

加工和安装误差对无侧隙蜗杆传动 接触线及齿廓的影响

邓星桥, 向中凡, 王进戈

(西华大学机械工程与自动化学院, 610039, 成都)

摘要: 在具有加工和安装误差的情况下, 为了研究各蜗杆参数对无侧隙双滚子包络环面蜗杆的齿廓及蜗杆齿面接触线的影响规律, 建立了包含加工误差和安装误差的蜗杆传动啮合函数, 建立了蜗杆齿面接触线及蜗杆齿廓方程, 利用三维建模技术分析蜗杆、蜗轮轴交角误差, 中心距误差, 蜗杆轴向窜动误差, 蜗轮滚子齿距角误差, 砂轮滚子偏距误差, 转角误差等对蜗杆齿廓的影响, 同时分析了在误差作用下蜗杆齿面接触线发生的变化, 并进行了运动学仿真。研究表明: 转角误差、砂轮滚子齿距角误差达 0.5° 时对蜗杆齿廓影响较为明显, 即容易产生卡死现象; 当蜗杆轴交角误差达 0.5° 时, 整个蜗杆齿廓产生了严重变形, 且蜗杆轴断面变为椭圆形, 极易发生蜗轮轮齿折断现象; 其他误差在 1 mm 以内时对齿廓及齿接触线的影响较小。

关键词: 无侧隙; 双滚子包络环面蜗杆; 接触线分析; 齿廓; 三维建模

中图分类号: TH132.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)02-0111-06

Effects of Errors on Tooth Profile and Contact Curve of Non-Backlash Double-Roller Enveloping Hourglass Worm

DENG Xingqiao, XIANG Zhongfan, WANG Jingge

(School of Mechanical Engineering and Automation, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: For a new non-backlash double-roller enveloping hourglass worm, the tooth profile and contact curve equation, which involves several errors of worm parameters, was established to investigate the effects of the errors on the worm tooth profile. Technology of three-dimensional modeling was chosen to analyze the influence law of the errors. The influences of the setover error of roller, the error of axial float of worm, the centre distance error, the error of axial movement, the angular pitch error and the error of shaft angle on the tooth profile were discussed, the contact curve was analyzed, and the kinematic simulation was carried out. The results show that the axial movement error, the angular pitch error and the error of shaft angle reaching 0.5° exert clear influence on the tooth profile of worm; especially, when the error of shaft angle gets 0.5° the tooth profile of worm is heavily deformed and the axis cross-section becomes ellipse; however, the other errors have lighter influence on the tooth profile of worm as the values are limited within 1.0 mm.

Keywords: non-backlash; double-roller enveloping hourglass worm; contact-curve analysis; tooth profile; three-dimensional modeling

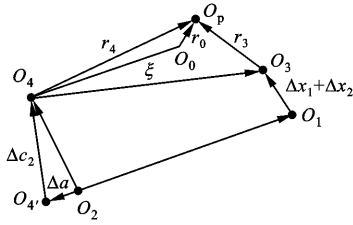


图4 径矢关系

根据文献[8-13],为便于描述,首先考虑 Δa 、 Δd 、 Δc_2 、 $\Delta \beta$ 4 个误差参数, $\Delta \varphi_2$ 、 $\Delta \alpha$ 在这里暂取为 0, 可得如下相关公式

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{v}^{3'4'} &= v_{3'}^{3'4'} \mathbf{e}_1 + v_{4'}^{3'4'} \mathbf{e}_2 + v_n^{3'4'} \mathbf{n} \\ v_1^{3'4'} &= -B_1 \sin \alpha \cos \theta + B_2 \cos \alpha \cos \theta - B_3 \sin \theta \\ v_2^{3'4'} &= -B_1 \cos \alpha - B_2 \sin \alpha \\ v_n^{3'4'} &= -B_1 \sin \alpha \sin \theta + B_2 \cos \alpha \sin \theta + B_3 \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{v}^{3'4'}$ 为蜗杆蜗轮相对速度矢量; $v_1^{3'4'}$ 、 $v_2^{3'4'}$ 、 $v_n^{3'4'}$ 为 $\mathbf{v}^{3'4'}$ 分别在 $\mathbf{e}_1$ 、 $\mathbf{e}_2$ 、 $\mathbf{n}$ 方向的分量, 其中系数为

$$\begin{aligned} B_1 &= -(c_2 + x_0 - N) \cos \beta \cos \varphi_2 - (\sin \beta - i_{21})(b_2 + y_0 \cos \alpha - z_0 \sin \alpha) + M \sin \beta \\ B_2 &= (c_2 + x_0 - N) \cos \beta \sin \varphi_2 + (\sin \beta - i_{21})(a_2 - y_0 \sin \alpha - z_0 \cos \alpha) - L \sin \beta \\ B_3 &= -\cos \beta \sin \varphi_2 (b_2 + y_0 \cos \alpha - z_0 \sin \alpha - M) + (a_2 - y_0 \sin \alpha - z_0 \cos \alpha - L) \cos \beta \cos \varphi_2 \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} L &= (A - \Delta a) \cos \varphi_2 - (\Delta x_1 + \Delta x_2) \cos(\Delta \beta) \sin \varphi_2 \\ M &= -(A - \Delta a) \sin \varphi_2 - (\Delta x_1 + \Delta x_2) \cos(\Delta \beta) \cos \varphi_2 \end{aligned}$$

$$N = (\Delta x_1 + \Delta x_2) \sin(\Delta \beta) - \Delta c_2$$

$\omega^{3'4'}$ 为蜗杆蜗轮相对角速度矢量, 表示如下

$$\left. \begin{aligned} \omega^{3'4'} &= \omega_1^{3'4'} \mathbf{e}_1 + \omega_2^{3'4'} \mathbf{e}_2 + \omega_n^{3'4'} \mathbf{n} \\ \omega_1^{3'4'} &= \sin \alpha \cos \theta \sin \varphi_2 - \cos \alpha \cos \theta \cos \varphi_2 + i_{21} \sin \theta \\ \omega_2^{3'4'} &= \cos \alpha \sin \varphi_2 + \sin \alpha \cos \varphi_2 \\ \omega_n^{3'4'} &= \sin \alpha \sin \varphi_2 - \cos \alpha \sin \theta \cos \varphi_2 - i_{21} \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\omega_1^{3'4'}$ 、 $\omega_2^{3'4'}$ 、 $\omega_n^{3'4'}$ 为相对速度矢量 $\omega^{3'4'}$ 分别在 $\mathbf{e}_1$ 、 $\mathbf{e}_2$ 、 $\mathbf{n}$ 方向的分量, 其中该传动的啮合函数为

$$\begin{aligned} \Phi &= v_n^{3'4'} = M_1 \cos \varphi_2 - M_2 \sin \varphi_2 - M_3 \quad (5) \\ M_1 &= (z_4 - \Delta d \sin \beta + \Delta c_2) \sin \alpha \sin \theta \cos \beta + x_4 \cos \theta \cos \beta + \Delta d \cos \beta \sin \beta \sin \alpha \sin \theta + (A - \Delta a) \cos \alpha \sin \beta \sin \theta \\ M_2 &= -(z_4 - \Delta d \sin \beta + \Delta c_2) \cos \beta \cos \alpha \sin \theta + \end{aligned}$$

$$y_4 \cos \beta \cos \theta - (A - \Delta a) \sin \alpha \sin \beta \sin \theta -$$

$$\Delta d \cos \beta \sin \beta \cos \alpha \sin \theta$$

$$M_3 = -(\sin \beta - i_{21})(y_4 \sin \alpha + x_4 \cos \alpha) \sin \theta + (A - \Delta a) \cos \beta \cos \theta$$

由式(5)可得

$$\theta = F(u, \varphi_2) \quad (6)$$

根据式(1)~式(6)可得蜗杆齿面接触螺旋线方程为

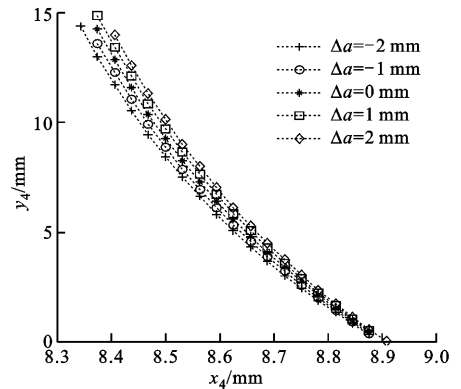
$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_0 &= x_0 \mathbf{i}_0 + y_0 \mathbf{j}_0 + z_0 \mathbf{k}_0 \\ \theta &= F(u, \varphi_2) \\ \varphi_2 &= i_{21} \varphi_1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当用 $\varphi_2' = \varphi_2 + \varphi_2'$ 、 $\alpha' = \alpha + \alpha'$ 替代式(6)中的 α 、 φ_2 时, 即可得包含有式(1)中所有 ΔE 参数的蜗杆齿面螺旋线方程. 在式(7)中, 当 φ_2 取一定值时即可得到一条瞬时接触线, 将此接触线转换到蜗轮轮齿所在的 x_4 - y_4 平面(母面)中, 可得到母面接触线方程为

$$x_4 = R\theta; y_4 = u; \varphi_2 = \text{const} \quad (8)$$

2 误差对蜗杆接触线及齿廓的影响分析

选取 1 组参数对蜗杆进行分析, 其中 $A = 125$ mm, $Z_1 = 1$, $Z_2 = 25$, $R = 5$ mm, $c_2 = 5.5$ mm, 利用式(8)计算得到蜗杆传动中的齿面接触线, 并利用 Pro/E 软件拟合形成蜗杆齿面, 各误差参数对蜗杆接触线及齿廓的影响分别如图 5~图 10 所示.

图5 Δa 对接触线的影响

从图 5 可以看出, 当 Δa 为负时, 蜗杆接触线变短, 且集中分布在母面中段, 当 Δa 为正时, 蜗杆接触线变长, 但偏离的距离都不大. 从图 6 也可以看出, 当误差为正时的齿槽深度大于误差为负时的齿槽深度, 利用 Pro/E 软件中的间隙分析工具分析得出, 具有误差的蜗杆齿面与无误差时的蜗杆齿面贴合较好, 蜗杆轴断面未发生明显变形. 因此, 中心距

误差改变了蜗杆传动中接触线的接触长度,但对蜗杆齿廓形状没有大的影响.

从图 7 中可以看出,转角误差对蜗杆齿面接触线影响较大,接触线发生了较大的偏移.通过软件分析得出(如图 8c),当转角达到 1° 时,齿廓在轴向位移量超过 1.5 mm ,但蜗杆轴断面未发生变形.因此,转角误差主要引起蜗杆齿廓在轴向的左、右移动及接触线的偏移.从图 9 及图 10 中可以看出,齿距角误差也引起了蜗杆齿廓在轴向的左、右移动及接触线的偏移,但对接触线分布的影响没有转角误差的影响大.从图 11 及图 12 可以看出,具有误差的蜗杆齿廓与无误差的蜗杆齿廓紧密贴合, c_2 对蜗杆齿廓影响不大,对接触线的分布影响也不大.图 13 及图 14 的结果显示,轴向窜动误差 Δd 对接触线的影响较大,但对蜗杆齿廓没有大的影响.

图 15 及图 16 表示,轴交角误差对蜗杆齿廓及接触线的影响都相当大,误差齿面与无误差齿面不能贴合,两齿面间的间隙较大,且蜗杆的轴断面变成椭圆形,与无误差时蜗杆轴断面为圆柱形相差较大,完全改变了环面蜗杆的形状.

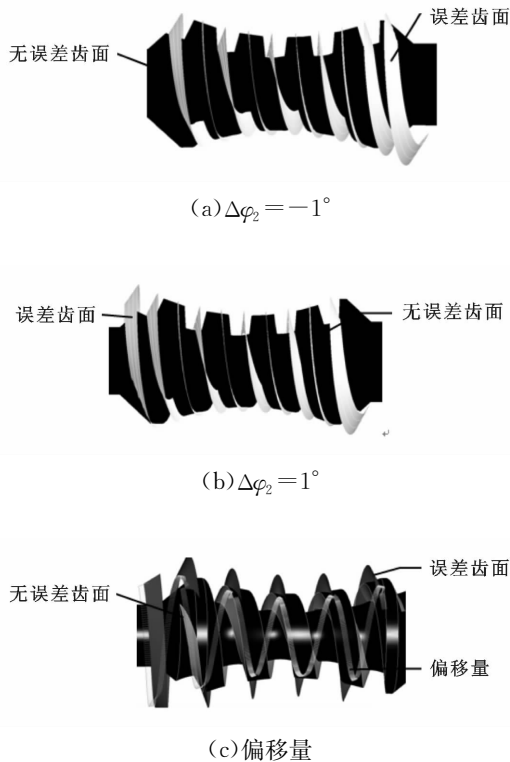


图 8 转角误差对蜗杆齿廓的影响

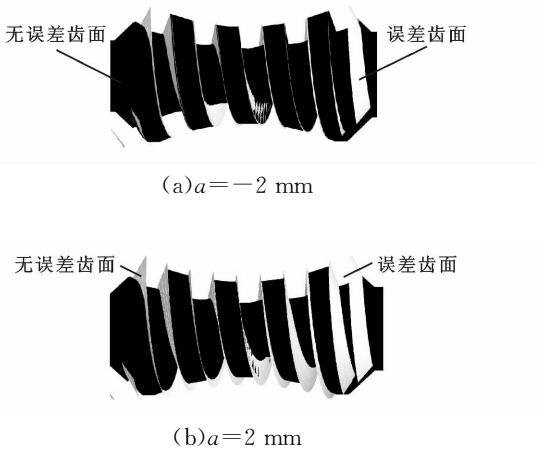


图 6 中心距误差对蜗杆齿廓的影响

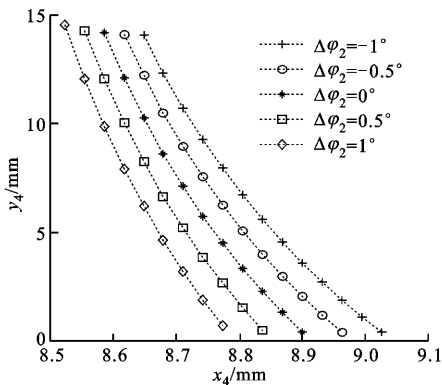


图 7 $\Delta\varphi_2$ 对接触线的影响

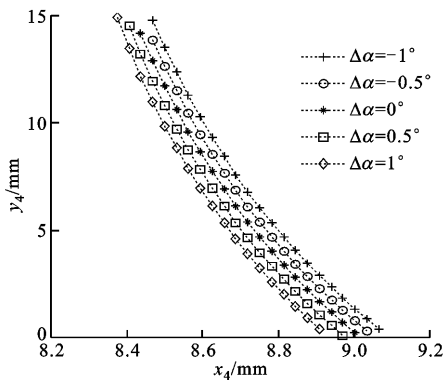


图 9 $\Delta\alpha$ 对接触线的影响

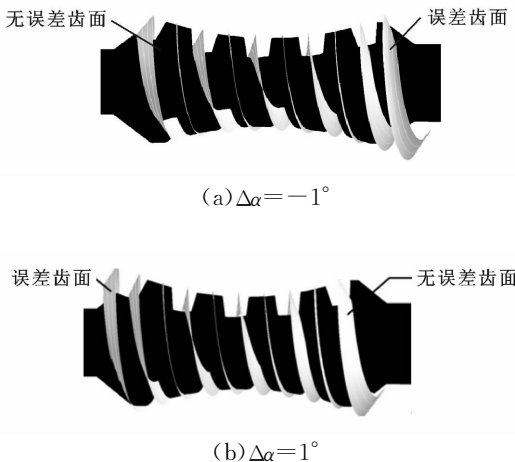


图 10 齿距角误差对蜗杆齿廓的影响

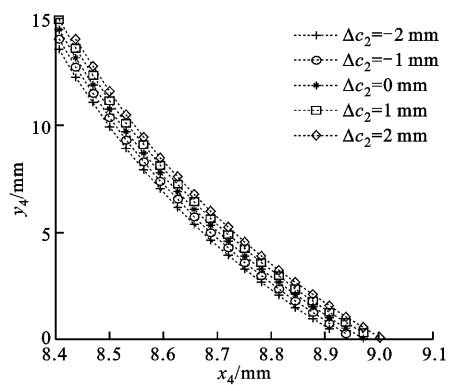


图 11 Δc_2 对接触线的影响



图 12 $\Delta c_2 = \pm 2$ mm 时蜗轮滚子偏距误差对齿廓的影响

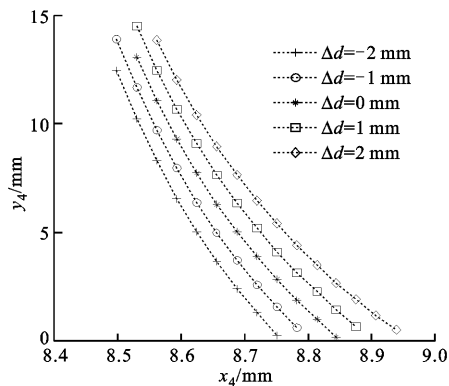


图 13 Δd 对接触线的影响



(a) $\Delta d = -2$ mm



(b) $\Delta d = 2$ mm

图 14 蜗杆、蜗轮轴向窜动误差对齿廓的影响

从以上分析结果可知,转角误差和齿距角的误差引起了蜗杆齿面接触位置的左、右偏移,即对蜗杆

传动啮合点的影响较大,这样非常容易导致蜗杆的啮合性能整体下降,以及在传动中蜗轮卡死甚至轮齿折断的现象,而轴交角的误差一旦超过 0.5° 就完全改变了原有蜗杆的齿廓形状,其啮合点也发生了极大的偏移,理论上如果要想正常地传递动力或扭矩应该是非常困难的。

为了进一步验证以上的研究结果,利用 Pro/E 软件的运动学仿真功能对蜗杆在各种误差状态下的运动进行了运动学仿真,结果见图 17。

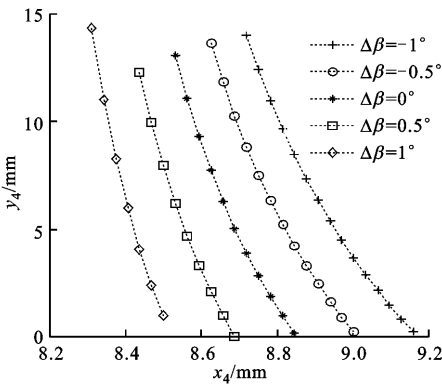
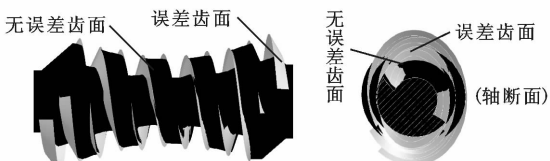
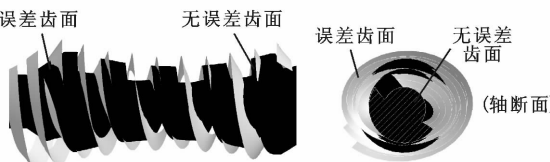


图 15 $\Delta\beta$ 对接触线的影响



(a) $\Delta\beta = -0.5^\circ$



(b) $\Delta\beta = 0.5^\circ$

图 16 轴交角误差对齿廓的影响

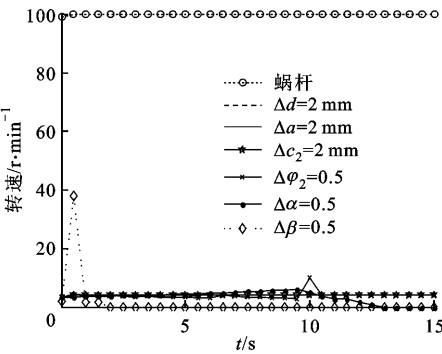


图 17 轴交角误差对齿廓的影响

在该仿真实验中设定传动比 $i_{12}=25$, 蜗杆的速度为 100 r/min. 从图 17 的分析结果可知, 蜗杆在 $\Delta\alpha$ 、 Δc_2 、 Δd 3 种误差状态下均能正常运转, 整个运行过程中未发现异常. 当 $\Delta\alpha$ 为 0.5° 且运行到 4 s 时, 发现蜗轮速度有波动, 在 8 s 后完全停下来; 当 $\Delta\varphi_2$ 为 0.5° 时, 在 10 s 的时候发生卡死, 速度降为 0, 蜗轮停止转动; 当存在轴交角误差时, 蜗轮在一开始获得一个较大的速度, 随后立即降为 0, 蜗轮停止转动. 仿真实验表明: 转角误差和齿距角的误差容易导致蜗杆传动中蜗轮轮齿卡死或折断现象, 轴交角误差由于受到的瞬时冲击较大, 其轮齿被折断的可能性更大.

3 结 论

基于齿轮啮合原理, 首次建立了在误差状态下的无侧隙双滚子包络环面蜗杆的齿面方程及接触线方程, 利用三维建模技术分析了蜗杆蜗轮轴交角误差、中心距误差、蜗杆轴向窜动误差、蜗轮滚子齿距角误差、砂轮滚子偏距误差、转角误差等对蜗杆齿廓影响的变化规律, 同时研究了各误差对蜗杆接触线分布影响的规律及对蜗杆传动性能的影响. 研究表明: 轴交角误差、转角误差以及齿距角误差对蜗杆齿廓及接触线的分布影响最大, 且容易发生蜗轮轮齿卡死或折断现象, 轴向窜动误差对蜗杆齿廓的影响次之, 中心距误差、滚子偏距误差对蜗杆齿廓影响较小. 在加工过程或在进行齿面修形时应重点考虑轴交角误差、转角误差以及齿距角误差所带来的影响. 该研究的数学模型和研究结果为该新型蜗杆传动的进一步研究奠定了理论基础.

参考文献:

- [1] 洪雷, 王进戈, 张均富, 等. 无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动的啮合分析[J]. 西华大学学报, 2008, 27(3): 18-23.
HONG Lei, WANG Jing, ZHANG Junfu, et al. Meshing analysis of non-backlash double roller enveloping hourglass worm gearing[J]. Journal of Xihua University, 2008, 27(3): 18-23.
- [2] 邓星桥, 王进戈, 张均富, 等. 无侧隙双滚子包络环面蜗杆真实啮合齿面的理论研究[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(2): 222-226.
DENG Xingqiao, WANG Jing, ZHANG Junfu. The real tooth surface theory study of the non-backlash double-roller enveloping hourglass worm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(2): 222-226.
- [3] 邓星桥, 王进戈, 张均富, 等. 基于遗传算法的无侧隙双滚子包络环面蜗杆传动的参数优化设计[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(2): 250-254.
DENG Xingqiao, WANG Jing, ZHANG Junfu. Optimization design of the non-backlash double-roller enveloping hourglass worm's parameters based on genetic algorithm[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(2): 250-254.
- [4] 马振群, 王小椿, 沈兵. 对称弧形线圆柱齿轮的真实齿面接触分析研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(7): 722-725.
MA Zhenqun, WANG Xiaochun, SHEN Bing. Real tooth contact analysis of the cylindrical gears with symmetrical arcuate tooth trace[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(7): 722-725.
- [5] 王进戈, 张光辉, 杨念增. 滚锥包络环面蜗杆副的设计与制造[J]. 机械设计与制造, 1992(1): 47-49.
WANG Jing, ZHANG Guanghui, YANG Nianzeng. The design and manufacture of rolling cone enveloping hourglass worm gearing[J]. Machinery Design and Manufacture, 1992(1): 47-49.
- [6] GOSSELIN C, MASSETH J, LIANG W. Cutter interchangeability for spiral-bevel and hypoid gear manufacturing[C] // ASME/AGMA 2003 International Power Transmission and Gearing Conference. Chicago, USA: ASME, 2003: 449-457.
- [7] VILMOS S. Influence of tooth errors and misalignments on tooth contact in spiral bevel gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(10): 1253-1267.
- [8] PADMASOLALA G, LIN H H, OSWALD F B. Influence of tooth spacing error on gears with and without profile modifications[C] // 8th International Power Transmission and gearing Conference. Chicago, USA: ASME, 2000: 101-103.
- [9] MITOME K. Machine element for transmitting accurate rotation[J]. J Adv Automat Technol, 1995, 7(3): 197-203.
- [10] LIU C C, TSAY C B. Contact characteristics of beveloid gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(4): 333-350.
- [11] JESPER B. Transmission error in anti-backlash conical involute gear transmissions; a global-local FE approach[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 41(1): 431-457.
- [12] 石万凯, 秦大同, 徐戊娇. 误差和载荷耦合作用下蜗杆传动的啮合控制[J]. 中国机械工程学报, 2003, 14(23): 1999-2001.

SHI Wankai, QIN Datong, XU Wujiao. Conjugate control of worm gearing influenced by the errors and the load [J]. China Mechanical Engineering, 2003,14 (23):1999-2001.

[13] ZHANG Guanghui, WANG Jinge. The study on roll-

ing cone enveloping hourglass worm gearing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1993,16(4): 293-298.

(编辑 杜秀杰 管咏梅)