

直线电机的非参数模型直接自适应预测控制

曹荣敏¹, 侯忠生²

(1. 北京机械工业学院 计算机及自动化系, 北京 100085; 2. 北京交通大学 先进控制系统研究所, 北京 100044)

摘要: 将基于紧格式线性化的非参数模型直接自适应预测控制方法应用到直线电机速度和位置控制中. 控制器的设计是直接基于伪偏导数的估计和预报, 而伪偏导数信息则是通过参数估计算法和预报算法利用 I/O 数据在线导出. 仿真演示了该方法对电机这种不确定动态非线性系统的有效性和抗干扰能力.

关键词: 非参数模型; 自适应控制; 自适应预测控制; 永磁直线电机; 鲁棒性

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Nonparametric model direct adaptive predictive control for linear motor

CAO Rong-min¹, HOU Zhong-sheng²

(1. Department of Computer & Automation, Beijing Institute of Machinery Industry, Beijing 100085, China;

2. Advanced Control Systems Laboratory, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In this paper, the nonparametric model direct adaptive predictive control approach is applied to linear motor speed and position control based on the dynamic linearization of tight format of a class of SISO nonlinear systems. The design of controller is directly based on the estimate and prediction of pseudo-partial-derivatives (PPD) derived on-line from the I/O data of the motor motion using the parameter estimation algorithm and prediction algorithm. The effectiveness and the anti-disturbance are demonstrated for the linear motor nonlinear systems with vaguely known dynamics by simulation examples using MATLAB.

Key words: nonparametric model; adaptive control; adaptive predictive control; permanent magnet linear motor; robustness

1 引言(Introduction)

自适应控制器的设计和实现在能够线性动态建模的系统中已成功应用. 目前这个领域的焦点更多的集中在非线性系统自适应控制器的设计方面^[1].

非参数模型直接自适应预测控制^[2]算法是将预测控制应用在一般的非线性系统的自适应控制中, 通过引入伪偏导数(pseudo-partial-derivative, PPD)的概念, 用紧格式线性化的动态线性时变模型来替代一般非线性系统, 利用受控系统的 I/O 数据通过参数估计算法在线估计伪偏导数, 并根据伪偏导数的估计值利用某种预报算法对将来的 PPD 进行预测, 再通过滚动优化实现控制律. 基于非参数模型及其自适应控制的应用, 详细内容及研究进展见文献^[1~4].

众所周知, 直线电机正广泛应用于工业及交通领域中^[5]. 目前对直线电机的控制已经有了一些有效

的控制方法^[1,6], 然而它们的应用都是基于受控系统精确数学模型的控制理论和方法, 模型的好坏对控制系统的影响非常大.

本文将非参数模型直接自适应预测控制方法应用于直线电机的速度和位置控制中, 由于该方法无需受控系统的数学模型, PPD 的估计和预测仅需要受控系统的 I/O 数据, 与经典的自适应控制系统设计相比具有在线估计参数少、设计简单、鲁棒性强、易于实现等特点.

2 永磁直线电机的模型 (Permanent magnet Linear motor model)

描述永磁直流直线电机运动方程的非线性时变模型为^[1]

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= v(t), \\ u(t) &= m\dot{v}(t) + f_{\text{load}}(t) + f_{\text{friction}}(\dot{x}) + \end{aligned} \quad (1)$$

$$f_{\text{ripple}}(x) + w(t). \quad (2)$$

其中: f_{load} 为负载力(N), f_{friction} 为摩擦力(N), f_{ripple} 为推力脉动(N), $u(t)$ 为推力(N), m 为质量(kg), $w(t)$ 为其他干扰, $x(t)$ 为位置(m), $v(t)$ 为速度(m/s), t 是连续时间(s).

$$f_{\text{friction}} = (f_c + (f_s - f_c)e^{-(\dot{x}/\dot{x}_s)^\delta} + f_v \dot{x}) \text{sgn } \dot{x}. \quad (3)$$

其中: f_s 为静态摩擦力, f_c 为库仑摩擦力的最小值, $\dot{x}_s$ 为实验测得的润滑参数, f_v 为实验测得的负载参数, δ 为附加的经验参数, 仿真时取为1.

由电机结构中的齿槽效应和磁阻而产生的脉动力建模如下^[1]:

$$f_{\text{ripple}} = b_1 \sin(w_0 x). \quad (4)$$

其中: b_1 为振幅, w_0 为角速度, 仿真时取为 $b_1 = 8.5 \text{ N}$, 周期取大约 7 mm .

直线电机位置和速度的期望轨迹设计如下:

$$x_d(\tau) = x_0 + (x_0 - x_f)(15\tau^4 - 6\tau^5 - 10\tau^3), \quad (5)$$

$$v_d(\tau) = (x_0 - x_f)(60\tau^3 - 30\tau^4 - 30\tau^2). \quad (6)$$

其中: $\tau = t/(t_f - t_0)$, x_0 是初始位置, x_f 是终止位置, 仿真时取 $x_0 = 0$, $x_f = 0.2 \text{ m}$, $t_f = 1 \text{ s}$.

从模型可知, 由于直线电机直接驱动负载, 负载的变化和外部扰动将直接影响伺服系统的性能. 推力纹波的产生、系统参数的变化、摩擦阻力的非线性变化以及状态的观测噪声等都会降低系统的伺服性能^[7]. 为了保证系统具有快速跟踪性能, 且对不确定扰动因素具有较强的鲁棒性, 非参数模型控制方法不失为较好的选择.

3 非参数模型直接自适应预测控制器设计与参数整定(Design of nonparametric model direct adaptive predictive control and parameter tuning)

基于文献[2]的紧格式线性化理论和方法, 一般离散时间非线性系统可以转换为线性系统, 当 $\Delta u(k) \neq 0$ 时, 一定存在伪偏导数 $\phi(k)$, 使得

$$y(k+1) = y(k) + \phi(k)\Delta u(k), \quad (7)$$

并且 $|\phi(k)| \leq b$, b 是常数, $\phi(k)$ 是时变参数, $y(k)$, $u(k)$ 分别表示系统 k 时刻的输入与输出.

3.1 控制方案设计(Design of control scheme)

式(7)即为非线性系统的向前1步的预报方程, 依次可以得到向前2步、3步... N 步的预报方程, N (预报区段)步输出预报方程为

$$Y(k+1) = E(k)y(k) + A_1(k)U_1(k). \quad (8)$$

其中 N_u 为控制时域.

$$Y(k+1) = [y(k+1), \dots, y(k+N-1)]^T,$$

$$U_1(k) =$$

$$[\Delta u(k), \dots, \Delta u(k+N_u-1), 0, \dots, 0]_{N_u \times 1}^T,$$

$$E(k) = [1, \dots, 1]_{N \times 1}^T,$$

$$A_1(k) =$$

$$\begin{bmatrix} \phi(k) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \phi(k) & \phi(k+1) & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi(k) & \dots & \phi(k+N_u-1) & & \\ \vdots & & \vdots & & 0 \\ \phi(k) & \phi(k+1) & \phi(k+N_u-1) & \phi(k+N_u-1) \end{bmatrix}_{N \times N}.$$

伪偏导数估计算法为^[2]

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + \frac{\eta_k \Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u(k-1)^2} (\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1)\Delta u(k-1)), \quad (9)$$

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(1), \text{ 若 } \hat{\phi}(k) \leq \varepsilon \text{ 或 } |\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon. \quad (10)$$

其中: $\eta_k \in (0, 1)$, μ 是权重因子, ε 是充分小的正数, $\hat{\phi}(1)$ 是 $\hat{\phi}(k)$ 的初值.

伪偏导数预测算法为^[2]

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(k+i) = & \theta_1 \hat{\phi}(k+i-1) + \theta_2 \hat{\phi}(k+i-2) + \dots + \\ & \theta_{n_p}(k) \hat{\phi}(k+i-n_p). \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $\theta_i (i = 1, 2, \dots, n_p)$ 是系数, n_p 是预测阶数.

$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n_p})^T$ 的估计值确定方法为

$$\begin{aligned} \theta(k) = \theta(k-1) + & \frac{\hat{\Phi}(k-1)}{\delta_1 + \|\hat{\Phi}(k-1)\|^2} \times \\ & [\hat{\phi}(k) - \hat{\Phi}^T(k-1)\theta(k-1)]. \end{aligned} \quad (12)$$

其中: $\hat{\Phi}(k-1) = (\hat{\phi}(k-1), \hat{\phi}(k-2), \dots, \hat{\phi}(k-n_p))^T$, δ_1 是一小正数, 可取 $\delta_1 \in (0, 1]$.

根据控制目标函数, 经过优化推导得到预测控制律如下:

$$\begin{aligned} U_1(k) = [A_1^T(k)A_1(k) + \lambda I]^{-1} A_1^T(k) \times \\ [Y^*(k+1) - E(k)y(k)], \end{aligned} \quad (13)$$

$$u(k) = u(k-1) + g^T U_1(k). \quad (14)$$

其中: $Y^*(k+1) = [y^*(k+1), \dots, y^*(k+N)]^T$, $g = [1, 0, \dots, 0]^T$, λ 是权重因子.

至此控制方案可以实现. 控制器的结构用图1来表示, 直线电机的期望输出是期望速度 v_d 和期望位置 x_d , $y(k+1)$ 是实际的速度或位置输出, $u(k)$ 是系统控制中的推力, k 是采样时刻. 当控制启动时, 预测输出的初值取为测得的实际输出.

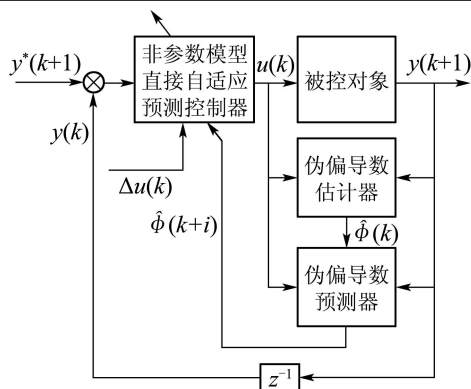


图1 非参数模型直接自适应预测控制框图

Fig. 1 Block diagram of NMDAPC

注1 式(10)是为了使参数估计算法具有更强的时变参数跟踪能力。

注2 时变参数估计是为了弥补模型的变化, 而参数预测则是基于过去的变化来预测将来的作用。

注3 根据给出的直线电机的输入输出信息通过式(9)在线估计 $\hat{\phi}(k)$, 并通过预报算法式(11)对 $\hat{\phi}(k+i)$ 进行预测。

注4 将其作用于非参数模型自适应控制器通过式(13和(14)得到优化控制律 $u(k)$, 再通过式(8)进行未来输出 $\hat{y}(k+i)$ 的预测。

注5 把新的时刻重新定义为 k 时刻, 则预测初值的前 N 个分量将与期望输出一起, 在预报时变参数 $\hat{\phi}(k), \dots, \hat{\phi}(k+N_u-1)$ 的基础上, 参与新时刻控制量的计算, 如此循环进行, 以实现在线滚动优化控制。

3.2 初值选取及参数设定(Choice of the initial values and parameter tuning)

此控制方案在线调整的参数是 N_u 个。

控制时域 N_u 的选取: $N_u \leq N$, 简单系统可取为1, 复杂对象需适当增加 N_u 以得到满意的过渡过程及跟踪性能。

伪偏导数初值的选取: 一般 $\hat{\phi}(1) > 0$, 因为当系统控制输入 $u(k)$ 增加时, 下一时刻系统输出应该是至少不减的。

预测时段 N 的选取: 应该大到对象动态特性能充分表现出来, 一般设置为4~10。

λ 的选取: 可以是任意的正数, 一般有 λ 越大, 系统响应越慢, 超调越小, 稳定性越好; 反之则相反。 λ 是一个重要的参数, 它的选取可以改变闭环系统的动态特性。

预测阶数 n_p 的选取: 该参数即为AR模型的阶数, 推荐的实际应用值为2~7, 仿真时取为3。

4 仿真研究(Simulation study)

仿真环境为: $f_{\text{load}} = 5 \text{ N}$, $w(t)$ 为幅值5 N的白噪

声干扰。

直线电机的模型仅用于受控系统I/O数据的产生, 不参加控制器的设计, 仿真初值设为

$$\begin{aligned} u(1) &= u(2) = u(3) = 12, \\ y(1) &= y(2) = y(3) = y(4) = 0, \\ \hat{\phi}(1) &= 1, \hat{\phi}(2) = 0.5, \hat{\phi}(3) = 0.1, \\ \hat{\phi}(4) &= [0.1, 0.2, 0.4]^T, \\ N &= 5, n_p = 3, N_u = 5, \eta_k = 1, \end{aligned}$$

采样周期为0.001 s, $\varepsilon = 10^{-5}$, $\delta_1 = 1$ 。仿真中的横坐标均为采样点标注, 伪偏导数是无单位量。

情形A NMDAPC仿真。

电机带载并加入白噪声干扰, 导致速度超调增大, 位置误差也加大。设置权重因子 $\mu = 1$, 调节参数 $\lambda = 1.6$, 仿真结果如图2所示, 具有较好的跟踪效果, 系统稳定性好。

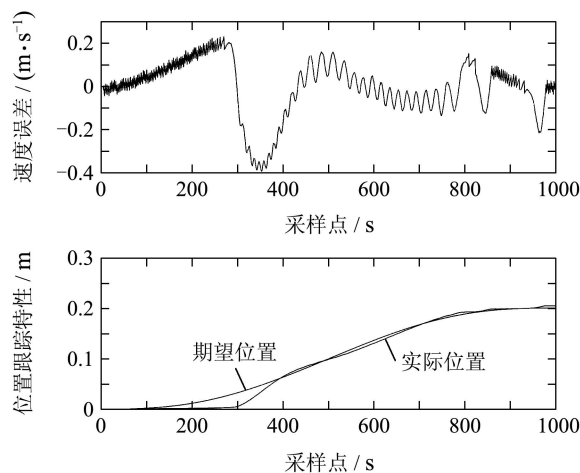


图2 非参数模型直接自适应预测控制仿真

Fig. 2 Simulation for NMDAPC

其他参数不变, 减小 λ , 速度超调增大, 延迟减小; 增大 λ 延迟增大。整个调节过程位置跟随变化不大, 调节区域可从0.6~9之间选取, 可见 λ 的选取具有不敏感性, 调节容易, 这在实际应用中是非常重要的。

情形B PID控制。

当系统空载且无外部干扰和噪声时, PID控制效果与非参数模型控制差别不大, 但PID参数调整非常敏感, 稍微的变化都可能使控制效果不好。带负载且加入干扰, 再调节PID参数到最佳时, $K_p = 0.15$, $K_i = 10$, $K_d = 0.5$, 速度和位置仍然有较大的波动, 系统不稳定, 如图3所示。

两种方案的比较结果: PID方案的速度误差明显大于非参数模型方案, 在接近第400个采样点(4 s)时, 速度误差达到了0.8 m/s, 且整个控制过程均不能减

小. 而非参数模型方案的最大速度误差只有0.4m/s, 虽然速度误差在开始阶段较大, 但在500个采样点后(5s)后保持很小. 此外非参数模型方案的位置跟踪特性在400个采样点(4s)后平滑跟踪, 而PID的位置跟踪特性则在整个控制过程中出现振荡, 这在电机的实际应用中将会造成设备的磨损, 使系统不稳定, 不能实现精确的控制.

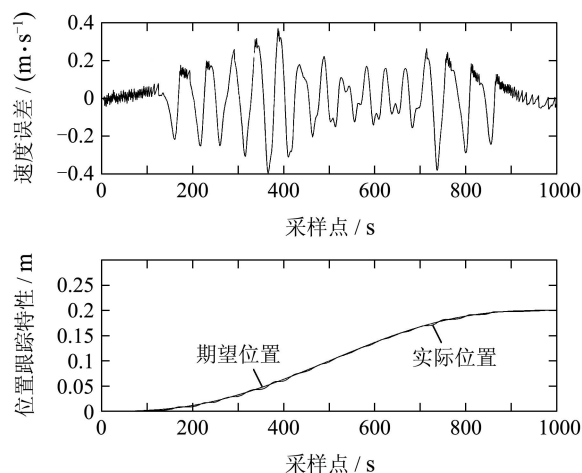


图3 PID控制仿真

Fig. 3 Simulation for PID

5 结论(Conclusion)

1) 增大控制时域 N_u 和预测时段 N 以及预测阶数 n_p , 对参数变化的敏感性降低, 有利于系统的控制. 但系统控制精度变化不大, 而伪偏导数估计和预测过程随其增大却更加复杂.

2) 主要调节参数 λ 的不同, 可以改变系统的动态性能, 但控制效果对其变化不敏感, 单调下降地调节 λ 非常方便. 由于该方案调节参数少, 所以在控制

应用中便于使用 and 实现.

参考文献(References):

- [1] TAN K K, LEE T H, HUANG S N, et al. Adaptive predictive control of a class of SISO nonlinear systems[J]. *Dynamics and Control*, 2001, 11(2): 151 – 174.
- [2] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
(HOU Zhongsheng. *Nonparametric Model and Its Adaptive Control Theory*[M]. Beijing: Science Press, 1999.)
- [3] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状和展望[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 586 – 592.
(HOU Zhongsheng. The state of the art and perspective of model-free adaptive control[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(4): 586 – 592.)
- [4] ZHANG Bin, ZHANG Weidong. Adaptive predictive functional control of a class of nonlinear systems[J]. *ISA Transactions*, 2006, 45(2): 175 – 183.
- [5] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
(YE Yunyue. *Linear Motor Principle and Application*[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2000.)
- [6] 雷春林, 吴捷, 陈渊睿, 等. 自抗扰控制在永磁直线电机控制中的应用[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 423 – 428.
(LEI Chunlin, WU Jie, CHEN Yuanrui, et al. Auto-disturbance-rejection controller used in permanent-magnet linear motor control system[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(3): 423 – 428.)
- [7] TAN K K, DOU H F. High precision linear motor control via relay-tuning and iterative learning based on zero-phase filtering[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, 9(2): 244 – 253.

作者简介:

曹荣敏 (1964—), 女, 硕士, 副教授, 目前研究方向为计算机控制技术及应用、电气控制、无模型控制方法应用, E-mail: rongmin_cao@yahoo.com.cn;

侯忠生 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究领域为无模型自适应控制理论、学习控制、智能交通系统、智能信息处理等, E-mail: houzhongsheng@china.com.