

基于滑膜变结构控制的轮式机器人控制系统设计仿真

杨 博, 吴 伟

(沈阳工业大学电气工程学院 沈阳 110870)

摘要 以轮式机器人上的永磁无刷直流电机的研究为研究对象。在此基础上,为了实现精确控制机器人速度和转向功能,建立了永磁无刷直流电机的数学模型,传统 PID 控制过于依赖控制对象的模型参数,鲁棒性差,实际生产现场条件下难以达到最优状态。针对这一问题,滑膜变结构控制是对非线性不确定系统的一种有效的综合方法,通过对切换函数符号判别,不断地切换控制量来改变系统结构,使状态变量运动到事先设计好的空间切换面上。变结构控制对系统的参数摄动和内外干扰鲁棒性非常强,且结构简单。在响应快速考虑负载转矩的情况下,运用滑膜变结构控制,对轮式机器人电机控制系统进行设计,完成流程图的编译。最后用 MATLAB 软件的 SIMULINK 模块进行模块的搭建并进行仿真实验,得到实验结果,验证控制系统的准确性。

关键词: 轮式机器人 永磁无刷直流电机 滑膜变结构

1 引言

如今机器人发展深受国内外学者的关注,尤其是伴随电力电子技术以及控制理论的迅速发展,机器人实用化日益广泛^[1]。而性能优良的电机和高速的驱动系统是其发展的关键技术,直接影响机器人的稳定性、快速性和准确性^[2]。

机器人控制系统日趋智能化,模糊控制,神经网络自适应控制,遗传算法,滑膜变结构控制等非线性智能控制技术的应用,使得控制系统精确度大幅提高,系统抗干扰能力日益增强^[3]。

本文采用的是一种滑膜变结构控制^[4]。滑膜变结构控制系统的基本思想在于通过控制对象的切换以最大限度地利用每一结构的良好性能。引入变结构系统的好处之一是可以获得任意单独结构无法得到的性质,如通过开关逻辑可以将两个都不稳定的(或品质极差的)子系统综合成一个高质量的稳定系统^[5]。

本文构造了滑膜变结构控制器估算永磁无刷直流电机转子转速并进行预测控制。与传统 PID 控制的仿真结果相比较,从而验证了设计的正确性和有效性,体现出滑膜变结构控制方法的优越性^[6]。

2 永磁无刷直流电机模型

永磁无刷直流电机的数学模型表示为:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, U_a 、 U_b 、 U_c 为 A、B、C 三项相电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为电机各项相电流; R_a 、 R_b 、 R_c 各项绕组的电阻; L_a 、 L_b 、 L_c 为电机各项绕组的自感; e_a 、 e_b 、 e_c 为电机各项反电动势, M_{ab} 、 M_{ac} 、 M_{ba} 、 M_{bc} 、 M_{ca} 、 M_{cb} 分别为电机两项的互感。

由于转子是永磁体,电机绕组采用 Y 型接线方式,所以由式(1)可简化为:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{电机的电磁转矩方程为: } T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega_m \quad (3)$$

式中 T_e 为电机的电磁转矩； ω_m 为转子机械角速度。

$$\text{电机的运动方程为: } T_e = T_l + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (4)$$

对于 BLDC 而言，任何时刻只有两相同时导通，忽略绕组因换相引起的电流波动和二极管的压降和续流，把整个电机作一个整体，式 (2) 可以简化为：

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} = a_1 \frac{d\omega}{dt} + a_2\omega + a_3U + f(t) \quad (5)$$

U 为电机端电压； i 为母线电流； $R = 2r$ 为等效电阻； $L' = 2(L - M)$ 为等效电感； K_e 为反电势系数； ω 为电机角速度。

$$\text{电机的转矩平衡方程为: } T_e = J \frac{d\omega}{dt} + K_b\omega + T_l \quad (6)$$

$$T_e = K_T i \quad (7)$$

式中 K_b 为阻尼系数， K_T 为转矩系数。由式子 (6)(7) 可以求出：

$$a_1 = -\frac{RJ + K_b L'}{L'J} \quad (8)$$

$$a_2 = -\frac{K_b R + K_e K_T}{L'J} \quad (9)$$

$$a_3 = \frac{K_T}{L'J} \quad (10)$$

$$f(t) = -\frac{RT_l}{L'J} \quad (11)$$

3 控制器设计

$$\text{设 } \omega_r \text{ 为给定速度, 给定速度和反馈速度的偏差: } \omega - \omega_r = x_1 \quad (12)$$

$$x_2 = \frac{d\omega}{dt} \quad (13)$$

$$\text{由式 (5)(12)(13) 可得: } \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_2 & a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_3 \end{bmatrix} m + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{R}{L'J} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{式中: } m = U + \frac{a_2}{a_3} \omega_r \quad (15)$$

$$\text{由滑膜结构可知, 控制逻辑方程为式: } m = U + \frac{a_2}{a_3} \omega_r$$

滑膜超平面： $s = Cx_1 + x_2$ (C 为常数且大于 0)，控制法则如下：

$$(1) \text{ } sx_1 \geq 0 \text{ 时, } \psi_1 = \alpha_1;$$

$$sx_1 < 0 \text{ 时, } \psi_1 = \beta_1$$

$$(2) \text{ } sx_2 \geq 0 \text{ 时, } \psi_2 = \alpha_2;$$

$$sx_2 < 0 \text{ 时, } \psi_2 = \beta_2$$

$$(3) \text{ } s \geq 0 \text{ 时, } \delta_1 \text{sign}(s) = \delta_1$$

$s < 0$ 时, $\delta_1 \text{sign}(s) = -\delta_1$

根据滑膜变结构理论, 在相平面中, 运动点遇上滑模线, 并逼近原点的充分必要条件是对于所有偏差状态 x_1 、 x_2 存在: $s \dot{s} \leq 0$

经计算可得:

当 $sx_1 \geq 0$ 时, $\psi_1 = \alpha_1 > \frac{a_2}{a_3}$; 当 $sx_1 < 0$ 时, $\psi_1 = \beta_1 < \frac{a_2}{a_3}$;

当 $sx_2 \geq 0$ 时, $\psi_2 = \alpha_2 > \frac{C+a_1}{a_3}$; 当 $sx_2 < 0$ 时, $\psi_2 = \beta_2 < \frac{C+a_1}{a_3}$

α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 、 δ_1 为控制器待选参数。 δ_1 是为了克服扰动的参数。滑膜参数 C 要求为一个适当的正数。

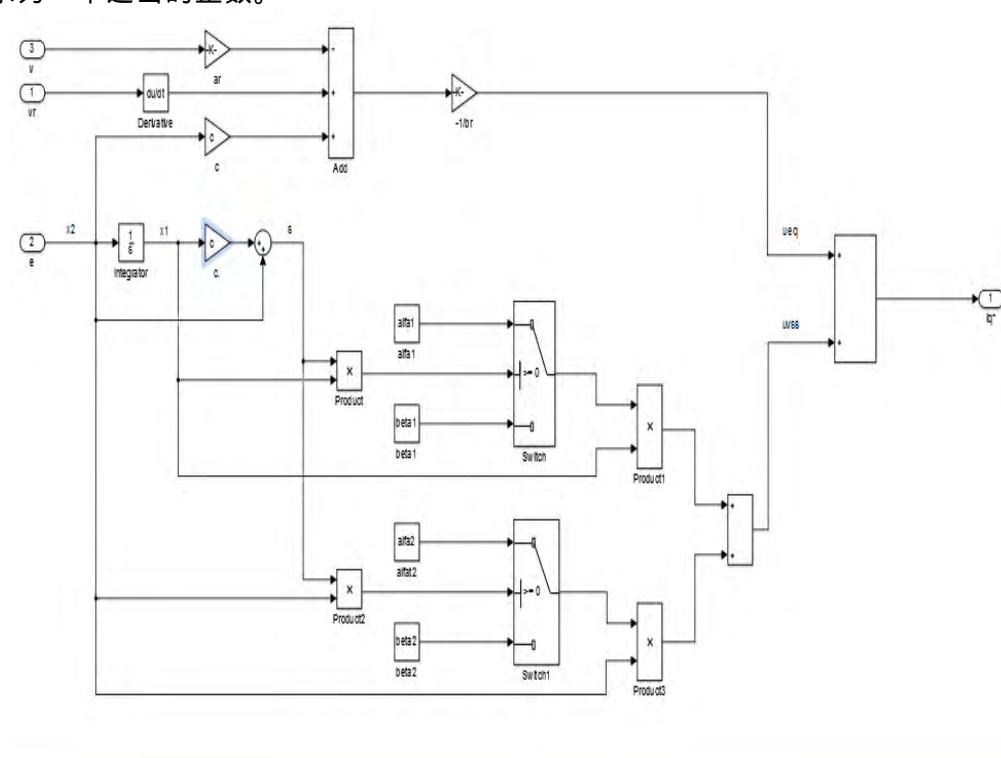


图 1 为滑膜变结构控制器结构图

4 仿真验证与分析

本文采用 MATLAB/SIMULINK 对滑膜变结构控制器进行仿真, 实验用的永磁无刷直流电机参数为: 额定电压为 24V, 额定转速为 3000r/min, 反电势系数 K_e 为 0.0482V/(rad/s), 有效相电感 L 为 1.4mH, 转矩系数 K_T 为 0.0522Nm/A, 相电阻 R 为 0.488Ω, 转动惯量 J 为 $1.89 \times 10^{-6} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$, 阻尼系数 K_b 为 $4.53 \times 10^{-6} \text{ Nm/(rad/s)}$ 。仿真时给定的参考转速为 1500r/min, 为了验证系统抗干扰能力, 在 60ms 时, 使负载转矩由原来的 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 增加至 $0.3 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 系统分别采用普通 PID 和本文提到的滑膜变结构控制策略进行仿真, 图 2 所示为滑膜变结构控制阶跃响应曲线, 图 3 所示为普通 PID 控制阶跃响应曲线。

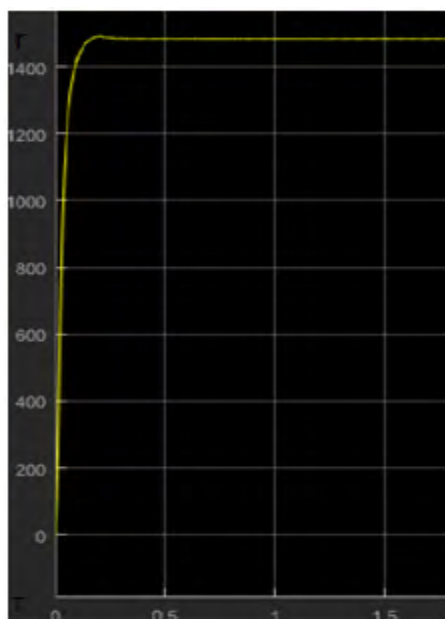


图 2 为滑膜变结构控制响应曲线

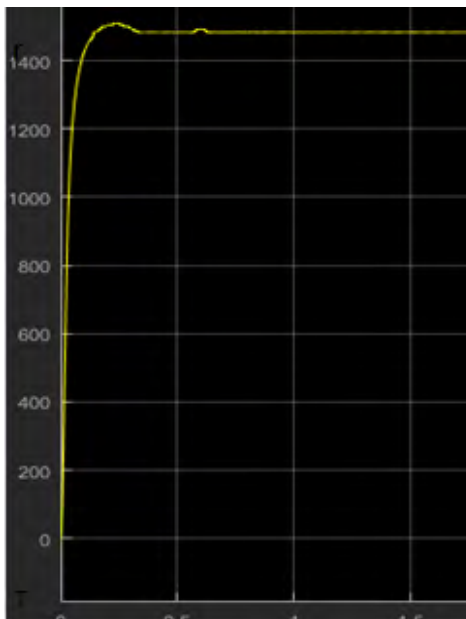


图 3 为 P I D 控制响应曲线

根据图 2 和图 3 分析，本文提出的滑模变结构控制在抑制超调和加快响应速度等方面取得了相当好的效果，优于普通 PID；在负载变化时，滑模变结构控制与普通 PID 控制相比，系统速度波动小且恢复时间短，说明本文提出的自适应滑模变结构控制器具有很强的鲁棒性。

参考文献

- 【1】 徐国华，谭民.移动机器人的发展现状及其趋势[J].机器人技术及应用 2001,3:7-14.
- 【2】 付庄，刘成良.轮式移动机器人 WMR 的运动分析[J].机器人 2001,23(7):598-600.
- 【3】 李航，宋春华，罗胜彬.机器人的研究现状及其发展趋势[J].微特电机 2013(04).
- 【4】 范永，谭民.机器人控制器的现状及展望[J].机器人，1999，01:76-81
- 【5】 Bara A., Dale S. Dynamic Modeling and Stabilization of Wheeled Mobile Robot[A].// In: 11th WSEAS International Conference on Mathematical Methods, Computational Techniques and Intelligent Systems[C], Canary Islands, Spain, 2009, 5: 87-92.
- 【6】 王珊珊.轮式移动机器人控制系统设计[D].南京理工大学，2013.

作者简介

杨博 男，1990 年生，硕士，研究方向为电机及其控制。
 吴伟 女，1969 年生，副教授，研究方向为智能机器人。