

扩张状态观测器在双电机同步控制中的应用

王伟峰¹, 彭超², 严鹏¹, 杨斌¹

(1. 上海神添实业有限公司, 上海 200438; 2. 中国人民解放军 95841 部队, 甘肃 酒泉 735018)

摘要:交叉耦合同步控制是多电机同步控制的一种主要形式,但当系统中一台电机存在外界干扰时,交叉耦合部分会将干扰作用传递到其他电机伺服系统,对各电机伺服精度和同步精度均会产生不良影响。针对该问题,设计了双永磁同步直线电机同步控制系统,在双电机同步控制系统中加入线性扩张状态观测器。仿真及实验结果均证明,扩张状态观测器在双电机交叉耦合同步控制系统中能够有效提高各电机位置伺服精度和同步控制精度。

关键词:扩张状态观测器;电机;同步控制

中图分类号:TM351 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2019)05-0200-04

Application of Extended State Observer in Synchronous Control of Dual Motors

WANG Weifeng¹, PENG Chao², YAN Peng¹, YANG Bin¹

(1. Shanghai Shen Tian Industrial Co., Ltd., Shanghai 200438, China;

2. The 95841 Troops of people's Liberation Army of China, Jiuquan 735018, China)

Abstract: Cross coupling synchronous control is mainly applied to the synchronous control for multi motor. when the motor is disturbed in external environment, the interference is transferred to other motor servo systems by the cross coupling part, which can result in adverse effects on the servo precision and synchronization accuracy of each motor. For this, the synchronous control system for the dual permanent magnet synchronous linear motor is designed, and the linear extended state observer is applied to the synchronous control system of the dual motors. The result of the simulation test shows that the extended state observer can be used to effectively improve the position servo precision and the synchronization control precision in the dual motor cross coupling synchronous control system.

Keywords: extended state observer; motor; synchronous control

0 引言

随着工业技术的不断发展,工业应用领域中运动控制系统的复杂度变得越来越高。在很多大型设备或精密设备中,往往需要同步或协同控制多台电机来完成指定的作业流程。

交叉耦合同步控制是一种经典的同步控制算法,其同步控制方法可以有效改善被控子系统间的相互运动同步,极大地提高同步精度,目前已经成为多轴系统同步运动控制的主要模式^[1]。然而,在多电机交叉耦合同步控制系统中,当其中一个电机伺服系统存在外界干扰时,交叉耦合部分会将干扰引入其他电机伺服系统中,对各电机伺服控制精度产生一定的影响。

针对上述问题,本文以永磁同步直线电机为对象,在双电机交叉耦合同步控制系统中设计了扩张状态观测器,并进行了仿真及实验,验证了扩张状态观测器在交叉耦合同步控制系统中提升控制精度和同步精度的有效性。

1 永磁同步直线电机的数学模型

永磁同步直线电机的原理与永磁同步旋转电机相同,

可认为是将旋转电机沿着半径的方向剖开,然后沿电机的圆周展开为直线形成,图 1 为其结构示意图。

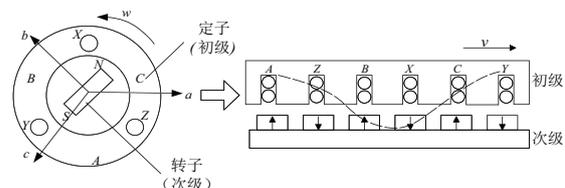


图 1 永磁同步直线电机结构示意图

永磁同步直线电机的电压平衡方程为:

$$u = L \frac{di}{dt} + R \cdot i + k_e \cdot v \tag{1}$$

其中: u 、 i 、 R 、 L 分别为电机电压、电枢电流、电枢电阻和电枢电感, k_e 为反电势系数($V/(m/s)$), $k_e = \phi_f \cdot p$ 。

永磁同步直线电机电磁推力方程为:

$$F_e = K \cdot \phi_f \cdot i_q = K_T \cdot i_q \tag{2}$$

其中: K_T 为推力常数(N/A), $K_T = K \cdot \phi_f$ 。

永磁同步直线电机的运动学方程为:

基金项目:上海市 2016 年度科技创新行动计划项目(16111107102)

作者简介:王伟峰(1989—),男,工程师,硕士,主要研究方向为多轴运动控制。

$$M \frac{\partial^2 x(t)}{\partial t^2} = F_e(t) - \mu w(t) - F_l(t, x) \quad (3)$$

其中: $F_l(t, x)$ 为外部干扰力, M 为负载质量, μ 为摩擦系数。

忽略式(3)中的摩擦力与外部干扰力的作用,对式(1)和式(3)做 Laplace 变换有:

$$U(s) = LI(s)s + RI(s) + k_e SX(s) \quad (4)$$

$$MS^2 X(s) = F_e(s) = K_T I(s) \quad (5)$$

由式(4)与式(5)可得,永磁同步直线电机的传递函数模型框图如图 2 所示。

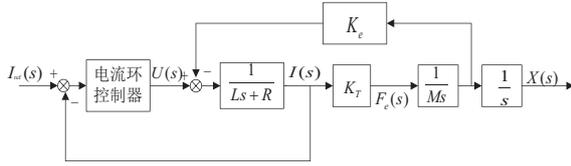


图 2 永磁同步直线电机模型框图

2 交叉耦合同步控制律设计

本节针对并联驱动的双永磁同步电机控制系统设计交叉耦合同步控制律。

首先定义各电机位置伺服控制的跟踪误差:

$$e_i = y_r - y_i \quad (6)$$

其中: y_r 为位置参考输入, m ; y_i 为位置测量输出, m 。

然后定义位置同步偏差:

$$\varepsilon_{y1} = e_{y1} - e_{y2}, \quad \varepsilon_{y2} = e_{y2} - e_{y1} \quad (7)$$

其中: e_{y1} 、 e_{y2} 分别为两个永磁同步电机的位置跟踪误差, m ; ε_{y1} 、 ε_{y2} 分别为两个永磁同步直线电机的位置同步偏差, m 。

位置同步控制系统的控制目标是当位置参考输入一致时,各电机伺服系统控制输出相同,其控制误差也就相同^[2],即 $e_{y1} = e_{y2}$,因此有 $\varepsilon_{y1} = \varepsilon_{y2} = 0$ 。

定义矩阵 Ξ :

$$\Xi = TE \quad (8)$$

其中: $\Xi = [\varepsilon_{y1}, \varepsilon_{y2}]^T$, $E = [e_{y1}, e_{y2}]^T$, 且 $T = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ 。

由式(6)、式(7)可知,要保证各侧直线电机实现精确的位置跟踪并且两侧直线电机位置实现同步控制,必须有: $\Xi = 0$ 且 $E = 0$ 。因此,可定义同步控制系统的混合误差矩阵(E_h):

$$E_h = \begin{bmatrix} e_{y1} \\ e_{y2} \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} e_{y1} - e_{y2} \\ e_{y2} - e_{y1} \end{bmatrix} = E + \beta \Xi \quad (9)$$

其中 β 为系统交叉耦合常数。

将式(8)代入式(9)可得:

$$E_h = (I + \beta T)E \quad (10)$$

其中: I 为单位阵, $(I + \beta T)$ 为正定阵。

由式(10)可知,当且仅当系统的混合误差矩阵 $E_h = 0$ 时,才有 $E = 0$ 且 $\Xi = 0$ 。因此,将 E_h 作为伺服控制器的输入进行控制可以实现各电机伺服系统的位置控制收敛以及同步收敛。图 3 为交叉耦合同步控制的控制系

统框图。

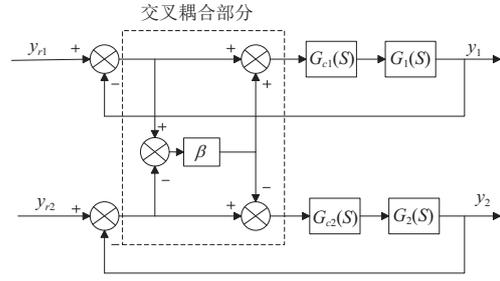


图 3 交叉耦合同步控制框图

3 扩张状态观测器设计及同步控制仿真

3.1 扩张状态观测器的基本概念及原理

状态观测器是指根据系统的外部变量(输入变量和输出变量)的实测值得出状态变量估计值的一类动态系统,也称为状态重构器^[3]。扩张状态观测器借用状态观测器的思想,把未建模动态和各种扰动的综合作用看成是一个新的状态——扩张状态,通过输出反馈的方式观测这个扩张状态。扩张状态观测器的优点在于它并不依赖于系统的具体数学模型,它所依靠的仅仅是对象的阶次^[4]。

设二阶被控对象一般形式为^[5]:

$$\dot{y} = f(t, y, \dot{y}, w) + bu \quad (11)$$

式中: w 为外界干扰, $f(t, y, \dot{y}, w)$ 为包含系统所有不确定项的函数, b 为不确定参数。

二阶被控对象的状态方程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(t, x_1, x_2, w) + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (12)$$

令系统状态变量 $x_3(t) = f(t, x_1, x_2, w)$, 则有:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = h(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (13)$$

虽然式(13)中 $h(t)$ 的具体公式未知,式(13)所表达的系统为线性系统,故可以建立状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 g_1(z_1 - y) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 g_2(z_2 - y) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 g_3(z_3 - y) \end{cases} \quad (14)$$

从式(14)可以看出,对于观测器中的参数 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 和函数 $g_1(\cdot)$ 、 $g_2(\cdot)$ 、 $g_3(\cdot)$, 只要选择恰当,就可以实现对原系统各个状态变量的观测,即有: $z_1(t) \rightarrow x_1(t)$, $z_2(t) \rightarrow x_2(t)$, $z_3(t) \rightarrow x_3(t)$ 。

如果取 $g_i(e_i) = e_i$, 这类型的扩张状态观测器被称为

线性扩张状态观测器(linear ESO,LESO)^[6]。

3.2 永磁同步直线电机位置伺服系统的线性扩张状态观测器设计

由式(3)可知,永磁同步直线电机的运动学模型为二阶模型,选取状态变量 x_1 、 x_2 分别为电机输出位移与速度,即 $x_1 = y$ 、 $x_2 = \dot{y} = v$ 。由式(14)可得二阶模型的LESO:

$$\begin{cases} Z_1(s)s = Z_2(s) + \beta_1(Y(s) - Z_1(s)) \\ Z_2(s)s = Z_3(s) + \beta_2(Y(s) - Z_1(s)) + b_0 U(s) \\ Z_3(s)s = \beta_3(Y(s) - Z_1(s)) \end{cases} \quad (15)$$

其中: β_1 、 β_2 、 β_3 为 LESO 的控制参数, b_0 为补偿系数。

因此,永磁同步直线电机的二阶模型应设计为如式(15)所示的三阶 LESO,实现对系统的扰动观测。如果系统剪切频率(ω_c)已知,则 LESO 的带宽通常设计为 $\omega_0 = (3\sim 5)\omega_c$ ^[7]。

根据 LESO 中的状态变量,其输出 Z_1 、 Z_2 分别为位置反馈信号与速度反馈信号的估计, Z_3 为 LESO 对扰动的估计。所以在经典的三环位置伺服系统中加入 LESO 增强系统的干扰估计性能。LESO 在位置伺服系统中的控制框图如图 4 所示。

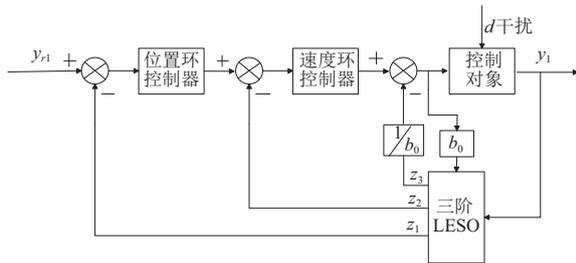


图 4 LESO 系统框图

3.3 加入 LESO 的双电机同步控制系统设计与仿真

双电机位置同步控制系统的控制目标是使混合误差矩阵(E_h)趋向于 0^[8],因此交叉耦合部分的输出应作为各电机位置环 PID 的输入。由于 LESO 的抗干扰性能是用过估计被控对象的系统输出及外部扰动实现的,所以同步控制系统的每个电机均需要设计相应的 LESO。

每个电机的位置伺服控制系统采用三环控制结构,在此基础上加入交叉耦合结构及 LESO 的双电机同步控制系统 Simulink 仿真框图如图 5 所示,LESO 的仿真结构图如图 6 所示。

在系统仿真设计中,电机模型选用 TL12 型永磁同步直线电机,其电枢电阻 $R = 3.6 \Omega$,电枢电感 $L = 27 \text{ mH}$,反电势系数 $k_e = 76 \text{ V}/(\text{m}/\text{s})$ 。

如图 6 所示,对双电机同步控制系统中的电机 1 施加幅值为 50 N 的白噪声外部干扰,得到图 7 和图 8 所示的 2 个电机的位置输出仿真曲线。由图 8 可知,虽然电机 2 没有直接施加外部干扰,但施加在电机 1 上的外界干扰也通

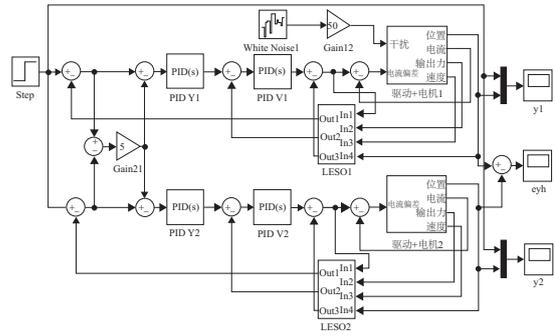


图 5 加入 LESO 的交叉耦合同步控制仿真框图

过交叉耦合部分传递到了电机 2 的控制系统中。通过对比图 7 和图 8 中加入 LESO 和未加入 LESO 的仿真曲线可知,在存在外部强干扰的情况下,加入 LESO 的 2 个电机位置控制精度明显高于未加入 LESO 时的控制精度,LESO 的抗干扰作用较为明显。

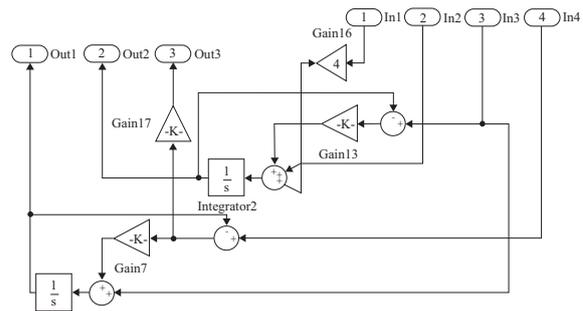


图 6 LESO 的仿真框图

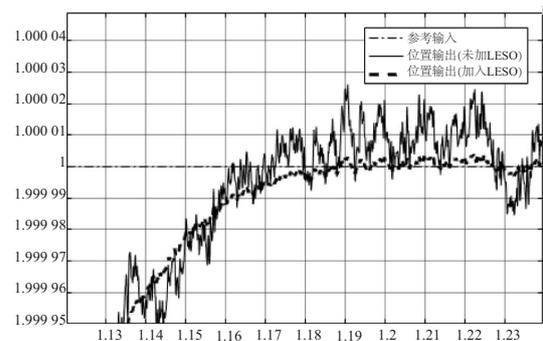


图 7 电机 1 位置阶跃响应曲线

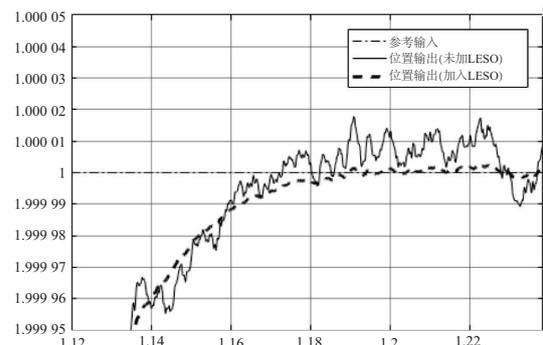


图 8 电机 2 位置输出仿真曲线

将 2 个电机的位置输出相减得到如图 9 所示的同步误差仿真曲线,对比两种曲线可知,加入 LESO 的情况下,双电机同步误差明显更小。

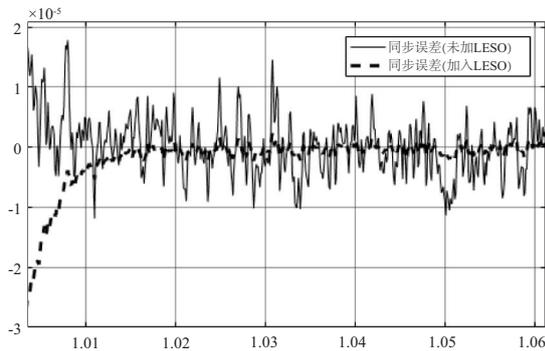


图 9 双电机同步误差仿真曲线

3.4 实验验证

为验证加入 LESO 的双电机同步控制系统的可行性及其实际效果,进行了实验验证。图 10 为机床内部双电机同步夹紧固定系统,在该运动平台中对同步控制算法进行试验。2 个电机分别负责相互垂直两个方向的夹具运动,共同实现对工件的同步夹紧功能。其中伺服电机采用 SM0803-AE4-KCD 步进伺服电机,同步控制算法在以 Stm32F407 为主控芯片的运动控制卡上实现。

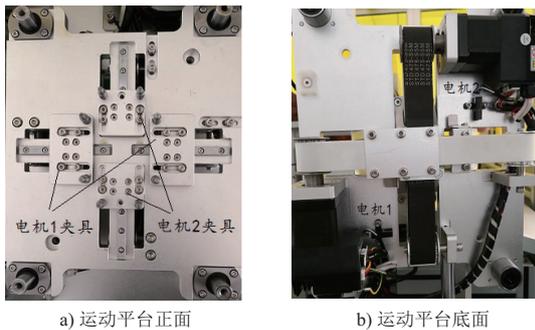
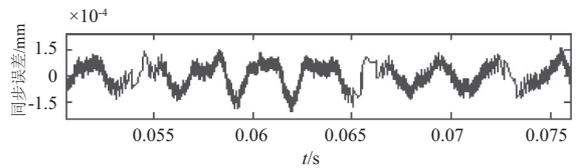


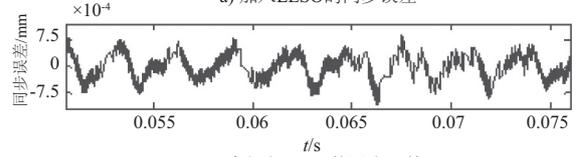
图 10 双电机同步试验平台

在双电机同步运动过程中,读取电机匀速段位置编码器数据得到如图 11 所示的实验数据。

如图 11 所示,当加入 LESO 后双电机运动的最大同步误差由 0.75 mm 变为 0.15 mm。实验结果证明,LESO 在双电机同步控制系统中对减少同步误差达到了明显良好的效果。



a) 加入LESO的同步误差



b) 未加入LESO的同步误差

图 11 匀速段同步误差曲线

4 结语

本文建立了永磁同步直电机的数学模型,并针对双电机同步系统设计了交叉耦合同步控制律。此外,针对永磁同步直线电机模型设计了扩张状态观测器,并将其加入到双电机交叉耦合同步系统中。仿真及实验结果均证明,扩张状态观测器在双电机同步系统中不仅能提高各电机的控制精度,对于提高系统的同步控制精度也有明显的作用。

参考文献:

- [1] 高恒路,桑勇. 同步控制策略及其典型应用的研究[J]. 液压气动与密封,2012,1(5):1-5.
- [2] 彭思齐,戴瑜兴,许海霞. LED 多线切割机自动绕线的并联差分耦合同步控制[J]. 信息与控制,2012,41(5):559-563.
- [3] 王海强,黄海. 扩张状态观测器的性能与应用[J]. 控制与决策,2013,28(7):1078-1082.
- [4] 罗鹏,陈强,周丹. 基于非线性扩张状态观测器的位置伺服控制[J]. 控制工程,2017,24(11):2350-2354.
- [5] 康忠健,陈学允. 非线性扩张状态观测器的一种设计方法[J]. 电机与控制学报,2001,5(3):199-203.
- [6] Du L, Li X, Lei Y, et al. Quasi sliding mode fast maneuver control based on LESO of high agile small satellite [C]//Measurement, Information and Control (ICMIC), 2013 International Conference on IEEE, 2013, 2: 1339-1344.
- [7] He ping L, Zhuang ju L, Yun jian W. A Decoupling Control Method Based on Backstepping Control and ESO Compensation [C]//Optoelectronics and Image Processing (ICOIP), 2010 International Conference on IEEE, 2010, 1: 3-7.
- [8] 唐红雨,陈飞. 多电机同步控制系统设计与实现[J]. 电气传动,2017,47(6):45-49.

收稿日期:2018-06-15