

基于主轴系统动态行为的高速铣削工艺参数优化

张正旺, 李爱平, 鲍进, 刘雪梅

(同济大学 现代制造技术研究所, 上海 201804)

摘要: 提出了一种基于主轴系统动态行为的高速铣削工艺参数优化方法。基于主轴系统动态行为, 以无颤振状态下随转速变化的极限切削深度最大及生产率最大为综合优化目标函数, 构建集成主轴系统动态行为与工艺参数交互影响特性的优化模型, 运用人工蜂群算法对铣削工艺参数进行优化计算, 得到无颤振状态下生产率最大的最优铣削工艺参数组合方案。实例及试验结果表明, 采用基于主轴系统动态行为的高速铣削工艺参数优化方法可以获得最优铣削工艺参数, 该参数在实际切削时不会发生颤振。

关键词: 主轴系统动态行为; 颤振; 人工蜂群算法; 最大生产率; 工艺参数优化

中图分类号: TG5

文献标志码: A

Parameters Optimization of High Speed Milling Based on the Dynamic Behaviour of Spindle System

ZHANG Zhengwang, LI Aiping, BAO Jin, LIU Xuemei

(Institute of Advanced Manufacturing Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A high speed milling process parameters optimization method with considering the dynamic behavior of the spindle system is presented. Based on the dynamic behavior of spindle system, an optimization model which integrates the interaction characteristics of spindle system dynamic behavior and the parameters is constructed. Maximizing the limited depth of cut which can avoid the occurrence of chatter vibration and maximizing the production rate are considered as objectives. By using Artificial Bee Colony algorithm, the optimal milling parameters are obtained. Example and experimental results show that, to get the optimal results, spindle system dynamic behavior must be considered as variable in the optimization process.

Key words: dynamic behavior of spindle system; chatter vibration; Artificial Bee Colony algorithm; maximization of production rate; parameters optimization

工艺参数的选择是工艺规划的关键一步, 如何选择合理的工艺参数, 使得在保证满足零件加工质量的前提下尽可能地提高生产率, 已经成为当今世界切削行业不断探索和研究的课题。国内外学者在加工工艺参数优化的优化模型构建、优化算法及切削稳定性等方面进行了大量研究。早在 20 世纪 50 年代, 美国密歇根大学 Gilbert^[1] 发表了一篇有关切削加工经济性的文章, 首次提出了最大生产率和最低生产成本的工艺参数优化准则。日本京都大学 Okushima 和 Hitomi^[2] 于 1964 年提出了以最大利润为目标函数的工艺参数优化准则, 澳大利亚墨尔本大学 Armarego 和 Russell^[3] 后来将该准则重新命名为最大利润率, 即以单位时间内获得的利润最大为优化目标。北京航空航天大学陈志同等^[4] 针对目前采用加权方法构造工艺参数优化模型时权重的不确定性问题和同一工件不同工序和走刀的工艺参数耦合问题, 基于统计学原理提出了一种面向单元切削过程的工艺参数优化模型, 以实现多工艺参数组优化问题的解耦。印度国立理工学院 Venkata 等^[5] 以最大生产率为优化目标, 采用多种进化算法对多道铣削的工艺参数进行了优化。土耳其比特利斯伊仁大学 Aykut 等^[6] 以最小切削力和最大材料去除率为综合目标函数, 优化了端面铣削钴基合金时的工艺参数。集美大学谢书童等^[7] 为了得到合理的数控加工工艺参数, 以最低生产成本为优化目标, 提出了一种基于边缘分布估计算法和车削次数枚举方法相结合的新型优化算法。集美大学 Xie 等^[8] 采用蚁群优

收稿日期: 2014-02-27

基金项目: 上海市“十二五”基础性研究重点项目(12JC1408700, 11JC1413200); 国家高档数控机床与基础制造装备科技重大专项(2011ZX04015-022)

第一作者: 张正旺(1974—), 男, 博士生, 主要研究方向为机械结构动力学。E-mail: newang@126.com

通讯作者: 李爱平(1951—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为数字化设计与制造、制造系统与自动化。

E-mail: limuzi@tongji.edu.cn

化算法对多道车削加工中的工艺参数进行了优化. 土耳其布尔萨工业大学 Yildiz^[9] 为了实现多道车削加工过程中的工艺参数优化, 以生产成本最低为目标函数, 提出了一种田口-差分进化混合优化算法. 伊朗科技大学 Zarei 等^[10] 采用和声搜索算法优化了多道端铣加工时的铣削次数、每次铣削深度、转速及进给量等参数. 印度安娜大学 Savadamuthu 等^[11] 采用遗传算法对车削过程的工艺参数进行了优化. 美国佛罗里达大学 Kurdi^[12] 将切削稳定性图作为约束条件, 采用粒子群优化算法及序列二次规划法对铣削工艺参数进行了优化.

高速切削机床主轴系统的动态行为尤其是颤振会严重制约切削加工的效率, 影响零件的加工精度、刀具和机床主轴的使用寿命. 切削稳定性图提供了无颤振切削的切削速度及相应的极限切削深度, 但在目前的工艺参数优化研究中, 部分研究根本未考虑切削稳定性这个因素, 较常见的做法是将切削稳定性图作为一个在切削过程中不会发生变化的约束条件引入优化模型. 在高速切削过程中, 由于主轴系统动态行为与工艺参数的动态交互影响, 切削稳定性图通常会随工艺参数的改变而发生变化, 将切削稳定性图简化为定值的约束条件进行优化, 难以获得最优的工艺参数. 为获得无颤振状态下最优工艺参数, 本文提出一种基于主轴系统动态行为的高速铣削工艺参数优化方法, 考虑主轴系统动态行为与工艺参数的动态交互影响特性, 建立集成主轴系统动态行为与工艺参数的优化模型, 以无颤振状态下最大极限切削深度与最大生产率为综合优化目标函数, 结合多种约束条件, 进行铣削工艺参数优化.

1 主轴系统动态行为与工艺参数动态交互特性

在金属切削过程中, 当切削深度超过某一数值时, 主轴系统会发生颤振. 颤振使加工表面产生波纹, 使切削力发生剧烈变化, 因而危害机床和刀具的寿命. 颤振属于自激振动类型, 它是一个闭环系统, 包括切削过程和主轴系统的振动系统 2 个基本部分以及这 2 个部分的相互方位关系, 其原理如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 刀具和工件间的振动 Y 影响切削过程, 从而产生切削力的变动量 P , P 作用到主轴系统的振动系统, 又产生振动 Y . 2 个基本部分 I 和 II 之间的联结中还存在相互方位 III, 通过改变 2 个基本部分的相互方向, 可以改变它们的相互影响, 从

而改变稳定加工的极限条件. 因此, 可以认为有 3 组参数影响颤振的发生: 切削过程工艺参数、振动系统参数及切削过程与振动系统的相互方位^[13].

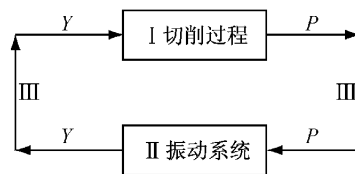


图 1 颤振原理

Fig. 1 Schematic diagram of chatter

2 集成主轴系统动态行为与工艺参数的高速铣削优化模型

2.1 随转速变化的极限切削深度

通常采用极限切削深度 a_{lim} 绘制切削稳定性图, 预测机床切削时的非颤振区域. 铣削时 a_{lim} 的求解式为^[14]

$$\left. \begin{aligned} a_{lim} &= \frac{-1}{2K_f \operatorname{Re}\{\mathbf{H}(j\omega)\}} \\ N &= \frac{60}{ZT} \\ T &= \frac{2k\pi + \epsilon}{2\pi f_c} \\ \epsilon &= 3\pi + 2\Psi \\ \Psi &= \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}\{\mathbf{H}(j\omega)\}}{\operatorname{Re}\{\mathbf{H}(j\omega)\}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: K_f 为切削力系数, 大小取决于被加工材料的性质; $\operatorname{Re}\{\mathbf{H}(j\omega)\}$, $\operatorname{Im}\{\mathbf{H}(j\omega)\}$ 分别为刀尖点频响函数的实部和虚部, ω 为圆频率; N 为主轴转速; Z 为刀具齿数; T 为刀具切削周期; k 为工件表面产生振动波纹的整数个数; ϵ 为当前刀齿与前一刀齿振痕之间相位差; f_c 为颤振频率; Ψ 为频响函数的相位差.

由式(1)可知, 极限切削深度的大小与工艺系统频响函数的实部及切削力系数成反比, 获得刀尖点频响函数 $\mathbf{H}(j\omega)$ 是实现无颤振切削的关键. 目前, 多数研究是通过测试或者分析静止状态下的工艺系统获得刀尖点频响函数, 忽略了切削过程工艺参数对主轴系统动态行为的影响. 高速切削机床通常采用电主轴, 电主轴一般采用角接触球轴承作为支承轴承. 高速切削时, 由于离心力的作用, 会导致角接触球轴承的外圈接触角变小、内圈接触角变大, 使得角接触球轴承的径向接触刚度变低. 因此, 低速切削状态下刀尖点频响函数与静止状态基本相同, 而高速切削状态下的刀尖点频响函数与静止状态则会有一

定的差异. 高速切削时极限切削深度会随着主轴转速的变化而发生改变, 如果用静止状态下的切削稳定性图来预估高速切削的稳定性会产生较大的误差. 德国达姆施塔特工业大学 Abele 等^[15]对随转速变化的刀尖点频响函数进行了研究, 并得出随转速变化的刀尖点频响函数可表示为

$$H(j\omega) = C[(j\omega)I - A]^{-1}B + D \quad (2)$$

式中: A, B, C, D 为待定矩阵, 可通过子空间辨识法求出; I 为单位矩阵. 由式(1)及式(2)可得到随转速变化的极限切削深度 a_{lim} .

2.2 最大生产率

最大生产率是指在单位时间内生产尽可能多的零件, 或生产单个零件花费尽可能少的时间. 单个零件的生产时间包括以下几个部分: ①加工准备时间 $T_p = T_s/N_b$, 式中: T_s 为加工一批零件总的准备时间; N_b 为该批量中的零件个数. ②工件装卸操作时间 T_L . ③调整时间 T_a . ④加工时间 T_m . 对端面铣削加工而言, $T_m = L/f$, 式中: L 为铣削长度; f 为进给量, 且 $f = f_z ZN$, f_z 为每齿进给量; $N = 1\ 000 V/\pi d$, V 为切削速度, d 为铣刀直径. ⑤单件换刀时间 $T_c = T_d T_m / T_n$, 式中: T_d 为更换一次刀具所需时间; T_n 为刀具寿命.

$$T_n = \frac{C_v^{\frac{1}{m}} d_m^{\frac{b_v}{m}} (B_m B_h B_p B_t)^{\frac{1}{m}}}{V_m^{\frac{1}{m}} a_m^{\frac{e_v}{m}} f_z^{\frac{u_v}{m}} a_r^{\frac{n_v}{m}} Z^{\frac{r_v}{m}} \lambda_s^{\frac{q_v}{m}}} \quad (3)$$

式中: C_v 为工艺常数; a 为切削深度; B_m, B_h, B_p, B_t 为修正系数; $b_v, m, e_v, u_v, r_v, n_v, q_v$ 为指数; λ_s 为刃倾角; a_r 为切削宽带. 因此, 单件产品的总生产时间 T_{pt} 可表示为

$$T_{pt} = T_p + T_L + T_a + T_m + T_c \quad (4)$$

设铣削整个切削深度需要经 N_p 层加工, $N_p = \text{INT}(a_t/a) + 1$, 式中: a_t 为总的切削深度; INT 为取整函数, 即取值不大于 a_t/a 的整数. 则单件产品的总生产时间可表示为

$$T_{pt} = T_p + T_L + \sum_{i=1}^{N_p} (T_{ai} + T_{mi} + T_d \frac{T_{mi}}{T}) \quad (5)$$

式中: i 为第 i 层切削; T_{ai}, T_{mi} 分别为第 i 层切削的调整时间和加工时间. 即

$$T_{pt} = \frac{T_s}{N_b} + T_L + N_p T_a +$$

$$\sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{\pi d L}{1\ 000 f_{zi} Z V_i} + \frac{T_d \pi L V_i^{(1-m)} a_i^{\frac{e_v}{m}} f_{zi}^{\frac{u_v}{m}-1} a_r^{\frac{n_v}{m}} Z^{\frac{r_v}{m}-1} \lambda_s^{\frac{q_v}{m}}}{1\ 000 C_v^{\frac{1}{m}} d^{\frac{b_v}{m}-1} (B_m B_h B_p B_t)^{\frac{1}{m}}} \right) \quad (6)$$

式中: f_{zi} 为每一层的每齿进给量; V_i 为每一层的切

削速度; a_i 为每一层的切削深度.

2.3 目标函数

为了构建集成主轴系统动态行为与工艺参数交互影响特性的优化模型, 以无颤振状态下随转速变化的极限切削深度最大与生产率最高为工艺参数优化的综合目标函数, 即

$$F(X) = \omega_1 a_{lim} + \omega_2 \frac{1}{T_{pt}} \quad (7)$$

式中: X 为设计变量; ω_1, ω_2 为权重系数.

2.4 设计变量

待优化的设计变量分别为切削速度、每齿进给量及切削深度. 可表示为

$$X = (V_i, f_{zi}, a_i)^T \quad (8)$$

2.5 约束条件

(1) 切削速度应该满足机床主轴转速约束.

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (9)$$

式中: V_{min}, V_i, V_{max} 分别表示机床允许的最小切削速度、当前切削速度和机床允许的最大切削速度, 且

$$\left. \begin{aligned} V_{max} &= \frac{\pi d N_{max}}{1\ 000} \\ V_{min} &= \frac{\pi d N_{min}}{1\ 000} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: N_{max}, N_{min} 分别表示机床允许的最大主轴转速和最小主轴转速. 即

$$\left. \begin{aligned} C_1(X) &= V_i - \frac{\pi d N_{max}}{1\ 000} \leq 0 \\ C_2(X) &= \frac{\pi d N_{min}}{1\ 000} - V_i \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(2) 每齿进给量必须在机床允许的范围之内.

$$f_{zmax} \leq f_{zi} \leq f_{zmin} \quad (12)$$

式中: f_{zmax}, f_{zmin} 分别表示机床允许的最大进给量和最小进给量, 且

$$\left. \begin{aligned} f_{zmin} &= \frac{f_{min}}{Z N_{max}} \\ f_{zmax} &= \frac{f_{max}}{Z N_{min}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

即

$$\left. \begin{aligned} C_3(X) &= f_{zi} - \frac{f_{max}}{Z N_{min}} \leq 0 \\ C_4(X) &= \frac{f_{min}}{Z N_{max}} - f_{zi} \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

(3) 切削深度必须位于工件要求范围之内且小于最大极限切削深度.

$$\left. \begin{aligned} 0 &< a_i \leq a_t \\ a_i &\leq a_{lim} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: a_t 为工件要求的切削深度. 即

$$\left. \begin{aligned} C_5(\mathbf{X}) &= a_i - a_t \leq 0 \\ C_6(\mathbf{X}) &= 0 < a_i \\ C_7(\mathbf{X}) &= a_i - a_{im} \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

(4) 铣削力 F_{ci} 小于安全铣削力 F_s .

$$F_{ci} \leq F_s \quad (17)$$

$$F_{ci} = C_{zp} a_r Z V_i^{b_z} a_i^{e_z} f_{zi}^{u_z} \quad (18)$$

式中: C_{zp} 为常数; b_z, e_z, u_z 为指数.

$$F_s = 0.1 k_b d_a^3 \cdot [0.08 L_a + 0.65 \sqrt{(0.25 L_a)^2 + (0.5 k_b / 1.3 k_t d)^2}]^{-1} \quad (19)$$

式中: K_b 为主轴许用弯曲强度; d_a 为主轴直径; L_a 为主轴位于两支撑之间的长度; K_t 为主轴许用弯曲强度; k_t 为主轴许用扭曲强度. 即

$$C_8(\mathbf{X}) = C_{zp} a_r Z V_i^{b_z} a_i^{e_z} f_{zi}^{u_z} - 0.1 k_b d_a^3 \cdot [0.08 L_a + 0.65 \sqrt{(0.25 L_a)^2 + (0.5 k_b / 1.3 k_t d)^2}]^{-1} \leq 0 \quad (20)$$

(5) 铣削功率不能超过机床的最大功率 P_m .

$$C_9(\mathbf{X}) = \frac{F_{ci} V_i}{6 \cdot 120} - P_m \eta \leq 0 \quad (21)$$

式中: η 为功率系数.

综上, 集成主轴系统动态行为与工艺参数交互影响特性的高速铣削工艺参数优化模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} \max F(\mathbf{X}) \\ \text{s. t. } C_i(\mathbf{X}) \leq 0 \quad (i = 1, \dots, 9) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

3 优化算法

土耳其学者 Karaboga^[16-17] 提出了用于解决多变量函数优化问题的人工蜂群算法 (Artificial Bee Colony algorithm, ABC). 人工蜂群算法是一种建立在蜜蜂自组织模型和群体智能基础上模拟自然界蜂群采蜜过程的新兴启发式算法. 人工蜂群算法将每只蜜蜂视为一个智能体, 各自从事不同的活动, 最后通过多个智能体之间的相互合作高效地实现目标的搜索与优化. 它的主要特点是不需要了解问题的特殊信息, 只需要对问题进行优劣的比较, 通过每只蜜蜂的局部寻优行为最终获得群体的全局最优值. 在人工蜂群算法中, 蜂群由寻蜜蜂、决策蜂和侦察蜂组成, 每个蜜源代表优化问题的一个可行解, 每个循环搜索过程主要包括以下 3 个部分: ① 寻蜜蜂采集蜜源的信息并计算蜂蜜储量; ② 决策蜂评估来自寻蜜蜂分享的蜜源信息, 以蜂蜜储量的概率值选取蜜源; ③ 如果某一个当前最佳蜜源经过 N_{im} (循环极限次数) 次循环后仍不能得到改善, 则该蜜源对应的寻蜜蜂转化为侦察蜂, 随机寻找新的蜜源. 由于侦察蜂的

存在, 人工蜂群算法能够有效避免优化结果陷入局部最优, 具备极强的全局搜索能力. 国外学者研究表明^[18], 同粒子群算法和遗传算法相比, 采用人工蜂群算法进行工艺参数优化的收敛速度较快. 因此, 本文选用人工蜂群算法, 利用 MATLAB 软件进行铣削工艺参数优化.

结合人工蜂群算法和集成主轴系统动态行为与工艺参数的优化模型, 构建高速铣削工艺参数优化的基本流程如图 2 所示. 第 1 部分建立集成主轴系统动态行为与工艺参数的优化模型; 第 2 部分采用人工蜂群算法进行全局寻优.

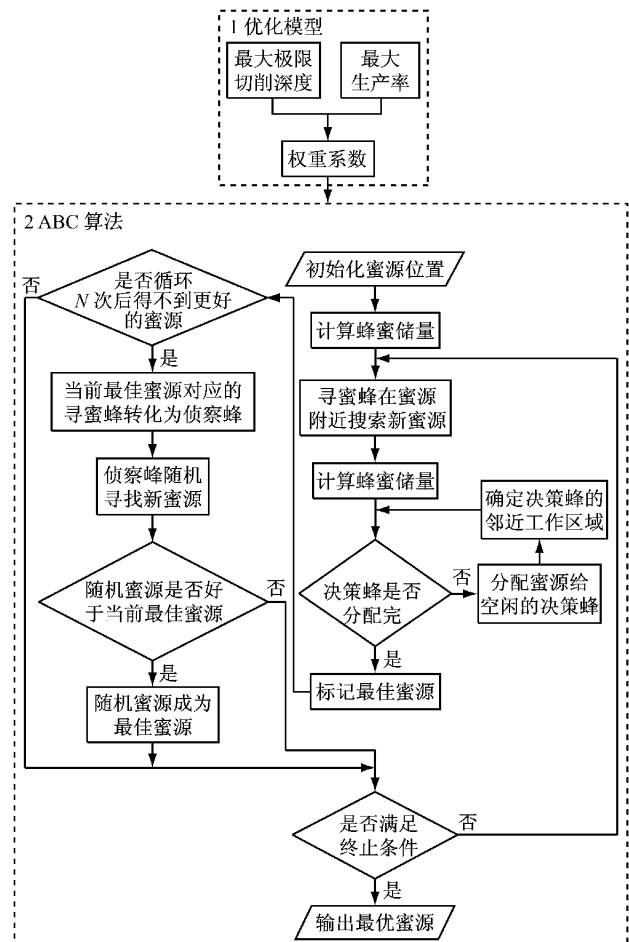


图 2 高速铣削工艺参数优化流程

Fig.2 Flowchart of high speed milling process parameters optimization

4 实例与试验验证

加工所用机床为沈阳机床股份有限公司研制的高速五轴加工中心 VMC0656mu, 该机床采用德国凯斯乐电主轴, 主轴转速最高可达 $24\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 主轴最大扭矩可达 $100\ \text{N} \cdot \text{m}$, 加工类型为顺铣, 工件材料为航空铝合金 7075-T6, 刀具参数如表 1.

表1 刀具参数

Tab.1 Cutter parameters

| 直径/ mm | 齿数 | 刃倾 角/(°) | 刀齿长 度/mm | 刀具悬 长/mm | 刀具 材料 |
|-----------|----|-------------|-------------|-------------|----------|
| 16 | 2 | 30 | 40 | 60 | 硬质合金 |

其他参数如下: $p_m = 16 \text{ kW}$, $\eta = 0.7$, $L_a = 350 \text{ mm}$, $d_a = 70 \text{ mm}$, $k_b = 140 \text{ MPa}$, $k_t = 120 \text{ MPa}$, $K_f = 726 \text{ MPa}$, $L = 103 \text{ mm}$, $a_r = 16 \text{ mm}$, $T_L = 1.5 \text{ min}$, $T_s = 10 \text{ min}$, $T_d = 0.5 \text{ min}$, $T_a = 0.1 \text{ min}$, $N_b = 100$, $B_m = 1$, $B_h = 1$, $B_p = 0.8$, $B_t = 0.8$, $m = 0.43$, $e_v = 0.3$, $u_v = 0.5$, $r_v = 0.1$, $n_v = 0.1$, $q_v = 0$, $C_v = 108.4$, $b_v = 0.95$, $C_{zp} = 68.2$, $b_z = -0.86$, $e_z = 0.86$, $u_z = 0.72$.

每齿进给量 f_z 依据刀具和工件材料特性设取值范围为每齿 $0.05 \sim 0.30 \text{ mm}$, 权重系数均取 0.5 .

4.1 工艺参数优化

为简化分析及充分展示主轴系统动态行为对工艺参数的影响,取 a_i/a_1 的值位于 $1.00 \sim 1.05$ 之间,即整个铣削过程包括一次粗铣加工和一次精铣加工,仅对粗加工阶段的工艺参数进行优化,并在额定转速范围内将主轴转速 N 划分为以下4个区间: $40 \sim 6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $6000 \sim 12000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $12000 \sim 18000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $18000 \sim 24000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,应用人工蜂群算法及集成主轴系统动态行为与工艺参数的优化模型在不同主轴转速区间内进行铣削工艺参数优化.

优化采用的蜂群总数为20只,其中寻蜜蜂与决策蜂的数量相同,即都为10只,最大迭代次数为300,循环极限次数 $N_{\text{lim}} = 5$,在优化循环过程中最多会有一只寻蜜蜂转化为侦察蜂.

采用人工蜂群算法进行铣削工艺参数优化的具体步骤如下:

(1) 步骤1. 在约束条件范围内随机产生10个初始蜜源,即给定10个工艺参数矩阵的初始值,每个蜜源分配一只寻蜜蜂,寻蜜蜂根据式(7)计算相应位置的蜂蜜储量.

(2) 步骤2. 寻蜜蜂根据式(23)在当前蜜源的邻近区域寻找新蜜源,并根据式(7)计算蜂蜜储量,如果新蜜源储量好于原蜜源,则寻蜜蜂接受新蜜源,否则仍采用原蜜源.

$\mathbf{X}_j(c+1) = \mathbf{X}_j(c) + \phi_j(\mathbf{X}_j(c) - \mathbf{X}_k(c))$ (23)
式中: j 为第 j 个蜜源; c 为循环次数; $\mathbf{X}_j(c)$ 为当前蜜源; $\mathbf{X}_j(c+1)$ 为新蜜源; k 为不同于 j 的指数; ϕ_j 是一个位于区间 $[-1, 1]$ 之间的随机数.

(3) 步骤3. 所有决策蜂根据适应度函数(24)以

轮盘赌的方式选取蜜源.

$$p_j = \frac{F(\mathbf{X}_j)}{\sum_{k=1}^s F(\mathbf{X}_k)} \quad (24)$$

式中: p_j 为第 j 个蜜源被决策蜂选中的概率,即适应度值; $F(\mathbf{X}_j)$, $F(\mathbf{X}_k)$ 分别为第 j 个和第 k 个蜜源的蜂蜜储量; s 为蜜源的数量,其值等于寻蜜蜂的只数.

(4) 步骤4. 决策蜂根据式(23)继续在已选取蜜源的邻近区域内对寻蜜蜂找到的蜜源依据式(30)进行选取,如果新选取到的蜜源适应度值好于原蜜源,则新蜜源成为选取的蜜源,否则仍选取原蜜源,当所有决策蜂均选取好蜜源后,根据适应度值确定当前最佳蜜源.

(5) 步骤5. 如经过 N_{lim} 次循环后仍不能改善当前最佳蜜源,则当前最佳蜜源对应的寻蜜蜂转化为侦察蜂,并在当前最佳蜜源附近随机寻找新蜜源,如果新蜜源适应度值好于当前最佳蜜源,则新蜜源成为当前最佳蜜源,否则仍采用原蜜源.

(6) 步骤6. 如果满足终止条件,则输出最优工艺参数矩阵,否则返回步骤2.

最终得到的优化结果如表2所示.

表2 使用人工蜂群算法得到的高速铣削工艺参数优化结果
Tab.2 Results of optimization using ABC for high speed milling

| $N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | a_1/mm | f_z/mm | $V/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | T_{pt}/min |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|----------------------------|
| 40~6000 | 1.93 | 0.257 | 239.56 | 1.803 |
| 6000~12000 | 1.87 | 0.169 | 507.25 | 1.754 |
| 12000~18000 | 2.65 | 0.215 | 737.29 | 1.747 |
| 18000~24000 | 1.72 | 0.248 | 1082.51 | 1.726 |

4.2 模态试验

对 VMC0656mu 机床主轴系统进行模态试验,获得静止状态下机床的切削稳定区域. 刀具参数仍如表1所示,工件材料为航空铝合金 7075-T6,切削力系数 $K_f = 726 \text{ MPa}$. 试验装置与传感器布置如图3所示,其中力锤型号为 PCB 086C05,加速度传感器型号为 PCB 353B11 S/N 9690,数据采集卡型号为 NI USB-9162.



图3 模态试验装置与传感器

Fig.3 Device and sensor of modal test

4.3 结果分析

从表1可知,优化得到的切削速度对应的主轴转速分别为 4 768.31, 10 096.54, 14 675.36, 21 546.78 $r \cdot \min^{-1}$, 图4中各曲线分别表示静止状态及转速为 10 096.54, 14 675.36, 21 546.78 $r \cdot \min^{-1}$ 时的切削稳定性图, 转速为 4 768.31 $r \cdot \min^{-1}$ 时的切削稳定性区域与静止状态下的基本一致, 故图中不再绘出, 图中黑点分别为各转速区间的优化结果, 即 A(4 768.31 $r \cdot \min^{-1}$, 1.93 mm), B(10 096.54 $r \cdot \min^{-1}$, 1.87 mm), C(14 675.36 $r \cdot \min^{-1}$, 2.65 mm), D(21 546.78 $r \cdot \min^{-1}$, 1.72 mm). 从图4中可以看出, A, B, C, D点分别位于转速为 0, 10 096.54, 14 675.36, 21 546.78 $r \cdot \min^{-1}$ 的切削稳定区域内, 即本文得到的最优转速与切削深度均位于各优化转速相对应的非颤振区域内. 而转速为 14 675.36 $r \cdot \min^{-1}$ 和转速为 21 546.78 $r \cdot \min^{-1}$ 的最优切削深度分别为 2.65 mm, 1.72 mm, 这2个值却位于静止状态切削稳定区域的颤振区域, 也就是说, 在高速切削区间 6 000~12 000 $r \cdot \min^{-1}$, 12 000~18 000 $r \cdot \min^{-1}$ 进行工艺参数优化时, 如果视切削稳定区域为定值, 得到的切削深度的值比实际可采用的值小. 从图4中还可以看出, 在低速切削区间(主轴转速小于 6 000 $r \cdot \min^{-1}$), 不会发生颤振的最大切削深度约为 3.5 mm, 如果在进行工艺参数优化时不考虑切削稳定性, 得到的切削深度可能会大于 3.5 mm, 从而在切削时出现颤振. 结果表明, 由于高速切削机床可供选择的切削速度与切削深度范围很广, 而且切削稳定性区域会随着主轴转速的改变发生变化, 视切削稳定区域为定值将其作为约束条件引入优化模型, 或者是根本不考虑切削稳定性, 得到的优化结果均有可能不是最优结果, 基于主轴系统动态行为进行工艺参数优化才能获得最优结果.

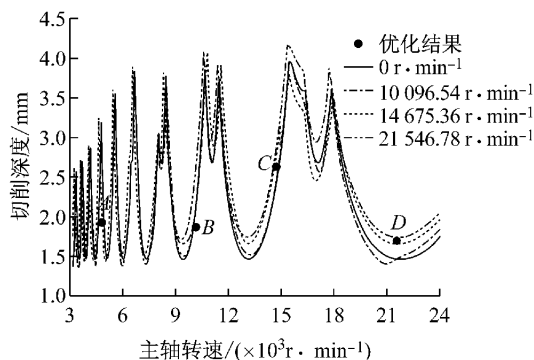


图4 不同转速下的切削稳定性图及各转速区间内的优化值
Fig.4 Stability lobe diagrams under different speed and optimization results of different speed interval

4.4 试验验证

在高速五轴加工中心 VMC0656mu 机床上进行颤振切削试验, 刀具参数仍如表1, 加工方式为顺铣, 工件材料为航空铝合金 7075-T6, 测试的工艺参数为优化结果 A, B, C, D 点, 每齿进给量的值如表2. 试验装置与仪器如图5, 测力系统采用 Kistler 9265B 动态测力仪及 Kistler 5070 电荷放大器.

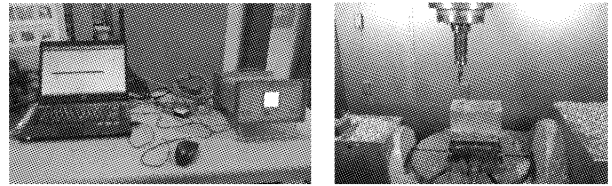


图5 颤振切削试验装置与仪器

Fig.5 Test equipment and instrument of chatter test

以 A, B, C, D 这4个点的参数铣削时的切削力时域信号及与工件垂直方向切削力 F_y 的幅值频谱如图6. 图6b中, 幅值最大的频率为 158.7 Hz, 该频率为刀齿切削频率 $2 \times 4 768 r \cdot \min^{-1} / (60 s) = 158.9 \text{ Hz}$, 317.4 Hz, 952.3 Hz 及 1 269.8 Hz 均为刀齿谐波频率, 位于刀齿切削频率之前, 幅值较低的频率为 78.8 Hz, 该频率为主轴基频 $4 768 r \cdot \min^{-1} / (60 s) = 79.5 \text{ Hz}$, 都不是颤振频率; 图6d中, 幅值最大的频率为 336.4 Hz, 该频率为刀齿切削频率 $2 \times 10 097 r \cdot \min^{-1} / (60 s) = 336.6 \text{ Hz}$, 673 Hz, 1 009.5 Hz 及 1 346.2 Hz 均为刀齿谐波频率, $10 097 r \cdot \min^{-1} / (60 s) = 168.3 \text{ Hz}$ 为主轴基频, 都不是颤振频率; 图6f中, 幅值最大的频率为 488.3 Hz, 该频率为刀齿切削频率 $2 \times 14 675 r \cdot \min^{-1} / (60 s) = 489.2 \text{ Hz}$, 976.6 Hz, 1 464.9 Hz 及 1 953.2 Hz 均为刀齿谐波频率, 位于刀齿切削频率之前, 幅值较低的频率为 244.5 Hz, 该频率为主轴基频 $14 675 r \cdot \min^{-1} / (60 s) = 244.6 \text{ Hz}$, 都不是颤振频率; 图6h中, 幅值最大的频率为 711.1 Hz, 该频率为刀齿切削频率 $2 \times 21 547 r \cdot \min^{-1} / (60 s) = 718.2 \text{ Hz}$, 1 422.2 Hz 及 2 133.3 Hz 为刀齿谐波频率, 位于刀齿切削频率之前, 幅值较低的频率为 358.6 Hz, 该频率为主轴基频 $21 546 r \cdot \min^{-1} / (60 s) = 359.1 \text{ Hz}$, 而 1 069.8 Hz 和 1 780.9 Hz 则为主轴频率的谐波频率, 它们分别与 1 422.2 Hz 及 2 133.3 Hz 的差值均约为主轴基频的大小, 都不是颤振频率. 仔细观察以各参数铣削时的工件切削表面, 亦都非常光滑平整, 无波纹. 即以 A, B, C, D 这4个点的参数铣削时主轴系统都不会发生颤振, 与本文基于主轴系统动态行为的端铣工艺参数优化结果相吻合.

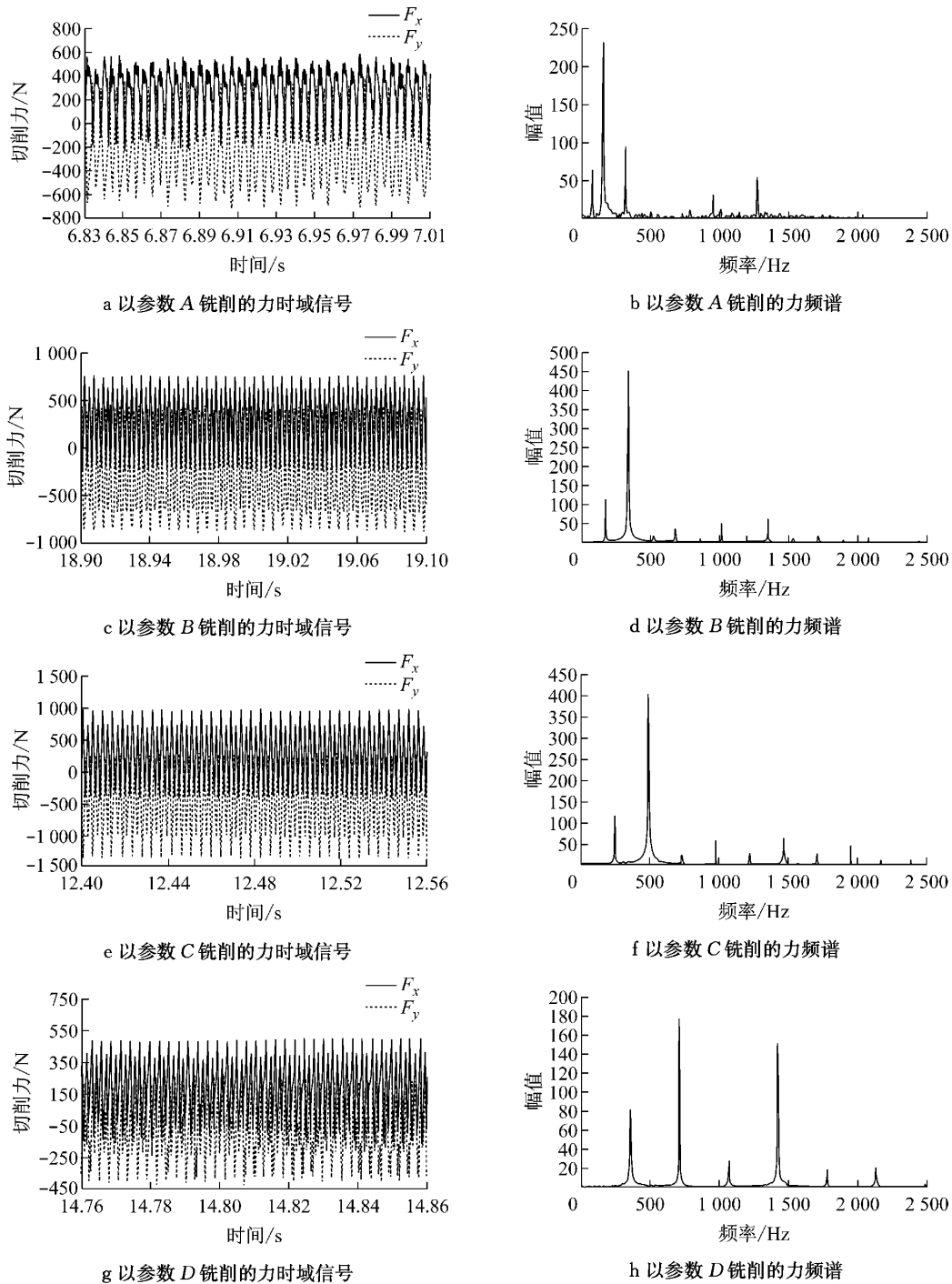


图 6 不同加工参数点的切削力时域信号与相应的幅值频谱

Fig.6 Force signal and frequency spectrum of different cutting parameters

5 结语

为了突破以往研究中未考虑切削稳定性或仅将切削稳定性图简化为定值约束引入优化模型从而不易获得最优工艺参数的局限,本文提出了一种基于主轴系统动态行为的高速铣削工艺参数优化方法.考虑主轴系统动态行为与工艺参数在切削加工过程

中的动态交互影响,基于主轴系统动态行为,以无颤振状态下随转速变化的极限切削深度最大及生产率最大为综合优化目标函数,建立了集成主轴系统动态行为与工艺参数交互影响特性的优化模型,并运用人工蜂群算法对铣削工艺参数进行了优化计算,得到了无颤振状态下可以获得最大生产率的最优铣削工艺参数组合方案.实例及试验结果表明,由于高速切削机床可供选择的切削速度与切削深度范围较

大,且切削稳定区域容易随着切削速度的变化发生改变,主轴系统动态行为与工艺参数的动态交互特性对工艺参数的合理选择有较大影响,如忽略切削过程工艺参数对主轴系统振动系统的影响,其优化结果可能并不是最优结果,采用基于主轴系统动态行为的铣削工艺参数优化方法则可以获得高速铣削无颤振状态下的最优工艺参数。

参考文献:

- [1] Gilbert W W. Machining theory and practice[M]. Cleveland: American Society for Metal, 1950.
- [2] Okushima K, Hitomi K. A study of economical machining: An analysis of the maximum-profit cutting speed [J]. The International Journal of Production Research, 1964, 3(1): 73.
- [3] Armarego E, Russell J K. Maximum profit rate as a criterion for the selection of machining conditions [J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1966, 6(1): 15.
- [4] 陈志同,张保国. 面向单元切削过程的切削参数优化模型[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 230.
CHEN Zhitong, ZHANG Baoguo. Mathematic model on cutting parameter optimization for unit cutting process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 230.
- [5] Venkata R R, Pawar P J. Parameter optimization of a multi-pass milling process using non-traditional optimization algorithms[J]. Applied Soft Computing, 2010, 10(2): 445.
- [6] Aykut S, Kentli A, Gülmez S, *et al.* Robust multiobjective optimization of cutting parameters in face milling [J]. Acta Polytechnica Hungarica, 2012, 9(4): 85.
- [7] 谢书童,郭隐彪. 数控车削中成本最低的切削参数优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10): 2144.
XIE Shutong, GUO Yinbiao. Optimization approach of cutting parameters for minimizing production cost in CNC turnings[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(10): 2144.
- [8] Xie S, Guo Y. Optimisation of machining parameters in multi-pass turnings using ant colony optimisations[J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2012, 11(2): 204.
- [9] Yildiz A R. Hybrid Taguchi-differential evolution algorithm for optimization of multi-pass turning operations[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(3): 1433.
- [10] Zarei O, Fesanghary M, Farshi B, *et al.* Optimization of multi-pass face-milling via harmony search algorithm [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2386.
- [11] Savadamuthu L, Muthu S, Vivekanandan P. Optimization of cutting parameters for turning process using genetic algorithm [J]. European Journal of Scientific Research, 2012, 69(1): 73.
- [12] Kurdi M H. Robust multicriteria optimization of surface location error and material removal rate in high-speed milling under uncertainty [D]. Gainesville: University of Florida, 2005.
- [13] 柯尼希贝格. 机床结构[M]. 金希武,译. 北京:机械工业出版社, 1982.
Koenigsberger F. Machine tool structures[M]. Translated by JIN Xiwu. Beijing: China Machine Press, 1982.
- [14] Altintas Y, Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2004, 53(2): 619.
- [15] Abele E, Fiedler U. Creating stability lobe diagrams during milling[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 309.
- [16] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Kayseri: Erciyes University, 2005.
- [17] Karaboga N. A new design method based on artificial bee colony algorithm for digital IIR filters [J]. Journal of the Franklin Institute, 2009, 346(4): 328.
- [18] Venkata R R, Pawar P J. Parameter optimization of a multi-pass milling process using non-traditional optimization algorithms[J]. Applied Soft Computing, 2010, 10(2): 445.
- [14] Cheng T X, Wang X, Yue J B, *et al.* A regional pricing model of parking in the central commercial district of urban [EB/OL]. [2013-08-18]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201205-371/>.
- [14] 宗芳,张屹山,李志瑶. 城市中心商业区停车收费分析 [EB/OL]. [2013-08-18]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20121102.1657.002.html>.
ZONG Fang, ZHANG Yishan, LI Zhiyao. Parking pricing in the urban central business [EB/OL]. [2013-08-18]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20121102.1657.002.html>.
- [15] Arnott R, Rowse J. Downtown parking in auto city [J]. Regional Science and Urban Economics, 2009, 39(1): 1.
- [16] 梅振宇,项贻强,陈峻,等. 基于停车选择行为的路内停车价格优化模型 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(1): 99.
MEI Zhenyu, XIANG Yiqiang, CHEN Jun, *et al.* Optimizing model of curb parking pricing based on parking choice behavior [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(1): 99.
- [17] van der Waerden P. Pamela, A parking analysis model for predicting effects in local areas [EB/OL]. [2013-08-18]. <http://alexandria.tue.nl/extra2/739991.pdf>.
- [18] Hensher D, Rose J, Greene W. Applied choice analysis: A primer [M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [19] 关宏志. 非集计模型: 交通行为分析的工具[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
GUAN Hongzhi. Disaggregate model: A tool of traffic behavior analysis [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [20] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk [J]. Econometrica, 1979, 47(2): 263.
- [21] Shoup D. The ideal source of local public revenue [J]. Regional Science and Urban Economics, 2004, 34(6): 753.

(上接第 95 页)