

基于输入和误差补偿的PMSM迭代学习控制*

史伟民¹, 路丰瑜¹, 沈加海²

(1. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018; 2. 海宁纺织机械厂, 浙江 海宁 314400)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)在运行过程中受到扰动影响的问题,在分析其数学模型的基础上,采用矢量控制方法,构建了Matlab/Simulink环境下的永磁同步电机仿真模型,介绍了基于迭代学习的输入和误差补偿的控制方法,利用先前误差信息以及误差的变化趋势,对误差提前进行了预测补偿;最后对整个控制系统进行了仿真。仿真结果表明,与传统的PI控制相比较,该控制方法扰动抑制效果明显,提高了系统运行性能,证明了迭代学习控制可用于有效抑制系统干扰。

关键词: 永磁同步电机; 迭代学习控制; 输入和误差补偿

中图分类号: TH39; TM351 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1461-03

Iterative learning control on PMSM based on input and error compensation

SHI Wei-min¹, LU Feng-yu¹, SHEN Jia-hai²

(1. School of Machinery and Automatic Control, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Haining Textile Machinery Factory, Haining 314400, China)

Abstract: Aiming at the disturbance of the permanent magnet synchronous motor(PMSM) during running, on the basis of analysis of the mathematical model of PMSM, the simulation model was established by using vector control methods under Matlab/Simulink environment. Input and error compensation based on iterative learning control(ILC) was introduced. Error could be compensated and forecasted in advance utilizing previous error information and error change trend. Finally, the whole control system was simulated. The simulation results show that compared with the traditional PI control, disturbance rejection effect of proposed method is more obvious, which demonstrates that iterative learning control can restrain interference and improve system performance.

Key words: permanent magnet synchronous motor(PMSM); iterative learning control(ILC); input and error compensation

0 引 言

近年来,随着电力电子技术和微电子技术的快速发展,新型电机控制理论、稀土永磁材料的研究也取得了瞩目成绩,这些主流领域的发展大大推动了永磁同步电动机的广泛应用。永磁同步电动机具有体积小、损耗低、效率高等优点,在节约能源和环境保护日益受到重视的今天,对其进行研究就显得非常必要。文献[1]提出了利用状态反馈线性化的方法,可以用于有效提高系统快速性与精度,但对于进一步抑制非线性扰动的作用仍不理想;文献[2]通过建立精确的系统模型,利用扰动观测器对一定带宽内扰动进行抑制;文献[3]介绍了复合迭代学习控制电机系统,分别是沿时间

轴的反馈控制策略和沿迭代轴的迭代策略,证明其可有效提高电机位置精度;文献[4]采用脉冲整形滤波技术,针对系统的振动模态设计输入指令整形器,并采用离散化的设计方法进行脉冲序列优化,有效地消除了残余振动,提高了系统的响应速度,简化了设计方法。

本研究在 Matlab/Simulink^[5-6]平台上搭建永磁同步电机的仿真模型^[7-8],提出一种基于迭代学习的新型控制策略,即对输入和误差同时进行迭代学习控制的补偿。

1 永磁同步电机数学模型

在笔者研究的永磁同步电机控制中,忽略了磁饱和效应、涡流损耗、温度及频率变化对电动机参数的

收稿日期: 2012-07-30

基金项目: 浙江省重大科技专项资助项目(2011C11063)

作者简介: 史伟民(1965-),男,浙江宁波人,教授,博士,硕士生导师,主要从事机电控制技术方面的研究. E-mail: swm@zstu.edu.cn

影响。

由于永磁同步电动机具有多变量、强耦合、非线性等特点,需要通过矢量控制的坐标变换来实现电机的解耦控制。在 $d-q$ 同步旋转坐标系下,其电路方程和转矩方程分别为^[9-11]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d - \frac{L_q}{L_d}\omega_r i_q \\ \frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q + \frac{L_d}{L_q}\omega_r i_d - \frac{\lambda\omega_d}{L_q} \end{cases} \quad (1)$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (2)$$

式中: i_d, i_q —初级绕组 $d、q$ 轴电流; L_d, L_q —初级绕组 $d、q$ 轴电感,且通常都认为等于 L ; R —定子电阻; v_d, v_q —永磁直线电机初级绕组 $d、q$ 轴方向的电压分量; λ —电磁转矩系数; ω_r —转子角速度; p —定子磁极对数; T_e —电磁转矩。

在 PMSM 磁场定向控制中,为了使输出转矩最大,通常令 $i_d = 0$,所以电动机的转矩方程为:

$$T_e = 1.5p\lambda i_q \quad (3)$$

此时,电磁转矩和 q 轴电流成正比,且有:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

式中: T_L —电机的阻转矩, J —转动系统的转动惯量。

通过控制输出力矩,即可调节速度。

2 迭代学习控制器设计

最初,迭代学习算法由 Arimoto 等人首次提出,迭代学习控制方法适合重复运动特性的被控对象,该方法利用控制系统先前的控制经验,根据系统的实际输出和期望输出的偏差,进行学习算法后,不断修正未来的控制信号,向理想控制信号逼近,从而实现系统的完全跟踪。

2.1 ILC 输入控制

本研究的输入控制采用 P 型算法,其 ILC 控制框图如图 1 所示。

P 型学习律为:

$$u_{k+1}(t) = (1 - \alpha)u_k(t) + \mu e_k(t) \quad (5)$$

式中: α —遗忘因子, μ —误差迭代因子。

其中,第 k 次的误差信号为:

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t)$$

2.2 ILC 误差控制

在上述输入控制采用 P 型算法的同时,本研究对误差也进行 ILC 控制校正。该方法在利用前次误差信号中相邻两次抽样的误差变化值以及最大的误差值

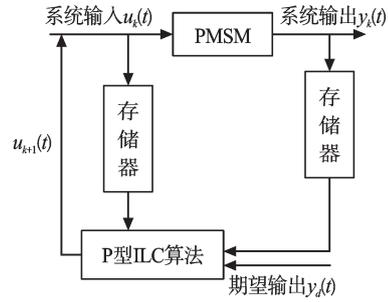


图1 ILC输入控制示意图

$y_d(t)$ —给定的期望转速; $y_k(t)$ —系统第 k 次的实际输出转速; $u_k(t), u_{k+1}(t)$ —第 k 次与第 $k+1$ 次前馈电流补偿控制量; $e_k(t), e_{k+1}(t)$ —第 k 次与第 $k+1$ 次的实际输出转速与期望转速的误差值

对新的误差进行迭代修正,从而可以更好地及时预期误差变化,更快地逼近真实的输入控制,抑制扰动。具体推导过程如下:

$$e_{k+1}(t) = e_{k+1}^*(t) + E_k^*(t) \quad (6)$$

式中: $e_{k+1}(t)$ —经过 ILC 学习后的第 $k+1$ 次的误差输入; $e_{k+1}^*(t)$ —第 $k+1$ 次迭代时系统实际输出 $y_{k+1}(t)$ 与期望值 y_d 的差值; $E_k^*(t)$ —利用第 k 次误差信息对第 $k+1$ 次误差进行修正的迭代补偿误差。

依据下面叙述可得到:

$$E_k^*(t) = B \frac{|e_k(t)|}{\varepsilon} |\Delta e(t)| \quad (7)$$

式中: ε —给定的误差范围参数(本研究取 0.3); $\Delta e(t)$ —误差的下一个抽样与本次抽样 (t 时刻)的差值,反映了在下一时刻误差的变化趋势, $\Delta e(t) = e_k(t+1) - e_k(t)$; B —修正系数。

Step1: 在初始状态下反复试验,不断更改修正系数 B 的值,直到迭代效果最好,此时,记下 $E_k^*(t)$ 的最大输入值 $E_k^*(t)_{\max}$, 与 $|e_k(t)|$ 的最大估计值一起代入式 (7), 可得 $|\Delta e|$ 的计值 $|\Delta e|^*$;

$$\text{Step2: } B = \frac{\lambda |e_k(t)|_{\max} + E_k^*(t)_{\max}}{|e_k(t)|_{\max} |\Delta e|^*} \varepsilon;$$

Step3: 将上一步的 B 的表达式代入式 (7), 可得:

$$E_k^*(t) = \frac{\lambda |e_k(t)|_{\max} + E_k^*(t)_{\max}}{|e_k(t)|_{\max} |\Delta e|^*} |e_k(t)| |\Delta e(t)| \quad (8)$$

式中: $|e_k(t)|_{\max}$ —第 k 次迭代时误差的最大绝对值; λ —误差最大值与迭代补偿误差的传递系数,可通过反复试验得到。

本研究将输入迭代控制和误差补偿迭代控制结合时,其示意图如图 2 所示。第 $k+1$ 次运行时,将实际输出与参考值比较后得到实际误差 $e_{k+1}^*(t)$, 将其进

行迭代学习后,可得误差输入值 $e_{k+1}(t)$ 。同时,在输入控制部分,本研究利用第 k 次的实际误差 $e_k^*(t)$,通过P型迭代学习后,可得第 $k+1$ 次的输入值 $u_{k+1}(t)$ 。

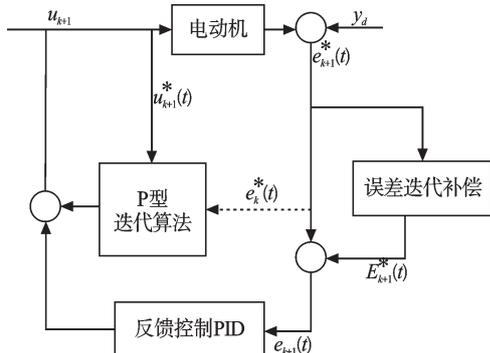


图2 整个系统迭代示意图

由图2可以看出,该控制方法在输入和误差部分同时进行迭代学习,可以及时利用前次与本次误差信息对误差变化进行预测和补偿,有效提高了误差输入的准确性,同时可以对后续输入控制产生影响,补偿输入,提高其干扰抑制性能。

3 仿真实验

如上所述,本研究采用基于 ILC 的输入控制和误差控制相结合的方法对 PMSM 进行同步控制,并在 Matlab/Simulink 的平台上进行仿真,实现电流环和速度环的双闭环控制策略。永磁同步电机参数为:定子电阻为 0.62Ω ; d 、 q 轴电感为 0.0021 mH ;永磁体磁链为 0.08627 Wb ;转动惯量为 $0.00036 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$;极对数为4。给定参考速度为 100 rad/s 。整个系统仿真时间 0.12 s ,在 0.04 s 时,负载转矩由 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 变为 $2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

PMSM 系统控制框图如图3所示。

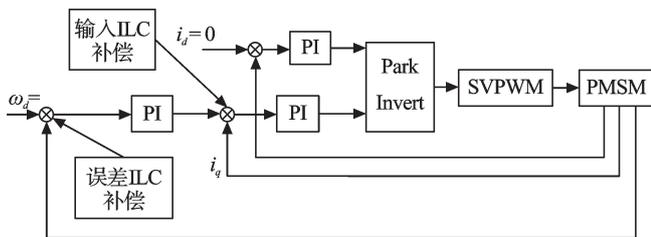


图3 PMSM 系统控制框图

图3中,速度环和电流环均采用PI控制器;其中,位置环控制器比例增益取值为17,积分增益为0.2; d 轴电流控制器比例增益为10,积分增益为70; q 轴电流控制器比例增益为10,积分增益为70。输入 ILC 补偿中,遗忘因子 α 为0.99,误差迭代因子 μ 为0.12。误差 ILC 补偿中,经过反复试验后,传递系数 λ 取0.95,初始状态下的迭代补偿误差的最大输入值 $E_k^*(t)_{\max}$ 为17.8,估计值 $|\Delta e^*$ 为0.04。经过5次学习后转子转速的实验效果如图4所示。当本研究对系统只进行传统的PI控

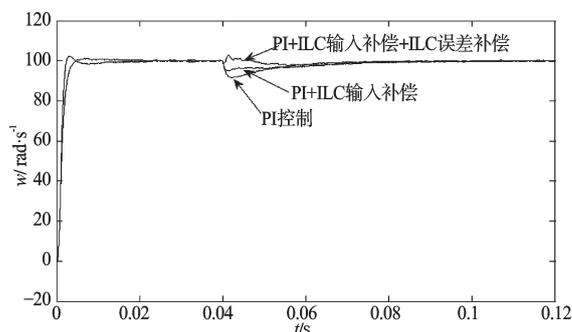


图4 5次迭代后不同控制策略时的转子转速值

制时, 0.04 s 时刻负载转矩突变,速度受到扰动,最小值变为 92.6 rad/s ;当系统受到PI控制与P型 ILC 输入补偿的共同控制时,扰动后最小值变为 95 rad/s ;在前者基础上,研究者对系统加入 ILC 误差补偿控制时,扰动情况明显改善,最小值为 98 rad/s ,最大值为 102 rad/s ,且可以较快恢复到给定速度 100 rad/s 。

系统在过渡时间后的误差均方差如图5所示。图5中,虚线为PI+ILC输入补偿时的情况,实线为PI+ILC输入补偿+ILC误差补偿的情况。可以看出,初次迭代后,后者的扰动抑制效果比前者更为明显。

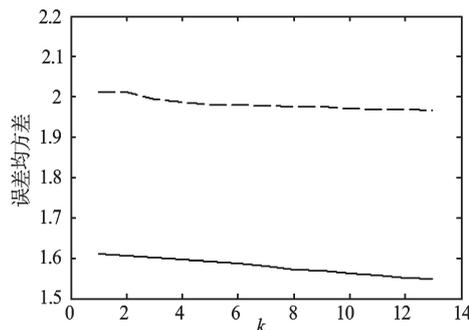


图5 误差均方差

4 结束语

本研究利用电机矢量控制的思想,在 Matlab/Simulink 环境下构建了永磁同步电机数学的仿真模型,对其控制及扰动进行了研究。笔者在传统的PI控制基础上,运用迭代学习理论,提出了P型输入学习补偿和误差输入学习补偿相结合的方法,分别在误差段和输入端进行了迭代研究,对系统同时进行控制。

仿真结果表明:该控制方法具有良好的扰动抑制效果,迭代学习控制有助于系统干扰的消除,降低扰动影响,改善系统运行性能。

参考文献(References):

[1] ZHANG Chun-ming, GUO Qing-ding. feedback linearization based control of speed tracking for AC linear permanent magnet synchronous servo motor[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2003, 18(3): 5-9.

示)。从图中看出,经过神经网络训练的自适应模糊控制的响应曲线与常规PID控制的响应曲线相比,其超调量小、过渡时间短、动态响应过程快、稳态误差小,系统较稳定且鲁棒性好。

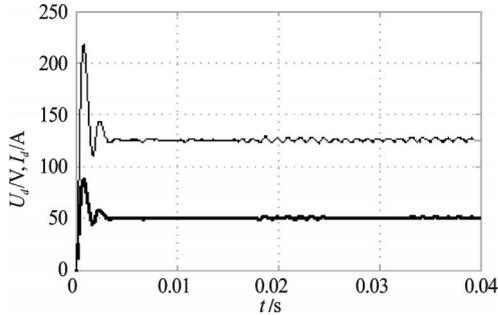


图7 常规PID控制直流电源输出电压和电流波形

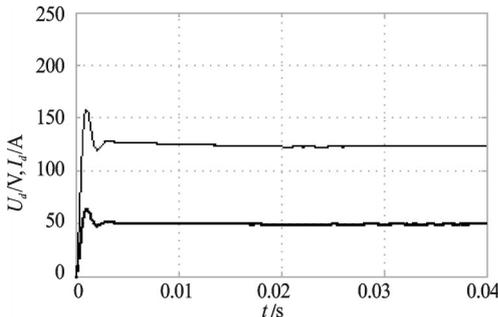


图8 自适应神经模糊控制直流电源输出电压和电流波形

5 结束语

本研究通过DSP TMS320LF2407实现神经网络算法,得出采用神经网络来调整模糊控制规则的方法,并将该控制规则应用于直流电源中。

实验仿真结果表明,利用该方法已可以取得良好的控制效果:既可以有效地解决常规控制方法普遍存

在的自适应能力不强和抗干扰能力差等问题,又可以动态地适应外界环境的变化,从而更有利于满足直流电源实际工作的需要。

参考文献(References):

- [1] 沈 盼. 移相全桥 ZVZCS 式船用充电电源的研究[D]. 武汉:湖北工业大学电气工程学院,2010.
- [2] 张松兰. 自适应模糊控制器设计[J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(2):12-14.
- [3] 刘文军, 罗玉峰. 开关电源模糊控制 PID 的设计和 MATLAB 仿真研究[J]. 微型计算机, 2006, 3(28):36-72.
- [4] 张军涛. 数字电流滞环控制的 Boost DC-DC 变换器[D]. 西安:西安科技大学通信与信息工程学院,2011:26-30.
- [5] 李 恒, 韩向锋. 基于 Matlab 的模糊 PID 双闭环直流调速系统的仿真[J]. 煤矿现代化, 2009(1):72-73.
- [6] 张德丰. Matlab 模糊系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,2009
- [7] KOVACIC Z, BOGDAN S. 模糊控制器设计理论与应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [8] 全钟华. 智能建模、仿真与控制平台[D]. 合肥:中国科学技术大学自动化系,2002.
- [9] 崔雅嵩. 浅谈电力变换技术的几种方式[J]. 吉林工程技术师范学院学报, 2011, 27(7):49-50.
- [10] 张 立, 祝龙记, 李 莉. 基于 DSP 的连续可调高压直流电源的研究[J]. 煤矿现代化, 2008(2):43-44.
- [11] 谢聪乾. 变电站直流电源运行车维护探讨[J]. 机电工程技术, 2011, 40(4):27-29.
- [12] 曹 勇, 王 飞. 基于 UC3848 的降压程控 DC/DC 电源设计[C]//中国高校通信类院系学术讨论会. 南宁:[出版者不详], 2009.
- [13] 任大为, 胡建人. 准谐振开关电源工作频率的研究[J]. 机电工程, 2011, 28(6):765-768.

[编辑:李 辉]

(上接第 1463 页)

- [2] LEKSONO E. Cooperative Control of Multi-manipulator based on Workspace Disturbance Observer considering the Interaction with External Force Environments [C]. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics. Tokyo:[s.n.], 1997.
- [3] MA Hang, YANG Song, LI Ying-shun, et al. Segmented Compensation using Compound Iterative Learning Control on 2D System for Linear Motor [C]. Proceedings of the Ninth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Qingdao[s.n.], 2010.
- [4] 史伟民, 杨亮亮, 陶 维, 等. 基于脉冲整形滤波的轨迹涂胶残余振动抑制研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(7): 860-863.
- [5] 张德丰. Matlab 自动控制系统设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [6] 王中鲜. Matlab 建模与仿真应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [7] 高延荣, 舒志兵, 耿宏涛. 基于 Matlab/Simulink 的永磁同步电机(PMSM)矢量控制仿真[J]. 机床与液压, 2008, 36(7):296-299.
- [8] 贺 凯, 熊光煜. 基于 Matlab7. 1/Simulink 的永磁直线同步电机的建模与仿真[J], 电力学报, 2007, 22(4): 450-453.
- [9] 秦 忆. 现代交流伺服系统[M]. 武汉:武汉理工大学出版社, 1995.
- [10] 杨 勇. 基于模糊自整定的改进型永磁同步电机矢量控制仿真研究[J]. 机电工程技术, 2010, 39(8):47-49.
- [11] 钱 昊, 赵荣祥. 永磁同步电机矢量控制系统[J]. 农机化研究, 2006, 28(2):90-91.

[编辑:李 辉]