

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.049

永磁同步电机偏差耦合 AISMC 观测器同步控制研究

皇甫振伟¹, 李峰²

(1. 河南经济贸易技师学院 自动控制系, 河南 新乡 453000;

2. 河南理工大学 机械工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了解决永磁同步电机(PMSM)多电机差速失步振荡问题,设计一种基于耦合自适应积分滑模控制(AISMC)观测器的永磁同步电机偏差同步控制方法。选择滞环控制永磁同步电机来实现多电机同步控制,考虑到外部负载变化容易干扰多电机发生同步性能下降的情况。研究表明:利用速度综合评测指标来优化同步补偿器可实现多PMSM同步效果更理想。相对SMC和ISMC,AISMC观测器获得更优同步效果,形成了更小转速与跟踪误差,达到了良好的稳定性。该研究有助于优化多电机同步控制过程,实现速度参数的补偿。

关键词: 永磁同步电机;同步控制;积分滑模控制;扰动观测器

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)04-0261-04

Research on Synchronization Control of Permanent Magnet Synchronous Motors Using Deviation Coupling AISMC Observer

Huangfu Zhenwei¹, Li Feng²

(1. Department of Automatic Control, Henan Economy and Trade Technician College, Xinxiang 453000, China

2. School of Mechanical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to further solve the problem of differential speed loss and oscillation in multi-motor systems with permanent magnet synchronous motors (PMSMs), a deviation synchronization control method based on a coupled adaptive integral sliding mode control (AISMC) observer is designed. Hysteresis control is selected for PMSMs to achieve multi-motor synchronization control, considering that external load variations can easily interfere with the synchronization performance degradation of multiple motors. The research results indicate that optimizing the synchronous compensator using a comprehensive speed evaluation index can achieve a more ideal synchronization effect for multiple PMSMs. Compared with SMC and ISMC, the AISMC observer achieves better synchronization effects, resulting in smaller speed and tracking errors, and achieving good stability. This research contributes to optimizing the multi-motor synchronous control process and enabling speed parameter compensation.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; synchronization control; integral sliding mode control; disturbance observer

0 引言

为了提升电机控制效率,对多电机开展同步控制研究成为了许多学者的重要研究内容,目前该控制技术已在精密零部件加工、工业制造、动力机械结构等领域获得广泛应用^[1-2]。还有学者通过参数耦合的形式来实现对永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)进行多电机同步控制的功能,建立一种具有高阶时变非线性特征的复杂系统,能够实现较高的控制精度,并具备良好的工况适应性,极大促进了智能制造以及大规模机器传动控制技术的发展^[3-4]。因此,为进一步提升多电机同步控制效率,需要从

算法设计与控制结构优化方面开展深入探讨,对电机运行控制开发更加高效的算法。

关于电机动力系统的研究工作已有较多前期报道,对后续电机控制系统优化提供了一定的参考价值。其中,Cordeiro 等^[5]通过仿真分析发现,在外部干扰因素作用下,电机运动状态将会受到一定程度影响,引起电机速度发生明显改变。为控制多台电动机同时达到精确协调效果以及增强系统动力传输与运动参数稳定性,需要对多电机同步系统设置实时转速反馈机制,采用更简单的控制结构,从而不断促进控制性能的提升。现阶段已经实现工业化应用的多电机控制方法为:主从控制、虚拟主轴、耦合算法、邻近点交叉、偏差分

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(20B430012)

第一作者简介: 皇甫振伟(1979—),男,河南新乡人,高级讲师,本科,研究方向为电气自动化,wang75590336@163.com。

析等多种形式。其中,主从式结构的组成部分较简单,但以并行方式进行控制,较易受外部环境因素的干扰,导致精度的实际控制效果偏差,通常仅被用于大规模传动控制机构^[6-9]。虽然虚拟主轴能够以很快速度追踪,但控制箱运行过程很容易受虚拟转速和反馈信号的影响,进而导致多电机结果发生异步现象。采用交叉耦合算法对改善电机的抗干扰性能具有较理想的效果,但这种策略仍无法适用于两个以上电机之间的同步调控^[10]。在处理两个电机同步控制偏差的问题上,交叉耦合控制存在局限性,而丁威等^[11]采用平均耦合方法实现了多电机控制精度的提升,但这种结构的控制性能与负载参数存在显著关联性。Fang 等^[12]同时利用复合联动控制策略和主辅协同调控机制,使三台电机能够实现动作同步控制效果,然而为了实现这一过程必须依托一个复杂系统架构。姜志斌^[13]基于交叉联动架构,提出了一种经典偏差联动模型,为此针对主驱动电机及其辅助电机之间的同步偏差配置了特定增益来补偿追踪误差,以增强同步控制准确性。但也需注意,即使经过以上处理后,当仅采用单一误差补偿策略,也难以有效解决扰动条件下多电机转速同步追踪精度不足的问题^[14]。

根据以上分析,本研究采用滞环控制策略对永磁同步电机进行多机同步操作,此外,当外部负载发生波动时易导致多电机同步控制性能变差,本文特地为多电机同步过程开发了一套改良控制架构和更高效算法。此外,为了对偏差耦合控制模型中速度参数进行有效补偿,引入了速度性能评估参数。

1 偏差耦合控制

采用常规偏差耦合控制方式时,通常是以同步步速补偿机制来调节控制电机与其它电机之间的速度差异,并将该差异与增益系数相乘的结果作为控制输入值^[15]。张荣芸等^[16]构建了改进型偏差耦合同步控制结构,利用滑模扰动观测器对电机负载扰动进行观测,并与改进的偏差耦合同步控制结构相结合。本文在前人研究和传统偏差耦合计算的基础上,融合了速度评价指标,并优化同步补偿数据,以此评估控制电机与其他电机之间的耦合效果。基于这一优化方式,本文构建了优化偏差耦合同步系统架构,如图 1 所示。

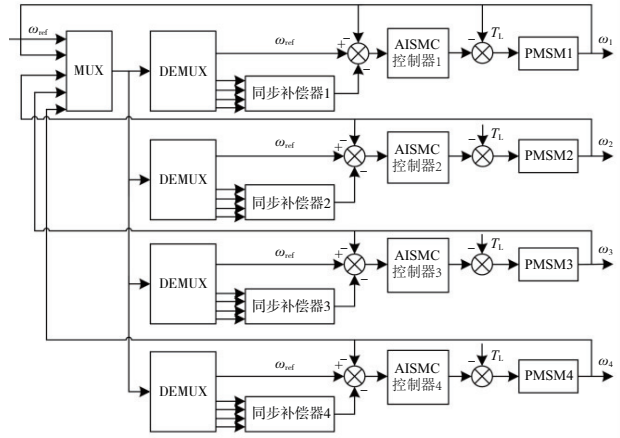


图 1 改进偏差耦合控制图

本实验针对 PMSM 同步补偿器开展测试,针对 PMSM 建立了如下跟踪函数^[17]

$$e_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_1 \quad (1)$$

式中: e_1 为电机 1 的转速误差; ω_1 为电机 1 的转速; ω_{ref} 为电机预设转速。

同时,为 PMSM 传统设计同步补偿器 E_1

$$E_1 = K_{12}(\omega_1 - \omega_2) + K_{13}(\omega_1 - \omega_3) + K_{14}(\omega_1 - \omega_4) \quad (2)$$

$$K_{i,j} = \frac{J_i}{J_j} \quad (3)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 为对应电机的转速; $K_{i,j}$ 为相应的反馈增益补偿系数。

本文对 4 个电机同步控制性能进行了分析,对应的补偿增益系数也存在差异,本文采用的同步补偿方案只能获得被控电机和其它电机同步结果,但并不能确定不同电机之间的耦合状态,最终建立了以下的速度综合评价项 ω_p

$$\omega_p = (\omega_{\max} + \omega_{\min}) / 2 - \bar{\omega}_m \quad (4)$$

$$\bar{\omega}_m = \sum_{i=0}^n \frac{\omega_i}{n} \quad (5)$$

式中: $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ 分别为被控电机的转速最大与最小值; m 为 PMSM 转速均值。

图 2 为改进后转速同步误差补偿器 E_1

$$E_1 = K_{12}(\omega_1 - \omega_2) + K_{13}(\omega_1 - \omega_3) + K_{14}(\omega_1 - \omega_4) + \omega_p \quad (6)$$

对多电动机进行同步控制时,不管是速度还是定位参数,都需要对其进行补偿,并将所得的负回馈结果输入转速环调节器,以 q 轴电流提供补偿作用,以确保启动阶段各电机实现理想同步控制效果^[18]。同时可以根据转速环的控制过程并

利用先进算法来获得更高精度的单电机控制性能,使电机同步控制达到更高精度,并且明显提升运行的稳定性。

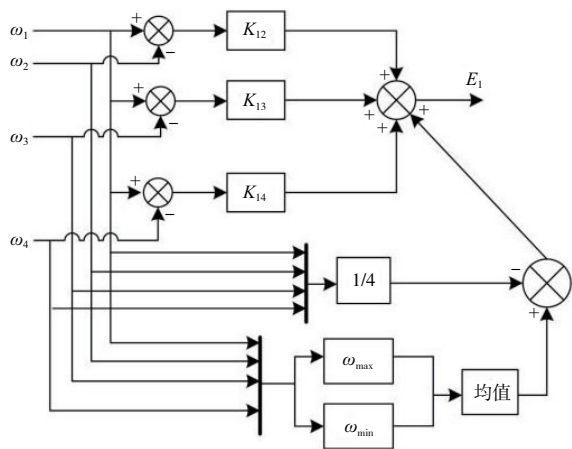


图2 PMSM 优化补偿器

2 自适应积分滑模调节

在 PMSM 系统中采用多电机运行方式,为增强单个电机控制精度,引入了一种积分滑动模态架构。在此架构下,以积分滑动模态面特性,确立了指数量控制规则,进而构造出 PMSM 自适应积分滑模控制。自适应积分滑模控制 (adaptive integral sliding mode control, AISMC) 滞环调节原理如图 3 所示。滑模控制可作为外环稳定转速,滞环控制作为内环快速跟踪电流变化,两者协同提升系统鲁棒性和响应速度^[19]。

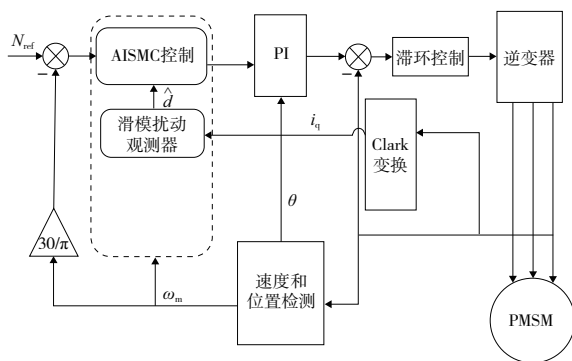


图3 AISMC 滞环调节

3 实验验证

3.1 控制结果分析

为综合评价 AISMC 控制效果,并测试 PMSM 多电机调控效果,本实验利用多电机协同的方法

构建测试平台。

为上位机建立了 MATLAB/Simulink 测试系统,构建得到多 PMSM 优化偏差耦合模型,具体如图 1 所示。PMSM 按照图 3 所示的方式根据 AISMC 实现控制,获得可执行代码后再进行编译处理得到能够满足 DSP 运行要求的 C 代码,再将其算法跟上位机相连^[20],测试台 XDS100V3 进行仿真控制,上位机再以串口接收数据,从而达到控制参数的高效调控。

测试时,控制转速为 1 000 r/min,0.1~0.2 s 内维持负载转矩 4 N·m,其余时间负载转矩为 0。表 1 为永磁同步电机参数。

表 1 多电机同步参数

参数	电机			
	1	2	3	4
转速/(r/min)	3 000			
定子电阻 R_s/Ω	2.880	2.860	2.880	2.890
电感/ 10^{-3} mH	8.520	8.460	8.410	8.360
永磁体磁链 ψ_r/Wb	0.173	0.179	0.183	0.191
转动惯量 $J/(10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2)$	0.850	0.880	0.940	0.980
阻尼系数 $B/(10^{-4} \text{ Nm} \cdot \text{s})$	0.800	0.800	0.750	0.750
极对数 n_p	4			

进行自主积分滑模调节时,对于为积分滑模积分系数 c 的选择,必须保证实现稳定的积分滑模函数值位于 0 附近。在配置这两个参数的过程中,以特定的倍率设计滑模函数,并在 0.1 s 对电机的负载转矩进行设定,相关数据如图 4 所示。通过观察可知,在 c 取值为 0.1 情况下,系统能够有效控制误差变量迅速且稳定地趋向滑模面。

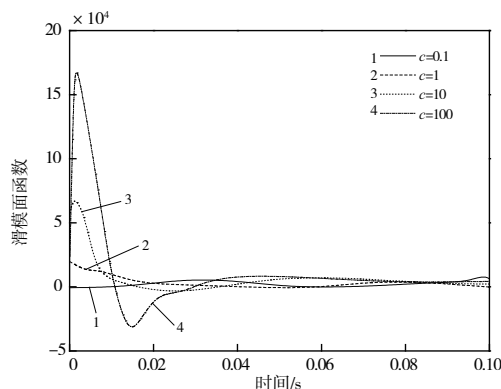


图4 滑模面函数变化

为验证本次设计的偏差耦合同步优化模型可

靠性,为单 PMSM 设置了传统滑模算法,同时比较多 PMSM 偏差耦合控制方式与优化多 PMSM 偏差耦合控制方式的差异性。图 5 给出了改进前后 PMSM 进行转速控制时形成的同步误差。

根据图 5 测试结果可以发现,只以 PMSM 调节 SMC 时,可以选择常规偏差耦合同步调控模式,PMSM 之间相比获得同步误差的更优偏差结果。通过速度评测指标来优化同步补偿器有效提升被控电机耦合性能,使其更符合实际结果,由此可以判断本文设计的根据优化偏差耦合同步控制结构实现的多 PMSM 同步效果更理想。

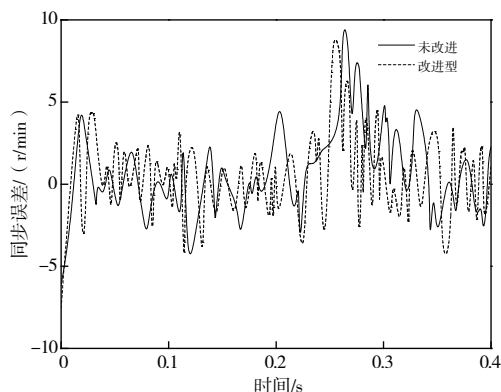


图 5 改进前后转速同步误差曲线

3.2 算法对比

对扰动观测器优化多 PMSM 同步控制系统的效果进行评价,加入了经过优化处理的多 PMSM 偏差耦合同步系统,为单 PMSM 设置了 AISMC 控制模型以及根据 AISMC 和传统观测器开展测试。转速跟踪误差测试数据列于表 2 中。

表 2 不同观测器的转速跟踪误差结果统计

参数	AISMC	ISMIC	SMC
跟踪误差	0.015	0.036	1.325

对多电机同步误差曲线进行分析可知,加入 $4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 脉冲负载后,形成了 $0 \sim 2 \text{ r/min}$ 的多电机同步误差。经过 0.25 s 后为电机设置持续负载的情况下电机转速减小了 $0 \sim 25 \text{ r/min}$,此时多电机运行过程形成了 $0 \sim 13 \text{ r/min}$ 的同步误差。由此可以推断,根据 AISMC 和传统观测器来实现多电机的同步控制时,相对 SMC 和 ISMC 控制方式可以获得更优同步效果,同时具备优异抗扰性能,从而实现稳定的 PMSM 多电机同步控制状态。

对测试得到的电机同步误差进行分析可以发现,相对 SMC、ISMIC 方式形成了更小的转速跟踪

误差,可以在很短时间中快速到达设定转速,并且受到负载影响程度都较低,电机转速呈现小幅波动,系统保持良好的稳定性。

4 结语

本文开展永磁同步电机偏差耦合 AISMC 观测器同步控制研究,得到如下有益结果:

1) 利用速度综合评测指标来优化同步补偿器时,可以提升被控电机和其它电机耦合性能,使其更符合实际结果,判断本文设计的根据优化偏差耦合同步控制结构实现的多 PMSM 同步效果更理想。

2) 相对 SMC 和 ISMC, AISMC 观测器可以获得更优同步效果,具备优异抗扰性能,实现稳定的 PMSM 多电机同步控制状态。形成了更小转速与跟踪误差,在很短时间中快速到达设定转速。受到负载影响程度都较低,电机转速呈现小幅波动,系统保持良好的稳定性。

参考文献:

- [1] 王毅波,曹宽. 多电机同步控制技术发展简介[J]. 微特电机,2019,47(8):69-73.
- [2] 吴政江,李建贵,黄玉祥. 永磁同步电机控制自动代码生成的研究[J]. 机械设计与制造,2021(10):182-185.
- [3] 金晶,万衡,黄金华. 汽车动力系统永磁同步电机稳定性控制[J]. 计算机仿真,2018,35(4):84-87.
- [4] 肖雄,王健翔,张勇军,等. 一种优化的双电机主-从模型转矩预测控制策略[J]. 电工技术学报,2018,33(24):5720-5730.
- [5] Cordeiro A, Manuel J F M, Pires V F. Performance of synchronized master-slave closed-loop control of AC electric drives using real time motion over Ethernet (RTMoE)[J]. Mechatronics,2020,69:102400.
- [6] 董凡,方攸同,黄晓艳,等. 同步控制策略在高速列车牵引电机中的应用[J]. 微电机,2016,49(8):27-30,39.
- [7] 周颖,孙超,王冬生,等. 网络化电机同步的改进型交叉耦合预测控制[J]. 电机与控制学报,2019,23(12):101-107,115.
- [8] 夏长亮,李莉,谷鑫,等. 双永磁电机系统转速同步控制[J]. 电工技术学报,2017,32(23):1-8.
- [9] Shi T N, Liu H, Geng Q, et al. Improved relative coupling control structure for multi-motor speed synchronous driving system[J]. IET Electric Power Applications, 2016,10(6):451-457.

(下转第 276 页)

- 收稿日期:2025-06-27

制, 2021, 49(5): 81-90.

- 收稿日期:2024-12-05