

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519374

一种 PMSM 自整定在线惯量辨识策略*

李彦潮 许博

(北京信息科技大学机电工程学院 北京 100192)

摘要: 针对伺服电机控制系统需要精确的电机动力学参数以提高控制器精度的问题,对永磁同步电机(PMSM)传统速度环PI控制中难以实现在线机械参数辨识的问题进行了研究,提出了一种超螺旋算法(STA)在线参数辨识策略。首先,使用递推最小二乘法(RLS)辨识得到的 C_m 、 B_m 进行摩擦转矩前馈补偿,然后基于SOGI-QSG算法进行幅值提取,在递归最小二乘法拟合离线参数的基础上,提出的在线机械参数辨识策略通过分析系统速度环频率特征,在实现PMSM矢量控制系统速度环PI参数自整定的同时,实现PMSM矢量控制系统在线惯量辨识,并使用Matlab simulink进行仿真实验验证。研究表明:STA惯量辨识策略可以在调节PMSM速度环PI参数的同时实现转动惯量的在线辨识,实现相对误差0.3529%,结果对比RLS和扩展卡尔曼滤波算法(EKF),精度分别提升4.33%和17.3%,证明本策略的有效性和实用性。

关键词: 惯量辨识;永磁同步电机;矢量控制

中图分类号: TM341;TN601 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

A self-tuning online inertia identification strategy for PMSM

Li Yanchao Xu Bo

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Information Technology, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the issue that servo motor control systems require accurate motor dynamic parameters to improve controller accuracy, this study investigates the difficulty in achieving online mechanical parameter identification in the traditional speed loop PI control of PMSM, and proposes an STA online parameter identification strategy. First, the friction torque feedforward compensation is performed using C_m and B_m obtained by RLS identification. Then, amplitude extraction is conducted based on the SOGI-QSG algorithm. On the basis of offline parameter fitting using the recursive least squares method, the proposed online mechanical parameter identification strategy analyzes the frequency characteristics of the system's speed loop. It realizes the self-tuning of PI parameters for the speed loop of the PMSM vector control system while achieving online inertia identification of the PMSM vector control system, with simulation experiments verified using Matlab Simulink. The research results show that the STA inertia identification strategy can realize online identification of the moment of inertia while adjusting the PI parameters of the PMSM speed loop, achieving a relative error of 0.3529%. Compared with the RLS and EKF, the accuracy is improved by 4.33% and 17.3% respectively, which proves the effectiveness and practicality of this strategy.

Keywords: inertia identification; permanent magnet synchronous motor; vector control

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因具有结构简单、功率密度高、瞬时扭矩大等优点,广泛适用于机器人、电动汽车、航空航天等领域^[1-3]。然而在实际运行中,由于运行环境干扰,电机本身磁路特性多变,多种设计参数间存在耦合,在永磁同步电机

的控制器设计中常常由于非线性因素,影响控制精度和瞬态响应。因此,如何精确地辨识出永磁同步电机的参数而对控制系统施加精准的前馈补偿是提高控制精度的关键^[4]。永磁同步电机非线性因素的参数主要包括永磁体磁链、定子电阻、交直流电感等电磁参数,以及转动惯量、库伦摩擦、阻尼系数等机械参数^[5]。其中,转动惯量由于电机高速旋转,收到非线性因素的影响最大,成为机械参数辨识的

收稿日期:2025-07-16

* 基金项目:昌平区科技副总项目(202403004015)资助

重点^[6]。为此,国内外学者先后展开研究,提出了一系列辨识方法。目前,电机惯量的在线辨识方法主要有递推最小二乘法、模型参考自适应算法、扩展卡尔曼滤波算法、人工智能算法等^[7-9]。其中递推最小二乘法较容易收环境噪声的影响,且需要足够大的数据量用来拟合^[10];模型参考自适应法难以在非线条件下确定自适应律,卡尔曼滤波法可以实现噪声环境下的状态估计,但其协方差矩阵难以准确描述^[11],人工智能算法在处理复杂非线性系统的参数辨识具有一定优势,但其运算复杂,且容易陷入局部最优。据此,对 PMSM 的转动惯量而言,使用一种响应速度快,辨识精度高的在线辨识算法能有效提高控制器精度,从而提升系统的性能。

对于矢量控制的 PMSM 系统,国内外学者的参数辨识的成果多集中在定子电阻 R_s 或永磁体磁链 ψ_f 等电磁参数辨识上,而难以实现在前者辨识基础上同时对电机惯量 J_m 等机械参数的辨识。潘海鸿等^[12]使用最小二乘法(recursive least square, RLS)实现对电机电阻、电感和永磁体磁链参数的辨识,但这种方法十分占用计算资源;清华大学李世元等^[13]使用扩展卡尔曼滤波算法(extended Kalman filter algorithm, EKF)进行在线辨识,但 EKF 是一种时域递推算法,只能在时域内进行辨识;对此潘海鸿等^[14]将其与小波变换相结合,提出一种能在频域内对 PMSM 单参数多尺度在线辨识的方法;杨洪沙等^[15-16]基于 PMSM 的机械参数将转动惯量 J_m 、库伦摩擦 C_m 和阻尼系数 B_m 分别采用 3 个不同时间尺度的最小二乘算法进行在线辨识,再将辨识结果互相更新,基于电机参数的不同时间尺度实现电机多参数同时在线辨识,然而为了保证算法收敛,仍然需要在 d 轴注入幅度及频率合理的启动电流以确保慢时间尺度最小二乘算法的参数辨识精度,对启动电流的激励效果要求较高^[17-21]。因此,针对伺服电机控制系统需要精确的电机动力学参数以提高控制器精度的问题,本文对永磁同步电机(PMSM)传统速度环 PI 控制中难以实现在线惯量辨识的问题进行了研究,提出了一种超螺旋算法(super-twisting algorithm, STA)在线参数辨识策略。首先使用斜坡激励电流来启动系统,其次,为了消除摩擦转矩对系统的影响,将使用 RLS 辨识得到的 C_m 、 B_m 进行摩擦转矩前馈补偿,然后基于 SOGI-QSG 算法进行幅值提取,在永磁同步电机 FOC 矢量控制模型中实现了转动惯量的在线辨识,并使用 Matlab simulink 进行仿真实验验证^[22-25]。最后将实验结果和单独使用 RLS 和 EKF 进行对比,证明 STA 策略能够实现对 PMSM 矢量控制系统速度环 PI 参数自整定的同时,对 PMSM 转动惯量辨识精度有所提升。

1 PMSM 参数辨识模型

在理想状态下, PMSM 的 d - q 轴坐标系中的电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega_r i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d \omega_r i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d, i_d 为 d 轴电压、电流; u_q, i_q 为 q 轴电压、电流; R_s 为定子电阻; ω_r 为电角速度; ψ_f 为永磁体磁链。

PMSM 采用 $i_d = 0$ 的矢量控制且电机处于稳态时 d - q 轴电压方程可以简化为:

$$\begin{cases} u_d = -L_q \omega_r i_q \\ u_q = R_s i_q + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (2)$$

2 RLS 机械参数辨识算法

为了改善后文自整定算法(self-tuning algorithm, STA)的动态性能,提出了一种基于递归最小二乘多项式函数拟合(RLS)的机械参数辨识算法,能够有效克服传统最小二乘法辨识中 $\frac{d\omega_m}{dt}$ 引入噪声影响辨识结果的问题,实施于系统的启动过程。该过程将得到系统的粘滞阻尼系数、库仑摩擦系数和转动惯量,摩擦转矩系数用于系统非线性摩擦转矩前馈补偿,以改善系统动态性能,转动惯量初值用于本文的自整定算法。

在电机系统启动阶段,令转子转速跟踪斜率为 k 的斜坡转速参考信号 ω^{ref} 来启动系统,参考信号 ω^{ref} 如式(3)所示。

$$\omega^{\text{ref}} = kt [s] \quad (3)$$

在转子转速达到期望转速后,系统将进入稳态。在匀加速和平稳运行阶段采用 RLS 算法,如图 1 所示。

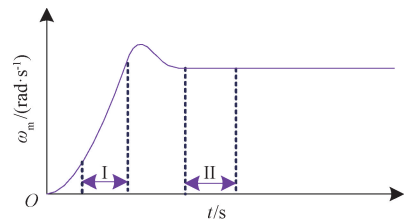


图 1 RLS 算法实施过程

Fig. 1 Implementation process of the RLS algorithm

在加速阶段,系统的机械运动方程为:

$$T_e = PJ\omega_m + B_m\omega_m + C_m \text{sign}(\omega_m) \quad (4)$$

分析可得,在转子转速处于匀加速阶段时,系统的电磁转矩 T_e 是机械转速 ω_m 的一次函数,随着转速的升高而逐渐增大,而转子转速与时间变量 t 成正比。基于此,应用递推最小二乘法对式(4)进行一次函数的多项式拟合,函数拟合式为:

$$T_e(t) \equiv at + b \quad (5)$$

其中,拟合系数 a 和 b 为:

$$\begin{cases} a = kB_m \\ b = pJ\omega_m + C_m \text{sign}(\omega_m) \end{cases} \quad (6)$$

在转速平稳阶段,系统几乎不存在加速转矩,对稳态阶段的转速和电磁转矩进行采样,可得到平均转速 ω_{ma} 和平均电磁转矩 T_{ea} ,结合式(6)可得:

$$T_{ea} = B_m \omega_{ma} + C_m \text{sign}(\omega_{ma}) \quad (7)$$

联立式(5)~(7),可得机械参数辨识值为:

$$\begin{cases} \hat{B}_m = \frac{a}{k} \\ \hat{C}_m = T_{ea} - \frac{a}{k} \omega_{ma} \\ \hat{J} = \frac{a}{k^2} \omega_{ma} + \frac{b}{k} - \frac{T_{ea}}{k} \end{cases} \quad (8)$$

辨识得到的摩擦转矩系数 B_m 和 C_m 将用于摩擦转矩的前馈补偿中,以改善系统动态性能。摩擦转矩系数只在系统的启动过程进行辨识,后续将不再对其进行辨识。因为摩擦转矩系数在单次的运行过程中变化较小, B_m 受润滑剂的类型以及温度的影响,因此机械负载的变化对其影响较小; C_m 与转轴和轴承之间接触面的粗糙度、材料特性以及压力大小有关,由径向力分量引起 C_m 变化的影响可以等效为到负载转矩的改变中。由于Stribeck现象导致零速附近的摩擦转矩存在较为严重的非线性,但这一转速区域非常窄,对通常情况下的系统运行造成的影响较小。综上所述,RLS算法得到的摩擦转矩系数,对于系统运行具有较为良好的改善作用。

3 STA 算法

3.1 自整定的意义

永磁同步电机驱动系统运行过程中可能遭遇变化的机械负载,这意味着负载转矩和转动惯量具有时变特性。负载转矩的变化可以被视为系统外部扰动,速度环PI调节器对负载扰动具有较强的抑制能力。然而,转动惯量的变化将直接改变系统模型参数以致参数失配,将很大程度上影响系统环路的频率特征。当引起速度环路的带宽增大时,将引起系统过冲,对噪声和扰动更为敏感,系统稳定性降低甚至失稳;当引起速度环路的带宽减小时,将导致系统动态响应性能降低,抑制外界干扰能力下降,稳态误差和系统的调节时间都会变大。以上两种情况都会降低系统性能,影响实际驱动系统正常运行。

针对上述参数失配与环路带宽改变的难题,本文提出了一种基于速度环频率响应自整定的在线机械参数辨识策略。STA旨在平衡电机系统的动态性能和稳定性,确保电机系统始终保持所需的速度环带宽和最大鲁棒性。该方案可以增强系统处理负载惯性的能力,从而允许系统即使在负载的转动惯量显著变化时也能保持期望的带宽和最大鲁棒性。值得强调的是,本文采用的特定频率响应提取方案,可以有效抑制采样噪声和信号中直流偏置的干扰。这为本文所提出的自整定算法提供了更精确的频域响应,使系统带宽更准确地跟踪期望带宽,提高了系统转动惯量辨识的

精度。此外,该STA可应用于任何基于PI调节器的控制系统,实现系统控制参数的最优整定,并可广泛地与各种先进算法结合以提高系统性能。根据STA的基本原理,STA不关心系统的内部细节,而只考虑系统的激励和响应之间的关系。在STA的计算逻辑上,整个计算过程采用了SOGI-QSG和PI两种较为经典的算法,计算负担较小。

3.2 PI参数对频率特性的影响

速度环PI调节器的比例增益 K_{sp} 和积分增益 K_{si} 对系统开环频率特性有较大影响,同时也会影响闭环系统的静态特性和动态性能。根据第2节中的速度环路PI参数整定策略,可得系统具有极大相角裕度下 K_{sp} 和 K_{si} 的约束条件为:

$$K_{si} = \frac{\omega_i^2}{\omega_i} K_{sp} \quad (9)$$

在该约束条件下,设置不同速度环比例增益 K_{sp} 时系统开环的频率响应曲线。该约束条件保证了系统在转折频率处具有极大的相角裕度,使得开环系统的穿越频率 ω_c 仅由速度环比例增益 K_{sp} 决定。因此,可以动态地调整速度环的比例增益 K_{sp} 和积分增益 K_{si} 以保持期望的开环带宽和相频特性。速度环幅频响应特性如图2所示。

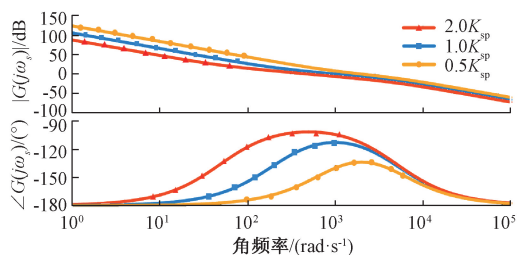


图2 不同 K_{sp} 下的频率响应曲线

Fig. 2 Frequency response curves under different K_{sp} values

3.3 自整定算法基本原理

引入微小正弦扰动信号激励系统速度环路,分析系统的幅频响应。根据速度环开环幅频增益来调整PI参数,保证系统在开环穿越频率 ω_c 处的幅频增益始终保持为0 dB,实现PI参数自整定与机械参数在线辨识,如图3所示,为STA的系统控制框图。

利用3.2节STA初始估算算法得到的粘滞阻尼系数 B_m 和库仑摩擦系数 C_m 进行摩擦转矩前馈补偿,以改善系统动态性能。在自整定过程中, $x_p(t)$ 为向速度环注入的微小正弦激励信号,如式(10)所示,该正弦激励信号的频率 ω_c 即系统期望的开环穿越频率。

$$x_p(t) = A_p \sin(\omega_c t) \quad (10)$$

实际运行过程中的低频转速参考信号 ω^{ref} 会干扰STA算法的选频过程,为了获取速度环开环中,目标频率的激励信号 $e(t)$ 和响应信号 $r(t)$,如式(11)、(12)所示。

$$e(t) = x_p(t) + \omega_m^{ref} - \omega_m \quad (11)$$

$$r(t) = \omega_m - \omega_m^{ref} \quad (12)$$

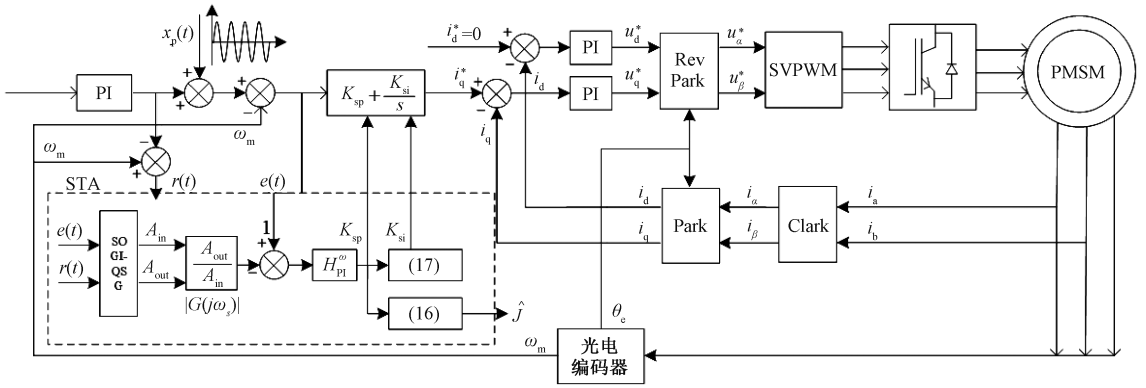


图 3 基于速度环频率响应自整定的在线机械参数辨识系统控制框图

Fig. 3 Control block diagram of the online mechanical parameter identification system based on speed loop frequency response self-tuning

基于二阶广义积分的正交信号发生器(second order generalized integral quadrature signal generator, SOGI-QSG)可以根据输入的具有任意相位的正弦函数,生成与之正交的正弦函数,并且收敛速度快,抗噪能力强。本文基于 SOGI-QSG 设计了正弦信号的幅值提取算法,用于提取激励信号 $e(t)$ 和响应信号 $r(t)$ 的幅值 A_{in} 与 A_{out} ,据此可以得出系统在频率 ω_s 处的速度开环幅频增益 $|G(j\omega_s)|$ 。

本文设计了自整定调节器 $H_{PI}^{\omega_s}$ 用于获取速度环的比例增益 K_{sp} ,并根据式(9)获取积分增益 K_{si} ,对速度环 PI 参数 K_{sp} 和 K_{si} 进行自整定以实现环路幅频增益 $|G(j\omega_s)| = 1$ 。考虑到系统转动惯量参数与速度环路 PI 参数整定过程存

在着强相关关系,因此,自整定过程实际上就是电机惯量在线辨识的过程。

3.4 自整定算法部署

基于 SOGI-QSG 的幅值提取算法的结构,如图 4 所示,其中 ω_c 是待处理信号的角频率; k_{dc} 是直流反馈增益; k_{ac} 是交流反馈增益; v 是待处理信号; v_{noise} 是带有高频噪声和直流偏置干扰下的待处理信号; v_q 表示信号 v 的正交信号; $\text{sqrt}(\cdot)$ 表示开方函数; $\|v\|$ 为信号 v 的幅值大小。针对传统 SOGI-QSG 对于直流干扰不具有抑制作用,以及不具有交流信号增益的问题,本文设计了直流反馈通路和交流反馈通路,提升了幅值提取算法目标信号的追踪能力和直流偏置信号影响下的抗扰性能。

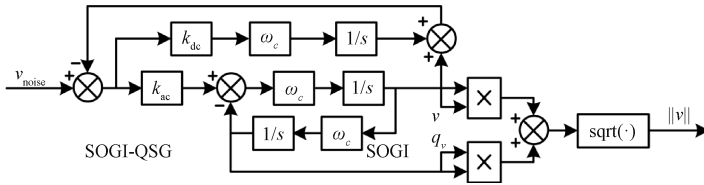


图 4 基于 SOGI-QSG 的幅值提取算法结构框图

Fig. 4 Structural block diagram of the amplitude extraction algorithm based on SOGI-QSG

自整定调节器用于调整速度环 PI 参数,以保证期望频率处的开环增益为 0 dB,且相角裕度为极大值,共由两部分组成,分别为 $H_{PI}^{\omega_s}$ 调节器和 $f(K_{sp}, \omega_s, \omega_i)$ 映射器, $H_{PI}^{\omega_s}$ 调节器用于调节 K_{sp} 的大小,使系统 ω_s 频率的开环增益跟踪 0 dB; $f(K_{sp}, \omega_s, \omega_i)$ 映射器根据 K_{sp} 大小映射得到 K_{si} ,使得系统相角裕度具有极大的值。

在期望的开环穿越频率 ω_s 处,开环幅频增益 $|G(j\omega_s)|$ 与速度环的比例增益 K_{sp} 之间的数学关系可以由偏微分方程来表征,如式(13)所示。

$$\frac{\partial |G(j\omega_s)|}{\partial K_{sp}} = \frac{\partial \left(\sqrt{K_{sp}^2 + \frac{K_{si}^2}{\omega_s^2}} \frac{\omega_i}{\sqrt{\omega_s^2 + \omega_i^2}} \frac{K_T}{j\omega_s} \right)}{\partial K_{sp}} \quad (13)$$

通过将式(7)代入式(11)中,可得:

$$\frac{\partial |G(j\omega_s)|}{\partial K_{sp}} = \frac{K_T}{J\omega_s} \quad (14)$$

当自整定算法的开环穿越频率被设置为 ω_s 时,根据式(11)可知,在频率 ω_s 处的开环幅频增益 $|G(j\omega_s)|$ 与 K_{sp} 的大小成正比例关系。基于这一关系,可将自整定调节器 $H_{PI}^{\omega_s}$ 设计为纯积分环节,即:

$$H_{PI}^{\omega_s} = \frac{\omega_s \hat{J} \omega_s}{K_T s} \quad (15)$$

其中,转动惯量参数由第 3.3 节的自整定初始算法得到。根据式(13),可得系统速度环 PI 调节器的比例增益,如式(16)所示。

$$K_{sp} = L^{-1} \left[L \left(1 - \frac{A_{out}}{A_{in}} \right) \cdot H_{PI}^{\omega_s} \right] \quad (16)$$

其中, $L(\cdot)$ 和 $L^{-1}(\cdot)$ 分别为拉式变换算子和拉氏反

变换算子。根据式(7),可以相应地确定积分增益,即:

$$K_{si} = f(K_{sp}, \omega_s, \omega_i) = \frac{\omega_s^2}{\omega_i} K_{sp} \quad (17)$$

当 STA 进入稳态时,即速度环 PI 参数处于稳定状态,系统转动惯量辨识值为:

$$\hat{J} = \frac{K_{sp} K_T}{\omega_s} \quad (18)$$

3.5 稳定性与收敛速度分析

由于 STA 的输出参与了速度环 PI 参数的整定, STA 的稳定性和收敛速度影响着 PMSM 驱动系统的稳定性和动态性能。本节将基于压缩映射原理给出 STA 稳定性的证明,并阐述出 STA 算法的收敛过程本质上是一个压缩映射过程,这意味着 STA 具有较为迅速的收敛性能。

在证明 STA 稳定性之前,有必要给出压缩映射原理和一些基本假设。压缩映射原理指出,若 (X, d) 是完备的距离空间, $T: X \rightarrow X$, 若对于任意的 $x, y \in X$, 不等式 $d(Tx, Ty) \leq \theta d(x, y)$ 成立, 其中 $0 < \theta < 1$, 则存在唯一的 $x_0 \in X$ 使得 $Tx_0 = x_0$ 。

基本假设: 1) 系统可以在初始条件下能够稳定运行; 2) STA 的带宽远远低于速度环的开环穿越频率; 3) 逆变器死区等非线性因素可以忽略。

合理性说明: 1) 该条件是保证系统能够执行 STA 的前提条件, 可以通过离线参数辨识或者简单的参数试凑来达成; 2) 该条件是 STA 的设计要求, 对于保证系统的稳定性至关重要。该条件将用于 STA 的稳定性证明, STA 的低带宽虽然会影响系统转动惯量的辨识速度和速度环中 PI 参数的收敛速度, 但不会影响系统参数便是的准确性; 3) 通常情况下, SVPWM 载波信号为 10 kHz, 速度环的截止频率要远低于逆变器的开关频率, STA 的带宽远低于速度环的带宽。虽然逆变器非线性因素会给系统带来高频谐波, 包括 5 次和 7 次谐波转矩脉动, 但这些非线性因素对系统的影响几乎都为高频信号, 经过速度环路和 STA 环路收到很大的衰减。

在式(9)的约束条件下, 当系统速度环路的开环带宽被唯一确定时, 系统的转动惯量与转矩系数的比值, 即 $\eta = J/K_T$, 对应于唯一的 K_{sp}^* , 如式(19)所示。

$$K_{sp}^* = f(\eta) = \eta \omega_s \quad (19)$$

其中, K_{sp}^* 表示在期望的开环频带宽度为 ω_s 时, 速度环 PI 调节器的比例参数; η 是系统的转动惯量与转矩系数的比值; 函数 $f(\cdot)$ 反映了该映射关系。自整定收敛过程本质上是自整定调节器的输出值 K_{sp} 向 $K_{sp}^* = f(\eta)$ 的收敛过程。结合式(17), 假设自整定初始时刻的比例参数 K_{sp} 为:

$$K_{sp} = \delta K_{sp}^* = \delta \eta \omega_s, (\delta > 0) \quad (20)$$

其中, δ 为常数, 表示自整定初始时刻的 K_{sp} 与期望 K_{sp}^* 之间的比例关系。由式(16)~(20)可得, 在初始时刻,

系统在 ω_s 处的开环幅频增益为:

$$|G(j\omega_s)| = \frac{K_{sp}}{\eta \omega_s} = \delta \quad (21)$$

由式(13)和(20)分析可知, 每经过一个自整定周期 $T_s = 1/f_s$ 后, 将获得新的比例增益 K_{sp}^{new} , 如式(21)所示。式(21)可通过式(19)进一步表示为式, 即:

$$K_{sp}^{new} = K_{sp} + (1 - \delta) \omega_s \delta \eta \omega_s T_s \quad (22)$$

$$K_{sp}^{new} = [\delta + (1 - \delta) \omega_s \delta T_s] K_{sp}^* \quad (23)$$

可将上述 STA 过程视为 K_{sp} 经过一个 STA 周期 T_s 后, 映射为 K_{sp}^{new} 的过程, 这一映射关系用 $T(\cdot)$ 表示, 即:

$$K_{sp}^{new} = T(K_{sp}) \quad (24)$$

根据式(21)和(22)可知, K_{sp} 进行映射后的像和原像与期望 K_{sp}^* 进行映射的像与原像之间的距离 d 为:

$$d(TK_{sp}, TK_{sp}^*) = \|1 - \delta\| \omega_s \delta T_s K_{sp}^* \quad (25)$$

$$d(K_{sp}, K_{sp}^*) = \|1 - \delta\| K_{sp}^* \quad (26)$$

令:

$$\xi = \omega_s \delta T_s \quad (27)$$

由压缩映射原理可知, 当 $0 < \xi < 1$ 时, 映射 $T(\cdot)$ 为压缩映射, 且 ξ 为映射 $T(\cdot)$ 的压缩映射常数。

条件 $0 < \xi < 1$ 容易实现, 一方面, STA 周期 T_s 等于 SVPWM 算法的载波周期, 其数值较小; 另一方面, 考虑到实际机械负载变化相对缓慢, STA 的期望带宽 ω_s 可以设置为较小的值, 以保证 STA 的抗干扰能力, 并且能够满足收敛速度需求。因此, 为了满足压缩映射成立条件 $0 < \xi < 1$, 只需比例系数满足 $0 < \delta < 1/(\omega_s T_s)$, 即可保证 STA 稳定。此外, 压缩映射常数 ξ 也揭示了 STA 的收敛速度, 每次经历一个 STA 周期, 当前 K_{sp} 与期望 K_{sp}^* 之间的偏差缩小到原来偏差的 ξ 倍。因此, 偏差 $err(t)$ 按照指数形式收敛, 最终趋近于 0, 即:

$$err(t) = err(t_0) \xi^{t/T_s} (t > 0) \quad (28)$$

其中, $err(t_0)$ 表示初始时刻 K_{sp} 与期望 K_{sp}^* 之间的偏差。

此外, 由于 3.4 节的 STA 初始化算法, 转动惯量初值能够使参数 δ 接近于 1, 从而能显著地减小参数 ξ 的值。因此, STA 的初始收敛速度可以达到一个较高的水平, 缩短了系统的收敛过程, 显著改善 STA 的动态性能。若系统初始时 $0 < \delta < 1$, 则该算法能够表现出非常迅速的收敛速度, 因为这意味着压缩常数 ξ 非常小; 若 $1 < \delta < 1/(\omega_s T_s)$ 范围内, 随着 STA 的收敛, δ 将逐渐趋近于 1, 同时 ξ 将越来越小, 这意味着 STA 的收敛速度将逐渐加快, 也拥有着较为不错的收敛速度。

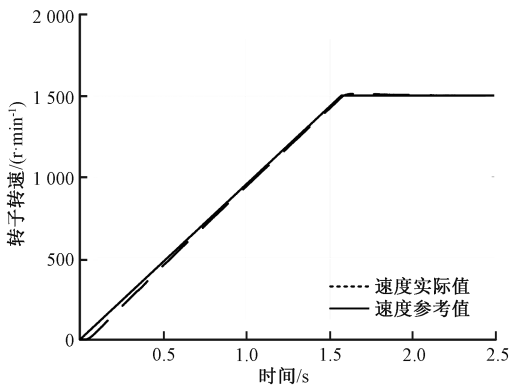
4 仿真验证与分析

为了初步验证本文提出机械参数辨识方案的科学性和有效性, 首先基于 Matlab/Simulink 进行了 STA 初始化算法和 STA 算法的仿真验证, 仿真中电机系统参数如表 1 所示。

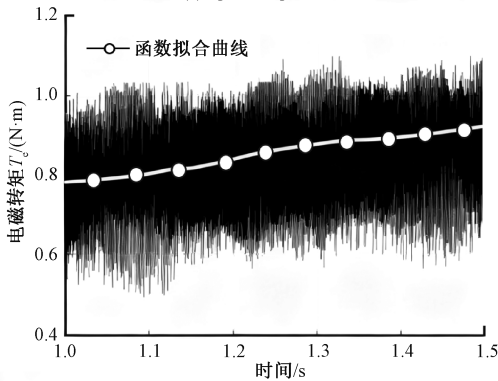
表 1 永磁同步电机仿真参数

Table 1 Simulation parameters of permanent magnet synchronous motor

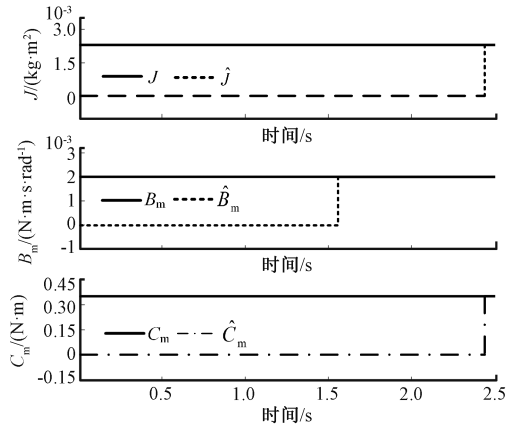
参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率	200 W	极对数	4
额定线电压	380 V	转子惯量	0.001 7 kg·m ²
额定线电流	6.8 A	电阻	2.8 Ω
额定转速	1 500 r/min	电感	0.005 5 H
额定力矩	1.27 N·m	磁链	0.182 7 Wb



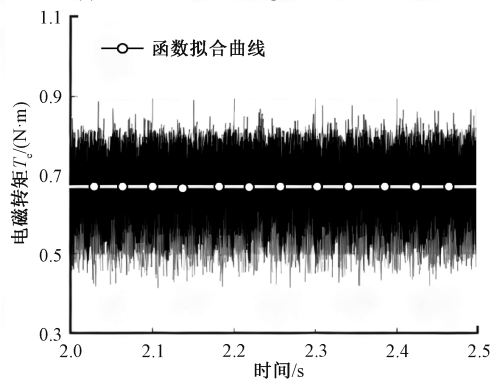
(a) 转速响应
(a) Speed response



(c) 加速阶段拟合结果
(c) Fitting results of the acceleration phase



(b) 机械参数辨识结果
(b) Results of mechanical parameter identification



(d) 匀速阶段拟合结果
(d) Fitting results of the constant velocity phase

图 5 STA 初始化算法仿真结果

Fig. 5 Simulation results of the STA initialization algorithm

如图 5(a)所示,由于 STA 初始化算法通过施加转速斜坡信号作为转速参考信号,使得基于 RLS 多项式函数拟合的机械参数辨识过程不需要转速导数 $d\omega_m/dt$ 信息,而是使用转速斜率 k 代替,得到机械参数辨识值相对准确。机械参数辨识结果及其相对误差,如表 2 所示。

4.2 自整定算法仿真验证

对 STA 算法共进行了 2 种工况下的仿真验证,工况 1 为额定转速、额定负载工况,仿真验证结果如图 6(a)所示;

4.1 RLS 机械参数辨识仿真验证

STA 初始化解法需要电机转子转速追踪斜坡信号启动,仿真中设置的参考转速递增斜率为 $k=100 \text{ rad/s}^2$,转速参考值限幅值为额定转速 $n_N=1\,500 \text{ r/min}$,即额定机械转速为 $\omega_{mN}=157.08 \text{ rad/s}$ 。在转速上升阶段和转速达到参考转速的平稳阶段分别进行基于 RLS 多项式函数拟合的机械参数辨识,对电磁转矩 T_e 和时间 t 进行多项式函数拟合。仿真结果如图 5 所示,图 5(a)为参考转速与实际转速对比图;图 5(b)为机械参数辨识结果;图 5(c)和(d)分别为加速阶段和匀速阶段的电磁转矩曲线和多项式函数拟合曲线。

表 2 STA 初始化算法仿真结果

Table 2 Simulation results of the STA initialization algorithm

参数	真实值	辨识值	相对误差/%
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.001 7	0.001 706	0.352 9
阻尼系数 $B_m/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	0.002 0	0.001 998	-0.102 2
库伦摩擦 $C_m/(\text{N}\cdot\text{m})$	0.350 0	0.351 890	0.540 1

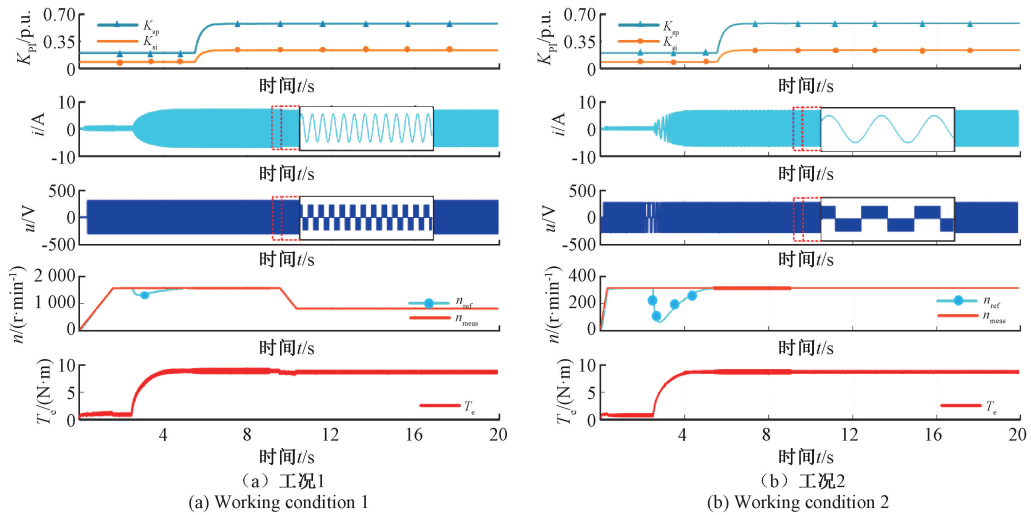


图 6 不同工况下 STA 的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of STA under different operating conditions

工况 2 为低转速、额定负载工况, 仿真验证结果如图 6(b) 所示。图 6(a) 和 (b) 均给出了速度环 PI 参数、相电流、线电压、转速以及电磁转矩的变化曲线。

如图 6(a) 所示, 电机的转子转速从 0 r/min 加速到 1 500 r/min 的额定转速, 转子转速加速斜率为 $k=100 \text{ rad/s}^2$, 然后在额定转速下 $t=2 \text{ s}$ 时突然施加 $8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的额定负载转矩进行 STA 实验。在 $t=5 \text{ s}$ 左右时执行 STA 算法, 辨识系统的转动惯量, 并对速度环的 PI 参数进行了整定。在 $t=10 \text{ s}$ 左右转子速度从 1 500 r/min 逐渐减速到 750 r/min 随后保持稳态。图 6(a) 给出了该过程各个变量的变化过程, 包括速度环 PI 参数的收敛情况、A 相定子电流 i_a 和线电压 U_{AB} 变化趋势、转子转速的跟踪情况以及电磁转矩 T_e 。随时间的变化情况。仿真中, 速度环 PI 参数最终稳定收敛, 表明了系统转动惯量辨识完成, 收敛到真实值。

如图 6(b) 所示, 电机的转子转速从 0 r/min 加速到 300 r/min 的低速状态, 转子转速加速斜率为 $k=100 \text{ rad/s}^2$, 然后在低速下 $t=2 \text{ s}$ 时突然施加 $8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的额定负载转矩进行 STA 实验。在 $t=5 \text{ s}$ 左右时执行 STA 算法, 辨识系统的转动惯量, 并对速度环的 PI 参数进行了整定。图 5(b) 给出了该过程各个变量的变化过程, 包括速度环 PI 参数的收敛情况、A 相定子电流 i_a 和线电压 U_{AB} 变化趋势、转子转速的跟踪情况以及电磁转矩 T_e 。随时间的变化情况。仿真中, 速度环 PI 参数最终稳定收敛, 表明了系统转动惯量辨识完成, 收敛到真实值。如图 7 所示, STA 在对比 RLS 和 EKF 等常见辨识算法中, 转动惯量 J 、粘滞阻尼系数 B_m 和库伦摩擦 C_m 的绝对误差值显著低于后两者, 其中转动惯量辨识精度较后两者分别提升 4.33%、17.3%, 表明 STA 算法具有良好的辨识精度。

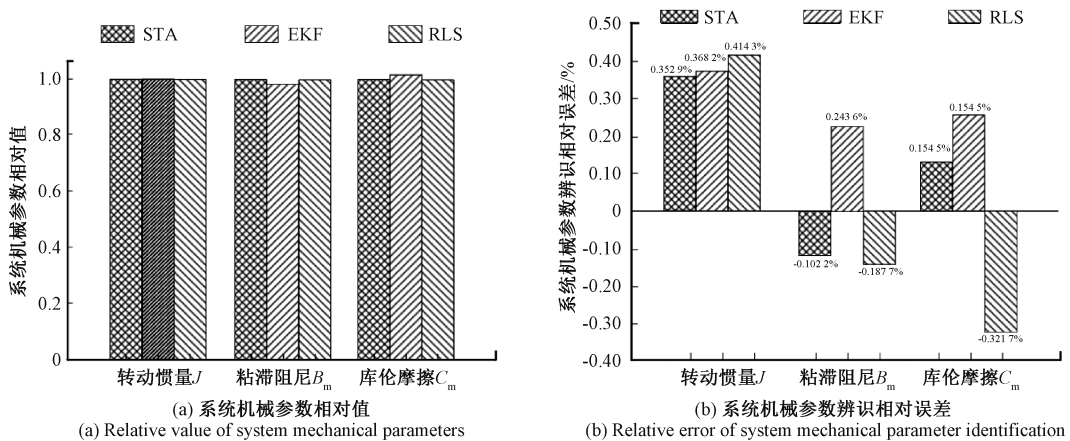


图 7 STA 对比常见算法的辨识误差

Fig. 7 Comparison of recognition errors between the STA algorithm and common algorithms

5 结 论

本文提出了基于速度环频率响应自整定的永磁同步电机在线惯量辨识策略,首先,由于传统递推最小二乘法在机械参数辨识的应用中涉及转速微分变量,将导致大量的噪声影响辨识结果的问题,使用斜坡速度参考信号模拟电机系统的启动过程,该过程应用递推最小二乘法进行多项式函数拟合,有效减小了噪声干扰,得到了良好的辨识效果,辨识结果用于摩擦转矩前馈补偿以及为后续 STA 算法赋初值。将这一阶段定义为 STA 算法初始化,为后文 STA 算法奠定了基础。其次,针对电机系统运行过程中存在由于机械负载改变而导致的参数失配,影响系统动态性能,甚至威胁系统稳定性的问题,提出了基于频率响应自整定算法的在线机械参数辨识算法,以平衡电机系统的动态性能和稳定性,保证电机系统始终拥有所需的环路带宽和极大的稳定裕度。该技术解决方案中核心算法是,基于 SOGI-QSG 的幅值提取算法,该算法在带有直流偏置噪声和高频噪声污染下,仍然能够有效提取特定频率信号的幅值,并且收敛速度快。经过 simulink 仿真实验验证,本文所提出的 STA 算法能够适用于含有 PI 控制器的永磁同步电机矢量控制系统,在调节 PI 参数的同时实现电机惯量在线辨识,且辨识误差 $\leq \pm 0.5\%$,满足理想的精度要求。

参考文献

- [1] 李红梅,陈涛. 永磁同步电机参数辨识研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 29(5): 638-647.
LI H M, CHEN T. Review of research on parameter identification of PMSM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(5): 638-647.
- [2] 倪涛,赵亚辉,赵泽仁,等. 6-UPRU 并联机器人动力学建模及基本动力学参数确定研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(12): 2911-2919.
NI T, ZHAO Y H, ZHAO Z R, et al. Dynamics modeling and base dynamics parameter determination of 6-UPRU parallel manipulators [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(12): 2911-2919.
- [3] 张相胜,陈佳明. 一种改进的机器人动力学参数辨识方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2025, 46(1): 50-56.
ZHANG X SH, CHEN J M. Improved identification method of robot dynamic parameter [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2025, 46(1): 50-56.
- [4] 谢兴彪,张晓旭,孙秀婷,等. 6-PSU 并联机器人动力学模型辨识及其驱动力矩估计新方法[J]. 力学学报, 2025, 57(1): 183-198.
XIE X B, ZHANG X X, SUN X T, et al. A new method for dynamic model identification and driving
- torque estimation for 6-PSU parallel robots [J]. Acta Mechanica Sinica, 2025, 57(1): 183-198.
- [5] 杨中华,俞经虎,俞哲,等. 应用于动力学参数辨识的激励轨迹优化研究[J]. 机械传动, 2024, 48(11): 37-47.
YANG ZH H, YU J H, YU ZH, et al. Optimization study of excitation trajectories for dynamic parameter identification [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(11): 37-47.
- [6] 朱振彪,唐俊,梁志远,等. 绳驱动双足机器人腿部动力学建模及参数辨识研究[J]. 机械传动, 2024, 48(8): 18-25.
ZHU ZH B, TANG J, LIANG ZH Y, et al. Dynamics modeling and parameters identification research on rope driven biped robot legs [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2024, 48(8): 18-25.
- [7] 洪博锴,孟婷,张豪,等. 碳纤维复合材料-金属混合机械臂的改进动力学辨识方法[J]. 东华大学学报(自然科学学报), 2025, 51(1): 119-130.
HONG B K, MENG ZH, ZHANG H, et al. Improved dynamics identification for carbon fiber composite-metal robotic arms [J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2025, 51(1): 119-130.
- [8] 倪洪杰,张林峰,金哲豪,等. 基于白鲨算法的七自由度机械臂动力学参数辨识[J]. 高技术通讯, 2024, 34(5): 505-514.
NI H J, ZHANG L F, JIN ZH H, et al. Dynamic parameter identification of 7-DOF manipulator based on white shark algorithm [J]. Chinese High Technology Letters, 2024, 34(5): 505-514.
- [9] 王帅,吴成东,刘彦君,等. 一种改进工业机械臂动力学参数辨识方法研究[J]. 机械设计与制造, 2024(11): 358-361, 365.
WANG SH, WU CH D, LIU Y J, et al. A modified identification method of industrial robot's parameter [J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(11): 358-361, 365.
- [10] 张学聪,晁永生. 工业机器人动力学参数的改进遗传算法辨识[J]. 机床与液压, 2024, 52(9): 30-35.
ZHANG X C, CHAO Y SH. Improved genetic algorithm identification for dynamic parameters of industrial robots [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(9): 30-35.
- [11] 娄宇轩,倪艳光,潘若鸣,等. ISSA 算法在加油机器人动力学参数辨识中的应用[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(1): 109-113, 120.
LOU Y X, NI Y G, PAN R M, et al. Application of ISSA algorithm in dynamic parameter identification of refueling robot [J]. Machine Design & Research, 2024, 40(1): 109-113, 120.

- [12] 潘海鸿,张青,丁可帅,等.工业机器人关节伺服模型辨识及其参数自整定[J].机床与液压,2024,52(23):32-36.
PAN H H, ZHANG Q, DING K SH, et al. Industrial robot joint servo model identification and parameter self-tuning[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(23):32-36.
- [13] 李世元,杨恒占,钱富才,等.基于互联自适应卡尔曼观测器的PMSM参数辨识[J].电子测量技术,2024,47(24):21-29.
LI SH Y, YANG H ZH, QIAN F C, et al. PMSM parameter identification based on interconnected adaptive Kalman observer[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(24):21-29.
- [14] 潘海鸿,陈韬,贾丙琪,等.采用激励轨迹实现机器人关节伺服动刚度的辨识[J].组合机床与自动化加工技术,2024(1):25-28,33.
PAN H H, CHEN T, JIA B Q, et al. Servo dynamic stiffness identification of robot joints using excitation trajectory[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(1):25-28,33.
- [15] 杨洪钊,谢冲,邓亨,等.协作机器人低速动力学参数辨识与外力矩估计[J].控制工程,2025,32(8):1458-1464.
YANG H CH, XIE CH, DENG H, et al. Low-speed dynamic parameter identification and external torque estimation of cooperative robot [J]. Control Engineering of China, 2025, 32(8):1458-1464.
- [16] 王玉瑶,贺利乐,陈佳旋,等.斜坡极点自平衡机器人静态平衡控制方法研究[J].机械科学与技术,2025,44(9):1549-1556.
WANG Y Y, HE L L, CHEN J X, et al. Static balance control method of slope pole self-balancing robot [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44(9):1549-1556.
- [17] 钟佩思,王祥文,张超,等.基于混沌粒子群算法的机器人动力学参数辨识[J].仪表技术与传感器,2023(8):107-113.
ZHONG P S, WANG X W, ZHANG CH, et al. Robot dynamic parameter identification based on chaotic particle swarm optimization algorithm [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(8):107-113.
- [18] 张一楠,丁建完.基于WLS-MBO算法的串联机器人动力学参数辨识[J].计算机工程与科学,2023,45(7):1274-1281.
ZHANG Y N, DING J W. Identification of dynamic parameters of tandem robot based on WLS-MBO algorithm [J]. Computer Engineering & Science, 2023, 45(7):1274-1281.
- [19] 邹孔金,丁建完.机器人动力学参数辨识研究[J].组合机床与自动化加工技术,2023(5):10-13,18.
ZOU K J, DING J W. Research on dynamic parameter identification of robot[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(5):10-13,18.
- [20] 任瑞龙,张士雄.非线性权重粒子群算法的机械臂动力学参数辨识[J].组合机床与自动化加工技术,2023(5):39-44.
REN R L, ZHANG SH X. Nonlinear weighted particle swarm optimization for dynamic parameter identification of manipulator [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(5):39-44.
- [21] 董慧芬,姚勤燃,王俊峰.基于动力学参数辨识的两轮机器人平衡控制[J].控制工程,2025,32(2):345-353.
DONG H F, YAO Q R, WANG J F. Balance control of two-wheeled robot based on dynamic parameter identification[J]. Control Engineering of China, 2025, 32(2):345-353.
- [22] 陈小涛,张文斌,索春光,等.基于双路参考激励信号参数辨识的非接触电压测量方法[J].仪器仪表学报,2025,46(3):20-29.
CHEN X T, ZHANG W B, SUO CH G, et al. Non-contact voltage measurement method based on parameter identification of dual reference excitation signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3):20-29.
- [23] 王禹智,吴志强,徐世超.一种PMSM位置伺服系统的动态建模与控制[J].仪器仪表学报,2024,45(4):226-233.
WANG Y ZH, WU ZH Q, XU SH CH. Dynamic modeling and control of a PMSM position servo system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4):226-233.
- [24] GUO H, XU J Q, CHEN Y H. Robust control of fault-tolerant permanent-magnet synchronous motor for aerospace application with guaranteed fault switch process [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12):7309-7321.
- [25] ZHAO J W, WANG L J, DONG F, et al. Robust high bandwidth current regulation for permanent magnet synchronous linear motor drivers by using two-degree-of-freedom controller and thrust ripple observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(3):1804-1812.

作者简介

李彦潮(通信作者),硕士,主要研究方向为机器人动力学。

E-mail:935542051@qq.com

许博,博士,副教授,主要研究方向为机器人运动控制。

E-mail:Xubo821130@bistu.edu.cn