

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2014.03.028

基于 MPC 和 DOB 的直线伺服控制系统设计

赵希梅^{1,2}, 游健康¹, 李洪谊²

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁沈阳 110870;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁沈阳 110016)

摘要: 数控机床用永磁直线同步电动机 (PMLSM) 在高速度高精度加工时存在的系统滞后、外部扰动、系统参数变化等不确定因素严重影响伺服系统的控制性能。为解决这一问题, 提出将模型预测控制器 (MPC) 和扰动观测器 (DOB) 相结合的预测鲁棒控制系统。采用 MPC 作为前馈控制器, 通过模型预测、滚动优化和反馈校正来提高系统的跟踪性能; 采用 DOB 对外部负载等不确定性扰动进行观测和抑制, 进而提高系统的鲁棒性, 达到同时提高系统跟踪性能和鲁棒性的目的。仿真实验表明: 所提出的控制方法是有效可行的, 明显地提高系统的控制精度。

关键词: 永磁直线同步电动机; 预测控制; 干扰观测器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881 (2014) 3-101-3

Design of Linear Servo Control System Based on MPC and DOB

ZHAO Ximei^{1,2}, YOU Jiankang¹, LI Hongyi²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning 110870, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China)

Abstract: For NC machine with permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM), in the high speed and high precision machining, uncertain factors seriously affect the control performance of the servo system, such as the system decay, the external disturbances, parameter variations and so on. The predictive robust control system was proposed based on combining the model predictive controller (MPC) with disturbance observer (DOB). The MPC was used as the feedforward controller, through model prediction, rolling optimization and feedback correction to improve the tracking performance of the system; DOB was used to observe and suppress external load uncertainty disturbance. So the robustness of the system is improved, to achieve the objective of improving system tracking performance and robustness. Simulation results show that the proposed method is feasible and effective, can obviously improve the control precision of the system.

Keywords: Permanent magnet linear synchronous motor; Predictive controller; Disturbance observer

在现代数控机床中, 要实现高速度、高精度的加工, 必须要依靠刀具、丝杠、转轴以及控制系统的良好配合^[1]。传统的依靠旋转电机带动丝杠实现直线运动很难实现高速度的加工, 直线电机由于省去了中间的转换机构, 直接驱动被控对象, 提高了加工效率, 广泛应用于现代数控加工设备中^[2-3]。然而直线电机省略了丝杠等传动机构, 任何外部的扰动都会直接加载到负载上, 增加了控制难度。另外, 系统的运行过程中需要一定的时间进行数据传输, 位置输出不能实时跟踪给定信号, 产生了时间的延迟^[4]。针对 PMLSM 存在的系统延迟、系统参数变化、外部扰动等不确定因素的影响, 提出一种基于 MPC 和 DOB 的

预测鲁棒控制系统。MPC 有着对模型参数要求不高的特点, 通过对系统的模型预测、滚动优化、反馈校正提高系统的跟踪性能。DOB 将系统参数变化及外部扰动等造成的实际被控对象与名义模型输出间的差异等效到控制的输入端, 观测出等效干扰, 在控制中引入等效补偿, 实现对扰动的抑制。这样用 MPC 提高系统的跟踪性能, 用 DOB 提高系统的鲁棒性能, 进而提高系统的控制精度。

1 直线伺服控制系统设计

基于 MPC 和 DOB 的预测鲁棒控制系统框图如图 1 所示。图中点划线框部分为 DOB, $w(k)$ 为系统的输入信号, $u(k)$ 为控制器的输出信号, $y(k)$ 为系统的位

收稿日期: 2013-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51175349); 国家自然青年科学基金项目 (61105099); 沈阳市科技计划项目 (F12-277-1-70)

作者简介: 赵希梅 (1979—), 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为直线伺服、数控技术等。E-mail: zha-oximei79@yahoo.com.cn。

置输出。

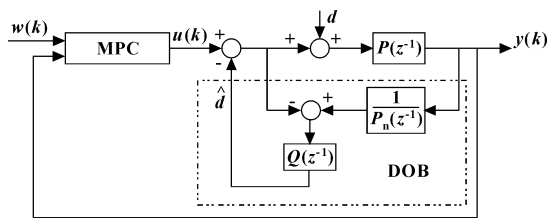


图 1 基于 MPC 和 DOB 的预测鲁棒控制系统框图

1.1 预测控制器设计

预测控制由内部模型、反馈校正和滚动优化等几个部分组成^[5]。预测控制能够根据电机过去和未来的输入输出状态和系统的内部模型，预测电机未来的输出状态。用模型输出的误差实现反馈校正后，再与系统的参考轨迹进行比较，并应进行滚动优化，然后计算出当前时刻加于被控系统的控制量，完成整个动作循环。

根据 PMLSM 的动力学模型，其位置信号的数学模型可表示为二阶传递函数：

$$P(s) = \frac{1}{as^2 + bs} \quad (1)$$

由于 MPC 是在离散条件下进行设计的，首先将式 (1) 转换为离散形式：

$$y(k) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k-1) \quad (2)$$

其中：d 为系统的时间延迟，多项式 A(z⁻¹) 和 B(z⁻¹) 分别为：

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{n_A}z^{-n_A}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{n_B}z^{-n_B}$$

其中：n_A 和 n_B 为多项式 A(z⁻¹) 和 B(z⁻¹) 的阶数。

系统在 t = k + i 时刻的输出为：

$$y(k+i) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k+i-1) \quad (3)$$

根据 MPC 设计原理将其表示为受控自回归积分滑动平均模型形式：

$$\hat{y}(k+i) = z^{-d}\hat{B}u(k+i-1) - z(\hat{A}-1)\hat{y}(k+i-1) \quad (4)$$

式中：^表示输出的估计值。

将式 (4) 中 z(\hat{A}-1)\hat{y}(k+i-1) 代入到等式左边得到受控自回归积分滑动平均模型：

$$\hat{A}\hat{y}(k+i) = z^{-d}\hat{B}u(k+i-1) \quad (5)$$

引入丢番图方程：

$$\frac{1}{\hat{A}} = E_i + z^{-i}\frac{F_i}{\hat{A}} \quad (6)$$

$$E_i\hat{A} = 1 - z^{-i}F_i \quad (7)$$

其中：E_i 的阶数小于等于 i - 1，且 F_i 的阶数为 n_A - 1。

将式 (5) 的两边同时乘以 E_i 得：

$$\hat{y}(k+i) = z^{-d}E_i\hat{B}u(k+i-1) + F_i\hat{y}(k) \quad (8)$$

用式 (8) 代替式 (4) 后可消除估计值和实际值间的差，这样使得实际值与估计值的输出相等，因此，用 y(k) 替换式 (8) 中的 \hat{y}(k) 得：

$$\hat{y}(k+i) = z^{-d}E_i\hat{B}u(k+i-1) + F_iy(k) \quad (9)$$

另外，将式 (6) 两边同时乘以 \hat{B} 得：

$$E_i\hat{B} = \frac{\hat{B}}{\hat{A}} - z^{-i}\frac{F_i\hat{B}}{\hat{A}} \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (8) 中得：

$$\hat{y}(k+i) = \frac{z^{-d}\hat{B}}{\hat{A}}u(k+i-1) + F_i[y(k) - \hat{y}(k)] \quad (11)$$

式 (11) 即为模型预测第 k + i 步的输出预测值。

然后将前 i 步的预测值代入到如下目标函数中：

$$J = \sum_{i=1}^n [y(k+i) - w(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^m \lambda u^2(k+i-1) \quad (12)$$

其中：w 为参考输入的信号，n 为最大预测长度，m 表示控制长度，λ 为加权系数。由于直线电机数学表达式为二阶，采用 2 步预测，则目标函数可表示为：

$$J = [\hat{y}(k+2) - w(k+2)]^2 + [\hat{y}(k+1) - w(k+1)]^2 + \lambda u^2(k+1) + \lambda u^2(k) \quad (13)$$

目标函数 J 分别对 u(k)、u(k+1) 求微分并使其为 0，就可以求出下一步控制器输出 u(k) 的值。

1.2 DOB 设计

DOB 的设计原则是将电机参数变化及外部扰动造成的实际被控对象与名义模型输出差异等效到控制的输入端，即观测出等效扰动，这样就在控制中引入了等效补偿，扰动被完全抑制。其结构框图如图 2 所示。

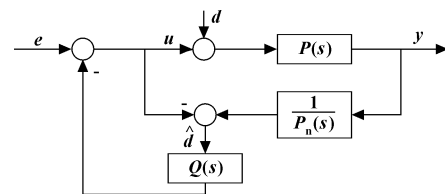


图 2 DOB 结构框图

图中 P(s) 表示电机的传递函数，P_n(s) 表示电机的参考模型，Q(s) 为低通滤波器，d 为外部的扰动，\hat{d} 为外部扰动的估计值。

假设低通滤波器 Q(s) = 1，则控制器 U(s) 及输出 Y(s) 为：

$$U(s) = \frac{P_n(s)}{P(s)}E(s) - D(s) \quad (14)$$

$$Y(s) = P(s) [U(s) + D(s)] \quad (15)$$

将式 (14) 代入式 (15) 得:

$$Y(s) = P_n(s) E(s) \quad (16)$$

从式 (16) 中可以看出, 系统的干扰和参数变动都已经被 DOB 补偿了, 然而在实际的操作中由于 $1/P_n(s)$ 是无法实现的, 因此, 假设的 $Q(s) = 1$ 是不能够实现的, 需要在干扰观测器中使用低通滤波器 $Q(s)$, 这样 $1/P_n(s)$ 才能实现。 $Q(s)$ 的选择必须能够使控制器内部稳定并降低控制器内部扰动, 所以, DOB 主要是针对滤波器进行设计。

系统内部的稳定需要满足以下条件:

$$Q(s) \in RH_\infty, Q(s)/P_n(s) \in RH_\infty \quad (17)$$

假设 $P(s) = P_n(s)$, 则内部开环增益为 $Q(s)/(1 - Q(s))$, 之后引入灵敏度函数, 这样可以直观看出系统的设计过程。内部回路的灵敏度函数 $S(s)$ 为 $S(s) = 1 - Q(s)$, 互补灵敏度函数 $T(s) = Q(s)$, 其中 $T(s)$ 表示系统能够承受的干扰。

在理论上, DOB 的响应速度会随着 $Q(s)$ 带宽增宽和阶数提高而加快, 这样就会有更好的扰动抑制效果, 电机对扰动的灵敏度就会越低。但是当阶数升高时, 由于大的相位滞后, 会使得系统产生大的欠阻尼现象, 系统运行会变得更加不稳定^[6]。因此, 使 DOB 具有好的稳定性和动态性能是 $Q(s)$ 设计的关键。首先, $Q(s)$ 的相对阶数不能小于 $P_n(s)$ 的相对阶数, 根据经验选择如下:

$$Q(s) = \frac{1 + 3\tau s}{1 + 3\tau s + 3(\tau s)^2 + (\tau s)^3} \quad (18)$$

由于系统是在离散条件下运行的, 因此将其转换为离散形式, 表示如下:

$$Q(z^{-1}) = \frac{b_{q0}z^{-1} + b_{q1}z^{-2} + b_{q2}z^{-3}}{1 + a_{q1}z^{-1} + a_{q2}z^{-2} + a_{q3}z^{-3}} \quad (19)$$

2 仿真与分析

为了验证所提出的方案的有效性, 对预测鲁棒控制系统进行仿真实验, 其中采样时间为 0.005 s, MPC 中取 $\lambda = 0.000\ 001$, DOB 中取 $\tau = 0.000\ 1$ 。将预测鲁棒控制系统与 PID 控制器进行对比, 首先分别对 PID 控制和预测鲁棒控制系统输入幅值为 1、周期为 π 的正弦信号, 得到基于 PID 控制器的正弦跟踪误差曲线如图 3 所示, 基于 MPC 和 DOB 控制的正弦跟踪误差曲线如图 4 所示。从图中明显看出: 基于 MPC 和 DOB 的系统误差远远小于基于 PID 控制的系统误差。

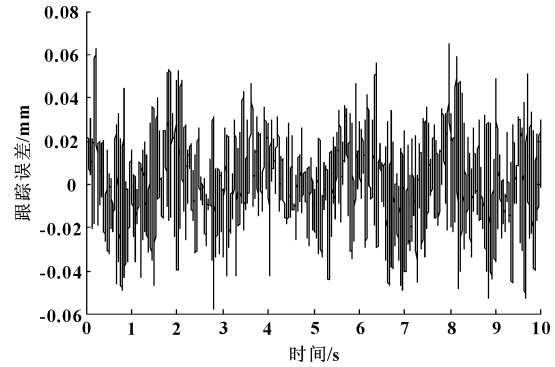


图 3 基于 PID 控制器的正弦跟踪误差曲线

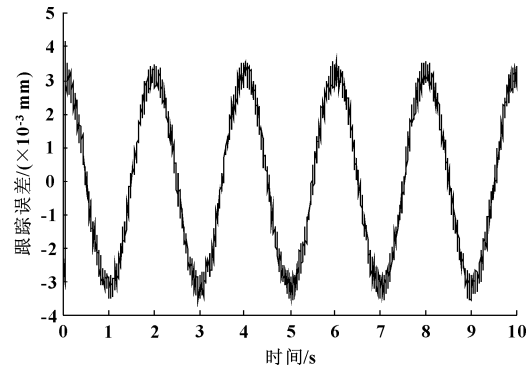


图 4 基于 MPC 和 DOB 控制的正弦跟踪误差曲线

3 结论

针对 PMLSM 伺服系统中存在的系统延迟、外部负载扰动等诸多不确定因素的影响, 设计了一种预测鲁棒控制系统, 用 MPC 通过模型预测、滚动优化和反馈校正提高系统的跟踪性能, 用 DOB 提高系统的鲁棒性, 实现对直线伺服系统的鲁棒跟踪控制, 大大改善系统的控制精度, 进而减小了实际加工中的轮廓误差。

参考文献:

- [1] 唐振宇, 李锻能. 高速加工与直线电机在数控机床的应用[J]. 机电工程技术 2005 34(11): 72 - 69.
- [2] 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.
- [3] 赵希梅, 郭庆鼎. 基于扰动观测器和重复控制器的永磁直线同步电动机鲁棒控制[J]. 电机工程学报 2010 30(15): 64 - 69.
- [4] 李国勇. 智能预测控制及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 电子工业出版社 2010.
- [5] ERROUSSI R, OUHROUCHE M. Nonlinear Predictive Controller for a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2010 81(2): 394 - 406.
- [6] TAN K K, LEE T H. Precision Motion Control with Disturbance Observer for Pulse Width-modulated-driven Permanent Magnet Linear Motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics 2003 39(3): 1813 - 1818.