

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.048

成形法加工螺旋锥齿轮铣削力模型*

贾新杰¹ 邓效忠² 苏建新²

(1. 西北工业大学机电学院, 西安 710072; 2. 河南科技大学机电工程学院, 洛阳 471003)

【摘要】 根据成形法加工螺旋锥齿轮的几何理论,推导出任意时刻切削厚度和切削宽度的计算公式,建立了成形法加工螺旋锥齿轮大轮的动态铣削力模型,通过单因素实验标定了铣削力系数,编写了成形法加工螺旋锥齿轮大轮动态铣削力仿真程序。为验证动态铣削力模型的有效性,设计了实验装置。铣削力计算结果和实验结果的误差不超过±15%,证明了铣削力模型的正确性。

关键词: 螺旋锥齿轮 成形法 铣削力模型

中图分类号: TG501.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)12-0268-05

Milling Forces Model of Spiral Taper Gear Using Form Milling

Jia Xinjie¹ Deng Xiaozhong² Su Jianxin²

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract

Based on the geometrical theory of the form milling the spiral taper gear, the computational formula of the cutting thickness and cutting width in every time was deduced. The milling force model for form milling the spiral taper gear was presented. The milling force factors were calibrated via single factor experimentations and the form milling force simulation programs were prepared. Experimental installations were designed to validate the availability of the milling force model. Comparison between the computational results and experimental observations confirmed the validity deviation of the proposed model was within ±15%.

Key words Spiral taper gear, Form milling, Milling force model

引言

铣齿切削力是数控螺旋锥齿轮铣齿机设计的重要数据,同时也是铣齿过程振动研究、铣齿切削用量优化并最终实现铣齿智能控制的基础。成形法铣齿类似面铣,面铣研究在国内外有很多。文献[1~4]给出了4种不同的面铣切削力模型;Adolfsson等^[5]研究了多齿面铣切削力,指出面铣切削力受刀片初始径向、轴向安装误差、刀盘轴线与主轴回转中心线偏心误差、刀片磨损的影响;Andersson等^[6]在文献[5]的基础上考虑了主轴倾

斜和载荷变化引起的刀具倾斜以及切削速度延迟对铣削力的影响,建立了更加精确的面铣铣削力计算模型;在齿轮加工切削力研究领域,Antoniadis等^[7]建立了滚切直齿圆柱齿轮切削力模型,Sutherland等^[8]建立了拉内直齿的切削力模型;于建春^[9]等采用BP神经网络对直齿锥齿轮铣齿功率进行了研究,给出了预测直齿锥齿轮铣齿功率的计算方法;郭茜等^[10]研究了直齿锥齿轮飞刀铣齿切削的动力学问题。本文采用经典方法建立成形法加工螺旋锥齿轮大轮瞬时动态铣削力模型并编制相应的仿真计算程序。

收稿日期: 2011-11-23 修回日期: 2012-05-22

* 国家自然科学基金资助项目(51075121)

作者简介: 贾新杰,博士生,主要从事螺旋锥齿轮数字化制造研究,E-mail: jia-xinjie@hotmail.com

通讯作者: 邓效忠,教授,博士生导师,主要从事螺旋锥齿轮先进设计方法、数字化制造研究,E-mail: dxz01@163.com

1 成形法铣齿几何原理

半滚切法适用于加工传动比大于 2.5 的螺旋锥齿轮,是指大轮用成形法加工,小轮用展成法加工。成形法加工大轮时,摇台不动,机床结构简单,切齿效率高。

1.1 刀片产形面方程

刀片产形面方程为^[11]

$$\mathbf{r}_{mT}(u_m, \theta_m) = \begin{bmatrix} u_m \sin \alpha_m \cos \theta_m \\ u_m \sin \alpha_m \sin \theta_m \\ \pm [(r_d \mp 0.5W) \cot \alpha_m - u_m \cos \alpha_m] \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 (u_m, θ_m) ——确定刀片产形面上动点 N 的参数
 r_d ——刀盘名义半径
 W ——错刀距
 α_m ——齿形角, $m = i, e, i$ 表示内刀片,取上“+”; e 表示外刀片,取下“-”

刀片刀尖点矢径为

$$u_{m0} = (r_d \mp 0.5W) / \sin \alpha_m$$

1.2 螺旋锥齿轮大轮面锥方程

图 1 建立了大轮面锥的坐标系 S_a ,在交错点 O_2 处建立大轮坐标系 S_2 ,图中 B 为大轮齿面宽, z_a 为面锥顶点到交错点距离。

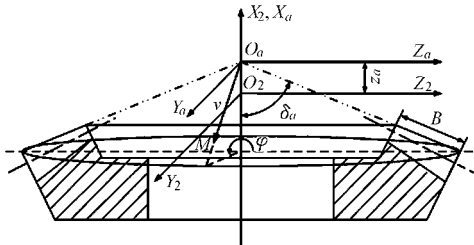


图 1 大轮轮坯
Fig. 1 Workpiece of gear

坐标系 S_a 中,大轮面锥方程为

$$\mathbf{r}_a(v, \varphi) = \begin{bmatrix} -v \cos \delta_a \\ v \sin \delta_a \sin \varphi \\ -v \sin \delta_a \cos \varphi \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 (v, φ) ——确定面锥上动点 M 的参数
 δ_a ——面锥角

1.3 大轮成形法铣齿机床调整参数

螺旋锥齿轮大轮成形法调整参数包括轮坯安装角 δ_m ,水平刀位 H ,垂直刀位 V ,轴向轮位修正值 x_2 ,床位 $z_j(z_j = 0$ 时切削结束)。

刀片产形面 $\mathbf{r}_{mT}(u_m, \theta_m)$ 在机床坐标系 S_M 中的方程为

$$\mathbf{r}_{mM}(u_m, \theta_m) = M_{MT} \mathbf{r}_{mT}(u_m, \theta_m) \quad (3)$$

大轮面锥 $\mathbf{r}_a(v, \varphi)$ 在机床坐标系 S_M 中方程为

$$\mathbf{r}_{aM}(v, \varphi, z_j) = M_{Mf} M_{f2} M_{2a} \mathbf{r}_a(v, \varphi) \quad (4)$$

由方程(3)、(4)可得到机床坐标系 S_M 中刀片产形面与大轮面锥交线的方程

$$\begin{aligned} L_{maM}(u_m, \theta_m, v, \varphi, z_j) = \\ \mathbf{r}_{mM}(v, \varphi, z_j) - \mathbf{r}_{mM}(u_m, \theta_m) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

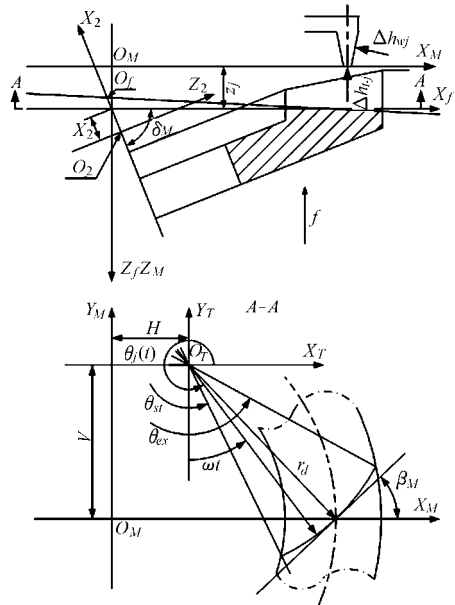


图 2 成形法粗铣大轮
Fig. 2 Form milling gear

由图 2 可得切入角 θ_{st} 和切出角 θ_{ex} 为

$$\theta_{st} \approx \frac{3\pi}{2} + \beta_M - \frac{B}{2r_d \cos \beta_M} \quad (6)$$

$$\theta_{ex} \approx \frac{3\pi}{2} + \beta_M + \frac{B}{2r_d \cos \beta_M} \quad (7)$$

式中 β_M ——大轮中点螺旋角

2 瞬时切削宽度和切削厚度

为简化研究对象,假定铣齿过程中任意时刻只有一个刀片参与切削。满足任意时刻只有一个刀片切削的条件为

$$\frac{2\pi r_d}{z_T} > \frac{B}{\cos \beta_M} \quad (8)$$

式中 z_T ——刀盘刀片数

铣削过程中,刀盘以转速 n (r/min) 旋转,工件在滑台带动下沿 $-Z_M$ 轴以进给速度 f (mm/min) 向刀盘运动。机床坐标系 S_M 中,当工件移动到 $z_j = h_a$ (h_a 为大轮全齿高)时刀具和工件开始接触,切削开始,当 $z_j = 0$ 时切削结束。切削过程中,每齿进给量 $f_c = f / (nz_T)$,刀片节距角 $\theta_p = 2\pi / z_T$ 。

任意时刻 t ,刀片 j 的转角为

$$\begin{aligned} \theta_j(t) = 3\pi/2 + 2\pi nt - (j-1)\theta_p + 2k\pi \\ (j = 1, 2, \dots, z_T; k = 0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (9)$$

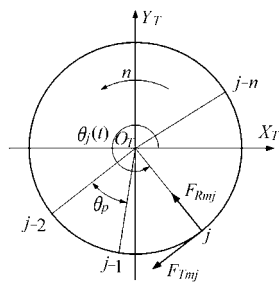


图3 刀片在刀盘上的安装位置

Fig.3 Position of blades on cutter head

j 取奇数对应外刀片,取偶数对应内刀片, k 刀盘转动的圈数。

工件沿 $-Z_M$ 轴进给距离为 $z_j(t)=ft$,床位 $z_j=h_a-z_j(t)$ 。

考虑到铣齿机主轴以及主轴支撑系统刚度大,忽略切削力造成的主轴弯曲对瞬时切削厚度的影响,同时刀片经过刃磨,忽略刀片磨损对铣削力的影响。瞬时铣削力受刀片初始径向、轴向安装误差、刀盘轴线与主轴回转中心线偏心误差的综合影响,表现为刀片工作刃和顶刃在机床上的径向和轴向相对于理论值的误差^[6],由实际测量确定。

$$\Delta h_w=(\Delta h_{w,1},\Delta h_{w,2},\cdots,\Delta h_{w,z_T}) \tag{10}$$

$$\Delta h_t=(\Delta h_{t,1},\Delta h_{t,2},\cdots,\Delta h_{t,z_T}) \tag{11}$$

其中 $\Delta h_{w,j}=r_{w,j}-r_{w,(j-2)}$ $\Delta h_{t,j}=r_{t,j}-r_{t,(j-2)}$

式中 $r_{w,j}$ ——工作刃径向跳动测量值

$r_{t,j}$ ——顶刃轴向跳动测量值

对于外刀片(j 取奇数):当 $0\leq z_j\leq h_a$,且 $2k\pi+\theta_{st}\leq\theta_j(t)\leq 2k\pi+\theta_{ex}$ 时,将 $(\theta_j(t),z_j)$ 代入方程(5)可求得 $u_{ej}(\theta_j(t),z_j)$ 。外刀片工作刃切削宽度: $b_{ew}(t)=u_{ej}(\theta_j(t),z_j)-u_{e0}(b_{ew}(t)>0$ 时表示刀片未切入工件; $b_{ew}(t)<0$ 时表示刀片切入工件),切削厚度为 $h_{ew}=2f_c\sin\alpha_e+\Delta h_{w,j}$ 。外刀片顶刃切削宽度: $b_{et}=S_b(S_b$ 为刀顶宽),切削厚度 $h_{et}=2f_c+\Delta h_{t,j}$ 。

对于内刀片(j 取偶数):当 $0\leq z_j\leq h_a$,且 $2k\pi+\theta_{st}\leq\theta_j(t)\leq 2k\pi+\theta_{ex}$ 时,将 $(\theta_j(t),z_j)$ 代入方程(5)可求得 $u_{ij}(\theta_j(t),z_j)$ 。内刀片工作刃切削宽度: $b_{iw}(t)=u_{ij}(\theta_j(t),z_j)-u_{i0}(b_{iw}(t)>0$ 表示刀片切入工件; $b_{iw}(t)<0$ 表示未切入工件),切削厚度为 $h_{iw}=2f_c\sin\alpha_i+\Delta h_{w,j}$ 。内刀片顶刃切削宽度: $b_{it}=S_b$,切削厚度 $h_{it}=2f_c+\Delta h_{t,j}$ 。

3 铣削力模型

根据文献[1]切削力模型,瞬时铣削力由大轮材料(20CrNiMo)的单位横截面切削力和瞬时切削面积决定。任意时刻 t ,刀片 j 的瞬时切向铣削力 F_{Tmj} 由工作刃切向铣削力 F_{Tmw} 和顶刃切向铣削力 F_{Tmt} 合成,可表示为

$$F_{Tmj}=F_{Tmw}+F_{Tmt} \tag{12}$$

$$F_{Tmw}=C_sb_{mw}(t)h_{mw} \tag{13}$$

$$F_{Tmt}=C_sb_{mt}(t)h_{mt} \tag{14}$$

式中 C_s ——单位横截面切削力

依据文献[1],可得

$$C_s=C_{s1}h_m^{-q}(1-0.01\gamma) \tag{15}$$

式中 C_{s1} ——工件材料的单位切削力,为横截面切削宽度和切削厚度均为1,并且刀片前角 $\gamma=0$ 时的切削力

q ——常数,与工件材料和切削方式有关

刀片 j 所受瞬时径向铣削力 F_{Rmj} 和瞬时轴向铣削力 F_{Amj} 可以表示为

$$F_{Rmj}=\phi_{TR}F_{Tmj} \tag{16}$$

$$F_{Amj}=\phi_{TA}F_{Tmj} \tag{17}$$

式中 ϕ_{TR} 、 ϕ_{TA} ——径向切削力和轴向切削力与切向切削力的比率

由图3可知,刀盘坐标系 S_T 中,刀片沿坐标轴所受的瞬时铣削力为

$$\begin{cases} F_{XT}=-F_{Tmj}\sin\theta_j(t)\mp F_{Rmj}\cos\theta_j(t) \\ F_{YT}=-F_{Tmj}\cos\theta_j(t)\pm F_{Rmj}\sin\theta_j(t) \\ F_{ZT}=F_{Amj} \end{cases} \tag{18}$$

经坐标变换,工件坐标系 S_2 中,工件沿坐标轴所受的瞬时铣削力为

$$\begin{cases} F_{X2}=F_{XT}\cos\delta_M-F_{ZT}\sin\delta_M \\ F_{Y2}=-F_{YT} \\ F_{Z2}=F_{XT}\sin\delta_M+F_{ZT}\cos\delta_M \end{cases} \tag{19}$$

式中 δ_M ——机床根锥角

4 切削力系数标定

快速标定铣削力系数的实验方法^[12]如图4所示,在刀具几何、工件材料和进给方向确定的情况下,改变每齿进给量和转速,进行一组切削实验,通过数据采集系统获得切削力实验数据。通过实验获得的平均切削力与理论上的平均切削力表达式来辨

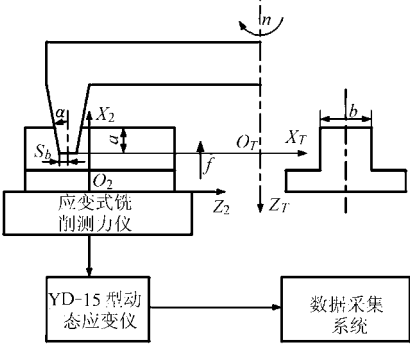


图4 切削力系数标定实验示意图

Fig.4 Schematic diagram of cutting force parameter calibrated experiments

识切削力系数。

刀具在有效接触区内($\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$)进行切削,瞬时铣削力在主轴旋转一周内进行积分,结果除以 2π 可得刀盘旋转一周的理论平均切削力为

$$\overline{F} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_p(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^{\frac{z_T}{2}} \int_{\theta_1}^{\theta_2} F_p(\theta) d\theta \quad (20)$$

其中 $P = (X_2, Y_2, Z_2)$

数据处理方法见文献[12]。

5 模拟程序与实验验证

为获得成形法铣齿任意时刻 t 的铣削力数据,采用 Matlab 编制了计算程序,程序流程如图 5 所示。

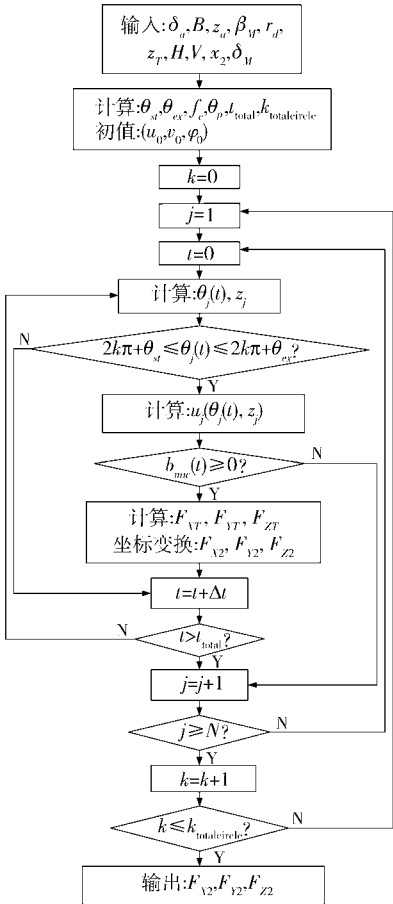


图 5 成形法铣削力模拟程序流程

Fig. 5 Flow chart for form milling force simulation procedure

选择一对准双曲面齿轮副的大轮进行验证实验,大轮结构参数,机床调整参数和刀盘参数如表 1~3 所示。

实验所用机床为 YK2180 型铣齿机。刀具为哈尔滨工具厂精切铣刀,内刀片、外刀片各 6 个。刀片为高速钢,涂层处理,前角 $\gamma = 20^\circ$ 。工件材料 20CrNiMo,正火,干切。工件按正确安装尺寸固定在应变式铣削测力仪上,测力仪的内部电桥受切削

表 1 准双曲面齿轮副轮坯参数

Tab. 1 Geometric parameters of spiral taper gear

参数	小轮	大轮	参数	小轮	大轮
齿数	8	41	面锥角 $\delta_a/(^\circ)$	18.23	76.93
大轮模数 m/mm		4.162	根锥角 $(^\circ)$	12.03	70.28
大轮齿宽 B/mm		25.00	面锥顶点到交错点距离 z_a/mm	11.48	-1.86
轴交角 $(^\circ)$		90	轮冠到交错点距离 $/\text{mm}$	81.15	21.72
大轮外锥距 R_e/mm		87.96	螺旋角 $\beta_M/(^\circ)$	50.00	26.82
节锥角 $(^\circ)$		75.93	全齿深 h_a/mm	8.85	8.59
外径 $/\text{mm}$	61.03	171.13	螺旋方向	LH	RH
齿根角 $(^\circ)$		5.65	安装距 $/\text{mm}$	52.50	86.00

表 2 大轮机床调整参数

Tab. 2 Machine tool settings of gear

参数	数值
机床根锥角 $\delta_M/(^\circ)$	68.87
水平轮位 x_2/mm	MD + 1.62
水平刀位 H/mm	33.48
垂直刀位 V/mm	72.55

注:MD 为大轮安装距。

表 3 精切刀盘参数

Tab. 3 Parameters of finishing cutter head

参数	数值
刀盘半径 r_d/mm	76.20
内、外刀片压力角 $\alpha/(^\circ)$	21.25
刀顶距 W/mm	2.54

力作用产生电压信号,经动态应变仪(CS-1A 型)放大,数据采集卡(PCI2000 型,采样频率:3 000 Hz)采集数据并处理。

工件坐标系 S_2 中铣削力仿真结果如图 6 所示。成形法加工螺旋锥齿轮大轮瞬时铣削力是刀盘转角 $\theta_j(t)$ 和床位 z_j 的函数。从图 6 仿真结果看,在整个切削过程中,铣削力呈脉冲型,力的幅值逐渐变大。

工件坐标系 S_2 中三向铣削力仿真结果与实验结果对比如图 7 所示。由图 7 可以看出:铣削力实验结果和仿真结果变化趋势相符。 X 、 Y 、 Z 3 个方向模拟结果与实验结果的相对误差分别为:7.8%、12.9%、6.5% 和 8.3%、11.6%、5.7%,说明所建铣削力模型具有一定精度。工件进给速度一定时,提高刀盘转速,切削力绝对值变小。

6 结束语

建立了成形法加工螺旋锥齿轮大轮瞬时铣削力的模型,编制了仿真程序。根据给定的大轮结构参

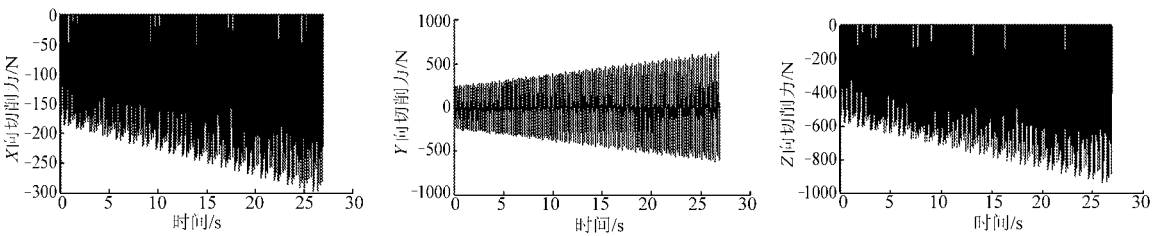


图 6 切削力仿真结果(刀盘转速 44.56 r/min,进给速度 20 mm/min,干切,高速钢涂层刀具)

Fig. 6 Curves of simulation result

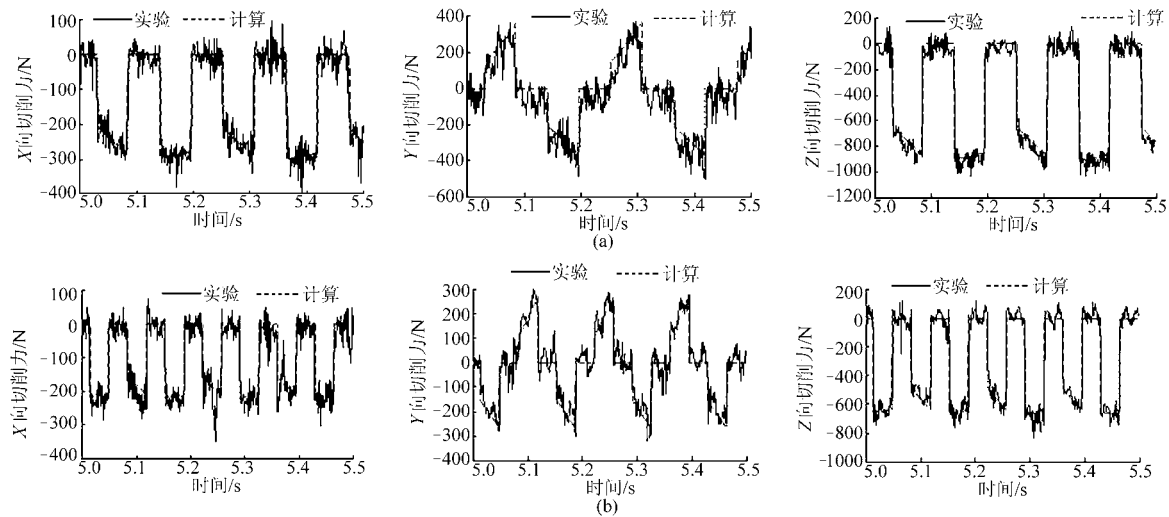


图 7 实验结果和计算结果变化曲线(进给速度 20 mm/min,干切,高速钢涂层刀具)

Fig. 7 Curves of experimental result and simulation result

(a) $n = 29.48 \text{ r/min}$ (b) $n = 44.56 \text{ r/min}$

数、刀盘参数、机床调整参数可以计算出不同切削量成形法加工螺旋锥齿轮大轮的切削力计算,为数控切齿时 X、Y、Z 3 个方向瞬时铣削力。模型适用于螺旋锥齿轮铣齿机的设计提供理论借鉴。

参 考 文 献

1 Heikkala J. Determining of cutting force components in face milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 52(1):1~8.

2 Li X P, Nee A Y C, Wong Y S, et al. Theoretical modeling and simulation of milling forces [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89~90:266~272.

3 Pradeep Kumar Baro, Suhas S Joshi, Kapoor S G. Modeling of cutting forces in a face-milling operation with self-propelled round insert milling cutter [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(7~8):831~839.

4 KorkutI, Donertas M A. The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling [J]. Materials and Design, 2007, 28(1):308~312.

5 Adolfsson C, SHL J E. Cutting force model for multi-toothed cutting processes and force measuring equipment for face milling [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1995, 35(12):1 715~1 728.

6 Andersson C, Andersson M, Stahl J E. Experimental studies of cutting force variation in face milling [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(1):67~76.

7 Antoniadis A, Vidakis N, Bilalis N. A simulation model of gear skiving [J]. Journal of Materials Processing Technology 2004, 146(2):213~220.

8 Sutherlad J W, Salisbury E J, Hoge F W. A model for the cutting force system in the gear broaching process [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1997, 37(10):1 409~1 421.

9 于春建,黄薇调,王亨雷,等. 基于 BP 神经网络的铣齿切削功率计算方法研究[J]. 工具技术,2008,42(4):62~65.

10 郭茜,李庆. 高速干式飞刀铣齿切削动力学模型及仿真研究[J]. 机械传动,2008,32(5):21~23.

11 曾韬. 螺旋锥齿轮设计与加工[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1989.

12 刘志新. 高速铣削过程动力学建模及其物理仿真研究[D]. 天津:天津大学,2006.