

文章编号: 1001-0920(2005)03-0308-04

永磁直线电机基于ESO的速度辨识与控制

刘希喆, 吴捷, 雷春林

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 运用自抗扰控制技术, 分别对永磁同步直线电机的直轴电流 i_d 和动子速度 v 设计了控制器。直轴电流的自抗扰控制器除完成对 i_d 控制外, 还要借助于控制器中的扩张状态观测器(ESO), 完成对动子速度的辨识。速度的辨识信号作为速度环自抗扰控制器的反馈信号, 从而可设计出一种新型的无速度传感器永磁直线电机的控制系统。由于采用基于过程误差的非线性控制律, 观测器受电机参数的影响极小, 具有算法简单、辨识精度高等优点。

关键词: 扩张状态观测器; 永磁同步直线电机; 自抗扰控制器; 速度辨识

中图分类号: TM 351 **文献标识码:** A

Speed identification and control of PM SLM based on ESO

L I U X i-zhe, W U J ie, L E I Chun-lin

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China Correspondent: L U Xi-zhe, E-mail: liuxizhe@tom.com)

Abstract: By using ADRC method, two controllers are designed for straight axis current loop and mover speed loop of PM SLM. The first controller controls straight axis current (i_d), and identifies the speed of mover by means of expanded state observer (ESO) in it. By taking this identified speed signal as the feedback signal of speed controller, a new control system of PM SLM without speed sensor is proposed. Because of the use of nonlinear control law based on process error, this observer is simple, effective and robust against the variety of motor parameters. The simulation results show that the identified speed error is mighty small, and the performance of this control system is much improved.

Key words: expanded state observer (ESO); permanent magnet synchronous linear motors (PM SLM); auto disturbances rejection controller (ADRC); speed identification

1 引言

永磁同步直线电机(PM SLM)由于采用直接驱动, 克服了传统的“旋转电机-连杆/丝杆”型驱动系统的反向间隙、大摩擦、大惯性等缺点, 具有速度快、灵敏度高、随动性好、准确度高等优点, 因而在精密加工、电子装配线和仪器仪表业有着广泛的应用。在PM SLM控制系统中, 一般需要在电机的运动平台上安装位置/速度传感器(如光栅尺等), 用于测量电机动子的速度和位置, 为控制器提供反馈信号, 但这会给调速系统带来下列问题:

1) 增加了电机动子的运动惯量, 加大了调速系

统的空间尺寸;

2) 增加了电机与控制系统之间的连线和接口电路, 使系统易受干扰;

3) 传感器对使用条件如温度、湿度和振动的要求, 限制了调速系统的适用范围;

4) 传感器及其辅助电路增加了调速系统的成本, 某些高精度传感器的价格甚至会超过电机本身的价格。

为克服这些问题, 许多学者对无速度传感器交流调速系统进行深入研究。目前, 适用于永磁电机的速度辨识方法主要有直接计算法、模型参考自适应

收稿日期: 2003-10-22; 修回日期: 2003-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(60174025)。

作者简介: 刘希喆(1970—), 男, 河南南阳人, 博士生, 从事自适应控制、鲁棒控制的研究; 吴捷(1937—), 男, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制、电力系统等研究。

法, 基于观测器的估算法、人工智能估算法等^[1]。其中: 直接算法要用到电机的参数, 为保证估算精度还要进行电机参数的在线辨识; 模型参考自适应法存在算法的稳定性和收敛速度问题; 通常采用的降阶观测器和扩展卡尔曼滤波法存在计算量大、受电机参数影响大等缺点; 而人工智能估算法目前仍不成熟。迄今为止, 无速度传感器控制方案还只能用于控制精度不太高的调速系统。

自抗扰控制器(ADRC)是一种基于过程误差的非线性控制律, 其算法是基于“大误差小增益, 小误差大增益”的工程经验设计的, 不依赖于对象的精确数学模型。ADRC中的扩张状态观测器(ESO)不仅能观测出系统的状态及其各阶微分, 而且能观测出系统的“综合扰动项”, 它具有算法简单、跟踪速度快等优点^[2]。本文利用ESO设计一种新型的永磁直线电机速度观测器, 该观测器受电机参数的影响极小, 具有算法简单、辨识精度高等优点。

2 PMSLM 模型

PMSLM 在 d - q 轴系下的数学模型为^[3]

$$L_d \dot{i}_d = -R_s i_d + \frac{\pi}{\tau} L_q i_q v + u_d, \quad (1)$$

$$L_q \dot{i}_q = -R_s i_q - \frac{\pi}{\tau} (L_d i_d + \Psi_f) v + u_q, \quad (2)$$

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

其中: u_d 和 u_q 分别为 d 轴和 q 轴的定子电压, i_d 和 i_q 分别为 d 轴和 q 轴的定子电流, R_s 为定子电阻, L_d 和 L_q 分别为 d 轴和 q 轴的定子电感, Ψ_f 为永磁铁产生的磁链, F_e 为电磁推力, v 为动子运动速度, τ 为极距, p_n 为极对数。

直线电机传动系统的机械运动方程为

$$M \dot{v} = -B_v v - F_L + F_e \quad (4)$$

其中: M 为电动机的动子质量, B_v 为粘滞摩擦系数, F_L 为负载阻力。

式(4)中主要考虑了负载阻力和粘滞摩擦两种扰动。实际上, 直线电机在运行过程中还存在其他形式的推力扰动, 如静摩擦、滑动摩擦、风阻、齿槽推力、纹波推力等扰动。其中后两种扰动主要从电机设计和制造的角度进行抑制, 而风阻扰动在普通应用场合的量值极小, 可以忽略不计。这里将静摩擦力和滑动摩擦力视为一个综合摩擦扰动, 其表达式为^[3]

$$f(v) = f_c \operatorname{sgn}(v) + (f_s - f_c) e^{-(v/v_s)^2} \operatorname{sgn}(v). \quad (5)$$

其中: $f(v)$ 为综合摩擦力, f_s 为静摩擦力, f_c 为滑动

摩擦力。

3 基于 ESO 的速度辨识与控制

3.1 i_d 控制和速度辨识

由式(1)可得

$$\dot{i}_d = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{\pi L_q}{\tau L_d} i_q v + \frac{1}{L_d} u_d \quad (6)$$

令综合扰动项

$$a(t) = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{\pi L_q}{\tau L_d} i_q v, \quad (7)$$

则有

$$\dot{i}_d = a(t) + \frac{1}{L_d} u_d \quad (8)$$

根据式(8)可设计出直轴电流 i_d 的自抗扰控制器^[4]。其中 i_d -TD 是一个一阶微分跟踪器, 负责安排速度信号的过渡过程, 其表达式为

$$\begin{cases} \Theta = i_{d1} - i_d^* \\ \dot{i}_{d1} = -r_1 \operatorname{fal}(\Theta, a_0, \delta) \end{cases} \quad (9)$$

其中: i_d^* 为直轴电流的给定信号, i_{d1} 为跟踪输出信号, r_1 为跟踪系数, fal 函数的表达式为

$$\operatorname{fal}(\epsilon, a, \delta) = \begin{cases} |\epsilon|^a \operatorname{sgn}(\epsilon), & |\epsilon| > \delta \\ \epsilon/\delta^{1-a}, & |\epsilon| \leq \delta \end{cases} \quad (10)$$

二阶 ESO 的表达式为

$$\begin{cases} \epsilon = i_{d2} - i_d \\ \dot{i}_{d2} = a(t) - \beta_{01} \operatorname{fal}(\epsilon, a, \delta) + \frac{1}{L_d} u(t) \\ \dot{a}(t) = -\beta_{02} \operatorname{fal}(\epsilon, a, \delta) \end{cases} \quad (11)$$

其中: i_d 为直轴电流的反馈信号, i_{d2} 为直轴电流的观测输出信号, $a(t)$ 为综合扰动项的观测值。

非线性状态误差反馈控制器的表达式为

$$\begin{cases} \Theta = i_{d1} - i_{d2} \\ u_0 = \beta_1 \operatorname{fal}(\Theta, a_1, \delta) \end{cases} \quad (12)$$

在自抗扰控制器设计中, ESO 具有非常重要的作用, 它既可产生输出量的跟踪值及其各阶微分, 从而得到系统的广义误差, 又可准确地观测出系统的综合扰动项 $a(t)$ 。 $a(t)$ 通常是一个自定义的非线性项, 它没有明确的物理意义, 但深入的研究可以发现, 通过对 $a(t)$ 的观测和前馈补偿, ADRC 可实现被控对象的线性化, 这是自抗扰控制器的重要贡献之一。

本文设想利用 $a(t)$ 在 PMSLM 中的实际内涵(如式(7)所示), 进一步构造出系统的状态变量, 即直线电机动子的速度信号

$$\hat{v} = \frac{\tau L_d}{\pi L_q i_q} \left[a(t) + \frac{R_s}{L_d} i_d \right] \quad (13)$$

根据式(13)即可设计出电机的速度观测器, 如图1所示。可以看出, 该观测器中含有电机的相电阻 R_s , 它会随温度的变化而变化, 这无疑会影响速度辨识

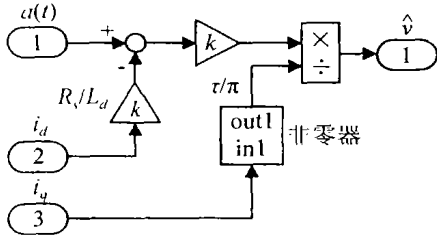


图1 PM SLM 的速度观测器

的精度 对于永磁直线电机而言,为实现电机的线性解耦控制并获得最大的推力电流比,通常采用 $i_d = 0$ 的控制策略 所以 R_s 的时变影响非常小,可以忽略不计. 本文的仿真结果也证明了这一点

3.2 速度控制器设计

PM SLM 采用表面安装结构时,存在 $L_d = L_q$, 则式(3)可化为

$$F_e = \frac{3}{2} p_n \frac{\pi \psi_f i_q}{\tau} \quad (14)$$

令直电机的推力系数

$$k_f = \frac{3}{2} p_n \frac{\pi \psi_f}{\tau} \quad (15)$$

将式(14), (15) 代入(4), 并考虑综合摩擦扰动(5)的影响, 可得 PM SLM 的速度环状态方程

$$\dot{v} = - \frac{F_L + f(v)}{M} - \frac{B_v}{M} v + \frac{k_f}{M} i_q \quad (16)$$

定义综合扰动项 $a(t)$ 和参数项 b 分别为

$$a(t) = - \frac{F_L + f(v)}{M} - \frac{B_v}{M} v, \quad (17)$$

$$b = k_f / M. \quad (18)$$

代入式(16) 可得

$$\dot{v} = a(t) + bi_q \quad (19)$$

根据式(19) 可设计出 PM SLM 的速度环自抗扰控制器^[4]. 其中: 速度环 TD 为

$$\begin{cases} \epsilon_0 = v_1 - v^*, \\ \dot{v}_1 = - r_f \text{fal}(\epsilon_0, a_0, \delta_0). \end{cases} \quad (20)$$

速度环 ESO 为

$$\begin{cases} \epsilon = z_1 - \hat{v}, \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} \text{fal}(\epsilon, a, \delta) + bu(t), \\ \dot{z}_2 = - \beta_{02} \text{fal}(\epsilon, a, \delta). \end{cases} \quad (21)$$

其中: z_1 跟踪速度 v , z_2 跟踪 $a(t)$. $a(t)$ 直接反馈到控制输出端, 以便对系统的综合扰动进行补偿 而速度环 NLSEF 为

$$\begin{cases} \epsilon_1 = v_1 - z_1, \\ u_0 = \beta_1 \text{fal}(\epsilon_1, a_1, \delta_1). \end{cases} \quad (22)$$

速度环自抗扰控制器的输出即为转矩电流的给定值 i_q^* .

3.3 i_q 控制

由于电流环的时间常数远远小于速度环的时间常数, 电流环采用比例控制器 考虑逆变器驱动电路的滞环效应, PM SLM 在闭环控制下的 q 轴电压可表示为

$$u_q = k_p (i_q^* - i_q) e^{-\tau_0 s} \quad (23)$$

其中: k_p 为等效的电流控制器增益, τ_0 为逆变器的滞后时间 通常用一阶惯性环节来代替滞后环节, 即

$$e^{-\tau_0 s} \approx \frac{1}{T_0 s + 1} \quad (24)$$

4 仿真实验

根据以上结果, 本文利用 MATLAB/Simulink

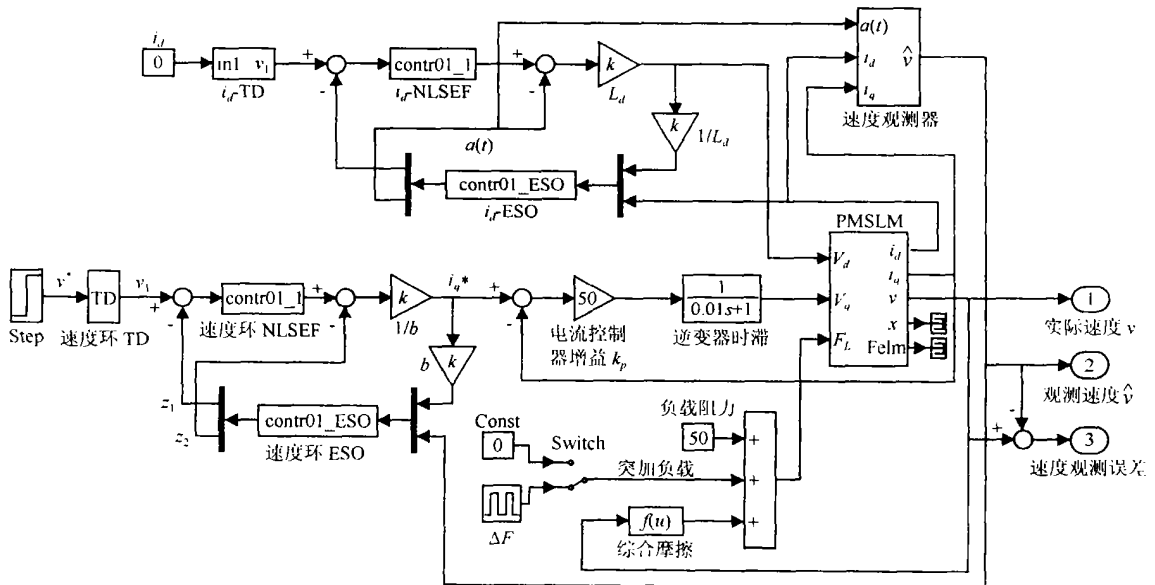


图2 系统辨识与控制仿真

软件^[5], 设计了永磁直线电机基于 ESO 的速度辨识与控制仿真, 如图 2 所示 其中采用的额定仿真参数如表 1 所示

表 1 永磁直线电机的仿真参数

参数名称	参数数值
相电阻 R_s	8.6 Ω
同步电感 $L_d = L_q$	6.0 mH
永磁体磁链标称值	0.35 V · s
极距 τ	0.031 m
极对数 P	1 对
空载时动子总质量 M_0	1.635 kg
粘滞摩擦系数标称值 B_y	0.1 N · s/m
静摩擦力 f_s	20 N
滑动摩擦力 f_c	10 N
润滑系数 V_s	0.1 m/s
额定负载 F_L	50 N
推力系数 K_f	40 N/A
电流放大系数 K_p	50
逆变器滞后时间 T_0	10 ms

为验证无速度传感器永磁直线电机传动系统的控制性能, 在第 2 秒突加负载扰动 $\Delta F_L = 30\text{N}$, 并比较了动子质量变化和电机相电阻变化时的控制效果, 如图 3~ 图 5 所示

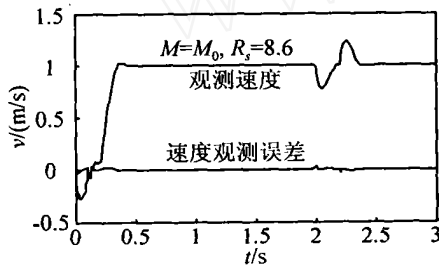


图 3 额定状态下速度的辨识与控制效果

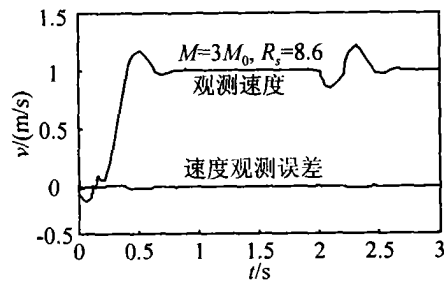


图 4 动子质量增大 3 倍时速度的辨识与控制效果

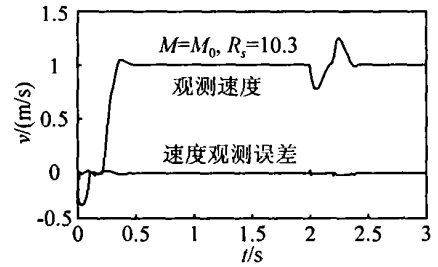


图 5 电机相电阻增大 20% 时速度的辨识与控制效果

5 结 语

本文利用自抗扰控制技术中的扩张状态观测器, 对永磁同步直线电机设计了一种新型的速度观测器 由于该观测器是基于过程误差而不是基于电机参数而设计的, 显示了极强的跟踪能力和抗参数扰动能力 仿真结果表明, 无论动态还是稳态, 无论运行工况变化还是电机参数变化, 速度的观测误差都很小 但该系统的调节和恢复时间约为 0.3 s 左右, 该指标不够理想 分析其原因, 主要与综合扰动项 $a(t)$ 的初值选择有关 自抗扰控制器具有对 $a(t)$ 的自寻优功能, 一般经过几个周期的寻优过程, 系统便可达到满意的运行性能

参考文献 (References)

- [1] 李永东 交流电机数字控制系统[M] 北京: 机械工业出版社, 2002: 343-358
- [2] 黄一, 张文革 自抗扰控制器的发展[J] 控制理论与应用, 2002, 19(4): 485-492
(Huang Y, Zhang W G Development of active disturbance rejection controller[J] Control Theory and Applications, 2002, 19(4): 485-492)
- [3] 郭庆鼎, 王成元, 周美文, 等 直线交流伺服系统的精密控制技术[M] 北京: 机械工业出版社, 2000: 97-108
- [4] 韩京清 非线性状态误差反馈控制律——NLSEF[J] 控制与决策, 1995, 10(3): 221-225
(Han J Q. Nonlinear state error feedback control law — NLSEF [J] Control and Decision, 1995, 10(3): 221-225)
- [5] 薛定宇, 陈阳泉 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M] 北京: 清华大学出版社, 2002: 350-362