

考虑了机器和模具维护的注塑车间生产调度智能优化

牛 奔^{1,2}, 毕 莹¹, 张芳芳¹, 刘 憬¹

(1. 深圳大学管理学院, 广东 深圳 518060; 2. 香港理工大学工学院, 九龙 香港)

摘 要:有效集成预防性机器和模具维护的生产调度方案能够大大提高生产系统的可靠性和稳定性,提高生产效率,降低生产成本。本文以注塑车间生产为背景,对考虑机器和模具预防性维护的生产调度问题进行研究,并运用结构重组的细菌觅食优化(SRBFO)算法对这一问题进行优化求解。传统的基于时间的、维护时长固定的维护策略并不能够很好的符合实际生产的需要,因此,本文考虑了动态随机的、机器和模具维护时长随机器和模具年龄变化的维护策略,将机器和模具维护同样当作决策变量之一整合进入产品生产调度决策中。接着,我们选择了 SRBFO 算法为这种典型的 NP 问题来寻找最优的生产调度方案。在求解过程中,为了实现算法中细菌“位置矢量”到“可行调度方案”的映射,必须对细菌进行编码解码,每个细菌需要携带五个方面的信息才能够完整的通过三种不同的解码方式转化为一个可行的调度方案。最后,将 SRBFO 算法用来求解 5 个不同规模的生产调度问题实例,并与 PSO 算法进行了对比,实验结果表明了无论是在解的质量还是算法稳定性上面,SRBFO 算法在处理本文所研究的生产调度问题上的性能要优于 PSO 算法。同时为了进一步验证本文所提的维护策略的优越性,在实例求解中将传统的基于机器年龄的、维护时长固定的维护策略作为对比策略,实验结果表明本文所提出了动态随机的、预防性维护时长随机器和模具年龄变化的维护策略相比较基于加工时间的、维护时长固定的维护策略而言,更能够缩短最大完工时间。

关键词:维护;生产调度;优化

中图分类号:C931; O221 **文献标识码:**A

1 引言

随着市场竞争的日趋激烈,生产调度作为一种有效的资源配置和优化手段,受到了越来越多的关注。自从 1954 年 Johnson^[1]提出流水车间调度问题,而后 Muth 和 Thompson^[2]在 1963 年提出了车间调度问题的著名实例,生产调度问题逐渐成为一个热门话题,受到了学术界的广泛关注。许多类型的生产调度问题已被广泛研究,如单机调度问题^[3]、平行机调度问题^[4], flow-shop 调度问题^[5]、job-shop 问题^[6-7]以及 open-shop 调度问题^[8]等。

然而大部分的生产调度问题都是基于许多实际工业生产调度问题的简化模型,具有普适性而不具有针对性,因此并不适合于所有的车间的生产。基

于此,本文特别关注注塑车间的生产调度问题,并对此进行研究。

注塑行业是一种传统工业,主要是生产注塑产品,其加工模式使得许多形状较为复杂的零部件可以更为精准的生产出来,满足实际需求。随着国民对住房、汽车等方面的需求量越来越大,注塑加工企业具有广阔的发展前景。

注塑车间中最重要的就是注塑过程,注塑过程是指将融化的塑料经过注塑机喷嘴注射到相应的模具模腔中,经冷却固化成型为塑料制品^[9]。注塑车间调度问题即为如何将不同的注塑模具均衡的安排到不同压力的注塑机上生产出不同的注塑产品,并在满足相关约束的条件下优化相关的性能指标。

目前已有相关研究人员对注塑车间的生产调度问题进行了研究,如刘洋洋^[10]结合生产实际,考虑了工艺、设备和批量约束条件,建立了注塑生产调度模型。高维龙^[9]综合考虑了注塑模腔数、机器经济属性、注塑模状态、相同注塑模数量、工件投放时间和交货期、工件权重、工件颜色等约束条件,建立了复杂批调度模型。尽管上述研究针对注塑车间的调度问题进行了较为全面和系统的研究,但都忽略了

收稿日期:2015-06-02; 修订日期:2015-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71001072, 71271140, 71471158, 71461027); 香港学者计划 2012(G-YZ24); 中国博士后基金(20100480705); 广东省自然科学基金(S2012010008668, 9451806001002294); 深圳市基础研究计划(JC201005280492)

作者简介:牛奔(1980-),男(汉族),安徽全椒人,深圳大学副教授,香港理工大学博士后,研究方向:智能管理。

生产过程中最重要的操作——维护。

在实际生产中,由于生产系统的稳定性同时依赖于模具和机器,一旦某一个机器发生故障等情况发生,整个生产系统的运行往往会受到影响。为了提高生产系统的可靠性和稳定性,许多研究人员对整合了机器维护策略进行了研究,如 Stadnicka 等^[11]提出一种带有风险维护的机器维修策略,并对其的性能进行了系统分析,如 Guo,Chiming^[12]等人在 CBM 的概念下,针对面向任务的系统,提出了一个基于维纳退化(Wiener Degradation)的机器维护优化模型等。

为了防范这种不确定因素在注塑车间的发生,提高生产效率,本文针对注塑车间的生产过程,将预防性维护考虑到该生产调度过程中,来提高生产系统的可靠性和稳定性。但是目前许多对考虑了维护的生产调度问题的研究主要立足于大部分的实际工业生产调度问题,只考虑了机器维护,而注塑车间生产中,模具的损坏等故障的发生也是不可忽视的,一般情况下,模具损坏或故障同样会导致生产过程的中断,因此模具预防性维护应该与机器维护同样重要。另外一方面,大部分的维护策略都是基于时间的,维护时长固定的,并不能够对资源进行较好的整合,特别是当机器或模具在等待加工时,如果能够较好的利用该等待时间进行维护,则能够大大的提高生产效率。基于以上两点,本文提出了动态随机的、预防性维护时长随机器和模具年龄变化的维护策略,并将该策略整合入注塑车间的生产调度过程中。同时,为了验证这一策略的优越性,本文将该策略与预防性维护时长固定的策略进行了对比研究。

大部分的生产调度问题都具有 NP-hard 性质^[13],本文研究的考虑机器和模具维护的注塑车间生产调度问题也不例外。为了能够在可接受的时间内获得较为满意的解,许多研究人员采用进化算法对调度问题进行求解,如 Gao Kaizhou 等人^[14]采用了两个阶段的人工蜂群算法来求解有新作业插入的灵活的作业车间调度问题。Asadzadeh^[15]将局部搜索技术与遗传算法混合,并用来求解智能代理作业车间调度问题。Peng Bo 等人^[16]将禁忌搜索算法引入到路径重连框架中,来为车间作业调度问题的生成解决方案。以上研究虽然获得不错的结果,但是由于大部分的算法都是问题依赖型,因此,为了给本文所题的生产调度问题寻找最有效的求解算法。本文采用了结构重组的细菌觅食优化(SRBFO)算

法对该问题进行求解。

细菌觅食优化(BFO)算法是一种群体智能算法,是 Passino^[17]受启发于大肠杆菌在人体肠道中的觅食过程而开发出来的。SRBFO 算法是 BFO 算法的一种变型,于 2014 年被 Niu Ben 等人^[18]提出,目前已被应用于函数优化^[19]、投资组合^[20]等问题上。为了进一步对 SRBFO 算法进行研究以及扩展其算法在生产调度问题上的应用,SRBFO 算法被用来为本文所研究的考虑了机器和模具预防性维护的注塑车间生产调度问题寻找最优的调度方案。

2 问题描述

注塑车间的调度问题与经典的车间调度问题如 Flow-Shop 问题、Job-Shop 问题等有所不同。在注塑车间的调度问题中,每次调度的产品是有多种类型的,产品之间没有相关性,但是每个产品都对应了一个生产批量。所有产品只需要经过一种工序即注塑工序即可完成加工过程,在该过程中,每个产品必须依靠相应的模具在机器上进行加工。由于模具存在多腔等特点,不同的产品可以用同一副模具上进行生产。同样,不同的模具可以在同一台注塑机上进行加工操作,但由于机器的差异性,同一副模具在不同注塑机上的加工时间是不同的。注塑车间的调度问题即为将要生产的产品和其对应的模具分配到相应的注塑机上进行加工,在满足相应的系统约束的条件下使得最大完工时间最小。

考虑了机器和模具维护的注塑车间生产调度问题即将维护操作调度到加工过程中,该维护操作可以是基于加工时间(即机器年龄)的,维护时长固定的操作;也可以是动态的、随机的、维护时长随机器和模具年龄变化的操作。如下面章节所示。

2.1 维护策略

与传统的大部分维护时长固定的策略不同,本文提出了维护时长随着机器或模具年龄变化的维护策略,其具体关系如下表 1-2 及图 1-2 所示。

表 1 机器年龄和维护时长的关系

机器年龄	维护时间
$0 < A_1 \leq 200$	150
$200 < A_1 \leq 480$	$160 + A_1 / 4 - 40$
$480 < A_1 \leq 720$	$200 + A_1 / 3 - 50$
$720 < A_1$	720

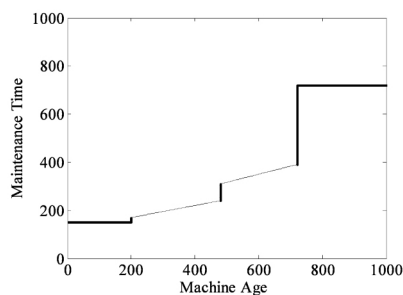


图 1 机器年龄和维护时长的关系图

表 2 模具年龄和维护时长的关系

模具年龄	维护时间
$0 < A_2 \leq 160$	100
$160 < A_2 \leq 400$	$160 + A_2/3 - 40$
$400 < A_2 \leq 640$	$200 + A_2/2 - 50$
$640 < A_2$	640

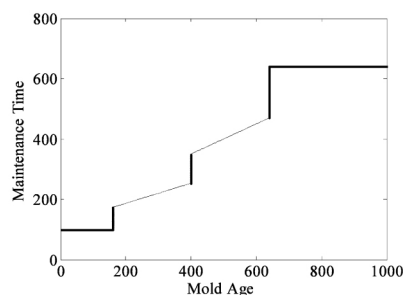


图 2 模具年龄和维护时长的关系图

2.2 问题描述

在本文研究的生产调度问题为:有 $P(p = 1, 2, \dots, P)$ 个产品需要生产,每个产品只能在某台模具上面加工,模具总数为 $D(d = 1, 2, \dots, D)$,注塑车间总共有机器数 $M(m = 1, 2, \dots, M)$,产品 p 的开始加工时间为 S_p ,完成时间为 C_p ,产品的生产批量为 U_p ,单位产品 p 在模具 d 和机器 m 上的加工时间为 P_{pmd} , M_t 表示在时间 t 的可用机器数, D_t 在时间 t 的可用模具数, x_{pmd} 、 y_{pmdt} 、 PM_{mt} 、 PMD_{dt} 均为为决策变量,其中 x_{pmd} 等于 1 表示产品 p 在模具 d 和机器 m 上加工,否则等于 0; y_{pmdt} 等于 1 表示在 t 时间产品 p 在模具 d 和机器 m 上加工,否则等于 0; PM_{mt} 等于 1 表示在 t 时间对机器 m 进行维护,否则等于 0; PMD_{dt} 等于 1 表示在 t 时间对模具 d 进行维护,否则等于 0。

本问题的目标函数为 $\text{Min}(\max(C_p))$,即将机器和模具维护整合进入生产调度后的最大完工时间最小化。其他约束条件和假设条件如下:

(1)在整个机器加工过程中,所有机器都是可用的;

(2)且除去机器维护的时间外,所有机器的可用工作时间是连续的;

(3)各个产品的加工准备时间均包含在加工时间中;

(4)在开始加工前,所有产品都是等待加工的;

(5)不是所有的模具都可以在所有的机器上加工的。

(6)每个产品只能在一个一台机器和模具上进行生产加工;

(7)在同一时刻,一台机器上只能供一个模具加工一种产品;

(8)每个产品的完工时间等于开始时间加上产品批量乘以单位加工时间;

(9)产品在加工过程中占据所有机器和模具的时间等于产品的总加工时间,即产品在生产时是不允许中断的;

(10)机器和模具维护是在机器非加工时间进行的。

3 SRBFO 算法简介

BFO 算法是一种基于种群的随机搜索算法,由 Passino 在 2002 年提出。该算法主要模拟大肠杆菌在人体肠道中搜索食物的过程,即趋化、游动、繁殖、死亡和驱散过程。BFO 算法中主要运用了这四个重要的操作算子来进行细菌位置的更新从而搜索到最好的解。

SRBFO 算法是基于 BFO 算法而提出的一种改进算法。在 BFO 算法中,四个操作算子组成了三层嵌套循环结构,导致 BFO 算法计算复杂,收敛速度缓慢,耗时长。因此 Niu 等人^[18]受启发于 GA、PSO 以及其他智能算法采用的是单循环结构优势,将单循环结构引入到 BFO 算法中提到原始三层嵌套结构,将复制操作、死亡—驱散操作与趋化操作并行进行,提出了 SRBFO 算法,简化了算法计算复杂性。并且相关研究成果已证明了该算法在函数优化和实际问题求解上的有效性,详细情况见 Niac Ben 等^[18-20]。

采用单循环结构的 SRBFO 算法的操作流程图如图 3 所示。

4 SRBFO 算法在生产调度问题上的应用

为了解决第 2 小节所提出来的生产调度问题,寻找出最优的生产及维护调度方案,本节采用了 SRBFO 算法来求解此类问题。

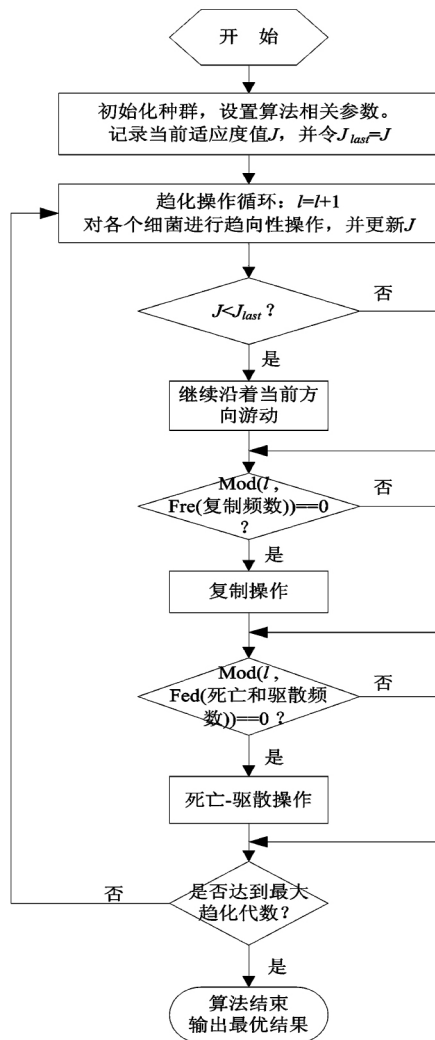


图3 SRBFO 算法的流程图

本文所研究的生产调度问题是典型的离散优化问题，而 SRBFO 算法是一种在连续空间搜索的算法。为了使 SRBFO 能够成功应用于求解此类问题，必须对细菌进行编码和解码，从而实现“位置矢量”到“可行调度方案”的映射。

4.1 编码和解码

在编码过程中，每个细菌必须包含五个方面的信息：①产品的生产调度安排(P)；②与产品相应的模具的生产调度安排(D)；③机器的生产调度安排(M)；④机器的预防性维护调度安排(PM)；⑤模具的预防性维护调度安排(PMD)。一个细菌唯有携带了这个五个方面的信息，才能够代表一个潜在的可行解。因此，在求解过程中，我们对每个细菌的维度进行了分块化，分为4个小区间，即每一个区间代表了一个方面的信息，这个方面的信息加上潜在产品与模具的映射关系构成了一个完整的潜在解。假如在本文的调度问题中，有3个产品需要被生产，分

别有2个模具和机器可供调度，这三个产品分别对应的模具为1、2、2，则在编码中，一个细菌的维度应设为12，分为了4个小区间，则一个细菌的编码如下图所示。

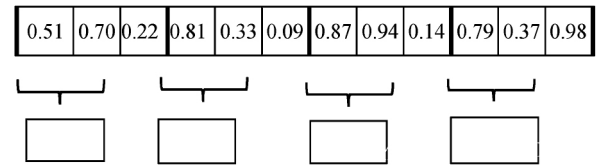


图4 一个细菌的编码实例

想要实现“位置矢量”到“可行调度方案”的映射，必须对细菌的编码进行解码，使得每个细菌的位置矢量经过一定的处理后能够成为一个可行解。因此本文主要采用了三种解码方式，一种是基于随机密钥表示^[21]的解码方式，另外一种是最小位置值^[22]的解码方式，一种是将连续矢量转换为二进制^[23]的解码方式。通过这三种解码，可以将以上连续的位置矢量转变为离散的可行解，从而实现生产调度问题的求解。即如上图4实例，通过转换后可以得到的一个调度方案如表3所示。

表3 上述实例解码后的一个调度方案

产品生产调度安排	2	1	3
模具生产调度安排	2	1	2
机器生产调度安排	2	1	1
机器维护调度安排	0	1	0
模具维护调度安排	0	1	1

4.2 实例求解

在本节中，我们选取了5个不同规模的生产调度问题的算例（算例参数设置见表4），在 Matlab R2011a 中运用 SRBFO 算法和 PSO^[24] 算法对5个算例进行求解。算法实验参数设计如下：实验运行次数为10次，迭代/趋化次数为1000，种群数量为100。在 PSO 算法中，设置惯性权重 $w = 1$ ，加速常数 $c_1 = c_2 = 2$ 。在 SRBFO 算法中，游动次数为2，驱散概率为0.25，复制频数 $Fre = 24$ ，驱散-死亡频数 $Fed = 48$ ，趋化步长为0.1。

表4 算例参数设置

算例	P	D	M	P×D×M
1	15	4	3	15×4×3
2	15	8	3	15×8×3
3	20	4	3	60×12×10
4	30	8	5	30×8×5
5	40	10	6	40×10×6

同时为了验证在 2.1 节中提出的动态随机的、预防性维护时长随机器和模具年龄变化的维护策略的优越性,本小节在实验中选择了基于加工时间的、维护时长固定的维护策略与此进行对比。在维护时长固定的维护策略中,对于机器,如果机器年龄大于 720,则必须进行维护,维护时长为 720;对于模具,如果模具年龄大于 640,则必须进行维护,维护时长

为 640。

生产调度问题中其他参数设置:

- (1)每个工作的数量是 2 到 10 之间的随机整数。
- (2)每个模具在某个机器上面的加工时间是 35 到 55 之间的整数。
- (3)机器的初始工龄为 0。

表 5 算法的寻优结果(算例 1—5)

算例	算法	维护策略	最大值	最小值	平均值	方差
1	PSO	fixed	3290	2607	3.060e+003	2.531e+002
		vary	2908	2.675e+003	2.779e+003	8.523e+001
	SRBFO	fixed	3110	2566	2.827e+003	1.927e+002
		vary	2.758e+003	2.567e+003	2.642e+003	5.758e+001
2	PSO	fixed	2039	1960	1.999e+003	3.064e+001
		vary	1.981e+003	1781	1.870e+003	6.584e+001
	SRBFO	fixed	2006	1960	1.969e+003	1.369e+001
		vary	1.919e+003	1.732e+003	1.832e+003	6.154e+001
3	PSO	fixed	4029	3524	3.865e+003	1.556e+002
		vary	3.806e+003	3.437e+003	3.550e+003	1.195e+002
	SRBFO	fixed	3770	3577	3.690e+003	5.244e+001
		vary	3.494e+003	3.247e+003	3.394e+003	9.001e+001
4	PSO	fixed	4206	3676	3.980e+003	1.645e+002
		vary	3.827e+003	3.419e+003	3.641e+003	1.257e+002
	SRBFO	fixed	4120	3851	3.978e+003	8.027e+001
		vary	3.715e+003	3.435e+003	3.626e+003	7.631e+001
5	PSO	fixed	4525	3855	4.198e+003	2.277e+002
		vary	4.278e+003	3.871e+003	4.043e+003	1.321e+002
	SRBFO	fixed	4631	4248	4.433e+003	1.196e+002
		vary	4.273e+003	4.018e+003	4.134e+003	8.585e+001

对于五个规模不同的实例,两种不同的维护策略(Fixed 和 Vary),SRBFO 算法和 PSO 算法运行 10 次,经过 1000 次迭代后搜索到的最大值、最小值、平均值等数值结果如表 5 所示。图 5~9 则展示了 SRBFO 算法和 PSO 算法在求解分别考虑了不同维护策略的生产调度问题时的收敛曲线。

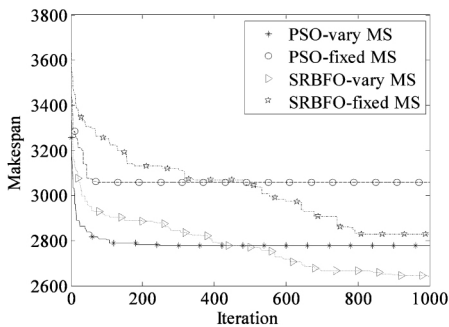


图 5 收敛曲线(算例 1)

分析对比表 5 中的数值结果,可以发现,对于这不同规模的 5 个实例,SRBFO 算法搜索到的最大值

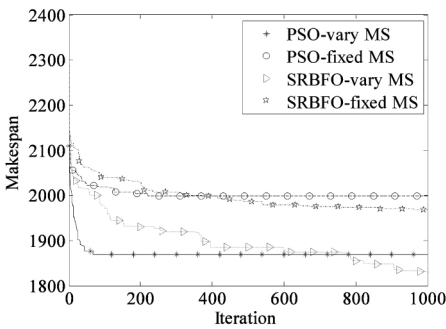


图 6 收敛曲线(算例 2)

均要小于 PSO 算法,除了第 4、5 个实例,SRBFO 算法在实例 1、2、3 上搜索到的最小值均比 PSO 算法要小。从收敛图形同样可以看出,虽然 SRBFO 算法在前期搜索速度比 PSO 算法要慢,但是在迭代后期,SRBFO 算法仍然保持了较好的搜索能力,能够继续开发更多的搜索空间,寻找到最优的解。因此,在处理本文所研究的生产调度问题上,SRBFO 算法表现的出来的性能无论是从解的质量还是从算

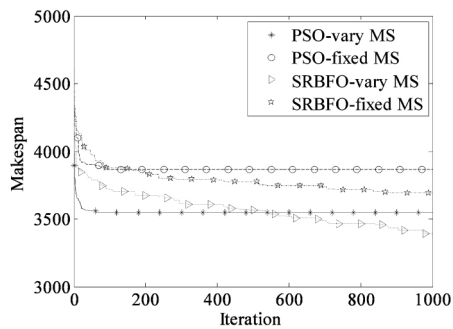


图7 收敛曲线(算例3)

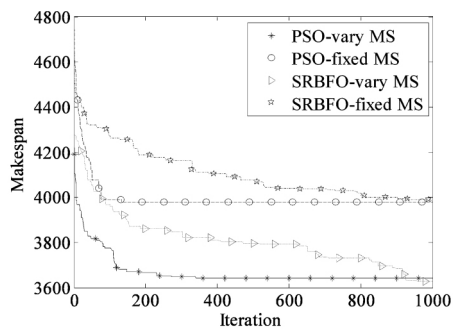


图8 收敛曲线(算例4)

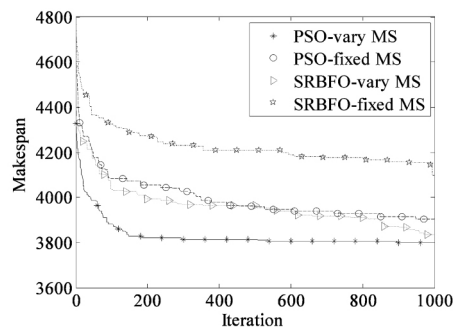


图9 收敛曲线(算例5)

法稳定性的角度而言,是要优于 PSO 算法的。

同样可以通过实验得到的数值结果和收敛曲线对两种不同的维护策略进行比较分析。我们发现,无论是数值结果还是收敛曲线,本文所提出了动态随机的、预防性维护时长随机器和模具年龄变化的维护策略相比较基于加工时间的、维护时长固定的维护策略而言,更能够缩短最大完工时间,从而证明了本文提出了维护策略的优越性。

5 结语

本文研究了考虑了机器和模具维护的注塑车间生产调度问题,并采用了 SRBFO 算法对这一问题进行优化求解。为了提高生产系统的可靠性和稳定

性,对生产系统的资源进行更好的整合,本文提出了动态随机的、机器和模具维护时长随机器和模具年龄变化的维护策略,并将机器和模具维护同样当作决策变量之一整合进入产品生产调度决策中。运用 SRBFO 算法为这种典型的 NP 问题来寻找最优的生产调度方案,挑选了 5 个不同规模的生产调度问题实例,并与 PSO 算法进行了对比,实验结果表明了 SRBFO 算法在处理本文所研究的生产调度问题的性能要优于 PSO 算法。

同时为了进一步验证本文所提的维护策略的优越性,在实例求解中考虑了传统的基于机器年龄的、维护时长固定的维护策略,并将此策略与本文提出的策略进行了对比,实验结果表明本文所提出了动态随机的、预防性维护时长随机器和模具年龄变化的维护策略相比较基于加工时间的、维护时长固定的维护策略而言,更能够缩短最大完工时间。

未来的研究将继续关注于采用本文提出的 SRBFO 算法解决更多的实际问题,同时,更多的算法将被研究用来求解本文中所研究的生产调度问题,例如菌群优化算法^[25]、多目标细菌觅食优化算法^[26]。

参考文献:

- [1] Johnson S M. Optimal two and three stage production schedules with setup times included [J]. Naval research logistics quarterly, 1954, 1(1): 61-68.
- [2] Muth J F, Thompson GL. Industrial scheduling [M]. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1963.
- [3] Davis J S, Kanet J J. Single machine scheduling with early and tardy completion costs [J]. Naval Research Logistics (NRL), 1993, 40(1): 85-101.
- [4] Cheng Runwei, Gen M. Parallel machine scheduling problems using memetic algorithms [J]. Computers & Industrial Engineering, 1997, 33(3-4): 761-764.
- [5] Emmons H, Vairaktarakis G. The robust flow shop [M]// Emmons H, Vairaktarakis Flow Shop scheduling. US: Springer, 2013: 291-301.
- [6] Yamada T, Nakano R. Job shop scheduling [M]// Zalzal MMS, G. Fleming Genetic algorithms in engineering systems. Stevenage UK: Institution of Electrical Engineers, 1997: 134-160.
- [7] Van Laarhoven P J M, Aarts E H L, Lenstra J K. Job shop scheduling by simulated annealing [J]. Operations research, 1992, 40(1): 113-125.
- [8] Gonzalez T, Sahni S. Open shop scheduling to minimize finish time [J]. Journal of the ACM (JACM), 1976, 23(4): 665-679.
- [9] 高维龙. 注塑企业复杂批调度问题算法与仿真研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.
- [10] 刘洋洋. 面向注塑企业的车间生产调度技术研究 [D]. 华中科技大学, 2013.
- [11] Stadnicka D, Antosz K, Ratnayake RMC. Development of an empirical formula for machine classification; Prioritization of

- maintenance tasks [J]. *Safety Science*, 2014, 63(3): 34–41.
- [12] Guo Chiming, Wang Wenbin, Guo Bo, et al. A maintenance optimization model for mission-oriented systems based on Wiener degradation [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013, 111(2): 183–194.
- [13] Chen C L, Bulfin R L. Complexity of single machine, multi-criteria scheduling problems [J]. *European Journal of Operational Research*, 1993, 70(1): 115–125.
- [14] Gao Kaizhou, Suganthana P N, Chua T J, et al. A two-stage artificial bee colony algorithm scheduling flexible job-shop scheduling problem with new job insertion [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(21): 7652–7663.
- [15] Asadzadeh L. A local search genetic algorithm for the job shop scheduling problem with intelligent agents [J]. *Computer & Industrial Engineering*, 2015, 85: 376–383.
- [16] Peng Bo, Lv Zhiping, Cheng TCE. A tabu search/path relinking algorithm to solve the job shop scheduling problem [J]. *Computer & Industrial Engineering*, 2015, 53: 154–164.
- [17] Passino K M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control [J]. *Control Systems, IEEE*, 2002, 22(3): 52–67.
- [18] Niu Ben, Bi Ying, Xie Ting. Structure-redesign-based bacterial foraging optimization for portfolio selection [M]//Han K, Qromiham. *Intelligent Computing in Bioinformatics*. Switremand; Huang Deshuang. Springer International Publishing, 2014: 424–430.
- [19] Niu Ben, Liu Jing, Bi Ying, et al. Improved bacterial foraging optimization algorithm with information communication mechanism [C]. *Proceedings of the 10th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS2014)*, Kunming, November 15–16, 2014: 47–51.
- [20] 牛奔, 毕莹, 郭晨. 结构重组的细菌觅食优化算法及其在投资组合问题上的应用 [C]//傅继良, 许保光. 第十六届中国管理科学学术年会, 北京:《中国管理科学》编辑部, October 17–20, 2014: 205–211.
- [21] Bean J C. Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization [J]. *ORSA journal on computing*, 1994, 6(2): 154–160.
- [22] Tasgetiren M F, Liang Y C, Sevkli M, et al. A particle swarm optimization algorithm for makespan and Total flowtime minimization in the permutation flowshop sequencing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(3): 1930–1947.
- [23] Niu Ben, Bi Ying. Binary bacterial foraging optimization for 0/1 knapsack problem [C]//*Proceedings of In: 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, Beijing, July 6–11, 2014: 647–652.
- [24] Shi Yuhui, Eberhart R C. Parameter selection in particle swarm optimization [M]//Porto UW, Saravanan N, waegen D, et al. *Evolutionary Programming VII*. Berlin Heidelberg Springer, 1998: 591–600.
- [25] Niu Ben, Wang Hong, Chai Y J. Bacterial colony optimization [J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012, 2012.
- [26] Niu Be, Wang Hong, Wang Jingwen W, Tan Lijing. Multi-objective bacterial foraging optimization [J]. *Neurocomputing*, 2012, 116: 336–345.

Intelligent Optimization of Injection Workshop Production Scheduling Problem with Machine and Mold Maintenance

NIU Ben^{1,2}, BI Ying¹, ZHANG Fang-Fang¹, LIU Jing¹

(1. College of Management, Shenzhen University, Shenzhen 518000, China;

2. School of Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong)

Abstract: A good production scheduling integrated with preventive maintenancescheduling scheme is significant for maintaining a higher reliability and stability, improving the production efficiency and reducing production costs for manufactory system. In this paper production scheduling problem with mold and machine maintenance consideration is studied and solved by structure-redesign-based bacterial foraging optimization (SRBFO) algorithm. Traditional maintenance activities operated with fixed duration and based on operation time can not satisfied the actual production. Therefore, in this paper, the dynamic and random maintenance strategy is considered, in which machine and mold maintenance activities varying with the usage age of machine/mold. The maintenance activities are set as decision variables to be integrated into production scheduling problem and the SRBFO algorithm is chosen to find the optimal production scheduling scheme for this typical NP problem. In the solving process, in order to realize the mapping of “the position vector of bacteria” to “feasible scheduling schemes” in algorithm, each bacterium must encode with carrying five aspects of information to be able to transfer into a feasible scheduling scheme through three different decoding ways. Finally, SRBFO is applied to solve five different scale production scheduling problem instances compared with PSO, experimental results show that SRBFO is performed better than PSO in dealing with production scheduling problems in terms of the stability of algorithm and the solution quality. At the same time, to prove the superiority of the proposed maintenance strategy, we used the traditional maintenance strategy was losecl used on machine age and with maintenance duration fixed uses as comparable strategy, the results show that the proposed maintenance strategy in this paper is better to shorten the maximum completion time.

Key words: maintenance; production scheduling; optimization