

基于 FxLMS 算法的双馈直线电机交流电磁力矩自适应补偿控制

彭英楠, 王修森, 王业勤*, 钟再敏
(同济大学汽车学院, 上海 201804)

Adaptive Compensation Control of AC Electromagnetic Torque for Doubly-Fed Linear Motors Based on the FxLMS Algorithm

PENG Yingnan, WANG Xiuse, WANG Yeqin*, ZHONG Zaimin
(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: [Objective] In response to the rotor vibration issues of doubly-fed linear motor (DFLM) under AC excitation, this paper proposes an adaptive compensation control method based on the filtered-x least mean-square (FxLMS) algorithm, aimed at enhancing both the dynamic performance and the operational stability of DFLM. [Method] Firstly, the electromagnetic vibration mechanism of DFLM under AC excitation was analyzed in depth. By establishing the two-point force model of a five-phase twenty-slot DFLM under AC excitation, the generation mechanism of the pitching moment induced by AC excitation was investigated. Secondly, based on the mechanism analysis, the FxLMS algorithm was introduced as the core control method, which relied on closed-loop feedback control to adaptively inject harmonic currents, thus effectively suppressing the periodic vibration. Finally, in order to further improve the control effect, a feedforward compensation control method based on the electric angle of the mover excitation current was proposed, in combination with the above generation mechanism of electromagnetic torque, improving the dynamic response capability of the system. [Results] To validate the effectiveness of the proposed method, simulation analysis and experimental verification were conducted. A dynamic model of the DFLM was established on the Matlab/Simulink platform, and the vibration response of the mover before and after the introduction of adaptive compensation control was compared and analyzed. The simulation results indicated that the adaptive compensation control method based

on the FxLMS algorithm achieved substantial suppression of vertical mover vibrations. And the introduction of feedforward control improved the dynamic performance of the control system and reduced the regulation pressure of the feedback control. To further verify the practical performance of the algorithm, an experimental platform was set up and tests were conducted under different operating conditions. Experimental results showed that the adaptive compensation control method based on the FxLMS algorithm significantly reduced the vertical mover vibrations induced by AC excitation. [Conclusion] The adaptive compensation control method based on FxLMS algorithm utilizes the adaptive characteristics of the FxLMS algorithm, combined with the feedforward compensation strategy. This approach effectively solves the vibration problem generated during the AC excitation process of DFLM without changing the original closed-loop control structure, significantly improved the operation stability and control accuracy of DFLM. It provides a novel solution for the high-performance control of DFLM.

Key words: doubly-fed linear motor; FxLMS algorithm; adaptive compensation control; vibration suppression

摘要: [目的] 针对双馈直线电机 (DFLM) 在交流励磁下的动子振动问题, 本文提出了一种基于滤波-x 最小均方 (FxLMS) 算法的自适应补偿控制方法, 旨在提高 DFLM 的动态性能和运行稳定性。[方法] 首先, 对 DFLM 在交流励磁条件下的电磁振动机理进行了深入分析, 通过建立五相 20 槽 DFLM 交流励磁两点受力模型, 研究了由交流励磁引起的俯仰力矩的产生机理。然后, 基于该机理分析, 引入了 FxLMS 算法作为核心控制方法, 依靠闭环反馈控制自适应地注入谐波电流, 从而有效抑制周期性振动。最后, 为进一步提升控制效果, 提出了一种基于动子

基金项目: 上海市科学技术委员会项目 (23DZ1203300)

Shanghai Municipal Commission of Science and Technology
(23DZ1203300)

励磁电流角度的前馈补偿控制方法,提升了系统的动态响应能力。【结果】为了验证所提方法的有效性,进行了仿真分析和试验验证。基于 Matlab/Simulink 平台建立了 DFLM 的动态模型,对比分析了引入自适应补偿控制前后的动子振动响应。仿真结果表明,基于 FxLMS 算法的自适应补偿控制方法在动子垂向振动抑制方面取得了显著效果;前馈控制的引入,改善了控制系统的动态性能,减轻了反馈控制的调节压力。为了进一步验证算法的实际应用性能,本文搭建了试验平台,并在不同的运行条件下进行了试验测试。试验结果表明,本文所提的基于 FxLMS 算法的自适应补偿控制方法能够显著降低交流励磁引起的动子垂向振动。【结论】基于 FxLMS 算法的自适应补偿控制方法利用 FxLMS 算法的自适应特性,结合前馈补偿策略,在不改变原有闭环控制结构的前提下,有效解决了 DFLM 交流励磁过程中产生的振动问题,显著提高了 DFLM 的运行稳定性和控制精度,为 DFLM 的高性能控制提供了一种新的解决方案。

关键词: 双馈直线电机; FxLMS 算法; 自适应补偿控制; 振动抑制

0 引言

相比于旋转电机,直线电机在推动物体平动方面具有无需额外机械结构就可以将力直接作用于电机动子结构的特点,因此具有高加速度、大速度范围等优势^[1-4]。而双馈直线电机(Doubly-Fed Linear Motor, DFLM)相比其他直线电机可同时提供推力和法向力、控制自由度更多,可实现定子和动子之间的非接触式功率传输^[5-6],有望在未来的城际轨道交通等领域中发挥关键作用^[7],但目前对 DFLM 的相关研究依旧很少。

无论是旋转电机还是直线电机,随着对电机性能要求的提升,其振动问题日益凸显。电机振动不仅会产生电磁噪声,还可能引发与系统其他部件的共振,同时电机振动所带来的电流波动也可能给电源带来更大的功率波动。因此,电机的振动问题会影响整个系统的使用寿命、可靠性和舒适性。相比通过调整电机结构来抑制电机振动,采用主动控制方法更容易实现且成本更低。目前电机振动控制方法主要包括:滤波法^[8-10]、脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)法^[11-13]和谐波电流注入法^[14-17]。其中谐波电流注入法是指注入与振动电磁力阶次相同、频率相同且相位相反的谐波电流,注入的谐波电流产生的电磁力

与原电磁力相互抵消,从而有效抑制电磁振动。使用最小均方(Least Mean-Square, LMS)算法这种自适应方法进行谐波电流注入,有助于提升整个控制系统的动态性能和鲁棒性。

LMS 算法是一种基于梯度下降原理的寻优算法,最早由 Widrow^[18-19]在信号处理领域提出,具有不需要先验知识、低计算复杂度、易于收敛和易于实现的特点。在 Widrow 等人的基础上, Burgess 等人^[20]对系统的构成及算法进行了仿真研究,提出了著名的滤波-x 最小均方(Filtered-x LMS, FxLMS)算法,该算法简单且有效,基本实现了对前馈信号即已知振动源或噪声源的自适应控制。

由于 FxLMS 算法具有鲁棒性强、计算复杂度低和易于实现的优点,其在电机的振动抑制领域应用广泛。Gunther^[21]提出了一种基于 FxLMS 算法的永磁同步电机转子位置传感器周期性误差在线补偿策略,利用 FxLMS 自适应滤波器实时调整转子位置以补偿误差,有效抑制了位置误差的低次谐波。王欣^[22]提出了一种基于离散小波变换的 FxLMS 算法,用于抑制永磁同步电机的不稳定和混沌行为,该算法在时域和频域同时控制电机动态,有效增强了系统稳定性,避免了失稳情况的发生。王永勤^[23]提出了一种基于 FxLMS 算法的共振抑制方法,该方法在不需测量负载端变量的情况下,通过自适应调整有限脉冲响应滤波器实现了对电机驱动系统中共振的抑制。Dominik^[24]提出了一种基于多谐波自适应控制器的新型主动振动控制方法,采用基于窄带的多 FxLMS 自适应控制策略来抑制永磁同步电机中的谐波干扰信号及其高次谐波成分。Marco^[25]提出了一种基于 FxLMS 算法的主动振动控制方法,通过注入补偿电流来抑制永磁同步电机中由磁各向异性引起的振动。Reitmeter 等人^[26]提出了一种通过控制驱动扭矩来主动降低齿轮箱中齿轮啮合振动的方法,采用 FxLMS 算法并结合二次路径识别确定一个补偿扭矩,然后由电驱动施加此补偿扭矩以抵消振动。

DFLM 交流励磁会产生行波磁场,行波磁场运动会引起电机各相间电磁力的周期性变化,从而形成一个相对于基波频率二倍频的交流电磁力矩,进而导致电机动子在垂向上产生一个相对于基波频率二倍频的前后振动。为了抑制这种前后振动,减轻振动对 DFLM 正常运行的影响,本文采

用 FxLMS 算法对振动进行自适应补偿。为了更好地设计控制算法, 本文对二倍频振动的产生机理进行了分析, 在自适应控制方法的基础上引入前馈补偿, 既提升了系统的动态性能, 又减小了反馈系统的调节压力。

综上所述, 本文的工作可总结如下:

(1) 对一种由 DFLM 交流励磁所引起的交变电磁力矩的产生机理进行了分析;

(2) 提出了一种包括前馈补偿与基于 FxLMS 算法的自适应控制方法来抑制交流电磁力矩, 并通过仿真和试验验证了该控制方法的有效性。

1 交流励磁俯仰力矩产生机理

与其他类型直线电机不同, DFLM 在动子侧采用交流励磁, 这使得电机在动子侧形成了一个相对绕组运动的行波磁场, 从而导致电磁力在相间的分布发生周期性变化。如果忽略齿槽效应与端部效应带来的影响, 这种电磁力的周期性分布变化可以等效为一个作用在动子上的交变电磁力矩, 由于该力矩会使动子产生俯仰振动, 故称其为俯仰力矩。

以集中式五相 20 槽 DFLM 为例, 将整个动子分为前、后 1/2 动子单元, 建立两点受力模型, 如图 1 所示。并基于此模型具体阐述俯仰力矩的产生机理。

由参考文献 [27] 可知, 各相产生的垂向力 F_{zn} 与各相瞬时励磁电流 i_n 的关系可表示为

$$F_{zn} = \frac{3}{4} \frac{M_n^2}{\kappa \delta} i_n^2 = K_{Fz} i_n^2 \quad (1)$$

式中: M_n 为各相互感; κ 为定动子匝数比; δ 为电机气隙。 M_n 、 κ 和 δ 在控制系统中通常不发生变化, 可视为常数, 为方便将其组合表示, 记为电磁力系数 K_{Fz} 。

图 1 中, 将前 1/2 动子单元上的垂向电磁力定义为 F_F , 其到定子中点的距离定义为力臂 L_1 ; 将后 1/2 动子单元上的垂向电磁力定义为 F_R , 其到定子中点的距离定义为力臂 L_2 。

为了保证 DFLM 稳定运行, 通常情况下需使电机在动子侧垂向合力的大小不变, 即 F_F 与 F_R 的大小不变。但在不同电角度下, 电磁力分布会发生变化, 可以等效为力的作用点发生了变化, 即 L_1 与 L_2 改变, 这就产生俯仰力矩。

在前 1/2 动子单元中, 为了保证动子垂向电

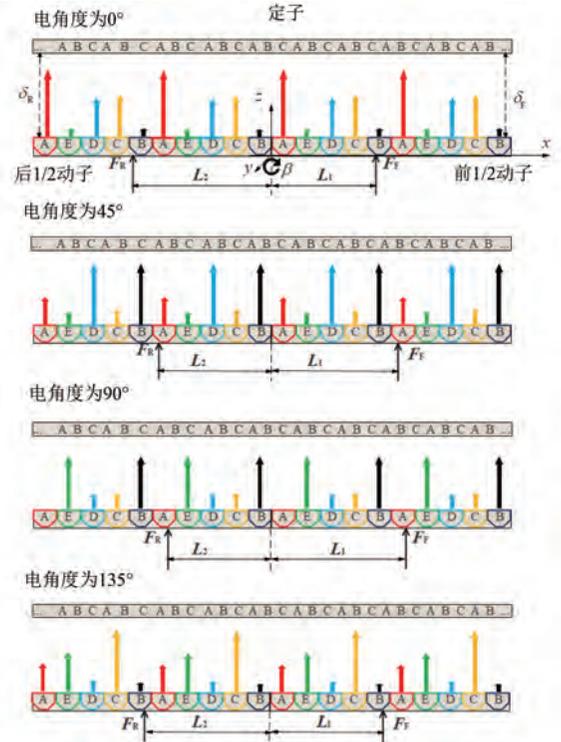


图 1 五相 20 槽 DFLM 交流励磁两点受力模型

Fig. 1 Two-point force model of a five-phase twenty-slot DFLM under AC excitation

磁力大小不变, 各相励磁电流与动子电流幅值的关系可表示为

$$\begin{aligned} i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 + i_d^2 + i_e^2 = & \\ I_r^2 \cos^2(\omega_f t) + I_r^2 \cos^2\left(\omega_f t - \frac{2\pi}{5}\right) + & \\ I_r^2 \cos^2\left(\omega_f t - \frac{4\pi}{5}\right) + I_r^2 \cos^2\left(\omega_f t - \frac{6\pi}{5}\right) + & \\ I_r^2 \cos^2\left(\omega_f t - \frac{8\pi}{5}\right) = \frac{5}{2} I_r^2 & \quad (2) \end{aligned}$$

式中: i_a 、 i_b 、 i_c 、 i_d 和 i_e 为五相励磁电流; I_r 为动子电流幅值; ω_f 为电机角速度。

按照图 1 所示的动子相排布情况, 将五相电磁力进行叠加, 则前 1/2 动子单元上所作用的俯仰力矩 $T_{\omega F}$ 可表示为

$$T_{\omega F} = -K_{Fz} \sum_{n=0}^5 \left(\frac{s_{n1} + s_{n2}}{2} \right) \alpha i_n^2 =$$

$$K_{Fz} \cdot I_r^2 [L_0 + L_\omega \cos(2\theta_f + \varphi_\omega)] = F_F L_1 \quad (3)$$

式中: α 为齿距; s_{n1} 、 s_{n2} 为第 n 相的两个线包到定子中心的距离; L_0 为固定的力臂变化幅值; L_ω 为交变的力臂变化幅值; θ_f 为动子单元的电角度; φ_ω 为俯仰力矩相对动子电角度的相位差。

L_0 、 L_ω 和 φ_ω 只与动子单元本身的相数、相排布和槽距相关,因此对于特定的动子单元,这三个参数是固定的。以图 1 所示的五相 20 槽 DFLM 为例, $L_\omega = 0.526\alpha$ 、 $L_0 = 5\alpha$ 、 $\varphi_\omega \approx 18^\circ$ 。

由式(3)可知,对前 1/2 动子单元而言,垂向电磁力到动子中心的力臂 L_1 可表示为

$$L_1 = L_0 + L_\omega \cos(2\theta_f + \varphi_\omega) \quad (4)$$

同理可得,后 1/2 动子单元的垂向电磁力到动子中心的力臂 L_2 可表示为

$$L_2 = -L_0 + L_\omega \cos(2\theta_f + \varphi_\omega) \quad (5)$$

综上所述,整个动子的俯仰力矩 T_w 表达式为

$$T_w = F_F L_1 + F_R L_2 = (F_F - F_R) \cdot L_0 + (F_F + F_R) L_\omega \cos(2\theta_f + \varphi_\omega) \quad (6)$$

由上文可知 F_F 与 F_R 的大小不会发生变化,所以俯仰力矩可以约等于一个相对于励磁电流二倍频且相位差固定的力矩。由于俯仰力矩的存

在,会导致动子单元在悬浮力方向上产生励磁电流频率二倍频的周期性振动。为了平衡此振动,需要注入特定频率的谐波电流,为使谐波电流注入能够实现幅值与相位的自适应,本文提出了一种基于 FxLMS 算法的俯仰力矩自适应控制方法。

2 基于 FxLMS 算法的俯仰力矩自适应控制方法

基于对俯仰力矩产生机理的分析可知,基本的位置闭环控制不能有效抑制俯仰力矩导致的振动。因此,在不改变原有位置闭环控制的基础上,本文设计了一种可以和垂向位置比例微分(Proportional Differential, PD)闭环控制并联的基于 FxLMS 算法的自适应控制器。假设忽略整个系统的非线性,加入 FxLMS 算法的 DFLM 动子单元垂向控制系统如图 2 所示。

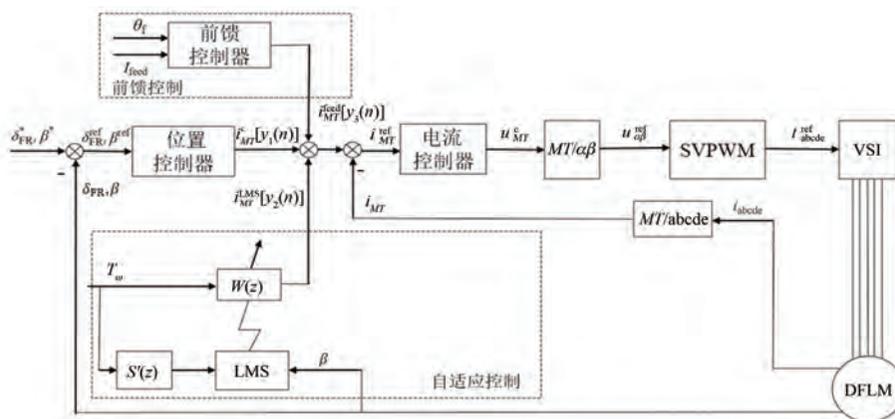


图 2 DFLM 动子单元垂向控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of the vertical control system for the DFLM mover unit

位置 PD 控制器的输出为 $i_{MT}^c [y_1(n)]$,将以动子电流矢量定向的磁场同步坐标系记为 $M-T$ 坐标系, i_m 、 i_t 分别为动子电流在 M 轴、 T 轴上的分量。为了能够更好调节垂向电磁力^[27],设置电流环控制目标电流 $i_t = 0$ A,依靠位置反馈来调节 i_m ,实现对垂向电磁力的控制。FxLMS 自适应控制器与闭环控制系统并联,自适应控制器的输出为 $i_{MT}^{LMS} [y_2(n)]$ 。同时,为了提升系统的动态响应能力,降低反馈系统的调节压力,基于俯仰力矩的产生机理,设计了一种前馈补偿控制方法,前馈输出为 $i_{MT}^{feed} [y_3(n)]$ 。 $i_{MT}^c [y_1(n)]$ 、 $i_{MT}^{LMS} [y_2(n)]$ 和 $i_{MT}^{feed} [y_3(n)]$ 三者叠加,实现了对动子垂向位置与俯仰力矩的同时控制。

2.1 前馈补偿原理

在已知动子电角度、具体电机参数以及相排

布方式的情况下,根据式(6)可知,俯仰力矩大小只与动子的垂向电磁力大小有关,而垂向电磁力大小可以由励磁电流大小直接体现,励磁电流大小则可以直接由电流传感器测得。故而可以根据励磁电流大小推测出理想情况下的俯仰力矩大小,依据俯仰力矩大小与当前动子励磁电流电角度来进行谐波注入^[28-29]。

前、后 1/2 动子单元的垂向电磁力可近似表示为

$$\begin{cases} F_F = \frac{3}{4} \frac{M_r}{\kappa \delta} i_{rF}^2 = K_{F2} i_{rF}^2 \\ F_R = \frac{3}{4} \frac{M_r}{\kappa \delta} i_{rR}^2 = K_{F2} i_{rR}^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: M_r 为动子互感; i_{rF} 、 i_{rR} 分别为前、后1/2动

子单元的励磁电流。

为方便运算,将位置控制所需的交流励磁电流等效为直流电,由式(6)可知,所需注入的电流频率为励磁电流频率的二倍,故加入补偿电流后,前、后 1/2 动子单元电流可表示为

$$\begin{cases} i_{rF} = I_{r0} + I_{rw} \cos(2\theta_f + \varphi_\omega) \\ i_{rR} = I_{r0} - I_{rw} \cos(2\theta_f + \varphi_\omega) \end{cases} \quad (8)$$

式中: I_{r0} 为前后 1/2 动子单元位置控制电流的等效直流量; I_{rw} 为前后 1/2 动子单元的前馈补偿电流。

将式(7)、式(8)代入式(6),同时忽略 I_{rw}^2 这一项,可解得:

$$I_{rw} = \frac{4}{3} \frac{\kappa \delta (F_F + F_R)}{M_r I_{r0}} \quad (9)$$

由式(9)求得的 I_{rw} 即为所需添加的前馈补偿电流幅值。由式(9)可知, I_{rw} 与电机本身参数和垂向电磁力合力有关。而所需的电角度 $2\theta_f + \varphi_\omega$ 可以从励磁电流中获得,故可以添加一个基于励磁电流电角度的前馈补偿电流 i_{MT}^{feed} , 如式(10)所示:

$$i_{MT}^{feed} = \pm I_{rw} \cos(2\theta_f + \varphi_\omega) \quad (10)$$

基于式(10)进行前馈补偿,由于在绝大多数情况下,DFLM 的垂向电磁力不会发生巨大变化,因此可以通过试验直接标定出所需的前馈补偿电流幅值,即 $I_{rw} = I_{feed}$ 。

2.2 FxLMS 自适应控制器设计

DFLM 正常工作时,由于理想模型与实际电机存在差异、实际垂向载荷会发生变化等因素,仅仅依靠前馈补偿不能达到理想效果,因此需要使用反馈方法进行闭环调节。为了实现俯仰力矩的反馈控制,基于 FxLMS 算法设计了自适应控制器,其控制系统原理如图 3 所示。

位置 PD 闭环控制系统与 DFLM 可以等效为一个二阶弹簧阻尼系统,忽略前馈控制,则整个控制系统如图 3(a) 所示。图 3(a) 中, $x(n) = T_\omega^*$ 为相当于前馈信息的模拟俯仰力矩; $y_1(n)$ 、 $y_2(n)$ 分别为等效闭环控制系统的输入电流、FxLMS 自适应控制器的输出电流; $e(n) = \beta$ 为动子单元实际俯仰角度; $S(z)$ 和 $S'(z)$ 分别为闭环系统和理想闭环系统等效的离散传递函数; $d(n)$ 为俯仰角度控制目标。由于 $d(n)$ 为俯仰角度等于 0, 那么图 3(a) 可等效为图 3(b)。图 3(b) 中, $a_1(n)$ 、 $a_2(n)$ 分别为闭环控制器的输出引起的俯仰角度和

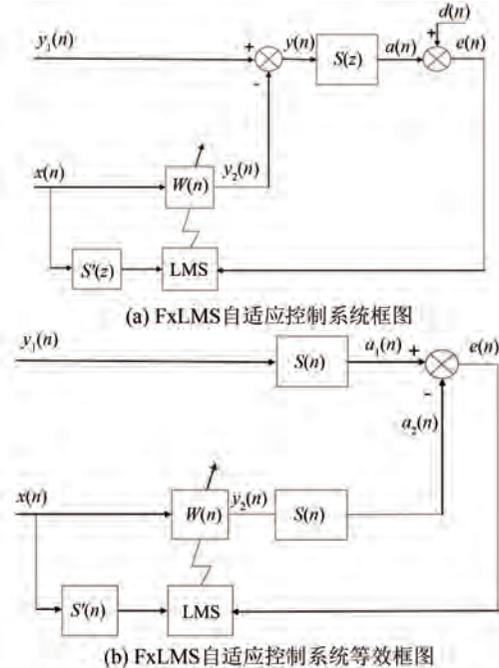


图 3 FxLMS 自适应控制系统原理框图

Fig. 3 Schematic diagrams of FxLMS adaptive control system

FxLMS 自适应控制器输出引起的俯仰角度; $S(n)$ 与 $S'(n)$ 分别为闭环系统和理想闭环系统等效的 n 阶有限冲击响应 (Finite Impulse Response, FIR) 滤波器,可以发现其与 FxLMS 前馈振动控制方法完全等效。

$x(n)$ 经 n 阶 FIR 滤波器 $W(n)$ 滤波后,得到抵消俯仰力矩的电流 $y_2(n)$:

$$y_2(n) = W(n)x(n) \quad (11)$$

再经闭环系统等效的 n 阶 FIR 滤波器 $S(n)$, 得到对应的俯仰角度 $a_2(n)$:

$$a_2(n) = S(n)y_2(n) \quad (12)$$

与 $a_1(n)$ 叠加后得到实际俯仰角度,即输入 LMS 算法的误差 $e(n)$:

$$\begin{aligned} e(n) &= a_1(n) - a_2(n) = \\ &= a_1(n) - S(n)[W(n)x(n)] \end{aligned} \quad (13)$$

与 LMS 算法相同, FxLMS 算法将最小均方误差作为目标函数 $J(n)$:

$$\begin{aligned} J(n) &= E[e^2(n)] = \\ &= E[a_1^2(n)] - 2\mathbf{P}^T \mathbf{W} + \mathbf{W}^T \mathbf{R} \mathbf{W} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: \mathbf{R} 为 $S(n)x(n)$ 的自相关矩阵; \mathbf{P} 为期望信号 $x_1(n)$ 与 $S(n)x(n)$ 的互相关矩阵; E 为数学期望; \mathbf{W} 为滤波器的权矢量。

对目标函数 $J(n)$ 求偏导,可得其梯度表达式:

$$\nabla J(n) = \frac{\partial J(n)}{\partial W(n)} = 2RW - 2P \quad (15)$$

根据梯度下降原理, $W(n)$ 权系数更新表达式为

$$W(n+1) = W(n) + 2\mu\Delta W(n) \quad (16)$$

式中: $\Delta W(n)$ 为滤波器权系数的修正值; μ 为引入的步长,显然步长越大,迭代次数越小,收敛速度越快,但当步长过大时,有可能导致错过最优解。

根据 LMS 算法,采用单个误差信号的平方梯度作为均方误差梯度的估计,即:

$$\Delta W(n) = \frac{\partial J(n)}{\partial W(n)} = 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial W(n)} = -2e(n)[S(n)x(n)] \quad (17)$$

因此 $W(n)$ 的权系数更新表达式可写为

$$W(n+1) = W(n) - 2\mu e(n)[S(n)x(n)] \quad (18)$$

综上所述,根据梯度下降原理,当步长 μ 大小合理时,LMS 算法能够自适应地使误差 $e(n)$ 为 0,实现自适应控制。

3 仿真分析

通过仿真对所设计自适应控制器的控制效果

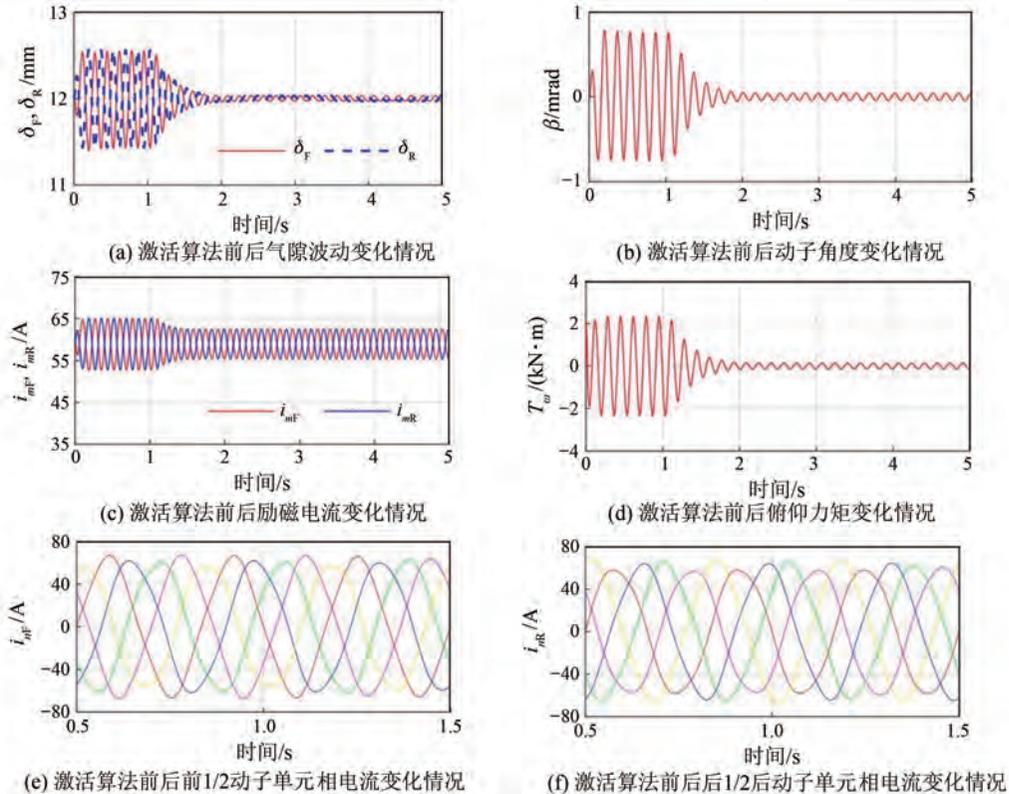


图 4 FxLMS 自适应反馈控制算法的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of FxLMS adaptive feedback control algorithm

进行分析。以前、后 1/2 动子单元动子的气隙 δ_F 、 δ_R 的变化情况与动子的俯仰角度 β 的变换情况为评价指标,以此来验证该自适应控制方法的有效性。在 Matlab/Simulink 软件中搭建 DFLM 双点仿真模型,其参数如表 1 所示。

表 1 DFLM 参数表

Tab. 1 DFLM parameter table

参数名称	参数值
动子单元质量 m/kg	2 950
动子单元长度 L/mm	2 975
单元电机齿距 α/mm	148.75
悬浮间隙 δ_0/mm	12
动子转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	2 175.8
动子相数	5
动子槽数	20
动子电阻/ Ω	0.024
动子电感/H	0.048 5

3.1 FxLMS 自适应反馈控制仿真分析

对 FxLMS 自适应反馈控制算法进行仿真分析。动子励磁电流频率为 3 Hz, FxLMS 算法参数为抽头数 $n=16$,步长 $\mu=3$ 。在 1 s 时激活 FxLMS 自适应反馈控制算法,仿真结果如图 4 所示。

如图 4(d) 所示, 在激活反馈控制算法前, 系统存在一个频率为 6 Hz 的 2 kN·m 的力矩波动, 体现为前、后 1/2 动子单元在 $M-T$ 同步坐标系上的 M 轴电流分量 i_{mF} 、 i_{mR} 的电流波动。由图 4(a) 和图 4(b) 可知, 激活反馈控制算法后, δ_F 、 δ_R 波动与 β 波动大约在 1 s 内快速收敛, 将悬浮间隙振幅抑制在 0.1 mm 以下, 同时将俯仰角度振幅抑制在 0.06 mrad 以下。由图 4(c)、图 4(e) 和图 4(f) 可知, 补偿电流大小约为 3.2 A, 且振动抑制对基频相电流波形的影响很小。仿真结果表明 FxLMS 算法能够有效抑制由俯仰力矩导致的动子振动。

3.2 FxLMS 自适应反馈+前馈控制仿真分析

进一步地, 对 FxLMS 自适应反馈+前馈控制算法进行仿真分析。同样动子励磁电流频率为 3 Hz, FxLMS 算法参数为抽头数 $n=16$, 步长 $\mu=3$ 。前馈电流幅值为 3.2 A, 在 1 s 时激活 FxLMS 自适应反馈+前馈控制算法, 仿真结果如图 5 所示。

如图 5(a) 和图 5(b) 所示, δ_F 、 δ_R 波动与 β 波动以极快的速度实现收敛, 在极短时间内将悬浮间隙振幅抑制在 0.1 mm 以下, 同时将俯仰角度振幅抑制在 0.06 mrad 以下。对比有、无前馈控制时的振动收敛情况可知, 前馈补偿增强了整个控制系统的动态性能。

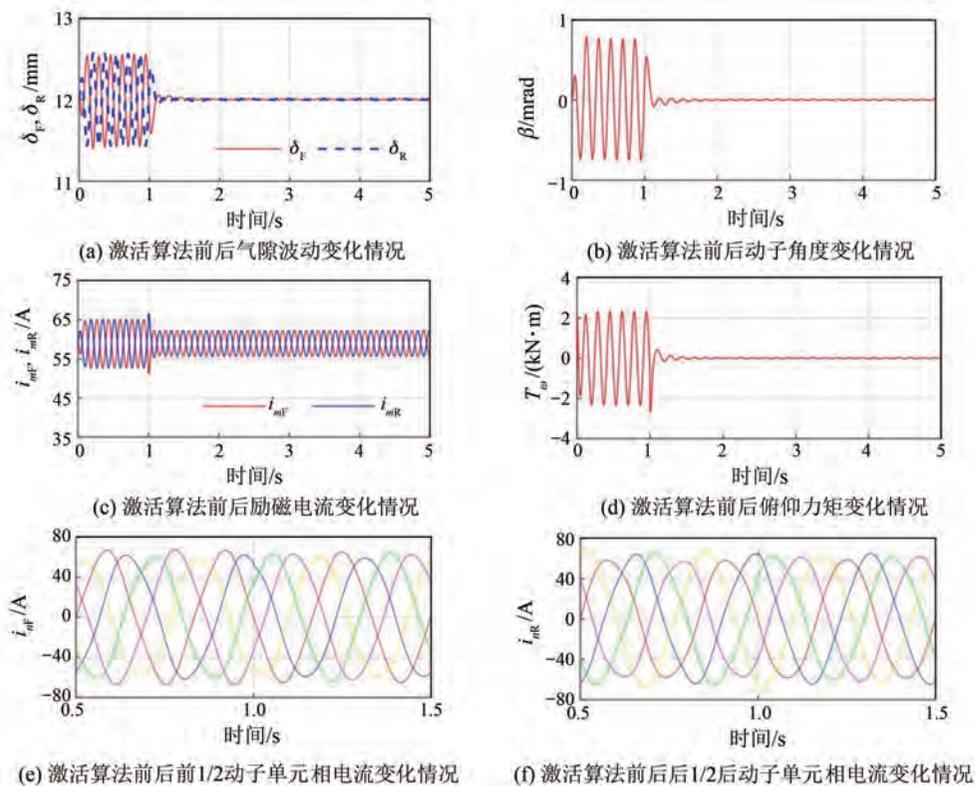


图 5 FxLMS 自适应反馈+前馈控制算法的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of FxLMS adaptive feedback and feedforward control algorithm

4 试验验证

为了进一步验证基于 FxLMS 算法的自适应控制方法对真实 DFLM 俯仰力矩振动抑制的有效性, 进行控制器与被控对象全部为实物的台架试验。DFLM 垂向位置控制试验台架示意图如图 6 所示。使用 TI 公司的 C28 系列 TMS320F28377D

作为主控芯片输出 PWM 波形驱动绝缘栅双极晶体管模块输出电压来控制动子电流, 并通过间隙传感器与惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 测得动子两端悬浮间隙与加速度, 间得到动子的俯仰角度与角速度, 将测到的信号返回主控芯片实现闭环控制。DFLM 垂向位置控制试验台架的具体参数如表 2 所示。

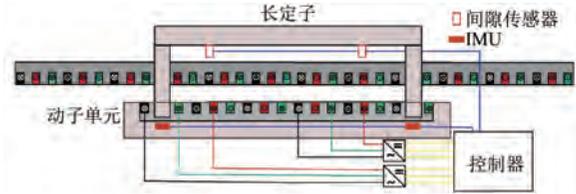


图 6 DFLM 垂向位置控制试验台架

Fig. 6 Experimental platform for vertical position control of the DFLM

表 2 DFLM 垂向位置控制试验台架参数表

Tab. 2 Parameters of experimental platform for vertical position control test of the DFLM

参数名称	参数值
定子单元质量 m/kg	2 950
定子单元长度 L/mm	2 975
单元电机齿距 α/mm	148.75
悬浮间隙 δ_0/mm	12
定子转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	2 175.8
直流端电压/V	440
定子相数	3
定子匝数	18
定子绕组形式	分布式
定子相数	5
定子槽数	20
定子匝数	120
定子绕组形式	集中式
定子电阻 R_s/Ω	0.024
定子电感 L_s/H	0.048 5

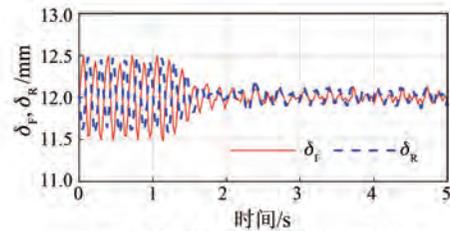
4.1 FxLMS 自适应反馈控制试验验证

对 FxLMS 自适应反馈控制算法进行试验验证。定子励磁电流频率为 3 Hz, FxLMS 算法参数为抽头数 $n=16$, 步长 $\mu=3$ 。在 1 s 时激活 FxLMS 自适应反馈控制算法, 试验结果如图 7 所示。

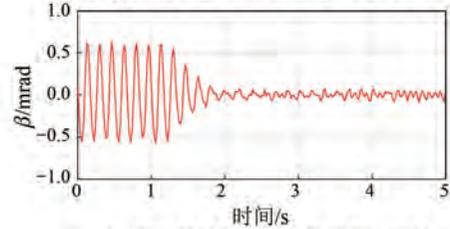
由图 7(a) 和图 7(b) 可知, 激活反馈控制算法后 δ_f 、 δ_r 波动与 β 波动在大约 1 s 内快速收敛, 与仿真结果基本相同, 说明 FxLMS 反馈控制算法能够有效抑制俯仰力矩。由图 7(d) 和图 7(e) 可知, 激活反馈控制算法前后, 前、后 1/2 定子单元相电流波形变化较小, 因此振动抑制对位置控制的影响可以忽略。

4.2 FxLMS 自适应反馈+前馈控制试验验证

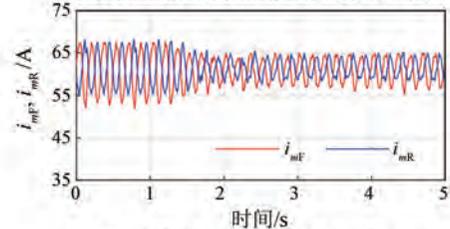
进一步地, 对 FxLMS 自适应反馈+前馈控制算法进行试验验证。同样定子励磁电流频率为 3 Hz, FxLMS 算法参数为抽头数 $n=16$, 步长 $\mu=3$ 。前馈电流幅值为 3.5 A, 在 1 s 时激活 FxLMS 自适应反馈+前馈控制算法, 试验结果如图 8 所示。



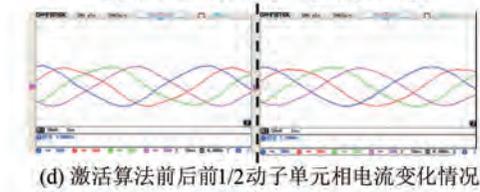
(a) 激活算法前后气隙波动变化情况



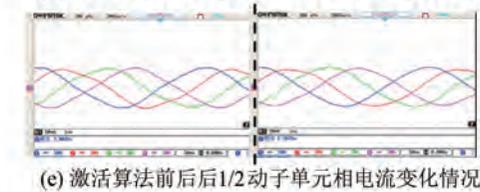
(b) 激活算法前后定子角度变化情况



(c) 激活算法前后励磁电流变化情况



(d) 激活算法前后前 1/2 定子单元相电流变化情况



(e) 激活算法前后后 1/2 定子单元相电流变化情况

图 7 FxLMS 自适应反馈控制算法试验结果

Fig. 7 Experimental results of FxLMS adaptive feedback control algorithm

如图 8(a) 和图 8(b) 所示, δ_f 、 δ_r 波动与 β 波动以极快的速度实现收敛, 与仿真结果相同, 说明前馈补偿可以增强控制系统的动态性能。

5 结语

本文针对 DFLM 在垂向位置控制过程中, 由于交流励磁产生的俯仰力矩导致的定子振动问题, 提出了一种基于 FxLMS 算法的自适应控制方法, 并通过引入前馈补偿, 改善了控制系统的动态性能, 减轻了反馈控制的调节压力。仿真分析和试验结果表明, 所设计的基于 FxLMS 算法的自适

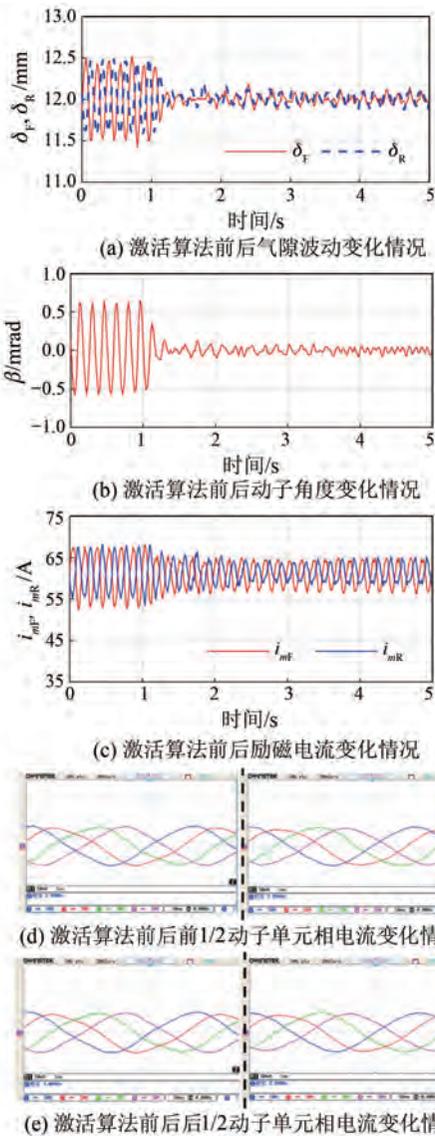


图 8 FxLMS 自适应反馈+前馈控制算法试验结果

Fig. 8 Experimental results of FxLMS adaptive feedforward and feedback control algorithm

应补偿控制方法能够在短时间内稳定振动,证明了该控制方法在实际应用中的有效性和实用性,为进一步优化 DFLM 的垂向位置控制系统提供了理论依据和技术支持。

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 interest.

作者贡献

彭英楠进行了方案设计、内容总结与论文撰

写,王修森进行了试验研究,钟再敏、王业勤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, and paper writing were carried out by Peng Yingnan. The experiment was conducted by Wang Xiuse. The manuscript was revised by Zhong Zaimin and Wang Yeqin. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 黄虹云,毛源发,王滢. 长定子双馈直线电机电磁计算与有限元分析[J]. 电工技术, 2021, (19): 76-79.
HUNAG H Y, MAO Y F, WANG Y. Electromagnetic calculation and finite element analysis of long stator doubly-fed linear motor [J]. Electric Engineering, 2021, (19): 76-79.
- [2] 刘鞠波,蓝益鹏. 混合励磁磁通切换直线电机磁悬浮系统改进自抗扰控制的研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 98-105.
LIU J B, LAN Y P. Research on improved active disturbance rejection control for the maglev system of hybrid excitation flux switching linear motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51 (10): 98-105.
- [3] 隋延飞,李旭,李星占,等. 基于模糊自抗扰的精密直线电机运动控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(6): 6-11.
SUI Y F, LI X, LI X Z, et al. Precise linear motor motion control based on fuzzy ADRC [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(6): 6-11.
- [4] 刘扬,杨玮林,毕恺韬,等. 基于干扰观测器的永磁同步直线电机自适应 PID 控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(4): 18-23.
LIU Y, YANG W L, BI K T, et al. Adaptive PID control of permanent magnet synchronous linear motor based on disturbance observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(4): 18-23.
- [5] 钟再敏,王业勤,吉文. 常导交流电磁悬浮高速磁浮运载技术创新探索[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 105-114.
ZHONG Z M, WANG Y Q, JI W. Innovative

- exploration of normal conductor-based AC electromagnetic suspension technology for high-speed maglev transportation [J]. *Science and Technology Foresight*, 2023, 2(4): 105-114.
- [6] ZHONG Z M, SHAO Z S, REN J, et al. Thrust and levitation coupling and fluctuation analysis of linear doubly-fed induction motors with variable air-gap [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 2022, 3(4): 1177-1186
- [7] WANG Y Q, SHAO Z S, ZHONG Z M, et al. Quasi-synchronous operation of a long-stator doubly fed linear motor with accurate control of both propulsion and contactless power transfer [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(1): 689-698.
- [8] XIE F, LIANG K K, WU W M, et al. Multiple harmonic suppression methods for induction motor based on hybrid morphological filters [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 151618-151627
- [9] MAO B, ZHU H. Unbalance vibration suppression control of PMA-BSynRM based on total least square adaptive filtering algorithm [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, 11: 5798-5808.
- [10] WANG X, ZHU H Q. Vibration compensation control of BPMSM with a dead-time effect based on adaptive neural network band-pass filter [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(6): 7145-7155.
- [11] TRZYNADLOWSKIA M, BLAABJERG F, PEDERSEN J K, et al. Random pulse width modulation techniques for converter-fed drive systems-a review [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1993, 30(5): 1166-1175.
- [12] PINDORIYA R M, RAJPUROHIT B S, KUMAR R, et al. A novel application of harmonics spread spectrum technique for acoustic noise and vibration reduction of PMSM drive [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 103273-103284
- [13] SHAFI K P M, PETER J, RAMCHAND R. Hybrid PWM-based nearly constant switching frequency hysteresis controller for VSI-fed IM drives with reduced peak-to-peak torque ripple [J]. *Journal of Power Electronics*, 2023, 23(11): 1712-1723.
- [14] 蔡勤磊, 鲍晓华, 胡薇. 基于混合谐波注入的潜水感应电机电磁噪声削弱[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(5): 39-49.
- CAI Q L, BAO X H, HU W, et al. Electromagnetic noise reduction of submersible induction machine based on hybrid harmonic injection [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(5): 39-49.
- [15] 刘文彬, 韩雪岩, 朱龙飞. 基于谐波注入算法的变频器驱动下 PMSM 损耗抑制方法[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(1): 1-8.
- LIU W B, HAN X Y, ZHU L F. Loss suppression method of PMSM driven by inverter based on harmonic injection algorithm [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(1): 1-8.
- [16] WU Z Q, YANG Z J, DING K, et al. Order-domain-based harmonic injection method for multiple speed harmonics suppression of PMSM [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(4): 4478-4487.
- [17] LANGHECK A, KRAHE D, BREINING P, et al. NVH optimization in PMSM through harmonic current injection with optimum current trajectory [J]. *Electromechanical Drive Systems*, 2021: 1-8.
- [18] WIDROW B, STEARNS, et al. *Adaptive Signal Processing* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 2008.
- [19] WIDROW B, GLOVER J R, MCCOOL J M, et al. Adaptive noise canceling: Principles and applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1975, 63(12): 1692-1716.
- [20] BURGESS J C. Active adaptive sound control in a duct: A computer simulation [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1981, 70(3): 715-726.
- [21] SCHUBERT D, ANGERPOINTNER L, HECKER S, et al. Active vibration cancellation using a multi-harmonic controller [C]//2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications, Montreal, 2020.
- [22] WANG X, STEVE SUH C. Nonlinear time frequency control of PM synchronous motor instability applicable to electric vehicle application [J]. *International Journal of Dynamics and Control*, 2016, 4: 400-412.
- [23] WANG Y Q, HUANG F C, LIU H B. Adaptive filtered x-least mean square algorithm with improved convergence for resonance suppression [J]. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems & Control Engineering*,

- 2014, 228(9): 668-676.
- [24] SCHUBERT D, ANGERPOINTNER L, HECKER S, et al. Adaptive compensation of three-phase voltage source inverter nonlinearities in acoustic applications [C]//2021 IEEE Conference on Control Technology and Applications, San Diego, 2021.
- [25] CONCARI C. Active vibration control via current injection in electric motors [J]. *Electronics*, 2024, 13(17): 3442.
- [26] REITMETER D, MERTENS, A, et al. Active reduction of gear mesh vibrations by drive torque control [C]//2023 IEEE International Conference on Mechatronics, Loughborough, 2023.
- [27] 邵仲书. 双馈直线电机准同步运行原理及其高速磁浮应用关键问题[D]. 上海:同济大学,2023.
- SHAO Z S. Quasi-synchronous operation of doubly-fed linear motor and its key technology of highspeed maglev application [D]. Shanghai: Tongji University, 2023.
- [28] 钟再敏,王业勤,王修森,等. 附加俯仰力矩的补偿控制方法、设备及介质: CN202310826989. 0 [P]. 2023-10-24.
- [29] WANG X S, ZHONG Z M, WANG Y Q, et al. Magnetic levitation control of doubly-fed linear motor with multi-phase AC excited move [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2024.

收稿日期:2024-08-20

收到修改稿日期:2024-11-07

作者简介:

彭英楠(2000-),男,硕士研究生,研究方向为车用电驱动系统,2332873@tongji.edu.cn;

* 通信作者:王业勤(1987-),男,博士,助理教授,研究方向为电气化交通领域的电驱动,yeqin_wang@tongji.edu.cn。