

数据驱动无模型自适应直线伺服系统精密控制和实现

曹荣敏^{1,2}, 周惠兴¹, 侯忠生³

(1. 中国农业大学 工学院 精密工程研究中心, 北京 100083;

2. 北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192; 3. 北京交通大学 先进控制系统研究所, 北京 100044)

摘要: 针对现代制造业对高精度机床伺服系统的要求, 将数据驱动无模型自适应控制方法应用到直线伺服系统的位置控制中, 控制器设计不包括直线伺服系统结构的任何信息, 是直接基于动态线性化模型中伪偏导数的估计和预报, 而伪偏导数是根据直线电机电压输入和位置输出在线估计的. 永磁同步直线电机运动控制系统的实时实验结果表明, 在相同条件下, 数据驱动无模型自适应控制方法的位置跟踪误差比PID减小了0.4 mm到2.6 mm, 比神经网络控制时减小了0.2 mm到0.5 mm. 该方法还提高了对负载扰动的鲁棒性.

关键词: 数据驱动控制; 无模型自适应控制; 精密运动控制; 永磁同步直线电机; 鲁棒性

中图分类号: TP273 TM359.4 **文献标识码:** A

Data-driven model-free adaptive precision control for linear servo system

CAO Rong-min^{1,2}, ZHOU Hui-xing¹, HOU Zhong-sheng³

(1. Precision Engineering Research Center, School of Industry, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

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

Abstract: To meet the requirements on the high-precision tool-servo system in modern manufacturing industry, we propose a data-driven model-free adaptive control (MFAC) method to control the position of this system. The design of controller requires no structure information of the linear servo system, but makes use of the estimated and predicted pseudo-partial derivatives (PPD) of the dynamic linearization model, that are obtained online from the input-voltage and the output-position of the linear motor. Under the same conditions in real experiments, this method brings about a position-tracking error which is 0.4 mm to 2.6 mm smaller than that of the PID method, and 0.2 mm to 0.5 mm smaller than that of the neural networks (NN) method. The robustness against the load disturbance is also improved.

Key words: data-driven control; model-free adaptive control; precision motion-control; permanent magnet synchronous linear motor (PMSLM); robust

1 引言(Introduction)

直线电机及其伺服驱动控制技术在机床进给上的广泛应用, 使机床的传动结构出现了重大变化^[1-2]. 但是, 直线电机运行时参数的变化及导轨摩擦力的产生、内部存在的齿槽效应和端部效应^[3-4]等都给直线伺服进给机构的控制带来困难. 要克服以上问题, 除研究和采用高性能的硬件外^[1-2], 先进的控制策略必须要对这些扰动予以抑制或补偿^[5-8]. 自适应鲁棒控制方法虽然使系统对外部扰动和参数摄动不敏感, 能够提高电机动态刚度抑制扰动影响, 却很难实现对永磁同步直线电机(PMSLM)非线性的完全补偿, 同时由于算法的复杂性、控制参数收敛慢限制了其在实时性要求很高的直线伺服系统中的应用^[4-5]. PID控制方法由于缺乏快速抑制扰

动的能力而难以适应精密位置跟踪的要求^[6]. 扰动观测器的方法可以补偿一定带宽内的扰动, 但这需要确定系统准确的数学模型^[7]. 神经网络控制因仅用受控系统I/O数据来设计控制器而得到广泛应用, 但需要进行离线与在线系统辨识, 计算量大, 且须知受控系统的阶数、模型等先验知识^[8]. 为此构造精密直线伺服系统中安全的不依赖于系统模型的控制器对实际中的成功应用至关重要.

数据驱动控制方法是指控制器设计不包含受控过程数学模型信息, 仅利用受控系统的在线和离线I/O数据以及经过数据处理而得到的信息来设计控制器, 并在一定的假设下, 有收敛性、稳定性保障和鲁棒性结论的控制理论与方法^[9-10]. 无模型自适应控制(model-free adaptive control, MFAC)^[11-12]是典型

的数据驱动控制方法之一。

本文设计了数据驱动的无模型自适应直线伺服系统控制方案, 理论分析和实验研究验证了该方法对抑制系统干扰的有效性和系统动态参数变化时的鲁棒性, 该方案的应用能够实现直线伺服系统的精密位置控制。

2 直线电机伺服系统工作原理(Operation principle of PMSLM servo system)

直线伺服系统硬件设备见图1所示。



图1 直线伺服系统硬件设备

Fig. 1 Configuration for linear servo system

该系统是郑州微纳科技有限公司研发的直线电

机精密运动平台, 由U型永磁同步直线伺服电机、机械运动平台、精密线性导轨、光栅编码器检测装置和数字伺服驱动器构成。永磁同步直线电机的最大速度为1 m/s, 最大加速度为60 m/s², 最大行程为380 mm, 额定推力为30 N, 峰值推力为80 N。

本文设计的无模型自适应直线伺服系统是一个双闭环系统。速度内环由以色列Elmo公司开发生产的直线电机伺服驱动器内部实现, 位置外环由MFAC方案实现。系统工作原理如图2所示。系统工作过程如下:

Step 1 在PC机上将设计好的MFAC算法通过MATLAB/Simulink搭建, 将输入、输出接口替换为cSPACE的Simulink硬件模块, 运行编译模块将MFAC算法自动生成DSP代码, 通过PC机的USB接口将代码下载到cSPACE控制卡上的DSP中。

Step 2 cSPACE硬件在回路(hardware-in-loop, HIL)控制卡通过光栅编码器采集直线电机位置信号, 与期望正弦位置输入信号比较得到误差信号, 误差信号经过DSP中的MFAC算法运行后得到电压控制信号, 通过D/A转换送往直线电机伺服驱动器。其中位置检测装置光栅的分辨率为5 μm。

Step 3 来自cSPACE控制卡的控制信号, 经过直线电机伺服驱动器放大后驱动直线电机运行。

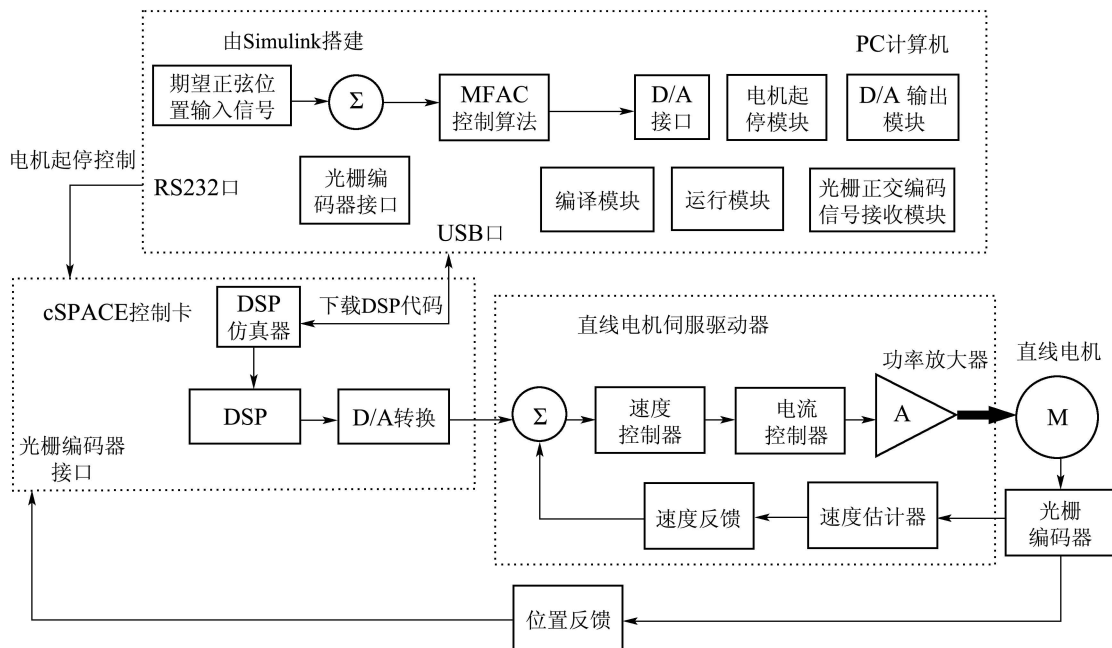


图2 直线伺服系统工作原理图

Fig. 2 Operation principle for linear servo system

3 直线电机伺服系统的无模型自适应控制(MFAC of linear motor servo system)

MFAC属于在线数据的数据驱动控制方法, 是指在受控系统工作点处用动态紧格式线性时变

模型来替代常规离散时间非线性系统, 且仅用受控系统的输入输出数据来在线估计伪偏导数(pseudo-partial-derivative, PPD), 从而实现非线性系统的无模型学习自适应控制^[11-12]。

由于永磁同步直线电机伺服系统的复杂非线性特性^[4],采用MFAC方法来设计伺服系统的位置控制器,从而达到抑制干扰,实现精密控制的目的.该系统可以通过下列单输入单输出非线性离散时间方程来描述:

$$y(k+1) = f(y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u)), \quad (1)$$

其中: $u(k)$, $y(k)$ 分别表示直线电机伺服系统在 k 时刻的电压输入与位置输出, n_y , n_u 分别表示伺服系统未知的阶数, $f(\dots)$ 是伺服系统未知的非线性函数. 直线伺服系统满足以下3个条件:

1) 输入电压和输出位置是可观测的和可控制的,即对给定幅值(允许范围内)的期望正弦位置输出信号,一定存在一个电压输入信号(电机允许范围内),使直线电机在此电压信号的驱动下,位置输出跟随期望的正弦输出.

2) 直线伺服系统未知的非线性函数 $f(\dots)$ 关于当前的电压控制输入 $u(k)$ 的偏导数是连续的,即输入控制电压在电机允许范围内,电压的增量会导致相应的位置输出增量的变化.

3) 有界的输入电压变化产生有界的输出位置变化,即输入电压在电机允许范围内的变化会产生输出位置在电机允许范围的变化,这是对直线伺服系统输出位置变化量的限制.

基于这些条件,依据紧格式线性化的定义^[11],式(1)可以表述为下列紧格式动态线性化模型的形式,且伪偏导数PPD是一致有界的:

$$\Delta y(k+1) = \phi(k)\Delta u(k), \quad (2)$$

其中 $\phi(k)$ 是系统的伪偏导数.

此线性化的证明见文献[11].由式(2)可知,此模型结构简单、参数少,且为时变增量形式,是以控制系统设计为目的的数据模型,而非机理模型.如果式(2)中采样周期及 $\Delta u(k)$ 的值均很小时,伪偏导数PPD可以看成是一个慢时变参数,且与输入电压 $u(k)$ 的关系可以忽略.本实验中采样周期取0.005 s,电机平稳运行时的电压变化量 $\Delta u(k)$ 较小,所以直线伺服系统MFAC控制器的设计是可行的.

在设计直线伺服系统的MFAC时,除要保证电压变化量 $\Delta u(k) \neq 0$,还必须在控制律算法中加入可调参数 λ ,用以限制电压增量 $\Delta u(k)$ 的变化.将以上思想体现在控制目标函数中,经过优化推导出基于紧格式线性化的数据驱动无模型自适应控制律算法如下:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_k \phi(k)}{\lambda + \phi(k)^2} [y^*(k+1) - y(k)], \quad (3)$$

其中: ρ_k 是步长序列, $\rho_k \in (0, 2)$, λ 是控制输入变化的惩罚因子, $y^*(k+1)$ 表示直线伺服系统 $k+1$ 时刻的期望位置输出, $y(k)$ 表示直线伺服系统 k 时刻的实际位置输出.

λ 的作用除限制输入电压变化增量,保证式(2)在合理范围内替代式(1)外,还可以间接限制伪偏导数值的变化. λ 越小,伺服系统的响应越快,但可能产生超调,甚至使电机失稳;反之, λ 越大,伺服系统的响应越慢,系统的电压输入和位置输出越平稳,超调越小.我们将通过实验来验证它的变化对系统动态特性的影响.

设计控制器时为避免参数的估计值变化太快或者克服对某些突变的电机位置采样数据过于敏感,提出估计准则函数^[11],由准则函数通过极小化推导得到具有对时变参数跟踪能力的伪偏导数估计算法:

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + \frac{\eta_k \Delta u(k-1)}{\mu + |\Delta u(k-1)|^2} \times (\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1)\Delta u(k-1)), \quad (4)$$

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(1), \text{ if } \hat{\phi}(k) \leq \varepsilon, \text{ or } |\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon, \quad (5)$$

其中: μ 是关于参数估计变化量的惩罚因子,它的适当选取,可以限制伺服系统线性替代的范围; η_k 是步长序列, $\eta_k \in (0, 2)$; ε 是充分小的正数, $\hat{\phi}(1)$ 是 $\hat{\phi}(k)$ 的初值.

依据估计算法可知,重置算法(5)是使估计算法(4)具有更强的时变参数跟踪能力.从本文实验研究考虑,式(5)可以防止电压变化量 $\Delta u(k)$ 为0.因为如果 $\Delta u(k)$ 为0,位置变化量则为0,电机将停止运行.

系统参数选取如下:步长序列 η_k 取为1.5, ρ_k 选择0.01,惩罚因子 μ 取为1, ε 取为0.001,实验中 $\hat{\phi}(1)$ 初始值取2,重置时取为0.5.

从上述控制方案看出,直线伺服系统的控制律与该系统的参数数学模型结构、系统阶数等先验知识无关,仅利用直线伺服系统输入输出数据便可设计MFAC控制器.该方案可以实现伺服系统的参数自适应控制和结构自适应控制,由于控制律中只有一个伪偏导数PPD是在线调整的参数,因而该方案计算量相对较小且易于实现.

4 实验研究(Experiment research)

实验分两部分进行,第1部分是驱动器性能测

试, 第2部分是伺服系统控制实验.

4.1 直线电机伺服驱动器特性测试及分析 (Testing and analysis of linear motor servo driver)

直线伺服驱动器动态响应特性直接关系到外环MFAC控制策略的实施. 使用Elmo Composer对伺服驱动器的底层参数进行设置和调节. 获得的频率特性如图3所示, 从相频特性可知速度闭环系统具有较宽的带宽(相对于将要加入的0.2 Hz-1 Hz的期望正弦输入信号), 则系统响应速度快、跟踪控制信号能力强.

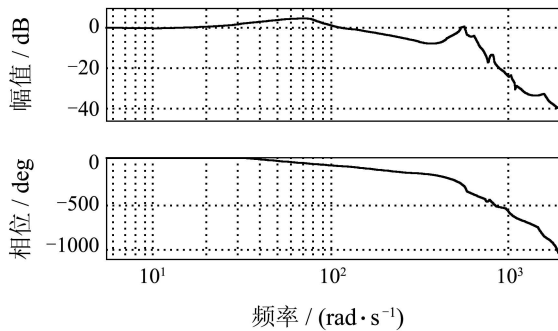


图3 直线伺服驱动器相频和幅频特性

Fig. 3 Frequency performance for linear motor servo driver

速度闭环在阶跃输入时, 速度跟踪特性如图4所示. 因为光栅编码器分辨率是5 μm, 所以当给定

期望的阶跃速度输入是20000个脉冲/秒, 则对应匀速度为0.1 m/s. 图4中虽然有一定的超调, 但有较强的响应速度和较短的调节时间, 速度稳态误差为零. 对本文主要研究位置精密控制来讲, 已经达到了速度控制的要求.

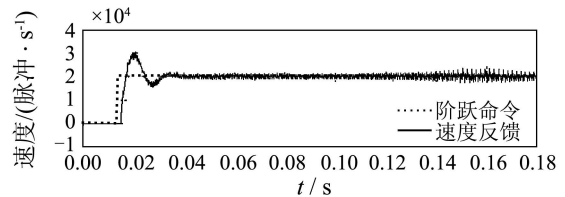


图4 直线伺服驱动器速度跟踪特性

Fig. 4 Velocity tracking performance for linear servo driver

4.2 直线伺服系统控制实验(Control experiment of linear servo system)

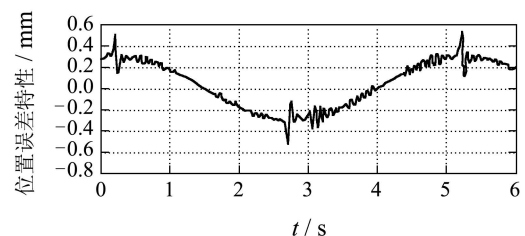
本实验目的是在直线伺服驱动器速度内环动态特性稳定情况下, 验证MFAC位置控制器的鲁棒性及精密控制性能. 依据硬件设备的性能指标, 在直线电机不同速度(正弦信号不同频率)和不同行程(正弦信号不同幅值)情况下进行了PID、神经网络和MFAC算法的实验, 本文以采样周期为0.005 s, 期望位置输入正弦信号幅值为90 mm, 正弦信号不同频率的情况展开讨论. 列举的3种实验情形如表1所示.

表1 PID、神经网络和MFAC实验情形划分
Table 1 Experiment case for PID, NN and MFAC

情形	期望位置输入信号	负载扰动情况	实验目的
A	0.2 Hz正弦波(平均速度约72 mm/s)	空载	电机运行速度较低时, 验证3种算法的位置跟踪效果
B	1 Hz正弦波(平均速度约360 mm/s)	空载	情形A低速运行平稳后, 将速度加大近5倍, 验证3种方法在系统参数变化后对位置跟踪的适应性及控制精度
C	1 Hz正弦波(平均速度约360 mm/s)	运行平稳后, 加2 kg负载	验证3种方法对负载扰动发生变化时位置跟踪的鲁棒性

情形 A 采用PID算法, 将PID参数调节到最好分别为0.9, 18, 0时, 跟踪误差在0.6 mm之内, 见图6(a)所示. 采用BP神经网络控制方法, 神经网络是3层网络结构, 输入层有1个结点, 中间层有20个结点, 输出层有1个结点, 学习率为1, 训练3000步后的控制效果见图6(b)所示, 神经网络控制时位置跟踪精度优于PID, 位置误差在0.4 mm之内. 如果改用MFAC算法, 则闭环响应和稳定性可以由适当的选取权重常数λ来折中, 因此能够得到稳定的、控

制精度优于PID和神经网络的跟踪响应, 跟踪误差在0.2 mm之内, 如图6(c)所示. $\lambda = 4$, $\phi(k)$ 的初值 $\phi(1) = 2$.



(a) PID位置误差特性

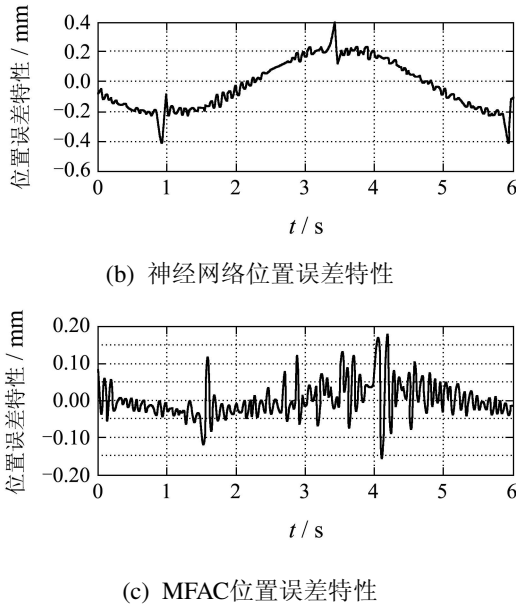


图5 情形A: PID、神经网络与MFAC算法特性比较
Fig. 5 Case A: performance comparison for PID, NN and MFAC

将正弦信号的幅值减小为30 mm, 即直线电机正反向行程变短时, 3种算法的位置误差变化均不大, 在0.01 mm之间. 当正弦信号的幅值增大为150 mm, 即直线电机正反向行程加大时, 3种算法控制效果与其正弦信号幅值为90 mm时类似, 误差变化依然不大.

由此可知, 在低速空载的情况下, 3种算法均能保证输出稳定跟踪正弦位置信号, 且跟踪精度相差不大. 即使改变直线电机行程(加速度变化, 导致电流变化, 推力波动等变化), 3种算法依然有较好的控制效果. 但PID算法调节参数较多, 调整非常敏感, 稍微的变化都可能使控制效果产生非常大的变化, 神经网络的训练时间又过长, 而MFAC可调参数只有 λ , 实验中便于调节.

实验结果中各种算法的最大位置误差及最大位置误差变化量均出现在电机换向时刻. 本系统位置检测光栅的分辨率为 $5 \mu\text{m}$, 而位置误差控制结果未达到微米级, 分析主要原因.

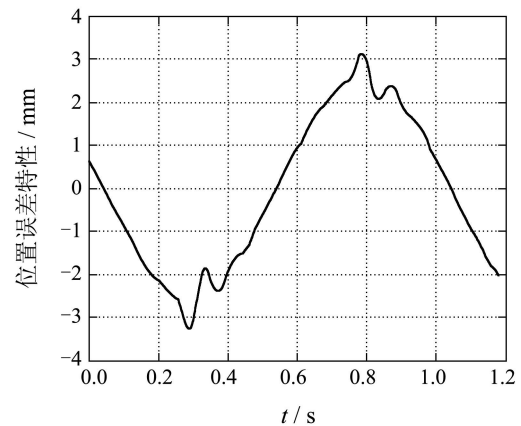
注1 虽然硬件在回路(hardware-in-loop, HIL)实时仿真与控制是目前国内外控制系统设计的常用方法, 但依然有它的局限性, 代码编译效率、数据交换方式、仿真器的性能指标等均影响了数据传输带宽, 最终限制了采样频率的提高.

注2 伺服系统的机电时间常数表示电机过渡过程时间的长短, 反映电系统变化的快慢程度. 直线伺服系统的机电时间常数可小于1 ms, 而本系统采样时间为5 ms, 由于采样频率不够高, 导致最终影响了伺服系统的动态特性.

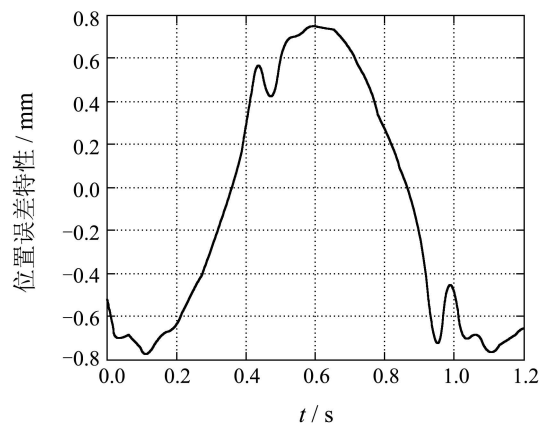
为此, 只要将本文的MFAC控制方案应用在DSP全速运行而非硬件在回路仿真调试, 无疑能够使位置误差控制在微米级.

情形B 将期望位置正弦信号频率从0.2 Hz增加到1 Hz, 相当于直线电机的运行速度提高了约5倍, 此时PID参数调到最好(1, 24, 0)时的位置误差特性如图6(a)所示, 最大误差为3 mm左右, 跟踪误差明显增大, 控制精度降低. 采用神经网络控制训练4000步后的位置误差特性如图6(b)所示, 最大误差在0.8 mm之内, 位置控制精度依然优于PID. 但MFAC算法依然具有最好的控制效果, 误差在0.4 mm之内, 如图6(c)所示. 此时MFAC中 λ 调整为1.3, 伪偏导数初值 $\hat{\phi}(1)$ 取2.

从永磁直线电机特性可知^[3-4], 当速度或加速度变化时, 驱动电机的电流将发生变化, 因此电机中随电流变化的时变干扰对电机动态性能产生非常大的影响, 而实验验证MFAC方法之所以在模型参数变化时依然具有很好的适应性, 正说明了MFAC的控制律是不依赖于模型的, 它的伪偏导数是一个时变的参数, 由于它的不断变化, 自适应调节了位置变化量和电压变化量之间的关系, 如图6(d)所示.



(a) PID位置误差特性



(b) 神经网络位置误差特性

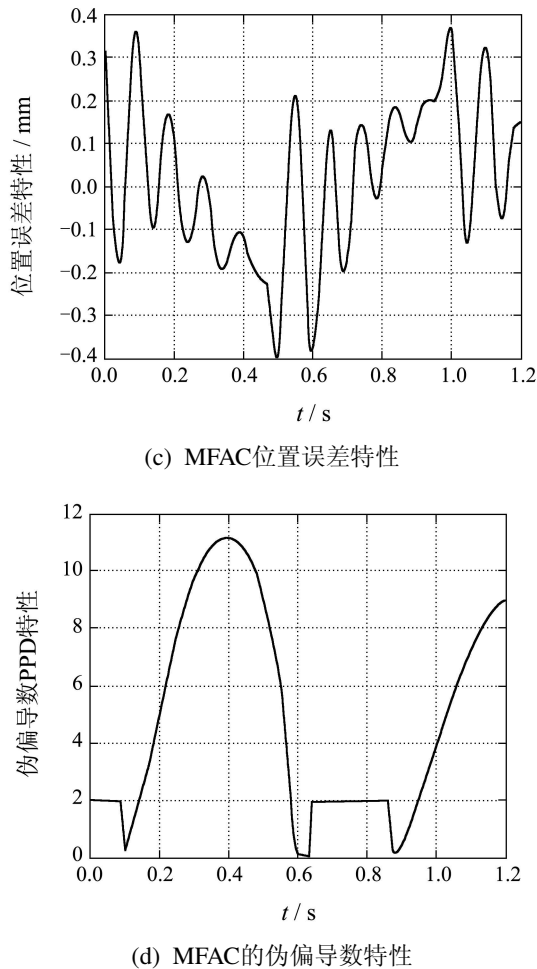


图6 情形B: PID、神经网络及MFAC算法特性比较
Fig. 6 Case B: performance comparison for PID, NN and MFAC

当其他参数不变, $\lambda > 8$ 后, 位置输出产生非常大的相位差, 既延迟加大, 最大可达 180° . $\lambda > 10$ 后系统开始不稳定. 这是因为 λ 过大, 导致了电压变化量趋于零, 不能够调节电机电压和位置的变化, 所以导致系统不能稳定运行. 当减小 λ 后, 输出变为三角波, 甚至平顶现象, 具有非常大的位置跟踪误差. 当 $\lambda < 0.5$ 后, 系统开始震荡, 这是因为 λ 过小, 导致过大的电压变化量, 使系统不能平稳运行. 由此可见 λ 的变化影响了系统的动态性能. 这与上述理论分析是相吻合的. 从 λ 的变化可知, 它的调节范围很宽, 对参数的敏感性弱, 所以系统的鲁棒性好.

情形 C 在情形B参数不变的情况下, 伺服系统加入2 kg负载, 当采用PID算法时, 无论如何调节参数, 系统都无法控制, 直线电机出现非常大的震荡, 往复运动达到行程的终点后, 电机停止不能再运行. 采用神经网络控制方法, 电机能够正常运行, 训练4000步后最好的控制效果如图7(a)所示, 误差比未加负载时明显加大, 在1.5 mm之内. 这是因为

神经网络控制中网络节点和隐层个数的确定都需要受控系统的信息, 由于干扰导致系统信息变化后, 控制精度降低. 而改用MFAC算法, 伪偏导数重置初值 $\hat{\phi}(1)$ 为0.5, 不必调节参数 λ 就可得到稳定的跟踪特性, 误差在1 mm之内, 特性如图7(b)所示, 控制效果明显优于神经网络和PID.

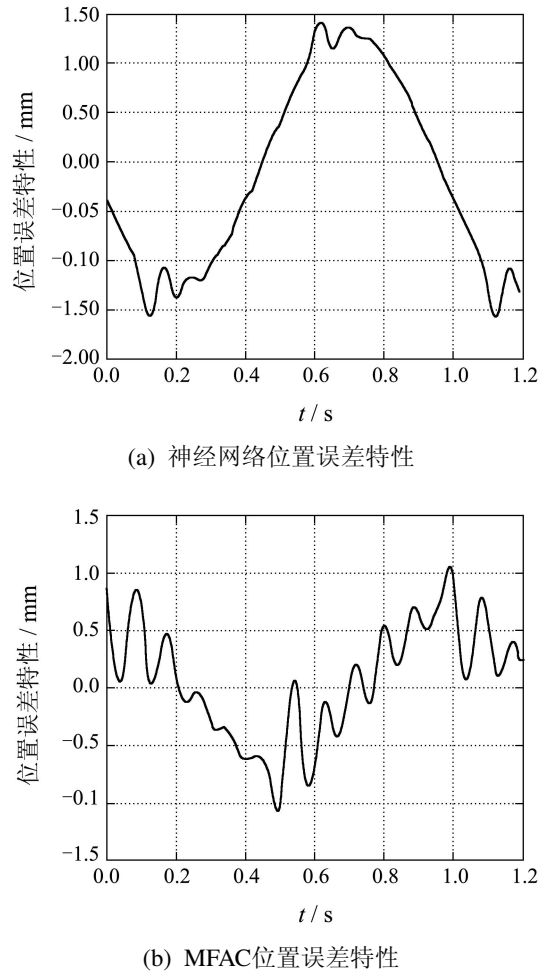


图7 加负载后的神经网络控制和MFAC控制效果
Fig. 7 NN control and MFAC performance on load

从永磁直线电机特性可知^[3-4], 由于负载与电机的电压、位置、速度和加速度等参数均有关, 当负载变化时会使这些参数均发生变化, 而MFAC在直线伺服系统负载扰动变化后, 依然能够很好的进行控制, 再次体现了它不依赖于模型的特性.

5 结论(Conclusion)

永磁同步直线电机是一个结构复杂、参数众多, 且结构、阶数和参数均时变的非线性系统, 实验表明, 将数据驱动的无模型自适应紧格式线性化控制方法应用在实际直线电机伺服系统中, 由于控制器的设计不依赖于模型参数, 所以当信号频率大小(速度)变化、直线电机行程长短(加速度)变化或是负载扰动等参数变化时, 伪偏导数均

可以自动调节电机驱动电压使位置输出快速跟踪期望值的变化,从而使控制具有很强的鲁棒性和精密的控制效果。

参考文献(References):

- [1] WU D, CHEN K, WANG X. An investigation of practical application of variable spindle speed machining to noncircular turning process[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 44(11/12): 1094 – 1105.
- [2] JIN S M, ZHU Y W, LEE S H, et al. Optimal design of auxiliary poles to minimize detent force of permanent magnet linear synchronous motor[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*, 2010, 33(1/2): 589 – 595.
- [3] 张明超, 尹文生, 朱煜. 永磁同步直线电机推力波动建模与抑制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(8): 1253 – 1257. (ZHANG Mingchao, YIN Wensheng, ZHU Yu. Force ripple modeling and suppression in permanent magnet linear synchronous motors[J]. *Journal Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, 50(8): 1253 – 1257.)
- [4] TAN K K, HUANG S N, LEE T H, et al. Robust adaptive numerical compensation for friction and force ripple in permanent magnet linear motors[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, 38(1): 221 – 228.
- [5] HUANG Y S, SUNG C C. Implementation of sliding mode controller for linear synchronous motors based on direct thrust control theory[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(3): 326 – 338.
- [6] TAN K K, LEE T H, ZHOU H X. Micro-positioning of linear piezoelectric motors based on a learning nonlinear PID controller[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2001, 6(4): 428 – 436.
- [7] TAN K K. 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.
- [8] DAVID N, FRANCESCO C, BIAGIO T. Precise position control of tubular linear motors with neural networks and composite learning[J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(5): 515 – 522.
- [9] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 650 – 667. (HOU Zhongsheng, XU Jianxin. On data-driven control theory: the state of the art and perspective[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 650 – 667.)
- [10] 袁微, 朱学峰. 水厂混凝投药大滞后过程的数据驱动直接控制方法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(3): 335 – 342. (AI Wei, ZHU Xuefeng. Data-driven direct control method for coagulation dosing large time-delay process in water works[J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 335 – 342.)
- [11] 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 Models and Its Adaptive Control Theory*[M]. Beijing: Science Press, 1999.)
- [12] 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.)

作者简介:

曹荣敏 (1964—), 女, 副教授, 博士研究生, 目前研究方向为无模型自适应控制理论及其应用、直驱技术研究及应用, E-mail: rongmin_cao@yahoo.com.cn;

周惠兴 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为直驱技术研究及应用、机电综合系统设计, E-mail: huixingzhou@yahoo.cn;

侯忠生 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为无模型自适应控制理论、数据驱动控制、学习控制理论, E-mail: zhshhou@bjtu.edu.cn.