

· 电子机械工程 ·

## 基于遗传算法与动态规划法的工艺过程优化

王志红, 杜平安, 郭志龙, 梁山虎

(电子科技大学机械电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**针对制造系统中的工艺过程优化问题,提出一种基于遗传算法和动态规划法的综合优化模型。该模型将工艺过程的优化分解为两个并行层次-工序层和工艺路线层。用改进的遗传算法求解工序层中的工艺参数优化问题,同时利用动态规划法实现工艺路线层次的优化。将两个层次优化方法有机结合,在局部优化的基础上进行整体优化,从而实现整个工艺过程的优化。通过实例证明了该优化模型求解的可行性和有效性。

**关键词** 遗传算法; 动态规划法; 制造过程; 优化

中图分类号 TH164

文献标识码 A

## Process Planning Optimization based on Genetic Algorithm and Dynamic Programming Method

WANG Zhi-hong, DU Ping-an, GUO Zhi-long, LIANG Shan-hu

(School of Mechatronics Engineering, Univ. of Electron. Sci. & of China Chengdu 610054)

**Abstract** An integrated optimization model based on genetic algorithm and dynamic programming method is proposed to optimize manufacturing process during process planning. Due to the complexity of manufacturing process, this model decomposes the process into two parallel aspects and the optimization is conducted respectively. For the aspect of working procedures, genetic algorithm is improved to optimize their process parameters efficiently, which belongs to the constraint optimal problems that are usually difficult to deal with for genetic algorithm. And for the aspect of routings, dynamic programming method is employed to search the best manufacturing routing. Based on the local optimization by generic algorithm, the whole manufacturing process is optimized by using dynamic programming method. A case study is also presented to demonstrate the feasibility and effectiveness of the model.

**Key words** genetic algorithm; dynamic programming method; manufacturing process; optimization

目前关于工艺过程优化的研究多数仅限于工艺参数、工艺路线<sup>[1-2]</sup>。要实现工艺过程优化,把两者有机结合起来进行整体优化是必要的。工艺过程优化涉及的变量多且关系复杂,属有约束混合离散优化问题,因此难以针对整个过程建立统一的优化模型。为此,本文提出将工艺过程的优化分解为两个并行层次进行。

### 1 总体优化方案

工艺过程由不同工序按一定路线组成,因此可将其分解为工序层次和工艺路线层次的优化。工序层中以每个工序的工艺参数作为优化变量,用遗传算法得到优化后的加工成本、时间等优化目标值;

工艺路线层的优化采用动态规划法,其中每个阶段的可行路径(此处指工序)由专家知识库给出,阶段效益由工序层次的优化结果和设备资源及其布局共同决定。通过两个层次优化方法的结合,在局部优化的基础上进行整体优化,最终得到以时间或成本为目标的最优工艺路线。总体优化方案如图1所示。

### 2 优化模型的建立

#### 2.1 遗传算法

##### 2.1.1 遗传算法概述

遗传算法<sup>[3]</sup>是一种广泛用于求解寻优问题的方法。它是按概率在解空间进行搜索,因此能较为有效地避开局部极值,以较高的效率逼近全局最优解。

收稿日期: 2006-08-25

基金项目: 国家863计划资助项目(2003AA411210)

作者简介: 王志红(1981-),女,硕士,主要从事CAD/CAPP/CAM方面的研究。

同时, 将待解决问题转化为编码序列问题, 与问题的物理意义和特点没有关系, 对设计变量和目标函数要求少, 因此适用面广, 算法也便于使用和改进。

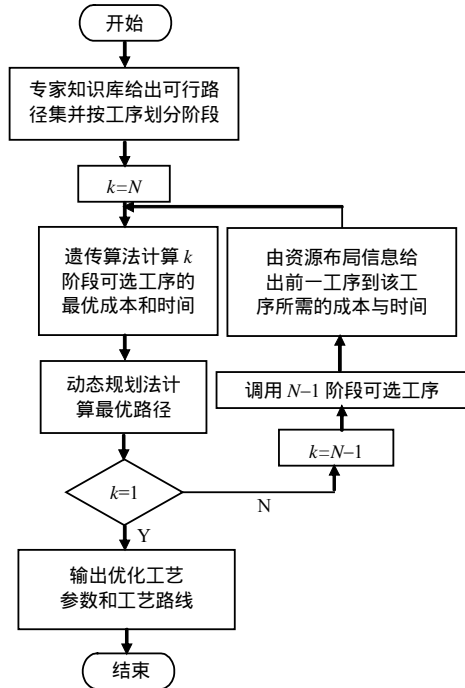


图1 总体优化方案

2.1.2 工艺参数优化的遗传算法处理

机加工中, 每道工序的工艺参数选择会直接影响制造成本和效率, 同时还受加工精度等方面的约束。传统的机加工中, 多是根据经验来确定工艺参数, 但在较复杂的情况下, 单靠经验确定的参数很难保证最佳的经济效益, 而且缺乏科学依据。而工艺过程涉及的变量多且复杂, 传统的数学方法难以有效解决此类优化问题。根据问题的特点, 可利用遗传算法解决此优化问题。以成本为优化目标, 则优化模型为:

$$\begin{cases} \min C(X) = \sum_{k=1}^n C_k(X) \\ \text{s.t. } h_j(X) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, k \\ g_j(X) = 0 \quad j = k + 1, k + 2, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

式中 优化变量  $X=(x_1, x_2, \dots, x_s)$  为工艺参数集, 包括切削速度、进给量等。

传统的遗传算法难以处理有约束优化问题。改进算法中, 常用惩罚函数转化成无约束优化问题<sup>[3]</sup>, 但惩罚因子的选择一直没有好的方法。选择偏大, 惩罚力度过大, 容易导致早熟; 选择过小, 惩罚力度偏小, 容易使个体落入非可行域。有些采用梯度算子, 引导遗传操作产生的新一代种群中的非可行个体转化成可行个体<sup>[4]</sup>。但是该方法中, 梯度算子

要根据具体问题给出, 不具有普适性。为此, 本文提出一种新的约束处理方法。其算法流程如图2示, 图中下标  $j$  表示遗传代数。相关计算公式如下: 目标函数  $C(X_i) = \sum_{k=1}^n C_k(X_i)$ , 其中,  $X_i$  为每一代中的一个样本; 适应度函数  $f(X_i) = 1/C(X_i)$ , 其中, 样本  $X_i$  被选中作为下一代亲本的概率  $p(X_i) = f(X_i) / \sum_{i=1}^N f(X_i)$ , 其中,  $N$  为样本大小; 样本  $X_i$  被选中次数  $l(X_i) = \text{int}[p(X_i)N]$ ; 变异次数  $l_m = \text{int}[p_m N]$ ,  $p_m$  为变异概率。

对优化变量  $X=(x_1, x_2, \dots, x_s)$  采用二进制编码方式, 各个变量的二进制代码按顺序排列, 组成一个染色体, 代表一个样本的信息, 多个样本组成种群。通过对染色体的选择性复制、交叉和变异操作, 实现遗传算法寻优计算。交叉操作中, 采用两点交叉 (Two-Point Crossover), 随机选取个体中的两个基因位, 交换两亲本对应部分。

如图2所示, 本算法的改进之处在于, 对每次交叉或变异操作后产生的新一代种群进行检验, 判断每个样本是否在可行域内, 如果不是则重新进行交叉或变异。交叉点的位置是随机选择的, 变异中被改变的基因也是随机选择的。因此通过再次交叉或变异, 比较容易使改变后的样本满足约束条件。该方法主要优点在于简单易行, 且适用性强。

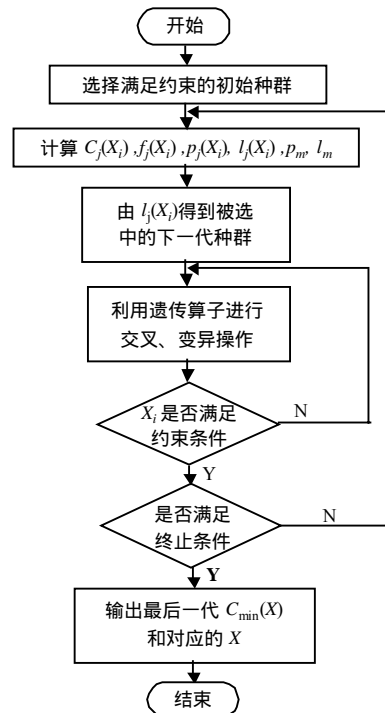


图2 改进遗传算法流程图

### 2.2 动态规划法

动态规划法<sup>[5]</sup>是研究多阶段决策问题的数学方法，其原理概括为：无论过去的状态和决策如何，对前面的决策所形成的状态而言，余下的诸决策必须构成最优策略。因此，多阶段决策问题的求解过程可看成是一个连续递推过程，由后向前逐步计算。

工序层次优化的输出结果是完成每道工序所需的最短时间和最低成本。在此基础上，对整个工艺过程进行优化属于离散优化问题<sup>[6-8]</sup>。根据问题的特点，选用动态规划法可实现此问题的优化。动态规划的基本递推方程及边界条件分别为：

$$f_i(X_i) = \min \text{ or } \max [g(X_i, d(X_i)) + f_{i+1}(d(X_i))] \quad i = n, n-1, \dots, 1; \quad (2)$$

$$f_{n+1}(X_{n+1}) = 0$$

式中  $i$  表示阶段； $X_i$  表示第  $i$  阶段的某一状态，即可选中间途径之一； $d(X_i)$  表示第  $i$  阶段当处于  $X_i$  状态时的决策变量； $f_i(X_i)$  表示最优指标函数，指从  $i$  阶段的  $X_i$  状态到终点的最优路线； $g(X_i, d(X_i))$  表示在  $X_i$  状态  $d(X_i)$  决策方案下的阶段效益。

动态规划过程如图3所示。其中每个阶段的可行路径(此处指工序)由专家知识库给出，图中表示为  $A_i, B_i, C_i$ ；阶段效益由工序层次的优化结果和设备资源及其布局共同决定，图中表示为  $c_{ij}$ 。车间设备资源和布局决定工件在不同工序间的流动成本。动态规划法是一种全局优化方法，统筹全局，因此可避免传统加工中按经验安排工艺路线时的局部优化问题。

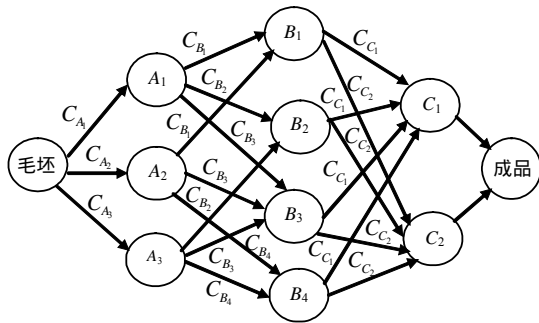


图3 动态规划示意图

### 3 实例研究

待加工零件如图4所示，其材料灰铸铁为190 HB，孔径精度等级为IT11，孔表面粗糙度为  $Ra3.2$ 。根据加工要求，可行工艺路线如图5示。优化步骤如下<sup>[9]</sup>：

(1) 建立优化模型：分别计算第二阶段中扩孔和铰孔的最低成本。优化模型如下<sup>[9]</sup>：

$$\min C = M \times \frac{\pi d_0 l}{1\ 000vf} +$$

$$\frac{v^z f^y}{C_T} \left( \frac{C_p}{k_1 + 1} + G t_s + G t_p \right) \quad \text{s.t. } g(v, f) \leq 0$$

式中  $M$  为单位时间的总费用率； $t = \pi d_0 l / 1\ 000vf$  为单位工序时间； $v$  为切削速度； $f$  为进给量； $C_T$  为由经验决定的常数； $C_p$  为刀具价格； $k_1$  为刀具折返前重磨次数； $G$  为刀具修磨和对刀的劳动工资和管理费等； $t_s$  为刀具重磨时间； $t_p$  为对刀时间； $z$  和  $y$  为经验数据， $z > y$ ，此处选  $z=2, y=1$ 。

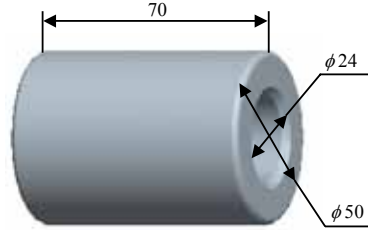


图4 加工零件

以扩孔为例，以切削用量  $v$  和  $f$  作为优化变量，约束条件即  $v$  和  $f$  的取值范围如表1所示。式中其他相关参数作常数处理，根据经验选适当的常数值，则目标函数简化为  $C = \frac{\pi d_0 l}{1\ 500vf} + 0.02v^2 f$  铰孔计算方法类似，只是参数取值不同。

表1 工序优化

	查手册 <sup>[9]</sup>		优化切削用量		优化成本
	$v/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	$f/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	$V/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	$f/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	$C/\text{元}$
扩孔	19.0~20.4	1.0~1.2	19.0	1.0	7.4
铰孔	9.0	1.3~2.6	9.0	1.3	5.6
钻孔	13~14	0.78~0.96	13	0.78	3.0
半精镗	5~25	2.0~5.0	5	2.0	2.0

(2) 用动态规划法：分别计算第二阶段从完成钻孔和半精镗孔到孔加工完毕所需成本最低的路线。图5所示箭头线上的数字表示工件在两道工序间的流动成本。

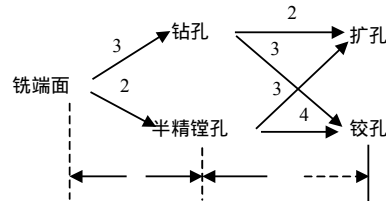


图5 可行工艺路线

(3) 类似于步骤(1)的方法：计算钻孔和半精镗孔的最低成本。

(4) 类似于步骤(2)的方法：计算出从铣端面到孔加工完毕所需成本最低的路线。计算结果如表1、2

所示。由结果可知,最优工艺路线为:铣端面-半精镗-铰孔。

表2 工艺路线优化

阶段	节点	路线	阶段效益/元	最优解	
				成本/元	路线
钻孔		钻-扩	7.4+2=9.4	8.6	钻-铰
		钻-铰	5.6+3=8.6		
半精镗		镗-扩	7.4+3=10.4	9.6	镗-铰
		镗-铰	5.6+4=9.6		
铣端面		铣-钻	3.0+3+8.6=14.6	13.6	铣-镗
		铣-镗	2.0+2+9.6=13.6		

## 4 结束语

本文提出的基于动态规划法和遗传算法,把工艺路线层优化和工序优化结合起来的综合优化模型,能较为满意地解决工艺过程优化问题。对遗传算法的改进,提高了其处理约束优化问题的能力。通过实例验证了该方法的有效性。

### 参 考 文 献

[1] VANCZA J, MARKUS A. Experiments with the integration

of reasoning, optimization and generalization in process planning[J]. *Advances in Engineering Software*, 1996, 25: 2 9-39.

- [2] DOWNLATSHAHI S, ASHOK M S. Design optimization in concurrent engineering: a team approach. *concurrent engineering*[J]. *Research and Application*, 1997, 5(5): 145-154.
- [3] 周 明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [4] 李建勇, 鄂明成. 基于混合遗传算法的柔性制造系统优化设计[J]. *计算机集成制造系统-CIMS*, 2003, 9(3): 198-20.
- [5] 李向东. 运筹学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- [6] FEN C J, KUSIAK A, Huang C. Cost evaluation in design with form features[J]. *Computer-Aided Design*, 1996, 28(11): 879-885.
- [7] 沈静株. 过程系统优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [8] BLOCH C, RANGANATHAN R. Process-based cost modeling[J]. *IEEE Transaction on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 1992, 15(3): 288-294.
- [9] 孟少龙. 机械加工工艺手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.

编 辑 孙晓丹

(上接第133页)

## 5 结束语

本文讨论量子比特和门操作的几何表示。通过将量子比特的Bloch球表示投影到扩充复平面上,建立了量子比特的复数表示;将量子门的么正操作与扩充复平面上的一类分式线性映射相等同,得出了么正操作与共形映射的对应关系。运用量子比特的几何表示和量子门操作的共形映射表示,人们可以从几何角度更为深刻地理解双态量子体系的量子力学行为。

### 参 考 文 献

- [1] ALBER G, BETH T, HORODECK M, et al. *Quantum information: an introduction to basic theoretical concepts and experiments*[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.
- [2] SHOR P W. Algorithms for quantum computation

discretelog and factoring[C]// In *Proceeding of the 35<sup>th</sup> IEEE Symposium on Foundatins of Computer Science*, Sante Fe, 1994: 20.

- [3] NIELSEN M, CHUANG I. *Quantun computation and quantum information*[M]. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000.
- [4] DIRAC P A M. *The principles of quantum mechanics*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1958.
- [5] AHLFORS L V. *Complex analysis*[M]. 3<sup>rd</sup>Edition. New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 1979.
- [6] 余扬政, 冯承天. 物理学中的几何方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [7] 李承祖, 黄明球, 陈平行, 等. 量子通信和量子计算[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.

感谢山西大学光电研究所彭堃堃院士的鼓励和四川大学物理与技术学院王顺金教授的指点。

编 辑 漆 蓉