

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614947

基于自适应反步法的永磁同步电机单级位置 伺服控制设计与分析*

王金燕, 周扬忠

(福建省新能源发电与电能变换重点实验室(福州大学) 福州 350108)

摘 要: 永磁同步电机(PMSM)伺服系统凭借其高功率密度、高效率与优异的控制性能,已成为高端装备与自动化领域的核心驱动部件。随着数控机床、工业机器人等应用向高速、高精度与高动态响应方向持续发展,对位置伺服系统的跟踪精度、响应速度与抗干扰能力提出了更为严苛的要求。“位置+电流”的单级比例-积分-微分(PID)位置伺服控制结构因位置响应迅速的优点而受到行业青睐,但其设计复杂,且系统参数不确定性、未建模动态等干扰因素严重制约了其在高端伺服领域的应用。为此,提出一种基于自适应反步法的单级位置伺服控制策略。首先,对位置伺服环进行自适应反步设计,基于位置闭环递推出虚拟速度给定;针对参数不确定与未建模干扰,设计自适应观测器,通过虚拟速度闭环递推出控制转矩的 q 轴电流给定,实现了位置环与速度环的一体化设计。在此基础上,构建完整的位置闭环模型,精确分析位置闭环的稳定性。最后,通过与 PID 单级位置控制策略进行仿真与实验对比,结果表明,所提控制策略在位置闭环稳态与动态误差方面均更小,对系统参数不确定性及未建模干扰具有更强的鲁棒性,为高端伺服系统的高性能控制提供了一种有效解决方案。

关键词: 永磁同步电机; 自适应反步; 单级位置伺服设计; 稳态性分析

中图分类号: TM341 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 80

Design and analysis of single-stage position servo control for permanent magnet synchronous motors based on adaptive backstepping method

Wang Jinyan, Zhou Yangzhong

(Fujian Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion (Fuzhou University), Fuzhou 350108, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor (PMSM) servo systems have become a core driving component in high-end equipment and automation due to their high power density, high efficiency, and excellent control performance. As applications such as computer numerical control (CNC) machine tools and industrial robots advance toward higher speeds, precision, and dynamic response, more stringent requirements are imposed on position servo systems in terms of tracking accuracy, response speed, and disturbance rejection capability. The "position + current" single-stage proportional-integral-derivative (PID) position servo control structure is favored for its fast position response; however, its design complexity, combined with disturbances such as parameter uncertainties and unmodeled dynamics, limits its application in high-end servo domains. To address these challenges, this article proposes a single-stage position servo control strategy based on adaptive backstepping. First, an adaptive backstepping design is conducted for the position servo loop to derive a virtual velocity reference. An adaptive observer is then designed to compensate for parameter uncertainties and unmodeled disturbances, and the q -axis current reference for torque control is derived through the virtual velocity closed loop, achieving integrated position-velocity control. A complete position closed-loop model is subsequently constructed to accurately analyze stability. Finally, simulation and experimental comparisons with the PID-based single-stage position control demonstrate that the proposed strategy achieves smaller steady-state and dynamic position errors, as well as stronger robustness against parameter uncertainties and unmodeled disturbances, providing an effective solution for high-performance high-end servo systems.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; adaptive backstepping; single-stage position servo design; steady-state performance analysis

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)伺服系统以其高功率密度、高效率及优异的控制性能,已成为数控机床、工业机器人、精密仪器等高端装备与自动化领域的核心驱动部件^[1-5]。随着这些领域向高速、高精度、高动态响应方向持续发展,对位置伺服的跟踪精度、响应速度与抗干扰能力提出了更为严苛的要求^[6]。

然而,永磁伺服系统在实际运行中,面临电机参数(如阻尼系数、转动惯量、磁链)时变、负载扰动、以及未建模等多重不确定性的综合影响^[7-9]。研究表明,若不对这些不确定性进行有效补偿,将直接导致系统跟踪精度下降、动态品质恶化,严重制约其在高端应用中的性能。

工程中典型的基于比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)的级联式三环(位置环、速度环和电流环)位置伺服控制结构清晰、易于实现,但其级联结构较为复杂。为此,近年来,一种简化的位置环与电流环结合的单级位置PID控制结构受到关注,它避免了复杂的级联设计,简化了控制器结构。但无论是传统的级联式PID三环控制还是单级位置PID控制,都存在响应慢、对参数变化和扰动鲁棒性不足的固有局限^[10],无法有效抑制电机参数摄动及系统未建模部分对控制性能的影响。

反步法作为一种基于Lyapunov稳定性理论的系统化非线性控制器设计方法,通过逐步递推构造虚拟控制律与Lyapunov函数,为处理非线性、强耦合系统的控制问题提供了强有力的框架^[11-12]。文献[12]首次将反步控制应用于感应电机,实现了无需磁链测量的转速控制,并通过Lyapunov理论证明了闭环系统的稳定性。但标准反步控制存在对模型精确性依赖高、解析求导过程复杂以及缺乏主动抑制未知扰动能力的缺陷,限制了其在PMSM高性能伺服控制中的应用。

为提升系统对不确定性的自适应能力,自适应反步法应运而生,其通过在线估计未知参数或扰动上界,显著增强了对参数变化与未建模扰动的鲁棒性^[13-17]。文献[16]将自适应反步控制与非线性扰动观测器相结合,提出了一种带有非线性扰动观测器的自适应反步滑模位置跟踪控制方法,确保了电机位置的快速跟踪并有效抑制了参数变化与负载波动的影响,但该方法存在参数整定困难的问题。文献[17]采用自适应神经网络实时估计不确定性并施加补偿控制,通过Lyapunov函数分析推导出神经网络参数的在线自适应调节律,从而提升了位置伺服控制精度,然而,复杂的控制器结构导致其对控制平台的硬件性能提出了较高要求。

鉴于此,本文针对永磁同步电机单级位置伺服结构在强鲁棒性与高精度控制方面的需求,提出一种基于自适应反步法的单级位置伺服控制策略,对位置伺服环进行自适应反步法设计;构建完整的位移闭环模型,分析位置闭环稳定性。通过仿真及实验全面研究所提控制策略性能。

1 永磁伺服传动链模型

采用永磁磁场定向dq坐标系,电磁转矩方程为:

$$T_e = p[(L_d - L_q)i_d i_q + \psi_f i_q] \quad (1)$$

其中, i_d 、 i_q 分别为d、q轴电流; L_d 、 L_q 分别为d、q轴电感; ψ_f 为永磁体磁链; p 为电机极对数。

电机运动方程为:

$$T_e = T_L + B\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

式中: B 为粘滞摩擦系数; J 为转动惯量; T_L 为负载转矩; ω 为转子机械角速度。

联结式(1)和(2), PMSM的运动方程进一步变形为:

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L = p[(L_d - L_q)i_d i_q + \psi_f i_q] \quad (3)$$

在实际运行过程中,系统转动惯量和等效粘性摩擦系数等会随着温度、润滑条件、零件磨损以及是否带载等工况的改变而变化。考虑建模不确定性和未知外部干扰的影响,式(3)可改写为:

$$(J_0 + \Delta J) \frac{d\omega}{dt} + (B_0 + \Delta B)\omega + (T_{L0} + \Delta T_L) = p(L_{d0} - L_{q0})i_d i_q + p(\Delta L_d - \Delta L_q)i_d i_q + p(\psi_{f0} + \Delta\psi_f)i_q \quad (4)$$

式中: J_0 、 B_0 、 T_{L0} 、 L_{d0} 、 L_{q0} 和 ΔJ 、 ΔB 、 ΔT_L 、 ΔL_d 、 ΔL_q 分别为电机参数的标称部分和变化部分。

采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略,定义系统扰动之和为:

$$T_{d1} = \Delta J \frac{d\omega}{dt} + \Delta B\omega + T_{L0} + \Delta T_L - p\Delta\psi_f i_q \quad (5)$$

进一步,则式(4)变为:

$$J_0 \frac{d\omega}{dt} + B_0\omega + T_{d1} = p\psi_{f0} i_q \quad (6)$$

为便于对位置和速度子系统设计,根据式(6)进一步建立永磁伺服系统状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega \\ \dot{\omega} = A\omega - bu + d_1 \end{cases} \quad (7)$$

其中, θ 为转子机械角度, $A = -\frac{B_0}{J_0}$, $b = -\frac{p\psi_{f0}}{J_0}$, $d_1 = -\frac{T_{d1}}{J_0}$, $u = i_q$ 。

由于电流环带宽远大于速度环带宽,可将其视为比例环节,令电流传递函数为单位1。由上式可建立位置伺服系统的结构框图如图2所示。

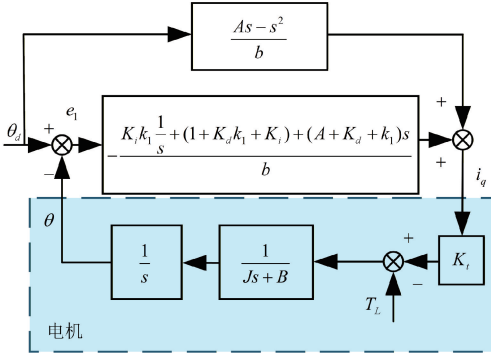


图2 位置伺服系统的结构

Fig. 2 Position servo system block diagram

其中, K_t 为转矩系数, $K_t = p\psi_f$ 。

则位置系统的开环传递函数为:

$$W_{(op)} =$$

$$\frac{J_0[(A + K_d + k_1)s^2 + (1 + K_d k_1 + K_i)s + K_t k_1]\psi_f}{s^2(Js + B)\psi_{f0}} \quad (26)$$

忽略参数不确定性及未建模等,根据式(26)进一步建立位移闭环传递函数为:

$$W_b = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (27)$$

其中, $a_2 = A + K_d + k_1$, $b_2 = K_d + k_1$, $a_1 = b_1 = 1 + K_d k_1 + K_i$, $a_0 = b_0 = K_t k_1$ 。

闭环特征方程为:

$$D(s) = s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0 \quad (28)$$

根据劳斯—赫尔维茨稳定性判据可知,系统稳定的充要条件为:

$$\begin{cases} (K_d + k_1)(1 + K_d k_1 + K_i) > k_1 K_i \\ K_d + k_1 > 0 \\ 1 + K_d K_i + K_i > 0 \\ k_1 K_i > 0 \end{cases} \quad (29)$$

已知 k_1, K_d, K_i 均大于0,参数取交集可得:

$$\begin{cases} (K_d + k_1)(1 + K_d k_1 + K_i) > k_1 K_i \\ K_d > 0 \\ K_i > 0 \\ k_1 > 0 \end{cases} \quad (30)$$

4 仿真研究

本文利用 MATLAB/Simulink 进行仿真建模,对本文所提控制策略与单级 PID 位置伺服控制策略进行对比。

位置给定为 S 曲线,在系统标称参数下,两种控制策略的位置跟踪曲线与误差对比分别如图3(a)与(b)所示。对比误差曲线可知,本文所提控制策略的位置误差保持在 ± 12.5 deg,单级 PID 控制策略的位置误差保持在 ± 20.5 deg,本文所提控制策略位移误差较单级 PID 控制策略稳态误差减小了 39%。

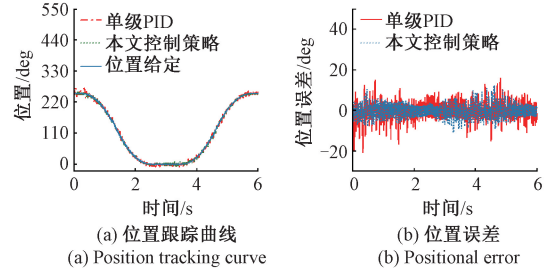


图3 系统标称参数下位置跟踪响应仿真曲线

Fig. 3 Simulation curve of position tracking response under nominal system parameters

为验证本文控制策略的鲁棒性,仿真模拟了实际工程应用中常见的粘滞阻尼系数 B 显著增大的场景。仿真中在 $t = 1$ s 时,粘滞系数 B 分别由标称值增加 50%、250%,两组仿真结果分别如图4和5所示。

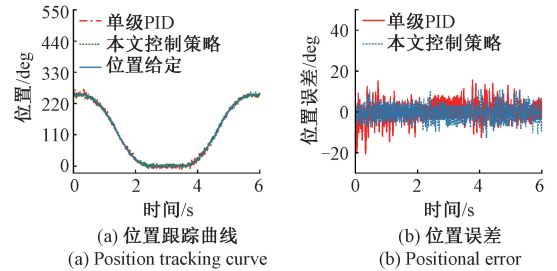


图4 位置跟踪响应仿真曲线(B 50%扰动)

Fig. 4 Position tracking response under 50% perturbation in damping (B)

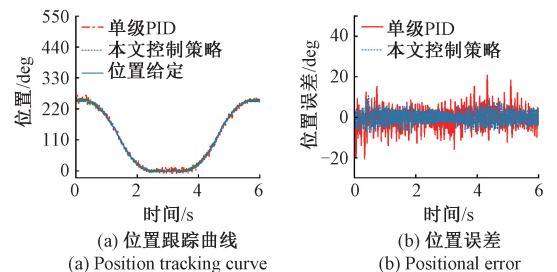


图5 位置跟踪响应仿真曲线(B 250%扰动)

Fig. 5 Position tracking response under 250% perturbation in damping (B)

同时,仿真模拟了工业实践中伺服系统最常面临且最关键的负载转动惯量 J 增加的工况。在 $t=1\text{ s}$ 时,转动惯量 J 由标称值增加 50% 以及 120%, 两组仿真结果分别如图 6 和 7 所示。

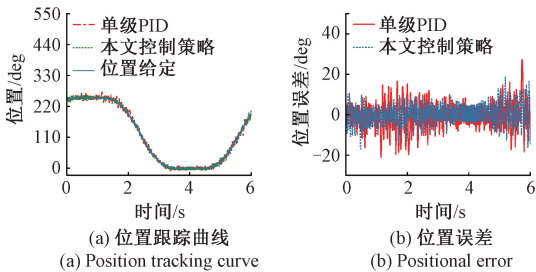


图 6 位置跟踪响应仿真曲线(J 50% 扰动)

Fig. 6 Position tracking response under 50% perturbation in inertia (J)

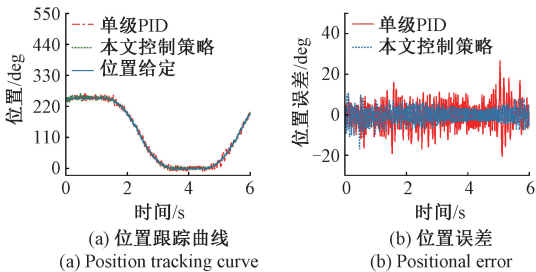


图 7 位置跟踪响应仿真曲线(J 120% 扰动)

Fig. 7 Position tracking response under 120 % perturbation in inertia (J)

由仿真结果可知,本文所提控制策略在系统粘滞阻尼系数与电机转动惯量发生变化时,位置跟踪仍能保持稳定且位置误差均小于单级 PID 控制,表现出良好的鲁棒性。

5 实验研究

实验中所使用的 PMSM 电机的标称参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 标称参数
Table 1 PMSM nominal parameters

参数	数值
额定电压 U_N/V	220
定子电阻 R/Ω	2
永磁磁链 ψ_f/Wb	0.045
直轴电感 L_d/H	0.012 24
交轴电感 L_q/H	0.012 72
极对数 p	5
转动惯量 $J/(kg\cdot m^2)$	0.000 052
转矩系数 $K_t/(N\cdot A^{-1})$	0.45

控制板的核心处理器为 TMS320F28388S, 转子位置角通过单圈绝对式编码器获得,系统控制周期为 $125\text{ }\mu\text{s}$, 实验平台如图 8 所示。

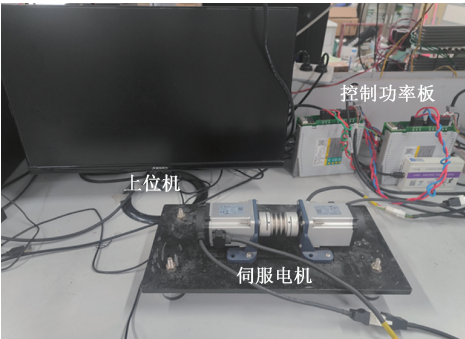


图 8 实验平台

Fig. 8 Photo of experimental platform

选取正弦参考信号,将单级 PID 控制器、三环控制器以及本文所提控制器分别作用于 PMSM, 获得位置跟踪曲线及误差曲线等。图 9 为单级 PID 位置跟踪响应曲线,其中图 9(a) 为位置跟踪曲线,图 9(b) 为误差曲线。从图 9 中可以看出,单级 PID 控制稳态误差在 $-1.20\sim 1.80\text{ deg}$, 误差较大。

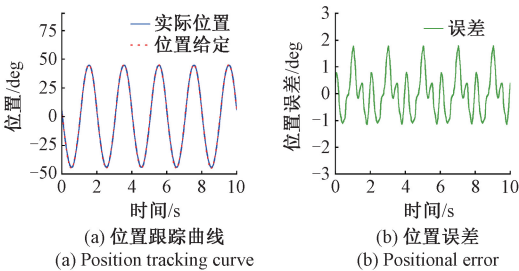


图 9 单级 PID 位置跟踪响应曲线

Fig. 9 Position tracking response curve of PID

图 10 为三环控制位置跟踪响应曲线,其中图 10(a) 为位置跟踪曲线,图 10(b) 为误差曲线。从图 10 中可以看出,三环控制稳态误差在 $-1.20\sim 1.30\text{ deg}$ 。

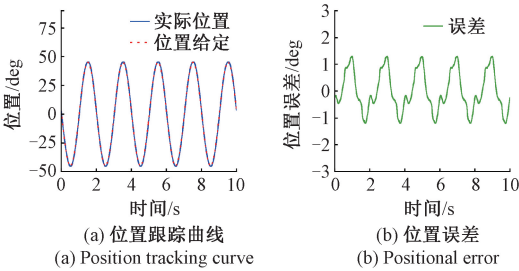


图 10 三环控制位置跟踪响应曲线

Fig. 10 Position tracking response curve of three-loop control

将本文控制器作用于系统,其中 $K_d = 175$ 、 $k_1 = 120$ 、 $K_i = 3\,000$, 满足系统稳定条件,在此条件下获得的位置跟踪响应曲线如图 11 所示。从图 11 中可以看出,实际位置曲线基本与位置给定曲线重合,位置稳态误差在 $-1.10 \sim 1.20\text{ deg}$,相较于单级 PID 控制稳态误差减小了约 30%,相较于三环控制稳态误差减小了约 10%。

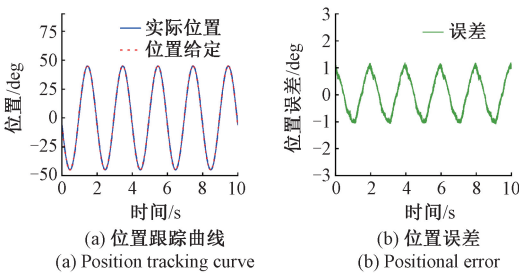


图 11 本文所提控制位置跟踪响应曲线
Fig. 11 The position tracking response curve proposed in this paper

图 12(a) 给出了转速为 $1\,000\text{ r/min}$ 时采用本文所提控制方法和单级 PID 控制时的斜坡跟踪误差曲线,并且在 $t = 1.2\text{ s}$ 时突加了负载扰动。图 12 为本文控制方法跟踪过程中自适应增益 $\hat{d}_1$ 变化曲线。从图 12(a) 中可以看出,在突加负载扰动时,单级 PID 的位置跟踪误差下降 1.5 deg 且在 2 s 后恢复至稳态,三环控制跟踪误差下降 1.36 deg 且在 0.7 s 后恢复至稳态,本文控制策略位置跟踪误差下降 1.3 deg 且在 0.3 s 后恢复至稳态。从图 12(b) 中可以看出,增益量 $\hat{d}_1$ 在突加扰动后有个较大的抬升,并且在 1 s 后达到新的稳态。

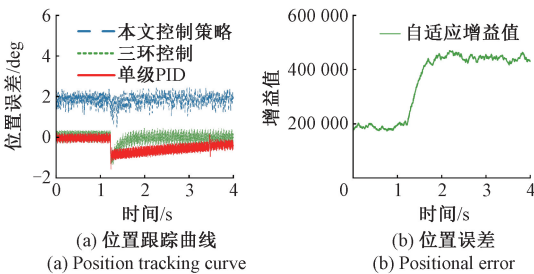


图 12 斜坡跟踪及自适应增益 $\hat{d}_1$ 响应

Fig. 12 Ramp tracking and adaptive switching gain response $\hat{d}_1$

6 结 论

本文提出一种基于自适应反步法的单级位置伺服控制策略,对其进行了自适应反步法设计;构建了完整的位置闭环模型及精确的闭环稳定性分析。通过详细的理论分析、仿真及实验验证得出:

1) 在整体结构上,本文所提控制策略可以等效为“前馈+反馈”位置控制结构,采用传动链标称参数直接构建位置速度和加速度前馈支路,对位置误差经等效 PID 控制,控制结构便于理解和应用;

2) 与 PID 单级位置伺服控制结构相比较,本文所提控制策略系统稳态误差只有 $\pm 1.2\text{ deg}$,比单级 PID 控制稳态误差减小了约 25%。突加负载误差只有 1.3 deg ,比单级 PID 突加负载误差减小了约 13%,且恢复时间比单级 PID 缩短了 85%。与三环控制结构相比较,本文所提控制策略稳态误差减小了约 10%,突加负载误差减小了约 5%,恢复时间缩短了约 60%。自适应机制可通过动态调整增益,有效衰减外部干扰,增强了系统的抗干扰能力。

参考文献

[1] 张臻,周扬忠. 永磁同步电机位置伺服系统改进变结构自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 263-271.
ZHANG ZH, ZHOU Y ZH. An improved variable structure active disturbance rejection control for the permanent magnet synchronous motor position servo system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 263-271.
[2] 鲍明堃,周扬忠. 基于复合神经网络重构对象的永磁同步直线电机变参数型位移速度并行控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2470-2484.
BAO M K, ZHOU Y ZH. Parallel displacement velocity control of permanent magnet synchronous linear motor with variable parameters based on composite neural network reconstruction object[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2470-2484.
[3] 方一鸣,李官胤,李建雄,等. 伺服电机驱动连铸结晶器振动系统建模与分析[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2615-2623.
FANG Y M, LI G Y, LI J X, et al. Modeling and analysing for oscillation system of continuous casting mold driven by servo motor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2615-2623.
[4] 孙斌,王海霞,苏涛,等. 永磁同步电机调速系统非线性自抗扰控制器设计与参数整定[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6715-6726.
SUN B, WANG H X, SU T, et al. Nonlinear active disturbance rejection controller design and tuning for permanent magnet synchronous motor speed control

- system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6715-6726.
- [5] 王淑娟,吴治峰,彭东林,等. 永磁伺服电机嵌入式位置检测理论及误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2547-2554.
- WANG SH X, WU ZH Y, PENG D L, et al. Embedded position detection theory and error analysis for permanent magnet servo motors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2547-2554.
- [6] 史婷娜,徐奕扬,谭本慷,等. 机器人关节用伺服电机关键技术及展望[J]. 电工技术学报, 2025, 40(19): 6192-6212.
- SHI T N, XU Y Y, TAN B K, et al. Key technologies and prospects of the servo motor for robot joints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(19): 6192-6212.
- [7] 马伟明,王东,程思为,等. 高性能电机系统的共性基础科学问题与技术发展前沿[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2025-2035.
- MA W M, WANG D, CHENG S W, et al. Common basic scientific problems and development of leading-edge technology of high performance motor system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2025-2035.
- [8] 甘醇,曲荣海,石昊晨,等. 宽调速永磁同步电机全域高效运行控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2496-2512.
- GAN CH, QU R H, SHI H CH, et al. Review of high-efficiency control strategy for permanent magnet synchronous motors under wide speed range[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2496-2512.
- [9] 牛泽农,黄文新,卜飞飞,等. 弹性伺服系统高性能位置控制器设计及增益边界分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(16): 5234-5246.
- NIU Z N, HUANG W X, BU F F, et al. High-performance position controller design and gain boundary analysis for elastic servo systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(16): 5234-5246.
- [10] 王政,温从剑,朱辰雨,等. 位置伺服永磁电机鲁棒性无差拍预测转速控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5176-5184.
- WANG ZH, WEN C J, ZHU CH Y, et al. Robust deadbeat predictive control for position servo permanent magnet motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5176-5184.
- [11] KANELLAKOPOULOS I, KREIN P T, DISILVESTRO F. Nonlinear flux-observer-based control of induction motors[C]. 1992 American Control Conference. IEEE, 1992: 1700-1705.
- [12] 杨启涯,庄海,张颖杰. 永磁同步电机积分反步自适应控制[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(8): 15-18, 62.
- YANG Q Y, ZHUANG H, ZHANG Y J. Integral backstepping adaptive control for permanent magnet synchronous motors[J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(8): 15-18, 62.
- [13] 金爱娟,张劲松,李少龙. 基于自适应扰动观测器的PMSM模型预测电流控制[J]. 包装工程, 2023, 44(23): 171-180.
- JIN AI J, ZHANG J S, LI SH L. Model predictive current control for PMSM based on adaptive disturbance observer[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(23): 171-180.
- [14] 林立,易斯卿,王翔,等. 内置式永磁同步电机自适应反步控制研究[J]. 电子制作, 2020(15): 62-64.
- LIN L, YI S Q, WANG X, et al. Research on adaptive backstepping control for interior permanent magnet synchronous motors[J]. Practical Electronics, 2020(15): 62-64.
- [15] 孙小钰,周坤,熊江枫,等. 基于干扰估计的机械腿自适应反步滑模控制[J]. 控制工程, 2025, 32(8): 1472-1479.
- SUN X Y, ZHOU K, XIONG J F, et al. Adaptive backstepping sliding mode control of mechanical legs based on interference estimation[J]. Control Engineering of China, 2025, 32(8): 1472-1479.
- [16] 黄刚,万雨龙. 基于扰动观测器的PMSM系统自适应反步滑模控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(3): 136-140.
- HUANG G, WAN Y L. Adaptive backstepping sliding mode control for PMSM system based on nonlinear disturbance observer[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(3): 136-140.
- [17] TING CH SH, CHANG Y N, SHI B W, et al. Adaptive backstepping control for permanent magnet linear synchronous motor servo drive[J]. IET Electric Power Applications, 2015, 9(3): 265-279.

作者简介



王金燕,2024 年于江西理工大学获得学士学位,现为福州大学硕士研究生,主要研究方向为永磁同步电机伺服控制。

E-mail:240120072@fzu.edu.cn

Wang Jinyan received her B.Sc. degree from Jiangxi University of Science and Technology in 2024. She is currently a master's student at Fuzhou University. Her main research interest indudes permanent magnet synchronous motor servo control.



周扬忠(通信作者),分别在 1996 年和 2007 年于南京航空航天大学获得学士学位和博士学位,现为福州大学教授,主要研究方向为现代调速系统、新能源发电系统。

E-mail:zhouyangzhong@fzu.edu.cn

Zhou Yangzhong (Corresponding author) received his B.Sc. and Ph.D. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1996 and 2007, respectively. He is currently a professor at Fuzhou University. His main research interests include modern motor drive systems and renewable energy technologies.