

二维直线电机实时轮廓误差估计及无模型控制

张宝林¹, 曹荣敏¹, 侯忠生²

(1. 北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192;

2. 青岛大学 自动化学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对二维直线电机轮廓误差易受跟踪误差影响和复杂系统不易控制的问题, 提出一种实时轮廓误差估计(CEE)和无模型自适应控制(MFAC)相结合的改进交叉耦合控制(CCC)策略。实时CEE依据当前实际位置信息和坐标变换思想, 可以准确确定规则轮廓的轮廓误差点, 得到轮廓误差真实值, 避免受跟踪误差的影响。同时, 对于单轴误差控制, 依据系统的输入输出数据, 设计出MFAC算法, 避免对精准数学模型的依赖。仿真和实验结果表明, 所提出的方法提高了系统的轮廓精度, 降低了控制难度, 验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 实时轮廓误差估计; 无模型自适应控制; 交叉耦合控制; 轮廓精度; 二维直线电机

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20064

Real-time Contour Error Estimation and Model-free Control for Two-dimensional Linear Motor

ZHANG Baolin¹, CAO Rongmin¹, HOU Zhongsheng²

(1. School of Automation, Beijing Information Science and Technology University,

Beijing 100192, China; 2. School of Automation, Qingdao University,

Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: Aiming at the problem that contour error of two-dimensional linear motor is susceptible to tracking error and complex system is difficult to control, an improved cross-coupled control(CCC) strategy combining real-time contour error estimation(CEE) and model-free adaptive control(MFAC) was proposed. Real-time CEE is based on the current actual position information and coordinate transformation idea. It can accurately determine the contour error point of regular contour, get the true value of contour error, and avoid the influence of tracking error. Moreover, for single-axis error control, an MFAC algorithm was designed according to the input and output data of the system, which avoids the dependence on accurate mathematical model. The simulation and experimental results show that the proposed method improves the contour accuracy of the system, reduces the control difficulty, and verifies the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: real-time contour error estimation; model-free adaptive control; cross-coupled control; contour accuracy; two-dimensional linear motor

随着工业制造技术及自动化设备的快速发展, 高速、高精度已是未来制造业发展的趋势^[1]。而直线电机作为数控机床的驱动装置, 具有高动态性能和高效率等优点^[2], 因此在精密加工等领域得到广泛应用。但是, 在二维直线电机加工过程中, 负载扰动、机械延迟及双轴跟踪误差等因素对其轮廓精度会产生较大影响。

为提高二维直线电机的轮廓精度, 传统轮廓

误差估计(contour error estimation, CEE)采用减小单轴跟踪误差^[3]的方法, 进而减小轮廓误差, 但是减小跟踪误差并不能很好地提高轮廓精度。轮廓误差模型概念的提出, 最早是由文献[4]在CCC中提出的直线CEE模型。文献[5]提出了基于圆形的CEE模型。后来又有许多学者对圆形误差估计模型做出改进, 进而提高估计精度。目前研究较多的轮廓误差方法为线性估计、二阶逼

基金项目: 国家自然科学基金(61833001, 61433002); 北京市自然科学基金(4142017)

作者简介: 张宝林(1994—), 男, 硕士研究生, Email: perc_zbl@126.com

近估计,其大多受跟踪误差影响,不能准确计算出轮廓误差值,尤其在大曲率处轮廓误差较大,轮廓精度较低。

对于CCC中的单轴误差控制,文献[6]提出基于速度场规划控制方法,提高了直驱XY平台的轮廓精度。文献[7]采用摩擦补偿的轮廓控制方法对XY平台进行控制,但在启动时刻轮廓误差依然很大。文献[8]采用一种实时误差估计与PID结合的方法,但控制效果并不出色。因此如PID^[9]、最优控制^[9]等控制方法虽被用于实现CCC^[10],但其大多设计都基于模型,所以针对高复杂、强非线性模型^[11-12]并不适用,同时,其参数调节困难、控制难度高、控制精度低。

针对上述问题,提出了一种实时CEE模型与MFAC相结合的改进CCC策略。与传统的CEE相比,对于规则轮廓,其最大优势是不受跟踪误差性能和期望轮廓影响,只与当前实际位置点有关,因此提高了轮廓精度。同时,对于CCC单轴误差控制采用MFAC算法,较传统的CCC中的PID控制,可调参数少,能在线实时调节,降低了控制难度,提高了轮廓精度。仿真和实验表明,所提策略提高了二维直线电机的轮廓精度,降低了控制难度。

1 二维直线电机动力学特性

二维直线电机运动平台由2台永磁直线同步电机(permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM)构成。在建立其动态数学模型时需要考虑诸多外部干扰和不确定性^[13],其中的主要因素是库伦摩擦力变化、齿槽力和推动力脉动^[14]。描述PMLSM运动方程的数学模型为^[15]

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ M\dot{v} = u - B\dot{x} - f_f - f_c + D \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} f_f &= [f_c + (f_s - f_c)e^{-(\dot{x}/\dot{x}_s)^\delta}] \text{sgn}(\dot{x}) \\ f_c &= b\sin(\omega_0 x) \end{aligned}$$

式中: x 为电机位置; v 为电机速度; M 为动子质量; u 为控制对象的输入力; B 为粘滞摩擦系数; f_f 为库伦摩擦力; f_c 为电磁推动力; D 为其它误差; f_c 为最小库伦摩擦力; f_s 为静态摩擦力; \dot{x}_s 为实验所得润滑参数,值为0.1; δ 为附加经验参数,取为1; b 为推力脉动振幅; ω_0 为推力脉动角速度。

由于 f_f 与 \dot{x} 有关, f_c 与 x 有关,因此可表示为

$$f_f = A_f f_f(\dot{x}) \quad (2)$$

$$f_c = C_c f_c(x) \quad (3)$$

式中: A_f 为库仑摩擦力系数; $f_f(\dot{x})$ 为已知连续函数,用来近似估计传统的库仑摩擦力; C_c 为电磁推力系数; $f_c(x)$ 用来近似估计电磁推动力。

根据式(1)~式(3)得到二维直线电机模型的表达式为

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \end{bmatrix} \ddot{x} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} \dot{x} + \begin{bmatrix} A_{fx} \\ A_{fy} \end{bmatrix} f_f(\dot{x}) + \begin{bmatrix} C_{fx} \\ C_{fy} \end{bmatrix} f_c(x) - \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x u_x \\ K_y u_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: K 为控制器输入 u 的系数。

根据最小二乘法原理,进行二维直线电机系统辨识,得到对应数学模型参数,如表1所示。

表1 二维直线电机参数
Tab.1 Two-dimensional linear motor parameters

	M	B	A_f	C_c	D
X轴	0.18	26.34	0.024	2.25	0.012
Y轴	0.24	35.07	0.037	0.27	0.005

2 传统轮廓误差估计

传统CEE方法主要是采用密切圆逼近的方式来近似计算轮廓误差,其思想如图1所示。

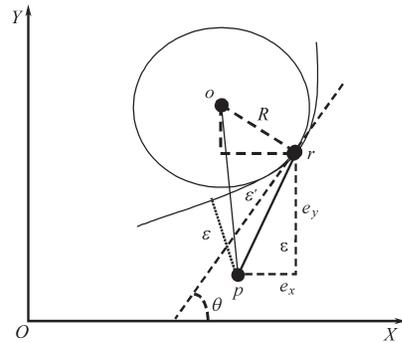


图1 任意平面曲线的轮廓误差
Fig.1 Contour error of arbitrary plane curve

图1中, $r(r_x, r_y)$ 为期望加工点; $p(p_x, p_y)$ 为实际加工点; $o(x_0, y_0)$ 为曲率圆圆心; θ 为 r 点的切线与X轴的夹角; e_x, e_y 为直线电机XY轴的跟踪误差; e' 为近似轮廓误差值; e 为真实轮廓误差值,经过二阶麦克劳林展开得到:

$$e \approx e' = -e_x \left(\sin\theta - \frac{e_x}{2R} \right) + e_y \left(\cos\theta + \frac{e_y}{2R} \right) \quad (5)$$

从式(5)中看出,传统CEE与各轴跟踪误差有关,同时受到期望轮廓曲率的影响,仅控制双轴跟踪精度难以保证其在尖端时的轮廓精度。

3 二维直线电机轮廓误差估计与控制整体设计方案

在传统CCC基础上进行改进,如图2所示,分为2部分。第1,对CEE,采用实时CEE方法,其能够准确确定规则轮廓误差的实际值,不受跟踪误差影响。第2,对单轴误差控制器,采用MFAC算法。

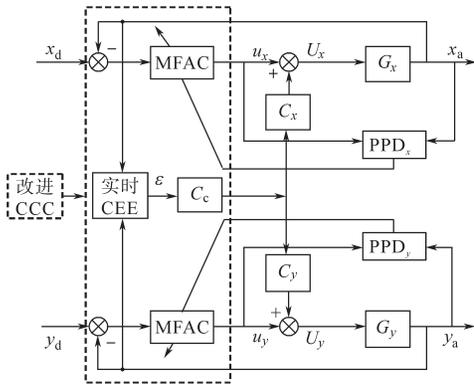


图2 二维直线电机轮廓误差估计与控制整体设计框图
Fig. 2 Overall design block diagram of contour error estimation and control for two-dimensional linear motor

图2中: x_d, y_d 为期望位置; x_a, y_a 为实际位置; C_c 为交叉耦合控制器; C_x, C_y 为交叉耦合增益; U_x, U_y 为整体控制输入; G_x, G_y 为X, Y轴对应的子系统;PPD_x与PPD_y为各轴伪偏导数(pseudo partial derivative, PPD)估计器。其整体控制律为

$$\begin{cases} U_x = u_x + K_p C_x \varepsilon \\ U_y = u_y + K_p C_y \varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_x, u_y 为双轴MFAC算法控制律; ε 为轮廓误差值; K_p 为交叉耦合控制器参数。

3.1 实时轮廓误差估计法

实时CEE的设计思想是:由直线电机的编码器反馈得到实际位置点,根据最小值原则确定轮廓误差点并在该点建立Frenet系。如图3所示, $f(s)$ 为期望椭圆轮廓; D 为期望加工点; A 为实际加工点; E 为轮廓误差点; ε 为轮廓误差; TEN 为Frenet系,相对 XOY 系角度为 θ ;投影角为 α 。

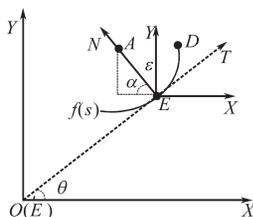


图3 实时轮廓误差估计
Fig. 3 Real-time contour error estimation

当 $f(s)$ 为椭圆轨迹,可得其方程为

$$f(s) = ax^2 + by^2 - c = 0 \quad (7)$$

因此,在轮廓误差点E的表达式为

$$f(E) = ax_E^2 + by_E^2 - c = 0 \quad (8)$$

$$\frac{y_E - y_A}{x_E - x_A} = \frac{f_y(E)}{f_x(E)} = \frac{by_E}{ax_E} \quad (9)$$

进而得到关于 x_E 的方程:

$$\begin{aligned} &(a^3 + ab^2 - 2a^2b)x_E^4 + (2a^2b - 2ab^2)x_E^3 + \\ &(ab^2x_A^2 + a^2by_A^2 - a^2c - b^2c + 2abc)x_E^2 + \\ &(2b^2c - 2abc)x_Ax_E - b^2cx_A^2 = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

由图3可知:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta = \arctan\left(\frac{y_E - y_A}{x_E - x_A}\right) \quad (11)$$

通过式(10)可以准确确定轮廓误差点坐标。同时可以得出任意向量及任意坐标从 XOY 到 TEN 的转换公式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ n \end{bmatrix} \quad (12)$$

因此, TEN 下的纵坐标即为真实轮廓误差的值,所以通过该法得到的轮廓误差表达式为

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -\sin\theta x + \cos\theta y \\ &= -\sin\theta(x_E - x_A) + \cos\theta(y_E - y_A) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中向量 AE 与二维直线电机跟踪误差无关。所以,实时轮廓误差计算的轮廓误差值始终是实际的准确值。

3.2 无模型自适应控制算法

根据图2所示控制方案,先进行各轴分散估计^[16],得到双轴的PPD估计值,再进行双轴的MFAC设计。以直线电机系统X轴为例,其形式如下式:

$$y(k+1) = f[y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-n_u)] \quad (14)$$

式中: $y(k), u(k)$ 为 k 时刻系统的实际输出位置和控制输入电压, $y(k), u(k) \in \mathbf{R}^l$; n_y, n_u 为系统阶数。

设计MFAC前,式(14)进行紧格式动态线性(compact form dynamic linearization, CFDL)。根据文献[11]的假设条件,式(14)对 k 的任意取值和 $\Delta u(k) \neq 0$ 时都有: $|\Delta y(k+1)| \leq d|\Delta u(k)|$,且一定存在一个伪偏导数 $\phi(k)$,使得^[11]:

$$\Delta y(k+1) = \phi(k)\Delta u(k) \quad (15)$$

其中 $|\phi(k)| \leq d$

式中: d 为一个常数。

令控制输入准则函数为

$$J[u(k)] = |y_d(k+1) - y(k+1)|^2 + \lambda |u(k) - u(k-1)|^2 \quad (16)$$

其中, λ 为权重系数, $\lambda > 0$, 限制控制输入量的变化。 λ 越小, 系统响应速度越快, 但可能发生超调; λ 越大, 系统响应越慢, 但输出性能更好。

将式(15)代入式(16), 得到以下控制律:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho \hat{\phi}(k)}{\lambda + |\hat{\phi}(k)|^2} [y^*(k+1) - y(k)] \quad (17)$$

式中: ρ 为步长因子, $\rho > 0$ 。

为克服电机位置突变对数据的影响, 同样提出估计准则函数^[11], 通过求极值得到对时变参数有良好跟踪能力的伪偏导数估计值:

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u(k-1)^2} [\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1) \Delta u(k-1)] \quad (18)$$

式中: μ 为惩罚因子, $\mu \in (0, 1]$, 一般取 1; η 为加入的步长序列, $\eta \in (0, 1]$ 。

从式(17)中看出, 该控制算法不显含与系统有关的模型信息, 因此保证二维直线电机具有较好的稳态响应, 降低了控制难度。令

$$\vec{y}(k+1) = y^*(k+1) - y(k) \quad (19)$$

代入式(17)得到:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho \hat{\phi}(k)}{\lambda + |\hat{\phi}(k)|^2} \{ \vec{y}(k+1) + k_1 [\vec{y}(k+1) - \vec{y}(k)] \} \quad (20)$$

式中: k_1 为正常数。

4 仿真与实验分析

仿真与实验时选用以下性能指标评估轮廓控制方案的质量:

1) $\epsilon_{\text{mad}} = \frac{1}{T} |\epsilon|$ 为轮廓误差的平均绝对误差。

2) $\epsilon_{\text{max}} = \max |\epsilon|$ 为轮廓误差的最大绝对值。

采用以下 4 种控制方法进行对比: 1) C1: CFDL-MFAC-直线轮廓误差估计; 2) C2: CFDL-MFAC-圆轮廓误差估计; 3) C3: CFDL-MFAC-实时轮廓误差估计; 4) C4: PID-实时轮廓误差估计。C1 和 C2 为传统 CEE 与 MFAC 结合的控制方法; C4 为实时 CEE 与 PID 结合控制方法; C3 为所提出的实时 CEE 与 MFAC 相结合的改进 CCC 方法。

选取椭圆轨迹作为期望输出, 表达式为

$$\begin{cases} x_d = 10 \sin t \text{ mm} \\ y_d = 5 \cos t \text{ mm} \end{cases} \quad (21)$$

4.1 仿真分析

仿真时, 采用 C3 法, 得到 MFAC 的主要参数为: $\lambda_x = \lambda_y = 0.07$, $\rho_y = \rho_x = 100$, $k_1 = 4000$, $K_p = 0.01$ 。实际轮廓与期望轮廓如图 4、图 5 所示。从图 4、图 5 中可以看出, 实际轮廓能够很好地跟踪期望轮廓, 并且在曲率大的位置也能保持很好的跟踪效果。

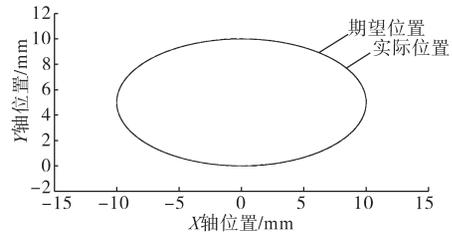


图4 期望轮廓与实际轮廓

Fig.4 Desired and the actual contour

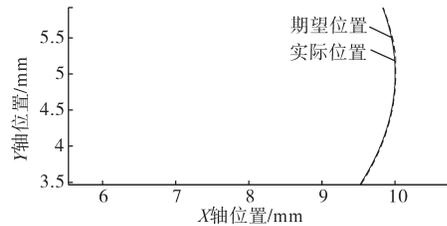


图5 尖端时刻的轮廓位置

Fig.5 Contour position at the tip moment

4种控制方案的轮廓误差变化值如图 6, 轮廓误差结果如表 2。图 6 显示 C3 法在启动时刻和运行过程中, 轮廓误差值较其它方法都要小。在表 2 中, 更加直观地看出, C3 法较 C2 法, ϵ_{max} 减小了近一半, ϵ_{mad} 减小了约 56%, 基本稳定在 3 μm ; C3 较 C4 法 ϵ_{max} 减少了约 73%, ϵ_{mad} 减少了约 89%。

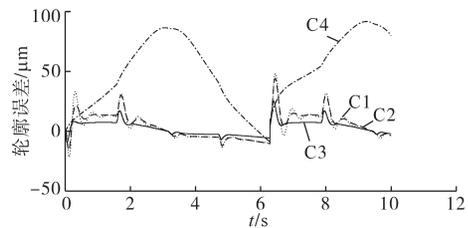


图6 不同控制方法的轮廓误差值

Fig.6 Contour error values for different control methods

表 2 轮廓误差结果

Tab.2 Contour error results

控制方法	$\epsilon_{\text{max}}/\mu\text{m}$	$\epsilon_{\text{mad}}/\mu\text{m}$
C1	48.20	8.73
C2	44.10	7.40
C3	24.20	3.22
C4	91.70	28.55

通过C1,C2,C3仿真,C3法较传统法的轮廓精度更高。通过C3,C4仿真,验证了MFAC的有效性,同时也验证了整体算法的有效性。

4.2 实验分析

二维直线电机实验平台如图7所示。其参数为: X,Y 轴行程250 mm; X,Y 轴持续推力分别为22 N,58 N;持续电流2.2 A;分辨率为1 μm ; X,Y 轴最大功率分别为50 W,92 W。

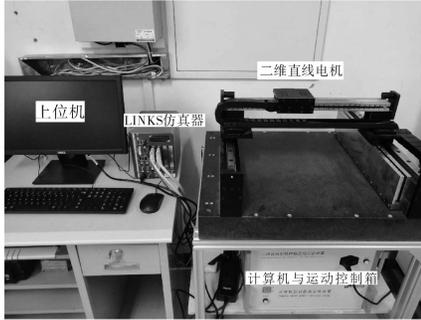


图7 二维直线电机平台

Fig.7 Two-dimensional linear motor platform

该系统配以 LINKS-RT 半实物仿真平台,构成一套完整的控制系统开发所需的实时仿真验证环境。其关键的控制单元连接原理图如图8所示。

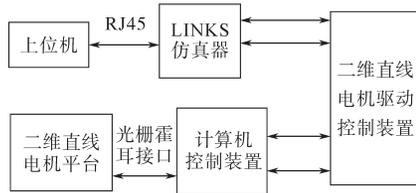


图8 二维直线电机连接原理图

Fig.8 Connection schematic diagram of two-dimensional linear motor

实验时参数调试为 $\lambda_x = \lambda_y = 1.2$,其它参数与仿真一致。

通过 LINKS-RT 得到如图9、图10所示的数据采集图。图9显示出采用C3法时 X,Y 轴实际和期望位置几乎重合;从图10看出,采用C3法时轮廓误差也保持在 $\pm 10 \mu\text{m}$ 。期望轨迹轮廓与实际轨迹轮廓如图11所示。从图11看出,期望位置与实际位置基本重合。启动时刻和尖端时刻的轮廓位置如图12、图13所示。从图12看出,在启动时刻C3法也能快速跟踪期望轮廓,而C2,C4法都需要一段时间的响应过程;从图13中可以看出,即使在大曲率处C3也能实现良好的跟踪效果。

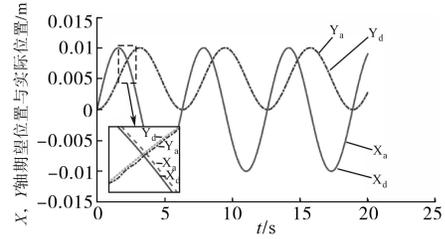


图9 X,Y 轴数据采集图

Fig.9 Data acquisition picture of X, Y axis

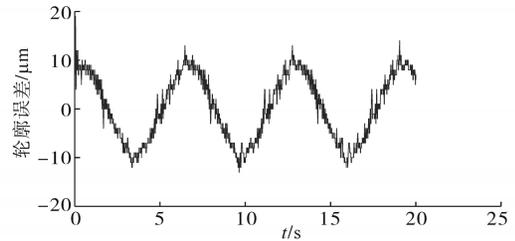


图10 轮廓误差数据采集图

Fig.10 Data acquisition picture of contour error

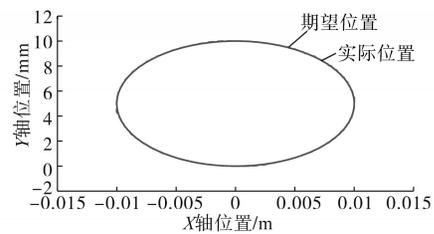


图11 期望轮廓与实际轮廓

Fig.11 Desired and the actual contour

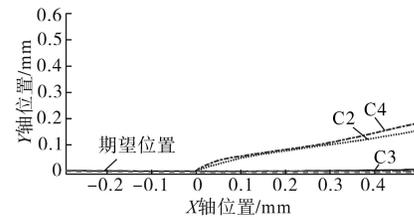


图12 启动时刻的轮廓位置

Fig.12 Contour position at start-up time

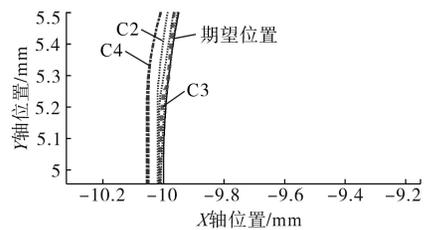


图13 尖端时刻的轮廓位置

Fig.13 Contour position at the tip moment

C2,C3,C4轮廓误差实验结果对比如图14所示,3种方法与文献8的实验轮廓误差结果如表3所示。从图14中可以看出,C3的控制效果最好,且运行过程中波动小,稳定性高。同时,表3

中更加直观地看出 C3 较 C2 的 ε_{mad} 减小了近 64%, ε_{max} 减小了 1 个数量级, 较 C4 法 ε_{mad} 减小近 80%, ε_{max} 减小了 94%, 并且调节参数时, 主要调节 λ, ρ , 且不依赖数学模型及未知参数变化影响, 降低了控制难度。与文献[8]相比, C3 法的椭圆轮廓误差的 ε_{max} 和 ε_{mad} 依然有所降低。综合可见: 本文所提出 CFDL-MFAC-实时轮廓误差估计控制方法效果更好。

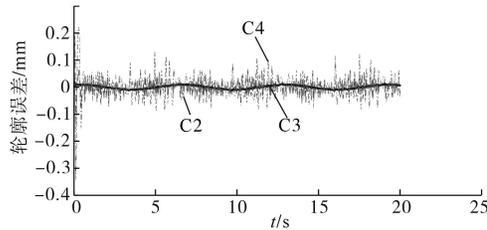


图 14 不同控制方法的实验轮廓误差值

Fig. 14 Experimental contour error values for different control methods

表 3 实验轮廓误差结果

Tab. 3 Experimental contour error results

控制方法	$\varepsilon_{\text{max}}/\mu\text{m}$	$\varepsilon_{\text{mad}}/\mu\text{m}$
C2	190.00	16.95
C3	19.00	6.03
C4	345.00	29.64
文献[8]	± 30	± 20

5 结论

针对二维直线电机轮廓误差易受跟踪误差影响和复杂系统不易控制的问题, 提出了实时 CEE 和 MFAC 相结合的改进 CCC 方案。实时 CEE 较传统 CEE 相比, 在于轮廓误差控制器的输入信息不再是跟踪误差, 而是当前时刻实际位置点信息, 因此避免受跟踪误差的影响, 减小了轮廓误差。对于单轴控制器采用基于紧格式的 MFAC 算法, 控制器结构设计简单, 仅利用两轴往复运动时产生的输入输出数据达到实时估计的效果, 进而提高了整个系统的跟踪精度和轮廓精度, 同时降低了控制难度。

仿真和实验结果表明, 所提出的方法即使在复杂二维直线电机系统上也可将椭圆轮廓的轮廓精度稳定地控制在 10 μm 以内, 验证了所提方

法的正确性和有效性。

参考文献

- [1] 武志涛, 杨永辉. 一种永磁直线电机驱动 X-Y 平台精密轮廓跟踪控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4037-4043.
- [2] 孙旭霞, 孙伟, 樊昱琨, 等. 基于双模糊 PI 控制的交流位置伺服系统研究[J]. 电气传动, 2017, 47(11): 45-49.
- [3] 王丽梅, 孙璐. 直驱 XY 平台的改进鲁棒迭代学习控制[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(9): 1-8.
- [4] Koren Y. Cross-coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1980, 102(4): 265-272.
- [5] Koren Y, Lo Ch-Ch. Variable-gain Cross-coupling Controller for Contouring[J]. CIRP Annals, 1991, 40(1): 371-374.
- [6] Wang Limei, Li Bing. Research on Trajectory Planning of Contour Control for a Linear Motor Drive X-Y Table Based on Velocity Field[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 438-444.
- [7] 王丽梅, 李兵. 基于摩擦观测器的直接驱动 XY 平台轮廓控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(1): 31-36.
- [8] 杨舒捷, 董浩, 俞嘉锋. 基于实时轮廓误差估计器的多轴运动系统变增益交叉耦合控制[C]//第 37 届中国控制会议论文集(C), 2018: 3977-3982.
- [9] 孙继卫, 刘秀敏, 郭亚男. 基于扰动观测器的永磁同步电机复合滑模控制[J]. 电气传动, 2018, 48(2): 14-18.
- [10] Wang Z, Hu C, Zhu Y, et al. Newton-ILC Contouring Error Estimation and Coordinated Motion Control for Precision Multi-axis Systems with Comparative Experiments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1470-1480.
- [11] 侯忠生, 金尚泰. 无模型自适应控制: 理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 7-10.
- [12] 曹荣敏, 周惠兴, 侯忠生. 数据驱动无模型自适应直线伺服系统精密控制和实现[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 310-316.
- [13] Hu C, Yao B, Wang Q. Adaptive Robust Precision Motion Control of Systems with Unknown Input Dead-zones: A Case Study with Comparative Experiments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2454-2464.
- [14] 赵希梅, 王晨光. 永磁直线同步电机的自适应增量滑模控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 111-117.
- [15] Cronin Brian, Spong Mark W. Switching Control of Multi-Input Cascade Nonlinear Systems[C]//Proceedings of the 42nd IEEE International Conference on Decision and Control, 2003: 4277-4282.
- [16] 曹荣敏, 周惠兴, 侯忠生, 等. 非圆切削刀具进给系统的复合迭代学习控制[J]. 电气传动, 2012, 42(9): 42-46.

收稿日期: 2019-03-22

修改稿日期: 2019-05-15