

点还是直线到圆的转折点, 相比于传统PID控制, GPCCC算法中转折点处的轮廓误差明显减小, 并能够大大提高轮廓误差的收敛速度. 传统PID控制为三闭环级联控制, 其在拐点时动态响应速度较慢, 导致轮廓误差较大. 本文提出的GPCCC控制策略用GPC取代了传统方法的位置环和速度环, 提高了跟踪的响应速度.

从图5(b)与图5(c)中的 e_x 曲线可以看出, GPC在椭圆框1和椭圆框2内的误差为0, GPCCC在相应的位置误差并不为0. 这是由于GPCCC将轮廓误差反馈来自行修正GPC的给定轨迹, 存在两轴间的协同, 致使牺牲了一部分的单轴跟踪误差来减小平面轮廓误差. 从轮廓误差的局部放大图可以看出, 相比于GPC控制, GPCCC在轮廓误差幅值和收敛速度上均得到了一定的改善.

表2为图5转折点A和B处的轮廓误差 ε/mm 及调节时间 t_s/ms .

表2 轮廓误差动态响应

Table 2 Transient response of contour errors

控制方法	传统PID		GPC		GPCCC	
	ε/mm	t_s/ms	ε/mm	t_s/ms	ε/mm	t_s/ms
点A	0.84	760	0.46	355	0.35	290
点B	0.60	1080	0.36	320	0.25	300

由表2可知, 相对于传统PID控制, GPC算法能够提高系统在转折点处的动态响应速度, 同时也能够缩短轮廓误差的调节时间. 在GPC上加入位置修正模块后, 转折点处的轮廓误差与调节时间得到了进一步的改善. 这说明本文提出的GPCCC控制策略在GPC的基础上加入给定轨迹自修正能够提高轨迹跟踪精度.

相对于冗余的传统三闭环级联控制结构, GPCCC用一个广义预测控制器来替代传统的位置环与速度环PID控制器. 在预测与优化过程中, 构建性能指标的价值函数, 求解最优控制量, 来提高动态响应能力. 位置修正模块根据 ε 对 x, y 轴给定位置进行成比例的修正, 提高轮廓误差收敛速度. 上述改进对数控机床等加工产品的精度以及机器手臂的定位跟踪准确度的提高有一定的现实意义.

4.3 自由曲线跟踪(Free curve tracking)

为验证GPCCC的稳态精度, 本文进行了自由曲线跟踪实验, GPCCC的跟踪轨迹如图6(a)所示, 起始点为O点, 逆时针旋转一周回到O点. 其轮廓误差如图6(b)所示.

由图6可以看出, 在自由曲线跟踪过程中, GPCCC的跟踪效果平滑, 轮廓误差很小并且平稳. GPCCC能够准确地跟踪平滑的自由轨迹, 保证跟踪的稳态精度.

(a) 跟踪轨迹

(b) 轮廓误差

图6 GPCCC自由曲线跟踪

Fig. 6 Free-curve tracking of GPCCC

5 结论(Conclusions)

本文针对双轴联动轨迹跟踪系统, 将广义预测控制(GPC)与交叉耦合控制(CCC)相结合提出广义预测交叉耦合控制(GPCCC). 该策略一方面通过广义预测控制提高轨迹跟踪的稳态精度与拐点处的动态性能, 另一方面根据轮廓误差的大小, 通过交叉耦合对给定轨迹进行修正, 从而提高双轴的协调性能. 本文所提出的控制策略能够满足轨迹跟踪的高精度、高性能的控制要求, 具有良好的使用价值. 为了进一步提高双轴联动系统的工作效率, 接下来的研究会重点考虑轨迹跟踪效率与精度之间的协调.

参考文献(References):

- [1] CHIN S C, LI Y C. Cross-coupling position command shaping control in a multi-axis motion system [J]. *Mechatronics*, 2011, 21(3): 625 – 632.
- [2] SHI T N, LIU H, GENG Q, et al. An improved relative coupling control structure for multi-motor speed synchronous driving system [J]. *IET Electric Power Applications*, 2016, 10(6): 451 – 457.
- [3] CORAPSIZ M F, KOKSAL E. Trajectory tracking control and contouring performance of three-dimensional CNC [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2212 – 2220.
- [4] TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital control [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1987, 109(1): 65 – 68.
- [5] LEE H S, TOMIZUKA M. Robust motion controller design for high accuracy positioning systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996, 43(1): 48 – 55.
- [6] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems [J]. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1980, 102(4): 265 – 272.

- [7] CHEN W, WANG D D, GENG Q, et al. Robust adaptive cross-coupling position control of biaxial motion system [J]. *Science China Technological Sciences*, 2016, 59(4): 680 – 688.
- [8] YAN Qiuzhen, SUN Mingxuan. Error trajectory tracking by robust learning control for nonlinear systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(1): 23 – 30.
(严求真, 孙明轩. 一类非线性系统的误差轨迹跟踪鲁棒学习控制算法 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(1): 23 – 30.)
- [9] WANG L M, JIN F Y, SUN Y B. 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.
- [10] CHIN S C, LI Y C. Robust cross-coupling synchronous control by shaping position commands in multi-axes system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(12): 4761 – 4773.
- [11] LIE T, LANDERS R G. Predictive contour control with adaptive feed rate [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(4): 669 – 679.
- [12] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control: Part I and Part II [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 137 – 160.
- [13] ZHAO Ximei, ZHAO Jiuwei, LI Hongyi. Robust tracking control for direct drive XY table based on GPC and DOB [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(6): 150 – 154.
(赵希梅, 赵久威, 李洪谊. 基于GPC和DOB的直驱XY平台鲁棒跟踪控制 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 150 – 154.)
- [14] BELDA K, VOŠMIK D. Explicit generalized predictive control of speed and position of PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 3889 – 3896.
- [15] YEH S S, HSU P L. Estimation of the contouring error vector for the cross-coupled control design [J]. *Mechatronics*, 2002, 7(1): 44 – 51.

作者简介:

陈 炜 (1977–), 男, 硕士生导师, 研究方向为电机系统及其控制, E-mail: chen_wei@tju.edu.cn;

刘 旭 (1993–), 男, 硕士研究生, 研究方向为多电机智能控制, E-mail: liu_xu@tju.edu.cn;

史婷娜 (1969–), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机系统及其控制, E-mail: tnshi@tju.edu.cn;

夏长亮 (1968–), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机系统及其控制, E-mail: motor@tju.edu.cn.