

直线电机驱动 XY 平台精密轮廓跟踪控制

武志涛, 杨永辉*

(辽宁科技大学电子与信息工程学院, 辽宁省 鞍山市 114051)

Precise Contour Tracking Control for Linear Motor Drive XY Tables

WU Zhitao, YANG Yonghui*

(School of Electrics and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning,
Anshan 114051, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: In order to reduce the contour error generated by the direct-drive XY table during tracking process, this paper presented a trajectory tracking control scheme combining the PDFF position controller and the real-time variable gain contour error compensator. By reasonably selecting three parameters of PDFF controllers, permanent magnet linear position servo systems had the advantages of quick response and small overshoot. Furthermore, in order to accurately estimate the contour error in real time, a new contour error model was defined by using the information of the tracking error and feed rate, and a real-time contour error estimator was constructed based on that model. By combining with a variable-gain cross-coupling control structure, a real-time variable gain contour error compensator was formed. Experimental results show that the innovative method proposed in this paper can not only calculate the contour error of the trajectory tracking system in real time but also effectively make the XY table meet the requirements of high-precision contour tracking.

KEY WORDS: linear motor; servo control; contour error model; cross-coupled control; XY table

摘要: 为了减少直驱 XY 平台在循迹跟踪过程中所产生的轮廓误差, 该文提出一种 PDFF 位置控制器与实时变增益轮廓误差补偿器相结合的轨迹跟踪控制方案。通过合理选择 PDFF 控制器的 3 个参数, 使永磁直线电机位置伺服系统在减少超越量的同时具有响应速度快的优点。其次, 为了实时准确地估算轮廓误差, 利用跟踪误差与进给率等信息定义一个新的轮廓误差模型, 并依此模型构建实时轮廓误差估计器, 再通过与变增益交叉耦合控制结构相结合组成实时变增益轮廓误差补偿器。实验结果表明, 所提出的创新性方法不仅可实时且有效地计算出轨迹跟踪系统的轮廓误差, 并且使 XY 平台满足高精度轮廓跟踪的需求。

关键词: 直线电机; 伺服控制; 轮廓误差模型; 交叉耦合控制; XY 平台

0 引言

随着工业制造技术及自动化设备的快速发展, 使得制造业对于高速、高精度的要求逐渐提高, 直驱 XY 平台由于采用直接驱动的方式达到直线运动, 因此具有精度高、推力大、高速度等优点, 被广泛应用于精密加工设备等领域^[1]。

精密的轮廓轨迹跟踪为多轴驱动系统的主要控制目的^[2]。若想减小循迹系统的轮廓误差, 必须直接针对驱动系统的轮廓误差, 设计特殊的控制器, 才能满足所要的轮廓精度要求。但是当两轴同动时, 各轴之间的动态特性会互相耦合, 形成一复杂的交相连接的非线性系统, 这将造成控制器设计上的困难。由于传统的轨迹跟踪控制器是各轴分开设计的, 且轴与轴之间是分别控制的, 两者之间互不影响, 也就是非耦合系统, 当各轴动态特性差异较大时, 控制系统在循迹跟踪过程中所存在的轮廓误差通常无法满足高精度的需求。

对于两轴 XY 同步控制系统, 文献[3]提出主从式控制架构, 即将同动系统的两个分别独立的单轴系统, 选择设定一轴为主轴, 另一轴为从轴, 将主轴的位置信号回馈提供给另一个从轴, 从而形成闭环控制系统。但从轴的控制信号会滞后于主轴, 在高速同步运动时, 此方法会增加轮廓跟随误差。为了解决此问题, 文献[4]提出交叉耦合 CCC 控制系统, 此方法将同动的两轴先算出整体的轮廓跟踪误差, 在通过交叉耦合的控制器, 计算出每个轴所需要补偿的位置误差值, 在同一时间将两轴的位置误差值回馈至各轴的控制器来降低轮廓跟踪误差。在文献[5-6]中, 分别利用最优化控制和李亚普诺夫稳定性原理, 设计多轴交叉耦合控制系统来确保整个

系统的稳定性和鲁棒性,但这两种方法忽略了控制系统中的不确定性与外部干扰的影响。文献[7]提出新的两轴交叉耦合控制的架构,并推导出轮廓跟踪误差的传递函数。文献[8]采用参考模型自适应理论进行交叉耦合控制器的设计,并且验证了控制系统的鲁棒性。文献[9]设计了两轴 XY 平台轮廓轨迹跟踪鲁棒控制器,此方法通过前馈和回馈补偿来抑制控制系统的不确定性和外部干扰的影响,并且成功应用于半导体加工领域。文献[10]提出一种自适应性控制与交叉耦合控制相结合控制策略,来抑制内、外部各种非线性动态扰动对控制系统的影响。文献[11]提出一种基于迭代学习的交叉耦合控制器设计方法,并证明了学习法则的收敛性与稳定性。文献[12-13]提出可变增益交叉耦合控制,使其在跟踪非线性轨迹时,可随着命令路径轮廓的改变实时调变耦合增益值,以提高轮廓跟踪精度。

PI 控制器具有运算简单、可靠度高、稳定性好等特点,但却容易产生超调并且抗扰动能力较差。PDF 控制器鲁棒性能好,但响应速度比 PI 控制器差,因此本文结合 PDF 和 PI 控制的特点,设计了一种永磁直线电机 PDFPI 位置伺服控制器。在轮廓误差的定义方式上,区别于文献[14],本文利用跟踪误差与进给率等信息定义一个新的轮廓误差模型。再据此误差模型结合文献[13]的变增益交叉耦合控制结构设计实时变增益轮廓误差补偿器。PDFPI 位置控制器与轮廓误差补偿器相结合构成了本文的整合式循迹跟踪控制系统。

1 基于 PDFPI 的直线电机位置控制器设计

XY 平台高精度轮廓跟踪的基本要求是直线电机位置跟踪的高精度^[15-16]。为满足直线电机伺服系统高精度定位的要求,本文结合 PI 与 PDF 控制的特点设计了 PDFPI 控制器,该控制器可兼具并弥补两种控制的优点与不足。

1.1 PDF 与 PI 控制器

PDF 控制器近年来开始使用在伺服控制系统中^[17]。PDF 控制又可称为极点配置控制,其优点是这种控制器只会改变闭环极点的位置而不会移动开环零点的位置。图1为PDF位置控制结构方框图,其中: K_I 、 K_P 、 K_F 皆为可调整参数; K_v 为速度回路比例常数; K_f 为推力系数,令 $K_t = K_v K_f$; M 表示直线电机动子和动子所带负载的总质量; B 为黏滞摩擦系数。

PDF 控制器系统闭环传递函数为:

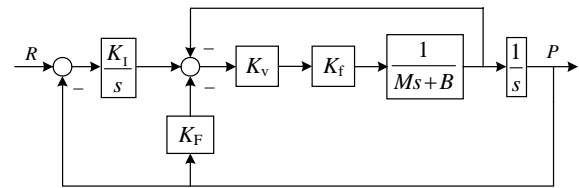


图1 PDF 控制框图

Fig. 1 Block diagram of the PDF control

$$\frac{P(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_I}{s} \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s}}{1 + \frac{K_I}{s} \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s} + K_F \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s}} = \frac{K_I K_t}{Ms^3 + (B + K_t)s^2 + K_F K_t s + K_I K_t} \quad (1)$$

图2为PI位置控制结构方框图,PI控制器系统闭环传递函数为:

$$\frac{P(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_p s + K_I}{s} \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s}}{1 + \frac{K_p s + K_I}{s} \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s}} = \frac{K_p K_t b s + K_I K_t b}{Ms^3 + (B + K_t)s^2 + K_p K_t b s + K_I K_t b} \quad (2)$$

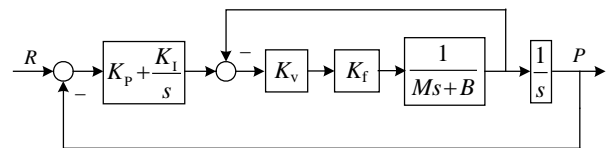


图2 PI 控制框图

Fig. 2 Block diagram of the PI control

比较式(1)与(2)可知,若调整参数使 $K_p = K_F$, 则此时 PI 控制器和 PDF 控制器会有相同的特征方程式,即具有相同的响应。两者最大的差异在于,PI 控制器比 PDF 控制器多了一个零点 $Z = -K_I/K_p$, 代表在 PDF 控制器上多加了一个零点。一般而言,左半面的零点对于瞬时响应性能主要影响是减少上升时间,但同时会增加最大超调量,而稳定时间几乎不变。

1.2 PDFPI 控制器

PDFPI 控制器结构如图3所示,传递函数为:

$$\frac{P(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_I}{s} \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s} + K_{FF} \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s}}{1 + \frac{K_I}{s} \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s} + K_{FF} \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s}} = \frac{K_{FF} K_t s + K_I K_t}{Ms^3 + (B + K_t)s^2 + K_{FF} K_t b s + K_I K_t} \quad (3)$$

比较式(1)~(3)可知,若调整参数使 $K_p = K_F$, 则此时 PDFPI 控制器、PDF 控制器与 PI 控制器都

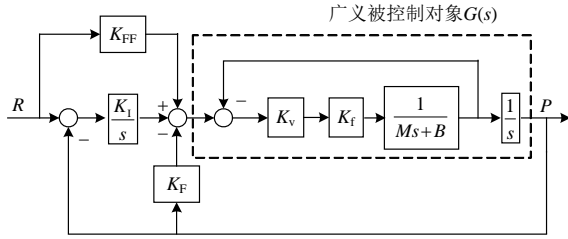


图 3 PDFF 控制框图

Fig. 3 Block diagram of the PDFF control

有相同的特性方程式, 其极点相同。三者的差异在于零点的位置, 其中 PDFF 控制器的零点位置在 $Z = -K_{FF}/K_I$, 由积分增益和前馈回路增益来决定。此时若调整参数使 $K_{FF}=0$, 由式(1)及(3)可知此时 PDFF 控制器相当于 PDF 控制器。若调整参数使 $K_{FF}=K_F$, 由式(2)及(3)可知, 此时 PDFF 控制器相当于 PI 控制器。可定义 $p=K_{FF}/K_F$, 若 $p=0$ 相当于 PDF 控制器, $p=1$ 相当于 PI 控制器, 若限制 $0 \leq p \leq 1$, 就可使 PDFF 控制器兼具 PI 与 PDF 两种控制的特性。广义被控对象的传递函数 $G(s)$ 定义为

$$G(s) = \frac{K_v K_f / [s(Ms+B)]}{1 + K_v K_f / (Ms+B)} = \frac{K_v K_f}{Ms^2 + (B + K_v K_f)s} \quad (4)$$

2 XY 平台的轮廓误差模型及轮廓控制器设计

2.1 XY 平台的轮廓误差模型

在自由轮廓跟踪任务中, 实时准确的轮廓误差难以求得, 通常的做法是定义一个近似准确的轮廓误差^[18]。文献[18]提出了等效误差的概念, 把实际的轮廓误差近似分解为法线误差和切向误差。但法线误差在高速和大曲率条件下, 并不能真实有效的反应实际的轮廓误差。此误差模型原理上的不足, 使得循迹系统的轮廓误差难以进一步减小。

本文利用跟踪误差与进给率等信息定义了一个新的轮廓误差模型。首先, 定义实际轨迹位置 P_1 点距命令轨迹的最短距离 E_c 为轮廓误差, 如图 4 所示。 R_1 、 R_2 为命令轨迹上的两个位置点, R_2 滞后于 R_1 的距离 L 可由跟踪误差 E_P (即 $P_1 R_1$) 在 P_1 点沿切线方向的投影近似表示:

$$L = \frac{\mathbf{P}_1 \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{P}_{1t}}{|\mathbf{P}_{1t}|} \quad (5)$$

定义矢量 \mathbf{R}_1 与 \mathbf{P}_1 表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 = R_{1x} \mathbf{i} + R_{1y} \mathbf{j} \\ \mathbf{P}_1 = P_{1x} \mathbf{i} + P_{1y} \mathbf{j} \end{cases}$$

位置 R_1 与 P_1 点的单位切线向量可以表示为:

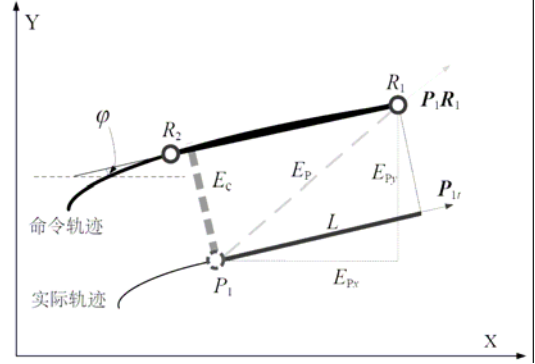


图 4 自由曲线的轮廓误差图示

Fig. 4 Contour error of arbitrary contour trajectory

$$\mathbf{R}_{1t} = \frac{\mathbf{R}_1}{dl_1} = \frac{1}{dl_1} (R_{1x} \mathbf{i} + R_{1y} \mathbf{j}) \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{1t} = \frac{\mathbf{P}_1}{dl_2} = \frac{1}{dl_2} (P_{1x} \mathbf{i} + P_{1y} \mathbf{j}) \quad (7)$$

式中: $dl_1 = \sqrt{dR_{1x}^2 + dR_{1y}^2}$; $dl_2 = \sqrt{dP_{1x}^2 + dP_{1y}^2}$, 则

$$L = \frac{\mathbf{P}_1 \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{P}_{1t}}{|\mathbf{P}_{1t}|} = \frac{P_{1x}}{dl_2} (R_{1x} - P_{1x}) + \frac{P_{1y}}{dl_2} (R_{1y} - P_{1y}) \quad (8)$$

在恒定进给率或渐变进给率情况时, 点 R_2 至 R_1 的时间 Δt 可以表示为:

$$\Delta t = L / \sqrt{\bar{v}_{R_{1x}}^2 + \bar{v}_{R_{1y}}^2} \quad (9)$$

$\sqrt{\bar{v}_{R_{1x}}^2 + \bar{v}_{R_{1y}}^2}$ 可以视为位置 R_1 点的平均进给率, 则点 R_2 的位置可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_1(t - \Delta t) &\approx \begin{bmatrix} R_{1x} - \bar{v}_x \Delta t \\ R_{1y} - \bar{v}_y \Delta t \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} R_{1x} - [(v_{R_{1x}} + v_{R_{2x}}) / 2] \Delta t \\ R_{1y} - [(v_{R_{1y}} + v_{R_{2y}}) / 2] \Delta t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

由于点 R_2 与 P_1 位置接近, 并且有相同的目标位置 R_1 , 所以可以近似假设:

$$v_{P1} \approx v_{R2} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)中, 则 \mathbf{R}_2 可表示为:

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} R_{2x} \\ R_{2y} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} R_{1x} - (\frac{v_{R_{1x}} + v_{P_{1x}}}{2}) \Delta t \\ R_{1y} - (\frac{v_{R_{1y}} + v_{P_{1y}}}{2}) \Delta t \end{bmatrix} \quad (12)$$

由图 4, 经计算得轮廓误差公式为:

$$E_c = -E_{Px} \sin \phi + E_{Py} \cos \phi \quad (13)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{R_{2y} - R_{1y}}{R_{2x} - R_{1x}} \right) \quad (14)$$

2.2 实时变增益轮廓误差补偿器

根据轮廓误差模型估算式(13)、(14), 本文构建

了实时轮廓误差估计器, 再结合文献[13]的变增益交叉耦合控制结构组成了实时变增益轮廓误差补偿器, 可变增益 CCC 双轴运动控制系统如图 5 所示。 K_c 为 PI 交叉耦合控制器, C_x 和 C_y 是交叉耦合控制器可变增益, 对于一个非线性轮廓跟踪任务, 其值可表示为^[12]:

$$C_x = -\sin\phi + E_{Px} / (2\rho) \quad (15)$$

$$C_y = -\cos\phi - E_{Py} / (2\rho) \quad (16)$$

式中 ρ 为命令轨迹曲率半径。

为实现良好的循迹跟踪精度, 永磁直线电机位置主控制器采用 PDFF 控制策略, 实时变增益轮廓误差补偿器实现轮廓误差的实时补偿作为辅助控制器, PDFF 位置控制器与实时变增益轮廓误差补偿器相结合构成了整合式控制结构, 如图 5 所示。

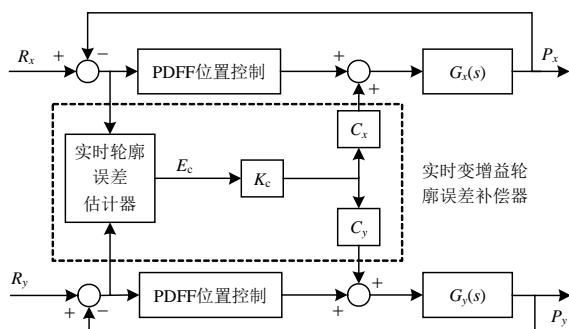


图 5 轨迹跟踪系统整体控制框图

Fig. 5 Block diagram of trajectory tracking control system

3 实验研究

本节将在不同的负载条件下进行了轮廓跟踪实验, 以验证所提出方法的有效性^[19-20]。实验装置主要由: LM22-26 型精密 XY 两轴直线电机平台、ACJ-055-09 型 Copley 伺服驱动器、Galil DMC 控制卡、VILT-0400 光栅编码器和上位机组成, 实验装置如图 6 所示。



图 6 轮廓跟踪系统测试平台

Fig. 6 Measure platform of contour tracking system

LM22-26 型精密 XY 平台两个轴的直线电机参数分别为: 动子质量 $M_x=3.4\text{kg}$, $M_y=2.8\text{kg}$; 两轴的推力系数 $K_{fx}=10.11\text{ N/A}$, $K_{fy}=0.56\text{ N/A}$; 粘滞摩擦系数 $B_x=244.319\text{ Ns/m}$, $B_y=82.017\text{ Ns/m}$ 。选取 X、Y 轴 PDFF 位置控制器增益分别为 $K_{FFx}=9.1$, $K_{Fx}=11.5$, $K_{Lx}=3.7$, $K_{vx}=7.8$; $K_{FFy}=7.8$, $K_{Fy}=11.2$, $K_{Ly}=2.7$, $K_{vy}=6.6$ 。交叉耦合控制器参数为: $K_{cp}=13.9$, $K_{ci}=75.5$ 。实验命令轨迹为圆形轨迹, 轨迹半径 $\rho=50\text{mm}$, 进给率 100mm/s , 分别进行无负载和负载 2kg 的轨迹跟踪实验, 实验命令轨迹为圆形的目的在于, 可由命令轨迹的半径、圆心以及实际轨迹位置的坐标计算出真实的轮廓误差, 借此来验证本文轮廓误差计算模型与所提方法的有效性。实验结果如图 7—12 所示。

图 7 为循圆轨迹实验曲线图, 图 8 为图 7 局部 I 处放大显示图。图 9、11 分别为空载与负载条件下, 循圆轨迹真实轮廓误差曲线。图 10、12 分别为空载和负载条件下, 基于本文所提轮廓误差模型估算得出的轮廓误差曲线。通过对比图 9 与 10、图 11 与 12 可见: 在两种负载条件下, 基于本文所提出的误差模型计算得到的轮廓误差都可以有效

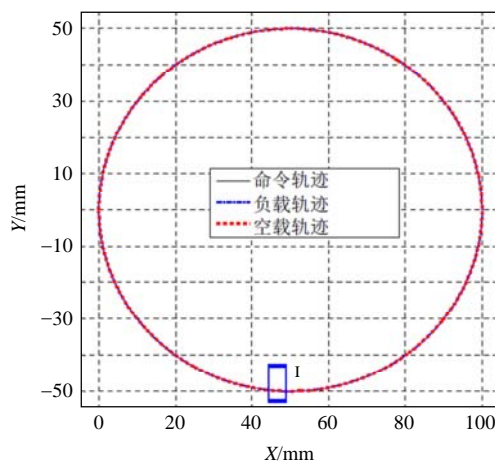


图 7 圆形轮廓轨迹

Fig. 7 Circle-shaped contour

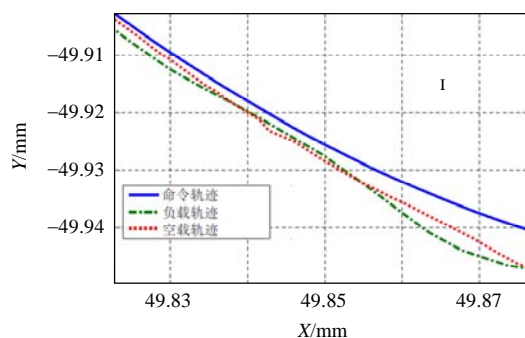


图 8 圆形轮廓轨迹局部 I

Fig. 8 Local enlarged image I of circle-shaped contour

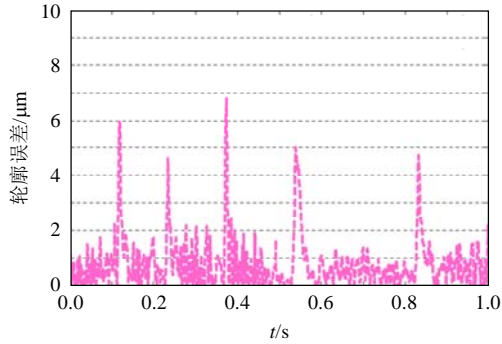


图 9 空载真实轮廓误差

Fig. 9 True contour error with no load

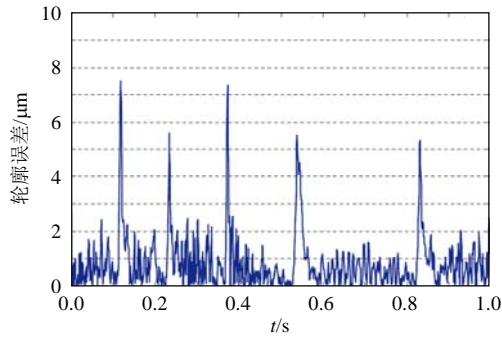


图 10 空载实验估算轮廓误差

Fig. 10 Actual calculation contour error with no load

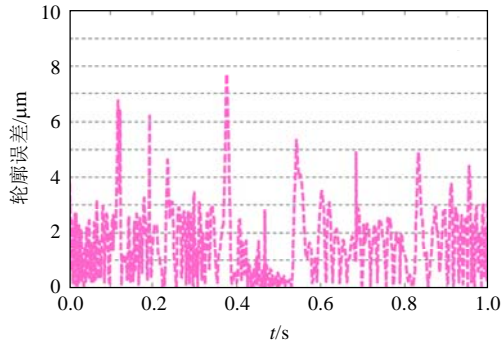


图 11 负载真实轮廓误差

Fig. 11 True contour error with 2kg load

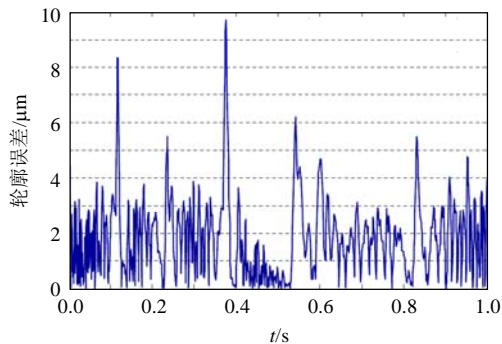


图 12 负载 2kg 实验估算轮廓误差

Fig. 12 Actual calculation contour error with 2kg load

反映真实的轮廓误差。并且在空载情况下，循圆系统真实的轮廓误差 $\leq 7\mu\text{m}$ ；在负载为 2kg 时，循圆系统真实的轮廓误差 $\leq 8\mu\text{m}$ ；由图 9 和 11 可得，本文提出的 PDFF 位置控制器与实时变增益轮廓误差

补偿器相结合的轨迹跟踪控制方案能够有效地减小循圆系统的轮廓误差，并且可以有效抑制 XY 平台动子质量参数变化对轮廓误差精度的影响，从而使系统具有较强的鲁棒性能。与文献[11]中轮廓控制方案下的循圆轨迹误差指标相比较如表 1 所示。对比可见：本文所提出的创新性方法循圆轨迹跟踪的效果更好。

表 1 循迹跟踪系统指标比较

Tab. 1 Performance comparison of contour tracking systems

循圆跟踪	平均误差/ μm	均方差/ μm
本文	1.37	6.25
文献[11]	1.49	9.59

4 结论

本文融合 PDF 和 PI 控制的特点，设计了一种永磁直线电机 PDFF 位置伺服控制器。针对曲线的轮廓误差难以实时准确测量的问题，本文定义了一个新的轮廓误差模型，并基于此误差模型结合变增益交叉耦合控制结构设计了实时变增益轮廓误差补偿器。通过实验得到以下结论：

- 1) 本文提出的整合式控制策略可以有效抑制 XY 平台动子质量变化对轮廓误差精度的影响，从而使循圆系统具有较强的鲁棒性。
- 2) 基于本文所提出的误差模型计算得到的轮廓误差可以有效反映循圆轨迹的真实轮廓误差。

参考文献

[1] 郭庆鼎，王成元，周美文，等. 直线交流伺服系统的精密控制技术[M]. 北京：机械工业出版社，2000：1-5.
Guo Qingding, Wang Chengyuan, Zhou Meiwen, et al. Precision control technology of linear AC servo system [M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 1-5(in Chinese).

[2] Su Kehan, Cheng Mingyang. Contouring accuracy Improvement using cross-coupled control and positionerror compensator[J] International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(12-13): 1444-1453.

[3] 杨俊友，刘永恒，白殿春. 基于迭代学习与小波滤波器的永磁直线伺服系统扰动抑制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 87-93.
Yang Junyou, Liu Yongheng, Bai Dianchun. Disturbance rejection for PMLSM based on iterative learning control and wavelet filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 87-93(in Chinese).

[4] 王丽梅，李兵. 直线电机驱动 XY 平台的速度场轨迹

- 规划与控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 438-445.
- Wang Limei, Li Bing. Research on trajectory planning of contour control for a linear motor drive XY table based on velocity field[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 438-445(in Chinese).
- [5] 王丽梅, 孙璐. 基于经验模态分解算法的直驱 XY 平台交叉耦合迭代学习控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4745-4753.
- Wang Limei, Sun Lu. Cross-couple iterative learning control of direct drive XY table based on an empirical mode decomposition algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4745-4753(in Chinese).
- [6] Barton K L, Alleyne A G. A cross-coupled iterative learning control design for precision motion control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(6): 1218-1231.
- [7] Yeh S S, Hsu P L. Estimation of the contouring error vector for the cross-coupled control design[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(1): 44-51.
- [8] 王丽梅, 金抚颖, 孙宜标. 基于等效误差的直线电机 XY 平台二阶滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 88-92.
- Wang Limei, Jin Fuying, Sun Yibiao. Second order sliding mode control for linear motor XY table based on equivalent errors method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 88-92(in Chinese).
- [9] Cheng Mingyang, Su Kehan. Contouring accuracy improvement using a tangential contouring controller with a fuzzy logic based feedrate regulator[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(1-2): 75-85.
- [10] Cheng M Y, Lee C C. On real-time contour error estimation for contour following tasks[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. California, USA: IEEE, 2005: 1047-1052.
- [11] Cheng Mingyang, Lee Chengchien. Motion controller design for contour-following tasks based on real-time contour error estimation[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1686-1695.
- [12] Koren Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 1980, 102(4): 265-272.
- [13] 宋杨. 基于 l_1 控制的 XY 平台直线伺服系统轮廓跟踪控制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.
- Song Yang. Contour tracking control of XY table linear servo system based on l_1 control[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2008(in Chinese).
- [14] Zhiming X, Jincheng C, Zhengjin F. Performance evaluation of a real-time interpolation algorithm for NURBS curves[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 20(4): 270-276.
- [15] 夏加宽, 沈丽, 彭兵. 齿槽效应对永磁直线伺服电机法向力波动的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2847-2853.
- Xia Jiakuan, Shen Li, Peng Bing. Influences of cogging effects on normal force ripple in permanent magnet linear servo motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2847-2853(in Chinese).
- [16] 司纪凯, 司萌, 封海潮. 两自由度直驱电机的研究现状及发展[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 98-105.
- Si Jikai, Si Meng, Feng Haichao. Research status aive motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 98-105(in Chinese).
- [17] 孙宜标, 杨雪, 夏加宽. 采用鲁棒微分器的永磁直线同步电机二阶滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 6-10.
- Sun Yibiao, Yang Xue, Xia Jiakuan. Second order sliding mode control for PMLSM using robust differentiator [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(33): 6-10(in Chinese).
- [18] Chen S L, Wu K C. Contouring control of smooth paths for multi-axis motion systems based on equivalent errors [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(6): 1151-1158.
- [19] 王丽梅, 武志涛. 直接驱动 XY 平台轮廓误差分析及法向交叉耦合控制[J]. 电机与控制学报 2010, 14(9): 63-68.
- Wang Limei, Wu Zhitao. Contour error analysis and normal cross-coupled control for direct drive XY table [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(9): 63-68(in Chinese).
- [20] Yeh S S, Hsu P L. Analysis and design of integrated control for multi-axis motion systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(3): 375-382.



武志涛

收稿日期: 2017-12-04.

作者简介:

武志涛(1981), 男, 博士, 研究方向为直线电机伺服驱动技术, aswzt@163.com;

*通信作者: 杨永辉(1971), 男, 教授, 研究方向为机器人通讯与控制。

(责任编辑 吕鲜艳)

