

工步排序问题的约束模型及其遗传算法的求解

郝建波, 李宗斌, 赵丽萍

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对加工中心上的工步排序问题, 以辅助加工时间最短为优化目标, 基于多色集合理论建立了问题的约束模型. 在约束模型中, 使用多色集合理论中的围道布尔矩阵, 直观、全面地描述了问题的条件约束, 并方便了计算机编程. 在模型约束下, 采用遗传算法求解, 并详细描述了编码、交叉和变异等操作过程. 由于引入了约束模型, 问题的所有解都被控制在有效解范围内, 因此缩小了搜索空间, 保证了得出的解都是有效解, 并且能提高收敛到最优解的速度. 实例证明, 在模型约束下的遗传算法能够很好地求解加工中心上的工步排序问题, 排序结果满足条件约束要求且接近最优.

关键词: 约束模型; 多色集合理论; 遗传算法; 工步排序

中图分类号: TP278 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)07-0860-05

Genetic Algorithm with Constraint Model for Sequencing Workingsteps on Machining Center

HAO Jianbo, LI Zongbin, ZHAO Liping

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the sequencing workingsteps on machining center, by taking the assistant machining time as the optimization object, a constraint model is established based on polychromatic sets theory, where the contour matrix is used to formalize the conditioned restrictions visually and comprehensively. A genetic algorithm combined with the constraint model is designed to sequence workingsteps on machining center, and the process of encoding, mutation and variation are described. The searching is among the valid solutions by searching the contour matrix, thus the searching range is reduced to ensure the solution validity, and the convergency rate is improved. An example demonstrates the efficiency of this algorithm for sequencing workingsteps on machining center.

Keywords: constraint model; polychromatic sets theory; genetic algorithm; sequencing workingsteps

为了适应省力、省时和节能的时代要求, 加工中心是迅速发展起来的自动换刀数控机床, 在加工中心上加工箱体、壳体等较复杂的零件时, 由于加工中心具有工作台转位和自动换刀的功能, 零件在一次装夹下的工步数目有数十到上百道, 工步数越多, 排序规模越大, 因此单靠经验难以得到最优的排序方案. 在研究工步排序的优化方法时, 减少加工辅助时间, 对于提高加工中心的生产效率, 具有十分重要的

意义.

为解决加工中心上的工步排序问题, 文献[1]采用了模拟退火法, 文献[2-4]等使用的是遗传算法, 文献[5]采用的是模拟退火和遗传算法, 文献[6]则采用了反馈式神经网络模型. 本文在分析工步排序原则的基础上, 采用多色集合理论^[7]在加工中心上建立了工步排序问题的约束模型, 直观、全面地描述了问题的条件约束, 并在此模型的基础上采用遗传

算法进行工步排序,既保证了得出的解都是有效解,又能提高收敛到最优解的速度。

1 工步排序问题的数学模型

在加工中心上加工零件时,工步排序主要受以下条件约束:①在同一表面上加工零件时,应按先粗加工,再半精加工,最后精加工的次序进行;②既有铣面又有镗孔和钻孔的零件,应按先铣面、后镗孔或钻孔的顺序进行加工。若加工的平面不作为孔的基准,则面加工与孔加工没有严格的先后次序要求;若加工平面作为孔的基准,则面加工与孔加工有严格的先后次序约束要求,即先加工面后加工孔。

工步排序结果主要需要达到以下目标:①将同一方位上的表面加工集中在一起,以尽量减少工作台的转位时间,其中方位为零件在 X、Y、Z 轴正负向共 6 个方向;②使用相同刀具的工步应集中安排在一起,以尽量减少换刀时间。

设 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 是某工件在加工中心上一次装夹的 $n(n>1)$ 个加工工步的集合,这 n 个工步构成某一种工序顺序 $x=\{o_1, o_2, \dots, o_n\}$,即从工步 o_1 开始,到工步 o_n 结束。优化目标是找一个最优的顺序 x^* ,在满足先粗后精、先面后孔条件约束的前提下,换刀和工作台转位的辅助时间最短。因此,目标函数为

$$f(x) = f_1(x) + f_2(x) \quad (1)$$

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{n-1} g(D_i - D_{i+1}) t_i \quad (2)$$

$$g(D_i - D_{i+1}) = \begin{cases} 1 & D_i \neq D_{i+1} \\ 0 & D_i = D_{i+1} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{n-1} ((A_i/90)t'_i) \quad (4)$$

式中: $f_1(x)$ 为 x 的换刀时间总和; $f_2(x)$ 为 x 的工作台转位时间总和; D_i 为 x 中 o_i 使用的刀具; D_{i+1} 为 x 中 o_{i+1} 使用的刀具; t_i 为每次换刀的时间; t'_i 为工作台转位 90° 需要的时间; A_i 为 x 中 i 和 $i+1$ 之

间工作台转过的角度。

由式(2)和式(3)可知,函数 $f_1(x)$ 的值越小,刀具越集中;由式(4)可知,函数 $f_2(x)$ 的值越小,方位越集中。因此,工步排序的数学优化模型为

$$f(x^*) = \min\{f(x)\} \quad (5)$$

2 工步排序问题的约束模型

分别使用特征-工步围道布尔矩阵及特征-面孔属性围道布尔矩阵,来描述工步排序中的先粗后精和先面后孔的条件约束。某零件有 15 个特征,每个特征的加工工步链为:通孔 1、2、5、8、11(粗镗-精镗);平面 4、7、10、13、15(粗铣-精铣);螺纹孔系 3、6、9、12、14(钻)。

如图 1 所示,加工中心上可以进行的操作包括钻、粗镗、半精镗、精镗、粗铰、精铰、攻丝、粗铣和精铣,根据各特征的加工工步链,得到特征-工步围道布尔矩阵。

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}
a_1			●			●			●			●		●	
a_2	●	●			●			●			●				
a_3															
a_4	●	●			●			●			●				
a_5															
a_6															
a_7															
a_8				●			●			●			●		●
a_9				●			●			●			●		●

$a_1 \sim a_9$:加工工步,分别表示钻、粗镗、半精镗、精镗、粗铰、精铰、攻丝、粗铣、精铣; $F_1 \sim F_{15}$:第 1~第 15 个加工特征;●:特征点

图 1 特征-工步围道布尔矩阵示意图

对所有工步按顺序进行编号(见表 1),在表 1 中,列标对应特征编号,行标对应工步名称,表中非零元素值即为工步编号。这样,根据工步编号所在位置即可找出工步对应的特征编号和加工方法,且编号值惟一。根据各特征的面、孔属性,可以得到特征-面孔属性围道布尔矩阵示意图(见图 2)。将图 2 中黑点处以 1 代替,而将非黑点处以 0 代替(见表 2)。

表 1 工步编号及位置

工步	加工特征														
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}
a_1	0	0	5	0	0	10	0	0	15	0	0	20	0	23	0
a_2	1	3	0	0	8	0	0	13	0	0	18	0	0	0	0
a_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_4	2	4	0	0	9	0	0	14	0	0	19	0	0	0	0
a_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_8	0	0	0	6	0	0	11	0	0	16	0	0	21	0	24
a_9	0	0	0	7	0	0	12	0	0	17	0	0	22	0	25

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}
b_1				•			•			•			•		
b_2	•	•	•		•	•		•	•		•	•		•	•

b_1 :面; b_2 :孔

图2 特征-面孔属性围道布尔矩阵

表2 加工特征对应的面孔属性

面孔	加工特征														
属性	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}
b_1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
b_2	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0

3 模型约束下的遗传算法求解

在遗传算法中,以式(5)所示函数的倒数作为适应度函数,求得适应度最大的个体,即方位和刀具最集中的个体.由于引入了约束模型,因此编码、交叉、变异操作有别于一般遗传算法.

3.1 模型约束下的编码

采用实数编码的方式,设有 n 个工步,则基因值为在 $1 \sim n$ 之间随机取值,且每个基因值不同.假设有 u 个特征, v 种加工方法,将类似表 1 中的数据存入二维数组 $a[v][u]$ 中,类似表 2 中的数据存入二维数组 $b[2][u]$ 中,具体编码过程如下.

步骤 1 找出数组 $a[][]$ 中每一列第 1 个不为 0 的元素,存入一维数组 $c[]$ 中;将找出的元素所在的列标存入数组 $d[]$ 中,行标存入数组 $e[]$ 中;设数组 $c[]$ 中一共有 $n(n \leq 15)$ 个元素.

步骤 2 从 $0 \sim (n-1)$ 个数字中随机选取一个,设为 x ,即选取工步 $c[x]$,而工步 $c[x]$ 所在列为 $d[x]$,行标为 $e[x]$.

步骤 3 若 $b[0][d[x]]$ 为 1,则工步 $c[x]$ 对应的特征为面, $c[x]$ 即为基因值,将 $a[e[x]][d[x]]$ 元素置 0;若 $b[0][d[x]]$ 为 0,则工步 $c[x]$ 对应的特征为孔,设工步 $c[x]$ 对应的特征所在面的特征编号为 y ,若数组 $a[][]$ 中第 y 列的所有元素都为 0,即特征 y 的所有工步都完成了加工,则 $c[x]$ 即为基因值,将 $a[e[x]][d[x]]$ 元素置 0;若 $b[0][d[x]]$ 为 0,设工步 $c[x]$ 对应的特征所在面的特征编号为 y ,若数组 $a[][]$ 中第 y 列有元素不为 0,即特征 y 还有工步没有加工完,转步骤 1. 循环步骤 1、2、3,直至基因个数为工步个数.

3.2 交叉操作

设需要进行交叉操作的 2 个父代个体分别为

A_1 和 A_2 ,它们交叉之后产生的子代个体为 B ,交叉操作过程如下.

步骤 1 随机产生 2 个交叉位置 e_1, e_2 ,设 $e_1 < e_2$.

步骤 2 设 A_1 中 e_1 和 e_2 位置之间的基因段为 $m[]$; A_1 中 0 和 $e_1 - 1$ 位置之间的基因段为 $n[]$.

步骤 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 $w[]$, 0 和 $s - 1$ 位置之间的基因段为 $x[]$, f 位置之后的基因段为 $y[]$.

步骤 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 $w[]$ 中存放的每一个基因值,按照先后顺序,将不包含 $m[]$,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.

步骤 5 将 $m[]$ 中的基因按顺序存入 B 的空基因段位置.

3.3 变异操作

为保证进行变异后的个体仍然满足先粗后精和先面后孔的条件,变异操作采用启发式互换变异法,变异过程见图 3,可以多次执行该流程,以增加变异位置.

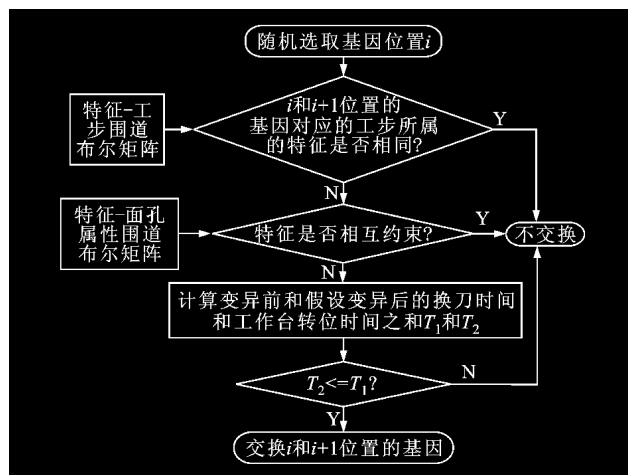


图3 变异流程图

3.4 参数的设置

从交叉操作过程中可以看出,并不是每一次所选择的染色体个体都能执行交叉操作,所以交叉概率不宜取太小(0.5~0.85 之间为宜),以免进化速度太慢而过早地陷入局部收敛状态. 变异概率是增加种群多样性的重要因素,太小则不会产生新个体,太大则使遗传算法成为随机搜索. 由于本算法的变异操作具有非强制性,满足相应的条件才执行,所以变异概率不宜取太小,在 0.4~0.95 之间为宜. 当工

步数目较少时,交叉概率和变异概率取较大值;反之,取较小值.

4 实例分析

采用模型约束下的遗传算法,对图4所示零件

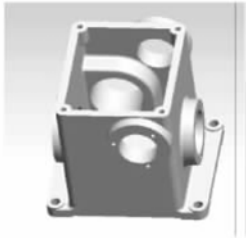


图 4 实例实体图

的加工工步进行排序. 该零件需要加工 15 个特征,共 25 个工步,各特征所在方位面如表 3 所示. 图 4 中的后面、左面、前面、右面、顶面分别为方位面 1~5,各工步所属特征和所用刀具如表 4 所示.

取遗传算法运行参数的群体大小为 101,交叉概率为 0.75,变异概率为 0.85,最大进化代数为 80. 每次换刀时间为 5 s,工作台转位 90°所需时间为 2 s,运行 5 次,取得最优解(加工时间为 65 s). 由图 5 可知,当最短加工时间为 65 s 时,所得结果满足工步排序受到的条件约束,即先粗后精、先面后孔,且能较快地得到较优的排序结果,能够较大程度地实现方位集中和刀具集中.

表 3 零件特征及所在方位面

特征编号	特征名称	所在方位面	特征编号	特征名称	所在方位面
1	φ35 通孔	1	9	M4 孔系	3
2	φ48 通孔	1	10	端面	3
3	M4 孔系	1	11	φ40 通孔	4
4	端面	1	12	M4 孔系	4
5	φ40 通孔	2	13	端面	4
6	M4 孔系	2	14	M6 孔系	5
7	端面	2	15	顶面	5
8	φ35 通孔	3			

表 4 工步所属特征及所用刀具

实例	特征	刀具号	实例	特征	刀具号
1	1	391.68A-2-038 13 C06A	14	8	C3-391.38A-1-024 086A
2	1	C3-391.38A-1-024 086A	15	9	R415.5-0350-30-8CD
3	2	391.68A-3-047 16 T11A	16	10	R390-020A2011L
4	2	C3-391.38A-1-024 086A	17	10	R390-020A2011L
5	3	R415.5-0350-30-8CD	18	11	391.68A-3-047 16 T11A
6	4	R390-020A2011L	19	11	C3-391.38A-1-024 086A
7	4	R390-020A2011L	20	12	R415.5-0350-30-8CD
8	5	391.68A-3-047 16 T11A	21	13	R390-020A2011L
9	5	C3-391.38A-1-024 086A	22	13	R390-020A2011L
10	6	R415.5-0350-30-8CD	23	14	R415.5-0550-30-8CD
11	7	R390-020A2011L	24	15	R390-020A2011L
12	7	R390-020A2011L	25	15	R390-020A2011L
13	8	391.68A-2-038 13 C06A			

图5 工序排序结果

5 结 论

对于加工中心上的工序排序问题,随着工序数目的增多,在排序条件和目标的约束下,工序排序优化过程很复杂。本文首先使用多色集合理论建立了加工中心上的工序排序问题的约束模型,该约束模型直观地表达了问题的条件约束。然后,提出了采用模型约束下的遗传算法求解加工中心上的工序排序问题,并详细设计了编码、交叉、变异等由引入约束模型而产生的特殊遗传操作过程。实例证明,使用模型约束下的遗传算法在加工中心上进行工序排序,其结果满足条件约束要求且接近最优。

参考文献:

- [1] 蒲建,王先逵,吴丹,等. 工艺规划中的组合优化问题[J]. 清华大学学报,1997,37(8):69-71.
PU Jian, WANG Xiankui, WU Dan, et al. Combinatorial optimization problems in process planning[J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37(8):69-71.
- [2] 秦宝容,王宁生. 基于遗传算法的加工中心工序排序优化方法[J]. 中国机械工程,2003,13(18):1531-1535.
QIN Baorong, WANG Ningsheng. A genetic algo-

rithm-based optimization method for sequencing machining steps on a machining center[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 13(18):1531-1535.

- [3] 张冠伟,赵相松,李佳,等. 基于遗传算法的工序优化排序方法[J]. 计算机集成制造系统,2005,11(2):242-246.
ZHANG Guanwei, ZHAO Xiangsong, LI Jia, et al. Method of operation optimization sequencing using genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(2):242-246.
- [4] 朱海平,肖诗旺,黄刚. 基于遗传算法的工艺过程排序研究[J]. 华中科技大学学报,2006,36(3):50-53.
ZHU Haiping, XIAO Shiwang, HUANG Gang. Research on operation sequencing based on genetic algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2006, 36(3):50-53.
- [5] 刘敏,潘晓弘,程耀东,等. 加工中心上基于模拟退火和遗传算法的工序优化问题研究[J]. 中国机械工程,1999,10(11):1223-1227.
LIU Min, PAN Xiaohong, CHENG Yaodong, et al. Research on operation optimization oriented machining center based on simulated annealing & genetic algorithms[J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10(11):1223-1227.
- [6] 郭占斌,刘海军. 神经网络用于箱体类零件工序自动排序的方法[J]. 农业机械学报,2006,37(2):124-126.
GUO Zhanbin, LIU Haijun. Study on artificial neural network method in automatic sequencing of box-type parts[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2006, 37(2):124-126.
- [7] 李宗彬,徐立达. 多色集和其在模拟复杂对象和系统中的应用[J]. 计算机与操作研究,2003,30(6):851-860.

(编辑 管咏梅)

2007年我校获准国家自然科学基金资助项目153项

2007年我校获准国家自然科学基金资助项目共计153项,资助经费4 876万元,其中面上项目144项、重点项目5项(含1项重大国际合作交流项目)、国家杰出青年基金项目3项、海外青年合作研究基金项目1项,项目数位居全国高校排名第11位。值得一提的是,国家杰出青年基金在时隔10年后,又取得了新进展,医学学科实现了零的突破。获得国家杰出青年基金资助的分别是材料学院李长久教授、能动学院席光教授和医学院郑鹏生教授;电信学院任巍教授作为合作人获得海外青年合作研究基金;获得重点项目资助的分别有电信学院管晓宏教授和高静怀教授、能动学院何雅玲教授、医学院贺浪冲教授、材料学院孙军教授获得重大国际合作交流项目。

我校科技处积极组织各类项目的申报,2007年组织申报国家自然科学基金各类项目879项(其中面上项目830项、重点项目23项、国家杰出青年基金项目18项、海外港澳合作研究基金项目8项),最终153项获准资助,面上项目资助率达17.2%。

科技处:董康宁