

# 基于抗饱和PI控制器和占空比调制的直线 游标永磁电机直接推力控制

赵文祥<sup>†</sup>, 吴彬玉, 陈 前, 邱先群, 姜庆旺

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘 要:** 针对直线游标永磁电机控制系统存在的非线性饱和及推力脉动大等问题, 提出一种基于抗饱和PI控制器及占空比调制的改进式直接推力控制方法. 该控制器采用变结构的积分环节, 能快速退出饱和区. 在分析电压矢量对电磁推力的影响基础上, 采用开关频率固定的占空比调制方式. 仿真与实验结果表明, 所提出的改进式直接推力控制方法能有效减小系统的超调量和推力脉动, 提高系统的稳定性和鲁棒性.

**关键词:** 直线电机; 永磁电机; 抗饱和; PI控制器; 直接推力控制; 占空比调制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Direct thrust force control of linear vernier PM motor based on anti-windup PI controller and duty ratio modulation

ZHAO Wen-xiang<sup>†</sup>, WU Bin-yu, CHEN Qian, QIU Xian-qun, JIANG Qing-wang

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Due to the nonlinear saturation and high thrust force ripples in linear vernier permanent-magnet motor drive, an improved direct thrust force control strategy based on the anti-windup PI controller and duty ratio modulation is proposed. The variable-structure is adopted in the proposed controller, which can make the system quickly exit saturation zone. Duty ratio modulation with a constant switching frequency is adopted based on the analysis of effects that voltage vector has on thrust force ripples in the control strategy. The simulation and experimental results show that the proposed improved direct thrust force control system can effectively reduce the systemic overshoot and thrust ripples, thus improving the stability and robustness of the control system.

**Keywords:** linear motor; permanent-magnet motor; anti-windup; PI controller; direct thrust force control; duty ratio modulation

## 0 引 言

随着中国经济的飞速发展, 交通堵塞问题日益严重. 轨道交通作为新型交通工具受到了广泛的关注, 牵引技术尤为关键. 相比于采用旋转电机的轨道交通牵引系统, 直线电机牵引系统有结构简单、效率高、动力强、噪声小等显著的优势<sup>[1-2]</sup>. 直线感应电机已被应用于首都机场、广州地铁等城市轨道交通系统, 但存在效率较低的问题. 永磁直线同步电机具有较高的效率, 但需要沿着轨道铺设永磁体, 造价成本高, 且不易维护. 初级型直线游标永磁(LVPM)电机将永磁体和绕组同时放置在初级(列车)上, 次级(轨道)仅

由导磁材料构成, 结构简单且电机效率较高, 因此在轨道交通领域有着较好的应用前景<sup>[3-5]</sup>.

传统的直接推力控制(DTFC)系统的速度环节一般采用传统PI控制器来调节, 控制器的输出为电机参考推力给定值. 由于受逆变器的容量、电机最大输出推力有限等因素的影响, 速度控制器的输出必须受到限幅. 当速度发生大的突变时, 控制器输出会受到饱和限制, 此时电机只能输出预设的最大推力, 这就造成积分饱和现象<sup>[6-8]</sup>. 积分饱和现象会引起系统超调量大、稳定时间长.

为了改善传统PI控制器的不足, 学者们设计了

收稿日期: 2016-11-08; 修回日期: 2017-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777090, 51277194); 江苏省333工程科研基金项目(BRA2017388); 江苏省高校优势学科项目(苏政办发[2014]).

作者简介: 赵文祥(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 从事高性能永磁电机的设计与电磁分析及控制系统等研究; 吴彬玉(1991-), 男, 硕士生, 从事永磁直线电机的驱动与控制的研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: zwx@ujs.edu.cn

一些控制性能更好的PI控制器.文献[9-10]提出基于神经网络构建逆系统的方法,通过设计扩张状态观测器的方法提高系统的稳定性和鲁棒性,但这些方法参数变化多、计算复杂、调节困难、不易于工程应用.一些学者通过设计抗饱和和PI控制器<sup>[11-13]</sup>来消除积分饱和和现象.抗饱和控制器主要分为条件积分法和反计算法.反计算法设计简单,工程上应用最多,但反馈增益需反复调整,工程应用中难以满足定量设计的性能要求.

本文针对传统直接推力控制系统速度环节存在的非线性饱和及推力脉动大等问题,提出一种基于抗饱和PI控制器和占空比调制的新型LVPM电机直接推力控制方法.在分析电压矢量对电磁推力的影响基础上,采用了开关频率固定的占空比调制方式.最后,给出了仿真与实验结果,验证了所提出方法的有效性和可行性.

### 1 LVPM电机及其数学模型

#### 1.1 电机结构

图1为三相LVPM电机的结构图,电机的初级定子由硅钢片叠成的永磁体、初级铁心和三相电枢绕组组成,永磁体通过组合阵列表嵌在初级齿上.轨道侧的电机次级仅由带有凸极的硅钢片开槽形成齿槽结构,既无永磁体又无绕组,结构简单.由于电机次级仅由导磁性材料组成,具有较高的机械强度,易于维护,非常适合长行程和大推力的应用领域.

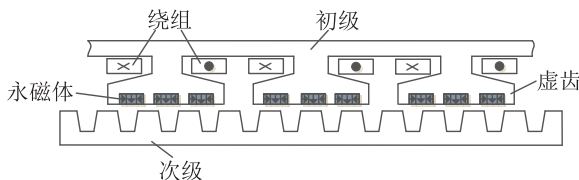


图1 LVPM电机结构

LVPM电机的次级凸极铁芯形成交替变化的气隙磁导,电枢绕组产生的磁链与永磁体产生的磁链相互作用,调制出快速运行的谐波磁场,提高电机的电磁推力密度和空载感应电动势<sup>[14-15]</sup>.

#### 1.2 数学模型

LVPM电机在  $d$ 、 $q$  两相同步旋转坐标系下的数学模型可描述如下:

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt}, \\ \psi_s = L_s i_s + \psi_r, \\ \psi_r = \psi_f e^{j(\omega_r t + \theta_{r0})}. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\psi_s, \psi_r$  分别为定子和转子的磁链矢量;  $u_s$  为定

子电压矢量;  $i_s$  为定子电流矢量;  $L_s$  为定子自感;  $v$  为初级速度;  $\psi_f$  为永磁体磁链;  $\omega_r$  为转子磁链的电角速度;  $\theta_{r0}$  为转子磁链初始相位.

LVPM电机的电磁推力可以表示为定子磁链和转子磁链的叉乘形式,即

$$F_e = \frac{3\pi P_n}{2\tau L_s} \psi_r \otimes \psi_s. \quad (2)$$

其中:  $P_n$  为电机极对数,  $\tau$  为次级极距.

LVPM电机的机械运动方程表示为

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

其中:  $F_L$  为负载阻力,  $M$  为电机的初级质量,  $B$  为粘滞摩擦系数,  $v$  为初级速度.

## 2 改进式直接推力控制

### 2.1 新型抗饱和PI控制器

在典型的LVPM电机直接推力控制系统中,内环的推力响应速度要远远快于速度外环,因而在分析速度控制器时(系统稳定),可忽略内环推力的动态过程.设传统PI控制器的输出为  $u_n$ ,为了抑制非线性饱和和现象的影响,在控制输出端加入饱和和限幅环节.经过饱和和限幅环节,对控制系统输入  $u_s(F_e^*)$ ,有

$$u_s = \begin{cases} F_{\max} \text{sgn}(u_n), & |u_n| > F_{\max}; \\ u_n, & -F_{\max} \leq u_n \leq F_{\max}. \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数,  $F_{\max}$  为控制器输出限幅值.

当PI控制器的输出  $u_n$  在  $[-F_{\max}, F_{\max}]$  之间时,系统运行在线性区,反之则运行在饱和区.当给定速度发生大的阶跃变化或有其他干扰时,由于积分环节的累积作用,积分量将远远大于非线性的饱和限幅值,从而造成系统的超调量大、稳定时间长的问题,引起饱和和现象.

为了更好地抑制饱和和现象,提高系统运行的控制性能,本文提出一种新型抗饱和(anti-windup)变结构PI控制器,如图2所示.

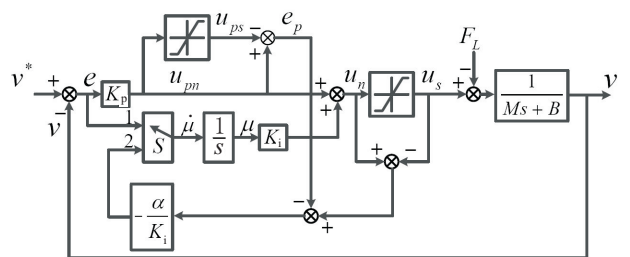


图2 抗饱和和变结构PI控制器结构

控制器通过反馈系数  $\mu$  实现积分项的自适应调整,其自适应变化律为

$$\dot{u} = \begin{cases} -\alpha[(u_n - u_s) - e_p]/K_i, \\ u_n \neq u_s, e(u_n - \bar{u}) > 0; \\ e, u_n = u_s. \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $\alpha$  为积分反馈时间常数, 满足  $\alpha \gg B/M$ ;  $e_p = (u_{pn} - u_{ps})$ ;  $\bar{u} = (F_{\min} + F_{\max})/2$ .

新型PI控制器采用条件积分法和反算法相结合的方法, 并将比例和积分项对饱和的影响进行分离, 充分发挥比例项的作用, 实现更加精确地反馈补偿. 文献[12]对这种采用条件积分法和反算法相结合的抗饱和变结构PI控制进行了稳定性分析. 新型抗饱和PI控制器是在保持传统PI控制器结构的基础上进行改进, 既可以提高系统的控制性能, 又易于工程应用.

## 2.2 开关频率固定的占空比调制

由式(1)和(2)可推导出电磁推力  $F_e$  的离散化表达式, 可表示如下:

$$F_{e(k+1)} = F_{ek} - F_{ek} \frac{R_s T_s}{L_s} + \frac{3\pi P_n}{2\tau L_s} (u_{sk} \otimes \psi_{rk}) T_s - \frac{3\pi P_n}{2\tau L_s} \omega_{rk} (\psi_{rk} \psi_{sk}) T_s. \quad (6)$$

将式(6)加以改变, 得到电磁推力在一个控制周期内的变化量为

$$\begin{aligned} \Delta F_{ek} &= -F_{ek} \frac{R_s T_s}{L_s} + \frac{3\pi P_n}{2\tau L_s} (u_{sk} \otimes \psi_{rk}) T_s - \\ &\quad \frac{3\pi P_n}{2\tau L_s} \omega_{rk} (\psi_{rk} \psi_{sk}) T_s = \\ &\quad \Delta F_{ek1} + \Delta F_{ek2} + \Delta F_{ek3}. \end{aligned} \quad (7)$$

分析式(7)可知, 电磁推力的变化量由3项组成, 其中第1项  $\Delta F_{ek1}$  是定子电阻消耗能量所造成的电磁推力的衰减, 因此必为负值, 该项与推力  $F_{ek}$  成正比; 第2项  $\Delta F_{ek2}$  反映了电压矢量对电磁推力变化的影响; 第3项  $\Delta F_{ek3}$  也为负值, 它的绝对值和速度成正比关系, 速度越高  $\Delta F_{ek3}$  的绝对值越大.

由于推力变化量第1项和第3项总为负值, 零电压矢量的作用使电磁推力下降. 零电压矢量作用对电磁推力的影响主要取决于电机速度, 根据推力控制要求将零电压矢量引入推力调节器, 有助于降低推力脉动, 提高电机运行的稳定性.

在传统的DTFC系统中, 从开关表中选取的单一电压矢量作用于整个控制周期, 从而产生较大的推力脉动, 尤其在低速时推力脉动更大. 采用占空比调制<sup>[6]</sup>技术可以大大改善以上传统DTFC存在的问题. 在占空比调制中, 每个控制周期内选取的有效电压矢量作用部分时间, 剩余的时间作用零电压矢量, 即通过占空比调节电压矢量的作用幅值. 占空比  $d$

定义为有效电压矢量的作用时间与控制周期的比值. 第  $k$  周期的实际作用电压矢量可表示为

$$u'_s(k) = u_s(k)d(k), \quad 0 \leq d(k) \leq 1, \quad (8)$$

其中  $u_s(k)$  为第  $k$  周期的有效电压矢量.

经典的占空比确定方法, 如无差拍控制、直接平均转矩控制、转矩脉动最小控制, 均可以提高系统的稳态性能, 但这些方法计算复杂, 并且对电机的参数依赖大. 为消除对电机参数的依赖性和减小计算的复杂性, 采用一种“综合”的简单占空比计算方法, 表达如下:

$$d = \left| \frac{E_F(k)}{C_F} \right| + \left| \frac{E_\psi(k)}{C_\psi} \right| = \left| \frac{F_e^*(k) - F_e(k)}{C_F} \right| + \left| \frac{\psi_s^*(k) - \psi_e(k)}{C_\psi} \right|. \quad (9)$$

其中:  $F_e^*(k)$  和  $\psi_s^*(k)$  分别为第  $k$  周期电磁推力和定子磁链的参考值,  $F_e(k)$  和  $\psi_s(k)$  分别为第  $k$  周期电磁推力和定子磁链的估算值,  $C_F$  和  $C_\psi$  为正常数.

由式(9)计算的占空比, 仅需电磁推力和定子磁链的偏差值, 减少了对电机自身参数的依赖性, 具有简单性的特点.  $C_F$  和  $C_\psi$  的取值在一定范围内对系统性能不会产生太大的影响, 系统可稳定运行, 只是推力脉动有所不同, 故占空比计算方法具有更好的鲁棒性.

在空间电压矢量脉宽调制中, 每次开关状态转换时, 只改变其中一相的开关状态, 并且对零电压矢量在时间上进行平均分配, 以使开关频率固定和产生的PWM对称. 基于这种调制方式, 在占空比DTFC中可以对每控制周期的有效电压矢量和零电压矢量的施加顺序进行调整, 将零电压矢量  $u_0(000)$ 、 $u_7(111)$  在时间上进行平均分配, 从而实现固定的开关频率. 其中, PWM发波的比较值  $t_x$ 、 $t_y$  表示如下:

$$t_x = \frac{T_s - t_{on}}{4}, \quad t_y = \frac{T_s + t_{on}}{4}, \quad (10)$$

其  $on = dT_s$ ,  $t_x$  和  $t_y$  构成三相PWM调制的比较值表, 6个非零有效电压矢量发波的比较值通过在线查表即可获得.

## 3 仿真分析与实验验证

### 3.1 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中建立电机直接推力控制系统的仿真模型, 对改进式DTFC控制算法的有效性进行仿真分析. 系统仿真和实验所用LVPM电机参数如下: 额定电压  $U_N = 270$  V; 额定电流  $I_N = 5$  A; 直轴电感  $L_d = 84.9$  mH, 交轴电感  $L_q = 89.3$  mH, 极距  $\tau = 0.0147$  m; 极对数  $P_n = 2$ ; 定子电阻  $R_s = 1.25$   $\Omega$ ; 永磁体磁链  $\psi_f = 0.12$  Wb; 电机初级质量  $M = 32$  kg;

粘滞摩擦系数  $B = 0.1 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ .

仿真中电机空载起动, 采样周期为  $50 \mu\text{s}$ , 给定参考定子磁链  $\psi_s^*$  为  $0.2 \text{ Wb}$ ,  $C_F$  取值为  $7$ ,  $C_\psi$  取值为  $0.1$ . PI 控制器中  $k_p$  取值为  $30$ ,  $k_i$  取值为  $25$ , 新型抗饱和和PI控制器中积分反馈时间常数  $\alpha$  取  $1$ .

传统PI和新型抗饱和和PI控制器仿真对比波形如图3所示. 在  $0 \text{ s}$ , 当给定速度为  $0.2 \text{ m/s}$  时, 传统PI控制器的速度响应的超调量约为  $14\%$ , 调节时间约  $0.10 \text{ s}$ ; 新型抗饱和和PI控制器速度响应几乎无超调, 调节时间约  $0.05 \text{ s}$ . 在  $0.2 \text{ s}$  速度阶跃到  $0.4 \text{ m/s}$  时, 传统PI控制器有一定的超调, 而抗饱和PI控制器速度响应几乎无超调, 故新型抗饱和PI控制器可以有效抑制饱和现象, 减小系统超调量, 提高系统的控制性能.

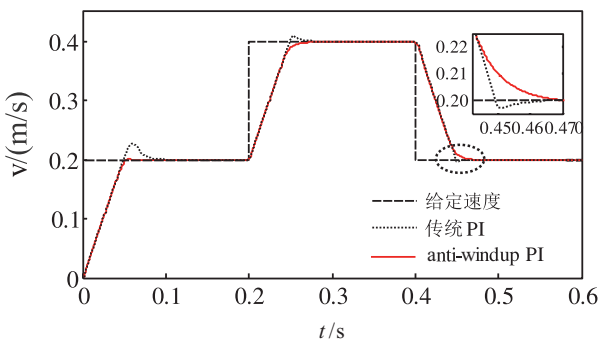
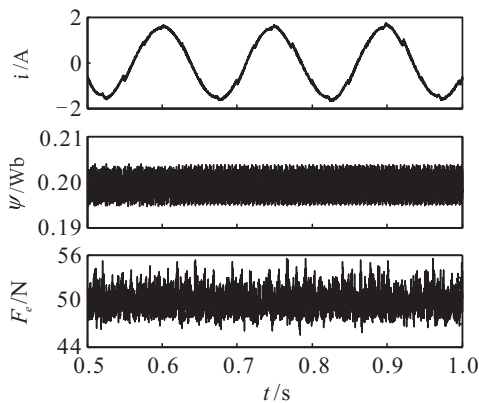
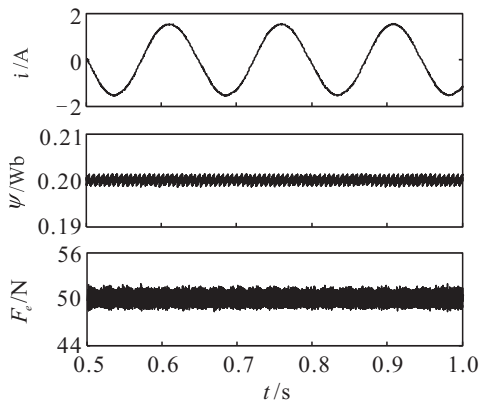


图3 传统PI和ant-windup PI速度仿真对比波形



(a) 传统DTFC



(b) 改进式占空比DTFC

图4 DTFC仿真对比波形

LVPM电机在空载运行, 给定速度为  $0.1 \text{ m/s}$ , 负载阻力为  $50 \text{ N}$  时, 传统DTFC和本文提出的改进式占空比DTFC电流、磁链和推力仿真对比波形如图4所示. 电机稳态运行时, 改进式DTFC的定子电流正弦度较好, 与传统DTFC相比, 定子电流的畸变和脉动得到明显改善. 由于在占空比计算中考虑了对磁链的控制, 改进式DTFC的磁链脉动比传统DTFC有明显的减小. 传统DTFC的推力脉动约为  $10 \text{ N}$ ; 改进式DTFC的推力脉动约为  $4 \text{ N}$ . 显然, 本文提出的改进式DTFC能有效减小推力脉动, 提升系统的稳态性能.

### 3.2 实验验证

为了进一步验证本文所提出的基于新型抗饱和和PI控制器和占空比调制的改进式DTFC的稳态性能和动态性能, 进行了实验研究. 系统的实验平台如图5所示, 主要包括主控电路、电流和电压采集、驱动电路、拉力采集、负载等.

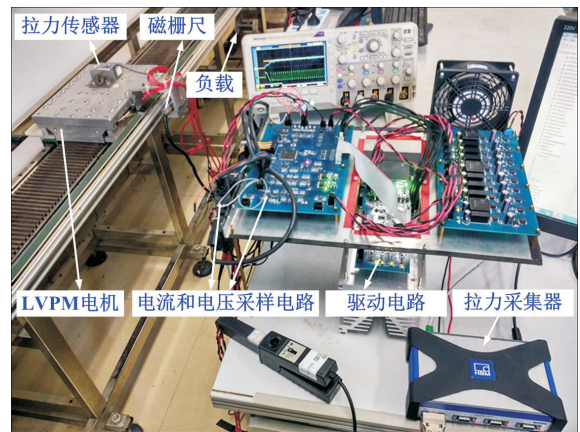
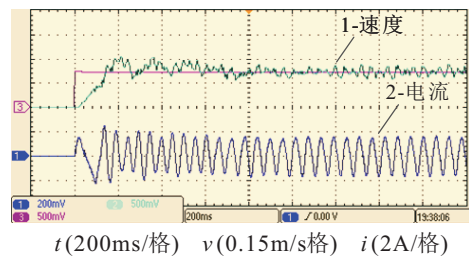
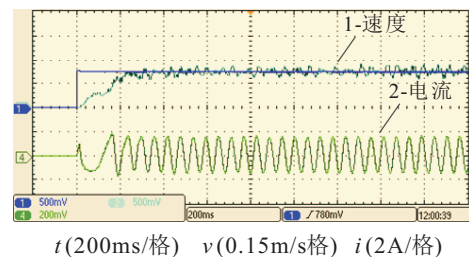


图5 实验平台

采用传统PI和新型抗饱和和PI控制器的速度响应实验对比波形如图6所示.



(a) 传统PI控制器

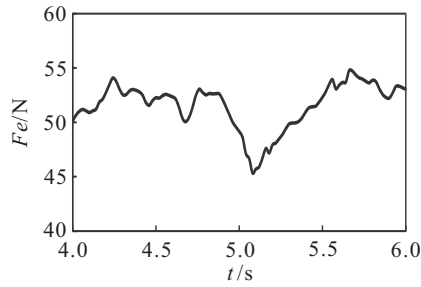


(b) anti-windup PI控制器

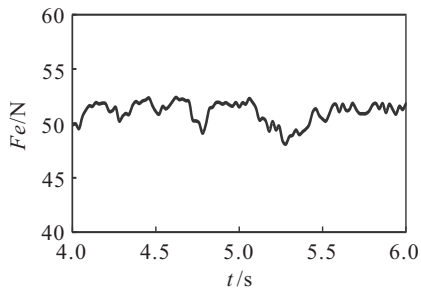
图6 速度响应实验对比波形

LVPM 电机空载运行, 由图 6 可知: 当速度由 0m/s 阶跃到 0.2m/s 时, 采用传统 PI 控制器的速度响应有较大的超调量, 调节时间较长, 由于受速度超调的影响电流也产生了一定的畸变; 而采用新型抗饱和 PI 控制器几乎无超调量, 调节时间很短. 故新型抗饱和 PI 控制器能有效抑制饱和现象, 减小系统的超调量, 提高系统的控制性能.

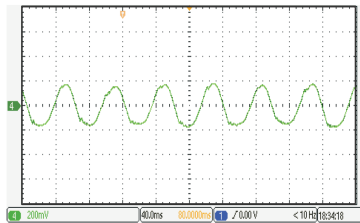
图 7 为稳态运行时传统 DTFC 和改进式 DTFC 的推力和电流实验波形.



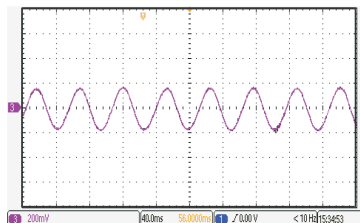
(a) 传统 DTFC 推力波形



(b) 改进式占空比 DTFC 推力波形



(c) 传统 DTFC 电流波形



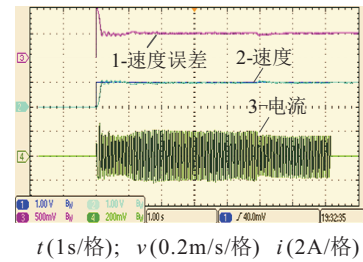
(d) 改进式占空比 DTFC 电流波形

图 7 稳态运行时推力和电流实验波形

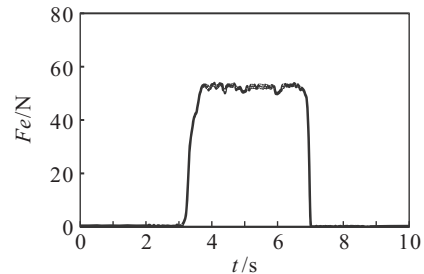
由图 7(a) 和图 (b) 可看出: 当负载阻力为 50 N 时, 传统 DTFC 的推力脉动约为 10 N; 改进式 DTFC 的推力脉动约为 4 N, 有效减小了推力脉动. 由图 7(c) 和图 7(d) 可知: 传统 DTFC 的定子电流有明显的畸变; 而改进式 DTFC 定子电流正弦度较好, 无畸变. 以上实验

结果与仿真是基本相符的, 验证了占空比调制算法的有效性.

图 8 为改进式 DTFC 的推力动态响应实验波形. 可以看出: 负载阻力在 3 s 由 0 N 突增到 50 N, 负载阻力在 7 s 由 50 N 突减到 0 N. 当负载阻力突增(减)时, 电机在受到轻微扰动后能快速回到给定速度, 稳定运行. 与传统 DTFC 相比, 改进式 DTFC 在提高系统控制性能的同时保持了较好的动态性能.



(a) 速度跟电流波形



(b) 推力动态响应实验波形

图 8 推力动态响应实验波形

## 4 结论

本文针对传统直接推力控制系统速度环节存在的非线性饱和及推力脉动大的问题, 提出了一种基于抗饱和 PI 控制器和占空比调制的新型直线游标永磁电机直接推力控制方法. 新型抗饱和 PI 控制器采用变结构的积分环节, 保证系统出现饱和时, 能快速地退出饱和区. 该方法通过占空比调制调节有效电压矢量的作用幅值, 并通过平均分配零电压矢量使开关频率固定. 仿真与实验结果表明, 该方法在保持传统 DTFC 结构简单的基础上能有效减小系统的超调量, 并能有效减小推力脉动, 提高系统的稳定性和鲁棒性, 易于工程应用.

## 参考文献(References)

- [1] Carpita M, Beltrami T. Multiphase active way linear motor: Proof-of-concept prototype[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59(5): 2178-2188.
- [2] 蓝益鹏, 郭庆鼎. 永磁直线电机伺服系统非线性鲁棒控制器设计[J]. 控制与决策, 2006, 21(6): 705-708. (Lan Y P, Guo Q D. Nonlinear robust controller design for permanent magnet linear servo motor system[J]. Control and Decision, 2006, 21(6): 705-708.)

[3] 杜恽, 程明, 邹国棠. 初级永磁型游标直线电机设计与静态特性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 27(11): 22-30. (Du Y, Cheng M, Zou G T. Design and analysis of a new linear primary permanent magnet vernier machine[J]. Trans on China Electrotechnical Society, 2013, 27(11): 22-30.)

[4] 赵文祥, 邱先群, 刘国海, 等. 基于支持向量机广义逆的直线永磁游标电机内模解耦控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(8): 1420-1423. (Zhao W X, Qiu X Q, Liu G H, et al. Internal model control of linear permanent-magnet vernier motor based on support vector machines generalized inverse[J]. Control and Decision, 2016, 31(8): 1420-1423.)

[5] Zhao W X, Zheng J Q, Liu G H. Design and analysis of a linear permanent-magnet vernier machine with improved force density[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2016, 63(43): 2072-2082.

[6] Hwi-Beom S, Jong-Gyu P. Anti-Windup PID with integral state predictor for variable-speed motor drivers[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59(3): 1509-1516.

[7] 杨明, 徐殿国, 贵献国. 控制系统Anti-Windup设计综述[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(6): 623-626. (Yang M, Xu D G, Gui X G. Review of control system anti-windup design[J]. Electric Machines and Control, 2012, 10(6): 623-626.)

[8] 周华伟, 温旭辉, 赵峰. 一种具有预测功能的抗积分饱和PI速度控制器[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(3): 15-21. (Zhou H W, Wen X H, Zhao F. Predictive Anti-Windup strategy for PI-type speed controller[J]. Electric Machines and Control, 2006, 16(3): 15-21.)

[9] 刘希喆, 吴捷, 雷春林. 永磁直线电机基于ESO的速度辨识与控制[J]. 控制与决策, 2005, 20(3): 308-311. (Liu X Z, Wu J, Lei C L. Speed identification and control of PMSLM based on ESO[J]. Control and Decision, 2005, 20(3): 308-311.)

[10] 潘月斗, 徐杰, 陈虎, 等. ESO在直接转矩矩阵变换器中的应用及稳定性分析[J]. 控制与决策, 2013, 28(4): 586-589. (Pan Y D, Xu J, Chen H, et al. Stability analysis and application of ESO in direct torque control of matrix converter[J]. Control and Decision, 2013, 28(4): 586-589.)

[11] Fernando A, Fernando D, Hernan D. LPV wind turbine control with anti-windup features covering the complete wind speed range[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2014, 29(1): 259-266.

[12] 牛里, 杨明, 唐思宇, 等. 基于积分状态预测的Anti-Windup PID控制器设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 146-152. (Niu L, Yang M, Tang S Y, et al. Design of Anti-Windup PID controller with integral state prediction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 146-152.)

[13] 于艳君, 柴凤, 高宏伟, 等. 基于Anti-Windup控制器的永磁同步电机控制系统设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 67-70. (YU Y J, Chai F, Gao H W, et al. Design of PMSM system based on Anti-Windup controller[J]. Trans on China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 67-70.)

[14] Li J G, Chau K T, Li W L, et al. Harmonic analysis and comparison of permanent magnet vernier and magnetic-gear machines[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2011, 47(10): 3649-3652.

[15] Wang S Y, Zhao W X, Ji J H. Magnetic gear ratio effects on performances of linear primary permanent magnet vernier motor[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 0610505.

[16] Niu F, Li K, Yao W. Direct torque control for permanent-magnet synchronous machines based on duty ratio modulation[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6160-6170.

(责任编辑: 孙艺红)

## 下 期 要 目

基于时变增益ESO的航天器无源姿态跟踪控制 . . . . . 王 青, 等

考虑学习/遗忘特性的软件项目调度多目标优化方法 . . . . . 郭一楠, 等

基于子类划分和粒子群优化的自适应编码多类分类方法 . . . . . 薛爱军, 等

改进遗传模拟退火算法在TSP优化中的应用 . . . . . 何 庆, 等

基于融合多策略改进的多目标粒子群优化算法 . . . . . 杨景明, 等

多搜索策略协同进化的人工蜂群算法 . . . . . 王志刚, 等

基于加幂积分方法的制导控制一体化设计 . . . . . 孙向宇, 等

一种基于改进UPF的运动声阵列交互多模型目标跟踪方法 . . . . . 邱 忆, 等

基于距离量测的双领航多AUV协同定位队形优化分析 . . . . . 马 朋, 等