

基于最小加工冲击的活塞外廓线重构及优化

杨润青¹, 翟 鹏^{1*}, 魏 一¹, 韩宇珍¹, 李传坤², 孙丽丽², 刘振文³

(1. 山东大学机电与信息工程学院, 山东 威海 264209;

2. 山东滨州渤海活塞有限公司技术中心, 山东 滨州 256602; 3. 山东玲珑机电有限公司技术中心, 山东 烟台 265400)

摘要: 由椭圆-偏心圆组成的活塞组合型外廓线, 在高速插补时通常是对外廓线的型值点用三次样条曲线进行拟合, 由于三次样条曲线拟合不能实现 2 阶参数(即 C^2)连续而引起冲击, 影响被加工活塞的轮廓及尺寸精度. 为了减小冲击, 将椭圆-偏心圆交点按奇异点处理, 删除奇异点及其相邻角度范围的型值点, 并采用五次样条曲线进行拟合. 以重构后组合型线的加速度最小为目标, 在满足精度要求的条件下, 对可删除插值角度进行了优化. 加工实验结果表明, 优化后的活塞外圆能实现加速度无突变且轮廓满足精度要求.

关键词: 活塞外圆; 椭圆-偏心圆; 型线重构; 减小冲击

中图分类号: TG 659

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2019)03-0455-06

为使活塞在各种工况下均能与气缸壁保持均匀的间隙, 活塞通常设计为中凸变椭圆型^[1], 其纵向型线为中凸鼓形, 裙部横向截面型线为沿裙高呈线性变化的变椭圆^[2]. 而对于某些大功率活塞, 其裙部横向截面外廓线一般设计为椭圆-偏心圆的组合型^[3]. 对于这种组合型外廓线, 其插值方法一般采用多项式插值、分段多项式插值和三次样条曲线插值^[4]. 三次样条曲线插值计算简捷, 应用范围广^[5-7], 但由于其无法保证在组合型外廓线交点处 2 阶参数(即 C^2)的连续性, 故加工过程中刀具会产生振动甚至冲击, 影响轮廓精度. 在实际加工中, 需要根据加工误差进行人为修正, 以保证轮廓精度达到要求^[8]. 但是人为修正增加了工艺周期, 且活塞表面质量无法保证.

对于大椭圆度活塞的加工, 切削角的周期性变化会引起切削力的波动, 减小刀具寿命和降低活塞表面质量. Kim 等^[9]设计了一种 2 自由度的前角可变刀架机构, 李抢等^[10-11]提出了一种切削角补偿机构, 通过该机构可以补偿由非圆轮廓引起的切削角的变化, 有效地提高了活塞的表面质量和轮廓精度. 杨吉祥等^[12]针对切削角变化设计了一种新的刀架机构, 并开发了

相应的轨迹插补算法, 与传统车削算法相比, 该算法使加工后的最大绝对轮廓误差降低了 37.9%. 然而, 对于小椭圆度异形活塞外圆的加工, 切削角的变化不再是影响活塞轮廓精度的主要因素. 因此, 需要对活塞裙部截面的曲线进行重构及优化. 黄海滨等^[13]和孙华刚等^[14]分别提出变截面螺旋轨迹算法和近似螺旋线轨迹法, 提高了小椭圆度异形活塞的轮廓精度. 但以上方法均以刀具加工路径为螺旋线进行轨迹优化, 无法解决组合型线在奇异点处的加速度突变问题.

本研究针对组合型外廓线交点处 C^2 不连续造成的加工冲击和误差问题, 对活塞裙部截面曲线进行重构, 删除了组合型线交点处的部分型值点, 对优化后的型值点采用五次样条曲线进行拟合, 并对结果进行了实验验证.

1 活塞截面组合外圆型线数学模型

图 1 为椭圆-偏心圆组合外廓线示意图, 以活塞裙部截面中心为圆心, 活塞裙部长轴为椭圆长轴, 椭圆短轴部分由偏心圆替代, 以缩短活塞裙部短轴处的径

收稿日期: 2018-09-21 录用日期: 2019-02-18

基金项目: 山东省科技厅高端制造装备重大科技创新工程项目(2017CXGC0911); 山东省泰山领军培育项目(2016GRC3205); 山东省自然科学基金(ZR2019MEE086)

* 通信作者: zhaip@sdu.edu.cn

引文格式: 杨润青, 翟鹏, 魏一, 等. 基于最小加工冲击的活塞外廓线重构及优化[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2019, 58(3): 455-460.

Citation: YANG R Q, ZHAI P, WEI Y, et al. Reconstruction and optimization of piston profile curve based on minimum processing impact[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2019, 58(3): 455-460. (in Chinese)



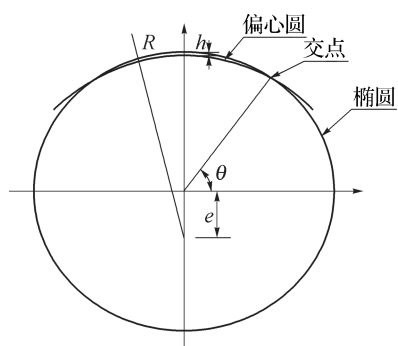


图 1 椭圆-偏心圆组合型外廓线示意图

Fig. 1 The chart of combined outline with ellipse and eccentric

向收缩量. 图中, e 为偏心圆偏心距, R 为偏心圆半径, h 为偏心圆在纵坐标方向上相对于椭圆的径向收缩量, θ 为椭圆与偏心圆交点对应的极角. 本研究中, 以潍柴 3A 型号活塞裙部高度 25 mm 的横截面为例, 椭圆度 $G=0.38$, $h=0.4$ mm, $\theta=48^\circ$, $e=1.96$ mm, ω 为主轴的角速度, 主轴转速为 800 r/min. 由于椭圆-偏心圆组合型线为长短轴对称图形, 为简化计算, 本研究针对该活塞 $[0^\circ, 90^\circ]$ 的外廓线进行计算, 再根据其对称性即可得到整个外廓线的径向位移. 活塞外廓线的 $[0, 90^\circ]$ 内刀具的径向位移表达式:

$$\Delta_1 = \frac{G}{4} [1 - \cos(2\omega t)] = \frac{G}{2} \sin^2(\omega t), \quad 0 \leq \omega t < \theta, \quad (1)$$

$$\Delta_2 = \frac{D_z}{2} + e \sin(\omega t) - \sqrt{(R)^2 - e^2 \cos^2(\omega t)}, \quad \theta \leq \omega t \leq 90^\circ, \quad (2)$$

其中 D_z 为椭圆长轴直径.

2 组合型外廓线重构及优化

2.1 组合型外廓线重构

用三次样条曲线对椭圆-偏心圆组合型外廓线进行拟合处理, 并求一次、二次导, 刀具在第一象限的径

向位移 Δ 、速度 v 、加速度 a 特性如图 2 所示. 图中, 刀具径向位移曲线连续, 但存在尖点(图 2(a)), 因此速度与加速度产生剧烈突变(图 2(b)和(c)), 致使加工过程中刀具产生振动冲击^[15], 影响活塞外轮廓的精度.

为解决上述问题, 本研究采用具有更高阶的五次样条曲线对组合外圆型线进行拟合, 则单个子区间的加速度表达式为三次多项式, 因此在相邻子区间交点处, 二阶导数有更高的连续性且平滑^[16], 满足 C^2 连续, 保证了刀具的加速度变化连续, 有利于降低对机构强度等性能的要求. 图 3 表示五次样条曲线拟合得到的刀具在第一象限的径向位移 Δ 、速度 v 、加速度 a 及加速度导数 $\dot{a}$.

观察图 3 可知, 用五次样条曲线拟合后, 刀具加速度最大值由 8×10^5 mm/s² 降低为 5×10^5 mm/s², 但之后又产生了较大的二次突变, 导致加工效果仍不理想. 参考 Farin 等^[17] 用 B 样条曲线进行节点去除后可得到更加光顺的曲线的结论, 本研究对组合型外廓线进行了进一步重构. 具体步骤为: 删除使运动特性变差的奇异点及附近一定角度范围内的型值点, 被删除的部分直接由五次样条曲线进行拟合. 重构后的曲线保证了奇异点处的光顺连接, 且刀具加速度冲击极小.

2.2 确定删除型值点的个数

为了保证活塞轮廓的精度, 删除型值点的个数不能过多. 本研究在圆周上每度取一个型值点, 共取 360 个型值点. 根据加工要求, 一般取理论交点 $\pm 3^\circ$, 即椭圆侧删除型值点个数 s_1 和偏心圆侧删除型值点个数 s_2 分别不超过 3 个时, 活塞轮廓可满足精度要求. 此约束条件可表示为:

$$S = \{(s_1, s_2) \mid 0 \leq s_1 \leq 3, 0 \leq s_2 \leq 3, s_1, s_2 \in \mathbf{Z}\}.$$

其中, S 代表两侧删除型值点个数的集合, 由 16 个元素组成, 每个元素对拟合曲线加速度的影响是不同的, 选取使加速度无二次突变且加速度波动最小的元素是本研究中外廓线优化的重点.

根据函数及导数的性质可知, 若使加速度在最大

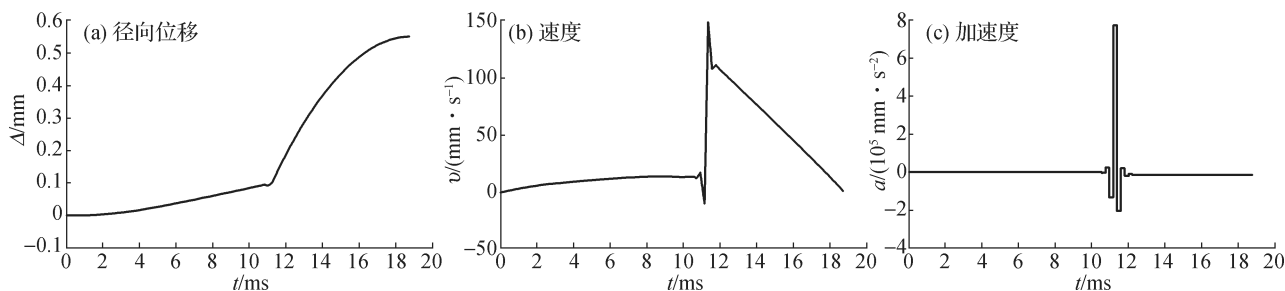


图 2 三次样条曲线拟合后刀具的运动特性

Fig. 2 Motion characteristics of tool after cubic spline fitting

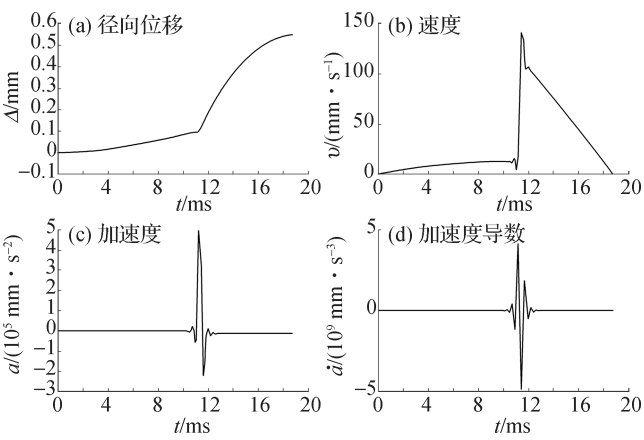


图 3 五次样条曲线拟合后刀具的运动特性
Fig. 3 Motion characteristics of tool after quantic spline fitting

值后无二次突变,则加速度导数应在其对应的零点后不大于零,即:

$$\dot{a} \leq 0, \omega t \in (\sigma, 90^\circ), \tag{3}$$

其中: σ 为加速度最大时刀具转过的角度。

针对前文中的组合型外廓线,对集合 S 中每个元素进行拟合,算出 σ 最大值为 56° ,为保证所有元素最大限度的满足式(3),以区间长度最小为原则,取 $\sigma = 56^\circ$. 然而,通过计算后发现没有满足式(3)的元素. 这是因为集合 S 在 $\omega t \in (56^\circ, 90^\circ)$ 内,加速度的导数不是严格非正的,其数值在趋于零时总是会出现大于零的情况. 此时需要引入松弛变量 c , 使加速度的二次突变尽可能小,即:

$$\dot{a}_{\max} \leq c, (c > 0), \omega t \in (56^\circ, 90^\circ). \tag{4}$$

为了确定松弛变量 c , 列出集合 S 在 $\omega t \in (56^\circ, 90^\circ)$ 内所有加速度导数的最大值,如表 1 所示.

过大的松弛变量会使加速度二次突变趋于明显,由表 1 中 $\dot{a}_{\max}$ 较小的 3 个元素做对比可知,当松弛变量 c 不大于 1×10^7 时,加速度曲线无明显二次突变,如图 4 所示.

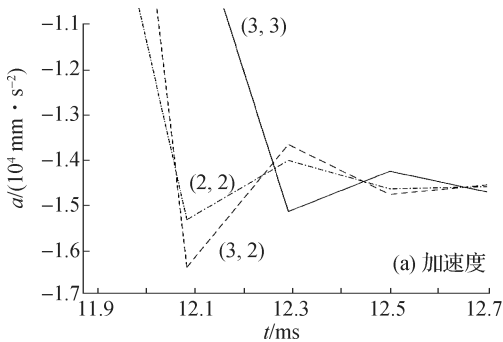


表 1 加速度导数的最大值
Tab. 1 Maximum value of acceleration derivative

s_2	$\dot{a}_{\max}/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-3})$			
	$s_1 = 0$	$s_1 = 1$	$s_1 = 2$	$s_1 = 3$
0	1.14×10^9	8.43×10^7	9.03×10^7	6.82×10^7
1	5.13×10^8	1.31×10^7	2.57×10^7	2.74×10^7
2	1.25×10^9	2.08×10^8	5.14×10^6	1.08×10^7
3	7.63×10^8	2.17×10^8	1.78×10^7	3.48×10^6

以加速度波动最小为优化目标,以可删除型值点个数及加速度无明显二次突变为约束条件,建立数学模型如下:

$$\min a,$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \{(s_1, s_2) \mid 0 \leq s_1 \leq 3, 0 \leq s_2 \leq 3, \\ s_1, s_2 \in \mathbf{Z}\}, \\ \dot{a}_{\max} \leq 1 \times 10^7, \omega t \in (56^\circ, 90^\circ). \end{cases}$$

将该模型进行编程求解,具体流程如图 5 所示. 最终的优化结果为:椭圆侧删除型值点个数为 3 个,偏心圆侧删除型值点个数也为 3 个.

删除型值点后,刀具的位移 Δ 、速度 v 、加速度 a 及加速度导数 $\dot{a}$ 特性如图 6 所示,位移曲线在交点处更圆滑,速度、加速度曲线连续且平滑,加速度无明显二次突变.

3 结果验证

将三次样条拟合的型线与删除型值点后用五次样条重构的外圆型线的位移 Δ 、速度 v 、加速度 a 运动规律进行对比,如图 7 所示. 相比于优化前的外廓线,重构的型线其刀具位移曲线更圆滑,不存在尖点;速度 v 、加速度 a 连续且平滑,加速度突变也得到了很大的改善. 因此,优化后刀具具有更好的运动特性,理论

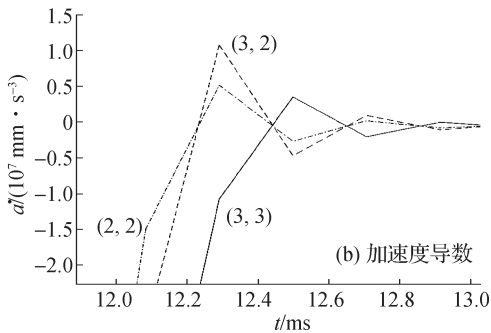


图 4 加速度、加速度导数局部放大图
Fig. 4 The partial magnification of acceleration, acceleration derivative

<http://jxmu.xmu.edu.cn>

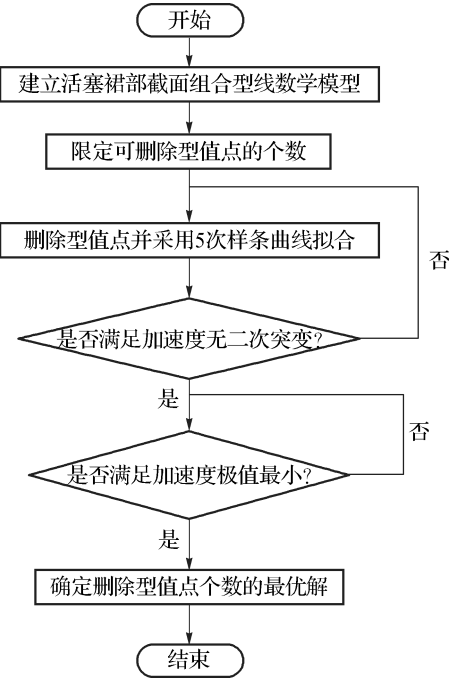


图 5 程序流程图

Fig. 5 Program flow chart

上会大大降低车削活塞外轮廓过程中由加速度突变造成的刀具冲击等问题,有利于提高活塞外轮廓的加

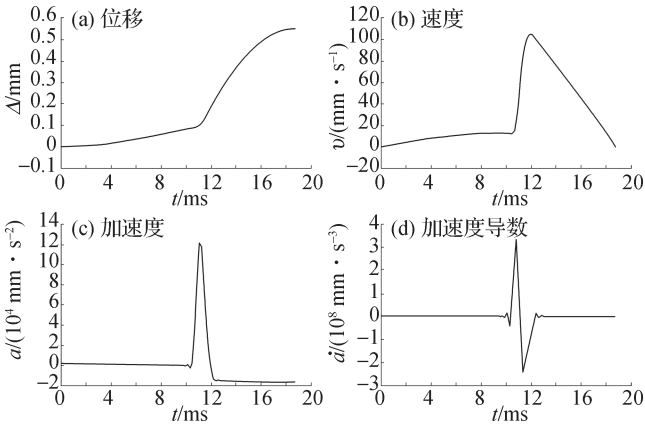


图 6 删除型值点后刀具的运动特性

Fig. 6 Motion characteristics of tool removed data

工精度。

将优化后的外廓线结合活塞的工艺图纸,得到活塞的加工数据参数,采用安加公司 PISTON Turner B 机床进行车削加工实验. 设置切削余量为 0.50 mm、主轴转速为 650 r/min,利用日本东京精密 ROND COM 60A 圆度仪对加工完成的活塞外圆进行测量,测量结果如图 8 所示。

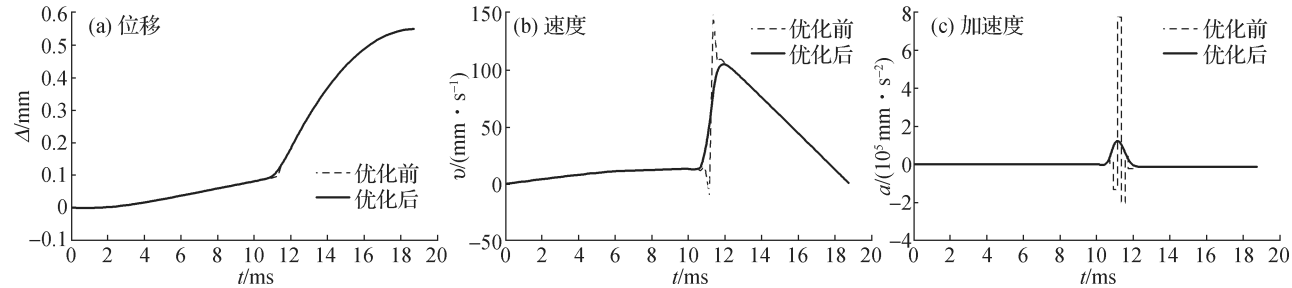


图 7 删除型值点前后的径向位移(a)、速度(b)和加速度(c)对比

Fig. 7 Comparison of radial dwsplacement (a), speed (b) and acceleration (c) before and after the deletion of data

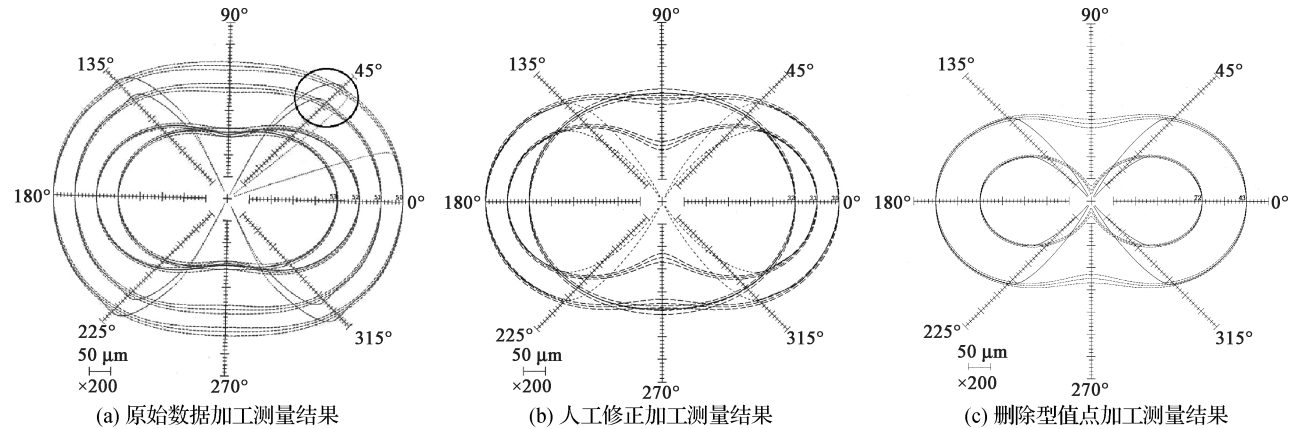


图 8 活塞加工的实验测量结果

Fig. 8 Experimental measurement result of processed piston

图 8(a)为原始数据的加工结果,型线在交点附近有凸起,且超过公差带范围,误差较大(圆圈内所示);图 8(b)为经过人工修正的加工测量结果,交点处的型线没有大的凸起,由于人工输入修正点难以做到准确及平滑,所以测量曲线有较大的波动,同时也造成交点角度偏差;图 8(c)为两侧删除 3 个型值点后的加工结果,优化后的型线在公差带内,且整体尺寸误差波动较小。

表 2 为经过人为修正优化和删除型值点优化的 5 组测量数据对比,测量截面为活塞高度 25 mm 处的截面。优化前,48°处无测量结果是由于从 41°开始,径向收缩量太大,测量结果不准确。

从表 2 中看到,删除型值点优化前后测量结果与误差值的对比表明,在满足活塞轮廓精度的条件下,优化后的误差更小。48°处的误差为-3 μm,虽然大于椭圆、偏心圆交点处的理论收缩量,但是不影响活塞工作接触。椭圆-偏心圆的交点角度值理论上为 48°,人工修正后的交点在 40°,本研究优化后交点在 47°,交点角度偏差小,更接近理论数值。

表 2 优化前后测量数据对比

Tab. 2 Comparison of measurement data optimized before and after

$\theta/(^{\circ})$	径向收缩量/ μm				
	设计值	优化前		优化后	
		测量值	误差	测量值	误差
10	-5	-5.6	-0.6	-5	0
20	-20	-20.6	-0.6	-20	0
30	-44	-45.4	-1.4	-43	1
40	-72	-74.4	-2.4	-73	-1
48	-97			-100	-3

4 结 论

高速车削椭圆-偏心圆组合型线时,由于其交点处加速度突变造成的冲击,使得加工精度严重超差。本研究将交点按奇异点处理,为了降低加速度突变产生的冲击,将奇异点两侧一定角度范围内的型值点删除,并用五次样条曲线进行拟合处理,由此完成组合型外廓线的曲线重构。将优化后的外廓线数据用于实际加工,结果表明,活塞轮廓实现了交点处平滑,且满足轮廓精度、交点角度偏差等要求,优于人为多次修

正的结果,为小椭圆度组合外廓线活塞的加工优化及精度提高等问题提供了良好的解决途径。

参考文献:

[1] 田欣. 中凸变椭圆活塞型面数控车削创成技术研究[D]. 济南:山东大学,2014:6-7.

[2] 郑冬. 大尺寸中凸变椭圆活塞车削加工衍生式数控系统研究[D]. 北京:中国农业大学,2014:5-6.

[3] 刘明晖. 柴油机活塞外圆型面设计及参数建模研究[D]. 长沙:湖南大学,2013:20.

[4] 吴海韵,姜涛,常小龙,等. 二次椭圆-偏心正圆组合活塞裙部加工算法优化及轨迹点计算[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2014,53(2):212-216.

[5] FENG Z, LIU H, HAO R. Research on spline interpolation of smoothness of machine tool[C]//International Conference on Robots & Intelligent System. Huaian: IEEE, 2017: 266-269.

[6] 张林华,赵庆志,张兴武,等. 对等间距法逼近三次样条曲线的再研究[J]. 机床与液压,2016,44(23):136-139.

[7] GE M, WU P, ZHU D, et al. Application of different curve interpolation and fitting methods in water distribution calculation of mobile sprinkler machine[J]. Biosystems Engineering,2018,174:316-328.

[8] 谌侨. 开放式中凸变椭圆活塞车削加工研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2015:10.

[9] KIM B S, TSAO T C. Development of a novel variable rake angle mechanism for noncircular turning and its control [J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2010,24(5):1035-1040.

[10] QIANG L, WU A, BING C. Variable angle compensation control of noncircular turning [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1):735-746.

[11] 李抢,艾武,段春,等. 基于高响应直线电机的非圆曲面加工技术研究[J]. 中国机械工程,2012, 23 (23): 2869-2874.

[12] YANG J, AI W, LIU Y, et al. Kinematics model and trajectory interpolation algorithm for CNC turning of non-circular profiles[J]. Precision Engineering, 2018, 54:212-221.

[13] 黄海滨,马凯威,刘建春,等. 中凸变椭圆活塞的车削轨迹优化与误差分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(9):66-69.

[14] 孙华刚,袁惠群. 活塞裙部超磁致伸缩车削加工机理研究[J]. 制造技术与机床,2007(9):14-17.

[15] 于金刚,林浒,张晓辉,等. 一种新型的 Jerk 连续加减速控制方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2009 (8):61-64.

- [16] 陈蔚. 样条曲线插补算法及其自适应速度控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014:38.
spline curves[J]. Computer Aided Geometric Design, 1987,4(1):91-103.
- [17] FARIN G, REIN G, SAPIDIS N, et al. Fairing cubic B-

Reconstruction and optimization of piston profile curve based on minimum processing impact

YANG Runqing¹, ZHAI Peng^{1*}, WEI Yi¹, HAN Yuzhen¹,
LI Chuankun², SUN Lili², LIU Zhenwen³

(1. School of Mechanical Electrical & Information Engineering, Shandong University, Weihai 264209 China;

2. Technology Center of Shandong Binzhou Bohai Piston Co., Ltd., Binzhou 256600 China;

3. Technology Center of Shandong Linglong Electrical Co., Ltd., Yantai 265400 China)

Abstract: In the case of high-speed interpolation, the combined external piston profile composed of ellipse-eccentric circle is usually fitted with cubic spline curves at the data point of the external profile. Since the fitting of cubic spline curve cannot achieve the continuity of second-order parameters (C^2), the impact will originate, affecting the contour and dimensional accuracy of the processed piston. For the purpose of reducing the impact, the method treats the intersection point of the elliptic-eccentricity circle as a singular point, deletes the singular point and its adjacent angle range, and then uses the quintic spline curve for fitting. To minimize the acceleration of the reconstructed composite line, we optimize the expendable interpolation angle under the condition of satisfying the precision requirement. Machining-experiment results show that the optimized piston outer circle can achieve no abrupt acceleration and the contour meets the precision requirements.

Keywords: point skirt outline; ellipse-eccentric; reconstruction; reduce shock