



差分进化算法求解带批处理机的机器人制造单元调度问题

吴秀丽, 袁琦

引用本文:

吴秀丽, 袁琦. 差分进化算法求解带批处理机的机器人制造单元调度问题[J]. 控制与决策, 2020, 35(1): 74–82.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0417>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

液压驱动单元基于力的阻抗控制方法控制参数灵敏度分析

Control parameters sensitivity analysis of force-based impedance control for hydraulic drive unit

控制与决策. 2019, 34(10): 2125–2133 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0083>

基于虚拟领队的 uncertain 轮式移动机器人自适应编队控制

Adaptive control of wheeled mobile robot formation with uncertainties based on virtual leader

控制与决策. 2017, 32(7): 1203–1209 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0481>

基于预测控制的时滞多机器人编队脉冲控制

Impulsive control for multi-robot formation with communication delay based on predictive control

控制与决策. 2016, 31(8): 1453–1460 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0564>

非线性迭代学习算法在机器人上肢康复中的应用

Nonlinear iterative learning algorithm and its application in upper limb rehabilitation

控制与决策. 2016, 31(7): 1325–1329 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0101>

轨迹跟踪级联机器人编队控制方法

Trajectory tracking cascade robot formation control

控制与决策. 2016(2): 317–323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1676>

湍流环境中多弱感知机器人气味源搜索算法

Odor source search employing multi-robots with limited perception in turbulence environments

控制与决策. 2015, 30(8): 1429–1433 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0701>

一种新的相位角编码量子进化算法

A new phase angle encoded quantum evolutionary algorithm

控制与决策. 2015(4): 739–744 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1600>

基于嵌入式视觉的子机器人入舱方法

Embedded vision based docking approach for child robot

控制与决策. 2015, 30(12): 2265–2269 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1587>

差分进化算法求解带批处理机的机器人制造单元调度问题

吴秀丽[†], 袁琦

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 机器人制造单元是智能制造系统的主要载体, 研究机器人制造单元的生产调度问题对于提高智能制造系统的生产效率有着重要作用. 对此, 研究带批处理机的混合流水线机器人制造单元调度问题. 首先, 针对机器人制造单元与批处理机的生产特性, 建立数学优化模型; 其次, 设计差分进化算法对其进行求解, 提出染色体组编码的概念, 求解该问题的染色体组由两个染色体构成, 第1条染色体确定工件在每个工序选择的机器, 第2条染色体确定加工顺序以及机器人的搬运顺序; 然后, 设计差分变异、交叉以及选择操作; 最后, 进行数值实验, 结果证明, 针对带批处理机的机器人制造单元调度问题, 差分进化算法能缩短完工时间, 得到更好的解.

关键词: 机器人制造单元; 批处理; 差分进化算法; 调度; 染色体组编码; 智能制造

中图分类号: TP18

文献标志码: A

Differential evolution algorithm for solving robotic cell scheduling problem with batch-processing machines

WU Xiu-li[†], YUAN Qi

(School of Mechanic Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The robotic cell is the main carrier of the smart manufacturing system. Studying the robotic cell scheduling problem plays an important role in improving the production efficiency of the smart manufacturing system. This paper studies the robotic cell hybrid flowshop scheduling problem with batch-processing machines. Firstly, a mathematical optimization model is established for the production characteristics of the robotic cell and batch-processing machines. Then, a differential evolution algorithm is designed to solve it, and the concept of genome encoding is proposed. The genome for solving this problem consists of two chromosomes: the first determines the machine distribution at each stage, and the second determines the processing sequence and the handling sequence of the robot. Furthermore, the differential mutation, crossover, and selection operations are designed. Finally, a numerical experiment is performed, and the result shows that, for the robotic cell scheduling problem with batch-processing machines, the differential evolution algorithm can shorten the makespan and get a better solution.

Keywords: robotic cell; batch-processing; differential evolution algorithm; scheduling; genome encoding; smart manufacturing

0 引言

机器人制造单元是智能制造系统的主要载体之一, 其运作管理与控制的水平直接决定着智能制造系统的运作水平^[1]. 而调度作为运作管理的核心, 如何高效调度机器人制造单元成为智能制造系统生产管理者所面临的新的挑战. 在机器人制造单元中, 工件在工作站间的转运是由搬运机器人完成的, 因此在研究机器人制造单元生产调度问题时, 不仅要确定工件的加工顺序, 还需要考虑搬运机器人搬运每个工件的时间和顺序^[2].

混合流水线作为一种典型的生产模式, 具有很强的工程背景^[3]. 此外, 一些特殊工艺如喷漆、电镀等常常用到批处理机, 从而实现热处理、化工反应等^[4]. 批处理机的主要特征是: 相比于一般加工, 批处理机的加工时间较长; 一旦开始某个批次的加工, 就不允许别的工件抢占; 批处理机一般价格昂贵、体积庞大, 有效利用能有效提高车间工作效率^[5]. 这类问题常常被定义为带批处理机的混合流水线生产调度问题 (Hybrid flowshop scheduling problem with batch-processing machine, HFSP-BM)^[6].

收稿日期: 2018-04-06; 修回日期: 2018-05-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51305024).

责任编辑: 王凌.

[†]通讯作者. E-mail: wuxiuli@ustb.edu.cn.

HFSP-BM问题可以大致分为两类:一类是所有阶段机器全是批处理机的情况,另一类是同时考虑批处理机和离散机的情况.在实际生产中,第2类情况更加常见.

针对第1类情况,Sawik^[7]在全由批处理机构成的混合流水车间的背景下,考虑可分割和不可分割的订单下的调度问题,提出了适用于按订单生产的调度的整数规划方案,并由实验验证其能够很好地解决工业实践中可能遇到的目标函数. Nhat等^[8]以纺织品的批量染色问题为背景,以完工时间最小为目标,提出了嵌入启发式多亚群遗传算法,有效解决了大批量的调度问题.

针对第2类情况,Xuan等^[9]在最后阶段批量生产的混合流水车间问题下,以完工时间最小化作为目标,建立了一个整数规划模型,并针对该问题提出了一种基于批量解耦的拉格朗日松弛算法,实验结果表明该算法能提供更好的调度解,对于中小模型收敛更快. Ruiz等^[10]采用基于遗传算法的仿真算法求解多属性组合调度决策问题,并且利用回归分析对遗传算法参数进行了优化,实证结果表明,基于遗传算法的仿真算法胜过几个常用的调度规则.在解决此类问题时,还有一种特殊的规则设计方法,郑丹^[11]针对带批处理机的多阶段混合流水车间调度问题,以完工时间最短作为目标,采用遗传算法确定规则集,再通过蚁群算法确定搜索规则的方式进行求解,与其他算法和规则相比,能得到较好的解.

综上所述,对于HFSP-BM问题,现有研究中提出了各种各样的模型,使其符合各种实际应用场景,并针对不同的模型提出不同的适合的算法,比如智能算法、仿真方法等.现有研究中,还没有将HFSP-BM问题与智能制造系统联系起来,为此,本文提出将机器人制造单元与HFSP-BM问题相结合,研究带批处理机的混合流水线机器人制造单元调度问题(Robotic cell hybrid flowshop scheduling problem with batch-processing machine, RCHFSP-BM).本文的主要贡献在于:1)建立了PCHFSP-BM优化模型;2)提出了染色体组编码方式,可以有效表达RCHFSP-BM;3)设计了差分进化算法对RCHFSP-BM进行求解.

1 带批处理机的混合流水线机器人制造单元调度优化模型

1.1 问题描述

RCHFSP-BM可以这样描述:混合流水线包含 k ($k \geq 3$)个生产阶段,每个阶段又包含多台不同的并行机,每个工件顺次经过 k 个阶段进行加工,工件通

过一个搬运机器人在各个生产阶段实现工件的传递,工件在每个阶段所需要的加工时间与所选取的机器相关.为了问题的简化,特给出如下假设:

- 1) 工件在可用机器上所需要的加工时间是确定且已知的;
- 2) 每台机床都有足够多的缓冲区,即机床有足够多的位置存放机器人搬运过来待加工的工件,且有足够多的位置存放加工完毕的工件,等待机器人搬运走;
- 3) 不考虑机器抢占、机器故障、操作人员缺失等情况.

为方便理解该问题,表1给出了一个3阶段带批处理机的混合流水机器人制造单元调度问题,其中数据是6个工件在3个阶段中不同机器上所对应的生产时间.由表1中数据可知,第1阶段有2台机器,第2阶段有3台机器,第3阶段有3台机器.第2阶段是批处理机,相较于其他工序加工时间较长,因此对于批处理的规划很有必要.

表1 工件在机器上的加工时间

工件号	第1道工序		第2道工序			第3道工序		
	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	C3
1	12	24	126	118	99	10	26	15
2	21	15	131	142	126	14	25	19
3	28	16	125	149	134	21	17	15
4	10	12	132	123	156	22	26	23
5	25	35	180	162	140	14	22	16
6	33	22	125	152	160	12	14	18

图1给出了该问题的一个调度方案,其中横坐标代表时间,纵坐标代表机器,小块上的数字代表工件编号,因为工序2为批处理,所以其相应的机器上对应的小块上有多个工件编号.

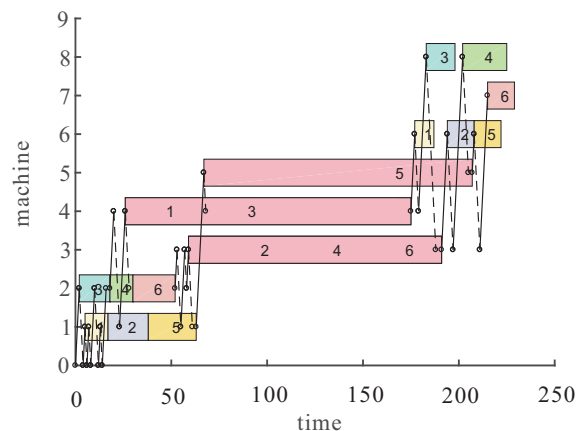


图1 工件加工的甘特图

图1中线代表搬运机器人的路径,其中实线代表机器人单元在进行搬运工件作业,虚线代表机器人单元空载返回机器去进行装载.机器人具体作业为首

先拿起工件3从起点运至机器2,卸载后空载返回起点,拿起工件1从起点运至机器1,卸载后空载返回起点,依次类推.

1.2 优化模型

优化模型所用到的符号定义如下:

k : 工序索引,取值为 $1, 2, \dots, K$.

j : 工件索引,取值为 $1, 2, \dots, N$.

m : 机器索引,取值为 $1, 2, \dots, M$.

b : 批处理机上的批次号,取值为 $1, 2, \dots, B$.

t : 表示时间,取值为 $1, 2, \dots, T$.

C_{jk} : 工件 j 在第 k 道工序的完工时间.

S_{jk} : 工件 j 在第 k 道工序的开始加工时间.

P_{jk} : 工件 j 在第 k 道工序的加工时间.

pt_{jkm} : 工件 j 的第 k 道工序使用机器 m 的加工时间.

p_{kmb} : 第 k 道批处理工序使用机器 m 的 b 批次的加工时间.

R_{pq} : 使用机器人单元将工件从机器 p 移动到机器 q 所花费的时间.

CM_m : 批处理机 m 的容量.

X_{jkm} : 若工件 j 的第 k 道工序是在机器 m 上完成,则 $X_{jkm} = 1$;否则 $X_{jkm} = 0$.

Y_{jkm} : 若工件 j 的第 k 道批处理工序是在机器 m 的 b 批次上完成,则 $Y_{jkm} = 1$;否则 $Y_{jkm} = 0$.

TO_k : 若第 k 阶段是批处理工序,则 $TO_k = 1$;否则 $TO_k = 0$.

TM_m : 若机器 m 为批处理机,则 $TM_m = 1$,否则 $TM_m = 0$.

s_{jkt} : 若工件 j 的第 k 道工序在 t 时刻开始,则 $s_{jkt} = 1$;否则 $s_{jkt} = 0$.

对于智能制造系统而言,生产的高效化是其追求的第1目标,所以优化模型以完工时间为目标,可表示为

$$\max_{i \leq k \leq K} \{ \max_{i \leq k \leq K} C_{jk} \}. \quad (1)$$

s.t.

$$\begin{cases} P_{jk} = \sum_{m=1}^M X_{jkm} pt_{jkm}, \forall j, k, TO_k = 0; \\ P_{jk} = \sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^B Y_{jkm} p_{kmb}, \forall j, k, TO_k = 1; \end{cases} \quad (2)$$

$$C_{jk} = S_{jk} + P_{jk}, \forall j, k; \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{jkm} = 1, \forall j, k; \quad (4)$$

$$P_{kmb} \geq Y_{jkm} pt_{jkm}, \forall j, k, m, b, TO_k = 1; \quad (5)$$

$$\sum_{t=1}^T s_{jkt} = 1, \forall j, k; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} S_{j(k+1)} &\geq C_{jk} + R_{pq}, \\ \forall j, k &= 1, 2, \dots, K-1, X_{j(k-1)p} = 1, X_{jkq} = 1; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} S_{jkt} X_{jkm} \sum_{j'=1}^N \sum_{t'=S_{jk}}^{C_{jk}-1} s_{j'kt'} X_{j'km} &= 0, \\ \forall j, k, t, m, j &\neq j', TO_k = 0; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^N Y_{jkm} \geq CM_m, \forall k, m, b, TM_m = 1; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Y_{jkm} Y_{j'kmb} S_{jk} &= Y_{jkm} Y_{j'kmb} S_{j'k}, \\ \forall j, j', k, m, b, TO_k &= 1. \end{aligned} \quad (10)$$

其中:式(2)表示每个工件在每道工序的加工时间,由工件选择的机器,批处理工序中的批次等因素共同决定;式(3)表示完工时间等于开始加工时间加上加工所用时间;式(4)表示工件在每一阶段只能被加工一次;式(5)表示在批处理工序中,同一批次的加工时间应大于等于本批次中任意一工件的加工时间;式(6)表示在每个生产阶段,工件只能被分配到一个机器上进行加工;式(7)表示工件只有在前一道工序完成且搬运到本工序的机器时,才可以开始这一工序的加工;式(8)表示在一般生产阶段,每个机器一次只能加工一个工件;式(9)表示在批处理阶段,每一批次中工件的个数应不大于批处理机的容量;式(10)表示同一批次的工件拥有相同的开始加工时间.

2 基于差分进化算法的调度优化方法

2.1 算法描述

流水线调度问题为NP难题,一般使用启发式或元启发式的方式求解^[12]. RCHFSP-BM是复杂的流水线调度问题,其求解难度更大.差分进化算法(Differential evolution algorithm, DE)^[13]是一种高效的全局优化算法,是一类基于群体的自适应全局优化算法,由于其具有结构简单、容易实现、收敛快速、鲁棒性强等特点,被广泛应用于数据挖掘、模式识别、数字滤波器设计、人工神经网络、电磁学等各个领域^[14].

DE的算法流程如图2所示.首先,随机产生初始种群,并对初始种群进行评价;其次,判断是否满足终止条件,若满足则停止计算,输出最终结果,若不满足则对种群中的染色体进行差分变异,产生新种群;再次,对新老种群中的染色体进行交叉,形成新种群中的染色体;最后,对新种群中的染色体进行评估,并与

之前的种群的染色体进行比较,采用贪婪算法,新旧种群中位于同一位置的染色体,选择表现好的染色体进入下一代种群,判断是否满足终止条件,若不满足则继续上述步骤,直到满足终止条件,输出最终结果。

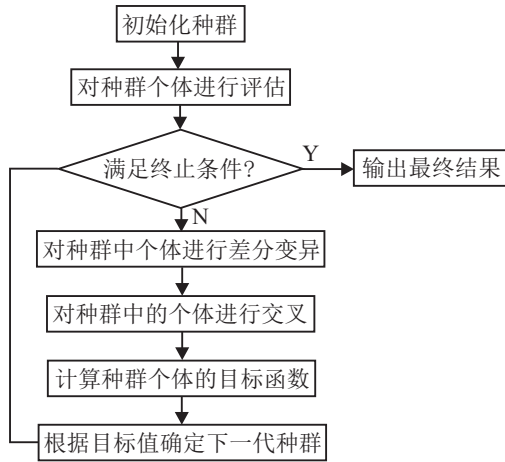


图2 算法流程

2.2 算法详细步骤

2.2.1 编 码

在用DE算法求解RCHFSP-BM前,需要先将问题映射到算法空间,这个过程需要确定3类决策变量:1)机器分配;2)加工顺序;3)机器人的搬运顺序。为了求解该问题,本文提出染色体组编码。染色体组^[15]是细胞中的一组非同源染色体,它们在形态和功能上各不相同,但又互相协作,携带着控制一种生物生长、发育、遗传和变异的全部信息。每个染色体组由2个染色体构成,第1条染色体确定工件在每个工序选择的机器,称为机器染色体;第2条染色体确定加工顺序以及机器人的搬运顺序,称为顺序染色体。

机器染色体采取一个 mn 的矩阵染色体表示, m 表示工件个数, n 表示工序个数,每个点的取值范围与工序上的机器数有关,即取值为小于该工序上机器数的整数。图3所示为表1所对应的实例的一个具体的机器染色体,表示工件1在3个阶段所选择的加工机器分别为A1、B2、C3,依次类推。

机器染色体	1	2	3
	2	1	1
	2	1	2
	1	2	3
	1	3	3
	2	1	1

图3 机器染色体示例

顺序染色体采取基于工序的编码方式,形式为一个长度为 mn 的一维向量。其中 m 表示工件个数, n

表示工序个数,每个点的取值为工件编号,即当工件编号 i 出现的第 j 次表示 i 工件的第 j 道工序。如图4上侧表示表1所对应的实例的一个具体的顺序染色体,下侧箭头所指的表示其具体的含义。

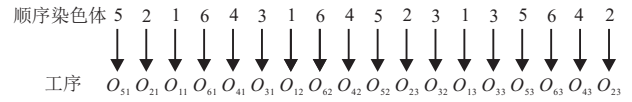


图4 顺序染色体示例

2.2.2 差分变异

差分进化算法通过差分策略实现染色体变异,随机选取种群中两个不同的染色体,将其向量差缩放后与另一随机选择的染色体进行向量合成,形成新的染色体作为变异后的染色体,即

$$V_N(g+1) = X_{r_1}(g) + F(X_{r_2}(g) - X_{r_3}(g)). \quad (11)$$

其中: r_1, r_2 和 r_3 是3个随机数,表示对种群中个体的随机选择,其取值为小于等于种群个体数量的随机正整数; F 为缩放因子,是一个确定的常数; g 为第 g 代。

对变异后的染色体需要进行合法性检查,根据编码规则,对于不符合要求的染色体按如下规则进行更改,使其符合实际要求。

对于机器染色体,根据每个工序的机器数对其取值进行限制,第 n 道工序的机器数为 M_n ,因此机器染色体第 n 列数的取值范围为 $[1, M_n]$ 。其行为可用下式表示。

$$\begin{cases} f_{i,j}(g+1) = f_{i,j}(g+1), & f_{i,j}(g+1) \in [1, M_j]; \\ f_{i,j}(g+1) = 1 + r(M_j - 1), & f_{i,j}(g+1) \notin [1, M_j]. \end{cases} \quad (12)$$

其中: $f_{i,j}(g+1)$ 为 $V_N(g+1)$ 中表示机器染色体的具体的值, M_j 为第 j 道工序的机器数, r 为取值在 $[0,1]$ 间的随机数。

对于顺序染色体,为了更好地对其数值进行检查,使用下式将其转换为 mn 个数值:

$$r_i(g+1) = r_i(g+1) + (k_i(g+1) - 1)m. \quad (13)$$

其中: $r_i(g+1)$ 为 $V_N(g+1)$ 中表示顺序染色体的具体的值, $k_i(g+1)$ 为第 i 个被搬运的工件被搬运至第 $k_i(g+1)$ 个工序, m 为工件个数。

为了使得到的数值满足其分布在 $1 \sim mn$ 之间,且每个数都不相等,再使用禁忌算法对其进行检查以及按规则进行更改,使其符合实际要求。

将染色体的值经过式(13)变换后对其进行检查,依次从第1个数开始,将出现过的数字放入禁忌表中,之后不允许其再出现。若出现了禁忌表中的数值,则在非禁忌表中选择数值最小的数作为其取值,再将其

加入禁忌表.

2.2.3 交叉

由于同一染色体组中两个染色体的形态与取值方式不同,对于两条染色体采用不同的交叉方法.

对于机器染色体,对变异前后的两个种群的染色体进行交叉,采用如下所示的方式进行:

$$\begin{cases} f_{i,j}(g+1) = f_{i,j}(g+1), \text{rand}(0,1) < \text{cr}; \\ f_{i,j}(g+1) = f_{i,j}(g), \text{rand}(0,1) \geq \text{cr}. \end{cases} \quad (14)$$

即对染色体中的每个值分别进行判断,对每个值产生随机数,当随机数小于交叉概率时,则选用新种群中的值,否则采用旧种群中的值. 其中: $f_{i,j}(g+1)$ 为 $V_N(g+1)$ 中表示机器染色体的具体的值; $\text{rand}(0,1)$ 为 $[0,1]$ 间的随机数; cr 为交叉概率.

对于顺序染色体,交换变异后新种群中染色体自身片段得到交叉后的染色体,具体例子如图5所示,随机生产位置5,则交叉后染色体由新种群染色体第6~第18位与第1~第5位组成.

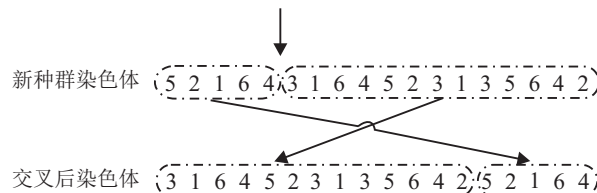


图5 顺序染色体交叉

2.2.4 评估

评估染色体时需要将染色体解码,因此需要设计解码算法. 考虑RCHFSP-BM的难点在于批处理机的批量设置,设置批量时应当考虑两种约束:1)批处理机处理批量的大小,一次处理的批量不能大于批处理机的最大容量;2)等候时间,批处理机未满足最大容量时,不能无限等候^[16].

因为本文由顺序染色体可以确定搬运以及加工顺序,所以可以使用到达批处理机和离开批处理机的顺序以及批处理机的容量来确定批次,而不需要像之前文献中以时间窗作为等待的条件^[16]来确定批次,具体的解码算法如图6所示.

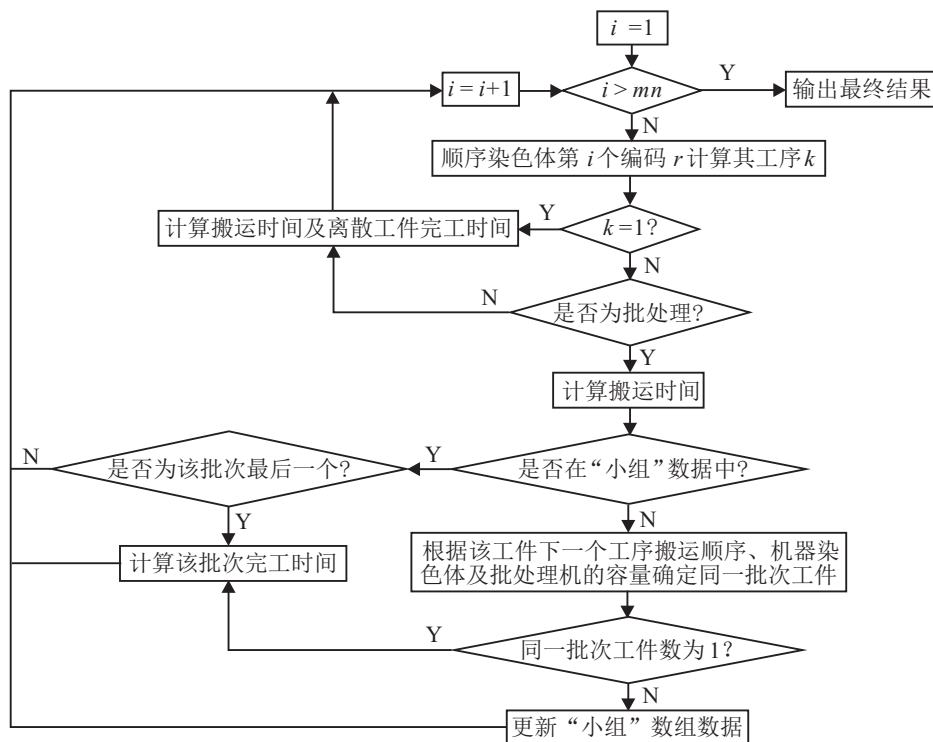


图6 解码规则

Step 1: 依次取顺序染色体上的编码 r , 并计算其工序 k 值.

Step 2: 若 $k = 1$, 则根据机器人搬运的时间以及此工件在第1阶段选择的机器明确其加工时间, 计算其完工时间, 然后返回 Step 1 继续循环; 若 k 的取值不为1, 则转 Step 3.

Step 3: 检查工序 k 所对应的工序为普通工序还

是批处理工序, 若为批处理工序, 则转 Step 4; 若为普通工序, 则转 Step 5.

Step 4: 计算批处理工序的完工时间.

Step 4.1: 计算机器人将其从上一工序所使用机器搬运至本工序所使用机器的时间.

Step 4.2: 在数组“小组”中搜索, “小组”为一个数组, 存放已经被安排的工件组批信息. 若在小组中

存在此工件及对应工序,但不为该批次的最后一个,则返回Step 1继续循环;若在小组中存在此工件及对应工序,且为该批次的最后一个,则转入Step 4.3;若在小组中不存在此工件及对应工序,则转入Step 4.4.

Step 4.3: 将其对应批次的工件提取出来,根据它们的到达时间以及此机器上一批工件的完工时间,计算它们开始加工的时间,它们的加工时间对应他们加工时间中的最大值,并由此计算它们的完工时间,然后返回Step 1继续循环.

Step 4.4: 在顺序染色体中,寻找该工件所对应的下一阶段的搬运顺序的位置,将这两个位置中间同处于 k 阶段,且与此工件在 k 阶段中所使用的为相同机器的工件全部找出来.若工件只有1个,则转入Step 4.5,否则转入Step 4.6.

Step 4.5: 根据机器人搬运的时间,此机器上一批工件的完工时间以及此工件在第 k 阶段选择的机器,明确其加工时间,计算其完工时间,将工件的基本信息(如工件序号、工序编号、机器编号以及批次)存入数组“小组”,然后返回Step 1继续循环.

Step 4.6: Step 4.4中的工件个数若大于它们所使用机器的容量,则将大于部分的工件去除;若工件中有工件的下一步骤在该组批结束之前进行,则将其后的工件去除;将剩余工件的基本信息(如工件序号、工序编号、机器编号以及批次)存入数组“小组”,然后返回Step 1继续循环.

Step 5: 根据机器人搬运的时间,此机器上一工件的完工时间以及此工件在第 k 阶段选择的机器,明确其加工时间,计算其完工时间,然后返回Step 1继续循环,直至循环完成染色体中的每一位.

3 数值实验

3.1 实验设计

针对所提出的问题,结合实际生产情况设计了30个测试用例.测试用例的生成规则如下:

1) 共生成30个测试用例.其中:5个工件数为10、工序数为5的测试用例;5个工件数为15、工序数为5的测试用例;5个工件数为10、工序数为10的测试用例;5个工件数为15、工序数为10的测试用例;5个工件数为10、工序数为15的测试用例;5个工件数为15、工序数为15的测试用例.

2) 每个工序的机器个数服从 $U[2, 4]$ 的均匀分布.

3) 加工时间分为离散加工时间和批处理加工时间,离散加工时间服从 $U[10, 30]$ 的均匀分布,批处理加工时间服从 $U[100, 200]$ 的均匀分布.

4) 批处理机的容量服从 $U[2, 6]$ 的均匀分布.

3.2 参数设置

对于差分进化算法其参数主要设置如下:种群规模为50,迭代次数为1000,缩放因子为0.5,交叉概率为0.9.

3.3 实验结果

对30个测试用例,使用DE进行计算,并与双种群遗传算法(Double population genetic algorithm, D-GA)^[17],遗传算法(Genetic algorithm, GA)^[18-19]和在带批处理机的车间调度问题以及机器人制造单元调度问题两个领域中被使用的算法——蚁群优化算法(Ant colony optimization, ACO)^[20-21]进行比较.对于每个测试用例使用4个算法分别计算30次,取其结果的平均值作为最终结果,结果如表2所示.

表2 算法结果比较

$N \times K$	测试用例	完工时间			
		DE	D-GA	GA	ACO
10×5	1	461.8	497	509.6	495.2
	2	636.6	699.2	763.2	696
	3	645	698.2	743.6	668.8
	4	620.8	653.2	721.8	679.8
	5	620.2	658.2	682.2	658.8
15×5	1	643.2	674.2	778.6	724.2
	2	646.4	702	769.2	708.6
	3	1013.2	1124.6	1216.6	1164.6
	4	581.6	633.8	702.8	643
	5	766.6	847.4	945.4	925.2
10×10	1	1987.8	2243.2	2586.2	1926.2
	2	1335	1526	1769.6	1397.2
	3	1962	2176.4	2380.4	1953
	4	1537.2	1911.8	2006.2	1532.8
	5	1359.8	1666.8	1899.8	1449.8
15×10	1	1691	2105	2439.2	1989.6
	2	2001.8	2287	2739	2182.6
	3	1661.4	1924.4	2172.4	1873.4
	4	2106.2	2417.2	2832.6	2356
	5	1543	1827.6	2049.4	1718.4
10×15	1	2443.6	2897.6	3361.4	2475.6
	2	2354.2	2832.6	3363	2423.2
	3	2024.4	2362.6	2865.4	2039
	4	1957.8	2297	2664.8	1960.8
	5	2849.4	3254.6	3888.2	2870.6
15×15	1	3489.4	4111.4	5105.6	3633
	2	2352.6	2934.6	3445.4	2567.4
	3	2558.8	3154	3805.6	2813.8
	4	2332.2	2780	3419	2536
	5	2853.8	3277.6	4168.6	2994.2

由表2可以看出:针对RCHFSP-BM,上述4种算法中遗传算法的寻优能力最差,差分进化算法明显优于遗传算法和双种群遗传算法;在小规模问题上(10×5 与 15×5),差分进化算法最优,双种群遗传算法与蚁群算法寻优能力相似,遗传算法最差;在 10×10 规模问题上,差分进化算法与蚁群算法寻优能力相

似;在 15×10 、 10×15 以及 15×15 规模问题上,4个算法寻优能力的排名为差分进化算法、蚁群算法、双种群遗传算法、遗传算法。

在表2的30个测试用例中,仅有3个测试用例未能找到4个算法中的较优解。综合而言,差分进化算法在RCHFSP-BM上能够得到较好的满意解。

图7给出了 10×5 规模中第1个测试用例在运行30次中得到的最满意的解的甘特图,此时完工时间为430个单位。 10×5 规模中第1个测试用例的具体信息为:总共10个工件,每个工件都要经过5道工序,5道工序所包含的机器数分别为:2,2,3,4,2;第4道工序为批处理工序,4台批处理机的容量分别为:4,4,2,5。图7中横坐标代表时间,纵坐标代表机器,小块上的数字代表工件编号,因为工序4为批

处理,其相应的机器上对应的小块上有多个工件编号。图7中线代表搬运机器人的路径,实线代表机器人单元在进行搬运工件作业,虚线代表机器人单元空载返回机器去进行装载。

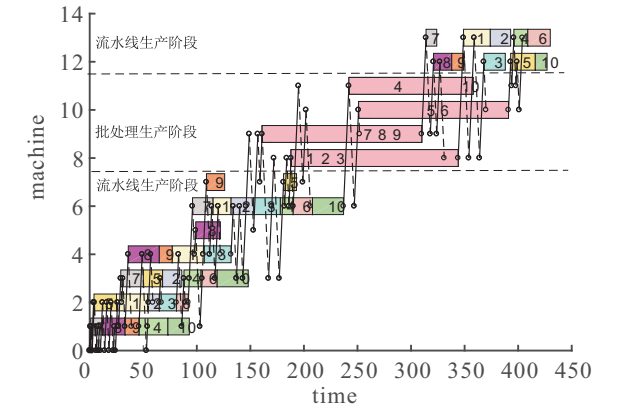


图7 10×5 规模中第1个测试用例的甘特图

表3 机器人运输路线表

No.	ST	ET	SM	EM	j	No.	ST	ET	SM	EM	j	No.	ST	ET	SM	EM	j
1	0	1	0	1	7	33	81	83	2	4	3	65	181	182	7	6	0
2	1	2	1	0	0	34	83	86	4	1	0	66	182	184	6	8	2
3	2	4	0	2	5	35	86	88	1	3	4	67	184	186	8	6	0
4	4	6	2	0	0	36	88	89	3	2	0	68	186	188	6	8	3
5	6	7	0	1	8	37	92	93	2	3	6	69	188	190	8	6	0
6	7	8	1	0	0	38	93	96	3	6	7	70	190	195	6	11	4
7	8	9	0	1	9	39	96	98	6	4	0	71	195	199	11	7	0
8	9	10	1	0	0	40	98	99	4	5	8	72	199	202	7	10	5
9	10	12	0	2	1	41	99	103	5	1	0	73	202	206	10	6	0
10	12	14	2	0	0	42	103	105	1	3	10	74	237	242	6	11	10
11	14	16	0	2	2	43	105	106	3	4	0	75	242	247	11	6	0
12	16	18	2	0	0	44	106	109	4	7	9	76	247	251	6	10	6
13	18	20	0	2	3	45	109	112	7	4	0	77	251	252	10	9	0
14	20	22	2	0	0	46	112	114	4	6	1	78	310	314	9	13	7
15	22	23	0	1	4	47	114	117	6	3	0	79	314	318	13	9	0
16	23	24	1	0	0	48	117	120	3	6	2	80	318	321	9	12	8
17	24	26	0	2	6	49	120	122	6	4	0	81	321	324	12	9	0
18	26	27	2	1	0	50	132	134	4	6	3	82	324	327	9	12	9
19	27	29	1	3	7	51	134	137	6	3	0	83	327	331	12	8	0
20	29	30	3	2	0	52	137	140	3	6	4	84	344	349	8	13	1
21	30	31	2	3	5	53	140	143	6	3	0	85	349	354	13	8	0
22	31	33	3	1	0	54	143	146	3	6	6	86	354	359	8	13	2
23	33	36	1	4	8	55	146	149	6	9	7	87	359	364	13	8	0
24	36	39	4	1	0	56	149	153	9	5	0	88	364	368	8	12	3
25	46	49	1	4	9	57	153	157	5	9	8	89	368	370	12	10	0
26	49	53	4	0	0	58	157	159	9	7	0	90	391	393	10	12	5
27	53	54	0	1	10	59	159	161	7	9	9	91	393	394	12	11	0
28	54	55	1	2	0	60	161	167	9	3	0	92	394	396	11	13	4
29	55	57	2	4	1	61	167	170	3	6	10	93	396	398	13	11	0
30	57	59	4	2	0	62	170	172	6	8	1	94	398	399	11	12	10
31	65	66	2	3	2	63	172	177	8	3	0	95	399	401	12	10	0
32	66	67	3	2	0	64	177	181	3	7	5	96	401	404	10	13	6

图7所表示的机器人的路线可由表3表示. 其中: No. 表示编号; ST 表示此次运输的开始时间; ET 表示此次运输的终止时间; SM 表示此次运输离开的机器; EM 表示此次运输到达的机器; j 表示工件号, 工件号为0表示空载. 机器人具体作业为首先在0时刻拿起工件7, 花费1个单位时间从起点运至机器1, 在1时刻机器1卸下工件7, 卸载后花费1个时间单位空载返回起点; 在2时刻拿起工件5, 花费2个单位时间从起点运至机器2; 在4时刻机器2卸下工件5, 卸载后花费2个单位时间空载返回起点, 依次类推.

经过实验可以得出, 针对 RCHFSP-BM, 差分进化算法是很好的解决方案, 这得益于以下两点:

1) 算法在设计过程中, 不同于一般只考虑加工顺序或加工机器单方面的做法, 而是设计了染色体组的编码方式, 将其加工顺序与加工机器同时考虑, 并根据其不同的特性, 设计不同的变异以及交叉方法, 一同进行变异与交叉, 使得算法更加灵活; 考虑问题时从全局出发, 而不像以往算法中仅针对单一行为作出判断.

2) DE 本身的优越性, 由于其采用差分变异的方式进行变异, 使得算法在收敛前期, 由于种群中染色体差异较大, 产生新种群的染色体也与原种群染色体存在较大的差异, 增加了种群中染色体的多样性, 可以对问题进行全局搜索; 但到了收敛后期, 种群中的染色体差异较小, 即产生的新种群的染色体与原种群染色体差异较小, 则可以在最优解附近进行搜索, 这种方式提高了种群搜索效率.

4 结 论

本文采用差分进化算法解决带批处理机的机器人制造单元调度问题. 根据智能制造系统的特征, 建立了带批处理机的机器人制造单元调度数学模型, 根据差分进化算法的原理设计了解决带批处理机的机器人制造单元调度问题的算法. 根据实际生产情况设计实验, 并将差分进化算法与常用的3种启发式算法进行比较, 实验验证了差分进化算法能够很好地解决带批处理机的机器人制造单元调度问题.

在今后的研究中, 可以将本文所提出的模型拓展到多目标优化模型, 提出多目标差分进化算法; 也可以考虑更多实际情况, 构造启发式规则, 提高DE搜索效率等.

参考文献(References)

- [1] Che A, Kats V, Levner E. An efficient bicriteria algorithm for stable robotic flow shop scheduling[J]. *European J of Operational Research*, 2017, 260(3): 964-971.
- [2] 晏鹏宇, 车阿大, 李鹏, 等. 具有柔性加工时间的机器人制造单元调度问题改进遗传算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(2): 404-410.
(Yan P Y, Che A D, Li P, et al. Improved genetic algorithm for robotic cell scheduling problem with flexible processing times[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(2): 404-410.)
- [3] Luciana S, Carlos E. Heuristics for a flowshop scheduling problem with stepwise job objective function[J]. *European J of Operational Research*, 2018, 266(3): 950-962.
- [4] Tshi P, Heng S, Ching J. Two new approaches for a two-stage hybrid flowshop problem with a single batch processing machine under waiting time constraint[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 113: 859-870.
- [5] 王凌, 王圣尧, 方晨. 分布估计调度算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 108-109.
(Wang L, Wang S Y, Fang C. Estimation of distribution scheduling algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 108-109.)
- [6] Li M, Ching J. Tabu search heuristic for two-machine flowshop with batch processing machines[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2011, 60(3): 426-432.
- [7] Sawik T. Integer programming approach to production scheduling for make-to-order manufacturing[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2005, 41(1): 99-118.
- [8] Nhat T, Chen F. A hybrid multi-subpopulation genetic algorithm for textile batch dyeing scheduling and an empirical study[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, DOI: org/10.1016/j.cie.2018.01.005.
- [9] Xuan H, Tang L. Scheduling a hybrid flowshop with batch production at the last stage[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(9): 2718-2733.
- [10] Ruiz R, Maroto C. A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 169(3): 781-800.
- [11] 郑丹. 面向带有批处理机的混合流水车间的调度规则自动设计[D]. 北京: 北京理工大学计算机学院, 2016.
(Zheng D. Automatic design of rules for hybrid flow shops with batch processing machines[D]. Beijing: School of Computer Science and Technology Institute of Technology, 2016.)
- [12] Wu X, Sun Y. A green scheduling problem for flexible job shop with energy-saving measures[J]. *J of Cleaner Production*, 2018, 172(20): 3249-3264.
- [13] Storn R, Price K. Differential evolution — A simple and

- efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[Z]. Int Computer Science Institute, 1995.
- [14] 徐斌. 基于差分进化算法的多目标优化方法研究及其应用[D]. 上海: 华东理工大学信息科学与工程学院, 2013.
(Xu B. Research and application of mulit-objective optimization algorithm base on differential evolution[D]. Shanghai: School of Information Science and Engineering East China University of Science and Technolog, 2013.)
- [15] Tsunewaki K, Mukai Y, Endo T R. On the descent of the cytoplasms of polyploid species in Triticum and Aegilops[J]. Wheat Genet, 1978, 1: 261-272.
- [16] Konstanin C, Celia A, Hans K. Batch machine production with perishability time windows and limited batch size[J]. European J of Operational Research, 2011, 210(1): 37-47.
- [17] 赵燕伟, 吴斌, 蒋丽, 等. 车辆路径问题的双种群遗传算法求解方法[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(3): 303-306
(Zhao Y W, Wu B, Jiang L, et al. Double populations genetic algorithm for vehicle routing problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(3): 303-306.)
- [18] 陶宇. Job-shop类型机器人制造单元调度问题与算法研究[D]. 广州: 广东工业大学机电工程学院, 2014.
(Tao Y. Research scheduling problem and algorithm of job-shop robotic manufacturing cell[D]. Guangzhou: School of Electromrchanical Engineering Guangdong University of Technology, 2014.)
- [19] Dang Q, Nguyen L. A heuristic approach to schedule mobile robots in flexible manufacturing environments[J]. Procedia CIRP, 2016, 40: 390-395.
- [20] Long C, Hui X, Lu C, et al. Learning-based adaptive dispatching method for batch processing machines[C]. Winter Simulation Conf on Simulation: Making Decisions in A Complex World. Washington: IEEE Press, 2013: 3756-3765.
- [21] Elmi A, Topaloglu S. Cyclic job shop robotic cell scheduling problem: Ant colony optimization[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017(111): 417-432.

作者简介

吴秀丽(1977—), 女, 副教授, 博士, 从事制造过程智能优化调度算法等研究, E-mail: wuxiuli@ustb.edu.cn;

袁琦(1995—), 女, 硕士生, 从事智能制造系统生产调度的研究, E-mail: 539964118@qq.com.

(责任编辑: 孙艺红)

《控制与决策》入选《中国科技期刊卓越行动计划》项目

本刊讯: 2019年11月25日,中国科协正式公布2019年度《中国科技期刊卓越行动计划》评选结果.经项目申报、资格审查、陈述答辩和专家委员会复核,产生了中国科技期刊卓越行动计划领军期刊、重点期刊、梯队期刊、高起点新刊、集群化试点入选项目共计285项,由教育部主管东北大学主办的学术期刊《控制与决策》入选“中国科技期刊卓越行动计划梯队期刊”项目.

《中国科技期刊卓越行动计划》由中国科协、财政部、教育部、科学技术部、国家新闻出版署、中国科学

院、中国工程院联合实施,以5年为周期,面向全国科技期刊系统构建支持体系,是迄今为止我国在科技期刊领域实施的力度最大、资金最多、范围最广的重大支持专项.能够入选该计划项目是对《控制与决策》30多年来在引领我国学科发展中发挥重要作用的高度认可,也是重任在肩.感谢各级领导、期刊编委和评审专家,以及广大作者和读者一如既往的支持与关爱!未来,《控制与决策》将依托项目支持继续坚守初心争一流,为构建开放创新、协同融合、世界一流的中国科技期刊体系而努力奋斗.