

基于改进遗传算法求解钢卷包装线平衡问题

章志康, 张含叶

(九江学院, 九江 332005)

摘要: **目的** 针对某企业钢卷包装生产线效率低的问题, 采用改进遗传算法对其进行求解。**方法** 采用自适应改变交叉概率和变异概率, 当种群适应度趋于一致时, 增大交叉概率和变异概率; 当种群适应度相差较大时, 采用较小的交叉概率和变异概率。**结果** 优化后的包装生产线平衡率达到 88.46%, 改进后的包装生产线具有更好的平衡结果。**结论** 所采用的改进遗传算法可以有效地求解单品种钢卷包装生产线平衡问题。

关键词: 钢卷包装; 生产线平衡; 遗传算法

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0162-05

Steel-coil Packaging Line Balancing Problem Solved Based on Improved Genetic Algorithm

ZHANG Zhi-kang, ZHANG Han-ye

(Jiujiang University, Jiujiang 332005, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the low efficiency of the steel-coil packaging production line with improved genetic algorithm. Self-adaption was used to change the crossover probability and mutation probability. When the fitness of the populations tended to be consistent, the crossover probability and mutation probability should be increased; when the fitness of the populations differed greatly, the smaller crossover probability and mutation probability should be used. The balance rate of the optimized packaging production line reached by 88.46%. The improved packaging production line had a better balancing effect. The improved genetic algorithm adopted can effectively solve the balance problem of single-variety steel-coil packaging production line.

KEY WORDS: steel-coil packaging; product line balancing; genetic algorithm

钢卷包装生产线是人和机器的有效组合, 能充分体现设备的灵活性, 是钢铁包装行业中应用最为广泛的生产方式之一。钢卷包装由主要工序和辅助工序组成, 其主要工序根据包装的内容可分为放置防锈纸、套塑料套、放纸护角或者铁护角、安装平板纸、放置护板和打捆带等多道工序, 其辅助工序则主要包括卧卷的运输、包装材料的准备工作等多项需提前准备的工序。包装生产线平衡问题, 就是在满足一定的约束条件下, 将一组包装作业元素尽可能均匀地分配到各个工位上, 实现生产线的平衡。包装线平衡实质上是一种组合优化问题, 即完成一个或多个目标的优化。在实际工厂中, 相当一部分车间中存在生产过程不连续、生产节拍混乱的情况, 以致经常出现停工待料或大量积压的现象, 这就是包装生产线不平衡造成的结

果。随着智能算法的发展, 生产线平衡问题得到一定的解决, 例如模拟退火算法^[1]、禁忌搜索算法^[2]、遗传算法^[3-6]、粒子群算法^[7]、蚁群算法^[8-10]、人工免疫算法^[11-12]等, 而采用人工智能算法求解钢卷包装生产线平衡问题方面的研究文献未见报道, 因此文中采用改进遗传算法对单品种钢卷包装生产线平衡问题进行研究。

1 假设条件

文中在建立装配线的数学模型之前, 作如下假设^[13-14]: 作业元素是不可分的最小自然作业单位, 一个作业元素只能分配到一个工作站中; 所有的作业元素必须全部分配到工作站中; 作业元素的操作

收稿日期: 2016-07-14

作者简介: 章志康 (1996—), 男, 九江学院本科生, 主攻机械设计制造及其自动化。

通讯作者: 张含叶 (1982—), 男, 博士, 九江学院副教授, 主要研究方向为数字化制造。

时间是确定的; 作业元素之间的装配优先关系是已知的, 且任务的分配不能违反装配优先关系; 装配节拍是已知的, 且大于作业元素时间中的最大者; 装配线上没有并行的工作站, 且相邻的工作站间无缓存区; 装配线上的操作者之间不存在技术水平的差异; 装配线上只装配一种类型的产品。

2 数学模型

2.1 变量定义

文中用到的变量及其含义: i 为作业元素序号, $i \in N$; j 为作业元素序号, $j \in N$; k 为工作站序号, $k \in M$; n 为作业元素的总数目; m 为工作站总数目; N 为作业元素的集合, $N = \{1, 2, \dots, n\}$; M 为工作站的集合, $M = \{1, 2, \dots, m\}$; C 为装配节拍; t_i 为作业元素 i 的操作时间; $s(k)$ 为分配到第 k 个工作站上的作业元素集; $t(S_k)$ 为第 k 个工作站的作业时间, 其中 $t(S_k) = \sum_{i \in s(k)} t_i$; P' 为装配优先关系矩阵, 如果作业元素 i 是 j 的直接或间接前序任务, 则 $P'(i, j) = 1$, 否则 $P'(i, j) = 0$; S_1 为装配线负荷平滑指数, $S_1 = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (C - t(S_k))^2}$; 如果作业元素 i 分配到工作站 k 上, 则 $x_{ik} = 1$, 否则 $x_{ik} = 0$ 。

2.2 目标函数

主要目标函数为最小化工作站数, 即 $f_1 = \min m$, 次要目标函数为最小化装配线负荷平滑指数, 即

$$f_2 = \min \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (C - t(S_k))^2}, \text{ 因此构建目标函数:}$$

$$f = w_1 f_1 + w_2 f_2 \quad (1)$$

式中: w_1 和 w_2 均为权重系数。

2.3 约束条件

$$\sum_{k \in M} x_{ik} = 1, \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{k \in M} k x_{ik} \leq \sum_{k \in M} k x_{jk}, \forall P'(i, j) = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ik} t_i \leq C, \forall k \quad (4)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, \forall i, k \quad (5)$$

其中, 约束条件式(2)确保一个作业元素只能分配至一个工作站中; 约束条件式(3)确保任务分配要满足优先关系约束; 约束条件式(4)确保每个工作站的作业时间都要满足装配线的节拍约束; 约束条件式(5)表示变量的取值范围。

3 改进遗传算法流程设计

3.1 确定参数

种群规模 M : 种群太小, 多样性差, 容易造成“早熟”; 种群太大, 会降低算法的寻优效率。交叉概率 P_c , 变异概率 P_m 。

3.2 初始化

随机产生 M 个个体, 但这 M 个个体不一定全部满足装配优先约束关系, 因此, 设计了算法 1 使得随机生成的 M 个个体都满足装配优先约束关系。

for $i = 1: n-1$

If $P'(A(i+1, 1), A(i, 1)) = 1$, then exchange the position of $A(i+1, 1)$ and $A(i, 1)$ in A .

end

end

其中: A 为种群 M 中的任意个体, A 是一个 n 行 1 列的矩阵; 利用算法 1 随机生成一个满足装配优先约束关系的个体, 记为 p_g^0 , 然后保存在记忆库中, 令 $p_g = p_g^0$ 。

3.3 种群更新

种群更新包括交叉操作、变异操作和选择操作。

3.3.1 交叉操作

1) 确定交叉操作中染色体的数量 M_1 , 如果 M_1 是奇数, 则在 M_1 中随机删除一个。任意 2 个染色体 parent1 和 parent2 随机组成一对, 进行如下的操作。 $M_1 = \lceil M \times p_c \rceil$, “[x]”表示大于或等于 x 的最小正整数。

2) 在 $[1, n-1]$ 中随机选择一个整数作为交叉点。

3) 复制 parent 1 中交叉点左侧的基因, 并保持该基因顺序不变, 将其作为 offspring 1 中左侧的基因; 同时在 parent 2 中删除与 parent 1 交叉点左侧相同的基因, 并把 parent 2 中剩下的基因按照从左到右的顺序作为 offspring 1 中右侧的基因, 从而生成新的个体 offspring 1; 同理生成 offspring 2。交叉操作的原理见图 1。

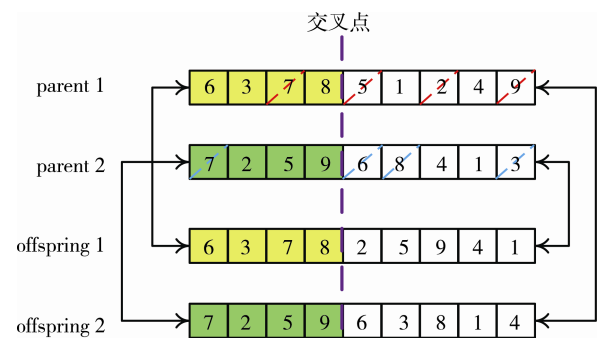


图 1 交叉操作原理

Fig.1 Cross operation principle

基本遗传算法的交叉概率是固定, 交叉概率改进公式:

$$p_c = \begin{cases} p_{c1}, f' \geq f_{avg} \\ \frac{p_{c1}(f_{max} - f')}{f_{max} - f_{avg}}, f' < f_{avg} \end{cases}$$

式中: p_{c1} 为 $0 \sim 1$ 之间的常数; f' 为要交叉的 2 个个体中较小的适应度; f_{max} 为每代种群中的最大适应度; f_{avg} 为每代种群中的平均适应度。

3.3.2 变异操作

1) 定变异操作中染色体的数量 M_2 。 $M_2 =$

$\lceil M \times p_m \rceil$, “ $\lceil x \rceil$ ”表示大于或等于 x 的最小正整数。

2) 在 $[1, n-1]$ 中随机选择 2 个不同整数作为变异点。

3) 在 parent 中交换这 2 个变异点所对应位置的基因, 生成新个体 offspring。变异操作的原理见图 2。

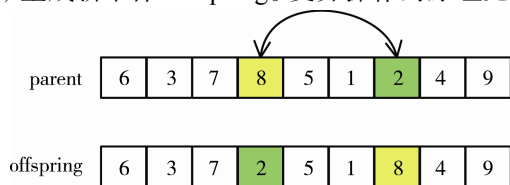


图 2 变异操作原理

Fig.2 Mutation operation principle

基本遗传算法的变异概率也为一固定的常数, 变异概率改进公式:

$$p_m = \begin{cases} p_{m1}, f' \geq f_{avg} \\ \frac{p_{m1}(f_{max} - f')}{f_{max} - f_{avg}}, f' < f_{avg} \end{cases} \quad (6)$$

式中: p_{m1} 为 $0 \sim 1$ 之间的常数; f' 为要变异的个体适应度; f_{max} 为每代种群中的最大适应度; f_{avg} 为每代种群中的平均适应度。

3.3.3 选择操作

根据式(1)计算种群($M+M_1+M_2$)中所有个体的适

应度, 根据适应度从小到大的顺序选择前 M 个适应度所对应的个体作为下一代种群, 并将最优值所对应的个体记为 p_g^{t+1} 。

3.4 记忆库更新

如果 $f(p_g^{t+1}) \leq f(p_g^t)$, 则 $p_g = p_g^{t+1}$; 否则, $p_g = p_g^t$ 。

3.5 判断是否达到停止条件

在算法的迭代过程中, 一旦最优个体的适应度和群体适应度不再上升, 则停止迭代, 进入 3.6 节, 否则, 转入 3.3 节。

3.6 输出结果

输出钢卷包装线的平衡结果, 即钢卷包装线中作业元素-工作站的分配结果。

4 实例求解

以某钢卷包装^[15]作为实例研究对象, 对其包装生产线进行优化设计。已知该生产线一年内包装钢产品 173 000 件, 采用两班制, 每班每天工作 8 h, 则其装配节拍 $C \approx 120$ s。该包装生产线中各工序的操作内容、作业优先顺序和作业时间见表 1。#

表 1 某钢卷包装作业顺序
Tab.1 Steel coil packaging sequence

工序编号	包装零件名称	操作内容	紧后工序号	作业时间/s
1		信息确认	2,3,4	60
2		钢卷上料	5,6	60
3		钢卷称重	5,6	30
4	标签	测量尺寸和偏差, 贴标签	5,6	40
5	防锈纸	放置内芯防锈纸	7	60
6	防锈纸	放置外周防锈纸	7	50
7		防锈纸全封闭粘贴	8	50
8	塑料套	预套塑料套	9	50
9		塑料袋全封闭	10,11	120
10	纸内护角	包纸内护角	12,13	40
11	纸外护角	包纸外护角	12,13	60
12	周面平板纸	包周面平板纸	14	100
13	外周包板	包外周包板	14	120
14	内周护板	安装内周护板	15,16	40
15	圆护平板纸	安装圆护平板纸	17,18	60
16	铁圆护板	安装铁圆护板	17,18	50
17	铁内护角	放置铁内护角	19	30
18	铁外护角	放置铁外护角	19	30
19	捆带	周向打捆	20	120
20	捆带	径向打捆	21	100
21	标签	人工粘贴标签	22	40
22		发送钢卷, 指吊入库		70

式(1)中 w_1 和 w_2 分别是主要目标函数和次要目标函数的权重，文中取 $w_1=10$ ， $w_2=1$ 。通过拉丁方实验设计及其运算结果，设置改进遗传算法中的参数为： $M=80$ ， $p_{c1}=0.75$ ， $p_{m1}=0.01$ 。采用 Matlab 语言对其进行仿真，其计算结果和工位负荷图分别见表 2 和图 3。

表 2 钢卷包装生产线平衡结果
Tab.2 The product line balancing results of steel coil packaging

工作站序号	工作站作业元素	工作站时间/s	空闲时间/s
1	1,4	100	20
2	2,3	90	30
3	5,6	110	10
4	7,8	100	20
5	9	120	0
6	10,11	100	20
7	12	100	20
8	13	120	0
9	14,15	100	20
10	16,17,18	110	10
11	19	120	0
12	20	100	20
13	21,22	110	10

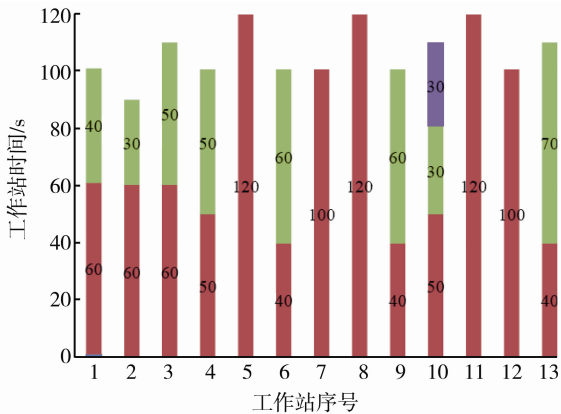


图 3 包装生产线工位负荷
Fig.3 Working load of packaging production line

该包装生产线的平衡率为：

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{Cm} \approx 88.46\%$$

钢卷原始包装线中作业元素-工作站的分配情况见表 3。与改进前相比，虽然工作站数目和平衡率都相同，但改进后的装配线负荷平滑指数为 17.3205，小于改进前的装配线负荷平滑指数 20，这意味着分配到每个工位上的作业元素时间都尽量均等，这将提高工人和设备的利用率，因此，采用改进遗传算法优化后的包装生产线具有更好的效果。

表 3 钢卷包装生产线的原始方案
Tab.3 The original results of steel coil packaging

工作站序号	工作站作业元素	工作站时间/s	空闲时间/s
1	1,2	120	0
2	3,4	70	50
3	5,6	110	10
4	7,8	100	20
5	9	120	0
6	10,11	100	20
7	12	100	20
8	13	120	0
9	14,15	100	20
10	16,17,18	110	10
11	19	120	0
12	20	100	20
13	21,22	110	10

5 结语

针对单品种钢卷包装生产线平衡问题，构建了以最小化工作站数和负荷平滑指数为目标函数，采用改进遗传算法对其进行求解，优化后的包装生产线平衡率达到 88.46%，结果表明改进遗传算法可以有效地求解单品种钢卷包装生产线平衡问题。

参考文献：

[1] GUDEN H, MERAL S. An Adaptive Simulated Annealing Method for Type-one Simple Assembly Line Balancing: a Real Life Case Study[J]. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 2013, 28(4): 897—908.

[2] LAPIERRE S D, RUIZ A, Soriano P. Balancing Assembly Lines with Tabu Search[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 168(3): 826—837.

[3] YU J F, YIN Y H. Assembly Line Balancing Based on an Adaptive Genetic Algorithm[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48 (1/2/3/4): 347—354.

[4] GONCALVES J F, ALMEIDA J R D. A Hybrid Genetic Algorithm for Assembly Line Balancing[J]. Journal of Heuristics, 2002, 8(6): 629—642.

[5] SABUNCUOGLU I, EREL E, TANYER M. Assembly Line Balancing Using Genetic Algorithms[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2000. 11(3): 295—310.

[6] PONNAMBALAM S G, ARAVINDAN P, NAIDU G M. A Multi-objective Genetic Algorithm for Solving Assembly Line Balancing Problem[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(5): 341—352.

[7] DOU J P, LI J, SU C. A Novel Feasible Task Se-

- quence-oriented Discrete Particle Swarm Algorithm for Simple Assembly Line Balancing Problem of Type 1 [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(9/10/11/12): 2445—2457.
- [8] BLUM C. Beam-ACO for Simple Assembly Line Balancing[J]. *Inform Journal on Computing*, 2008, 20(4): 618—627.
- [9] BAUTISTA J, PEREIRA J. Ant Algorithms for a Time and Space Constrained Assembly Line Balancing Problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(3): 2016—2032.
- [10] MCMULLEN P R, TARASEWICH P. Using Ant Techniques to Solve the Assembly Line Balancing Problem[J]. *IIE Transactions*, 2003, 35(7): 605—617.
- [11] KHOO L P, ALISANTOSO D. Line Balancing of PCB Assembly Line Using Immune Algorithms[J]. *Engineering with Computers*, 2003, 19(2/3): 92—100.
- [12] ZHANG X, HAN X, KONG X. An Immune Particle Swarm Optimization Algorithm for Mixed Assembly Line Balancing[C]// 38th International Conference on Computers and Industrial Engineering, 2008: 1875—1880.
- [13] TRIKI H, MELLOULI A, HACHICHA W, et al. A Hybrid Genetic Algorithm Approach for Solving an Extension of Assembly Line Balancing Problem[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2016, 29(5): 504—519.
- [14] SURESH G, SAHU S. Stochastic Assembly Line Balancing Using Simulated Annealing[J]. *International Journal of Production Research*, 1994, 32(8): 1801—1810.
- [15] 刘海江. 宝发展钢产品包装工艺技术报告[R]. 上海: 同济大学现代制造技术研究所, 2012.
- LIU Hai-jiang. The Steel Product Packaging Technology Report of Baosteel Development[R]. Shanghai: Institute of Modern Manufacturing Technology of Tongji University, 2012.