

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514625

高速大功率燃料电池空压机控制器研究^{*}

张 前^{1,2}, 陈广宇^{1,2}, 孙秀秀^{1,2}, 贾一帆^{1,2}, 张 建³

(1. 河北工业大学机械工程学院 天津 300401; 2. 天津市新能源汽车动力传动与安全技术重点实验室 天津 300401;
3. 天津市云驱科技有限公司 天津 300382)

摘 要:随着燃料电池系统向大功率方向发展,系统对空气供应能力和空压机驱动功率提出了更高要求。目前,行业内单堆燃料电池系统功率已超过 350 kW,进一步提高了空压机在高功率、高转速及宽速域稳定运行的控制要求。而传统电机控制策略在高速运行条件下存在转速估算精度下降、系统鲁棒性不足以及稳态精度难以保证等问题。为解决上述不足,设计并研制了一种面向高速大功率燃料电池空压机的电机控制器,并提出了一种新型宽速域自适应滑模观测器方法,在传统滑模观测器结构基础上,引入宽速域饱和函数;一方面利用其分段调控特性,实现平滑切换,有效抑制抖振,提高转速估算精度;另一方面依托其可变速边界层特性,根据电机转速及误差信息动态调整边界范围,从而优化高速下的系统稳态性能。控制器采用碳化硅功率模块构建三相逆变器,最大输出功率可达 80 kW,最高驱动转速 80 000 r/min,能够满足 200~500 kW 燃料电池系统的供气需求。搭建高速空压机实验平台,并与传统滑模观测器算法进行对比。结果表明,该控制器能够实现稳定可靠的电机驱动,特别是在高速工况下转速波动范围明显减小。在 80 000 r/min 工况下波动由 ± 150 r/min 降低至 ± 90 r/min,降幅约 40%,转速稳定性及估算精度显著提升,验证了所提方法的有效性。

关键词:无位置传感器控制;滑模观测器;永磁同步电动机;空压机;燃料电池

中图分类号: TP273 TH45 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470. 40

Research on the air compressor controller of high-speed and high-power fuel cell

Zhang Qian^{1,2}, Chen Guangyu^{1,2}, Sun Xiuxiu^{1,2}, Jia Yifan^{1,2}, Zhang Jian³

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Power Transmission and Safety Technology for New Energy Vehicles, Tianjin 300401, China;
3. Tianjin Cloud Drive Technology Co., Ltd., Tianjin 300382, China)

Abstract: As fuel cell systems evolve towards the higher power outputs, higher requirements are imposed on air supply capacity and compressor driving power. At present, the power of a single-stack fuel cell system has exceeded 350 kW, which further raises the control requirements of air compressors operating under high-power, high-speed, and wide-speed-range conditions. However, the conventional motor control strategies suffer from the reduced speed estimation accuracy, insufficient system robustness, and degraded steady-state performance under the high-speed operation conditions. To address these issues, a motor controller of high-speed, high-power fuel cell air compressors is designed and developed, and an adaptive sliding mode observer with the novel wide-speed-range is proposed. Based on the traditional sliding mode observer structure, a wide-speed-range saturation function with variable boundary layer is introduced. On one hand, its piecewise regulation characteristics enable the smooth switching, effectively suppresses chattering and improving the speed estimation accuracy. On the other hand, its variable boundary layer allows the dynamic adjustment according to motor speed and estimation error, thereby enhancing the steady-state performance under high-speed conditions. As a result, the proposed method effectively improves the speed estimation accuracy under the high-speed operation and enhances the steady-state performance. The controller employs the silicon carbide power modules to construct a three-phase inverter with a maximum output power of 80 kW and a maximum speed of 80 000 r/min, which can meet the air supply requirements of 200~500 kW fuel cell systems. A high-speed air compressor experimental platform is

收稿日期: 2025-10-28 Received Date: 2025-10-28

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4004200)项目资助

constructed and compared with the traditional sliding mode observer algorithm. The results show that the controller can achieve stable and reliable motor drive, whose speed fluctuation range is significantly reduced under the high-speed operating conditions. The speed fluctuation at 80 000 r/min is decreased from ± 150 r/min to ± 90 r/min with a reduction rate of approximately 40%, which significantly improves the speed stability and estimation accuracy, thus verifying the effectiveness of the proposed method.

Keywords: sensorless control; sliding mode observer; permanent magnet synchronous motor; air compressor; fuel cell

0 引言

质子交换膜燃料电池是一种利用空气中的氧气和氢气在催化剂的作用下进行电化学反应的发电装置^[1-2]。在国家对绿色新能源大力支持的背景下,车用燃料电池系统的研发取得了显著突破。随着系统向高效化与集成化的不断升级,其所依赖的空压机性能瓶颈愈发凸显,成为当前研究中的关键问题之一^[3]。燃料电池的空压机通常采用超高速永磁电机作为动力,驱动叶轮旋转做功,为氢燃料电池输送特定压力流量的洁净空气^[4]。

国内外学者对燃料电池系统进行了充分的研究。Walters 等^[5]针对 30 kW 车用氢燃料电池系统进行了开发。石晨旭等^[6]对 100 kW 燃料电池发动机进气系统建立了详细的被控对象模型,其中电堆的额定功率为 120 kW。张广孟等^[7]对 120 kW 氢燃料电池系统进行了设计与试验分析。同时,领先的燃料电池企业也加快了大功率燃料电池系统产品的研发。系统配套企业完成 200 kW 以上功率产品开发,单堆芯设计先进系统产品额定功率突破 350 kW,可充分满足多场景商用化应用需求^[8]。

氢燃料电池汽车要求燃料电池动力系统具有较宽的功率输出范围和稳定的工作状态,因此燃料电池通常通过堆叠方式组合,以满足特定的输出功率和电压需求^[9-10]。为了维持燃料电池堆的正常工作效率,空压机作为其中空气供给系统的重要部分,要具有更大的扭矩和转速,来保证燃料电池的稳定高效运行,这也对其控制器提出了更高的功率和转速控制要求。

无位置控制技术不依赖外部传感器,具有更高的转速控制能力^[11],在空压机控制中被广泛应用。在过去的研究中,已有多种永磁同步电动机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)无传感器磁场定向控制方案被提出并得到改进,例如采用龙伯格观测器^[12]、扩展卡尔曼滤波器^[13]和滑模观测器(sliding mode observer, SMO)^[14]等,用于估计中高速范围内的位置和速度值^[15]。SMO 算法因其鲁棒性强、响应速度快等优点在实际应用中最为普遍^[16]。SMO 的无传感器控制,在高速区间内运行时,SMO 需设置足够大的开关增益才能保证状态观测误差有效收敛,但是更高的开关增益会增加位置估计误差,从而引起抖动^[17-19]。

文献[20]改进的双幂次趋近律通过调整滑模增益可以在短小时内收敛至滑模面,且具有快速响应能力和抖振抑制能力。在文献[21]中介绍了一种基于指数函数选项的自适应滑模到达定律(adaptive sliding mode reaching law, ASMRL)。所提出的 ASMRL 可以抑制抖振,还可以通过融合系统状态变量和滑模表面的变化来减少到达时间。其中使用的分段调控逻辑有效的减少了抖振,也成为当前非常有效的方法之一。文献[22]设计了新型自适应快速幂次趋近律,通过引入与系统状态关联的自适应增益项,并采用光滑切换函数替代传统切换函数,既实现滑模面趋近速度的自适应调节,又有效抑制了抖振,显著减小转子位置估计误差,提升观测精度。上述实验测试仅针对额定转速最高为 3 000 r/min 的低功率场景,不足以支持其改进方法在高速高功率下还可以具有同等效果且能稳定运行。

为克服现有方法的不足,本文提出了一种改进的宽速域滑模观测算法(wide speed range SMO, WSA-SMO)。通过改进的宽速域饱和函数,显著减少了空压机在高转速下的抖振,且拓展了控制器的有效功率范围。实验结果表明,改进后的控制系统显著提升了空压机的性能,特别是在大功率应用场景中的稳定性和效率。

1 永磁同步电机数学模型

由于 PMSM 的转子是一个永磁体,并且具有恒定的磁通量,因此可以用定子电压表达式来分析 PMSM 的工作状态。PMSM 在忽略电机铁芯饱和、涡流和磁滞损耗等情况下,在此基础上,为了简化计算将三相电压方程等效变换为两相电压方程,表贴式永磁同步电机的电压方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_{\alpha} = R_s i_{\alpha} + L_s \frac{di_{\alpha}}{dt} + E_{\alpha} \\ u_{\beta} = R_s i_{\beta} + L_s \frac{di_{\beta}}{dt} + E_{\beta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{α} 、 u_{β} 为定子电压; i_{α} 、 i_{β} 为两相定子电流; R_s 、 L_s 分别为定子绕组的电阻和电感; E_{α} 、 E_{β} 为反电动势。

其中反电动势 E_{α} 、 E_{β} 分量还可表示为:

$$\begin{cases} E_{\alpha} = -\omega_r \psi_f \sin\theta_e \\ E_{\beta} = \omega_r \psi_f \cos\theta_e \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω_r 为电角速度; ψ_f 为电机磁链; θ_e 为电机转子位置。

为了方便使用电流对反电动势进行观测, 将式(1)的电压方程变换为电流的状态方程, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_\alpha + \frac{u_\alpha}{L_s} - \frac{E_\alpha}{L_s} \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_\beta + \frac{u_\beta}{L_s} - \frac{E_\beta}{L_s} \end{cases} \quad (3)$$

2 新型宽速域滑模观测算法设计

滑模控制在非线性的控制系统中有极强的收敛性和抗干扰性。在空压机的无位置控制中采用 SMO 提取转子位置和速度有很强的优势。SMO 的设计包括滑模面和趋近率两方面, 这两方面直接影响着收敛的速度和电机的抖动。传统的 SMO 选用单一的符号函数, 这在高转速下会出现明显抖动, 不适用于宽速域范围的调速, 只适用于受限速度区域^[23-24]。同时, 也很难在高速范围内保持稳定的运行。因此, 提出了一种随转速动态调整的变边界层饱和函数, 可以实现从低到超高速的稳定运行; 其分段的设计特性, 对比符号函数有明显的过度范围, 使得不仅是转速切换还是高转速运行都有极强的稳定性。

电机电压方程中的反电动势中包含有转子和速度信息, 因此依据式(3)重新构造电机定子电流状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\hat{i}_\alpha + \frac{u_\alpha}{L_s} - \text{sat}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\hat{i}_\beta + \frac{u_\beta}{L_s} - \text{sat}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\hat{i}_\alpha$ 、 $\hat{i}_\beta$ 是对应的电流观测值, 用于与 i_α 、 i_β 实际电流值进行区分。定义电流误差为:

$$\begin{cases} \bar{i}_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \bar{i}_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\bar{i}_\alpha$ 、 $\bar{i}_\beta$ 为电流误差分量。为简化表示, 令 $\bar{i}$ 表示电流误差变量, 即 $\bar{i} = \bar{i}_\alpha$ 或 $\bar{i}_\beta$ 。sat($\bar{i}$) 就是所构建的边界层饱和函数, 用来取代传统的符号函数 sign($\bar{i}$)。

在 SMO 中设计合适的趋近函数可以明显的减小波动误差, 使电机在更高转速下平稳运行。sat($\bar{i}$) 具体的形式为:

$$\text{sat}(\bar{i}) =$$

$$\begin{cases} k\omega_r, & \bar{i} > \varepsilon\omega_r \\ k\omega_r \left(\sin\left(\frac{\pi}{2\varepsilon\omega_r}\bar{i}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \right), & 0 \leq \bar{i} < \varepsilon\omega_r \\ k\omega_r \left(\sin\left(\frac{\pi}{2\varepsilon\omega_r}\bar{i}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \right), & -\varepsilon\omega_r < \bar{i} < 0 \\ -k\omega_r, & \bar{i} < -\varepsilon\omega_r \end{cases} \quad (6)$$

式中: k 为边界层增益常数; ε 为电流误差估计的敏感因数, 其取值可由定子绕组最大电流的波动幅值确定。

根据式(6), 边界层宽度随转速变化, 转速升高时边界层扩展, 从而提高高速时的最大占空比调整能力。

根据式(3)~(5), 电流观测值和电流实际值的误差表达式可定义为:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\bar{i}_\alpha + \frac{E_\alpha}{L_s} - \text{sat}(\bar{i}_\alpha) \\ \frac{d\bar{i}_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\bar{i}_\beta + \frac{E_\beta}{L_s} - \text{sat}(\bar{i}_\beta) \end{cases} \quad (7)$$

通过电流误差构建滑模面如式(8)所示。

$$S_n = \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

当观测值 $\hat{i}_\alpha$ 和 $\hat{i}_\beta$ 分别趋近于 i_α 和 i_β 时, 滑模面 S_n 趋近于 0, 此时观测器对系统参数和外部干扰具有鲁棒性。

同时可使用 sat($\bar{i}$) 算得反电动势。

为了验证所构造的滑模面的稳定性, 使用李雅普诺夫稳定性理论对滑模面进行验证。对于 PMSM 的无位置传感器控制, 用于确定滑模条件稳定的李雅普诺夫函数通常可以定义为:

$$V = \frac{1}{2} S_n^T S_n \quad (9)$$

根据李雅普诺夫稳定性定理, 可以推导出滑模稳定的条件, 当 $V > 0$ 并且 $\dot{V} < 0$ 会满足稳定性要求。将式(9)展开, 显然 $V > 0$, 所以只需要验证 $\dot{V} < 0$ 即可。因此可得到式(10):

$$\dot{V} = [\bar{i}_\alpha \quad \bar{i}_\beta] \begin{bmatrix} \dot{\bar{i}}_\alpha \\ \dot{\bar{i}}_\beta \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

将式(7)代入式(10), 并进一步整理可得到式(11)。

$$\dot{V} = [\bar{i}_\alpha \quad \bar{i}_\beta] \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s}\bar{i}_\alpha + \frac{E_\alpha}{L_s} - \text{sat}(\bar{i}_\alpha) \\ -\frac{R_s}{L_s}\bar{i}_\beta + \frac{E_\beta}{L_s} - \text{sat}(\bar{i}_\beta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(11)展开如式(12)所示。

$$\dot{V} = \left[-\frac{R_s}{L_s}\bar{i}_\alpha^2 - \frac{R_s}{L_s}\bar{i}_\beta^2 \right] + \left[\frac{1}{L_s}E_\alpha\bar{i}_\alpha - \bar{i}_\alpha\text{sat}(\bar{i}_\alpha) + \frac{1}{L_s}E_\beta\bar{i}_\beta - \bar{i}_\beta\text{sat}(\bar{i}_\beta) \right] \quad (12)$$

第 1 项显然小于 0, 所以当 k 满足一定条件使得第 2 项也小于 0 即可满足稳定性定理。

因此 k 满足以下最大值函数关系, 其数学表达如式(13)所示。

$$k \geq \max(|E_\alpha|, |E_\beta|) \quad (13)$$

可以看出无论 sat($\bar{i}$) 中 $-\varepsilon\omega_r < \bar{i} < \varepsilon\omega_r$ 或者 $-\varepsilon\omega_r > \bar{i}$, $\bar{i} > \varepsilon\omega_r$ 都可以容易得到 $\dot{V} < 0$, 所以设计的观

测器的稳定性可以得到保证。

传统 SMO 使用的切换函数 $\text{sign}(\bar{i})$ 如图 1 所示。 $\text{sign}(\bar{i})$ 边界区域的不连续性切换会产生抖动,在高转速下尤为明显,即使一个微小的电流误差在其作用下也会被急剧放大,从而导致转速和位置观测不准,给电机控制造成影响。图 2 展示了 3 种转速下饱和函数的不同边界范围。通过可变增益 $k\omega_r$,在不同转速自适应调整边界层宽度,提升了算法在高速下的稳定观测能力,同时增强了转速切换过程中的系统稳定性。在高转速下有更优异的控制性能。

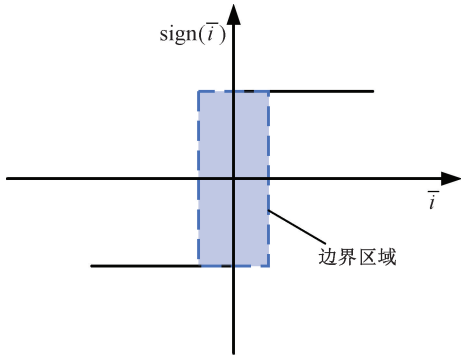


图 1 传统的符号函数
Fig. 1 Traditional sign function

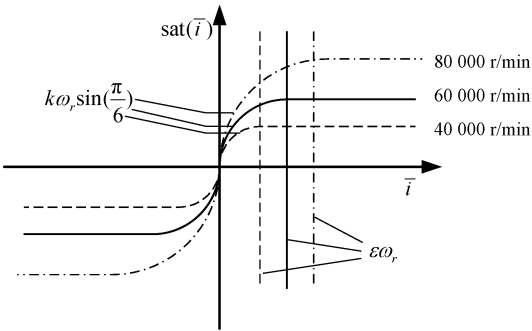


图 2 不同转速下的边界层饱和函数
Fig. 2 Boundary saturation function at different rotational speeds

图 3 为电机转速和转子位置的详细计算流程。构建宽速域滑模观测器后,向其中输入电压 u_α, u_β 。使用观测器公式计算估计电流 $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$ 再和实际采样的 i_α, i_β 计算误差后输入到饱和函数,当电流误差越来越小时,观测到的反电动势也会更加精确。然而,离散的计算过程和高频率的信号切换会加剧反电动势信号中的高频噪声,导致转速和转子位置波动较大。因此,还要使用低通滤波器 (low-pass filter, LPF) 滤去高频干扰,再计算出电机速度和转子位置。因此,本研究将设计的边界层饱和函数

与 LPF 相结合形成新型 WSA-SMO,可以在 10 000 ~ 80 000 r/min 的速度范围,获取稳定的电机转速和转子位置。

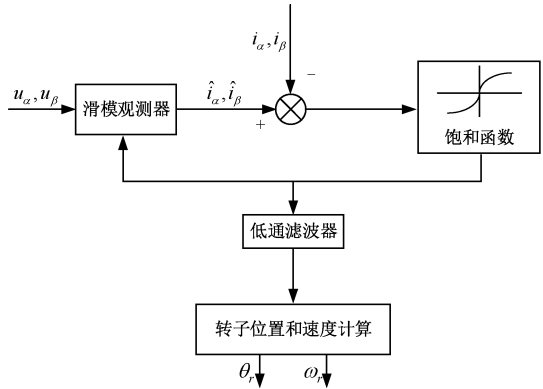


图 3 电机转速和转子位置的计算流程
Fig. 3 Flowchart of calculating motor speed and rotor position

3 控制器的设计

3.1 硬件设计

半导体碳化硅 (silicon carbide, SiC) 模组在控制器上用作功率开关,可以实现更高的开关频率且具备更低的开关损耗。在不同种类的开关器件中展现了优异的性能。图 4 为电机控制器的三维模型,采用一体化设计,将所需的控制板和驱动板等都封装在壳体内部,外部只保留直流、三相电流、外部通讯接口以及散热的水循环接口。图 5 可以更清晰的查看内部结构,图 5(a) 左侧为控制板,右侧为驱动板,图 5(b) 展示了底层 SiC 模组的连接。控制板采用 TI 公司的 TMS320F28335 芯片作为主运算单元来读取数据并执行无位置传感器控制算法,产生脉冲宽度调制 (pulse-width modulation, PWM) 信号控制开关,还负责和燃料电池系统的其他部分进行数据交互。驱动板负责驱动 SiC 模组同时隔离电源和控制电路。此外,电磁干扰滤波板的设计可以抑制高频开关产生的电磁干扰,保障系统电磁兼容性。

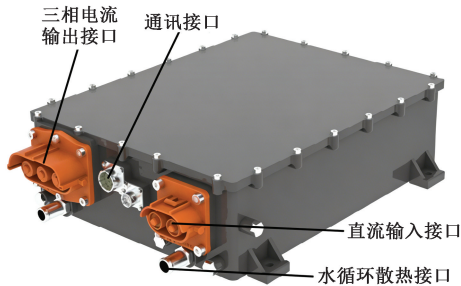


图 4 控制器的三维模型
Fig. 4 Three-dimensional model of the controller

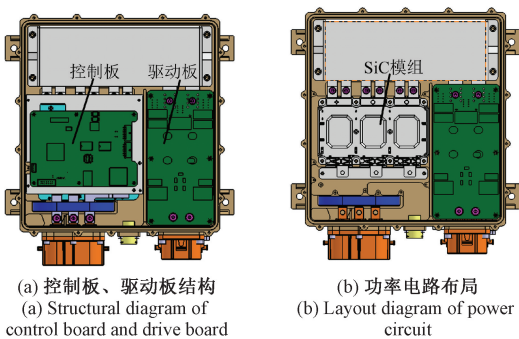


图 5 控制器内部结构

Fig.5 Internal structure of the controller

该控制器的主要参数如表 1 所示。

表 1 控制器的参数

Table 1 Parameters of the drive

参数	单位	数值
最大功率	kW	80
额定电压	V	700
最大相电流	A	200
整机重量	kg	10
直流电压工作范围	V	600~800
效率	%	98
动态响应	s	2
最高控制电机转速	r/min	80 000
开关频率	kHz	10~30

除了所需的器件外,为了保证控制器在高功率高转速下持续运行一段时间,控制器还额外设计了大面积的水循环散热系统,结构如图 6(a) 所示。图 6(b) 的流体仿真图展示了液体在控制器内不同区域的流速状态,在深色(高流速)区域周边布置 SiC 模组,有利于强化局部散热能力,及时带走器件产生的热量,避免局部过热,从而保证系统的稳定运行。

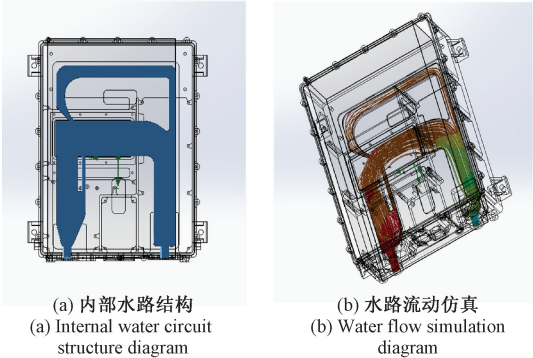


图 6 控制器散热流体仿真

Fig.6 The thermal fluid simulation of the controller

3.2 控制系统程序设计

图 7 为无传感器速度控制的框图,其中 WSA-SMO 模块表示用于估计转子位置的滑模观测器。为了控制空压机,控制器内部主控芯片的模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 模块采集输出电流和母线电压,之后将采集的三相电流坐标变换为矢量控制中的 $d-q$ 同步旋转坐标系下的电流值。使用七段式空间矢量脉宽调制 (space vector PWM, SVPWM) 和采集到的母线电压进行调制,产生 6 路 PWM 控制逆变器,并传递至电机定子,如图 7 所示。需注意,SVPWM 具有更高的开关速度和更低的开关损耗。利用输入转速与估计速度的误差,实现比例-积分 (proportional-integral, PI) 控制,PI 控制同时用于电流控制。 q 轴电压采用串联 PI, d 轴电压采用 $id=0$ 的 PI 控制^[25],这在表贴式的空压机中,可以保证有最高的效率。WSA-SMO 模块采用设计的 $\text{sat}(\bar{i})$ 函数作为切换函数,通过反电动势估计转子角度以及转速。

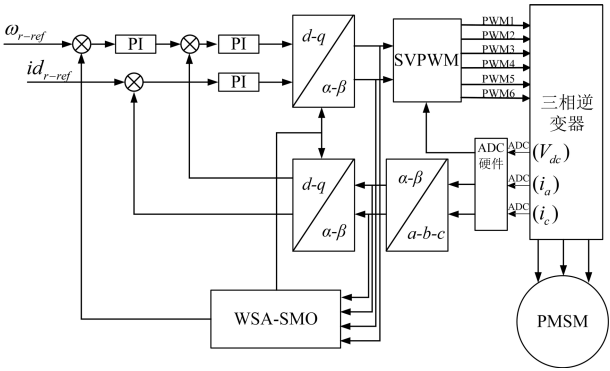


图 7 控制系统原理

Fig.7 Schematic diagram of the control system

为了保证整套开发系统所需的外设配置、算法实现、算法封装、用户应用等功能的实现。在嵌入式软件开发过程中,将程序分成应用层、接口层、中间层以及驱动层,图 8 为整体系统软件架构,应用层采用 NI 公司的 Labview 进行编写与控制器通过控制器局域网总线进行通讯,中间层和驱动层的算法使用 C 语言编写留出接口供应用层使用。中间层为主要的核心算法,驱动层则基于 TI 的驱动库对部分初始化函数进行定制修改,最终组成完整的系统架构。这种操作可以降低系统软件复杂度和依赖关系、同时有利于标准化,便于管理各层程序。

4 实验设计

建立一个实验平台来验证所提出的方案的实际性能。图 9 中包括可在不同转速下工作的控制器,更清晰的控制器见图 10,温度检测器可以获得设备不同位置的实时温度,示波器获取空压机的电流波形,可以观测电机

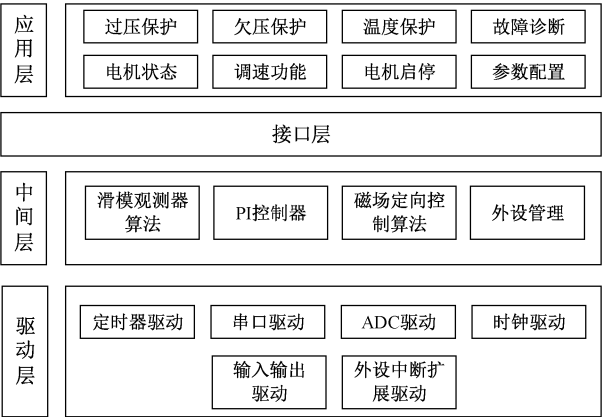


图 8 系统软件架构

Fig. 8 System software architecture diagram

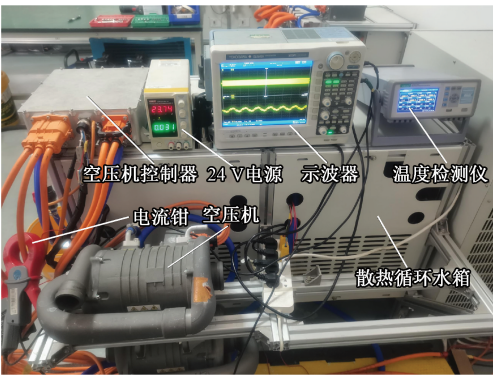


图 9 空压机试验台

Fig. 9 Air compressor test bench

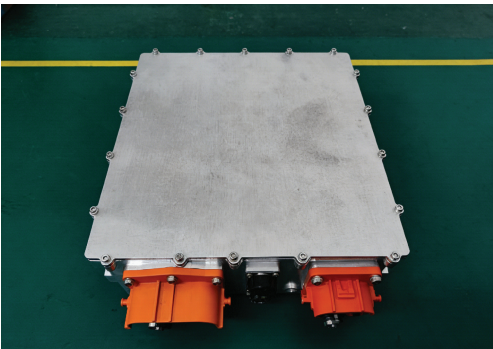


图 10 内置 WSA-SMO 算法的空压机控制器

Fig. 10 Air compressor controller with embedded WSA-SMO algorithm

转动的平稳程度。控制器的输入由大功率可调直流电源提供,内部控制板则需要 24 V 电源进行供电。实验平台还包括水冷散热的水箱和操控对象空压机。

所使用的空压机如图 11 所示,其主体为永磁同步电机,最高转速为 80 000 r/min,最大功率为 80 kW,可以支

持 200~500 kW 的燃料电池堆,绕组采用星形连接方式,具体参数见表 2。空压机通过旋转的叶轮吸入气体,在叶轮上方形成真空,完成一系列连续空气压缩的操作。

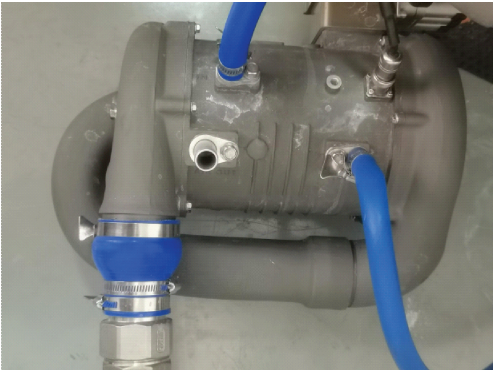


图 11 大功率燃料电池空压机实物

Fig. 11 Physical photo of high-power fuel cell air compressor

表 2 空压机参数表

Table 2 The parameters of the air compressor

参数	单位	数值
最大转速	r/min	80 000
最大功率	kW	80
最大电压	V	750
最大相电流	A	200
极对数		1

为了更加清晰的展示 WSA-SMO 的实际性能,和传统 SMO 在电流波形上进行对比,直流供电全部为 700 V。图 12~14 分别给出了空压机在 40 000、60 000 和 80 000 r/min 转速下的两相电流波形 i_a 、 i_b 。

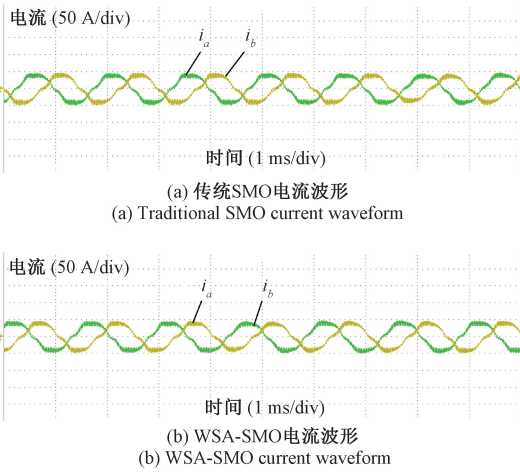


图 12 40 000 r/min 时的空压机电流波形

Fig. 12 Current waveforms of the air compressor at 40 000 r/min

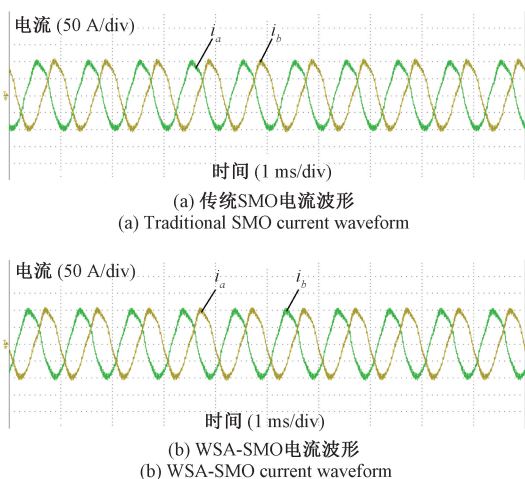


图13 60 000 r/min时的空压机电流波形

Fig. 13 Current waveforms of the air compressor at 60 000 r/min

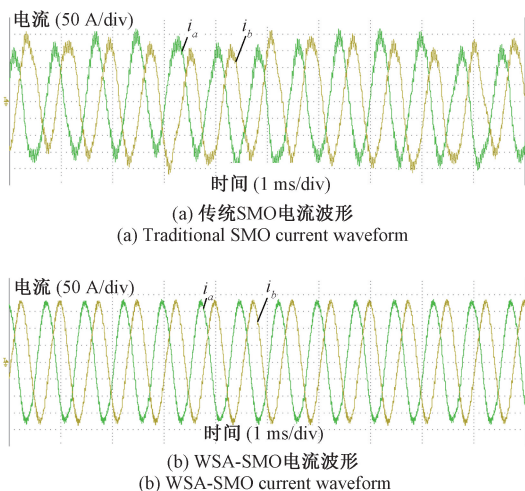


图14 80 000 r/min时的空压机电流波形

Fig. 14 Current waveforms of the air compressor at 80 000 r/min

在40 000 r/min时直流电源功率为7 kW。通过电流波形分析,如图12(a)和(b)所示,传统SMO和WSA-SMO的电流波形差异较小,并且由于电流较小且转速较低电流波形和正弦有部分差异。转速为60 000 r/min时,功率为24 kW。从图13(a)和(b)可见,传统SMO的电流波形和WSA-SMO依旧没有明显差异,只是随着转速提高电流增大,电流波形更加趋近于正弦。当两者都增加并保持在80 000 r/min时,功率达到最大功率80 kW,相电流幅值约为180 A。二者的电流波形对比如图14(a)和(b)所示,可以看出传统SMO的电流波形谐波加剧同时幅值不稳,WSA-SMO的电流波形仍然平稳且趋近于正弦,侧面证明了新算法有良好的稳态性能及转

速估计能力。波形对比也证明了WSA-SMO算法在更高转速下比传统SMO具有更好的性能。

随后,为了验证WSA-SMO在转速以及转子位置估计方面优异的性能,在程序中定义一个数组将转速和转子位置存入内存中,间隔33.3 μs 记录一次,即一个PWM周期一次,在电机转速稳定后读取10 000 μs 时间长度的数据。

读取电机转速数据后,进行数据处理,记录整体数据的中位数、均值以及最大最小值,以箱型图的方式展示。通过核密度曲线统计不同转速范围的转速数量分布,以曲线方式展示转速的集中程度。还通过抖动点图展示了10 000 μs 时间中的异常点分布。最后,将读取的WSA-SMO和传统SMO电机转速、转子位置分别进行比较。

图15对比了两种算法在40 000 r/min目标范围内的转速分布范围。从箱形图可以看出,WSA-SMO和传统SMO的转速波动范围差距很小,并且均值(箱型图中的五角星)和中位数(箱型图的横线)相近。核密度曲线展示,传统SMO的数据分布和WSA-SMO的都呈现对称分布(峰值在40 000 r/min附近)证明其在低速40 000 r/min有相同的控制性能(图15,背景曲线)。此外,抖动点表明,在40 000 r/min时,WSA-SMO和传统SMO数据都比较集中只有少量离群点(图15,散点部分)。在转子位置图16上可以看出二者的位置估计几乎一致,都呈现直线状态(右上角局部放大图)。这些共同表明,WSA-SMO和传统SMO在40 000 r/min时都能保持良好的性能。

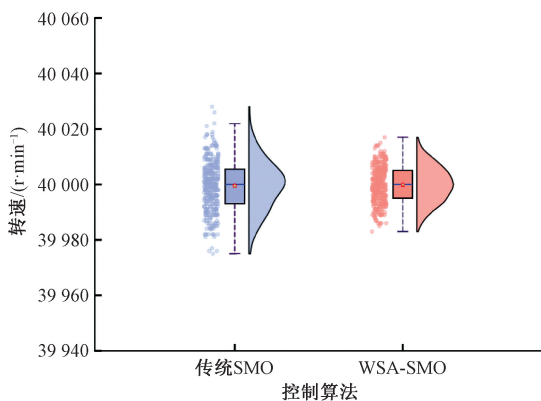


图15 40 000 r/min转速数据对比

Fig. 15 Data comparison diagram at 40 000 r/min

图17对比了转速增加到60 000 r/min时,目标范围内的转速波动分布。箱形图显示,WSA-SMO的转速范围和传统SMO基本相近,但WSA-SMO的转速分布更加集中。核密度曲线进一步表明,传统SMO的转速在60 000 r/min附近呈现较宽的分布,而WSA-SMO则表现出更加对称且集中的分布特性(图17,背景曲线)。此外,WSA-SMO的离群点数量相对较少,说明其在该工况下具有更好的稳定性(图17,散点部分)。

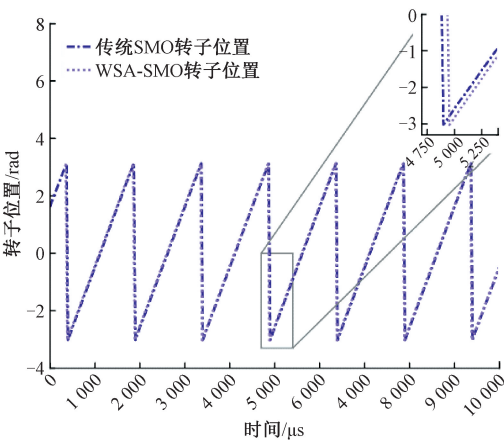


图 16 40 000 r/min 转子位置对比

Fig. 16 The comparison results of rotor position at 40 000 r/min

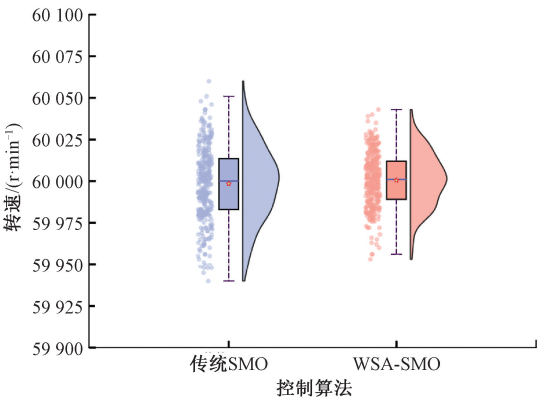


图 17 60 000 r/min 转速数据对比

Fig. 17 Data comparison diagram at 60 000 r/min

转子位置估计结果如图 18 所示。从整体来看,两种方法的转子位置估计结果基本一致。但局部放大结果表明,传统 SMO 的位置曲线出现轻微的畸变且有一定的波动,而 WSA-SMO 仍保持较好的线性特性,曲线更加平滑。

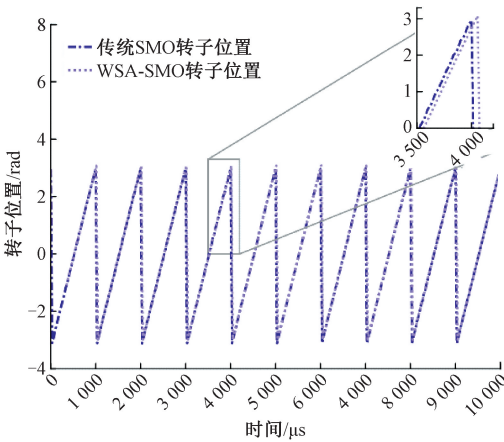


图 18 60 000 r/min 转子位置对比

Fig. 18 The comparison results of rotor position at 60 000 r/min

当转速进一步提高至 80 000 r/min 时,如图 19 所示,两种方法的性能差异更加明显。箱形图表明,WSA-SMO 的转速范围已经明显小于传统 SMO。核密度曲线可以看出,传统 SMO 和 WSA-SMO 的转速在 80 000 r/min 附近都呈现对称分布(图 19,背景曲线),但 WSA-SMO 在 80 000 r/min 转速的数量点明显更为集中。此外,抖动点展示了在 80 000 r/min 时,WSA-SMO 和传统 SMO 离群值在数量和大小上都有明显差异(图 19,散点部分)。

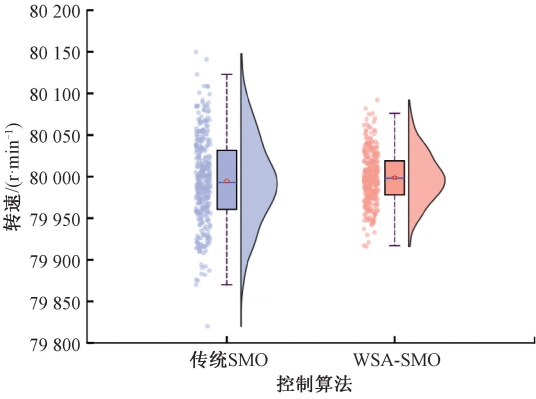


图 19 80 000 r/min 转速数据对比

Fig. 19 Data comparison diagram at 80 000 r/min

转子位置估计结果如图 20 所示。可以看出,在此转速工况下,两种方法的差异已较为明显,传统 SMO 的位置曲线出现明显畸变且幅值波动较大,而 WSA-SMO 基本保持线性变化特性,曲线仍较为平滑。由此表明,WSA-SMO 通过宽速域饱和函数的设计抑制了转速波动,使转速均匀分布在固定转速附近并且改善了转子位置的估计精度。

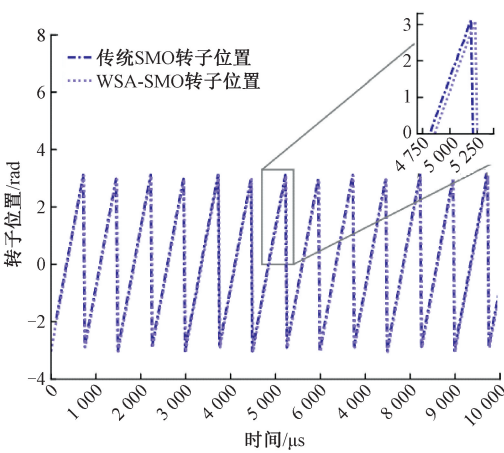


图 20 80 000 r/min 转子位置对比

Fig. 20 Rotor position comparison diagram at 80 000 r/min

综合以上分析,电机转速从 40 000 r/min 增加到 80 000 r/min,WSA-SMO 对比传统 SMO 在转速波动,电

流波形,以及转子位置估计上都有良好的性能,同时其在最高转速 80 000 r/min 运行时,控制器功率达到最大输出功率 80 kW,也证明了其在大功率下运行的效果。

5 结 论

本研究开发了一款基于 WSA-SMO 控制算法的大功率燃料电池空压机控制器。与传统的 SMO 不同,WSA-SMO 使用了可变边界层的宽速域饱和函数来代替符号函数。这一改进提高了控制器在宽速域范围内的适用性,并增强了转速估计精度与系统稳态性能。同时,增加了散热和抗电磁干扰等结构使控制器能承受更大的功率,分层架构设计使程序更加简洁。此外,通过实验测试平台,评估了控制器在 10 000~80 000 r/min 范围的运行效果并验证了其在最大输出功率下的性能。通过一系列电流波形图、转速稳态实验证明了所提出的 WSA-SMO 优于传统 SMO。对高速大功率燃料电池空压机控制器的研究具有较大参考价值。未来研究将进一步优化观测器的设计,致力于其在更宽速域工况下稳定可靠运行。

参考文献

- [1] SANG J, VENTURI M, BOCKSCH R, et al. NVH-challenges of air supply subsystems for automotive fuel cell applications [J]. SAE International Journal of Engines, 2009, 1(1): 258-266.
- [2] 罗刚,王永富,张化锴. 燃料电池空气系统的自适应模糊建模与控制[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 245-254.
LUO G, WANG Y F, ZHANG H K. Adaptive fuzzy modeling and control of fuel cell air system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 245-254.
- [3] 李龙,梁前超,何俊能,等. 车用燃料电池空压机性能预测研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(6): 22-25.
LI L, LIANG Q CH, HE J N, et al. Study on performance prediction of vehicle fuel cell air compressor[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(6): 22-25.
- [4] 张宏杰,花为,于雯斐,等. 氢燃料电池空压机用超高速永磁电机设计[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(11): 39-48.
ZHANG H J, HUA W, YU W F, et al. Design of ultra-high speed permanent magnet machine for hydrogen fuel cell air compressor[J]. Electric Machines and Control,

2022, 26(11): 39-48.

- [5] WALTERS M, WICK M, TINZ S, et al. Fuel cell system development: A strong influence on FCEV performance[J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2018, 7(3): 335-350.
- [6] 石晨旭,杜常清,王超,等. 车用大功率燃料电池发动机进气系统控制[J]. 汽车工程, 2023, 45(11): 2148-2156.
SHI CH X, DU CH Q, WANG CH, et al. Control of gas supply system of high power fuel cell engine for vehicle[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(11): 2148-2156.
- [7] 张广孟,李增山,任科轩,等. 120 kW 氢燃料电池系统设计与试验分析[J]. 高校化学工程学报, 2024, 38(5): 788-795.
ZHANG G M, LI Z SH, REN K X, et al. Design and experimental study of 120 kW hydrogen fuel cell system[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2024, 38(5): 788-795.
- [8] 焦道宽,何云堂,王佳,等. 中国氢燃料电池全产业链发展现状及创新趋势[J]. 电源技术, 2025, 49(11): 2192-2196.
JIAO D K, HE Y T, WANG J, et al. Development status and innovation trends of hydrogen fuel cell industry in China[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(11): 2192-2196.
- [9] 王克文,张晓平,周厚庆,等. 基于混合动力的氢燃料电池轨道车辆研究概述[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 50-59.
WANG K W, ZHANG X P, ZHOU H Q, et al. Overview of research on hydrogen fuel cell rail vehicles based on hybrid power[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2024, 45(9): 50-59.
- [10] 陈家一,高帷韬,贾璐,等. 燃料电池汽车动力系统及管理策略研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(1): 80-92.
CHEN J Y, GAO W T, JIA L, et al. Research progress on powertrain and energy management strategy of fuel cell vehicle[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(1): 80-92.
- [11] 夏长亮,叶梦婷. 高速电机无位置传感器控制关键技术与前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6991-7007.
XIA CH L, YE M T. Key technologies and prospects of high-speed motor sensorless control[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6991-7007.
- [12] BERNARD P, PRALY L. Estimation of position and resistance of a sensorless PMSM: A nonlinear luenberger

- approach for a nonobservable system[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2021, 66(2): 481-496.
- [13] XIAO L, ZHANG J L, XIE H R, et al. A novel speed estimation algorithm for a permanent magnet linear synchronous motor using an extended kalman filter with multiple fading factors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2024, 60(11): 1-5.
- [14] SHI S, WANG Y, MAI S P. Research on speed control of PMSM based on a new sliding mode reaching law of fast integral terminal sliding mode control with iterative-based high-gain disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(3): 4352-4363.
- [15] 于林鑫, 袁昕, 费连越. 基于改进准一型锁相环的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(9): 301-310.
- YU L X, YUAN X, FEI L Y. Sensorless control of PMSM using an improved quasi-type-1 phase-locked loop [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(9): 301-310.
- [16] 赵文祥, 宋世昌, 周书文, 等. 改进滑模观测器的电流源逆变器驱动 PMSM 无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 987-995.
- ZHAO W X, SONG SH CH, ZHOU SH W, et al. Sensorless control of current source inverter driven PMSM with improved sliding mode observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 987-995.
- [17] ZHANG Q, YANG D F, KONG Q Y, et al. A super-high-speed PM motor drive for centrifugal air compressor used in fuel cell unmanned aerial vehicle [J]. IET Electric Power Applications, 2023, 17(11): 1459-1468.
- [18] JUNEJO A K, XU W, MU CH X, et al. Adaptive speed control of PMSM drive system based a new sliding-mode reaching law [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12110-12121.
- [19] 姬娟娟, 崔彦良, 王开云. 基于锁相环的异步电机无速度传感器矢量控制[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 307-315.
- Ji J J, Cui Y L, Wang K Y. Sensorless vector control of induction motors based on phase-locked loop [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 307-315.
- [20] 郭昕, 黄守道, 彭昱, 等. 基于改进型双幂次趋近律与全局快速终端滑模观测器的 IPMSM 调速系统滑模控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 190-203.
- GUO X, HUANG SH D, PENG Y, et al. Sliding mode control for IPMSM speed regulation system based on an improved double power reaching law and global fast terminal sliding mode observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 190-203.
- [21] ZHANG ZH, YANG X D, WANG W Y, et al. Enhanced sliding mode control for PMSM speed drive systems using a novel adaptive sliding mode reaching law based on exponential function[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 11978-11988.
- [22] WANG D H, LI B Q, ZHAO Y Y. An adaptive SMO approach for low-chattering sensorless control of PMSM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(10): 15329-15338.
- [23] 张港, 高文根, 杭孟荀, 等. 基于改进 SMO 的永磁同步电机全速段位置估算研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 185-193.
- ZHANG G, GAO W G, HANG M X, et al. Research on position estimation of permanent magnet synchronous motor at full speed based on improved SMO[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 185-193.
- [24] WANG T Q, WANG B, YU Y, et al. High-order sliding-mode observer with adaptive gain for sensorless induction motor drives in the wide-speed range[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(11): 11055-11066.
- [25] 王龙达, 徐传芳, 鞠艳杰, 等. 永磁同步电机改进鲨鱼优化非线性自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 303-312.
- WANG L D, XU CH F, JU Y J, et al. Nonlinear auto disturbance rejection control via the improved shark smell optimization for permanent magnet synchronous motor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 303-312.

作者简介



张前, 分别在 2011 年和 2018 年于北京科技大学获得学士学位和博士学位, 现为河北工业大副教授, 主要研究方向为高速永磁无刷电机控制系统。

E-mail: zhangqian1988@hebut.edu.cn

Zhang Qian received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from University of Science and Technology Beijing in 2011 and 2018, respectively. He is currently an associate professor at Hebei University of Technology. His main research

interests include control systems for high-speed permanent magnet brushless motors.



孙秀秀(通信作者), 2011 年于山东理工大学获得学士学位, 2014 年于天津大学获得硕士学位, 2019 年于天津大学获得博士学位。现为河北工业大学副教授, 主要研究方向为超高密度燃料电池技术、燃料电池空压机结构优化与设计。

E-mail: 2019042@hebut.edu.cn

Sun Xiuxiu (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2011, her M. Sc. degree from Tianjin University in 2014, and her Ph. D. degree from Tianjin University in 2019. She is currently an associate professor at Hebei University of Technology. Her

main research interests include ultra-high density fuel cell technology and structural optimization and design of fuel cell air compressors.



张建, 2012 年于天津理工大学获得学士学位, 现为天津市云驱科技有限公司高级工程师, 主要研究方向为超高速空压机控制技术。

E-mail: 1032671510@qq.com

Zhang Jian received his B. Sc. degree from Tianjin University of Technology in 2012. He is currently a senior engineer at Tianjin Cloud Drive Technology Co., Ltd. His main research interest includes the control technology of ultra-high-speed air compressors.