

Disturbance Observer Robust Control for Synchronized Drive of Dual Linear Motors System

Lili Liu

Dept. of Electronic Information Engineering, Suzhou Vocational University, Suzhou, China
szlily2005@yahoo.com.cn

Abstract: Based on synchronization of dual linear motors in the feed direction of gantry moving type boring-milling machining center, disturbance observer control method is proposed to limit the asynchronization of X - drift caused by the parameters variation. Besides, load dynamic compensation of Y- drift is proceeded to decrease disturbance to X- drifts. The results of simulation test indicate that the proposed system has strong robustness and good rapidity, and dynamical synchronous error is small. So this control method can satisfied the demand of the controlled subject for the high precision synchronous control.

Keywords: disturbance observer; linear motor; gantry - moving type boring - milling machining; synchronization control; disturbance template

双直线电机同步驱动系统中干扰观测器鲁棒控制

刘莉莉

苏州职业大学, 苏州, 中国, 215104
Email: szlily2005@yahoo.com.cn

摘要: 针对龙门移动式镗铣加工中心同步传动不一致性问题, 主要采用干扰观测器的控制方案来抑制 X 轴向上的不同步, 同时, 针对 Y 轴方向上的由于刀架位置变化导致的 X 轴方向上的不同步进行了负载动态补偿。仿真结果表明, 此种控制方案鲁棒性强, 动态过程同步误差小, 能够较好地满足被控对象对高精度的要求。

关键词: 干扰观测器; 直线电机; 龙门移动式镗铣加工中心; 同步传动; 扰动

1 引言

对于大型高精度的龙门移动式镗铣加工中心来说, 尽管龙门两侧立柱采用两套完全相同的传动机构, 但由于横梁、刀架等移动部件受力并不总是对称的以及加工过程中各种不确定性扰动, 使得双轴间产生了同步误差, 这将导致同步进给精度与工件的加工质量降低, 甚至造成工件的损坏, 从而难以保证两立柱移动过程的高度一致性, 通常位置同步误差为 $25\sim 35\mu\text{m}$, 不能满足高精度加工 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的加工要求^[1]。因此, 这里的同步控制问题是保证加工精度的关键, 具有非常现实的意义。两台直线电机驱动的龙门移动式镗铣加工中心示意图如图 1 所示。

本文将干扰观测器应用于龙门移动式镗铣加工中心双直线电机驱动的 X 轴方向上, 以抑制外部力矩干扰以及模型参数变化等不确定因素造成的不同步现象。此外, 针对 Y 轴方向上的刀架位置变化而导致的

X 轴方向上的不同步, 依据力矩平衡原理进行了补偿。仿真结果表明此种控制方案具有鲁棒性强, 同步误差小, 反应速度快的优点。

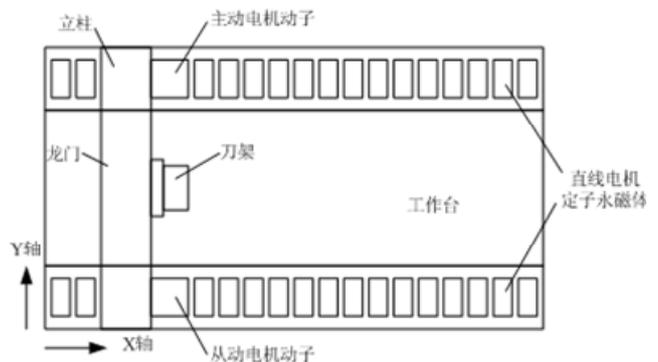


Fig. 1 Diagram sketch of gantry-moving type boring-milling machining center

图1 龙门移动式镗铣加工中心示意图

2 三相直线永磁伺服电机数学模型

本直线永磁同步电机的 $d-q$ 轴模型^[2]电压程及磁链方程为:

$$u_q = R_s i_q + \lambda_q + \frac{\pi}{\tau} v \lambda_d \quad (1)$$

$$u_d = R_s i_d + \lambda_d - \frac{\pi}{\tau} v \lambda_q \quad (2)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{PM} \quad (3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (4)$$

式中, u_d, u_q 分别是 d, q 轴定子电压; i_d, i_q 分别是 d, q 轴电流; L_d, L_q 分别是 d, q 轴电感; λ_d, λ_q 分别是 d, q 轴磁链; R_s 是定子电阻; λ_{PM} 是定子永磁体产生的励磁磁链。

对直线永磁同步电机进行矢量控制, 使定子电流矢量与定子永磁体磁场在空间正交, 即 $i_d = 0$, 则电磁推力 F_e 只与 i_q 成正比, 可得

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} \lambda_{PM} i_q = k_T i_q \quad (5)$$

式中, k_T 是推力系数。

直线永磁同步电机的运动方程为

$$F_e = k_T i_q = F_L + F_E + Dv + m \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

式中, F_L 是负载阻力; F_E 是端部效应产生的等效阻力; D 是粘滞摩擦系数; m 是定子及所带负载的质量。

3 控制系统的设计

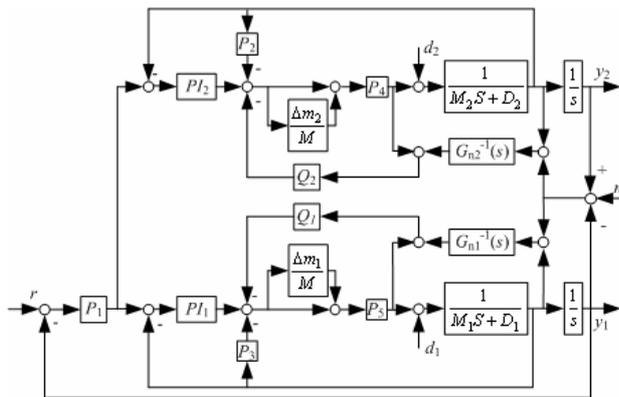


Fig. 2 Simplified schematic of system structure

图2 系统结构原理图

本文采用主从结构, 当主动电机受到外界干扰产生位置同步误差时, 从动电机的速度给定也随之变化, 此做法能够提高控制系统耦合机械的安全性^[3]。在本文中, 将干扰观测器应用于加工中心双直线电机驱动的 X 轴方向上, 以抑制外部力矩干扰以及模型参数变化

等不确定因素造成的不同步现象, 系统结构原理图如图 2 所示。另外, 针对刀架位置变化导致的 X 轴方向上双直线电机的不同步依据力矩平衡原理进行补偿。

3.1 干扰观测器的设计

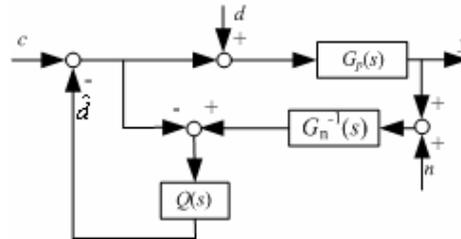


Fig. 3 Block diagram of disturbance observer

图3 干扰观测器结构图

干扰观测器的控制结构如图 3 所示, 其中 d 为系统的外部干扰; \hat{d} 为干扰的估计量; n 为测量噪声; $G_p(s)$ 为实际对象的传递函数; $G_n(s)$ 为标称对象的传递函数, $Q(s)$ 为低通滤波器。为了说明干扰观测器的作用, 先令 $Q(s)=1$ 。当 $Q(s)=1$ 时, 可推导出

$$\hat{d} = (1 - \frac{G_n(s)}{G_p(s)})c + G_n^{-1}(s)n + d \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 当 $G_p(s)=G_n(s)$ 时, 干扰观测器估计出的 \hat{d} 就等于实际的干扰 d 加上测量噪声的影响。当 $G_p(s) \neq G_n(s)$ 时, 干扰观测器估计出的 \hat{d} , 就不只包含真正的干扰 d 加上测量噪声的影响, 还包含系统不确定性造成的等效干扰。

通过干扰观测器补偿后, 系统的输出可表示为

$$y = G_p(s)(c - \hat{d} + d) = G_n(s)c - n \quad (8)$$

从上式可知, 若能消除测量噪声的影响, 则输出与输入之间的关系将成为标称对象。根据图 3, 输出 y 可表示为:

$$y = G_{CY}(s)c + G_{DY}(s)d + G_{NY}(s)n \quad (9)$$

$$G_{CY}(s) = \frac{G_p(s)G_n(s)}{G_n(s) + Q(s)(G_p(s) - G_n(s))}$$

$$G_{DY}(s) = \frac{G_p(s)G_n(s)(1 - Q(s))}{G_n(s) + Q(s)(G_p(s) - G_n(s))}$$

$$G_{NY}(s) = \frac{G_p(s)Q(s)}{G_n(s) + Q(s)(G_p(s) - G_n(s))}$$

如果低通滤波器 $Q(s) \approx 1$, 则 $G_{CY}(s) \approx G_n(s)$,

$G_{DY}(s) \approx 0, G_{NY}(s) \approx -1$, 可见式(8)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 $Q(s) \approx 0$, 那么 $G_{CY}(s) \approx G_P(s), G_{DY}(s) \approx G_P(s), G_{NY}(s) \approx 0$, 这样观测了开环动态。可见通过低通滤波器 $Q(s)$ 的设计可较好地抵抗外加干扰^[4]。

因此, $Q_i(s)$ 的设计是干扰观测器设计中的一个重要环节。首先, 由图可见 $Q_i(s)G_{ni}^{-1}(s)$ 必须是正则的, 所以 $Q_i(s)$ 的相对阶应不小于 $G_{ni}(s)$ 的相对阶; 其次, $Q_i(s)$ 带宽的设计应是在干扰观测器的鲁棒性和干扰抑制能力之间的折中。

$$G_{ni}(s) = \frac{1}{M_0 s}, \quad (i=1, 2) \text{ 其中 } M_0 \text{ 为空载时动子质量。}$$

那么不确定对象的集合可以用乘积摄动来描述, 即

$$G_{pi}(s) = G_{ni}(s)(1 + \Delta(s)), \quad (i=1, 2) \quad (10)$$

式中, $\Delta(s)$ 为可变的传递函数, $G_{pi}(s) = \frac{1}{Ms + D}$ 。由这两个式子可得

因为 M_0 为刀架处于横梁中心时动子的质量, 而 M 为刀架偏离横梁中心时动子的质量。可见, $\Delta(s)$ 可保证是最小相位系统。

由鲁棒稳定性定理, 干扰观测器鲁棒稳定的充分条件是

$$\| \Delta(s) Q_i(s) \|_{\infty} \leq 1 \quad (12)$$

该式是 $Q_i(s)$ 设计的基础, 通过对其的设计, 可实现鲁棒性要求。由于 $\Delta(s)$ 是最小相位系统, 所以 $Q_i(s)$ 的选择就比较容易。

除了考虑干扰观测器的鲁棒性外, 还必须考虑其干扰抑制能力。所以干扰观测器的频带 f_q 的选择也是决定其性能的一个重要因素。在本文中, 干扰观测器的频带 f_q 应在系统同步误差信号频率和测量噪声 n 的频率之间进行选择。

综合以上对鲁棒性和干扰抑制能力的分析, 可得

$$Q(s) = \frac{3\tau + 1}{3\tau^2 s^2 + 3\tau s + 1} \quad (13)$$

其中 τ 的选择可通过仿真确定。

3.2 负载动态补偿的设计

当龙门移动式镗铣加工中心实现二维运动控制时, Y 轴直线上刀架位置变化往往会导致 X 轴双平行直线电机等效惯量的改变, 进而影响 X 轴的同步输出特性。本文提出了一种负载动态补偿的方法, 依据力矩平衡原理, 根据刀架位置变化调整比例增益并补

偿至 X 轴两线电机, 使得系统能够保持较高的同步性能。

当某一直线电机等效惯量增加时, 其控制回路的电流输入至速度输出的传递函数将产生变化, 即

$$\frac{1}{M} \Rightarrow \frac{1}{M + \Delta m_i} \quad (\text{忽略粘滞摩擦系数})$$

本文中所述的负载动态补偿原理就是分别利用一个比例值来调整 X 轴双平行直线电机电流输入至速度输出的传递函数, 使其维持恒定的关系, 即

$$\frac{W}{M} = \frac{W'}{M + \Delta m_i}$$

可得负载动态增益 $W' = (1 + \frac{\Delta m_i}{M})W$ 。式中 W 为一个比例值, 可定义为 1, M 为 Y 轴直线电机动子质量, Δm_i 为等效的补偿量。

如图4所示, 定义长度 a, b, c, x, X 轴上刀架和负载的质量 m_1 。

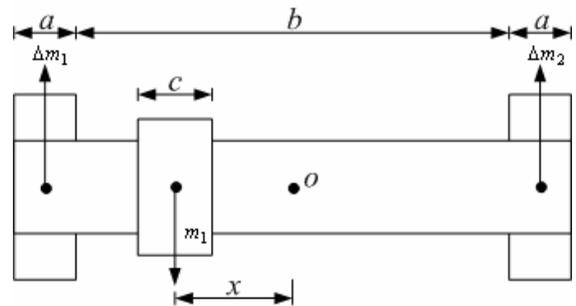


Fig.4 Diagrammatic sketch of torque balance
图4 力矩平衡示意图

设横梁中心点为坐标原点 O , 当位移量为 x 时, 根据力矩平衡原理, 可计算如下

$$m_1 g x = \Delta m_i g \left(\frac{a+b}{2} \right) \quad (14)$$

$$\Delta m_i = \frac{2m_1 x}{(a+b)} \quad (15)$$

当 m_1 向左偏移时 $i=1$, 对主动电机进行补偿; 当 m_1 向右偏移时 $i=2$, 对从动电机进行补偿(可通过再 Y 轴上安装位置传感器来完成)。这样, 通过调整负载动态增益, 使系统仍维持良好的同步响应。

4 系统仿真

本文在空载情况下, 采用两台参数完全相同的直线电机进行了系统仿真, 直线电机参数如下: $m = 11.0 \text{ kg}, D=1.2 \text{ Ns/m}, KT=25 \text{ N/A}, F_{en} = 300 \text{ N}, v_n = 1.0 \text{ m/s}$, 控制器参数由仿真确定。图5为系统在 $t=0.3 \text{ s}$ 时在从动电机轴上突加 80 N 阶跃干扰的情况下, 基于

干扰观测器的控制方案与应用常规的 PID 控制方案的对比曲线。

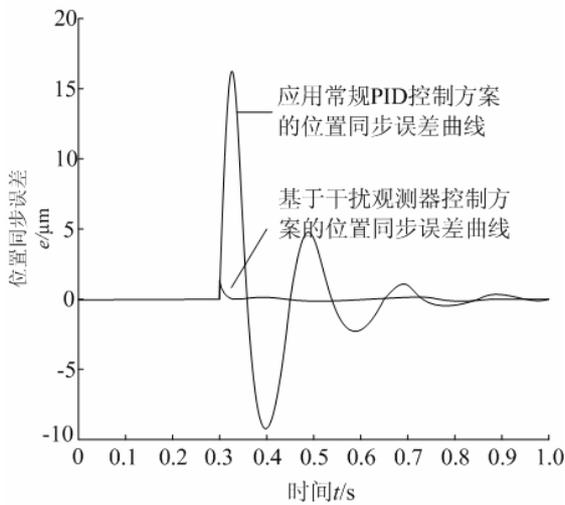


Fig. 5 Position synchronous error comparison of disturbance observer control and normal PID
图 5 输入阶跃干扰位置同步误差的对比曲线

由此可见本文所提方案响应速度快，鲁棒性好，系统在扰动作用下同步误差很小，而且误差很快得到了抑制。位置同步误差可保证 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 的高精度要求。

5 结论

本文在分析重型龙门移动式镗铣加工中心双直线

电机驱动的两轴间不同步的主要原因的基础上，应用了干扰观测器的控制方法来抑制双直线电机驱动的 X 轴方向上的扰动。还针对 Y 轴方向上的由于刀架位置变化导致的 X 轴方向上的扰动进行了负载动态补偿。由仿真曲线可以看到，此种控制方案是行之有效的，具有鲁棒性强，同步误差小，反应速度快的优点，能够较好地满足被控对象对高精度的要求，提高了伺服系统的性能指标。这对提高龙门移动式镗铣加工中心的加工精度有着十分积极的意义。

References (参考文献)

- [1] Qingding Guo, Yibiao Sun, Limei Wang. Modern PMSM and AC-servo system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006. 138-146.
郭庆鼎, 孙宜标, 王丽梅. 现代永磁电动机交流伺服系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 138-146.
- [2] Jiachun Lin, Wei Li, Tong Zhao, et al. Force ripple suppression strategy in permanent magnet linear synchronous motor[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 449-452(Ch).
林家春, 李伟, 赵彤, 等. 永磁直线同步电动机推力波动抑制策略[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(3): 449-452
- [3] Lin F J, Lin C H, Hong C M. Robust control of linear synchronous motor servo drive using disturbance observer and recurrent neural network noncompensator[J]. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 2000, 147(4): 263-272.
- [4] Ximei Zhao, Qingding Guo. Linear servo robust tracking control based on DOB and ZPETC to improve the contour machining precision[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21(6): 111-114(Ch).
赵希梅, 郭庆鼎. 为提高轮廓加工精度采用 DOB 和 ZPETC 的直线伺服鲁棒跟踪控制[J]. *电工技术学报*, 2006, 21(6): 111-114.
- [5] Boldea I, Nasar S A. Linear electric actuators and generators[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.