

本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

党存禄, 陈文德.
PMLSM动子位置估算与校正策略研究.
电机与控制应用, 2021, 48(10): 14.



 数据监测 多维数据采集, 全面运行分析 全景可视窗口, 丰富报表类型	 预测运维 海量行业数据, 精准趋势预测 生命周期管理, 性能尽在掌握	 故障诊断 专业机理模型, 自动故障告警 在线智能诊断, 高效便捷派单	 绿色节能 环保绿色先行, 助力低碳生产 节能降耗减排, 合理降本增效	 聚汇商机 供需多方互联, 协同合作共赢 有效整合资源, 共享生态未来
--	--	--	--	--

SEARI
上电科

上海电器科学研究所(集团)有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司

云平台技术支持: 18918675776
固定电话: 021- 52669993

业务垂询: 18801608667
地址: 上海市普陀区武宁路505号9号楼



微信扫码关注
关注我们

PMLSM 动子位置估算与校正策略研究^{*}

党存禄^{1,2,3}, 陈文德¹

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

3. 兰州理工大学 电气与控制工程国家级实验教学示范中心, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 由于无传感器技术无法直接得到永磁直线同步电机(PMLSM)动子绝对位置, 目前的研究中主要是通过速度积分估算动子位置。但是速度是由无传感器技术估算的, 与实际速度之间仍存在微小误差, 随着电机连续运动, 误差量不断积累, 最终可能会导致估算位置与实际位置之间的误差发散, 甚至可能会使得基于无传感器控制的位置伺服系统崩溃。因此, 提出一种全新的低成本、高精度位置校正策略, 并进行了仿真验证, 仿真结果表明该策略提高了位置估算结果的精度, 并且消除了由偏差累积而导致无传感器位置伺服系统崩溃的风险。

关键词: 永磁直线同步电机; 滑模观测器; 动子位置估算; 动子位置校正

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)10-0014-06

doi: 10.12177/emca.2021.090

Research on Position Estimation and Correction Strategy of PMLSM Mover^{*}

DANG Cunlu^{1,2,3}, CHEN Wende¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Gansu Province Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. National Experimental Teaching Demonstration Center of Electrical and Control Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The sensorless technology cannot directly obtain the absolute position of the permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) mover, and the mover position is estimated by integrating the speed. However, the speed is estimated by sensorless technology, and there is still a slight error between the actual speed. With the continuous movement of the motor, the accumulated deviation eventually causes the deviation between the estimated position and the actual position to diverge, or even make the position servo system based on sensorless control collapse. A new low-cost, high-precision position correction strategy is proposed, and the simulation verification is conducted. The simulation results show that this strategy improves the accuracy of the position estimation results and eliminates the risk of sensorless position servo system breakdown due to accumulated deviations.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); sliding mode observe (SMO); mover position estimation; mover position correction

收稿日期: 2021-07-02; 收到修改稿日期: 2021-08-20

^{*} 基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(20YF8GA055)

作者简介: 党存禄(1964—), 男, 本科, 教授, 研究方向为电力电子与电力传动。

陈文德(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁直线同步电机无传感器技术。

0 引言

永磁直线同步电机(PMLSM)因为其独特的物理结构,不需要中间转换结构就能将电能转化为使电机做直线运动的机械能,实现了无需任何传动机构的“零传动”,克服了由中间转换结构带来的不利因素,因此在一些精密加工、仪器仪表业、电子装配线等领域得到了广泛的应用。在PMLSM的控制系统中,控制方案大都需要测量动子的速度和位置信息。目前,PMLSM伺服控制中广泛使用光栅尺作为位置传感器。但是光栅尺不仅安装成本高,后期的维护与检修同样也会增加运行成本。除此之外,也会增加PMLSM的空间尺寸。在某些特定的环境中,并没有空间安装光栅尺等大尺寸的传感器^[1]。

针对PMLSM的位置传感器存在的缺点,使得性能良好、成本低的无位置传感器技术成为近年来的一个研究热点,并形成了反电动势法^[2-3]、基于电机理论与自适应控制理论相结合的自适应算法(包括滑模观测器、卡尔曼滤波器等)^[4-6]、高频脉冲注入法^[7-8]等无位置传感器算法。对于PMLSM的特殊运动方式,动子的绝对位置在大多数应用场景中是最重要的信息。但是文献[7]通过高频脉动电流注入法提取含有动子相对于磁极的位置信息,利用AEKF进行滤波,得到了低速域下的动子速度与范围在 $(0 \sim 2\pi)$ 的相对于动子底部磁极的电角度位置,并无法得出PMLSM的动子绝对位置。文献[9]利用反电动势积分法,利用反正切函数求解出范围在 $(-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2})$ 的电角度位置,并对时间求导,得出了动子速度,依旧无法得出动子绝对位置。文献[10]复合高频脉冲注入法与反电动势积分法实现全速域的速度与磁极位置检测,并未得出动子绝对位置。文献[11]在设计PMLSM基于dq轴估计模型的闭环估计器中提出对速度积分求动子位置。文献[12]考虑到PMLSM往复运动,速度变化大特点,针对2种方法的优缺点,提出复合高频信号注入法与增广卡尔曼算法的全速域无位置传感器控制方法,其中对速度积分,实现了对位置的估算。文献[6]则利用磁链观测器实现了PMLSM的速度与电角度位置观测,并通过对速度积分估算得到了PMLSM

位置,实现了PMLSM位置伺服控制。文献[13]搭建闭环观测器实现了对PMLSM的速度与磁极位置估算,但是动子位置仍是利用速度积分估算。文献[14]提出一种低阶串行双扩展卡尔曼滤波法,以电角速度为状态变量,也是积分估算动子位置。

以上文献虽然使用了不同的无传感器技术,但是对于位置估算均是利用速度积分,存在偏差累积问题。对此,本文建立了PMLSM速度、电流双闭环矢量控制模型,并且以滑模观测器为例,仿真验证了无传感器技术的速度误差与由此带来的位置估算误差,并且从应用角度提出了一种新的低成本且高精度PMLSM位置校正策略,仿真验证了其校正效果。

1 PMLSM 数学模型

在建立PMLSM的模型数学之前,先做如下假设:

- (1) 忽略PMSLM中磁路饱和影响;
- (2) 不考虑PMSLM中铁心的磁滞现象及涡流损耗;
- (3) 不考虑PMLSM的端部效应影响;
- (4) 定子电动势以正弦规律变化,不考虑PMLSM中高次谐波的影响。

以上述假设为前提,PMLSM在dq坐标系下的非线性数学模型描述如下:

电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q 分别为d、q轴电压; R_s 为定子绕组电阻; i_d, i_q 分别为d、q轴电流; ψ_d, ψ_q 分别为d、q轴磁链; ω 为电机电角速度。

磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{pm} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ψ_{pm} 为永磁体磁链; L_d 为d轴同步电感; L_q 为q轴同步电感。

推力方程:

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} p [\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

式中: τ 为电机极距; ψ_{pm} 为永磁体磁链; p 为电枢极对数。

对于表贴式 PMLSM, $L_d = L_q$, 本文研究表贴式 PMLSM, 因此式(3)简化为

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} p \psi_{pm} i_q \quad (4)$$

机械方程:

$$F_e = M_n \frac{dv}{dt} + B_n v + F_d \quad (5)$$

式中: F_e 为电磁推力; M_n 为动子质量; B_n 为黏滞摩擦力系数; v 为动子速度且有 $v = \omega\tau/\pi$; F_d 为负载。

2 滑模观测器

滑模变结构观测器与其他方法最大的差异在于系统是动态变化的, 根据系统当前的状态, 迫使系统按照预定的“滑动模态”的状态轨迹运动。

为方便建立 PMLSM 的滑模观测器, 需要将 PMLSM dq 坐标系模型通过 $2r-2s$ 变换到 $\alpha\beta$ 坐标系。该坐标系下电压方程如下:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & 0 \\ 0 & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $p = \frac{d}{dt}$ 为微分算子; u_α, u_β 为定子电压; i_α, i_β 为定子电流; E_α, E_β 为反电动势。

E_α, E_β 满足:

$$\begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = \omega \psi_{pm} \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

为便于应用滑模观测器观测反电动势, 将式(6)改写为电流状态方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:

$$A = \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} -R_s & 0 \\ 0 & -R_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

为获得反电动势估计值, 设计滑模观测器如下:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$ 为定子电流观测值; u_α, u_β 为观测器的输入。

将式(10)和式(9)作差, 可得电流误差方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} E_\alpha - \nu_\alpha \\ E_\beta - \nu_\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $\tilde{i}_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha, \tilde{i}_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta$ 为电流观测器误差。

设计滑模控制率为

$$\begin{bmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\alpha - i_\alpha) \\ k \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $k > \max \{ -R |\tilde{i}_\alpha| + E_\alpha \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\alpha), R |\tilde{i}_\beta| + E_\beta \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\beta) \}$ 。

当状态观测器的状态变量达到滑模面时, $\tilde{i}_\alpha = 0, \tilde{i}_\beta = 0$ 之后, 该观测器的状态将一直保持在滑模面上, 此时的控制量就可以等价于反电动势。对此, 可得:

$$\begin{bmatrix} \hat{E}_\alpha \\ \hat{E}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{bmatrix}_{eq} = \begin{bmatrix} k \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\alpha)_{eq} \\ k \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\beta)_{eq} \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于实际控制量是不连续的高频信号, 为提取反电动势估计值, 需要外加一个低通滤波器。

经过滤波以后对于电角速度则有:

$$\hat{\omega} = \frac{\sqrt{\hat{E}_\alpha^2 + \hat{E}_\beta^2}}{\psi_{pm}} \quad (14)$$

PMLSM 的线速度则有:

$$\hat{v} = \frac{\tau}{\pi} \hat{\omega} \quad (15)$$

3 动子位置估算与校正

目前 PMLSM 无传感器控制系统主要是利用对速度积分估算动子位置。但是由于速度源自于无传感器技术, 与电机实际速度之间仍然存在微小的误差。对该速度信号积分势必会造成动子位置计算误差。随着电机连续运行, 偏差量也会累积。而且仅开环计算, 也无法保证位置估算结果与实际位置的误差收敛, 甚至会发散, 导致基于无传感器控制的位置伺服系统失去意义, 限制了无

传感器技术在 PMLSM 上的应用。

针对这一现状,本文提出一种低成本高精度的校正策略,如图 1 所示。在定子侧,动子高频经过位置固定一枚高采样频率的光电式传感器并记录其安装位置 B ,当动子上的位置参考点与传感器位置重合时,该传感器动作,DSP 或者其他控制器接收到外部中断,将此时的估算位置与传感器坐标 B 作差,并且将偏差量注入到位置估算结果中,实现了对于估算位置的校正。随着电机的连续运行,动子每一次经过该位置,估算位置就会被校正一次,提高了无传感器位置估算结果的精度,有效地避免了由于偏差累积而导致无传感器系统崩溃的风险。

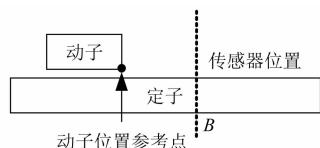


图 1 动子位置校正

位置估算为

$$\hat{x} = \int \hat{v} dt + x_0 \quad (16)$$

式中: $\hat{x}$ 为动子估算位置; $\hat{v}$ 为无传感器技术计算得到的速度; x_0 为动子初始位置。

当动子到达传感器位置 B 时:

$$\hat{x} = \int_0^t \hat{v} dt + x_0 \quad (17)$$

式中: t 为动子到达 B 位置时,DSP 或控制器收到传感器中断信号的时间。

$$\Delta x = \hat{x} - B \quad (18)$$

式中: Δx 为动子到达传感器位置时,无传感器技术估算位置与位置 B 的误差。

校正后的估算位置:

$$\tilde{x} = \hat{x} - \Delta x \quad (19)$$

式中: $\tilde{x}$ 为校正后的估算位置。

考虑到式(20)中 t 为 DSP 或者其他控制器接收到中断信号时的时间,其中包含了传感器响应时间。因此,此时计算的 $\hat{x}$ 并不是动子到达 B 位置瞬间的估算位置,而是含有传感器响应时间段的位移。由于目前常规的光电传感器响应时间 $\tau < 2$ ms,直线电机速度以 0.6 m/s 计,响应时间内位移为 1.2 mm,仍有一定误差,对此提出进一步

修正方案,如图 2 所示。

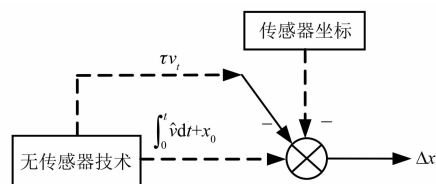


图 2 误差计算

$$\hat{x} = \int_0^t v dt - \tau v_t \quad (20)$$

式中: v_t 为 DSP 接收到外部中断的瞬间无传感器技术观测到的速度; τ 为传感器响应时间。

由于光电式传感器响应时间非常短,忽略该时间段内速度变化量,利用该速度对于计算结果修正。此时计算的 $\tilde{x}$ 已经非常接近动子到达传感器位置时的计算结果:

$$\Delta x = \int_0^t v dt - \tau v_t - B \quad (21)$$

通过式(21)对二者位置偏差计算,并且将偏差注入到估算结果:

$$\tilde{x} = \int \hat{v} dt - \Delta x \quad (22)$$

由此实现了 PMLSM 位置的校正,提高了 PMLSM 位置估算结果的精度,避免了估算结果与实际位置之间发散导致伺服系统崩溃的风险。该位置校正策略,为无传感器技术在 PMLSM 位置伺服系统的使用提供了保障。虽然增加了一枚“坐标”传感器,但是成本与体积比常用的光栅尺而言具有极强的优势,尤其是对于长定子 PMLSM 或者精度要求不太高的场景具有重要意义。

4 系统 MATLAB 仿真

在 MATLAB/Simulink 中搭建 PMLSM 速度、电流双闭环矢量控制系统与滑模观测器,如图 3 所示。PMLSM 模型参数为, $R_s = 2.65 \Omega$ 、 $L_d = L_q = 26.7$ mH、 $\psi_{pm} = 0.3031$ Wb、 $\tau = 0.016$ m、 $M_n = 28$ kg、 $B_n = 4$ N·s·m⁻¹。

仿真条件为直流侧电压 $U_{dc} = 311$ V,SVPWM 开关频率为 10 kHz,电机初始位置为 0 m。初始时刻给定速度为 0.6 m/s,达到给定速度后,在 0.5 s 时,给定阶跃为 0.8 m/s,研究该连续变速运动过程中估算位置与实际位置的偏差。假设在定

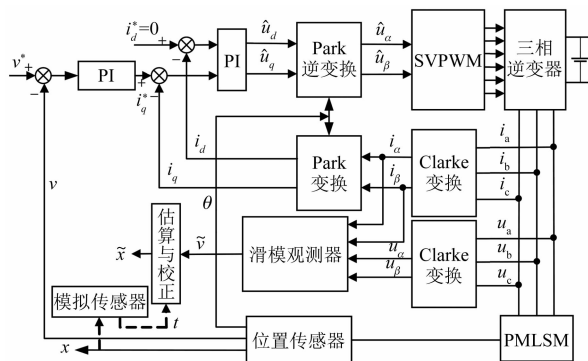


图 3 PMLSM 控制系统

子侧 0.5 m 处安装前文所述的传感器,仿真中通过在电机实际位置到达 0.5 m 时,触发校正系统,实现对于传感器的模拟。根据传感器坐标与该时刻的无传感器技术估算位置求取偏差并且对位置估算结果进行校正,实现了基于传感器的校正系统仿真模拟,并且验证了校正效果。

图4为电机实际速度,图5为滑模观测器的观测速度,图6为二者的速度误差,虽然很小,但是对于位置估算而言,不能忽略。

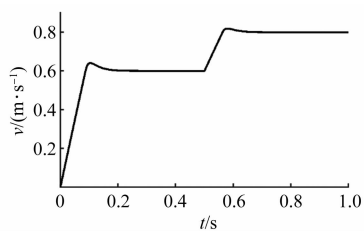


图 4 电机速度

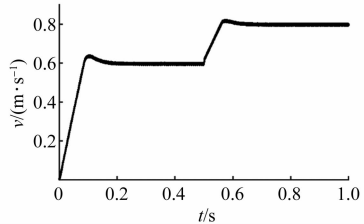


图 5 滑模观测器速度

图 7 为未校正的动子实际位置与滑模观测器估算位置,可以看出随着电机的连续运行,由于速度误差的影响,二者之间的位置误差累积,使得 PMLSM 位置伺服系统性能下降。图 8 为采用了该校正策略后的结果,在动子到达 0.5 m 处,触发了校正系统,求得偏差量并且注入估算结果中,实

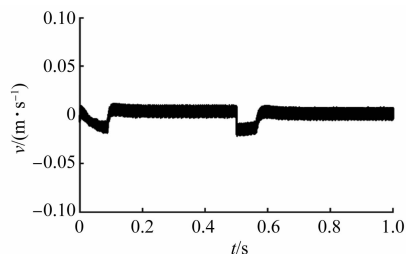


图 6 滑模观测器的速度误差

现了动子位置校正,清除了在此之前积累的历史偏差。提高了估算结果的精度,也避免了偏差累积造成控制系统崩溃的风险。

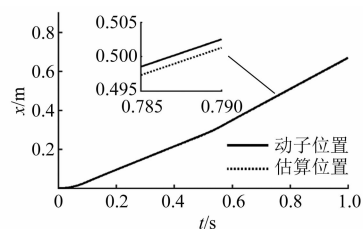


图 7 无校正的动子位置与估算位置

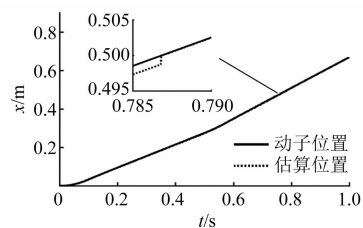


图 8 校正后动子位置与估算位置

图9为无校正系统的位置估算误差与校正后的位置估算误差对比。可以看出,随着电机连续运行,无校正系统的位置估算误差开始发散,导致位置估算结果的精度下降。在0.5 m处触发校正系统后,清除了之前积累的偏差,与无校正系统的位置估算误差相比,校正后误差更小,大幅度提升了位置估算结果的精度。

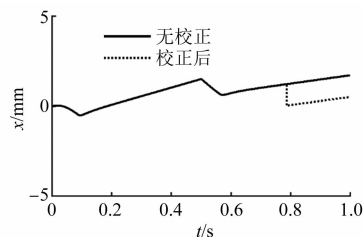


图 9 无校正与校正后位置估算误差

5 结 语

由于目前的 PMLSM 无传感器控制系统主要是通过速度积分估算动子位置。但是该速度与实际速度之间仍存在误差,积分会造成偏差量的累积,而且是开环计算,本身不具备校正能力。本文提出在 PMLSM 无传感器控制系统的定子侧动子高频经过的位置安装一枚传感器,实现类似“行程开关”的功能,每一次动子到达该位置时,都能触发校正系统,清除历史偏差,提升了位置估算系统精度的同时,也保证了控制系统不会因为位置估算误差发散而使控制系统崩溃。与传统光栅尺等传感器相比,成本低、体积小、质量轻,为一些精度要求不高的位置伺服系统和长定子 PMLSM 提供了更具性价比的选择。

【参考文献】

- [1] 郑继贵,吴红星,黄玉平,等. 永磁直线同步电机位置检测技术[J]. 微电机,2014,47(9): 85.
- [2] 蒋阳,吉敬华,赵文祥,等. 基于新型抗低频扰动反电势观测器的直线永磁游标电机无位置控制[J]. 中国电机工程学报,2019,39(增1): 243.
- [3] 张波,葛琼璇,刘金鑫,等. 基于扩展反电动势法的长定子直线同步电机无速度传感器控制研究[J]. 电工技术学报,2017,32(23): 91.
- [4] 李净净,蔡一,章晓旗,等. 基于自适应 Luenberger 观测器的永磁同步直线电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用,2020,47(4): 24.
- [5] 向凡,许鸣珠. 基于 MRAS 和磁链补偿的无速度传感器永磁直线同步电机直接推力控制[J]. 电机与控制应用,2019,46(8): 18.
- [6] 孔龙涛,程明,张邦富. 基于模型参考自适应系统的模块化磁通切换永磁直线电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报,2016,31(17): 132.
- [7] 杨春雨,马婷婷,周林娜,等. 永磁同步直线电机低速域无位置传感器控制[J]. 微特电机,2018,46(9): 59.
- [8] 陆华才,徐月同. 基于 AEKF 的永磁直线同步电机速度和位置估计算法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(33): 90.
- [9] 王利,卢琴芬,叶云岳. 永磁直线同步电机无位置传感器动子位置辨识[J]. 电机与控制学报,2012,16(6): 7.
- [10] LU H C, YAO X Y, TI J. Combined back-EMF estimator with high-frequency signal injection for wide speed range sensorless control of PMLSM [J]. Advanced Materials Research, 2013, 753/754/755: 2526.
- [11] 陆华才,江明,陈其工. 永磁直线同步电机驱动系统速度和位置无传感器检测新方法[J]. 电工电能新技术,2011,30(2): 5.
- [12] 陆华才,提娟,高文根,等. 永磁直线同步电机全速无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报,2013,17(4): 92.
- [13] WANG G R, ZHAO Z H. A new position-estimated algorithm of PMLSM sensorless driving system in full scope of speed [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 635/636/637: 1412.
- [14] 孙兴法,聂子玲,朱俊杰,等. 基于低阶串行双扩展卡尔曼滤波的永磁直线同步电机无速度传感器控制策略[J]. 电工技术学报,2018,33(12): 2685.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部