

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.046

离心式空压机 PMSM 无位置传感器控制研究

黎林, 刘淑杰, 张元良

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要:针对离心式空压机中永磁同步电机进行无位置传感器矢量控制问题,提出一种基于非线性磁链观测器的三段式电机运行方案。其中在电机启动前使用两次转子预定位算法来避免定位盲区并在传统的 I/f 控制中添加了一种基于瞬时无功功率的电流幅值调节算法,提高了电机在开环运行过程中的电流利用率和抗负载扰动性能;在开环加速阶段完成后切换到基于非线性磁链观测器中闭环运行。通过 Simulink 仿真和实验表明:该控制方案能够控制空压机稳定运行到 50 000 r/min。

关键词:离心式空压机;转子预定位;瞬时无功功率;非线性磁链观测器

中图分类号:TM351 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0244-06

Research on Position Sensorless Control of PMSM of Centrifugal Air Compressor

LI Lin, LIU Shujie, ZHANG Yuanliang

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A three-stage motor operation scheme based on nonlinear flux observer was proposed to solve the problem of position sensorless vector control of permanent magnet synchronous motor in centrifugal air compressor. The rotor positioning algorithm is used twice before the motor starts to avoid the blind spot, and a current amplitude adjustment algorithm based on instantaneous reactive power is added to the traditional I/f control, which improves the current utilization rate and anti-load disturbance performance of the motor during open-loop operation. The closed-loop operation based on nonlinear flux observer is switched to the closed-loop operation after the completion of the open-loop acceleration stage. Simulink simulation and experiments show that the proposed scheme can control the compressor to run stably to 50 000 r/min.

Keywords: centrifugal air compressor; rotor prepositioning; instantaneous reactive power; nonlinear flux observer

0 引言

离心式空压机是一种高效、节能的空气压缩设备,近年来随着氢能源燃料电池汽车的发展,它可作为车用燃料电池阴极供气系统的重要部件^[1],得到了许多车企和研究机构的关注。永磁同步电机是作为离心式空压机原动机的最佳选择之一^[2-4],由其直接驱动叶轮做高速旋转,连续地生产压缩空气,并且它们之间不需要机械传动装置,因此可以做到系统噪声小、传动效率高和整机体积小。

矢量控制技术是对永磁同步电机进行高效控制的最优方法之一,它可使控制系统获得良好的稳态和动态响应特性^[5]。然而为了保证空压机系统的紧凑性和可靠性,一般不会为永磁同步电机加装机械式位置传感器^[6-7],这就需要无位置传感器的矢量控制技术来对其进行控制。在无

位置传感器的永磁同步电机控制技术中,有一类是通过搭建观测器来得到电机转子位置信息,进而实现矢量闭环控制。2010 年 LEE 等^[8]针对表贴式永磁同步电机的无位置传感器控制提出了一种非线性磁链观测器,但该观测器应用于电机零速闭环启动的性能不是非常稳定。因此针对离心式空压机中永磁同步电机的无位置传感器控制,本文提出一种基于非线性磁链观测器的三段式控制方案,先使用两次转子预定位算法定位电机转子位置,然后使用改进后的 I/f 算法控制电机转动到一个预期的速度,最后使用非线性磁链观测器进行矢量闭环控制。经仿真和实验验证,该控制方案能稳定地将某型号离心式空压机运行在 50 000 r/min,具有一定的工程实际应用价值。

1 两次转子预定位

对于该离心式空压机 PMSM 无位置传感器控

基金项目:国家重点研发计划课题项目(2019YFB2004604)

第一作者简介:黎林(1999—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机无感 FOC 控制,840485962@qq.com。

制系统而言,电机能否顺利启动取决于转子初始位置的判别,基于不准确的转子位置的启动过程可能会导致电机出现反转或启动失败。转子预定位算法是用于电机转子初始位置检测的一种简单易行的算法,其原理是在电机启动前,向定子绕组通入方向和幅值固定的电流矢量,并持续一段时间,从而将电机转子牵引到电流矢量指向的位置。

对于表贴式永磁同步电机,在 $i_d=0$ 的控制方式下,电磁转矩公式可简化为^[9]

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_s I \sin \theta \quad (1)$$

式中: T_e 为电机产生的电磁转矩; n_p 为电机的极对数; ψ_s 为永磁体磁链; I 为定子电流幅值; θ 为转矩角。

为方便分析,引入 d^*-q^* 参考坐标系,如图1所示, q^* 轴方向与电流矢量方向一致^[10]。由式(1)可知,在预定位过程中电机产生的电磁转矩主要是由电流矢量的幅值大小和转矩角所决定的。由于存在外部负载转矩,并且给定电流的大小不能超过硬件电路所设计的最大允许电流,因此在给定电流矢量处会出现一个定位盲区。如果在启动时刻电机转子落入定位盲区,由于转矩角过小,电磁转矩不足以克服阻力矩,从而导致预定位失败。

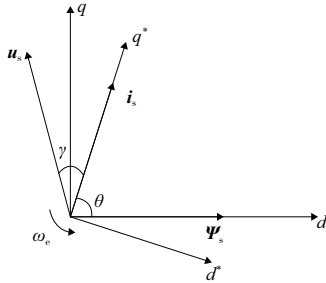


图1 电机旋转坐标系

为了解决上述的预定位失败问题,如图2所示,本文采取了2次转子预定位算法来实现转子预定位过程。该算法是将两个正交的定子电流矢量分别作用一段时间,第1次定位过程所施加的定子电流矢量角度为 $\pi/2$ ^[11],与A相垂直;第2次定位过程施加的定子电流矢量角度为 0° ,与A相方向相同。

由图2可以看到第1次预定位过程可以使电机转子与第2次预定位过程施加的定子电流矢量之间的夹角足够大,因此在第2次预定位过程产

生的电磁转矩足以拉动电机转子指向A相^[12]。

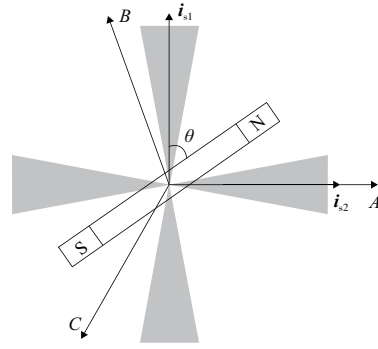


图2 两次转子预定位示意图

2 I/f 控制改进方案

由于非线性磁链观测器的零速闭环启动性能并不稳定,因此需要通过I/f开环控制加速到合适的速度后再切入闭环运行^[13]。在传统的I/f控制中,电流幅值一般固定不变^[14],并且会将电流幅值设为较大的值,保证了在较小的转矩角下电机也能产生足够的电磁转矩,以此来提高电机在受到扰动时的稳定性^[15],但这会降低电机在开环运行过程中电流的利用率。

为了提高I/f控制中电流的利用率和抗负载扰动性能,本文基于瞬时无功功率来构建电流幅值调节系统,提高电磁转矩的稳定裕度和电流的利用率。

PMSM的定子电压矢量方程为

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + L_s \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} + j\omega_e \psi_s \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}_s$ 为定子电压矢量; $\mathbf{i}_s$ 为定子电流矢量; ψ_s 为永磁体磁链矢量; R_s 为定子电阻; L_s 为等效同步电感; ω_e 为转子旋转的电角速度。

将式(2)展开成复矢量形式并沿 d^*-q^* 参考坐标系分解^[16],可得参考坐标系下的电机电压方程为:

$$U \sin \gamma = \omega_e L_s I + \omega_e \psi \cos \theta \quad (3)$$

$$U \cos \gamma = R_s I + \omega_e \psi \sin \theta + L_s \frac{dI}{dt} \quad (4)$$

式中: U 、 I 、 ψ 分别为 $\mathbf{u}_s$ 、 $\mathbf{i}_s$ 、 ψ_s 的幅值大小; γ 为电压矢量 $\mathbf{u}_s$ 与电流矢量 $\mathbf{i}_s$ 间的夹角。

电压矢量与电流矢量的向量积为瞬时无功功率 Q ,则式(3)可以改写为

$$\omega_e \psi \cos \theta = \frac{Q}{I} - \omega_e L_s I \quad (5)$$

瞬时无功功率也可以由 α - β 坐标系中的电

压信号 $u_{\alpha,\beta}$ 和电流信号 $i_{\alpha,\beta}$ 计算得到^[17-18]:

$$Q = u_{\beta} i_{\alpha} - u_{\alpha} i_{\beta} \quad (6)$$

通过将 $\omega_e \psi \cos \theta$ 作为PI控制器的反馈量,期望值设为0,建立如图3所示的电流矢量幅值调节系统,使转矩角稳定在 $\pi/2$ 来动态调节定子电流矢量的幅值^[19-20]。

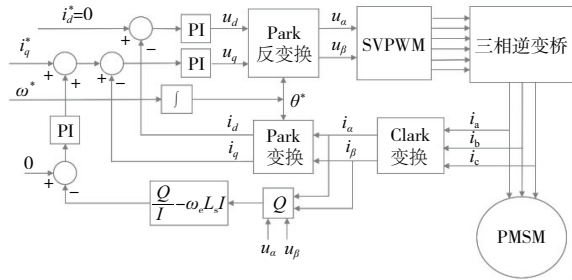


图3 基于电流幅值调节的I/f控制框图

3 非线性磁链观测器的实现

在 α - β 坐标系下,SPMSM的数学模型可以简化为

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_{\alpha} p & 0 \\ 0 & R_s + L_{\beta} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \omega_e \Psi_m \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (7)$$

对磁链进行微分可以得到反电动势,因此可以构建如下的状态变量,其中 x 为磁链; y 为反电动势。

$$x = L \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \Psi_m \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \sin \theta_e \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$y = -R_s \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

在对反电动势进行积分时,为了消除直流偏置或积分漂移的影响,在这里将实际磁链幅值与估算磁链幅值做差来补偿估算出的磁链分量。对式(8)进行移项,可得到如下的函数,该函数的模即为磁链的幅值。

$$\eta(x) = x - L \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

可以得到如下的非线性观测器:

$$\dot{\hat{x}} = y + \frac{\delta}{2} \eta(\hat{x}) [\Psi_m^2 - \|\eta(\hat{x})\|^2] \quad (11)$$

式中: $\hat{x}$ 为观测器的状态变量; δ 为观测器增益。

最后对 α 轴和 β 轴的磁链分量进行反正切处理便可以得到转子的电角度 θ_e ,电机的电角速度 ω_e 则可以通过对电角度 θ_e 的微分进行平均值滤波

来得到^[21]。

$$\begin{cases} \theta_e = \arctan \left(\frac{\hat{x}_{\beta} - L i_{\beta}}{\hat{x}_{\alpha} - L i_{\alpha}} \right) \\ \omega_e = \frac{1}{50 T_s} \sum_{k=1}^{50} d\theta_e(k) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\hat{x}_{\alpha}$ 和 $\hat{x}_{\beta}$ 分别为估计出的磁链在 α 轴和 β 轴的分量; T_s 为电机相电流的采样周期。

4 仿真分析与实验验证

为了验证本文所提出的基于非线性磁链观测器的三段式无位置传感器控制方案对离心式空压机中表贴式永磁同步电机进行转速控制的有效性,在Simulink仿真环境中搭建了系统控制模型进行仿真分析,并搭建了实验台架进行实验验证,仿真和实验所用的电机参数如表1所示。

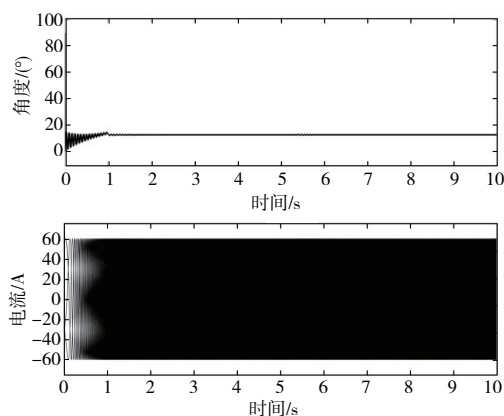
表1 表贴式永磁同步电机参数表

参数	数值
额定电压/V	450.0
额定电流/A	90.0
定子电阻/ Ω	0.017
定子电感/mH	0.061 4
永磁体磁链/Wb	0.004 39
磁极对数	1

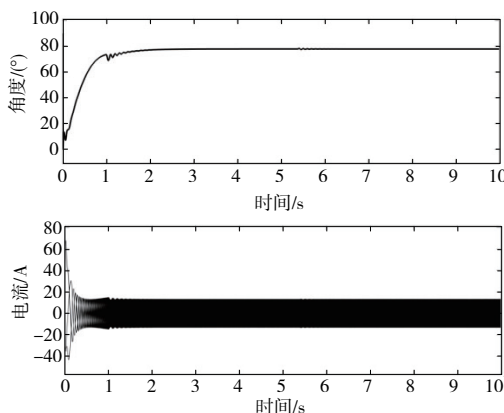
4.1 仿真结果及分析

仿真时间设置为10s,初始电流设为60A,初始负载转矩为0.4Nm。如图4所示,分别给出了传统I/f控制方法和改进后的I/f控制方法在加速到30000r/min下电机转矩角和三相电流的波形。可以看到,传统控制方法下的电流幅值恒定为60A,转矩角只有12.51°;而使用改进后的I/f控制方法时,通过调节定子电流矢量幅值可以将转矩角提高到77.9°,稳态时电流幅值为13.4A,相较于传统方法电流幅值下降了77.7%,提高了电机运行时电流的使用效率。

为了验证非线性磁链观测器的效果,在仿真中使用改进后的I/f控制算法启动加速,待转速达到10000r/min后切入基于非线性磁链观测器的闭环控制,并运行到50000r/min,从第6s开始让电机减速停止。如图5所示,当电机切入闭环运行后,转矩角由60°变为90°,并且在电机加减速的情况下,转矩角基本保持稳定。



(a) 传统I/f控制下的转矩角和三相电流波形



(b) 改进I/f控制下的转矩角和三相电流波形

图4 传统I/f和改进I/f控制的仿真对比

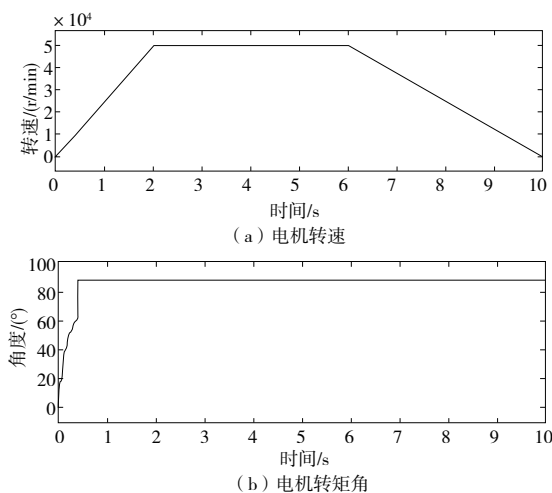


图5 电机转速与转矩角

图6所示为当电机运行在30 000 r/min时,突加1.0 Nm负载下3种控制方法对应的电机转速波形。可以看出改进后的I/f控制算法转速波动较传统I/f控制方法较小,抗负载扰动能力有所提高;而基于非线性磁链观测器闭环控制下的电

机转速波动最小,并且调节时间也相较于前两种方法短。

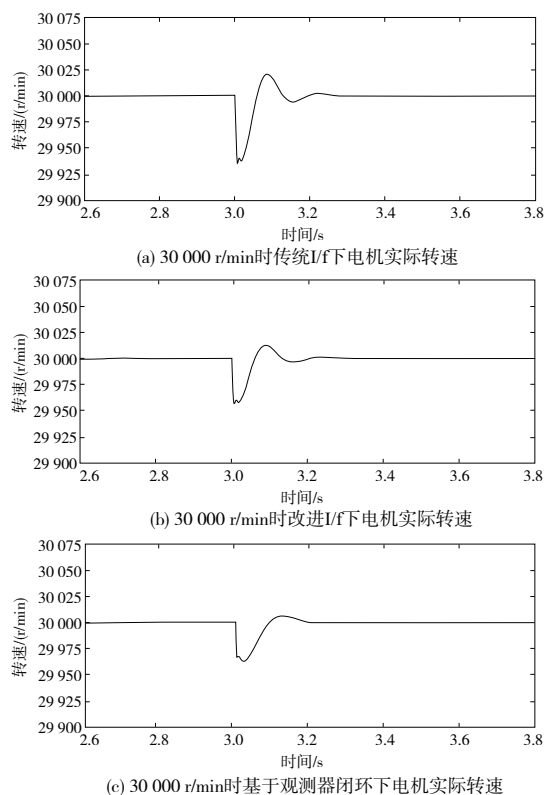


图6 30 000 r/min时不同方法下的负载转速波形

4.2 实验结果及分析

为了对本文提出的控制方案进行实验验证,搭建了如图7所示的离心式空压机高压实验平台。其中控制器芯片采用的是NXP公司的MPC5744P;电机相电流采样上选用了TransFar的HS72-A-P系列开环霍尔式电流传感器;功率模块选用的是Infineon公司的FS800R07A2E3,开关频率设置为20 kHz。

在实验中电机控制算法的计算周期为100 μ s,非线性磁链观测器的增益为5 000 000,2次转子预定位中通入的电流矢量幅值大小为30 A,每次的定位保持时间为70 ms。图8所示的是使用FreeMASTER软件记录的非线性磁链观测器估算出的电机转速,当空压机电机通过改进后的I/f控制算法加速到10 000 r/min时,切入到基于非线性磁链观测器的闭环运行中,并继续加速运行到50 000 r/min稳定运行。可以看到切入闭环控制后电机速度较为稳定,当达到稳态转速时没有出现明显的过冲和振荡,转速误差在15 r/min左右。

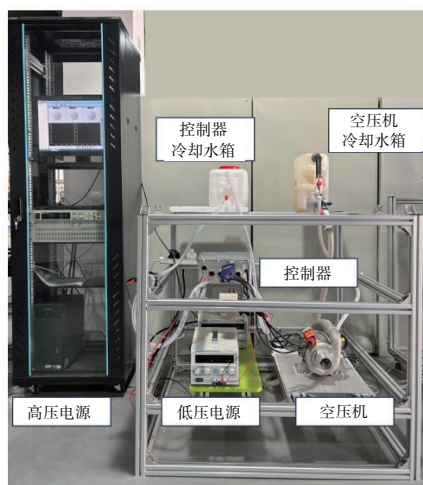


图7 离心式空压机高压实验平台

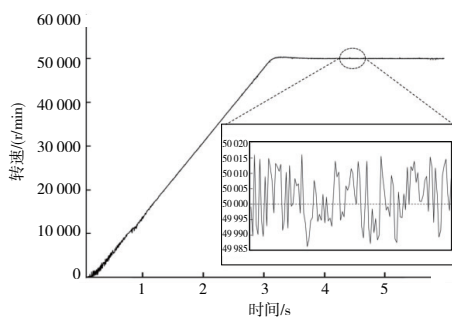


图8 观测器得出的空压机运行速度

图9展示了在电机启动阶段, I/f 控制中通过对转速积分得出的转子角度信息和非线性磁链观测器观测出的转子角度信息的对比, 可以看出非线性磁链观测器在实际应用中具有较快的收敛速度, 能在一个电角度周期内完成收敛并保持稳定。

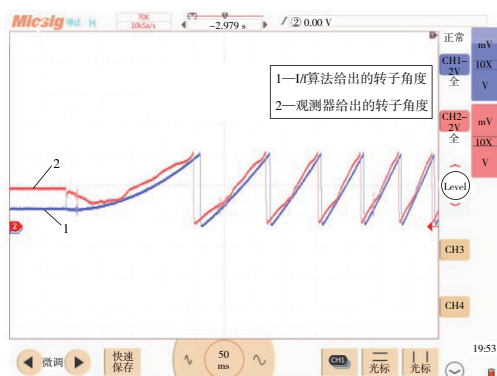
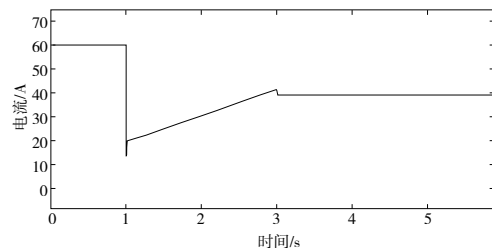
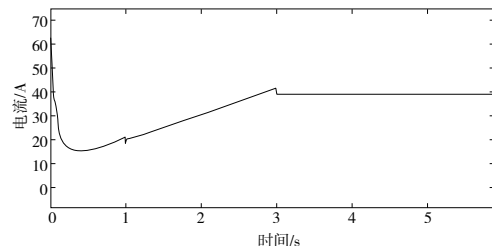


图9 启动阶段时记录的角度

图10所示是分别使用传统 I/f 控制和改进后的 I/f 控制来进行三段式无位置传感器控制方案下的空压机电机的相电流幅值, 可以看到改进后

的 I/f 控制在开环加速过程中的电流使用率较高, 并且在切入闭环运行时不会出现较大的电流波动。

(a) 使用传统 I/f 控制的三段式运行方案下的电机相电流幅值(b) 使用改进 I/f 控制的三段式运行方案下的电机相电流幅值图10 基于不同 I/f 控制方法下的电机相电流幅值

5 结语

本文针对离心式空压机中永磁同步电机的转速控制问题, 提出了基于非线性磁链观测器的三段式无位置传感器控制方案。该方案不仅保证了电机在启动阶段能够顺利带动空压机叶轮转动, 而且还提高了电机在开环运行时的电流利用率和抗负载扰动性能, 使用非线性磁链观测器观测出的转子角度进行矢量闭环控制。经 Simulink 仿真分析和实验验证, 该控制方案能够成功控制某型号离心式空压机中的永磁同步电机运行到 50 000 r/min。

参考文献:

- [1] 周拓, 白书战, 孙金辉, 等. 车用燃料电池专用空压机的现状分析[J]. 压缩机技术, 2021(1): 39-44.
- [2] KIM Y K, LEE J. A comparative study of high-speed permanent magnet synchronous motor for air compressor [C]//2005 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG). Nagoya: IEEE, 2005: 663-664.
- [3] 邢帅帅, 焦天姿. 空气压缩机用永磁同步电机电磁仿真设计[J]. 电机技术, 2023(3): 11-14, 22.
- [4] 仇道琳. 氢燃料电池空气泵用超高速永磁电机运行特性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2024.
- [5] 汪华章, 何涛, 刘鲲鹏, 等. 永磁同步电机控制策略综述[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2025, 51(2): 177-192.
- [6] 施泽京. 变频空调单转子式压缩机无刷直流电机控

- 制技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2023.
- [7] 王鑫,罗广旭,周玉璇,等. 空调永磁同步电机无位置传感器调速控制探究[J]. 制冷,2023,42(3):58-61.
- [8] LEE J, HONG J, NAM K, et al. Sensorless control of surface-mount permanent-magnet synchronous motors based on a nonlinear observer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2):290-297.
- [9] 赵化勇,田伟,吉敬华. 基于I/F启动的PMSM无感复合控制方法[J]. 电子测量技术,2024,47(16):41-48.
- [10] 王一凡,石一磬,孙国强,等. 基于SVPWM的永磁同步电机矢量控制方法研究[J]. 微电机,2024,57(9):14-21.
- [11] 赵毅恒,宁博文,卢少武,等. 基于I/F启动和扩展卡尔曼滤波的永磁同步电机全速域无传感器控制方法[J]. 电机与控制应用,2022,49(2):1-7,19.
- [12] 陈再发,刘彦呈,卢亨宇. 船舶永磁同步电机全转速范围无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报,2020,24(5):58-67.
- [13] 王垚鑫,年珩,赵建勇,等. PMSM的I/F结合滑模控制的模型设计实现方法[J]. 实验技术与管理,2022,39(7):16-23.
- [14] 何志敏. 永磁同步电机开环控制问题研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [15] 刘普,崔艺博,王聪,等. 基于双MPC与变斜率I/f的SPMSM快速启动控制策略研究[J]. 电机与控制学报,2024,28(9):151-161.
- [16] 王萌,杨家强,张翔,等. 一种表贴式永磁同步电机电流矢量闭环I/f控制方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(10):2513-2521.
- [17] 尹泉,张馨月,罗慧,等. PMSM抑制I/f启动策略稳态速度波动的新型方法[J]. 电气传动,2020,50(6):3-9.
- [18] 陈鑫宇. 基于瞬时转矩理论的感应电机转矩控制及转速估计研究[D]. 南宁:广西大学,2023.
- [19] 张乘玮,沈汉林,唐其鹏,等. 一种高效的PMSM无位置传感器I/f控制方法[J]. 微特电机,2017,45(10):48-52.
- [20] 张翔,高岚. 船舶永磁同步推进电机的优化I/f启动控制方法[J]. 舰船科学技术,2024,46(4):109-115.
- [21] 梁波,尹华杰. PMSM的MP-MRAS无位置传感器控制[J]. 机械制造与自动化,2022,51(2):149-151,156.

收稿日期:2023-12-08

(上接第243页)

- [3] 袁培江,陶一宁,傅帅,等. 航空制孔机器人的现状与展望[J]. 航空制造技术,2022,65(13):38-47.
- [4] THOMPSON P, OBEROI H, DRAPER A. Development of a multi spindle flexible drilling system for circumferential splice drilling applications on the 777 airplane[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2008;01-2301.
- [5] LOGEMANN T. Mobile robot assembly cell (RACe) for drilling and fastening[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2016;01-2078.
- [6] 何凤涛,陈雪梅,熊衍龙,等. 曲面自动化制孔技术研究现状与发展趋势[J]. 科学技术与工程,2020,20(29):11834-11841.
- [7] 姚艳彬,毕树生,员俊峰,等. 飞机部件机器人自动制孔控制系统设计与分析[J]. 中国机械工程,2010,21(17):2021-2024.
- [8] 冯昌源. 机器人自动钻铆系统离线轨迹与姿态优化方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
- [9] 朱文杰. 飞机壁板机器人制孔系统换刀技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [10] 盛王鼎,黎朝晖,周愿愿,等. 运载火箭短壳自动钻铆离线编程技术研究[J]. 航天制造技术,2021(5):40-45.
- [11] LEE ISAACS L, NELSON R, TRAPP S. Recreational therapists consider leisure motivation when evaluating virtual reality games[J]. Therapeutic Recreation Journal, 2021, 55(4):399-413.
- [12] LUO QUN, XUE HONG, LIU BOFENG, et al. Accurate data extraction technology for off-line programming of aircraft automatic drilling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(4):97-102.
- [13] 王巍,周星宇. 面向垂尾壁板的自动制孔离线编程模块设计及孔位误差分析[J]. 机械工程师,2021(3):17-20,23.
- [14] 陶鹏,王华兴,段代坤,等. 基于CAA的船舶工艺仿真环境搭建与LNS-SATSP排产优化[J]. 船海工程,2024,53(4):71-77.
- [15] 孙颖. 面向机身壁板的自动制孔系统应用研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2023.
- [16] ZHU W D, MEI B, KE Y L. Inverse kinematics solution of a new circumferential drilling machine for aircraft assembly[J]. Robotica, 2016, 34(1):98-117.
- [17] 刘国良,孙文磊. 复杂曲面随形打印变形机器人逆解算法与控制研究[J]. 机床与液压,2023,51(5):29-34.
- [18] 杨东浩,方维,许澍虹. 基于混合现实技术的民机驾驶舱仿真平台[J]. 民用飞机设计与研究,2022(4):13-20.

收稿日期:2024-05-27