Fei, CAO Huajun, et al. Job scheduling model of machining system for green manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(4):27-33(in Chinese). [何彦,刘飞,曹华军,等.面向绿色制造的机械加工系统任务优化调度模型[J].机械工程学报,2007,43(4):27-33.]

[3] LIU Aijun, YANG Yu, CHENG Wenming, et al. Improved NSGA for complex manufacturing environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012,18(11):2447-2458(in Chinese). [刘爱军,杨育,程文明,等.复杂制造环境下的改进非支配排序遗传算法[J].计算机集成制造系统,2012,18(11):2447-2458.]

[4] ZHENG Jinhua. Multi-objective evolutionary algorithm and application[M]. Beijing: Science Press, 2010: 2-11(in Chinese). [郑金华.多目标进化算法及其应用[M].北京:科学出版社,2010:2-11.]

[5] XING Lining, CHEN Yingwu, YANG Kewei. Multi-objective flexible job shop schedule; design and evaluation by simulation modeling[J]. Applied Soft Computing, 2009,9(1):362-376.

[6] ZHANG Guohui, SHAO Xinyu, LI Peigen, et al. An effective hybrid particles warm optimization algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009,56(2):1309-1318.

[7] XU Xinli, YING Shiyan, WANG Wanliang. Fuzzy flexible job-shop scheduling method based on multi-agent immune al-

- gorithm[J]. Control and Decision, 2010, 25(2): 171-184 (in Chinese). [徐新黎, 应时彦, 王万良. 求解模糊柔性 Job shop 调度问题的多智能体免疫算法[J]. 控制与决策, 2010, 25(2): 171-184.]
- [8] JU Quanyong, ZHU Jianying. Multi-objective flexible job shop scheduling of batch production[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 148-154 (in Chinese). [鞠全勇, 朱剑英. 多目标批量生产柔性作业车间优化调度[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 148-154.]
- [9] WU Xiuli, SUN Shudong, YU Jianjun, et al. Research on multi-objective optimization for flexible job shop scheduling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(5): 731-736 (in Chinese). [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.]
- [10] LI Junqing, PAN Quanke, WANG Yuting. Hybrid Pareto-based tabu search algorithm for solving the multi-objective flexible job shop scheduling problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(7): 1419-1426 (in Chinese). [李俊青, 潘全科, 王玉亭. 多目标柔性车间调度的 Pareto 混合禁忌搜索算法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(7): 1419-1426.]
- [11] GHASEM M, MEHDI M. A Pareto approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problem using particle swarm optimization and local search[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 129(1): 14-22.
- [12] FONSECA C M, FLEMING P J. Genetic algorithms for multiobjective optimization; formulation, discussion and generalization[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. San Francisco, Cal., USA; Morgan Kaufmann, 1993: 416-423.
- [13] HORN J, NAFPLIOTIS N, GOLDBERG D E. A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization[C]//Proceedings of the 1st IEEE Congress on Evolutionary Computation. Washington, D. C., USA; IEEE, 1994: 82-87.
- [14] SRINIVAS N, DEB K. Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithm[J]. Evolutionary Computation, 1995, 2(3): 221-248.
- [15] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm; NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [16] KNOWLES J, CORNE D. The Pareto archived evolution strategy: a new baseline algorithm for multi-objective optimization[C]//Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation. Piscataway, N. J., USA; IEEE Press, 1999: 98-105.
- [17] ZITZLER E, THILE L. Multi-objective evolutionary algorithm; a comparative case study and the strength Pareto approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257-271.
- [18] CORNE D W. The Pareto envelope based selection algorithm for multi-objective optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2000, 1917: 839-848.
- [19] ZENG Sanyou, LI Hui, DING Lixin, et al. A fast algorithm for finding non-dominated set based on sorting[J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(9): 1565-1571 (in Chinese). [曾三友, 李 晖, 丁立新, 等. 基于排序的非劣集合快速求解算法[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(9): 1565-1571.]
- [20] FANG K, UHANA N, ZHAO F, et al. A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2011, 30(4): 234-240.
- [21] LUO H, DU B, HUANG G Q, et al. Hybrid flow shop scheduling considering machine electricity consumption cost[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 146(2): 423-439.
- [22] DAI M, TANG D B, GIRET A, et al. Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(5): 418-429.
- [23] DONG Rong, HE Weiping. Hybrid genetic algorithm-ant colony optimization for FJSP solution[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(11): 2492-2501 (in Chinese). [董 蓉, 何卫平. 求解 FJSP 的混合遗传-蚁群算法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(11): 2492-2501.]
- [24] LING Haifeng, WANG Xishan. A two-stage parameter adaptive ant colony algorithm for flexible job shop scheduling problem[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(24): 3380-3385 (in Chinese). [凌海峰, 王西山. 求解柔性作业车间调度问题的两阶段参数自适应蚁群算法[J]. 中国机械工程, 2013, 24(24): 3380-3385.]
- [25] LIU Mingzhou, ZHANG Mingwei, JIANG Zengqiang, et al. Multi-objective and flexible job-shop problems study based on hybrid particle swarm optimization[J]. Transactions of The Chinese Society For Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 122-127 (in Chinese). [刘明周, 张明伟, 蒋增强, 等. 基于混合粒子群算法的多目标柔性 Job-Shop 调度方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 122-127.]
- [26] WANG Yanhong, WANG Wenxia, YU Hongxia, et al. Dynamic balance adaptive colony algorithm solving job-shop scheduling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(10): 2521-2527 (in Chinese). [王艳红, 王文霞, 于洪霞, 等. 一类求解作业车间调度问题的动态平衡自适应蚁群算法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(10): 2521-2527.]
- [27] SHI Jinliang, LIU Fei, XU Dijian, et al. Decision model and practical method of energy-saving in NC machine tool[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(11): 1344-1346 (in Chinese). [施金良, 刘 飞, 许弟建, 等. 数控机床空载运行时节能决策模型及实用方法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(11): 1344-1346.]
- [28] JENSEN M T. Reducing the run-time complexity of multiobjective EAs; the NSGA-II and other algorithms[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(5): 503-515.

作者简介:

蒋增强(1979—),男,江苏宜兴人,副教授,博士,研究方向:制造系统运行优化理论与技术、制造执行系统等, E-mail: zqiang@bjtu.edu.cn;

左 乐(1989—),男,湖北襄阳人,硕士研究生,研究方向:制造系统运行优化理论与技术。