

基于自抗扰重复控制器的永磁同步电机 转速波动抑制策略

郝正杰, 刘田震*, 崔泰赞, 雷 龙

(东北石油大学 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163319)

Speed Fluctuations Suppression Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Active Disturbance Rejection Repetitive Controller

Hao Zhengjie, Liu Tianzhen*, Cui Taiyun, Lei Long

(School of Electrical and Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163319, China)

Abstract: [Objective] In practical applications, the speed of permanent magnet synchronous motor (PMSM) is susceptible to multi-source coupled disturbances, rendering traditional motor control inadequate for meeting the control requirements of PMSM in certain high-precision applications. Therefore, it is of great significance to study anti-disturbance control strategies for PMSM against periodic and aperiodic disturbances to suppress speed fluctuations and enhance the control accuracy of the motor system. [Methods] Addressing the speed fluctuation issue of permanent magnet synchronous motors under the influence of periodic and non-periodic disturbances, a speed fluctuation suppression strategy for PMSM based on active disturbance rejection repetitive controller was proposed to achieve speed fluctuation suppression. Firstly, the error-based active disturbance rejection controller (EBADRC) was improved by replacing the integrator in the extended state observer (ESO) with a low-pass filter to enhance its anti-disturbance capability. Secondly, a repetitive controller was used to improve the control law of EBADRC, thereby achieving suppression of periodic fluctuations caused by various disturbance frequencies. Finally, experimental comparisons were conducted on a prototype test platform between the control strategy proposed in this paper, EBADRC, improved

EBADRC, and PI control. [Results] Under the conditions of sudden 50% and 100% load increases, the proposed control strategy was able to better suppress periodic and aperiodic disturbances. Under the condition of a sudden 100% load increase at rated speed of 2 000 r/min, the speed drop when using the proposed control method was reduced by 65, 78, and 85 r/min compared to when using a PI controller, EBADRC, and improved EBADRC, respectively. The periodic speed fluctuations were reduced by 7, 12, and 26 r/min, respectively. The steady-state speed test of the proposed method under b_0 mismatch conditions showed that the PMSM still operated stably when the parameter b_0 was doubled or halved, thus demonstrating the good parameter robustness of the proposed method. [Conclusion] The speed fluctuation suppression strategy for PMSM based on active disturbance rejection repetitive controller proposed in this paper can effectively suppress both periodic and aperiodic disturbances and exhibits good robustness.

Key words: permanent magnet synchronous motor; active disturbance rejection control; repetitive control; speed fluctuation suppression

摘要: [目的]在实际应用中,永磁同步电机(PMSM)转速易受到多源耦合扰动的影响,导致传统电机控制无法满足PMSM在一些高精度应用领域中的控制要求。因此研究针对周期性和非周期性扰动的PMSM抗扰控制策略来抑制转速波动对提高电机系统控制精度具有重要意义。[方法]针对受周期性与非周期性扰动影响下永磁同步电机的转速波动问题,提出了一种基于自抗扰重复控制器的永磁同步电机转速波动抑制策略,来实现转速波动抑制。首先对基于误差的自抗扰控制器(EBADRC)进

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助(2024MD763933);黑龙江省优秀青年教师基础研究支持计划(YQJH2024043)

General Funding of the China Postdoctoral Science Foundation (2024MD763933); Basic Research Support Program for Excellent Young Teachers in Heilongjiang Province (YQJH2024043)

行改进,采用低通滤波器去替代 ESO 中的积分器,增强其抗干扰能力。其次使用重复控制器去改进 EBADRC 的控制律,从而实现对多种干扰频率造成的周期性波动的抑制。最后在样机试验平台上对本文所提控制策略以及 EBADRC、改进 EBADRC 和 PI 控制进行试验对比。【结果】在突加 50% 负载与突加 100% 负载的工况下,所提控制策略可以更好地抑制周期性干扰与非周期性干扰。在额定转速 2 000 r/min 时,突加 100% 负载工况下,采用所提控制方法时的转速跌落比采用 PI 控制器、EBADRC、改进 EBADRC 时的转速跌落分别减小了 65、78 和 85 r/min,周期性转速波动分别减小了 7、12 和 26 r/min。所提方法在 b_0 不匹配工况下的转速稳态试验表明,在参数 b_0 增大一倍或减小一倍时,PMSM 仍运行稳定,由此证明所提方法的参数鲁棒性能较好。【结论】本文所提的基于自抗扰重复控制器的永磁同步电机转速波动抑制策略可以有效抑制周期性与非周期性扰动,并具备良好的鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机;自抗扰控制;重复控制;转速波动抑制

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 因其高效率、高功率密度和优异的调速性能^[1],吸引了国内外学者的广泛关注。PMSM 在现代工业领域中拥有极好的应用前景,包括在数控机床^[2]、航空航天^[3]、空调压缩机^[4-6]、电动汽车^[7]、机器人^[8]、风机^[9-10] 等对控制性能要求较高的应用领域。但在实际应用中,PMSM 转速易受到多源耦合扰动的影响,例如负载转矩突变、参数摄动等非周期性扰动,还有电流采样误差、齿槽转矩、磁链谐波、逆变器死区、编码器量化误差等周期性扰动。这些扰动不仅会带来噪音,还会引起机壳振动或导致能量损耗,进而导致传统电机控制无法满足 PMSM 在一些高精度应用领域中的控制要求。因此研究针对周期性和非周期性扰动的 PMSM 抗扰控制策略来抑制转速波动对提高电机系统控制精度具有重要意义。

近年来,针对 PMSM 受周期性与非周期性干扰产生的转速波动,国内外学者提出了一系列控制算法来抑制转速波动,包括谐振控制^[11],重复控制^[12],自抗扰控制 (Active Disturbance Rejection Controller, ADRC)^[13-15],迭代学习^[16],

谐波注入算法^[17]等。文献[18]针对压缩机制冷系统中低速工况下转速周期性波动问题,采用谐振控制并联比例-积分 (Proportional-Integral, PI) 控制作为转速控制回路来抑制转速波动。文献[19]针对增程器转速系统中的转速波动,采用自适应反步法和重复控制相结合的控制策略来抑制转速波动。文献[20]提出了一种迭代学习控制和有限冲激响应滤波器的控制方案,利用迭代学习的输出信息设计有限冲激响应滤波器,从而增强电机控制系统的抗扰动能力。

ADRC 凭借其优秀的抗干扰能力,以及结构简单和参数易调节等特点而逐渐成为 PMSM 控制策略的重要研究方向。但是 ADRC 中的扩张状态观测器 (Extended State Observer, ESO) 的带宽有限,难以抑制周期性转速波动。文献[21]提出 ADRC 与自适应谐振控制器结合作为 PMSM 速度环控制器来抑制周期性与非周期性干扰,通过 ESO 观测出不确定扰动的频率,对谐振频率实现自动调整,从而实现对不确定扰动的抑制能力。文献[22]提出 ADRC 与矢量谐振器结合,通过矢量谐振器来抑制 PMSM 控制系统中的电流谐波,通过 ADRC 来抑制电机参数摄动,将 ESO 的观测扰动通过线性反馈的方法进行扰动补偿,进一步提高了电机控制系统的抗扰动能力。此外有学者提出了单自由度 ADRC^[23],将参考信号的微分值融入到总扰动中,并通过观测,避免了跟踪微分器的使用,使其结构简单且不损失抗干扰能力。该单自由度 ADRC 相比传统 ADRC 能更好地应用在工业控制器上,但单自由度 ADRC 对非周期性干扰的抑制能力不足,需要进一步改进。文献[24]采用两个谐振控制器去拓宽 ESO 的带宽,能针对两种特定的谐波频率造成的周期性干扰进行抑制,但结构较为复杂。

为了抑制 PMSM 的周期性与非周期性波动,本文提出了一种自抗扰重复控制器。首先对基于误差的自抗扰控制器 (Error-Based Active Disturbance Rejection Controller, EBADRC) 进行改进,采用低通滤波器去替代 ESO 中的积分器,增强其抗干扰能力;然后使用重复控制器去改进 EBADRC 的控制律,重复控制器可以在干扰频率的基频与倍频处提供高增益^[19],从而实现

对多种干扰频率造成的周期性波动的抑制。

1 建立考虑周期性与非周期性干扰的永磁同步电机数学模型

为了简化 PMSM 的建模,常常忽略 PMSM 驱动系统中电流采样误差、逆变器死区、齿槽转矩、电机参数摄动等非理想因素的影响。这些因素会给电机转速带来周期性和非周期性的干扰,因此为了实现 PMSM 驱动系统的精确速度控制,首先需要建立考虑周期性与非周期性干扰的 PMSM 数学模型。

PMSM 的动态方程为

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

式中: ω_m 为电机的机械转速; J 为转动惯量; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; B 为摩擦因数。

其中 T_e 的表达式为^[18]

$$T_e = \frac{3}{2}p_n I_s \sin\beta [I_s \cos\beta (L_d - L_q) + \psi_f] \quad (2)$$

式中: p_n 为电机极对数; ψ_f 为永磁体磁链; I_s 为定子电流; β 为定子电流和 d 轴电流之间的夹角; L_d 和 L_q 分别为电机 d 、 q 轴的电感。

将式(2)代入式(1)可得:

$$\frac{d}{dt}\omega_m = bI_s + T_d - \frac{1}{J}(T_L + B\omega_m) \quad (3)$$

$$b = \frac{3}{2J}p_n \psi_f \sin\beta \quad (4)$$

$$T_d = \frac{3}{2J}p_n (L_d - L_q) I_s^2 \sin\beta \cos\beta \quad (5)$$

由于 PMSM 驱动系统中会出现例如负载转矩突变、参数摄动等非周期性扰动,还有电流采样误差、齿槽转矩、磁链谐波、逆变器死区、编码器量化误差等周期性干扰,这些因素会造成转速出现周期性干扰 f_p 与非周期性干扰 f_{ap} 。考虑这些因素造成的干扰,PMSM 的机械动态方程可进一步表示为

$$\frac{d}{dt}\omega_m = bI_s + T_d - \frac{1}{J}(T_L + B\omega_m) + f_{ap} + f_p \quad (6)$$

定义 f_{total} 为 PMSM 系统受到的总干扰,则式(6)可改写为

$$\frac{d}{dt}\omega_m = b_0 I_s + f_{total} \quad (7)$$

式中: b_0 是 b 的标么值。

$$f_{total} = f_{ap} + f_p + T_d - \frac{1}{J}(T_L + B\omega_m) + \Delta b I_s \quad (8)$$

$$\Delta b = b - b_0 \quad (9)$$

2 改进 EBADRC 的设计及性能分析

2.1 改进 EBADRC 的设计

EBADRC 将参考转速的微分值融入到总扰动中,从而省去了跟踪微分器,并简化了控制器结构。定义转速误差值 e_m 为 $\omega_{m,ref}$ 与 ω_m 之差, $\omega_{m,ref}$ 为参考转速, ω_m 为实际转速,则式(7)可改写为

$$\frac{d}{dt}e_m = f_e - b_0 I_s \quad (10)$$

式中: f_e 为新的总扰动。

$$f_e = \frac{d}{dt}\omega_{m,ref} - f_{total} \quad (11)$$

将新的总扰动扩张为状态变量,建立状态空间方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}e_m &= f_e - b_0 I_s \\ \frac{d}{dt}f_e &= z_e \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: z_e 为总扰动的微分值。

EBADRC 由 ESO 和控制律构成^[24],因此有:

(1) ESO 可设计为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}\hat{e}_m &= \hat{f}_e - b_0 I_s + g_1(e_m - \hat{e}_m) \\ \frac{d}{dt}\hat{f}_e &= g_2(e_m - \hat{e}_m) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: \hat{e}_m 为输入转速给定值与转速差值的观测值; \hat{f}_e 为总扰动的观测值; g_1 、 g_2 均为扩张状态观测器的增益。

根据文献[11]通常有:

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= 2\omega_0 \\ g_2 &= \omega_0^2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: ω_0 为 ESO 的带宽。

ω_0 决定了 ESO 的干扰观测能力并对系统稳定性造成影响,通常设置为 5~10 倍的截止频率。

(2)控制律设计为

$$I_o = \frac{1}{b_0}(K_e e_m + \hat{f}_e) \quad (15)$$

式中: K_e 为控制律带宽,决定转速环响应速度。

通常有:

$$K_e = \omega_c \quad (16)$$

式中: ω_c 为截止频率。

根据式(12)~式(14),可求得实际扰动到估算扰动的传递函数为

$$G_{\text{ESO}}(s) = \frac{\hat{f}_e(s)}{f_e(s)} = \frac{\omega_0^2}{(s + \omega_0)^2} \quad (17)$$

根据 ESO 的传递函数可以发现,ESO 观测扰动的能力类似于低通滤波器,为了进一步增强 ESO 的非周期性干扰观测能力,用低通滤波器 h_1 来替换 EBADRC 中 ESO 的积分器从而对 EBADRC 进行改进,因此有:

$$h_1(s) = k_r / (s + \omega_c) \quad (18)$$

式中: k_r 为低通滤波器增益。

改进后的 ESO 为一阶低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)-ESO。则 LPF-ESO 的方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \hat{e}_m &= \hat{f}_e - b_0 I_s + g_1(e_m - \hat{e}_m) \\ \hat{f}_e &= g_2 h_1(e_m - \hat{e}_m) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

根据式(7)、式(13)与式(15),构建改进 EBADRC 的控制器框图,如图 1 所示。

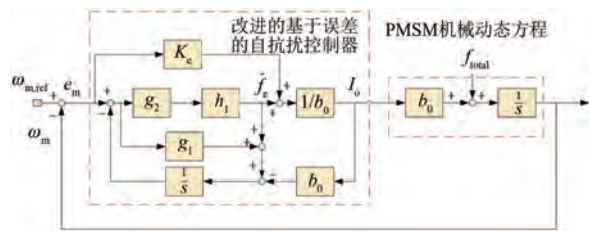


图 1 改进 EBADRC 控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of the improved EBADRC control system

2.2 改进 EBADRC 的抗扰性能分析

采用频域分析法分析所提改进 EBADRC 的性能。根据式(12)、式(14)和式(19)得到 LPF-ESO 的估算扰动与实际扰动的传递函数为

$$G_{\text{LPF-ESO}}(s) = \frac{k_r \omega_0^2}{s^2 + s(\omega_c + 2\omega_0) + 2\omega_0 \omega_c + k_r \omega_0^2} \quad (20)$$

根据式(12)~式(16),改进前 EBADRC 的传

递函数为

$$G_{c1}(s) = \frac{I_o(s)}{e_m(s)} = \frac{\omega_c(s + \omega_0)^2 + \omega_0^2 s}{b_0(s^2 + 2\omega_0 s)} \quad (21)$$

根据式(12)、式(14)和式(19),改进后 EBADRC 的传递函数为

$$G_{c2} = \frac{\omega_c s^2 + s(\omega_c^2 + 2\omega_c \omega_0 + \omega_0^2 k_r) + \omega_c k_r \omega_0^2 + 2\omega_0 \omega_c^2}{b_0(s + 2\omega_0)(s + \omega_c)} \quad (22)$$

根据图 1 所示,改进前 EBADRC 的转速闭环扰动传递函数为

$$G_{d1}(s) = \frac{\omega_m(s)}{f_{\text{total}}(s)} = \frac{s(s + 2\omega_0)}{(s + \omega_c)(s + \omega_0)^2} \quad (23)$$

改进后 EBADRC 的转速环闭环扰动传递函数为

$$G_{d2}(s) = \frac{s^2 + s(\omega_c + 2\omega_0) + 2\omega_0 \omega_c}{s^3 + 2s^2(\omega_c + \omega_0) + a_1 s + a_2} \quad (24)$$

其中:

$$a_1 = 4\omega_0 \omega_c + \omega_c^2 + k_r \omega_0^2 \quad (25)$$

$$a_2 = k_r \omega_0^2 \omega_c + 2\omega_0 \omega_c^2 \quad (26)$$

取 $\omega_c = 20\pi$ rad/s, $\omega_0 = 50\pi$ rad/s, $k_r = 5$ 绘制 LPF-ESO 和 ESO 的伯德图,如图 2 所示。由图 2 可知,LPF-ESO 在低频段与 ESO 的观测能力相似,在低频段对干扰估计的稳态误差几乎为 0;但是在中高频段,LPF-ESO 拥有更好的观测能力。绘制改进 EBADRC 与 EBADRC 的扰动传递函数的伯德图,如图 3 所示。由图 3 可知,改进 EBADRC 比 EBADRC 在零低频段的抗干扰能力更强,且改进 EBADRC 在零低频段的相位偏移更小,对干扰抑制的稳态误差几乎为 0;但其对中频段的周期性扰动抑制能力较弱。为了进一步探究 ω_0 与 k_r 对改进 EBADRC 的影响,分别设置 $\omega_0 = 25\pi, 50\pi, 75\pi$ rad/s, $k_r = 2, 5, 10$ 绘制 EBADRC 的伯德图,如图 4 和图 5 所示。由图 4 可知,增大 ω_0 可以增强改进 EBADRC 在低频段的抗干扰能力,但 ω_0 过大会增加系统中频段的相位偏移,降低中频段的周期性干扰抑制能力。由图 5 可知,增大 k_r 可以增强改进 EBADRC 的抗扰动能力,但是 k_r 过大会降低中频段的周期性干扰抑制能力,使中频段出现额外的相位偏移,因此需要选择大小合适的 ω_0 和 k_r 。

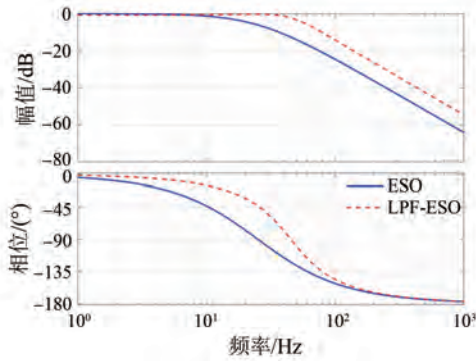


图 2 LPF-ESO 与 ESO 对干扰估计性能的伯德图
Fig. 2 Bode diagram of disturbance observation performance of LPF-ESO and ESO

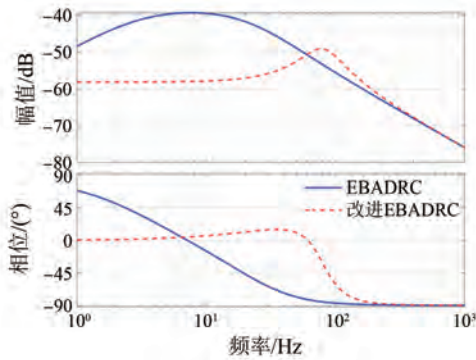


图 3 EBADRC 与改进 EBADRC 的转速闭环扰动传递函数伯德图
Fig. 3 Bode diagram of the speed closed-loop disturbance transfer function for EBADRC and improved EBADRC

Fig. 3 Bode diagram of the speed closed-loop disturbance transfer function for EBADRC and improved EBADRC

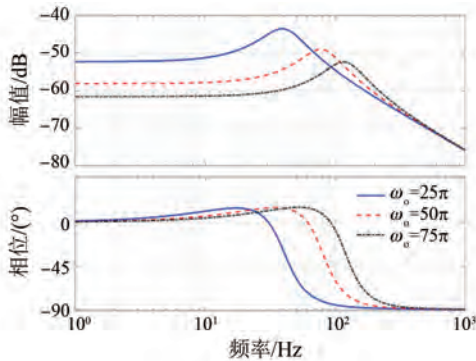


图 4 不同 ω_0 下改进 EBADRC 的扰动传递函数伯德图
Fig. 4 Bode diagram of disturbance transfer function for improved EBADRC with varying ω_0

综上所述,改进 EBADRC 可以抑制转速环内零低频段存在的非周期性扰动,但对中频段的周期性干扰的抑制能力不足,导致系统在周期性干扰下难以稳定。

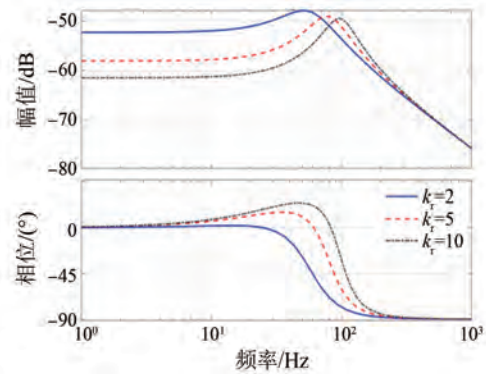


图 5 不同 k_r 下改进 EBADRC 的扰动传递函数伯德图
Fig. 5 Bode diagram of disturbance transfer function for improved EBADRC with varying k_r

3 自抗扰重复控制器设计及性能分析

EBADRC 因为带宽不足导致其难以抑制周期性干扰,而改进 EBADRC 在中频段对周期性干扰的抑制能力不足,因此本文采用重复控制器来增强改进 EBADRC 的控制律。重复控制器通过引入任意周期信号的内部模型,将上一周期的误差用于当前控制量的生成,在干扰信号的基频和倍频处提供较高的增益,从而可以实现周期性干扰抑制^[13]。

3.1 自抗扰重复控制器设计

重复控制器的传递函数如下:

$$G_{rc}(s) = \frac{k_{rc} \cdot e^{-sTN}}{1 - q(s) \cdot e^{-sTN}} \quad (27)$$

式中: k_{rc} 为重复控制器增益; e^{-sTN} 为重复控制器的延时模块,其中 N 为系统采样频率(即 f_s 与扰动信号基频 f_d 之比), T 为时间常数; $q(s)$ 通常取一个略小于 1 的常数或低通滤波器。

重复控制器的结构图如图 6 所示,本文提出的自抗扰重复控制器的框图如图 7 所示。

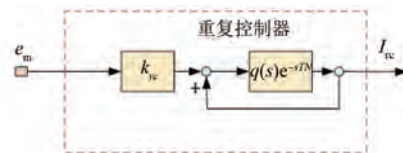


图 6 重复控制器控制框图

Fig. 6 Block diagram of repetitive controller

重复控制器的控制律 I_{rc} 为

$$I_{rc} = e_m \times G_{rc} \quad (28)$$

总控制律 I_s 为

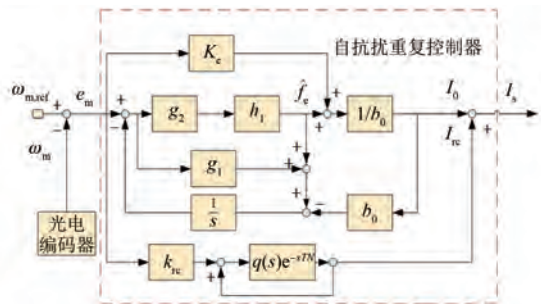


图 7 自抗扰重复控制器结构框图

Fig. 7 Block diagram of active disturbance rejection repetitive controller

$$I_s = I_0 + I_{rc} \quad (29)$$

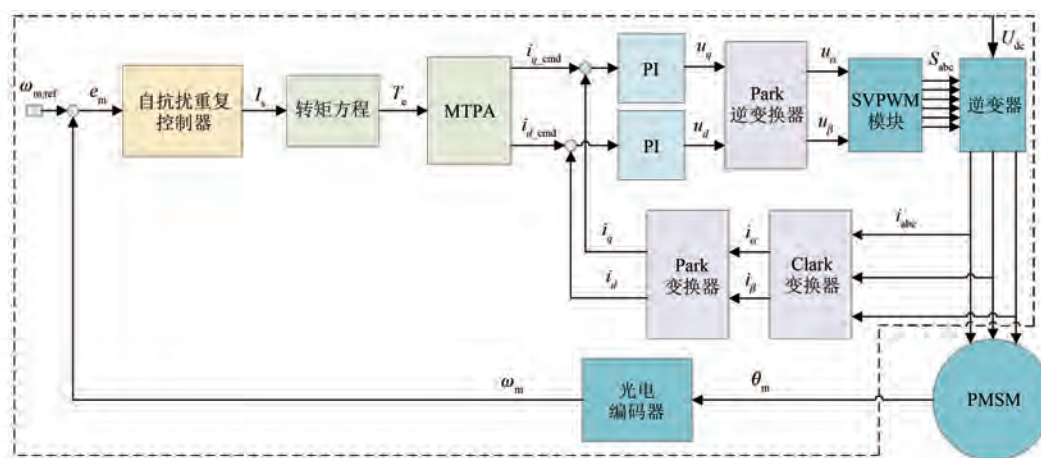


图 8 基于自抗扰重复控制器的 PMSM 控制框图

Fig. 8 Block diagram of PMSM control based on the active disturbance rejection repetitive controller

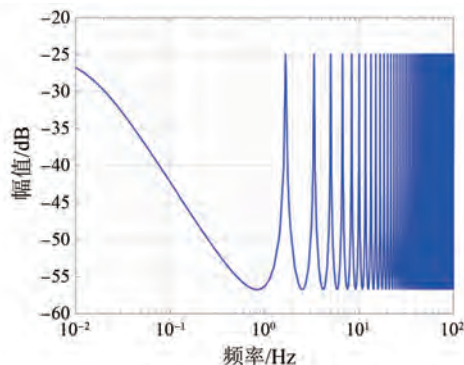


图 9 重复控制器的伯德图

Fig. 9 Bode diagram of repetitive controller

根据图 7 所示, 自抗扰重复控制器的传递函数为

$$G_{c3}(s) = \frac{I_s(s)}{e_m(s)} = G_{c2}(s) + G_{rc}(s) \quad (30)$$

自抗扰重复控制器的转速闭环扰动的传递函

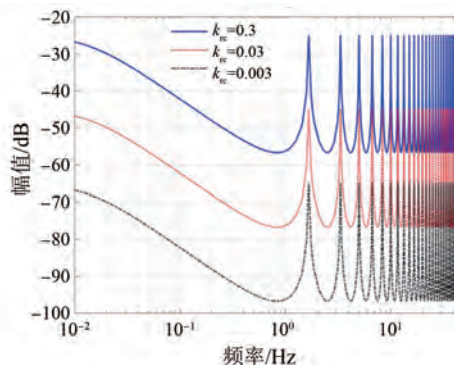


图 10 不同 k_{rc} 下重复控制器的伯德图

Fig. 10 Bode diagram of repetitive controller with varying k_{rc}

数为

$$G_{d3}(s) = \frac{\omega_m(s)}{f_{total}(s)} = \frac{1}{s + b_0 G_{c3}(s)} \quad (31)$$

取 $\omega_c = 20\pi$ rad/s, $\omega_0 = 50\pi$ rad/s, $k_r = 5$, $k_{rc} =$

0.03, $q(s) = 0.95$, 绘制重复控制器、改进 EBADRC 控制器和自抗扰重复控制器的转速闭环扰动传递函数伯德图, 如图 11 所示。由图 11 可知, 本文所提的自抗扰重复控制器对零低频段和中高频段的扰动具有很强的衰减作用, 可以抑制周期性与非周期性干扰, 转速环具有良好的稳态性能。

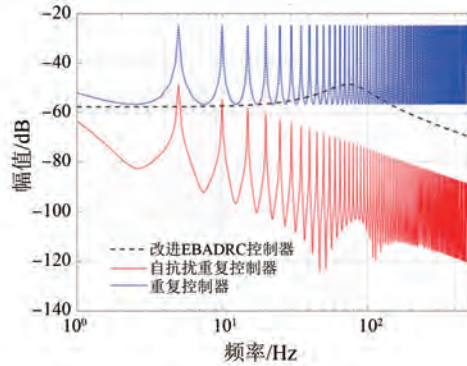


图 11 三种不同控制器的转速闭环扰动传递函数伯德图

Fig. 11 Bode diagram of speed closed-loop disturbance transfer function of three different controllers

3.3 基于自抗扰重复控制器稳定性分析

根据图 7, 自抗扰重复控制器转速开环传递函数为

$$G_{open}(s) = \frac{b_0 G_{e3}(s)}{s} \quad (32)$$

取 $\omega_c = 20\pi$ rad/s, $\omega_0 = 50\pi$ rad/s, $k_r = 0.1$, $k_{re} = 0.03$, $q(s) = 0.95$, 根据式 (30) 绘制自抗扰重复控制器转速开环的奈奎斯特图, 如图 12 所示。由图 12 可知, 奈奎斯特图的曲线不包围 $(-1, j0)$ 。因此选择以上参数时, 系统是稳定的。

4 试验验证及结果分析

4.1 试验平台搭建

为了进一步验证所提方法对 PMSM 控制系统的有效性和可行性, 搭建了如图 13 所示的 750 W 的 PMSM 试验平台。在试验平台上进行了本文所提控制策略以及 EBADRC、改进 EBADRC 和 PI 控制的试验对比, 选用的电机参数如表 1 所示。该试验平台采用磁粉制动器来产生负载转矩, 控制算法由运行频率为 8 kHz 的 R5F524T8ADFM MCU 执行, PMSM 则由开关频率为 8 kHz 的 STGIPQ5C60T 模块驱动。轴端安装有光电编码器从而获得电机实际转速。

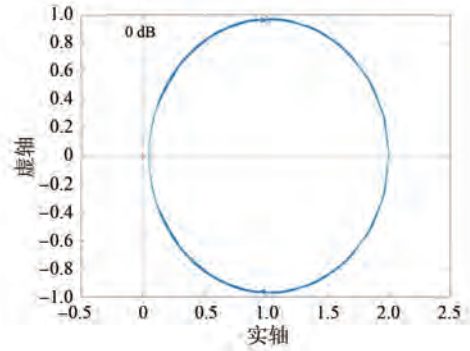


图 12 自抗扰重复控制器转速开环的奈奎斯特图
Fig. 12 Nyquist curve of speed open-loop transfer function of active disturbance rejection repetitive controller

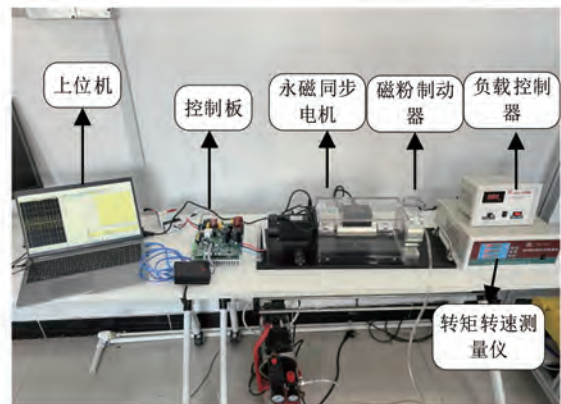


图 13 试验平台

Fig. 13 Experimental setup

表 1 试验电机主要参数

Tab. 1 Main parameters of the prototype motor

参数名称	参数值
额定功率 P_N /kW	0.75
额定电压 U_n /V	220
额定电流 I_n /A	3
d 轴电感 L_d /H	0.014
q 轴电感 L_q /H	0.014
额定转速 N_r /(r · min ⁻¹)	2 000
额定转矩 T_e /(N · m)	2.4
极对数 P_n	4
定子电阻 R /Ω	2.47

4.2 稳态与动态试验

在 PMSM 转速控制系统中, 非周期性扰动例如突加负载转矩, 会造成转速严重跌落^[18]。此外, 由于试验电机平台存在电流采样误差问题, 导

致转速出现一次谐波和二次谐波,本文通过突加负载和对一次谐波与二次谐波的抑制来验证所提方法对周期性与非周期性扰动抑制的有效性。

为了充分验证所提方法的有效性和可行性,本文将所提出的自抗扰重复控制器与PI控制器,EBADRC和改进EBADRC进行对比试验。PI控制器的参数设置为 $K_p=1, K_i=5$;EBADRC的参数设置为 $\omega_c=20\pi \text{ rad/s}, \omega_0=50\pi \text{ rad/s}$;改进EBADRC和所提方法的 ω_c 和 ω_0 与EBADRC的设置相同。所提方法中重复控制器的参数设置为 $k_{rc}=0.03$,低通滤波器的参数设置为 $k_f=0.3$,转速设置为 $1\ 200 \text{ r/min}$ 。

图14为突加50%负载工况下四种控制器的转速与电流对比试验结果,图15为突加100%负载工况下四种控制器的转速与电流对比试验结果。表2为不同突加负载工况下四种不同控制器的转速对比结果。由表2可知,50%突加负载工况下,分别采用PI控制器、EBADRC、改进EBADRC和所提方法时,转速跌落分别为88、48、39和37 r/min,周期扰动分别造成41、35、32和

21 r/min的转速波动。在100%突加负载的工况下,采用PI控制器时,转速跌落为150 r/min,周期扰动造成51 r/min的转速波动;与PI控制器对比,当分别采用EBADRC、改进EBADRC和所提方法时,转速跌落分别减少38.7%、46%、45.8%;周期扰动分别减少17.6%、17.6%、49%。图16为四种不同控制器在额定转速2 000 r/min工况下,突加100%负载的转速电流对比图,采用所提方法时的转速跌落比采用PI控制器、EBADRC、改进EBADRC时的转速跌落分别减小了65、78和85 r/min,周期性转速波动分别减小了7、12和26 r/min。图17为四种不同控制器在转速稳态时的转速谐波对比结果。由图17可知,当采用PI控制器时,稳态时一次谐波幅值是转速的0.28%,二次谐波幅值是转速的0.86%;当采用EBADRC时,稳态时一次谐波幅值减少了0.03%,二次谐波幅值减少了0.33%;当采用改进EBADRC时,稳态时一次谐波幅值减少了0.11%,二次谐波幅值减少了0.48%;当采用所提方法时,稳态时一次谐波幅值减少0.13%,二次谐波幅值减少0.58%。

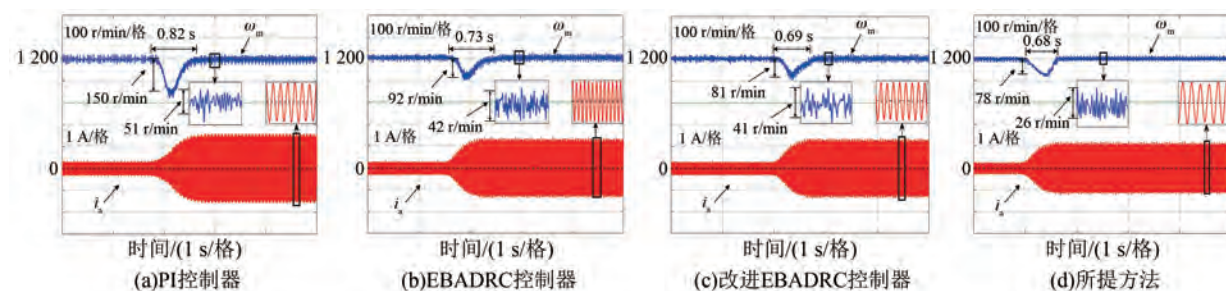


图14 1 200 r/min转速下突加50%负载下四种控制器转速与电流对比结果

Fig. 14 Experimental results comparing the speed and current of four different controllers under sudden increase of 50% rated load at 1 200 r/min

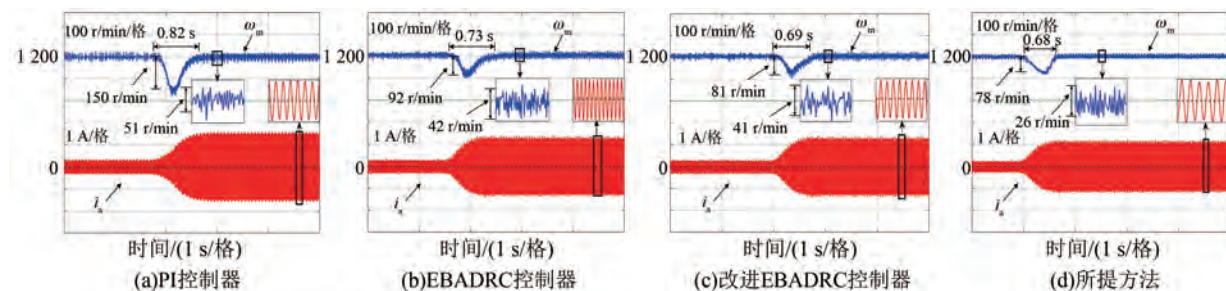


图15 1 200 r/min转速下突加100%负载下四种不同控制器转速与电流对比结果

Fig. 15 Experimental results comparing the speed and current of four different controllers under sudden increase of 100% rated load at 1 200 r/min

表 2 不同工况下四种控制器的转速对比结果

控制策略	突加 50% 负载			突加 100% 负载		
	转速跌落/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	恢复时间/s	周期性转速 波动/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	转速跌落/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	恢复时间/s	周期性转速 波动/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)
PI	88	0.71	41	150	0.82	51
EBADRC	48	0.58	35	92	0.73	42
改进 EBADRC	39	0.55	32	81	0.69	41
所提方法	37	0.51	21	78	0.68	26

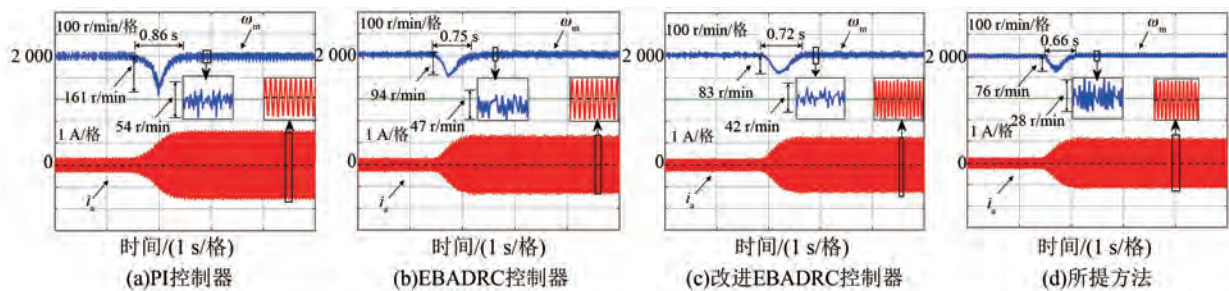


图 16 2 000 r/min 转速下突加 100% 负载时四种不同控制器转速与电流对比结果

Fig. 16 Experimental results comparing the speed and current of four different controllers under sudden increase of 100% rated load at 2 000 r/min

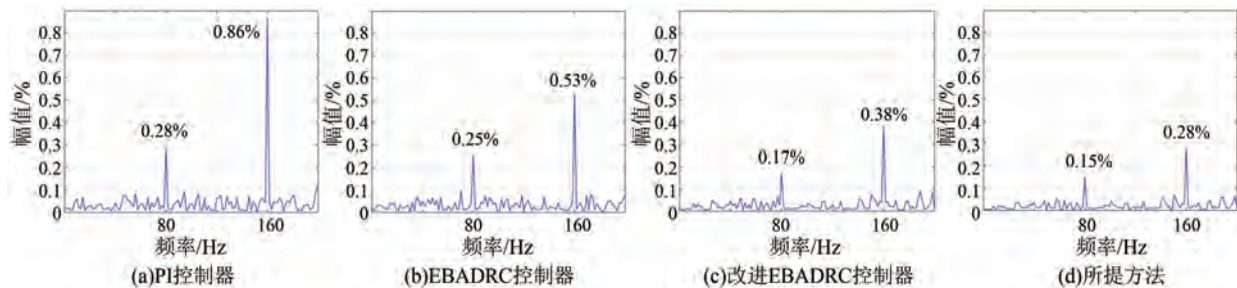


图 17 基于四种不同控制器的转速谐波对比结果

Fig. 17 Comparative results of Harmonic of rotational speed based on four different controllers

4.3 参数不匹配稳态试验

对所提方法在参数不匹配工况下进行试验对比,从而验证所提方法的参数鲁棒性。根据图 7,选择参数 b_0 进行不匹配的工况测试。图 18 为所提方法在 b_0 不匹配工况下的转速稳态试验结果,试验开始时保持参数 b_0 不变,然后分为(a)、(b)两组试验,(a)试验为在 1.5 s 时将其设置为 $0.5b_0$, (b)试验为在 2.5 s 时将其设置为 $2b_0$ 。由图 18 可知,在参数 b_0 增大一倍或减小一倍时,PMSM 仍运行稳定,由此证明所提方法参数鲁棒性能较好。

根据以上所有结果可知:

(1)PI 控制器的抗扰能力不足,在非周期及

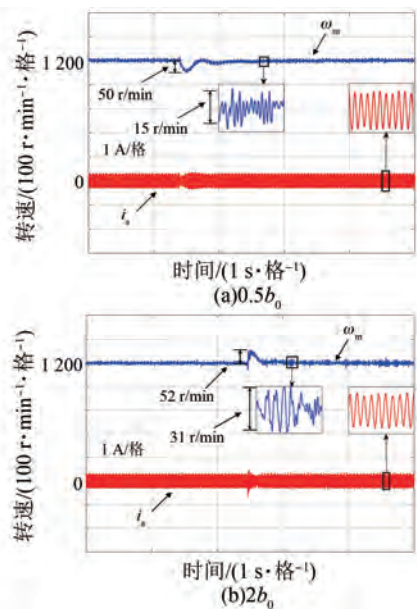
周期性扰动下转速波动较大。

(2)EBADRC 对于突加负载转矩造成的非周期性转速跌落有较好的抑制能力,但对于周期扰动造成的转速波动的抑制能力不足。使用低通滤波器替换掉 ESO 中的积分器从而改进 EBADRC,可进一步增强 EBADRC 对周期性干扰与突加负载造成的转速跌落的抑制能力。

(3)所提方法在改进 EBADRC 的基础上进一步增强了周期扰动抑制能力,同时在参数变化时依然具有良好的鲁棒性。

5 结语

针对于受周期性与非周期性干扰下 PMSM

图 18 参数 b_0 变化下的稳态试验结果Fig. 18 Steady-state experimental results with mismatched parameter b_0

的转速波动问题,本文提出了一种自抗扰重复控制器。首先采用低通滤波器替代 ESO 中的积分器,增强其干扰观测能力。然后在此基础上采用重复控制器改进 EBADRC 的控制律,增强所构成的自抗扰重复控制器抑制周期性干扰的能力,并通过频域分析来验证所提方法的鲁棒性。最后在 PMSM 试验平台上与 PI 控制器、EBADRC 控制器、改进 EBADRC 控制器进行对比试验,试验结果表明本文所提方法可以有效抑制转速环中的周期性与非周期性干扰,并且具有较好的参数鲁棒性。此外所提方法结构简单,能更好地适用于工业控制器,因此所提方法具备工业应用的潜在价值。

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

刘田震进行了方案设计、内容总结、试验研究与论文撰写,崔泰赞、雷龙参与了图形编辑、数据分析,郝正杰参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary, experiment and paper writing were carried out by Liu Tianzhen. Graphic editing, data analysis were participated by Cui Taiyun and Lei long. The manuscript was revised by Hao Zhengjie. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 郭鸿浩,曹睿,林欣欣,等. 非理想磁链永磁同步电机转矩脉动抑制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(2): 63-71.
- Guo H H, Cao R, Lin X X, et al. Torque ripple minimization of non-ideal magnet flux permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(2): 63-71.
- [2] 王立平,孔祥昱,于广. 基于遗传算法的并混联机床电机伺服控制参数整定[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(10): 1106-1114.
- Wang L P, Kong X Y, Yu G. Motor servo control parameter tuning for parallel and hybrid machine tools based on a genetic algorithm[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(10): 1106-1114.
- [3] 崔淑梅,匡志,杜博超,等. 基于自抗扰控制原理的全电飞机用永磁同步电机转速闭环控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊1): 107-115.
- Cui S M, Kuang Z, Du B C, et al. Speed closed-loop control of permanent magnet synchronous motor for all-electric aircraft applications based on active disturbance rejection controller [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 107-115.
- [4] 郝正强. 内置式永磁同步电机单转子压缩机优化调速控制[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- Hao Z Q. Optimal speed control for interior permanent magnet synchronous motor single rotor compressors [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [5] 赵哲,林浩然,代颖,等. 压缩机电机的预应力模态分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 39-48.
- Zhao Z, Lin H R, Dai Y, et al. Pre-stress modal analysis of compressor motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 39-48.
- [6] 刘照旭,储剑波,李超,等. 基于改进型极值搜索

- 算法的压缩机转速脉动抑制方法[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(11): 1148-1159.
- Liu Z X, Chu J B, Li C, et al. A speed ripple suppression method for compressors based on improved extremum seeking algorithm[J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(11): 1148-1159.
- [7] 王柄东, 王道涵, 王晓姬, 等. 交流调磁型永磁同步电机磁通协同调控最大转矩铜耗比控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3630-3645.
- Wang B D, Wang D H, Wang X J, et al. A maximum torque per copper loss control for AC flux-regulation permanent magnet synchronous motor with magnetic flux co-regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3630-3645.
- [8] 何伟严, 马吉恩, 王宏涛, 等. 机器人关节电机转矩动态特性研究[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(12): 12-20.
- He W Y, Ma J E, Wang H T, et al. Dynamic characteristics of robot joint motor torque[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(12): 12-20.
- [9] 黄蕾, 徐帅奇, 朱琰. 基于扩展卡尔曼滤波与线性自抗扰控制的风机转子动能功率平滑策略[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(11): 1160-1169.
- Huang L, Xu S Q, Zhu Y, et al. Wind turbine rotor kinetic energy power smoothing strategy based on extended kalman filter and linear active disturbance rejection control[J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(11): 1160-1169.
- [10] 范晨兴, 杨建飞, 邱鑫, 等. 基于 CFD 的垂直轴风机特性的叶片优化与系统能源设计[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(10): 1125-1136.
- Fan C X, Yang J F, Qiu X, et al. CFD-based blade optimisation and system energy design for vertical axis wind turbine characteristics[J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(10): 1125-1136.
- [11] Chuan H, Fazeli S M, Wu Z Z, et al. Mitigating the torque ripple in electric traction using proportional integral resonant controller[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 10820-10831.
- [12] Tang M, Formentini A, Odhano S A, et al. Torque ripple reduction of PMSMs using a novel angle-based repetitive observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2689-2699.
- [13] Liu X F, Deng Y T, Wang J L, et al. Fixed-time generalized active disturbance rejection with quasi-resonant control for PMSM speed disturbances suppression[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 6903-6918.
- [14] 王子辰, 胡春鹤. 基于改进黑翅鸢算法的永磁同步电机自抗扰控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(3): 262-271.
- Wang Z C, Hu C H, et al. Active disturbance rejection control of permanent magnet synchronous motor based on improved black-winged kite algorithm[J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(3): 262-271.
- [15] 赵卓群, 赵辉, 吴频, 等. 潜油永磁同步电机的自抗扰控制技术研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(4): 402-411.
- Zhao Z Q, Zhao H, Wu P, et al. Research on active disturbance rejection control technology for submersible permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(4): 402-411.
- [16] Tian M H, Wang B, Yu Y, et al. Enhanced one degree-of-freedom ADRC with sampled-data iterative learning controller for PMSM uncertain speed fluctuations suppression[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(4): 8321-8335.
- [17] Lai C Y, Feng G D, Mukherjee K, et al. Torque ripple modeling and minimization for interior PMSM considering magnetic saturation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2417-2429.
- [18] Gao J, Wu X, Huang S D, et al. Torque ripple minimisation of permanent magnet synchronous motor using a new proportional resonant controller[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(2): 208-214.
- [19] 孙少龙. 基于电机转矩补偿的增程器转速波动抑制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- Sun Z L. Research on speed fluctuation suppression strategy of range extender based on motor torque compensation[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [20] 赵希梅, 马志军, 朱国昕. 基于迭代学习与 FIR 滤波器的 PMLSM 高精控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 10-15.

- Zhao X M, Ma Z J, Zhu G X, High precision control for PMLSM based on iterative learning and FIR filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 10-15.
- [21] Tian M H, Wang B, Yu Y, et al. Robust adaptive resonant controller for PMSM speed regulation considering uncertain periodic and aperiodic disturbances [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(4): 3362-3372.
- [22] Wang Z, Zhao J W, Wang L Q, et al. Combined vector resonant and active disturbance rejection control for PMSLM current harmonic suppression[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(9): 5691-5702.
- [23] Madonski R, Shao S, Zhang H, et al. General error-based active disturbance rejection control for swift industrial implementations [J]. Control Engineering Practice, 2019, 84: 218-229.
- [24] 田明赫, 王勃, 于泳, 等. 基于谐振改进型单自由度自抗扰控制器的 PMSM 转速波动抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6209-6219.
- Tian M H, Wang B, Yu Y, et al. Speed fluctuations suppression strategy for PMSM based on resonance-improved single-degree-of-freedom active disturbance rejection controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6209-6219.
-
- 收稿日期:2025-12-22
收到修改稿日期:2026-02-06
作者简介:
郝正杰(1994—),男,博士,副教授,研究方向为永磁同步电机鲁棒控制和无传感器控制, nepu_haozj@ nepu.edu.cn;
* 通信作者:刘田震(2000—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步转速抑制无传感控制技术,1238003061040@ stu.nepu.edu.cn。