

文章编号: 1009 - 444X(2021)04 - 0321 - 06

永磁同步电机无位置传感器控制策略研究

何 郑, 马西沛, 范平清, 赵 恒, 王岩松

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 针对电子水泵用永磁同步电机无传感器控制系统中调速存在超调、抖振和响应慢的问题, 采用一种混合滑模变结构的速度环和龙伯格观测器的 PMSM 无传感器控制算法. 在转速环节设计基于新型趋近律的滑模速度控制器, 在传统指数趋近律的基础上, 在等速项中加入运动点的运动误差, 采取双曲正切函数替代比较切换函数, 改善趋近滑模面运动过程中的收敛速度和抖振抑制能力. 采用线性控制结构的龙伯格观测器结合锁相环, 应用到无传感器控制系统中, 改善估算转速抖振问题及稳定性. 仿真结果表明, 在电机空载启动和外加扰动工况下, 该算法可有效提高永磁同步电机无传感器控制系统转速的跟踪效果, 改善转速的超调与抖振问题, 同时提高系统的抗外部干扰能力.

关键词: 永磁同步电机; 滑模控制; 双曲正切函数; 龙伯格观测器; 速度环

中图分类号: TM351; TG506

文献标志码: A

Research on sensorless control strategy of PMSM

HE Zheng, MA Xipei, FAN Pingqing, ZHAO Heng, WANG Yansong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the problems of overshoot, chattering and slow response in the sensorless control system of permanent magnet synchronous motor (PMSM) for electronic water pump, PMSM sensorless control algorithm based on hybrid sliding mode speed controller and Luenberger observer was proposed. In the speed loop, a sliding mode speed controller based on the new reaching law was designed. On the basis of the traditional exponential reaching law, the motion error of the moving point was introduced into the constant velocity term, and the hyperbolic tangent function was adopted to replace the comparison switching function, so as to improve the convergence speed and chattering suppression ability of the sliding mode. The Luenberger observer of the linear control structure combined with the phase-locked loop was applied to the sensorless control system, in order to improve the chattering problem and stability of the estimated speed. The simulation results show that under the no-load starting and external disturbance conditions of the motor, the algorithm can effectively improve the speed tracking effect of PMSM sensorless control system, improve the speed overshoot and chattering problems, and enhance the anti-interference ability of the system.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); sliding mode control; hyperbolic tangent function; Luenberger observer; speed loop

收稿日期: 2021 - 08 - 04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675324); 上海科委研发服务平台(18DZ2295900); 上海汽车工业科技发展基金会产学研项目(1910)

作者简介: 何 郑(1996 -), 男, 在读硕士, 研究方向为永磁同步电机控制. E-mail: 1121365768@qq.com

通信作者: 马西沛(1980 -), 男, 实验师, 硕士, 研究方向为汽车电子电控、智能制造. E-mail: maxipei@163.com

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有结构简单、功率密度高、效率高、损耗少、节能效果明显等特点, 被广泛使用于电动汽车、水泵、压缩机等产品^[1-2]。PMSM 是具有多参数、多输入的模型, 对 PMSM 物理模型的解耦一直是设计控制系统的重要环节。当电机受到外部干扰且内部参数随温度变化时, 传统的 PI 控制器鲁棒性不强, 无法达到稳定的控制要求。因此, 近年来许多学者针对 PI 控制技术的应用缺陷, 提出用滑模变结构替代 PI 控制器加入到控制系统中。滑模变结构具有对外部干扰和电机参数不敏感、快速性好等优点, 非常适用于 PMSM 控制算法^[3-5]。王要强等^[6]为解决趋近滑模面速度慢及抖振问题, 对幂次趋近律进行优化, 将幂次项指数与系统状态变量融合, 同时采用扩张状态观测器获取系统负载扰动, 并前馈补偿给滑模转速环, 以提高系统的动态性能。但该控制系统仍无法避免使用位置及转速传感器。苗敬利等^[7]针对传统 PI 转速环以及基于常规指数趋近律所设计的滑模速度调节器的转矩脉动大和鲁棒性差的问题, 提出一种变指数趋近律的滑模速度环, 但该控制系统仍旧依赖于转速传感器获取转速信号。苗敬利等^[8]在转速环环节设计新型趋近律, 采用模糊自适应方法实现趋近律参数的动态调节, 同时混合滑模观测器对转子位置和转速进行估算, 有效提高了系统响应, 降低抖振。罗雯等^[9]基于传统指数趋近律优化使用连续切换函数来平滑控制信号, 采用积分型滑模控制器抑制高频扰动, 同时采用龙伯格线性观测器提高转子位置估算精度, 使得电机的抗外部干扰能力增强, 极大地改善滑模抖振问题。

本研究针对 PMSM 无传感器控制系统, 采用新型趋近律的滑模转速环, 基于传统指数趋近律引入变指数项, 使运动点获得较快的收敛速度; 对开关函数进行平滑处理, 使用双曲正切函数代替比较切换函数, 削弱开关函数带来的抖振。由于滑模观测器的不连续性, 采用 Luenberger 观测器消除抖振; 最后采用锁相环进行转子位置估计。

1 滑模速度控制器设计

1.1 新型趋近律方法

传统指数趋近律为

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - qs, \quad \varepsilon, q > 0 \quad (1)$$

式中: $-\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ 为等速趋近项; $-qs$ 为指数趋近项;

s 为滑模面; $\operatorname{sgn}(s)$ 为符号函数; ε 为系统趋近切换面 $s=0$ 的速率。当 ε 减小, 趋近速度减慢; 当 ε 增大, 则趋近切换面时仍然保持过大速度, 同时带来抖振问题。

本研究基于上述传统指数趋近律, 对存在的缺陷进行适当优化, 设计一种新型趋近律的滑模变结构为

$$\dot{s} = -\varepsilon |x_1| \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) - qs, \quad \varepsilon, q > 0 \quad (2)$$

为改善趋近速度和抑制抖动, 在等速趋近项中引入系统状态变量 $|x_1|$, 使系统可以自适应地以指数和变速速率趋近滑模面, 以获取更快的趋近速度。当 $|x_1|$ 较大时, 系统在变速项 $-\varepsilon |x_1| \tanh(s)$ 和 $-qs$ 一起工作时迅速趋近滑模面, 速度比传统指数趋近律快。当系统进入滑动模态过程时, 变速项 $-\varepsilon |x_1| \tanh(s)$ 起主要作用, 且随着状态变量 $|x_1|$ 减小而减小, 最终稳定在零点处。当 $|x_1|$ 减小至 0 时, 变速项也为 0, 抖振得到抑制。

为验证新型趋近律的有效性, 采用相同的参数在 Matlab 中分别对式 (1) 和式 (2) 进行仿真, 参数为 $c=15$, $\varepsilon=5$, $k=10$ 。两种趋近律相轨迹对比如图 1 所示。从图 1 可知, 新型指数趋近律很好地抑制了传统指数趋近律所带来的抖振。

1.2 基于双曲正切函数的滑模控制

传统指数趋近律的滑模变结构所采用的比较切换函数会带来抖振问题, 且属于不连续函数, 不适合于需要开关函数函数求导的场合。而双曲正切函数相比切换函数有很好的抑制抖振效果。两种开关函数对比如图 2 所示。

1.3 T-SMC 速度控制器的设计

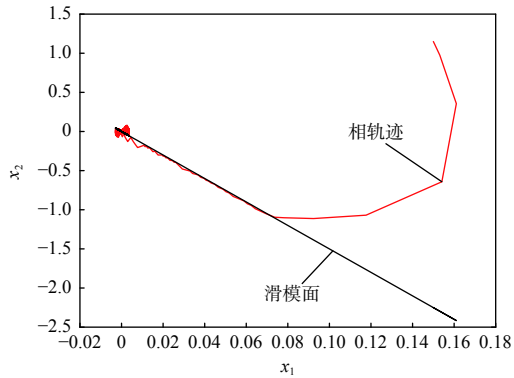
将 PMSM 转速环的速度误差及导数分别定义为系统的状态变量 x_1 、 x_2 , 即

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (3)$$

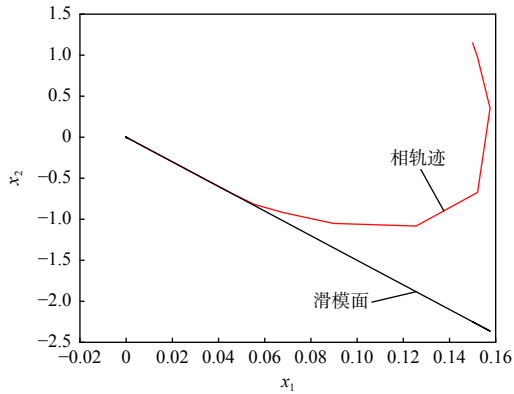
式中: ω_{ref} 为参考转速; ω_m 为估算转速。

本研究中表贴式 PMSM 采用 $i_d=0$ 的矢量控制方法即可获得较好的控制效果, 根据永磁同步电机数学模型得出变换后的模型公式为

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} (-Ri_q - p\psi_f \omega_m + u_q) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left(-T_L + \frac{3p\psi_f}{2} i_q \right) \end{cases} \quad (4)$$



(a) 传统指数趋近律相轨迹



(b) 新型指数趋近律相轨迹

图 1 趋近律相轨迹对比

Fig. 1 Comparison of phase trajectories of approach law

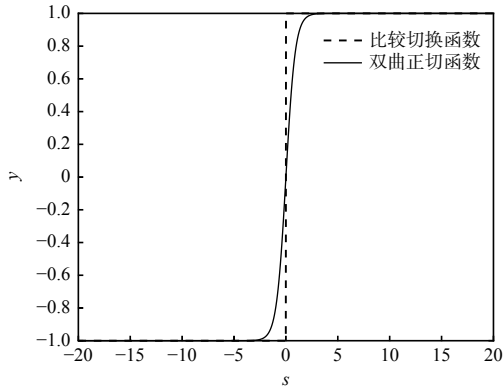


图 2 两种开关函数的对比

Fig. 2 Comparison of two switching functions

根据式 (3) 和式 (4) 可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \left(T_L - \frac{3p\psi_f}{2} i_q \right) \\ \dot{x}_2 = -\dot{\omega}_m = -\frac{3p\psi_f}{2} i_q \end{cases} \quad (5)$$

定义 $z = \frac{di_q}{dt}$, $D = \frac{3p\psi_f}{2J}$, 对式 (5) 进行整理, 可得电机控制系统的状态空间表达式为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} z \quad (6)$$

定义滑模面函数为

$$s = cx_1 + x_2 \quad (7)$$

式中: c 为待设计参数, $c > 0$.

对式 (7) 两边求导后代入式 (6), 可得

$$\dot{s} = c \dot{x}_1 + \dot{x}_2 = cx_2 - Du$$

采用式 (2) 中的趋近律算法, 并结合式 (7), 可得控制器表达式为

$$u = \frac{1}{D} \left[kx_2 + \varepsilon |x_1| \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) + qs \right] \quad (8)$$

从而可得 q 轴的参考电流为

$$i_q^* = \frac{1}{D} \int_0^t \left[kx_2 + \varepsilon |x_1| \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) + qs \right] dt \quad (9)$$

为证明系统的稳定性, 根据滑模到达条件 $s \cdot \dot{s} < 0$, 定义 Lyapunov 函数为 $V(x) = s^2/2$, 并两侧求导, 将式 (2) 代入可推出

$$\dot{V} = s \dot{s} = -\varepsilon s |x_1| \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) - qs^2 \quad (10)$$

当 $s > 0$ 时, $\tanh(s) = 1$, $s \cdot \tanh(s) > 0$, $\dot{V} < 0$; 当 $s < 0$ 时, $\tanh(s) = -1$, $s \cdot \tanh(s) > 0$, $\dot{V} < 0$. 因此, 根据滑模到达条件 $\dot{V} = s \cdot \dot{s} < 0$, 验证本研究提出的趋近律可保证系统进入滑动模态时是渐进稳定的.

2 Luenberger 观测器构建及位置估计

2.1 Luenberger 观测器的构建

为实现 PMSM 的无感控制策略, 保证系统的稳定性, 选取具有线性结构的 Luenberger 观测器. 相较于常用的滑模观测器, Luenberger 观测器估算精度高, 跟踪性能和动态性能都更好^[10-11].

根据 Luenberger 观测器位置估计策略, 可得观测器的轴状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A \hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C \hat{x} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\hat{x} = [\hat{i}_d \ \hat{i}_q \ -\hat{e}_d \ -\hat{e}_q]$ 为状态向量; $u = [\hat{u}_d \ \hat{u}_q]$ 为输入向量; $\hat{y} = [\hat{i}_d \ \hat{i}_q]$ 为输出向量; A 、 B 、 C 分别为状态空间矩阵、输入矩阵和输出矩阵的系数; L 为反馈增益矩阵.

根据永磁同步电机的数学模型, 构建 Luenberger 状态观测器模型, 其表达式为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{r_s}{L_s}\hat{i}_\alpha - \frac{\hat{e}_\alpha}{L_s} + \frac{u_\alpha}{L_s} + K_1(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{r_s}{L_s}\hat{i}_\beta - \frac{\hat{e}_\beta}{L_s} + \frac{u_\beta}{L_s} + K_1(\hat{i}_\beta - i_\beta) \\ \frac{d\hat{e}_\alpha}{dt} = p\omega_r\hat{e}_\beta + K_2(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \frac{d\hat{e}_\beta}{dt} = -p\omega_r\hat{e}_\alpha + K_2(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (12)$$

式中： \hat{e}_α 和 \hat{e}_β 为 $\alpha\beta$ 轴反电动势的估计值； \hat{i}_α 和 \hat{i}_β 为 $\alpha\beta$ 轴电流的估计值； K_1 和 K_2 为龙伯格观测器的增益值。

2.2 转子位置角及速度估算

反电动势中存在高次谐波和噪声,传统多采用反正切方法对转子位置角和转速进行估算.此方法由于查询反正切值容易产生计算噪声,从而观测值误差被放大,使转子位置的估计值远偏离正常值.锁相环使用积分、高通滤波以及归一化处理电角度,使获得的角度变量没有耦合,在设计合理的环路参数后,可获得更为精准的转子信息^[12].

Luenberger 观测器输出估算反电动势,反电动势中包含电机的转子与转速信息. α 和 β 轴的反电动势取差值得出转子位置角误差,再经过 PI 控制器可获得电转速信号,经过积分环节后可获得转子位置信号,锁相环原理如图 3 所示.

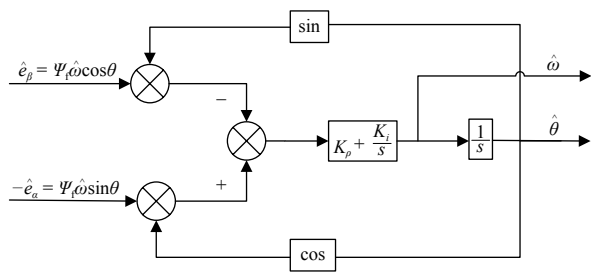


图 3 锁相环原理图

Fig. 3 Schematic diagram of phase-locked loop

3 仿真结果与分析

为验证 SMC 转速环与 Luenberger 观测器相结合的无传感器调速系统的性能,通过 Matlab/Simulink 将该算法应用于 PMSM 的无传感器调速控制进行仿真,如图 4 所示.分别对 Luenberger 观测器结合 PI 转速环和新型趋近律 T-SMC 转速环进行仿真对比分析,验证本研究策略的有效性.PMSM 主要参数见表 1.

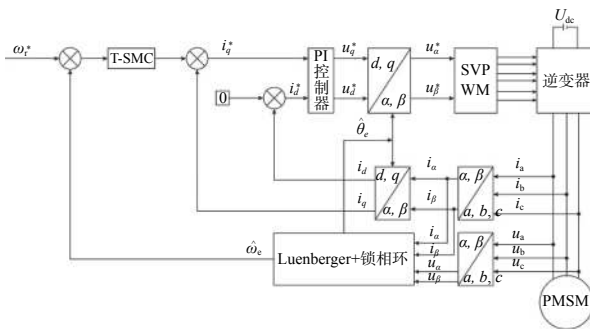


图 4 系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of system

表 1 PMSM 参数表

Table 1 Table of PMSM parameters

参数	取值
极对数 p	4
阻尼系数 B	0.000 1
定子电阻 R/Ω	2.875
定子电感 L_s/mH	0.008 5
永磁体磁链 φ_f/Wb	0.175
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.001

PMSM 以给定转速 1 000 r/min 空载启动,在 0.25 s 后加载 $2\text{N} \cdot \text{m}$ 的负载. Luenberger 观测器结合 PI 转速环的转速动态响应如图 5 所示. Luenberger 观测器结合新型趋近律滑模转速环的转速动态响应如图 6 所示.二者转速误差曲线如图 7 和图 8 所示.两类转速环性能对比见表 2.

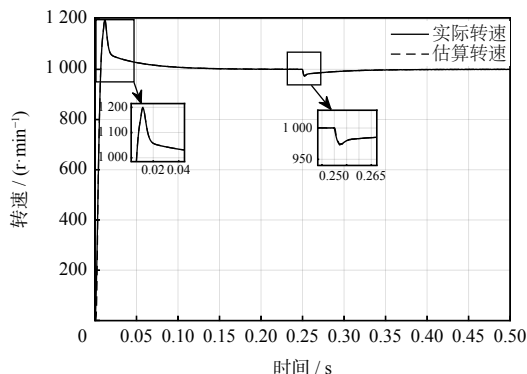


图 5 Luenberger+PI 转速环下的转速曲线

Fig. 5 Speed curve under Luenberger + PI speed loop

通过表 2 可以看出,启动阶段采用 Luenberger 观测器结合 T-SMC 转速环的系统调节时间更短,能更快趋近稳定状态,超调量相较于 PI 转速环降

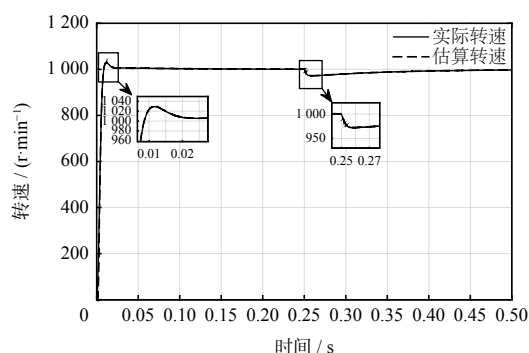


图 6 Luenberger+T-SMC 转速环下的转速曲线

Fig. 6 Speed curve under Luenberger + T-SMC speed loop

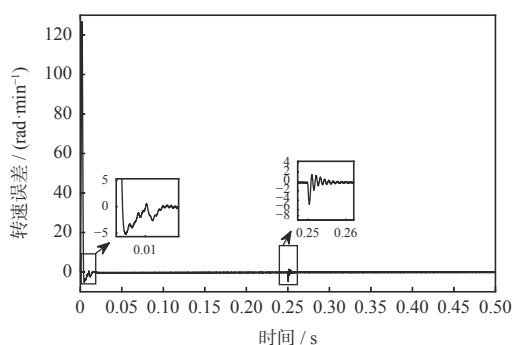


图 7 Luenberger+PI 转速环转速误差

Fig. 7 Luenberger observer and speed PI speed difference

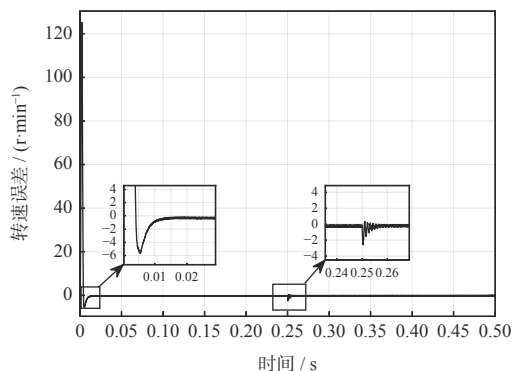


图 8 Luenberger+T-SMC 转速环转速误差

Fig. 8 Luenberger observer and T-SMC speed difference

表 2 性能对比

Table 2 Performance comparison

性能指标	条件设置	PI转速环/%	T-SMC转速环/%
超调量	空载启动	19.967	2.968
	突加负载	5.326	2.687

低 17%; 突加负载阶段, 超调量由 5.326% 下降至 2.687%。从图 7 和图 8 可以看出, 采用 T-SMC 转速环的转速差在启动阶段及突加负载阶段的抖动及跟踪效果更加显著, 在 0.015 s 后转速差趋于

0 且无抖动, 跟踪性能良好; 在突加负载后, 波动范围为 $-2.2 \sim 0.2$, 明显小于 PI 转速环下的波动, 可见 Luenberger 观测器的估算转速与实际转速的跟踪性能明显上升。

4 结 语

不同于传统 PI 转速环或者传统趋近律的滑模转速环, 本研究所采用的新型趋近律结合 Luenberger 观测器的无感控制方式, 估算转速与实际转速跟踪效果更显著, 超调量及快速性得到更好地改进, 对于外界干扰的抑制能力也有所提高。仿真结果表明, 将 T-SMC 转速环与 Luenberger 观测器结合的无感控制应用于矢量控制的 PMSM 调速系统, 其效果得到有效改善。该方式不仅改善了系统的鲁棒性, 也能保证调速系统的动态性能。

参考文献:

[1] KIVANC O C, OZTURK S B. Sensorless PMSM drive based on stator feedforward voltage estimation improved with MRAS multi-parameter estimation [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(3): 1326 - 1337.

[2] ZHANG X N, FOO G H B. A constant switching frequency-based direct torque control method for interior permanent-magnet synchronous motor drives [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(3): 1445 - 1456.

[3] 王毅波, 曹宽, 李彪. 一种改进型指数趋近律的永磁同步电机滑模控制 [J]. *微电机*, 2019, 52(12): 81 - 84, 106.

[4] 郭磊磊, 王华清, 代林旺, 等. 基于超螺旋滑模观测器的永磁同步电机无速度传感器控制方法 [J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(2): 21 - 31, 34.

[5] 苗敬利, 张宇航, 秦王毓. 基于超螺旋算法的永磁同步电机无传感器控制策略 [J]. *现代电子技术*, 2020, 43(17): 162 - 165, 170.

[6] 王要强, 朱亚昌, 冯玉涛, 等. 永磁同步电机新型趋近律滑模控制策略 [J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(1): 192 - 198.

[7] 苗敬利, 周重霞, 郑大伟. 永磁同步电机调速系统变指数趋近律控制 [J]. *电气传动*, 2019, 49(11): 18 - 21.

[8] 苗敬利, 郑大伟, 周重霞. 基于混合滑模控制器和反正切观测器的 SPMSM 直接转矩控制 [J]. *控制与决策*, 2019, 34(9): 1831 - 1839.

[9] 罗雯, 赵峰, 高锋阳, 等. 基于新型指数趋近率和转子位置观测器的PMSM积分滑模控制 [J]. 电测与仪表, 2021, 58(1): 172 - 176.

[10] 董力维. 电动汽车电机无传感器稳定性控制研究 [J]. 计算机仿真, 2017, 34(5): 182 - 186.

[11] 苑国锋, 牛泽农, 郑春雨, 等. 一种低载波比下内埋式永磁同步电机离散龙贝格观测器 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 236 - 244.

[12] 刘细平, 丁卫中, 袁长征, 等. 空调压缩机低速无位置传感器控制策略 [J]. 电气传动, 2021, 51(2): 3 - 8.

(编辑: 韩琳)

《上海工程技术大学学报》致谢审稿人

2021 年学报在各位编委、审稿专家、作者的支持和帮助下稳步前行, 出版工作得以顺利完成。尤其以下审稿专家 (排名不分先后) 给予的审读把关为学报质量提供了保障, 学报编辑部对您的辛勤工作致以最诚挚的谢意! 并向参与学报本年度出版工作的编委、专家、作者表达衷心的感谢! 谨祝大家身体健康, 万事如意!

- | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 艾 岭 | 黄泽宇 | 赖磊捷 | 来 鑫 | 刘新田 | 丁小兵 | 温利民 | 戴宏钦 | 朱雪春 | 茅 健 | 彭乐乐 |
| 徐 洋 | 张培磊 | 王秀梅 | 蔡昌春 | 张爱华 | 刘锡建 | 华志强 | 黄晓明 | 陈观慈 | 杜云慧 | 曾维理 |
| 沈振萍 | 骆顺华 | 杨明歌 | 陈俣秀 | 文永蓬 | 程 腾 | 孙丽伟 | 张勇军 | 吴国清 | 李声慈 | 王 丰 |
| 罗文斌 | 李期斌 | 叶 欣 | 曹双华 | 陈 飞 | 董万鹏 | 崔亚楠 | 邢海波 | 李静斌 | 孙艺瑕 | 冯青松 |
| 朱 颖 | 陈启军 | 张道英 | 张 丽 | 郭丽丽 | 陈艳波 | 金晓怡 | 杨 明 | 艾 蔚 | 龚红英 | 黄 双 |
| 朱 琳 | 徐旭松 | 张朝磊 | 黄 惠 | 韩善灵 | 叶 筱 | 王建萍 | 夏志杰 | 刘欣荣 | 李满宏 | 杨湘浩 |
| 段学超 | 阳 方 | 林 棻 | 孟 飞 | 文泽军 | 沈 波 | 刘意春 | 田国峰 | 陈 帅 | 刘 翔 | 何清波 |
| 王志军 | 高 双 | 陈国清 | 吴长水 | 庄异凡 | 孟秋风 | 庄新村 | 邱明丰 | 马英一 | 徐 丽 | 魏丽英 |
| 赵淑玲 | 黄立梁 | 徐建民 | 陈国栋 | 黄世泽 | 张新荣 | 王 平 | 许 彬 | 姜立春 | 汪 涛 | 刘喜正 |
| 游晓明 | 苏圣超 | 李红艳 | 郑元生 | 关文玲 | 姚红光 | 郑 鹏 | 马 芳 | 张均富 | 王 奋 | 唐林俊 |
| 陈月辉 | 石丽娜 | 杨晚生 | 马春伟 | 李名尧 | 李培生 | 胡心彬 | 于 森 | 冯美卿 | 彭必友 | 王 飞 |
| 李祥立 | 张楠楠 | 吴 浩 | 罗 冰 | 蒋志强 | 范君晖 | 赵文祥 | 许允斗 | 张学工 | 杨龙滨 | 王 驰 |
| 吴凤江 | 张立强 | 李海梅 | 林东海 | 郑树彬 | 程维明 | 左言言 | 张建业 | 赵现朝 | 陈巧玉 | 蒋扇英 |
| 杨 方 | 赵美云 | 汤 波 | 李志伟 | 陈东良 | 赵晋斌 | 陈 志 | 刘东尧 | 袁建辉 | 余 烨 | 杨文东 |
| 李泽鹏 | 叶巍翔 | 王宇嘉 | 李铸国 | 邢彦锋 | 娄帅锋 | 仇中柱 | 耿中元 | 周志峰 | 赵 晖 | 李立清 |
| 万爱兰 | 范青生 | 李明星 | 刘小君 | 时 瑾 | 江振林 | 陈卫刚 | 袁臣虎 | 吕爱凤 | 刘超峰 | 张西超 |
| 丁卫平 | 张恒运 | 林璧属 | 陈 强 | 魏丽丽 | 包 斌 | 陈淑梅 | 郝 勇 | 苗大纲 | 邓三鸿 | 谢旅荣 |
| 尹立孟 | 马大柱 | 王 骞 | 葛凤华 | 李家强 | 王 欣 | 马明辉 | 魏 鹏 | 陈国祥 | 伍 歆 | 张如全 |
| 陈祥恩 | 芮一川 | 马丽凤 | 杨 昆 | 张维娜 | 沈 骏 | 林俊亭 | 陈 蓓 | 周军莉 | 李卓然 | 吴 飞 |
| 吴建宝 | 周春晖 | 向道辉 | 孙龙飞 | 苏龙兴 | 李 伟 | 孙彦刚 | 刘 峥 | 龚元明 | 张 安 | 范平清 |
| 吴 忠 | 李巧茹 | 杨大章 | 李 文 | 秦 骥 | 蔡 琴 | 卜云飞 | 王 刚 | 曹增强 | 王孝兰 | 傅云斌 |
| 缪旭红 | 任洪娟 | 刘 芳 | 杨晓峰 | 徐 斌 | 姜 雨 | 孙建文 | 宋光雄 | 毛东森 | 张 敏 | 冯德成 |
| 李 路 | 易建军 | 李爱平 | 刘伟军 | 林文辉 | 梁艳平 | 李再帏 | 薛松柏 | 袁芳英 | 卢晨晖 | 郭艳辉 |
| 陈卓明 | 徐 磊 | 魏云冰 | 杨 坤 | | | | | | | |