

永磁直线同步电机超短反馈滑模控制研究*

杨 杰, 袁胜利, 高 涛

(江西理工大学 电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 永磁直线同步电机矢量控制的速度环常采用 PI 控制。传统 PI 控制器在速度追踪时存在起动过程超调大、受到负载扰动时调节时间长等不足之处。为提高伺服性能, 滑模控制被应用到伺服系统中, 但其缺点是存在抖振问题。因此, 提出一种基于内分泌激素调节的滑模控制方法, 可以有效降低速度的超调量, 缩短受到外部扰动时的调节时间。在 MATLAB 中搭建了系统的仿真模型, 仿真结果表明其对速度和推力的控制效果显著, 优于传统的 PI 控制和常规的滑模控制。

关键词: 永磁直线同步电机; 矢量控制; 滑模控制; 超短反馈

中图分类号: TM 359.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)02-0001-05

Research on Ultrashort Feedback Sliding Mode Control of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor*

YANG Jie, YUAN Shengli, GAO Tao

(School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The speed loop of the vector control of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) was usually controlled by PI. The traditional PI controller has some shortcomings such as overshoot in the starting process and long adjusting time under load disturbance. In order to improve the servo performance, sliding mode control was applied to the servo system, but its shortcoming was buffeting. Therefore, a sliding mode control method based on endocrine hormone regulation was proposed, which could effectively reduce the overshoot of speed and shorten the adjusting time when the hormone was disturbed by external disturbance by using the ultra short feedback mechanism of hormone secretion. The simulation model of the system was built in MATLAB. The simulation results showed that the control performance of speed and thrust was remarkable and excellent, and was better than the traditional PI control and sliding mode control.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); vector control; sliding mode control; ultra short feedback

0 引 言

直线电机直接将电能转换为直线运动的机械能, 省去了传统直线运动的中间转换传动装置, 提高了直线运动的工作效率, 受到人们的高度关注^[1]。永磁直线同步电机(PMLSM)作为直线电

机的一种, 同时兼具永磁电机和直线电机的诸多优点: 速度快、加速度大、定位精度高、推力大、损耗低等。国内外众多科研院所为其为动力系统研发了许多高新技术产品, 并广泛应用在加工制造、物流分拣、交通运输等领域。由于 PMLSM 结构的开放性, 没有中间缓冲环节, 负载扰动及参数扰动

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61763016); 国家重点研发计划先进轨道交通专项(2017YFB1201105-12); 江西省自然科学基金项目(20171BAB202030); 江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ150620)

作者简介: 杨 杰(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能控制、磁浮轨道交通系统。

袁胜利(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直线电机控制。

等一系列不确定因素直接作用到电机本体上,增加了伺服控制的难度,使控制策略要求变得更高^[2]。

在 PMLSM 的速度控制环节,常采用传统的 PI 控制,其控制效果往往达不到期望值,存在超调量大、调节时间长等缺点。研究人员常将其与其他的控制策略结合应用到伺服系统中去。常规的滑模控制(SMC)虽具有良好的鲁棒性,但其本质上是一种不连续的变结构控制,系统运行过程中存在抖振问题^[3]。在生物智能控制中,激素调节机制反馈回路包括常规反馈和超短反馈,超短反馈是指腺体的激素浓度对其自身的分泌活动产生的反馈抑制作用,具有良好的自适应性和稳定性^[4]。考虑控制器的自身输出信号变化量对系统的调节作用,本文设计了一种基于内分泌激素调节的 PMLSM 滑模控制方法,提高了系统的稳定性和鲁棒性。

1 直线电机模型

PMLSM 可看作是由永磁旋转电机沿径向剖开并展平,工作原理类似于旋转电机^[5]。在理论分析中常忽略磁路饱和、铁心损耗和集肤效应。假设三相绕组分布对称,电动势按正弦规律变化,那么可建立 PMLSM 在 d - q 坐标系下的数学模型。

电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d \frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & R_s + L_q \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_q i_q \\ L_d i_d + \psi_f \end{bmatrix} \omega_e \quad (1)$$

电磁推力方程为

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

机械运动方程为

$$M \frac{dv}{dt} = F_e - F_l - Bv \quad (3)$$

式中: u_d 、 u_q ——次级电压的 d 、 q 轴分量;

R_s ——次级绕组电阻;

L_d 、 L_q —— d 、 q 轴电感;

i_d 、 i_q ——次级电流的 d 、 q 轴分量;

ψ_f ——初级永磁体产生的磁链;

ω_e ——电角速度, $\omega_e = \pi v / \tau$;

τ ——极距;

p ——极对数;

M ——负载总质量;

v ——初级线速度;

F_l ——负载阻力;

B ——黏滞摩擦因数。

2 控制方案

2.1 控制器结构

矢量控制和直接推力控制是直线电机的两种基本解耦控制策略。在伺服控制系统中,控制器最常用的控制规律为 PID 控制。在 PMLSM 矢量控制中速度控制常采用 PI 调节器,但由于 PI 调节器的局限性,其控制性能已不能满足 PMLSM 实际控制需求。针对传统控制器的不足,本文设计了一种基于内分泌系统的激素调节机制超短反馈控制器,如图 1 所示。该控制器主要由滑模控制单元和超短反馈控制单元两部分组成。滑模控制单元接收速度误差信号,经过滑模控制律处理输出电流信号。超短反馈单元接收来自滑模控制单元的输信号和速度误差信号,按照内分泌调节原理处理信号,输出信号与滑模控制单元输出信号进行线性叠加,传递给受控对象进行操作,从而构成超短反馈控制器。

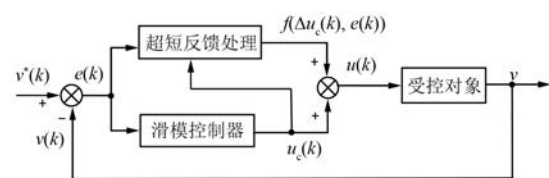


图1 超短反馈控制器结构

2.2 滑模控制

滑模控制作为变结构控制系统的一种控制策略,对外部扰动与参数不敏感、响应速度快,因此研究人员将其引入 PMLSM 的伺服控制,使系统具有很好的鲁棒性。这种鲁棒性可在工程应用中获得良好的控制性能。但滑模控制对参数摄动和外部扰动不敏感是以控制量的高频抖振换取的。理论上这种高频抖振是无限快的^[6],在实际应用中,滑模控制大多采用离散化的形式,使得抖振问题制约了高精度伺服系统的稳定控制。针对该问题,需对滑模控制进行改进,将抖振减少到可控范

围并保证滑模控制的不变性^[7-10]。文献[11]设计了一种 PMLSM 的智能增量滑模控制,针对的是位置误差,具有良好的位置跟踪精度。本文针对速度误差,设计了一种增量式滑模速度控制结构。

对于表贴式 PMLSM 有 $L_d = L_q = L$ 。为了提高其控制精度,实现其非线性解耦控制,本文采用 $i_d = 0$ 的矢量控制方式,可得到其状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{v} = \frac{1}{M} \left(\frac{3\pi}{2\tau} p \psi_f i_q - Bv - F_1 \right) \\ \dot{i}_q = \frac{1}{M} \left(\frac{3\pi}{2\tau} p \psi_f i_q - Bv \right) \end{cases} \quad (4)$$

速度 v 作为控制输入,式(4)可化作式(5)的运动方程:

$$\dot{V}(t) = A_c V(t) + B_c U(t) \quad (5)$$

其中:

$$V(t) = \begin{bmatrix} v(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix}, U(t) = \dot{i}_q(t),$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B}{M} \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{3\pi \cdot p \psi_f}{2\tau \cdot M} \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(5)变换成离散系统下的状态空间模型得:

$$V(k+1) = G_d V(k) + H_d U(k) \quad (7)$$

其中:

$$G_d = e^{A_c T}, H_d = \int_0^T e^{A_c t} dt B_c \quad (8)$$

式中: T ——离散迭代计算周期。

引入系统误差状态变量 $[v^*(k)]$ 为参考速度]:

$$e(k) = v^*(k) - v(k) \quad (9)$$

定义离散滑模面函数:

$$s(k) = KV(k) + k_1 e(k-1) \quad (10)$$

$$s(k+1) = KV(k+1) + k_1 e(k) \quad (11)$$

其中: $K = [k_1, k_2]$, k_1 为速度误差调节参数。

将式(7)代入式(11)可得:

$$s(k+1) = K[G_d V(k) + H_d U(k)] + k_1 e(k) \quad (12)$$

在滑模控制趋近律中,为削弱滑模面趋近原点邻域时的抖振问题^[12],选择用幂次函数 $\text{fal}[s(k), \alpha, \delta]$ 替代符号函数 $\text{sgn}[s(k)]$ 做平滑处理,设计一种新的滑模趋近律,使其快速收敛。其表达式如下:

$$\text{fal}[s(k), \alpha, \delta] =$$

$$\begin{cases} |s(k)|^\alpha \text{sgn}[s(k)], & |s(k)| > \delta \\ s(k) \cdot \delta^{\alpha-1}, & |s(k)| \leq \delta \end{cases} \quad (13)$$

其中: α 为 0 与 1 之间的常数; δ 为线性段区间长度。

设计离散滑模趋近律为

$$s(k+1) = -\varepsilon T \text{fal}[s(k), \alpha, \delta] + (1 - qT)s(k) \quad (14)$$

其中: $q > 0; \varepsilon > 0$ 。

联立式(12)和式(14)可得滑模控制器的表达式为

$$U(k) = \frac{1}{KH_d} \{ (1 - qT)s(k) - \varepsilon T \text{fal}[s(k), \alpha, \delta] - KG_d V(k) - k_1 e(k) \} \quad (15)$$

又因为 $U(k) = \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T}$, 所以增量式滑模控制器的控制律为

$$u_c(k) = i(k+1) = i(k) + \frac{T}{KH_d} \{ -KG_d V(k) - k_1 e(k) + (1 - qT)s(k) - \varepsilon T \text{fal}[s(k), \alpha, \delta] \} \quad (16)$$

根据离散滑模的到达条件,可验证系统是渐进稳定的。

2.3 超短反馈

神经内分泌激素调节的特点是遵循单调性和非负性^[13]。人们根据神经内分泌系统中的超短反馈作用机制,将其引入到工业控制中,并给出了一种超短反馈的控制算法。根据图1的控制器结构,超短反馈处理单元接收滑模控制器的输出信号 $u_c(t)$,按照神经内分泌规律进行非线性逻辑函数 $f[u_c(k), e(k)]$ 处理(取离散化形式)并输出处理信号,与滑模控制器的输出信号进行线性叠加,传递给受控对象进行系统控制。

非线性逻辑函数(取滑模控制器输出信号变化量 $\Delta u_c(k)$ 进行处理):

$$\begin{cases} f[\Delta u_c(k), e(k)] = a \cdot \frac{|\Delta u_c(k)|^m}{1 + |\Delta u_c(k)|^m} \cdot L_1 \cdot L_2 \\ L_1 = -\frac{e(k)}{|e(k)|} \cdot \frac{\Delta e(k)}{|\Delta e(k)|} \\ L_2 = \frac{\Delta u_c(k)}{|\Delta u_c(k)|} \end{cases} \quad (17)$$

其中: a 、 m 均为正实数; L_1 、 L_2 决定控制的变化方向。

理论上, 整个系统输出信号增量为零时, 超短反馈控制单元无输出信号, 滑模控制单元独自作用。实际控制中, 只要输出信号增量小于给定误差即可, 因此需对 L_1 作出改进。

$$\begin{cases} L_1' = -f_{db}[e(k), d] \cdot f_{db}[\Delta e(k), d] \\ f_{db}(x, d) = \begin{cases} -1, & x < -d \\ 0, & |x| \leq d \\ 1, & x > d \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

式中: d ——误差精度。

因此系统总控制律为

$$u(k) = u_c(k) + f[\Delta u_c(k), e(k)] \quad (19)$$

3 仿真验证与分析

根据 PMLSM 的状态空间方程, 在 MATLAB/Simulink 平台中建立其仿真模型, 以验证所设计算法(USF-SMC)的效果, 同时也给出了传统 PI 控制和常规的滑模控制的仿真结果作为对比。仿真系统结构框图如图 2 所示。

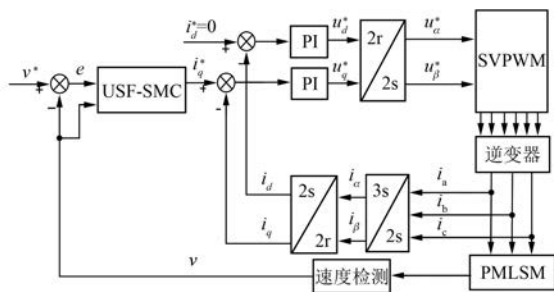


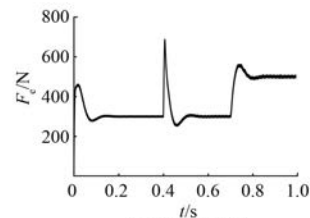
图2 PMLSM 控制结构框图

PMLSM 矢量控制采用 $i_d^* = 0$ 的控制策略, 仿真实电机参数: 次级绕组相电阻 $R_s = 2.7 \Omega$, 电感 $L_d = L_q = 17.5 \text{ mH}$, 永磁体磁链 $\psi_f = 0.175 \text{ Wb}$, 极距 $\tau = 24 \text{ mm}$, 极对数 $p = 3$, 转子总质量 $M = 9.6 \text{ kg}$, 黏滞摩擦因数 $B = 0.1 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。

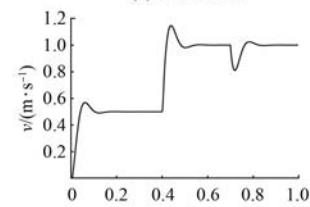
系统仿真时间为 1 s, 仿真给定初始参考速度为 0.5 m/s, 给定初始负载为 300 N, 在 0.4 s 时改变速度增加到 1 m/s, 在 0.7 s 时突加负载至 500 N, 观察速度和推力变化状况。通过试凑法不断调试系统, 从而得到相对较优的控制参数。在本文中滑模控制单元调节参数为: $K = [0.01 \quad -0.09]$, $k_i = 8$, $\alpha = 0.99$, $\delta = 0.1$, $\varepsilon = 10$, $q = 1000$; 超短反馈单元调节

参数为: $a = 2$, $m = 1.5$, $d = 1 \times 10^{-4}$ 。

仿真结果如图 3~图 5 所示。起动后, PI 控制器的速度响应如图 3(b) 所示, 超调量达到 14%, 调节时间约为 0.17 s, 在 $t = 0.4 \text{ s}$ 时速度增加至 1 m/s, 此时调节时间为 0.14 s, 出现约 14% 的超调量, 在 $t = 0.7 \text{ s}$ 时增加 200 N 的阶跃扰动, 此时速度出现 19% 的波动, 回稳时间 0.13 s。常规的滑模控制 SMC 控制器的速度响应如图 4(b) 所示, 调节时间 0.16 s, 速度增加时调节时间为 0.13 s, 出现约 7% 的超调, 负载扰动改变时速度出现约 13% 的波动。超短反馈控制器的速度响应如图 5(b) 所示, 起始调节时间 0.06 s, 速度增加时的调节时间 0.05 s, 增加负载时速度波动约 5%, 调节时间 0.04 s。

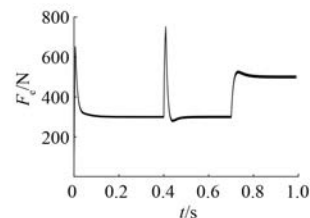


(a) 推力变化

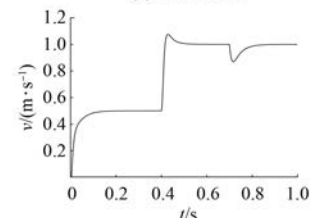


(b) 速度变化

图3 PI 控制器仿真结果



(a) 推力变化



(b) 速度变化

图4 SMC 控制器仿真结果

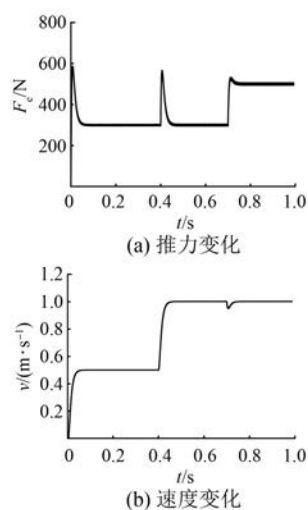


图5 超短反馈滑模控制器仿真结果

通过对3种控制算法的结果分析可以看出：不论是给定速度变化还是突加负载，PI控制器的推力响应都存在大的波动，达到稳态的时间较长，跟踪速度存在超调；SMC控制器的推力响应达到稳态时间相对较长，速度跟踪虽无大的超调，但调节时间稍长；基于超短反馈的滑模控制算法可以在速度突变情况下很快地跟踪给定值，且受到负载扰动时，能迅速地再次回到平稳状态，表现出优异的响应速度和抗干扰能力。

4 结 语

利用激素浓度对腺体分泌活动的促进或抑制作用的机制，结合滑模变结构控制的强鲁棒性，设计了一种基于内分泌激素调节的超短反馈滑模控制器。在PMLSM状态空间方程的基础上，得出其速度离散化数学模型，建立其离散化复合控制律。通过在MATLAB/Simulink平台搭建PMLSM仿真模型，对该算法的可行性进行验证。仿真结果表明相对于传统PI控制和常规的滑模控制，该算法可快速地跟踪速度变化及负载扰动，具有明显的优越性。

【参考文献】

- [1] 叶云岳. 国内外直线电机技术的发展、近况与趋势[J]. 电气时代, 2012(4): 26.
- [2] GIERAS J F, PIECHZ J, TOMCZUK B Z. Linear synchronous motors[M]. Abingdon: Taylor & Francis CRC Press, 2015.
- [3] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407.
- [4] FARHY L S. Modeling of oscillations in endocrine networks with feedback[J]. Methods in Enzymology, 2004, 384(12): 54.
- [5] 焦留成, 程志平. 永磁直线同步电动机特性及控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [6] LEE J D, KHOO S, LAI K Y. Terminal sliding mode control strategy design for second-order nonlinear system[C] // IECON 2012 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012: 2512.
- [7] HAJARE V D, KHANDEKAR A A, PATRE B M. Discrete sliding mode controller with reaching phase elimination for TITO systems[J]. ISA Transactions, 2017, 66: 32.
- [8] CHANG J L. Discrete sliding-mode control of MIMO linear systems[J]. Asian Journal of Control, 2010, 4(2): 217.
- [9] SAFA A, ABDOLMALAKI R Y, SHAFIEES, et al. Adaptive nonsingular terminal sliding mode controller for micro/nanopositioning systems driven by linear piezoelectric ceramic motors[J]. ISA Transactions, 2018, 77: 122.
- [10] 车志远, 陈军强, 杨春雨, 等. 永磁直线同步电机滑模控制系统[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(10): 8.
- [11] 赵希梅, 王晨光. 永磁直线同步电机的智能增量滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(9): 47.
- [12] 孙彪, 孙秀霞. 一种新的趋近律离散滑模控制方法及仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(10): 2422.
- [13] 刘宝, 丁永生, 王君红. 一种基于内分泌超短反馈机制的智能控制器[J]. 计算机仿真, 2008, 25(1): 188.

收稿日期: 2018-09-17