

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180151

一种永磁直线电机驱动 X-Y 平台 精密轮廓跟踪控制策略

武志涛 杨永辉

(辽宁科技大学电子与信息工程学院 鞍山 114051)

摘要 为了解决轮廓误差模型的不准确对循迹系统的影响,提出一种新的轮廓误差模型,该模型利用跟踪误差与进给率等信息定义轮廓误差,是一种改进式的等效切线轮廓误差模型。同时,为了减少直驱式 X-Y 平台在循迹跟踪过程中产生的轮廓误差,采用了位置 PDF 控制与轮廓 TCC 补偿控制相结合的整合式控制策略。PDF 控制使位置伺服系统具有较好的鲁棒性,TCC 轮廓补偿控制可以对轮廓误差进行实时的补偿。实验结果表明,该文所提出的改进式轮廓误差模型无论是在低进给率或高进给率条件下,都可以实时且有效地计算出循圆跟踪系统的轮廓误差,并使 X-Y 平台满足高精度轮廓跟踪的要求。

关键词: 永磁直线电机 直驱 X-Y 平台 轮廓误差模型 伺服控制

中图分类号: TP273

A Precise Contour Tracking Control Method for X-Y Table Driven by Permanent Magnet Linear Motors

Wu Zhitao Yang Yonghui

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

Abstract In order to solve the effect of inaccurate contour error model on the tracking control system, a new contour error model is proposed. The contour error model integrates the tracking error and feed rate information, which is an improved equivalent tangent contour error. At the same time, in order to reduce the contour error generated in the process of tracking the direct drive of the X-Y table, an integrated design method combining pseudo-derivative feedback (PDF) position control and Tangential contour compensation (TCC) control is adopted. The PDF control makes the position servo system better robust, and the TCC contours compensator can make real time compensation for the contour error. The experimental results show that the improved contour error model proposed can calculate the contour error effectively in real time under the condition of low feed rate and high feed rate, and make the X-Y servo table meet the requirements of high contour tracking accuracy.

Keywords: Permanent magnet linear synchronous motor, direct drive X-Y table, contour error model, servo control

0 引言

为满足先进制造对生产速度和品质的需求,高

速、高精度已是未来制造业的趋势,直线电机驱动 X-Y 精密平台以其响应快速、定位精度高、可靠性好等特点被广泛应用于精密加工设备等领域^[1]。

为了解决 X-Y 平台加工系统普遍存在的轮廓误差问题,文献[2]针对双轴系统的轮廓误差,提出交

国家自然科学基金项目资助(51175349)。

收稿日期 2018-01-26 改稿日期 2018-06-06

叉耦合的控制策略 (Cross-Coupled Control, CCC), 使得两个单轴之间不再是独立的控制 (等于将多轴系统进行整合控制), 从而降低轮廓误差, 但这种方法仅限于定速移动和线性路径。为使 CCC 可适用于不同类型的轮廓跟踪任务, 文献[3]采用参考模型自适应交叉耦合控制器来修正轮廓误差, 通过调整耦合控制器的增益来减小轮廓误差。文献[4]提出可变增益交叉耦合 (variable-gain cross-coupling) 控制, 使其在跟踪非线性轨迹 (如圆形、抛物线等) 时, 可随着命令路径轮廓的改变实时改变耦合增益值, 以提高轮廓跟踪精度。文献[5]将复杂自由曲线分解为多段简单曲线, 利用线性近似求得轮廓误差, 并基于模糊控制设计进给率调节器, 根据分段曲线的弧度调整交叉耦合控制器的增益, 以使交叉耦合控制可以应用于复杂曲线。文献[6]提出一种包含速度前馈控制器、修正型交叉耦合控制器及模糊调节进给率的复合运动控制架构。文献[7]提出一种基于方向场及网格点的方式来构建速度场, 通过路径规划达到减小轮廓误差的目的。文献[8]提出一种基于等效误差法的 X-Y 平台二阶滑模轮廓控制方案, 其缺点是滑模的设计存在困难, 控制系统存在抖振。对于非线性路径轮廓跟踪任务, 文献[9]提出一种近似等效的误差模型, 通过利用跟踪误差在命令轨迹坐标点法向上的投影定义轮廓误差, 再利用此误差设计轮廓控制器来减小轮廓误差, 其椭圆轨迹轮廓误差 $\leq 20 \mu\text{m}$ 。

以上研究方法所采用的轮廓误差模型都是基于一种近似的等效误差模型。该误差模型在跟踪误差较小时, 能有效反映实际的轮廓误差, 但在跟踪误差较大的情况下会产生计算失真。为了解决这个问题, 本文提出一种改进式等效轮廓误差模型作为空间自由曲线的轮廓误差计算方法。同时, 为了减少直驱式 X-Y 平台在循迹跟踪过程中产生的轮廓误差, 采用了位置 PDF 控制与轮廓补偿 TCC 控制相结合的整合式设计方法。

1 X-Y 平台轮廓误差模型分析

当命令轨迹为二维空间曲线时, 目前并无成熟的方法可以实时完全准确的计算出实际轨迹的轮廓误差值, 其解决办法是寻找一个近似的等效轮廓误差^[9,10]。

1.1 二维曲线的等效轮廓误差模型

等效轮廓误差采用命令轨迹位置的切线与法线坐标建立一个 T-C 坐标系, 并在 T-C 坐标中找出一个等效的轮廓误差量, 如图 1 所示。其中, $R(t)$ 为命令轨迹位置, $N(t)$ 为实际轨迹位置, T-C 坐标轴

是以 $R(t)$ 为基准作切线与法线所构成的坐标轴, 所谓等效轮廓误差就是将实际跟踪误差 E_N 投影到命令轨迹坐标的法线误差量。对于任意自由曲线, 如果命令轨迹的曲率变化较快并使系统的跟踪误差较大时 (指令曲线位置为 R' 点, 实际曲线位置为 N 点, 如图 2 所示), 采用一般近似等效的轮廓误差模型求得的轮廓误差为 E'_T , 此时将不能准确反映实际轮廓误差 E 。由图 2 可知, 若实际轮廓误差 E 为一正值, 此时估测出的轮廓误差 E'_T 却为负值, 所以等效轮廓误差估测法虽然计算简单, 但不是一种完美的轮廓误差模型。

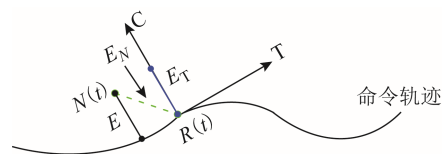


图 1 自由曲线的轮廓误差

Fig.1 Contour error of arbitrary contour trajectory

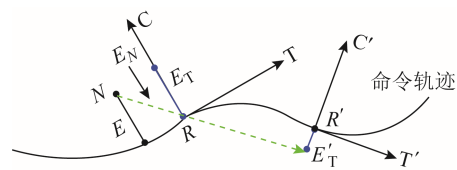


图 2 等效轮廓误差模型

Fig.2 The model of equivalent contour error

1.2 改进式轮廓误差模型

为了解决等效轮廓误差在高进给率或曲率变化较大情况下误差计算模型失真的问题, 本文提出一种改进式轮廓误差模型, 如图 3 所示。与采用跟踪误差投影方式获得的等效轮廓误差模型不同, 本文所提出的改进式轮廓误差模型并不是对 $R(t)$ 做切线, 而是利用目标轨迹点 R_2 与历史命令轨迹点 $R(t)$ 确定一条直线, 改进式轮廓误差定义为实际轨迹位置 $N(t)$ 至此直线的距离。就图 3 来说, E 为实际轮廓误差, 而等效轮廓误差为 E_T , 若采用改进后的轮廓误差模型则误差结果为 E_C 。从图中可明显看出, 相比于 E_T , 改进轮廓误差 E_C 将更接近于实际轮廓误差 E 。

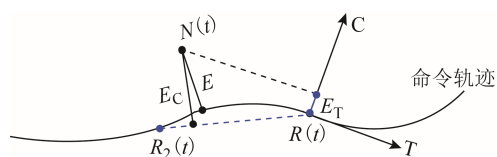


图 3 改进式轮廓误差模型

Fig.3 The model of improved contour error

本文利用跟踪误差投影到实际轨迹切线方向上的大小来确定 R_2 的位置, 如图 4 所示。其推导过程为

$$\begin{aligned} N_1 R_1: R_1 - N_1 &= (R_{1x} - N_{1x})\mathbf{x} + (R_{1y} - N_{1y})\mathbf{y} \\ N_2 N_1: N_1 - N_2 &= (N_{1x} - N_{2x})\mathbf{x} + (N_{1y} - N_{2y})\mathbf{y} \end{aligned}$$

式中, $N_1 R_1$ 、 $N_2 N_1$ 分别为位置误差矢量和实际轨迹位置切线矢量。跟踪误差投影到实际轨迹位置的切线向量的长度可表示为

$$E'_N = E_N \cos \theta = |N_1 R_1| \cdot \frac{(N_1 R_1) \cdot (N_2 N_1)}{|N_1 R_1| \cdot |N_2 N_1|} = \frac{(N_1 R_1) \cdot (N_2 N_1)}{|N_2 N_1|} \quad (1)$$

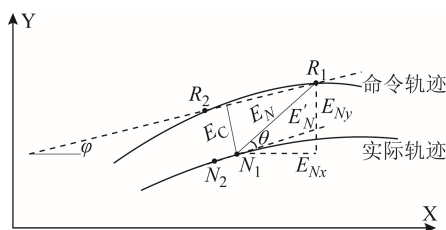


图 4 改进式轮廓误差计算模型

Fig.4 The calculation model of improved contour error

将 E'_N 的大小定义为命令轨迹坐标 R_1 、 R_2 之间的距离, 则

$$E'_N = |R_2 R_1| = |(R_{1x} - R_{2x})\mathbf{x} + (R_{1y} - R_{2y})\mathbf{y}| \quad (2)$$

设 \bar{v} 为 R_1 、 R_2 间的平均速度, Δt 为 R_1 至 R_2 所需时间, 则

$$E'_N = |(\bar{v}_x \cdot \Delta t)\mathbf{x} + (\bar{v}_y \cdot \Delta t)\mathbf{y}| \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (1) 可得

$$\begin{aligned} E'_N &= E_N \cos \theta = |(\bar{v}_x \cdot \Delta t)\mathbf{x} + (\bar{v}_y \cdot \Delta t)\mathbf{y}| \\ &= \sqrt{(\bar{v}_x \cdot \Delta t)^2 + (\bar{v}_y \cdot \Delta t)^2} = \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2} \cdot \Delta t \end{aligned}$$

故 R_2 至 R_1 所需时间 Δt 可表示为

$$\Delta t = \frac{E'_N}{\sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2}} = \frac{E_N \cos \theta}{\sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2}} = \frac{(N_1 R_1) \cdot (N_2 N_1)}{|N_2 N_1| \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2}} \quad (4)$$

式中, $\sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2}$ 为 R_2 至 R_1 间的平均速度, 当规划的进给率为定值或者区间无速度突变时, $\sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2}$ 可等同于进给率。

R_2 空间坐标可表示为

$$\begin{aligned} R_2 &= R_1 - \bar{v} \cdot \Delta t \\ &= \begin{pmatrix} R_{1x} - \bar{v}_x \cdot \Delta t \\ R_{1y} - \bar{v}_y \cdot \Delta t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{1x} - \left(\frac{v_{R1x} + v_{R2x}}{2} \right) \cdot \Delta t \\ R_{1y} - \left(\frac{v_{R1y} + v_{R2y}}{2} \right) \cdot \Delta t \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

因为实际位置 N_1 与直线 $R_2 R_1$ 距离最短, 这表示 N_1 接近于 R_2 , 并且这两个点有共同的目标位置 R_1 , 因此可设

$$v_{N1} \approx v_{R2} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (5) 中, 则 R_2 可表示为

$$R_2 = \begin{pmatrix} R_{2x} \\ R_{2y} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} R_{1x} - \left(\frac{v_{R1x} + v_{N1x}}{2} \right) \cdot \Delta t \\ R_{1y} - \left(\frac{v_{R1y} + v_{N1y}}{2} \right) \cdot \Delta t \end{pmatrix} \quad (7)$$

本节利用 R_1 、 R_2 以及跟踪误差 E_N 的 X 轴与 Y 轴分量来计算改进式轮廓误差 E_C , 如图 4 所示。

$$E_C = -E_{Nx} \sin \varphi + E_{Ny} \cos \varphi \quad (8)$$

$$\varphi = \arctan \frac{R_{2y} - R_{1y}}{R_{2x} - R_{1x}} \quad (9)$$

2 X-Y 平台整合型控制器设计

直线电机驱动 X-Y 平台是由轴向运动方向相互垂直的两台永磁直线同步电机构成的精密加工平台。本文采用整合式的控制策略来实现轮廓控制以提升循迹系统加工精度, 其控制结构可分为直线电机位置 PDF 控制器与切线-轮廓 TCC 补偿控制器两部分。

2.1 永磁直线电机位置 PDF 控制器

基于矢量控制的 PMLSM 直驱式 X-Y 平台的数学模型为^[11-15]

$$\ddot{N}_x = -\frac{B_x}{M_x} \dot{N}_x + \frac{K_{fx}}{M_x} i_{qx} \quad (10)$$

$$\ddot{N}_y = -\frac{B_y}{M_y} \dot{N}_y + \frac{K_{fy}}{M_y} i_{qy} \quad (11)$$

式中, N_i 为直线电机动子的位置输出量; K_{fi} 为推力系数; M_i 为直线电机动子和动子所带负载的总质量; B_i 为粘滞摩擦系数; $i=x, y$ 。

为满足永磁直线电机伺服系统高精度定位的要

求, 本文采用 PDF 控制策略设计位置控制器, PDF 控制又称为伪微分反馈控制, 它比传统的 PID 控制系统具有更快的响应速度和更好的鲁棒性。图 5 为 PDF 控制框图, 其中, K_I 、 K_F 为可调整参数, K_v 为速度回路比例常数, 令 $K_t = K_v K_f$ 。PDF 位置控制系统闭环传递函数为

$$\begin{aligned} \frac{N(s)}{R(s)} &= \frac{\frac{K_I}{s} \cdot \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s}}{1 + \frac{K_I}{s} \cdot \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s} + K_F \frac{K_t}{Ms^2 + (B + K_t)s}} \\ &= \frac{K_I K_t}{Ms^3 + (B + K_t)s^2 + K_F K_t s + K_I K_t} \end{aligned} \quad (12)$$

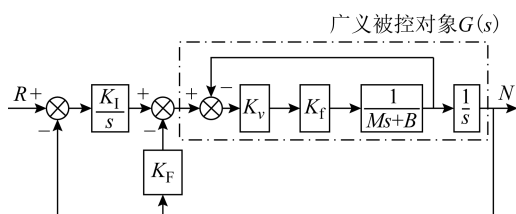


图 5 PDF 控制框图

Fig.5 Block diagram of the PDF control

图 5 中, 可定义广义被控对象的传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{\frac{K_v K_f}{s(Ms + B)}}{1 + \frac{K_v K_f}{Ms + B}} = \frac{K_v K_f}{Ms^2 + (B + K_v K_f)s} \quad (13)$$

2.2 切线-轮廓 TCC 补偿控制器

切线-轮廓补偿控制器先将 X-Y 轴直角坐标系中的跟踪误差值通过坐标变换为切线-轮廓坐标系 (T-C 坐标) 中的切线误差量以及法线误差量, 再分别经独立设计的切线控制器和法线控制器进行补偿, 最后再经坐标逆变换补偿回 X-Y 轴。在此结构下, 切线-轮廓补偿控制器只作为误差补偿量, 并不直接作为主控制器, 如图 6 所示。

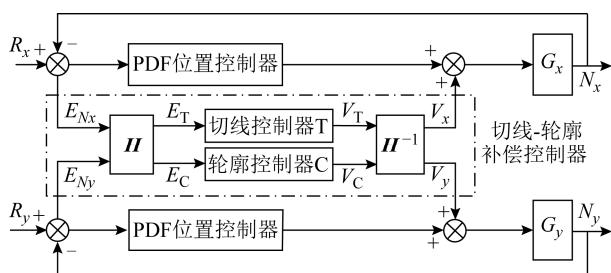


图 6 整合式控制框图

Fig.6 Block diagram of the integrated control

图 6 中, 转换矩阵 H 表示切线-轮廓坐标 (T-C 坐标) 与 X-Y 坐标间的转换关系, 如图 7 所示, 其转换矩阵公式为

$$H = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (14)$$

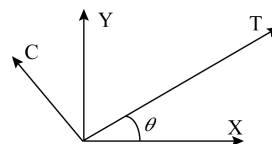


图 7 坐标转换

Fig.7 Coordinate conversion diagram

3 实验验证及分析

为了验证本文所提出的改进式轮廓误差模型的有效性而组建的轮廓跟踪实验系统装置主要由慧摩森 LM22-26 型精密 X-Y 平台两轴直线电机、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 8 所示。



图 8 轮廓跟踪验证系统

Fig.8 Contour tracking verification system

LM22-26 型精密 X-Y 平台两轴直线电机的参数分别为: 直线动子质量 $M_x=5.4$ kg, $M_y=2.8$ kg; X、Y 轴的推力系数分别为 $K_{fx}=10.11$ N/A, $K_{fy}=2.56$ N/A; 粘滞摩擦系数分别为 $B_x=244.319$ 2 Ns/m, $B_y=82.017$ 6 Ns/m。选取 X、Y 轴速度回路控制器参数分别为 $K_{vx}=7.86$, $K_{vy}=5.41$; PDF 位置控制器 X、Y 轴增益分别为 $K_{Fx}=11.5$, $K_{Ix}=7.2$, $K_{Fy}=8.7$, $K_{Iy}=6.0$; 切线-轮廓控制器参数 $T=0.000$ 2, $C=0.000$ 2; 实验命令轨迹采用圆形轨迹 $R=50$ mm, 如图 9 所示。由于目前实验室缺少高精度轮廓仪, 为此只选择圆形轨迹作为循迹跟踪的指令轨迹, 选择命令轨迹为圆形的目的是: 可由命令轨迹的半径、圆心以及实际轨迹位置的坐标通过上位机实时计算出实际轮廓误差。

选择稳态恒定进给率分别为 25 mm/s、100 mm/s, 进行循圆轮廓跟踪实验, 验证在低进给率与高进给

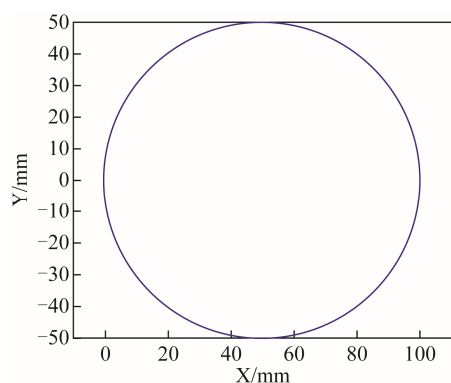


图 9 圆形轮廓轨迹

Fig.9 Circle-shaped contour

率速度条件下,改进式轮廓误差模型的有效性以及等效轮廓误差模型的不足。图 10~图 12 为低速条件下 (25 mm/s) 的循圆轮廓跟踪实验曲线。图 13~图 15 为高速条件下 (100 mm/s) 的循圆轮廓跟踪实验曲线。判断轮廓误差模型是否准确的标准就是看能否有效反映实际轮廓误差。对比图 10~图 12 可知:由于此时的跟踪误差较小,两种轮廓误差模型(图 11 与图 12)都可以有效反映实际轮廓误差(图 10),但相对而言,改进式轮廓误差模型更加有效地反映了实际轮廓误差。对比图 13~图 15 可知:在高速条件下,虽然采用等效轮廓误差模型(图 15)计算得出的轮廓误差值更小,但采用等效轮廓误差

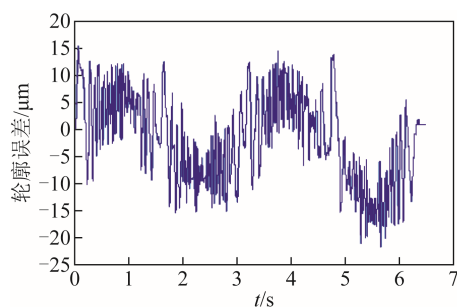


图 10 实际轮廓误差 (一)

Fig.10 Actual contour error (1)

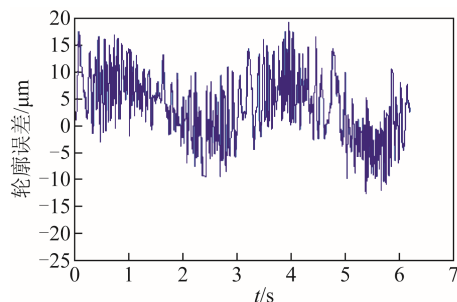


图 11 改进式轮廓误差 (一)

Fig.11 Improved contour error (1)

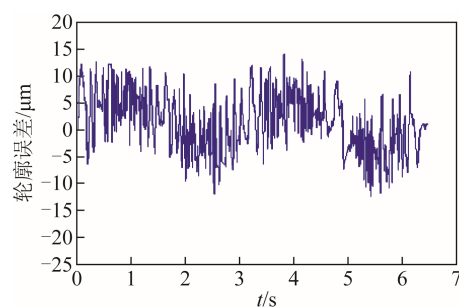


图 12 等效轮廓误差 (一)

Fig.12 Equivalent contour error (1)

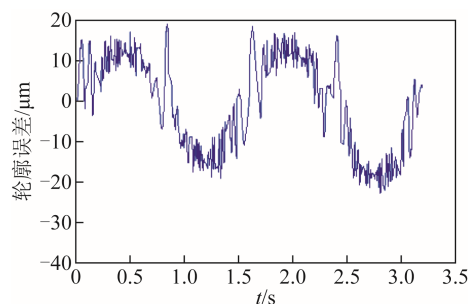


图 13 实际轮廓误差 (二)

Fig.13 Actual contour error (2)

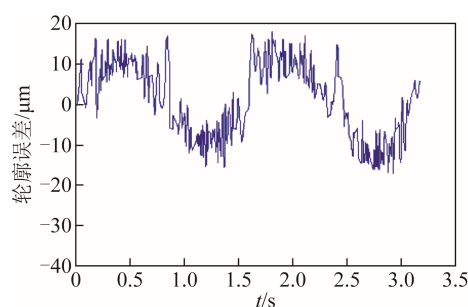


图 14 改进式轮廓误差 (二)

Fig.14 Improved contour error (2)

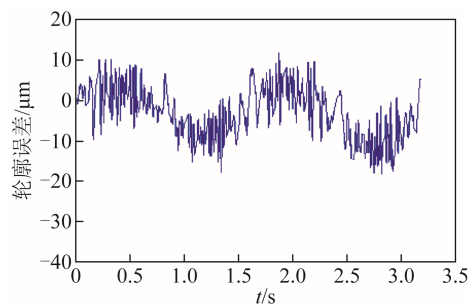


图 15 等效轮廓误差 (二)

Fig.15 Equivalent contour error (2)

模型计算得出的轮廓误差(图 15)已经不能有效反映实际轮廓误差(图 13),并且误差曲线出现了大幅失真的现象,而改进式轮廓误差(图 14)依然可以有效反映真实的轮廓误差(图 13)。由图 11 和

图 14, 图 12 和图 15 可知, 无论是在低速或高速条件下, 改进式轮廓误差与实际轮廓误差的差值均 $\leq \pm 5 \mu\text{m}$, 而等效轮廓误差模型计算得出的轮廓误差与实际轮廓误差的差值 $\leq \pm 10 \mu\text{m}$ 。由图 10 可得, 在低进给率条件下, 循圆系统实际轮廓误差 $\leq \pm 20 \mu\text{m}$; 由图 13 可得, 在高进给率条件下, 循圆系统实际轮廓误差 $\leq \pm 22 \mu\text{m}$; 对比图 11 与图 12, 图 14 与图 15, 改进式轮廓误差模型更能反映真实的轮廓误差。由实验结果可得: 本文所采用的整合式控制结构可以使直驱 X-Y 平台满足高精度轮廓跟踪的要求, 并且所提出的改进式轮廓误差模型可以实时有效的计算出循圆轨迹跟踪系统的轮廓误差。

4 结论

任意曲线的实时轮廓误差计算极其困难, 并且一直缺少一种兼具快速性与准确性的计算模型, 因此本文针对此问题, 提出改进式轮廓误差模型作为自由曲线的轮廓误差计算模型。同时, 为了减少直驱式 X-Y 平台在循迹跟踪过程中产生的轮廓误差, 本文采用了位置 PDF 控制与轮廓补偿 TCC 控制相结合的整合式控制结构。从实验曲线可以得出: 本文提出的改进式轮廓误差模型解决了一般等效切线轮廓误差在高进给率条件下模型不准确的问题, 并且所采用的整合式控制结构可以有效提高 X-Y 平台的加工精度, 在低进给率条件下, 循圆系统实际轮廓误差 $\leq \pm 20 \mu\text{m}$, 在高进给率条件下, 循圆系统实际轮廓误差 $\leq \pm 22 \mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] 郭庆鼎, 王成元. 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.
- [2] Su Ke-Han, Cheng Ming-Yang. Contouring accuracy improvement using cross-coupled control and position error compensator[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(12-13): 1444-1453.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Cheng Ming-Yang, Su Ke-Han. 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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): 4746-4753.
- [13] 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): 4746-4753.
- [14] 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.
- [15] 赵希梅, 武文斌, 朱国昕. 基于扩展卡尔曼滤波器的高速永磁直线同步电机扰动前馈补偿[J]. 电工技术学报, 2018, 33(7): 1516-1524.
- [16] Zhao Ximei, Wu Wenbin, Zhu Guoxin. Disturbance

- feed-forward compensation for high-speed permanent magnet linear synchronous motor based on extended Kalman filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1516-1524.
- [13] 王丽梅, 孙璐, 初升. 基于经验模态分解算法的永磁直线同步电机迭代学习控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 6-14.
Wang Limei, Sun Lu, Chu Sheng. Iterative learning control of permanent magnet linear synchronous motor based on empirical mode decomposition algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 6-14.
- [14] 孟高军, 余海涛, 胡敏强. 一种基于非线性反馈重复控制策略的磁通切换直线电机推力波动抑制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 169-178.
Meng Gaojun, Yu Haitao, Hu Minqiang. Thrust ripple Suppression for linear flux-switching permanent magnet machine based on a repetitive control strategy of nonlinear feedback[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 169-178.
- [15] 张翔, 叶佩青, 张辉. 基于组合继电反馈的永磁同步直线电机推力波动辨识方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 1-9.
Zhang Xiang, Ye Peiqing, Zhang Hui. An identification method of force ripple in permanent magnet synchronous linear motors based on the combined relay apparatus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 1-9.

作者简介

武志涛 男, 1981 年生, 博士, 研究方向为直线电机伺服驱动技术。

E-mail: aswzt@163.com

杨永辉 男, 1971 年生, 教授, 研究方向为机器人通讯与控制。

E-mail: lkdwzt@163.com (通信作者)

(编辑 于玲玲)