DOI:10.12177/emca.2026.227 文章编号:1673-6540(2026)10-1073-12 中图分类号:TM 351 文献标志码:A

机场滚筒式蛇形传送带车变倾角工况下永磁同步电机复合抗扰控制研究

高建树[1], 朱雨萱[2*]
(1. 中国民航大学 交通科学与工程学院,天津 300300;
2. 中国民航大学 电子信息与自动化学院,天津 300300)

Composite Anti-Disturbance Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor for an Airport Roller Serpentine Conveyor Vehicle under Variable-Inclination Conditions

Gao Jianshu[1], Zhu Yuxuan[2*]
(1. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: **[Objective]** To address the issues of speed fluctuation, additional load disturbance, and insufficient driving robustness in airport roller serpentine conveyor vehicles during large-inclination ramp conveying, this paper takes a single electric drum drive unit as the object and proposes a composite anti-disturbance control method based on parameter scheduling and feedforward-observer for permanent magnet synchronous motor (PMSM). **[Methods]** Firstly, the medium-speed operating condition was determined based on the drum diameter and the engineering conveying speed range, and a vector control model for the single-drum PMSM was established. Secondly, an equivalent ramp load model related to the slope angle was constructed, and the proportional-integral (PI) parameters of the speed loop were designed with the slope angle θ as the scheduling variable, enabling the controller gain to be adaptively adjusted with the inclination angle. Then, the calculable ramp load was compensated into the q-axis current command through gravity feedforward to reduce the feedback regulation pressure on the speed loop. Finally, for the unknown additional disturbances remaining after feedforward compensation, a residual compensation structure of a direction-adaptive sliding mode disturbance observer (SMDO) was constructed, and effective q-axis compensation current was generated through disturbance estimation bias correction, slope-direction gain adjustment, and compensation current limiting. **[Results]** The simulation results indicated that under the variable-inclination conditions of 0°→8°→16°→24° uphill and 0°→−8°→−16°→−24° downhill, the maximum speed deviation was reduced by the parameter-scheduled field-oriented control (FOC) compared with the fixed-parameter FOC, and the improvement became more obvious with the increase of the inclination angle. Under the condition of ±24° ramp, the speed deviation was significantly decreased and the output burden of the speed loop PI was greatly reduced by the gravity feedforward. When unknown additional disturbances were superimposed, the speed drop under uphill resistance disturbance and the speed overshoot under downhill assistance disturbance were respectively reduced by the direction-adaptive SMDO residual compensation. **[Conclusion]** The proposed composite anti-disturbance control method based on parameter scheduling and feedforward-observer improves the speed maintenance capability of the single-drum drive unit under variable-inclination angles and additional disturbances, and provides an executive-layer control foundation for subsequent research on multi-drum coordinated control.

Key words: airport roller serpentine conveyor vehicle; permanent magnet synchronous motor; parameter scheduling; sliding-mode disturbance observer; anti-disturbance control; variable-inclination

摘 要:**【目的】**针对机场滚筒式蛇形传送带车在大倾角

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

坡道输送过程中出现的速度波动、附加载荷扰动明显及驱动鲁棒性不足等问题,以单电动滚筒驱动单元为对象,提出一种永磁同步电机(PMSM)参数调度与前馈—观测复合抗扰控制方法。【方法】首先,根据滚筒直径和工程输送速度范围确定中速运行工况,建立单滚筒 PMSM 矢量控制模型。其次,构造与坡度角相关的等效坡道负载模型,并以坡度角 θ 为调度变量设计速度环比例积分(PI)参数,使控制器增益能够随倾角变化自适应调整;然后,将可计算的坡道负载通过重力前馈补偿到 q 轴电流指令中,以减轻速度环反馈调节压力;最后,针对前馈补偿后仍存在的未知附加扰动,构建方向自适应滑模扰动观测器(SMDO)残差补偿结构,通过扰动估计偏置校正、坡向增益调节和补偿电流限幅生成有效 q 轴补偿电流。【结果】仿真结果表明,在 0°→8°→16°→24°上坡和 0°→−8°→−16°→−24°下坡变倾角工况下,参数调度磁场定向控制(FOC)相比固定参数 FOC 均能降低最大转速偏差,且倾角越大改善越明显;在±24°坡道条件下,重力前馈能够显著减小转速偏差并大幅降低速度环 PI 输出负担;在叠加未知附加扰动时,方向自适应 SMDO 残差补偿能够分别降低上坡阻力扰动下的转速跌落和下坡助动扰动下的转速上冲。【结论】所提参数调度与前馈—观测复合抗扰控制方法能够提高单滚筒驱动单元在变倾角及附加扰动条件下的速度保持能力,并为后续多滚筒协同控制研究提供执行层控制基础。

关键词:机场滚筒式蛇形传送带车;永磁同步电机;参数调度;滑模扰动观测器;抗扰控制;变倾角

0 引言

机场滚筒式蛇形传送带车主要用于航空货物或行李在地面与机舱之间的连续输送[1],其工作过程中传送装置需要在一定倾角范围内展开并保持稳定运行。与常规平面滚筒输送装置相比,该类设备在实际作业中需要适应货舱内外的空间约束,并在较大倾角条件下维持滚筒输送速度的稳定[2]。对滚筒驱动单元而言,上坡输送的重力分量表现为持续阻力载荷,容易导致转速跌落和驱动转矩不足;下坡输送则可能出现明显助动效应,从而导致输送转速上冲甚至有超速的风险。因此,围绕机场滚筒式蛇形传送带车坡道工况开展滚筒驱动执行层控制研究,具有明确的工程背景与应用价值[3]。

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor,PMSM)具有响应速度快、控制精度高、便于实现矢量控制等优点[4-5],已广泛应用于伺服驱动、电动输送和牵引执行机构等场合。矢量控制能够实现电机转矩和磁链的解耦控制,是 PMSM 高性能调速系统中的常用方法[6-7]。现有研究多集中于电流环解耦、速度环比例积分(Proportional-Integral,PI)参数整定和鲁棒控制等方面[8],在负载相对稳定或工况变化较小的场景中能够取得较好的控制效果。然而,在机场滚筒式蛇形传送带车大倾角坡道输送过程中,坡道角变化会引起机械负载和速度环工作点变化,固定参数 FOC 难以同时兼顾不同倾角下的响应速度和调节平滑性。因此,有必要根据坡道工况对速度环参数进行适度调度[9]。

前馈补偿可针对已知或可计算负载提前施加补偿,有效降低反馈控制器的稳态负担。对于难以精确建模的外部扰动和参数不确定性,扰动观测器及滑模扰动观测器(Sliding Mode Disturbance Observer,SMDO)具有较强鲁棒性[10],已在电机抗扰控制中得到应用[11]。带扰动补偿的预测速度控制以及基于终端滑模观测器的鲁棒速度控制研究表明,观测与补偿机制能够改善 PMSM 在负载扰动下的速度性能[12-13]。SMDO 能够利用切换项增强扰动估计能力,但在实际应用中也可能带来补偿电流突变、转矩波动增大和观测增益难以兼顾不同扰动强度等问题[14]。并且对于坡道输送系统来说,上坡阻力型负载和下坡助动型负载方向相反,若补偿方向不加区分,可能导致上下坡工况下补偿效果不一致。因此需要结合坡道负载方向和执行层电流约束对观测补偿结构进行工程化处理。

综上,现有 PMSM 抗扰控制研究多面向通用伺服或牵引负载场景,针对机场滚筒式蛇形传送带车大倾角坡道输送中已知坡道负载、未知附加扰动和上下坡负载方向相反共同作用的研究相对不足。本文以机场滚筒式蛇形传送带车单滚筒驱动单元为对象,提出一种变倾角参数调度与前馈—观测复合抗扰控制方法。主要内容包括:结合滚筒直径和工程输送速度范围确定中速仿真工况,建立单滚筒 PMSM 驱动模型;构造基于坡度角的等效坡道负载模型,并设计速度环 PI 参数调度规律;引入重力前馈补偿已知坡道负载,降低速度环长期调节负担;针对前馈后的未知附加扰动,设计方向 SMDO 残差补偿结构,通过偏置校正、坡向增益和电流限幅生

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

成有效补偿电流；通过变倾角、重力前馈和扰动矩阵仿真验证所提方法的有效性。

1 系统建模与控制策略设计

1.1 研究对象与工程映射

本文研究对象为机场滚筒式蛇形传送带车的单滚筒驱动单元。为突出执行层控制策略本身，研究将其范围限定为该单元在坡道输送工况下的速度保持控制，而不涉及整车行走、转向、升降及多滚筒协同调度等问题。

滚筒直径 $D=0.05$ m。根据工程输送速度范围 0.16~0.50 m/s 可计算出滚筒转速范围为 60~190 r/min。本文选取中速工况 $n^*=115$ r/min 作为仿真目标，其对应目标机械角速度为

$$\omega_m^* = \frac{2\pi n^*}{60} \tag{1}$$

对应输送速度为

$$v = \frac{\pi D n^*}{60} \tag{2}$$

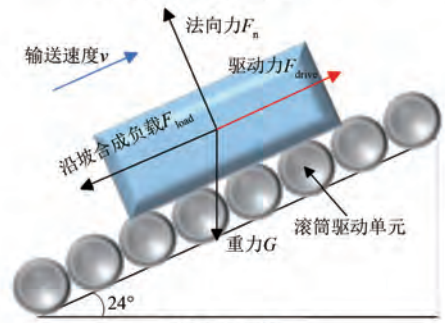
该中速设置位于工程速度范围中部，利于评价控制策略在典型输送速度下的动态性能。

在工程应用中，滚筒驱动单元所承受的外载不仅与坡道角度有关，还会受到行李件数、摆放方式、接触状态和局部摩擦变化等影响[15]。针对负载扰动与参数变化，扩展卡尔曼观测器和全阶观测器等方法也被用于 PMSM 扰动抑制与电流控制[16-17]。为兼顾工程可解释性与控制仿真的可重复性，本文采用已知坡道负载与未知附加扰动结合的等效建模思路，将重力分量等可预测部分统一归入已知坡道负载，并将行李接触冲击、局部摩擦突变和负载不均等难以准确建模的部分统一归入未知附加扰动。

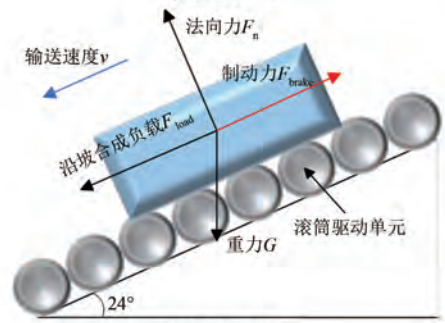
研究对象实物结构及 24°坡道工况下滚筒输送单元负载方向示意如图 1 所示。图 1(a)给出了机场滚筒式蛇形传送带车滚筒输送部分的实物结构，图 1(b)、(c)则为 24°极限坡道下单滚筒输送单元的受力方向示意。图中，G 为重力；F_n 为法向支撑力；F_{drive} 为滚筒驱动力；F_{brake} 为防超速的制动力；F_{load} 为沿输送方向的等效负载力；v 为输送方向速度。上坡时，F_{load} 与运动方向相反，表现为阻力型载荷；下坡时，F_{load} 与运动方向一致，表现为助动型载荷。



(a)传送带部分的实物结构



(b)上坡工况



(c)下坡工况

图 1 研究对象实物结构及 24°坡道工况下滚筒输送单元负载方向示意

Fig. 1 Physical structure of the researched object and schematic of the load direction for the drum conveying unit under 24° ramp condition

1.2 PMSM 与基础磁场定向控制模型

在同步旋转 dq 坐标系下，PMSM 电压方程可表示为

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \tag{3}$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \tag{4}$$

机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - B\omega_m - T_m \tag{5}$$

电磁转矩为

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

$$T_e = 1.5p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

式中:u_d、u_q、i_d、i_q 和 L_d、L_q 分别为 d、q 轴电压、电流和电感;R_s 为定子电阻;ψ_f 为永磁体磁链;ω_e 为电角速度;ω_m 为机械角速度;J 为等效转动惯量;B 为粘性阻尼系数;T_m 为机械负载转矩;T_e 为电磁转矩;p 为极对数。

本文采用 $i_d^* = 0$ 的常规磁场定向控制(Field-Oriented Control, FOC)结构作为基础控制方式。速度环根据目标转速与实际转速偏差生成 q 轴电流指令,电流环完成 d、q 轴电流调节,以实现滚筒驱动转矩控制[18]。

1.3 变倾角坡道负载模型

设坡度角为 θ,以滚筒输送运行方向为参考定义上坡、下坡工况:$\theta>0$ 为上坡工况,表现为阻力;$\theta<0$ 为下坡工况,表现为助动;$\theta=0$ 为水平工况。T_{slope} 的正负号仅用于表征坡道负载相对于输送运行方向的阻力或助动特性。坡道等效负载转矩定义

$$T_{slope}(\theta) = K_g \sin\theta \quad (7)$$

式中:K_g 为坡道负载系数。

为与 24°极限坡度工况衔接,令 $\theta = 24°$、$T_{slope} \approx 10$ N·m,则:

$$K_g = \frac{10}{\sin 24°} \quad (8)$$

机械侧总负载可表示为

$$T_m = T_{slope}(\theta) + T_{dist} \quad (9)$$

式中:T_{slope} 为由坡度角确定的已知坡道负载;T_{dist} 为未知附加扰动,用于表征附加载荷。

1.4 变倾角参数调度 FOC 及参数有界性分析

为改善固定参数速度环 PI 在不同坡度角下适应性不足的问题,以坡度角绝对值构造调度变量,如式(10)所示:

$$\sigma = \frac{|\theta|}{24°},\ 0 \leqslant \sigma \leqslant 1 \quad (10)$$

速度环 PI 系数分别设计为

$$K_p(\theta) = K_{p0}(1 + a_p\sigma) \quad (11)$$

$$K_i(\theta) = K_{i0}(1 + a_i\sigma) \quad (12)$$

式中:$K_{p0}=0.14$、$K_{i0}=7$ 为水平工况基础参数;$a_p=0.30$、$a_i=0.10$ 为调度系数。

坡度角越大,速度环参数取值越高,以增强坡道负载变化下的速度保持能力。由于坡道等效负载幅值在 $|\theta| \leqslant 24°$ 范围内随倾角绝对值单调增加,采用归一化变量 $\sigma = |\theta|/\theta_{max}$ 可表征坡道负载强度变化。由 $|\theta| \leqslant \theta_{max}$ 可得,$0 \leqslant \sigma = |\theta|/\theta_{max} \leqslant 1$。

由此可得,式(11)、(12)中的调度参数满足条件 $K_{p0} \leqslant K_p(\theta) \leqslant K_{p0}(1+a_p)$,$K_{i0} \leqslant K_i(\theta) \leqslant K_{i0}(1+a_i)$。

当忽略扰动项时,速度误差的积分状态 $\xi = \int e_\omega dt$ 满足近似关系 $J\ddot{\xi} + [B + K_t K_p(\theta)]\dot{\xi} + K_t K_i(\theta)\xi = 0$,其特征方程为

$$Js^2 + [B + K_t K_p(\theta)]s + K_t K_i(\theta) = 0 \quad (13)$$

式中:K_t 为等效转矩系数。

本文所采用的变倾角参数调度仅在有限范围内对稳定 PI 参数适度增强,不会引入符号反转或无界增益。后续变倾角仿真也表明,系统在 0°、8°、16°和 24°各工况切换中均能稳定收敛。

1.5 重力前馈补偿

变倾角工况下,坡道负载 $T_{slope}(\theta)$ 可由坡度角计算获得。前馈等效转矩定义为

$$T_{ff} = K_{ff} T_{slope}(\theta) \quad (14)$$

式中:$K_{ff}=0.9$ 为前馈系数。

1.6 方向自适应 SMDO 残差补偿

已有研究从改进 SMDO、二阶滑模控制、先进控制方法综述以及扩张状态观测等方面进行了拓展[19-23]。针对扰动补偿、抖振衰减、负载转矩辨识及不匹配扰动抑制等问题,相关研究提出了多种滑模扰动观测策略[24-27]。此外,针对 PMSM 负载扰动、抖振及参数变化等问题,时变扰动观测器、改进趋近律滑模控制以及基于抗扰预测模型的控制方法也被用于提高系统的动态性能和抗扰能力[28-30]。在此基础上,为进一步增强抗扰性能,本文构建 SMDO 残差补偿结构。复合抗扰控制结构框图如图 2 所示。

首先,将扰动估计量 $\hat{d}$ 进行偏置校正,如式(15)所示:

$$\hat{d}_0(\theta) = \frac{1}{t_b - t_a}\int_{t_a}^{t_b} \hat{d}(t)\,dt,\ T_{dist} = 0 \quad (15)$$

残差扰动估计量为

$$d_{res} = \hat{d} - \hat{d}_0(\theta) \quad (16)$$

在固定±24°扰动矩阵中,经无附加扰动稳态标定,$\hat{d}_0$ 为 8.5 N·m。

考虑到上坡阻力扰动与下坡助动扰动的补偿方向相反,定义坡向符号函数为

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

$$s_\theta = sgn(\theta) \tag{17}$$

式中：$sgn(\theta)$用于确定坡向补偿方向。

方向自适应补偿增益为

$$K_{iq,\mathrm{eff}} = K_{iq0} s_\theta \tag{18}$$

式中：$K_{iq0}=1.5$。

当 $\theta=0$ 时，取 $sgn(\theta)=0$，此时坡向残差补偿电流为零。最终生成限幅后的有效观测补偿电流为

$$i_{q,\mathrm{obs}}^{\mathrm{eff}} = \mathrm{sat}(K_{iq,\mathrm{eff}} d_{\mathrm{res}}, -I_{\mathrm{obs,max}}, I_{\mathrm{obs,max}}) \tag{19}$$

式中：$I_{\mathrm{obs,max}}=3$ A 为 SMDO 残差补偿电流限幅。

最终，q 轴参考电流为

$$i_q^* = i_{q,\mathrm{PI}} + i_{q,\mathrm{ff}} + i_{q,\mathrm{obs}}^{\mathrm{eff}} \tag{20}$$

式中：$i_{q,\mathrm{PI}}$ 为速度环 PI 输出；$i_{q,\mathrm{ff}}$ 为重力前馈电流；$i_{q,\mathrm{obs}}^{\mathrm{eff}}$ 为方向自适应 SMDO 残差补偿电流。

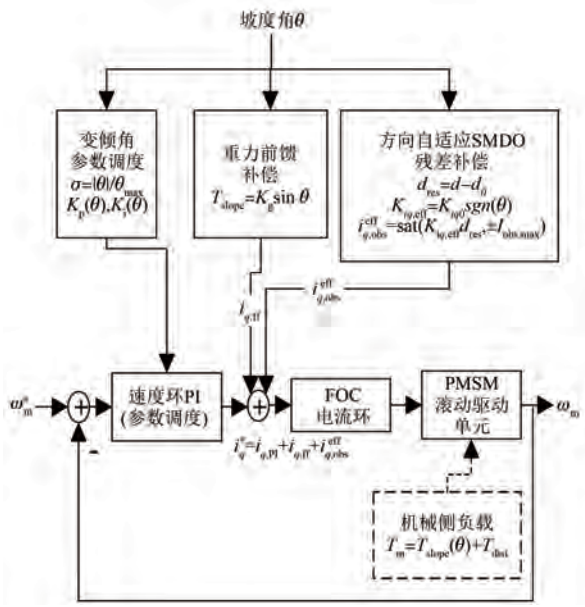


图 2 变倾角参数调度与前馈—观测复合抗扰控制结构

Fig. 2 Structure of variable-inclination parameter scheduling and feedforward-observer composite anti-disturbance control

2 仿真试验设计

基于 Matlab/Simulink 平台搭建仿真模型，控制对象为单滚筒 PMSM 驱动单元，主要仿真参数如表 1 所示。

为验证所提方法的分层作用，本文设计三组仿真试验。

第一组为变倾角参数调度 FOC 验证试验。在重力前馈和 SMDO 残差补偿均关闭的条件下，分别设置上坡变倾角序列 0°→8°→16°→24°和下坡变倾角序列 0°→−8°→−16°→−24°，比较固定参数 FOC 与参数调度 FOC 的最大转速偏差。

第二组为重力前馈补偿验证试验。在 SMDO 关闭且 $T_{\mathrm{dist}}=0$ 的条件下，分别针对上坡+24°和下坡−24°工况，比较 $K_{\mathrm{ff}}=0$ 与 $K_{\mathrm{ff}}=0.9$ 时的转速响应、速度环 PI 输出和前馈电流变化。

第三组为方向自适应 SMDO 残差补偿验证试验。考虑到 $|\theta|=24°$ 为传送带车标准规定的极限坡度工况，对应坡道负载最强，因此第三组试验选取固定±24°作为代表性严苛工况，用于检验方向自适应 SMDO 残差补偿在阻力型与助动型负载方向下的抗扰效果。在参数调度 FOC 与重力前馈均开启的条件下，分别设置上坡+24°与下坡−24°固定坡度工况，并在 $t=2$ s 时加入未知附加扰动。上坡扰动取 $T_{\mathrm{dist}}=+2,+5,+8$ N·m，下坡扰动取 $T_{\mathrm{dist}}=-2,-5,-8$ N·m。比较无 SMDO 残差补偿与方向自适应 SMDO 残差补偿两种情形。

表 1 主要仿真参数

Tab. 1 Main simulation parameters

参数名称	参数值
定子相电阻 R_s/Ω	0.96
d 轴电感 L_d/H	5.5×10^{-3}
q 轴电感 L_q/H	12×10^{-3}
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.1827
转动惯量 J/(kg·m²)	0.003
粘性阻尼系数 B/(N·m·s·rad⁻¹)	0.008
极对数 p	4
滚筒直径 D/m	0.05
目标转速 n^*/(r·min⁻¹)	115
目标角速度 ω_m^*/(rad·s⁻¹)	12.042 8
输送速度 v/(m·s⁻¹)	0.301 1
最大倾角 $\theta_{\max}$/(°)	24
坡道负载系数 K_g/(N·m)	24.585 9
K_{p0}	0.14
K_{i0}	7
a_p	0.30
a_i	0.10
K_{ff}	0.9
K_{iq0}	1.5
$I_{\mathrm{obs,max}}$/A	3
扰动估计偏置基准 $\hat{d}_0$/(N·m)	8.5

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

评价指标方面,本文以目标机械角速度附近的转速保持能力作为主要评价对象。针对变倾角参数调度试验,分别定义上坡和下坡工况下的不利方向转速偏差。对于上坡阻力型工况,有:

$$\Delta\omega_{\mathrm{m,up}}(t)=\max[\omega_{\mathrm{m}}^{*}-\omega_{\mathrm{m}}(t),0] \tag{21}$$

对于下坡助动型工况,有:

$$\Delta\omega_{\mathrm{m,dn}}(t)=\max[\omega_{\mathrm{m}}(t)-\omega_{\mathrm{m}}^{*},0] \tag{22}$$

对第 k 次倾角跃变,最大转速偏差定义为

$$\Delta\omega_{\mathrm{m,max}}^{(k)}=\max_{t\in[t_k,t_k+\Delta t]}\Delta\omega_{\mathrm{m}}(t) \tag{23}$$

式中:t_k 为倾角跃变时刻;Δt 为统计窗口。

针对重力前馈补偿试验,除最大转速偏差外,进一步统计速度环 PI 输出的稳态绝对均值和前馈电流稳态均值,以评价重力前馈对已知坡道负载的承担作用及其对速度环反馈调节负担的削减效果。

针对方向自适应 SMDO 残差补偿试验,上坡附加阻力扰动主要表现为转速跌落,最大转速跌落量定义为

$$\Delta\omega_{\mathrm{drop}}=\omega_{\mathrm{m}}^{*}-\min_{t\in[t_{\mathrm{d}},t_{\mathrm{d}}+\Delta t]}\omega_{\mathrm{m}}(t) \tag{24}$$

下坡助动扰动主要表现为转速上冲,最大转速上冲量定义为

$$\Delta\omega_{\mathrm{rise}}=\max_{t\in[t_{\mathrm{d}},t_{\mathrm{d}}+\Delta t]}\omega_{\mathrm{m}}(t)-\omega_{\mathrm{m}}^{*} \tag{25}$$

式中:t_{d} 为附加扰动施加时刻。

控制策略改善率统一定义为

$$\eta=\frac{X_0-X_{\mathrm{c}}}{X_0}\times 100\% \tag{26}$$

式中:X_0 为对照组转速指标;X_{c} 为改进控制策略的转速指标。

3 仿真结果与分析

3.1 变倾角参数调度 FOC 结果分析

图 3 给出了变倾角工况下固定参数 FOC 与参数调度 FOC 的响应对比。图 3(a)和图 3(c)分别按式(21)、(22)计算上坡、下坡不利方向转速偏差 $\Delta\omega_{\mathrm{m}}$,并选取上坡 16°→24°及下坡-16°→-24°代表性倾角跃变阶段进行局部展示;图 3(b)、(d)则按式(23)统计各倾角跃变阶段的最大转速偏差。

由图 3 可知,参数调度 FOC 在上、下坡工况下均能降低倾角变化引起的 $\Delta\omega_{\mathrm{m}}$,且在高倾角变化阶段改善效果更为明显。

表 2 给出了变倾角工况下最大转速偏差及

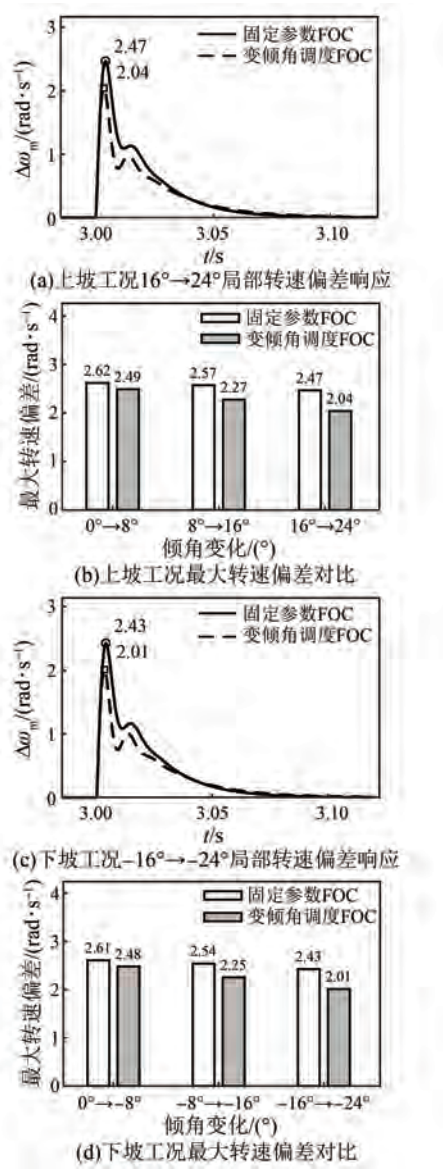


图 3 变倾角工况下固定参数 FOC 与参数调度 FOC 的响应对比

Fig. 3 Response comparison of fixed-parameter FOC and parameter-scheduled FOC under variable-inclination conditions

改善率的定量结果。上坡工况中,参数调度 FOC 在 0°→8°、8°→16°和 16°→24°三个阶段分别使最大转速偏差降低 5.09%、11.57% 和 17.16%;下坡工况中,对应改善率分别为 4.94%、11.44% 和 17.05%。结果表明,随着倾角增大,参数调度对最大转速偏差的抑制作用更加明显。这表明以 θ 为调度变量调整速度环参数,能够改善固定参数 FOC 在不同坡度下适应性不足的问题。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

3.2 重力前馈补偿效果分析

固定坡道工况下不同前馈系数对速度环 PI 稳态负担的影响结果如表 3 所示。由表 3 可知，$K_{ff}=0$ 时，已知坡道负载主要由速度环 PI 承担；$K_{ff}=0.9$ 时，$|i_{q,PI}|$均显著降低；$K_{ff}=1.0$ 时，完全前馈导致速度环产生反向修正，使$|i_{q,PI}|$反而增大。因此，本文采用 $K_{ff}=0.9$ 作为保守前馈系数。

为验证重力前馈对已知坡道负载的补偿作用，在 SMDO 关闭、$T_{dist}=0$ 的条件下，分别针对上坡+24°和下坡−24°工况开展有无重力前馈对比，结果如图 4 所示。

表 2 变倾角参数调度 FOC 对比结果

Tab. 2 Comparison results of parameter-scheduled FOC under variable-inclination conditions

工况	倾角变化	固定参数 FOC 最大转速偏差/(rad·s^{-1})	参数调度 FOC 最大转速偏差/(rad·s^{-1})	改善率/%
上坡	0°→8°	2.619 5	2.486 2	5.09
	8°→16°	2.570 1	2.272 7	11.57
	16°→24°	2.465 3	2.042 2	17.16
下坡	0°→−8°	2.607 3	2.478 4	4.94
	−8°→−16°	2.542 8	2.251 8	11.44
	−16°→−24°	2.425 2	2.011 8	17.05

表 3 固定坡道工况下不同前馈系数对速度环 PI 稳态负担的影响

Tab. 3 Effect of different feedforward coefficients on the steady-state burden of speed loop PI under fixed ramp conditions

工况	K_{ff}	$i_{q,ff}$ 估计/A	$i_{q,PI}$ 均值/A	i_q^* 均值/A
上坡	0	0	9.208 2	9.208 2
	0.9	8.997 8	0.210 4	9.208 2
	1.0	9.997 6	−0.789 4	9.208 2
下坡	0	0	−9.032 3	−9.032 3
	0.9	−8.997 8	−0.034 5	−9.032 3
	1.0	−9.997 6	0.965 3	−9.032 3

由图 4 可知，在无重力前馈时，坡道负载接入后系统转速偏差明显增大，速度环 PI 输出需要长期承担坡道负载补偿需求；加入重力前馈后，最大转速偏差减小，速度环 PI 输出的稳态绝对均值显著降低，表明前馈通道有效承担了可计算坡道负载项。

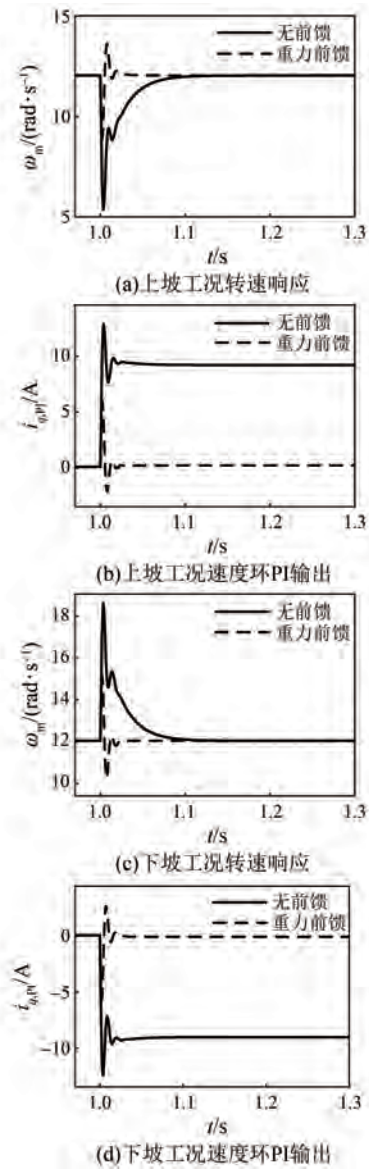


图 4 有无重力前馈下转速响应与速度环 PI 输出对比

Fig. 4 Comparison of speed response and speed loop PI output with and without gravity feedforward

表 4 进一步给出了重力前馈补偿效果的定量统计。上坡+24°工况下，加入重力前馈后最大转速偏差由 6.671 0 rad/s 降至 3.200 0 rad/s，稳态$|i_{q,PI}|$由 9.208 2 A 降至 0.210 4 A；下坡−24°工况下，最大转速偏差由 6.573 1 rad/s 降至 3.142 3 rad/s，稳态$|i_{q,PI}|$由 9.032 3 A 降至 0.034 5 A。并且上坡前馈电流为正，下坡前馈电流为负，表明前馈方向与坡道负载方向一致。结果表明，重力前馈能够有效承担已知坡道负载需求，降低速度反馈环节的调节压力。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

表 4 重力前馈补偿效果对比

Tab. 4 Comparison of gravity feedforward compensation effects

工况	K_{ff}	最大转速偏差/(rad·s^{-1})	稳态 $\lvert i_{q,\mathrm{PI}}\rvert$/A	稳态 $i_{q,\mathrm{ff}}$/A
上坡	0	6.671 0	9.208 2	0
+24°	0.9	3.200 0	0.210 4	8.997 8
下坡	0	6.573 1	9.032 3	0
−24°	0.9	3.142 3	0.034 5	−8.997 8

3.3 方向自适应 SMDO 残差补偿结果分析

为了验证补偿电流限幅是否实际参与控制过程,进一步给出了不同 $I_{\mathrm{obs,max}}$ 条件下的 $i_{q,\mathrm{obs}}^{\mathrm{eff}}$ 响应,如图 5 所示。由图 5 可知,上坡工况下,补偿电流随扰动增大而逐渐增大,并分别达到 2 A、3 A、4 A 和 5 A 的限幅值;下坡工况下,补偿电流方向相反,并在 $I_{\mathrm{obs,max}}=2$、3、4 A 时达到对应负向限幅。这表明所设补偿电流限幅并非形式参数,而是实际参与了 SMDO 残差补偿过程。

无 SMDO 与限幅 3 A 条件下的转速偏差响应如图 6 所示。由图 6 可知,引入 $I_{\mathrm{obs,max}}=3$ A 的 SMDO 残差补偿后,上坡工况下转速跌落后的恢复速度加快;下坡工况下转速上冲后的衰减过程也得到改善。这表明方向自适应 SMDO 残差补偿能够在上坡阻力型扰动和下坡助动型扰动下分别发挥补偿作用。

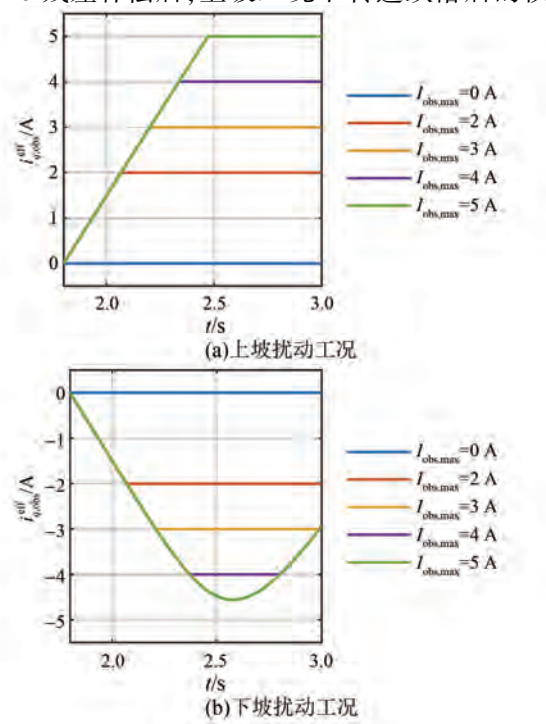


图 5 不同补偿电流限幅下的 SMDO 补偿电流响应

Fig. 5 SMDO compensation current responses under different compensation current limits

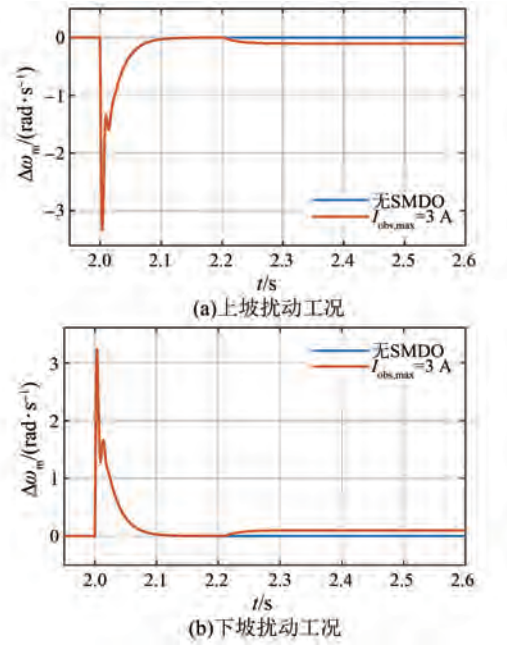


图 6 无 SMDO 与限幅 3 A 条件下的转速偏差响应

Fig. 6 Speed deviation responses without SMDO and with a 3 A compensation current limit

不同补偿电流限幅下的 SMDO 补偿效果对比如表 5 所示。由表 5 可知,当 $I_{\mathrm{obs,max}}=0$ 时,SMDO 残差补偿支路不参与 q 轴电流指令,附加扰动主要由速度环 PI 承担;当 $I_{\mathrm{obs,max}}$ 增大时,补偿电流幅值相应增大,速度环 $\lvert i_{q,\mathrm{PI}}\rvert$ 均值明显降低。以

表 5 不同补偿电流限幅下的 SMDO 补偿效果对比

Tab. 5 Comparison of SMDO compensation performance under different compensation current limits

工况	$I_{\mathrm{obs,max}}$/A	$\lvert i_{q,\mathrm{obs}}^{\mathrm{eff}}\rvert_{\max}$/A	$\lvert i_{q,\mathrm{PI}}\rvert$均值/A
上坡	0	0	4.776
	2	2.000	2.791
	3	3.000	1.911
	4	4.000	1.152
	5	5.000	0.785
下坡	0	0	4.598
	2	2.000	2.614
	3	3.000	1.738
	4	4.000	1.110
	5	4.556	0.950

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

$I_{obs,max}$ = 3 A 为例，上坡和下坡工况下 $|i_{q,PI}|$ 均值分别由无 SMDO 补偿时的 4.776 A 和 4.598 A 降至 1.911 A 和 1.738 A，表明 SMDO 残差补偿能够有效减轻速度环反馈调节负担。继续增大 $I_{obs,max}$ 虽可进一步降低 PI 输出，但补偿支路参与程度增强，恢复阶段更容易出现偏置或反向修正。因此，本文取 $I_{obs,max}$ = 3 A 作为扰动补偿能力与执行层动态平滑性之间的折中值。

在图 6 所示中等扰动工况基础上，进一步对不同附加扰动幅值进行矩阵化统计，结果如表 6 所示。其中，上、下坡工况分别采用 $\Delta\omega_{drop}$、$\Delta\omega_{rise}$ 作为评价指标。上坡工况中，当 T_{dist} = +2，+5，+8 N·m 时，方向自适应 SMDO 残差补偿分别使 $\Delta\omega_{drop}$ 降低 7.66%、3.13% 和 1.96%；下坡工况中，当 T_{dist} = −2，−5，−8 N·m 时，$\Delta\omega_{rise}$ 分别降低 7.75%、3.11% 和 1.95%。结果表明，经坡向符号调整后，该补偿结构能够在上坡阻力型扰动和下坡助动型扰动下分别产生正确方向的补偿作用，使两类工况下的转速偏差均得到降低，随着扰动幅值增大，改善率因补偿电流限幅而降低。

表 6　方向自适应 SMDO 残差补偿扰动矩阵结果

Tab. 6　Disturbance matrix results of direction-adaptive SMDO residual compensation

$\lvert T_{dist}\rvert$/(N·m)	上坡无补偿 $\Delta\omega_{drop}$/(rad·s^{-1})	上坡补偿后 $\Delta\omega_{drop}$/(rad·s^{-1})	改善率/%	下坡无补偿 $\Delta\omega_{rise}$/(rad·s^{-1})	下坡补偿后 $\Delta\omega_{rise}$/(rad·s^{-1})	改善率/%
2	1.325 9	1.224 3	7.66	1.300 5	1.199 7	7.75
5	3.323 4	3.219 2	3.13	3.235 1	3.134 5	3.11
8	5.307 8	5.204 0	1.96	5.148 6	5.048 1	1.95

3.4　不同控制措施对系统性能的影响及组合适用条件

不同控制措施的作用分工与组合条件如表 7 所示。三种控制措施并非简单叠加，而是分别对应不同类型的工况变化和扰动来源。

由表 7 可知，在变倾角工况下，参数调度 FOC 能够降低倾角切换引起的转速偏差；在固定坡道工况下，重力前馈可显著降低速度环 PI 对坡道负载的稳态承担量；在叠加附加扰动后，SMDO 残差补偿能够进一步减轻速度环反馈调节负担，并改善扰动后的转速恢复过程。三者组合使用的前提是：速度环和电流环基础闭环稳定，倾角调度参数保持正值且有界，坡道负载前馈方向与坡向一致，SMDO 补偿电流方向随坡向自适应调整，并通过 $I_{obs,max}$ 对补偿电流进行限幅。上述条件共同保证了控制器在不同坡道和扰动方向下的稳定运行。

表 7　不同控制措施的作用分工与组合条件

Tab. 7　Functional division and combination conditions of different control measures

控制措施	作用对象	组合使用条件
变倾角参数调度 FOC	坡道角变化引起的速度环工作点变化	$K_p(\theta)$、$K_i(\theta)$ 为正且有界
重力前馈补偿	可计算的坡道已知负载 T_{slope}	坡度角可获得，前馈方向与坡向一致
方向自适应 SMDO 补偿	附加扰动 T_{dist}、摩擦变化和建模残差	已知坡道负载由前馈承担，补偿方向随坡向调整
补偿电流限幅	SMDO 注入的 q 轴补偿电流	$i_{q,obs}^{eff}$ 有界，避免补偿过强

综上，所提复合控制结构能够在变倾角、固定坡道和附加扰动条件下分别发挥参数适应、已知负载补偿和残差扰动抑制作用。

4　结语

面向机场蛇形滚筒传送带车单滚筒驱动单元，建立了工程速度下的 PMSM 矢量控制模型，提出一种参数调度与前馈—观测复合抗扰控制方法。仿真结果表明，在上坡和下坡变倾角工况下，参数调度 FOC 相比固定参数 FOC 均能降低最大转速偏差，且倾角越大改善越明显；在固定±24°坡道工况下，重力前馈能够明显减小转速偏差，并大幅降低速度环 PI 输出负担，验证了已知坡道负载前馈补偿的有效性；自适应 SMDO 残差补偿结构通过扰动估计偏置校正、坡向增益调节和电流限幅生成有效 q 轴补偿电流。本文所提参数调度与

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

前馈—观测复合抗扰控制方法能够提高单滚筒驱动单元在变倾角及附加扰动条件下的速度保持能力,并为后续多滚筒协同控制研究提供执行层控制基础。

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

朱雨萱完成了方案设计、仿真模型搭建及验证和论文初稿撰写,高建树、朱雨萱参与论文审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, simulation model development and verfication, and paper writing were carried out by Zhu Yuxuan. The manuscript was revised by Gao Jianshu, Zhu Yuxuan. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参 考 文 献

[1] 中国民用航空局. 民用运输机场航班保障专用设备配置指南(试行)[S]. 北京: 中国民用航空局, 2015.
Civil Aviation Administration of China. Guidelines for the configuration of special equipment for flight support at civil transport airports (Trial) [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2015.

[2] Zhang D Y, Zhang Y, Yue Y B, et al. Optimal design of robust control for belt conveyor systems based on fuzzy dynamic model and Nash game [J]. Journal of the Franklin Institute, 2024, 361(11): 106925.

[3] Kozhubaev Y, Novak D, Karpukhin V, et al. Research on monitoring and control systems for belt conveyor electric drives [J]. Automation, 2025, 6(3): 34.

[4] 李耀华, 王自臣, 何雨勰, 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]. 电机与控制应用, 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.

[5] 马雨新, 赵朝会. 基于相位超前校正 LESO 的 PMSM 无位置传感器控制研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(7): 778-787.
Ma Y X, Zhao C H. Research on PMSM sensorless control of LESO based on phase lead correction [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(7): 778-787.

[6] Lu M L, Werren D. Time study for the power stow roller track conveyor for airport baggage handling [C]// Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2023, 67(1): 829-833.

[7] Sorensen R A, Nielsen M, Karstoft H. Routing in congested baggage handling systems using deep reinforcement learning [J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2020, 27(2): 139-152.

[8] Yang T, Du Y W, Li B, et al. An enhanced equivalent input disturbance approach to current control of PMSM with periodic and aperiodic disturbances [J]. Science China Information Sciences, 2025, 68: 132205.

[9] 张国强, 杜锦华. 永磁同步电机无位置传感器控制技术研究综述[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 1-13.
Zhang G Q, Du J H. Review of position sensorless control technology for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 1-13.

[10] 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 S C, Zhou S 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.

[11] 高梓伦, 张攀, 周书文, 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, Zhang P, Zhou S W, et al. Robust model predictive control algorithms for dual three-phase permanent magnet synchronous motors based on super-twisting sliding mode observers [J]. Electric

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

Machines & Control Application，2025，52(5)：562-571.

[12] 洪俊杰，赵明郎，黄龙蛰，等. 带扰动补偿的永磁同步电机预测速度控制[J]. 电机与控制应用，2025，52(1)：94-105.
Hong J J，Zhao M L，Huang L Z，et al. Predictive speed control for permanent magnet synchronous motors with disturbance compensation [J]. Electric Machines & Control Application，2025，52(1)：94-105.

[13] Wang Y H. A robust observer-based speed control of permanent magnet synchronous motors based on non-singular terminal sliding mode observer [J]. Electrical Engineering，2025，107：9283-9293.

[14] 程梦坤，储剑波. 基于分数阶扩展滑模扰动观测器的 PMSM 无模型控制算法研究[J]. 电机与控制应用，2024，51(10)：51-63.
Cheng M K，Chu J B. Research on model-free control algorithm for PMSM based on fractional-order extended sliding mode disturbance observer [J]. Electric Machines & Control Application，2024，51(10)：51-63.

[15] 李浩东，李长兵. 永磁同步伺服系统摩擦力和扰动补偿方法研究[J]. 电机与控制应用，2022，49(1)：22-27.
Li H D，Li C B. Research on friction and disturbance compensation of permanent magnet synchronous servo system [J]. Electric Machines & Control Application，2022，49(1)：22-27.

[16] 刘栋良，赵金洋，董旭辉，等. 扩展卡尔曼观测器下的永磁同步电机负载扰动抑制研究[J]. 电工技术学报，2025，40(8)：2488-2503.
Liu D L，Zhao J Y，Dong X H，et al. Research on load disturbance suppression technology of permanent magnet synchronous motor under extended Kalman filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2025，40(8)：2488-2503.

[17] 刘小俊. 带全阶观测器的永磁同步电机电流滑模控制器研究[J]. 电机与控制应用，2025，52(6)：690-699.
Liu X J. Research on current sliding mode controller with full-order observer for PMSM [J]. Electric Machines & Control Application，2025，52(6)：690-699.

[18] Ran Y K，Qiao M Z，Sun L C，et al. Review of position sensorless control technology for permanent magnet synchronous motors [J]. Energies，2025，18(9)：2302.

[19] Liu L，Dong H，Xu X B，et al. Improved sliding mode disturbance observer-based model-free finite-time terminal sliding mode control for IPMSM speed ripple minimization [J]. Control Engineering Practice，2025，155：106178.

[20] Zhang Z，Chen Z R，Li N，et al. A dynamic convergence second-order sliding mode control structure for PMSM with an observer based on a novel sliding mode reaching law [J]. Control Engineering Practice，2025，164：106504.

[21] Moulai L A，Zaihidee F M，Mekhilef S，et al. Implementation of deep reinforcement learning in permanent magnet synchronous motors control：A review [J]. Annual Reviews in Control，2025，60：101014.

[22] Tuyen T T，Yang J，Liao L Q，et al. Recent advances in sliding mode control techniques for permanent magnet synchronous motor drives：A review [J]. Electronics，2025，14(19)：3933.

[23] 东野亚兰，杨淑英，王奇帅，等. 基于增强型扩张状态观测器的永磁同步电机低抖振高抗扰二阶终端滑模电流控制[J]. 电工技术学报，2024，39(8)：2434-2448.
Dongye Y L，Yang S Y，Wang Q S，et al. Enhanced extended state observer based second order terminal sliding mode current control for permanent magnet synchronous machine with low chattering and improved disturbance rejection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(8)：2434-2448.

[24] Ding F F，Liu X D. High-order fast fixed-time sliding mode single-loop control for PMSM with disturbance compensator [J]. Control Engineering Practice，2025，164：106509.

[25] Qu L Z，Qiao W，Qu L Y. Active-disturbance-rejection-based sliding-mode current control for permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2021，36(1)：751-760.

[26] Yim J，You S，Lee Y，et al. Chattering attenuation disturbance observer for sliding mode control：Application to permanent magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2023，70(5)：5161-5170.

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

[27] Tang S, Shi T, Cao Y, et al. Simultaneous identification of load torque and moment of inertia of PMSM based on variable structure extended sliding mode observer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(7): 8585-8596.

[28] 陈勇志, 张立嘉, 刘旭东. 基于时变扰动观测器的永磁同步电机预设性能滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 148-158.
Chen Y Z, Zhang L J, Liu X D. Preset performance sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on time-varying disturbance observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 148-158.

[29] 刘澎澎, 王仲根, 王珊珊, 等. 基于改进双幂次趋近律的SPMSM滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 201-209.
Liu P P, Wang Z G, Wang S S, et al. Sliding mode control of SPMSM using an improved double-power reaching law [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 201-209.

[30] 陈再发, 刘彦呈. 基于抗扰预测模型的表贴式永磁同步电机占空比控制集模型预测控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 171-180.
Chen Z F, Liu Y C. Model predictive control of duty cycle control set for surface-mounted permanent magnet synchronous motor based on anti-disturbance prediction model [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 171-180.

收稿日期:2026-05-27
收到修改稿日期:2026-06-25

作者简介:

高建树(1966—),男,博士,研究员,研究方向为民航地面特种设备开发、特种车辆机械、电气与控制技术、智慧机场以及跟踪与定位技术,2909488508@qq.com;

*通信作者:朱雨萱(2001—),女,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制、机场输送装备电驱动系统控制,2024022208@cauc.edu.cn。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.