

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.011

基于改进遗传算法的柔性作业车间调度方法研究*

廖 珊, 翟所霞, 鲁玉军*

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对柔性作业车间调度问题,提出了一种自适应的遗传机制,构造出自适应的适值函数定义方法,设计了相应的自适应选择、交叉和变异3种算子。为了解决同一工序的不同机器的负荷平衡,提出了表征机器加工能力的能力系数。通过轮换方法实现了相同工序不同机器之间的调度。仿真实验结果表明,该调度算法具有可行性。

关键词: 柔性作业车间调度; 改进遗传算法; 适值函数

中图分类号: TH311 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)06-0729-05

Research on the flexible flow-shop scheduling based on the improved adaptive genetic algorithm

LIAO Shan, ZHAI Suo-xia, LU Yu-jun

(College of Mechanics and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the flexible flow-shop scheduling problem, a modified adaptive genetic algorithm was given. A highly adaptive genetic mechanism and a definition method of highly adaptive fitness function were proposed. Corresponding adaptive selection, crossover and mutation operators were given. To solve the load balance of different machine in same working process, capacity coefficients which describe the processing capacity of the machine was presented to distributing the tasks to different machines on rotation. Finally, the simulation results validate the feasibility of the improved adaptive genetic algorithms.

Key words: flexible flow-shop scheduling(FFS); improved adaptive genetic algorithms; fitness function

0 引 言

柔性作业车间调度问题(flexible flow-shop scheduling problem, FFSP)也称混合 Flow-shop 调度问题,是指带有机器可选柔性的车间调度问题。该问题的主要特征是在某些工序存在并行机器,更加符合实际生产环境^[1-2]。柔性作业车间调度问题已经被证明为 NP 难问题,难以取得最优解,为了使调度问题更符合实际,各种调度算法都在不断的改进和发展。遗传算法是一种借鉴生物自然选择而不依赖梯度信息的随机搜索算法,在算法实现方面具备结构上的隐含并行

性、计算原理上的随机性和自适应性,且鲁棒性强,适用于传统搜索方法难以解决的复杂非线性问题,已经被广泛应用于求解柔性作业车间调度问题^[3-6]。

由于传统遗传算法在求解柔性作业车间调度问题时,存在搜索效率低、容易过早收敛等缺陷,本研究提出一种改进的自适应遗传算法,设计具有自适应的遗传机制,提出解决同一工序不同机器的负荷平衡的车间柔性调度策略。

1 柔性作业车间调度问题描述

柔性作业车间调度问题可以描述为:在一个加工

收稿日期: 2014-03-13

基金项目: 浙江省自然科学基金重点资助项目(LZ12F03003);国家地方联合工程实验室开放基金资助项目(2013KF04);浙江省高校重中之重学科优秀青年人才培养基金资助项目(ZSTUMD2012B005)

作者简介: 廖珊(1992-),女,湖南湘潭人,主要从事生产车间调度、精益生产方面研究. E-mail:lauraliaoshan@gmail.com

通信联系人: 鲁玉军,男,博士,副教授,硕士生导师. E-mail:lue_t_lyj@zstu.edu.cn

系统中,需要在 m 台机器上加工 n 个工件,每个工件都包含一道或多道工序,且各工序顺序是预先确定的,每道工序可以在一台或多台不同机器上进行加工,每道工序的加工时间随着所选择的机器性能的不同而发生变化。同时满足如下约束条件:

- (1) 同一时刻同一机器只能加工一种工件;
- (2) 每个工件一旦开始加工不能中断;
- (3) 同一工件工序存在先后约束关系,工序不可逆,不同工件工序之间不存在先后约束关系;
- (4) 不同工件之间具有相同优先级;
- (5) 不考虑机器故障等随机要素。

柔性作业车间调度的目标就是为每道工序选择最合适的机器,并合理安排工件的加工顺序和加工时间,就是使最大完工时间最小化^[7-9]。即柔性作业车间调度问题的目标函数:

$$g(x) = \min(\max_{i=1}^n C_i) \quad (1)$$

式中: C_i —工件 i 的加工完成时间, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

2 车间柔性调度策略

由于制造的柔性化,在柔性流水线中某些工序上存在着并行机器,这些机器的加工能力存在差异性^[7]。为了平衡生产负荷,需要对不同并行机器的加工能力进行表征,这里定义了加工能力系数 β ,作为对工序加工时间的补充。若机器的加工时间为 t ,则考虑加工能力差异的加工时间为 $t \times \beta$ 。本研究用轮换法确定并行机器的任务分配,首先确定该工序对应的并行机器序列,然后用能力系数 β 乘以对应机器的标准加工时间。具体的调度步骤为:

步骤一:针对生产计划,在尽可能满足约束条件(如交货期、工艺路线、资源情况等)的前期下,对生产任务进行分解,确定需要加工工件的工序及工序的并行机情况,为每一道工序生成一个工序对象,用来处理该工序的不同机器调度和平衡信息。

步骤二:生成具体的加工序列,为加工工件的各工序确定一台机器。同时,在计算中考虑同工序不同机器加工能力差异,生成机器加工时间 $t \times \beta$ 。

步骤三:执行自适应遗传算法调度,求解调度结果。

步骤四:对调度求解获得的最优适应度值 C_{\max} 结果进行分析,比较不同调度算法的优劣。

3 改进的自适应遗传算法设计

用自适应遗传算法求解柔性作业车间调度问题的关键是采用有效的遗传编码以及自适应的交叉、变

异和选择操作,适应函数定义方法也对遗传算法寻优过程影响巨大。通过对种群重复地进行选择、交叉、变异等基本遗传操作,不断产生出比父代更适应环境的新一代种群,直到满足要求条件为止^[10]。改进的自适应遗传算法流程图如图1所示。

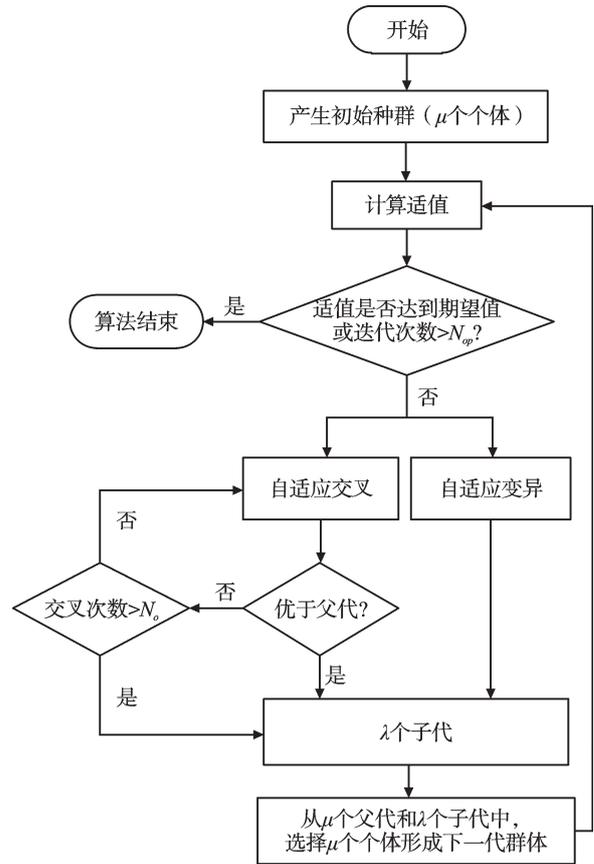


图1 改进的自适应遗传算法流程图

3.1 遗传编码

遗传算法是交替地在编码空间对染色体进行遗传操作,在解空间对解进行评价和选择。因此,如何将问题的解或方案转换为编码表达的染色体是遗传算法的关键。为了有效地解决柔性作业车间调度问题的遗传编码,可以采用一种基于矩阵的编码方法^[11]。

3.2 初始化种群

笔者利用参考文献[11]中遗传编码方法,随机产生一定数量染色体,构成遗传算法所需的初始种群。

3.3 自适应适应函数

适应是对解的质量的一种度量,解的适应性是进化过程中进行选择的唯一依据,改变种群内部结构的操作都是通过适应加以控制的。因此,适应函数定义方法对遗传计算过程的影响很大^[12]。

如果群体中出现超级个体,该个体的适应大大超过群体的平均适应值,则在按照适应比例进行选择时,该个体很快就会在群体中占有绝对的比例,从而

导致算法较早地收敛。在这种情况下,应该缩小这些个体的适应度,以降低这些超级个体的竞争力。在搜索过程的后期,群体的平均适值可能会接近群体的最优适值,出现停滞现象。这种情况下,应该改变原始适应值的比例关系,以提高个体之间的竞争力。本研究给出一种新的适值函数定义方法—适值比值自调整适值函数 $f(x)$ 。

适值函数 $f(x)$ 是由目标函数 $g(x)$ 通过映射方式得到。定义同代群体中最大与最小适值之比 $k=f^{\max}/f^{\min}$, 适值计算参数为 C , 推导如下:

$$k=(g^{\max}-C)/(g^{\min}-C), \text{ 则:}$$

$$C=\frac{k g^{\min}-g^{\max}}{k-1} \quad (2)$$

假设最佳适值比区域为 (a, b) (a, b 值可以通过计算机仿真获得), 则适值比值自调整适值函数 $f(x)$ 定义形式如下:

$$k_0=\frac{a+b}{2} \quad (3)$$

$$C_{n+1}=\frac{k_n g_n^{\min}-g_n^{\max}}{k-1} \quad (4)$$

$$f(x)=g(x)-C_{n+1} \quad (5)$$

$$k_{n+1}=\begin{cases} a, & f_{n+1}^{\max}/f_{n+1}^{\min}<a \\ \frac{f_{n+1}^{\max}}{f_{n+1}^{\min}}, & a<f_{n+1}^{\max}/f_{n+1}^{\min}<b, k_n+1 \in[a, b] \\ b, & f_{n+1}^{\max}/f_{n+1}^{\min}>b \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_n —第 n 代的最大最小适值比, C_{n+1} —第 $n+1$ 代的适值计算参数。

在本研究的调度实例中,为了缩短算法搜索时间,给定阈值 N_{op} , 经过 N_{op} 次进化后算法结束。

3.4 改进自适应遗传操作设计

遗传运算模拟了基因在每一代中创造新后代的繁殖过程,交叉操作在遗传操作中起着关键作用,是产生新个体的主要方法,变异操作是产生新个体的辅助方法,但决定了遗传算法的局部搜索能力大小。交叉操作和变异操作相互配合,可以共同完成对搜索空间的全局搜索和局部搜索^[9]。

遗传算法的交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的选择是影响遗传算法行为和性能的关键参数,直接影响算法的收敛性。针对不同的优化问题,需要反复实验来确定 P_c 和 P_m , 这是一件繁琐的工作,而且很难找到适应于每个问题的最佳值。

在自适应遗传操作过程中, P_c 和 P_m 能够随适应度自动改变。当种群各个个体适应度趋于一致或者趋于局部最优时,使 P_c 和 P_m 增加,以跳出局部最优;而当群体适应度比较分散时,使 P_c 和 P_m 减少,以利于优良个体的生存。同时,当前代的最优个体不被破

坏,仍然保留并进入下一代(最优保存策略);但较优个体要对应于更高的交叉概率与变概率。

自适应交叉概率、变异概率计算公式为:

$$P_c=\begin{cases} P_{c1}-\frac{(P_{c1}-P_{c2})(f'-f_{avg})}{f_{max}-f_{avg}} & f'>f_{avg} \\ P_{c1} & f'\leq f_{avg} \end{cases}$$

$$P_m=\begin{cases} P_{m1}-\frac{(P_{m1}-P_{m2})(f_{max}-f)}{f_{max}-f_{avg}} & f'>f_{avg} \\ P_{m1} & f'\leq f_{avg} \end{cases}$$

式中: f_{max} —群体中最大的适值; f_{avg} —每代群体的平均适值; f' —要交叉的两个个体中较大的适值,是要变异的个体的适值 f 。一般取 $P_{c1}=0.9$; $P_{c2}=0.6$; $P_{m1}=0.1$; $P_{m2}=0.001$ 。

(1) 交叉算子。对按照轮盘赌规则产生的 N 个个体,计算群体的平均适值 f_{avg} 和最大适值 f_{max} 。将群体中的各个个体随机搭配成对,共组成 $N/2$ 对,对每一对个体,按照自适应公式计算自适应交叉概率 P_c , 并随机产生 $R(0, 1)$, 如果 $R < P_c$, 则对改组染色体进行交叉操作。采用二点交叉,即随机设定两个交叉点,将两个交叉点之间的码串相互交换,产生新的子代个体。为了缩短算法搜索时间,给定阈值 N 。如果经过次交叉操作都不能再产生优于父代的个体,即认为自适应交叉操作结束。

(2) 变异算子。对于 N 个个体,按照自适应变异公式计算自适应变异概率 P_m , 并随机产生 $R(0, 1)$, 如果 $R < P_m$, 则对该染色体进行变异操作。对于第 i 个基因 a_i , 变异算子为:

$$d=R \text{ and } \{-1, 1\};$$

$$\text{if } d=1, r=R \text{ and } (0, S_i-a_i), \text{ or } r=R \text{ and } (0, a_i-1);$$

$$a_i'=a_i+d \times r$$

式中: d —整数, r —实数, a_i —要变异个体, a_i' —变异的结果。

这种变异方法使得基因一直在 $(1, S_i+1)$ 范围内,保证了其合法性,同时也使变异具有充分的随机性。

(3) 自适应选择算子。选择操作在遗传操作交叉和变异之后,是从遗传操作产生的新个体和所有操作前的群体中按照一定概率选出优良个体,形成下一代群体。为了提高算法的自适应性,本研究设计了一种自适应选择操作。设初始种群有 μ 个个体,每一子代交叉变异产生 λ 个新个体。为了保持种群的多样性和算法的收敛性,将变异产生的新个体直接放入下一代,交叉产生的新个体并不直接放入下一代中,只有适应度优于父代平均值适值的个体才放入下一代,适值过低的个体直接淘汰掉。最后,从 μ 个父代和 λ 个子代中,利用轮盘赌选择方法,选出 μ 个个体形成下一代群体。

4 调度实例

某厂车间要加工15个工件,每个工件都有冲压、退火、电镀、贴片和分贴5个工序,各工序机器数分别为5、2、3、3、2,每台机床的加工能力不同,具体加工时间如表1所示。同工序各机器的加工能力系数如表2所示,0表示该工序没有该机器。基于改进的自适应遗传算法的参数取值如表3所示。

表1 工件在各个工序上的加工时间(单位:min)

| | 工序1 | 工序2 | 工序3 | 工序4 | 工序5 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 10 | 2 | 6 | 6 | 4 |
| 2 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 3 | 11 | 2 | 9 | 9 | 6 |
| 4 | 12 | 3 | 7 | 7 | 5 |
| 5 | 11 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 6 | 9 | 5 | 5 | 5 | 2 |
| 7 | 5 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 8 | 6 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| 9 | 7 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| 10 | 6 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| 11 | 5 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 12 | 3 | 3 | 2 | 2 | 4 |
| 13 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 |
| 14 | 10 | 7 | 8 | 8 | 5 |
| 15 | 11 | 7 | 7 | 7 | 5 |

表2 同工序个机器加工能力系数

| | 工序1 | 工序2 | 工序3 | 工序4 | 工序5 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 机器1 | 1.0 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 1.4 |
| 机器2 | 1.1 | 1.0 | 1.3 | 1.0 | 1.0 |
| 机器3 | 1.3 | 0 | 1.0 | 1.2 | 0 |
| 机器4 | 1.4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 机器5 | 1.2 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表3 基于改进的自适应遗传算法的参数取值

| 参数 | 取值 |
|-----------------|---------------------|
| Pop Init Range | 1.1~5.9 |
| Population | 20 |
| Elite Count | 1 |
| Generations | 100 |
| Fitness Scaling | rank |
| Selection FCN | Selection to chunif |
| Mutation rate | 0.01~0.05 |
| Crossover rate | 0.55~0.85 |

本研究分别随机进行10次仿真,Matlab仿真^[13]进化过程如图2所示,在98代左右获得近似最优解,所求的最优适应度值 C_{max} 为560。其中最好的一条染色体为:

[5.085 6, 3.208 7, 2.243 9, 1.522 3, 2.735 5, 1.027 1, 3.491 8, 3.717 0, 4.534 5, 2.400 7, 4.314 5, 4.153 2, 3.106 5, 1.278 6, 5.548 7; 2.313 5, 2.130 7,

2.437 9, 2.835 7, 1.757 5, 1.359 9, 1.399 3, 2.665 9, 2.468 1, 1.541 4, 1.153 5, 2.017 4, 1.111 8, 1.727 7, 2.751 9; 2.316 8, 1.217 8, 3.232 7, 3.711 3, 2.764 1, 1.344 5, 1.554 7, 2.618 3, 2.384 0, 1.640 2, 3.019 0, 1.070 2, 2.092 5, 3.515 2, 1.849 1; 2.205 3, 1.226 0, 1.615 4, 2.698 5, 1.773 7, 1.494 7, 3.327 9, 3.537 5, 3.494 5, 2.428 2, 3.056 6, 1.011 7, 2.124 7, 2.524 9, 3.693 8; 1.368 1, 1.138 2, 1.588 4, 1.785 1, 2.814 3, 2.325 2, 1.274 9, 2.570 1, 2.376 9, 1.548 8, 2.147 3, 1.003 6, 2.104 1, 2.718 6, 1.683 9]

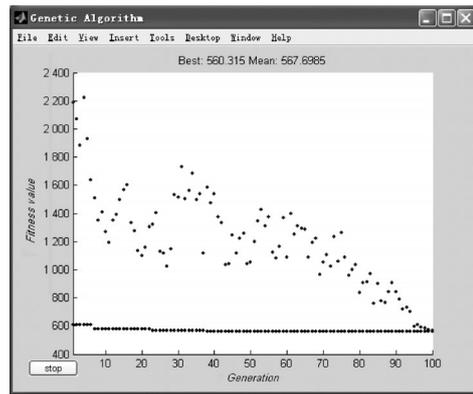


图2 基于改进遗传算法的进化过程

基于标准遗传算法的进化过程如图3所示,算法在52代左右停滞收敛,从而可以证明其跳出局部近似最优解的能力较差,且所得解最优适应度值 C_{max} 为648。

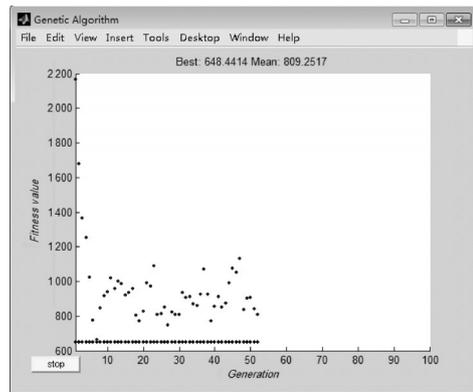


图3 基于标准遗传算法的进化过程

由图2和图3的比较可以看出,本研究采用改进的自适应遗传算法得到的最优适应度值 C_{max} 为560,比采用标准遗传算法获得的最优适应度值 C_{max} 为648更小,所以算法搜索最优解的能力更强。同时,本研究利用改进的自适应遗传算法消除了采用标准遗传算法容易陷入局部最优、停滞收敛的弊端。

5 结束语

本研究针对柔性作业车间调度问题,构造了高度

自适应的遗传机制,采用自适应的适值函数提高了适值函数的优化能力,同时通过算法中的自适应选择算子、交叉算子和变异算子,改善了原算法在搜索后期出现的停滞不前现象。调度前采用柔性调度策略,提出了表征机器加工能力系数和轮换方法,实现了同一工序上不同机器的负荷平衡调度。

参考文献(References):

- [1] 魏 巍,谭建荣,冯毅雄,等. 柔性工作车间调度问题的多目标优化方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(8):1592-1598.
- [2] 王万良,姚明海,吴云高. 基于遗传算法的混合Flow-shop调度方法[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(7):863-869.
- [3] HEJAZI S R, SAGHAFIAN S. Flow shop-scheduling problems with makespan criterion. [J] **International Journal of Production Research**, 2005, 43(14):2895-2929.
- [4] 李 平,唐秋华,夏绪辉,等. 基于双层遗传编码的柔性作业车间自适应重调度研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(16):2195-2201.
- [5] 王万良,吴启迪. 生产调度智能算法及其应用[M]. 北京:

科学出版社, 2007.

- [6] 李俊青,潘全科. 求解模糊作业车间调度问题的混合优化算法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23):142-149.
- [7] PEZZELLA F, MORGANTI G, CIASCETTI G. A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem[J]. **Computers and Operations Research**, 2008, 35(10):3203-3212.
- [8] 李传鹏. 基于改进遗传算法的柔性作业车间调度优化与仿真[D]. 济南:济南大学机械工程学院, 2013.
- [9] 陈永卿,潘 刚,李 平. 基于混合遗传算法的装配线平衡[J]. 机电工程, 2008(4):60-62.
- [10] 周根贵. 生产与运作管理及其遗传算法[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [11] 王万良,吴启迪,宋 毅. 求解作业车间调度问题的改进自适应遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(2):58-62.
- [12] 胡国四,韩生廉. 遗传算法适值函数定义方法的研究[J]. 控制与决策, 1999, 14(6):694-697.
- [13] 雷英杰,张善文,李续武. Matlab 遗传算法工具箱及应用, [M]. 2版. 西安:西安电子科技大学出版社, 2005.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

廖 珊,翟所霞,鲁玉军. 基于改进遗传算法的柔性作业车间调度方法研究[J]. 机电工程, 2014, 31(6):729-733.

LIAO Shan, ZHAI Suo-xia, LU Yu-jun. Research on the flexible flow-shop scheduling based on the improved adaptive genetic algorithm[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(6):729-733. [《机电工程》杂志: http://www.meem.com.cn](http://www.meem.com.cn)

(上接第728页)

光顺地生成。铣刀的前角和后角等参数对刀具的寿命、切削效率有着很大的影响,通过参数化系统可以正确、快速地实现铣刀的再生成,提高了设计效率。

4 结束语

本研究以整体硬质合金平头立铣刀为例,对其数学模型进行了详细地求解,并基于UG OPEN工具完成了参数化直接建模,实现了交互方式操作难以实现的功能,提高了刀具设计效率。同时,微小参数的变化即有可能对刀具的整体性能产生重要的影响,能够实现整体硬质合金刀具的快速参数化直接建模,为进一步研究刀具的其他特性打下了良好的基础。

参考文献(References):

- [1] 邓远超. 整体硬质合金刀具参数化建模技术与方法的研究[D]. 成都:西华大学机械与自动化学院, 2008.
- [2] 程开举,郑敏利,姜 彬. 数控高速铣刀参数化设计系统的开发[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2005, 10(1):32-36
- [3] 董正卫,田立中,付一力. UG/OPENAPI编程基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.

- [4] 袁哲俊,刘华明. 刀具设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1996.
- [5] KALDOR S, RAFAEL A M, MESSINGER D. On the CAD of profiles for cutters and HelicalFluteS-geometrical aspects [J]. **Annals of the CIRP**, 1998, 37(1):53-56.
- [6] 孙 妙,杨昌明,邓远超,等. 立铣刀三维建模新方法[J]. 工具技术, 2009(7):59-61.
- [7] 米 蓉. 立铣刀三维参数化设计系统研发[D]. 成都:西南交通大学机械工程学院, 2011.
- [8] 邱迎宾. 复杂形状刀具三维实体建模[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院, 2007.
- [9] 赵 邦. 整体硬质合金立铣刀计算机辅助设计与制造系统研究[D]. 济南:山东大学机械工程学院, 2007.
- [10] 梁锡坤. B样条类曲线及其在曲线参数化中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2009(4):99-101.
- [11] 黄 勇,张博林,薛运锋. UG二次开发与数据库应用基础与典型范例[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [12] 张生昌,连加伟,邓鸿英,等. 基于VC++及UG的多级滚柱转子泵转子参数化模块建立[J]. 轻工机械, 2012, 30(2):82-85.
- [13] 张晓东,姜兆亮,陈露露. 基于UG的整体硬质合金立铣刀数字化建模[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(9):8-11.

[编辑:张 翔]