

基于遗传算法的永磁同步直线电机 PID 控制研究*

韩彦东 汪旭东 许孝卓 封海潮

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 由于永磁同步直线电机系统运行过程中参数摄动和负载扰动等问题的存在,传统 PID 控制器无法满足高精度伺服控制系统的要求。设计出一种基于遗传算法(GA)优化的 PID 控制器,并通过 Simulink 对永磁同步直线电机控制系统进行建模和仿真实验。仿真和实验表明,采用 GA 优化的 PID 控制器与传统的 PID 控制器在指定速度和负载扰动条件下相比,具有更好的动态稳定性和跟踪性能,能有效抑制参数摄动的影响并对负载扰动具有较强的鲁棒性,实验结果也证明了方案的有效性和可行性。

关键词: 永磁同步直线电机;遗传算法;PID 控制;鲁棒性

中图分类号: TP241.3; TN305.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 120.3099

PID control of permanent magnet linear synchronous motor
based on genetic algorithms

Han Yandong Wang Xudong Xu Xiaozhuo Feng Haichao

(College of electrical engineering and automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: As the permanent magnet synchronous linear motor system is running dynamic parameter uncertainties and load disturbances exist such issues, the traditional PID controller can not meet the requirements of high precision servo control system. This design of an optimal PID controller based on genetic algorithm (GA), and through Simulink permanent magnet synchronous linear motor control system modeling and simulation. The simulation and experimental results show that the genetic algorithm (GA) optimization of PID controller and traditional PID controller at the specified speed and load disturbance conditions, compared with better dynamic stability and tracking performance, can effectively inhibit parameter perturbation impact and load disturbance has strong robustness, The results also demonstrate the effectiveness and feasibility of the program.

Keywords: permanent magnet synchronous linear motor; genetic algorithm; PID control; robustness

1 引言

永磁同步直线电动机直接驱动的提升系统是一种新型无绳提升系统,具有结构简单、无绳直接驱动、速度不受限制等优异性能,逐渐受到人们的重视。由直线电机构成的直驱系统取消了电机与工作台之间的所有中间传动环节,与传统的“旋转电机+滚珠丝杠副”构成的直线运动相比,在精度、快速性、耐久性等方面具有明显的优势^[1]。但系统的参数摄动、负载扰动、端部效应、齿槽效应、摩擦力等不确定因素未经衰减直接作用与永磁直线同步电机,没有任何中间缓解的缓冲,因而增加了控制上的难度^[2-4]。传统 PID 控制器具有很大的局限性,并不具有全局优化的能力,对此

一些学者采用一些智能控制策略。例如基于神经网络的 PID 控制策略,基于迭代学习的永磁直线电机控制方法,自构式模糊神经网络的永磁直线电机控制器等。但这些控制策略都各自有着一些缺陷,如模糊控制对模糊规则选择和比例参数的选取比较敏感,而神经网络控制比较复杂和困难,且鲁棒性较差,迭代学习控制更适用于具有重复性运动的永磁直线电机控制系统中,对于非重复性运动控制有一定的缺陷等^[5-11]

针对这一问题,本文将遗传算法(GA)应用到永磁同步直线电机的控制系统中,设计一种基于遗传算法(GA)参数优化的自整定永磁同步直线电机 PID 控制器,即当外界条件变化时,利用遗传算法对 PID 的 3 个参数 k_p 、 k_i 、 k_d 进

收稿日期:2015-08

* 基金项目:国家自然科学基金(61074095,51277054,U1361109)、教育部高效博士点基金(20114116110003)、河南省重点公关(122102210121)、河南省教育厅自然科学研究(13A470337)资助项目

行实时控制和全局优化,从而提高直线电机的控制精度和鲁棒性。

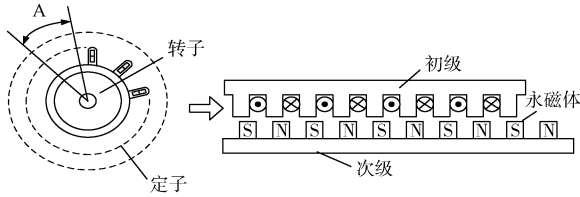


图 1 永磁同步直线电机的结构

2 永磁同步直线电机的数学模型

为分析方便,做如下假设:1)忽略温度及铁心饱和对电机性能参数的影响;2)不考虑初次级阻尼作用和纵向端部效应;3)忽略涡流和磁滞损耗;4)永磁体的电导率为零且磁场恒定不变^[12]。

考虑仅有基波分量的情况,使用 $d-q$ 轴模型设计电机的伺服控制系统。由于永磁体产生磁动势的值是一定的,并且在次级上也不存在阻尼绕组,可整理得到电流平衡方程式:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + \frac{dL}{dt} & 0 \\ 0 & r + \frac{dL}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Li_q \\ \psi_{PM} + Li_d \end{bmatrix} \frac{\pi v}{\tau} \quad (1)$$

式中: L 为电枢电感, τ 为极距, ψ_{PM} 为永磁体有效磁通, v

为动子运动速度。

交轴直轴磁链方程为:

$$\begin{aligned} \phi_d &= L_d i_d + \phi_f \\ \phi_q &= L_q i_q \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ϕ_d 、 ϕ_q 为 $d-q$ 轴磁链, ϕ_f 为定子磁钢在电枢中的耦合磁链。

在没有任何外力的作用下,现对电磁推力做如下推导,输入功率为:

$$P = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3)

$$P_{dq} = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) = \frac{3}{2}[(i_d^2 R_s + i_q^2 R_s) + (i_d \frac{\partial \phi_d}{\partial i_d} + i_q \frac{\partial \phi_q}{\partial i_q}) + \frac{\pi v}{\tau}(\phi_d i_q - \phi_q i_d)] \quad (4)$$

式中: $i_d \frac{\partial \phi_d}{\partial i_d} + i_q \frac{\partial \phi_q}{\partial i_q}$ 为无功功率, $\frac{\pi v}{\tau}(\phi_d i_q - \phi_q i_d)$ 为电机的电磁功率 P_e 。

当有 p 对极时,可得电磁推力的表达式为:

$$F_m = \frac{P_m}{v} = \frac{3\pi p}{2\tau}(\phi_d i_q - \phi_q i_d) \quad (5)$$

永磁同步直线电机的机械平衡方程为:

$$F_m = F_L + B_v v + M \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

式中: F_m 为电磁推力, F_L 为负载阻力, B_v 为粘性摩擦系数, M 为运动部分的质量。由式以上方程组即可建立 $d-q$ 坐标系下的永磁直线电机模型,如图 2 所示。

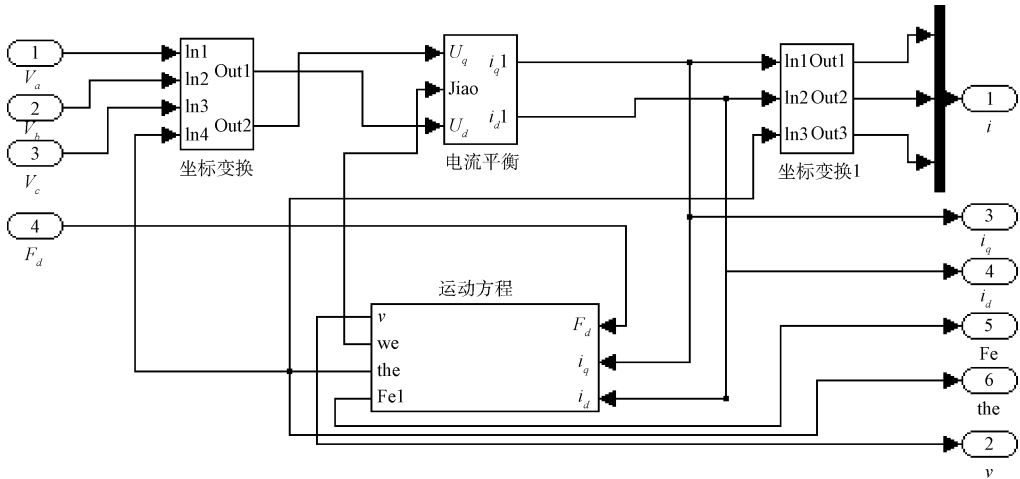


图 2 永磁同步直线电机的仿真模型

3 基于 GA 优化的 PID 控制器设计

3.1 PID 控制理论

PID 控制是最为常见的控制规律,其原理图如图 3 所示。

该系统是由模拟 PID 控制器和被控对象组成。PID 控

制器的输出值 $v(t)$ 取决于系统给定值 $r(t)$ 和系统输出值的偏差 $e(t)$ 、偏差的积分、偏差的微分的线性加权组合,即:

$$v(t) = K_P [e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (7)$$

式中: T_I 为积分时间常数; T_D 为微分时间常数; K_P 为比例系数。

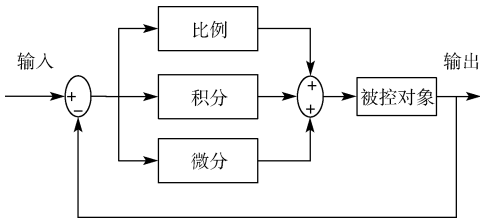


图3 PID控制系统原理框图

传统的PID控制器尽管将 k_p 、 k_i 、 k_d 参数设定的很合理,但由于设定值是固定的,无法满足高精度永磁同步直线电机伺服控制要求。永磁同步直线电机在运行过程中存在着参数摄动和负载扰动等不确定因素干扰,因此要考虑与其他方法相结合的控制技术,以达到对永磁同步直线电机高精度和高鲁棒性控制的目的。

3.2 GA 优化 PID 参数

GA 是 Holland 提出的模拟自然界的“优胜劣汰、适者生存”的生物进化论法则所衍生的一种并行随机搜索最优方法。作为一种随机化搜索算法,首先通过产生一组初始的解,通过“复制”、“交叉”、“变异”对初始解的变量进行操作。通过个体适应度指标来淘汰适应度低的个体,使整个“种群”向更加适应环境的方向发展,从而得到最优解。理论上分析,在保留上一代最佳个体的前提下,迭代过程中遗传算法是全局收敛的,并且具有很强的全局搜索能力^[13-15]。因此本文将 GA 与传统 PID 控制相结合设计出一种能过利用遗传算法在线自整定参数的永磁直线同步电机伺服系统的速度调节器,其结构图如图3所示。

在应用 GA 时,为避免参数选取范围过大,往往先按经验选取一组参数,然后将这组参数利用遗传算法进行设计,以此来降低初始寻优的盲目性,大大减少计算量。

利用遗传算法优化 k_p 、 k_i 、 k_d 的流程如图4所示。

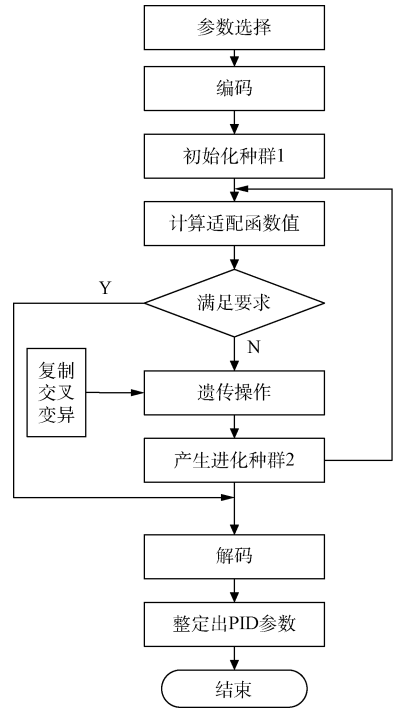


图4 GA 优化 PID 参数自整定流程

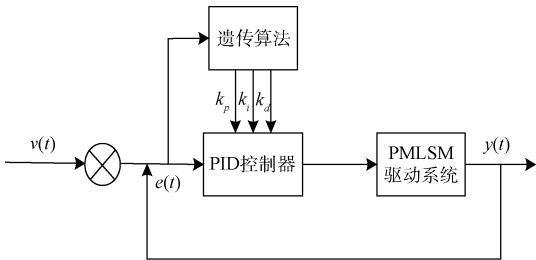


图3 GA 优化的 PID 控制原理

4 仿 真

根据前文推导出的电流平衡方程和机械运动方程所构建的永磁同步直线电机模型,用 Simulink 建立基于 GA 优化 PID 参数的永磁同步直线电机伺服控制系统,如图5所示。

在基于遗传算法优化的控制系统中,将外环(速度环)输入的速度指令与反馈速度比较产生的误差 e 送入GA优

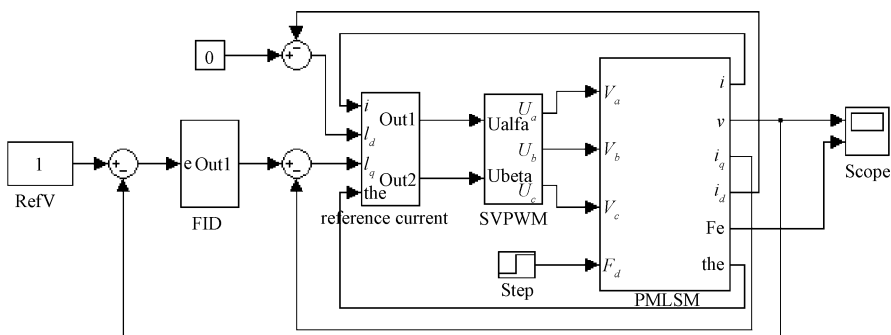


图5 GA 优化 PID 控制仿真系统

化 PID 参数控制器中从而实现 PID 参数 k_p 、 k_i 、 k_d 的整定优化,控制器的输出 u 作为电流环的输入调制产生控制波形,输出三相正弦信号驱动永磁同步直线电机。

分别对传统 PID 控制器和用 GA 优化的 PID 控制器的永磁同步电机控制系统进行仿真,永磁同步电机速度参考指令设定为 1 m/s,空载启动。为监测两种控制器的抗干扰能力,在 0.03 s 时施加 200 N 的冲击响应。永磁同步直线电机的仿真参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

参数	参数值
极对数	1
极距	32 mm
转子质量	5 kg
绕组电阻	2.6 Ω
永磁磁链	0.3 Wb
直轴电感	26.7 mH
交轴电感	26.7 mH

仿真结果如图 6 所示。从速度响应曲线图上可以看出 GA 优化 PID 控制器在响应速度上略低于传统 PID 控制器,但速度响应没有超调量,能够保证电机平稳、快速启动并达到指定速度指令。从转矩响应曲线可以看出在施加 200 N 的负载扰动时,经优化的 PID 控制器的控制效果更好,响应曲线过渡平滑,超调量更小。说明 GA 优化 PID 控制器具有更强的动态跟踪性能和更好的抗干扰性能。

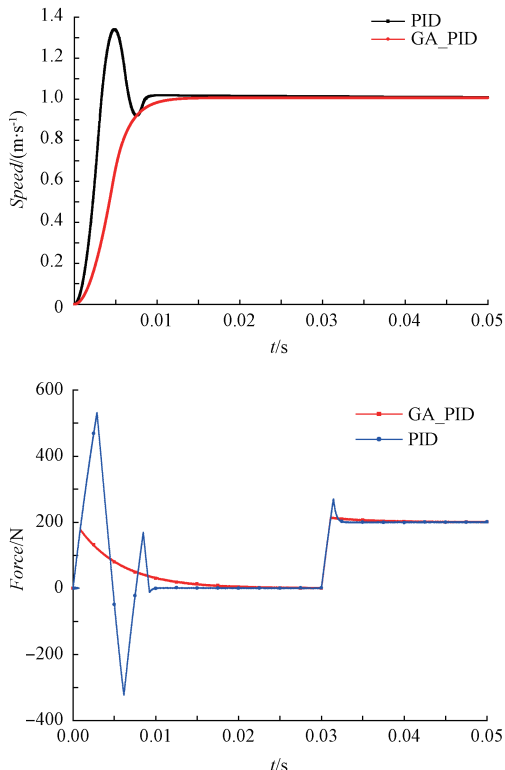


图 6 速度响应和转矩响应曲线

5 实 验

实验采用永磁直线电机无绳提升装置,电机的主要参数为:极对数为 2,极距 32 mm,转子质量 5 kg,绕组电阻 3.5 Ω ,绕组电感 34 mH。

实验时,无绳提升系统电机的速度控制同仿真时一样,分别采用传统 PID 控制和遗传算法优化的 PID 控制。电机的给定速度为 50 mm/s,电机的实际速度响应曲线如图 7 和 8 所示。

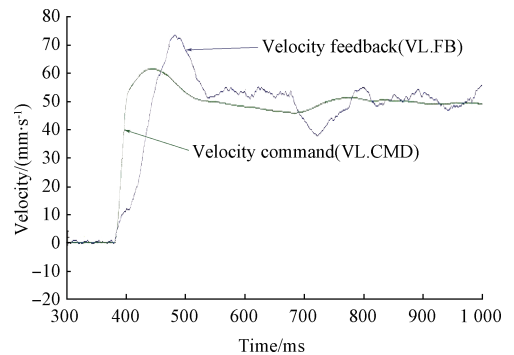


图 7 传统 PID 控制电机速度响应曲线

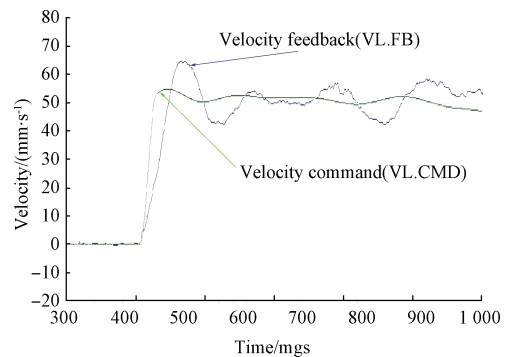


图 8 GA 优化 PID 控制电机速度响应曲线

从图 7 和 8 可知,两种控制方式都具有良好的速度跟踪特性,后者的响应速度更快。传统 PID 控制电机启动时速度响应幅值波动为 25 mm/s,稳态定的速度波动幅值为 11 mm/s;遗传算法优化的 PID 控制电机启动时速度响应幅值波动为 15 mm/s 稳定后的速度波动幅值为 8 mm/s。

6 结 论

针对传统 PID 控制技术中遇到电机参数摄动控制器参数无法随之跟踪变动的问题,提出一种基于 GA 对 PID 的 3 个参数 k_p 、 k_i 、 k_d 进行在线自整定优化的控制方法。并通过 MATLAB 仿真和实验的方法对两种控制进行比较,从仿真和实验结果可知,此控制方法相比于传统 PID 控制方法具有更好的动态响应性能和鲁棒性,具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] LUO H H, WU J, CHANG W S. Minimizing thrust fluctuation in moving-magnet permanent-magnet brushless linear dc motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007(43): 1968-1972.
- [2] SUNG C C, HUANG Y S. Based on direct thrust control for linear synchronous motor systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1629-1639.
- [3] CHEEMA M A M, FLETCHER J, RAHMAN M F, et al. Modified direct thrust control of linear permanent magnet motors with sensorless speed estimation[C]. IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2012: 1908-1914.
- [4] 焦留成, 陈志平. 永磁直线同步电机同步电动机特性及控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [5] 付子义, 程志平, 韩元盛. 神经网络PID控制在永磁直线同步提升系统中的应用[J]. 河南理工大学学报, 2005, 24(1): 61-64.
- [6] 张宏伟, 焦留成, 康润生. 永磁直线同步电动机提升系统的模糊PID控制[J]. 微电机, 2004, 37(6): 34-36.
- [7] 余发山, 岳伟超, 张瑞庄, 等. 基于迭代学习的矿井提升系统跟踪控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(2): 138-145.
- [8] 汪旭东, 夏涛, 许孝卓, 等. 永磁同步直线电机的粒子群PID空间矢量控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 655-661.
- [9] 张金龙, 徐慧, 刘京南, 等. 基于模糊神经网络的精密角度定位PID控制[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 549-552.
- [10] 肖成, 陈刚, 冯登超, 等. 基于最优模糊推理的风电机组变桨距二维模糊PID控制器设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(10): 22-25.
- [11] 张宏伟, 余发山, 卜旭辉, 等. 基于鲁棒迭代学习的永磁直线电机控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(6): 81-86.
- [12] 赵吉文, 王荔枝, 张梅, 等. 直线电机定子位置检测的图像亚像素测量算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2592-2598.
- [13] WANG L M, PANG Y. Variable-gain cross coupling control for linear motor XY table based on genetic algorithm[C]. Transactions on Tech Publications Advanced Materials Research, 2011 (383): 7104-7110.
- [14] MA X J, LIU L, LI L. Research and simulation on PID control method for brushless DC motor based on genetic algorithm and BP neural network[C]. 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008.
- [15] LIU J, XIE Q W. Research on the Fuzzy PID speed control system of permanent magnet linear synchronous motor based on genetic algorithm[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014 (494): 1582-1586.

作者简介

韩彦东, 1987年出生, 硕士研究生, 主要研究领域为直线电机设计及其控制。

E-mail: 393365298@qq.com

汪旭东, 1967年出生, 河南省特聘教授, 博士研究生导师, 主要研究领域为直线电机及其电气控制, 特种电机研究及设计等。

许孝卓, 1981年出生, 河南理工大学讲师, 主要研究领域为直线电机理论研究及其应用等。

封海潮, 1983年出生, 河南理工大学讲师, 主要研究领域为特种电机优化设计及其控制。