

交流伺服系统速度环变参数 PI 及负载转矩 补偿控制研究

吴崇凯¹, 王寅², 潘佳炜¹, 邱鑫^{1*}, 杨建飞¹, 戚国阳¹

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 浙江捷昌线性驱动科技股份有限公司, 浙江 绍兴 312500)

Research on Variable Parameter PI and Load Torque Compensation Control of AC Servo System Speed Loop

WU Chongkai¹, WANG Yin², PAN Jiawei¹, QIU Xin^{1*}, YANG Jianfei¹, QI Guoyang¹

(1. School of Electric & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Zhejiang Jiechang Linear Motion Technology Co., Ltd., Shaoxing 312500, China)

Abstract: [Objective] In the field of modern industrial automation, the dynamic performance of the speed loop of permanent magnet synchronous motors directly affects the operational efficiency and stability of the system. Currently, factors such as load torque disturbances and parameter variations have a significant impact on the dynamic performance of the speed loop, limiting the application of the motor in high-precision and high-dynamic response scenarios.

[Methods] To address this problem, this paper proposed a variable parameter proportional integral (PI) control strategy based on the adaptive sliding mode load torque observer. This strategy innovatively combined the high-precision estimation capability of the sliding mode observer with the adaptive characteristics of variable parameter PI control. By capturing the transient changes in load torque in real-time through the sliding mode observer, the PI controller was driven to dynamically adjust the proportional and integral parameters, enabling the system to maintain optimal control under different operating conditions and achieve global dynamic optimization.

[Results] The effectiveness of the proposed control strategy was verified through simulation and experiment. The results showed that the variable parameter PI control improved the dynamic response speed by approximately 27.5% compared with the traditional fixed-parameter PI control. Compared with the normal PI dual closed-loop control, the system overshoot

was reduced by 20.6%, the recovery time was reduced by 56.6%, and the response time was reduced by 50% through the speed loop variable parameter PI control with load torque identification compensation. [Conclusion] The proposed control strategy effectively enhances the dynamic response speed, steady-state accuracy and anti-disturbance capability of the speed loop of permanent magnet synchronous motor, significantly enhances the system control effect, and shows good engineering application prospects in the fields of new energy vehicles and industrial robots.

Key words: speed loop; sliding mode observer; variable parameter PI; load torque

摘要:【目的】在现代工业自动化领域,永磁同步电机的速度环动态性能直接影响系统的运行效率与稳定性。当前,负载转矩扰动、参数变化等因素对速度环动态性能影响显著,限制了电机在高精度、高动态响应场景下的应用。【方法】针对此问题,本文提出一种基于自适应滑模负载转矩观测器的变参数比例积分(PI)控制策略。该策略创新性地将滑模观测器的高精度估计能力与变参数 PI 控制的自适应特性相结合。通过滑模观测器实时捕捉负载转矩的瞬态变化,驱动 PI 控制器动态调整比例和积分参数,使系统在不同工况下都能保持最优控制状态,从而实现全局动态优化。【结果】通过仿真与试验对所提控制策略的有效性进行验证。结果表明,变参数 PI 控制相较于传统固定参数 PI 控制,其动态响应速度提升了约 27.5%。相较于普通 PI 双闭环控制,通过速度环变参数 PI 控制与负载转矩辨识补偿,系统超调量减少了 20.6%,恢复时间减少了 56.6%,响应时间减少了 50%。【结论】所提控制策略有效提升了永磁同步电机速度环的动态响

基金项目:江苏省研究生科研实践创新项目(SJCX25_0723)

Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province(SJCX25_0723)

应速度、稳态精度与抗扰动能力,显著增强了系统控制效果,在新能源汽车、工业机器人等领域展现出良好的工程应用前景。

关键词: 速度环;滑模观测器;变参数PI;负载转矩

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)凭借体积小、质量轻、控制精度高及功率密度高等优点,被广泛应用于工业机器人、汽车等领域。随着PMSM的广泛使用,人们对其控制精度的要求越来越高,相应控制算法也得到快速发展。

比例积分(Proportional Integral, PI)控制是工业伺服系统最常用的方法。文献[1-2]给出了速度环PI整定的推导与优化方式,整定效果良好且具有一定的抗扰性能。近些年来智能算法不断发展,出现了通过神经网络^[3]、遗传算法^[4]等方法辅助PI参数整定,但实现较为复杂。

实际工况下,速度环PI控制器容易出现积分饱和现象,文献[5]采用积分切除以去饱和,实现简单,但鲁棒性较差。单一固定的PI参数很难兼顾快速性与稳定性,文献[6]将变参数PI控制应用于风电机组转速恢复,但变参数PI控制无法应用于高响应的伺服系统。文献[7-8]探索了速度误差与PI参数的动态关系,为变参数PI控制提供了思路,但其参数调整规则往往依赖经验或特定模型,自适应能力有限。

PI控制难以满足伺服系统高响应速度与强抗扰动能力的要求。引入前馈控制可根据负载变化提前补偿,以弥补PI控制的不足,其中负载转矩的精确估算是关键。对于机器人等传动系统,常需适配大范围惯量比负载,但负载转矩无法直接测量,且易受干扰和参数变化影响,导致传统PI控制难以兼顾动态响应性能与抗扰性能,因此负载转矩观测器成为研究热点。文献[9]采用现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)器件设计并实现了基于卡尔曼滤波器的负载转矩观测器,其能够对负载转矩扰动进行实时观测和补偿,提高了PMSM伺服系统对负载转矩扰动的抑制能力。

在众多观测器中,滑模观测器(Sliding Mode Observer, SMO)凭借强鲁棒性、对系统不确定性

和干扰性的抑制能力,在非线性系统状态估计中表现突出。SMO通过构造滑模面迫使观测误差收敛,可实现对负载转矩的高精度估计^[10-11]。文献[12-13]通过引入滑模负载转矩前馈补偿,将负载转矩按比例反馈到电流环中,在负载转矩发生突变时进行补偿。文献[14-15]在SMO基础上采用新型趋近律,削弱系统抖振现象同时更快恢复到给定转速,提高了系统的抗扰动能力和鲁棒性。

当前研究仍存在以下不足:(1)传统SMO固有的抖振会使观测转矩信号含有高频噪声,易引起电流环波动,影响系统稳定性和补偿效果;(2)现有架构中,SMO与PI控制器独立运行,PI参数调整未能充分利用SMO提供的实时信息,限制了系统整体性能;(3)面对复杂工况时,如何同时保证观测器精度、前馈有效性及参数自适应性,以实现全局动态最优,仍面临挑战。

针对上述不足,本文提出了一种基于自适应滑模负载转矩观测器的变参数PI控制策略,旨在通过SMO的高精度估计能力与变参数PI控制的自适应特性,协同优化系统性能,实现全局动态优化,为复杂工况下的运动控制提供新思路。

1 速度环影响因素

PMSM速度环的动态响应性能(调节时间、超调量、抗扰能力及稳态误差)直接决定了调速系统的稳定性、抗扰能力与跟踪精度。除控制器PI参数外,影响该性能的关键因素主要可归纳为以下几点。

(1)机械系统特性与负载因素。机械系统惯量变化易致转速响应滞后;负载突变或扰动会迫使速度环补偿;电流环带宽不足将引起转速跌落或超调;库伦摩擦会增大稳态误差;粘滞阻尼不足会引发振荡;低刚度限制带宽并诱发机械谐振。

(2)传感器精度因素。传感器噪声会引入转速测量误差,导致控制输出抖动和高频振荡。

(3)动态交互与扰动因素。电流环带宽不足会限制速度环响应,造成跟踪滞后与抗扰能力下降;外部扰动超出调节能力时,系统响应易出现滞后或振荡。

2 变参数PI控制

2.1 PI参数对负载转矩扰动的影响

PMSM伺服系统速度环结构框图如图1所

示。图 1 中, ω^* 、 ω 分别为给定转速、实际转速; i_q^* 、 i_q 分别为 q 轴电流给定值、 q 轴电流反馈值; K_{if} 、 T_{if} 分别为电流环反馈系数、电流环延时时间常数; K_{sf} 、 T_{sf} 分别为转速反馈系数、转速延时时间常数; K_{sp} 、 K_{si} 分别为速度环 PI 控制器的比例增益、积分时间常数; K_T 为转矩常数; T_L 为负载转矩; J 为电机转动惯量; B 为摩擦因数。

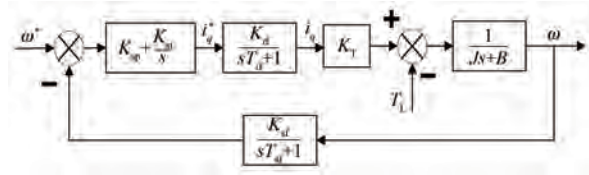


图 1 速度环结构框图

Fig. 1 Speed loop structural framework

通常系统中电流环、转速检测环节响应闭环截止频率远远高于速度环的带宽,因此可将其动态响应从一阶惯性进一步近似为比例环节,从而对系统进行降阶。PMSM 伺服系统速度环简化结构框图如图 2 所示。

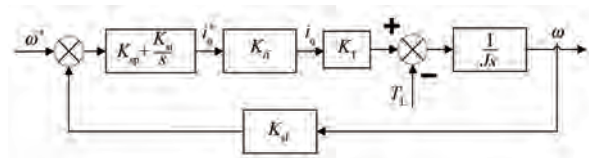


图 2 速度环简化结构框图

Fig. 2 Simplified structural framework of speed loop

由图 2 可得从输入转速到输出转速的闭环传递函数:

$$G_{\omega-\omega^*}(s) = \frac{\omega(s)}{\omega^*(s)} = \frac{K_{if}K_T(K_{sp}s + K_{si})}{Js^2 + K_{if}K_TK_{sp}s + K_{if}K_TK_{si}} \quad (1)$$

采用传统 PI 速度控制器时, $G_{\omega-\omega^*}(s)$ 的分子中由于存在较大的微分项,当参考转速发生变化时,会导致转速产生较大的超调。

对式(1)进行推导可得从负载转矩到输出转速的闭环传递函数:

$$G_{\omega-T_L}(s) = \frac{\omega(s)}{T_L(s)} = \frac{-s}{Js^2 + K_{sp}K_{if}K_TK_{sf}s + K_{sf}K_{if}K_TK_{si}} \quad (2)$$

令 $s=j\omega$, 幅频特性表达式为

$$|G(j\omega)| = \frac{\omega}{\sqrt{(K_{sf}K_{if}K_TK_{si} - J\omega^2)^2 + (K_{sf}K_{sp}K_{if}K_T\omega)^2}} \quad (3)$$

针对式(3),幅频特性曲线峰值满足:

$$\frac{d|G(j\omega)|}{d\omega} = 0 \quad (4)$$

求解整理可得:

$$-2J^2\omega^5 + 2K_{sf}^2K_{if}^2K_T^2K_{si}^2\omega = 0 \quad (5)$$

解得:

$$\omega = \sqrt{\frac{K_{sf}K_{si}K_{if}K_T}{J}} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),整理得到峰值为

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{K_{sp}K_{if}K_{sf}K_T} \quad (7)$$

当外部扰动频率接近峰值点对应的频率时,系统输出幅值显著增大,可能引发机械振动或电路谐振。由式(6)可知对应频率与 K_{if} 、 K_{sf} 、 K_{si} 、 K_T 和 J 有关。因此通过改变 PI 控制器的 K_{si} 可以调整幅频特性峰值对应的频率。由式(7)可知,通过调整 PI 控制器的 K_{sp} 能够调节峰值的大小,从而改善负载转矩对转速的影响。因此,伺服系统对负载转矩扰动的转速响应与控制器参数的选择有关,通过动态调节速度环 PI 控制器参数,可以实现对负载转矩扰动的全运行范围实时抑制。

2.2 变参数 PI 对动态响应的影响与设计

PMSM 采用固定参数 PI 控制时,难以兼顾动态响应性能与稳态精度。增大 K_{sp} 可提升带宽、抑制扰动,但 K_{sp} 过高会降低阻尼,引起超调或振荡;增大 K_{si} 可加速稳态收敛、抑制低频扰动,但 K_{si} 过高易导致积分饱和,延长调节时间或引起振荡。

变参数 PI 控制将 K_{sp} 、 K_{si} 由固定值设计为转速误差 e (给定转速与反馈转速的差值) 的函数,即基于 e 动态调整控制参数。一般来说,为提高控制器的灵敏度,并兼顾稳态误差,在 e 较大时, K_{sp} 取较大值以提高系统的快速响应能力, K_{si} 取值不可太大以减小超调,防止振荡;在 e 较小时, K_{sp} 取较小值避免超调量过大, K_{si} 取较大值以减小系统的稳态静差。为达到期望的变参数 PI 控制,设计 K_{sp} 、 K_{si} 关于 e 的函数方程,如式(8)所示:

$$\left\{ \begin{array}{ll} K_{sp} = K_{sp}^* + \frac{e}{\mu}, & J < J_0 \\ K_{si} = K_{si}^* + \frac{e^2}{\mu^2}, & J < J_0 \\ K_{sp} = \left(K_{sp}^* + \frac{e}{\mu} \right) \frac{J}{J_0}, & J \geq J_0 \\ K_{si} = K_{si}^* + \frac{e^2}{\mu^2}, & J \geq J_0 \end{array} \right. \quad (8)$$

式中: K_{sp}^* 、 K_{si}^* 为 PI 控制器的初始参数; μ 为变参数 PI 系数; J_0 为离线辨识惯量。

通过建立控制器模型可以确定 PI 参数选择的范围, 结合迭代调试策略进行参数寻优, 最终得到的 K_{sp} 、 K_{si} 使控制系统兼顾快速性与稳定性。

3 基于滑模变结构的负载转矩补偿前馈控制

3.1 负载转矩前馈补偿原理

常规 PMSM 双闭环设计基于空载或恒负载假设, 参数整定未考虑负载动态变化, 仅将其简化为固定扰动。由于建模未包含负载变化, 所用传递函数无法准确反映负载突变动态^[16-17], 导致控制器在负载波动时抑制转速偏差能力不足, 影响系统抗扰性与稳定性。

为减小外部干扰、增强系统抗扰性, 引入前馈补偿。当外部干扰可测时, 前馈控制器对确定性扰动超前补偿, 有效降低其对系统输出的影响, 保障转速稳定运行^[18]。

电机存在负载扰动时, 在转矩给定电流中加入负载转矩扰动补偿量以实施超前动态抵消, 补偿后的速度环等效模型如图 3 所示。

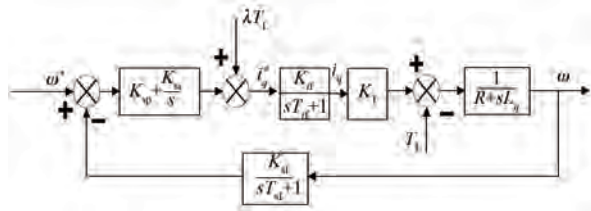


图 3 存在负载扰动时的速度环等效模型

Fig. 3 Equivalent model of the speed loop with load disturbance

由图 3 可知, 当滑模增益 $\lambda = \frac{T_{it}+1}{K_t K_{it}}$ 时, 负载转矩造成的波动将被完全补偿。

负载转矩前馈补偿是在负载转矩可测的前提下进行的, 因此如何准确获取系统的负载转矩成为关键性问题, 一般获取负载转矩的方法有直接计算法和负载转矩观测器法两种方法。

直接计算法的基本原理是通过机械运动方程直接得出负载转矩表达式:

$$T_L = \frac{3}{2} p_n i_q \psi_f - B \omega_m - J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (9)$$

式中: ψ_f 为转子磁链; p_n 为极对数; ω_m 为转子机械角速度。

上文分析速度环时, 对系统传递函数作了结构简化, 忽略了摩擦部分。但实际系统中, PMSM 的电磁转矩与产生的电磁转矩并不完全相等。产生的电磁转矩需分别克服转动惯量形成的惯性转矩、抵消转动过程中的摩擦损耗, 剩余部分用于平衡负载转矩。

在 PMSM 控制系统中, 常用的负载转矩观测器一般有以下几种。

(1) 基于电机动力学模型, 通过测量电流、转速等可观测变量, 重构负载转矩等不可直接测量的状态量, 例如 SMO、拓展卡尔曼滤波器^[19]。

(2) 将负载转矩视为外部扰动, 通过构建扰动模型从转速或电流信号中分离出扰动分量的扰动观测器^[20]。

(3) 利用神经网络、模糊逻辑等智能算法^[21], 无需精确数学模型, 依赖大量训练数据, 建立负载转矩与可测信号的非线性映射, 适合高动态或强非线性场景。

卡尔曼滤波器需根据估计误差和噪声动态调整增益, 计算复杂且对处理器要求高, 工程应用受限。扰动观测器依赖精确模型, 参数失配会导致估计精度显著下降。智能算法需大量存储, 难以嵌入式部署。因此, 本文采用自适应 SMO, 速度环控制框图如图 4 所示。其中, $\hat{T}_L$ 为负载转矩估计值。

根据式(9)构建 PMSM 的状态方程:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{3p_n \psi_f i_q}{2} - T_L - B \omega_m \right) \quad (10)$$

由于电气时间常数远小于机械时间常数, 可得:

$$\dot{T}_L = 0 \quad (11)$$

此时可得到:

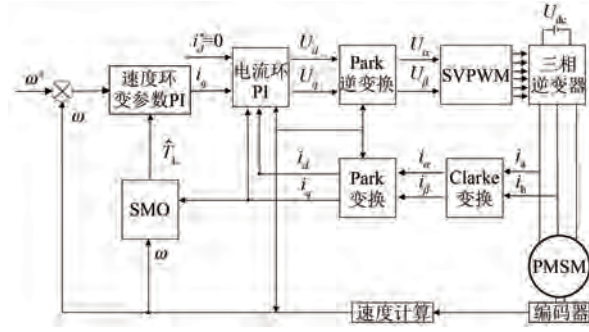


图 4 速度环控制框图

Fig. 4 Speed loop control diagram

$$\begin{cases} \dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \left(\frac{3p_n \psi_f i_q}{2} - T_L - B\omega_m \right) \\ \dot{T}_L = 0 \end{cases} \quad (12)$$

将转速估计误差 e_ω 定义为滑模面 S , 即 $S = e_\omega = \hat{\omega}_m - \omega_m$, $\hat{\omega}_m$ 为转子机械角速度估计值。定义负载估计误差 $e_T = \hat{T}_L - T_L$ 。构造估计方程如式 (13) 所示:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \left(\frac{3p_n \psi_f i_q}{2} - \hat{T}_L - B\omega_m \right) + \lambda u_{SMO} \\ \dot{\hat{T}}_L = g u_{SMO} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $u_{SMO} = \text{sgn}(\hat{\omega}_m - \omega_m)$ 为滑模中间变量; g 为反馈增益。

典型滑模负载转矩观测器结构如图 5 所示。传统 SMO 其反馈回路的 u_{SMO} 包含两个主要干扰成分: 由开关控制律中 sgn 符号函数不连续性引发的抖振分量; 由 q 轴电流测量引入的噪声分量。为改善信号质量, 采用一阶低通滤波环节来平滑输出信号^[22]。因此, $\hat{T}_L$ 可表示为

$$\hat{T}_L = g u_{SMO} \cdot \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (14)$$

式中: ω_c 为低通滤波器的截止频率。

为抑制系统抖振, 可在滑模面 S 附近设计饱和函数 $\text{sat}(S)$ 代替符号函数 $\text{sgn}(S)$, 来控制输入的不连续部分, 以此进一步削弱抖振。 $\text{sat}(S)$ 表达式为

$$\text{sat}(S) = \begin{cases} 1, & S > \Delta \\ S/\Delta, & |S| \leq \Delta \\ -1, & S < -\Delta \end{cases} \quad (15)$$

式中: Δ 为边界层。

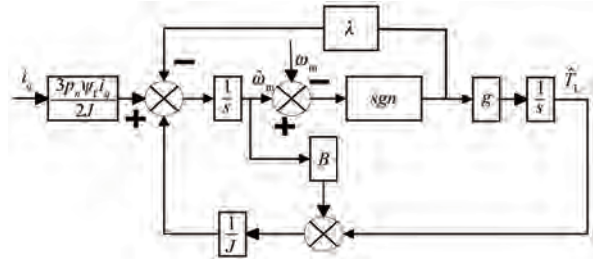


图 5 典型滑模负载转矩观测器结构图

Fig. 5 Structure diagram of classic sliding mode load torque observer

当 Δ 较小时, 系统趋近滑模面速度较快, $\text{sat}(S)$ 趋近于 $\text{sgn}(S)$, $\hat{T}_L$ 的抖振较为明显; 当 Δ 较大时, $\hat{T}_L$ 抖振较小, 但系统到达滑模面的速度会降低。综上, 采用 $\text{sat}(S)$ 能够有效减轻 SMO 的抖振问题, 但难以同时实现快速收敛和高精度的观测要求。

3.2 基于自适应滑模趋近律的负载转矩观测器设计

传统固定切换增益的指数趋近律在接近滑模面时, 由于不连续控制作用产生的强激励信号会引发显著抖振, 直接影响控制精度与稳定性。为解决该问题, 趋近阶段初期用大增益加速, 临近滑模面时降低增益以削弱高频切换^[23]。边界层过小会减少稳态抖振但延缓进入理想滑模, 过大则缩短趋近周期但增加控制能量需求^[24]。

基于上述分析, 本文提出一种自适应变速趋近律。通过实时监测状态轨迹与滑模面的距离及变化率, 自适应调节控制作用。状态快速偏离时增强控制以加速收敛, 接近滑模面时则降低控制以抑制抖振^[25], 从而兼顾响应速度与稳定性。工程上可固定部分参数, 动态调整趋近速度, 既缩短趋近时间, 又增强对参数摄动和外部扰动的鲁棒性。通过平衡控制强度与抖振抑制, 可有效限制稳态误差, 保障滑模运动的高精度跟踪性能。

基于指数趋近律在收敛效率与抖振抑制上的平衡特性, 提出一种动态调节的自适应指数趋近策略, 其表达式为

$$\begin{cases} u_{SMO} = -\varepsilon k(S) \text{sat}(S) - \varphi S \\ k(S) = \frac{1}{\lambda_1 + \left(1 + \frac{\delta}{|S|^\beta} - \lambda_1\right) e^{-\alpha|S|}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: k 为 SMO 等速项自适应增益; ε, φ 分别为

SMO 等速项、指数项的滑模增益, $\varepsilon > 0, \varphi > 0; \lambda_1, \delta, \alpha$ 和 β 为设计参数, $0 < \lambda_1 < 1, \delta > 0, \alpha > 0, \beta > 0$ 。

当 SMO 远离滑模面, 即 $|S|$ 较大时, $e^{-\alpha|S|}$ 趋近于 0, 使得 $k_1(S) \approx 1/\lambda_1$, 此时 SMO 等速项增益为 ε/λ_1 , 小于原始增益 ε , 从而保证观测器具有更短的收敛时间和更强的鲁棒性; 当 SMO 接近滑模面, 即 $|S|$ 较小时, $e^{-\alpha|S|}$ 趋近于 1, 使得 $k_1(S) \approx \frac{|S|^\beta}{|S|^\beta + \delta}$, 此时 SMO 等速项增益为 $\frac{|S|^\beta \varepsilon}{|S|^\beta + \delta}$, 小于原始增益 ε , 从而抑制稳态下 SMO 的高频抖振现象, 提升其稳态性能。

用李雅普诺夫函数对新型趋近律进行证明:

$$V(S) = \frac{1}{2}S^2 \quad (17)$$

对 $V(S)$ 求导:

$$\dot{V}(S) = S \cdot \dot{S} = S \cdot [-\varepsilon k(S) \cdot \text{sat}(S) - \varphi S] = -\varepsilon k(S) \cdot S \cdot \text{sat}(S) - \varphi S^2 \quad (18)$$

当 $|S| > \Delta$ 时, S 与 $\text{sat}(S)$ 同号, $S \cdot \text{sat}(S) = |S| \geq 0$; 当 $|S| \leq \Delta$ 时, $\text{sat}(S) = \frac{S}{\Delta}, S \cdot \text{sat}(S) = \frac{S^2}{\Delta} \geq 0$ 。

由于设计的 $\varepsilon \geq 0, k(S) \geq 0$, 所以 $-\varepsilon k(S) \cdot S \cdot \text{sat}(S)$ 非正; φS^2 同样非负。由此可得 $\dot{V}(S) \leq 0$, 即全局渐近稳定性。

当且仅当 $S = 0$ 时, $\dot{V}(S) \geq 0$, 系统收敛至滑模面 $S = 0$, 实现速度跟踪。

3.3 惯量辨识

变参数 PI 控制器稳定性与负载转矩观测器的建立均依赖准确的负载转动惯量, 而惯量动态变化会导致控制器性能下降、观测器误差增大。因此, 需通过惯量辨识应对其动态变化, 以保障系统性能。

常用惯量辨识方法包括递归最小二乘法^[26]、模型参考自适应法^[27]和扩展卡尔曼滤波^[28]等。本文采用基于机械运动方程的惯量直接计算方法, 并在辨识结果后引入滑动滤波以平滑更新过程, 从而提升工程应用的稳定性和可靠性。采用直接算法辨识的转动惯量如图 6 所示。

从图 6 可知, 转动惯量辨识值为 $0.145 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 辨识误差为 10.49%。

在负载平台上通过实际对比, 分析转动惯量失配对所提 SMO 性能的影响。

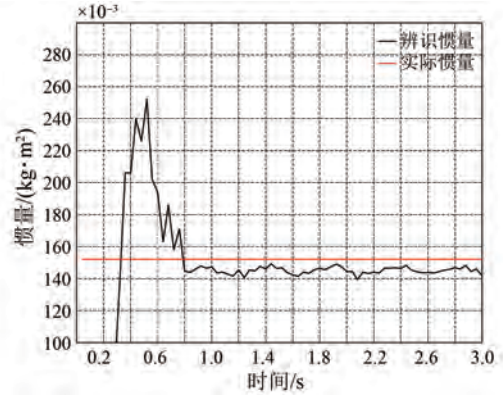


图 6 直接算法辨识的转动惯量波形

Fig. 6 Waveform of moment of inertia identified by the direct calculation method

给定参考转速 $\omega^* = 1000 \text{ r/min}$, 初始负载转矩 $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$, 1.3 s 后负载转矩为 $1.27 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。转动惯量变化为实际值的 0.2 倍、1 倍和 5 倍时, 所提自适应 SMO 负载转矩观测结果如图 7 所示。

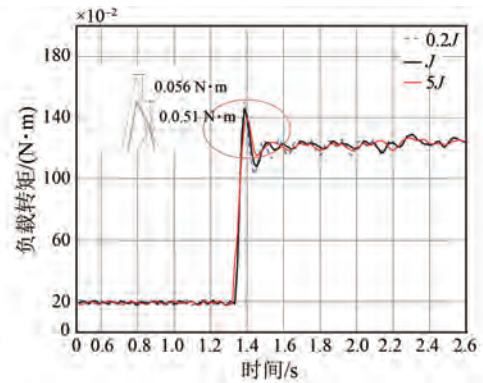


图 7 不同转动惯量下负载转矩辨识结果

Fig. 7 Identification results of load torque under different moments of inertia

由图 7 可知, 负载转矩观测值受转动惯量变化的影响较小, 与转动惯量参数匹配时的负载转矩观测结果相比, 最大偏差为 $0.056 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

4 仿真分析

为验证本文所提滑模变结构负载观测器的性能, 基于 Matlab/Simlink 进行仿真。速度环采用变参数 PI 控制器。仿真与试验用 PMSM 具体参数如表 1 所示。

给定参考转速 $\omega^* = 1000 \text{ r/min}$, 初始负载转矩 $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$, 0.2 s 后负载转矩为 $1.27 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转动惯量变化量 $\Delta J = 0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。对比无转矩前馈补偿、经典滑模转矩前馈补偿和自适应滑模转矩前馈补偿

的转速波形,结果如图 8~图 10 所示。

表 1 PMSM 参数

Tab. 1 PMSM parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/W	133	定子电阻/ Ω	2.71
额定电压/V	220	d 轴电感/mH	5.2
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 000	q 轴电感/mH	5.2
极对数	5	磁链/Wb	0.067 7
额定转矩/($N \cdot m$)	1.27	转动惯量/($g \cdot cm^2$)	0.7

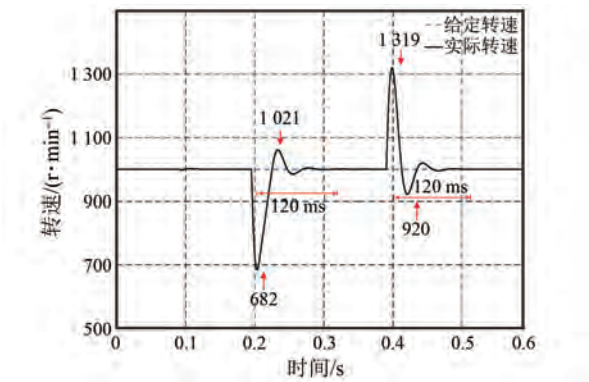


图 8 无转矩前馈补偿的转速波形

Fig. 8 Speed waveform without torque feedforward compensation

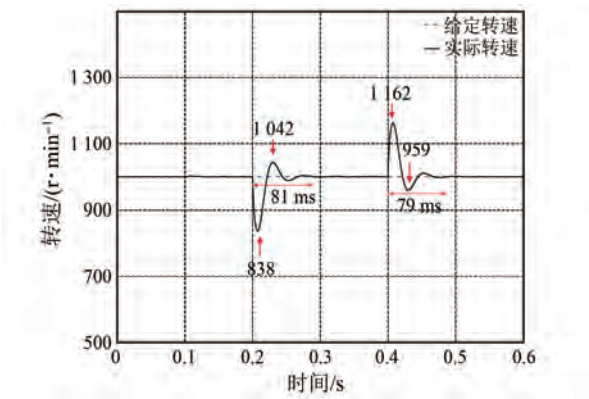


图 9 经典滑模转矩前馈补偿的转速波形

Fig. 9 Speed waveform with classical sliding mode torque feedforward compensation

对比图 8~图 10 可知,在负载突变时,采用无转矩前馈补偿、经典滑模转矩前馈补偿和自适应滑模转矩前馈补偿的转速波动分别为 318 r/min、172 r/min 和 100 r/min,系统恢复时间分别为 120 ms、81 ms 和 32 ms。可见,相较于无转矩前馈补偿和传统滑模前馈转矩补偿,在负载突变时,采用自适应滑模转矩前馈补偿的系统转速波动更

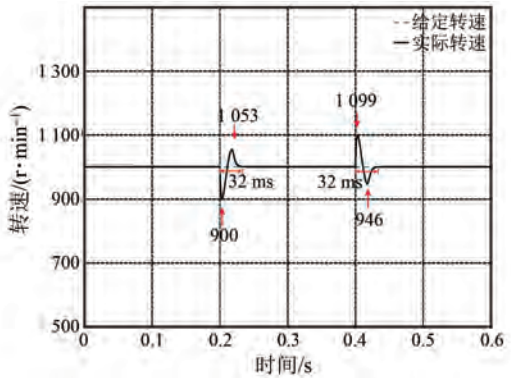


图 10 自适应滑模转矩前馈补偿的转速波形

Fig. 10 Speed waveform with adaptive sliding mode torque feedforward compensation

小且恢复时间更快。

突加负载和突卸负载时,采用经典 SMO 和自适应 SMO 辨识的负载转矩如图 11 和图 12 所示。

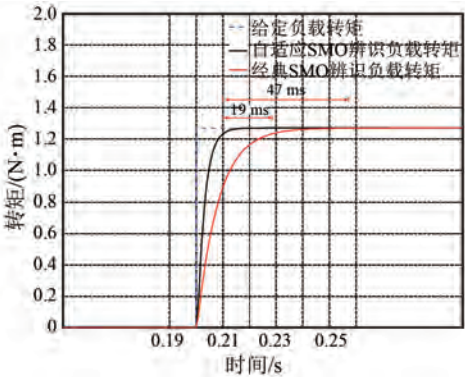


图 11 突加负载时负载转矩辨识结果

Fig. 11 Load torque identification results during sudden load application

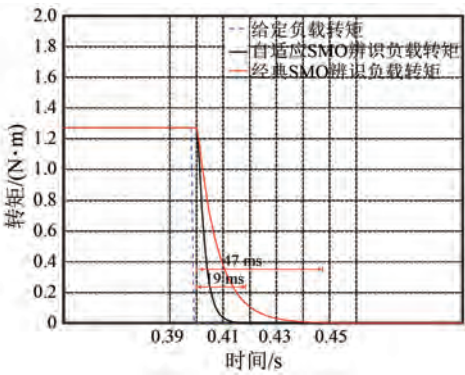


图 12 突卸负载时负载转矩辨识结果

Fig. 12 Load torque identification results during sudden load shedding

由图 11 和图 12 可知,自适应 SMO 的响应时间为 19 ms,相较于经典 SMO 的 47 ms,响应时间

减少了 59.57%,负载转矩能够更快跟随。采用所提自适应 SMO 可以大大提高驱动系统的抗扰能力和动态响应速度。

5 试验验证

5.1 试验平台硬件设计

硬件控制系统结构框图如图 13 所示。主控板采用 DSP+FPGA 架构,核心芯片均为国产化芯片。

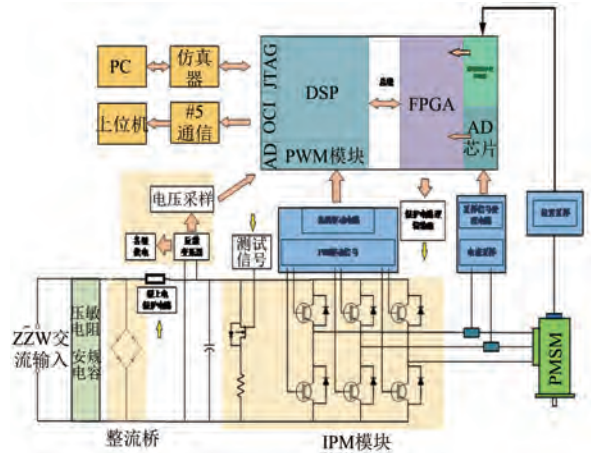


图 13 硬件控制系统结构框图

Fig. 13 Hardware control system structure block diagram

试验平台如图 14 所示,主要由 PMSM 对拖平台、转矩传感器、配电箱、电机驱动器、上位机以及示波器组成。

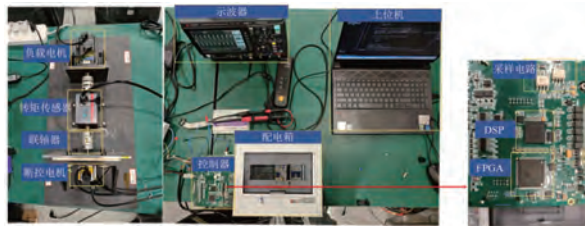


图 14 试验平台

Fig. 14 Experimental platform

5.2 试验平台软件设计

图 15 为基于自适应滑模负载转矩观测器的变参数 PI 控制算法流程图。在电机运行时刻,通过电流与转速的反馈值进行负载转矩的观测与惯量的辨识,根据转速差值进行 PI 计算作为 PI 控制器的参数,将观测出的负载转矩与 PI 控制器输出叠加作为速度环输出,然后输出至电流环给定。

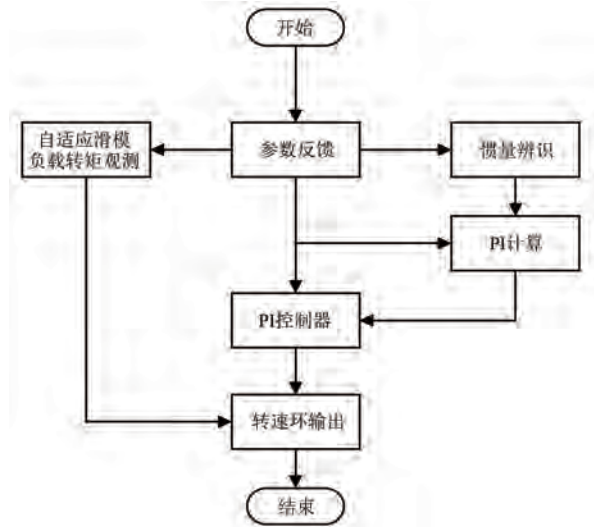


图 15 基于自适应滑模负载转矩观测器的变参数 PI 算法流程图

Fig. 15 Flowchart of variable parameter PI algorithm based on adaptive sliding mode load torque observer

5.3 试验结果

为验证本文所设计的观测器及变参数 PI 控制方案的有效性,设计了以下试验方案。

(1)为验证所设计变参数 PI 控制方案能够有效提升速度环动态响应速度,兼顾稳定性与抗扰性。试验时电机运行条件设置为:给定转速 1 000 r/min;初始负载转矩 0.2 N·m,0.75 s 后突加负载转矩 1.27 N·m,1.25 s 后突卸负载转矩 1.27 N·m;转动惯量变化量 $\Delta J = 0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,对比分析转速响应效果。变参数 PI 试验波形如图 16 所示,将转速变化分为 A、B、C 和 D 四个阶段,各阶段转速放大波形如图 17~图 20 所示。

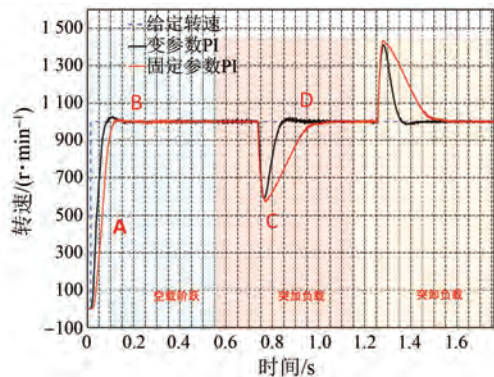


图 16 变参数 PI 控制试验波形

Fig. 16 Variable parameter PI control experimental waveforms

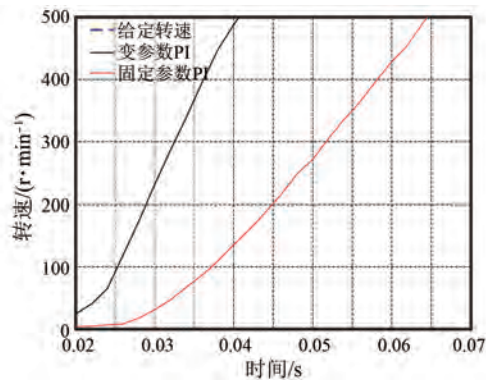


图 17 A 阶段空载上升

Fig. 17 Stage A no-load rise

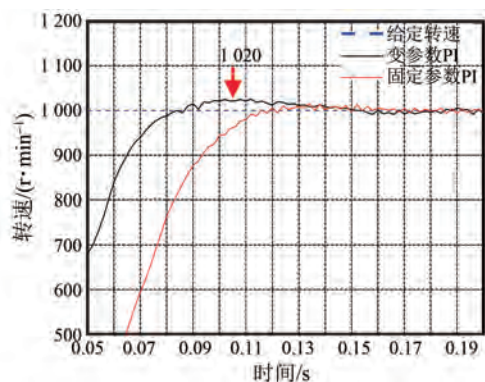


图 18 B 阶段空载稳定

Fig. 18 Stage B no-load stability

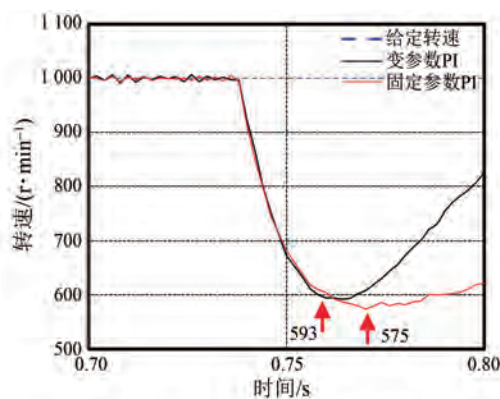


图 19 C 阶段转速速降

Fig. 19 Stage C speed dopping

由图 16~图 20 可知,空载起动初始阶段,由于速度跟踪误差显著增大,此时变参数 PI 控制器通过动态调整比例增益参数,使得转速响应曲线的斜率显著增加,相较于传统固定参数 PI 控制器,其动态响应速度提升了约 27.5%。然而,这种增益调节同时引入了约 5% 的超调量。在突加/突卸负载的动态过程中,由于变参数 PI

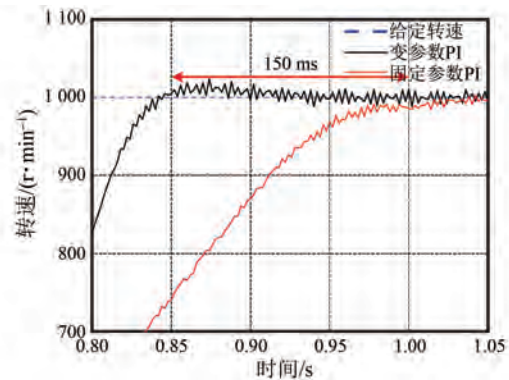


图 20 D 阶段带载稳定

Fig. 20 Stage D load stability

控制器的自适应特性,系统能够在转速偏差产生后快速调节输出,使转速快速收敛至给定值。然而,变参数 PI 控制虽能提升系统的动态响应速度,但对负载扰动引起的转速稳态偏差的幅值改善效果有限。

(2) 为验证自适应滑模负载转矩观测器能够有效提升速度环动态响应性能与抗扰性能,试验时电机运行条件与变参数 PI 运行条件一致,对比分析转速响应效果,试验结果如图 21 和图 22 所示。

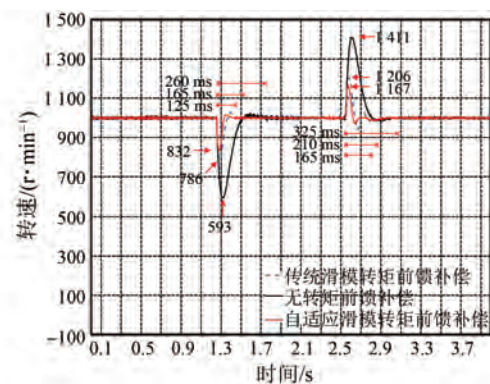


图 21 负载转矩变化时转速波形

Fig. 21 Speed waveforms when load torque changes

由图 21 可知,突加负载时,采用无转矩前馈补偿、经典滑模转矩前馈补偿和自适应滑模转矩前馈补偿的转速波动分别为 407 r/min、214 r/min 和 168 r/min,系统恢复时间分别为 325 ms、210 ms 和 165 ms。可见,在负载突变时,相较于无转矩前馈补偿和传统滑模转矩前馈补偿,采用自适应滑模转矩前馈补偿的转速波动更小,恢复时间更快。

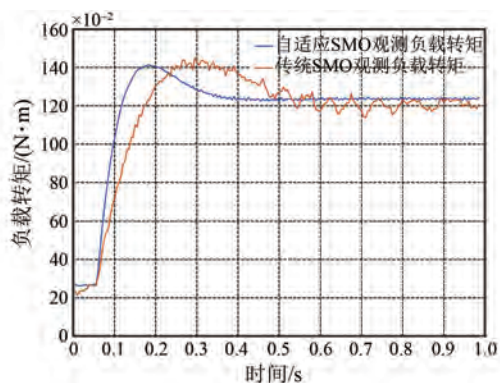


图 22 动态下负载转矩观测性能比较

Fig. 22 Comparison of load torque observation performance under dynamic conditions

由图 22 可知,经典 SMO 的响应时间为 70 ms,自适应 SMO 的响应时间为 45 ms。可见自适应 SMO 负载转矩观测结果具有更快的动态响应速度以及更小的抖振。

(3) 为验证所设计的控制方案对系统的内部参数和外部负载变化具有强鲁棒性,试验时电机运行条件设置为:初始给定转速阶跃值为 500 r/min,带惯量盘起动,转动惯量变化量 $\Delta J = 0.15 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,对比分析转速响应效果,结果如图 23 所示。

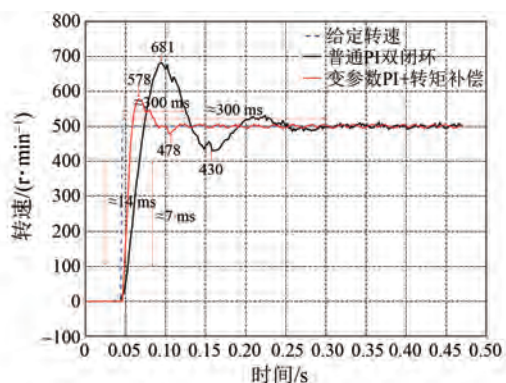


图 23 带惯量盘起动试验波形

Fig. 23 Experiment waveforms for starting with inertia disk

由图 23 可知,相较于普通 PI 双闭环,通过速度环变参数 PI 与负载转矩辨识补偿,超调量减少 20.6%,恢复时间减少 56.6%,响应时间减少 50%。可见,本文所提基于自适应滑模负载转矩观测器的变参数 PI 控制策略能够有效提升系统的动态响应能力与抗扰能力。试验结果验证了所提复合控制策略的有效性。

6 结语

本文针对 PMSM 速度环在负载转矩扰动、参数变化等工况下动态性能与抗扰能力不足的问题,提出了一种基于自适应滑模负载转矩观测器的变参数 PI 控制策略,旨在实现系统全局动态优化。

仿真与试验结果验证了该策略的有效性。与传统固定参数 PI 控制相比,本文策略的动态响应速度提升约 27.5%;与普通 PI 双闭环控制相比,结合负载转矩补偿后,超调量减少 20.6%,恢复时间缩短 56.6%,响应时间降低 50%,且在负载突变时转速波动更小、抗扰能力更强。

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

吴崇凯进行了方案设计、理论推导与论文撰写,王寅、潘佳伟和戚国阳进行了试验研究,邱鑫、杨建飞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, theoretical derivation, and paper writing were carried out by Wu Chongkai. The experimental study was conducted by Wang Yin, Pan Jiawei and Qi Guoyang. The manuscript was reviewed and revised by Qiu Xin and Yang Jianfei. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 王莉娜,朱鸿悦,杨宗军. 永磁同步电动机调速系统 PI 控制器参数整定方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 104-117.
WANG L N, ZHU H Y, YANG Z J. Tuning method for PI controllers of PMSM driving system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 104-117.
- [2] 王爽,冯坚栋,丁雪,等. 基于最优开环截止频率学习的永磁伺服系统 PI 控制器参数整定方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 44-54.
WANG S, FENG J D, DING X, et al. PI controllers

- tuning method of permanent magnet servo system based on optimal open-loop cut-off frequency learning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 44-54.
- [3] JAN R M, TSENG C S, LIU R J. Robust PID control design for permanent magnet synchronous motor: A genetic approach [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 78(7): 1161-1168.
- [4] TIAN L S, LIU Y, ZHAO J. Design and analysis of a self-tuning speed controller for permanent magnet synchronous motors based on the neural network [J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2015, 12(7): 1170-1177.
- [5] KHAN A M, RAHMAN A M. A new wavelet-based speed controller for induction motor drives [J]. Electric Power Components and Systems, 2008, 36(12): 1282-1298.
- [6] 张俊武, 王德林, 刘柳, 等. 基于变参数 PI 控制的双馈风电机组频率控制策略[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(12): 9-17.
- ZHANG J W, WANG D L, LIU L, et al. Frequency control strategy for doubly-fed wind turbine based on variable parameter PI control [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(12): 9-17.
- [7] 孙强, 程明, 周鹏, 等. 新型双凸极永磁电机调速系统的变参数 PI 控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 117-122.
- SUN Q, CHENG M, ZHOU E, et al. Variable PI control of a novel doubly salient permanent magnet motor drive [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 117-122.
- [8] 梁传栋, 许刘超, 潘志恒, 等. 一种改进型滑模变结构控制永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(3): 1-6+17.
- LIANG C D, XU L C, PAN Z H, et al. An improved sliding mode variable structure control direct torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(3): 1-6+17.
- [9] 关欣, 李叶松. 基于实时负载转矩反馈补偿的永磁同步电机变增益 PI 控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 38-45.
- GUAN X, LI Y S. Variable gain PI control method for permanent magnet synchronous motor based on load torque feedback real-time compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 38-45.
- [10] 王雷, 王育安, 吴建昆, 等. 永磁同步电机改进型超螺旋滑模观测器的控制研究[J]. 电工电气, 2024, (8): 15-20+25.
- WANG L, WANG Y A, WU J K, et al. Research on control of improved super-spiral sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor [J]. Electrotechnics Electric, 2024, (8): 15-20+25.
- [11] 侯利民, 李锐, 王巍, 等. 基于 ESO 分数阶滑模调节的 PMSM 模型预测转矩控制[J]. 控制工程, 2024, 31(3): 433-438+449.
- HOU L M, LI R, WANG W, et al. PMSM model predictive torque control based on ESO fractional sliding mode regulation [J]. Control Engineering of China, 2024, 31(3): 433-438+449.
- [12] 迟世伟, 刘慧博. 基于前馈补偿的永磁同步电机自抗扰控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(1): 9-13.
- CHI S W, LIU H B. ADRC control of permanent magnet synchronous motor based on the feedforward compensation [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(1): 9-13.
- [13] 张兵, 唐猛, 廖海洲. 基于负载观测的 PMSM 滑模抗扰动自适应控制[J]. 工程设计学报, 2013, 20(5): 427-433.
- ZHANG B, TANG M, LIAO H Z. Anti-disturbance adaptive sliding mode control of PMSM based load torque observer [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2013, 20(5): 427-433.
- [14] 张贺伟. 基于新型趋近律与负载补偿永磁同步电机滑模控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- ZHANG H W. Research on sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on new approach law and load compensation [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024.
- [15] 石秦赓, 朱俊杰, 韩一, 等. 基于自适应滑模观测器的永磁同步电机负载转矩辨识[J]. 电工技术学报, 2025, 40(12): 3868-3882.
- SHI Q G, ZHU J J, HAN Y, et al. Load torque identification of permanent magnet synchronous motor based on adaptive sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(12): 3868-3882.
- [16] 陈天翔, 张辑, 彭彦卿. 基于转矩滑模观测器的

- 抗负载扰动控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 114-118.
- CHEN T X, ZHANG J, PENG Y Q. Anti-load disturbance control method based on torque sliding mode observer [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 114-118.
- [17] 吕洋. 变惯量负载永磁同步电机高性能控制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- LYU Y. Research on high performance control strategies of permanent magnet synchronous motor with variable inertia [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [18] 王铮. 基于自适应卡尔曼观测器的永磁同步电机系统速度控制[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- WANG Z. Speed control of permanent magnet synchronous motor with a self-adaption Kalman observer [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [19] YOSHIOKA T, PHUONG T T, YABUKI A, et al. High-performance load torque compensation of industrial robot using Kalman-filter-based instantaneous state observer [J]. IEEJ Journal of Industry Applications, 2015, 4(5): 589-590.
- [20] ZHENG L, HAO Z Z, SONG J W, et al. Compensator design of permanent magnet synchronous linear motor control system based on load disturbance observer [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(5): 3709-3720.
- [21] LIU Q, LU H, ZHANG X B, et al. Active prediction compensation strategy: A new positioning compensation technique for improving the accuracy of the dual ball screw feed mechanism under load [J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2025, 53(2): 1572-1601.
- [22] 丁文, 梁得亮, 罗战强. 两级滤波滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(11): 1-10.
- DING W, LIANG D L, LUO Z Q. Position sensorless control of PMSM using sliding mode observer with two-stage filter [J]. Electrical Machines and Control, 2012, 16(11): 1-10.
- [23] 张立伟, 李行, 宋佩佩, 等. 基于新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制系统[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊1): 70-78.
- ZHANG L W, LI X, SONG P P, et al. Sensorless vector control using a new sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor speed control system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 70-78.
- [24] MAOYUN Z, YONG C, ZHIQIN H, et al. Research on fractional-order sliding mode PMSM speed regulation based on load observer [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2024, 19(5): 3429-3438.
- [25] 张晓光, 孙力, 赵克. 基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 111-116+8.
- ZHANG X G, SUN L, ZHAO K. Sliding mode control of PMSM based on a novel load torque sliding mode observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 111-116+8.
- [26] 荀倩, 王培良, 李祖欣, 等. 基于递推最小二乘法的永磁伺服系统参数辨识[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 161-169.
- GOU Q, WANG P L, LI Z X, et al. PMSM parameters identification based on recursive least square method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 161-169.
- [27] 王飞宇, 田井呈, 卓克琼, 等. 基于改进模型参考自适应算法的永磁同步电机转动惯量辨识[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(8): 63-67+87.
- WANG F Y, TIAN J C, ZHUO K Q, et al. Inertia identification of permanent magnet synchronous motor based on improved model reference adaptive system algorithm [J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(8): 63-67+87.
- [28] 杨明, 屈婉莹, 陈扬洋, 等. 基于变周期递推最小二乘法与卡尔曼观测器的伺服系统在线惯量辨识[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊2): 367-376.
- YANG M, QU W Y, CHEN Y Y, et al. On-line inertia identification of servo system based on variable period recursive least square and Kalman observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 367-376.

收稿日期:2025-05-18

收到修改稿日期:2025-08-16

作者简介:

吴崇凯(1998-),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制,2845177554@qq.com;

* 通信作者:邱鑫(1985-),男,博士,副教授,研究方向为电机控制、电机优化设计,qiuxin_nh@163.com。