

轨迹误差建模的多轴联动机床轮廓误差补偿技术

李学伟, 赵万华, 卢秉恒

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了提高数控机床多轴联动加工精度,减小由传动机构和运动部件质量、刚度、阻尼及摩擦等因素造成的轮廓误差,针对交叉耦合控制参数难以选择及容易使系统不稳定的问题,提出了一种针对多轴联动机床进行运动轨迹误差建模和补偿的方法.该方法通过测量机床的典型实际联动轨迹,来建立轮廓误差模型,实现了加工过程轮廓误差的实时估算和补偿.通过对 x 、 y 轴工作台的联动轮廓误差建模和补偿实验,证明此方法可以显著减小圆弧及曲率连续变化曲线轨迹的加工误差,从而提高了在高速条件下的数控机床多轴联动的加工精度.

关键词: 轮廓误差;交叉耦合;误差补偿;多轴联动

中图分类号: TP273.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)03-0047-06

Contour Error Compensation Strategy for Multi-Axis Machining by Trajectory Error Modeling

LI Xuewei, ZHAO Wanhua, LU Bingheng

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the machining precision of multi-axis machine tools, diminish its contour error caused by various factors of the transmission mechanism, such as mass, rigidity, damp and friction, and aiming at the difficulty of parameter identification in the cross-coupled control method and the induced system instability, a novel error modeling and compensation strategy for multi-axis machine tools is proposed. The contour error model is established by measuring several contour errors of typical trajectory, and the contour error can be calculated and compensated by the error model during machining process. The new compensation strategy is implemented on a x 、 y table, which shows that the new approach enables to significantly reduce the contour error of circle and trajectory with continual curvature and improve the multi-axis machining precision, especially for high speed machining.

Keywords: contour error; cross coupled control; error compensation; multi-axis machining

高速机床以其高效率、高精度加工的优势,越来越多的受到航空、航天、汽车、模具等加工行业的重视.但是,随着机床加工进给速度的提高,机械传动系统的固有频率限制了进给系统的响应速度,使得机床伺服进给系统无法实时跟随系统变化的输入指令,因此导致多轴联动加工时产生轮廓误差,特别是在高速、高加速度的加工中,这一问题尤为突出^[1].

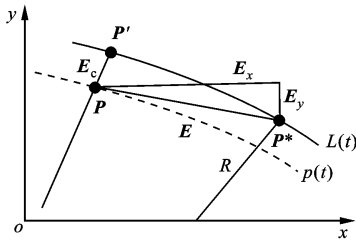
针对高速加工中轮廓误差突出的问题,近年来一些学者进行了大量研究,这些研究主要通过 2 种途径来提高多轴机床的联动加工精度.一种是跟随误差控制方法,其主要采取的是零相位误差跟随控制^[2-7],此方法是建立在运动控制模型的基础上,能够有效提高单轴的控制精度.由于实际机床进给系统复杂,模型难于获得,因此该方法容易使系统不稳

定,产生振荡.另一种是轮廓误差控制方法^[8-13].1980年 Koren 提出了交叉耦合控制方法,通过比较各联动轴的反馈值与指令值,实时估算联动轮廓误差,再将误差分配到各联动轴,从而实现了实时轮廓误差的补偿.交叉耦合控制方法在允许存在各轴跟随误差的同时,将各轴之间进行协调控制,达到了减小轮廓误差的目的,有效地提高了联动精度.对于圆弧和自由轨迹的误差则难以直接计算获得,而是由反馈和指令实时近似估算,通过调节各轴的补偿增益进行补偿,但增益太小补偿效果却不明显,增益太大则使系统不稳定,产生振荡^[1,13].

本文在分析了交叉耦合控制方法对轮廓误差的补偿效果以及影响补偿效果原因的基础上,提出了一种通过测量轨迹误差来建立机床联动轮廓误差模型,并进行实时计算和补偿的方法.

1 机床联动加工轨迹误差

机床在实际加工中,由于进给传动系统惯性、摩擦、刚度、阻尼等因素的存在,导致进给系统实际输出与指令之间存在跟随误差,各运动轴的跟随误差随不同运动状态而不同,因此在多轴联动时会产生轮廓误差,如图1所示.



$L(t)$:指令轨迹; $p(t)$:实际轨迹; P^* :指令位置向量; P :实际位置向量; P' :距实际位置最近的向量点; E :跟随误差向量; E_x 、 E_y : x 、 y 轴的跟随误差向量; E_c :轮廓误差向量; R :曲率半径

图1 轮廓误差与跟随误差

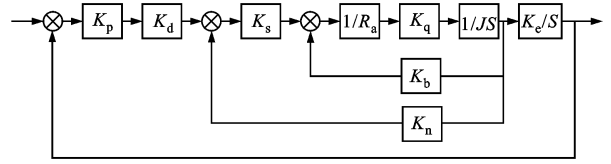
如图2所示,为了便于对轮廓误差的形成进行解释和计算,将机床伺服进给系统简化成二阶模型,而速度环控制模型简化为

$$W(S) = \frac{K_m}{\tau S + 1} \quad (1)$$

$$K_m = \frac{K_s}{K_b + K_s K_n}; \quad \tau = \frac{J R_a}{K_q (K_b + K_s K_n)} \quad (2)$$

式中: K_m 为单位电压对应的电机转速; τ 为时间常数.位置控制开环的传递函数为

$$G_k = K/[S(\tau S + 1)]$$



K_p :控制器的位置增益; K_d :数模转换系数; K_e :位置编码器的脉冲数; K_n :速度反馈系数; K_s :速度调节器增益; K_b :反电动势常数; R_a :电枢回路电阻; K_q :电力矩常数; J :转动惯量; S :微分算子

图2 机床伺服进给系统的简化模型

$$K = K_p K_d K_m K_e$$

式中: K 为位置闭环控制的开环增益.将系统的闭环传递函数简化为二阶模型,则有

$$G(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{1}{2}(K\tau)^{-1/2}; \quad \omega_n = (K/\tau)^{1/2}$$

在 x 、 y 轴联动圆弧轮廓加工中, x 、 y 轴的输入分别为

$$x_i(t) = R \cos(\omega t); \quad y_i(t) = R \sin(\omega t)$$

其稳态输出分别为

$$x_o(t) = R_x \cos(\omega t - \phi_x) \quad (4)$$

$$y_o(t) = R_y \sin(\omega t - \phi_y) \quad (5)$$

$$R_x = \frac{\omega_{nx}^2}{[(\omega_{nx}^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_x \omega_{nx} \omega)^2]^{1/2}} R$$

$$R_y = \frac{\omega_{ny}^2}{[(\omega_{ny}^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_y \omega_{ny} \omega)^2]^{1/2}} R$$

$$\tan \phi_x = \frac{2\xi_x \omega_{nx} \omega}{\omega_{nx}^2 - \omega^2}; \quad \tan \phi_y = \frac{2\xi_y \omega_{ny} \omega}{\omega_{ny}^2 - \omega^2}$$

式中: R_x 、 R_y 为 x 、 y 轴的输出幅值; ϕ_x 、 ϕ_y 为 x 、 y 轴的滞后相位; ω_{nx} 、 ω_{ny} 为 x 、 y 轴的固有频率; ξ_x 、 ξ_y 为 x 、 y 轴的阻尼比; ω 为输入指令轨迹的角速度.

输出轨迹方程为

$$R_y^2 x^2 + R_x^2 y^2 - 2R_x R_y \sin(\phi_x - \phi_y) xy = R_x^2 R_y^2 \cos^2(\phi_x - \phi_y) \quad (6)$$

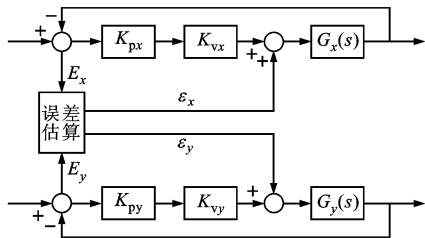
当 $\xi_x = \xi_y = \xi$ 、 $\omega_{nx} = \omega_{ny} = \omega_n$ 、 $\phi_x = \phi_y$ 时,式(6)可简化为

$$x^2 + y^2 = \frac{R^2}{1 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 - 2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^4} = R'^2 \quad (7)$$

从式(7)可以看出,当 x 、 y 轴参数相等时,实际稳态运动轨迹仍为圆,但圆的半径则存在误差,其数值的大小与简化系统阻尼、固有频率及角速度有关.

2 交叉耦合控制

交叉耦合控制方法是在各联动轴分别进行比例微积分(PID)闭环控制的基础上增加了交叉耦合控制器,主要包括:①根据反馈位置和速度进行轮廓误差估计;②进行误差分配补偿,如图3所示。



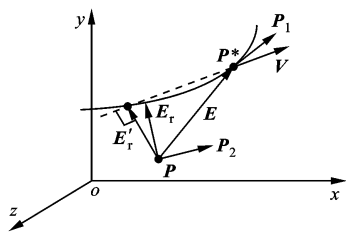
K_{px} 、 K_{py} : x 、 y 轴的位置环增益; K_{vx} 、 K_{vy} : x 、 y 轴的速度增益;

$G_x(s)$ 、 $G_y(s)$: x 、 y 轴机械部分传递函数;

ϵ_x 、 ϵ_y : x 、 y 轴的误差补偿分量

图3 交叉耦合控制框图

机床加工指令一般由直线段、圆弧和自由曲线构成,对于直线轨迹,通过调节运动控制参数达到匹配后,实际的机床输出位置与输入之间存在滞后,但不存在轮廓误差^[14]。机床联动加工曲线轨迹的轮廓误差如图4所示。



P_1 、 P_2 、 P^* 、 P 处的速度向量; E_r : 轮廓误差向量; E'_r : 估算轮廓误差向量; V : 实际和指令速度向量的平均单位向量

图4 曲线轨迹的轮廓误差

对于加工曲线轨迹,跟随误差向量

$$E = P^* - P$$

实际加工时,由于 E_r 难以计算,一般取近似值

$$E_r \approx E'_r = -EVV = E - EVV \quad (8)$$

$$V = (P_1 + P_2) / |P_1 + P_2| \quad (9)$$

对于 x 、 y 轴联动轨迹加工,式(9)可写成

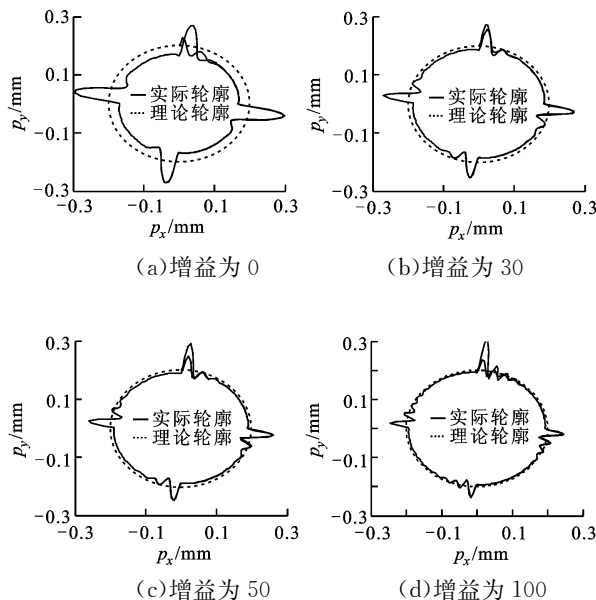
$$E'_r = \begin{bmatrix} \epsilon'_{rx} \\ \epsilon'_{ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x - (E_x V_x + E_y V_y) V_x \\ E_y - (E_x V_x + E_y V_y) V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_y (E_x V_y - E_y V_x) \\ -V_x (E_x V_y - E_y V_x) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: ϵ'_{rx} 、 ϵ'_{ry} 为轮廓误差在 x 、 y 轴上的分量; V_x 、 V_y 为速度向量的平均单位向量在 x 、 y 轴上的分量。

由式(9)、(10)可知,若近似实时估算当前的轮

廓误差,需要实时获取理论位置和实际位置坐标、理论速度和实际速度向量,这些数据均可通过实时读取指令数据和反馈数据获得。交叉耦合系统是一个多输入多输出的系统,实际速度和实际位置受机械系统性能影响显著,特别是摩擦和振荡容易导致轮廓误差估算错误。为了提高系统对补偿量的响应速度,必须选择增益系数,但增益选择不当会直接影响补偿效果和系统的稳定性。

从图5可以看出,交叉耦合控制系统通过调节增益系数可以调节轮廓补偿效果。当增益系数选择较小时,补偿效果不明显,但增益过大会使系统产生振荡。由于正反向非线性摩擦的影响,当运动轴越过象限位置时,会导致轮廓误差估算错误,使运动轴产生强烈振荡。



p_x 、 p_y : 分别表示机床在 x 、 y 轴上的位移

图5 不同增益的交叉耦合控制效果

综上所述,本文提出了一种通过典型轨迹测量建立的机床运动控制误差模型,通过仿真和实验证明,根据输入指令、计算联动误差进行实时补偿的方法,可以显著提高 x 、 y 轴联动的加工精度,而且不会造成由增益选择不当而产生的效果不明显或振荡的问题。

3 联动轨迹误差建模的补偿方法

3.1 建立误差模型

由式(7)可知,当简化二阶模型中的 ω_n 、 ξ 确定后,根据指令半径和速度(角速度)可以计算出半径误差的大小,但是实际系统中的阻尼比和固有频率受机械系统刚度、阻尼、惯性以及控制器参数等因素

的影响,所以难于准确获取.本文采用实验的方法获取系统阻尼比 ξ 和固有频率 ω_n .

为了获取较好的补偿效果,在机床常用加工速度的范围内,给数控机床输入不同速度 v_i 和半径为 r_i 的圆弧指令,测量实际加工轨迹的平均半径 r'_i ,再根据式(7)可以得到

$$\sum (r_i^2 - r_i'^2) = \sum \left(1 - \frac{1}{1 + (2\xi\omega_i/\omega_n)^2 - 2(\omega_i/\omega_n)^2 + (\omega_i/\omega_n)^4} \right) r_i^2 \quad (11)$$

$$\omega_i = v_i / r_i$$

当 ω_n 、 ξ 为初始值时,边界搜索计算式中的 ω_n 、 ξ ,将作为 x 、 y 轴联动系统的固有频率和阻尼比参数. ξ 、 ω_n 在不同加工条件下会略有不同,是在综合考虑不同加工条件下的实际误差后获得的.由此建立的误差模型能够反应不同速度、不同半径加工条件与实际半径误差 δ_r 的关系

$$\delta_r = r_i \left(1 - (1 + 2\xi(\frac{\omega}{\omega_n})^2 - 2(\frac{\omega}{\omega_n})^2 + (\frac{\omega}{\omega_n})^4)^{1/2} \right) \quad (12)$$

3.2 轮廓误差的补偿

通过对数控指令进行加、减速处理和插补后得到一系列位置坐标序列,每个插补周期向伺服控制系统发出一个位置坐标,通过比较反馈值与位置坐标的差,实现运动轴的跟随控制.为了实现联动加工误差的实时估算和补偿,根据建立的联动误差模型和系统输入的指令(速度和半径)可以对误差进行实时计算和补偿,如图6所示.

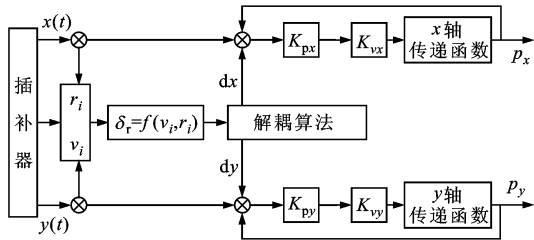


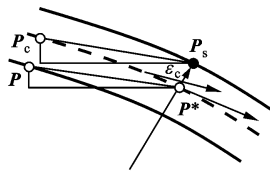
图6 轮廓误差补偿框图

轮廓误差的估算结果需要分配到各联动轴进行补偿,对于 x 、 y 轴联动的圆弧运动,因其联动误差表现在半径轮廓上,因此补偿值也需要根据当前轨迹的法向进行补偿,如图7所示.

根据误差模型计算的误差补偿量

$$\epsilon_c = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \delta_r \mathbf{V}_c \quad (13)$$

假设第 n 个插补周期 T 的切向速度为 $\mathbf{V}_n(v_{xm}, v_{ym})$,



$\mathbf{P}$:补偿后实际位置向量; $\mathbf{P}_c$:补偿后的指令位置向量; ϵ_c :误差补偿量

图7 圆弧轨迹的轮廓误差补偿原理

其法向向量有 $\mathbf{M}_1(-v_{ym}, v_{xm})$ 和 $\mathbf{M}_2(v_{ym}, -v_{xm})$,为了确定它们的外法向量,引入当前插补周期内的加速度向量

$\mathbf{a}(a_{xm}, a_{ym}) = (\mathbf{V}_n(v_{xm}, v_{ym}) - \mathbf{V}_{n-1}(v_{xm-1}, v_{ym-1}))/T$ 其中 $v_{n-1}(v_{xm-1}, v_{ym-1})$ 为数控系统插补周期加工轨迹的切向速度,如果 $\mathbf{a}\mathbf{M}_1 \geq 0$,则 $\mathbf{M}_1$ 为轨迹曲线在该点处的内法向量, $\mathbf{M}_2$ 为其外法向量.此时

$$\mathbf{V}_c = \mathbf{M}_2 / \|\mathbf{M}_2\|$$

4 实验与结果

为了验证本文提出的联动误差补偿方法的可行性,在搭建的三轴立铣机床上进行 x 、 y 轴联动圆弧轨迹加工实验,实验台采用PA开放式数控系统,可以实时读取、修改和写入指令,以及反馈中的速度、位置数据.实验分为建立误差模型和误差实时补偿,补偿流程图如图8所示.

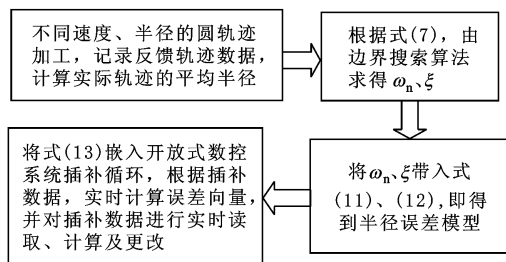


图8 x 、 y 轴联动轮廓误差补偿流程图

4.1 误差建模

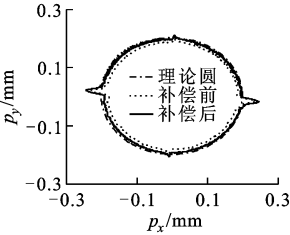
为了建立误差模型,需要获取不同加工速度和半径指令下的实际圆形轨迹的半径误差.在数控系统中输入的 R 为10~60 mm、速度 v 分别为0.5、1、2、4、6、8和10 m/min的圆轨迹加工指令,通过开放式数控系统,实时读取并记录实际反馈位置,然后求取反馈位置坐标与指令圆心坐标的平均距离,并作为平均半径.

根据数控指令和实验结果可以得到式(11),根据式(7)、利用边界搜索计算式(11)最小值,可以得到 $\omega_n = 44.0325 \text{ rad/s}$, $\xi = 0.79217$.由式(7)、(12)可以获取实验台 x 、 y 轴联动圆弧加工的误差模型

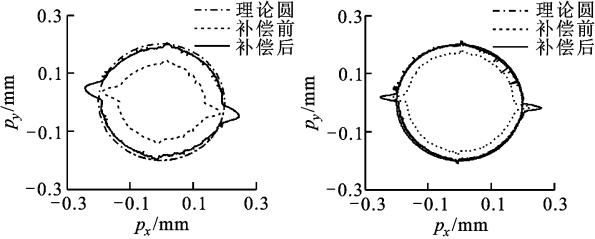
$$\epsilon = r_i - r'_i =$$
$$r_i \left(1 - \left(1 + \left(0.792\,17 \frac{\omega_i}{44.032\,5} \right)^2 - 2 \left(\frac{\omega_i}{44.032\,5} \right)^2 + \left(\frac{\omega_i}{44.032\,5} \right)^4 \right)^{1/2} \right) \quad (14)$$

4.2 圆轨迹半径误差补偿

采用 PA 数控系统的二次开发功能将误差模型嵌入实验台数控系统中,对不同速度、不同半径的圆弧指令进行联动加工实验,实验结果如图 9、图 10 所示. 结果表明,采取联动轮廓补偿可以有效提高圆弧轨迹的轮廓误差,而且在运动轨迹越过象限时不会因为误差估算错误而出现振荡.



(a) $R=30\text{ mm}, v=4\text{ m/min}$



(b) $R=10\text{ mm}, v=8\text{ m/min}$ (c) $R=60\text{ mm}, v=5\text{ m/min}$

图 9 轮廓误差在不同速度、半径指令下的补偿效果

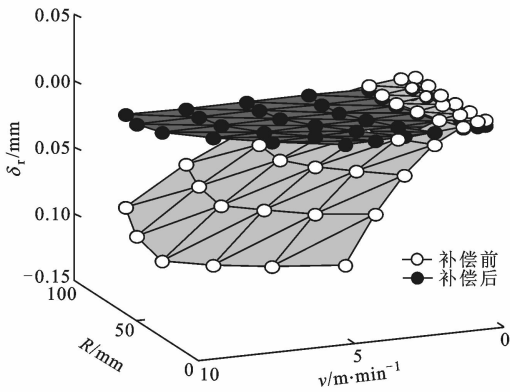
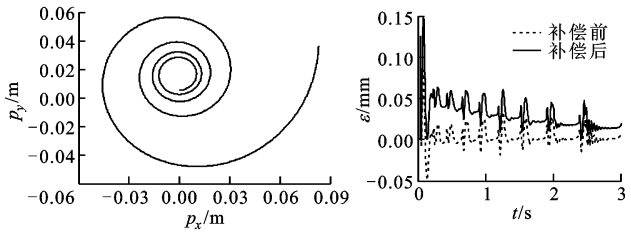


图 10 半径误差补偿前后的对比曲线

4.3 螺旋线轨迹的轮廓误差补偿

如图 11 所示,本文对螺旋曲线进行了 x 、 y 轴联动加工仿真,速度为 5 m/min . 仿真结果表明,当联动加工轨迹为变曲率轨迹时,采用补偿方法仍然

可以显著减小联动加工轨迹的轮廓误差.

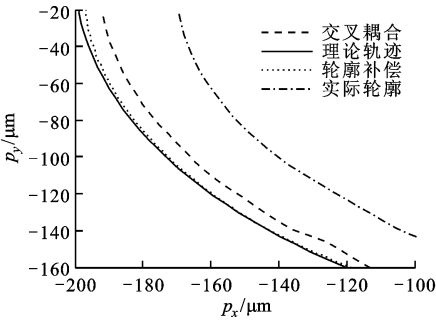


(a)螺旋曲线轨迹 (b)轮廓误差比较

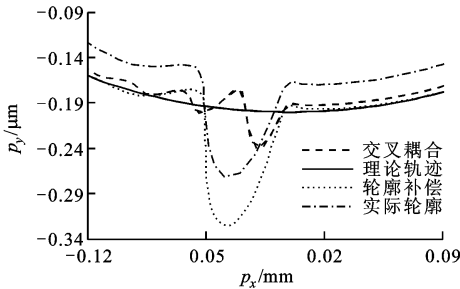
图 11 螺旋曲线 x 、 y 轴联动加工的轮廓误差比较

4.4 交叉耦合控制与轨迹误差补偿比较

如图 12 所示,交叉耦合方法可通过调节补偿增益来改善补偿效果,但由于误差估算错误会导致运动轴在加工过程中产生振荡,因此轨迹误差补偿方法对半径轮廓误差补偿的效果显著且不会产生振荡,能够有效提高联动轮廓的精度. 由于运动轨迹越过象限时的误差是由单轴运动做反向运动时动静摩擦的非线性因素造成的,因此可以通过对单轴的控制策略进行有效地控制.



(a)半径误差补偿



(b)过象限误差补偿

图 12 2 种补偿方法的效果比较

5 结 论

(1)本文提出的基于联动轨迹误差建模的轮廓误差补偿方法,显著地提高了机床对圆弧及曲率连续变化曲线轨迹的加工精度.

(2)在多轴联动加工时,加工速度越大,轨迹曲率越大,轮廓误差越显著.

(3)交叉耦合控制方法可以通过调节补偿增益来改善补偿效果,但若增益太小,补偿效果则不明显,而增益太大,运动轴容易产生振荡.本文提出的基于轨迹误差建模的轮廓误差补偿方法,则无需调节补偿参数就能够有效减小轮廓误差,并且补偿过程平稳,不会导致运动轴产生振荡.

参考文献:

- [1] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Tracking and contour error control in CNC servo systems [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(3): 301-326.
- [2] TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital-control [J]. Transactions of the ASME: Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1987, 109(1): 65-68.
- [3] FUNAHASHI Y, YAMADA M. Zero phase error tracking controllers with optimal gain characteristics [J]. Transactions of the ASME: Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1993, 115(3): 311-318.
- [4] YAMADA M, FUNAHASHI Y, FUJIWARA S. Zero phase error tracking system with arbitrarily specified gain characteristics [J]. Transactions of the ASME: Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1997, 119(2): 260-264.
- [5] 马骋,冯之敬,赵广木.零幅相误差跟踪控制器[J].清华大学学报:自然科学版,2000,40(5):44-46.
MA Cheng, FENG Zhijing, ZHAO Guangmu. Zero amplitude and phase error tracking controller [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(5): 44-46.
- [6] 富强,吴云洁.基于QFT和ZPETC的高精度鲁棒跟踪控制器设计[J].自动化技术与应用,2004,23(8): 1-3.
FU Qiang, WU Yunjie. QFT and ZPETC-based robust control design for a high accuracy tracking system [J]. Techniques of Automation and Applications, 2004, 23(8): 1-3.
- [7] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems [J]. Transactions of the ASME: Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1980, 102(4): 265-272.
- [8] YEH Z M, TARNG Y S, LIN Y S. Cross-coupled fuzzy logic control for multiaxis machine tools [J]. Mechatronics, 1997, 7(8): 663-681.
- [9] TARNG Y S, CHUANG H Y, HSU W T. Intelligent cross-coupled fuzzy feedrate controller design for CNC machine tools based on genetic algorithms [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39(10): 1673-1692.
- [10] 李圣怡,张云洲,张明亮,等.超精密机床的变增益交叉耦合控制研究[J].基础自动化,2000,7(2):25-28.
LI Shengyi, ZHANG Yunzhou, ZHANG Mingliang, et al. Cross-couple-method-based research of ultra CNC servo control [J]. Basic Automation, 2000, 7(2): 25-28.
- [11] CHIN J H, CHENG Y M, LIN J H. Improving contour accuracy by fuzzy-logic enhanced cross-coupled precompensation method [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2004, 20(1): 65-76.
- [12] 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.
- [13] ZHONG Q. A linear cross-coupled control system for high-speed machining [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 19(8): 558-563.
- [14] 李宏胜.轮廓跟踪运动控制系统关键技术的研究[D].南京:东南大学,2005.

[本刊相关文献链接]

- 实轴空间综合约束下的数控加工速度前瞻策略. 2012, 46(2): 64-69.
- 静压导轨误差均化效应影响因素研究. 2010, 44(11): 33-36.
- 固定位宽乘法器的量化误差补偿方法及电路实现. 2011, 45(12): 75-81.
- X-Y工作台摩擦误差补偿方法的研究. 2011, 45(45): 69-73.
- 旋转轴与平移轴联动误差的快速测量及溯源. 2010, 44(6): 80-84.
- 坐标测量机动力学刚度估计与加速度误差补偿. 2009, 43(1): 47-51.
- 线结构光扫描测头误差分析与补偿方法. 2008, 42(3): 286-290.
- 一种多线结构光测头的误差补偿方法. 2007, 41(1): 50-54.

(编辑 管咏梅)