

DOI: 10.3901/JME.2013.21.031

基于扰动补偿算法的拉床主溜板 双伺服同步驱动控制策略^{*}

鲁文其¹ 胡旭东¹ 史伟民¹ 林绿高² 邓雄飞¹

(1. 浙江理工大学浙江省现代纺织装备技术重点实验室 杭州 310018;

2. 缙云高新机械制造有限公司 缙云 321404)

摘要: 阐述电伺服拉床的机电一体化系统结构, 介绍拉床工作台的双伺服同步驱动系统及双滚珠丝杠机械传动机构。为提高拉削过程负载断续变化时主溜板同步运行的精度, 从提高单轴伺服系统本身抑制负载扰动性能的角度出发, 设计基于扰动辨识和补偿机理的自校正算法, 重点分析其原理。基于该自校正算法设计并实现了双轴同步驱动的控制策略, 该控制策略具有简单可靠易实现的特点。以一台 20 t 的伺服拉床为研究对象, 分别在两主溜板耦合和不耦合且受力不平衡的情况下对控制策略的同步性能进行了多种吨位的加工测试, 试验结果显示该扰动补偿算法是有效的, 基于该扰动算法的同步控制策略具有很好的同步精度, 这给双滚珠丝杠伺服同步控制系统的应用提供了很好的理论参考和试验数据。

关键词: 电伺服拉床 扰动补偿 同步控制

中图分类号: TG156

Double Servo Synchronization Drive Control Strategy for the Main Slide Carriage of Broaching Machine Based on Disturbance Compensation Algorithm

LU Wenqi¹ HU Xudong¹ SHI Weimin¹ LIN Lügao² DENG Xiongfei¹

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Modern Textile Equipment Technology,

Zhejiang Sci-tech University, Hangzhou 310018;

2. Jinyun Gaoxin Machinery Manufacturing Co., Ltd., Jinyun 321404)

Abstract: The electromechanical integration system structure of the electric servo broaching machine, the double servo synchronous drive system and the double ball screw mechanical structure of the broaching machine worktable are introduced. To improve the synchronous operation precision of the worktable when the load changing intermittently, a self-tuning control algorithm is designed based on disturbance identification and compensation which is presented from the perspective of raising the load disturbance inhibition performance of servo drive system. And the principle of the algorithm is analyzed especially. Based on this disturbance compensation algorithm, a control strategy that achieved synchronization driven is designed and the control strategy is simple, reliable and easy to implement. Taking a 20-ton servo broaching machine as the goal, the synchronization performance of the control strategy is tested for a variety of tonnage, on the case of the two main slide carriage ran independently and the worktable work with unbalanced load respectively. The experimental results show that the disturbance compensation algorithm is effective, the synchronization control strategies based on the disturbance algorithm has a good synchronization accuracy, which provides a good theoretical reference and experimental data for the application of double ball screw servo synchronization control system.

Key words: Electric servo broaching machine Disturbance compensation Synchronization control

0 前言

拉床是用拉刀加工工件各种内、外成形表面的

机床, 是一种高效率、适宜大批量零件加工的金属切削加工设备。目前国内拉床主要采用液压系统^[1-3]驱动, 但液压拉床存在耗能、油液泄露污染和低速运行会有“爬行”现象等问题。随着经济发展, 汽车、航空业、造船业、军工等市场对零件提出了高柔性、高效率、多样化的发展要求, 液压拉床已不能满足需求, 而永磁交流伺服电动机直接驱动的拉床具有拉削速度可变、控制灵敏、节能环保等优点,

^{*} 国家自然科学基金(51307151)、浙江省自然科学基金(LY13E070005)浙江省重点科技创新团队计划(111329A4E09354)、浙江理工大学科研启动基金(1103823-Y)、机械设计理论浙江省重中之重学科和浙江理工大学重点实验室优秀青年人才培养基金(ZSTUMD2011B005)资助项目。
20130124 收到初稿, 20130510 收到修改稿

成为了以后的发展趋势^[4]。国内在该方面的研究刚刚起步,现有技术都采用单丝杠驱动,能够承受负载拉力在 20 t 以下。而德国克林克、日本山阳机械株式会社等公司已开发负载拉力达到 100 t 的产品,其价格昂贵,普遍采用了双伺服电动机同步驱动的技术^[5]。为打破国外产品垄断,双伺服电动机同步驱动技术的研究成为了国内了大吨位电伺服拉床研制的核心技术之一。但双伺服同时驱动受控对象时,由于所受外部干扰不一样或是结构不完全对称,会造成系统受力不均匀而振动,这对系统的同步精度造成很大的影响^[6]。为此,国内外学者从上位机运动控制角度出发提出了多种控制算法,如 ANDERSON 等^[7]在 1999 年提出了电子虚拟总轴多电动机同步控制方法,KOREN^[8]在 1980 年提出了交叉耦合多电动机同步控制策略,KULKARNI 等在此后的十多年里,先后发表了十余篇关于交叉混合控制的研究论文,从而为多轴耦合补偿控制的研究与应用奠定了基础。HUA 等又把自适应前馈控制策略用到交叉耦合控制、双轴同步控制中,提高了动态响应和抗干扰能力。文献[9]提出用神经元的自学习功能,使双轴同步误差的补偿量随控制次数的增加逐步趋于合理,从而实现最佳同步控制效果,但该类算法实现复杂,是以跟踪线性目标为前提,当遇到非线性轨迹曲线的跟踪控制时就暴露其局限性,且对上位机控制系统实时性要求较高;而文献[10]提出的主令多电动机同步控制算法和文献[11]提出的主从多电动机同步控制算法,实现起来简单很多,对上位机控制系统的实时性要求也较低,但该算法采用传统的交流伺服系统进行设计,伺服系统本身不具备扰动抑制功能,算法在保证一个电动机控制精度时往往对其他电动机的干扰不具有预见性,这样就不能保证多电动机的同步性能。本文将齿隙非线性、丝杠刚度以及受力不均匀都视为单轴驱动伺服系统的外部扰动,从提高单轴伺服系统扰动性能角度出发研究控制策略^[12],设计了基于扰动辨识和补偿机理的单轴伺服驱动系统自校正算法以及基于这个扰动补偿算法的双轴同步驱动的控制策略。该策略相比文献[10-11]提出的同步控制算法,具有更高的同步精度;相比文献[7-9]的同步控制算法,具有简单易实现的特点。以一台 20 t 的伺服拉床为研究对象进行了试验测试。

1 拉床机电一体化系统结构

图 1 为电伺服拉床机械部分的结构示意图,主

要由拉刀、床身、底座、滚珠丝杠、副溜板、主溜板、减速器、工作台、光电编码器、伺服电动机等部件组成。

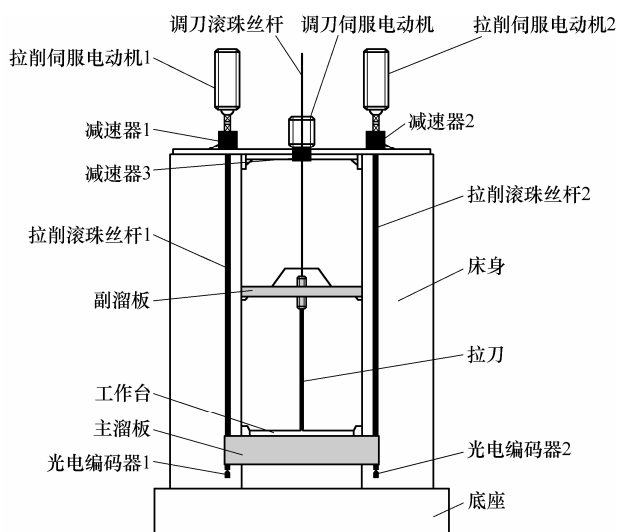


图 1 拉床机械系统结构

拉床运行的动力源由两套机电一体化伺服驱动系统组成:一是控制副溜板运行的单伺服驱动系统;二是控制主溜板(工作台)运行的双伺服同步驱动系统。单伺服驱动系统采用一个小功率的伺服驱动器控制伺服电动机旋转,并经减速器、滚珠丝杠后带动副溜板上下运行,达到调整拉刀位置的目的。双伺服同步驱动系统采用两个大功率伺服驱动器分别独立驱动两个伺服电动机运行,经两独立减速器后分别再驱动两根滚珠丝杠旋转共同驱动主溜板上下运行,达到拉削的目的。为了保证主溜板的同步精度,两根丝杠的同一侧分别安装有两个光电编码器,作为主溜板实际位置的反馈。二个大功率伺服驱动器的同步运行以及一个小功率伺服驱动器的运行都由一个上位机系统进行协调控制。本文主要针对主溜板的双伺服同步驱动系统进行研究。

2 双伺服同步驱动系统

2.1 单轴伺服驱动系统

单轴伺服系统的基本控制原理框图如图 2 所示,采用位置外环,速度、电流内环的三环控制结构,位置给定信号由上位机输出,实际的位置信息由伺服电动机上安装的光电编码器反馈,两者作差经位置环 P 控制器调节后输出到速度控制回路中作为电动机的转速给定。速度控制方案采用 $i_d = 0$ 的矢量控制算法,电动机的转速给定和实际速度反馈作差,经速度环 PI 控制器调节后得到电流环的交轴(q 轴)电流给定。电动机定子的三相电流采用物理

传感器检测, 并经 3 轴/2 轴的变换得到电动机静止坐标系下的两相电流 i_α 、 i_β , 再经静止-旋转变换得到实际的交直流轴(q 、 d 轴)电流反馈。 q 轴电流给定与其实际反馈比较并经电流环 PI 控制器调节后得到 q 轴电压 u_q ; d 轴电流给定与其实际反馈比较并经电流环 PI 控制器调节后, 同样得到 d 轴电压 u_d 。 u_d 、 u_q 经旋转-静止坐标变换后输出 u_α 、 u_β 。 u_α 、 u_β 通过空间矢量调整算法(Space-vector pulse width modulation, SVPWM)计算六路 PWM 信号的占空比, 并输出去控制功率管的通断, 实现永磁同步电动机(Permanent magnet synchronous motor, PMSM)的运行控制。

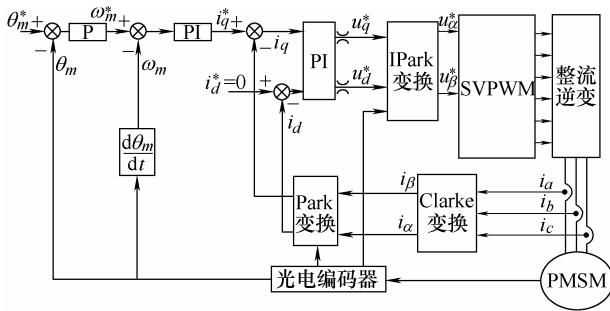


图2 单轴伺服系统基本的控制原理框图

2.2 单轴机械传动机构

图3为单轴机械传动机构的结构框图, 伺服电动机的旋转运动经减速器+滚珠丝杠的组合传递转换成主溜板的直线运行。

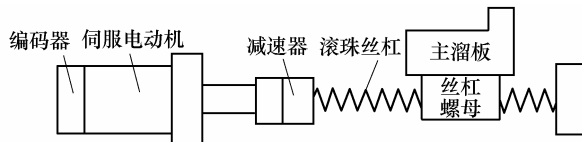


图3 主溜板单轴滚珠丝杠伺服驱动系统

2.3 工作台双轴同步驱动系统

工作台的双轴同步驱动系统如图4所示, 采用两套对称的单轴机械传动机构进行设计。两伺服电

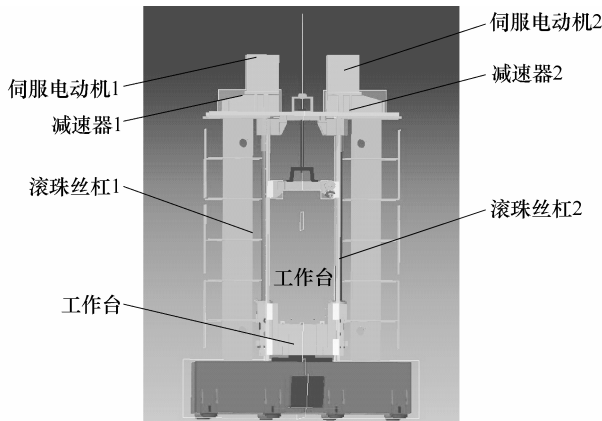


图4 双丝杠传动机构

动机分别经两经减速器驱动滚珠丝杠运行, 滚珠丝杠上安装有独立分开的两个主溜板, 两个主溜板通过中间的耦合件(工作台)连接在一起形成一个整体的加工平台。

3 单轴伺服驱动扰动补偿控制策略

3.1 扰动辨识

由电动机学原理知, 电动机的运动学方程为

$$J d\omega_m/dt + B_m \omega_m + T_L = T_e \quad (1)$$

$$d\theta_m/dt = \omega_m \quad (2)$$

式中 ω_m ——转子机械角速度

θ_m ——机械角位置

T_e ——电动机输出转矩

T_L ——负载扰动转矩

J ——转动惯量

B_m ——黏性阻尼系数

因为控制器的采样频率远远高于扰动转矩的变化时间, 所以负载扰动转矩作为一个状态变量, 可假定它是一个恒值, 即负载扰动转矩对时间的微分为零。设

$$dT_L/dt = 0 \quad (3)$$

由式(1)、(2)得电动机的动力学状态方程式

$$\begin{cases} dx/dt = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{式中 } A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -B_m/J & -1/J \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1/J \\ 0 \end{pmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_L \end{pmatrix}$$

$$C = (1 \ 0 \ 0) \quad u = T_e \quad y = \theta_m$$

式(4)的输入变量为电动机输出转矩, 状态变量为机械角位置、机械角速度和负载扰动转矩, 输出变量为机械角位置。式(4)可写为式(5)

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -B_m/J & -1/J \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1/J \\ 0 \end{pmatrix} T_e \quad (5)$$

由动力学状态等式(4), 可建立一个全维状态观测器, 见式(6)

$$\begin{cases} d\hat{x}/dt = A\hat{x} + Bu + K(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\hat{x} = (\hat{\theta}_m \ \hat{\omega}_m \ \hat{T}_L)^T$ 为被估计的状态变量,

$\mathbf{K} = (k_1 \ k_2 \ k_3)^T$ 为状态反馈增益阵。

由式(4)~(6)得

$$d\tilde{\mathbf{x}}/dt = (\mathbf{A} - \mathbf{KC})\tilde{\mathbf{x}} \quad (7)$$

式中, $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ 为观测误差。其特征方程为

$$s^3 + (k_1 + B_m/J)s^2 + (k_2 + k_1 B_m/J)s - k_3/J = 0 \quad (8)$$

选择适当的 \mathbf{K} , 使 $(\mathbf{A} - \mathbf{KC})$ 有稳定、适当的特征值, $\tilde{\mathbf{x}} \rightarrow 0$ 时, 与 $x(t)$ 、 $u(t)$ 和 $\tilde{x}(0)$ 无关; $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ 与 $\tilde{x}(0)$ 无关。

根据指定的期望极点 α 、 β 、 γ , 则观测器的期望特征多项式为

$$s^3 - (\alpha + \beta + \gamma)s^2 + (\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha)s - \alpha\beta\gamma = 0 \quad (9)$$

由式(8)和式(9)得

$$\begin{cases} k_1 = -(\alpha + \beta + \gamma) - B_m/J \\ k_2 = (\alpha\beta + \beta\gamma + \gamma\alpha) + (\alpha + \beta + \gamma)B_m/J + (B_m/J)^2 \\ k_3 = \alpha\beta\gamma J \end{cases} \quad (10)$$

假设 $B_m = 0$, 且 $\alpha = \beta = \gamma$, 则式(10)可改写成

$$\begin{cases} k_1 = -3\alpha \\ k_2 = 3\alpha^2 \\ k_3 = \alpha^3 J \end{cases} \quad (11)$$

式(6)可改写成

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -B_m/J & -1/J \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1/J \\ 0 \end{pmatrix} T_e + \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{pmatrix} (\theta_m - \hat{\theta}_m) \quad (12)$$

根据系统期望的特性, 选择极点所在的位置, 按照式(12)构造观测器, 即可观测出负载力矩。

3.2 扰动补偿

由于系统的实际负载(T_{L2})作用在电流环之后, 为抑制负载扰动对系统性能造成的影响, 本文考虑采用电流环之外的转速环调节器来进行补偿, 下面对速度补偿原理作简单阐述。

将电流环等效为一阶惯性环节, 采用负载观测器对电动机的实际负载(T_{L2})作实时辨识, 并将辨识得到的负载当前值(T_{L1})引入到电流调节器的输入端, 作为系统补偿扰动的控制输入量, 具体如图 5 所示。图 5 中, k_p 和 k_i 分别为速度控制器的比例系数和积分系数; $T_i = T_v + K$ 为电流闭环时间常数,

式中的 K 为电流环增益, T_v 为速度滤波器时间常数; β_1 为负载力矩辨识值的前馈系数或补偿系数; $K_S = K_{p2}/K_{p1}$ 为速度环放大系数与电流环放大系数的比值, K_{p1} 为电流检测环节放大系数, K_{p2} 为速度检测环节放大系数。

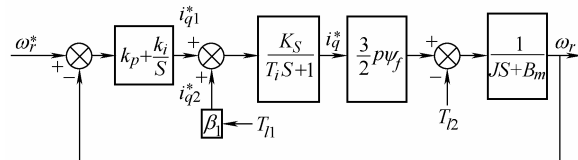


图 5 基于负载力矩辨识和补偿的速度控制框图

根据图 5 的控制框图, 可推得调速系统的静特性方程为

$$\omega_r = \frac{K_S K_T k_p s + K_S K_T k_i}{D(s)} \omega_r^* + \frac{K_S K_T \beta_1}{D(s)} T_{L1} - \frac{(T_i s + 1)s}{D(s)} T_{L2} \quad (13)$$

式(13)中的 $D(s)$ 为特征多项式, 且 $D(s) = J T_i s^3 + (\beta_1 T_i + J)s^2 + K_S K_T k_p s + K_S K_T k_i$, $K_T = 3 p \psi_f / 2$ 为转矩系数。由式知, 当负载观测器的辨识值 T_{L1} 等于系统的实际负载转矩 T_{L2} 时, 只要调节补偿系数 β_1 , 表示电流补偿作用的一项 $K_S k_i \beta_1 T_{L1} / D(s)$ 就可以校正负载突变带来的另一项 $T_{L2} (T_i s + 1)s / D(s)$, 这样通过负载观测器的辨识和前馈补偿就可以校正因负载突变 T_{L2} 而引起的速度变化。这种基于扰动量的补偿控制, 在参数选择恰到好处时, 可以实现静差为零, 称为全补偿, 这就是控制系统的速度补偿原理。由式(14)的静特性方程可得到全补偿的条件为

$$\beta_1 = (T_i s + 1) / (K_S K_T) \quad (14)$$

4 双轴伺服同步驱动控制策略

基于前面采用扰动辨识和补偿机理而设计的单轴伺服驱动系统, 本文设计了拉床工作台的双轴伺服同步驱动控制策略和实现方案(图 6)。该控制策略采用主令方式进行控制, 两个伺服系统的位置指令由上位机统一给定, 在伺服系统两边受力不平衡时依靠伺服系统本身设计的自校正算法来补偿扰动。该控制策略的实现方案采用可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC)作为上位机系统的控制核心并设计脉冲+方向的方式进行位置控制。PLC 内置 4 路高速脉冲输出, 方案设计其中的一路高速脉冲输出信号同时作为两个伺服系统的高

速脉冲输入信号,具体连接时在 PLC 脉冲输出口和两个伺服驱动器之间安装有继电器,继电器的通与断也由 PLC 进行控制。两主溜板的实际位置由安装在丝杠上的两个光电码盘反馈到 PLC 中计算而得,当出现同步误差时,PLC 可通过继电器的通与断进行伺服运行状态的调整和保护,具体误差值可通过触摸屏观察。

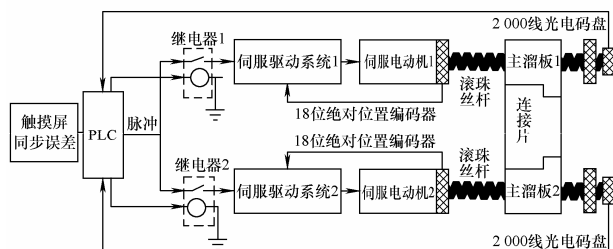


图6 工作台双伺服同步驱动控制策略原理框图

5 试验

采用本文设计的同步控制策略,以一台 20 t 的电伺服拉床为研究对象,设计了伺服拉床的控制系统和样机,如图 7 所示(经计算后得到相关参数见下表),为了验证同步控制策略的有效性,下面分别对控制算法的同步性能作试验测试。

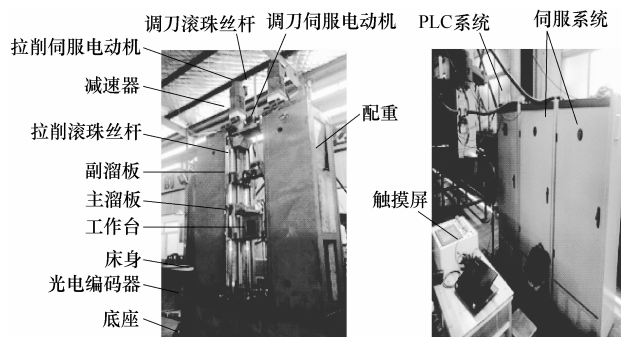


图7 电伺服拉床样机

表 双轴伺服驱动系统若干关键参数

参数	数值
PLC 输出 1 Hz 频率脉冲对应主溜板运行速度/(mm/s)	0.003 05
PLC 输出 1 个脉冲对应主溜板行程/ μm	3.06
触摸屏 1 个同步误差脉冲对应主溜板同步误差/ μm	11
电动机相电流传感器检测值 1 V 对应电流/A	66.67
永磁同步电动机功率/kW	22
永磁同步电动机级数	4
永磁同步电动机额定转速/(r/min)	2 000

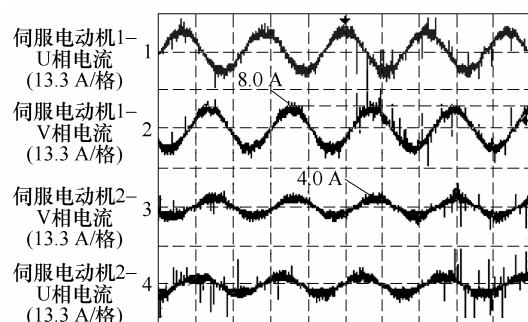
5.1 工作台不耦合两边受力不平衡情况下测试

本文首先对补偿算法的有效性进行测试。考虑安全性,测试时两个主溜板之间不安装连接片,因

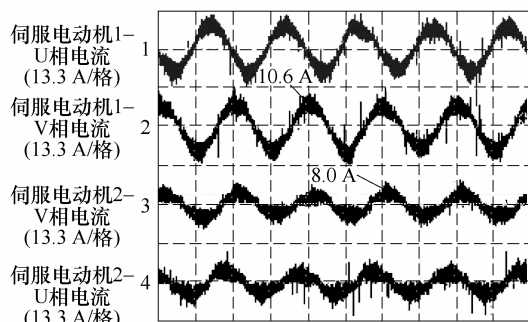
两个主溜板上都安装有配重,本试验为体现受力不平衡,首先在一边加配重另一边不加配重的情况下进行测试,运行时两边具体受力具体多少可通过安装在伺服电动机 1 和伺服电动机 2 两相电流上的霍尔传感器检测并反馈到示波器中换算而得,而同步性能可通过触摸屏观察,PLC 系统设置了同步保护功能,当超过一定误差(60 μm)时立马停止运行。具体测试时设置拉床主溜板行程为 1 600 mm,运行速度为 2.2 m/min。当伺服系统引入扰动补偿算法运行样机得到的试验波形如图 8a 所示,从上至下分别表示伺服电动机 1 的 U/V 两相电流波形和伺服电动机 2 的 U/V 两相电流波形(下同),从波形知,此时伺服电动机 1 的最大相电流(8 A)是伺服电动机 2(4.0 A)的 2 倍,电动机的运行速度都为 300 r/min,伺服电动机两边的受力是不平衡的,而观察触摸屏上显示的同步误差数据,在某个时刻最大为 40 μm ,大部分时间在 20 μm 之内。而当伺服系统不引入扰动补偿算法而运行样机时,在起动瞬间就出现了同步保护,系统不能运行。因此,由以上结果可知本文设计的扰动补偿算法是有效的。其次,进行运行速度大小对同步性能影响的测试。伺服系统引入扰动补偿算法,系统在跟前面同样负载和行程给定的情况下,进行了多个速度范围内的测试。其中设置速度为 5.50 m/min 运行测试得到的试验波形如图 8b 所示,从波形知,此时伺服电动机 1 的最大相电流(10.6 A)是伺服电动机 2(8.0 A)的 1.3 倍,电动机的运行速度都为 750 r/min,触摸屏显示在整个行程内同步误差最大为 40 μm ,且大部分时间也在 20 μm 之内。因此,从试验结果知,基于扰动补偿算法的双轴伺服同步驱动系统在工作台不耦合、两边受力不平衡情况下运行时同步精度在 40 μm 以内,同步性能较好,且同步精度不受运行速度大小影响。

5.2 工作台耦合两边受力不平衡情况下测试

基于前面的试验条件与数据,下面将工作台安装在主溜板之间用螺母固定进行零件的加工测试。设置拉床主溜板行程为 1 600 mm,运行速度为 5.89 m/min,工作台上分别放置 10 t、14 t 的工件进行拉削测试,得到的试验波形分别如图 9a、9b 所示,从波形知电动机的运行速度都为 803 r/min,与计算值吻合。图 9a 为加工 10 t 零件时测得的试验波形,可知,伺服电动机 1 的最大相电流(21.3 A)是伺服电动机 2(10.6 A)的 2 倍;图 9b 为加工 14 t 零件时测得的试验波形,此时,伺服电动机 1 的最大相电流(45.3 A)是伺服电动机 2(37.3 A)的 1.2 倍,显然主溜板两边受力是不平衡的,但在整个行程内同步误差最大依然为某个点 40 μm ,大部分时间在 20 μm

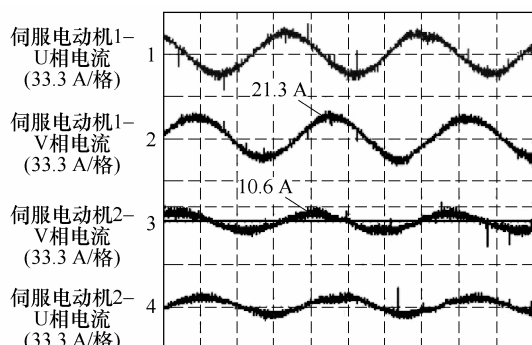


时间 (25 ms/格)
(a) 工作台2.2 m/min速度运行

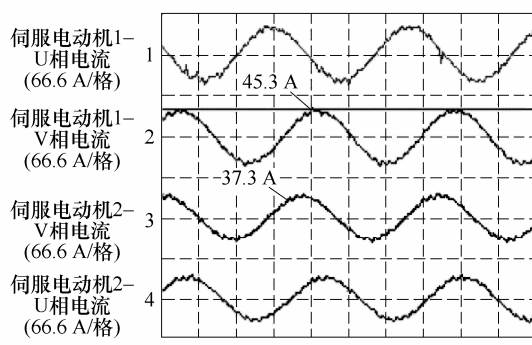


时间 (10 ms/格)
(b) 工作台5.5 m/min速度运行

图8 无工作台耦合两边受力不平衡情况下测试波形



时间 (5 ms/格)
(a) 工作台5.89 m/min速度运行、10 t零件拉削



时间 (5 ms/格)
(b) 工作台5.89 m/min速度运行、14 t零件拉削

图9 工作台耦合两边受力不平衡情况下加工测试波形

之内。因此,该双轴伺服同步驱动系统在工作台耦合、两边受力不平衡情况下运行,同步性能较好,且同步精度几乎不受负载出力大小影响。图10为最后拉削加工后的3个零件。

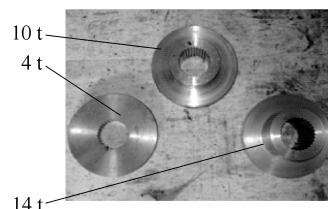


图10 拉床加工后的零件

6 结论

(1) 阐述了电伺服拉床的机电一体化系统结构,介绍了拉床工作台的双伺服同步驱动系统及双滚珠丝杠机械机构。

(2) 为提高拉削过程负载断续变化时主溜板的同步运行精度,从提高伺服系统本身抑制负载扰动性能的角度出发,设计了基于扰动辨识和补偿机理的单轴驱动伺服系统自校正算法和基于该算法的双轴同步驱动的控制策略。

(3) 以一台20 t的伺服拉床为研究对象,分别在两主溜板耦合和不耦合且受力不平衡的情况下对控制策略的同步性能进行了多种吨位的加工测试,试验结果显示该扰动补偿算法是有效的,基于该扰动算法的同步控制策略具有很好的同步精度,且实现简单,这给双丝杠伺服同步控制系统的应用提供了很好的理论参考和试验数据。

参考文献

- [1] 柏艳红, 权龙. 电液位置速度复合伺服系统控制策略[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 150-155.
BAI Yanhong, QUAN Long. Control strategy of the electro-hydraulic position and speed hybrid servo system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24): 150-155.
- [2] 孟文俊, 沈东凯, 王占林, 等. 基于矢量控制的航空液压泵源测试系统转速控制方案[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 311-315.
MENG Wenjun, SHEN Dongkai, WANG Zhanlin, et al. Vector control based rotating speed control strategies in aero hydraulic pump test system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 311-315.
- [3] 彭勇刚, 韦巍. 伺服电动机直接驱动定量泵液压系统在精密注塑中的应用及其控制策略[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 173-179.
PENG Yonggang, WEI Wei. Application and control strategy of servo motor driven constant pump hydraulic system in precision injection molding[J]. Journal of

- Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 173-179.
- [4] 倪敬, 彭丽辉, 项占琴. 有效容错控制及其在电液伺服同步系统中的应用[J]. 中国机械工程, 2010, 21(11): 1342-1347.
- NI Jing, PENG Lihui, XIANG Zhanqin. Effective fault tolerant control on electro hydraulic servo synchro system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 21(11): 1342-1347.
- [5] KARL KLINK GMBH, KARL KLINK RISH M. 100×2800×800 S helical broaching machine in double column table-up design with D-DRIVE[EB/OL]. 2011. <http://www.karl-klink.de/index.php?id=38>.
- [6] 谭文斌, 李醒飞, 向红标, 等. 伺服系统转矩纹波的补偿研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 1-6.
- TAN Wenbin, LI Xingfei, XIANG Hongbiao, et al. Research on compensation of torque ripple in servo system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 1-6.
- [7] ANDERSON R, LORENZ R. Web machine coordinated motion control via electronic line-shafting[J]. IEEE, IAS Annual Tech. Conf., 1999 (10): 3-7.
- [8] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing system[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1980, 102(12): 1324-1330.
- [9] 张承慧, 石庆升, 程金. 一种多电动机同步传动模糊神经网络控制器的设计[J]. 控制与决策. 2007, 22(1): 10-13.
- ZHANG Chenghui, SHI Qingsheng, CHENG Jin. Design of fuzzy neural network controller for synchronization drive in multi-motor systems[J]. Control and Decision, 2007, 22(1): 10-13.
- [10] 刘福才, 刘学莲, 刘立伟. 多级电动机传动系统同步控制理论与应用研究[J]. 控制工程, 2002, 9(4): 87-90.
- LIU Fucui, ZHANG Xuelian, LIU Liwei. Synchronous control theory and practical study of multi-motor synchronous driving system[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(4): 87-90.
- [11] TOMIZUKA M, HU J, CHIU T, et al. Synchronization of two motion control axes under adaptive feedforward control[J]. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1992, 114: 3234-3245.
- [12] 鲁文其, 胡育文, 梁骄雁, 等. 永磁同步电动机伺服系统抗扰动自适应控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 75-81.
- LU Wenqi, HU Yuwen, LIANG Jiaoyan, et al. Anti-disturbance adaptive control for permanent magnet synchronous motor servo system[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(3): 75-81.
-
- 作者简介:** 鲁文其(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为机电传动与控制。
E-mail: luwenqi@zstu.edu.cn
- 胡旭东, 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机电传动与控制。发表论文 40 多篇, 其中 15 篇被 EI 收录。
E-mail: xdhu@zstu.edu.cn
- 史伟民, 男, 1965 年出生, 博士, 博士研究生导师。主要研究方为机电一体化控制技术。
E-mail: swm@zstu.edu.cn
- 林绿高, 男, 1974 年出生, 硕士, 工程师。主要研究方为机电一体化控制技术。
E-mail: linlvga@163.com
- 邓雄飞, 男, 1988 年出生。主要研究方为机电一体化控制技术。
E-mail: zstufx2010@163.com