

# 椭圆活塞磨削廓形误差自适应模糊控制研究<sup>①</sup>

彭宝营<sup>②</sup> 李启光 韩秋实 杨庆东

(北京信息科技大学机电工程学院 北京 100192)

**摘要** 椭圆活塞 X-C 联动磨削过程中,其廓形精度受到各种加工因素的干扰。为提高椭圆活塞磨削加工精度,分析了椭圆活塞 X-C 联动加工机理,提出了廓形误差的估算模型,并根据该模型设计了廓形误差模糊自适应控制器;建立了椭圆活塞 X-C 磨削仿真模型,进行了廓形误差的常规加工控制与模糊自适应控制的对比仿真实验。结果表明,所设计的自适应模糊交叉耦合控制器能够有效减小 X-C 椭圆廓形误差。

**关键词** 椭圆活塞, 联动磨削, 廓形误差, 自适应模糊控制

## 0 引言

与传统活塞相比,中凸变椭圆活塞在工作时具有更宽、更均匀的承载面,减小了配缸气隙,从而减弱活塞对气缸壁的冲击,并降低发动机运行噪声,广泛应用于各种内燃机中<sup>[1]</sup>。目前,椭圆活塞主要采用精密车削加工<sup>[2]</sup>,但随着人们对装备性能要求的日益提高,迫切需要高速度、高效率、低消耗、低噪声的内燃机,这就对椭圆活塞的加工精度提出了更高的要求,一些学者对椭圆活塞的精密磨削进行了研究。李德奇<sup>[3]</sup>对中凸变椭圆活塞靠模的数控磨削方法进行了研究。吴玉厚等<sup>[4]</sup>采用直线电机做进给,对椭圆活塞的随动磨削技术进行了研究。车席国等<sup>[5]</sup>对椭圆活塞 X-C 磨削数学模型及加工过程仿真方法进行了探索研究。这些研究说明,精密磨削加工将成为中凸变椭圆活塞加工的重要发展趋势。

为了提高椭圆的活塞的加工精度,江思敏等<sup>[6]</sup>提出了滑膜抗干扰控制,Zhang 等<sup>[7]</sup>采用重复控制,崔红等<sup>[8]</sup>提出了变增益零相位误差跟踪滑模控制,通过优化刀具进给位置精度,提高椭圆活塞的加工精度。Huang 等<sup>[9]</sup>采用增加速度前馈、加速度前馈的控制方法来提高椭圆活塞加工系统动态定位精度和跟踪精度。Liu 等<sup>[10]</sup>提出了基于 H<sub>∞</sub> 鲁棒控制的学习前馈控制,有效提高了椭圆加工系统的抗干扰能力。然而廓形误差是椭圆活塞的主要加工精度指

标<sup>[11,12]</sup>,上述研究主要集中在提高进给电机的动态性能上,虽然能够有效提高该电机的跟踪精度,但并不能保证提高椭圆活塞轮廓的廓形误差。因此,本文研究了 X 轴带动砂轮架进给、C 轴带动工件旋转椭圆活塞联动磨削加工方法,以椭圆活塞的廓形误差控制为研究对象,设计了廓形误差自适应模糊控制器,利用模糊控制器的自适应能力,降低加工过程中各种因素对廓形精度的影响。同时进行了仿真实验验证,为椭圆活塞加工质量的提升提供依据。

## 1 椭圆活塞磨削廓形误差分析

### 1.1 椭圆活塞磨削 X-C 联动加工模型

椭圆的参数方程如式

$$\begin{cases} x = a \cos t \\ y = b \sin t \end{cases} \quad (1)$$

所示,其中  $a$  为长轴,  $b$  变为短轴,参数  $t$  的取值范围为  $0 \sim 2\pi$ 。

根据式(1),可将椭圆轮廓轨迹方程由直角坐标  $(x, y)$  转换成极坐标  $(\rho, \varphi)$ :

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \varphi = \begin{cases} \arctg(y/x) & (x > 0, y \geq 0) \\ \pi + \arctg(y/x) & (x < 0) \\ 2\pi + \arctg(y/x) & (x > 0, y \leq 0) \\ \pi/2 & (x = 0, y > 0) \\ 3\pi/2 & (x = 0, y < 0) \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

<sup>①</sup> 国家自然科学基金(51375056),北京市自然科学基金(3142009)和北京市自然科学基金重点(KZ201211232039)资助项目。

<sup>②</sup> 男,1980 年生,博士,讲师,研究方向:数控技术与装备;联系人,E-mail: pengbaoying@126.com

(收稿日期:2014-05-06)

非圆曲线 X-C 联动加工坐标公式如式

$$\begin{cases} X = \sqrt{\rho^2 + R_w^2 - 2\rho R_w \cos(\theta + \frac{\pi}{2})} \\ C = \varphi - \arccos \frac{X^2 + \rho^2 - R_w^2}{2X\rho} \end{cases} \quad (3)$$

所示<sup>[13]</sup>, 其中,  $\theta = \arctan \frac{\rho(\varphi)}{\rho'(\varphi)}$ ,  $R_w$  为砂轮的半径。

将椭圆活塞的极坐标轨迹  $(\rho, \varphi)$  带入式(3), 即可求出椭圆活塞 X-C 联动磨削加工坐标。

## 1.2 椭圆活塞磨削廓形误差计算方法

单轴跟踪误差主要指伺服误差, 即某一时刻电机指令位置与实际位置之差。平面曲线轮廓廓形误差是指实际位置与指令位置在轮廓轨迹指定点处法线方向上的偏差, 可用  $\varepsilon$  表示。椭圆活塞采用 X-C 联动磨削时, 实质是一种砂轮包络。为了便于观察计算, 可采用砂轮反转法即工件不动、砂轮反向旋转对非圆曲面轴类零件磨削进行分析。椭圆活塞 X-C 联动加工廓形误差, 即为砂轮包络轨迹与工件廓形轨迹之间的误差。

如图 1 所示, 采用砂轮反转法对椭圆活塞 X-C 联动磨削误差进行分析, 在以椭圆中心  $O$  为原点的直角坐标系  $xOy$ 、极坐标系  $MON$  中, 理论磨削点  $A(\rho, \varphi)$ , 与之对应的砂轮中心  $O_1(X, C)$ 。加工过程中, 当存在跟踪误差  $\Delta X, \Delta C$  时, 砂轮中心变为  $O_2(X_1, C_1)$ , 对应的实际加工点为  $A_1(X_1, C_1)$ 。磨削点处法线长度之差即为廓形误差  $\varepsilon$ , 由几何关系可推导出廓形误差近似计算公式如下:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= |AA'| \approx |AO_2| - |AO_1| \\ &= ((X + \Delta X) \cos(C + \Delta C) - \rho \cos \varphi)^2 \\ &\quad + ((X + \Delta X) \sin(C + \Delta C) - \rho \sin \varphi)^2)^{\frac{1}{2}} - R_w \end{aligned} \quad (4)$$

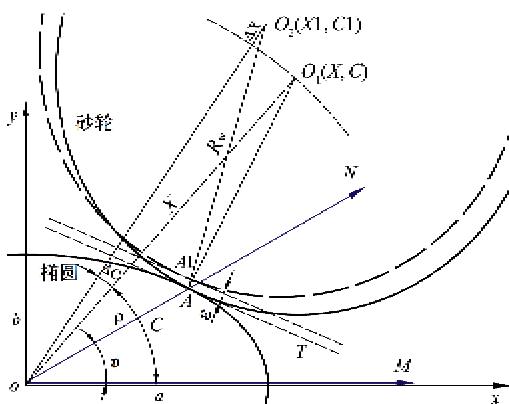


图 1 椭圆活塞 X-C 联动磨削廓形误差分析

由式(4)可知, 椭圆活塞 X-C 联动磨削时, 由  $X, C$  单轴跟踪误差  $\Delta X, \Delta C$  并不能直接形成廓形误差, 廓形误差还与砂轮半径、廓形轨迹等因素密切相关。

## 1.3 椭圆磨削误差影响度计算方法

椭圆活塞 X-C 联动磨削过程中,  $X$  轴跟踪误差  $\Delta X, C$  轴跟踪误差  $\Delta C$  对廓形误差影响程度是不同的。按照文献[14]对非圆曲面 X-C 跟踪误差与廓形误差的分析方法, 椭圆活塞 X-C 联动磨削跟踪误差对廓形误差的影响度计算公式如下:

$$\begin{cases} G_x = \frac{X^2 + R_w^2 - \rho^2}{2XR_w} \\ G_c = \frac{\rho(\varphi)\rho'(\varphi)}{\sqrt{\rho'^2(\varphi) + \rho^2(\varphi)}} \end{cases} \quad (5)$$

## 2 椭圆活塞 X-C 磨削廓形误差模糊自适应控制方案设计

椭圆磨削加工过程复杂, 引起加工误差的原因有很多, 如磨削力的变化、加工速度的变化、机床振动等都会引起 X-C 单轴跟踪误差的变化。此外, 系统动态的非线性、不确定性因素如数控系统的死区、限幅及机床温度等问题也会引起跟踪误差。这些跟踪误差变化最终导致加工过程中廓形误差变化。传统的控制方法很难取得满意的效果。模糊自适应控制能够根据加工情况做出自适应调整, 并能对磨削过程做出智能模糊判断。

### 2.1 廓形误差模糊自适应控制方案

在 X, C 单轴控制的基础上, 依据交叉耦合控制<sup>[15]</sup>原理, 设计了椭圆磨削廓形误差模糊自适应补偿控制, 以减小廓形误差, 控制原理图如图 2 所示。其控制思想是将跟踪误差  $\Delta X$  与  $\Delta C$ 、轮廓轨迹  $(\rho, \varphi)$ 、加工坐标  $(X, C)$  在耦合控制器中按式(2)首先

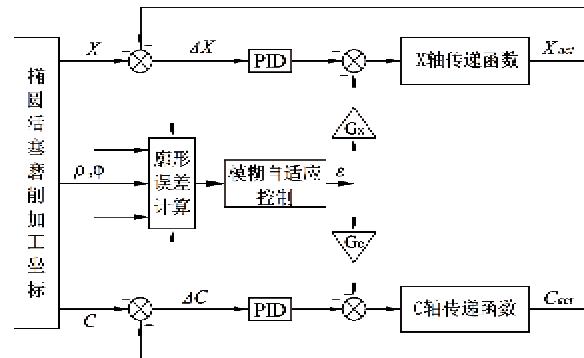


图 2 椭圆活塞磨削廓形误差模糊自适应控制原理图

进行综合,计算得到廓形误差,然后经过模糊自适应控制器进行调节,将误差信息分配给各轴以产生相应的实时附加补偿作用, $G_x$ 与 $G_c$ 分别为X轴、C轴廓形误差分配增益,其计算公式如式(5)所示。

## 2.2 自适应模糊控制器设计

椭圆活塞廓形误差主要由X、C轴跟踪误差耦合形成,影响因素较多,传统的定值比例积分微分(PID)很难取得满意的控制效果。自适应模糊PID将模糊规则及有关信息(如评价指标、初始PID参数等)作为知识存入控制器,运用模糊推理,即可实现对PID参数的最佳调整。X、C轴耦合后的廓形误差为 $\varepsilon$ ,自适应模糊廓形误差PID控制器以其误差 $e$ 及误差变化 $ec$ 作为输入,利用模糊控制规则在线调整PID的各项参数,使不同时刻的 $\varepsilon$ 保持在一个合理的范围内。自适应模糊廓形误差PID控制器结构原理图如图3所示。

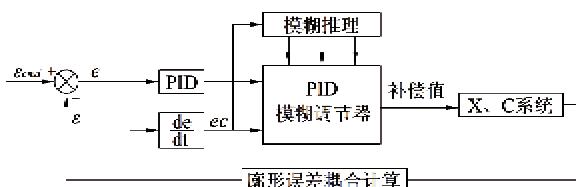


图3 自适应模糊廓形误差PID控制框图

## 3 仿真实验及验证

建立了椭圆活塞X-C磨削加工仿真平台。采用砂轮反转法验证椭圆活塞加工模型的有效性,并对廓形误差模糊自适应控制效果进行仿真验证。

### 3.1 椭圆活塞X-C磨削模型仿真模型验证

取长轴 $a=50$ ,短轴 $b=25$ 。将 $t$ 按照 $0-2\pi$ 均匀离散,带入式(1),得到360组椭圆廓形坐标,并按照式(2)转换为极坐标。设砂轮半径 $R_s=50\text{mm}$ ,将360组极坐标加工点及 $R_s$ 带入式(3),得到该椭圆X-C联动加工坐标。按照上述过程,采用了Matlab 2010b M文件开发了计算程序,利用Matlab 2010b GUI开发了仿真操作界面如图4所示。可以看出砂轮包络轨迹与椭圆廓形吻合。

### 3.2 X-C轴传递函数

采用的软件是美国Delta TAU公司开发的一款为PMAC系统专用的伺服动力分析软件PMAC Servo Analyzer,该软件采用快速傅氏变换频率响应模型识别和基于频域非线性曲线拟合技术的传递函数识别技术,对PMAC系统发出正弦扫频从而获得系统的传递函数。

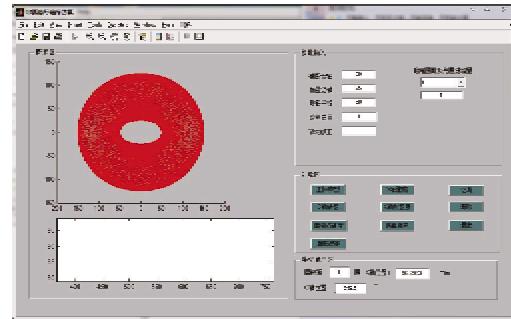


图4 椭圆X-C加工仿真操作界面

以某数控凸轮轴磨削为例,利用该软件测量该磨床C轴系统的零极点及增益为PLZeros = [ ],PL1Poles = [ 0.000; 0.000; -690.313 ],PLGAIN = 19591.641,则C轴传递函数如下式:

$$G(s) = \frac{19591.641}{s^2(s + 690.313)} \quad (6)$$

同理,可确定X轴电机的传递函如式(7)所示。

$$G(s) = \frac{22000}{s(s + 980)} \quad (7)$$

### 3.3 廓形误差模糊PID仿真模型

利用Matlab模糊控制工具箱,按照廓形误差模糊自适控制方案,以廓形误差 $\varepsilon$ 的误差 $e$ 及误差 $ec$ 做为模糊输入,以比例系数变化 $\Delta K_p$ 、积分系数 $\Delta K_i$ 、微分系数 $\Delta K_d$ 作为模糊输出。建立模糊关系如图5所示。

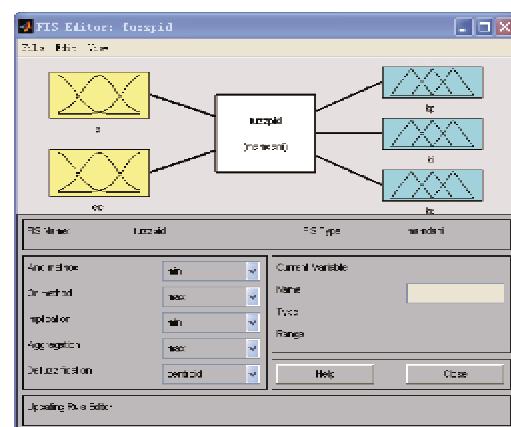


图5 廓形误差模糊关系

廓形误差变化 $e$ 及廓形误差变化率 $ec$ 的模糊域为 $[-0.06, 0.06]$ ,单位为 $\text{mm}$ ; $K_p, K_d$ 的模糊域为 $[-6, 6]$ , $K_i$ 的模糊域为 $[-0.6, 0.6]$ 。将 $e, ec, \Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 离散到11个等级;模糊论域定为7个数量化阶段,分别以NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)来

表示。

在模糊 PID 调节过程中,比例系数  $K_p$  的作用是加快系统响应速度,但容易产生超调。即达到稳态之前,可以增加  $K_p$ ,以提高系统的响应速度;出现超调以后则降低  $K_p$ 。积分系数  $K_i$  的作用是消除稳态误差,但  $K_i$  过大会出现积分饱和现象,引起超调。微分系数  $K_d$  的作用是改善系统的动态特性,使响应更加平滑,抑制偏差变化<sup>[16]</sup>。按照上述原则,建立了 49 个模糊规则,模糊规则库如图 6 所示。

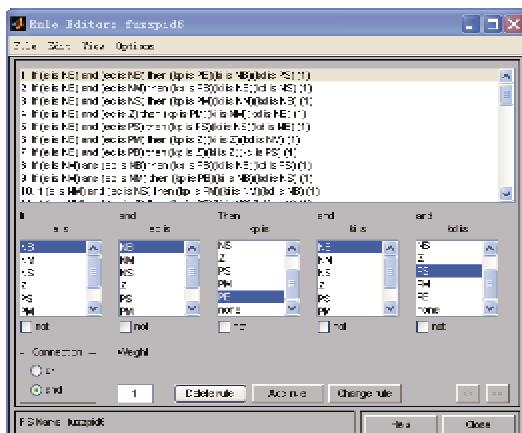


图 6 廓形误差模糊规则库

隶属度函数选择常用的三角形函数。此外,为了使输出尽可能平滑,设置输入、输出量的 NB、PB 的隶属函数为 S 形函数。最终建立的廓形误差模糊模型如图 7 所示,将该模糊模型存储为 ellipse.fis。

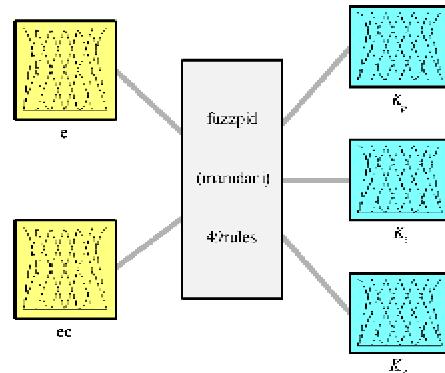


图 7 廓形误差模糊模型

利用 Matlab Simulink 建立廓形误差模糊自适应 PID 模糊自适应控制仿真模型如图 8 所示。 $e$  的误差及误差变化率经过模糊运算后输出比例、积分、微分的变化量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  后分别于  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的初始设置值相加,得到三个参数值后代入典型 PID 中进行计算,得到调节量。

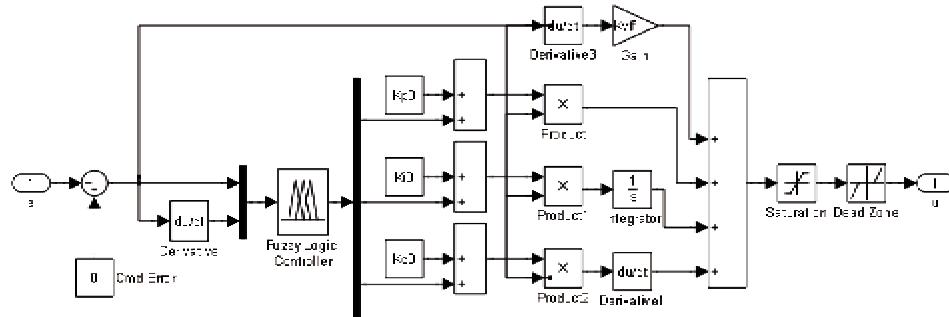


图 8 模糊自适应控制仿真模型

双击图 8 中的 Fuzzy Logic Controller 模块,弹出如图 9 所示的对话框,输入 ellipse,建立模糊关联。

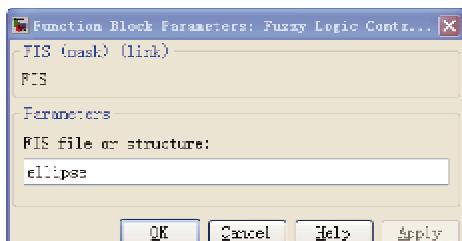


图 9 模糊关联设置

设置模糊 PID 的初始值为  $K_p0 = 10$ ,  $K_i0 = 1$ ,  $K_d0 = 10$ , 将图 8 所示的廓形误差模糊自适应 PID 模糊自适应控制仿真模型封装为 Self-adaptive fuzz PID 模块。

### 3.4 椭圆活塞磨削廓形误差模糊自适应控制仿真

按照图 2 所示的椭圆活塞磨削廓形误差模糊自适应控制原理,采用 Matlab Simulink 建立仿真程序模型如图 10 所示。其中, $X_t$ 、 $C_t$  为  $X$ 、 $C$  轴指令位置; $p$ 、 $a$  表示椭圆活塞的极坐标轨迹; $G_x$ 、 $G_c$  为  $X$  轴、 $C$  轴的廓形误差补偿量分配增益,Self-adaptive fuzz PID 为封装后的模糊自适应控制 PID 模块。

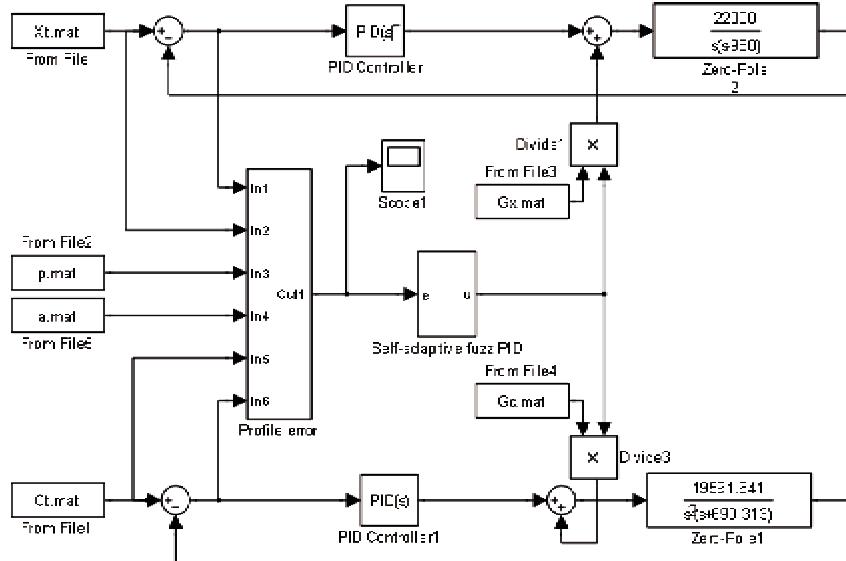
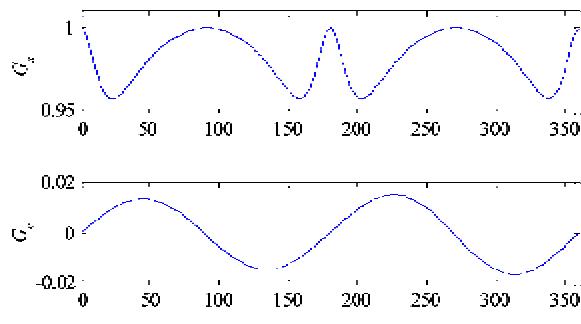


图 10 椭圆活塞磨削廓形误差模糊自适应控制仿真程序图

按照式(5),计算出跟椭圆活塞 X-C 联动磨削跟踪误差对廓形误差的影响度  $G_x, G_c$  如图 11 所示。

图 11 椭圆活塞磨削  $G_x, G_c$  曲线

进行椭圆磨削廓形误差模糊自适应交叉耦合控制仿真实验。设椭圆活塞一圈加工时间为 9s, 仿真结果采样周期设置为 0.025s。分别采集椭圆活塞常规加工、模糊自适应控制仿真中的 X 轴跟踪误差  $\Delta X$ , C 轴跟踪误差  $\Delta C$  及廓形误差  $\varepsilon$  曲线, 获得对比图分别如图 12、图 13、图 14 所示。

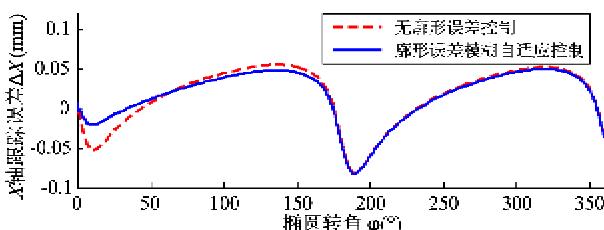


图 12 X 轴跟踪误差对比图

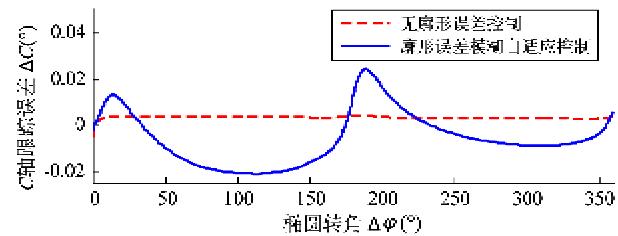


图 13 C 轴跟踪误差对比图

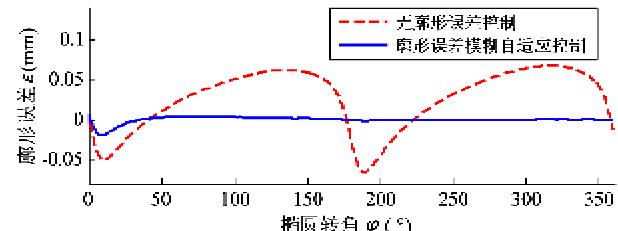


图 14 廓形误差对比图

由图 11、图 12 可以看出,采用了廓形误差模糊自适应控制后, X 轴跟踪误差略有下降,  $\Delta X$  的最大值由 0.055mm 下降到 0.049mm; 而 C 轴的跟踪误差却大幅增加,  $\Delta C$  的最大值由 0.006° 增加到 0.242°。

由图 14 可以看出,虽然采用廓形误差模糊自适应控制后 C 轴跟踪误差明显加大,但与没有廓形误差补偿控制相比,廓形误差的最大值为 0.68μm 下降到 0.19μm,而且更加均匀。

## 4 结 论

(1) 椭圆活塞 X-C 轴联动磨削时, 跟踪误差并

不能等同廓形误差, 廓形误差取决于  $X$ 、 $C$  轴跟踪误差、廓形轨迹、砂轮半径等多种因素。

(2) 本文所提出的廓形误差计算模型能够根据椭圆活塞 X-C 磨削加工特点快速的计算廓形误差, 与常规控制相比, 模糊自适应控制可以快速应对椭圆活塞磨削过程中加工因素对廓形误差的影响, 一定程度上提高椭圆活塞 X-C 联动磨削加工精度。

#### 参考文献

- [ 1 ] 黄海滨, 郭隐彪, 姜晨等. 基于中凸变椭圆活塞椭圆截面车削的平滑-等时轮廓插补法. 厦门大学学报(自然科学版), 2011, 50(1): 52-55
- [ 2 ] Wang H F. Design and control of a fast tool servo used in noncircular piston turning process. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 36(1): 87-94
- [ 3 ] 李德奇. 中凸变椭圆活塞靠模的数控磨削技术. 航空工艺技术, 1995, 11: 31-33
- [ 4 ] 吴玉厚. 数控机床电主轴单元技术. 北京: 机械工业出版社, 2006. 5
- [ 5 ] 车席国, 韩秋实, 李启光, 彭宝营. 椭圆活塞磨削数学模型及过程仿真方法研究. 制造业自动化, 2014, 36(2): 81-83
- [ 6 ] 江思敏, 王先逵, 石忠东等. 中凸变椭圆活塞加工用高性能直线伺服系统的研究. 机械工程学报, 2011, 37(9): 58-61
- [ 7 ] Zhang L N, Wang X K, Lin J L. Repetitive control and its application to linear servo unit for CNC machining of elliptical pistons. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, Shanghai, China, 1996. 630-633
- [ 8 ] 崔红, 郭庆鼎. 中凸变椭圆活塞直线伺服系统的变增益零相位误差跟踪滑模控制. 电气传动, 2005, 35(6): 43-47
- [ 9 ] Huang H B, Guo Y B, Xie S T, et al. Research on control technology of the middle-convex and varying ellipse piston lathe system. In: Proceedings of the Intelligent Computing and Intelligent Systems, Shanghai, China, 2009, 2: 622-626
- [ 10 ] Liu L L, Xu Z.  $H_\infty$  robust tracking control for periodic disturbance signal in piston machining based on the learning feedforward compensation. In: Proceedings of the International Symposium on Computer Science and Society, Kota Kinabalu, Malaysia, 2011. 258-261
- [ 11 ] 刘海江, 万德安, 闵新力等. 变椭圆活塞裙部横截面线轮廓误差最小二乘法. 同济大学学报(自然科学版), 2000, 28(2): 231-235
- [ 12 ] Zhao Y B, Xu Y X, Sheng D H. Quasiparticle swarm optimization for cross-section linear profile error evaluation of variation elliptical piston skirt. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 761798
- [ 13 ] 蔡力钢, 彭宝营, 韩秋实等. 一种新的非圆曲面零件切点跟踪磨削加工. 模型研究. 计算机集成制造系统, 2013, 19(10): 2455-2452
- [ 14 ] 彭宝营, 蔡力钢, 韩秋实等. X-C 直驱平台平面曲线轮廓磨削廓形误差非线性耦合控制研究. 计算机集成制造系统, 2014, 20(2): 371-378
- [ 15 ] Shin Y T, Chen C S, Lee A C. A Novel Cross-coupling Control Design for Bi-axis Motion. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002, 42(14): 1539-1548
- [ 16 ] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真. 北京: 电子工业出版社, 2012

## Contour error's self-adaptive fuzzy control in ellipse piston grinding

Peng Baoying, Li Qiguang, Han Qiushi, Yang Qingdong

(The College Of Mechanical Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192)

#### Abstract

To improve the machining precision of grinding an ellipse piston, a contour error calculation model was proposed based on the analyses of the mechanism for X-C linkage machining of an ellipse piston and the factors influencing the piston's contour precision in linkage grinding, and according to the model, a self-adaptive fuzzy strategy for contour error control was designed to weaken factors. Then, a simulation model for ellipse piston grinding was established, and the simulation experiments on comparing the conventional contour error control with the self-adaptive fuzzy control were conducted. The simulation results show that the proposed self-adaptive fuzzy controller can effectively reduce the contouring error of ellipse piston grinding.

**Key words:** ellipse piston, linkage grinding, contour error, self-adaptive fuzzy control