

基于多目标遗传算法的柔性加工线平衡优化

刘雪梅, 贾勇琪, 兰琳琳, 李爱平

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对柔性加工线平衡问题, 提出了生产线平衡的同时得到工位配置、操作分配与排序的方法. 分析了操作间的优先关系约束、操作同工位约束和由机床性能、装夹方式、工件姿态决定的工位对操作限制的约束以及工位能力约束, 以机床数量、生产线节拍、生产线平衡率为优化目标, 建立了优化模型. 设计了多目标遗传算法, 采用启发式种群生成方法和解码方法, 应用帕累托分级和共享函数法对可行解适应度值进行评价, 保证解的分布性和均匀性. 该方法应用于缸体生产线实例, 获得了满意的非支配解集及多个线平衡方案, 验证了方法可行有效.

关键词: 加工线; 柔性; 线平衡; 约束模型; 多目标遗传算法

中图分类号: TH162+.1

文献标志码: A

Optimization of Line Balancing for Flexible Machining Lines Based on Multi-objective Genetic Algorithm

LIU Xuemei, JIA Yongqi, LAN Linlin, LI Aiping

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To solve line balancing problems for flexible machining line, a method was proposed, which can provide optimal stations configuration and operations assignment and sequence. After analyzing precedence constraint, clustering constraint and station constraint decided by machine capability, setups and workpiece orientation, a mathematical model was constructed, in which three objectives were considered simultaneously: number of machines, cycle time, line balancing rate. The multi-objective genetic algorithm (MOGA) was presented. A heuristic population generation and a heuristic decoder were designed. The Pareto ranking method and the sharing function method were employed to evaluate the individuals' fitness, which guaranteed the dispersity and uniformity of the solutions. A case study for

cylinder block machining line was carried out, and multiple optimal solutions were obtained by the MOGA. The computational results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: machining line; flexible; line balancing; constraint model; multi-objective genetic algorithm

自动化生产线是当今制造业广泛应用的大批量生产形式, 随着市场对产品多品种、中小批量的要求, 传统的专机流水线已不能满足企业快速应对市场的需求. 为了寻求更加柔性的生产方式, 以加工中心为主体的柔性加工线由于其加工范围广、可重构能力强得到了越来越广泛的应用^[1].

生产线平衡问题是生产线规划和设计(重设计)过程中的基本问题, 自 Salvesson^[2]于1955年率先提出装配线平衡问题(Assembly Line Balancing Problem, ALBP), 国内外学者针对其数学模型以及求解方法展开了广泛研究, 即使是其中最简单的单产品装配线平衡问题也属于 NP 难问题^[3]. 相比于 ALBP 问题, 加工线平衡问题(Transfer Line Balancing Problem, TLBP)^[4]则更为复杂, 虽然机加工操作间的先后关联相对较少, 然而为充分满足加工要求、考虑各工位的机床、刀具、夹具等性能, 需引入零件特征、加工操作、工位等多方面的约束条件, 进而增加了加工线平衡规划的复杂程度.

目前针对 TLBP 的研究相对较少, 且主要集中于专机生产线^[5-8], 其中专用机床均配备多主轴头, 具有同时加工一组特定操作的能力, 不需要考虑工位装夹约束以及换刀、工作台转位等辅助时间. 随着柔性加工线的发展, 研究人员开始进行柔性加工线平衡问题的研究. Essafi 等^[9]考虑了加工操作间的顺序约束、操作同工位约束、操作不同工位约束、刀

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 上海市科委项目(15111105500); 国家高档数控机床与基础制造装备科技重大专项(2013ZX04012-071)

第一作者: 刘雪梅(1969—), 女, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为数字化制造、制造信息工程.

E-mail: liuxuemei@tongji.edu.cn

具可接近性约束以及操作顺序对辅助时间的影响,以最小机床数为目标建立了该问题的混合整数规划模型.为进一步求解大规模工业实例问题,Essafi 等^[10-11]以最小生产线成本为目标提出了蚁群和贪婪随机自适应搜索结合路径重连的启发式求解方法. Borisovsky 等^[12]以加工设备数量最少为目标提出了基于遗传算法的柔性加工线平衡方法,并分析了问题规模以及算法参数对求解的影响. Das 等^[13]将加工线平衡问题分解为特征分配和操作排序 2 个子问题, Osman 等^[14]以辅助时间最短为目标,提出基于 Benders 及蚁群算法的求解方法,但在实际生产中同一特征的加工操作可以在不同的工位上完成.

尽管研究者针对柔性加工线平衡问题的建模及求解方法进行了研究,柔性加工线平衡过程中的很多问题还有待解决,研究与实际应用仍存在差距.通常研究的是单目标优化问题,实用性较低.本文针对箱体类零件柔性加工线的线平衡问题,考虑了加工操作间优先关系约束、操作同工位约束、工位对加工操作的限制约束以及工位能力约束,以设备配置数、生产线节拍、生产线平衡率为目标研究该问题的数学模型,以非支配排序多目标遗传算法,对该问题进

行求解,并通过实例验证算法的有效性.

1 问题描述

生产线平衡问题是考虑生产线类型、工位数量及构型、基本工作单元间优先关系等约束条件将一系列基本工作单元分配到一定数量的工作站并在满足约束的同时保证各工位作业时间不超过规定节拍且使所有工位的空闲时间最小.

就本文问题而言,柔性加工线由若干个串行工位构成,每个工位由 1 台或多台加工中心并联而成.同一工位各加工中心性能相同且执行相同的操作.加工约束主要包括各操作之间的优先顺序关系约束、操作同工位约束和由机床性能、装夹方式、工件姿态决定的工位对操作限制的约束以及工位能力约束.由于加工中心为单主轴机床,分配到其上的加工操作必须顺序执行,各工位内部的操作顺序可通过影响加工中心的换刀、工作台转位、主轴移位等动作进一步对优化目标产生影响,故必须同时考虑各工位之间的操作平衡分配和工位内部的操作排序问题.柔性加工线平衡问题如图 1 所示.

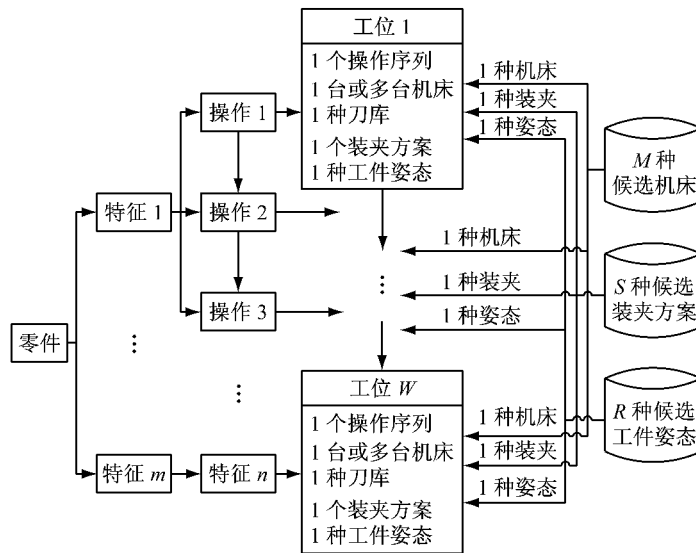


图 1 柔性加工线平衡问题模型

Fig.1 Model of line balancing problem for flexible machining line

1.1 加工操作聚类及信息描述

复杂箱体类零件分为 6 个基本平面,每个平面上有多个加工特征.由于复杂箱体零件加工操作数目较大,为减小问题规模,在建立加工操作时需进行聚类处理.将同一基本面上种类、尺寸、精度要求相同的特征同类加工操作处理为一个加工操作.采用操作单元存储加工操作相关信息,操作 $j(j=1, 2,$

\dots, N, N 为加工操作总数)对应的操作单元 O_j 定义如下:

$$O_j = \{O_p, T, D, t\} \tag{1}$$

式中: O_p 为操作种类; T 为操作所用刀具; D 为操作所在加工特征的方位面以及倾角; t 为操作加工时间,若该加工操作经过聚类处理,则该时间还应包括该组加工操作间的辅助时间.

1.2 工艺与工位约束

在机加工线平衡规划过程中,根据约束来源的不同,可以将其分为两大类:工艺约束信息与工位约束信息.此处以箱体类零件为加工对象,从加工中心的实际生产角度对各类约束进行描述.

1.2.1 工艺优先约束

工艺优先约束信息主要由加工特征之间以及特征内部操作之间的关联所产生,该类约束是为保证加工质量提出的必须遵守的约束.工艺优先约束信息主要包含以下几种:①先基准后其他.基准特征要先于非基准类特征加工.②先粗后精.同一个特征内若干加工操作须按照其工艺先后次序完成.③先面后孔.待加工面特征下存在孔系特征时,该面的粗(精)加工操作须先于其孔系粗(精)加工操作.④当孔和另外的特征发生部分相交时,孔先于其他特征加工.⑤当 2 个孔特征存在相交关系时,长孔先加工.

操作优先关系图(Operation Precedence Graph, OPG)是表达工艺优先约束最常用的一种方式.为便于计算机推理,采用操作优先关系矩阵 \mathbf{P} 来存储 OPG 信息, $\mathbf{P}=(p_{ij})(i, j$ 为操作编号, $i \in [1, N], j \in [1, N])$. 如果加工操作 j 为 i 的直接后继,则 $p_{ij} = 1, p_{ji} = 0 (i \neq j)$, 其余情况 $p_{ij} = p_{ji} = 0$.

1.2.2 操作同工位约束

操作同工位约束是指某些操作必须在同一工位上完成,如基准特征须在前续且同一工位中加工完成;相互之间有位置要求的特征须在同一工位上完成;相交孔特征须在同一工位上完成等.操作同工位约束可以用若干操作集合表示.

1.2.3 工位限制约束

工位限制约束是指由工位上加工设备、装夹方式、工件姿态等加工资源共同决定的对加工特征或操作的限制.工件以不同的姿态、不同的装夹方式在机床上安装,考虑夹具的遮挡、加工中心类型和转位能力,只有加工方向在机床转位能达到的范围并且不会和夹具遮挡面产生干涉的特征或操作才能在当前工位上加工.

工位限制约束采用式(2)所示的操作-资源约束矩阵表示, $1, \dots, i, \dots, N$ 为加工操作编号,第 1 到 M 列为机床对操作的限制约束, M 是候选机床种类数.第 $M+1$ 到 $M+S$ 列是装夹方式对操作的限制约束, S 为可行装夹方式的种类数,第 $M+S+1$ 到 $M+S+R$ 列是工件姿态对操作的限制约束, R 为工件安装姿态种类数.

$$\begin{bmatrix} b_{1,1} & \cdots & b_{1,M} & b_{1,M+1} & \cdots & b_{1,M+S} & b_{1,M+S+1} & \cdots & b_{1,M+S+R} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{i,1} & \cdots & b_{i,M} & b_{i,M+1} & \cdots & b_{i,M+S} & b_{i,M+S+1} & \cdots & b_{i,M+S+R} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{N,1} & \cdots & b_{N,M} & b_{N,M+1} & \cdots & b_{N,M+S} & b_{N,M+S+1} & \cdots & b_{N,M+S+R} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:

$$b_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{操作可于该资源限制下完成加工} \\ 0 & \text{操作不可于该资源限制下完成加工} \end{cases}$$

由于每个工位只能选择 1 种机床、1 种装夹方式和 1 种工件安装姿态,工位是机床、装夹方式、工件姿态的组合.工位限制约束又可转换为式(3)所示的操作-工位约束矩阵表示, W 为可选工位约束组合数.

$$\begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1k} & \cdots & d_{1W} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{i1} & \cdots & d_{ik} & \cdots & d_{iW} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{N1} & \cdots & d_{Nk} & \cdots & d_{NW} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $d_{ik} = 1$ 表示操作可于该工位(约束组合)下完成加工, $d_{ik} = 0$ 表示操作不可于该工位(约束组合)下完成加工.

1.2.4 工位能力约束

工位能力约束主要与工位上使用的机床、刀具有关,是对工位作业时间、工位机床数量、刀具数量的限制.

(1)每个工位有一个上限工作时间,它等于生产线节拍与工位机床数量之积.

$$\sum_{i=1}^{m_w} (t_i + t_{ij}) \leq C_{T0} \times N_w \quad (4)$$

式中: m_w 为工位上操作总数; t_i 为工位上第 i 个操作的操作时间; t_{ij} 为工位上相邻 2 个操作 i, j 的辅助时间,包括操作换刀时间、工作台转位时间、刀具移位时间; C_{T0} 为生产线节拍; N_w 为第 w 个工位的机床数量.

(2)工位上允许的机床数量限定了分配到工位上的机床总数.

$$N_w \leq N_0 \quad (5)$$

式中: N_0 为每个工位允许的机床总数.

(3)工位上刀库容量约束限定了分配到工位上使用不同刀具的操作总数.

$$N_{w, \text{mtool}} \leq N_{w, \text{mtool0}} \quad (6)$$

式中: $N_{w, \text{mtool}}$ 为第 w 个工位使用不同刀具的数量; $N_{w, \text{mtool0}}$ 为该工位上的刀库容量.

1.3 目标函数

在生产线规划过程中,生产目标可能有多个,而这些目标之间可能是冲突的,很难使所有的目标同时达到较佳状态.生产线平衡评价指标大多是以各工位的操作时间为出发点进行研究,其目的都是最大化生产线的工作效率、降低各工位的空闲时间,以在最短的时间内生产最多的产品.本文研究目标是在满足给定节拍的情况下,使机床设备配置数最少、生产线节拍最小、生产线平衡率最大.

$$N_M = \sum_{w=1}^W N_w \quad (7)$$

式中: N_M 为生产线需要配置的设备(加工中心)总数; W 为生产线工位总数.

$$C_T = \max(T_w/N_w) \quad (8)$$

式中: C_T 为最大工位节拍,即生产线节拍; T_w 为第 w 个工位的作业时间.

$$L_B = \frac{\sum_{w=1}^W (T_w/N_w)}{W \times C_T} \quad (9)$$

式中: L_B 为生产线平衡率,等于各工位节拍之和除以生产线节拍与工位数之积.

2 多目标遗传算法

采用一种基于帕累托(Pareto)最优概念的遗传算法来求解多目标优化问题.这种方法能够给出多目标优化问题的 Pareto 解集,从而可以帮助决策者在 Pareto 解集中挑选适合设计要求的解.

2.1 编码

采用结构体编码方式.结构体中包含操作序列、分配工位数和各工位节拍等属性.遗传算法生成随机染色体序列的同时初始化其他属性.

2.2 初始种群生成

生成初始种群时,为了保证种群的多样性,采用随机的方式产生染色体序列,同时保证各序列操作满足工艺优先约束.具体步骤如下:①载入操作序列 O 和操作优先关系矩阵 P ,操作总数 N ,初始化染色体序列 O' ,序号 $k=1$.②若 $k \leq N$ 则转③,否则退出循环输出染色体序列 O' .③生成随机数 $m(0 < m < N-k)$,在操作序列 O 中选择第 m 个操作 n ,若被选操作 n 前置操作已分配,转④,否则重复③;④将操作 n 加入初始染色体序列 O' ,并在操作序列 O 中消去 n ,将 P 矩阵第 n 行置零, $k=k+1$,转②.

2.3 解码方法

染色体序列到生产线平衡方案的映射需要通过

解码完成.生产线平衡一般是先确定工位构型、工位装夹、加工姿态等约束来限制工位可加工内容,然后利用搜索算法对可行域内解集合进行搜索寻优.本文提出一种基于启发式的解码方法对染色体表示的操作序列进行分配,分配过程以操作及操作间约束关系为主导,不需要提前确定生产线构型及选择工位装夹.具体解码方式如下:

(1)初始化工位号 $w=0$,染色体序列 O' .

(2)如果 O' 不为空,则 $w=w+1$,新建空工位 w ,机床数量 $N_w=1$,当前工位作业时间 $T_w=0$,空工位操作集合 $O_w=\{\}$,否则跳出循环,分配结束转步骤(8).

(3)搜索 O' 中序号最小且没有优先操作,并与当前工位已分配操作共享一种工位约束(装夹、姿态、机床的组合)的操作 j ,如果 j 存在,转步骤(4),否则转步骤(2).

(4)若 O_w 为空,转步骤(7),否则转步骤(5).

(5)检验当前工位是否满足约束式(6),满足转步骤(6),否则转步骤(2).

(6)计算当前工位时间 T_w 是否满足约束式(4),满足转步骤(7),否则转步骤(2).

(7)将搜索到的操作分入当前工位并更新工位时间 T_w ,将 j 从 O' 中删除,转步骤(3).

(8)计算目标函数.

将操作序列按某限制节拍 C_{T0} 分配到若干工位上的算法流程如图 2 所示.其中 T_w 为假设将加工操作 j 分配到 w 工位后的加工时间(此时并未真正完成分配), $T_w \leq (C_{T0} \times N_w)$ 为 j 真正分配到 w 工位的必要非充分条件. T_w 不是各个加工操作时间的简单叠加,还需加上辅助时间(换刀、转动、移位).若工位设备数超过最大设备数或者搜索失败,检验已分配操作是否满足同工位约束,如不满足,则进行工艺微调,将同工位操作集合及其优先操作分入工位,令 $w=w+1$,直到所分配操作序列为空.

2.4 适应度的确定

为保证解的分布性和均匀性,应用帕累托分级和共享函数法对可行解适应度值进行评价.帕累托分级步骤如下:①令级别 $g=1$.②从种群中任选一个解 X^* 作为参考,将其与种群中所有其他解进行比较,如果 X^* 支配所有其他的解,则令其级别 $g(X^*)=g$,重复此过程,直到种群中所有的解都被选择作为参考解为止.③删除所有级别为 g 的个体.④如果种群中还存在没有被确定级别的个体,则令 $g=g+1$,转②,否则退出循环,分级结束.

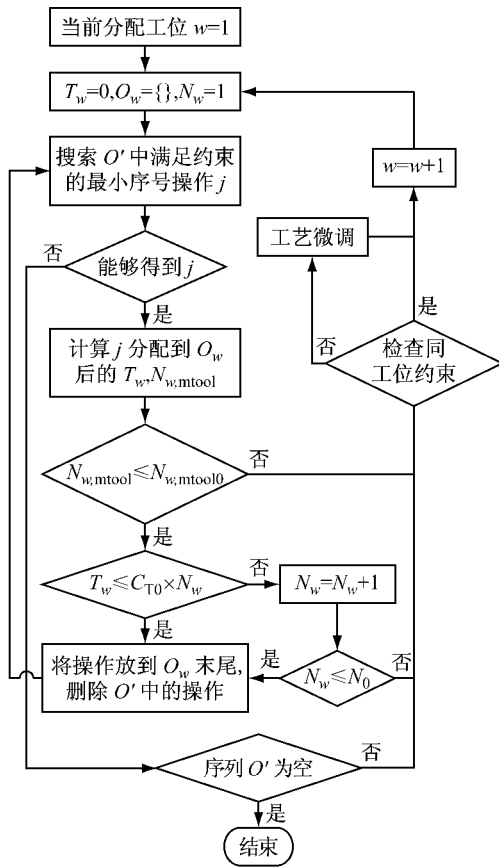


图 2 启发式解码算法流程

Fig. 2 Flow diagram of heuristic decoding algorithm

小生境计数计算步骤如下:①计算种群中所有个体的目标函数值。②计算个体 X_a 和 X_b 间的距离 $d_{ab} = |f_1(X_a) - f_1(X_b)| + |f_2(X_a) - f_2(X_b)| + |f_3(X_a) - f_3(X_b)|$, 式中 $f_1(X_a)$, $f_1(X_b)$ 及 $f_2(X_a)$, $f_2(X_b)$ 及 $f_3(X_a)$, $f_3(X_b)$ 分别为个体 X_a 和 X_b 的第 1、第 2 和第 3 个目标函数值。③计算共享函数值 $s(d_{ab}) = 1 - d_{ab}/O_s$ ($d_{ab} \leq O_s$), $s(d_{ab}) = 0$ ($d_{ab} > O_s$), 其中 O_s 为共享参数。

计算小生境计数 $N(X_a) = \sum_{b=1}^{p_{op}} s(d_{ab})$, 式中, p_{op}

为初始种群的规模。适应度函数为

$$F(X_a) = 2p_{op} - g(X_a) - N(X_a) \quad (10)$$

2.5 遗传算子

2.5.1 选择操作

选择算子建立在对个体适应度评价的基础上。采用锦标赛选择法随机地从种群中挑选一定数目的个体, 然后将适应度最高的个体作为父个体。这个过程重复进行 K (K 为种群数量) 次完成个体的选择。

2.5.2 交叉操作

设进行交叉操作的 2 个父代个体分别为 A_1 ,

A_2 , 它们交叉之后产生的子代个体为 B , 本文选择一种交叉过程中不违反操作间优先关系约束的交叉方式, 交叉操作如图 3 所示, 具体过程如下: ①随机产生 2 个交叉位置 e_1, e_2 , 设 $e_1 < e_2$ 。②设 A_1 中 e_1 和 e_2 位置之间的基因段为 m , A_1 中零和 $e_1 - 1$ 位置之间的基因段为 n 。③找出父代个体 A_2 中包含 m 中的基因值的最短基因片段, 设该片段在 A_2 中的起始位置为 s , 结束位置为 f 。设 s 和 f 位置之间的基因段为 p , 零和 $s - 1$ 位置之间的基因段为 x , f 位置之后的基因段为 y 。④将 x 和 y 中的基因值按照它们原来在 A_2 中的位置放入 B 中。对 p 中存放的每一个基因值按照先后顺序将不包含于 m 而在 n 中的基因值存入 B 的基因段 x 之后, 将不包含于 m 也不在 n 中的基因值存入 B 的基因段 y 之前。⑤将 m 中的基因按顺序存入 B 的空基因段位置。

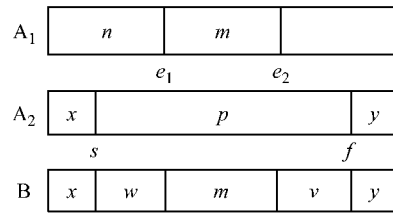


图 3 交叉示意

Fig. 3 Diagrammatic sketch of crossover

2.5.3 变异操作

对按照变异概率选择的个体进行变异操作时采用互换变异算子进行变异, 也就是先在个体序列中随机选取 2 个不同的基因位置, 然后对这 2 个位置的基因进行互换。

2.6 算法实现

算法过程所使用符号如下: 种群数量 K , 变异概率 p_m , 交叉概率 p_c , 迭代次数 i_{te} , 算法步骤如下: ①设定种群大小 K , 初始化参数 p_m, p_c 和 i_{te} , Pareto 档案集大小 N_p , 创建初始 Pareto 非支配集 $P_a = \emptyset$ 。②生成初始种群。③对种群中的每个染色体进行解码, 得到对应的生产线平衡方案。④计算每个平衡方案的 C_T, L_B, N_M, W 。⑤根据 Pareto 支配关系对种群进行帕累托分级。⑥把级别为 1 的所有非支配解放入非支配解集 P_a 中, 如果非支配解集的规模超过设定值, 则对 P_a 进行修剪。⑦计算种群中每个解的小生境计数。⑧计算种群中每个解的适应度值。⑨进行选择、交叉、变异操作。⑩采用精英保留策略, 令进化代数 $i_{te} = i_{te} + 1$, 如果达到设定的进化代数则终止算法, 输出非支配解集 P_a 中的所有解, 否则转步骤⑤。

3 案例分析

以某柴油发动机缸体生产线中的柔性化改造为例进行平衡方案优化以验证算法的有效性.原企业发动机缸体生产线以专机为主,加工对象单一,可变性差,不能及时适应生产任务的变化.根据企业要求,对缸体生产线中的部分专机工位进行柔性化改造,即使用加工中心代替专机加工.缸体零件如图 4 所示,原专机工位改造涉及到的特征操作按方位面统计如表 1 所示.

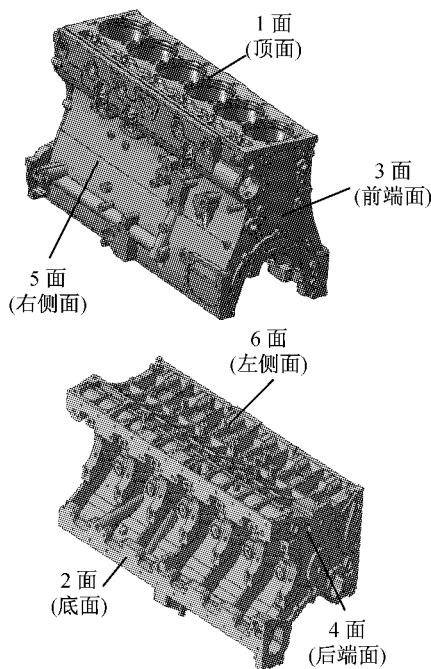


图 4 缸体示意

Fig.4 3D model of cylinder block

表 1 各面操作数

Tab.1 Operation number of each face

方位面	操作数	方位面	操作数
1 面	86	4 面	78
2 面	160	5 面	129
3 面	51	6 面	92

经聚类处理后得到该零件的 71 个制造特征的 132 个操作.由于该型号缸体有 6 个缸孔,纵向距离过大,加工时零件只有 2 种姿态和 2 种装夹方式,如图 5 所示.可使用 A 轴和 B 轴 2 种类型的四轴加工中心进行加工,B 轴加工中心采用装夹方案 1,以 2 面及 2 面上销孔定位,1 面为夹紧面,安装姿态为 2 面朝下,可加工 3 面、4 面、5 面、6 面及面上特征.A 轴加工中心采用装夹方案 2,以 5 面及 5 面上销孔定位,3 面、4 面为夹紧面,安装姿态为 5 面朝下,可加

工 1 面、2 面、5 面(由于夹具遮挡,5 面上部分操作可加工)、6 面及面上特征.

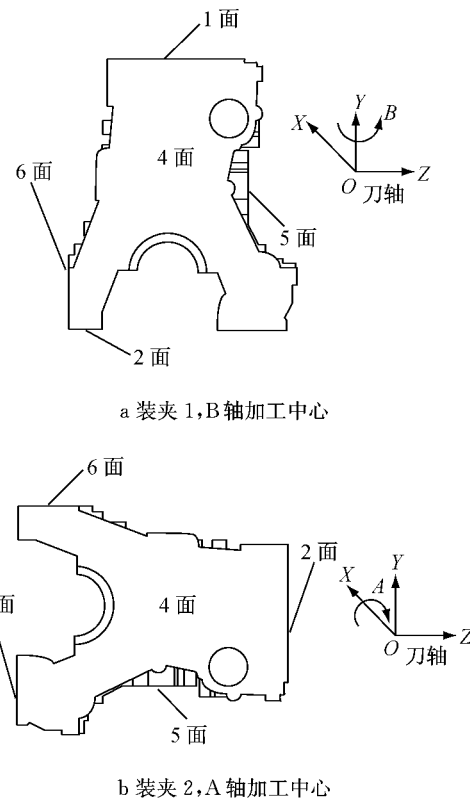


图 5 装夹方式与工件姿态

Fig.5 Clamping method and workpiece attitude

采用本文算法对上述实例进行计算,种群大小 100,迭代次数 500,交叉概率 0.8,变异概率 0.3,各工位最大并行机床数为 6 台,刀库最大容量为 60 把,根据企业生产计划,生产线最大节拍为 380 s.计算机的硬件参数为 Intel i5 处理器、8 GB 内存,通过 MatlabR2010b 软件进行算法运算,耗时 740 s,获得 Pareto 最优解集如图 6 和表 2 所示,机床投入数最少的方案 5 的线平衡方案如图 7 所示,该方案由 3 个工位组成,工位 1 和 3 使用装夹方案 1,工位 2 使用装夹方案 2,各工位节拍分别为 336.9 s,337.2 s 和 322.3 s.从表 2 中可以看出,计算所得 Pareto 最优解集中的解方案包含不同机床配置数下的最优方案,5 种方案均可满足生产节拍要求且生产线平衡率为 93%以上.随着机床数量的增加,生产线节拍减少,但当机床数量增加到一定值时,生产线节拍相差不大,如机床数量为 17 和 16 的 2 种线平衡方案.上述结论对生产线后期的增产规划具有一定指导作用.此外,从表 2 中还可看出,工位数少容易得到较高的平衡率.

为进一步验证算法,在上述多目标遗传算法及

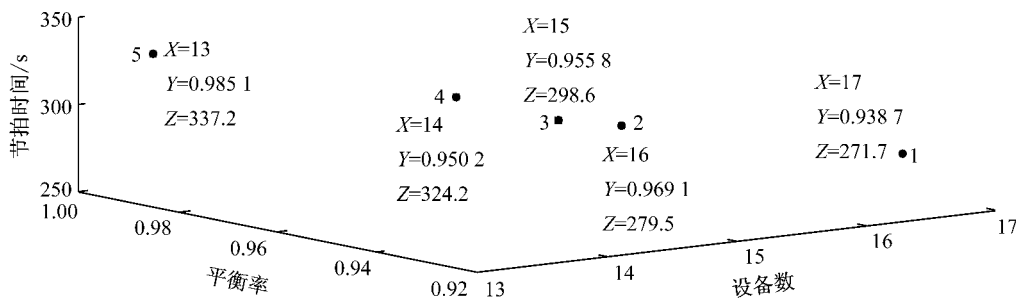


图 6 多目标 Pareto 解

Fig.6 Pareto solutions for multiple objects

表 2 多目标优化方案

Tab.3 Multi-objective optimization results

序号	节拍/s	平衡率/%	构型	设备数量
1	271.7	93.87	3-3-4-3-4	17
2	279.5	96.91	5-5-3-3	16
3	298.6	95.58	5-6-3-1	15
4	324.2	95.02	3-3-2-3-3	14
5	337.2	98.51	5-6-2	13

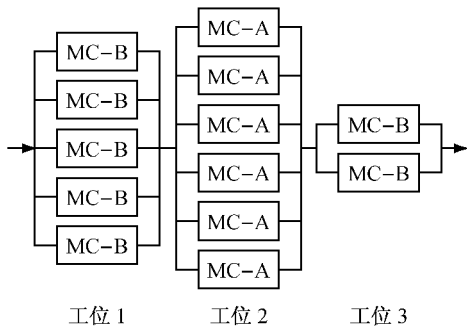


图 7 机床数量最少的生产线平衡方案

Fig.7 Production line balancing scheme of the least number of machines

求解结果基础上,限制设备数,以生产节拍最小为目标进行求解.分别限制设备数量为 13 到 17 台时,生产节拍迭代曲线如图 8 所示,每次运算平均耗时 350s.图 9 为设备数量限制为 13 台时得到的最优生产线平衡方案,该方案由 5 个工位组成,工位 1 和 2 和 4 使用装夹方案 1,工位 3 和 5 使用装夹方案 2,各工位节拍分别为 339.0,336.1,337.9,340.9 s 和 325.7 s,生产线节拍为 340.9 s,平衡率为 98.5%,

与多目标遗传算法求解结果相近.

本文算法改进了初始种群生成方法和解码方法,采用满足优先约束的操作序列构造初始种群,解码方法直接得到满足工位约束的操作分配方案.图 10 给出了设备数量为 13 台时传统遗传算法与改进遗传算法的节拍曲线收敛对比图.2 种算法除了进化策略不同,其余参数设定完全相同,由多次试验得出,本文算法收敛速度更快,最终所得解的结果更优.此外,针对相似问题,文献[1]利用改进粒子群算法求解,需要提前确定生产线构型和装夹方案,而本文算法不需要预先指定生产线构型和各工位装夹方案,能够同时得到多种构型的平衡方案,算法效率更高,适用范围更广.

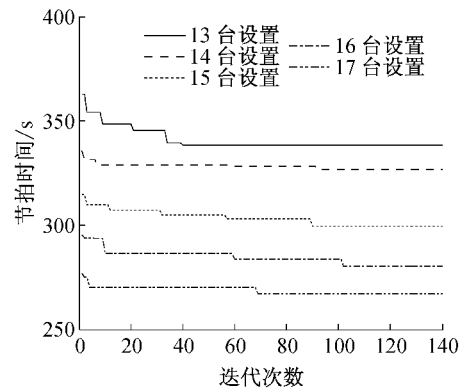


图 8 不同设备数的生产节拍迭代曲线

Fig.8 Iteration curve of cycle time for different number of machines

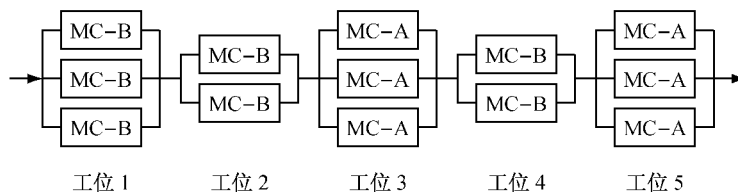


图 9 生产线平衡方案

Fig.9 Production line balancing scheme

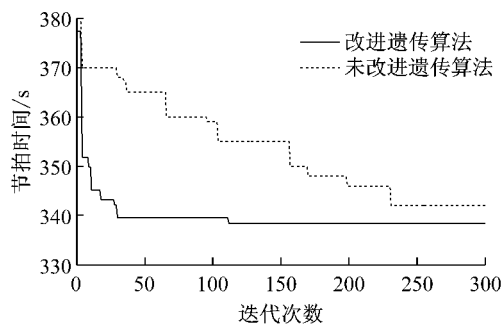


图 10 2种算法目标节拍的收敛曲线

Fig.10 Convergence curves of cycle time for two algorithms

4 结语

针对箱体类零件柔性机工线平衡问题,考虑了操作优先关系约束、工位限制约束、操作同工位约束、工位能力约束,以设备配置数、生产节拍、生产线平衡率为优化目标,建立了柔性加工线的优化模型。提出了多目标遗传算法,为了使算法的搜索尽可能在整个可行解空间进行,同时保证非支配解集的分散性和均匀性,采用随机的方式产生满足工艺优先约束的初始种群以及满足工位约束的启发式解码方法,并将帕累托分级和共享函数法用于适应度值的评价。通过工业实例验证,该多目标遗传算法可以得到满意的非支配解集,对生产线规划与再设计具有较好的指导作用。

参考文献:

- [1] 李爱平, 鲁力, 王世海, 等. 复杂箱体零件柔性机加工生产线平衡优化[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(4): 625.
LI Aiping, LU Li, WANG Shihai, *et al.* Optimization of flexible machining line balancing for complex prismatic parts [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(4): 625.
- [2] Salveson M E. The assembly line balancing problem [J]. Journal of Industrial Engineering, 1955, 6(3): 18.
- [3] Bhattacharjee T K, Sahu S. Complexity of single model assembly line balancing problems [J]. Engineering Costs and Production Economics, 1990, 18(3): 203.
- [4] Dolgui A, Guschinsky N, Levin G. On problem of optimal design of transfer lines with parallel and sequential operations [C]//Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'99). Barcelona; [s. n.]; 1999, 329-334.
- [5] Dolgui A, Finel B, Guschinsky N, *et al.* MIP approach to balancing transfer lines with blocks of parallel operations [J]. IIE Transactions, 2006, 38(10): 869.
- [6] Dolgui A, Ihnatsenka I. Branch and bound algorithm for a transfer line design problem: Stations with sequentially activated multi-spindle heads [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(3): 1119.
- [7] Dolgui A, Kovalev S, Kovalyov M Y, *et al.* Minimizing setup costs in a transfer line design problem with sequential operation processing [J]. International Journal of Production Economics, 2014, 151: 186.
- [8] Battia O, Dolgui A, Guschinsky N, *et al.* Integrated configurable equipment selection and line balancing for mass production with serial-parallel machining systems [J]. Engineering Optimization, 2014, 46(10): 1369.
- [9] Essafi M, Delorme X, Dolgui A, *et al.* A MIP approach for balancing transfer lines with complex industrial constraints [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(3): 393.
- [10] Essafi M, Delorme X, Dolgui A. Balancing lines with CNC machines: A multi-start ant based heuristic [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010, 2(3): 176.
- [11] Essafi M, Delorme X, Dolgui A. A reactive GRASP and path relinking for balancing reconfigurable transfer lines [J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(18): 5213.
- [12] Borisovsky P A, Delorme X, Dolgui A. Genetic algorithm for balancing reconfigurable machining lines [J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 66(3): 541.
- [13] Das K, Baki M F, Li X Y. Optimization of operation and changeover time for production planning and scheduling in a flexible manufacturing system [J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(1): 283.
- [14] Osman H, Baki M F. Balancing transfer lines using Benders decomposition and ant colony optimization techniques [J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(5): 1334.