

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.04.048

# 基于非线性扰动观测器的永磁同步电机优化控制

石燕燕<sup>1</sup>, 陈锡渠<sup>2</sup>

(1. 青岛科技大学 自动化学院, 山东 青岛 266042;

2. 河南科技学院 继续教育学院, 河南 新乡 453000)

**摘要:**为实现永磁同步电机控制的精确可控,提出一种永磁同步电机最优滑模速度控制方法,以非线性扰动观测器为基础,实现最优控制和滑模控制的有效结合,使电机控制过程中的超调现象和启动性能得到较大改善。针对随机扰动问题设计基于观测器(NDOB)的滑模观测器,经过对系统的前馈补偿有效降低了随机扰动影响。理论分析及仿真实验结果表明:该方法有效提高了系统的动态性能和鲁棒性。

**关键词:**滑模控制;永磁同步电机;鲁棒性;非线性扰动

**中图分类号:**TP273; TM351 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)04-0183-04

## Optimal Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Nonlinear Disturbance Observer

SHI Yanyan<sup>1</sup>, CHEN Xiqu<sup>2</sup>

(1. Institute of Automation, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

2. College of Continuing Education, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453000, China)

**Abstract:** In order to realize accurate control of PMSM, an optimal sliding mode speed control method for PMSM is proposed. Based on the nonlinear disturbance observer, the effective combination of optimal and sliding mode controls is implemented, which greatly improves the overshoot phenomenon and starting performance of PMSM. A sliding mode observer based on NDOB is designed for stochastic disturbance problem, and the effect of which is effectively reduced by feedforward compensation of the system. The theoretical analysis and simulation results show that this method improves the dynamic performance and robustness of the system with great effect.

**Keywords:** optimal sliding mode control; permanent magnet synchronous motor; robustness; nonlinear disturbance

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)因其性能的优势已被大量应用于新能源汽车、航空航天、机器人等许多工程领域。PID调节是较为常规、传统的方法,由于控制精度有限,目前迫切需要实现控制系统的升级与改进<sup>[1-3]</sup>。非线性的控制是目前应用较为广泛的方法,为解决调速系统存在随机扰动这一问题,有关非线性扰动观测器的研究变得越来越受关注。文献[4]主要针对多输入输出系统进行了研究,并提出了针对该系统干扰抑制的非线性观测器。文献[5]通过综合分析得到了一种新的综合控制方法,该方法主要针对不确定性干扰,通过复合决策有效抑制了随机扰动的影响。滑模控制(SMC)具有滑动模态状态独立、不受系统内部参数和外部扰动等特点。文献[6-7]分别将线性和非线性滑模控制运用到PMSM系统的控制中,有效提高了系统的稳定性,获得了良好的控制效果。目前针对永磁同步电机的非线性控制能较为有效地实现对永磁同步电机的控制,但是在实际应用过程中,因电机实际工作环境复杂,单一的控制方法仍不能有效消除随机扰动的影

响,对于超调和启动不稳定等问题仍需进一步研究。

本文提出了一种PMSM最优滑模速度控制方法。该方法以非线性扰动观测器为基础,实现了最优控制和滑模控制的有效结合,使电机控制过程中的超调现象和启动性能得到了较大改善。与此同时,针对随机扰动问题设计了基于观测器(NDOB)的滑模观测器,通过对系统的前馈补偿有效降低了随机扰动影响。

## 1 PMSM的数学模型

近似认为PMSM在同步旋转dq坐标系下的动态数学模型如下:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = Ri_q + \omega \varphi_f + \omega L_d i_d + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

PMSM运动方程为

$$T_e - T_L = \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

式中: $u_d$ 、 $u_q$ 分别表示d、q轴的电压分量; $i_d$ 、 $i_q$ 分别表示

第一作者简介:石燕燕(1999—),女,山东济宁人,本科,研究方向为电气自动化。

$d, q$  轴的电流分量;  $L_d, L_q$  分别表示  $d, q$  轴电感;  $R$  为电机定子绕组的电阻;  $\omega$  为电机的电角速度;  $\varphi_f$  为永磁体与定子交链磁链;  $T_e$  为电磁转矩;  $J$  为转动惯量;  $T_L$  为负载转矩;  $p$  为极对数。

系统的转速表达式为

$$\dot{\omega} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p^2 \varphi_f i_q}{J} - \frac{p}{J} T_L \quad (3)$$

当系统在运行过程中发生参数变化及受外部扰动作用时,根据实际情况系统的数学模型可整理为

$$\dot{\omega} = a i_q + d_1 \quad (4)$$

取 PMSM 系统的状态变量为:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_r - \omega \\ x_2 = \dot{x}_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\omega_r$  与  $\omega$  分别表示电机给定转速值和实际转速值。

综合式(4)、式(5),对  $x_1, x_2$  求导可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{\omega}_r - \dot{\omega} = \dot{\omega}_r - a i_q - d_1 \\ \dot{x}_2 = \ddot{\omega}_r - \ddot{\omega} = \ddot{\omega}_r - a \dot{i}_q - \dot{d}_1 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)整理成一般形式为

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)u + g_2(x)d \quad (7)$$

## 2 基于非线性扰动观测器的滑模控制器设计

根据式(7)研究了基于 PMSM 非线性扰动观测器表述为:

$$\begin{cases} \dot{z} = -k g_2 z - k [g_2 k x + f(x) + g_1 u] \\ \hat{d} = z + k x \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\hat{d}$  和  $z$  分别表示扰动观测器的扰动向量和内部状态向量;  $k$  为扰动观测器的增益矩阵。其中  $\hat{d}$  为式(7)中  $d$  的观测值,可表示为

$$\hat{d} = \begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \end{bmatrix}$$

扰动估计误差为

$$e_d(t) = d(t) - \hat{d}(t) \quad (9)$$

动态误差为

$$\dot{e}_d(t) = -k g_2(x) e_d(t) + \dot{d}(t) \quad (10)$$

设计滑动模式面为

$$s = c_1 x_1 + x_2 + b \hat{d}_1 \quad (11)$$

其中  $c_1$  为滑模面参数且  $c_1 > 0$ 。

对  $s$  求导,得

$$\dot{s} = c_1 \dot{x}_1 + \dot{x}_2 + b \dot{\hat{d}}_1 = c_1 \dot{x}_1 + \dot{\omega}_r - a \dot{i}_q + b \dot{\hat{d}}_1 - \dot{d}_1 \quad (12)$$

设计新型趋近律为

$$\dot{s} = -g |x_1| \operatorname{sgn}(s) - \frac{s}{g} + \dot{\hat{d}}_1 - \dot{d}_1 \quad (13)$$

式中  $g$  为常数。

结合式(12)、式(13)可得前馈控制量

$$i_{q1} = \frac{1}{a} \int \left[ c_1 \dot{x}_1 + \dot{\omega}_r + g |x_1| \operatorname{sgn}(s) + \frac{s}{g} + b \dot{\hat{d}}_1 - \dot{d}_1 \right] dt \quad (14)$$

为了削弱存在的抖振问题,这里引入抗抖振因子  $G(s)$  取代开关符号函数  $\operatorname{sgn}(s)$ ,其具体表达式为

$$G(s) = \frac{s}{|s| + v} \quad (15)$$

式中  $v$  为抗抖振因子,且  $v > 0$ 。

取李雅普诺夫函数为  $V = \frac{1}{2} s^T s$ ,由李雅普诺夫稳定性分析可得

$$\frac{dV}{dt} = s \dot{s} < 0 \quad (16)$$

## 3 最优滑模控制器的设计

为了提高系统的动态性能,结合最优控制与滑模控制各自的优势,设计最优滑模速度控制器。由式(2)、式(3)、式(5)可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega} = -\frac{3p^2 \psi_f i_q}{2J} + \frac{p}{J} T_L \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega} = -\frac{3p^2 \dot{\psi}_f i_q}{2J} \end{cases} \quad (17)$$

令  $D = 3p^2 \psi_f / 2J, u = \dot{i}_q$  可得到系统的状态空间表达式为

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -D \end{pmatrix} u \quad (18)$$

取线性滑模面为

$$s = c x_1 + x_2 \quad (19)$$

式中  $c$  为常数且  $c > 0$ 。其  $c$  值大小将影响滑动模态的动态品质及其渐进稳定性。因此选取最优的  $c$  尤为重要。

当系统在切换面上运动时,

$$c x_1 + x_2 = 0 \quad (20)$$

因此滑动模态方程表示为

$$\dot{x}_1 = -c x_1 \quad (21)$$

设定系统的优化性能指标函数为

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (22)$$

式中  $Q$  为给定的正定矩阵,取

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix}, q_{12} = q_{21} = 0$$

因为在滑动模态运动过程中,滑模运动与控制量无关,故式(22)的末项可忽略不计。于是

$$J = \int_0^{\infty} x^T Q x dt \quad (23)$$

利用二次性能指标最优控制求解法,根据李卡提方程

$$2 \cdot P \cdot \begin{pmatrix} q_{12} \\ q_{22} \end{pmatrix} - \frac{1}{q_{22}} P^2 + \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{12} & q_{22} \end{pmatrix} = 0 \quad (24)$$

可求解出  $P$ ,因此推出切换函数  $c$  的值为

$$c = \frac{1}{q_{22}} (P + q_{12}) \quad (25)$$

为了提高系统的动态品质,这里选取指数趋近律,其表达式为

$$\dot{s} = -k s - \varepsilon \operatorname{sign}(s) \quad (26)$$

通过以上分析可以得到非线性扰动观测器的输出已

经确定,将控制输出前馈至电流调节器的输入,最终得到电流给定值为

$$i_q = i_{q1} + i_{q2} = \frac{1}{a} \int \left[ cx_1 + \dot{\omega}_r + g |x_1| \operatorname{sgn}(s) + \frac{s}{g} + b \dot{d}_1 - \dot{d}_1 \right] dt - \frac{1}{D} \int [ks + \varepsilon \cdot \operatorname{sign}(s) + cx_2] dt。$$

## 4 仿真及实验验证

### 4.1 仿真分析

通过 Simulink 系统对仿真模型进行仿真分析,选用 PMSM 的参数如表 1 所示,系统的架构如图 1 所示。

表 1 永磁同步电机驱动系统的主要参数

参数	数值
额定转矩/(N·m)	12
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2 500
转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.001 05
永磁体磁链/Wb	0.25
摩擦系数/(N·m·(s·rad <sup>-1</sup> ))	0.000 1
极对数	4
定子电阻/Ω	0.85
$L_q/L_d$	$8.1 \times 10^{-3}$

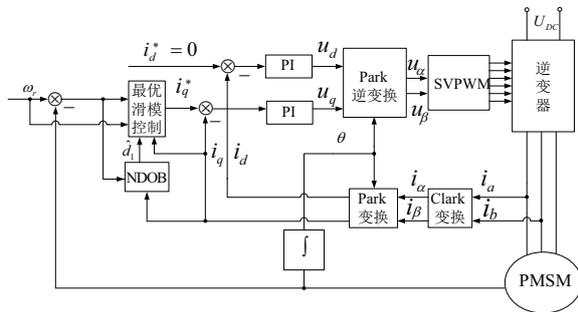


图 1 PMSM 调速系统的控制框图

图 2 为本文算法与传统的 PI 调节器对比的转速空载响应曲线。系统初始给定转速为 100 rad/s。从图中曲线可看出基于 NDOB 的 PMSM 最优滑模控制的控制方法启动平稳无超调,启动性能较好。

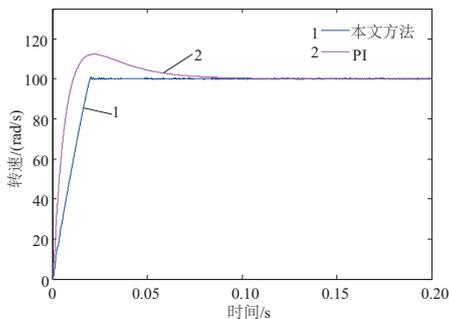


图 2 空载响应曲线

图 3 为存在负载扰动时两种控制方法对比曲线。系统在 0.15 s 时,加载 2 N·m。从图中曲线可明显看出本文

控制方法在加载时鲁棒性更强。

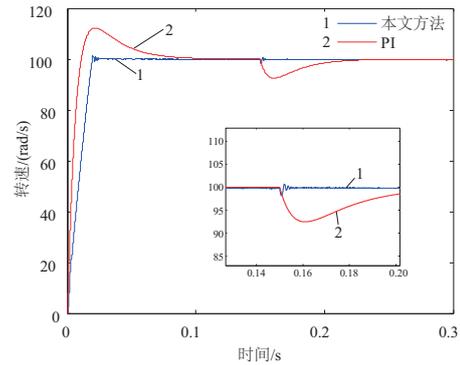


图 3 综合扰动时转速响应曲线

图 4 所示为负载扰动时电流响应曲线。可以看出本文方法在系统受到扰动时,电流波动不明显,电流动态性能较好。

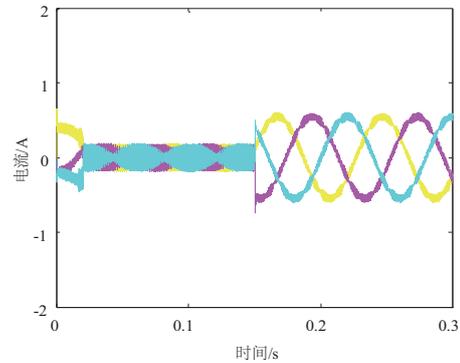


图 4 负载扰动时电流响应曲线

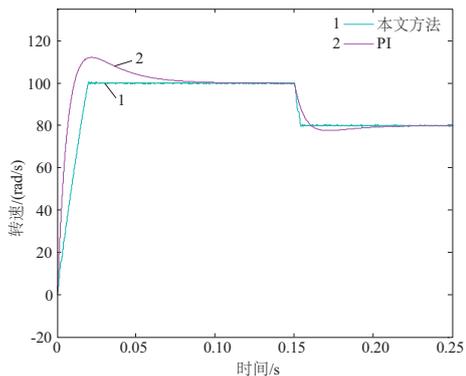


图 5 阶跃给定时速度对比曲线

从图 5 中对比可以看出,本文控制方法在系统阶跃给定时转速响应快速且无抖动,实现了较高的控制精度。

### 4.2 实验分析

通过基于 TMS320F2812 实时控制系统对该方法的有效性进行验证分析,实验结果达到预期效果。

图 6 为电机空载启动时稳定状态对应 A 相电流波形。从图中可看出在电机达到稳定运行状态时,定子电流稳定且正弦度较好。

图 7 为 PMSM 稳定运行时加减载速度波形。从图中

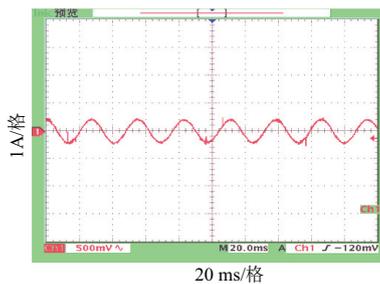


图6 PMSM 空载稳定运行时 A 相电流

可以得出,电机在稳定运行后的 27 s 加载和 35 s 卸载过程中,转速能够迅速地恢复到稳定状态,具有较强的鲁棒性。

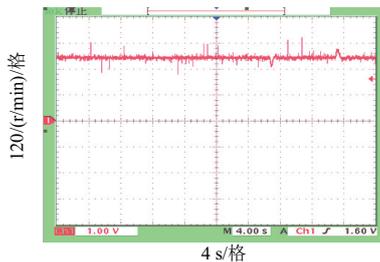


图7 PMSM 稳定运行时加载减速度波形

## 5 结语

本文针对永磁同步电机控制中存在的随机扰动、控制

增益大等问题,提出了一种 PMSM 最优滑模速度控制方法,该方法以非线性扰动观测器为基础,实现了最优控制和滑模控制的有效结合,使电机控制过程中的超调现象和启动性能得到了较大改善。同时针对随机扰动问题设计了基于 NDOB 的滑模观测器,通过对系统的前馈补偿,有效降低了随机扰动影响。

### 参考文献:

- [1] 白雪宁,杨向宇,赵世伟. 基于负载观测器的 PMSM 分数阶滑模位置控制[J]. 机械制造与自动化,2020,49(2):170-173.
- [2] 牛里,杨明,刘可述,等. 永磁同步电机电流预测控制算法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(6):131-137.
- [3] 周涛. 永磁同步电机调速系统的自抗扰控制[J]. 光学精密工程,2016,24(3):582-589.
- [4] YANG J,LI S H,CHEN W H. Nonlinear disturbance observer-based control for multi-input multi-output nonlinear systems subject to mismatching condition [J]. International Journal of Control,2012,85(8):1071-1082.
- [5] YANG J,ZOLOTAS A,CHEN W H,et al. Robust control of nonlinear MAGLEV suspension system with mismatched uncertainties via DOBC approach[J]. ISA Transactions,2011,50(3):389-396.
- [6] 肖海峰,刘海龙,贺昱曜. PMSM 的线性滑模变结构直接转矩控制研究[J]. 电气传动,2014,44(5):35-39.
- [7] 钱荣荣,骆敏舟,赵江海,等. 永磁同步电动机新型自适应滑模控制[J]. 控制理论与应用,2013,30(11):1414-1421.

收稿日期:2020-07-17

(上接第 158 页)

## 5 结语

本文以城市轨道交通客流检测为背景,以准确识别与检测客流为目标;以机器视觉技术为手段;以客观图像为研究对象。通过背景提取与更新、二值化、降噪、滤波与增强,获取了客观人物整体像素点信息。利用 Python 环境开发了相应的客流检测软件,并将其用于客流检测。最终通过对检测软件结果的分析,证明所设计的客流检测系统能够在复杂背景中有效获得人物信息。实验结果表明检测准确率高于 90.00%,达到了本次设计的目标,具有一定的应用价值。

### 参考文献:

- [1] 张强. 基于深度学习的地铁进站客流检测算法研究[D]. 北京:北方工业大学,2019.
- [2] 徐平. 红外 APC 乘客计数精度改进及公交客流量预测模型研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [3] 王爱丽,赵元,王子腾,等. 城市轨道交通客流信息智能检测与管控系统研究与设计[J]. 铁路计算机应用,2020,29(2):68-72.
- [4] 林薇. 基于机器视觉的道路车流量检测方法研究[D]. 沈阳:

沈阳工业大学,2011.

- [5] 陈水酉,何炳蔚,李永凯,等. 基于机器视觉的安全气囊检测系统研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(4):158-161.
- [6] 王爱丽,赵元,王子腾,等. 城市轨道交通客流信息智能检测与管控系统研究与设计[J]. 铁路计算机应用,2020,29(2):68-72.
- [7] DINO I G,SARI A E,ISERI O K,et al. Image-based construction of building energy models using computer vision[J]. Automation in Construction,2020,116:103231.
- [8] 龚松标. 基于自适应特征的复杂场景背景提取[D]. 西安:长安大学,2019.
- [9] 刘钱源,杨欢欢,刘培鑫,等. 基于监控视频的前景目标提取[J]. 数学建模及其应用,2018,7(1):63-71.
- [10] 吴天友,殷志祥. 基于帧差法与中值法的运动目标背景提取算法[J]. 怀化学院学报,2019,38(11):33-35.
- [11] 秦玮,陈希,马原原,等. 基于数学形态学的边缘检测算法分析[J]. 信息技术,2019,43(11):33-36.
- [12] 张天微. 形态学滤波在表面轮廓测量中的应用[J]. 工具技术,2019,53(8):116-118.
- [13] 胡嫣然. 一种基于 Python+OpenCV 的视频处理办法[J]. 计算机产品与流通,2020(8):139,141.

收稿日期:2020-08-17