

变性法粗铣弧齿锥齿轮小轮铣削力模型

贾新杰¹ 邓效忠² 王 斌²

1. 西北工业大学, 西安, 710072 2. 河南科技大学, 洛阳, 471003

摘要:基于四轴数控铣齿机变性法加工弧齿锥齿轮小轮的几何原理和机床运动学原理,推导出粗铣小轮过程中切削层瞬时切削面积的计算公式。采用传统切削力模型,建立了变性法加工弧齿锥齿轮小轮的铣削力模型,编写了铣削力仿真程序,并设计了验证方案。结果表明:采用不同切削用量时,考虑了传动效率的主电机切削功率计算结果与主电机变频器输出功率测量结果幅值基本在同一区间范围内,时间间隔一致,从而间接证明铣削力模型的有效性。

关键词:弧齿锥齿轮;变性法;粗铣;铣削力模型

中图分类号: TG501.3 **DOI:** 10.3969/j.issn.1004-132X.2013.18.020

Rough Milling Force Model of Spiral Bevel Gear Using Modified-roll Method

Jia Xinjie¹ Deng Xiaozhong² Wang Bin²

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072

2. Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan, 471003

Abstract: Based on the modified-roll method geometry theory and 4-axis CNC machine kinematics principles, the instantaneous cutting area formulas of the spiral bevel pinion rough milling were deduced. According to the traditional milling force model, the spiral bevel pinion rough milling force model based on the modified-roll method were presented, the milling force simulation programs were composed and the experimental schemes were designed. The experimental results show that the amplitude of the main motor cutting power and the transducer output power are almost in the same interval and the time intervals are the same. And the rough milling force model herein can guarantee a certain precision.

Key words: spiral bevel gear; modified-roll method; rough milling; milling force model

0 引言

弧齿锥齿轮铣齿切削力研究是铣齿机主电机功率校核、关键零部件可靠性分析、切削参数优化、铣齿过程动态监控的基础。长期以来,国内外不少学者针对齿轮加工过程的切削力进行了研究。Antoniadis等^[1]建立了滚刀刮削直齿圆柱齿轮切削力模型。Sutherland等^[2]建立了拉内直齿的切削力模型。陈斌等^[3]针对圆盘成形铣刀铣削直齿圆柱齿轮的加工过程,分别建立了顺铣、逆铣时的切削力模型。文献[4]建立了成形法加工螺旋锥齿轮大轮的切削力模型。弧齿锥齿轮小轮数控加工过程中铣齿机各轴运动关系复杂,加工调整参数多,至今未见弧齿锥齿轮小轮铣齿过程切削力研究的相关文献。

数控铣齿机和传统铣齿机之间存在等效转换关系^[5-7]。本文针对文献[7]描述的四轴数控铣齿机变性法加工弧齿锥齿轮小轮的加工过程,依据其切齿几何原理和四轴铣齿机机床运动学原理,推导出粗切小轮时切削层瞬时切削面积与机床运

动参数间的关系,采用传统切削力模型,建立了变性法粗切弧齿锥齿轮小轮的切削力模型,并编写了铣削力计算程序。由于小轮铣削过程中刀盘、摇台和工件轴同时做旋转运动,直接采用测力仪测量铣削力不易进行,因此,本文采用对比主电机切削功率计算结果和铣齿机主电机变频器输出功率实测结果的方法,间接验证切削力模型的有效性。

1 四轴 CNC 铣齿机切齿原理

1.1 刀片产形面方程

如图1所示,刀盘坐标系 S_i 中,刀片切削刃旋转形成圆锥。切削刃 i 上任一点的位置向量为(为简化模型,忽略刀尖圆弧)

$$\mathbf{r}_{ti}(s, \theta) = \begin{pmatrix} (r_c + s \sin \alpha) \cos \theta \\ (r_c + s \sin \alpha) \sin \theta \\ -s \cos \alpha \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

法向量为

$$\mathbf{n}_{ti} = \begin{pmatrix} -\cos \alpha \cos \theta \\ -\cos \alpha \sin \theta \\ \pm \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (2)$$

收稿日期: 2013-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075121)

式中, (s, θ) 为确定刀盘工作刃上动点坐标的参数; r_c 为刀尖半径; α 为刀片压力角, α 取“+”表示外切削刃, 取“-”表示内切削刃。

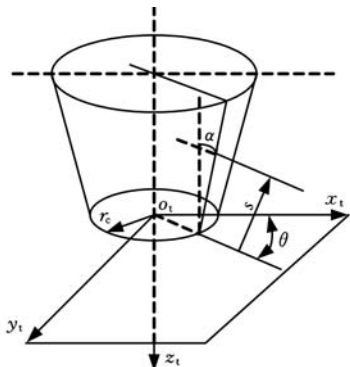


图 1 刀盘坐标系

1.2 弧齿锥齿轮小轮面锥方程

如图 2 所示, 坐标系 S_a 中, 小轮面锥方程为

$$r_a(u, \beta) = \begin{bmatrix} u \cos \delta_a \\ (r_a - u \sin \delta_a) \cos \beta \\ (r_a - u \cos \delta_a) \sin \beta \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中, (u, β) 为确定小轮面锥上动点的参数, $0 \leq u \leq B$ (B 为小轮齿面宽); r_a 为小轮外半径; δ_a 为面锥角。

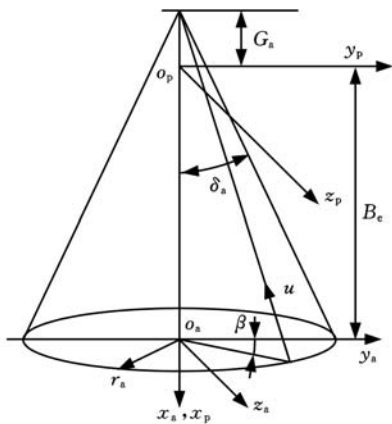


图 2 弧齿锥齿轮小轮坐标系

1.3 四轴 CNC 铣齿机变性法加工

图 3 所示为四轴数控铣齿机坐标系, 与传统机床的等效转换公式^[7] 为

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \gamma_m \\ x_m^{(oh)} &= D_{sr} \cos q + (x_e^{(od)} - \Delta A) \cos \gamma_m \\ y_m^{(oh)} &= -D_{sr} \sin q + E_m \\ z_m^{(oh)} &= (x_e^{(od)} - \Delta A) \sin \gamma_m - \Delta B \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中, γ_m 为传统机床轮坯安装角; D_{sr} 为传统机床径向刀位; q 为传统机床角向刀位; $x_e^{(od)}$ 为 CNC 机床上轮坯安装距(常量); ΔA 为传统机床水平轮位; E_m 为传统机床垂直轮位; ΔB 为传统机床床位。

小轮坐标系 S_p 中, 刀片工作刃包络形成小轮粗切齿面。在任意时刻 t , 切削刃 i 形成的锥面(产形面) Σ_i 为

$$r_{pi}(s, \theta, \phi_t, \phi_p) = M_{pt} r_{ti}(s, \theta) \tag{5}$$

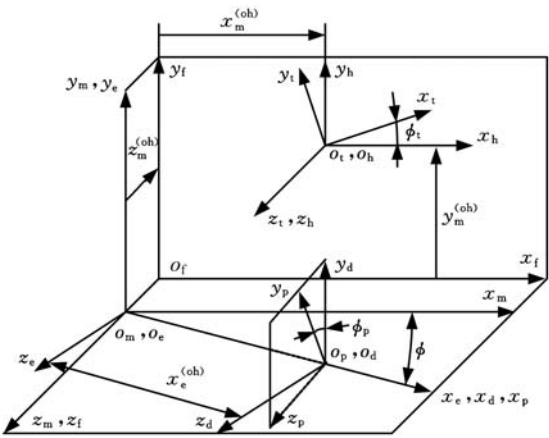


图 3 四轴数控铣齿机坐标系

$$M_{pt} = M_{pd}(\phi_p) M_{de} M_{em} M_{mh} M_{ht}(\phi_t)$$

式中, ϕ_t 为刀盘转角; ϕ_p 为小轮转角; M_{pt} 、 M_{pd} 、 M_{de} 、 M_{em} 、 M_{mh} 、 M_{ht} 分别为从坐标系 S_t 到 S_p 、 S_d 到 S_p 、 S_e 到 S_d 、 S_m 到 S_e 、 S_h 到 S_m 、 S_t 到 S_h 的位置向量变换矩阵。

对应的切削刃的法线为

$$n_{pi}(s, \theta, \phi_t, \phi_p) = L_{pt} n_{ti}(s, \theta) \tag{6}$$

$$L_{pt} = L_{pd}(\phi_p) L_{de} L_{em} L_{mh} L_{ht}(\phi_t)$$

式中, L_{pt} 、 L_{pd} 、 L_{de} 、 L_{em} 、 L_{mh} 、 L_{ht} 分别为 M_{pt} 、 M_{pd} 、 M_{de} 、 M_{em} 、 M_{mh} 、 M_{ht} 的三阶主子式。

展成小轮齿面时, 产形面和被加工齿面之间的啮合方程^[9] 为

$$n_d^{(M)} \cdot v_d^{(p)} = 0 \tag{7}$$

式中, $n_d^{(M)}$ 为坐标系 S_d 中产形面 Σ_i 的法线向量; $v_d^{(p)}$ 为坐标系 S_d 中产形面 Σ_i 与被加工小轮齿面之间的相对速度。

坐标系 S_p 中, 小轮面锥的方程为

$$r_{pa}(u, \beta) = M_{pa} r_a(u, \beta) \tag{8}$$

式中, M_{pa} 为从坐标系 S_a 到 S_p 的位置向量变换矩阵。

坐标系 S_p 中, 产形面 Σ_i 与小轮面锥的交线为

$$\begin{aligned} L_{pi}(s, \theta, \phi_t, \phi_p, u, \beta) &= \\ r_{pi}(s, \theta, \phi_t, \phi_p) - r_{pa}(u, \beta) &= 0 \end{aligned} \tag{9}$$

式中, L_{pi} 为产形面 Σ_i 与小轮面锥的交线方程。

2 四轴 CNC 铣齿机切削参数

四轴数控铣齿机上变性法粗铣弧齿锥齿轮小轮的切削参数包括: 展成插补进给速度 v , 切削速度 v_c , 滚比 m_{cp} , 摇台转角范围 $\phi_p \in [\phi_s, \phi_e]$, 摇台每度分步长数 n 。

由此可得刀盘角速度为

$$\omega_t = v_c / r_c \tag{10}$$

展成单个齿摇台总的分度数为

$$N_c = n(\phi_e - \phi_s) \tag{11}$$

实际加工中, 刀片工作刃旋转形成的锥面的母线被离散为 N 条切削刃(刀片)。刀盘相邻两条切削刃之间的夹角为

$$\theta_p = 2\pi / N \tag{12}$$

工件轴和摇台以滚比(m_{cp}) 做展成运动。设在切削初始位置,坐标轴 x_i 与切削刃重合,即初始位置时 $\theta_0 = 0^\circ$ 。在任意时刻 t ,刀片切削刃 i 转角为

$$\theta_{it}(t) = \theta_i + \omega_i t \tag{13}$$
$$\theta_i = \theta_0 - (i-1)\theta_p \quad i = 1, 2, \dots, N$$

摇台角为

$$\phi_c(t) = \phi_s + k(\phi_e - \phi_s)/N_c \tag{14}$$

式中, k 为摇台第 k 次分度, $0 \leq k \leq N_c$ 。

变性法加工弧齿锥齿轮小轮齿面时滚比 m_{cp} 为定值,可得小轮转角为

$$\phi_p(t) = \phi_{p0} + \phi_c(t)/m_{cp} \tag{15}$$

式中, ϕ_{p0} 为小轮初始转角。

3 小轮粗切过程瞬时切削面积计算

粗切开始时,滑台拖动工件箱以快进速度移动;到分度后退位置时,以进给速度 v 继续运动;到分度后退位置一半时,以进给速度 $v/2$ 运动;当滑台进给到粗切床位时停止。然后展成运动开始,直到切出整个齿槽。

切削层瞬时切削面积求解方法如下。

对于外刀片(α 取“+”),在任意时刻 t ,切削刃 i 对应的角度 θ_{it} 由式 (13) 确定, $t + 2\Delta t$ ($\Delta t = \theta_p/\omega_t$) 时刻,即刀盘转过 $2\theta_p$ 时,内刀片 $i+2$ 运动到切削刃 i 的位置,如图 4 所示。联立式 (5) ~ 式 (7) 及式 (9) ~ 式 (15),即可解得 (s_i, u_i, β_i) ,当 $s_i < 0$ 时表示刀片未切入工件,当 $s_i = 0$ 时表示刀片开始接触工件,当 $s_i > 0$ 且 $0 \leq u_i \leq B$ 时表示刀片切入工件。 $\angle B_i A_i C_i$ 由下式确定:

$$\angle B_i A_i C_i = \arccos \frac{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_{i+2\Delta t}}{|\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_{i+2\Delta t}|} \tag{16}$$

由于 $\angle B_i A_i C_i$ 很小,外刀片的瞬时切削面积可以近似表示为

$$A_{ii} = \frac{1}{2} s_i^2 \sin \angle B_i A_i C_i \tag{17}$$

对于内刀片(α 取“-”),从时刻 t 开始,刀盘转过 θ_p 时,外刀片 $i+1$ 经过切削刃 i 的位置;转过 $3\theta_p$ 时,外刀片 $i+3$ 到达切削刃 i 的位置。联立式 (6)、式 (7)、式 (9) ~ 式 (15),可解得 (s_i, u_i, β_i) 。当 $s_i < 0$ 时表示刀片未切入工件,当 $s_i = 0$ 时表示刀片开始接触工件,当 $s_i > 0$ 且 $0 \leq u_i \leq B$ 时表示刀片切入工件。

由于铣削弧齿锥齿轮时“摇台”和工件轴的滚比为常数,所以有

$$\angle N_i M_i Q_i = \angle B_i A_i C_i \tag{18}$$

由此可得内刀片的瞬时切削面积:

$$A_{oi} = \frac{1}{2} s_i^2 \sin \angle N_i M_i Q_i \tag{19}$$

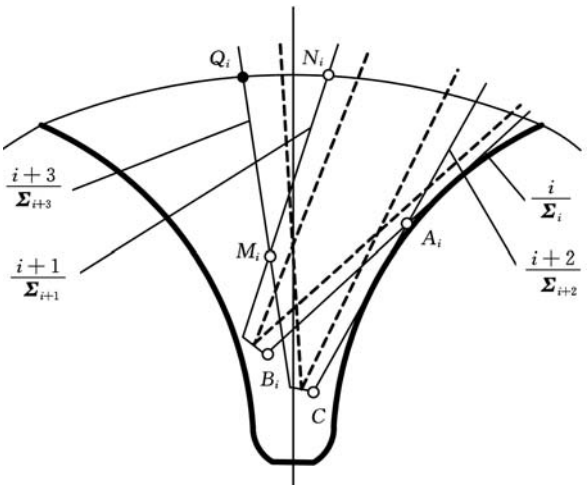


图 4 粗切加工示意图

4 切削力模型

本文采用经典切削力模型,刀盘切向切削力由工件材料的单位切削力和瞬时切削面积确定^[8]:

$$F_T(t) = C_F A_{ki} \quad k = (i, o) \tag{20}$$

式中, $F_T(t)$ 为瞬时切向切削力; C_F 为单位面积切削力。

切向切削力消耗的切削功率为

$$P_c(t) = F_T(t) v_c \tag{21}$$

主电机切削功率为

$$P(t) = P_c(t)/\eta \tag{22}$$

式中, η 为铣齿机传动效率。

5 实验验证

为获得在任意时刻 t 变性法粗铣弧齿锥齿轮小轮的铣削力数据,采用 MATLAB 编制了计算程序。程序初值确定方法参见文献[9]。

由于小轮粗切时摇台与工件轴间做展成运动,故直接测量切削力存在困难。本文采用间接测量法,即测量切削过程中主电机变频器的输出功率,与计算所得的主切削功率进行对比,以验证所建切削力模型的有效性^[10]。

选择一对弧齿锥齿轮的小轮进行验证实验,小轮轮坯参数、机床调整参数、刀盘参数如表 1 ~ 表 3 所示。

表 1 小轮轮坯参数

齿数	18
模数 (mm)	7
旋向	左
螺旋角 ($^\circ$)	35
平均压力角 ($^\circ$)	20
面锥角 δ_a ($^\circ$)	38.12
齿宽 B (mm)	36
后轮冠半径 r_a (mm)	69.232
小轮大端测量外锥距 B_e (mm)	110.554

表 2 机床调整参数

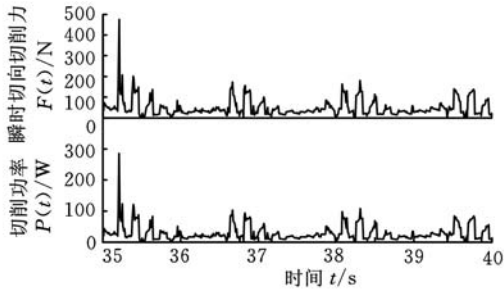
机床安装角 $\gamma_m(^{\circ})$	30.8
相当摇台摆角 $[\phi_s, \phi_e](^{\circ})$	[0, 40]
摇台每度分步长数 n	4
角向刀位 $q(^{\circ})$	-75.77
径向刀位 $D_{sr}(mm)$	98.236
水平轮位 $\Delta A(mm)$	0
垂直轮位 $E_m(mm)$	0
床位 $\Delta B(mm)$	0
CNC 机床上轮坯安装距 $x_e^{(od)}(mm)$	237.863
小轮初始转角 $\phi_{p0}(^{\circ})$	0
滚比 m_{cp}	1.799 417

表 3 刀盘参数

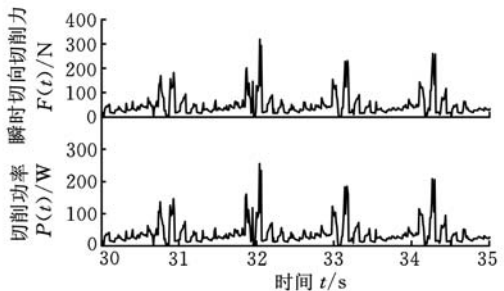
刀盘半径 $r_c(mm)$	114.6
理论错刀距 $W(mm)$	3.05
刀片总数 N	16
刀片压力角 $\alpha(^{\circ})$	18(外刀片)
	-22(内刀片)

实验在 YK2180M 型铣齿机上进行,主电机额定功率为 11kW。刀具为哈尔滨工具厂粗切刀盘,内刀片、外刀片各 8 个。刀片为高速钢,前角 $\gamma=20^{\circ}$ 。工件材料为 20CrNiMo,正火处理。冷却方式为油冷。铣齿机所用变频器为安川变频器(H1000 型),变频器输出功率信号端子输出(-10~10V)电压信号,对应输出功率(0~变频器设定的主电机额定功率)。数据采集卡(PCI2000 型,采样频率为 2000Hz)采集数据并处理。

刀盘坐标系 S_i 中,瞬时切向切削力与主电机切削功率计算结果如图 5 所示(局部结果)。变频器输出功率测量结果如图 6 所示。

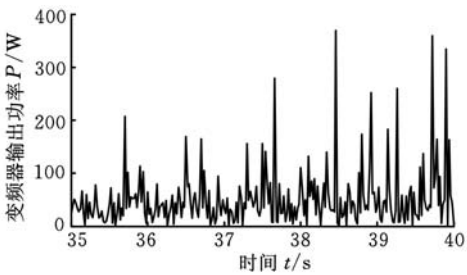


(a) $v_c=32.318m/min$

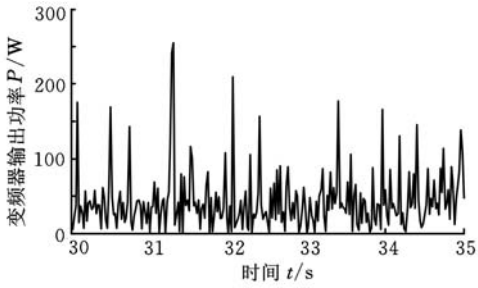


(b) $v_c=43.09m/min$

图 5 瞬时切向切削力与主电机切削功率计算结果



(a) $v_c=32.32m/min$



(b) $v_c=43.09m/min$

图 6 变频器输出功率测量结果

对比图 5 和图 6 可以看出:实测结果幅值变化显得杂乱些,这是由于理论计算时没有考虑刀片的轴向、径向回转误差,而实验时这个误差是客观存在的。图 5 和图 6 中相对应的主电机切削功率计算结果与变频器输出功率测量结果幅值基本上在同一区间范围,时间间隔一致,这间接证明了所建立的切削力模型的有效性。

6 结语

本文建立了变性法加工弧齿锥齿轮小轮瞬时铣削力模型,编制了计算程序。计算程序根据给定的小轮结构参数、刀盘参数、机床调整参数、切削加工参数可以对小轮粗铣过程瞬时切削力进行仿真。该铣削力模型可以为铣齿机设计时主电机功率选择、关键部件可靠性设计时动态载荷设定、铣齿过程铣削力实时监控时阈值选择等提供理论依据。

参考文献:

[1] Antoniadis A, Vidakis N, Bilalis N. A Simulation Model of Gear Skiving[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146(2): 213-220.

[2] Sutherland 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): 1409-1421.

[3] 陈斌,黄筱调,洪荣晶,等. 高效盘形齿轮铣刀切削力的研究[J]. 机床与液压, 2009, 37(11): 4-6.

(下转第 2523 页)

- bration and Quality Tests [J]. SAE Paper, 2000-01-0702.
- [5] 王化吉, 宗长富, 管欣, 等. 基于模糊层次分析法的汽车操纵稳定性主观评价指标权重确定方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 83-90.
Wang Huaji, Zong Changfu, Guan Xin, et al. Method of Determining Weights of Subjective Evaluation Indexes for Car Handling and Stability Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 83-90.
- [6] 滕继东, 项梦杰, 李苏, 等. 改进模糊层次分析法确定地质灾害危险性评价指标权重的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(1): 22-23.
Teng Jidong, Xiang Mengjie, Li Su, et al. Study on Confirming the Weights of Risk Evaluation Indexes in Geological Disasters by Improved Fuzzy Analytical Hierarchy Process[J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2008, 36(1): 22-23.
- [7] 康钦容, 唐建新, 张卫中. 改进模糊层次分析法在滑坡治理方案优化中的应用[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2010, 33(9): 98-103.
Kang Qinrong, Tang Jianxin, Zhang Weizhong. Application of Improved FAHP in Schemes Optimization about Landslide Treatment[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2010, 33(9): 98-103.
- [8] Matsushita A, Takanami K, Takeda N, et al. Subjective Evaluation and Vehicle Behavior in Lane-change Maneuvers[J]. SAE Paper, 800845.
- [9] 宾光富, 周元, Balbir S. Dhillon. 基于 Fuzzy-AHP 的机械设备多特征参数健康状态综合评价研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(20): 2487-2492.
Bin Guangfu, Zhou Yuan, Balbir S. Dhillon. Multi Feature Parameters Health State Evaluation of Mechanical Equipment Based on Fuzzy-AHP Methodology[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(20): 2487-2492.
- [10] 王正如, 梁晋, 王立忠, 等. 基于模糊综合评价的车身曲面品质分析[J]. 中国机械工程, 2011, 22(6): 748-751.
Wang Zhengru, Liang Jin, Wang Lizhong, et al. Study on Quality Evaluation of Automobile Surfaces Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(6): 748-751. (编辑 陈 勇)
- (上接第 2518 页)
- Chen Bin, Huang Xiaodiao, Hong Rongjing, et al. Study on the Milling Force of Disk Gear Milling Cutter[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(11): 4-6.
- [4] 贾新杰, 邓效忠, 苏建新. 成形法加工螺旋锥齿轮铣削力模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 268-272.
Jia Xinjie, Deng Xiaozhong, Su Jianxin. Milling Forces Model of Spiral Taper Gear Using Form Milling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 268-272.
- [5] 张艳红, 吴连银, 魏洪钦, 等. 刀倾法机床调整参数转化为 Free-Form 型机床调整参数的原理[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(5): 782-784.
Zhang Yanhong, Wu Lianyin, Wei Hongqin, et al. On the Theory of Transformation Machine Setting Parameters form Cutter-Tilt Milling Machine to Free-Form Milling Machine[J]. Mechanical Science and Technology, 2000, 19(5): 782-784.
- [6] 魏冰阳, 任东锋, 方宗德, 等. 传统机床与 Free-Form 型机床运动的等效转换[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(4): 425-428.
Wei Bingyang, Ren Dongfeng, Fang Zongde, et al. Study on Kinematics Equivalent Transformation from Traditional Machine Tools to Free-Form Ones[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(4): 425-428.
- [7] 张华, 邓效忠. 四轴数控螺旋锥齿轮铣齿机变性法铣齿研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(14): 1652-1655.
Zhang Hua, Deng Xiaozhong. Modified-roll Method Study on 4-axis CNC Spiral Bevel Gear Machine [J]. China Mechanical Engineer, 2007, 18(14): 1652-1655.
- [8] Heikkala J. Determining of Cutting Force Components in Face Milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 52(1): 1-8.
- [9] 田行斌. 弧齿锥齿轮啮合质量的计算仿真和控制[D]. 西安: 西北工业大学, 2000.
- [10] Litvin F L. Gear Geometry and Applied Theory [M]. New York: Prentice Hall Inc., 1994. (编辑 陈 勇)

作者简介: 赵又群, 男, 1968 年生. 南京航空航天大学能源与动力学院教授、博士研究生导师. 主要研究方向为车辆系统动力学. 发表论文 130 篇. 刘英杰, 男, 1982 年生. 南京航空航天大学能源与动力学院博士研究生.

作者简介: 贾新杰, 男, 1972 年生. 西北工业大学机电学院博士研究生. 主要研究方向为螺旋锥齿轮数字化制造技术. 发表论文 5 篇. 邓效忠(通信作者), 男, 1957 年生. 河南科技大学机电学院教授, 西北工业大学机电学院博士研究生导师. 王 斌, 男, 1970 年生. 河南科技大学机电学院副教授.