

基于 Pareto 遗传算法的切削用量优化^{*}

刘 伟 王太勇

(天津大学天津市先进制造技术与装备重点实验室, 天津 300072)

【摘要】 针对计算机辅助工艺规划中的切削用量决策问题,提出了一种基于 Pareto 遗传算法的切削用量优化算法。首先,以切削速度和进给量为优化变量,以切削效率和刀具耐用度为优化目标,通过对约束条件的分析,建立多目标优化模型。其次,改进选择算子,设置非劣解集以保存进化过程中用竞争法构造产生的 Pareto 最优解,从而保证算法的搜索方向;建立基于小生境技术的排挤机制以提高种群的多样性。然后,采用混合交叉算子和步长变异算子进行基因重组,经过若干次迭代,得到一个均匀分布于 Pareto 前沿的优化解集。最后,通过实例验证了该算法的可行性和有效性。

关键词: 计算机辅助工艺规划 切削用量 多目标优化 Pareto 遗传算法 小生境技术

中图分类号: TP162 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)02-0220-05

Optimization of Cutting Parameters Based on Pareto Genetic Algorithm

Liu Wei Wang Taiyong

(Tianjin Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technologies and Equipments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract

Based on the Pareto genetic algorithm, an algorithm was proposed for the cutting parameters selection and optimization to solve the decision-making problems of the cutting parameters in a computer aided process planning (CAPP) system. First, a multi-objective model was built by analysis of restraint with cutting speed and feed as optimization variables and cutting efficiency and the tool life as optimization objectives. Second, the selection operator was improved. In order to ensure the search direction, a non-inferior set was set up to save Pareto optimal solutions which were generated by competition during evolutionary processes. The crowing mechanism based on niche technology was established to keep population diversity. And then, genes were recombined by means of mixed crossover operator and step-size mutation operator and an optimal set which distributed uniformly along the Pareto front was obtained after a few times iteration. Experiments results showed that this algorithm was feasible and effective.

Key words Computer aided process planning, Cutting parameters, Optimization of multi-objective, Pareto genetic algorithm, Niche technology

引言

切削用量的取值对加工质量、加工效率、生产成本等均有重要影响。生产实践中,一般凭经验或查切削手册来选取切削用量。然而,随着数控技术的发展,切削用量的选择范围和灵活性增大,仅凭经验

选择的切削用量难以满足日益高速化和精密化的现代加工要求。运用金属切削理论、数学建模与模型优化算法寻求切削用量的最优值,是当前切削用量选择的一个重要方向^[1]。传统的数学优化方法,如单纯型法、最速下降法、牛顿法等都比较复杂、低效,且容易陷入局部最优解^[2]。近年来,一些智能优化

收稿日期: 2010-02-23 修回日期: 2010-04-21
^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA042005)、国家自然科学基金资助项目(50975193)和高等学校博士点专项科研基金资助项目(20060056016)
作者简介: 刘伟,博士生,副教授,主要从事计算机辅助工艺研究,E-mail: liuwei0616@163.com

算法,如神经网络^[3~4]、模拟退火算法^[5~6]、遗传算法^[1~2,6~10]、粒子群算法^[11~12]等逐渐被用于切削用量的选择和优化,其中遗传算法模拟生物进化中自然选择的法则,以基因重组和变异为基础,具有极强的全局搜索能力。目前,大多数使用遗传算法的文献都是以工序时间和成本为优化目标,采用二进制编码,通过线性加权法将多目标优化问题转换为单目标优化问题进行求解。这种解法虽然也能得到优化的结果,却存在编码误差大、运算效率低、优化目标不够明确等问题,因为受限于设计人员对优化模型性态的理解程度、实践经验和个人偏好等先验知识,很难给各目标函数确定的、合适的权重系数,所以只能获得特定条件下的某一优化解。

本文把 Pareto 最优解的概念^[13~15]和遗传算法相结合,以切削效率和刀具耐用度为优化目标,通过对选择、交叉和变异算子的改进,构造适用于求解多目标优化问题的算法,并将其应用于切削用量的选择和优化中。

1 切削用量优化的问题描述

一般来说,切削用量的选择要遵循在保证加工质量的前提下实现最高生产率和最低加工成本的原则,同时又要受到机床和刀具的性能及参数的限制和约束,因此切削用量的选择实质上是一个带约束的多目标优化问题。

1.1 优化变量

切削深度 a_p 、进给量 f 和切削速度 v 是切削用量三要素。因为 a_p 是根据零件的切削余量确定的,并且 a_p 对刀具耐用度的影响较小,所以可将 a_p 作为常量。这样,切削用量中优化变量为 $X = (v, f)$ 。

1.2 优化目标

现有的大多数文献都把单件或单工序的生产时间和生产成本作为优化目标。其中,生产时间包括切削时间、换刀时间和辅助时间,生产成本包括切削成本、换刀成本和辅助成本。然而,辅助时间和辅助成本主要和工序的划分与排序有关,对切削用量的取值基本不产生影响;分摊在单位时间内的管理成本很难确定,对切削用量的选择也只能产生较小的间接影响;而换刀时间和换刀成本都和刀具耐用度有关。刀具耐用度不仅影响刀具寿命,而且会对工序辅助时间和辅助成本产生影响。同时,提高切削用量三要素也是以刀具合理耐用度为限制条件的。因此将切削效率和刀具耐用度作为优化目标。

(1) 切削效率

切削效率是切削时间的倒数,因此切削效率 $E(v, f)$ 可表示为

$$E(v, f) = \frac{1}{t_m} = \frac{nf}{60L} = \frac{1\,000vf}{\pi dL} \tag{1}$$

式中 t_m ——切削时间, s d ——工件直径, mm
 n ——主轴转速, r/min
 v ——切削速度, m/min
 L ——工件切削长度, mm
 f ——进给量, mm/s

(2) 刀具耐用度

根据金属切削理论^[16],刀具耐用度 $T(v, f)$ 可表示为

$$T(v, f) = \frac{C_v}{v^\alpha f^\beta a_p^\gamma} \tag{2}$$

式中 C_v ——耐用度系数,与工件材料、刀具材料和其他切削条件有关
 α, β, γ ——指数,分别表示 v, f, a_p 对刀具耐用度的影响程度

显然,切削效率和刀具耐用度不可能同时达到最优,其中一个目标的性能提高必然以另一个目标的性能降低为代价。因此,算法关键是得到一个以切削效率和刀具耐用度为优化对象的 Pareto 解集。

1.3 约束条件的分析及处理

实际加工过程中,影响切削用量选择的因素很多,包括切削力、机床功率和工件表面粗糙度等,这些约束条件限定了算法的搜索空间。约束条件可用函数 $h_i(v, f) \leq 0 (i = 1, 2, \dots)$ 来表示。常用的约束条件表示如下^[6]:

(1) 主切削力约束

$$h_1(v, f) = F_Z - F_{Zmax} = 9.81 C_{F_Z} a_p^{x_{F_Z}} f^{y_{F_Z}} (60v)^{n_{F_Z}} K_{F_Z} - F_{Zmax} \leq 0 \tag{3}$$

式中 F_Z ——主切削力, N
 F_{Zmax} ——允许的最大主切削力, N
 C_{F_Z} ——系数,取决于被加工材料和切削条件
 $x_{F_Z}, y_{F_Z}, n_{F_Z}$ —— a_p, f, v 的指数
 K_{F_Z} ——当实际加工条件与所求得的经验公式的条件不符时,各种因素对切削力的修正系数

(2) 机床功率约束

$$h_2(v, f) = \frac{F_Z v}{60\,000} - \eta P_{max} = \pi d n F_Z - \eta P_{max} \leq 0 \tag{4}$$

式中 η ——机床效率
 P_{max} ——机床最大功率, kW
(3) 工件表面粗糙度约束

$$h_3(v, f) = f^2 / (8r_\epsilon) - R_{max} \leq 0 \tag{5}$$

式中 r_ϵ ——刀尖圆弧半径, mm
 R_{max} ——工件允许的表面轮廓最大高度, mm
另外,进给量 f 和切削速度 v 的取值还应该在

机床允许的范围 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 和 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 内,这两个约束条件可通过染色体的编码来满足。

以上给出的是一些常见的约束条件,根据不同的加工条件和要求,可以对其进行适当地增减。比如粗加工时,可不考虑工件表面粗糙度约束;加工细长轴或薄壁工件的时候,要考虑工艺系统的刚性约束。目前,在遗传算法中尚没有能够处理各种约束条件的一般性方法,只能是针对具体问题及其约束条件的特征,在考虑遗传算子运行能力的基础上,选用合适的方法。常用的方法有搜索空间限定法、可行解变换法、罚函数法等^[8]。本文采用置零法处理不合格个体,即对所有新产生的个体进行检验,判断它是否满足约束条件,若满足,则按式(1)、(2)计算其适应度;否则,将其适应度置零。

2 基于遗传算法的切削用量优化

根据 Pareto 最优解概念使用遗传算法求解多目标优化问题时,需要解决以下两个关键问题:①种群收敛性,即种群应尽快地向 Pareto 前沿方向进化。②种群多样性,即非劣解应尽量在 Pareto 前沿面上均匀分布。为此,本文对遗传算法的选择算子进行了改进:①设置非劣解集 NISet (non-inferior set),用以保存进化过程中所产生的 Pareto 最优解,保证算法的搜索方向。②建立基于小生境技术的排挤机制以提高种群的多样性。

2.1 编码

根据数控加工的特点,采用浮点数编码方法。本文中染色体由两个基因组成:一个是切削速度 v , 是一个在 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 内的浮点数;另一个是进给量 f , 是一个在 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 内的浮点数。

2.2 小生境技术

为使得到的解均匀地分布于 Pareto 前沿,就必须保持种群的多样性,防止因相似个体的近亲繁殖而导致算法早熟,使得最终解集中于某一较小的区域上。本文引入小生境技术,使处于同一小生境的相似个体互相排挤,从而达到抑制相似个体大量繁衍的目的。

设小生境半径为 σ ,用共享函数 $S(x_i, x_j)$ 表示种群中个体 x_i 和 x_j 的近似程度, $D(x_i, x_j)$ 表示个体 x_i 和 x_j 的欧式距离^[17], 则

$$S(x_i, x_j) = \begin{cases} 1 - D(x_i, x_j) / \sigma & (D(x_i, x_j) \leq \sigma) \\ 0 & (D(x_i, x_j) > \sigma) \end{cases} \quad (6)$$

$$D(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^{obj} (f_k(x_i) - f_k(x_j))^2} \quad (7)$$

式中 obj ——优化目标的个数

用小生境个数 $N(x_i)$ 表示个体 x_i 的拥挤程度

$$N(x_i) = \sum_{j=1}^n S(x_i, x_j) \quad (8)$$

由式(8)可知, $N(x_i)$ 值越大,个体 x_i 的拥挤程度越大,即和个体 x_i 相近似的个体越多。

2.3 非劣解集的构造

本算法使用两个种群,一个是进化种群 P ,其大小为 N ;一个是非劣解集 I ,其大小为 $I_{size} \leq M$ 。

在文献[18]所介绍的排除法的基础上,采用竞争法构造非劣解集,即将每代经过交叉和变异运算后的种群同当前非劣解集 I 中的个体进行竞争,优者保留,劣者淘汰。具体算法描述如下:

- (1) for each ($x \in P$).

(2) 置 $sign = true$.

(3) 如果 $I = \varnothing$, 则 $I = I \cup \{x\}$, 返回(1).

(4) for each ($q \in I$).

(5) 如果 x 支配 q , 则 $I = I - \{q\}$, 返回(4).

(6) 如果 q 支配 x , 则置 $sign = false$, 返回(4).

(7) 如果 $D(x, q) < \sigma$, 则置 $sign = false$, 返回(4).

(8) end for q .

(9) 如果 $sign = true$, 则 $I = I \cup \{x\}$, 返回(1).

(10) end for x .

(11) 如果 $I_{size} > M$, 则按小生境个数 $N(x_i)$ 对 I_{size} 中的个体进行升序排序, 保留前 M 个个体.

2.4 选择算子

为使种群向均匀分布于 Pareto 前沿的方向进化,避免因当前群体的最优个体被交叉、变异算子破坏而导致遗传算法不能收敛到全局最优解的情况,本文采取精英保留的策略,即当前非劣解集 I 中的个体不参与交叉和变异的运算而直接保留到下一代,直到被更好的解所替代;同时,为保持种群多样性,避免出现早熟现象,每次迭代后都随机产生 $N - I_{size}$ 个新个体补充到下一代种群中^[18]。

2.5 交叉算子

由于采用浮点数编码,因此结合被优化问题的性质,采用混合交叉方法进行交叉运算,子个体为^[19]

$$S_{c1} = \alpha F_{c1} + (1 - \alpha) F_{c2} \quad (9)$$

$$S_{c2} = \alpha F_{c2} + (1 - \alpha) F_{c1} \quad (10)$$

式中 S_{c1} 、 S_{c2} ——子个体 1 和子个体 2
 F_{c1} 、 F_{c2} ——父个体 1 和父个体 2
 α ——比例因子,是一个在 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数

产生交叉的染色体个数由交叉概率 P_c 控制,因为交叉是遗传算法中保持群体多样性的主要方法,

所以 P_c 的值一般较大,通常 P_c 取 0.5 ~ 0.8。

2.6 变异算子

对浮点数编码来说,个体的变异一般采取步长变异法,即在原有的基因值上加上或者减去一个值,即

$$G' = G + \Delta \tag{11}$$

式中 G ——原基因值 Δ ——变异步长
 G' ——变异后的基因值

为达到较好的搜索效果,在算法运行的初始阶段, Δ 一般取较大的值,以增加群体的多样性;随着搜索过程的进行, Δ 逐渐缩小,使个体更加接近最优解。因此采用非均匀变异算子,对个体中的每个基因都以相同的概率进行变异操作,相当于把整个解向量在解空间中作一个轻微的随机扰动^[20]。设 G 的取值范围是 $[G_{\min}, G_{\max}]$, 则

$$\Delta = \begin{cases} (G_{\max} - G) \gamma (1 - t/T)^b & (a = 0) \\ (G - G_{\min}) \gamma (1 - t/T)^b & (a = 1) \end{cases} \tag{12}$$

式中 γ —— $[0, 1]$ 上符合均匀概率分布的一个随机数
 T ——最大进化代数 t ——当前进化代数
 a ——随机数, a 取 0 或 1
 b ——系统参数,决定随机扰动对进化代数 t 的依赖程度

产生变异的染色体个数由变异概率 P_m 控制,因为变异在遗传算法中的作用远不如交叉,所以 P_m 的值一般较小,通常取 0.01 ~ 0.1。

综上所述,算法的关键在于非劣解集的构造,引入小生境技术的目的是使得到的 Pareto 解均匀分布,选择算子是为了保证了算法的进化方向,交叉和变异算子可产生新个体、避免算法早熟。

3 实例

设被加工工件的材料为 45 号钢,毛坯为锻件,正火处理,毛坯直径 $d = 60\text{ mm}$, 最终直径 $d_f = 48\text{ mm}$, 加工长度 300 mm , 系数 $C_{F_z} = 270$, 指数 $x_{F_z} = 1.0$ 、 $y_{F_z} = 0.75$ 、 $n_{F_z} = -0.15$ 。加工方式为外圆车削,最终表面粗糙度要求达到 $R_a = 0.8\text{ mm}$ 。设粗加工阶段走刀次数 $m = 1$, 精加工余量为 1 mm , 因此切削深度 $a_p = 5\text{ mm}$ 。

使用 CKA6136 数控车床,其转速范围为 $200 \sim 3\,000\text{ r/min}$, 最大进给速度为 $4\,000\text{ mm/min}$, 电动机功率 6 kW , 机床效率 $\eta = 0.85$, 主切削力的许用值 $F_{Z\max} = 3\,000\text{ N}$ 。

选用刀具材料为 YT15, 由切削用量手册^[21] 查得,耐用度系数 $C_v = (235)^5$, 指数 $\alpha = 5$ 、 $\beta = 2.25$ 、

$\gamma = 0.75$, 刀尖圆弧半径 $r_g = 0.8\text{ mm}$ 。

设置群体大小 $N = 100$, 最大迭代次数 $C_{\max} = 100$, 非劣解集的大小 $I_{\text{size}} \leq 40$, 为增加种群的多样性,扩大算法的搜索范围,设交叉概率 $P_c = 0.5$, 变异概率 $P_m = 0.1$ 。使用 C# 语言编写程序,算法运行结果如图 1 所示,可以看出:①算法运行所得到的优化解集基本沿 Pareto 前沿面均匀分布,证明了算法的可行性和有效性。②得到一个 Pareto 最优解集的意义在于扩大了工艺人员的选择空间,使其可以根据具体加工条件和要求选择合适的切削用量。③Pareto 最优解集中解的个数可根据实际需要通过 M 值调整。

图 1 显示出各点刀具耐用度和切削效率的取值,它们所对应的切削速度和进给量如表 1 所示。

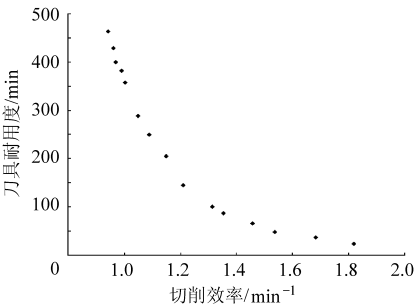


图 1 Pareto 前沿面
Fig. 1 Pareto front

表 1 算法运行结果

Tab. 1 Running results of algorithm			
切削速度 /m·min ⁻¹	进给量 /mm·s ⁻¹	切削效率 /min ⁻¹	刀具耐用 度/min
74.28	0.72	1.14	205.31
65.49	0.71	0.99	382.12
84.59	0.73	1.31	100.17
90.37	0.76	1.46	65.96
70.84	1.09	1.09	249.46
97.32	0.74	1.54	47.69
96.67	0.82	1.68	36.29
69.16	0.71	1.05	288.70
64.42	0.70	0.96	428.89
65.58	0.69	0.97	400.14
86.70	0.74	1.35	87.14
66.44	0.71	1.00	357.88
79.15	0.72	1.21	144.88
109.18	0.78	1.82	23.87
63.57	0.70	0.94	463.55

4 结束语

将 Pareto 最优解的概念和遗传算法结合,实现了先寻优后决策的求解模式,算法的关键在于通过竞争的方法构造非劣解集和利用小生境技术建立排

挤机制。通过实例验证,得到了较为理想的结果。本文是以车削加工为例阐述算法,对其他加工方式,只是目标函数和约束条件的表达式不同,核心算法并不会改变。然而,金属切削理论和遗传算法目前

还不是十分成熟,有些参数的选择和计算还只是基于实验或经验,缺乏坚实的数学基础,因此,如何提高算法运行的效率和结果的准确性,还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 武美萍,翟建军,廖文和. 数控加工切削参数优化研究[J]. 中国机械工程,2004,15(3):235~237.
Wu Meiping, Zhai Jianjun, Liao Wenhe. Research on NC machining parameter optimization [J]. China Mechanical Engineering, 2004,15(3):235~237. (in Chinese)
- 2 舒洲,黄宗南. 基于变形遗传算法的切削用量优化[J]. 机电工程,2005,22(1):40~44.
Shu Zhou, Huang Zongnan. Cutting parameters optimization based on variants of canonical genetic algorithms [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2005,22(1):40~44. (in Chinese)
- 3 陈杰,罗红波,赵武. 基于人工神经网络方法的切削用量智能选择系统[J]. 工具技术,2003,37(10):17~19.
Chen Jie, Luo Hongbo, Zhao Wu. Intelligence selection system for cutting parameter based on neural networks [J]. Tool Engineering, 2003,37(10):17~19. (in Chinese)
- 4 赵韩,冯宝林,董晓慧,等. 基于改进的BP神经网络对切削参数的优化选择[J]. 机床与液压,2008,36(5):213~215.
Zhao Han, Feng Baolin, Dong Xiaohui, et al. Optimization choice of cutting parameter based on improved BP neural network [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008,36(5):213~215. (in Chinese)
- 5 张双德. 基于改进型模拟退火算法的数控加工切削参数优化[J]. 煤矿机械,2004(6):76~78.
Zhang Shuangde. Application of improved simulated annealing algorithm in NC machining parameter optimization [J]. Coal Mine Machinery, 2004(6):76~78. (in Chinese)
- 6 Asokan P, Saravanan R, Vijayakuman K. Machining parameters optimization for turning cylindrical stock into a continuous finished profile using genetic algorithm (GA) and simulated annealing (SA) [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003,21(1):1~9.
- 7 李建广,姚英学,刘长清,等. 基于遗传算法的车削用量优化研究[J]. 计算机集成制造系统,2006,12(10):1651~1656.
Li Jianguang, Yao Yingxue, Liu Changqing, et al. Cutting parameters optimization in turning based on genetic algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2006,12(10):1651~1656. (in Chinese)
- 8 黄宗南,何岚岚,舒洲. 切削用量遗传优化中的约束条件处理[J]. 机械设计与研究,2008,24(4):93~97.
Huang Zongnan, He Lanlan, Shu Zhou. Constraints handling in cutting optimization by genetic algorithms [J]. Machine Design and Research, 2008,24(4):93~97. (in Chinese)
- 9 许锋,郑敏利,姜彬,等. 基于遗传算法的高速铣削参数优化系统[J]. 哈尔滨理工大学学报,2007,12(5):39~42.
Xu Feng, Zheng Minli, Jiang Bin, et al. High speed milling parameters optimal system based on genetic algorithm [J]. Journal of Harbin University of Science & Technology, 2007,12(5):39~42. (in Chinese)
- 10 申丽国,韩至骏,张昆. 应用生物遗传算法规划切削参数[J]. 中国机械工程,1994,5(6):34~35.
Shen Liguang, Han Zhijun, Zhang Kun. Using genetic algorithm to plan cutting parameters [J]. China Mechanical Engineering, 1994,5(6):34~35. (in Chinese)
- 11 刘海江,黄炜. 基于粒子群算法的数控加工切削参数优化[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008,36(6):803~806.
Liu Haijiang, Huang Wei. Computer numerical control machining parameter optimization based on particle swarm optimization [J]. Journal of Tongji University: Natural & Science, 2008,36(6):803~806. (in Chinese)
- 12 秦建华,李智. 改进型粒子群算法在数控加工切削参数优化中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术,2005(5):9~11.
Qin Jianhua, Li Zhi. Application of improved particle swarm algorithm in NC machining parameter optimization [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2005(5):9~11. (in Chinese)
- 13 祁荣宾,钱锋,杜文莉,等. 基于精英选择和个体迁移的多目标遗传算法[J]. 控制与决策,2007,22(2):164~168.
Qi Rongbin, Qian Feng, Du Wenli, et al. Multi-objective genetic algorithm based on elitist selection and individual migration [J]. Control and Decision, 2007,22(2):164~168. (in Chinese)
- 14 谢涛,陈火旺,康立山. 多目标优化的演化算法[J]. 计算机学报,2003,26(8):997~1003.
Xie Tao, Chen Huowang, Kang Lishan. Evolutionary algorithms of multi-objective optimization problems [J]. Chinese Journal of Computer, 2003,26(8):997~1003. (in Chinese)

6 Pratap Kumar Nagaraja, Donggang Yao. Rapid pattern transfer of biomimetic surface structures onto thermoplastic polymers [J]. Materials Science and Engineering: C, 2007, 27(4): 794 ~ 797.

7 张赫男,李翔,陈博,等. 仿鲨鱼体表结构的生物非光滑减阻表面制造[C] // 2005 中国机械工程学会年会论文集, 2005;33.

8 Raschi W G, Musick J A. Hydrodynamic aspects of shark scales[C] // Special report in Applied Marine Science and Ocean Engineering, 1984, 272: 1 ~ 10.

9 Springer V G, Gold J P. Sharks in question: the Smithsonian answer book[M]. Washington and London: Smithsonian Institution Press, 1989.

10 杜立群,刘海军,秦江. 微电铸器件铸层均匀性的研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 69 ~ 75.
Du Liqun, Liu Haijun, Qin Jiang. Study on uniformity of micro-electroformed device[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(1): 69 ~ 75. (in Chinese)

11 董祥忠. 特种成型与制模技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

12 Bechert D W, Bartenwerfer M, Hoppe G, et al. Drag reduction mechanisms derived from shark skin[C] // Proceedings of 15th ICAS Congress, New York: AIAA Inc, 1986;1 044 ~ 1 068.

(上接第 224 页)

15 Fonseca C M, Fleming P J. Multi-objective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms—part I : a unified formulation [J] . IEEE Transactions on System, Man & Cybernetics —Part A : Systems and Humans, 1998, 28(1):26 ~ 37.

16 杨广勇,王育民. 金属切削原理与刀具[M]. 北京:北京理工大学出版社,1994.

17 Horn J,Nafpliotis N. Multi-objective optimization using the Niched Pareto genetic algorithm, IlliGAL Report 93005 [R]. Champaign: University of Illinois at Urbana – Champaign,1993.

18 李丽荣,郑金华. 基于 Pareto Front 的多目标遗传算法[J]. 湘潭大学自然科学学报,2004,26(1): 39 ~ 41.
Li Lirong,Zheng Jinhua. Multi objective genetic algorithm based on Pareto Front[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University,2004,26(1): 39 ~ 41. (in Chinese)

19 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.

20 王文卓,张巧,吴春国,等. 遗传算子对免疫算法性能影响的分析[J]. 小型微型计算机系统,2007,28(8):1 448 ~ 1 451.
Wang Wenzhuo,Zhang Qiao,Wu Chunguo,et al. Analysis for the effect of genetic operators on the performance of immune algorithm[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2007,28(8):1 448 ~ 1 451. (in Chinese)

21 艾兴,肖诗纲. 切削用量简明手册[M]. 北京:机械工业出版社,1994.