

通过直线伺服鲁棒跟踪控制方法提高轮廓加工精度*

赵希梅¹ 郭庆鼎¹ 陈冬兰²

(1. 沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110023;

2. 沈阳第一机床厂车床研究所 沈阳 110025)

摘要: 为了减小零件加工的轮廓误差, 提出了一种采用直线伺服驱动的零相位跟踪控制器(ZPETC)和干扰观测器(DOB)相结合的鲁棒跟踪控制策略。零相位误差跟踪控制器作为前馈跟踪控制器, 提高了快速性, 使系统实现准确跟踪; 基于干扰观测器的鲁棒反馈控制器补偿了外部扰动、未建模动态、系统参数变化和机械非线性等不确定因素, 并根据预测到的干扰信息对各轴进行补偿以消除干扰对系统的影响, 从而保证了系统的强鲁棒性能。仿真结果表明所提出的控制方案是有效的, 既能实现完好跟踪, 又有较强的鲁棒性能, 从而提高了轮廓加工精度。

关键词: 干扰观测器 直线伺服 零相位跟踪控制 跟随控制 轮廓控制

中图分类号: TP273 TM383.42

0 前言

随着复杂型面零件加工精度不断提高的需要, 机床进给系统的轮廓跟踪精度已成为其重要的精度指标之一^[1]。就 CNC 系统来讲, 其轮廓加工轨迹是多轴协调运动的合成结果, 轮廓精度的提高涉及到机床每个进给轴动态特性和参数匹配, 并对各单轴进给驱动系统要求反应快、运动控制精度高、响应频带宽、扰动抑制能力强和对对象参数变化的强鲁棒性, 以取得尽可能小的跟随误差, 进而提高轮廓加工精度。

在 CNC 轮廓加工中, 一般采用常规 P 或 PD 型控制器, 它对各坐标轴的参数匹配有严格的限制。同时由于切削力、导轨非线性摩擦力和系统模型摄动等影响, 都可能严重地降低整个闭环系统的控制性能。一些研究指出^[2-3], 只要跟随控制算法能保证系统有足够的带宽、干扰抑制能力及鲁棒性, 就可以满足轮廓运动的精度要求。通过减小单轴的跟踪误差来提高轮廓加工精度, 本课题正是基于这种认识, 来研究减小轮廓误差的。

常规的跟随控制算法靠提高增益来拓宽频响带宽, 但其可能导致受激系统产生非建模特性, 甚至系统振荡, 因而提高增益受到限制。TOMIZUKA^[4-6]提出了 ZPETC 算法, 该算法基于系统的逆来设计, 使得输出与输入在所有频率上的相位差为零, 增益

为 1。尽管采用 ZPETC 可以大大减小跟随误差, 但由于这种前馈控制是开环的, 它对对象模型的摄动非常敏感, 并且会放大指令信号的高频成分或拾取杂散噪声, 产生高频干扰, 这是不希望出现的。由于 DOB 通常建立在闭环系统的内部, 可大大提高干扰抑制能力及系统的鲁棒性, 弥补 ZPETC 对扰动敏感的缺点。因此结合数控机床轮廓运动控制的特点, 提出了 ZPETC 和 DOB 相结合的控制方案。

1 轮廓误差模型及减小途径

1.1 轮廓误差的模型

轮廓误差是在多轴联动时, 由各个单轴的位置误差耦合产生的。因此, 系统运行时, 各个单轴受到任何的负载扰动或参数不匹配都可能影响轮廓误差。以两轴联动系统为研究对象, 其轮廓误差模型如图 1 所示。

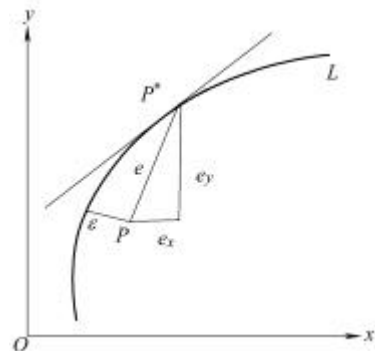


图 1 轮廓误差模型

图 1 中, L 为轮廓曲线, P 为实际位置, P^* 为

* 国家自然科学基金资助项目(50075057)。20050613 收到初稿, 20051220 收到修改稿

参考位置， e 为跟踪误差，即刀具的实际位置与指定位置之间的差距，跟踪误差沿机床各坐标轴上的分量用 e_x 、 e_y 表示； e 为轮廓误差，即刀具的实际位置到参考轨迹的最短距离。

1.2 减小轮廓误差的途径

目前，减小轮廓误差通常采用两种途径，一种是减小跟随误差，即间接减小轮廓误差；另一种为直接减小轮廓误差。通过各轴跟随控制着重减小跟随误差，从而间接地减小轮廓误差。用于直接减小轮廓误差的轮廓控制算法则首先计算或估计出轮廓误差的大小，然后对各坐标运动轴进行协调控制。但其要求各轴进行交叉耦合控制，且其控制器是非线性时变的，因此难以得到理想实用的控制算法。本项目是采用永磁同步电动机直线伺服系统，通过减小跟随误差的方法来间接地减小轮廓误差的。永磁直线同步电动机的数学模型见参考文献[1]。

2 鲁棒跟踪控制系统的设计

为了保证系统具有良好的快速动态跟踪性能，引入 ZPETC 方法设计前馈跟踪控制器，而利用 PD 控制器作为反馈控制器，来保证系统的稳定性，同时引入 DOB 来补偿外部扰动和对象的不确定性等因素。ZPETC 虽然可以使系统得到很好的跟踪性能，但由于它是开环控制，其特性依赖对象模型的准确性。因此通常首先应对被控对象进行闭环控制，从而在一定程度上减小对 ZPETC 特性产生的影响。但在数控机床高性能轮廓控制系统中通常存在机械非线性、摩擦及惯量变化等可能引起模型参数的变化。此时采用传统的 PID 调节器已经不能满足要求。为此，采用基于干扰观测器的鲁棒控制，它可以在闭环调节的基础上，进一步减小各种干扰和系统参数变化对系统的影响，使其在所要求的低频段逼近对象名义模型。在此基础上再采用 ZPETC 进行前馈补偿，使其相位差为零，幅值接近 1。这里将电动机、速度环和电流环三者作为被控对象，基于干扰观测器的零相位鲁棒跟踪控制框图如图 2 所示。

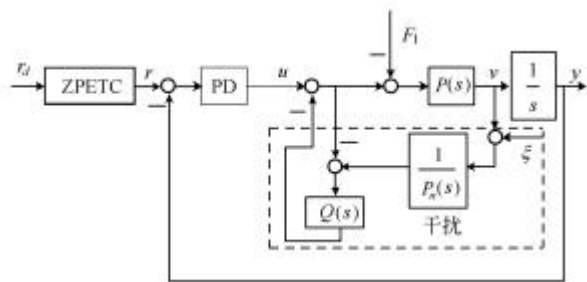


图 2 基于干扰观测器的零相位鲁棒跟踪控制框图

2.1 零相位误差跟踪控制

数控机床进给伺服系统的设计中，采用前馈控制可以大大拓宽系统的频带，提高其跟随性能。ZPETC 的设计是为了提高运动控制的跟踪精度，TOMIZUKA 提出的 ZPETC^[2]，其基本思想是基于零极点对消。而且，针对那些具有不稳定零点的系统抵消掉不稳定零点之后，ZPETC 还可以补偿这些零点产生的相位移，以便获得零相位误差。

下面将针对包含不可对消零点的系统来设计 ZPETC。考虑如下离散闭环传递函数

$$G_{cl}(z^{-1}) = \frac{y(k)}{r(k)} = \frac{z^{-d} B_c^a(z^{-1}) B_c^u(z^{-1})}{A_c(z^{-1})} \quad (1)$$

式中， z^{-d} 为闭环系统所造成的 d 步延迟， $B_c^a(z^{-1})$ 表示可接受的部分，即稳定的零点多项式。 $B_c^u(z^{-1})$ 表示不可接受的部分，即不稳定的零点多项式。

所设计的 ZPETC 如图 3 及式(2)所示。

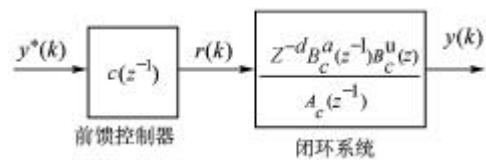


图 3 零相位误差跟踪控制器

$$c(z^{-1}) = \frac{r(k)}{y^*(k)} = \frac{z^d A_c(z^{-1}) B_c^u(z)}{B_c^a(z^{-1}) [B_c^u(1)]^2} \quad (2)$$

所以由 $y^*(k)$ 到 $y(k)$ 的传递函数为

$$\frac{y(k)}{y^*(k)} = \frac{B_c^u(z) B_c^u(z^{-1})}{[B_c^u(1)]^2} \quad (3)$$

当 $z = \exp(j\omega T)$ 时，输入指令与输出响应之间不存在相位差，可达到零相位跟踪控制。当 $\omega \rightarrow 0$ 时， $z \rightarrow 1$ 。所以系统在甚低频时，使得 $y(k) \rightarrow y^*(k)$ 。式(3)的相位差在整个频域内趋近于零，在一定频带内其幅值接近 1。证明如下

$$z = \exp(j\omega T) \quad \exp(j\omega T) = \cos(\omega T) + j \sin(\omega T)$$

$$\frac{B_c^u(\exp(j\omega T))}{B_c^u(1)} = R_e(\omega) - j I_m(\omega)$$

式中 $B_c^u(z^{-1}) = b_{c0}^u + b_{c1}^u z^{-1} + L + b_{cs}^u z^{-s}$

$$R_e(\omega) = \frac{b_{c0}^u + b_{c1}^u \cos(\omega T) + L + b_{cs}^u \cos(s\omega T)}{b_{c0}^u + b_{c1}^u + L + b_{cs}^u}$$

$$I_m(\omega) = \frac{b_{c0}^u + b_{c1}^u \sin(\omega T) + L + b_{cs}^u \sin(s\omega T)}{b_{c0}^u + b_{c1}^u + L + b_{cs}^u}$$

于是得到在频域内的表达式

$$[B_c^u(z^{-1})/B_c^u(1)][B_c^u(z)/B_c^u(1)] = [R_e(w) - jI_m(w)][R_e(w) + jI_m(w)] = R_e(w)^2 + I_m(w)^2$$

由上式可见，式(3)所表示的输入输出间传递函数无虚部，即在所有频率处均无相位差，且在 $w = 0$ 时，即静态时其增益为 1，而在低频段，其增益接近于 1。

2.2 干扰观测器设计

干扰形式具有多变化、不确定及随机性，因此无法预见和直接测量，最终影响到对象模型。而干扰观测器不需要对干扰信号建立准确的数学模型，而且它本身的结构也非常的简单，因此在预测干扰信号时避免了大量的数学计算，能够很好地满足实时需要。在系统设计时，干扰观测器能将系统不确定性视为系统干扰，并对干扰进行有效地估测和补偿，在一定的误差内可以将实际模型用其参考模型来等价。干扰观测器的控制结构如图 4 所示。

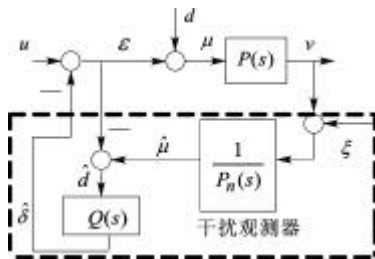


图 4 干扰观测器结构图

u ——速度环的给定输入信号 d ——系统的外部干扰
 \hat{d} ——干扰的估计量 x ——测量噪声 $P(s)$ ——实际对象的传递函数
 $P_n(s)$ ——标称对象的传递函数 $Q(s)$ ——低通滤波器

为了说明 DOB 的作用，令 $Q(s) = 1$ ，根据图 4 可推导出

$$\hat{d} = \hat{d} = \left(1 - \frac{P_n}{P}\right)u + \frac{1}{P}x + d \quad (4)$$

速度 v 可表示为

$$v = P(u - \hat{d} + d) = P_n u - x \quad (5)$$

从式(5)可知，若能够消除测量噪声的影响，则输出速度与输入指令之间的关系将成为标称对象。式(5)表明如果 $Q(s) = 1$ ，干扰观测器不能实现，表明 $1/P_n(s)$ 不可独立实现，因此必须适当设计 $Q(s)$ ，并使得 $Q(s)/P_n(s)$ 可以实现，也就是 $Q(s)$ 的相对阶数等于或大于 $P_n(s)$ 的相对阶数，其次， $Q(s)$ 必须能消除测量误差的影响。根据图 4，速度 v 可表示为

$$v = G_{uv}(s)u + G_{dv}(s)d + G_{xv}(s)x \quad (6)$$

式中 $G_{uv} = \frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q}$

$$G_{dv} = \frac{PP_n(1-Q)}{P_n + (P - P_n)Q}$$

$$G_{xv} = -\frac{PQ}{P_n + (P - P_n)Q}$$

如果 $Q(s) \sim 1$ ，上面三个传递函数为 $G_{uv} \sim P_n$ ， $G_{dv} \sim 0$ ， $G_{xv} \sim -1$ ，可见式(5)近似成立。这表明干扰观测器可以使实际对象表现为标称对象，这为控制系统提供了较强的鲁棒性。如果 $Q(s) \sim 0$ ，那么 $G_{uv} \sim P$ ， $G_{dv} \sim P$ ， $G_{xv} \sim 0$ ，这样观测了速度环的开环动态。因此，对于扰动抑制和模型不确定性，要合理选择 $Q(s)$ ， $Q(s)$ 的低频动态要接近于 1，高频动态必须接近于 0。因此 $Q(s)$ 的相对阶数等于或大于 $P_n(s)$ 的相对阶，采用三阶低通滤波器来满足上述特性

$$Q(s) = \frac{3ts + 1}{(ts)^3 + 3(ts)^2 + 3ts + 1} \quad (7)$$

选择不同的 t 值，对应 $Q(s)$ 不同的截止频率。

由此可见，DOB 的性能很大程度上取决于滤波器 $Q(s)$ 的设计，DOB 设计的要点是确定 $Q(s)$ 的阶次、相对阶和带宽^[7]。 $Q(s)$ 的相对阶应不小于名义模型的传递函数的相对阶，其带宽要考虑鲁棒性和干扰抑制能力的折衷， $Q(s)$ 的频带越宽，系统干扰抑制能力越强，但系统的鲁棒性会变差。

3 仿真结果及其分析

系统的标称对象 $P_n(s) = 1/(0.01s + 0.2)$ ， $K_f = 28.5 \text{ N/A}$ ；PD 控制器参数最佳选择为 $K_p = 5.2$ ， $K_d = 0.13$ ；滤波器 $Q(s)$ 设计中选择 $t = 0.001$ ；采样周期为 0.1 ms ，输入给定为 $r = 10\sin 10t \text{ (mm)}$ 时，分别对反馈控制、反馈+ZPETC 和反馈+ZPETC+DOB 三种控制策略下进行仿真，位置跟踪误差曲线分别如图 5~7 所示。

通过对三种控制策略的位置跟踪误差曲线对比，可以看出在相同的频带下，采用反馈+ZPETC+DOB 的控制策略的位置跟踪定位精度高，跟踪性能

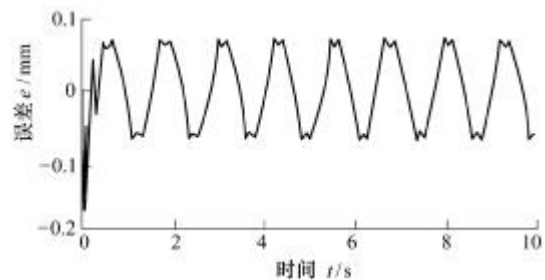


图 5 反馈控制的位置跟踪误差曲线

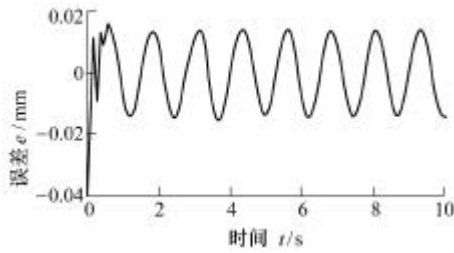


图6 反馈+ZPETC的位置跟踪误差曲线

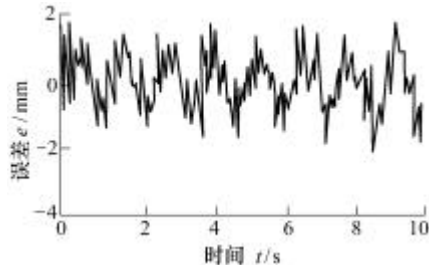


图7 反馈+ZPETC+DOB的位置跟踪误差曲线

好, 抗扰能力强, 从而能够在较好地抑制系统所受干扰的同时, 有效地减小轮廓误差。

4 结论

为了减小零件加工的轮廓误差, 针对直线伺服驱动系统首先提出了基于干扰观测器的零相位鲁棒跟踪控制策略。ZPETC保证了伺服系统的快速性, 使系统实现准确跟踪; 而基于DOB的反馈控制克服了内外部扰动等不确定性, 保证系统的抗扰性和跟踪精度。仿真结果表明: 该控制方案具有很好的快速跟踪性能和鲁棒性能。此控制方法可以有效地减小单轴的跟踪误差, 从而提高轮廓加工精度。

参 考 文 献

- [1] 郭庆鼎, 王成元, 周美文, 等. 直线交流伺服系统精密控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] TARNG Y S, CHUANG H Y, HSU W T. Intelligent cross-coupled fuzzy federate controller design for CNC machine tools based on genetic algorithm[J]. International Journal of Machine Tools Manufacture, 1999, 39(10): 1 673-1 691.
- [3] LO C C, CHUNG C Y. Tangential-contouring controller for biaxial motion control[J]. Trans. ASME, J. Dyn. Syst., Meas. Control, 1999, 121(3): 126-129.
- [4] TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital control[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1987, 109(3): 65-68.
- [5] YEH S S, HSU P L. An optimal and adaptive design of the feedforward motion controller[J]. IEEE/ASME Transactions, 1999, 4(4): 428-439.

- [6] XIA J Z, MENQ C H. Precision tracking control of non-minimum phase systems with zero phase error[J]. International Journal of Control, 1995, 61(4): 791-807.
- [7] KEMPF C J, KOBAYASHI S. Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(5): 513-527.

IMPROVING CONTOUR MACHINING PRECISION BY THE LINEAR SERVO ROBUST TRACKING CONTROL

ZHAO Ximei¹ GUO Qingding¹ CHEN Donglan²
 (1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023;
 2. Tuning Machine Institute, Shenyang First Machining Tool Company, Shenyang 110025)

Abstract : To reduce the contour error of the part machine, for the linear servo drive system, a robust tracking control strategy based on combining zero phase error tracking control (ZPETC) with the disturbance observer (DOB) is proposed. The zero phase error tracking controller is designed to ensure that the system has fast tracking performance and implements exactly tracking; while the DOB can overcome the influences of the uncertainties of the parameters perturbation, the external load disturbances, unmodelled dynamic and mechanical nonlinearity etc. DOB can compensate for each axis according to predicted disturbance information to eliminate the influences of the disturbance to the system, thus the stability and robustness of the system are obtained. The simulation results show that the control scheme not only can enhance the fast tracking performance in the linear servo system, but also has a strong robustness to parametric variations and resistance disturbances. Therefore the contour error is reduced effectively, and the precision of the contour machining is improved greatly.

Key words : Disturbance observer Linear servo

Zero phase error tracking control

Tracking control Contouring control

作者简介: 赵希梅, 女, 1979年出生, 博士研究生。主要研究方向为直线伺服、数控和鲁棒控制等。

E-mail: zhaoximei79@yahoo.com.cn

郭庆鼎, 男, 1939年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数控、交流伺服和智能控制等。