

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.03.013

基于滤波器的迭代学习最小二乘辨识方法*

史伟民, 吴达伟, 杨亮亮

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对永磁同步直线电机作为控制对象的参数辨识问题,在对直线电机的数学模型模型以及最小二乘辨识算法等内容进行了研究,发现了批处理最小二乘辨识算法虽然能够成功辨识伺服系统模型参数但是模型不够精确,尤其是针对伺服系统中存在的对振荡环节的辨识。根据传统辨识模型的不足,提出了一种基于滤波器的迭代学习最小二乘辨识方法,该算法通过滤波器来减小辨识过程中的噪声干扰,用迭代的方式来求解辨识模型带来的非线性问题。仿真和实验结果表明:与批处理最小二乘算法相比,基于滤波器的迭代学习最小二乘辨识方法能够有效提高辨识精度,振荡环节的辨识结果与功率谱分析得出的图线更加吻合。

关键词:永磁同步直线电机;参数辨识;迭代学习;最小二乘

中图分类号:TH39;TP27

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)03-0278-05

Filter based iterative learning least square identification method

SHI Wei-min, WU Da-wei, YANG Liang-liang

(School of Mechanical and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the parameter identification of the permanent magnet linear synchronous motor (PMSLM), the model parameters of servo system can be successfully identified by the block least squares algorithm on the basis of the study of the linear motor's mathematical model and the least square identification algorithm. However, its model is not accurate enough, especially for the oscillating element identification in the servo system. According to the shortcomings of the traditional identification model, a filter-based iterative learning least square identification method was proposed. The noise interference was reduced by the filter in the identification process, and nonlinear problem of the identification model was solved by iterating in this algorithm. The simulation and experiment results indicate that the filter-based iterative learning least square identification method can effectively improve the accuracy of identification compared with the block least squares algorithm, and the identification results of the oscillating element are more consistent with those obtained by power spectrum analysis.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor (PMSLM); parameter identification; iterative learning; least square

0 引 言

一个运动控制系统通常由上位机、运动控制器、伺服驱动器、电机及执行机构等构成^[1-3]。运动控制器作为一个机电系统的重要组成部分,它直接影响整个系

统的控制效果。

要想达到高速度高精度的控制效果,控制器参数的设置至关重要。如果参数设置不合理将会导致整个运动控制系统的不稳定,进而达不到所要求的运动性能。目前对控制器参数的设置多是根据人为经验来调整,虽然简单易行但是效率低下,控制性能依赖参数设

收稿日期:2017-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305404)

作者简介:史伟民(1965-),男,浙江宁波人,教授级高级工程师/教授,博士生导师,主要从事纺织机械机电控制技术、轻工皮革机械机电控制技术方面的研究。E-mail:swm@zstu.edu.cn

置人员自身素质。因此,要想得到一个稳定的、高速度高精度的控制参数,精确的控制对象模型很重要^[4,6]。

最小二乘辨识方法因其简单稳定,在参数辨识方面有着广泛的应用。文献[7]中采用递推最小二乘法对永磁同步电机进行离线参数辨识,成功地辨识了电阻和电感参数;文献[8]中以直线伺服系统作为辨识对象,用基于最小二乘的阶跃辨识法获得了比较精确的系统模型参数;李洪宇等^[9]通过测量定子电压和电流,基于扩展卡尔曼滤波器(EKF),研究了一种新颖算法,通过将两个基于扩展卡尔曼滤波器模型有机结合,协同工作,实现了对转子电阻、励磁电感、转子磁链和转速在线辨识;李旭春等^[10]在电机静止状态下使用递推最小二乘的辨识方法获得了电机参数,虽然他们通过不同的辨识算法获得了辨识参数,但是得到的辨识参数反映在伯德图上的情况并未做详细说明。对于高阶系统辨识,尤其是带有振荡环节的辨识,普通的最小二乘算法辨识精度不够,即使性能准则函数达到最优,系统中的振荡环节也未必能够得到体现。

因此,本研究将提出一种迭代滤波最小二乘辨识方法。

1 辨识模型

设离散化的传递函数如下:

$$G(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_n z^{-n_b}}{1 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_n z^{-n_a}} \quad (1)$$

式中: $\alpha_0 \dots \alpha_n$ —分子需要辨识的系数; $\beta_1 \dots \beta_n$ —分母需要辨识的系数; z —延迟因子。

系统辨识中常用的广义误差模型如图1所示^[11]。

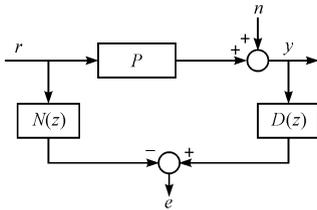


图1 广义误差模型

P —控制对象; r —输入信号,即参考轨迹; n —外部干扰; y —系统输出; $N(z), D(z)$ —广义模型; e —广义误差

可表述为:

$$e_j = \sum_{k=1}^{n_a} [\beta_k * y(j-k) + y(j)] - \sum_{k=0}^{n_b} \alpha_k * r(j-k) \quad (2)$$

若以 $\sum e_j^2$ 为准则函数,则模型参数 $\alpha_0 \dots \alpha_n$,

$\beta_1 \dots \beta_n$ 是线性的。这样的准则函数计算求解模型参数比较简单,但是其没有任何物理意义。

输出误差模型如图2所示。

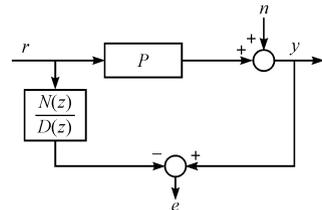


图2 输出误差模型

e —辨识出的模型输出与实际系统输出之间的差值

$$e_j = y(j) - \frac{N(z)}{D(z)} * r(j) \quad (3)$$

但是输出误差 e_j 是关于参数 $\alpha_0 \dots \alpha_n, \beta_1 \dots \beta_n$ 的非线性函数,这样就增加了求解参数的难度和计算量。

因此,本研究在图1的基础上提出一个新的辨识模型。在输入和输出数据两边同乘以 $1/D_{i-1}(z)$,相当于引入一个参数变动的低通滤波器。

迭代模型如图3所示。

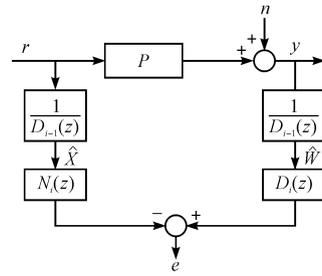


图3 迭代模型

\hat{x}, \hat{w} —经过低通滤波器 $\frac{1}{D_{i-1}(z)}$ 滤波后的 r, y

当图3的模型辨识参数达到收敛的情况下, $D_i = D_{i-1}$,即:

$$e_j = \lim_{i \rightarrow \infty} \left[y(j) * \frac{1}{D_{i-1}(z)} * D_i(z) - r(j) * \frac{1}{D_{i-1}(z)} * N_i(z) \right] = \lim_{i \rightarrow \infty} \left[y(j) - r(j) * \frac{N_i(z)}{D_i(z)} \right] \quad (4)$$

本研究通过迭代的方法把输出误差模型转化为广义误差模型来求解。

图3的迭代模型辨识结构虽然避免了求解带来的难度^[12],但在实际辨识中发现:因噪声的存在而使得辨识得到的低通滤波器 $\frac{1}{D_{i-1}(z)}$ 的极点可能在单位圆外面。经过不稳定的滤波器滤波后的数据产生发散,最终导致辨识失败。为了避免不稳定现象的发生,并且针对直线伺服系统有振荡环节的特点,本研究在图3辨识方法基础之上加

入带通滤波器。

滤波迭代模型如图 4 所示。

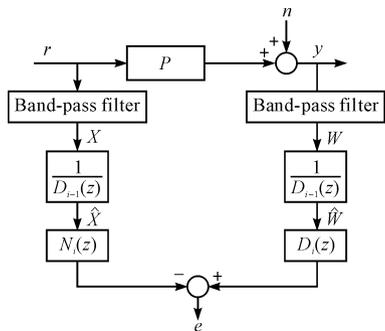


图 4 滤波迭代模型

Band-pass filter—带通滤波器; x, w —经过带通滤波器滤波后的输入输出数据; \hat{x}, \hat{w} — x, w 经过迭代低通滤波器滤波后的数据; i —迭代次数

2 系统参数辨识

根据图 4 得到:

$$\hat{x} = x * \frac{1}{D_{i-1}(z)}$$

$$\hat{w} = w * \frac{1}{D_{i-1}(z)} \quad (5)$$

误差为:

$$e = \hat{w} * D_i(z) - \hat{x} * N_i(z) \quad (6)$$

即:

$$e_j = \sum_{i=0}^n \alpha_i \hat{x}_{j-i} - \sum_{i=1}^n \beta_i \hat{w}_{j-i} - \hat{w}_j \quad (7)$$

为了方便计算写成如下形式:

$$e_j = q'_j \delta - \hat{w}_j \quad (8)$$

其中:

$$q'_j = [\hat{x}_j \cdots, \hat{x}_{j-n_b}, -\hat{w}_{j-1} \cdots, -\hat{w}_{j-n_a}]$$

$$\delta' = [a_0 \cdots, a_{n_b}, b_1 \cdots, b_{n_a}] \quad (9)$$

要求 $\sum e_j^2$ 取得最小值时 δ 的值,则以误差的平方和 $\sum e_j^2$ 为准则函数,对 δ 求偏导:

$$\frac{\partial (\sum e_j^2)}{\partial \delta} = 2 \sum q_j e_j = 0 \quad (10)$$

式(7)代入到式(8)中可得:

$$(\sum q_j q'_j) \delta = \sum w_j q_j \quad (11)$$

则:

$$\delta = Q^{-1} C \quad (12)$$

其中:

$$Q = \sum q_j q'_j$$

$$C = \sum \hat{w}_j q_j \quad (13)$$

3 参数辨识仿真与实验分析

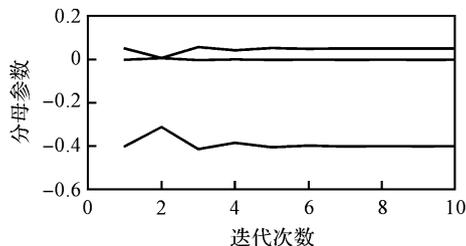
3.1 参数辨识仿真分析

本研究以下式离散传递函数为参数辨识仿真对象,来验证本研究中提出的算法的有效性:

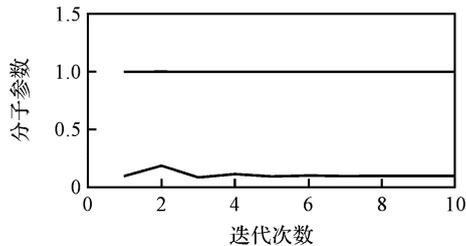
$$\frac{1 + 0.1z^{-1}}{1 - 0.4z^{-1} + 0.05z^{-2} - 0.002z^{-3}} \quad (14)$$

本研究用白噪声作为输入数据,发送给传递函数得到输出数据。在这里需要注意对于干扰噪声的设置,噪声过大造造成仿真辨识结果失真辨识失败。

参数迭代辨识结果如图 5 所示。



(a) 分母参数迭代辨识结果



(b) 分子参数迭代辨识结果

图 5 参数迭代辨识结果

通过图 5 的仿真结果可以看到:经过五次迭代辨识后辨识数据已经收敛。

仿真真值对比如表 1 所示。

表 1 仿真真值对比

	分子参数			分母参数	
真值	1	0.1	-0.4	0.05	-0.002
估计值	1.000 0	0.100 19	-0.399 80	0.049 901	-0.001 979 9

最后的迭代辨识结果与仿真对象的真值对比,误差在 2% 以下。

3.2 直线电机参数辨识实验与结果分析

永磁同步直线电机结构简单,没有中间传动环节,在低速时仍有较好的性能。另外,永磁直线电机与直线感应电机相比,具有单位尺寸出力大、结构轻、惯性小、响应快、发热少、冷却要求低、精度高、结构简单、体积小、重量轻、损耗小、效率高、电机形状和尺寸可以灵活多样等诸多优点^[13]。因

而直线电机广泛应用于各种有高速高精要求的场合。

该实验的运动控制实验平台如图6所示。

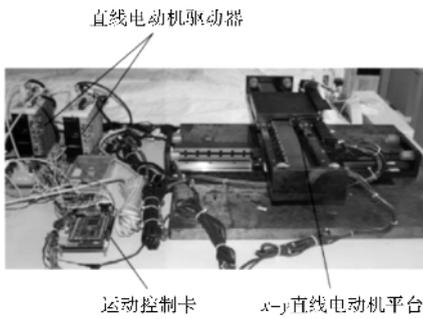


图6 运动控制实验平台

两台直线电机构成 $x-y$ 运动平台,直线电机均为 Baldor 公司的 LMCFO2C-HCO,运动位置由 GSI 公司分辨率为 $0.5 \mu\text{m}$ 的光栅尺测量,伺服驱动器同样为 Baldor 公司提供的 FMH2A03TR-EN23,对电机的控制采用电流控制。控制器采用的是 TI 公司的高性能浮点型数字信号处理器 TMS320F6713。控制器的计算结果通过 16 位精度的数模转换芯片作为电流指令输出给驱动器。因实验中只用到了一个轴,只需把下层锁死即可。

通过用功率谱分析得出的直线电机伺服系统的伯德图可以看出直线伺服系统整体近似一个二阶系统,在 100 Hz 的频率点有共振和反共振产生,因此把整个直线伺服系统按照四阶传递函数来辨识。

把四阶传递函数用下式进行双线性变换:

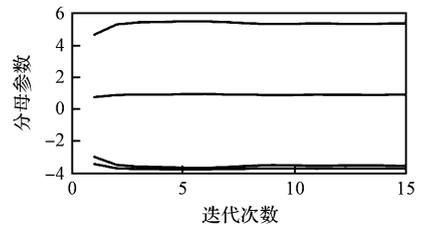
$$s = \frac{1}{T_s} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (15)$$

式中: T_s — 采样周期; z — 延迟因子。

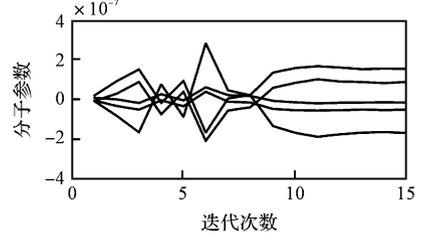
得到离散化的传递函数,即公式(1)中 $n_a = n_b = 4$ 。为了保证中频段尤其是振荡环节辨识的准确,该实验中:

- (1) 设置带通滤波器的通带频率为 80 Hz ~ 200 Hz 对数据进行滤波;
- (2) 令 $\frac{1}{D_{i-1}(z)} = 1$;
- (3) 用辨识算法进行辨识,得到 δ ;
- (4) 更新 $\frac{1}{D_{i-1}(z)}$;
- (5) 回到步骤(3),直到数据收敛。

用基于滤波器的迭代学习最小二乘辨识方法对直线伺服系统的实验迭代辨识结果如图7所示。通过 10 次迭代参数已经收敛。



(a) 分母参数辨识结果



(b) 分子参数辨识结果

图7 实验迭代辨识结果

随着迭代准则函数也下降趋于收敛,准则函数如图8所示。

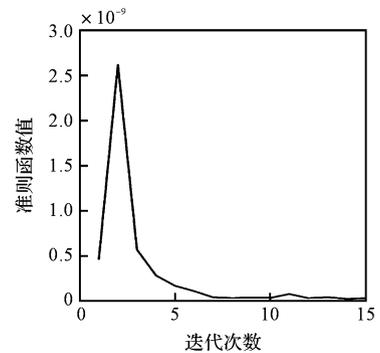


图8 准则函数

本研究用辨识结果绘制伯德图和功率谱分析对比,迭代学习最小二乘实验结果伯德图对比如图9所示。

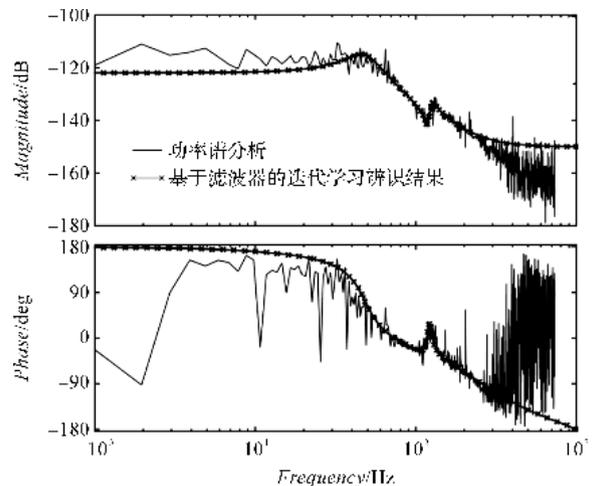


图9 迭代学习最小二乘实验结果伯德图对比

由此可见,两者整体拟合,特别是反应在在 100 Hz 左右的振荡环节,散点图与实线完全拟合。

同样,本研究经过通带频率为 80 Hz ~ 200 Hz 的带通滤波器滤波后的数据用批处理最小二乘辨识,得到的辨识数据绘制伯德图,并和功率谱分析对比,批处理最小二乘实验结果伯德图对比如图 10 所示。辨识数据结果的伯德图虽然大体可以重合,但是在 100 Hz 的振荡并无明显体现。

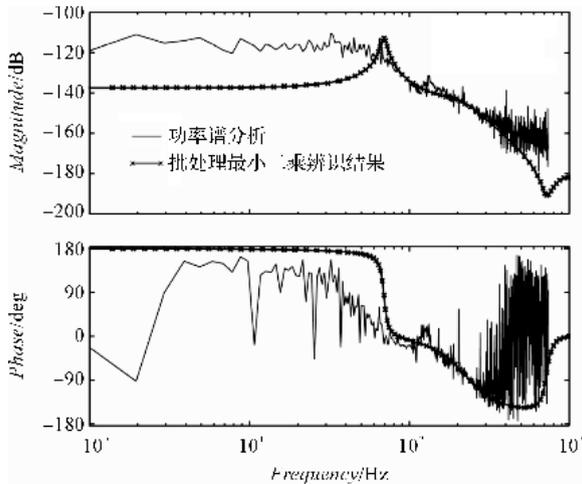


图 10 批处理最小二乘实验结果伯德图对比

4 结束语

本研究通过分析传统的辨识模型的不足,进而推导出了一种基于滤波器的迭代学习最小二乘辨识方法。仿真结果表明:该算法可以成功辨识模型参数,误差在 2% 以下。通过运动控制实验平台进行对比实验证明:基于滤波器的迭代学习最小二乘辨识方法能够成功辨识模型参数,并且与传统的最小二乘辨识方法相比基于滤波器的迭代学习最小二乘辨识方法能够精确辨识出传递环数的振荡环节,得到更加准确的辨识对象的数学模型。

因此,利用基于滤波器的迭代学习最小二乘辨识方法辨识算法进行离线参数辨识,可为后期的高速高精控制器的设计、振动的抑制提供可靠的依据。

但是辨识算法中滤波器的设计不够灵活的问题,有待进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 吕飞,余凤豪,张松涛,等. 永磁同步直线电机伺服控制系统设计[J]. 电机技术,2012(2):29-32.
- [2] 李盛培,罗亮,刘知贵. 永磁同步直线电机伺服控制系统研究与设计[J]. 机械设计与制造,2015(8):143-146.
- [3] 吴路路,韩江,田晓青,等. 无偏差最小二乘法伺服控制系统参数辨识[J]. 中国机械工程,2016,27(1):109-113.
- [4] DING F, LIU G, LIU X P. Partially coupled stochastic gradient identification methods for nonuniformly sampled systems[J]. **IEEE Transactions On Automatic Control**, 2010,55(8):1976-1981.
- [5] 李力千,王占林,周福章,等. 闭环运动控制系统中被控对象的模型辨识研究[J]. 制造业自动化,2000,22(1):17-20.
- [6] 故瑞云,周良德,林碧. 粉末颗粒物料高速、高精度自动称料系统的探究[J]. 包装与食品机械,2012(4):29-32.
- [7] 王莉娜,薛飞. 基于 RLS 的永磁同步电机离线参数辨识研究[J]. 电气传动,2015,45(5):16-20.
- [8] 陶大锦,柯大观,袁柳斌,等. 直线伺服系统模型参数辨识及其实验研究[J]. 中国机械工程,2014,24(7):915-921.
- [9] 李洪宇,王群京,李国丽,等. 基于扩展卡尔曼滤波器的电机参数辨识算法[J]. 电气工程学报,2015,10(5):34-42.
- [10] 李旭春,王倩,马少康. 带离线参数辨识的降阶观测器 PMSM 无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报,2017,21(1):1-7.
- [11] 萧德云. 系统辨识理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2014.
- [12] STEIGLITZ K, MCBRIDE L. A technique for the identification of linear systems[J]. **IEEE Transactions On Automatic Control**, 1965,10(4):461-464.
- [13] 陶昆,王春梅,张利琼. 永磁同步直线电机控制系统综述[J]. 煤矿机械,2014,35(4):14-16.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

史伟民,吴达伟,杨亮亮. 基于滤波器的迭代学习最小二乘辨识方法[J]. 机电工程,2018,35(3):278-282.

SHI Wei-min, WU Da-wei, YANG Liang-liang. Filter based iterative learning least square identification method[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(3):278-282.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>