

球头铣刀切削刃存在差异的切削力系数辨识

黎柏春¹, 王振宇¹, 张 斌², 王宛山¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 为了准确辨识得到球头铣刀切削刃存在差异的切削力系数, 提出结合平均铣削力方法和粒子群优化算法的辨识方法. 首先, 建立球头铣刀的铣削力模型, 推导基于平均铣削力且忽略切削刃差异的切削力系数辨识模型. 然后, 以基于平均铣削力方法辨识得到的切削力系数为初值、最小化铣削力仿真结果和测量结果的偏差平方和为目标, 引入修正系数为设计变量, 设计基于粒子群优化的切削力系数修正算法. 最后, 进行仿真和实验验证, 相关结果表明采用修正后的切削力系数不仅能准确地预测切削刃存在差异的铣削力峰值, 而且具有更好的吻合度和精度.

关 键 词: 球头铣刀; 切削力系数; 铣削力; 系数辨识; 粒子群优化

中图分类号: TH 164

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2019)09-1316-07

Identification of Cutting Force Coefficients in Different Cutting Edges of Ball-End Milling Cutter

LI Bai-chun¹, WANG Zhen-yu¹, ZHANG Bin², WANG Wan-shan¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding

author: LI Bai-chun, E-mail: libaichun@me.neu.edu.cn)

Abstract: In order to determine cutting force coefficients of a ball-end milling cutter, in which cutting edges have differences, a new method combining the average milling force method with particle swarm optimization (PSO) was proposed. Firstly, the milling force models and the identification models based on the average milling force method are constructed ignoring the differences of cutting edges. Then, the algorithm for searching more accurate cutting force coefficients based on PSO was given. The algorithm uses the coefficients obtained by the average milling force method as initial values, correction factors of cutting force coefficients as design parameters, and sum of squared deviations between the minimum cutting force of simulation and experiment as objective function. Finally, a series of simulations and experiments are performed. The results show that the predicted milling forces with corrected cutting force coefficients have a better consistency with measured forces.

Key words: ball-end milling cutter; cutting force coefficients; milling forces; coefficient identification; particle swarm optimization (PSO)

铣削力作为衡量球头铣刀铣削过程的重要物理参数, 一直是加工领域关注的热点. 早在 20 世纪 90 年代, Lee 等^[1] 基于离散的微元切削力建立了球头铣刀三轴铣削的铣削力模型, 并提出了利用正交切削数据估计切削力系数的方法. Cao

等^[2] 提出了考虑球头铣刀倾角的切削力系数辨识方法. 魏兆成等^[3] 针对球头铣刀铣削加工三维曲面的铣削力预测进行了深入研究. Wojciechowski 等^[4-5] 提出了根据瞬时铣削力辨识切削力系数的方法, 并建立了球头铣刀存在偏

收稿日期: 2018-09-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51505072); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N160303001, N150306001, N182303034).

作者简介: 黎柏春(1986-), 男, 重庆人, 东北大学讲师, 博士; 张 斌(1964-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师; 王宛山(1946-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

心的铣削力模型. Fu 等^[6]建立了球头铣刀存在偏心时的铣削力解析模型. Dikshit 等^[7-8]将切削力系数考虑为轴向位置的多项式函数,并提出了基于平均铣削力确定切削力系数的方法. Nan 等^[9]合并简化了球头铣刀倾斜铣削时的切削力系数,并采用平均铣削力方法进行了切削力系数辨识.

综上所述,球头铣刀铣削力研究的核心在于建立正确的铣削力模型和确定准确的切削力系数.目前,铣削力建模和切削力系数辨识都取得了丰硕的研究成果,相关理论日益完善,能实现大多数球头铣刀铣削过程的铣削力预测.但在近期进行的球头铣刀切削力系数辨识实验中出现了相邻切削刃所受铣削力明显不同的现象,主要是由于球头铣刀不同切削刃之间存在一定差异,例如刀具几何偏心、切削刃前后角误差等.因此切削力系数辨识需要考虑切削刃的差异,即不同切削刃的切削力系数不同.

目前的切削力系数辨识方法(主要是平均铣削力方法和瞬时铣削力方法)只适用于球头铣刀切削刃完全一致或仅仅存在偏心的情况,因为将不同切削刃的切削力系数考虑为不同时,利用现有辨识方法建立的辨识模型会出现线性相关,不能求解.因此,为了能够准确辨识切削刃存在差异的球头铣刀的切削力系数,下文将结合平均铣削力方法和粒子群优化算法进行相关的理论和实验研究.

1 铣削力建模

1.1 工件坐标系和刀具坐标系

建立铣削过程中工件坐标系和刀具坐标系,如图1所示.图1中,坐标系 $o_w - x_w y_w z_w$ 为工件坐标系;坐标系 $o'_w - x'_w y'_w z'_w$ 是与工件坐标系的坐标轴方向相同,且原点位于球头铣刀球面球心的过渡坐标系;坐标系 $o''_w - x''_w y''_w z''_w$ 是由坐标系 $o'_w - x'_w y'_w z'_w$ 绕 y'_w 旋转 α 角,使得 x''_w 与刀轴方向垂直得到的过渡坐标系,定义 α 角为进给倾斜角; f_z 为刀具每齿进给量在工件坐标系中的矢量形式;过渡坐标系 $o' - x'y'z'$ 的 x' 轴正方向是进给方向在垂直于刀轴平面内的投影方向, z' 轴正方向是刀具轴线向上的方向;夹角 γ 是绕 x''_w 轴旋转 z''_w 轴到 z' 轴所需的角度,定义 γ 角为侧倾角; R 是球头铣刀半径;坐标系 $o - xyz$ 是刀具坐标系,其圆心位于球头铣刀刀尖处,坐标轴方向与坐标系 $o' - x'y'z'$ 的坐标轴方向相同; a 为工件上的切削深度.

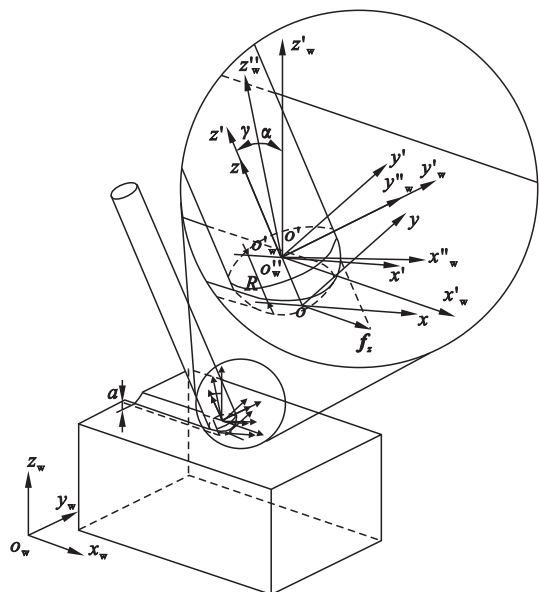


图1 工件坐标系和刀具坐标系

Fig. 1 Coordinate systems of workpiece and cutter

根据图1可得到坐标系 $o'_w - x'_w y'_w z'_w$ 和坐标系 $o - xyz$ 之间的旋转变换关系 ${}^c_w R$ 为

$${}^c_w R = [{}^{w'}n_{x'}, {}^{w'}n_{y'}, {}^{w'}n_{z'}]^{-1}. \quad (1)$$

式中, ${}^{w'}n_{x'}$, ${}^{w'}n_{y'}$, ${}^{w'}n_{z'}$ 分别为 $o' - x'y'z'$ 各坐标轴方向在 $o'_w - x'_w y'_w z'_w$ 中的单位矢量,可表示为

$$\left. \begin{aligned} {}^{w'}n_{z'} &= \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ {}^{w'}n_{y'} &= \frac{{}^{w'}n_{z'} \times f_z}{\| {}^{w'}n_{z'} \times f_z \|}, \\ {}^{w'}n_{x'} &= {}^{w'}n_{y'} \times {}^{w'}n_{z'}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

1.2 铣削力模型

将切削刃离散为有限的切削微元,如图2所示.图2中: κ 是切削微元的轴向位置角, rad; ψ_{ji} 是切削刃微元相对于切削刃顶点的圆周位置角, rad; φ_{ji} 是切削刃 j 上切削微元 i 相对于 x 轴正向的圆周位置角, rad; n 是主轴转速, r/min; db 是切削宽度, mm; dS 是切削微元长度, mm; h 是瞬时未变形切屑厚度, mm; $dF_{t,ji}$, $dF_{r,ji}$ 和 $dF_{a,ji}$ 分别为切向、径向和轴向的微元切削力分量, N.

根据经典的线性微元切削力模型^[10],每个切削微元所受切削力可描述为

$$\left. \begin{aligned} dF_{t,ji} &= K_{te} \cdot dS + K_{tc} \cdot h \cdot db, \\ dF_{r,ji} &= K_{re} \cdot dS + K_{rc} \cdot h \cdot db, \\ dF_{a,ji} &= K_{ae} \cdot dS + K_{ac} \cdot h \cdot db. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: K_{te} , K_{re} , K_{ae} 分别为切向、径向、轴向犁耕力系数, N/mm; K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} 分别为切向、径向、轴向

剪切力系数, N/mm^2 ; 切削微元长度 $\text{d}S$ 、切削宽度

$\text{d}b$ 和瞬时未变形切屑厚度 h 的表达式为

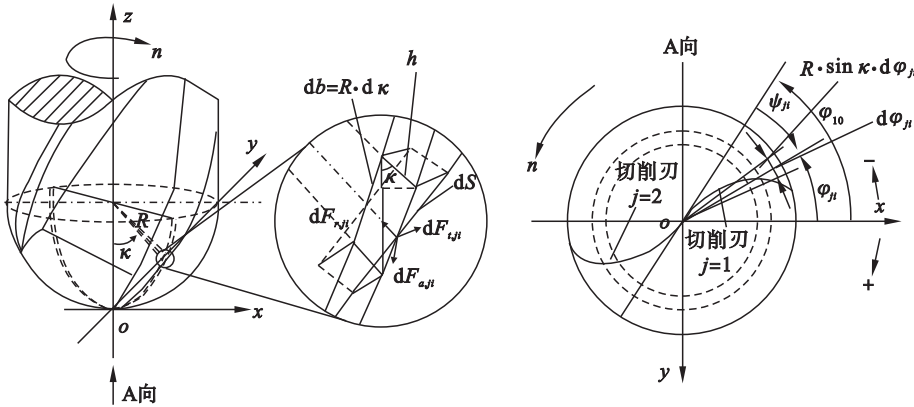


图 2 切削刃微元切削力
Fig. 2 Cutting forces of discrete element of cutting edge

$$\left. \begin{aligned} db &= R \cdot d\kappa, \\ dS &= \sqrt{1 + \tan^2 \beta \sin^4 \kappa} \cdot R \cdot d\kappa, \\ h &= [\sin \kappa \cdot \cos \varphi_{ji} \sin \kappa \cdot \sin \varphi_{ji} - \cos \kappa] \cdot \left(\frac{c}{w} \mathbf{R} \cdot \mathbf{f}_z \right). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, β 为刀具的公称螺旋角, rad .

结合式(3)和式(4), 通过积分求和可得铣削力为

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = R \cdot \sum_{j=1}^{N_f} \int_{\kappa_j^L}^{\kappa_j^U} \left(\mathbf{D}_{ji} \begin{bmatrix} K_{te} q + K_{te} h \\ K_{re} q + K_{re} h \\ K_{ac} q + K_{ac} h \end{bmatrix} \right) d\kappa. \quad (5)$$

式中: N_f 为切削刃数; κ_j^U, κ_j^L 分别为切削刃 j 的上、下切触边界; q 是与 β 和 κ 有关的表达式, $q = \sqrt{1 + \tan^2 \beta \sin^4 \kappa}$; \mathbf{D}_{ji} 是微元切削力变换到刀具坐标系中的变换矩阵,

$$\mathbf{D}_{ji} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_{ji} & -\cos \varphi_{ji} \sin \kappa & -\cos \varphi_{ji} \cos \kappa \\ \cos \varphi_{ji} & -\sin \varphi_{ji} \sin \kappa & -\sin \varphi_{ji} \cos \kappa \\ 0 & \cos \kappa & -\sin \kappa \end{bmatrix}. \quad (6)$$

2 切削力系数辨识方法

为了提高优化搜索效率, 降低求解过程不收敛概率, 首先利用平均铣削力方法估计得到近似的切削力系数, 然后以此为初值利用粒子群优化算法搜索更准确的切削力系数.

2.1 基于平均铣削力的辨识模型

相关研究^[10]表明对于球头铣刀球面部分的切削刃而言, 将犁耕力系数考虑为常数, 剪切力系数考虑为与轴向位置角有关的多项式函数能更准确地预测铣削力大小. 因此, 剪切力系数可表示为

$$\left. \begin{aligned} K_{te} &= K_{te0} + K_{te1} \kappa + K_{te2} \kappa^2 + K_{te3} \kappa^3 + K_{te4} \kappa^4, \\ K_{re} &= K_{re0} + K_{re1} \kappa + K_{re2} \kappa^2 + K_{re3} \kappa^3 + K_{re4} \kappa^4, \\ K_{ac} &= K_{ac0} + K_{ac1} \kappa + K_{ac2} \kappa^2 + K_{ac3} \kappa^3 + K_{ac4} \kappa^4. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据平均铣削力方法, 结合式(5)和式(7)可得到

$$\bar{\mathbf{F}}^m = \mathbf{I} \cdot \mathbf{K}. \quad (8)$$

式中: $\bar{\mathbf{F}}^m$ 为铣削力测量结果的平均值, 即 $\bar{\mathbf{F}}^m = [\bar{F}_x^m \quad \bar{F}_y^m \quad \bar{F}_z^m]^T$; \mathbf{I} 为基本的辨识系数矩阵; \mathbf{K} 为待辨识的切削力系数.

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_x^m \\ \bar{F}_y^m \\ \bar{F}_z^m \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \begin{bmatrix} F_x^m \\ F_y^m \\ F_z^m \end{bmatrix} \cdot d\varphi. \quad (9)$$

式中: F_x^m, F_y^m, F_z^m 为刀具所受铣削力测量值在刀具坐标系中的分量; φ 为刀具旋转角度.

$$\mathbf{I} = \frac{R}{2\pi} \begin{bmatrix} \left(\sum_{j=1}^{N_f} \int_0^{2\pi} \int_{\kappa_j^L}^{\kappa_j^U} q \mathbf{D}_{ji} d\kappa d\varphi \right)^T \\ \left(\sum_{j=1}^{N_f} \int_0^{2\pi} \int_{\kappa_j^L}^{\kappa_j^U} h \mathbf{D}_{ji} d\kappa d\varphi \right)^T \\ \vdots \\ \left(\sum_{j=1}^{N_f} \int_0^{2\pi} \int_{\kappa_j^L}^{\kappa_j^U} h \mathbf{D}_{ji} \kappa^4 d\kappa d\varphi \right)^T \end{bmatrix}^T, \quad (10)$$
$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{te} & K_{re} & K_{ac} & K_{te0} & K_{re0} & K_{ac0} & \cdots \\ K_{te4} & K_{re4} & K_{ac4} \end{bmatrix}^T. \quad (11)$$

由式(8)~式(11)可以看出, 一组铣削实验数据只能构造 3 个方程的方程组, 但切削力系数个数远大于 3, 需要多组非线性相关的实验数据构成正定或超定方程组. 为此, 根据多组实验, 利用最小二乘估计可得到切削力系数的估计值 $\hat{\mathbf{K}}$, 即辨识模型为

$$\hat{\mathbf{K}} = \min_K \left(\sum_{g=1}^m \| \bar{\mathbf{F}}_g^m - \mathbf{I}_g \mathbf{K} \|^2 \right). \quad (12)$$

式中： \bar{F}_g^m 为第 g 组实验的铣削力平均值； I_g 为第 g 组实验对应的辨识系数矩阵； m 为实验组数。

2.2 基于粒子群优化的切削力系数修正算法

1) 目标函数. 粒子群优化的目标是搜索得到准确的切削力系数使得铣削力的仿真计算值和实验测量值完全吻合. 因此, 对刀具旋转一周进行离散, 计算所有离散点处铣削力仿真计算值和测量值之间偏差的平方和最小作为优化目标函数, 即

$$f(K) = \min_K \left(\sum_{i=1}^d \|F_i^m - F_i^s\|^2 \right). \quad (13)$$

式中： d 为离散数； F_i^m, F_i^s 分别为第 i 个离散处铣削力的测量值和仿真计算值。

2) 设计变量. 设计变量是待辨识的切削力系数, 但为了保证已有的近似切削力系数在算法更新过程中具有相同的百分比变化趋势和统一边界约束, 故引入切削力系数的修正系数作为设计变量, 即 $K_i = X_i \cdot \hat{K}_i$ (X_i 为设计变量的第 i 个元素). 此外, 由于铣削力测量值为随时间变化的曲线, 而铣削力计算值为随刀具旋转角度变化的曲线, 在计算目标函数结果时需要将测量值变换为随角度变化的曲线. 其中涉及的刀具旋转初始角度只能通过搜索确定, 故将其作为设计变量. 至此, 所有设计变量为

$$X = [\dots \quad C_j^{K_{lc}} \quad C_j^{K_{rc}} \quad C_j^{K_{ac}} \quad C_j^{K_{lc}} \quad C_j^{K_{rc}} \quad C_j^{K_{ac}} \quad \dots \quad \varphi_{init}]. \quad (14)$$

式中： $C_j^{K_{lc}}, \dots, C_j^{K_{ac}}$ 为切削刃 j 的切削力系数修正系数； φ_{init} 为刀具旋转初始角度, rad.

根据式 (14) 中各设计变量物理意义, 其约束为

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq X_i \leq 2\pi, \quad i = 6N_f + 1; \\ 0 < X_i < 6, \quad \text{其他.} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

3) 算法流程. 根据目标函数、设计变量和粒子群优化^[11], 设计搜索切削力系数的算法流程如图 3 所示.

为了降低铣削力测量值中的噪声干扰, 采用巴特沃斯低通滤波对其进行处理, 并利用平均铣削力方法根据多组铣削力测量值估计切削力系数的初始值, 目标函数计算时则使用一组较好的测量值.

3 切削力系数辨识的实验研究

3.1 实验系统

为了验证切削力系数辨识方法, 选用一段直径 100 mm、长度 150 mm 的铝合金 AL2014 - T6 棒材为工件材料, 两刃硬质合金球头铣刀 (定制

刀具, 型号 R216. 42 - 10030 - A110G 1620, PVD (Ti, Al) N2 涂层) 为刀具, 进行实验研究. 刀具详细参数如表 1 所示.

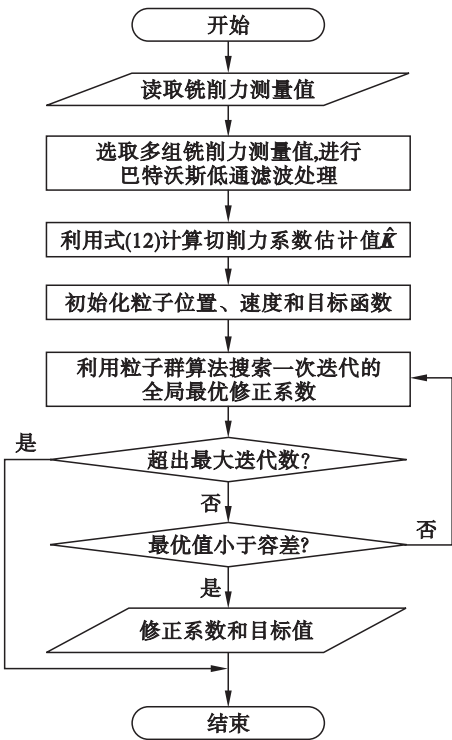


图 3 搜索切削力系数的算法流程
Fig. 3 Flowchart for searching cutting force coefficients

表 1 刀具参数 Table 1 Parameters of the cutter			
名 称	数值	名 称	数值
直径/mm	10	公称螺旋角/(°)	30
球头半径/mm	5	刃长/mm	26.5
刀长/mm	73.5	刃数	2
径向前角/(°)	1.5	轴向前角/(°)	1.5

铣削实验在 DMG - DMU50 五轴数控机床上进行; 铣削力测量过程由 Kistler9275 三向压电测力仪、Kistler5070 电荷放大器和 Kistler2855A5 数据采集卡组成的测量系统完成; 构建的实验系统如图 4 所示.

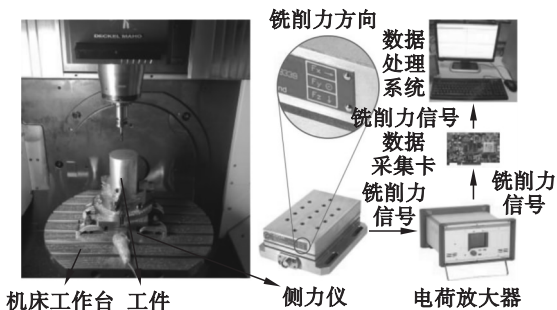


图 4 实验系统
Fig. 4 Experimental system

3.2 辨识实验和数据处理

辨识实验采用倾斜槽切铣削方式,以实现避免大切深情况下的铣削力还能反映球头部分所有切削刃的切削作用. 铣削方案和效果如图 5 所示,具体工艺参数和刀具所受平均铣削力(由测量值根据式(9)计算得到)如表 2 所示. 实验过程中主轴转速 n 为 3 000 r/min,铣削力测量的采样频率为 7 100 Hz. 根据表 2 的数据可估计得到球头铣刀的切削力系数为

$$\left. \begin{aligned} K_{le} &= 6.246\,4, \\ K_{re} &= 6.232\,1, \\ K_{ae} &= -0.302\,6, \\ K_{lc} &= 4\,831.436\,7 - 19\,496.820\,1\kappa + \\ &\quad 20\,525.736\,0\kappa^2 + 16\,154.166\,8\kappa^3 - 20\,553.334\,8\kappa^4, \\ K_{rc} &= 4\,924.397\,7 - 20\,000.663\,3\kappa + \\ &\quad 18\,571.491\,4\kappa^2 + 16\,516.520\,9\kappa^3 - 19\,694.304\,9\kappa^4, \\ K_{ac} &= -5\,842.068\,2 + 36\,968.618\,2\kappa - \\ &\quad 44\,315.936\,4\kappa^2 - 31\,728.588\,1\kappa^3 + 47\,332.798\,3\kappa^4. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

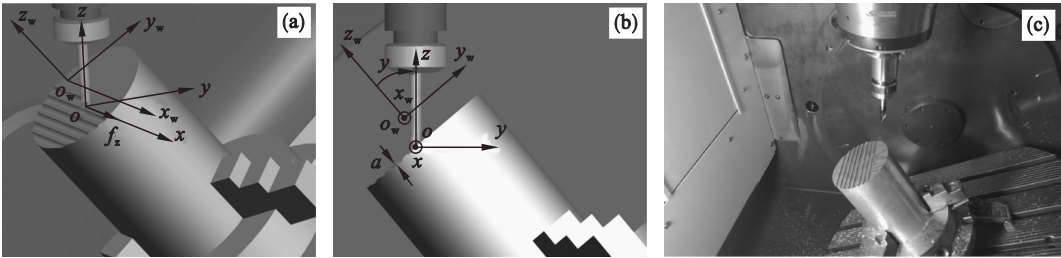


图 5 倾斜槽切铣削实验方案和效果
Fig. 5 Experimental scheme and result of milling
(a)—轴测图; (b)—沿 x 轴负方向的正投影图; (c)—槽切铣削效果.

表 2 铣削工艺参数						
Table 2 Process parameters of milling						
实验 编号	切削 深度 mm	每齿 进给 量 $\text{mm} \cdot \text{z}^{-1}$	γ ($^{\circ}$)	平均铣削力/N		
				F_x^m	F_y^m	F_z^m
1	0.5	0.05	0	-7.261 1	25.800 8	28.414 5
2	0.5	0.06	0	-7.938 8	29.409 1	31.233 8
3	1	0.04	0	-12.234 8	39.198 0	38.246 0
4	1	0.05	0	-13.133 8	45.011 7	40.695 5
5	1	0.06	0	-15.183 0	50.718 8	42.745 8
6	1	0.07	0	-18.185 9	56.742 4	49.567 5
7	1	0.04	-15	-23.557 0	34.486 3	39.731 5
8	1	0.05	-15	-28.275 2	41.652 6	45.368 5
9	1	0.06	-15	-32.752 8	47.004 0	50.008 3
10	1	0.03	-30	-26.553 2	17.342 2	24.259 3
11	1	0.04	-30	-32.430 3	21.163 5	29.368 8
12	1	0.05	-30	-38.068 0	26.578 3	35.434 4

以式(16)的近似切削力系数为初值,根据图 3 的流程利用 Matlab 实现相关计算. 选择实验 8 作为优化搜索的测量数据,设置最大迭代数为 26 000,最小迭代容差为 1.0×10^{-6} ,进行迭代计

算,其迭代收敛曲线如图 6 所示. 迭代过程具有较好的收敛性,经过 210 次的迭代计算即可使目标函数值小于迭代容差. 由此确定的切削刃 1 的切削力系数为

$$\left. \begin{aligned} K_{le} &= 8.002\,9, \\ K_{re} &= 8.485\,1, \\ K_{ae} &= -0.605\,2, \\ K_{lc} &= 3\,843.632\,6 - 15\,510.627\,0\kappa + \\ &\quad 16\,329.177\,5\kappa^2 + 12\,851.390\,9\kappa^3 - \\ &\quad 16\,351.133\,6\kappa^4, \\ K_{rc} &= 3\,603.146\,0 - 12\,441.105\,4\kappa + \\ &\quad 11\,552.110\,9\kappa^2 + 10\,273.848\,1\kappa^3 - \\ &\quad 12\,250.539\,8\kappa^4, \\ K_{ac} &= -5\,012.989\,2 + 31\,722.204\,7\kappa - \\ &\quad 38\,026.825\,8\kappa^2 - 27\,225.815\,1\kappa^3 + \\ &\quad 40\,615.548\,7\kappa^4. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

切削刃 2 的切削力系数为

$$\left. \begin{aligned} K_{te} &= 7.565\,4, \\ K_{re} &= 7.101\,4, \\ K_{ae} &= -0.605\,2, \\ K_{tc} &= 3\,402.512\,8 - 13\,730.528\,5\kappa + \\ &\quad 14\,455.137\,0\kappa^2 + 11\,376.483\,3\kappa^3 - \\ &\quad 14\,474.573\,2\kappa^4, \\ K_{rc} &= 2\,920.059\,5 - 11\,859.953\,4\kappa + \\ &\quad 11\,012.485\,8\kappa^2 + 9\,793.933\,6\kappa^3 - \\ &\quad 11\,678.289\,5\kappa^4, \\ K_{ac} &= -6\,222.078\,3 + 39\,373.322\,5\kappa - \\ &\quad 47\,198.563\,0\kappa^2 - 33\,792.443\,1\kappa^3 + \\ &\quad 50\,411.663\,2\kappa^4. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

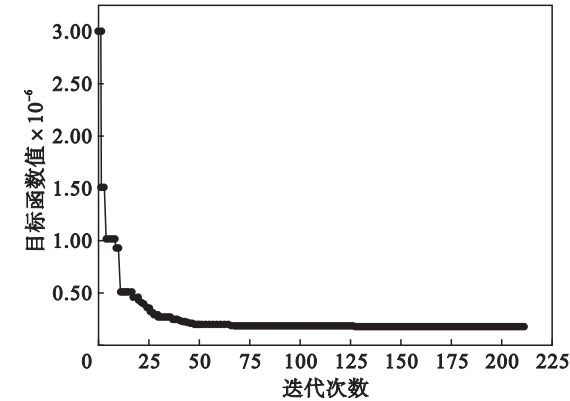


图6 收敛曲线
Fig. 6 Progress of the solver

3.3 辨识结果的实验验证和分析

为了验证确定的切削力系数,仍然以前述的工件、刀具和铣削力测量系统为基础,选择主轴转速 3 000 r/min、工件切深 1 mm、每齿进给量 0.06 mm/z,设置侧倾角为 -30°,进行槽切铣削实验.铣削过程中铣削力测量的采样频率设置为 7 100 Hz.将铣削力的测量值和仿真计算结果进行对比,如图 7 所示.

对比相邻切削周期的铣削力测量值可以看出,球头铣刀两切削刃的铣削力存在一定差异,并且呈现出稳定性和周期性,其原因主要是刀柄和刀具制造误差引起,例如偏心、切削刃的形状误差等.因此,本文引入切削力系数的修正系数.不仅将工件材料属性、刀具材料属性、刀具理想几何形状等因素的作用效果,而且还将切削刃的差异效果(制造误差)全部纳入切削力系数中.图 7 表明修正的切削力系数用于铣削力仿真,其仿真与测量值具有更好的吻合度,而且能相对准确地预测铣削力峰值.

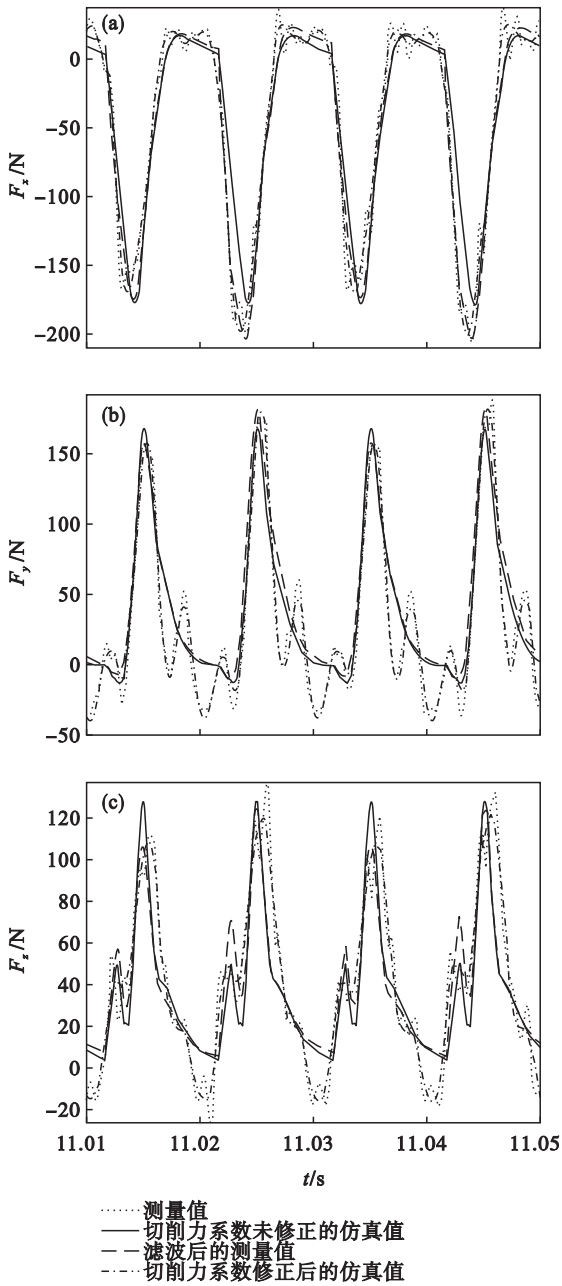


图7 铣削力的测量值和仿真计算结果
Fig. 7 Simulated and measured milling forces
(a)—x方向的铣削力;(b)—y方向的铣削力;
(c)—z方向的铣削力.

根据图 7 计算的仿真结果和测量值之间的平均铣削力误差和偏差平方和如表 3 所示.利用修正后的切削力系数进行铣削力仿真,其仿真结果具有更小的平均铣削力误差和偏差平方和.由此可以定量证明切削力系数修正方法的有效性和可靠性.

表 3 仿真结果和测量值的定量分析
Table 3 Quantitative analysis of simulated and measured milling forces

变量	切削力系数未修正	切削力系数修正后
$\ \bar{F}_x^m - \bar{F}_x^s \ / N$	2. 133 2	1. 884 9
$\ \bar{F}_y^m - \bar{F}_y^s \ / N$	6. 378 6	5. 984 4
$\ \bar{F}_z^m - \bar{F}_z^s \ / N$	2. 682 2	2. 423 2
铣削力 x 分量的偏差平方和	$9. 016\ 0 \times 10^4$	$2. 445\ 1 \times 10^4$
铣削力 y 分量的偏差平方和	$9. 595\ 8 \times 10^4$	$8. 420\ 3 \times 10^4$
铣削力 z 分量的偏差平方和	$5. 588\ 0 \times 10^4$	$5. 445\ 8 \times 10^4$

4 结 论

1) 利用经典的微元切削力模型建立了适用于多轴铣削的球头铣刀铣削力模型,推导了基于平均铣削力的切削力系数辨识模型.

2) 结合切削力系数辨识的平均铣削力方法和粒子群优化算法设计精确切削力系数的算法流程.引入切削力系数的修正系数为设计变量,即将切削刃差异的作用效果纳入切削力系数中,以此实现球头铣刀切削刃存在差异的切削力系数辨识.

3) 通过仿真和实验,验证球头铣刀切削刃存在差异时切削力系数辨识方法的可行性和正确性.结果表明采用修正的切削力系数,不仅能准确地预测铣削力峰值,而且具有更好的吻合度和精度.

参考文献:

[1] Lee P,Altintaş Y. Prediction of ball-end milling forces from

orthogonal cutting data[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,1996,36(9):1059 – 1072.

[2] Cao Q,Zhao J,Han S,et al. Force coefficients identification considering inclination angle for ball-end finish milling[J]. *Precision Engineering*,2012,36(2):252 – 260.

[3] Wei Z C,Wang M J,Cai Y J, et al. Prediction of cutting force in ball-end milling of sculptured surface using improved Z-map[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2013,68(5/6/7/8):1167 – 1177.

[4] Wojciechowski S. The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,2015,89:110 – 123.

[5] Wojciechowski S, Maruda R W, Nieslony P, et al. Investigation on the edge forces in ball end milling of inclined surfaces[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016,119:360 – 369.

[6] Fu Z,Yang W,Wang X,et al. An analytical force model for ball-end milling based on a predictive machining theory considering cutter runout [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84 (9/10/11/12):2449 – 2460.

[7] Dikshit M K,Puri A B, Maity A, et al. Determining cutting force coefficients from instantaneous cutting forces in ball end milling [J]. *International Journal of Machining & Machinability of Materials*,2016,18(5/6):552 – 571.

[8] Dikshit M K,Puri A B, Maity A. Analysis of cutting force coefficients in high-speed ball end milling at varying rotational speeds [J]. *Machining Science & Technology*, 2017,21(1):1 – 20.

[9] Nan C,Liu D. Analytical calculation of cutting forces in ball-end milling with inclination angle [J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*,2018,2(2):35.

[10] 黎柏春,王振宇,王国勋,等. 基于瞬时铣削力的球头铣刀铣削力系数辨识[J]. *东北大学学报(自然科学版)*,2016,37(5):678 – 682.

(Li Bai-chun,Wang Zhen-yu,Wang Guo-xun,et al. Milling force coefficient identification of ball-end milling based on instantaneous milling forces [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*,2016,37(5):678 – 682.)

[11] Zhang Q,Liu W,Meng X,et al. Vector coevolving particle swarm optimization algorithm [J]. *Information Sciences*, 2017,394/395:273 – 298.