DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.240 **中图分类号**：TM306 **文献标志码**：A

低速无位置传感器运行的永磁同步电机逆变器自适应死区补偿策略

张 坤[1]，张 航[2](中国电源学会会员)，陈 哲[3]，马 辉[1]，
雷昱坤[2](中国电源学会学生会员)，骆光照[3]

(1.中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心/航空机电系统综合航空科技重点实验室，南京 211106；2.西安理工大学电气工程学院，西安 710048；3.西北工业大学自动化学院，西安 710072)

摘要：首先，针对航空永磁同步电机PMSM(permanent magnet synchronous motor)泵类负载的工作特点，基于非线性磁链观测器实现电机的无位置传感器运行，提出一种改进的延时补偿策略来获取指令电压。受逆变器非线性延时影响，反馈电流会出现如 dq 轴电流耦合效果增大、估计转子位置滞后等现象，降低了无位置传感器的控制性能。接着，在全速域空间矢量脉宽调制SVPWM(space vector pulse width modulation)下，设计一种自适应扰动观测器来获取逆变器非线性延时引起的 q 轴扰动电压。最后，在 i_d=0 的电流控制策略中实时获取补偿时间估计值，并将其等效为三相电压补偿值作用于三相给定电压上。通过实验对所提逆变器非线性延时补偿策略进行验证，结果表明了所提策略可有效改善非线性磁链观测器在低速时的无位置传感器控制性能。

关键词：永磁同步电机驱动；非线性磁链观测器；逆变器非线性延时；自适应补偿

Low-speed Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Inverter Based on Adaptive Dead-time Compensation Strategy

ZHANG Kun[1], ZHANG Hang[2], *Member*, *CPSS*, CHEN Zhe[3], MA Hui[1],
LEI Yukun[2], *Student Member*, *CPSS*, LUO Guangzhao[3]

(1. Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems, AVIC/Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing 211106, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: First, according to the working characteristics of pump-type loads of an aero permanent magnet synchronous motor (PMSM), the sensorless operation of the motor is realized based on a nonlinear flux observer, and an improved time-delay compensation strategy is proposed to obtain the command voltage. Due to the influence of the inverter's nonlinear time-delay, the phenomena such as an increase in the dq-axis current coupling effect and the time-delay of estimated rotor position will occur in the feedback current, which degrade the sensorless control performance. Then, to address this issue, an adaptive disturbance observer is designed to obtain the q-axis disturbance voltage caused by the inverter's nonlinear time-delay under full-speed SVPWM modulation. Finally, the compensation time estimated in real time is obtained under the current control strategy with i_d= 0, which is further equivalent to the three-phase voltage compensation value acting on the given three-phase voltage. The proposed nonlinear time-delay compensation strategy for inverters put forward was verified by experiments, and results show that the proposed strategy can effectively improve the sensorless control performance of the nonlinear flux observer at low speeds.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive; nonlinear flux observer; nonlinear time-delay of inverter; adaptive compensation

收稿日期：2024-11-04；**修回日期**：2024-12-26；**录用日期**：2025-01-05；**网络首发日期**：2025-03-05
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52177059, 52007151)；陕西省重点研发计划基金资助项目(2023-YBGY- 401)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grants 52177059 and 52007151; Key Research and Development Plan of Shaanxi Province under the grant 2023-YBGY-401

航空机载泵类负载作为航空器推进、生命维持、引擎运行的部件，是航空航天的重要组成部分，对电机控制的可靠性要求较高，但实际工况下其高性能控制仍面临一些问题[1-3]。一方面，由于航空永磁同步电机 PMSM(permanent magnet synchronous motor)工作环境恶劣，机械式传感器易出现故障；另一方面，逆变器死区时间的存在会使航空 PMSM 低速运行时的控制效果变差。对于机械式传感器故障，常用的解决办法是采用无位置传感器控制，其中磁链观测器仅需通过对电机数学模型的变换，无需引入其他元件，结构简单、实用性较强。但传统磁链观测器由于存在纯积分环节，因此所观测到的磁链存在明显的直流偏置和积分漂移问题。针对这一问题，一部分学者采用低通滤波器 LPF (low pass filter)来获取磁链，但 LPF 自身存在衰减问题[1]；一部分学者采用磁链补偿的方法消除直流偏置[4-7]，在低转速时可以获得较好的磁链观测效果；也有学者对磁链类型进一步分类，提出了“有效磁链”的定义[8]。永磁体磁链和有效磁链与转子位置重合，可直接应用于磁场定向。此外，将磁链观测器与其他观测器结合亦是一类研究方向，文献[9-10]结合改进滑模观测器构建滑模磁链观测器，提高无传感器控制系统的鲁棒性[5,11-12]。而非线性磁链观测器通过 $\alpha\beta$ 轴的电流与指令电压来计算磁链，不存在直流偏置与积分漂移的问题，且该观测器对电机参数不敏感，比较满足航空机载泵类负载的工况要求。

目前，在电驱动系统中，系统延时通常包括逆变器非线性延时和计算延时[8,13-15]。对于逆变器非线性延时，死区时间是主要的影响因素，死区时间会在基波频率较低时对逆变器的输出电压性能产生较大影响；而在高转速区，相比于有效高电平信号的持续时间，逆变器非线性延时通常可以忽略[16]。值得注意的是，死区时间会造成电压误差，使输入电机的电压出现畸变，作用于电机后，使响应电流波形同样发生畸变，且在低速工况下，电机会出现较大转矩波动。此外，死区效应会进一步降低非线性磁链观测器在低速工况下的转子位置估计性能，增大磁场定向误差。死区时间的补偿可以从硬件和软件 2 个方面着手：硬件方面即检测出实际输出电压，并将其与控制器给定值相比，得出死区导致的电压偏差，接着叠加偏差与给定值，进行补偿，缺点是需要额外的硬件成本；软件方面即利用已知数据，通过不同的算法来消除死区的影响，如建立误差观测器，实时观测当前给定电压与应给定电压的误差，并构建反馈补偿环路对给定电压进行补偿[17-22]，或通过建立考虑死区的输出电压模型，以查表的形式在控制器中对电压进行补偿[23-24]。国内外学者针对逆变器非线性补偿已展开大量研究，文献[14]引入二次补偿，进一步降低了相电流中的谐波含量，但也增加了算法复杂度；文献[16]提出的补偿方法需要已知死区时间或开关管的相应参数，不适用于死区时间未知的场合。

为确保航空 PMSM 在低转速工况下实现可靠的无位置传感器控制，本文通过构建非线性磁链观测器实现电机的无位置传感器运行，并在 q 轴构建扰动电压观测器，根据扰动时间计算死区时间并获得补偿电压，同时对逆变器的输出相电压进行补偿，实现对死区效应影响的削弱。此外，对 4 kW 表贴式永磁同步电机 SPMSM(surface-mounted PMSM)进行了仿真与实验验证。结果表明，本文所提的自适应死区补偿策略可有效改善非线性磁链观测器在低速时的无位置传感器控制性能。

1　无位置传感器驱动下的逆变器死区作用原理

1.1　非线性磁链观测器设计

对于 SPMSM，其 $\alpha\beta$ 轴下的数学模型可表示为

$$\begin{cases} L\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = -R_\mathrm{s}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \omega\psi_\mathrm{m}\begin{bmatrix} \sin\theta_\mathrm{r} \\ -\cos\theta_\mathrm{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \\ T_\mathrm{e} = \dfrac{3p_\mathrm{n}}{4}\psi_\mathrm{m}(i_\alpha\cos\theta_\mathrm{r} - i_\beta\sin\theta_\mathrm{r}) \end{cases} \tag{1}$$

式中：L 和 R_s 分别为定子电感与电阻；i_α、i_β 分别为 α、β 轴电流；ω 和 θ_r 分别为电机电角度和转子位置；ψ_m 为永磁体磁链；u_α、u_β 分别为 α、β 轴电压；T_e 为电磁转矩；p_n 为极对数。对于 SPMSM，电机定子电感存在 $L=L_\alpha=L_\beta$ 的关系，其中 L_α、L_β 分别为 α、β 轴定子电感。

为了构建非线性磁链观测器，定义 $\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{y}$ 分别为观测器的状态变量和输出，具体为

$$\boldsymbol{x}=L\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix}+\psi_m\begin{bmatrix}\cos\theta_r\\ \sin\theta_r\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{y}=-R_s\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}u_\alpha\\ u_\beta\end{bmatrix} \tag{3}$$

根据式(2)和式(3)可知，状态变量与输出的关系为

$$\dot{\boldsymbol{x}}=L\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix}-\omega\psi_m\begin{bmatrix}\cos\theta_r\\ -\sin\theta_r\end{bmatrix}=\boldsymbol{y} \tag{4}$$

定义向量函数 $\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{x})$ 为

$$\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{x}-L\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix} \tag{5}$$

由式(2)和式(5)可知，对于 $\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{x})$ 的范数恒满足 $\|\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{x})\|^2=\psi_m^2$。当观测器状态估计值 $\hat{\boldsymbol{x}}$ 收敛至 $\boldsymbol{x}$ 时，$\|\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{x})\|^2$ 趋近于 0，从而实现修正项的自动归 0。

基于 Lyapunov 稳定性理论设计的非线性磁链观测器可表示为

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}=\boldsymbol{y}+\frac{\gamma}{2}\boldsymbol{\eta}(\hat{\boldsymbol{x}})[\psi_m^2-\|\boldsymbol{\eta}(\hat{\boldsymbol{x}})\|^2] \tag{6}$$

式中：$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}$ 为 $\hat{\boldsymbol{x}}$ 的导数；γ 为观测器增益，$\gamma>0$。

为获得包含转子位置角的相关量，对式(2)变形可得

$$\frac{1}{\psi_m}\left(\boldsymbol{x}-L\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix}\right)=\begin{bmatrix}\cos\theta_r\\ \sin\theta_r\end{bmatrix} \tag{7}$$

将观测器观测到的状态变量代入式(7)，即可得所需包含估计转子位置的正余弦分量为

$$\begin{bmatrix}\cos\hat{\theta}_r\\ \sin\hat{\theta}_r\end{bmatrix}=\frac{1}{\psi_m}\left(\hat{\boldsymbol{x}}-L\begin{bmatrix}i_\alpha\\ i_\beta\end{bmatrix}\right) \tag{8}$$

式中，$\hat{\theta}_r$ 为转子估计位置。

对于包含估计转子位置的正余弦分量，通常采用反正切函数提取估计转子位置，但反正切函数计算量较大，工程上并不采用，而是使用锁相环 PLL(phase locked loop)来提取转子位置[25]。据此，转子位置的估计原理如图 1 所示。与传统磁链观测器相比，非线性磁链观测器优化了纯积分环节，且只与定子电感有关。其中，$\boldsymbol{u}_{\alpha\beta}$、$\boldsymbol{i}_{\alpha\beta}$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压、电流矢量。

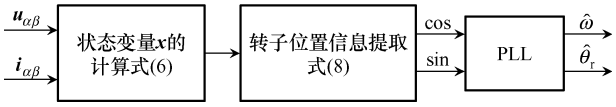


图 1 非线性磁链观测器结构

Fig. 1 Structure of nonlinear flux observer

1.2 死区对非线性磁链观测器性能影响分析

图 2 给出了 PMSM 驱动系统在控制中使用的坐标系分布。其中，ABC 轴为三相静止坐标系，其方向分别对应定子 A、B、C 三相绕组的轴线方向，各轴在空间上互差 120°；dq 轴为两相旋转坐标系，d 轴与永磁体励磁磁场方向一致，q 轴逆时针超前 d 轴 90° ，且 dq 坐标系随转子同步旋转。在系统时延补偿策略的设计中，本文所提出的逆变器非线性时延补偿策略也是基于 q 轴扰动电压完成的，补偿器的详细设计将在第 2 节给出。

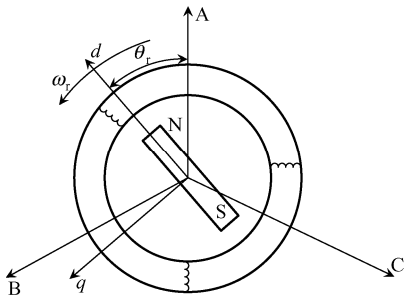


图 2 PMSM 空间坐标系分布

Fig. 2 Distribution of space coordinate system for PMSM

当 A 相电流 $i_a>0$ 时，图 3 给出了逆变器 A 相输出电压理想值 U_{an}^{deal} 与实际值之间的关系，T_{PWM} 为脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)载波周期。在逆变器非线性延时中，由于死区时间 T_{dead} 的存在，实际输出电压会变为 $U_{an,1}$，由此理想电压

和实际输出电压的差U_{err}为

$$U_{\mathrm{err}}=U_{an}^{\mathrm{deal}}-U_{an,1} \tag{9}$$

i_{a}<0 的情况与图 3 类似，为了补偿逆变器非线性延时的影响，在 PMSM 矢量控制系统中，可将死区补偿电压叠加到由电流调节器输出的指令电压上。

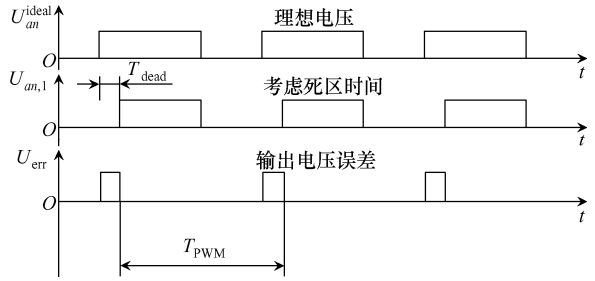


图 3　逆变器非线性延时影响的 A 相输出电压特性

Fig. 3 Characteristics of phase-A output voltage affected by inverter's nonlinear time-delay

当电机转速为 200 r/min 且带载 0.5 N·m 时，死区时间设置为 3 ms。不考虑逆变器死区时间的影响，图 4 和图 5 分别为理想条件下的i_{a}和非线性磁链观测器获得的磁链波形；考虑逆变器死区时间的影响时，图 6 和图 7 分别为 i_{a}和此时的磁链波形。对比可知，考虑死区时间时，电流在幅值为 0 时和峰值附近出现明显畸变，观测到的磁链波形正弦性也随之变差。

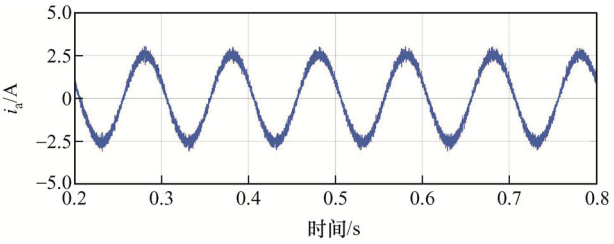


图 4　理想条件下的 A 相电流

Fig. 4 Phase-A current under ideal condition

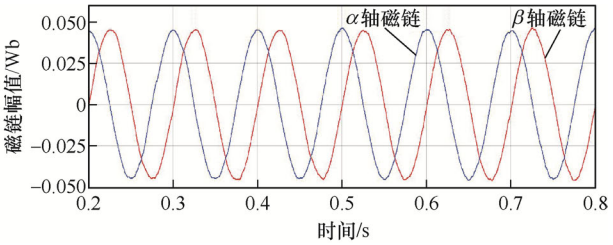


图 5　理想条件下的估计磁链

Fig. 5 Estimated flux linkage under ideal condition

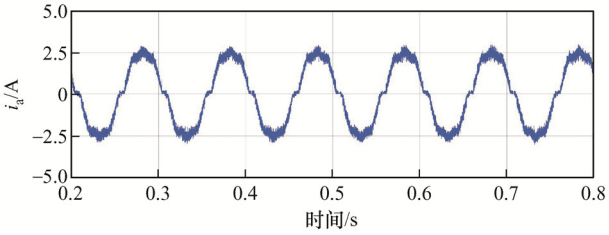


图 6　考虑死区时间时的 A 相电流

Fig. 6 Phase-A current considering dead-time

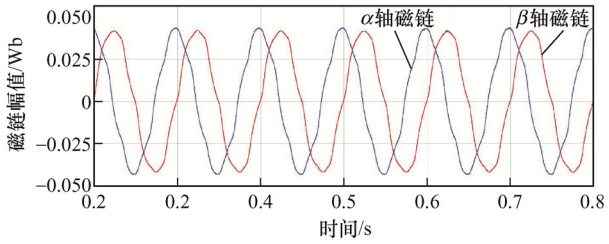


图 7　考虑死区时间时的估计磁链

Fig. 7 Estimated flux linkage considering dead-time

2　逆变器自适应死区补偿策略

2.1　扰动观测器设计

通过坐标变换，将式(1)从 $\alpha\beta$ 轴变换到 dq 轴，即

$$\begin{bmatrix}u_d\\u_q\end{bmatrix}=R_{\mathrm{s}}\begin{bmatrix}i_d\\i_q\end{bmatrix}+L\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_d\\i_q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}u_{d\mathrm{d}}\\u_{q\mathrm{d}}\end{bmatrix} \tag{10}$$

式中：$u_{d\mathrm{d}}$为 d 轴解耦项，$u_{d\mathrm{d}}=-\omega Li_q$；$u_{q\mathrm{d}}$为 q 轴解耦项，$u_{q\mathrm{d}}=\omega(Li_d+\psi_{\mathrm{m}})$。

当考虑死区时间但不进行相应补偿时，u_d 和 u_q 中会存在扰动电压，式(10)将改写为

$$\begin{bmatrix}u_d\\u_q\end{bmatrix}=R_{\mathrm{s}}\begin{bmatrix}i_d\\i_q\end{bmatrix}+L\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_d\\i_q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}u_{d\mathrm{d}}\\u_{q\mathrm{d}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}u_d^{\mathrm{dt}}\\u_q^{\mathrm{dt}}\end{bmatrix} \tag{11}$$

式中，u_d^{dt}、u_q^{dt}分别为 d、q 轴扰动电压。考虑对死区进行补偿后，式(11)可写为

$$\begin{bmatrix}u_d\\u_q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}u_d^{\mathrm{com}}\\u_q^{\mathrm{com}}\end{bmatrix}=R_{\mathrm{s}}\begin{bmatrix}i_d\\i_q\end{bmatrix}+L\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}i_d\\i_q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}u_{d\mathrm{d}}\\u_{q\mathrm{d}}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}u_d^{\mathrm{dt}}\\u_q^{\mathrm{dt}}\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中，u_d^{com}、u_q^{com}分别为 d、q 轴死区补偿电压。

若负载恒定，此时u_q^{dt}的变化很小，可忽略，其

导数可认为始终为 0，即 $\dot{u}_q^{\mathrm{d}t}=0$。因此，可以根据 q 轴电压方程推导出加入扰动电压后的状态变量 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{new}}$ 和输出量 y_{new}，具体表达式为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_{\mathrm{new}}=\begin{bmatrix}-\dfrac{R_{\mathrm{s}}}{L} & -\dfrac{1}{L}\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_q\\ u_q^{\mathrm{d}t}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\dfrac{1}{L}\\ 0\end{bmatrix}(u_q+u_q^{\mathrm{com}}-u_{q\mathrm{d}})\\ y_{\mathrm{new}}=[0\quad 1]\begin{bmatrix}i_q\\ u_q^{\mathrm{d}t}\end{bmatrix}\end{cases}\tag{13}$$

通过构建 q 轴扰动观测器，式(13)可进一步表示为

$$\begin{cases}\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}_{\mathrm{new}}=\begin{bmatrix}-G_1-R_{\mathrm{s}}/L & -1/L\\ -G_2 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{i}_q\\ \hat{u}_q^{\mathrm{d}t}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}G_1\\ G_2\end{bmatrix}i_q+\begin{bmatrix}1/L\\ 0\end{bmatrix}\cdot\\ \qquad(u_q+u_q^{\mathrm{com}}-u_{q\mathrm{d}})\\ y_{\mathrm{new}}=[0\quad 1]\begin{bmatrix}\hat{i}_q\\ \hat{u}_q^{\mathrm{d}t}\end{bmatrix}\end{cases}\tag{14}$$

式中，G_1 和 G_2 为观测器增益，用于将 q 轴电流估计误差 $i_q-\hat{i}_q$ 反馈至状态方程，$G_1=-(R_{\mathrm{s}}/L+\gamma_1+\gamma_2)$，$G_2=-L\gamma_1\gamma_2$，$\gamma_1$、$\gamma_2$为观测器的期望极点。

2.2 自适应死区补偿设计

假设在 ABC 坐标系下进行死区补偿，以 A 相为例，其死区补偿电压为

$$u_{\mathrm{a}}^{\mathrm{com}}=\frac{T_{\mathrm{c}}}{T_{\mathrm{s}}}U_{\mathrm{dc}}\,\mathrm{sgn}(i_{\mathrm{a}})\tag{15}$$

式中：$u_{\mathrm{a}}^{\mathrm{com}}$ 为 A 相死区补偿电压；T_{c} 为死区补偿时间；T_{s} 为采样周期时间；U_{dc} 母线电压；$\mathrm{sgn}(i_{\mathrm{a}})$ 为符号函数，其定义为

$$\mathrm{sgn}\left(i_{\mathrm{a}}\right)=\begin{cases}1 & i_{\mathrm{a}}>0\\ 0 & i_{\mathrm{a}}=0\\ -1 & i_{\mathrm{a}}<0\end{cases}\tag{16}$$

对于电机控制系统，死区时间未知，所以需要对其进行估计。对 A 相的死区补偿电压进行变换，可以得到 dq 轴下的补偿电压。由于 q 轴死区补偿电压存在周期性波动，因此用最大死区补偿电压 $u_{q,\max}^{\mathrm{com}}$ 表示，即

$$u_{q,\max}^{\mathrm{com}}=\frac{2\sqrt{2}T_{\mathrm{c}}U_{\mathrm{dc}}}{\sqrt{3}T_{\mathrm{s}}}\tag{17}$$

通过积分可以得到平均补偿电压为

$$u_{q,\mathrm{avg}}^{\mathrm{com}}=\frac{3}{\pi}u_{q,\max}^{\mathrm{com}}\int_0^{\frac{\pi}{3}}\sin\left(\theta_{\mathrm{r}}+\frac{\pi}{3}\right)\mathrm{d}\theta_{\mathrm{r}}=\frac{3}{\pi}u_{q,\max}^{\mathrm{com}}\tag{18}$$

式中，积分项在[0, π/3]区间的取值为 1，又因为 $u_q^{\mathrm{d}t}$ 的变化很小，所以可以用平均值来替代最大值，即

$$u_{q,\mathrm{avg}}^{\mathrm{com}}=\frac{2\sqrt{6}T_{\mathrm{c}}U_{\mathrm{dc}}}{\pi T_{\mathrm{s}}}\tag{19}$$

所以死区补偿时间可由式(19)得出，表达式为

$$T_{\mathrm{c}}=\frac{\pi T_{\mathrm{s}}}{2\sqrt{6}}\frac{u_{q,\mathrm{avg}}^{\mathrm{com}}}{U_{\mathrm{dc}}}\tag{20}$$

$u_q^{\mathrm{d}t}$ 的存在导致 q 轴实际电压 u_q^{real} 与理论值 u_q^{deal} 存在误差 u_q^{err}，即 $u_q^{\mathrm{err}}=u_q^{\mathrm{deal}}-u_q^{\mathrm{real}}=u_q^{\mathrm{d}t}$，而对电压进行补偿后，理论上可完全消除此误差，即 $u_q^{\mathrm{real}}+u_q^{\mathrm{com}}=u_q^{\mathrm{deal}}$，所以由 q 轴扰动观测器所观测到的扰动电压与补偿电压存在关系

$$u_q^{\mathrm{d}t}=u_{q,\mathrm{avg}}^{\mathrm{com}}\tag{21}$$

将式(19)代入式(21)反解出 T_{c}，可得其估计值为

$$\hat{T}_{\mathrm{c}}=\frac{\sqrt{6}\pi\hat{u}_q^{\mathrm{d}t}T_{\mathrm{s}}}{12U_{\mathrm{dc}}}\tag{22}$$

所以 ABC 坐标系下的死区补偿电压为

$$\begin{cases}\hat{u}_{\mathrm{a}}^{\mathrm{com}}=\dfrac{\hat{T}_{\mathrm{c}}}{T_{\mathrm{s}}}U_{\mathrm{dc}}\,\mathrm{sgn}(i_{\mathrm{a}})\\ \hat{u}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{com}}=\dfrac{\hat{T}_{\mathrm{c}}}{T_{\mathrm{s}}}U_{\mathrm{dc}}\,\mathrm{sgn}(i_{\mathrm{b}})\\ \hat{u}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{com}}=\dfrac{\hat{T}_{\mathrm{c}}}{T_{\mathrm{s}}}U_{\mathrm{dc}}\,\mathrm{sgn}(i_{\mathrm{c}})\end{cases}\tag{23}$$

结合上述推导，自适应死区补偿的结构如图 8 所示，考虑死区补偿的无位置传感器控制框图如图 9 所示，其中，SVPWM 为空间矢量脉冲宽度调制(space vector pulse width modulation)。

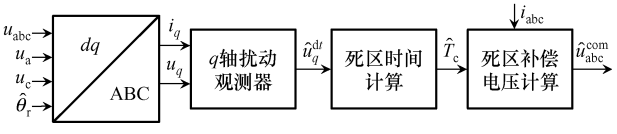


图 8 死区补偿原理框图

Fig. 8 Block diagram of principle of dead-time compensation

由式(14)可知，观测器极点的选择对 q 轴扰动电压的计算有很大的影响，而 q 轴扰动电压本身数值较小且最终参与计算的是其平均值，因此选用 q 轴电流作为极点配置的依据。图 10 为不同 γ 的 q 轴估计电流，当 γ=−1 000 时，电流估计效果较差，脉动十分剧烈；当 γ=−2 000 时，电流估计效果有所改善；当 γ=−3 000 时，电流估计效果较好，即可以较好地估计出 q 轴电流的高频成分。此外，由于后续计算不需要精确的高频成分，因此从稳定性的角度考虑，选择 γ_1=γ_2=−2 000。

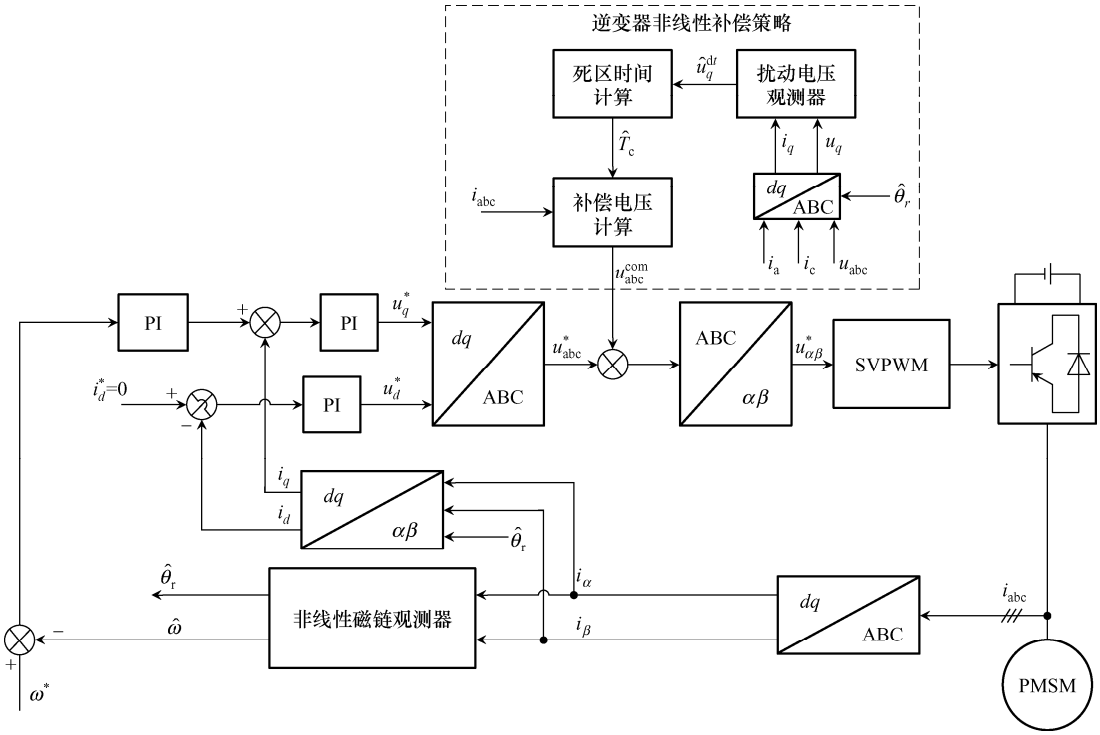


图 9　整体电机控制框图

Fig. 9 Block diagram of sensorless control considering dead-time compensation

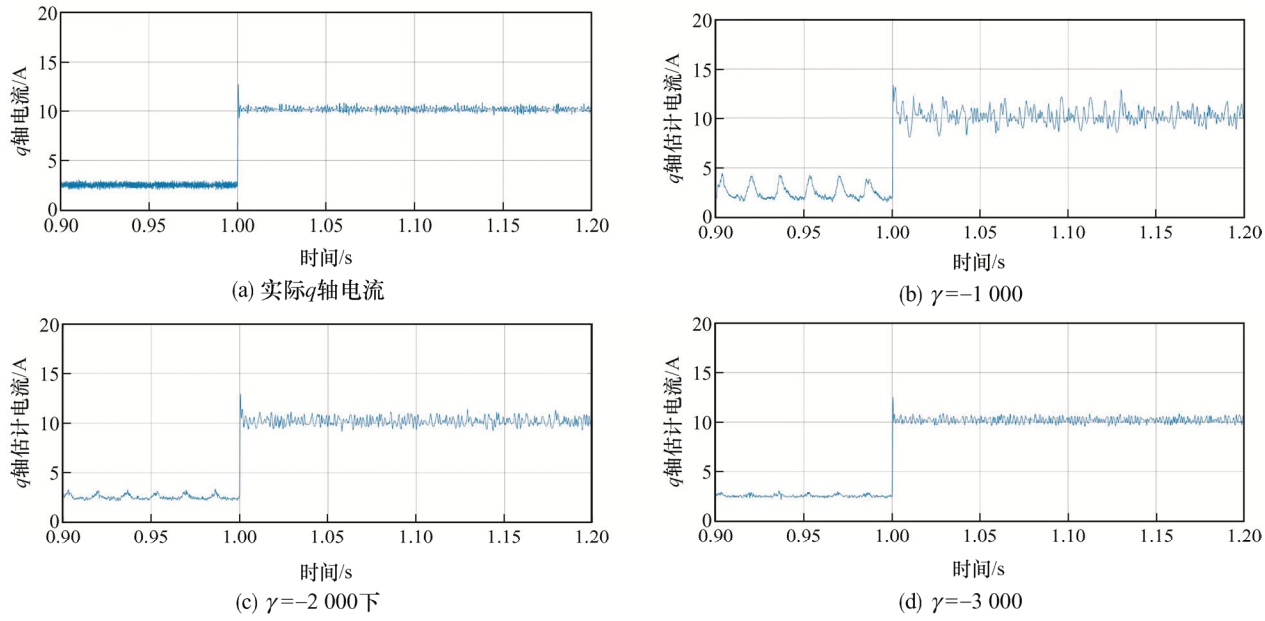


图 10　实际 q 轴电流与不同 γ 下的 q 轴估计电流波形

Fig. 10 Actual q-axis current and estimated q-axis current waveforms under different γ

3 实验结果分析

3.1 仿真及实验参数设置

为验证上述理论分析和设计方案的正确性及合理性，本文采用 MATLAB/Simulink 对图 9 所示的无位置传感器控制结构进行仿真，并通过实验进行了验证。仿真和实验电机参数见表 1。

整体仿真采用定步长仿真，步长为 1×10^{-5} s，仿真采用全速域 SVPWM，逆变器死区时间设置为 3 ms，直流侧电压为 250 V。

表 1 电机参数

Tab. 1 Motor parameters

电机参数	数值
额定转速/(r·min^{-1})	4 000
额定转矩/(N·m)	3
额定电流/A	12
极对数	3
相电阻/Ω	0.3
相电感/H	0.000 7
永磁体磁链/Wb	0.04
转动惯量/(kg·m^2)	0.000 2

3.2 仿真结果分析

为模拟实验中的加载过程，仿真中的加载形式为逐渐增大负载，在 0.4 s 时达到额定转矩 3 N·m。负载达到额定值后，电机转速趋于稳定。图 11 和图 12 分别为电机达到稳态后的 A 相电流波形及经过死区补偿后的 A 相电流波形。由图 11 和图 12 可知，补偿后的相电流在过零点处比未补偿时更加平滑，死区时间对电流的影响有所改善。

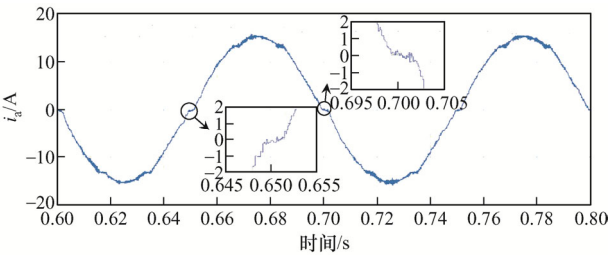


图 11 死区补偿前的 A 相电流

Fig. 11 Phase current before dead-time compensation

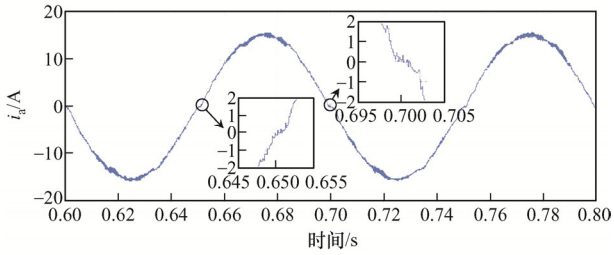


图 12 死区补偿后的 A 相电流

Fig. 12 Phase current after dead-time compensation

图 13 为所采用的加载曲线，在采用无位置传感器控制下，图 14 展示了负载达到额定值、考虑死区时间的电机转速，此时转速的最大波动范围为±6 r/min，图 15 为对死区进行补偿后的电机转速，补偿后转速的最大波动范围为±3 r/min。在图 14 和图 15 中，对比补偿前、后的转速波形可知，死区补偿后转速在稳态时的波动也有所减小。

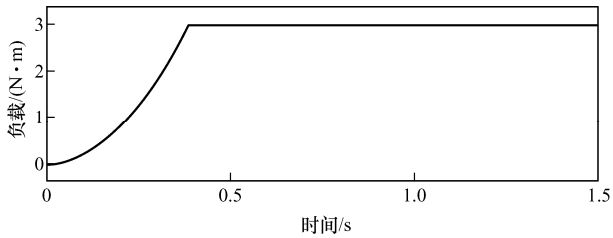


图 13 加载曲线

Fig. 13 Loading curve

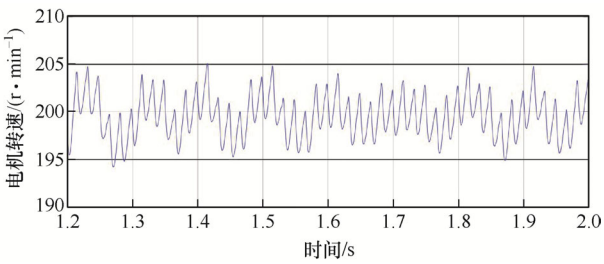


图 14 200 r/min、3 N·m 时考虑死区的转速波形

Fig. 14 Speed waveform considering dead-time under 200 r/min and 3 N·m

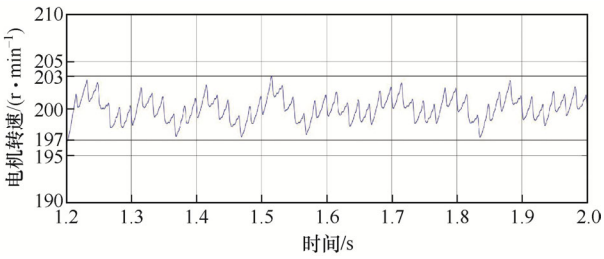


图 15 200 r/min、3 N·m 时死区补偿后的转速波形

Fig. 15 Speed waveform after dead-time compensation under 200 r/min and 3 N·m

3.3 实验结果分析

具体实验采用带载启动，以电阻负载的形式加载 1 N·m，其余设置均与仿真相同，实验平台如图 16 所示，所有的实验波形电机均采用无位置传感器控制。图 17、图 18 分别为死区补偿前、后的 A 相电流波形，死区补偿后的电流在幅值为 0 处的阶梯有所改善。为更明显地体现补偿效果，图 19、图 20 给出了 A 相电流快速傅里叶变换 FFT(fast fourier transform)分析结果。可知，加入死区补偿前总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)为 15.16%；加入死区补偿后，相电流中由于死区效应而产生的谐波已被抑制，THD 降低至 4.54%，谐波成分大幅度减少。



图 16　实验平台实物

Fig. 16 Physical of experimental platform

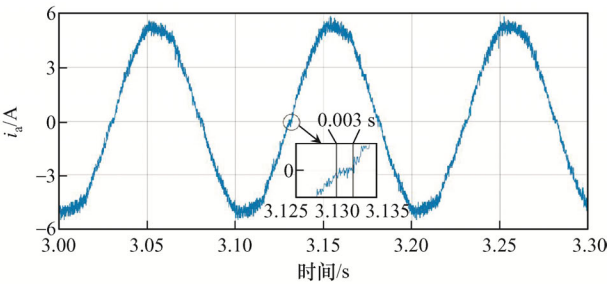


图 17　200 r/min、1 N·m 时死区补偿前的实验 A 相电流

Fig. 17 Experimental phase-A current before dead-time compensation under 200 r/min and 1 N·m

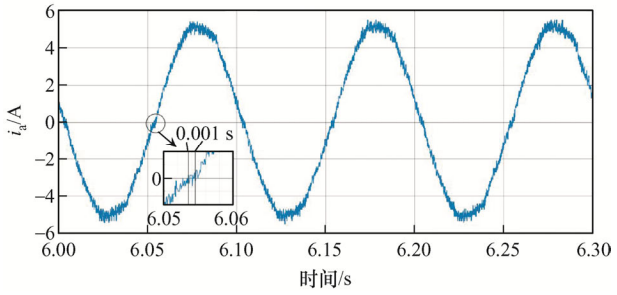


图 18　200 r/min、1 N·m 时死区补偿后的实验 A 相电流

Fig. 18 Experimental phase-A current after dead-time compensation under 200 r/min and 1 N·m

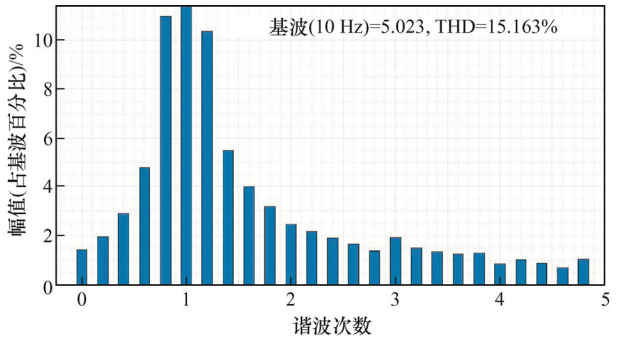


图 19　死区补偿前的 A 相电流 FFT 分析

Fig. 19 Phase-A current FFT analysis before dead-time compensation

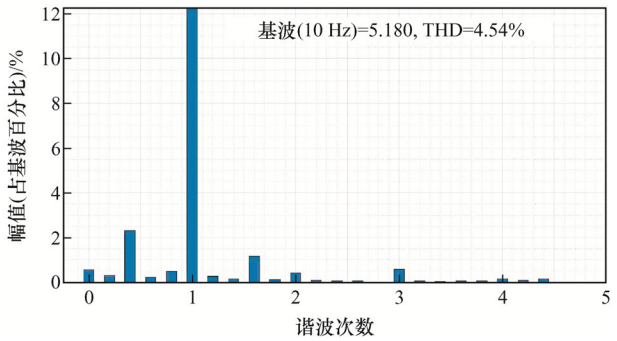


图 20　死区补偿后的 A 相电流 FFT 分析

Fig. 20 Phase-A current FFT analysis after dead-time compensation

图 21、图 22 分别为稳态时死区补偿前、后的电机转速。由图可见，补偿后的电机转速整体波动减小，与仿真结果相同。

图 23、图 24 分别为 500 r/min 下，负载由 2 N·m 突变至 3 N·m 时的 A 相电流波形和电机转速波形。对比可知，在引入死区补偿后，负载突变时 A 相

电流波动及到达稳态所需的时间显著减少，转速波动幅值明显下降。

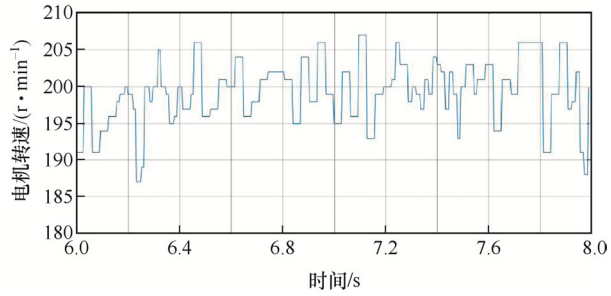


图 21　200 r/min、1 N·m 时死区补偿前的电机转速

Fig. 21 Motor speed before dead-time compensation under 200 r/min and 1 N·m

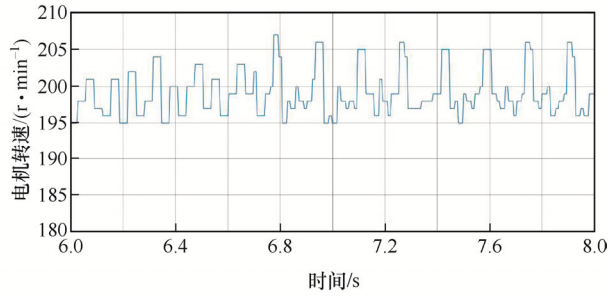


图 22　200 r/min、1 N·m 时死区补偿后的电机转速

Fig. 22 Motor speed after dead-time compensation under 200 r/min and 1 N·m

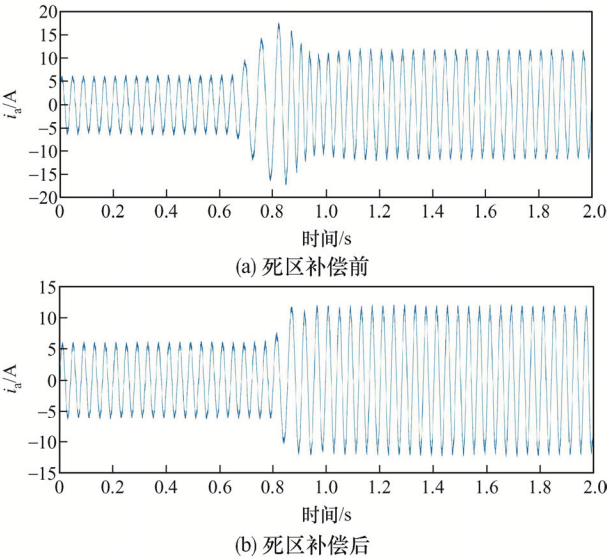


图 23　500 r/min、负载由 2 N·m 突变至 3 N·m 时 A 相电流

Fig. 23 Phase-A current under 500 r/min and changes in load from 2 to 3 N·m

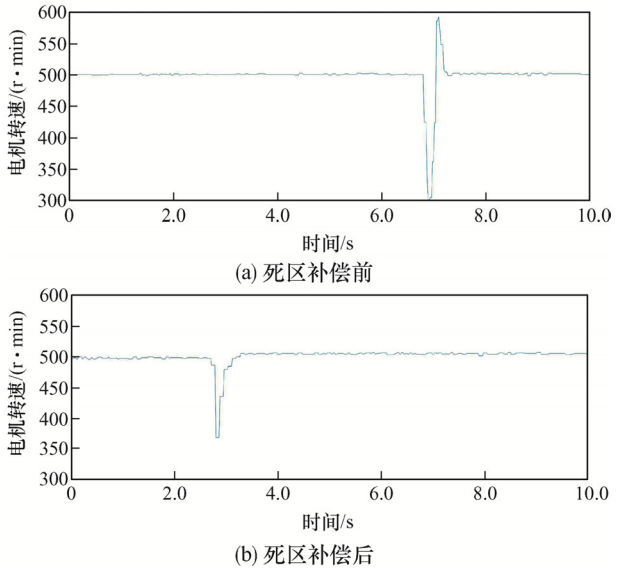


图 24　500 r/min、负载由 2 N·m 突变至 3 N·m 时电机转速

Fig. 24 Motor speed under 500 r/min and changes in load from 2 to 3 N·m

4　结语

本文分析了逆变器非线性因素中死区时间对 PMSM 非线性磁链观测器的影响，通过设计基于 q 轴扰动观测器的自适应死区补偿策略尽可能减弱死区时间对无位置传感器控制效果的不利影响，对非线性磁链观测器的低速应用性能提升提供了支撑和借鉴。通过仿真和实验，对比了无位置传感器运行下死区补偿前、后的相电流波形及稳态时的转速波动情况，验证了所提自适应死区补偿策略的有效性。但需要注意的是，当逆变器长时间处于高温、高频率工况下时，开关器件内部热效应加剧，从而加快其老化程度，使通断延时增加，降低自适应死区补偿的效果。因此，在大容量、高电压、高频率的工作环境下，本文所提的自适应死区补偿策略还有待优化。

参考文献：

[1] 田集斌, 孙述泽, 张安, 等. 自由活塞斯特林发电机永磁直线电机特性研究[J]. 电源技术, 2026, 50(6): 1084-1091.

Tian Jibin, Sun Shuze, Zhang An, et al. Research on characteristics of permanent magnet linear motors in free-piston Stirling generators [J]. Chinese Journal of Power

Sources, 2026, 50(6): 1084-1091. (in Chinese)

[2] 章回炫, 范涛, 宁圃奇, 等. 车用永磁同步电机高性能弱磁控制策略[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 378-385.
Zhang Huixuan, Fan Tao, Ning Puqi, et al. Flux-weakening control strategy for permanent magnet synchronous motor used in electric vehicles with high performance [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 378-385. (in Chinese)

[3] 刘春强, 骆光照, 涂文聪. 航空机电作动永磁同步电机自抗扰控制研究综述[J]. 电气工程学报, 2021, 16(4): 12-24.
Liu Chunqiang, Luo Guangzhao, Tu Wencong. Survey on active disturbance rejection control of permanent magnet synchronous motor for aviation electro-mechanical actuator [J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(4): 12-24. (in Chinese)

[4] Lin Xiaogang, Huang Wenxin, Jiang Wen, et al. A stator flux observer with phase self-tuning for direct torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6140-6152.

[5] Zhou Shichang, Zhang Zhenbin, Li Haitao, et al. A robust encoderless control for PMSM drives: A revised hybrid active flux-based technique [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 14438-14449.

[6] Wu Chao, Sun Xiangdong, Wang Jianyuan. A rotor flux observer of permanent magnet synchronous motors with adaptive flux compensation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 2106-2117.

[7] 周硕. 基于改进磁链观测器的 PMSM 转子位置估计方法[J]. 电气传动, 2020, 50(6): 15-21.
Zhou Shuo. Rotor position estimation method for PMSM based on improved flux linkage observer [J]. Electric Drive, 2020, 50(6): 15-21. (in Chinese)

[8] Ye Shuaichen, Yao Xiaoxian. A modified flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSMs with online stator resistance and inductance estimation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8652-8662.

[9] Liu Zirui, Shen Bohan, Kong Wubin, et al. Analytical approach for position observation error correction in IPMSM sensorless drives using online multiparameter estimation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(8): 9230-9243.

[10] 魏海峰, 韦汉培, 张懿, 等. 基于转子磁链模型的永磁同步电机转子位置估计策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 2963-2971.
Wei Haifeng, Wei Hanpei, Zhang Yi, et al. New rotor position estimation strategy for permanent magnet synchronous motor based on rotor flux model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 2963-2971. (in Chinese)

[11] Liang Donglai, Li Jian, Qu Ronghai, et al. Adaptive second-order sliding-mode observer for PMSM sensorless control considering VSI nonlinearity [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8994-9004.

[12] 赵文祥, 宋世昌, 周书文, 等. 改进滑模观测器的电流源逆变器驱动 PMSM 无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 987-995.
Zhao Wenxiang, Song Shichang, Zhou Shuwen, et al. Sensorless control of current source inverter driven PMSM with improved sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 987-995. (in Chinese)

[13] 韩坤, 孙晓, 刘秉, 等. 一种永磁同步电机矢量控制 SVPWM 死区效应在线补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 620-627, 692.
Han Kun, Sun Xiao, Liu Bing, et al. Dead-time on-line compensation scheme of SVPWM for permanent magnet synchronous motor drive system with vector control [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 620-627, 692. (in Chinese)

[14] 朱利东, 王鑫, 朱熀秋. 基于 NNBPF-EKF 的内置式永磁同步电机死区补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 5011-5019.
Zhu Lidong, Wang Xin, Zhu Huangqiu. IPMSM dead time compensation method based on NNBPF-EKF [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 5011-5019. (in Chinese)

[15] 陈会鸽, 王双岭. 五相感应电机变采样周期模型预测控制策略[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 318-326, 338.
Chen Huige, Wang Shuangling. Model predictive control strategy for five-phase induction motor with variable sampling period [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 318-326, 338. (in Chinese)

[16] 肖宏伟, 何英杰, 刘进军, 等. 基于窄脉冲消除的三电平逆变器矢量不对称死区补偿调制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1386-1397, 1545.
Xiao Hongwei, He Yingjie, Liu Jinjun, et al. Research on

vector asymmetric dead-time compensation modulation strategy of three-level inverter based on narrow pulse elimination [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1386-1397, 1545. (in Chinese)

[17] 闫博, 王家军. 基于时间方法的电压源逆变器死区补偿研究[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2021, 41(3): 43-50.
Yan Bo, Wang Jiajun. Research of dead-time compensation for VSI based on a time method [J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2021, 41(3): 43-50. (in Chinese)

[18] 陈国真, 黄旭东, 蒋炯炜. 基于死区效应时间补偿的永磁同步电机矢量控制[J]. 微特电机, 2022, 50(4): 52-56.
Chen Guozhen, Huang Xudong, Jiang Jiongwei. Permanent magnet synchronous motor vector control based on dead-time effects time compensation method [J]. Small & Special Electrical Machines, 2022, 50(4): 52-56. (in Chinese)

[19] 李有光, 谭秀菲. 基于跟踪微分器的 PMSM 死区补偿策略[J]. 微特电机, 2022, 50(2): 41-46.
Li Youguang, Tan Xiufei. Dead-time compensation method for PMSM based on tracking differentiator [J]. Small & Special Electrical Machines, 2022, 50(2): 41-46. (in Chinese)

[20] 胡启国, 马鉴望, 张祥, 等. 扰动电压观测器与线性补偿策略相结合的死区补偿方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 21-28.
Hu Qiguo, Ma Jianwang, Zhang Xiang, et al. Dead-time compensation method based on disturbance voltage observer and linear compensation strategy [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2023, 44(1): 21-28. (in Chinese)

[21] 刘小俊. 基于自适应陷波器的永磁牵引电机死区补偿方法研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(8): 24-30.
Liu Xiaojun. Method of dead time compensation for permanent magnet traction motor based on adaptive notch filter [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(8): 24-30. (in Chinese)

[22] 张立伟, 郑丽娜, 宋立群, 等. 采用扩展卡尔曼滤波器对 PMSM 死区补偿的方法[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(2): 93-99.
Zhang Liwei, Zheng Lina, Song Liqun, et al. Dead-time compensation for PMSM based on extended Kalman filter algorithm [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(2): 93-99. (in Chinese)

[23] 陈令云. 基于空间矢量脉宽调制的死区补偿方法研究[J]. 机械制造, 2019, 57(12): 29-31, 44.
Chen Lingyun. Study on dead zone com pensation approach based on SVPWM [J]. Machinery, 2019, 57 (12): 29-31, 44. (in Chinese)

[24] 于家文, 朱鹏程, 徐永向. 基于直轴电压分析的PMSM逆变器死区补偿策略[J]. 电气工程学报, 2021, 16(4): 51-58.
Yu Jiawen, Zhu Pengcheng, Xu Yongxiang. Dead zone compensation strategy for inverter of PMSM based on direct axis voltage analysis [J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(4): 51-58. (in Chinese)

[25] 吴翔, 陈硕, 李佳, 等. 基于改进正交锁相环的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 475-486.
Wu Xiang, Chen Shuo, Li Jia, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on improved quadrature phase-locked loop [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 475-486. (in Chinese)



张坤

作者简介：

张坤(1989—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：永磁同步电机无位置传感器控制，无刷同步电机控制。E-mail：zk_as@163.com。

张航(1987—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：永磁牵引系统高性能控制，无位置传感器传感器控制。E-mail：zh@xaut.edu.cn。

陈哲(1986—)，男，博士，副教授。研究方向：永磁同步电机高性能伺服控制，无位置传感器控制。E-mail：zhe.chen@nwpu.edu.cn。

马辉(1977—)，男，博士，高级工程师。研究方向：航空电子设备振动控制，热设计仿真技术。E-mail：valenmania@163.com。

雷昱坤(1999—)，男，中国电源学会学生会员，硕士。研究方向：永磁同步电机无位置传感器控制。E-mail：346515132@qq.com。

骆光照(1972—)，男，博士，教授。研究方向：航空航天永磁同步电机先进控制理论及应用。E-mail：guangzhao.luo@nwpu.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)