

李争,王蕾永,肖宇,等. 蚁群自寻优滑模控制在永磁同步直线电机的应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(3):77-84. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.012

Li Z, Wang L Y, Xiao Y, et al. Application of Ant Colony Self-optimizing Sliding Mode Control in PMLSM [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35(3):77-84. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.012

# 蚁群自寻优滑模控制在 永磁同步直线电机的应用

李争\*, 王蕾永, 肖宇, 周硕, 史雁鹏, 薛智宏

(河北科技大学 电气工程学院, 河北 石家庄 050018)

**摘要:** 本文以永磁同步直线电机(PMLSM)为研究对象,提出了基于蚁群自动寻优滑模控制策略.滑模结构对系统适应性强,蚁群算法具备较强的自学习能力,可以实现参数的自动寻优,把两者结合起来,充分发挥各自的优势,提高控制性能.首先通过理论分析建立了永磁同步直线电机的仿真模型,并基于此模型进行了算法验证,通过验证得出该算法可以有效改善直线电机控制性能,提高了系统鲁棒性.然后在永磁同步直线电机样机上进行算法验证,结果表明,算法控制效果优良,在永磁同步直线电机上具有可行性.

**关键词:** 蚁群算法; 滑模算法; 永磁同步电机; 直线电机

中图分类号:TM359.4 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2020)03-0077-08

## Application of Ant Colony Self-optimizing Sliding Mode Control in PMLSM

Li Zheng, Wang Leiyong, Xiao Yu, Zhou Shuo, Shi Yanpeng, Xue Zhihong

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract:** Permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) was taken as the research object, an ant colony based automatic optimization sliding mode control strategy was proposed. The sliding mode structure was adaptable to the system, ant colony algorithm had strong self-learning ability, automatic optimization of parameters were realized. Combined their respective advantages, control performance was improved. Firstly, the simulation model of PMLSM was established by theoretical analysis. Based on this model, the algorithm was verified that the algorithm effectively improved the control performance of linear motor and improved the system robustness. Then the algorithm was verified on the prototype of permanent magnet synchronous linear motor. The results show that the algorithm has satisfied control effect and is feasible on the permanent magnet synchronous linear motor.

**Keywords:** ant colony algorithm; sliding mode control; permanent magnet synchronous motor; linear motor

收稿日期:2019-02-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877070; 51577048);河北省自然科学基金资助项目(E2018208155);河北省高等学校科学技术研究重点项目资助(ZD2018228);河北省高层次人才资助项目(A201905008);高节能电机及控制技术国家地方联合工程实验室开放课题项目资助(KFKT201901);河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2018085)

\*通信作者, E-mail: Lzhfgd@163.com

传统的PID算法,结构简单,不依赖精确模型,但PID控制器由于其本身的特性,存在着控制精度不高等弊端,往往达不到控制精度.而且PID参数整定大多基于工程经验,整定过程耗时且精度有限.滑模变结构控制是一种非线性鲁棒控制系统,滑模控制器结构简单、输出稳定、易于实现等优点得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>.但滑模控制器参数整定没有统一的整定原则,造成了滑模控制效果不理想,抖振大,且参数整定依赖工程师的经验,存在较大随意性.近年来,诸多学者把智能算法引入到电机控制领域<sup>[5-9]</sup>,蚁群算法(ACO)可以自动寻优<sup>[10-12]</sup>,并具有自学习能力,通过把蚁群算法和滑模控制相结合,发挥各自优势,可以提高控制性能.

## 1 永磁同步直线电机的数学模型

永磁同步直线电机和普通旋转式永磁同步电机的原理类似,借鉴旋转电机的建模过程建立永磁同步直线电机的数学模型.建立直线电机在旋转坐标系下的电压方程、磁链方程、运动方程、反电动势方程等,经过Clark变换和Park变换,可以得到永磁同步直线电机在 $d-q$ 坐标下的电压回路方程和磁链方程式(1)<sup>[13-14]</sup>.

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d} \frac{v\pi}{\tau} i_q + \frac{u_d}{L_d}; \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q}i_q - \frac{v\pi}{\tau} \frac{L_d}{L_q} i_d + \frac{u_q}{L_q} - \frac{\psi_f}{L_q} \frac{v\pi}{\tau}; \\ \psi_d = L_d i_d + \psi_f; \\ \psi_q = L_q i_q. \end{cases} \quad (1)$$

考虑到关系式(2):

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = 0; \\ \frac{ds}{dt} = v. \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可以获得状态方程式(3).

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu; \\ y = Cx. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $C$ 为常量;其余变量为  $A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \frac{\pi}{\tau} & 0 & 0 \\ -\frac{L_d}{L_q} \frac{\pi}{\tau} & -\frac{R_s}{L_q} & \frac{\varphi_f}{L_q} \frac{\pi}{\tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $x = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v \\ s \end{bmatrix}$ ,  $u = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$ ,  $y = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix}$ .

电磁推力为

$$F_{em} = p_n \frac{3\pi}{2\tau} [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]. \quad (4)$$

运动方程为

$$m \frac{dv}{dt} = F_{em} - f - Bv. \quad (5)$$

式中: $L_d, L_q$ 为直轴和交轴电感量; $\psi_d, \psi_q$ 为直轴和交轴的磁通量; $\tau$ 为电机极距; $m$ 为动子质量; $v$ 为直线电机运行速度; $B$ 为粘滞摩擦系数; $\psi_f$ 为永磁体磁链; $F_{em}$ 为电机推力; $p_n$ 为电机极对数.对于隐极电机, $L_d=L_q$ ,则式(4)可简化为

$$F_{em} = p_n \frac{3\pi}{2\tau} \psi_f i_q. \quad (6)$$

基于以上分析,结合电压、电流的 Park 变换、Park 逆变换,Clark 变换可得永磁同步直线电机的仿真模型为如图 1 所示。

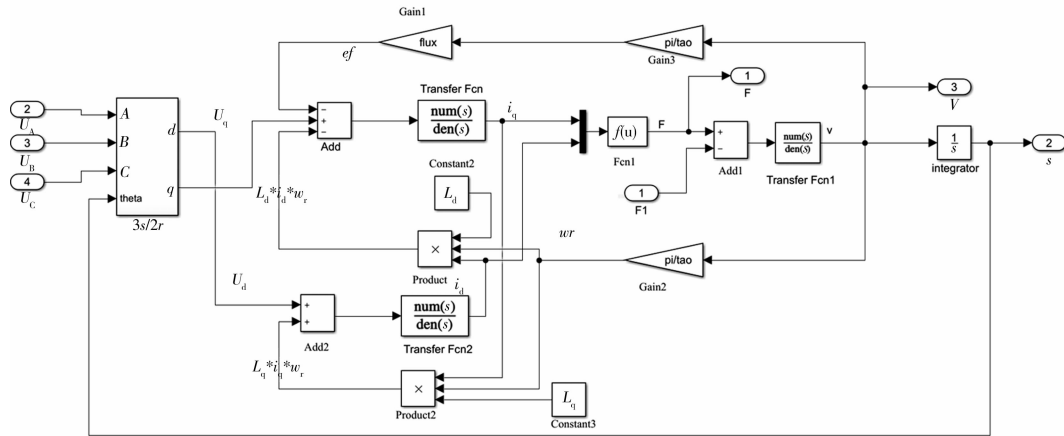


图 1 永磁同步直线电机仿真模型

### 2 直线电机推力模型分析

直线电机由于取消了中间传动环节,使电机具有了高精度、高速、高加速度等的性能,但正是因为取消了中间环节,相当于缺少了一个一阶惯性环节,外界的干扰可以直接作用在电机动子上,直线电机电磁推力来自动子和定子之间的电磁作用力,因此容易对直线电机的推力造成干扰。

直线电机的磁场建模有等效磁势法和等效磁化电流法,文献[21]对 2 种方法进行了详细描述.得出了磁力线分布和磁通密度分布图.直线电机的机械参数如下:极距 16 mm,永磁体宽度 13 mm,永磁体高度 5 mm,气隙 15 mm,动子厚度 7 mm.本文基于等效磁势法对磁场进行了 MATLAB 编程实现.磁场分布如图 2 所示.直线电机的动子在 y 方向上占据一定的空间,定子磁场在 y 轴的中间位置(y=8)最接近于正弦波(如图 3).动子高度为 7 mm,占据的 y 轴为 5~11 mm 的范围,磁场矢量分布如图 4 所示。

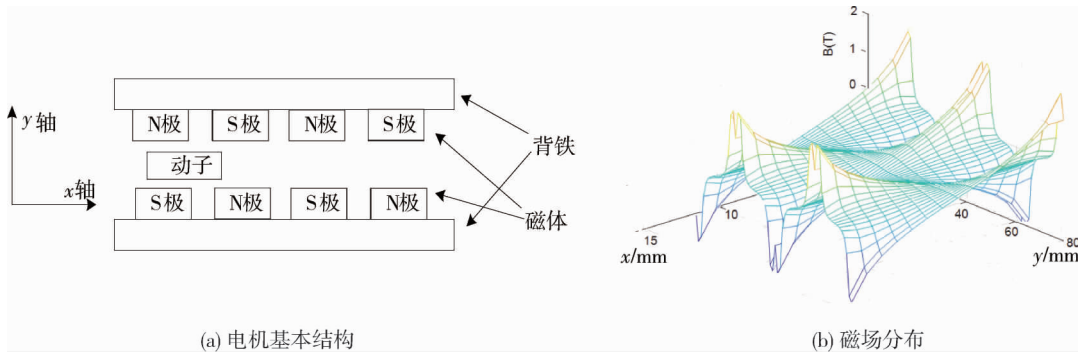


图 2 直线电机结构和磁场分布

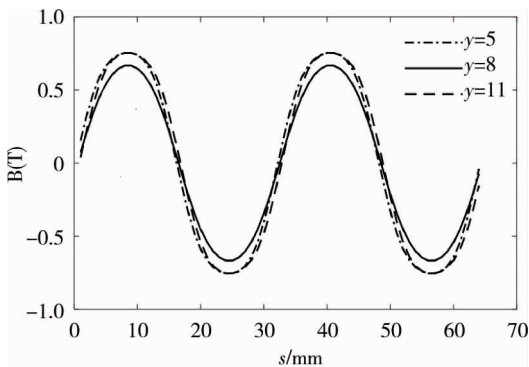


图 3 动子所在磁场的磁密分布

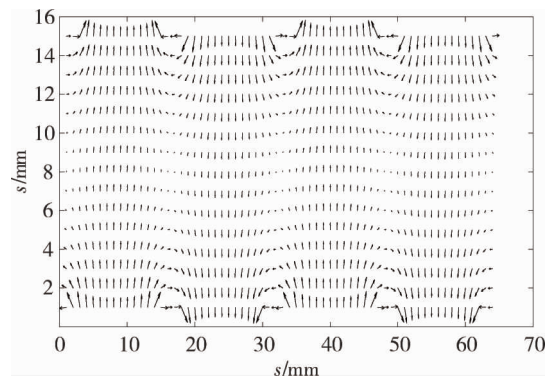


图 4 磁密矢量分布

从图 4 可知动子所在的磁场的磁密分布不均匀,这是造成直线电机推力波动的原因之一,U 型无铁芯

的直线电机的定子磁场分布相比于单边有铁芯直线电机的磁场分布对称性和正弦度更好<sup>[22]</sup>.忽略谐波含量不会对推力造成较大影响.

### 3 蚁群自寻优滑模控制器的设计

#### 3.1 传统积分滑模控制器设计

滑模变结构控制是一种特殊的变结构控制的,理想的滑模控制沿着切换面过渡到稳定状态<sup>[15]</sup>,但是由于其开关特性、非线性因素等,实际的滑模控制沿着一定特性下的切换函数做小幅、高频震荡切换,最终过渡到稳定状态附近<sup>[16-19]</sup>.

取永磁同步直线电机的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = v_r - v; \\ x_2 = \dot{x}_1 = \dot{v}_r - \dot{v}. \end{cases} \quad (7)$$

式中: $v_r$ 为转速给定值; $v$ 为转速反馈值.

求导可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{v}_r - \dot{v}; \\ \dot{x}_2 = \ddot{x}_1 = \ddot{v}_r - \ddot{v}. \end{cases} \quad (8)$$

对式(5)微分,并将式(6)带入可得

$$m\ddot{v} = K_t \dot{i}_q - \dot{f} - B\dot{v} \quad (9)$$

式中: $K_t = \frac{3\pi}{2\tau}\psi_f$ .

当给定速度和负载为定值时,式(8)和式(9)可简化为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{v}; \\ \dot{x}_2 = -\ddot{v}. \end{cases} \quad (10)$$

$$m\ddot{v} = K_t \dot{i}_q - B\dot{v}. \quad (11)$$

对于传统的滑模变结构算法,滑模切换函数选择 $s = cx_1 + x_2$ ,其中 $c$ 为正常数.采用指数趋近律 $\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks$ ( $k > 0, \varepsilon > 0$ )结合传统滑模切换函数,可以得到控制量 $i_q$ .

$$i_q = \frac{\int \left[ \left( c - \frac{B}{m} \right) x_2 + \eta \text{sgn}(s) + ks \right] dt}{K_t/m}. \quad (12)$$

#### 3.2 蚁群优化算法

蚁群算法是一种寻找优化路径的几率型算法,初步的研究表明该算法具有很多良好的性质,应用越来越广泛,并逐渐与其他算法融合<sup>[23-24]</sup>.蚁群算法是从自然界中真实蚂蚁觅食的群体性行为得到启发而提出的,其很多观点是来自于真实蚁群.蚁群算法本质上是一种并行的正反馈算法,具有较强的鲁棒性.相对于其他算法,蚁群算法优化的求解结果不依赖于初始路径的选择.蚂蚁在寻找路径时会在路径上释放出一种特殊的信息素,蚂蚁选择激素浓度较高路径的概率相对较大,形成一个正反馈.最优路径上的信息素浓度越来越大,其他路径上激素浓度却会随着时间的流逝而消减,最终整个蚁群会找出最优路径<sup>[20]</sup>.蚁群算法的核心思想有3条:选择机制,蚂蚁按状态转移概率进行路径选择,信息素越多的路径,得到的状态转移概率越大,被选择的可能性越高;信息素更新机制,路径越短,信息素增加越快;协作机制,个体之间通过信息素进行信息交流.

基于蚁群算法的滑模变结构控制器的自动寻优过程是对整个搜索空间进行全局搜索.在准则函数约束和信息素的指引下对不断调整参数值,最终找到最优路径,进而得到滑模控制器的3个参数指标,实现自动寻优,如图5所示.

在电机控制领域,优化目标一般为电机的动态性能和稳态性能.本文的被控对象为永磁同步直线电机,优

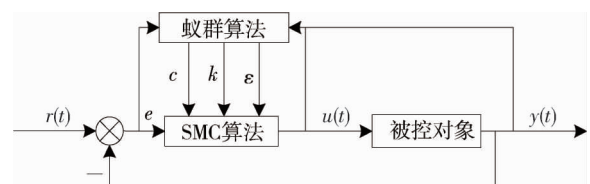


图5 蚁群自寻优滑模控制

化指标为超调量、调节时间、稳态误差、响应速度等静态和稳态指标.蚁群优化并不是对所有指标进行最优化设计,本文选取静态误差、上升时间作为综合约束条件,并引入超调量作为惩罚机制.采用的准则函数为

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| + ey(t) dt + t_u. \tag{13}$$

式中: $e(t)$ 为系统误差; $t_u$ 为上升时间; $ey(t)$ 为引入的超调量惩罚因子,抑制超调量.

### 3.3 优化实现

蚁群算法是一种寻找优化在蚁群优化实现过程中,首先将各条路径用相同的信息素值进行初始化,保证在第一次遍历时,蚂蚁往各个方向的概率相同,使得蚂蚁可以进行全局搜索,防止陷入局部最优解,以保证算法的有效性.设蚂蚁总数为 $m$ ,对于每只蚂蚁 $k$ ,其相应的目标函数为 $Q_i$ .

$$\Delta Q_{ij} = Q_i - Q_j. \tag{14}$$

定义蚂蚁 $k$ 在 $t$ 时刻的转移概率为

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\Delta Q_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k \in \text{allowed}_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\Delta Q_{ij}(t)]^\beta} & \\ 0 & \end{cases} \tag{15}$$

经过 $n$ 个单位时间后,蚂蚁所移动路径上的信息素强度按照式(16)做出相应调整:

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}; \\ \Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k. \end{cases} \tag{16}$$

式中: $\Delta\tau_{ij}^k$ 为第 $k$ 只蚂蚁在本循环中的路径 $ij$ 上留下的信息素强度.因此 $\Delta\tau_{ij}^k$ 可以表示为式(17).

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} F/Q_k; \\ 0. \end{cases} \tag{17}$$

式中: $F$ 为常数; $Q_k$ 为第 $k$ 只蚂蚁在本次循环中的目标函数值.蚂蚁完成一次循环后,对蚂蚁信息素进行更新,不断重复如上过程,得到控制器最优参数值(见图6).

### 3.4 蚁群算法参数对控制效果的影响

信息素进行更新,不断重复如上过程,得到控制器最优参数值蚁群算法的参数 $\alpha, \beta, \rho$ 对参数收敛性的影响,如图7和图8所示.从图7可知, $\alpha=0.8, \beta=0.2$ 时,代价函数收敛较快,且控制效果相当,收敛效果较好,挥发因子对收敛性和代价函数也有一定影响, $\rho=0.7$ 虽然代价函数不是最低,但是其收敛性最好,且代价函数与 $\rho=0.3$ 时相当,因此挥发因子选用 $\rho=0.7$ 作为验证参数.因此下面是按照此参数进行实验.

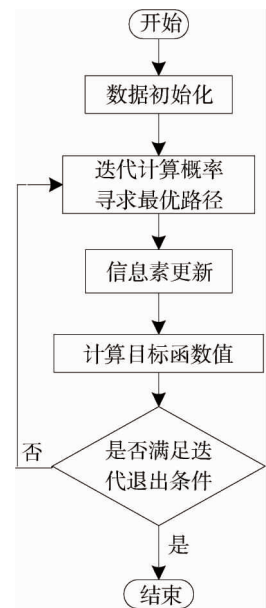


图6 蚁群算法寻优流程

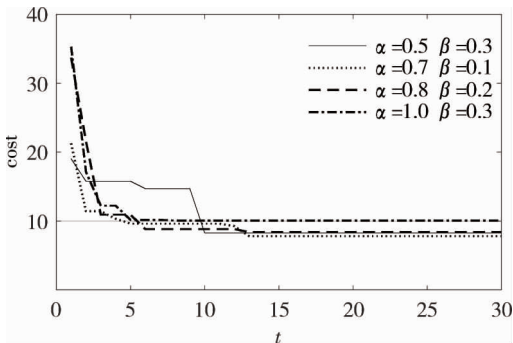


图7 启发因子和期望因子对综合性能指标的影响

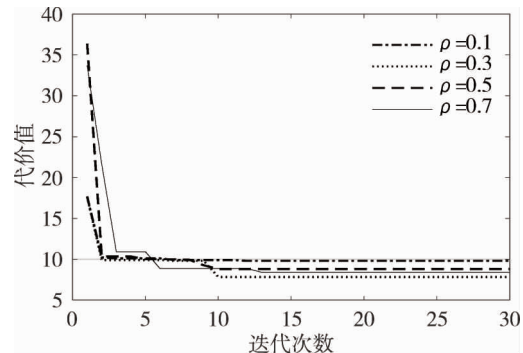


图8 挥发因子对控制效果的影响

## 4 算法仿真验证

永磁同步直线电机为高阶非线性系统,可以表示为式(3)的状态空间模型,确定积分滑模控制器参数 $c, k, \varepsilon$ 为可行解的空间矩阵,决策变量下界(LB)为 $[0.1, 0.1, 0.1]$ ,决策变量上界为 $[10, 10, 10]$ (由经

验可知,滑模控制器的3个参数的值较大,在程序中做了放大),进而将边界间数据进行100等分,得到蚁群算法搜索表.初始化蚁群算法参数:信息素因子取 $\alpha=0.8$ ,启发因子取 $\beta=0.2$ ,信息挥发因子取 $\rho=0.7$ ,蚂蚁数量取20,迭代次数为30次.永磁同步直流电机的蚁群自寻优滑模控制原理图如图9所示.速度环用蚁群自寻优滑模变结构控制器,电流环采用 $i_d=0$ 的磁场定向控制,速度环的输出为电流环 $i_q$ 的给定值.

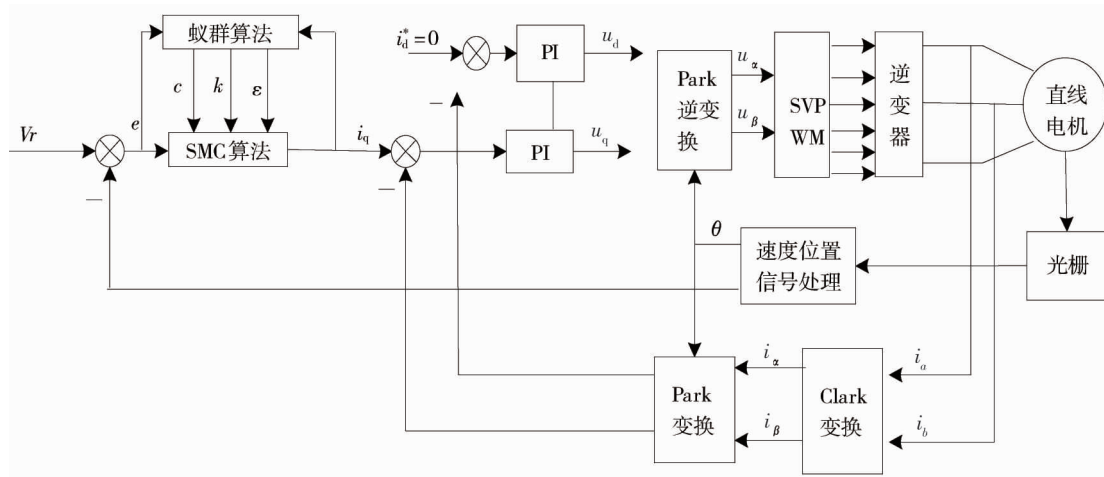


图9 蚁群自寻优滑模控制原理

本文仿真模型的电机具体参数: $R_s = 4.0 \Omega$ ;  $L_d = 8.2 \text{ mH}$ ;  $L_q = 8.2 \text{ mH}$ ;  $m = 1.425 \text{ kg}$ ;  $\Psi_f = 0.029 \text{ Wb}$ ; 粘滞摩擦系数  $B = 44 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\tau = 0.016 \text{ m}$ .仿真中,速度给定值在  $0.5 \text{ m/s}$  时,通过蚁群自寻优滑模控制器,测得动态速度响应曲线(见图10).由图10可知,仿真模型的跟踪性能良好、响应快速、无超调、无静态偏差、控制性能优异.滑模控制器参数收敛如图11所示,在进行第5次迭代时,控制器参数即收敛到最优.控制参数此时  $c = 6.87$ ,  $\varepsilon = 3.54$ ,  $k = 8.58$ .为了进一步说明蚁群自寻优控制器的优势,与PID控制器和积分滑模控制器做了对比,得到速度仿真曲线(见图12)和推力曲线(见图13).表2给出了PID算法、积分滑模算法、蚁群自寻优滑模算法的控制指标的详细参数.可以得出,蚁群自寻优滑模算法,在静态指标和稳态指标上都优于PID控制器和积分滑模控制器.

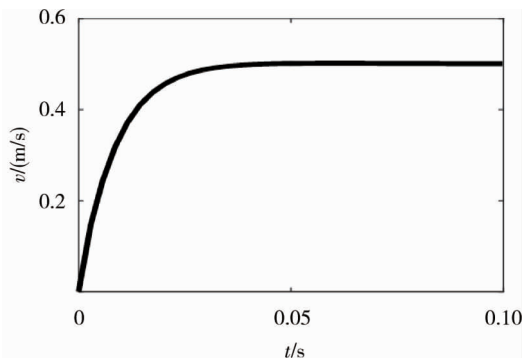


图10 蚁群自寻优滑模响应曲线

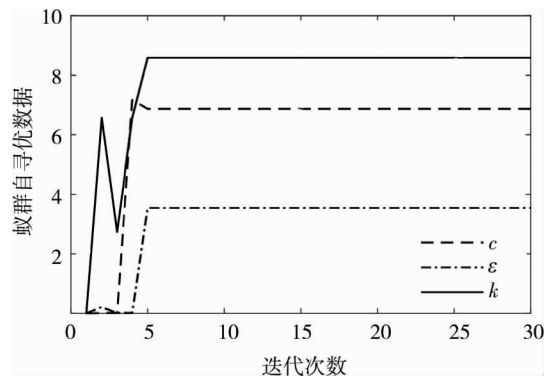


图11 滑模控制器参数收敛

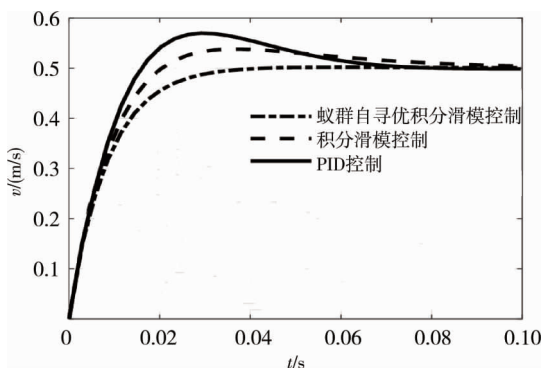


图12 3种算法速度响应

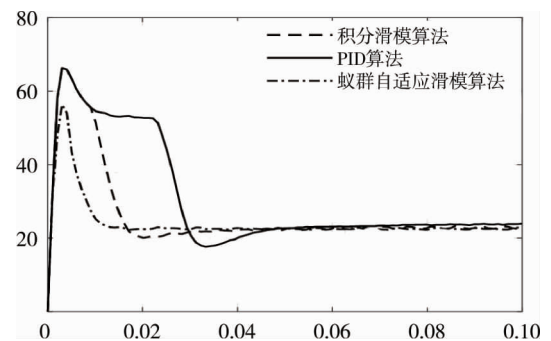


图13 3种算法推力响应



表2 不同控制器下的性能指标

性能指标	过渡时间/s	峰值时间/s	超调量/%
PID	0.060	0.040	12.0
积分滑模控制器	0.057	0.032	6.0
蚁群自寻优滑模控制器	0.032	0.045	0.1

## 5 实验验证

本文的实验验证部分是基于 TI 公司的 TMS320F2812 为核心的控制器上进行的.算法验证平台如图 14 所示.以 U 型无铁芯永磁同步直线电机作为被控对象,在 TMS320F2812 的开发板上验证蚁群自寻优滑模变结构算法的正确性,并测试永磁同步直线电机在此算法下的系统性能.

根据文献[21]的方法求得解析方法下的推力.并与直线电机实测推力进行了对比,如图 15 所示,将实测推力的离散点进行拟合后得到实测推力拟合曲线.通过对比拟合曲线和解析法得到的推力曲线,发现推力的理论值和实测值存在一定的偏差,主要原因是在进行理论分析时对模型进行了化简,并且直线电机在工作时的复杂工况和电气参数的变化都会对推力产生影响,同时实测推力在恒值范围内小幅波动也证明了本文所设计的控制算法的有效性.

蚁群自寻优滑模控制策略可以快速跟踪给定速度,如图 16 所示,设定直线电机以 1 m/s 运动,并在电机运行约 1s 时进行方向切换.电机实际速度很快达到给定速度,并在给定速度值范围内有微小波动,当切换速度时,由图 17 所示  $q$  轴电流在切换瞬间有很大过调,这是由于速度切换瞬间,存在很大的加速度造成的.同时如图 18 所示,在切换瞬间  $AB$  两相电流均发生较大畸变,但在控制器的作用下畸变快速消失, $AB$  两相电流继续近似呈现正弦分布.在速度跟踪实验中验证了本文设计的控制策略可以实现对于直线电机的速度控制,并且具有良好的抗干扰能力.



图 14 直线电机实物

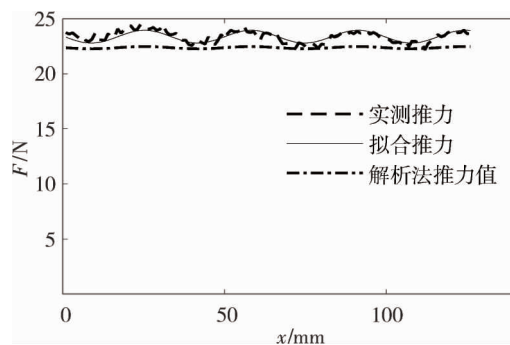


图 15 解析法推力与实测推力对比

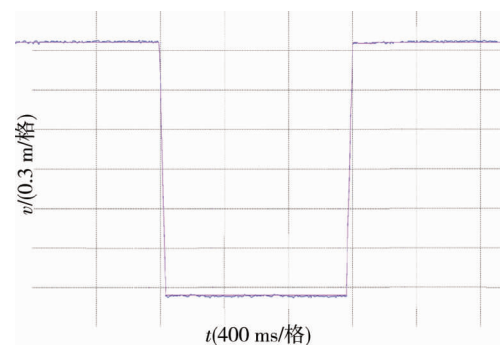


图 16 速度切换

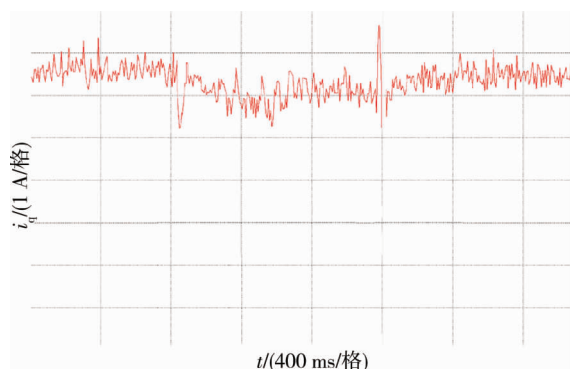
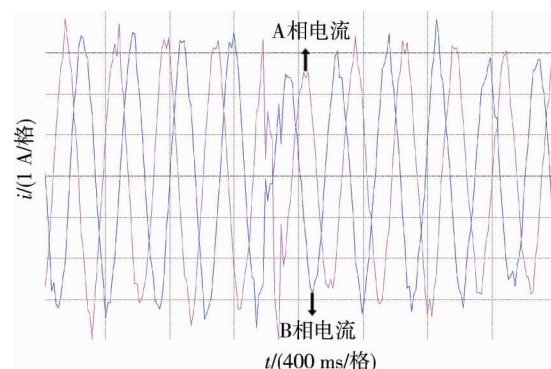
图 17  $q$  轴电流

图 18 A 相电流和 B 相电流

## 6 结论

1) 利用智能的优化算法,通过建立奖惩机制,在不断寻优迭代的过程中,根据误差结果调整控制器关键参数,实现控制器的控制参数最优化.

2) 通过理论分析、仿真验证、实验验证得出该算法可以有效改善直线电机控制性能,提高了系统鲁棒性.

3) 控制算法优良,在永磁同步直线电机上具有可行性,但需要进一步压缩计算过程,并加快寻优速度,从而提高算法的执行效率.

### 参考文献:

- [1] 张天. 基于滑模观测器的永磁同步电机矢量控制系统的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [2] 邵友. 永磁同步电机滑模变结构控制若干问题研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [3] 李政, 胡广大, 崔家瑞, 等. 永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 431-437.
- [4] 吴红星, 钱海荣, 刘莹, 等. 永磁直线同步电机控制技术综述[J]. 微电机, 2011, 44(7): 76-80.
- [5] 沈春娟. 基于自适应蚁群算法的PID控制器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016(12): 126-128.
- [6] 段海滨, 王道波, 黄向华, 等. 基于蚁群算法的PID参数优化[J]. 武汉大学学报:工学版, 2004, 37(5): 97-100.
- [7] 任彧, 徐晓柏. 无刷电机粒子群PID算法的优化研究[J]. 机电工程, 2008, 25(11): 65-67.
- [8] 夏永明, 付子义, 袁世鹰, 等. 粒子群优化算法在直线感应电机优化设计中的应用[J]. 电机与控制应用, 2002, 29(6): 14-16.
- [9] 胡佳琳, 秦哲, 臧怀泉, 等. 电动汽车永磁同步电机遗传优化鲁棒控制[J]. 燕山大学学报, 2017, 41(1): 51-55.
- [10] 苏文海, 姜继海, 刘庆和. 直驱式电液伺服转叶舵机退火蚁群寻优PD控制[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(1): 102-106.
- [11] 邢峰. 蚁群参数寻优自适应PID控制实验研究[J]. 机械设计与制造, 2016(7): 157-159.
- [12] 汪镭, 吴启迪. 蚁群算法在连续空间寻优问题求解中的应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(1): 45-48.
- [13] 李争, 张家祯, 王群京. U型无铁心永磁同步直线电机磁场建模与分析[J]. 电机与控制应用, 2018(2): 26-32.
- [14] 郝东丽. 基于DSP的永磁同步电机控制算法研究[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳自动化研究所, 2004.
- [15] Yahiaoui M, Kechich A, Boushane I K. Adaptive sliding mode control of PMLSM drive[J]. International Journal of Power Electronics&Drive Systems, 2017, 8(2): 639.
- [16] 贺宇轩, 解小华, 张爱春. 基于滑模变结构控制的永磁同步电机[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2015, 33(1): 12-18.
- [17] 谢东燊, 杨俊华, 熊锋俊. 永磁直线同步电机解耦自适应滑模混沌控制[J]. 计算机仿真, 2019, 36(5): 263-268.
- [18] 许叙遥, 林辉. 基于动态滑模控制的永磁同步电机位置速度一体化设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 77-83.
- [19] 张晓光, 赵克, 孙力, 等. 永磁同步电机滑模变结构调速系统动态品质控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 47-52.
- [20] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [21] Kim S, Park E, Jung S, et al. Optimal design of reformed auxiliary teeth for reducing end detent force of stationary discontinuous armature PMLSM[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1-5.
- [22] 孙鹏, 周惠兴. U型无铁心永磁同步直线电机气隙磁场有限元分析及实验研究[J]. 微电机, 2009, 42(8): 9-12.
- [23] Lee Z J, Lee C Y, Su S F. An immunity-based ant colony optimization algorithm for solving weapon - target assignment problem[J]. Applied Soft Computing, 2002, 2(1): 39-47.
- [24] Pilat M L, White T. Using genetic algorithms to optimize ACS-TSP[C]//International Workshop on Ant Algorithms, 2002.