

基于回转车削的齿端倒角加工运动建模*

胡昌军 刘孝光

(池州学院物理与机电工程系, 池州 247000)

【摘要】 分析了用回转车削方法进行轮齿齿端倒角加工的运动情况,建立了轮齿齿端倒角加工时刀具切削刃相对工件的矢量模型。运用 Matlab 软件对轮齿齿端倒角加工轨迹进行了仿真,并且在回转车床上进行了轮齿齿端倒角的试验验证,运用专门的检测工具对加工后的齿轮倒角形状进行检测,其倒角的角度误差不超过 0.3° ,满足工程上对倒角形状精度的要求。

关键词: 回转车削 齿端倒角 运动建模 轨迹仿真

中图分类号: TG501 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)12-0231-04

Kinematic Modeling of Gear Chamfering Based on Rotary Cutting

Hu Changjun Liu Xiaoguang

(Department of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Chizhou College, Chizhou 247000, China)

Abstract

Movement of gear chamfering by rotary cutting method was analyzed. Vector model between knife and workpiece was deduced. Locus of gear chamfering was emulated with Matlab, and gear chamfering was validated on rotary cutting machine. Specialized inspection tools was used for detecting the gear chamfer shape after machining, and the chamfer angle error was less than 0.3° , which met the project accuracy requirements.

Key words Rotary cutting, Gear chamfering, Kinematic modeling, Locus simulation

引言

汽车、拖拉机或机床的齿轮变速箱中,为了能够使变速齿轮在变速时换挡快捷、顺利,要对齿轮的进入啮合端进行倒角,通常倒角有倒圆角和倒尖角两种。这两种倒角均存在一定的缺陷,若倒圆角则啮入相对困难,不易滑入,在倒角处极易碰毛、磨损,这在齿部硬度低时尤为突出,严重影响齿轮寿命;若倒成尖角则换挡时易把渐开线齿面打毛,引起齿面凸起、飞边、毛刺,啮合时则产生杂音。为提高齿轮寿命,降低齿轮噪声,保证齿轮换挡快速、轻便,目前进行异型面倒角的研究成为了不少专家学者关注的课题^[1-11]。常见的齿端倒角有两种加工方式:一种为刀具连续回转,工件间歇分度;另一种为工件和刀具都是连续回转。前者在切削过程中工件固定,切好一个齿后采用分度装置转过一个齿,再进行下一

个齿的加工,是非连续切削,专用的齿轮倒角机床均为非连续切削;后者在切削的过程中刀具和工件都作旋转运动,且其传动比保持不变,是连续切削,加工效率高,能胜任不同形状要求的倒角加工^[12-13]。本文将采用空间机构运动学研究方法,运用矩阵和曲面包络理论,通过坐标变换,建立刀具相对于工件的位姿关系,为使用回转切削的方法进行齿端倒角提供理论依据。

1 齿端倒角的矢量建模

工件以角速度 ω_1 顺时针转动,为了分析刀尖相对工件的运动轨迹,假设工件静止不动,相当于坐标系绕着 x_i 轴以 ω_1 逆时针旋转,经过时间 t 坐标系转过角度 $\psi_1 = \omega_1 t$,坐标系由原来的位置 $x_i y_i z_i$ 变换到 $x_j y_j z_j$ (图 1),则工件上点 M 的坐标变换矩阵表达

收稿日期: 2011-01-01 修回日期: 2011-04-15

* 国家自然科学基金资助项目(51005026)

作者简介: 胡昌军,副教授,主要从事机械设计及理论、先进制造技术研究, E-mail: hejqy123@163.com

式为

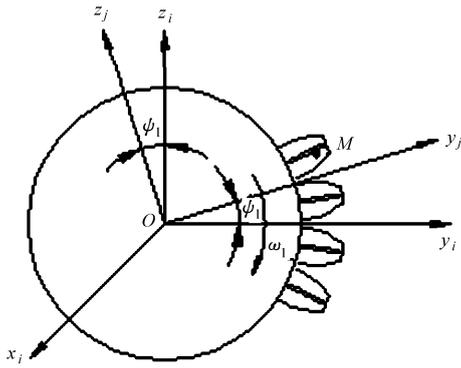


图1 工件的坐标变换

Fig. 1 Coordinate transformation of workpiece

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{c}_{ij} \mathbf{r}_j \tag{1}$$

$$\text{其中 } \mathbf{c}_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi_1 & -\sin\psi_1 \\ 0 & \sin\psi_1 & \cos\psi_1 \end{bmatrix}$$

式中 $\mathbf{r}_j, \mathbf{r}_i$ ——点 M 在新、旧坐标系中的坐标列阵

考虑到刀具在新坐标系 x_j, y_j, z_j 中的运动情况(图2),初始时,刀尖与工件上 M 点重合,刀具绕其轴线以 ω_2 作匀速转动,经时间 t 后刀尖由 M 运动至 M' ,刀具绕其轴线转过角度 $\psi_2 = \omega_2 t$,刀尖在新坐标系 x_j, y_j, z_j 中的坐标变换的矩阵表达式为

$$\mathbf{r}_j = \mathbf{r}_j^{(O_s)} + \mathbf{c}_{js} \mathbf{r}_s \tag{2}$$

其中

$$\mathbf{c}_{js} = \begin{bmatrix} \cos^2\alpha(1 - \cos\psi_2) + \cos\psi_2 & \cos\alpha\cos\beta(1 - \cos\psi_2) - \cos\gamma\sin\psi_2 & \cos\alpha\cos\gamma(1 - \cos\psi_2) - \cos\beta\sin\psi_2 \\ \cos\alpha\cos\beta(1 - \cos\psi_2) + \cos\gamma\sin\psi_2 & \cos^2\beta(1 - \cos\psi_2) + \cos\psi_2 & \cos\beta\cos\gamma(1 - \cos\psi_2) - \cos\alpha\sin\psi_2 \\ \cos\alpha\cos\gamma(1 - \cos\psi_2) - \cos\beta\sin\psi_2 & \cos\beta\cos\gamma(1 - \cos\psi_2) + \cos\alpha\sin\psi_2 & \cos^2\gamma(1 - \cos\psi_2) + \cos\psi_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中 $\mathbf{r}_j^{(O_s)}$ ——坐标原点 O_s 在 x_j, y_j, z_j 坐标系中的坐标列阵

\mathbf{r}_s ——点 M 在 x_s, y_s, z_s 坐标系中的坐标列阵

$$\mathbf{c}_{js} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1 + \cos\lambda\psi_1) & -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\lambda\psi_1 & \frac{1}{2}(1 - \cos\lambda\psi_1) \\ \frac{\sqrt{2}}{2}\sin\lambda\psi_1 & \cos\lambda\psi_1 & -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\lambda\psi_1 \\ \frac{1}{2}(1 - \cos\lambda\psi_1) & \frac{\sqrt{2}}{2}\sin\lambda\psi_1 & \frac{1}{2}(1 + \cos\lambda\psi_1) \end{bmatrix}$$

由上述分析可得刀尖相对工件的矩阵表达式为

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{c}_{ij} \mathbf{r}_j = \mathbf{c}_{ij} (\mathbf{r}_j^{(O_s)} + \mathbf{c}_{js} \mathbf{r}_s) \tag{4}$$

$$x_j(O_s) = 0$$

$$y_j(O_s) = y_j(M)$$

$$z_j(O_s) = z_j(M) - \sqrt{2}r_M$$

式中 r_M ——刀尖回转半径

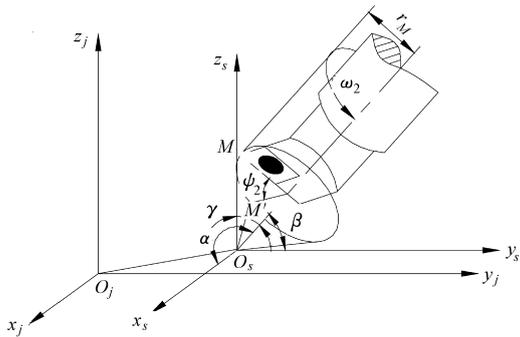


图2 刀尖坐标变换

Fig. 2 Coordinate transformation of knife point

式(3)中 $\psi_2 = \omega_2 t$, α, β, γ 分别为刀具轴线与坐标轴 x_s, y_s, z_s 的夹角,欲在轮齿端部倒出 45° 角,则刀具轴线与 y_s, O_s, z_s 平面夹角应为 45° 且平行于 x_s, O_s, z_s 平面。因此式(3)中的 α, β, γ 分别为 $45^\circ, 90^\circ$ 和 45° 。

\mathbf{c}_{js} 可以简化为

$$\mathbf{c}_{js} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1 + \cos\psi_2) & -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\psi_2 & \frac{1}{2}(1 - \cos\psi_2) \\ \frac{\sqrt{2}}{2}\sin\psi_2 & \cos\psi_2 & -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\psi_2 \\ \frac{1}{2}(1 - \cos\psi_2) & \frac{\sqrt{2}}{2}\sin\psi_2 & \frac{1}{2}(1 + \cos\psi_2) \end{bmatrix}$$

设刀具和工件的转速比为 λ , 即

$$\lambda = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\psi_2}{\psi_1}$$

则 \mathbf{c}_{js} 变为

2 齿端倒角的轨迹仿真

为得到刀尖相对工件的运动轨迹,确定式(4)中的有关参数,然后利用 Matlab 软件对该式的轨迹进行仿真,观察其形状。

取 $\lambda = 3$, 齿轮分度圆半径 $r = 65 \text{ mm}$, 刀尖回转半径 $r_M = 15 \text{ mm}$, $0 \leq \psi_1 \leq 2\pi$, 设开始时刀尖 M 在 y 轴上,且处于齿轮的分度圆上,则工件转过角度 ψ_1 后, M 点在坐标系 x_j, y_j, z_j 中的坐标为

$$x_j = 0 \quad y_j = r \cos\psi_1 = 65 \cos\psi_1$$

$$z_j = -r \sin\psi_1 = -65 \sin\psi_1$$

刀具转过角度 ψ_2 后,刀尖 M' 与开始时刀尖 M 的位置关系如图3所示。从图中可以得出,点 M' 相对于点 M 的关系为

$$x_{M'} = (r_M - r_M \cos\varphi_2) \cos 45^\circ$$

$$y_{M'} = -r_M \sin\varphi_2$$

$$z_{M'} = z_M - (r_M \sin 45^\circ - r_M \cos\varphi_2 \sin 45^\circ)$$

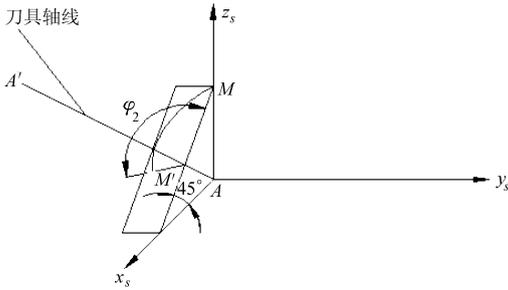


图 3 刀具转过 ψ_2 后刀尖 M 的位置变化

Fig. 3 Position of knife point change after tool turned ψ_2

综上所述,将所有数据代入式(4)得刀尖的轨迹表达式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A(B + CD) \quad (5)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi_1 & -\sin\psi_1 \\ 0 & \sin\psi_1 & \cos\psi_1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 65\cos\psi_1 \\ -65\sin\psi_1 - 15\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1 + \cos 3\psi_1) & -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin 3\psi_1 & \frac{1}{2}(1 - \cos 3\psi_1) \\ \frac{\sqrt{2}}{2}\sin 3\psi_1 & \cos 3\psi_1 & -\frac{\sqrt{2}}{2}\sin 3\psi_1 \\ \frac{1}{2}(1 - \cos 3\psi_1) & \frac{\sqrt{2}}{2}\sin 3\psi_1 & \frac{1}{2}(1 + \cos 3\psi_1) \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{15\sqrt{2}}{2}(1 - \cos 3\psi_1) \\ -15\sin 3\psi_1 \\ -65\sin\psi_1 - \frac{15\sqrt{2}}{2}(1 - \cos 3\psi_1) \end{bmatrix}$$

对式(5)进行矩阵运算,然后运用 Matlab 绘制刀尖相对工件的轨迹如图 4 所示。

将上述有关参数改变一下,取 $\lambda = 5$, 齿轮分度圆半径 $r = 200 \text{ mm}$, 刀尖回转半径 $r_M = 15 \text{ mm}$, 仿真后得刀尖轨迹曲线如图 5 所示。

3 齿端倒角矢量模型试验验证

为了验证上述齿端倒角模型,在图 6 所示的齿端倒角回转车削机床上对齿轮进行倒角加工,该机床有两把刀具同时参与切削。车削时刀具和工件同时旋转,形成对齿端边缘的倒角加工。该机床的主要技术参数如表 1 所示。

选择图 5 中的有关参数在回转车削机床上进行

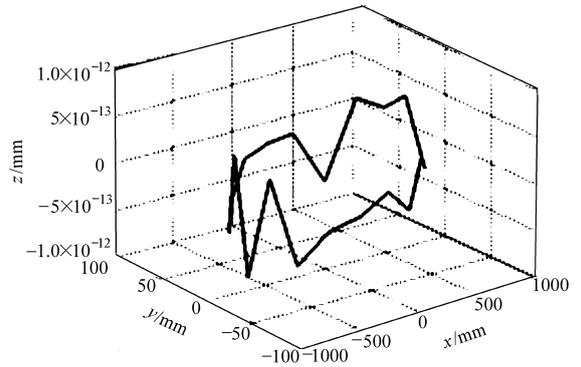


图 4 刀尖相对工件的轨迹

($\lambda = 3, r = 65 \text{ mm}, r_M = 15 \text{ mm}$)

Fig. 4 Relative locus between knife point and workpiece with $\lambda = 3, r = 65 \text{ mm}, r_M = 15 \text{ mm}$

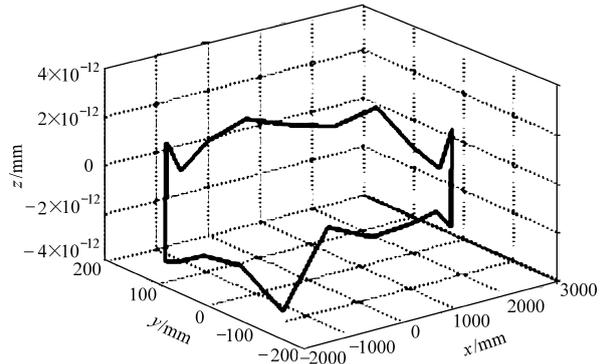


图 5 刀尖相对工件的轨迹

($\lambda = 5, r = 200 \text{ mm}, r_M = 15 \text{ mm}$)

Fig. 5 Relative locus between knife point and workpiece with $\lambda = 5, r = 200 \text{ mm}, r_M = 15 \text{ mm}$



图 6 用于齿端倒角的车削机床

Fig. 6 Rotary cutting machine for gear chamfering

试验,左侧刀具轴线位置调整至图 3 所示 AA' ,右侧刀具轴线与左侧刀具轴线相对于 xOz 平面对称,开动机床进行车削,加工后的齿端倒角零件如图 7 所示,运用专门的检测工具对加工后的齿轮倒角形状进行检测,其倒角的角度误差不超过 0.3° ,完全可以满足滑移齿轮在机械设备上使用对齿端倒角的精度要求,从而也证明了前面建立的齿端倒角加工的矢量模型是正确的。

表1 机床的主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of machine

参数	数值
主轴转速/ $r \cdot \min^{-1}$	≤ 1500
定位精度/mm	≤ 0.005
工件尺寸/mm	≤ 450
夹紧力/kN	10
丝杆驱动进给力/kN	3
机床占地面积/ m^2	6
机床质量/t	1.8

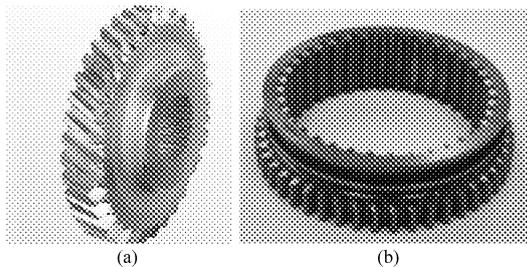


图7 用回转切削机床加工的齿端倒角零件

Fig.7 Gear parts chamfered on rotary cutting machine
(a) 外齿轮齿端倒角 (b) 外齿与内齿同时存在的齿端倒角

4 结论

(1) 采用回转车削机床能加工任意形状内、外齿轮的倒角, 非常方便。

(2) 在回转切削机床进行齿端倒角是连续切削, 刀具和工件都作旋转运动, 且其传动比保持不变, 克服了传统加工方法效率低的缺陷。

(3) 从刀具的运动轨迹分析可知, 只要刀具切削刃足够锋利, 完全可以获得理想的齿端倒角形状。

参 考 文 献

- Feng Xianying, Li Hui, Ai Xing. CNC flexible generating specific gear tooth profile based on standard involute gear hob[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 17(3): 377 ~ 380.
- Xu Wujiao, Qin Datong, Shi Wankai. Direct digital design and simulation of meshing in worm-gear drive[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(3): 428 ~ 433.
- Li Zuozhang, Zhou Yunfei, Wang Yanzhong, et al. NC method for generation of conjugating hypoid gears based on NC's flexibility[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 15(2): 157 ~ 161.
- 徐彦伟, 张连洪, 魏巍. 重型弧齿锥齿轮铣齿机数控加工模型建立与仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 211 ~ 215.
Xu Yanwei, Zhang Lianhong, Wei Wei. Model and simulation for numerical control machining of heavy duty spiral bevel gear cutting machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 211 ~ 215. (in Chinese)
- 贾春德, 姜增辉. 正交车铣运动的矢量建模及表面粗糙度的理论分析[J]. 机械工程学报, 2001, 37(3): 62 ~ 64.
Jia Chunde, Jiang Zenghui. Vector modeling of orthogonal turn-milling movement and theoretical analysis on roughness of surface[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(3): 62 ~ 64. (in Chinese)
- 胡昌军, 钱瑞明. 基于回转切削机床的齿轮倒角加工运动分析与动态仿真[J]. 机械传动, 2008, 32(1): 88 ~ 90, 93.
Hu Changjun, Qian Ruiming. Kinematic analysis and dynamic simulation for gear chamfering on rotary cutting machine tool [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2008, 32(1): 88 ~ 90, 93. (in Chinese)
- 郭伟, 邢德强, 牛占文. 齿轮曲面倒角加工参数计算分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(18): 2143 ~ 2146.
Guo Wei, Xing Deqiang, Niu Zhanwen. Study on calculation of processing parameters for gear camber chamfering[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(18): 2143 ~ 2146. (in Chinese)
- 牛占文, 孙立, 郭伟. 齿轮齿端曲面倒角加工刀具设计与仿真[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(增刊): 12 ~ 15.
Niu Zhanwen, Sun Li, Guo Wei. Design and simulation of cutters for gear camber chamfering[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(Supp.): 12 ~ 15. (in Chinese)
- 任廷志, 程爱明, 景奉儒. 蜗线齿轮及其共轭齿轮的几何分析与仿真[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 71 ~ 75.
Ren Tingzhi, Cheng Aiming, Jing Fengru. Limacon gear and conjugated gear's geometry analyse and simulation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 71 ~ 75. (in Chinese)
- 冯显英, 王清, 艾兴. 齿轮加工成形的运动学分析[J]. 山东大学学报: 工学版, 2000, 30(2): 101 ~ 106.
Feng Xianying, Wang Qing, Ai Xing. Kinematic analysis of gear machining [J]. Journal of Shandong University of Technology: Engineering Science, 2000, 30(2): 101 ~ 106. (in Chinese)
- 杨作梅, 安子军, 张鹏. 基于空间啮合理论的摆线球行星传动根切研究[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 216 ~ 222.
Yang Zuomei, An Zijun, Zhang Peng. Research on undercutting in cycloid ball planetary transmission based on space meshing theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 216 ~ 222. (in Chinese)

- 8 Lee K M, Shah D K. Kinematic analysis of a three-degrees-of-freedom in-parallel actuated manipulator [C] // 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988, 4(3): 354 ~ 360.
 - 9 吴光中, 李剑锋, 费仁元, 等. 3-PU*U*型平动并联机构的运动学分析[J]. 中国机械工程, 2004, 15(9): 816 ~ 819.
 - 10 胡福生, 郝秀清, 陈建涛. 3PSS 并联机构的运动学分析[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2006(1): 47 ~ 50.
 - 11 高征, 高峰. 6 自由度 3-U^rSR 并联机构的位置正解分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 171 ~ 177.
 - 12 韩方元, 赵丁选, 李天宇. 3-RPS 并联机构正解快速数值算法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 229 ~ 233.
Han Fangyuan, Zhao Dingxuan, Li Tianyu. A fast forward algorithm for 3-RPS parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 229 ~ 233. (in Chinese)
 - 13 吴鑫, 陈美丽, 张彦斌. 2T1R 并联机构位置及奇异性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 208 ~ 213.
Wu Xin, Chen Meili, Zhang Yanbin. Analysis of position and singularity of a parallel mechanism with three degrees of freedom [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 208 ~ 213. (in Chinese)
-

(上接第 201 页)

- 11 Li Z W, Chou S K, Shu C, et al. Characteristics of premixed flame in micro-combustors with different diameters [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(2 ~ 3): 271 ~ 281.
 - 12 Li Z W, Chou S K, Shu C, et al. Predicting the temperature of a premixed flame in a micro-combustor [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(19): 3 524 ~ 3 530.
 - 13 高静, 王恒, 苏庆泉, 等. 层流预混火焰传播速度与火焰稳定传播界限的测定[J]. 热能工程, 2009, 38(1): 14 ~ 16.
Gao Jing, Wang Heng, Su Qingquan, et al. Measurements of burning speed and stabilization limits for laminar premixed flames [J]. Thermal Engineering, 2009, 38(1): 14 ~ 16. (in Chinese)
 - 14 王谦, 李德桃, 潘剑锋. 燃烧学[M]. 北京: 中国科学文化出版社, 2002.
 - 15 葛新石, 叶宏. 传热和传质基本理论[M]. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2007.
 - 16 彭晓峰, 张扬. 传热词汇 A-Z (原著《Wärmeübertragung A-Z》)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
-

(上接第 234 页)

- 12 侯东海, 刘忠明, 吴序堂. 用工具斜齿条法加工斜齿非圆齿轮的啮合理论模型[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8): 49 ~ 54.
Hou Donghai, Liu Zhongming, Wu Xutang. Meshing theory analysis model for the manufacturing of helical noncircular gear by the helical tooling rack generating method [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(8): 49 ~ 54. (in Chinese)
- 13 胡昌军, 钱瑞明, 史雷. 基于回转车床的正多面体车削及刀尖轨迹仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 255 ~ 260.
Hu Changjun, Qian Ruiming, Shi Lei. Simulation on regular polygon forming and locus of knife point based on rotary cutting machine tool [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 255 ~ 260. (in Chinese)