

文章编号 1004-924X(2007)10-1589-07

复合前馈补偿的超磁致伸缩执行器精密伺服控制

龚大成, 吕福在, 项占琴, 唐志峰

(浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:研究了一种内嵌超磁致伸缩执行器(GMA)的智能镗削装置,针对 GMA 迟滞非线性,给出了一种基于复合前馈补偿的精密伺服控制方法。简要介绍了经典 Preisach 迟滞数值模型的实现方法,给出了一种基于迭代的迟滞非线性补偿方法以避免直接求取 Preisach 逆模型。讨论了迭代算法的实现步骤,验证了算法的可行性。分析了异圆销孔的镗削加工特点,在迭代补偿的基础上设计了重复控制补偿器,并结合两种补偿方法,给出了一种基于复合前馈补偿的 PID 控制方法,最后通过实验检验了方法的有效性。实验结果表明:在开环情况下,所给的迭代算法可以将 GMA 的迟滞非线性由补偿前的 $-15.7\% \sim +11.8\%$ 减小到 $-4.6\% \sim +5.2\%$,而基于复合前馈补偿的 PID 控制则可将误差进一步减小到 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内。实验表明,迭代补偿算法是有效的,该算法在补偿迟滞非线性的同时可避免直接求取 Preisach 逆模型,而基于复合前馈补偿的 PID 控制方法还可进一步提高 GMA 的控制精度。

关键词:超磁致伸缩致动器;迭代补偿;前馈补偿;重复控制补偿器;PID 控制

中图分类号:TP271.72;TP211.53 **文献标识码:**A

Precision servo control of GMA based on compounding feedforward compensation

GONG Da-cheng, LÜ Fu-zai, XIANG Zhan-qin, TANG Zhi-feng

(Modern Manufacture Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A Giant Magnetostrictive Actuator(GMA) driven mechanism for piston noncircular pin hole boring is presented. In order to attain desired radial displacement of the boring bar accurately, a compounding feedforward compensation method is proposed. The classical Preisach model for the hysteresis of GMA is introduced briefly, and a novel iterative compensation algorithm is proposed to avoid calculating Preisach converse model directly. Then the implement procedure of the iterative algorithm is discussed and the block diagram is given. A good linearization between the input current of GMA and its hysteresis output is found, the effect of the algorithm is validated by experiment. A repetitive control compensator is designed to improve the control performance of the GMA further, and then a compounding feedforward compensation method is presented based on the two compensators. Experiment results show that, at the case of open loop control, the iterative compensation algorithm can reduce the hysteresis nonlinearization of GMA from $-15.7\% \sim +11.8\%$ to $-4.6\% \sim +5.2\%$, and the PID control based on compounding feedforward compensation can reduce the tracking error of GMA to

收稿日期:2007-06-15;修订日期:2007-08-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50105019);中国博士后科学基金资助项目(No. 20060390337)

1 μm . These conclusions indicate that the iterative compensation algorithm is effective, it can avoid calculating the Preisach converse model directly and the PID control based on compounding feedforward compensation can improve the control performance of GMA further.

Key words: GMA; iterative compensation; feedforward compensation; repetitive control compensator; PID control

1 引言

发动机活塞的异形销孔是一种典型的非圆截面零件,传统的加工方法大多依赖多级机械部件的组合,如杠杆式刀杆或偏心刀杆等,通常存在结构复杂、易磨损、加工精度不易保证等缺点,而且加工精度对部件制造精度依赖性高。近年来,随着材料科学的发展,许多研究人员纷纷开发出了各种基于新型功能材料的智能刀杆,这些智能刀杆在外加激励下能够产生自发的变形,因而大大简化异形销孔的加工难度。尤其是集高刚度、快速响应性和高分辨率等优异特性于一身的超磁致伸缩执行器(Giant Magnetostrictive Actuator, GMA),更是在高速、高精度伺服加工方面展示出了巨大的前景和优势。但应用中,超磁致伸缩材料所表现出的迟滞与非线性一直是阻碍其执行器控制性能进一步提高的严重障碍^[1-2]。

建立迟滞数学模型是减小或消除 GMM 非线性的根本途径,但由于迟滞过程的复杂性,至今尚无统一的建模方法或理论。线性模型由于其简单、易用,在很多针对 GMA 非圆加工的研究中被广泛采用,但线性模型是一种小信号模型,并不适用于大场强工作状态,若仅仅通过限制 GMA 的激励场强来满足模型要求,则会造成材料利用率的严重损失。因此,深入研究可以用于高场强工作条件下的 GMA 迟滞模型,有着广泛而又深远的意义。

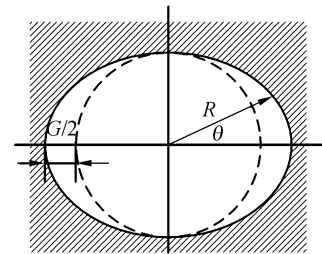
对于绝大部分非圆截面零件,由于其加工轨迹线根据图纸已经事先确定,其轨迹线沿时间轴或角度轴展开后,通常存在着很大的重复性,因而在加工中应对该特点加以充分地利用,为此,本文尝试采用了一种基于重复补偿的精密 PID 控制策略,进一步提高了 GMA 的控制精度。

2 非圆加工系统伺服特性分析

活塞异形销孔通常可以分为轴向异形孔和径向异形孔两类。与轴向异形孔的精密加工相比,径向异形孔的加工更为复杂,其关键就在于镗刀高速旋转的同时,还要实现镗刀径向的高频可控微位移。典型径向异形孔的基本结构如图 1(a)所示。其非圆部分的加工轨迹可以写为:

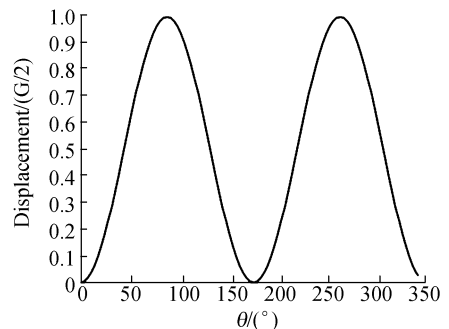
$$\Delta X = \frac{G}{4}(1 - \cos 2\theta), \quad (1)$$

式中: ΔX 为径向进刀量; θ 为主轴转角; G 为销孔的椭圆度,通常指销孔内外径之差,其典型值约为 0.02~0.04 mm^[3]。



(a) 径向异形孔的结构

(a) Structure of radial noncircular hole



(b) 径向位移与转角的关系

(b) Radial displacement vs rotational angle

图 1 非圆活塞型线分析与伺服跟踪曲线

Fig. 1 Illustration of noncircular cutting structure and tracking trajectory

由式(1)可以计算出镗刀在加工中径向位移量与转角间的对应关系,如图 1(b)所示。若主轴转速不变,则其转角与时间呈线性关系,因而图 1(b)也可以视为加工中镗刀径向位移量与时间的对应关系。

图 2 为本文所研究的异圆镗削装置的结构示意图^[4],其工作原理就是通过外加磁场来控制内嵌于镗杆的磁致伸缩材料产生伸缩变形,进而推动镗杆发生径向弯曲,实现镗刀的径向可控微位移。

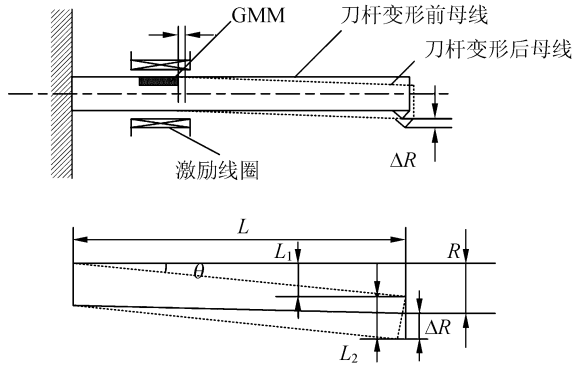


图 2 超磁致伸缩智能镗杆工作原理

Fig. 2 Deformation principle of GMM tool rod

如图知: $L_1 = L \sin \theta$, $L_2 = R \cos \theta$, 设变形后刀尖径向位移变化为 ΔR , 则 $\Delta R = L_1 - (R - L_2)$ 。当转角极小时, $\sin \theta = \theta$, $\cos \theta = 1$, 则 $\Delta R = L\theta$, 此时转角 θ 近似正比于超磁致伸缩材料的纵向变形量 ΔL , 若令 K 为比例因子, 则有 $\theta = K \cdot \Delta L$, 于是得到 GMM 变形量与刀尖径向位移变化量间的计算式:

$$\Delta L = \frac{\Delta R}{K \cdot L} \quad (2)$$

由式(2)可知, GMM 的伸长量与镗刀的径向位移存在良好的线性关系, 因此根据上述推导就将镗杆的径向变形控制问题转化为对内嵌 GMA 伸长量的控制问题了。

考虑到主轴每旋转一周, 刀具需往复运动两次。主轴转速 3 000 r/min, 则伺服刀架的跟踪频率要达到 $f = (3\ 000/60) \times 2 = 100$ Hz。理论上讲 GMM 的响应速度可达 20 kHz, 但事实上由于间隙、端面平整度和联接刚度等因素的存在, 实际工作中 GMA 的真实响应速度远远低于这个理论值, 但尽管如此, 实验表明 GMA 达到 300 Hz 以上响应速度还是非常容易的, 这说明频响并不是

问题的关键。因而下面将以 GMA 的精密伸缩控制作为主要的研究目标。

3 GMA 迟滞非线性的建模与补偿

Preisach 模型是一种基于迟滞宏观现象描述现象学模型, 它忽略迟滞过程的内在物理机理, 完全从现象描述的角度, 采用纯数学的方法对迟滞效应进行分析和预测, 已在各种迟滞过程的建模与预测上取得了良好的效果^[5-7], 并已经成为当前迟滞建模领域的主流模型, 这里也采用 Preisach 模型作为 GMA 迟滞非线性的建模方法。

Preisach 模型的本质是将迟滞过程输入/输出之间的一维多值映射变成可以用上、下开关场表示的二维平面内的一一映射。模型通过无穷个具有矩形滞回特征的基本迟滞算子的加权和来等效系统的宏观迟滞。其数学式为^[6]:

$$f(t) = \iint_T \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}[u(t)] d\alpha d\beta \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为系统迟滞输出, $u(t)$ 为输入, $\mu(\alpha, \beta)$ 为权重函数, $\gamma_{\alpha\beta}[u(t)]$ 为迟滞开关算子, α, β 为算子的上、下开关阈值, 算子输出值为 1 或 -1, 取决于算子的当前输入和历史。在应用中, 为防止 GMM 出现倍频效应, 通常使 GMM 工作在偏置状态下, 滞回曲线只会出现在第一象限, 因而模型在应用于 GMM 时, 算子的输出值应相应地修改为 1 和 0^[7]。

为辨识经典 Preisach 模型的参数, 通常先构造辨识函数:

$$F(M_k, m_k) = f_{M_k} - f_{m_k} \quad (4)$$

式中: f_{M_k} 为输入沿主滞环单调上升至 M_k 时的系统输出, f_{m_k} 为输入上升至 M_k 后又单调减小至 m_k 时的系统输出。

文献[6]分别针对以单调减小和单调增加作为当前输入状态的输入序列, 给出了 Preisach 模型迟滞预测数学式。输入 $u(t)$ 处于增加阶段, 系统输出可以写为:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] + F(u(t), m_{n-1}) \quad (5)$$

输入 $u(t)$ 处于减小阶段, 系统输出可以写为:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [F(M_k, m_{k-1}) - F(M_k, m_k)] + F(M_n, m_{n-1}) - F(M_n, u(t)) \quad (6)$$

式中： $n(t)$ 为随输入变化 Preisach 平面上记忆曲线的水平链数， $\{M_k\}$ 和 $\{m_k\}$ 分别为输入极大值序列和极小值序列。

Preisach 模型参数辨识过程中，由于网格离散化会造成误差，可以采用 Lagrang 双线性插值法来提高模型的精度，具体步骤可参考文献[6]。

补偿是消除或减小迟滞的根本方法，直观的补偿方法就是由迟滞预测模型直接推导出相应的逆模型，将系统的期望输出作为输入，施加于逆模型，通过正、逆模型的对销实现非线性系统的线性化。针对这一问题，国内外学者进行了大量的研究^[6-8]，但实践证明，Preisach 逆模型的直接求取有相当的难度，因而本文尝试采用一种基于迭代补偿的近似算法^[6]，以避免 Preisach 模型的直接逆运算。迭代补偿算法的框图如图 3。

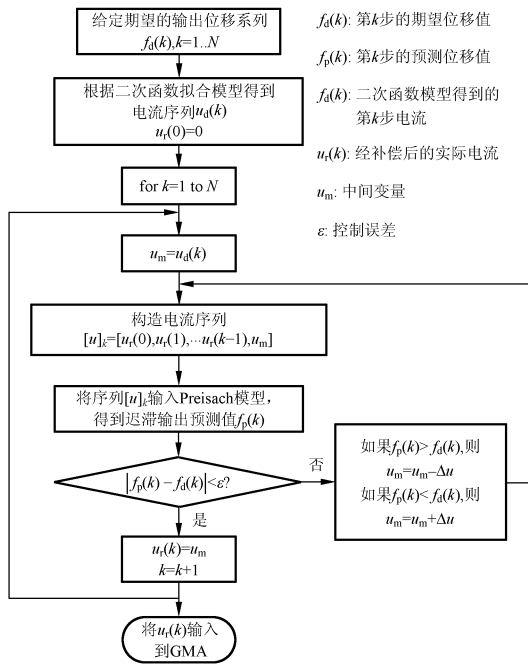


图 3 基于迭代的迟滞逆补偿框图

Fig. 3 Block diagram of iterative compensation algorithm

为减小迭代次数，将滞环曲线的多项式拟合结果作为迭代初值以提高计算效率。

迭代补偿算法需要事先确定期望输出轨迹，将其离散化后得到相应的期望输出序列 $f_d(k)$ ，根据拟合函数得到相应的输入初值 $u_d(k)$ ，采用所给的 Preisach 模型对该初值进行预测。

以求解第 k 步补偿输入电流为例来说明前述算法的具体执行步骤，设第 k 步之前的实际输入

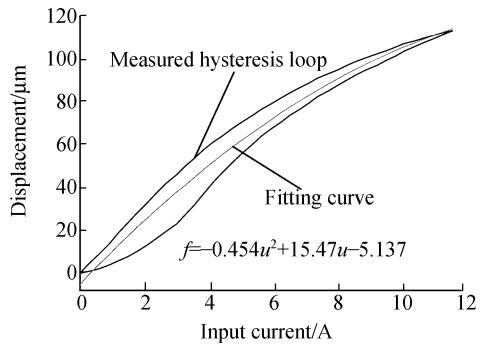


图 4 滞环曲线的曲线拟合

Fig. 4 Curve fitting of hysteresis loop

电流量序列是：

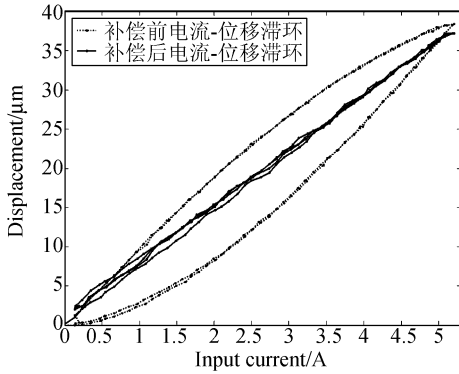
$$[u_r]_{k-1} = [u_r(1), u_r(2), \dots, u_r(k-1)]$$

将序列 $[u_r]_{k-1}$ 与第 k 步的二次函数拟合模型所得电流值 $u_d(k)$ 组成新序列：

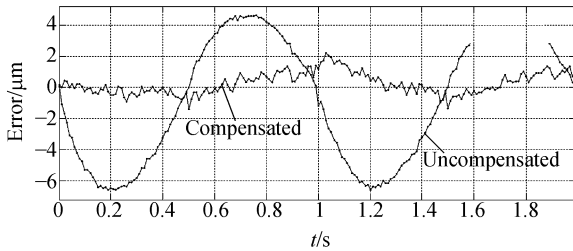
$$[u]_k = [u_r(1), u_r(2), \dots, u_r(k-1), u_d(k)]$$

用 Preisach 模型预测该输入，将结果与第 k 步的期望位移值比较，如果误差小于误差控制值 ϵ ，则表示第 k 步电流值取为 $u_d(k)$ 时，输出位移精度可以达到要求；若误差 $> \epsilon$ ，则需要进一步比较预测值与期望值，当预测值大于期望值时，需将实际输入 $u_d(k)$ 减小 Δu ，并与 $[u_r]_{k-1}$ 重新组成输入序列，再进行预测和比较；若预测值小于期望值，则将实际输入 $u_d(k)$ 增加 Δu ，也与 $[u_r]_{k-1}$ 重新组成输入序列，并预测比较，反复该过程，直到预测值与期望值之差符合误差要求，即求得第 k 步的实际电流。需注意的是，在构造的电流序列输入到 Preisach 模型之前，应预先处理使其满足擦除特性。当预测值与期望值差距较大，可增大 Δu ，以减小比较时间。

图 5 为采用前述迭代补偿算法对期望正弦信号进行跟踪的实验结果。从图 5(a)可以看出，补偿后迟滞输出与激励电流间的非线性关系有了明显的改善，从图 5(b)可以看出，尽管补偿后还存在 $-4.6\% \sim +5.2\%$ 的误差，但与无补偿时 $-15.7\% \sim +11.8\%$ 的迟滞误差相比，补偿效果相当明显。不过要实现活塞异形销孔的精密加工，刀具的重复定位精度应小于 $0.5 \mu\text{m}$ ^[9]，这样的精度显然还不能满足生产要求，必须增加闭环控制器来进一步提高控制精度。



(a)



(b)

图 5 迭代迟滞补偿实验结果

Fig. 5 Experiment results of iterative compensation

4 基于复合前馈补偿的 PID 控制

重复控制^[10]是基于内模原理的一种新型控制策略,主要应用于伺服系统重复轨迹的高精度控制。控制过程中,重复控制器能够把上一周期的控制偏差反映到现在,并与“现在的控制偏差”一起加到被控对象上,也就是说,重复控制器可以将上一周期的控制误差应用于当前控制量的生成,因而其对周期性的扰动具有良好的抑制能力。由图 1(b)可以看出,异圆销孔镗削加工中,其镗杆的径向变形幅度有着明显的周期特征,因而考虑采用重复控制。考虑到要将前述基于 Preisach 模型的前馈补偿信号和基于重复控制原理的补偿信号同时施加到被控对象上,设计了如下的复合前馈补偿 PID 闭环控制器,框图如图 6。图中: T 为采样间隔; $f_d(kT)$ 为 kT 时刻的期望输出; $u_p(kT)$ 为 kT 时刻的 Preisach 前馈补偿输入; $u_{pid}(kT)$ 为 kT 时刻的 PID 控制器的输入; $u_r(kT)$ 为 kT 时刻的重复补偿输入; $u(kT)$ 为 kT 时刻

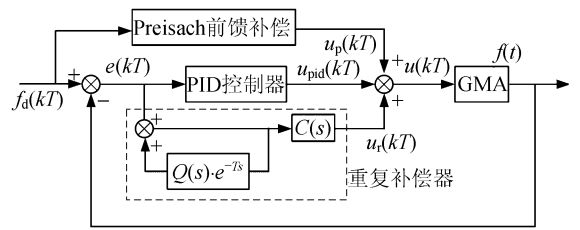


图 6 基于复合前馈补偿的 PID 控制框图

Fig. 6 Block diagram of PID control based on compounding feedforward compensation

GMA 的实际输入。 $Q(s)$ 为低通滤波器, $C(s)$ 为补偿器。

根据重复控制器的设计理论可知,在中、低频段 $Q(s)$ 应尽量接近于 1,以减小周期性干扰造成的误差,而在高频段,由于系统存在不确定性,应使 $|Q(s)| \gg 1$ 以保证系统的稳定性,因此 $Q(s)$ 一般可以选择为一阶惯性环节:

$$Q(s) = 1 / (1 + T_q s), \tag{7}$$

若系统频带为 ω_c ,时间常数 T_q 可取 $1/\omega_c$ 。

补偿器 $C(s)$ 直接串联在延迟环节后,是为了利用前一周期的误差信号对系统进行补偿,同时也可以用来改善系统的稳定性。根据文献[10]可将 $C(s)$ 取为一增益环节。

总的控制算法如下:

$$u(kT) = u_{pid}(kT) + u_p(kT) + u_r(kT). \tag{8}$$

尽管很多文献从电磁场和动力学角度给出了 GMA 的简化集中参数动态模型,但由于存在压磁系数、涡流时间常数、磁路磁阻等难以准确测定的参数,理论计算与实际的频响实验数据相去甚远,因而整个系统的传递函数最好通过实验方法测定。采用自行设计的 LabVIEW 虚拟频响测量仪测量系统频响曲线,通过最小二乘法来最终确定系统输出位移和输入电流之间的传递函数。确定 PID 控制器的参数时,可以先去掉图 6 中两个前馈补偿模块,将系统视为普通的 PID 的控制系统,采用基于遗传算法的参数整定方法,通过 Matlab 程序计算得到。

实验以某型号轿车发动机活塞镗削加工为例,其椭圆销孔的长轴为 34.16 mm,短轴为 34.12mm,椭圆度 0.04 mm,镗削加工时主轴转速 1 500 r/min。图 7 为基于复合前馈补偿的

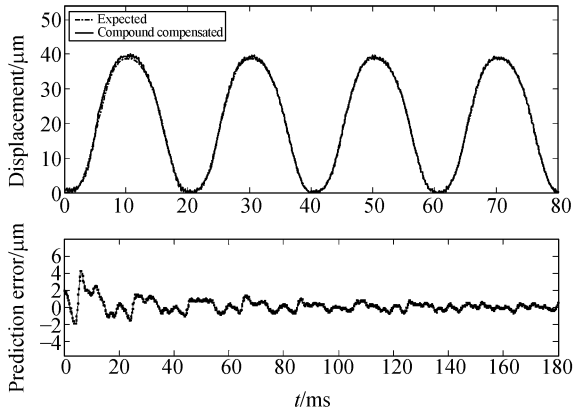


图 7 基于复合前馈补偿的 PID 控制实验结果

Fig. 7 Experiment results of PID control based on compounding feedforward compensation

PID 控制伺服跟踪实验结果。可以看出:第一个周期里,跟踪误差约为 9.5%,达到了 $4.3 \mu\text{m}$ 左右,比前面开环迭代补偿的时要大,这一方面是由于开始阶段,重复补偿器尚未发挥作用,同时也是由于经典 Preisach 模型是一种变化率非依赖型

迟滞模型,在高频场合,其补偿精度会受到一定的损失。第二、第三周期里,跟踪误差已经开始明显减小,当第四个周期结束时,系统的跟踪精度已达 $1 \mu\text{m}$,说明了补偿控制的有效性。

5 结 论

基于模型的迭代补偿方法可以避免 Preisach 模型的直接求逆困难,迟滞补偿实验表明迭代算法可以有效减小迟滞系统的非线性误差,但在高频情况下,经典 Preisach 模型的建模精度会受到一定的损失,因此仅仅依靠基于该模型的迭代补偿远不能达到足够的控制精度要求。但尽管如此,其补偿后的控制误差仍具有周期特征,因此采用重复控制仍然有效。实验表明在所给的复合前馈补偿控制下,GMA 的控制精度有了进一步的提高,说明了所给控制方法的有效性。

参考文献:

- [1] 孙麟治,李鸣鸣,程维明. 精密定位技术研究[J]. 光学精密工程,2005,13(增):69-75.
SUN L ZH, LI M M, CHENG W M. Study on precision positioning technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (Supp.):69-75. (in Chinese)
- [2] 王雷,谭久彬,刘玉涛. 超磁致伸缩体内涡流效应有限元分析[J]. 光学精密工程,2006,14(3):445-448.
WANG L, TAN J B, LIU Y T. Analysis on eddy current effect in giant magnetostriction with finite element method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):445-448. (in Chinese)
- [3] 吴劲松,吴声震. 活塞异形销孔的研究[J]. 内燃机配件,1994(4):9-13.
WU J S, WU SH ZH. Research on non-cylinder pin hole of piston[J]. *Internal Combustion Engine Fittings*, 1994 (4):9-13. (in Chinese)
- [4] 吕福在,项占琴,戚宗军. 高精度非圆截面加工机构设计及其控制方法研究[J]. 机械科学与技术,2000,19(5):764-769.
LV F Z, XIANG ZH Q, QI Z J. The mechanism design of micro-displacement actuator for precision non-circular cutting[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2000, 19(5):764-769. (in Chinese)
- [5] 王岳宇,赵学增. 补偿压电陶瓷迟滞和蠕变的逆控制算法[J]. 光学精密工程,2006,11(6):1032-1040.
WANG Y Y, ZHAO X Z. Inverse control algorithm to compensate the hysteresis and creep effect of piezoceramic [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 11(6):1032-1040. (in Chinese)
- [6] MAYERGOYZ I D. *Mathematical Models of Hysteresis and Their Application*[M]. New York: Academic Press of Elsevier, 2003.
- [7] 唐志峰. 超磁致伸缩执行器的基础理论与实验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.

- TANG ZH F. *Fundamental theory and experiments study of giant magnetostrictive actuator* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [8] GONG D CH, XIANG Z Q, PAN X H, *et al.*. Strategy and experiment of giant magnetostrictive actuator's precision control based on preisach mode[C]. *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2006; 1105-1109.
- [9] 张凯, 胡德金, 马浩全. 新型活塞异形销孔加工方法[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(增): 29-32.
ZHANG K, HU D J, MA H Q. Theoretical analysis on boring mechanism for piston noncircular pin hole[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2003, 37(Supp.): 29-32. (in Chinese)
- [10] HARA S, YAMAMOTO Y, OMATA T, *et al.*. Repetitive control system; a new type servo system for periodic exogenous signals[J]. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1988, 33 (7) : 659-668.

作者简介:龚大成(1978—),男,浙江杭州人,浙江大学现代制造工程研究所在读博士研究生,主要研究方向为新型智能材料执行器的精密控制;E-mail: gongdacheng@yahoo. com. cn

项占琴(1954—),男,汉族,浙江大学教授、博士生导师,现任浙江大学机械与能源工程学院现代制造工程研究所副所长,全国高校制造自动化研究会常务理事,全国高校制造自动化研究会华东分会副理事长,浙江省设备管理与维修分会副理事长,主要从事机电一体化、数控装备与技术、精密加工与制造等方面的研究。

E-mail: xzq128@yahoo. com. cn