

# 发动机凸轮轴磨削变形补偿技术研究\*

刘勇军 范晋伟 李云

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

**摘要:** 针对发动机凸轮轴数控磨削时产生连续变化的弹性变形问题,分析了凸轮轴受到磨削力变形对凸轮轮廓精度的影响,对轴向和径向变形进行了解耦,推导了不同位置、不同相位下凸轮受力变形量求解方程。分析了数控凸轮轴磨床的插补原理,建立了含有变形量误差的、工件旋转轴和砂轮进给轴联动的磨削运动学方程,提出了 $X$ 轴变形量与理论插补值进行几何叠加的指令修正误差补偿方法。对某发动机进排气凸轮轴磨削变形进行了建模与仿真,对数控凸轮轴磨床进行了补偿与加工试验,仿真与加工试验结果均表明磨削变形补偿可以将凸轮轴的轮廓精度提高 $5\ \mu\text{m}$ 。

**关键词:** 发动机 凸轮轴 磨削变形 仿真 误差补偿

**中图分类号:** TH161<sup>+</sup>.5; TK413.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0274-06

## Compensation Technology of Grinding Deformation for Engine Camshaft

Liu Yongjun Fan Jinwei Li Yun

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** To solve the camshaft's deformation compressed by the continuous and variable force when grinding, the influence of grinding force on the cam's curve accuracy was analyzed. The axial deformation and radial deformation were decoupled. The deformation value solution equation in variable position and angle was deduced. The interpolation principle of the CNC (computer numerical control) camshaft grinder was analyzed. The  $X - C$  linkage kinematics equation which included deformation errors, workpiece rotation axis, and grinding wheel axis was built. The soft error compensation manner by adding the errors to the interpolation value was proposed. The deformation error of one intake-exhaust camshaft was modeled and simulated. The CNC camshaft grinder was compensated and the manufacturing test was executed. The simulation and manufacturing result showed that camshaft's contours accuracy was improved  $5\ \mu\text{m}$  by the deformation compensation.

**Key words:** Engine Camshaft Grinding deformation Simulation Error compensation

### 引言

凸轮轴通常由数控凸轮轴磨床完成精加工,影响凸轮轴轮廓精度的主要因素有:数控磨床的几何精度、加工时的热变形、伺服跟踪误差和磨削变形等,目前国内外对凸轮轴加工精度及误差补偿的研究主要集中在数控磨床的几何误差分析与建模、热变形与补偿、单个凸轮加工误差分析、伺服跟踪误差

分析与补偿等方面<sup>[1~11]</sup>,而对于整根凸轮轴磨削时的变形与补偿尚未提及。由于多缸发动机凸轮轴为细长杆,加工时在砂轮磨削力的作用下很容易产生弹性变形,且变形量随着位置、相位的不同而变化,这种变形将降低凸轮的轮廓精度和升程精度,严重时会影响发动机的进排气性能。本文研究凸轮轴磨削变形对凸轮轮廓精度的影响及减小这一影响的策略。

收稿日期: 2012-05-14 修回日期: 2012-07-02

\* 国家自然科学基金资助项目(50775004)和北京市教委资助项目(KM200710005003)

作者简介: 刘勇军, 博士生, 主要从事数控精密加工与数控机床可靠性研究, E-mail: chengquan33@126.com

通讯作者: 范晋伟, 教授, 博士生导师, 主要从事精密及超精密加工技术与装备研究, E-mail: jwfan@bjut.edu.cn

### 1 磨削变形对凸轮形状的影响

凸轮在磨削时会受到 3 个互相垂直的力,即沿砂轮径向的法向磨削力  $F_n$ 、沿砂轮切向的切向磨削力  $F_t$  以及沿砂轮回转轴线方向的轴向磨削力  $F_a$ ,如图 1 所示( $F_a$  未标出)。由于砂轮磨粒具有较大的负前角,所以法向磨削力大于切向磨削力,其比值通常为 1.5~3.0。

发动机凸轮轴通常采用整体式加工,凸轮轴一般为细长杆,磨削时在磨削力的作用下将产生弯曲、扭转等复杂的弹性变形,这些变形将对凸轮轮廓产生重要影响。

法向力和切向力的合力可以等效为一个过凸轮回转中心的力  $F_c$  和一个附加力矩  $M_e$ ,如图 1 所示。

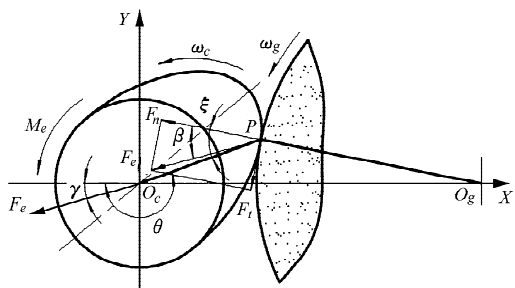


图 1 凸轮受力分析  
Fig.1 Cam forces analysis

理想情况下,假设凸轮轴为完全刚性件,在磨削力的作用下,凸轮轴不发生弹性变形,在 X 轴和 C 轴的联动下,能够加工出符合精度的凸轮,如图 2 中轮廓线 3 所示。实际上,在  $F_c$  和  $M_e$  的作用下,凸轮轴将在 X、Y 方向产生位移变形  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  和在  $\theta$  方向产生转角变形  $\Delta\theta$ 。此时如不进行误差补偿,加工出的凸轮在基圆和升程线上相对于理论轮廓都有所扩大<sup>[12]</sup>,如图 2 中的轮廓线 1 所示。为了保证在弹性变形的情况下加工出的凸轮轮廓满足精度要求,可以对变形进行补偿。根据凸轮轴磨削变形的特点,如在磨削时将砂轮的进给量增加一定的数值就可以将因变形而导致的轮廓扩大的部分抵消,从而加工出合格的凸轮轴工件。如图 2 所示,2 是补偿后的凸轮轮廓曲线,5 是未补偿时砂轮的进给位置,4 是经过补偿后的砂轮进给位置,求出补偿前、后砂轮进给位置的差值是进行补偿的关键。

轴向磨削力  $F_a$  使凸轮表面与轴向不平行,如图 3 所示。由于轴向磨削力  $F_a$  相对法向磨削力  $F_n$  和切向磨削力  $F_t$  较小,如磨削时按图 3b 所示的方向移动砂轮,则可以相对减少轴向力对凸轮轴变形的影响,即如磨削凸轮轴轴向中心左侧的凸轮,砂轮应从中心向左移动,如磨削轴向中心右侧的凸轮,砂轮应从中心向右移动。

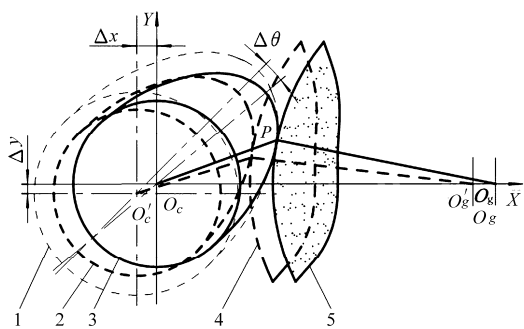


图 2 凸轮轴在法向和切向力作用下产生的变形  
Fig.2 Camshaft deformation under radial and tangential forces

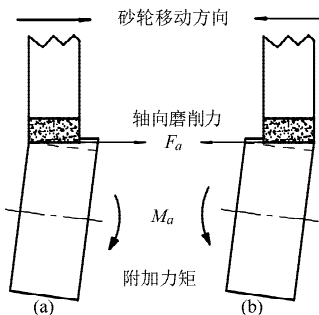


图 3 凸轮轴在轴向力作用下产生的变形  
Fig.3 Camshaft deformation under axial force

磨削时,凸轮轴在法向力、切向力和轴向力的共同作用下将发生综合变形,其变形量随磨削点 Z 坐标和转角  $\varphi$  的不同而不同,在补偿时要针对不同的 Z 与  $\varphi$  选取不同的补偿量。在磨削基圆时的凸轮轴变形如图 4 所示。

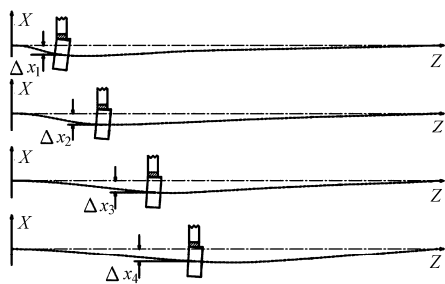


图 4 不同磨削位置凸轮轴的变形  
Fig.4 Camshaft deformation value at different positions

### 2 变形误差求解

设发动机凸轮轴挺杆从动件的运动规律为: $h = h(\varphi)$ ,可以通过三次样条插值得到凸轮轮廓线方程: $\rho = \rho(\varphi)$ 。

根据磨削原理有

$$F_t = Ka_p^{\mu-\delta} v_s^{-\xi} v_w^\tau b^\delta \quad (1)$$

$$F_n = cF_t \quad (2)$$

式中  $K$ ——系数常量  $b$ ——砂轮宽度  
 $\mu$ 、 $\delta$ 、 $\xi$ 、 $\tau$ ——指数常量  
 $a_p$ ——磨削深度  $c$ ——比例系数

$v_s$ ——磨削线速度

$v_w$ ——磨削点运动速度

法向磨削力与切削力的合力  $F_e$  为

$$F_e = \sqrt{F_n^2 + F_t^2}$$

由图 1 可知,  $F_e$  的等效力矩为

$$M_e = F_e \rho \sin(\xi - \beta)$$

$$\xi = \arcsin(dh(\varphi)/d\varphi/\rho)$$

$$\beta = \arctan(F_t/F_n)$$

由材料力学可知

$$\Delta x = F_e z^2 (l-z)^2 \sin\gamma / (3EI) \quad (3)$$

$$\Delta y = F_e z^2 (l-z)^2 \cos\gamma / (3EI) \quad (4)$$

由三角形关系可得

$$\gamma = \beta - \arcsin(\rho \sin\alpha / r_g) \quad (5)$$

式中  $r_g$ ——砂轮半径  $\alpha$ ——磨削角

式(5)中的磨削角  $\alpha$  是指磨削点与凸轮中心连线与  $X$  轴的夹角, 磨削角是与凸轮转角  $\varphi$  有关的一个量, 可以通过求解凸轮曲线方程  $(\rho, \theta)$  得到<sup>[13]</sup>。

$$M_e = K_\theta \Delta\theta \quad (6)$$

其中  $K_\theta = GI_p/z + GI_p/(l-z)$

通过式(3)、(4)和(6)可以求出凸轮轴上各个凸轮沿  $X$ 、 $Y$ 、 $\varphi$  方向的变形量  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  和  $\Delta\theta$ 。

由于相位变形量和位移变形量相互耦合, 在补偿时必须将其分离, 由图 5 可知

$$l_{O_c P} = \rho(\theta) \quad l_{O'_g O_g} = \varepsilon_x \quad l_{O_c P} = \rho(\theta)$$

$$l_{O_c P'} = \rho(\theta - \Delta\theta) \quad l_{O_g P} = r_g \quad l_{O'_g P'} = r_g$$

$$l_{O_c P}^2 + l_{O'_g O_g}^2 + 2l_{O_c P} l_{O'_g O_g} \cos\alpha = r_g^2$$

$$l_{O'_g P'}^2 + l_{O'_g O_g}^2 + 2l_{O'_g P'} l_{O'_g O_g} \cos(\alpha - \Delta\theta) = r_g^2$$

$$l_{O_c O_g} = \rho(\alpha) \cos\alpha + \sqrt{r_g^2 - \rho^2(\theta) \sin^2\alpha}$$

$$l_{O'_g O_g} = \rho(\theta - \Delta\theta) \cos(\alpha - \Delta\theta) +$$

$$\sqrt{r_g^2 - \rho^2(\theta - \Delta\theta) \sin^2(\alpha - \Delta\theta)}$$

所以  $X$  轴的变形误差  $\varepsilon_x$  为

$$\varepsilon_x = l_{O_c O_g} - l_{O'_g O_g} = l_{O_c O_g} - (l_{O'_g O_g} - \Delta x)$$

$$\varepsilon_x = F_e z^2 (l-z)^2 \sin\gamma / (3EI) + \rho(\alpha) \cos\alpha +$$

$$\sqrt{r_g^2 - \rho^2(\theta) \sin^2\alpha} - \rho(\theta - \Delta\theta) \cos(\alpha - \Delta\theta) -$$

$$\sqrt{r_g^2 - \rho^2(\theta - \Delta\theta) \sin^2(\alpha - \Delta\theta)} \quad (7)$$

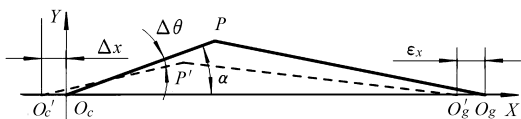


图 5 位移量和相位量解耦

Fig. 5 Decoupling of displacement and phase

$\varepsilon_x$  是一个与凸轮转角  $\varphi$ 、凸轮轴轴向坐标  $z$  相关的函数。

这里仅计算了在  $X$  方向的变形量, 由于磨削力导致凸轮轮廓在  $X$ 、 $Y$  方向都产生了变形, 但是目前

数控凸轮轴磨床均为  $C$  轴和  $X$  轴的二轴联动, 所以软件补偿只能在  $X$  轴上补偿,  $Y$  轴无法进行补偿。

### 3 凸轮轴变形误差补偿策略

#### 3.1 凸轮轴磨削插补原理

凸轮轴磨床磨削时,  $C$  轴和  $X$  轴联动, 所以只要求出砂轮位移  $X$  与凸轮轴转角  $\varphi$  的关系式, 并由关系式生成数控指令即可进行磨削加工。由于凸轮曲线复杂, 为了提高加工效率和加工质量, 一般采用离线插补<sup>[14]</sup>, 即将  $(X, \varphi)$  离散为一系列的点  $(X_0, \varphi_0)$ 、 $(X_1, \varphi_1)$ 、 $\dots$ 、 $(X_n, \varphi_n)$ , CNC 根据当前坐标  $(X_i, \varphi_i)$  和下一点坐标  $(X_{i+1}, \varphi_{i+1})$  采用直线插补、圆弧插补或曲线插补。

#### 3.2 误差补偿策略

凸轮轴磨床属于专用机床, 通常要求用户输入凸轮轴的升程、砂轮直径、凸轮数量、凸轮轴向分布等参数, 然后由 CNC 拟合出凸轮轮廓曲线, 计算磨削点联动坐标进行插补。由于每个厂家的数控系统都是封闭的, 无法直接在数控系统上进行补偿, 故提出软件补偿思路: 根据凸轮升程表, 利用三次样条拟合凸轮轮廓线, 计算理论联动磨削点坐标  $(X_0, \varphi_0)$ 、 $(X_1, \varphi_1)$ 、 $\dots$ 、 $(X_n, \varphi_n)$ , 计算误差值  $(\varepsilon_{x0}, \varphi_0)$ 、 $(\varepsilon_{x1}, \varphi_1)$ 、 $\dots$ 、 $(\varepsilon_{xn}, \varphi_n)$ , 将误差值与理论坐标进行叠加  $(X_0 + \varepsilon_{x0}, \varphi_0)$ 、 $(X_1 + \varepsilon_{x1}, \varphi_1)$ 、 $\dots$ 、 $(X_n + \varepsilon_{xn}, \varphi_n)$ , 生成新的数控加工程序, 然后将程序输入到 CNC 中进行磨削加工。除了加工过程是在 CNC 中进行之外, 其他计算和指令修正都是在 CNC 外部的补偿软件中进行的。

#### 3.3 包含误差的磨削运动学方程建立

首先确定理想情况下的运动学模型, 如图 6 所示, 凸轮轮廓曲线为  $(\rho, \theta)$ , 换成直角坐标为

$$\begin{cases} X = \rho \cos\theta \\ Y = \rho \sin\theta \end{cases}$$

因为  $\overline{O'_g P}$  与过凸轮轮廓线  $P$  点的切线垂直, 所以其斜率为

$$K = -\frac{dX}{dY}$$

$O'_g$  的坐标为

$$\begin{cases} X' = X + r_g \cos(\arctan K) \\ Y' = Y + r_g \sin(\arctan K) \end{cases}$$

转换为极坐标形式

$$\begin{cases} S = \sqrt{X'^2 + Y'^2} \\ \varphi = \arctan(Y'/X') \end{cases} \quad (8)$$

式中  $S$ ——砂轮  $X$  轴坐标

式(8)即为理想情况下的  $C$ 、 $X$  两轴联动运动学方程, 考虑到凸轮在磨削时的变形, 将变形量与理想

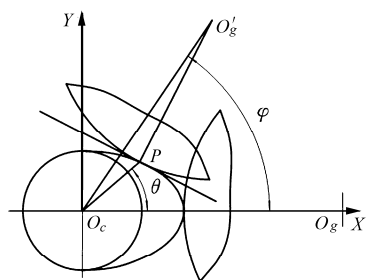


图 6 求解运动学模型

Fig. 6 Kinematics modeling solution

情况下的 X 轴坐标值进行几何叠加,即可求出含有误差的磨削运动学方程为

$$\begin{cases} S = \sqrt{X'^2 + Y'^2} + \varepsilon_x \\ \varphi = \arctan(Y'/X') \end{cases} \quad (9)$$

## 4 误差补偿与加工试验

### 4.1 误差计算与仿真

已知某凸轮轴部分参数为:凸轮轴直径 38.0 mm,基圆半径 22.5 mm,长度 592.0 mm,轴上共有 4 个进气凸轮和 4 个排气凸轮,其中进气凸轮的轴向坐标为 103、239、375、511 mm,砂轮线速度为 120 m/s,根据凸轮升程表拟合的升程曲线和经过解析计算得到凸轮轮廓曲线,如图 7 所示。

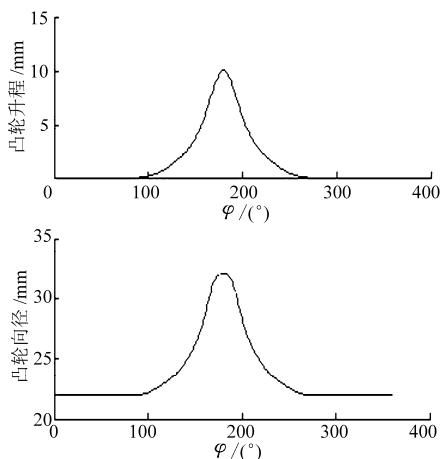


图 7 凸轮升程曲线和轮廓曲线

Fig. 7 Lift curve and contour curve

图 8 所示的是在磨削基圆时凸轮轴的变形曲线,由凸轮在凸轮轴上的 Z 向坐标可以求出每个凸轮在磨削基圆时的变形量。

图 9 显示每个凸轮在不同相位角的变形量误差。从图中可以看出,ε\_x 的最大值接近 4 μm,目前一般发动机的凸轮轴升程误差要求在 30 μm 以内,而高档汽车发动机的凸轮轴升程误差则要求在 10 μm 以内<sup>[15]</sup>,所以对因磨削引起的变形误差进行补偿具有很强的实际意义。

图 10 为补偿前、后砂轮的 X 坐标对比,从图中

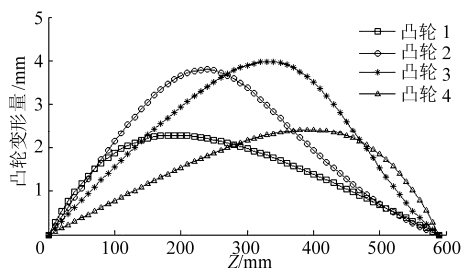


图 8 磨削基圆时凸轮轴的变形量

Fig. 8 Deformation when grinding base circle

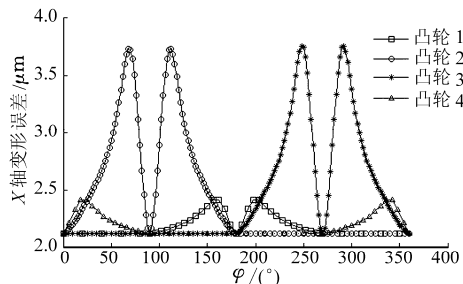


图 9 X 轴变形误差

Fig. 9 Deformation errors of X-axis

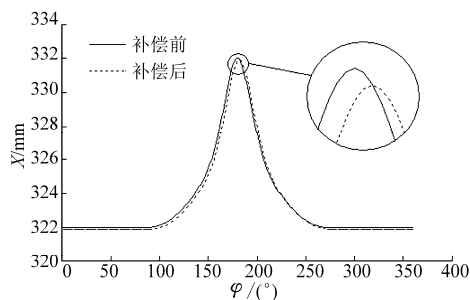


图 10 补偿前后 X 位移曲线

Fig. 10 X-displacement curves before and after compensation

可以看出,补偿后的砂轮位移要比理论值略小(更加靠近凸轮轴轴线)。

图 11 为补偿前后砂轮的轮廓曲线对比,从图中可以看出,补偿后的砂轮轮廓要比未补偿的轮廓略小,即抵消由于磨削变形而导致凸轮“肥大”的问题。

### 4.2 加工试验验证

为了验证对凸轮轴磨削变形建模与仿真的正确性,利用某型数控凸轮轴磨床在磨削变形补偿前与补偿后分别加工了 10 件样品,并利用凸轮轴测量仪进行了数据测量。凸轮轴测量仪可以测量凸轮升程、升程误差、轮廓数值、轮廓误差、相位角、速度曲线、加速度曲线等数据。测量时将凸轮轴竖直安装在凸轮轴测量仪上,测量仪驱动凸轮轴转动,通过测量仪上的高精度圆光栅和光栅尺对凸轮轴的角度和升程进行采样、记录,并利用配套软件计算、显示相关数据。本试验对补偿前后凸轮轴轮廓误差最大值的测量结果如图 12 所示。

根据轮廓误差可以计算出补偿前后加工件的最

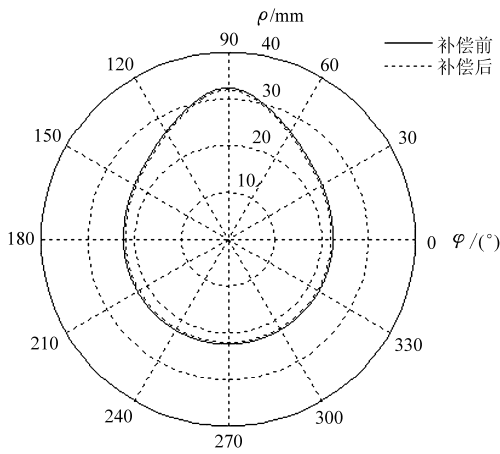


图 11 补偿前后凸轮轮廓曲线

Fig. 11 Cam curves before and after compensation

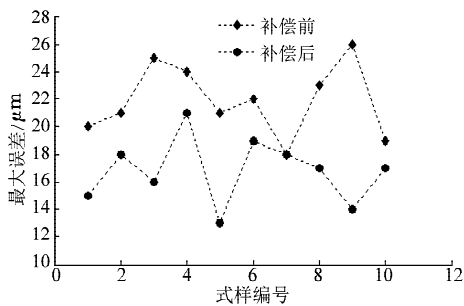


图 12 加工工件轮廓最大误差

Fig. 12 Maximum contour errors of manufactured parts

大误差均值分别为  $21.9 \mu\text{m}$  和  $16.8 \mu\text{m}$ , 经过补偿, 凸轮轮廓精度提高了  $5.1 \mu\text{m}$ , 与仿真结果较为接近, 但并不完全相等, 主要原因是在测量、建模等环节也存在误差。利用误差数据绘制的最大轮廓误差概率密度如图 13 所示, 从图中可以看出最大误差满足正态分布, 可以较容易求出补偿前后加工工件轮廓误差最大值小于  $20 \mu\text{m}$  的概率分别为 0.233 和 0.909。

所提出的磨削变形补偿方法是根据磨削变形的

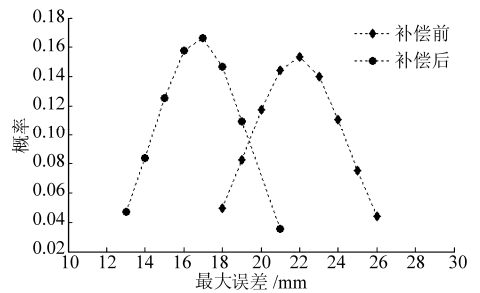


图 13 轮廓误差概率密度

Fig. 13 Probability density of contour errors

理论计算值对整个凸轮轴沿轴向对  $X$  值进行补偿, 在磨削不同凸轮时凸轮轴的变形不同, 每个凸轮及凸轮上的每个点的补偿效果也不相同。限于篇幅, 图 12 中仅给出了补偿前后凸轮轴中间位置凸轮的轮廓误差(中间凸轮轮廓误差最大)。

除了磨削弹性变形外, 机床几何误差、热误差、伺服跟踪误差等也会影响凸轮轴的磨削精度, 由于本文的试验只对磨削变形量进行了补偿, 所以补偿后轮廓误差并未消除, 需要进一步对其他因素进行研究与补偿。

## 5 结论

(1) 建立了发动机凸轮轴数控磨削时因磨削力而产生的误差量的求解方程, 通过方程可以求解出沿凸轮轴轴向不同位置、不同相位的误差值, 为误差补偿提供参数。

(2) 根据凸轮轴升程表, 对磨削变形误差和补偿前后的凸轮轮廓尺寸进行了仿真, 结果表明, 误差补偿可以将凸轮轮廓精度提高  $5 \mu\text{m}$ 。

(3) 根据建立的含有磨削变形误差的运动学方程生成的加工指令, 对数控凸轮轴磨床进行了补偿加工试验, 试验结果与仿真结果相近, 验证了针对磨削变形进行误差补偿的有效性和实用性。

## 参 考 文 献

- 1 Fujiwara T, Tsukamoto S, Matsubara D, et al. Simulation of cam grinding mechanism with CNC camshaft grinder [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 2004, 70(4): 1161 ~ 1167.
- 2 刘让贤, 刘佳, 黄宏亮. 凸轮轴干切削加工变形仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2007(1): 100 ~ 101.  
Liu Rangxian, Liu Jia, Huang Hongliang. The research of simulation of machining transmutation for camshaft dry-cutting [J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(1): 100 ~ 101. (in Chinese)
- 3 胡勇. SK-21 数控凸轮磨床几何误差软件补偿技术的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.  
Hu Yong. The research on geometric error soft compensation method of the SK-21 CNC grinding tool [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 4 Walsh A P, Baliga B C, Hodgson P. A study of the crankshaft pin grinding forces [J]. Key Engineering Materials, 2004, 257 ~ 258: 75 ~ 78.
- 5 阳红, 向胜华, 刘立新, 等. 基于最优权系数组合建模的数控机床热误差在线补偿[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 216 ~ 221.  
Yang Hong, Xiang Shenghua, Liu Lixin, et al. Online compensation for CNC machine thermal error based on optimal weights-based combined modeling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 216 ~ 221. (in Chinese)
- 6 Tsu-Chin T, Zongxuan S, Hanson R, et al. Design, modeling, and motion control of the noncircular turning process for camshaft

- machining[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2008, 130(3): 1~7.
- 7 陈逢军, 尹韶辉, 范玉峰. 一种非球面超精密单点磨削与形状误差补偿技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 186~191.  
Chen Fengjun, Yin Shaohui, Fan Yufeng. Ultra-precision single-point grinding technique and profile error compensation method for machining aspheric mould[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 186~191. (in Chinese)
- 8 Kuang Jao-Hwa, Hsu Chao-Ming, Hu Chin-Che. Dynamic behavior of globoidal cam systems with torque compensation mechanisms [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(8): 1201~1214.
- 9 李静, 沈南燕, 何永义, 等. 凸轮非圆磨削动态误差预测及补偿[J]. 制造技术与机床, 2009(10): 64~68.  
Li Jing, Shen Nanyan, He Yongyi, et al. Research on the dynamic error prediction and compensation in cam non-circular grinding process[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009(10): 64~68. (in Chinese)
- 10 Demeulenaere B, De Schutter J. Dynamically compensated cams for rigid cam-follower systems with fluctuating cam speed and dominating inertial forces[C]//2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings, 2001, 2: 763~768.
- 11 武志斌, 徐鸿钧, 姚正军, 等. 高效磨削时磨削热问题的研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 99~103.  
Wu Zhibin, Xu Hongjun, Yao Zhengjun, et al. The choke point and its counter measures of high efficiency grinding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 99~103. (in Chinese)
- 12 Patnaik D, Vijayender S P, Venkateswara R. A new model for grinding force prediction and analysis[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(3): 231~240.
- 13 Tang Qian, Pei Linqing, Xiao Hansong. Numerical and experimental analysis of quenching process for cam manufacturing[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(3): 529~536.
- 14 范晋伟, 关佳亮, 王文超, 等. 数控磨床磨削运动精度分析与控制方法的理论研究[J]. 北京工业大学学报, 2001, 27(4): 479~483.  
Fan Jinwei, Guan Jialiang, Wang Wenchao, et al. Study on the movement accuracy analysis and control for CNC grinding machining tool[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2001, 27(4): 479~483. (in Chinese)
- 15 邓朝晖, 王娟, 曹德芳, 等. 凸轮轴磨削加工过程的动态优化和仿真[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(5): 21~26.  
Deng Zhaohui, Wang Juan, Cao Defang, et al. Dynamic optimization and simulation of camshaft grinding process[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(5): 21~26. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 174 页)

- 11 王超, 张雪松, 徐政, 等. 基于 GO 法的特高压直流输电可靠性研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(1): 159~165.  
Wang Chao, Zhang Xuesong, Xu Zheng, et al. Reliability analysis of ultra high voltage direct current system based on GO methodology[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(1): 159~165. (in Chinese)
- 12 王智, 包成玉. YAG 激光器系统可靠性分析中 GO 法的应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(3): 377~380.  
Wang Zhi, Bao Chengyu. Application of GO methodology for reliability analysis of YAG laser system [J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2007, 47(3): 377~380. (in Chinese)
- 13 王淑娟, 王桂丽, 翟国富. GO 法在铁路客车电子防滑器仿真综合试验系统可靠性分析中的应用研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(10): 95~101.  
Wang Shujuan, Wang Guili, Zhai Guofu. Application and research of GO methodology in reliability analysis of synthetical simulated experiment system of railway electronic antiskid devices[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2006, 26(10): 95~101. (in Chinese)
- 14 张根保, 陈国华, 庞继红, 等. GO 法在供应链可靠性诊断中的应用[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(12): 40~46.  
Zhang Genbao, Chen Guohua, Pang Jihong, et al. Application of GO methodology in reliability analysis of supply chain[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(12): 40~46. (in Chinese)
- 15 贾增科. 基于 GO 法的应急管理系统可靠性分析[J]. 系统工程, 2011, 29(10): 123~126.  
Jia Zengke. Reliability analysis of emergency management system based on GO method[J]. Systems Engineering, 2011, 29(10): 123~126. (in Chinese)
- 16 张根保, 葛红玉. GO 法在产品装配过程质量分析中的应用研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(22): 2689~2692.  
Zhang Genbao, Ge Hongyu. Application and research of GO methodology in quality analysis of product assembly processes[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(22): 2689~2692. (in Chinese)
- 17 沙鸣, 孙世民. 供应链环境下猪肉质量链链节点的重要程度分析[J]. 中国农村经济, 2011(9): 49~59.  
Sha Ming, Sun Shimin. Analysis of importance degree about pork quality chain nodes under supply chain[J]. Chinese Rural Economy, 2011(9): 49~59. (in Chinese)
- 18 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. (in Chinese)
- 19 覃柏英. FAHP 的标度系统与排序方法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2005.  
Tan Baiying. The research of scale system and ranking method of FAHP[D]. Nanning: Guangxi University, 2005. (in Chinese)