

文章编号:1671-6833(2018)06-0059-05

基于广义粒子群优化模型的工艺规划方法研究

文笑雨, 罗国富, 李 浩, 肖艳秋, 乔东平, 李晓科

(郑州轻工业学院 河南省机械装备智能制造重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘 要: 在广义粒子群优化模型基础上, 结合工艺规划问题的特性, 设计了求解工艺规划问题的改进广义粒子群优化算法. 该算法采用当前粒子与个体极值库、种群极值库进行交叉操作的方式, 使粒子能够从个体极值和种群中获取更新信息, 引入变邻域搜索算法作为粒子的局部搜索策略. 实例测试结果显示, 与其他算法相比, 本文算法在求解工艺规划问题时具有更高的求解效率和更好的稳定性.

关键词: 广义粒子群优化算法; 工艺规划; 变邻域搜索; 组合优化

中图分类号: TH164 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.009

0 引言

工艺规划的输入是产品的设计数据, 输出为产品具体的制造信息, 它对制造系统的性能有着重要的影响^[1]. 由于柔性制造系统和数控加工中心的广泛应用, 许多零件在生产加工时, 存在大量的柔性工艺可供选择, 同时, 每道加工工序还有众多可选的加工资源, 这使得工艺规划问题成为一个典型的 NP (non-deterministic polynomial) -Complete 问题, 传统的方法很难有效地解决该问题^[1].

近年来, 越来越多的智能优化算法被应用于解决现代制造系统中的工艺规划问题, 如粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO)^[1]、殖民竞争算法^[2]、蚁群算法^[3-4]、蝙蝠算法^[5]、遗传算法^[6] (GA)、禁忌搜索^[6] (TS) 和模拟退火算法^[6] (SA) 等. 在上述方法中, PSO 算法是一种基于群体智能理论的优化算法. 传统的 PSO 适合于处理连续优化问题, 随着研究的深入, 许多学者对传统的 PSO 进行改进, 将其广泛应用于诸多复杂的组合优化问题中, 如旅行商问题^[7]、作业车间调度问题等^[8-9]. 其中, 高海兵等^[7]提出的广义粒子群优化 (general PSO, GPSO) 模型建立了一种将 PSO 应用于组合优化问题的通用思路, 在应用 GPSO 模型求解工艺规划问题时, 值得进一步去探索更加有效的粒子全局更新策略和局部搜索策略.

笔者在广义粒子群优化模型基础上, 结合工艺规划问题的特性, 设计了基于个体极值库和种群极值库的粒子全局更新策略, 引入变邻域搜索算法作为粒子的局部搜索策略, 提出了求解工艺规划问题的改进 GPSO (improved GPSO, IGPSO) 算法, 并使用已有工艺规划文献中的 6 个典型零件对提出的算法进行了测试, 验证了提出算法的有效性.

1 工艺规划问题描述

本文研究的工艺规划问题可被描述为: 某待加工零件具有多种加工特征, 每种加工特征具有不同的可选加工工艺, 每一种可选加工工艺可能包含多道加工工序, 每道加工工序可以在若干台可选机器上进行加工, 被加工零件的不同特征之间具有一定的次序约束关系. 工艺规划的目的是在已有加工资源和加工约束的情况下, 确定被加工零件的工艺路线, 从而使得某项指标达到最优. 在本文中, 选择待加工零件的加工时间作为优化目标, 并进行如下假设:

- (1) 同一零件的不同工序不能被同时加工;
- (2) 在 0 时刻, 所有的机器都是可用的;
- (3) 每道工序的加工时间被定义为常数;
- (4) 一个零件在一台机器上加工完成之后, 它被立刻传送至工艺路线中的下一台机

器,零件在不同机器之间的传输时间被定义为常数;

(5) 机器加工每道工序的准备时间和工序加工顺序是相互独立的,并被包含在每道工序的加工时间中.

为了形象地描述所研究的问题,针对某待加工零件详细说明如何进行工艺规划操作.表 1 给出了某零件的加工工艺信息表.

该零件包含有 9 个加工特征,有 5 台机器可供选择对零件不同的工序进行加工.确定该零件的工艺路线需要经过三个步骤:第一,确定不同加工特征的顺序,该顺序必须满足不同特征之间的次序约束关系;第二,确定每种加工特征具体的加工工艺;第三,对具有可选加工机器的工序确定具体的加工机器.

表 1 某零件的加工工艺信息表

Tab.1 Machining process information of a part				
特征	可选工艺	可选加工机器	加工时间	约束
F_1	O_1	M_1, M_2	13,8	在 F_2 , F_3 之前
	O_2-O_3	$M_2, M_3/M_3, M_4$	9,11/12,9	
F_2	O_4-O_5	$M_2, M_3/M_4$	23,17/18	—
	$O_6-O_7-O_8$	$M_3, M_5/M_3, M_4/M_4$	9,12/7,13/10	
F_3	O_9	M_1, M_4	27,23	—
F_4	$O_{10}-O_{11}$	$M_3, M_5/M_1, M_5$	5,8/6,12	在 F_7 , F_8 之前
	O_{12}	M_4, M_5	17,22	
F_5	O_{13}	M_3, M_4, M_5	43,47,46	—
F_6	$O_{14}-O_{15}$	$M_1, M_4, M_5/M_3, M_4$	18,19,21/17,14	—
F_7	O_{16}	M_2, M_3, M_5	31,28,34	在 F_9 之前
F_8	O_{17}	M_2, M_3, M_5	10,13,7	—
F_9	O_{18}	M_3, M_4	32,36	—

当该零件的工艺路线确定之后,可以计算出该零件的总加工时间.基于上述问题描述,本文研究的工艺规划问题优化目标为零件的总加工时间 (processing time, PT) 最短,具体计算方法如下所示:

Min $PT = OT + TT,$ (1)

式中: OT 为零件的工序加工时间; TT 为零件在不同机器之间的传输时间.

$$OT = \sum_{i=1}^n OT_i.$$
(2)

式中: OT_i 为工艺路线中第 i 道工序的加工时间; n 为零件的工艺路线中包含的工序数目.

$$TT = \sum_{i=1}^{n-1} TT_{M_i, M_{i+1}} \times \Omega(M_i, M_{i+1}).$$
(3)

如果零件相邻的两道工序在不同的机器上进行加工,则需要一定的机器传输时间, $TT_{M_i, M_{i+1}}$ 为从工艺路线中第 i 道工序的加工机器 M_i 转换到第 $i+1$ 道工序的加工机器 M_{i+1} 所需要的传输时间.

$$\Omega(M_i, M_{i+1}) = \begin{cases} 1, & \text{if } M_i \neq M_{i+1}; \\ 0, & \text{if } M_i = M_{i+1}. \end{cases}$$
(4)

当相邻两道工序在相同的机器上加工时,式 (4) 为 0;当相邻两道工序在不同的机器上加工时,式 (4) 为 1.

2 IGPSO 求解工艺规划问题

2.1 广义粒子群优化算法模型

高海兵等^[7]通过对传统 PSO 核心优化机理的分析,忽略粒子的具体更新策略,总结出了 GPSO 模型,其基本流程如图 1 所示.笔者在 GPSO 模型下设计求解工艺规划问题的 IGPSO 算法,接下来将分别介绍基于 IGPSO 算法的工艺规划方法主要组成部分以及算法流程.

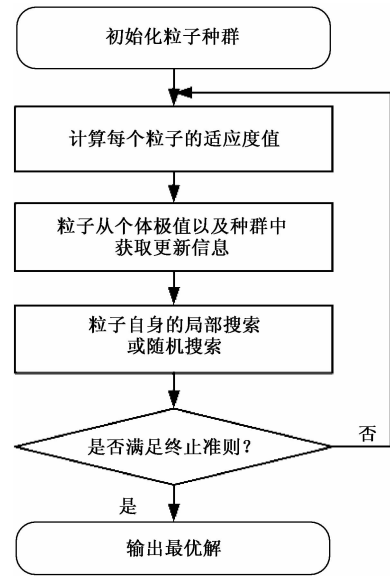


图 1 广义粒子群优化模型^[7]

Fig.1 General particle swarm optimization model

2.2 粒子的编码与解码

每一个粒子代表零件的一条具体的工艺路线,笔者采用文献[1]中的编码与解码方法对粒子进行编码与解码操作.每一个粒子包含三段长度不同的序列:第一段为特征序列;第二段为可选工艺序列,这两段序列的长度均等于零件的总特征数;第三段为可选机器序列,该序列的长度等于零件的总工序数.以表 1 中的零件为例,一种可行的粒子编码方案如图 2 所示.特征序列代表的含

义为该零件特征加工顺序为: $F_4-F_1-F_8-F_7-F_5-F_9-F_2-F_3-F_6$.

特征序列:

4	1	8	7	5	9	2	3	6
---	---	---	---	---	---	---	---	---

可选工艺序列:

1	2	1	2	1	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

可选机器序列:

2	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	3	2	2	1	2
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

图 2 粒子对应的编码方案

Fig. 2 Corresponding encoding scheme for a particle

可选工艺序列的第 i 个位置的数字 k , 代表了第 i 个特征选择第 k 种可选加工工艺进行加工, 如图 2 中可选工艺序列中第二个位置为 2, 则代表特征 2 从它的可选工艺集 $\{O_4-O_5, O_6-O_7-O_8\}$ 中选择第 2 种加工工艺, 即 $O_6-O_7-O_8$ 进行加工. 可选机器序列中第 i 个位置的数字 k , 代表了零件的第 i 道工序从可选加工机器集当中选择第 k 个加工机器, 如图 2 中可选机器序列第 1 个位置为 2, 则代表工序 1 从它的可选加工机器集 $\{M_1, M_2\}$ 中选择了第二个机器, 即 M_2 进行加工.

该编码方案经解码后代表所确定的零件工艺路线为: $O_{12}(M_4)-O_1(M_2)-O_{17}(M_2)-O_{16}(M_3)-O_{13}(M_3)-O_{18}(M_3)-O_6(M_3)-O_7(M_3)-O_8(M_4)-O_9(M_4)-O_{14}(M_4)-O_{15}(M_4)$.

2.3 初始化粒子种群

粒子种群中的每一个粒子代表零件的一种工艺规划方案. 按照编码操作, 每一个粒子包含三段序列, 均采用随机初始化的方法进行初始化操作. 每个粒子随机初始化编码之后, 利用文献[10]的约束调整方法调整编码方案, 然后使用解码操作对其进行解码, 获得具体该粒子所代表的零件工艺路线; 根据具体的工艺路线, 计算该工艺路线下零件的总加工时间, 将染色体所对应工艺路线的总加工时间直接作为适应度值.

2.4 粒子的全局更新策略

IGPSO 中粒子的全局更新采用文献[1]中的交叉操作来实现. 为了避免进行无效的交叉操作, 设定个体极值库, 保存粒子在搜索过程中发现的最好的若干个解(一般取 2~3 个)^[11]. 为了避免算法过早收敛, 设定种群极值库保存整个搜索过程中发现的最好的若干个解(一般取整个种群的 20%~30%). 当前粒子通过与个体极值库和种群极值库中不同的粒子进行交叉操作, 获取更新信息.

2.5 粒子的局部搜索策略

采用变邻域搜索算法作为粒子的局部搜索策略, 详细步骤如下:

步骤 1 根据粒子的编码方案, 定义 3 种邻域结构 $N1$ 、 $N2$ 、 $N3$. 其中, $N1$ 为交换操作, 即随机选择粒子中特征序列上不同的两个位置, 将这两个位置上的数值进行交换; $N2$ 为插入操作, 随机选择粒子中特征序列的一个位置, 将这个位置上的数值插入到该序列的任意其他位置之前; $N3$ 为变异操作, 随机选择粒子中可选工艺序列、可选加工机器序列中的一个位置, 根据其可选加工资源情况, 选择另外一种加工资源. 设定外循环最大迭代次数 $MaxIterOut$, 内循环最大迭代次数 $MaxIterIn$. 令 $i=0, l=0$. i 代表当前内循环次数, l 代表当前外循环次数.

步骤 2 随机挑选一种邻域结构, 产生当前粒子 $Pcurr$ 的邻域解 $P1$.

步骤 3 当 i 大于 $MaxIterOut$ 时, 输出 $Pcurr$; 否则, 顺序执行.

步骤 4 当 l 大于 $MaxIterIn$ 时, 令 $i=i+1$, 若 $P1$ 的适应度值小于 $Pcurr$, 则令 $Pcurr=P1$, 跳转到步骤 3; 当 l 小于或等于 $MaxIterIn$ 时, 顺序执行.

步骤 5 令 $k=1$, k 代表当前使用的邻域结构编号.

步骤 6 根据 Nk 随机产生 $P1$ 邻域解 $P2$. 如果 $P2$ 的适应度值小于 $P1$, 则令 $P1=P2, k=1$, 跳转到步骤 6(继续按照当前邻域结构进行搜索); 如果 $P2$ 的适应度值大于 $P1$, 则令 $k=k+1$, 如果 k 小于等于 3, 跳转到步骤 6(继续搜索下一个邻域). 如果 k 大于 3, 顺序执行.

步骤 7 令 $l=l+1$, 跳转到步骤 4.

2.6 IGPSO 求解工艺规划的总流程

步骤 1 设定算法参数: 种群规模 $PopSize$; 种群极值库规模 $GlobSize$; 个体极值库规模 $SelfSize$; 最大迭代次数 $MaxGen$; 粒子全局搜索的概率 $GlobProb$; 粒子局部搜索的概率 $LocalProb$; 变邻域搜索中外循环最大迭代次数 $MaxIterOut$; 内循环最大迭代次数 $MaxIterIn$.

步骤 2 随机初始化种群和个体极值库, 挑选种群中适应度值最好的 20% 个粒子存入种群极值库.

步骤 3 依据粒子全局搜索的概率, 依次对种群中的粒子进行全局搜索, 更新个体极值库和种群极值库.

步骤 4 依据粒子局部搜索的概率,依次对种群中的粒子进行局部搜索,更新个体极值库和种群极值库.

步骤 5 如果循环达到最大迭代次数,则输出种群极值库中最好的个体作为优化结果;如果循环没有达到最大迭代次数,则跳转到步骤 3.

3 计算结果及分析

3.1 算例及计算结果

上述提出的 IGPSO 算法用 C++ 语言编程实现. 本文的测试实例包含对 6 个不同的零件进行工艺规划,以验证提出算法的有效性. 零件 1 包含 14 个加工特征 20 道可选加工工序;零件 2 包含 15 个加工特征 16 道可选加工工序;零件 3 包含 11 个加工特征 14 道可选加工工序;零件 4 包含 13 个加工特征 13 道可选加工工序;零件 5 包含 7 个加工特征 9 道可选加工工序;零件 6 包含 14 个加工特征 18 道可选加工工序. 零件图和具体的加工信息表见文献[1]. 笔者假定在车间中有 5 台机器用于零件加工,零件在不同机器之间的传输时间见文献[1]. 算法参数设置如下:种群规模设定为 200,种群极值库规模设定为 40,个体极值库规模设定为 3,最大迭代次数设定为 100,粒子全局搜索的概率设定为 0.8,粒子局部搜索的概率设定为 0.3,变邻域搜索中外循环最大迭代次数设定为 20,内循环最大迭代次数设定为 20.

使用笔者提出的 IGPSO 算法针对 6 个零件独立计算 20 次,统计了 20 次运行中获得零件工

艺路线对应加工时间的最好值、平均值以及平均收敛代数,具体计算结果以及与其他算法的对比如表 2 所示,其中,SA、GA 和 MP SO(改进 PSO)算法的计算结果均来自文献[1]. 笔者提出的 IGPSO 获得的最优工艺路线如表 3 所示.

表 2 IGPSO 计算结果及与其他算法的对比
Tab.2 Results obtained by IGPSO and the comparisons with other algorithms

零件	算法	最好值	平均值	平均收敛代数
1	SA ^[1]	342	344.6	51.20
	GA ^[1]	342	343.8	46.20
	MP SO ^[1]	341	341.5	34.20
	IGPSO	341	341.0	16.75
2	SA ^[1]	187	190.2	46.30
	GA ^[1]	187	188.5	41.10
	MP SO ^[1]	187	187.0	33.10
	IGPSO	187	187.0	17.75
3	SA ^[1]	176	179.2	55.80
	GA ^[1]	176	177.5	50.60
	MP SO ^[1]	176	176.0	39.50
	IGPSO	176	176.0	11.75
4	SA ^[1]	222	222.0	70.30
	GA ^[1]	222	222.0	45.20
	MP SO ^[1]	222	222.0	31.80
	IGPSO	222	222.0	21.80
5	SA ^[1]	212	212.2	60.70
	GA ^[1]	212	212.0	51.30
	MP SO ^[1]	212	212.0	42.50
	IGPSO	212	212.0	41.55
6	SA ^[1]	361	363.4	98.10
	GA ^[1]	360	361.1	83.70
	MP SO ^[1]	359	360.5	72.30
	IGPSO	358	360.25	55.85

表 3 IGPSO 获得的最优工艺路线
Tab.3 Optimal process plans obtained by IGPSO

零件	IGPSO 获得的最优工艺路线
1	$O_1(M_4)-O_6(M_4)-O_{11}(M_4)-O_{18}(M_4)-O_5(M_4)-O_7(M_4)-O_8(M_4)-O_9(M_4)-O_{10}(M_4)-O_4(M_4)-O_3(M_4)-O_2(M_4)-O_{12}(M_4)-O_{13}(M_4)-O_{14}(M_4)-O_{15}(M_4)-O_{16}(M_4)-O_{17}(M_4)-O_{19}(M_4)-O_{20}(M_4)$
2	$O_{16}(M_4)-O_1(M_4)-O_2(M_4)-O_{14}(M_4)-O_6(M_4)-O_7(M_4)-O_{15}(M_4)-O_3(M_4)-O_4(M_4)-O_5(M_4)-O_9(M_4)-O_{13}(M_4)-O_8(M_4)-O_{11}(M_4)-O_{12}(M_4)-O_{10}(M_4)$
3	$O_1(M_4)-O_2(M_4)-O_6(M_4)-O_5(M_4)-O_3(M_4)-O_4(M_4)-O_{14}(M_4)-O_{12}(M_4)-O_{13}(M_4)-O_9(M_4)-O_{10}(M_4)-O_{11}(M_4)-O_8(M_4)-O_7(M_4)$
4	$O_3(M_1)-O_2(M_1)-O_{13}(M_1)-O_1(M_1)-O_4(M_1)-O_{10}(M_1)-O_{11}(M_1)-O_5(M_1)-O_6(M_1)-O_7(M_1)-O_8(M_1)-O_9(M_1)-O_{12}(M_1)$
5	$O_1(M_2)-O_3(M_2)-O_5(M_2)-O_6(M_5)-O_9(M_3)-O_4(M_5)-O_7(M_5)-O_8(M_4)-O_2(M_4)$
6	$O_{16}(M_4)-O_2(M_4)-O_{14}(M_2)-O_3(M_2)-O_8(M_2)-O_9(M_2)-O_{10}(M_2)-O_5(M_2)-O_6(M_1)-O_7(M_1)-O_1(M_1)-O_{11}(M_1)-O_{12}(M_1)-O_{18}(M_1)-O_{17}(M_1)-O_{15}(M_1)-O_{13}(M_1)-O_4(M_1)$

从表 2 可以看出,针对零件 1~零件 5,使用本文提出的 IGPSO 算法在 20 次独立运行中每次均都能够找到最优解.在最好值上,针对零件 1,IGPSO 算法的计算结果优于 SA 和 GA,与 MPSO 的计算结果相同.针对零件 2、零件 3、零件 4 和零件 5,4 种算法在最好值上的计算结果相同,但是与 SA、GA 和 MPSO 算法相比,笔者提出的 IGPSO 算法的平均收敛代数较少.针对零件 6,笔者提出的 IGPSO 在最好值、平均值和平均收敛代数上均优于其他 3 种算法.

3.2 计算结果分析

整体来说,4 种算法在本文的测试实例中显示的性能从优到劣顺序为:IGPSO > MPSO > GA > SA.虽然在零件 1~零件 5 的测试中,SA 算法获得了最优解,但是与其他 3 种算法相比,它所获得的平均值比较大,平均收敛代数也比较大.这是因为 SA 是一种局部搜索算法,计算结果比较依赖于初始解.相比 SA,全局搜索能力比较好的 GA 获得的计算结果更加稳定,平均收敛次数低于 SA,在零件 6 的测试中,获取了比 SA 更好的解.在零件 1~零件 5 的测试中,MPSO 获得的最好值与 GA 相同,平均值小于或等于 GA 获得的结果,平均收敛代数均优于 GA.在零件 6 的测试中,MPSO 获得了更小的最优解.这是因为,与 GA 的并行全局搜索策略相比,MPSO 在粒子的全局更新策略上有所不同,当前粒子通过与个体极值和种群极值库中的粒子进行交叉操作,迅速向解空间中较好的区域进行移动,因此,MPSO 平均收敛代数小于 GA.在零件 1~零件 5 的测试中,IGPSO 取得了与 MPSO 相同的最好值,在平均值上略优于 MPSO 获得的计算结果,平均收敛次数优于 MPSO.在对零件 6 的测试中,IGPSO 获得了新的最优解,平均值与平均收敛次数也优于 MPSO 获得的结果.与 MPSO 相比,笔者提出的 IGPSO 在算法的局部搜索策略上引入了变邻域搜索算法,增强了粒子的局部搜索能力,因此算法的平均收敛次数较少,且在零件 6 的测试中发现了新的最优解.通过不同测试实例的计算结果可以证明,笔者提出的算法 IGPSO 在求解工艺规划问题上具有一定优势.

4 结束语

笔者设计了一种 IGPSO 算法求解柔性工艺规划问题,计算结果显示,与其他算法相比,笔者提出的 IGPSO 算法在求解工艺规划问题时具有更高的求解效率和更好的稳定性.

在今后的研究工作中,可以从工艺规划问题建模和求解算法设计两个方向进一步深入研究.在工艺规划问题建模上,考虑进一步研究面向绿色制造模式的工艺规划问题建模方法;在求解算法设计上,笔者设计的 IGPSO 算法,是通过改变 GPSO 算法的操作算子,对算法的收敛和发散进行控制.近年来,涌现出了一些新型的群体智能优化算法,能够将数据挖掘的思想融入群体智能优化算法设计中,如头脑风暴优化算法^[12],为算法的设计提供了一种新思路.因此,考虑在今后的研究工作中,对基于头脑风暴算法的柔性工艺规划方法进行进一步的研究.

参考文献:

[1] LI X Y, GAO L, WEN X Y. Application of an efficient modified particle swarm optimization algorithm for process planning[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2013, 67(5/8): 1355-1369.

[2] LIAN K L, ZHANG C Y, SHAO X Y, et al. Optimization of process planning with various flexibilities using an imperialist competitive algorithm[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2012, 59(5/8): 815-828.

[3] 武轩. 复杂零件工艺路线重用与优化技术及在数控机床中的应用[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院, 2014.

[4] 黄凤立, 顾金梅, 张礼兵, 等. 基于禁忌制造特征动态调整的 STEP-NC 工艺路线蚁群优化方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(5): 596-602.

[5] 范孝良, 吴学华, 赵爱林, 等. 一种基于蝙蝠算法的工艺规划方法[J]. 图学学报, 2015, 36(6): 856-861.

[6] YUSOF Y, LATIF K. Survey on computer-aided process planning[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2014, 75(1/4): 77-89.

[7] 高海兵, 周驰, 高亮. 广义粒子群优化模型[J]. 计算机学报, 2005, 28(12): 1980-1987.

[8] 彭传勇, 高亮, 邵新宇, 等. 求解作业车间调度问题的广义粒子群优化算法[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(6): 911-917.

[9] 潘全科, 王文宏, 朱剑英, 等. 基于粒子群优化和变邻域搜索的混合调度算法[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(2): 323-328.

[10] LI W D, ONG S K, NEE A. Optimization of process plans using a constraint-based tabu search approach[J]. International journal of production research, 2004, 42(10): 1955-1985.

The Morphology and Mechanical Properties of Poly(Lactic Acid)
Stereocomplex Crystal

LIU Yanping^{1,2}, WEI Hanghang^{1,2}, LI Qian^{1,2}

(1. School of Mechanics&Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Micro-nano Moulding Technology National Center for International Joint Research, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The surface morphology and the difference in mechanical properties between crystalline region and amorphous region of the stereocomplex crystal were studied in this paper. The same mass ratio of Poly(L-lactic acid) (PLLA) and poly(D-lactic acid) (PDLA) stereocomplex was prepared by solution blending. Differential Scanning Calorimeter, Polarizing Microscope, Atomic Force Microscope, Confocal Laser Scanning Microscope and Nano Indentation Tester were used to list the surface morphology of PLA stereocomplex crystal and the diversification of mechanical properties. The result showed that a high degree of stereo-tacticity of PLLA/ PDLA blend could be achieved from the mass ratio of 1/1 for sample. The research also showed that obviously depression phenomenon on the surface of crystal was formed due to the contraction of the molecular chain. Furthermore, the hardness and modulus of crystalline region were improved compared to the amorphous region.

Key words: poly(lactic acid) ; stereocomplex crystal; surface morphology; mechanical properties

(上接第 63 页)

与工程学院,2009.

[11] 何铁芳. 基于改进广义粒子群优化的开放式车间调度方法研究[D]. 武汉:华中科技大学机械科学

[12] 程适,陈俊风,孙奕菲,等. 数据驱动的发展式头脑风暴优化算法综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018,39(3): 22 – 28.

Research on Process Planning Problems Based on General Particle
Swarm Optimization Model

WEN Xiaoyu, LUO Guofu, LI Hao, XIAO Yanqiu, QIAO Dongping, LI Xiaoke

(Henan Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Mechanical Equipment,Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: An Improved General Particle Swarm Optimization (IGPSO) algorithm was proposed for process planning problem based on the GPSO model and the characteristics of process planning problem. Crossover operations were utilized to achieve the particles to obtain updated information from individual extreme library and population extreme library. Variable Neighborhood Search algorithm was introduced as a local search strategy for particles. A set of instances have been conducted to examine the proposed algorithm and the comparisons among other algorithms appeared in current literature were also presented. The experimental results showed the proposed algorithm had higher efficiency and better stability in solving process planning problems.

Key words: general particle swarm optimization; process planning; variable neighborhood search; combination optimization