

11-20-2019

Error Control on Unequal Diameter Machining of Arc Surface Cam

Hu Dongfang

1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; ;2. Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Henan Province, Luoyang 471003, China;

Jianwei Guo

1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; ;2. Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Henan Province, Luoyang 471003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Error Control on Unequal Diameter Machining of Arc Surface Cam

Abstract

Abstract: The effective control for the machining error is an important means for obtaining high precision and high efficiency of the unequal diameter profile machining of the arc surface cam. *According to the space meshing principle and the rotation transformation tensor method, the contact line between the tool and the cam is analyzed; the cutter position offset and direction in the machining process are calculated. The actual working profile of the unequal diameter machining cam equation is established. Calculation method of normal error of globoid cam profile is deduced by the principle of differential geometry.* The comparison between the machining error of the unequal diameter machining and the simulation experiment is carried out. The results verify the effectiveness of the new tool position control technique in error compensation.

Keywords

arc surface cam, unequal diameter machining, error compensation, normal error, error control

Recommended Citation

Hu Dongfang, Guo Jianwei. Error Control on Unequal Diameter Machining of Arc Surface Cam[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 727-732.

弧面凸轮的非等径廓面加工误差控制

胡东方^{1,2}, 郭建伟^{1,2}

(1. 河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 机械装备先进制造河南省协同创新中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 对加工误差进行有效控制是弧面凸轮非等径廓面加工获得高精度和效率的重要手段。根据空间啮合原理和旋转变换张量法, 对刀具与凸轮的接触线进行分析, 计算出加工过程中的刀位偏移量和偏移方向, 进而建立了非等径加工弧面凸轮的实际工作廓面方程。运用微分几何原理推导出弧面凸轮廓面法向误差的计算方法, 进行了非等径加工理论加工误差与仿真实验的对比, 结果验证了该新的刀位控制技术对误差补偿的有效性。

关键词: 弧面凸轮; 非等径加工; 误差补偿; 法向误差; 误差控制

中图分类号: TG54 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 04-0727-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0274

Error Control on Unequal Diameter Machining of Arc Surface Cam

Hu Dongfang^{1,2}, Guo Jianwei^{1,2}

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Henan Province, Luoyang 471003, China)

Abstract: The effective control for the machining error is an important means for obtaining high precision and high efficiency of the unequal diameter profile machining of the arc surface cam. According to the space meshing principle and the rotation transformation tensor method, the contact line between the tool and the cam is analyzed; the cutter position offset and direction in the machining process are calculated. The actual working profile of the unequal diameter machining cam equation is established. Calculation method of normal error of globoid cam profile is deduced by the principle of differential geometry. The comparison between the machining error of the unequal diameter machining and the simulation experiment is carried out. The results verify the effectiveness of the new tool position control technique in error compensation.

Keywords: arc surface cam; unequal diameter machining; error compensation; normal error; error control

引言

随着机械制造业不断的向着高速、高精、高效、低噪声和自动化的方向发展, 弧面分度凸轮作为机

械中的关键部件, 良好的性能和独特的结构并且可实现任意复杂的运动形式, 在包装机械、航空发动机、纺织机械、自动化机械等领域中起着不可替代的作用。

目前, 弧面分度凸轮的数控加工方式在广义上分为两种形式^[1-3]: 等径加工和非等径加工。等径加工采用范成法在数控机床上进行等价加工^[4], 使用滚子曲面几何参数相同的刀具与工件做共轭运



收稿日期: 2017-06-08 修回日期: 2017-08-18;
基金项目: 国家自然科学基金(51605145), 河南省教育厅重大科技攻关项目(13A520232), 河南科技大学高级别项目培育基金(2011CX016);
作者简介: 胡东方(1967-), 男, 河南洛阳, 硕士, 副教授, 研究方向为虚拟产品设计与开发。

<http://www.china-simulation.com>

动,完成凸轮廓面的加工且加工精度高,但是在加工过程中由于刀具磨损严重需频繁的换刀,大大增加了加工成本,此方法在加工过程中对凸轮槽两侧同时进行顺铣和逆铣,极大的影响凸轮廓面的加工精度;非等径加工则采用刀具直径小于凸轮滚子直径的刀具进行加工,其加工方法包括仿自由曲面法、刀位补偿法和两重包络法,与等径加工相比,非等径加工更能有效的提高加工效率降低生产成本。

在加工弧面凸轮时加工误差不容忽视,其中影响加工精度误差的主要因素有加工工艺误差、编程误差、安装误差和刀具磨损误差。由以上的加工方式可知,仿自由曲面加工和刀具补偿法本身就存在理论误差,文献[5]提出一种刀轴轨迹面与凸轮廓面等距曲面的极差最小为优化目标的弧面凸轮单侧面数控加工刀位数据计算的优化算法;文献[6]对单侧面加工中存在的理论误差进行分析,提出弧面凸轮单侧面加工的刀位控制原理;文献[7]对弧面凸轮在加工过程中产生的弓高误差和弦高误差进行分析,并提出了减小误差的走刀方式。从误差控制效果和算法实现效率来看,整体误差控制考虑相对较小,在凸轮廓面加工过程中也无需过多考虑其他局部误差影响因素的存在问题,因此,本文从能否运用小于滚子尺寸的铣刀铣削出高精度的弧面凸轮出发,提出针对廓面加工误差补偿的新的刀位控制方法。

1 弧面凸轮非等径加工方法

1.1 接触线可加工性分析

弧面凸轮在分度段处,其廓面为不可展空间曲面。当刀具产生误差时,刀具与凸轮的理论啮合线和滚子与凸轮的实际啮合线是不重合的曲线,此时的接触线是一条沿滚子表面的弧线,而非直线,刀具无论如何补偿,都无法加工出形状相同的曲线,那么加工出的廓面则会存在误差,所以不能用加工平面凸轮时刀具补偿的方式进行弧面凸轮凹槽的加工。若采用刀具半径小于滚子半径的加工方式进

行加工,无论怎样控制刀具位置,弧面凸轮廓面上都会存在编程误差,但是通过一定的刀位控制方法,可以使得加工误差达到更小。因此理论接触线与实际接触线的位置关系决定了凸轮廓面的误差大小,采取合适的刀位控制方法,使得两曲线距离最近、重合的越好,凸轮廓面的误差就会越小。

刀位补偿法是通过刀位偏移实现凸轮廓面的范成法加工,其目的是使加工误差最小^[8-9]。刀位补偿法的加工原理如图 1 所示, R 为滚子半径; r 为刀具半径; A 和 C 为刀具与滚子的接触点;曲线 MN 为滚子与凸轮廓面的接触线,即为实际接触线;曲线 PQ 为刀具与凸轮廓面的接触线,即为理论接触线; B 为理论接触线与实际接触线的交点。当采用小直径的刀具加工时,令其偏移一个补偿量 $\Delta r=R-r$,则滚子和刀具在 AC 处相切,并且,在加工中实际接触线为 PQ ,所以刀具只能加工到 B 点,同时 MN 上的其他点处于欠切状态进而会产生欠切误差^[10]。这样虽然理论的接触线和实际的接触线在不同的柱面上,但是在滚子接触线长度一半处两接触线相交于一点 B ,这一点处的廓面法向误差为 0,此时实现了两接触线误差达到最小的目的。

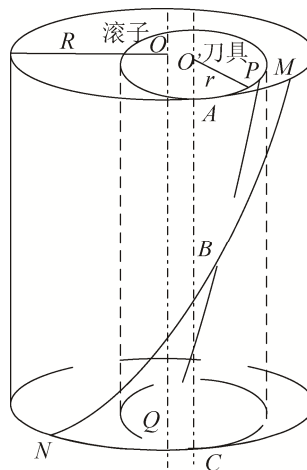


图 1 刀位补偿法

Fig. 1 Tool compensation method

1.2 刀位偏移量的确定

弧面凸轮机构的简化模型如图 2 所示, $o_0-x_0y_0z_0$ 为与机架固连的定坐标系,其中, z_0 轴为

从动盘的轴线方向, 并且 x_0 轴方向是由从动盘的中心指向凸轮中心; $o_1-x_1y_1z_1$ 为与从动盘相连并随之转动的动坐标系, x_1 轴与滚子轴线重合, 且一起和滚子绕 o_0 点转动, α_1 为从动盘角位移; $o_2-x_2y_2z_2$ 为与凸轮固连并和凸轮一起绕 y_2 轴做旋转运行的动坐标系, α_2 为 x_2 与 x_0 轴的夹角; c 为从动盘到弧面凸轮中心的中心距, β 为滚子与凸轮在接触点 D 处的接触角, n_1 为过滚子与弧面凸轮接触点 D 处的公法线的单位向量。

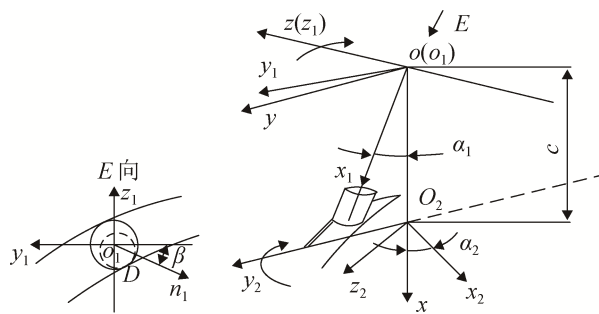


图 2 弧面凸轮机构简化模型

Fig. 2 Simplified model of arc surface cam mechanism

滚子上的接触点 D 在坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$ 中的位矢可表示为

$$\mathbf{R}_1 = (l_0 + l, R \cos \beta, R \sin \beta)^T \quad (1)$$

式中: l_0 为从动盘中心 o_1 到滚子内端面的距离; l 为啮合深度, 即从滚子内端面到接触点 D 的距离。

依据文献[11-12]以及共轭曲面啮合原理, 两曲面间的相对速度在公法线处互相垂直。那么滚子上的接触点 D 在动坐标 $o_1-x_1y_1z_1$ 的单位法向量为:

$$\mathbf{n}_1 = \frac{\frac{\partial \mathbf{R}_1}{\partial l} \times \frac{\partial \mathbf{R}_1}{\partial \beta}}{\left| \frac{\partial \mathbf{R}_1}{\partial l} \times \frac{\partial \mathbf{R}_1}{\partial \beta} \right|} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix} = (0, \cos \beta, \sin \beta)^T \quad (2)$$

令 F_1 和 F_2 分别为在固定坐标系 $o_0-x_0y_0z_0$ 中滚子和凸轮的角速度矢量, 则在接触点 D 处, 啮合曲面的相对速度为:

$$\mathbf{v} = \mathbf{F}_1 \times \mathbf{R}_1 - \mathbf{F}_2 \times (\mathbf{R}_1 - \mathbf{c}) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{c} = (c, 0, 0)^T$ 。

则滚子的工作曲面与弧面凸轮廓面的共轭曲面的啮合方程为:

$$\tan \beta = \pm \frac{(l + l_0)}{[c - (l + l_0) \cos \alpha_1]} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \quad (4)$$

式中: 正号为左旋凸轮, 负号为右旋凸轮; ω_1 为从动盘角速度; ω_2 为弧面凸轮角速度。

2 弧面凸轮理论误差模型

2.1 非等径加工弧面凸轮实际工作廓面方程

实际加工中, 在弧面凸轮机构的中心距、从动件运动规律等参数不变的情况下, 为解决刀具磨损、凸轮槽宽尺寸不一、加工余量难以控制等因素的影响, 采用非等径的加工方式进行加工, 将刀心位置处于滚子宽度一半的啮合角 β_1 上, 且距滚子中心的距离为 Δ_r 。如图 3 所示, β_1 为刀具与凸轮在刀具轴向一半处的啮合角(亦为等径加工接触角); β_2 为非等径加工接触角; K 为等径加工滚子与凸轮的接触点; H 为非等径加工刀具与实际加工廓面 Σ_1 的接触点; G 为非等径加工刀具与理论加工廓面 Σ_2 的接触点; n_2 为过滚子与凸轮接触点 K 处的法线; n_f 为实际工作廓面接触点法线; n_d 为理论工作廓面接触点法线; $\Delta_r \sin \beta_1$ 为刀具在动坐标 $o_1-x_1y_1z_1$ 的 y_0 轴方向的偏移量; $\Delta_r \cos \beta_1$ 为刀具在动坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$ 的 $-z_0$ 轴方向的偏移量。

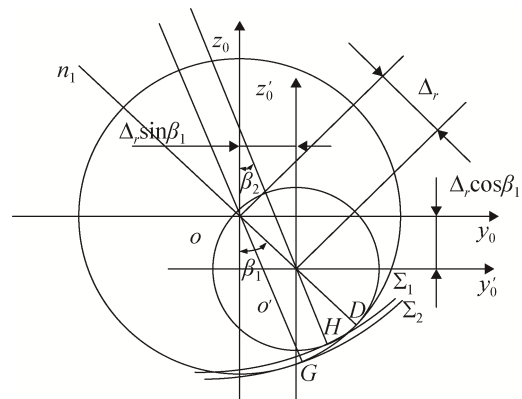


图 3 非等径加工刀具中心位置

Fig. 3 Central position of unequal diameter machining

在坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$ 中, 刀具在任意截面 $(l+l_0)$ 内, 与凸轮啮合点 H 的坐标用矢量可表示为:

$$(\mathbf{R}_H)_1 = \begin{bmatrix} -(l+l_0) \\ \Delta_r \cos \beta_1 + R \cos \beta_2 \\ \Delta_r \sin \beta_1 + R \sin \beta_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

啮合点 H 由动坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$ 到固定坐标系 $o_0-x_0y_0z_0$ 的坐标变换矩阵为:

$$\mathbf{M}_{10} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

在动坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$ 中,过啮合点 H 的单位法向矢量为:

$$\mathbf{n}_{H1} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ \partial a / \partial l & \partial b / \partial l & \partial c / \partial l \\ \partial a / \partial \beta_2 & \partial b / \partial \beta_2 & \partial c / \partial \beta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 \mathbf{j} + \sin \beta_1 \mathbf{k} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $a=-(l+l_0)$; $b=\Delta_r \cos \beta_1 + R \cos \beta_2$; $c=\Delta_r \sin \beta_1 + R \sin \beta_2$ 。

通过计算,可推导得弧面凸轮非等径加工的实际加工工作轮廓曲面方程为:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [c - \cos \alpha_1(l+l_0) - (R \cos \beta_0 + \Delta_r \cos \beta_1) \sin \alpha_1] \cos \alpha_2 - (R \sin \beta_0 + \Delta_r \sin \beta_1) \sin \alpha_2 \\ [c - \cos \alpha_1(l+l_0) - (R \cos \beta_0 + \Delta_r \cos \beta_1) \sin \alpha_1] + (R \sin \beta_0 + \Delta_r \sin \beta_1) \sin \alpha_2 \\ -\sin \alpha_1(l+l_0) + (R \cos \beta_0 + \Delta_r \cos \beta_1) \sin \alpha_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

由此可解得弧面凸轮非等径加工的啮合方程为:

$$\beta_0 = \arctg \frac{d\alpha_1(l+l_0) - \Delta_r \sin \alpha_1 \sin \beta_1}{c - \cos \alpha_1(l+l_0) \Delta_r \cos \beta_1 \sin \alpha_2} \quad (9)$$

式中: β_0 和 $\pi+\beta_0$ 分别对应凸轮的上下两个轮廓曲面。

2.2 凸轮廓面法向误差的计算

由前面图 3 非等径刀具加工位置所示,理论加工廓面 Σ_2 与实际加工廓面 Σ_1 为等距曲面,并且从式(9)可得出实际加工廓面接触点法线 \mathbf{n}_f 与理论加工廓面接触点法线 \mathbf{n}_d 是近似平行的,所以过实际加工廓面 Σ_1 上的任意一点 P 做法线,与理论加工廓面 Σ_2 交于点 Q ,那么 $|PQ|$ 则是弧面凸轮在 P 点的法向误差。所以,过 P 点的法线方程为:

$$\frac{x-x_p}{p_x} = \frac{y-y_p}{p_y} = \frac{z-z_p}{p_z} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 \cos \beta - \sin \alpha_2 \sin \beta \\ \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \beta - \cos \alpha_2 \sin \beta \\ \cos \alpha_1 \cos \beta \end{pmatrix} \quad (11)$$

根据滚子曲面与凸轮工作廓面的啮合原理,若存在加工误差时,此时实际廓面上的点 H 处于啮合状态,理论工作廓面上的点 G 有可能尚未进入啮合状态或者已经进入啮合状态,所以式 10 可以转化为:

$$\begin{cases} x = x_p + \frac{p_x}{p_y}(y - y_p) \\ z = z_p + \frac{p_z}{p_y}(y - y_p) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)是关于 $\alpha(k)$ 、 $l(k)$ 的二元非线性方程组,运用采用牛顿迭代法求解,以点 p 为迭代的初始点。设:

$$\begin{cases} f_1 = x - x_p - \frac{p_x}{p_y}(y - y_p) \\ f_2 = z - z_p - \frac{p_z}{p_y}(y - y_p) \end{cases} \quad (13)$$

利用牛顿迭代法对式 13 进行展开得:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_2}(\alpha_{20}, l_0) \Delta \alpha_2 + \frac{\partial f_1}{\partial l}(\alpha_{20}, l_0) \Delta l = -f_1(\alpha_{20}, l_0) \\ \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_2}(\alpha_{20}, l_0) \Delta \alpha_2 + \frac{\partial f_2}{\partial l}(\alpha_{20}, l_0) \Delta l = -f_2(\alpha_{20}, l_0) \end{cases} \quad (14)$$

式中:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial f_1}{\partial l} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial f_2}{\partial l} \end{bmatrix}, \quad \xi = \begin{bmatrix} -f_1 & \frac{\partial f_1}{\partial l} \\ -f_2 & \frac{\partial f_2}{\partial l} \end{bmatrix},$$

$$\psi = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_2} & -f_1 \\ \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_2} & -f_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} \Delta \alpha_2 = \frac{\zeta}{\Delta} \\ \Delta l = \frac{\psi}{\Delta} \end{cases}.$$

式中: α_{20} 、 l_0 分别为迭代的初始值,即点 p 所对应的凸轮实际工作廓面的参数。在实际加工过程中,加工误差一般很小,这样就保证了非线性方程组的收敛性。当 $|\alpha_{i+1} - \alpha_i| \leq 10^{-6}$ 且 $|l_{i+1} - l_i| \leq 10^{-6}$ 时迭代结束,此时可以得到理论加工廓面 Σ_2 上的

交点 G 所对应的参数 α_{2n} 和 l_{2n} , 所以 $\alpha_{2n} = \alpha_{i+1}$ 及 $l_{2n} = l_{i+1}$, 可得弧面凸轮廓面的法向误差为:

$$\Delta n = |PQ| = \sqrt{(x_p - x_Q)^2 + (y_p - y_Q)^2 + (z_p - z_Q)^2} \quad (15)$$

3 弧面凸轮非等径加工理论加工误差与仿真实验对比

为验证本文所提出的针对廓面加工误差补偿的新的刀位控制方法, 设计仿真实验如下: 针对一弧面凸轮工作廓面的非等径加工刀轨曲面, 采用不同刀具半径补偿进行加工, 对数据进行采集, 计算出廓面法向误差并进行分析。

由第 2 节计算的弧面凸轮廓面的法向误差, 现通过对一弧面凸轮廓面的误差计算来进行分析。其参数为: 中心距 $c=180$ mm, $l_0=70$ mm, 滚子半径 $R=20$ mm, 滚子宽度为 20 mm, 凸轮停歇角为 240° , 转盘滚子个数为 8, 转盘分度期的运动规律选用修正正弦加速度。将不同半径补偿量 Δ_r 以及刀具误差引起的廓面法向误差的精确值与仿真实验的近似值如表 1 所示, 表 1 的数据显示, 廓面误差与半径补偿量 Δ_r 成正比。

表 1 最大误差值
Tab. 1 Maximum error values

Δ_r/mm	δ_{\max}/mm	
	精确值	近似值
1	0.003 65	0.003 70
2	0.007 12	0.007 12
3	0.010 35	0.010 48
6	0.022 03	0.021 47
9	0.033 82	0.032 79

如图 4 所示从分布上可以看出, 刀具半径补偿量不断增大, 廓面误差也随之增大, 并且最大误差呈线性分布。为有效的减小由刀具引起的廓面法向误差, 保持精度, 选取刀具半径补偿 $\Delta_r=3\text{mm}$, 刀具误差对廓面法向误差的影响如图 5、图 6 所示。在图 5 中, 刀具半径补偿量 $\Delta_r=3\text{mm}$ 时, 滚子轴截面与刀具两端的廓面误差较大, 中间误差为 0, 滚子轴迹面呈现凹形, 则可采用修形鼓型滚子实现啮

合传动。同时, 在图 6 中, 当刀具半径补偿量 $\Delta_r=3$ mm 时, 在凸轮转角为 80° 时, 凸轮最大法向误差 $\Delta n=0.015 154$ mm, 并且只出现一次。

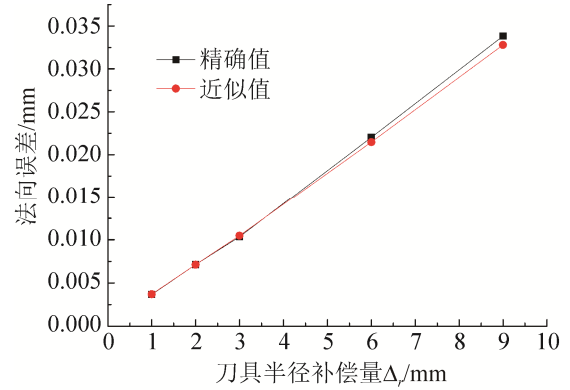


图 4 最大误差比较
Fig. 4 Comparison of maximum errors

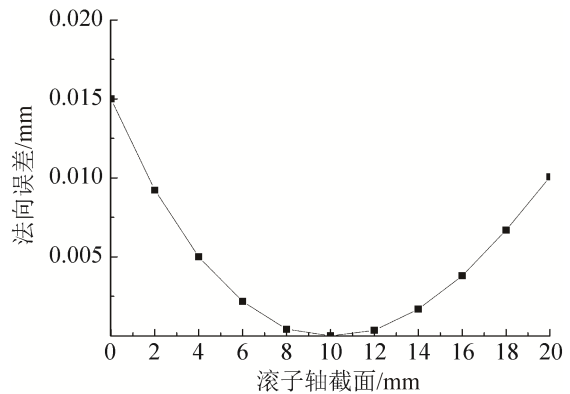


图 5 $\Delta_r=3\text{mm}$ 时, 滚子轴截面法向误差分布
Fig. 5 Normal error distribution of roller shaft section, when $\Delta_r=3\text{mm}$

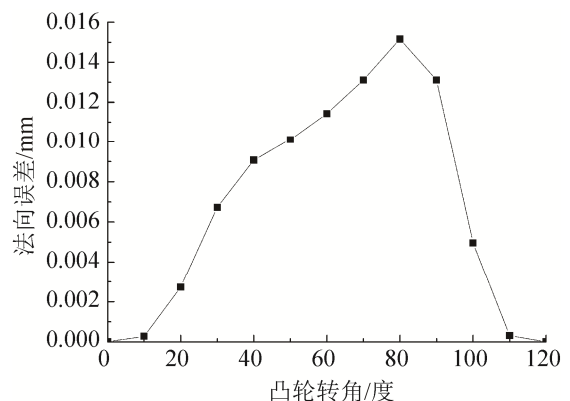


图 6 $\Delta_r=3\text{mm}$ 时, 滚子轴截面最大法向误差与凸轮转角关系
Fig. 6 Relation between the maximum normal error of roller shaft section and cam rotation angle, when $\Delta_r=3\text{mm}$

4 结论

(1) 采用针对廓面加工误差补偿的新的刀位控制方法, 大大降低了由刀具误差所引起的凸轮廓面的加工误差, 而且可进一步提高弧面凸轮廓面的加工精度和完善加工工艺。

(2) 通过推导的弧面凸轮廓面法向误差的计算方法, 能更加有效的实时对弧面凸轮廓面的加工情况进行了误差分析, 及时的将误差控制在许可的范围内。

(3) 此方法能够扩大刀具的使用范围, 提高刀具的使用寿命, 具有很好的经济性。

参考文献:

- [1] 杨延峰, 张跃明, 张玲爱, 等. 弧面分度凸轮廓面的加工[J]. 现代制造工程, 2005(5): 69-72.
Yang Yanfeng, Zhang Yueming, Zhang Ling'ai, et al. Manufacturing of profile of globoidal indexing cam[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2005(5): 69-72.
- [2] 胡自化, 张平, 漆瑞. 连续分度空间弧面凸轮的多轴数控加工工艺研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(24): 2184-2187.
Hu Zihua, Zhang Ping, Qi Rui. A Study on Multi-axis NC Machining Processes for Continuous Indexing Globoidal Cams[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(24): 2184-2187.
- [3] Tsay D M, Ho H C. Consideration of Manufacturing Parameters in the Design of Grooved Globoidal Cam Indexing Mechanisms[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215(1): 95-103.
- [4] 刘昌祺, 牧野洋, 曹西京. 凸轮机构设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 35-50.
Liu Changqi, Mu Yeyang, Cao Xijing. Cam mechanism design[M]. Bei Jing: Machinery Industry Press, 2005: 35-50.
- [5] 孔马斌, 胡自化, 李慧, 等. 基于等距曲面的弧面凸轮单侧面数控加工刀位优化算法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 277-282.
Kong Mabin, Hu Zihua, Li Hui, et al. New Cutter-location Optimization Algorithm and Error Analysis for Five-axis Flank Milling of Integral Impeller[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 277-282.
- [6] 尹明富, 赵镇宏. 弧面分度凸轮单侧面加工原理及刀位控制方法研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(2): 127-130.
Yin Mingfu, Zhao Zhenhong. Study on one—side machining principle and tool path control method of the globoidal cam[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(2): 127-130.
- [7] J N Lee. Interference-free Tool Path Generation using Enveloping Element for Five-axis Machining of Spatial Cam[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187/188: 1-10.
- [8] 何有钧, 邹慧君, 郭维忠, 等. 空间凸轮刀位补偿加工方式中理论加工误差的研究[J]. 中国机械工程, 2001, 12(9): 997-999.
He Youjun, Zou Huijun, Guo Weizhong, et al. Study on Theoretical Manufacturing Error Caused by Off-set Compensation in NC Machining for Spatial Cam[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(9): 997-999.
- [9] 葛正浩, 梁辰, 别瑜, 等. 弧面分度凸轮的非等价加工研究及误差分析[J]. 机械传动, 2016, 40(5): 43-45.
Ge Zhenghao, Liang Chen, Bie Yu, et al. Study on the Non-equivalent Machining and Error Analysis of Globoidal Indexing Cam[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(5): 43-45.
- [10] 程伟, 张跃明, 卜凡华. 弧面分度凸轮数控加工工艺研究[J]. 机械设计与制造, 2011(3): 171-173.
Cheng Wei, Zhang Yueming, Bu Fanhua. Study on the CNC processing of globoidal cam[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(3): 171-173.
- [11] 郑武. 弧面分度凸轮的廓面误差补偿及基于 SolidWorks 的运动仿真[D]. 西安: 西安理工大学, 2002.
Zheng Wu. The Profile Error Compensation of Globoidal Indexing Cam and the Movement Simulation Based on Solidworks[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2002.
- [12] 黄强, 张根保, 张新玉. 滚齿直接误差模型的建立与应用[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5588-5593.
Huang Qiang, Zhang Genbao, Zhang Xinyu. Building and Application of Direct Error Model for Gear Hobbing[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5588-5593.