

凸轮轴数控磨削工件主轴转速优化建模与实验研究

杨寿智¹ 邓朝晖² 吴桂云² 刘伟² 万林林² 彭克立³

1. 湖南大学, 长沙, 410082

2. 湖南科技大学难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湘潭, 411201

3. 湖南海捷精密工业有限公司, 长沙, 410205

摘要:根据凸轮轴 X-C 轴联动恒线速度磨削加工数学模型, 建立了砂轮架进给位移与速度、凸轮工件主轴转速的理论方程。根据数控凸轮轴磨床加工能力的约束条件, 对砂轮架进给中速度、加速度或加加速度值超出限定值的凸轮转角区间, 通过积分反求方法求解出相应转角区间工件主轴所允许的转速值, 并以该段转速值替换对应的转角区间上凸轮轴恒线速度磨削时理论转速值。对优化计算前后的工件主轴转速曲线进行了凸轮轴磨削加工实验。实验结果表明: 采用优化后的凸轮工件主轴转速进行加工, 相比于恒线速度理论转速加工, 其升程最大误差与最大相邻误差减小, 工件表面粗糙度降低, 提高了凸轮轴高效精密磨削加工质量。

关键词:凸轮轴; 工件主轴; 转速优化; 砂轮架加速度; 积分反求

中图分类号: TG580

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2016.05.014

Modeling and Experimental Research of Workpiece Spindle Speed Optimization in CNC Camshaft Grinding

Yang Shouzhi¹ Deng Zhaohui² Wu Guiyun² Liu Wei² Wan Linlin² Peng Keli³

1. Hunan University, Changsha, 410082

2. Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-cut Material, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201

3. Hunan Hicam Precision Industry Co., Ltd., Changsha, 410205

Abstract: According to the constant speed camshaft grinding mathematical model in X-C axis, the equations of horizontal feed displacement and velocity of wheelhead, cam workpiece spindle theory speed were established. Based on the machine capacity constraints of CNC camshaft grinder, the allowed values of workpiece spindle speed were calculated with integration reverse method, where the values of horizontal feed velocity, acceleration or jerk of wheelhead exceeded the limit in the corresponding corner section. Then the calculated values of workpiece spindle speed were replaced with the theoretical speed value of constant speed camshaft grinding on the corresponding corner section. With the workpiece spindle speed curves before and after optimization, the camshaft grinding experiments were carried out. The experimental results indicate that: using the optimized workpiece spindle speed, the maximum cam lifting errors and maximum adjacent errors of the camshaft decrease compared to that processed by the theoretical constant speed; and the surface roughness also decreases. It shows that optimization method can improve the processing quality of the precision and efficient camshaft grinding.

Key words: camshaft; workpiece spindle; speed optimization; wheelhead acceleration; integration reverse

0 引言

凸轮轴作为内燃机、柴油发动机的关键部件之一, 对其加工质量的要求越来越高^[1]。与传统的机械靠模仿形加工相比, 由砂轮架往复直线运动(X轴)和工件旋转运动(C轴)构成的两轴联动数控磨削加工, 能够显著地提高凸轮轴磨削精

度与效率, 同时具有很高的柔性^[2]。在凸轮轮廓的两轴联动数控磨削成形过程中, 砂轮架的往复直线运动是一个进给量随着工件旋转不断变化的过程, 该过程对机床数控系统计算能力、机床伺服系统响应能力和机械部分传动能力等都提出了很高的要求^[3]。在磨削凸轮升程非圆轮廓段时, 砂轮架进给速度变化剧烈, 引起砂轮架进给加速度突变, 对机床伺服系统造成较大的机械冲击, 磨床的伺服系统会产生响应滞后, 使得加工该升程段轮廓时有较大的跟踪误差, 无法实现正常的磨削

收稿日期: 2015-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175163); 国家科技支撑计划资助项目(2015BAF23B01); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110161110032)

加工,因此有必要对凸轮轴数控磨削加工中的凸轮工件主轴转速进行优化调整,从而使得砂轮架进给速度变化缓和,跟踪误差减小甚至消除^[4-10]。

目前国内外学者基于恒磨除率、恒线速度理论数学模型,结合非圆轮廓表面加工运动的特点,对凸轮磨削过程中工件主轴转速的优化调整技术作了较多的研究。盛晓敏等^[6]提出了凸轮轴“四点恒线速”的变转速理论模型,即磨削中保证凸轮在基圆、顶圆和两侧敏感点四处的线速度接近于恒定,其余各点速度均匀过渡变化,从而有效地实现了凸轮轴的整体磨削速度平稳。孙志永等^[7]采用角点法,根据凸轮展开的平面廓形选取 8 个角点,将基圆转速设为 100%,然后根据平面廓形选取的 8 个角点进行转速优化。邓朝晖等^[8]基于分段最小二乘拟合方法,通过改变拟合次数与分段数目的组合来优化加工运动曲线,得到了波动较小的速度曲线,并减小了联动轴加速度的跳动。蔡晓敏等^[9]研究了凸轮切点跟踪磨削的头架转速控制,建立了基于头架转速的运动模型,分析了头架转速变化规律,采用分段恒线速度的方法对头架转速曲线进行了优化。孙玉文等^[10]为了满足高速高精度的数控加工要求,结合曲线曲率约束及进给驱动限制,提出了基于速度敏感区的合理分段参数插补方法,对砂轮架进给速度进行了规划处理。企业加工中采用的工件转速是在恒线速度理论模型基础上,基于实际生产加工经验,选择合适的插值点进行优化拟合。

目前的研究尚未直接考虑砂轮架的加速度是否超过数控磨床的加速度限定范围,各种方法无法保证凸轮轴磨削加工中各联动轴进给的速度及其加速度不超过凸轮轴数控磨床伺服系统的响应要求。

为了保证凸轮轴数控磨削加工质量,需要在恒线速度理论转速曲线的基础上,对凸轮轴加工过程速度曲线作进一步的优化,使得调整后的加工工件转速值既符合凸轮轴实际生产加工要求,又能满足磨床进给伺服系统的响应需求,从而最大限度地减小进给系统跟踪误差,提高凸轮轴的加工质量。本文在充分利用凸轮轴数控磨床加工能力的前提条件下,以数控凸轮轴高速磨床加工能力为约束条件,对砂轮进给中速度、加速度、加加速度(即加速度的变化快慢)超出最大值的凸轮转角区间,通过积分反求方法求解出对应转角区间进给中对应的工件转速值,并以该段转速值替换对应的转角区间上凸轮轴恒线速度磨削时理论转速值。在 CNC8325B 全数控凸轮轴磨床上对

优化后的主轴转速与恒线速度理论转速进行对比工艺实验,验证了本文所提方法的正确性。

1 凸轮轴恒线速度磨削加工数学模型

采用 X-C 轴联动恒线速度磨削加工时,凸轮轮廓上磨削点的线速度是相对恒定的。图 1 为凸轮轴 X-C 轴联动磨削加工示意图,本文以滚子从动件为例来推导凸轮轴数控磨削过程中两轴联动 X-C 坐标值。

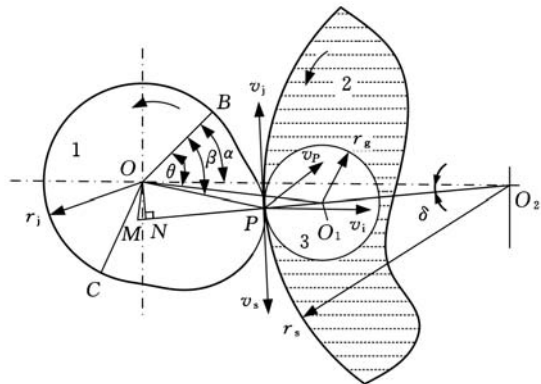


图 1 凸轮轴 X-C 轴联动磨削加工示意图

图 1 中,1 为凸轮,2 为砂轮,3 为滚子从动件测头, O 为凸轮基圆圆心,基圆半径 $OB = r_j$, O_1 为滚子从动件测头中心,滚子测头半径为 r_g , O_2 为砂轮中心,其半径为 r_s , B 为砂轮磨削行程的起始点, C 为砂轮磨削行程的终点,其中滚子从动件测头转角 $\angle BOO_1 = \theta$,凸轮转角 $\angle BOO_2 = \alpha$, $\angle OO_2O_1 = \delta$,磨削点 P 转角 $\angle BOP = \beta$ 。凸轮与砂轮相切点为 P 点,与 OM 相交于点 M 。 M 为凸轮相对于滚子测头的速度瞬心。

设凸轮的升程为 $H(\theta)$,作 $OM \perp OO_1$,则:

$$OM = \frac{dH(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

$$OO_1 = r_j + r_g + H(\theta) \quad (2)$$

可以得到砂轮的进给位移方程:

$$X(\theta) = OO_2 - r_j - r_s \quad (3)$$

设 $l(\beta)$ 表示磨削点沿凸轮轮廓走过的轨迹,经过时间 Δt ,磨削点由 P 点运动到 S 点, dl 表示从 P 点到 S 点之间的弧长大小,此时磨削点 P 的线速度可表示为

$$v_p = \frac{dl}{dt} = \sqrt{\left(\frac{d\rho}{d\beta}\right)^2 + \rho^2} \frac{d\beta}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} \quad (4)$$

式中, ρ 为磨削点 P 的极半径。

设磨削凸轮基圆部位时的角速度为 ω_j ,要求各磨削点线速度一样,令

$$v_p = \omega_j r_j \quad (5)$$

可以得到凸轮升程段各点的角速度 ω 为

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{\omega_j r_j}{\sqrt{(\frac{d\rho}{d\beta})^2 + \rho^2}} \frac{d\beta}{dt} \quad (6)$$

根据式(3)与式(6)可以分别拟合得到凸轮工件转角与砂轮进给中心位移曲线、凸轮工件转角与工件主轴转速曲线。图 2、图 3 所示分别为某汽车发动机进气凸轮轴 465Q 恒线速度磨削加工下的砂轮架进给位移与工件主轴理论转速 n ($n = \omega / (2\pi)$) 曲线。

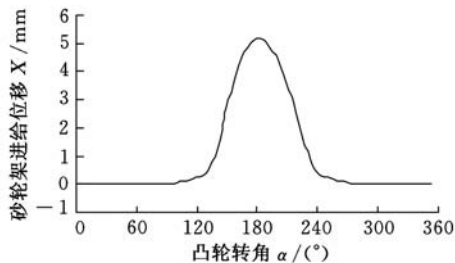


图 2 砂轮架进给位移曲线

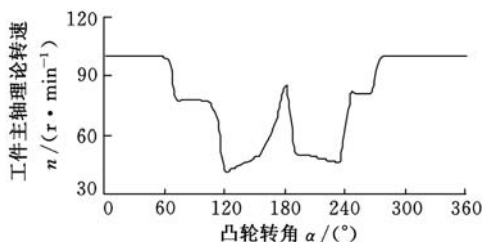


图 3 工件主轴理论转速曲线

2 凸轮工件主轴转速的反求优化

2.1 砂轮架联动进给过程运动学分析

在凸轮轴轮廓的数控磨削成形运动中,砂轮架的运动是沿着 X 轴方向的横向进给运动,与其耦合联动的凸轮工件主轴旋转运动可以分解出一个水平方向的移动速度,其速度值与砂轮架的横向进给运动速度值相同。砂轮与凸轮相互作用运动各个速度示意如图 1 所标注,凸轮在磨削切点 P 的线速度为 v_p ,砂轮在 P 点切向速度为 v_s ,凸轮 P 点切向速度为 v_j , v_j 与 v_s 大小相等,方向相反;砂轮水平进给速度为 v_i ,从而可以得到如下数学关系式:

$$v_i = v_j \sin(\beta - \alpha + \delta) - v_p \sin \delta \quad (7)$$

$$v_j = \rho(\theta) \frac{d\beta(\theta)}{d\alpha(\theta)} \omega(\theta) \quad (8)$$

$$\delta = \arcsin \frac{OO_1 \sin(\theta - \alpha)}{O_1 O_2} \quad (9)$$

将式(4)和式(8)代入到式(7)可以得到凸轮的水平运动速度关系式。由于砂轮与凸轮是联动加工,所以凸轮轴工件水平运动速度计算式同样适合于砂轮横向进给运动速度。

将式(7)对转角 θ 求一阶导数可以得到砂轮

横向水平进给加速度值。根据实际加工参数设定砂轮半径 200 mm,滚子测头半径 12.7 mm,凸轮基圆半径 15.5 mm,标准凸轮升程值由湖南海捷精密工业有限公司提供,通过 MATLAB 计算得到凸轮轴 465Q 磨削的砂轮架进给速度曲线和加速度曲线,如图 4、图 5 所示。

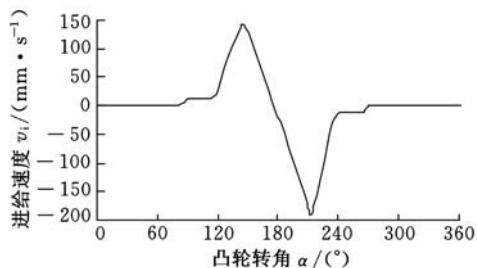


图 4 砂轮架水平进给速度曲线

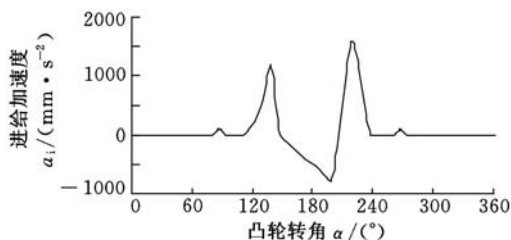


图 5 砂轮架进给加速度曲线

2.2 砂轮架进给过程最大加速度的分析

由于凸轮升程段为非圆轮廓,型线上各点曲率是不断变化的,故砂轮架进给速度总是受到不断变化的轮廓曲率半径的约束。为了保证磨削点的恒线速度,在磨削过程中工件主轴需进行变转速运动,这导致凸轮升程段的砂轮架进给速度变化大,通常会出现较大的瞬时速度以及加速度跳动,形成砂轮架进给速度敏感区域段。

根据图 2 所示砂轮架进给位移曲线,通过 MATLAB 编程拟合得到砂轮架位移 X 相对于凸轮转角 θ 的拟合多项式:

$$X(\theta) = -0.0922\theta^3 - 1.5589\theta^2 + 6.1132\theta - 0.2817 \quad (10)$$

在插补周期为 T 的时间内,工件主轴转过角度 $\Delta\theta_i$,同时砂轮架进给位移为 ΔX_i ,以数控凸轮轴磨床加工进给能力为约束条件,则砂轮架进给速度 v_i 与加速度 a_i 应该满足:

$$v_i = \frac{|X(\theta_i + \Delta\theta_i) - X(\theta_i)|}{T} \leq v_{\max} \quad (11)$$

$$a_i = \frac{|v_i(\theta_i + \Delta\theta_i) - v_i(\theta_i)|}{T} \leq a_{\max} \quad (12)$$

式中, v_{\max} 、 a_{\max} 分别为砂轮架伺服进给系统允许的最大速度、加速度值。

已知 CNC8325B 凸轮轴数控磨床的砂轮架伺服进给系统允许的最大速度 v_{\max} 、加速度 a_{\max} 、加加速度值 j_{\max} 分别为 150 mm/s、1500 mm/s²、

350 000 mm/s³。由图 4、图 5 可知,砂轮架的最大进给速度与最大进给加速度值分别达到了近 200 mm/s 与 2000 mm/s²,表明采用恒线速度磨削将会导致砂轮架的进给速度与加速度值超过磨床系统所能承受的能力范围,使得数控凸轮轴高速磨床进给伺服控制系统响应达不到要求,X-C 两轴联动的耦合运动效果不好,产生较大的轮廓跟踪误差,从而严重影响凸轮轴加工的轮廓精度。

2.3 凸轮工件主轴转速反求

在实际凸轮轴数控高速磨削加工中,如果某一点凸轮工件转速偏大,将导致磨削不充分,凸轮轮廓从基圆到桃尖过渡的两腰敏感处呈现出较大的正误差;如果升程段某点磨削工件转速偏小,则将降低凸轮的加工效率,同时有可能在磨削过程中出现表面波纹等。

在凸轮轴数控磨削过程中,凸轮轴磨床砂轮架通过伺服电机驱动完成水平方向上的往复运动,砂轮主轴进给伺服系统控制砂轮架进给加速度呈线性变化,即在凸轮升程的加速段磨削,凸轮工件主轴每旋转 1°,砂轮架的进给加速度变化是先匀加速后匀减速的过程,而对于减速段,砂轮架的加速度变化是先匀减速后匀加速的过程,计算过程与加速段是相同的。

凸轮工件主轴在转过每相邻的单位角度时对应的时间为 t_i ,其前后对应的砂轮架进给位移、速度、加速度分别为 $(x_{i-1}, v_{i-1}, a_{i-1})$ 、 (x_i, v_i, a_i) ,砂轮架进给加加速度为 j_i ,则砂轮架在凸轮升程加速段的匀加速或减速段的匀减速时,对应的加速度值 a_i 为

$$a_i = a_{i-1} + j_i t \quad (13)$$

砂轮架在凸轮升程加速段的匀减速或减速段的匀加速对应的加速度值 a'_i 为

$$a'_i = a_{i-1} + \frac{j_i t_i}{2} - j_i (t - \frac{t_i}{2}) \quad (14)$$

对加速度进行定积分求解,可得

$$v_i - v_{i-1} = \int_0^{t_i/2} a_i dt + \int_{t_i/2}^{t_i} a'_i dt \quad (15)$$

通过对上述定积分方程的求解可以得到工件主轴在实际磨削加工旋转每一度所对应的时间:

$$t_i = \frac{2[\sqrt{a_i^2 + 2j_i(v_i - v_{i-1})} - a_i]}{j_i} \quad (16)$$

根据凸轮工件主轴转过每一个角度时,所对应的砂轮架进给速度、加速度、加加速度值,对其进行取值判定,并计算工件转速值:

(1) 如果砂轮架进给速度、加速度、加加速度值都小于其砂轮架伺服进给系统允许的最大速度、加速度、加加速度值,即 $v_i < v_{\max}, a_i < a_{\max}$

且 $j_i < j_{\max}$,则说明在对应凸轮转角处砂轮架的进给速度、加速度、加加速度值在允许的最大值范围之内,因此可以求得在对应的凸轮转角处的工件转速值:

$$n_i = n_0 \frac{t_0}{t_i} \quad (17)$$

式中, n_0 、 t_0 分别为凸轮基圆转速、基圆段转过 1° 的时间。

(2) 砂轮架进给速度、加速度、加加速度值不都小于其砂轮架伺服进给系统允许的最大速度、加速度、加加速度值,即 $v_i \geq v_{\max}, a_i \geq a_{\max}$ 或 $j_i \geq j_{\max}$,则说明在对应凸轮转角处砂轮架的进给速度、加速度、加加速度值不都在允许的最大值范围之内,可以将超过最大值范围的量采用最大允许值代入式(16)求解 t_i ,进而通过式(17)求得在对应凸轮转角处的工件转速值。

根据优化反求后计算得到的转速值点,选取合适的节点区间,在保证尽量逼近恒线速度原有理论曲线形状的基础上,将实际计算得到的工件主轴转速通过三次样条曲线进行拟合,得到工件主轴转速值,如图 6 所示。

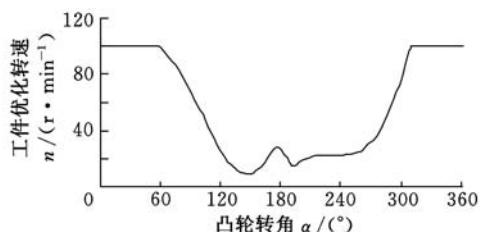


图 6 优化反求后凸轮工件主轴转速曲线

比较优化前后工件主轴转速曲线(图 3、图 6)可知,对部分区间转速值点进行优化后整个工件主轴转速曲线变得光滑;优化后工件主轴转速值较原来转速值降低,能够保证砂轮与工件联动进给磨削的充分性。

3 凸轮工件主轴转速优化实验验证

采用优化后的凸轮工件主轴转速值(图 6)与恒线速理论转速值(图 3),在 CNC8325B 全数控凸轮轴超高速复合磨床上进行凸轮轴数控磨削加工对比实验,检测加工后的最大凸轮轮廓升程误差、最大相邻误差与表面粗糙度。

465Q 进气凸轮轴材料为冷激铸铁,基圆半径为 15.5 mm,滚子测头半径为 12.7 mm,其最大升程为 5.1525 mm。定义砂轮磨削线速度为 100 m/s,其粗磨、精磨、光磨三阶段基圆转速分别为 90 r/min、80 r/min、60 r/min,具体的磨削加工工艺参数如表 1 所示。采用 CBN 砂轮进行高速磨

削,磨削液为水基 5%凯牌莫氏浓缩切削液,实验装置如图 7 所示。

表 1 凸轮轴数控磨削工艺方案

磨削阶段	工件基圆转速 (r/min)	磨削圈数	每圈进给量 (mm)	磨削余量 (mm)
粗磨	90	10	0.100	1.000
精磨	80	6	0.060	0.360
光磨	60	4	0.010	0.040
无火花磨	60	1	0	0



图 7 凸轮轴数控磨削实验装置

为减小随机因素对凸轮轴加工的影响,对两组转速值,在其他加工条件相同的环境下,进行三次重复实验,测量凸轮的最大升程误差、最大相邻误差与表面粗糙度,并取其平均值。对加工后的凸轮工件采用 BG1310-10 型凸轮轴轮廓检测仪进行升程误差、相邻误差的测量,采用 MarSurf M300 检测工件的表面粗糙度。

图 8 所示为优化前恒线速度理论转速磨削、优化后工件转速磨削的凸轮轮廓升程误差曲线(凸轮转角两端基圆段基本重合);表 2 是两组对比实验的测量结果。

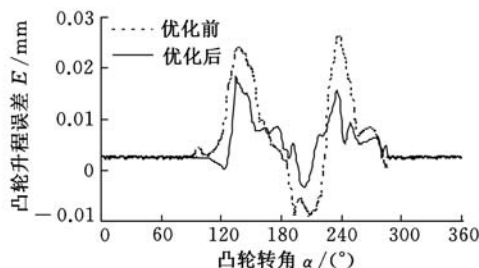


图 8 凸轮升程误差曲线

表 2 凸轮轴数控磨削实验结果 μm

	最大升程误差	最大相邻误差	表面粗糙度
理论转速磨削	26.2	3.3	0.338
优化转速磨削	17.3	2.7	0.335

由表 2 可知:优化后凸轮工件转速曲线加工出来的凸轮最大升程误差为 $17.3 \mu\text{m}$,相比于恒

线速度理论转速值加工出来的凸轮最大升程误差 $26.2 \mu\text{m}$ 减小了 $8.9 \mu\text{m}$,约减小 33.97%;最大相邻误差值由恒线速度理论转速值加工的 $3.3 \mu\text{m}$ 降低至 $2.7 \mu\text{m}$,约降低 18.18%;表面粗糙度值由恒线速度理论转速值加工的 $0.338 \mu\text{m}$ 减小到 $0.335 \mu\text{m}$,约减小 0.89%。表明通过约束砂轮进给速度、加速度、加加速度的最大值,采用积分反求法对凸轮工件主轴转速曲线进行优化,磨削加工后的工件轮廓精度提高,同时表面粗糙度值减小,更加符合实际生产提高加工精度的要求,从而验证了凸轮工件主轴转速优化建模的正确性。

4 结论

(1)通过分析凸轮轴恒线速度磨削过程数学模型,计算得到砂轮进给位移方程和凸轮工件主轴转速方程。

(2)针对磨削中砂轮架进给速度、加速度、加加速度超出最大值的凸轮转角区间,通过积分反求方法求解出对应的工件转速值,并以该段转速值替换相应的转角区间上凸轮轴恒线速度磨削时的理论转速值,采用三次样条曲线对优化后的工件主轴转速进行拟合处理。

(3)在 CNC8325B 数控凸轮轴磨床上对优化前后的凸轮工件转速进行高速磨削加工实验验证,实验结果表明,优化后凸轮工件转速曲线加工的凸轮最大升程误差为 $17.3 \mu\text{m}$,相比于恒线速度理论转速加工的凸轮最大升程误差 $26.2 \mu\text{m}$,减小了 $8.9 \mu\text{m}$;最大相邻误差值由原来的 $3.3 \mu\text{m}$ 减小至 $2.7 \mu\text{m}$,表面粗糙度值由原来的 $0.338 \mu\text{m}$ 减小到 $0.335 \mu\text{m}$ 。提高了凸轮轴高效精密磨削加工轮廓精度,提高了磨削加工质量。

参考文献:

- [1] 陈勇. 汽车轴类零件高效磨削实验研究与工艺优化 [D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [2] 许第洪, 孙宗禹, 周志雄, 等. 切点跟踪磨削法运动模型的研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(8): 68-73.
Xu Dihong, Sun Zongyu, Zhou Zhixiong, et al. Research on Motion Model of Tangential Point Grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(8): 68-73.
- [3] 李勇. 影响数控凸轮轴磨削加工精度若干因素的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [4] 曹德芳, 邓朝晖, 刘伟, 等. 凸轮轴磨削加工速度优化调节与自动数控编程研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(18): 2149-2155.

- Cao Defang, Deng Zhaohui, Liu Wei, et al. Research on Camshaft Grinding Speed Optimization and Automatic NC Programming[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(18): 2149-2155.
- [5] 肖真健. 数控磨床磨削凸轮轴类零件的数学模型与试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
- [6] 盛晓敏, 宓海青, 陈涛, 等. 汽车凸轮轴的高速精密磨削加工关键技术[J]. 制造技术与机床, 2007(4): 122-125.
- Sheng Xiaomin, Mi Haiqing, Chen Tao, et al. Key Techniques in High Speed and Precision Grinding of Cam Axes[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2007(4): 122-125.
- [7] 孙志永, 褚大雁. 数控凸轮轴磨床加工中的一些仿真技术[J]. 制造技术与机床, 2006(6): 97-99.
- Sun Zhiyong, Chu Dayan. Simulation Technology in Machining CNC Cam Grinding Machine[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2006(6): 97-99.
- [8] 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): 21-25.
- 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): 21-25.
- [9] 蔡晓敏, 何永义, 周其洪, 等. 凸轮切点跟踪磨削的头架转速研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(2): 41-44.
- Cai Xiaomin, He Yongyi, Zhou Qihong, et al. Revolution Control of Headstock Base on Non-circular Grinding[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(2): 41-44.
- [10] Sun Yuwen, Zhao Yang, Xu Jinting, et al. The Feedrate Scheduling of Parametric Interpolator with Geometry, Process and Drive Constraints for Multi-axis CNC Machine Tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 85: 49-57.
- (上接第 638 页)
- [5] Bookstein F. Fitting Conic Sections to Scattered Data[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1979, 9: 56-71.
- [6] Chesi G, Garulli A, Vicino A, et al. Estimation the Fundamental Matrix Via Constrained Least Squares: a Convex Approach[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(3): 397-401.
- [7] Hartley R. Indefense of the Eight-point Algorithm[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(6): 580-593.
- [8] 李京. 基于遗传粒子群优化算法的遥感图像分类方法研究与应用[D]. 北京: 首都师范大学, 2013.
- [9] 李永明. 人工神经网络 BP 学习算法的研究及在人脸识别中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [10] Kahl F, Hartley R. Multiple View Geometry under the Norm[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(9): 1603-1617.
- [11] Tomasi C, Kanade T. Shape and Motion from Image Streams under Orthography: a Factorization Method[J]. Int. Journal of Computer Vision, 1992, 9(2): 137-154.
- [12] Richard H, Jochen T, Dai Yuchao, et al. Rotation Averaging[J]. International Journal of Computer Vision, 2013, 103(3): 267-305.
- [13] Lasserre J B. Global optimization with Polynomials and the Problem of Moments[J]. SIAM J. Optimization, 2001, 11(3): 796-817.
- [14] Henrion D, Lasserre J B. Solving Nonconvex Optimization Problems-How Gloptipoly is Applied to Problems in Robust and Non-linear Control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2004, 24(3): 72-83.
- [15] Sturm J F. Using SeDuMi 1.02: a Matlab Toolbox for Optimization Over Symmetric Cones[J]. Optimization Methods and Software, 1999, 11(12): 625-653.
- [16] Waki H, Kim S, Kojima M, et al. Sparse POP: A Sparse Semidefinite Programming Relaxation of Polynomial Optimization Problems [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2008, 35(2): 1-15.

(编辑 袁兴玲)

作者简介: 杨寿智, 男, 1972 年生。湖南大学机械与运载工程学院博士研究生。研究方向为高效精密智能磨削技术。发表论文集近 10 篇。邓朝晖(通信作者), 男, 1968 年生。湖南科技大学机电工程学院教授、博士研究生导师。吴桂云, 男, 1989 年生。湖南科技大学机电工程学院硕士研究生。刘伟, 男, 1986 年生。湖南科技大学机电工程学院讲师、博士。万林林, 男, 1984 年生。湖南科技大学机电工程学院讲师、博士。彭克立, 男, 1976 年生。湖南海捷精密工业有限公司副总经理、高级工程师。

作者简介: 柯丰恺, 男, 1989 年生。华中科技大学机械科学与工程学院博士研究生。主要研究方向为最优化算法及三维重建。陈幼平, 男, 1957 年生。华中科技大学机械科学与工程学院教授、博士研究生导师。谢经明, 男, 1966 年生。华中科技大学机械科学与工程学院副教授。张代林, 男, 华中科技大学机械科学与工程学院讲师。