

混合遗传算法对混流装配线平衡问题的研究

李险峰[✉] 董绍华

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

[✉]通信作者, E-mail: Tecmia@126.com

摘 要 基于面向汽车行业总装生产线平衡问题的研究,提出了一种包含模拟退火因子的改进的遗传算法,设计了加速收敛因子模型以确保在有限种群空间中的快速收敛;同时考虑了更多工程现场实际约束来修正传统的约束模型.新算法模型应用在混流装配生产线平衡分析中,取得了算法快速收敛和分析结果与实际工程一致的结果.

关键词 装配; 平衡; 遗传算法; 模拟退火; 问题求解

分类号 U468.2⁺3

Study on mix-model assembly line balancing with a hybrid genetic algorithm

LI Xian-feng[✉], DONG Shao-hua

School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

[✉]Corresponding author, E-mail: Tecmia@126.com

ABSTRACT Based on the analysis of balancing in an automotive final assembly line, this paper proposed an enhanced genetic algorithm which includes a simulated annealing factor. A specific accelerated-convergence factor was designed for the algorithm to ensure fast convergence within a limited space. In the algorithm more engineering constraints were taken into consideration. The algorithm was applied to a mix-model production line, and the result shows a fast convergence and good agreement with practical engineering.

KEY WORDS assembly; balancing; genetic algorithms; simulated annealing; problem solving

混流生产线往往根据不同生产任务的要求在生产线上同时装配不同类型的产品.这些产品之间存在着装配结构类似、工艺接近等特点.混流装配生产线可以在不占用大量库存的前提之下,快速响应市场对于不同产品品种的需求.装配线平衡分析是指通过优化分析和计算从而将不同产品的各项不同装配任务分配到每一个装配站点,使得装配站点的作业时间小于或者等于预先设定的生产节拍,这在工程上属于典型的组合优化问题.

目前,对于装配生产线平衡问题的研究,主要围绕着两个方面进行:(1)给定生产节拍,优化最小工位数目;(2)给定工位数目,优化最小节拍.前者适合于计划期产品需求量确定,通过适当的作业分配,实现作业资源最小化;后者适合于生产资源已经确定,通过适当的作业分配,实现生产时间最小化.无论是哪种情况,都需要将不同产品的不同作业任务

分配到不同的装配站点,使得作业量均衡.混流装配线不同产品的装配作业任务和作业时间常存在着差异,因而给均衡作业任务带来了很大的挑战^[1].

本文混合遗传算法设计的目标是在已知确定的作业时间节拍前提下,优化计算最小的装配工位数目(即第一类装配生产线平衡问题),即首先通过计划产品的需求量计算出平均生产节拍,然后计算最小装配工位数目,通过建立算法模型并用改进的遗传算法进行问题求解,同时考虑现场待装产品的料箱空间尺寸约束,使得问题的描述更接近生产实际.

1 问题描述

设定 M 种产品在同一装配生产线上同时装配.每种产品的装配任务顺序都有严格作业的前后逻辑顺序要求,这种约束可以用作业顺序图加以描述.图1为三种不同产品(A, B, C)装配顺序逻辑

图^[2-3]. 每一种产品的装配任务和对应的逻辑顺序不尽相同. 因此在研究多种产品装配顺序问题时, 把这些不同的产品的装配任务和顺序逻辑图加以综合, 合并成为一个统一的多产品装配任务、顺序图集 (见图2). 这个综合任务顺序图包含了 M 种产品的 N 个装配操作. 由于某个操作的时间对于不同的产品可能不一样, 当一种产品的装配不含其中的某项装配任务时, 则将该任务时间设置为零. 在此基础上, 再根据作业任务的先后顺序约束和一个装配工艺节拍内 M 种产品的平均作业时间将作业任务平均分配到各个工位点中. 分配方案不一样, 各个站点的作业时间也不一样. 混流装配线平衡问题是求解满足约束条件前提下作业任务的分配, 通过一种优化方案使得各个装配站点的作业时间尽可能均衡控制到预先设定的节拍限制范围^[4].

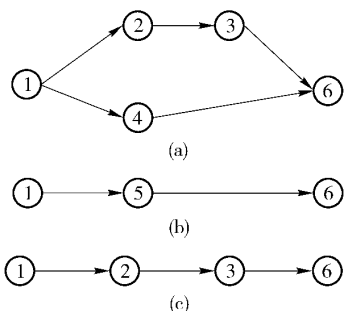


图1 装配顺序逻辑图. (a) 产品 A; (b) 产品 B; (c) 产品 C

Fig.1 Logic diagram of assembly sequence by products: (a) Product A; (b) Product B; (c) Product C

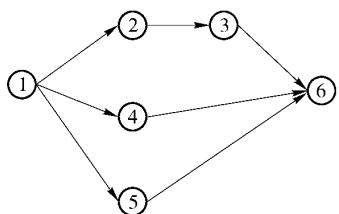


图2 合并后装配顺序逻辑图

Fig.2 Logic diagram of combined assembly sequence

2 数学模型

基于上述的问题描述, 提出了针对这类问题的数学模型.

设定在一个计划时期 T 内, 第 m 种产品的需求量为 R_m ($m=1, 2, \dots, M$), 则 M 种产品的总需求量为 $R = \sum_{m=1}^M R_m$; 平均生产节拍 $C_t = \frac{T}{\sum_{m=1}^M R_m}$; 在一个最小

生产循环中, 第 m 种产品的需求量为 d_m , $d_m = \frac{R_m}{r} \cdot r$

为 R_i ($i=1, 2, \dots, m$) 的最大公约数, 则 M 种产品的总需求量为 $r = \sum_{m=1}^M r_m$. 第 m 种产品第 i 个作业任务的作业时间为 t_{im} ; 理论最小工位数目^[5-6] 则为

$$ST_{\min} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N r_m t_{im}}{C_t \sum_{m=1}^M r_m}. \quad (1)$$

上式中的最小工位数目为理论上的最小值, 但是实际情况的工位数目往往会大于 $ST_{\min}$. 比如: 装配线上有较多的作业任务的平均作业时间接近平均节拍; 或者在任务分配过程之中, 即使当前工位的已分配任务的作业时间较短, 也有可能容纳不下一个接近平均节拍时间的操作任务. 因此, $ST_{\min}$ 只是一个理论的最小值参考.

在实际平衡装配生产线的分析过程中, 装配工位的负荷平衡是一个很重要的衡量因素, 当负荷不均匀时, 系统的等待、堵塞较重, 效率低下. 只有当负荷均匀时, 才能使整个装配生产系统的效率最高^[7]. 因此, 在平衡作业任务时, 整线的效率 K 是一个重要的考察目标. 以各个工位负荷均匀为优化目标, 可以描述为:

$$\min: K_i = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^S \left(\sum_{m=1}^M q_m T_{mk} - \sum_{j=1}^S \sum_{m=1}^M q_m T_{mj} / S \right)^2}{S}}; \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^S x_{ij} = 1, i=1, 2, \dots, N; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^S j x_{ij} \leq \sum_{l=1}^S l x_{kl}, i, k=1, \dots, N; \quad (4)$$

$$T_{mj} = \sum_{i=1}^N t_{mi} x_{ij}, m=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, S; \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M q_m T_{mj} \leq C_t, j=1, 2, \dots, S; \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, S; \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^M D_i \leq D_v. \quad (8)$$

式(2)中的目标函数是各个工位点的负荷的均方差最小, 也就是说各个站点的负荷尽可能接近, 其中 q_m 是第 m 种产品需求量占有所有产品需求量的百分比, $\sum_{m=1}^M q_m = 1$; 式(3)表示作业任务分配到工位时候的唯一性; 式(4)中表示装配约束属性; 式(5)为整个工位作业时间和时间不大于式(6)中预设的节拍 C_t ; 式(7)表示作业任务分配的装配(已分配为

1; 未分配为0)。

另外,作者查阅到的研究文献未见有在负荷平衡计算时考虑工程现场物料体积约束影响的。装配生产线上每一个作业区域(装配工位)有一个固定的空间体积 D_v 。在装配线旁的零部件物流区中预置的待装零部件总体的体积不能超过这个预设的体积。式(8)中约束条件是指每一个装配工位旁的物料存放的总体尺寸不超过预先设定的空间体积(见图3)。

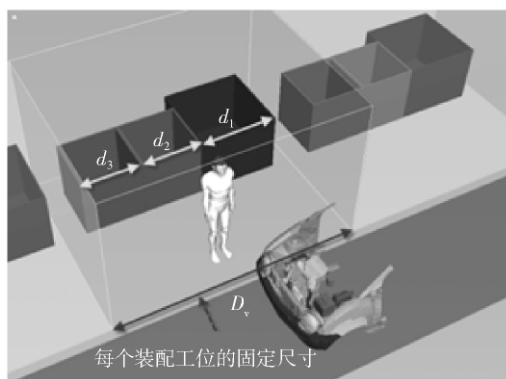


图3 体积约束示意图

Fig. 3 Illustration of volume restraints

3 算法设计

装配生产线作业平衡问题是一个典型 NP 难题。本文采用改进的遗传算法对于这个问题进行分析。

3.1 编码方法

基因串的编码采用自然数编码,编码是长度为 N 的数据串。每一个基因的序号对应任务的序号,基因座上的基因值标识的是分配到的作业单元的编号,如图4所示。

基因串	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	1	2	2	3	1	3	2	3	4	4	5	3	5	6	6	7	7	8	8	5
解码																				
工作站编号	1	2	3	4	5	6	7	8												
作业任务	1,5	2,3,7	4,6,8,12	9,10	11,13,20	14,15	16,17	18,19												

图4 基因编码方法

Fig. 4 Chromosome coding

3.2 初始种群的产生方法

将 N 个作业任务分配到 M 个工位,需要考虑作业任务之间的先后顺序和工位时间累积消耗不超过节拍的限制。为此,本文设计了一种基于任务排序的种群初始化方法,流程如下。

首先,任意取出一个任务节点,加入空队列。然后,从剩余节点中任选一个节点,它要么只能放在左

边,要么只能放在右边,要么两边都能放,如果都能放,就随机选一个位置插入。对于一般的情况,即队列中已经有 k 个节点的情况,任选一个待插入节点,将有 $k+1$ 个可插入位置,对这 $k+1$ 个位置进行逐步排查,假设有 n 个可插入节点,则任选一个可插入位置将其插入队列。重复以上过程,直到队列满位置。

3.3 交叉算子

为了更好地保留父辈的信息,本文采用了一种所谓“次序交叉”(sequence crossover)的方法。该方法是传统单点交叉^[8]的扩展,具体步骤如下。

步骤1:随机产生交叉点(见图5)。

父辈个体1	1	2	5	6	4	3	8	10	7	9	11
父辈个体2	1	3	2	4	5	7	9	6	8	10	11

图5 交叉算子设计第一步

Fig. 5 Step 1 of crossover design

步骤2:选取父代1交叉点左侧部分染色体进入子代1(见图6)。

父辈个体1	1	2	5	6	4	3					
-------	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--

图6 交叉算子设计第二步

Fig. 6 Step 2 of crossover design

步骤3:根据父代2产生子代1剩余染色体(见图7)。

父辈个体2	1	3	2	4	5	7	9	6	8	10	11
子代个体1	1	2	5	6	4	3	7	9	8	10	11

图7 交叉算子设计第三步

Fig. 7 Step 3 of crossover design

步骤4:交换父代位置,产生子代2(见图8)。

子代个体2	1	3	2	4	5	7	6	8	10	9	11
-------	---	---	---	---	---	---	---	---	----	---	----

图8 交叉算子设计第四步

Fig. 8 Step 4 of crossover design

通过次序交叉之后的子代可能存在产生不可行解的问题,本文通过采取将染色体中交叉重复的基因剔除的方法来保证后代解的可行性。如两个父代染色体 $f_1: \{6 \ 3 \ 2 \ 5 \ 4\}$ 和 $f_2: \{4 \ 3 \ 6 \ 5 \ 2\}$ 的交叉点为3,则 f_1 中的 $\{5 \ 4\}$ 和 f_2 中的 $\{5 \ 2\}$ 进行交换,并删除 f_1 和 f_2 中相同的基因部分,即生成子代 $f_1: \{6 \ 3 \ 4 \ 5 \ 2\}$ 和 $f_2: \{3 \ 6 \ 2 \ 5 \ 4\}$,从而避免了交叉过程中产生的不可行解。

3.4 变异算子

交叉重组之后是个体的变异。子个体变量以很

小的概率或者步长进行变异,变量转变的概率或者步长与维数(变量的个数)成反比,与种群的数量大小无关。据研究,变异本身是一种局部随机搜索,与选择、重组算子组合在一起,保证了遗传算法的有效性;同时保证了种群的多样性,以防止出现非成熟收敛。在本文变异操作中,引入变异率 P_d ,它是一个很关键的参数,控制着种群中参与变异的基因个体位数。 P_d 是一个取值在0~1之间的参数,取值越大表示参与变异的基因位越多,但当 P_d 大于0.5后,算法退化变成了随机搜索,遗传算法的意义就不复存在^[9]。与此同时,变异概率 P_m 决定了某个个体参与变异的概率,它是一个相对种群而言的概念。一旦决定参与变异的基因位,这些基因就被抽出来,剩余的队列中的作业元素(任务)保持原来的顺序不变,将这些抽取出来的任务节点重新插入到队列中,从而实现变异。同样地,采用和交叉算子类似的方法处理变异后产生的不可行解问题,从而保证变异的解满足基础的装配顺序约束。

3.5 适应度函数

为了构造能够满足装配生产线平衡的适应度函数,让遗传算法朝着装配作业工位数目最少的方向进化。本文提出了如下的适应度函数:

$$f = 1 - K. \quad (9)$$

3.6 加入模拟退火因子和收敛加速因子辅助算法加速收敛

为了克服传统单一的基于轮盘赌思路的遗传算法的局限性^[7],很多学者分别将其他智能算法的因素引入遗传算法,形成了很多新的智能组合优化算法。从算法本质而言,这些新的模拟自然界现象的优化策略加入到遗传算法的选择环节就是为了解决在选择父代和生成子代的过程中子代“新鲜性”问题。在种群数量相对有限的前提下,跳出局部最优解的“陷阱”,达到全局最优或者工程最优^[9]。本文中解决遗传算法早熟问题的思路是引入“遗传退火”的策略。

在基于标准模拟退火思路的基础之上,本文给出了包含“退火算法”思想的改进的选择操作的思路和算法框架以及程序脚本。算法思路如下。

第一步:在第 k 代种群 pop_k 和当前温度 t_k 条件下,访问种群中的每一个个体 $\text{pop}_i(k)$ 。

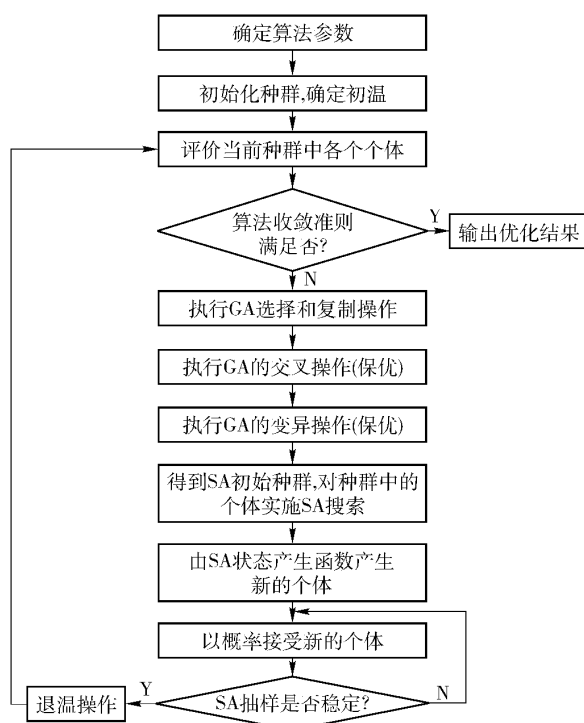
第二步:对于每一个个体,随机选择变异位,进行变异(在其邻域中随机选择一个状态)。其中变异概率与被选路径总数成正比, α 为比例常数。经修正的变异概率 $\tilde{P}_i$ 为

$$\tilde{P}_i = \frac{\alpha P_i}{\sum_{j=1}^m P_j}. \quad (10)$$

第三步:对变异得到的新个体 $\text{mutpop}_i(k)$ 计算其适应度值,并按照 Metropolis 概率准则选择接受或者放弃这个个体,如果接受则更新,否则放弃。

第四步:按照这个过程循环 N 次。

整个算法的流程框架如图9所示。



GA—遗传算法; SA—模拟退火算法

图9 改进遗传算法流程框架

Fig.9 Workflow of the enhanced genetic algorithm

4 算法实现与验证

基于上述算法思路和流程,本文采用通用仿真工具 MATLAB 进行了算法实现。同时为了验证和分析改进的遗传算法在工程应用中的价值和能力,本文选取了某型号汽车驾驶室仪表台总成(如图10所示)的分装线的数据,结合本文算法程序进行了



图10 待分析产品结构示意图

Fig.10 Schematic diagram of to-be assembled products

试算.

分装线上分别有两种不同类型的仪表台装配总成: A 型号仪表台装配流程如图 11 所示; B 型号仪表台装配流程如图 12 所示. 混装两种仪表台的作业时间和对应零部件的体积数据见表 1.

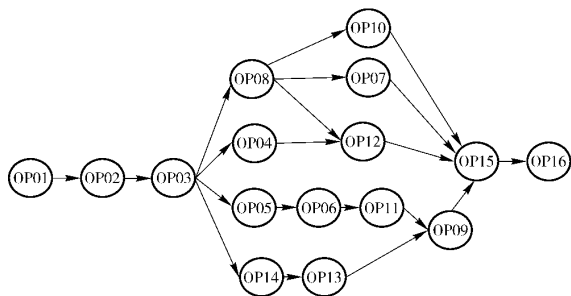


图 11 A 产品装配工艺顺序图

Fig. 11 Assembly sequence of Product A

设定 A 产品的年需求量为 20 000 件; B 产品的

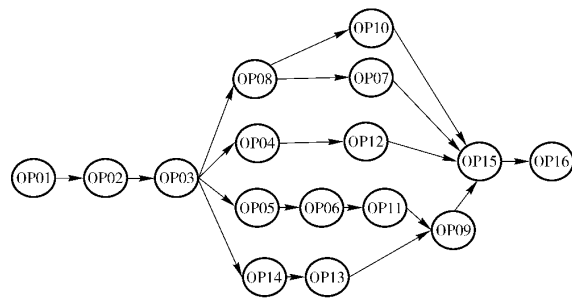


图 12 B 产品装配工艺顺序图

Fig. 12 Assembly sequence of Product B

需求量为 28 000 件. 装配线时间节拍 $C_t = \frac{T}{\sum_{m=1}^M D_m} =$

$250 \times 16 \times 3\,600 / 48\,000 \text{ s} = 300 \text{ s}$ (假定一年 250 个工作日, 一天两班共 16 h)^[10]; 产线布局设计中, 装配线旁物流区零件体积最大值 $D_v = 450$, 算法求解过程中的基本控制参数如下表 2 所示.

表 1 装配时间和产品体积信息

Table 1 Assembly time and part size information

装配流程	产品 A			产品 B		
	作业代号	作业时间/s	装配产品的体积	作业代号	作业时间/s	装配产品的体积
主定位支架安装	OP01	33	100	OP01	33	125
转同柱安装	OP02	38	20	OP02	38	20
仪表台内面板安装	OP03	49	35	OP03	49	35
气囊安装	OP04	35	50	OP04	35	30
空调风道安装	OP05	15	35	OP05	15	35
空调出风口格栅安装	OP06	25	25	OP06	25	25
仪表(速度、转速)安装	OP07	69	15	OP07	69	15
内部线缆安装	OP08	30	150	OP08	30	150
低位外部面板安装	OP09	60	60	OP09	60	60
手套箱安装	OP10	15	10	OP10	15	10
通风控制系统安装	OP11	45	25	OP11	45	25
副驾驶储物箱安装	OP12	23	67	OP12	23	67
中央控制面板	OP13	55	35	OP13	55	38
音响系统安装	OP14	35	66	OP14	35	70
涂腔	OP15	20	15	OP15	20	20
装配控制调整	OP16	27	10	OP16	27	125

注: 此处的体积是量纲为 1 的量.

表 2 算法算例中的控制参数取值

Table 2 Description and values of parameters in the algorithm

算法参数	参数说明	取值范围	算例取值	收敛相关性
M	进化迭代次数	100 ~ 200	200	相对高
N	种群规模, 必须取偶数	偶数	30	相对高
P_m	变异概率	0 ~ 1	0.6	高
P_d	变异程度控制参数	0 ~ 1	0.1	高
Z	状态转移次数	> 1	3	相对高
t_0	初始温度	1	1	相对高
β	降温系数	0 ~ 1	0.9	高

经仿真分析, 计算结果如下.

需要的最小装配工位数为 4, 见图 13, 工位 1 中的装配任务为

{ OP2(a), OP3(a), OP4(a), OP5(a), OP6(a), OP2(b), OP3(b), OP4(b), OP5(b) };

工位 2 中的装配任务为

{ OP7(a), OP9(a), OP11(b), OP13(a), OP15(a) };

工位 3 中的装配任务为

{ OP8(a), OP10(a), OP12(a), OP14(a), OP6(b),

OP7(b) , OP9(b) , OP12(b) , OP15(b) } ;

工位 4 中的装配任务为

{ OP1(a) , OP16(a) , OP1(b) , OP1(b) ,
OP8(b) , OP10(b) , OP11(b) , OP13(b) ,
OP14(b) , OP16(b) } .

四个工位的总时间消耗均小于 C_i , 满足节拍要求;
各个工位内部的作业顺序甘特图和累计时间消耗见
图 13 和 14 所示 , 作业时间满足节拍要求 , 作业顺序
满足装配顺序约束条件.

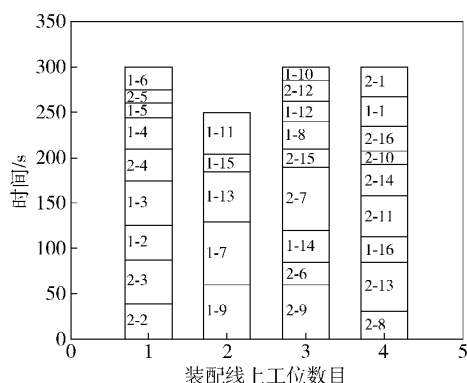


图 13 最小的装配工位数目与作业分配方案

Fig. 13 Minimized station numbers and allocated operation

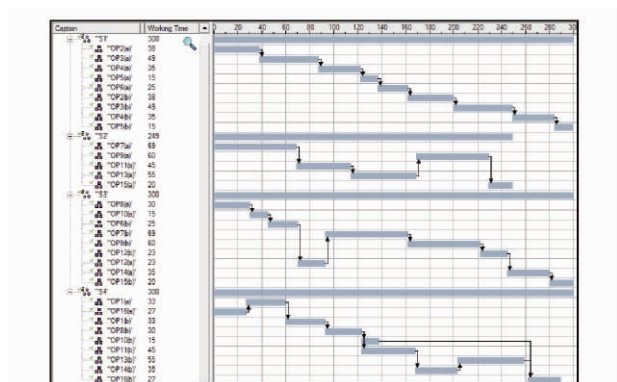


图 14 工位任务作业甘特图

Fig. 14 Gantt chart in each station

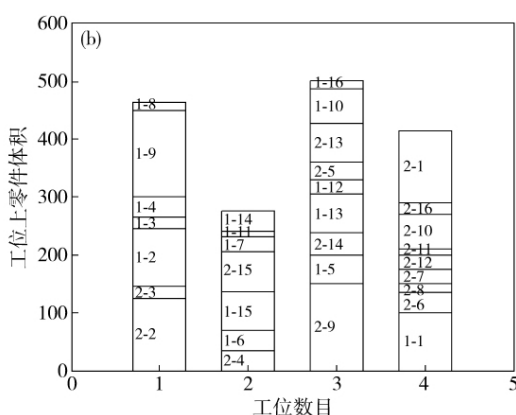
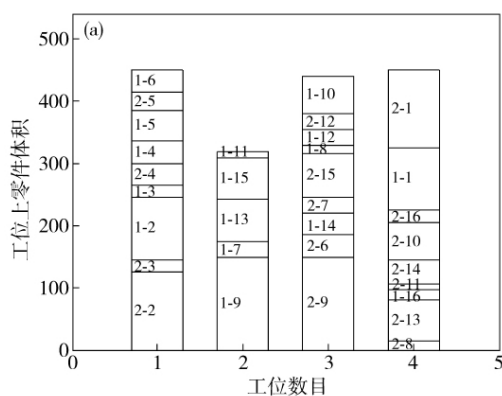


图 16 工位零件体积消耗. (a) 考虑约束; (b) 不考虑约束

Fig. 16 Consumed volumes of parts under stations: (a) with considering constraints; (b) without considering constraints

同时 , 整线的工位负荷率参见图 15. 在当前的
任务平衡分配方案中 , S1 工位到 S4 工位的平衡效
率 K 在 97.85% 左右 (绿色柱状条比例) , 平衡效率
指标良好.

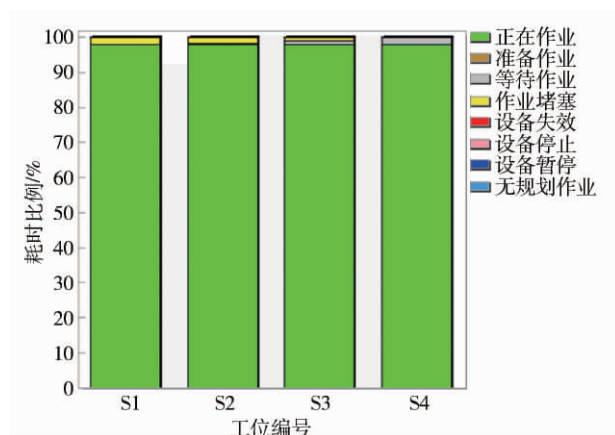


图 15 装配工位的平衡效率图

Fig. 15 Efficiency of each station

各工位零件体积消耗分布 (见图 16) . 根据上
图的任务分配组合情况 , 同时得出考虑零件体积约
束工况下的每个工位零件体积消耗如下 (见表 3) ,
可以看到每个工位下分配任务消耗的零件的体积均
未超过预设 D_i , 满足设计要求; 相比之下 , 如果忽略
产品体积的约束条件进行分析计算 , 得到的工位的
分配任务对应的零件体积消耗与对应作业任务分配
方案见图 16(b) 、图 17 和表 3 第三列 , 此时虽然工
位下任务时间总和小于预设时间值 , 但是 #1 和 #4
工位下的零件体积消耗超过预设的 D_i , 这种分配方案
在工程实际中是不允许发生的. 很明显 , 不考虑体
积约束的分配方案在实际场景中是不可行的.

优化算法收敛过程如图 18 所示. 本算例的硬
件运行环境为 CPU 2.1 GHz 主频、4 GB 内存、250 GB
硬盘的 DELL 笔记本 , 算例算法预设的最大迭代次

数是200. 可以看出算法在迭代步数为40步之前已经收敛, 该算例的平均计算时间为10s, 算法的收敛速度是很快的.

表3 工位下的零件体积消耗

Table 3 Consumed volumes of parts under stations

工位号	体积消耗(考虑约束)	体积消耗(不考虑约束)
No. 1	450	465
No. 2	318	276
No. 3	440	502
No. 4	450	415

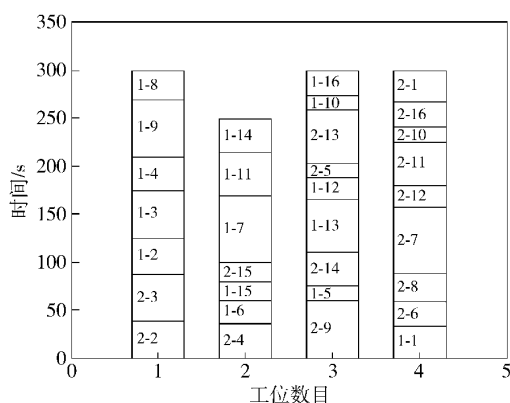


图17 工位数与作业平衡分配方案(不考虑约束)

Fig. 17 Station number and allocated operation chart (without considering constraint)

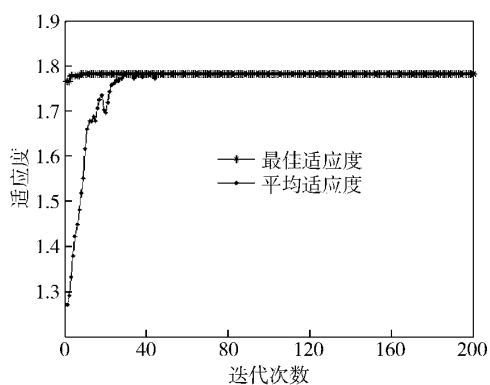


图18 算法收敛曲线图

Fig. 18 Convergence curves of the algorithm

5 结论

在混流生产线平衡问题的研究中, 本文的创新之处在于数学建模中对于加速迭代收敛、避免遗传算法中的种群退化进行了算法混合优化处理, 同时将之前很少考虑的现场物料摆放空间的限制作为约

束条件加入仿真算法模型, 使得分析的结果更具可行性.

参 考 文 献

- [1] Yang B Q, Tong M S. Mathematical modeling of automobile assembly line balancing. *Electr Drive Autom*, 2004, 26(1): 60 (杨本强, 童明傲. 汽车总成装配作业均衡编排问题的数学建模. 电气传动自动化, 2004, 26(1): 60)
- [2] Cao Z X, Zhu Y L, Zhao M Y, et al. Optimal research on balancing and sequencing of mixed model assembly lines. *Inf Control*, 2004, 33(6): 660 (曹振新, 朱云龙, 赵明扬, 等. 混流装配线负荷平衡与投产顺序的优化研究. 信息与控制, 2004, 33(6): 660)
- [3] Zhou X L, Cao Z X. Planning and simulation of the mix model assembly lines. *Mach Tool Hydraul*, 2008, 36(4): 344 (周小丽, 曹振新. 混流装配线的规划设计与仿真研究. 机床与液压, 2008, 36(4): 344)
- [4] Liu J H, Hou D L. The methods for solving the problem of balancing an assembly line. *For Eng*, 2006, 22(4): 21 (刘晋浩, 侯东亮. 装配线平衡问题的求解方法浅析. 森林工程, 2006, 22(4): 21)
- [5] Yu Z Q, Su P. Combining genetic algorithm and simulation analysis for mix-model assembly line balancing problem. *Comput Integr Manuf Syst*, 2008, 14(6): 1120 (于兆勤, 苏平. 基于遗传算法和仿真分析的混合装配线平衡问题研究. 计算机集成制造系统, 2008, 14(6): 1120)
- [6] Li B, Chen L P, Huang Z D, et al. Research on assembly line optimal scheduling for mass customization production. *China Mech Eng*, 2005, 16(24): 2198 (李斌, 陈立平, 黄正东, 等. 面向大规模定制的装配线优化调度研究. 中国机械工程, 2005, 16(24): 2198)
- [7] Ling W S. Research on balancing of mix-model assembly line workstations based on genetic algorithm. *J Hefei Univ Technol*, 2008, 31(8): 1287 (凌文曙. 基于遗传算法的混流装配线工作站平衡研究. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2008, 31(8): 1287)
- [8] Wu J H, Xia J K, Cao S H. Modeling of ALB Problem and its optimization. *J Syst Simul*, 1999, 11(5): 358 (吴君华, 夏巨谥, 曹山河. ALB问题的数学模型及其优化算法的研究. 系统仿真学报, 1999, 11(5): 358)
- [9] Wang L. *Intelligent Optimization Algorithm and its Application*. Beijing: Tsinghua University Press, 2001 (王凌. 智能优化算法与应用. 北京: 清华大学出版社, 2001)
- [10] Cai M, Wang F N, Yang S X. Material supply on car assembly line with JIT manufacturing style. *Manuf Autom*, 2006, 28(Suppl): 233 (蔡苗, 王峰年, 杨少霞. JIT生产模式下混流轿车总装配线上的物料配送. 制造业自动化, 2006, 28(增刊): 233)