

基于改进滑模控制与谐波注入算法的增程器 发电机转矩波动抑制研究

施 全¹, 马国涛², 孙 强³, 赵燕乐², 郭 伟^{2*}

(1. 重庆理工大学 车辆工程学院, 重庆 400054;

2. 北京航空航天大学 宁波创新研究院, 浙江 宁波 315800;

3. 宁波圣龙智能汽车系统有限公司, 浙江 宁波 315100)

Research on Torque Ripple Suppression of Range Extender Generator Based on Sliding Mode Control and Harmonic Injection Algorithm

Shi Quan¹, Ma Guotao², Sun Qiang³, Zhao Yanle², Guo Wei^{2*}

(1. School of Vehicle Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315800, China;

3. Ningbo Shenglong Intelligent Automotive Systems Co., Ltd., Ningbo 315100, China)

Abstract: [Objective] This paper focuses on the permanent magnet synchronous generator used in new energy vehicle range extenders. It addresses the issues of mechanical chattering caused by engine torque ripple and current distortion resulting from air-gap magnetic field distortion and inverter nonlinearities. The aim is to optimize motor control algorithms to enhance system robustness, thereby effectively suppressing vibration interference from the engine and torque ripple generated by the motor itself. [Methods] To improve the robustness of the speed outer loop and suppress chattering caused by engine torque ripple, the traditional PI controller was replaced by an improved sliding mode compensation controller. Meanwhile, to reduce the torque ripple inherent to the motor, a harmonic injection algorithm was introduced to specifically suppress the 5th and 7th current harmonics, thereby effectively mitigating the impact of harmonic currents.

[Results] Simulation and experimental results indicated that significant improvements were achieved in both disturbance rejection performance and current quality by the proposed strategy. Under the condition of 500 r/min and a 120 N·m step load, the peak speed overshoot was reduced from 538 r/min to 532 r/min, compared with the traditional PI controller. Meanwhile, the 5th and 7th current harmonics were almost completely eliminated by the harmonic injection algorithm. The key harmonic current components, i_{d5th} , i_{d7th} ,

and i_{q7th} , were all suppressed to 0, verifying the effectiveness of the proposed strategy. [Conclusion] The improved sliding mode controller enhances system robustness, enabling faster post-disturbance speed recovery and smaller fluctuations. Concurrently, the harmonic injection algorithm effectively suppresses current harmonics caused by inverter nonlinearities and motor magnetic field distortion, improving current quality. The combination of both achieves superior steady-state performance.

Key words: range extender; permanent magnet synchronous generator; harmonic injection algorithm; improved sliding mode controller

摘 要: 【目的】本文围绕新能源汽车增程器用永磁同步发电机,综合考虑发动机转矩脉动引发的机械抖振,以及电机自身因气隙磁场畸变、逆变器非线性等因素导致的电流畸变问题,开展相关研究。旨在通过优化电机控制算法,提升系统鲁棒性,从而有效抑制来自发动机的振动干扰及电机本体产生的转矩脉动。【方法】为提高转速外环的鲁棒性并抑制发动机转矩脉动带来的抖振,本文以改进后的滑模补偿控制器取代传统的 PI 控制器。同时,为减小电机自身的转矩脉动,引入了谐波注入算法来针对性地抑制 5 次、7 次电流谐波,从而有效降低谐波电流的影响。【结果】仿真与试验结果表明,所提策略在提升抗扰性能和电流质量上均取得显著效果。在 500 r/min、120 N·m 阶跃负载工况下,相较于传统 PI 控制器,改进滑模控制器将转速超调峰值从 538 r/min 降至 532 r/min。

基金项目: 创新挑战赛项目立项资金补助(2025YZQ09001)

Grant for Approved Innovation Challenge Project (2025YZQ090011)

同时,谐波注入算法几乎完全消除了5次、7次电流谐波,关键谐波电流分量 i_{d5th} 、 i_{d7th} 和 i_{q7th} 均被抑制到0,验证了所提策略的有效性。【结论】采用改进滑模控制器,系统鲁棒性增强,在负载扰动下转速恢复快、波动小;采用谐波注入算法,则能有效抑制由逆变器非线性及电机磁场畸变引起的电流谐波,提升电流质量。两者结合,实现了更好的稳态性能。

关键词: 增程器;永磁同步发电机;谐波注入算法;改进滑模控制器

0 引言

增程式新能源汽车因破解纯电续航焦虑、提升驾驶体验,获广泛市场认可^[1]。增程器由发动机、永磁同步发电机(Permanent Magnet Synchronous Generators, PMSG)及控制器组成^[2],通过将发电机控制在高效转速区间、发动机控制在高效转矩区间,为驱动电机供电及电池补能。由于两者间为刚性连接,发动机转矩脉动影响发电机运行稳定性^[3];传统比例积分(Proportional-Integral, PI)转速环控制难以兼顾系统快速响应与稳定性,鲁棒性欠佳^[4],且电机电流谐波引发的转矩脉动进一步影响了系统稳定性^[5]。

滑模控制器基于现代控制理论,通过设计滑模面引导系统运动,核心优势为鲁棒性强、可抵御外部扰动与参数不确定性,其设计关键在于滑模面与趋近率函数的选取,需平衡系统收敛速度与电机抖振问题^[6-8]。传统滑模控制器响应快、抗扰性强,但趋近滑模面时易产生抖振缺陷。文献[9]融合模糊控制调节切换增益,有效削弱抖振,但通用化程度低,易导致系统失稳。文献[10]结合神经网络拟合非线性特性设计自适应控制器,但占用大量微控制单元算力,可能引发控制延迟与失稳。文献[11]提出重复滑模控制策略,解决负载突变抖振,但重复控制的迭代特性会导致动态响应滞后。

针对PMSG设计及逆变器非线性产生的谐波问题,学者们开展了大量研究。文献[12]提出改进死区补偿算法,提升电流检测精度,但依赖动态变化的电机与逆变器参数,谐波抑制效果易退化。文献[13]通过转子分段等结构优化削弱齿槽转矩,但存在工艺复杂、成本与耗时较高的问题,且死区补偿法存在过零点检测不准,导致误补偿隐患。

综上所述,为同步解决发动机转矩脉动扰动、电机电流谐波引发的转矩脉动及系统鲁棒性不足等问题,本文提出改进滑模控制器与谐波注入算法相结合的综合控制策略。其中,改进滑模控制器用于转速外环控制,通过集成增益观测器实时追踪系统扰动,精准反馈扰动信息以优化控制输出,大幅提升发电机抵御转矩脉动的鲁棒性,避免传统滑模控制的抖振缺陷与增益匹配难题,同时兼顾响应速度与稳定性,适配新能源汽车电机宽转速转矩运行场景。针对电机5次、7次主导谐波,本文先建立电机谐波数学模型与专用变换坐标系,通过精准提取电流中的5次、7次谐波分量,设计独立谐波电流环将谐波电流闭环控制至趋近于零,再经谐波坐标变换与电压计算,向控制系统注入补偿谐波电压,从源头抑制谐波产生,进而消除谐波引发的转矩脉动,提升系统噪声、振动与声振粗糙度性能。

1 改进滑模控制器设计

1.1 滑模控制设计

首先建立增程器运动方程,如式(1)所示:

$$\frac{d\omega_{feb}}{dt} = T_e - \frac{T_L}{J} - \frac{B}{J}\omega_{feb} \quad (1)$$

式中: T_e 为发电机电磁转矩; T_L 为发动机转矩; J 为发电机转动惯量; B 为发电机粘性摩擦因数; ω_{feb} 为发电机实际反馈电角速度。

考虑电机参数变化以及系统不确定因素干扰,可得:

$$\frac{d\omega_{feb}}{dt} = T_e - \frac{B}{J}\omega_{feb} + \beta \quad (2)$$

式中: β 为扰动值。

其中发电机为内置式永磁同步电机,具有凸极性,即 $L_d < L_q$,其电磁转矩方程如式(3)所示:

$$T_e = \frac{3}{2}P_n[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3)$$

式中: P_n 为发电机极对数; ψ_f 为发电机磁链; i_d 、 i_q 分别为发电机 d 、 q 轴电流; L_d 、 L_q 分别为发电机 d 、 q 轴电感。

综上所述,建立PMSG状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \omega_{ref} - \omega_{feb} \\ \dot{x}_2 = \dot{x}_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω_{ref} 为发电机给定电角速度。

结合式(2)对式(4)进行求导, ω_{ref} 给定值为

常数,求导后为 0,因此式(4)求导后为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\left(T_e - \frac{B}{J}\omega_{\text{feb}} + \beta\right) \\ \dot{x}_2 = -\left(\dot{T}_e - \frac{B}{J}\dot{\omega}_{\text{feb}} + \dot{\beta}\right) \end{cases} \quad (5)$$

定义滑模面函数为

$$s = cx_1 + x_2 \quad (6)$$

对式(6)进行求导,可得:

$$\dot{s} = c\dot{x}_1 - \dot{T}_e + \frac{B}{J}\dot{\omega}_{\text{feb}} - \dot{\beta} \quad (7)$$

在电机实际控制中,滑模控制固有的高频抖动问题会对控制效果产生不利影响,通过选用合适的趋近率可有效缓解这一问题^[14-19]。为进一步提升系统的动态响应速度与稳态精度,本研究引入改进的新型趋近率方案,改进后的趋近率为

$$\dot{s} = -k_1 |s|^{\frac{1}{2}} \text{Sat}(s) - k_2 \int \text{Sat}(s) dt \quad (8)$$

式中: k_1 、 k_2 为自适应增益常数,且 $k_1 > 0$ 、 $k_2 > 0$ 。

结合式(7)、(8),输出滑模控制方程:

$$T_e = \int \left[c\dot{x}_1 + \frac{B}{J}\dot{\omega}_{\text{feb}} - \beta + k_1 |s|^{\frac{1}{2}} \text{Sat}(s) + k_2 \int \text{Sat}(s) dt \right] dt \quad (9)$$

其中二阶滑模控制器输出稳定性判断已有人验证^[20],Sat 切换函数如式(10)所示:

$$\text{Sat}(s, \delta) = \begin{cases} 1, & s > \delta \\ \frac{s}{\delta}, & |s| < \delta \\ -1, & s < -\delta \end{cases} \quad (10)$$

引入 Sat 饱和函数作为切换函数,其在滑模面 $|s|$ 处于小范围区间时呈现线性过渡特性,区别于 sign 符号函数的 ± 1 阶跃式跳变;将高阶趋近率与该 Sat 饱和函数有机结合,不仅能够确保控制系统兼具优异的收敛速度与强鲁棒性,还可实现高效抑制传统滑模控制器固有的高频抖振。

1.2 增益观测器设计

由于转矩传感器价格昂贵、安装困难,增程器上一般不采用,因此需要设计观测器来观测扰动 β ,本文采用增益式转矩观测器对 β 进行观测。由于电机参数变化缓慢,发动机具有滞后性,转矩变化慢,因此 β 导数可近似为 0。首先,建立系统状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{\text{feb}} = T_e - \frac{B}{J}\omega_{\text{feb}} + \beta \\ \dot{\beta} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

建立电角速度、转矩及参数扰动估计误差方程作为增益反馈,如式(12)所示:

$$\begin{cases} e_1 = \omega_{\text{feb}} - \hat{\omega}_{\text{feb}} \\ e_2 = \beta - \hat{\beta} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\hat{\omega}_{\text{feb}}$ 为反馈电角速度估计值; $\hat{\beta}$ 为参数扰动及发动机转矩估计值。

设计增益观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}}_{\text{feb}} = T_e - \frac{B}{J}\hat{\omega}_{\text{feb}} + \hat{\beta} + \frac{\lambda_1}{\mu}e_1 \\ \dot{\hat{\beta}} = \frac{\lambda_2}{\mu^2}e_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 μ 为正实数, μ 取值较小以实现高增益。

利用式(13)可以观测 $\hat{\beta}$ 扰动作为改进补偿滑模控制器的前馈补偿,并使 $\hat{\beta}$ 逼近于 β 。

对式(12)进行求导,可得:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{\omega}_{\text{feb}} - \dot{\hat{\omega}}_{\text{feb}} = \left(\frac{\lambda_1}{\mu} - \frac{B}{J}\right)e_1 + e_2 \\ \dot{e}_2 = \dot{\beta} - \dot{\hat{\beta}} = -\frac{\lambda_2}{\mu^2}e_1 \end{cases} \quad (14)$$

状态误差方程为

$$\dot{e} = Ae + B\beta \quad (15)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1}{\mu} - \frac{B}{J} & 1 \\ -\frac{\lambda_2}{\mu^2} & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}。$$

通过配置 $\frac{\lambda_1}{\mu} - \frac{B}{J}$ 、 $\frac{\lambda_2}{\mu^2}$ 使矩阵 A 的特征值实部均小于 0,误差收敛为 0。

2 谐波注入算法

理想情况下变频器输出完美的三相正弦波电压,但实际受限于脉宽调制技术,输出电压是由高频开关脉冲构成的调制波,而非平滑的正弦波。这种非正弦波形本身含有高次谐波,会直接作用于电机绕组产生谐波电流。这些电压谐波主要分为两类:一类集中在开关频率整数倍附近的“载波谐波”;另一类源于电机本体设计,如齿槽效应、绕组分布及永磁体磁密波形畸变等。在所有

谐波中,5次和7次谐波含量最为显著,因此本文选取这两者作为重点研究对象^[21-24]。

2.1 电机谐波模型及坐标系

先对基波磁动势进行分析,可得:

$$\begin{cases} F_{A1} = F_m \cos(\omega t) \sin \theta \\ F_{B1} = F_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ F_{C1} = F_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (16)$$

结合式(16)和三角恒等式 $\cos A \sin B = \frac{1}{2} [\sin(B-A) \sin(B+A)]$,可得:

$$F_1(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \sin(\omega t - \theta) \quad (17)$$

式(17)表明,此时产生的是正向旋转(逆时针)圆形旋转磁场,同步速为 $\omega_1 = \omega$ 。

对3次谐波磁动势进行分析,可得:

$$\begin{cases} F_{A3} = \frac{F_m}{3} \cos(\omega t) \sin(3\theta) \\ F_{B3} = \frac{F_m}{3} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left[3\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] = \\ 3F_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin(3\theta - 2\pi) = \\ \frac{F_m}{3} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \sin(3\theta) \\ F_{C3} = \frac{F_m}{3} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \sin\left[3\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)\right] = \\ \frac{F_m}{3} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \sin(3\theta - 4\pi) = \\ \frac{F_m}{3} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \sin(3\theta) \end{cases} \quad (18)$$

结合三角恒等式和式(18),将三相的3次谐波磁势相加,得到:

$$F_3(\theta, t) = \frac{F_m}{3} \sin(3\theta) \left[\cos(\omega t) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right] = 0 \quad (19)$$

由于电机三相呈对称关系,因此式(19)方括号内三项之和为0,由此可推出3的倍数次谐波由于电机三相对称关系,其所含的谐波近似为0。

对5次谐波进行分析:

$$\begin{cases} F_{A5} = \frac{F_m}{5} \cos(\omega t) \sin(5\theta) \\ F_{B5} = \frac{F_m}{5} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left[5\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right] = \\ \frac{F_m}{5} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(5\theta - \frac{10\pi}{3}\right) = \\ \frac{F_m}{5} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(5\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ F_{C5} = \frac{F_m}{5} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \sin\left[5\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)\right] = \\ \frac{F_m}{5} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(5\theta - \frac{20\pi}{3}\right) = \\ \frac{F_m}{5} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \sin\left(5\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (20)$$

结合三角恒等式和式(20),将三相的3次谐波磁势相加进行合成,可得:

$$F_5(\theta, t) = \frac{2}{3} \frac{F_m}{5} \sin(\omega t + 5\theta) \quad (21)$$

式(21)表明,5次谐波磁势产生一个反向旋转(顺时针)的磁场,其旋转速度是基波磁场同步速的1/5。采用同样的方法,7次谐波的合成磁势为

$$F_7(\theta, t) = \frac{2}{3} \frac{F_m}{7} \sin(\omega t - 7\theta) \quad (22)$$

式(22)表明,7次谐波磁势产生一个正向旋转(逆时针)的磁场,其旋转速度是基波磁场同步速的1/7。

综上,将5次、7次谐波分别转换到其对应的d、q轴同步旋转坐标系,以便于后续对5次、7次谐波d、q轴电流进行控制,坐标系如图1所示。

2.2 谐波抑制算法

基于abc/dq坐标变换的核心原理:当dq坐标系的旋转方向与速度同某一谐波频率严格同步时,该谐波分量即被转换为直流分量,而基波与其他频次分量则呈现为交流。具体而言,在转速为5次谐波频率的dq坐标系中,5次谐波转化为直流,7次亦然^[25-26]。据此,本文采用低通滤波器对5次、7次电流谐波进行提取,如图2所示。

具体过程为:把5次谐波电流降至0,故d、q轴的指令都设为零。PI调节器负责“盯”着实际电流和0的误差,输出一个基础调节量。同时,前馈补

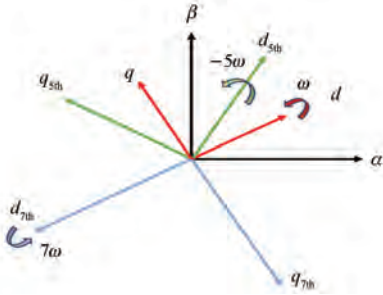
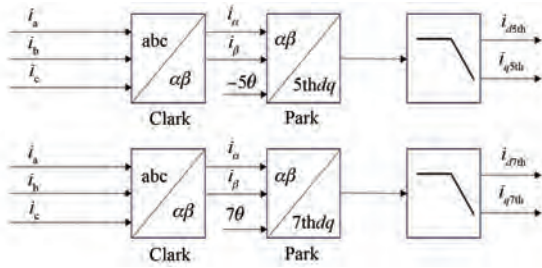
图 1 5 次、7 次谐波 d 、 q 轴电流同步旋转坐标系Fig. 1 Synchronous reference frames of 5th and 7th harmonic d - q axis currents

图 2 5 次、7 次电流谐波提取模块

Fig. 2 5th and 7th current harmonics extraction block

偿把电阻压降和电感交叉耦合(d 、 q 轴互相影响的部分)都算进去,让响应更快更准。最后把这几部分相加,就得到了要注入的 5 次谐波电压指令,正好把电机里的谐波抵消掉,如图 3 所示。

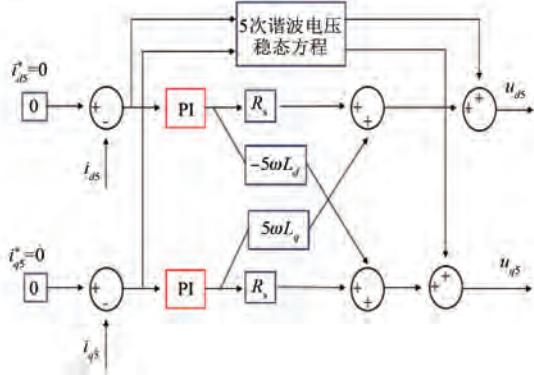


图 3 5 次谐波电流环

Fig. 3 5th harmonic current loop

同理,消除 7 次谐波步骤同上,如图 4 所示。最后,将谐波电流环计算得到的 d 、 q 轴电压经过坐标变换到 α 、 β 轴中,得到在静止三相坐标轴系下的补偿量 u_{α} 、 u_{β} ,如图 5 所示。

谐波注入后,电流会减小,进而降低电机损耗。铜耗 P_{Cu} 、铁耗 P_h 和涡流损耗 P_{eddy} 计算式分别为

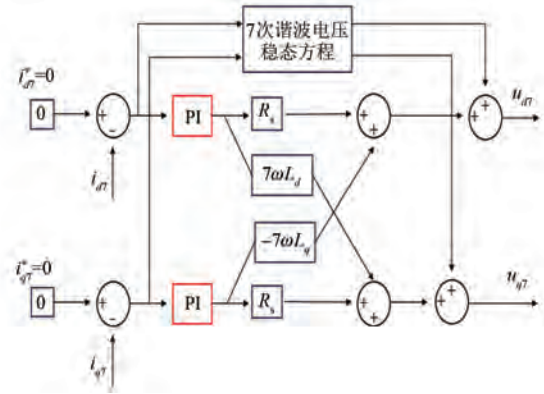
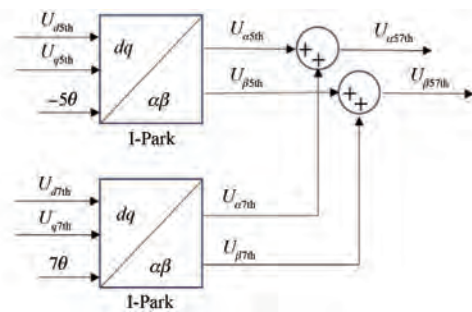


图 4 7 次谐波电流环

Fig. 4 7th harmonic current loop

图 5 5 次、7 次谐波电压 $dq/\alpha\beta$ 坐标变换Fig. 5 $dq/\alpha\beta$ coordinate transformation for 5th and 7th harmonic voltages

$$\begin{cases} P_{Cu} = I^2 R \\ P_h = K_h \cdot B_{max}^n \cdot f \\ P_{eddy} = K_{eddy} \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 \cdot t^2 \end{cases} \quad (23)$$

式中: K_h 为磁滞损耗常数; K_{eddy} 为涡流损耗系数; B_{max} 为磁通密度的最大值; n 为磁滞损耗的指数,取值 1.5~2.5; f 为电机的工作频率; t 为时间。

3 仿真分析

为了验证改进滑模控制及谐波注入算法的有效性,本文基于 Matlab/Simulink 平台进行了对比仿真分析。三种控制器下的转速仿真对比如图 6 所示。

由图 6 可知,0.5 s 突加负载,三种控制器的表现差异明显。PI 控制器稳态时转速存在明显的起伏,转速波动较大,且调节时间较长,抗扰性差;传统滑模控制器虽有所改善,但仍存在抖振;而改进后的滑模控制器转速波动较小、调节时间最短,表现出极强的鲁棒性,因此在增程系统中转速环采用改进滑模控制器更加合适。

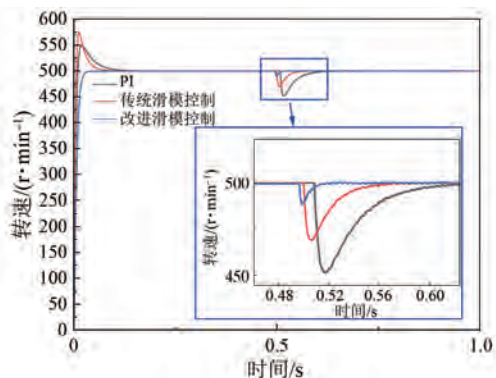


图 6 三种控制器下的转速仿真对比

Fig. 6 Comparison of simulation speed under three controllers

在谐波注入算法的仿真验证环节,借助 Scope 模块对发电机的实时反馈转速进行高精度采集与动态监测,电机转速对比图如图 7 所示。由图 7 可知,未加入该算法时,转速曲线因电流谐波畸变呈现明显波动,幅值较大;而在引入谐波注入算法后,转速波动幅值显著减小,曲线平滑度大幅提升,充分证明了该算法在降低转速脉动方面的控制效果较好。

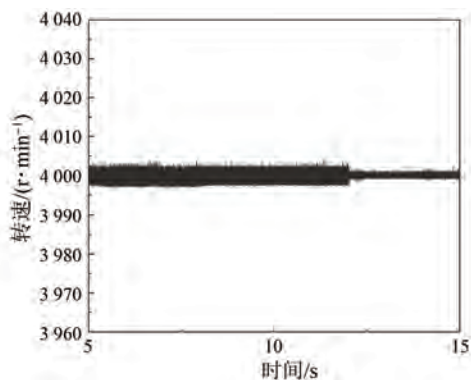


图 7 电机转速对比图

Fig. 7 Motor speed comparison diagram

为了验证转矩观测器的转矩跟随性能,在 2 s 时突加 50 N·m 负载,观测结果如图 8 所示。由图 8 可知,转矩观测器的观测值与实际值偏差并不大,仅存在微小的滞后性。负载突变时,观测转矩比实际转矩更为平滑,将观测到的负载扰动作为前馈补偿引入滑模控制器,能很好地削弱抖振,提高抗干扰性能。

未加入、加入谐波注入算法三相电流波形分别如图 9、10 所示。由图 9 可知,未加入谐波注入算法时,电机三相电流波形受逆变器非线性、死区

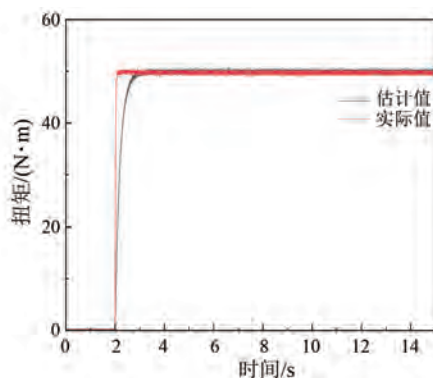


图 8 转矩观测器观测结果

Fig. 8 Torque observer estimation results

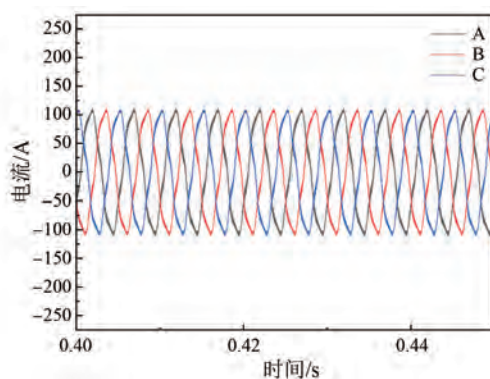


图 9 未加入谐波注入算法三相电流波形

Fig. 9 Three-phase current waveforms without harmonic injection

补偿等因素影响,谐波干扰严重,波形表面布满不规则毛刺,且大幅偏离标准正弦曲线,出现明显的波形畸变现象。这种畸变会加剧电机转矩脉动、增大运行噪声。由图 10 可知,在加入谐波注入算法后,电机三相电流波形得到了改善,原本杂乱的毛刺大幅减少乃至消失,电流波形轮廓变得平滑

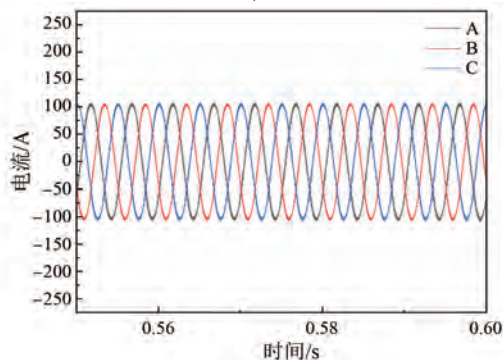


图 10 加入谐波注入算法后三相电流波形

Fig. 10 Three-phase current waveforms with harmonic injection

4 试验结果分析

为了还原车用增程器系统,试验采用测功机模拟发动机运行工况,搭建了对拖试验平台。如图 12 所示,平台由水冷机、电池模拟器、功率分析仪、示波器及 Vector 通讯设备等共同支撑。

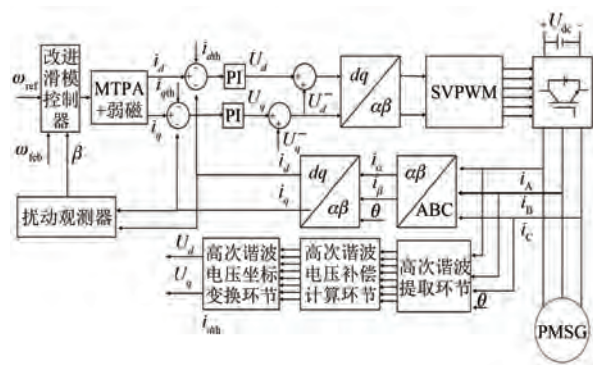


图 11 增程器发电机控制框图

Fig. 11 Control block diagram of the range extender generator

4.1 试验设置

为了验证本文提出的改进补偿滑模控制器和谐波注入算法的正确性和有效性,搭建如图 12 所示的试验平台进行验证。主控采用瑞萨 RH850 芯片,主频最高可达 400 MHz,依托批量寄存器保存、分支预测及高速闪存访问等技术,显著加快了中断响应与程序执行效率,确保了复杂算法的实时控制需求得到满足。仿真用发电机参数如表 1 所示。

表 1 增程器 PMSG 参数

Tab. 1 Parameters of range extender PMSG

参数名称	参数值
电机极对数	12
峰值转矩/(N·m)	220
额定转速/(r·min ⁻¹)	4 000
额定母线电压/V	520
L_d /mH	0.106
L_q /mH	0.158
电机转子磁链	0.05



图 12 试验平台

Fig. 12 Experimental platform

4.2 试验结果分析

考虑到增程器配套发动机在怠速区间与低转速运行阶段的机械振动与转矩脉动现象更为突出,此类扰动会直接传递至 PMSG,对其转速稳定性与发电品质造成不利影响,因此本次试验选取 500 r/min 低转速点开展控制效果验证。具体工况设置为:给定目标转速 500 r/min,并通过测功机施加稳定的反向转矩负载,以模拟增程器在实际车辆行驶中的能量输出状态。

为验证所提滑模控制器的鲁棒性,试验设置了负载转矩突加 $-120\text{ N}\cdot\text{m}$ 的工况,各控制器速度响应如图 13~15 所示。由图 13~15 可知,PI 控制器转速抖动最大,峰值达 538 r/min ;传统滑模控制器次之,峰值为 533 r/min ;而本文所提改进滑模控制器表现最优,抖动峰值仅 532 r/min ,且在转矩再次波动时转速变化极小。这表明所提方法在动态性能及抗干扰性上均优于传统 PI 及传统滑模控制,调节迅速且鲁棒性强,在增程器中效果显著。

为进一步验证转矩观测器性能,试验施加了从 $0\text{ N}\cdot\text{m}$ 到 $-150\text{ N}\cdot\text{m}$ 、再到 $-127\text{ N}\cdot\text{m}$ 并反向至 $150\text{ N}\cdot\text{m}$ 的变载指令,本文改进滑模控制器的速度响应如图 15 所示。由图 15 可知,除在 $-150\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $150\text{ N}\cdot\text{m}$ 变载瞬间因冲击过大导致实际转矩超调、引起局部跟随偏差外,观测转矩在整个周期内趋势跟随完整,且曲线更平滑。这证

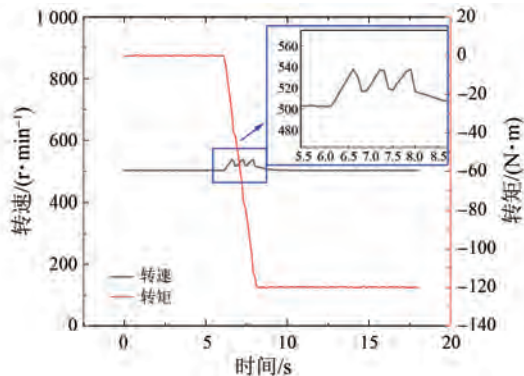


图 13 PI 控制器遇到突变负载速度响应

Fig. 13 Speed response of PI controller under step load disturbance

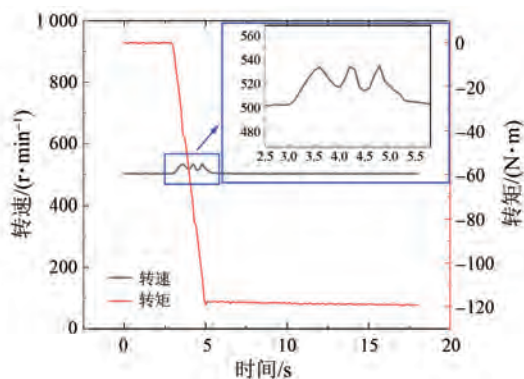


图 14 传统滑模控制器遇到突变负载速度响应

Fig. 14 Speed response of conventional sliding mode controller under step load disturbance

明所设计的观测器能够有效滤除高频冲击噪声,实现了对转矩的平稳实时检测。

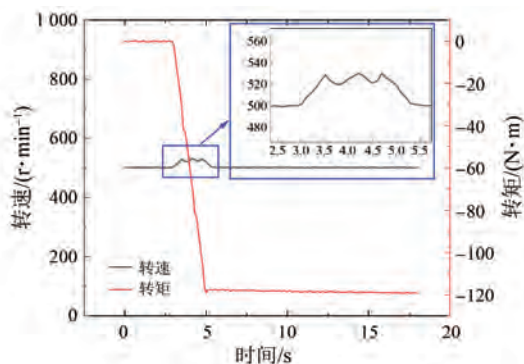


图 15 改进滑模控制器遇到突变负载速度响应

Fig. 15 Speed response of improved sliding mode controller under step load disturbance

转矩估算跟随对比如图 16 所示。由图 16 可知,加入谐波抑制算法后,电机转速波动明显减小。其本质在于,5 次、7 次谐波电流激发的 6 倍

频转矩脉动,会直接映射为转速的波动。试验结果表明,该算法有效抑制了转速脉动,验证了谐波补偿策略的正确性。

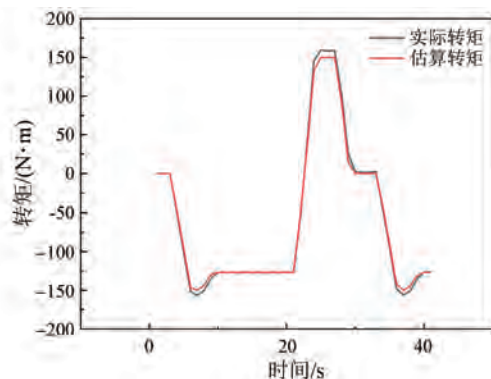


图 16 转矩估算跟随对比图

Fig. 16 Comparison of estimated and actual torque

加入谐波注入算法前后转速波形如图 17 所示,5 次、7 次谐波电流对比图分别如图 18、19 所示。由图 18 可知,电流中的 5 次谐波经坐标变换至 dq 同步旋转坐标系下,实施谐波注入算法后,其幅值显著下降。由图 19 可知,7 次谐波在加入谐波注入算法之后也有所下降,验证了该算法对气隙磁场畸变和逆变器非线性特性引起的 5 次、7 次谐波电流有较好的抑制效果。

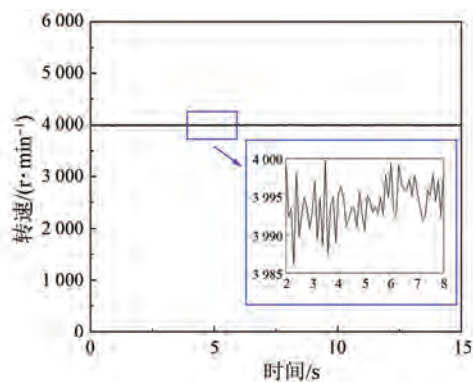


图 17 加入谐波注入算法前后转速波形

Fig. 17 Speed waveforms before and after harmonic injection algorithm

5 结语

通过改进滑模控制和谐波注入的联合作用,系统抗扰性和电能质量同步提升,从而实现了增程器的高效、低噪运行。主要结论如下。

(1) 针对发动机引入的转矩脉动,采用改进滑模控制器替代传统 PI 转速控制器,有效抑制了

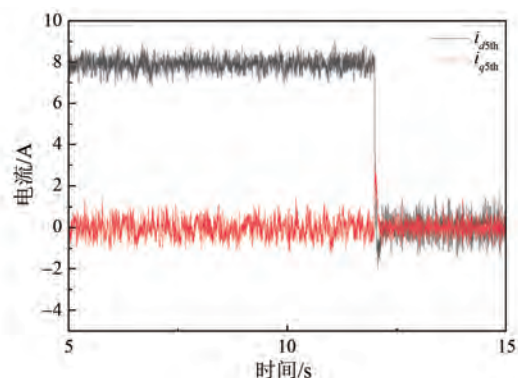


图 18 5 次谐波电流对比图

Fig. 18 Comparison of 5th harmonic currents

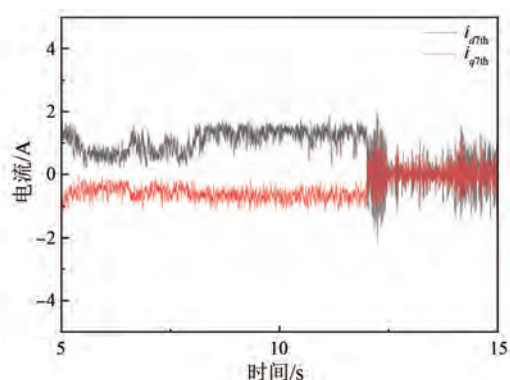


图 19 7 次谐波电流对比图

Fig. 19 Comparison of 7th harmonic currents

转速波动,增强了系统的鲁棒性。

(2) 针对电机侧逆变器非线性引起的 5 次、7 次谐波电流,通过谐波注入算法与谐波电流闭环控制,显著降低了电流畸变率,优化了电能质量。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

施全负责论文整体方案构思与设计解决方案;马国涛负责算法实现与论文撰写;孙强负责试验平台搭建与数据统计;赵燕乐负责图表整理与结果校核;郭伟负责项目统筹与技术指导,把控整体方向。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Shi Quan conceived the overall project and designed the solutions; Ma Guotao implemented the

algorithms and wrote the manuscript; Sun Qiang built the test bench and processed the statistics; Zhao Yanle prepared the figures and verified the results; Guo Wei supervised the project and provided technical guidance. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 朱卿纲, 郭斌, 胡晓峰, 等. 增程式电动汽车电机控制器下线测试系统[J]. 仪表技术与传感器, 2025(1): 61-67.
- Zhu Q G, Guo B, Hu X F, et al. Off-line test system for motor controller of range-extended electric vehicle [J]. Instrument Technique and Sensor, 2025(1): 61-67.
- [2] 李延腾, 赵子亮. 车用增程器系统参数匹配与控制策略研究[J]. 汽车文摘, 2025(12): 45-51.
- Li Y T, Zhao Z L. Research on parameter matching and control strategy of vehicle range extender system [J]. Automotive Digest, 2025(12): 45-51.
- [3] 张炜龙, 刘旺, 赵利文, 等. 混合动力汽车增程器转速控制技术的应用[J]. 防爆电机, 2025, 60(1): 30-32+54.
- Zhang W L, Liu W, Zhao L W, et al. Speed control technology and application of range extender for hybrid electric vehicles [J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2025, 60(1): 30-32+54.
- [4] 白书杰, 魏长银, 陈勇, 等. 三缸发动机式增程器扭转振动模糊 PID 主动抑制[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(2): 51-58.
- Bai S J, Wei C Y, Chen Y, et al. Fuzzy PID active suppression of torsional vibration of range extenders for three-cylinder engines [J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(2): 51-58.
- [5] 莫荣珍. 新能源汽车永磁同步电机电磁振动特性分析及控制技术[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(29): 177-180.
- Mo R Z. Analysis of electromagnetic vibration characteristics and control technology of permanent magnet synchronous motor for new energy vehicles [J]. Technology Innovation and Application, 2025, 15(29): 177-180.
- [6] 袁宝红. 基于滑模控制器的永磁同步电机矢量控制的研究[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版),

- 2025, 39(1): 66-71.
- Yuan B H. Research on vector control of permanent magnet synchronous motor based on sliding mode controller [J]. Journal of Lanzhou University of Arts and Science (Natural Science Edition), 2025, 39(1): 66-71.
- [7] 郑长森. 基于滑模方法的感应电机调速控制系统研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2024.
- Zheng C S. Research on speed control system of induction motor based on sliding mode method [D]. Qingdao: Qingdao University, 2024.
- [8] 屠卫威. 基于滑模的动态系统鲁棒控制问题研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2023.
- Tu W W. Research on robust control of dynamic systems based on sliding mode [D]. Shenyang: Northeastern University, 2023.
- [9] 刘华, 杨鹏, 马文良, 等. 基于模糊切换增益调节的PMSM滑模控制算法的仿真[J]. 电子测量技术, 2019, 42(19): 106-110.
- Liu J, Yang P, Ma W L, et al. Simulation of PMSM sliding mode control algorithm based on fuzzy switching gain adjustment [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(19): 106-110.
- [10] 郑康康, 刘宇涛. 基于滑模控制和神经网络的自适应控制器设计[C]//中国智慧工程研究会 2024 工程技术应用与施工管理交流会论文集(上), 湖南工程学院, 2024: 286-288.
- Zheng K K, Liu Y T. Design of adaptive controller based on sliding mode control and neural network [C]// Proceedings of the 2024 Engineering Technology Application and Construction Management Exchange Conference of China Smart Engineering Research Association (Part 1), Hunan Institute of Engineering, 2024: 286-288.
- [11] 季传坤, 钱俊兵. 基于重复滑模控制的PMSM的矢量控制系统[J]. 电子科技, 2019, 32(1): 52-57.
- Ji C K, Qian J B. Vector control system of PMSM based on repetitive sliding mode control [J]. Electronic Science and Technology, 2019, 32(1): 52-57.
- [12] 王智杰. 基于SiC逆变器的永磁同步电机电流谐波抑制研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2023.
- Wang Z J. Research on current harmonic suppression of permanent magnet synchronous motor based on SiC inverter [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2023.
- [13] 沈勇环, 陈益广, 赵维友. 削弱反磁通电机齿槽转矩的两种新方法[J]. 电工技术学报, 2007(7): 141-144.
- Shen Y H, Chen Y G, Zhao W Y. Two new methods for reducing cogging torque of flux-reversal motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007(7): 141-144.
- [14] 李耀华, 王自臣, 何雨颢, 等. 基于超螺旋滑模控制的永磁同步电机磁场定向控制研究[J]. 电机控制与应用, 2025, 52(5): 527-539.
- Li Y H, Wang Z C, He Y X, et al. Field-oriented control of permanent magnet synchronous motor based on super-twisting sliding mode control [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(5): 527-539.
- [15] 廖勇, 甄帅, 刘刃, 等. 用谐波注入抑制永磁同步电机转矩脉动[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 119-127.
- Liao Y, Zhen S, Liu R, et al. Torque ripple suppression of permanent magnet synchronous motor by the harmonic injection [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 119-127.
- [16] 马琮淦, 左曙光, 杨德良, 等. 电动车用永磁同步电机的转矩阶次特征分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(13): 81-87.
- Ma C G, Zuo S G, Yang D L, et al. Order feature analysis for torque ripple of permanent magnet synchronous motor for an electric vehicle [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(13): 81-87.
- [17] 马琮淦, 左曙光, 谭钦文, 等. 电动车用永磁同步电机非线性扭转振动模型[J]. 振动与冲击, 2013, 32(12): 131-134+158.
- Ma C G, Zuo S G, Tan Q W, et al. Non-linear torsional vibration model of a PMSM for electric driven vehicle [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(12): 131-134+158.
- [18] 李邦龙. 基于场路耦合的永磁同步电机电磁振动噪声分析[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2020.
- Li B L. Analysis of electromagnetic vibration and noise of permanent magnet synchronous motor based on field-circuit coupling [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020.
- [19] Xie Y, Xia Y, Li Z W, et al. Analysis of modal and vibration reduction of an interior permanent magnet

- synchronous motor [J]. *Energies*, 2019, 12(18): 3427.
- [20] 高金武, 孙少龙, 王舜尧, 等. 基于电机转矩补偿的增程器转速波动抑制策略[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2025, 55(8): 2475-2486.
- Gao J W, Sun S L, Wang S Y, et al. Speed fluctuation suppression strategy of range extender based on motor torque compensation [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2025, 55(8): 2475-2486.
- [21] 高梓伦, 孙全增, 孔钰, 等. 基于超螺旋滑模观测器的双三相永磁同步电机鲁棒性模型预测控制算法[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(5): 562-571.
- Gao Z L, Sun Q Z, Kong Y, et al. Robust model predictive control algorithms for dual three-phase permanent magnet synchronous motors based on super-twisting sliding mode observers [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(5): 562-571.
- [22] 徐龙, 李培鹤, 罗欣, 等. 一种改进的内置式永磁同步电机弱磁控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(3): 231-240.
- Xu L, Li P H, Luo X, et al. An improved flux-weakening control strategy for interior permanent magnet synchronous motors [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(3): 231-240.
- [23] 刘文彬, 韩雪岩, 朱龙飞. 基于谐波注入算法的变频器驱动下 PMSM 损耗抑制方法[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(1): 1-8.
- Liu W B, Han X Y, Zhu L F. Loss suppression method of PMSM driven by inverter based on harmonic injection algorithm [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(1): 1-8.
- [25] 杨成顺, 华涛, 戴宇辰, 等. 电动汽车用永磁同步电机宽速域抗干扰滑模控制[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(12): 21-29.
- Yang C S, Hua T, Dai Y C, et al. Wide speed domain anti-interference sliding mode control of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(12): 21-29.
- [26] 许龙飞, 马艳秋, 胡利民. 永磁同步电机注入谐波电流减小振动噪声的设计研究[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(9): 36-42.
- Xu L F, Ma Y Q, Hu L M. Design and research on reducing vibration noise by injecting harmonic current into permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(9): 36-42.
- [27] 孟文俊, 刘锦涛, 张浩宇, 等. 基于改进滑模控制的刮板输送机转速优化[J]. *起重运输机械*, 2026(1): 56-63.
- Meng W J, Liu J T, Zhang H Y, et al. Speed optimization of scraper conveyor based on improved sliding mode control [J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2026(1): 56-63.

收稿日期:2026-03-21

收到修改稿日期:2026-06-17

作者简介:

施 全(1971—),男,硕士,副教授,研究方向为车辆 NVH 测试技术, sq@cqut.edu.cn;

* 通信作者:郭 伟(1984—),男,博士,研究员,研究方向为车辆传动控制, guoweigreat@buaa.edu.cn。