

基于模糊马尔可夫模型的无刷直流电机控制研究

张 灿¹ 朱晓飞¹ 胡红伟¹
ZHANG Can ZHU Xiaofei HU Hongwei

摘 要

无刷直流电机 (BLDC) 因其优异的性能被广泛应用于各类驱动系统, 但其控制性能易受参数变化、负载扰动及非线性因素 (如换相转矩脉动) 的影响。为提升 BLDC 控制系统的鲁棒性、动态响应性能及抗干扰能力, 文章提出基于模糊马尔可夫模型的控制策略, 将模糊逻辑处理不确定性和非线性的优势与马尔可夫模型描述系统状态随机转移特性的能力相结合, 有效克服了传统方法的局限性。实验结果表明, 基于模糊马尔可夫模型的无刷直流电机具有良好稳定性和抗干扰能力。

关键词

T-S 模糊控制; 马尔可夫模型; 无刷直流电机

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.016

0 引言

无刷直流电机以电子换向系统取代传统有刷电机的机械换向结构, 彻底解决了电刷摩擦带来的效率损失、电磁干扰与寿命限制等问题。兼具结构紧凑、调速性能优越、能量转换效率高等综合优势。这一特性使其在变配电站开关柜、电动汽车驱动系统、精密工业伺服控制、航空航天作动器等高可靠性领域获得广泛应用。智能控制方法中, 模糊控制因无需精确数学模型、可依据经验规则实现自适应决策而备受关注。马尔可夫模型通过状态转移机制和动态决策优化解决传统控制难以处理的随机性、非线性问题。文献 [1] 针对直流无刷电机控制系统的特点, 速度环采用模糊 PID 控制可以减少调节时间、降低启动转速超调, 提高抗干扰能力。文献 [2] 提出 T-S 模糊与内模控制结合的驱动方式, 构建仿真模型并使用 Matlab/Simulink 进行验证。文献 [3] 建立精确的数学模型和高效模糊 PID 控制器, 实现了对电机的精准控制。文献 [4] 结合优化算法进一步增强了系统的动态响应性能与抗干扰能力, 从而保障电机在复杂工况下的稳定运行。文献 [5] 通过 LMI 方法设计 H_∞ 状态反馈控制器, 解决马尔可夫跳变奇异摄动系统的鲁棒控制问题, 数值示例验证了方法的有效性。

基于上述背景, 本文展开基于模糊马尔可夫模型的无刷直流电机控制研究, 包括系统模型构建和控制器设计, 最后通过仿真验证分析控制系统的可靠性和实用性。

1. 江苏电子信息职业学院 江苏淮安 223001

[基金项目] 江苏省省级创新创业项目 (G-2023-0316); 淮安市级科研项目 (HABL2023025); 校级自然科学研究重点项目 (JSEIZ2023001)

1 动力系统数学模型

1.1 无刷直流电机的基本结构

无刷直流电机控制系统可分为电机与电子驱动器两大模块, 如图 1 所示。电机模块包含产生动力的主体和检测转子位置的位置传感器; 驱动器模块则包括负责逻辑控制的信号处理电路、驱动电机的功率开关电路以及处理反馈信号的位置传感器电路。整个系统由直流电源供电。

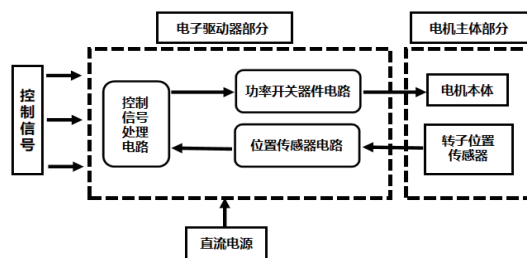


图 1 改进型直流电机等效电路

为简化理论分析与控制器设计, 本文在建立无刷直流电机数学模型时, 采用以下理想化假设:

- (1) 电机三相绕组采用“Y”型连接方式, 整距集中绕组沿定子内表面间隔 60° 电角度对称分布;
- (2) 忽略齿槽效应、磁路饱和、涡流及磁滞损耗;
- (3) 不计转子阻尼绕组及电枢反应对气隙磁场的影响;
- (4) 各相绕组的反电动势为理想的梯形波, 其平顶部分宽度为 120° 电角度。

1.2 电机驱动装置建模

考虑到变配电站的高可靠性要求及断路器操作对瞬时大扭矩的需求, 以灵敏度高的无刷直流电机和减速器组合作为驱动装置, 将动力装置根据速度不同区分为两部分。

聚焦无刷直流电机控制中的非线性与随机扰动难题, 构造模糊控制器为:

模糊规则 μ : 如果 $\rho_1(k)$ 是 $\gamma_{\mu 1}$, $\rho_2(k)$ 是 $\gamma_{\mu 2}$, $\rho_i(k)$ 是 $\gamma_{\mu i}$, 则:

$$u(k) = \kappa_{\mu, \alpha} x(k) \quad (6)$$

式中: $\kappa_{\mu, \alpha}$ 是控制器增益矩阵。

式 (6) 的全局模型描述为:

$$u(k) = \sum_{\mu=1}^g \chi_{\mu}(\rho(k)) \kappa_{\mu, \alpha} x(k) \quad (7)$$

将式 (5) 和式 (7) 结合在一起, 可推导公式为:

$$x(k+1) = \bar{A}_{\alpha} x(k) \quad (8)$$

式中: $\bar{A}_{\alpha} = \sum_{\mu=1}^g \sum_{\nu=1}^g \chi_{\mu}(\rho(k)) \chi_{\nu}(\rho(k)) (A_{\mu, \alpha} + B_{\mu, \alpha} \kappa_{\nu, \alpha})$ 。

2 仿真实验与结果分析

2.1 仿真实验

通过改进的无刷直流电机模型来说明所提出控制策略的有效性。一是对无刷直流电机模型引入基于模糊逻辑的控制器, 将整体非线性系统分解为多个线性子系统, 并用模糊逻辑平滑连接; 二是根据离散采样原理, 将连续时间模糊马尔可夫系统转化为离散时间模糊马尔可夫系统; 三是对于给定的系统参数, 根据 MATLAB 工具箱中的 `fesap` 函数得到模糊控制器增益。最后, 采用仿真图验证主要结果的有效性。

定义 $x_1(t) = \omega(t)$, $x_2(t) = i(t)$ 和 $u(t) = V(t)$ 得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ L \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{J_{\alpha}} & \frac{K_m L_f}{J_{\alpha}} x_2(t) \\ -K_m L_f x_1(t) & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + [0 \ 1]^T u(t) \quad (9)$$

系统参数为: $L_f = 0.006 \text{ H}$, $R = 3 \ \Omega$, $D = 0.06 \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad}\cdot\text{s})$, $J_1 = 0.005 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$, $J_2 = 0.003 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$, $K_m = 2 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$, $J_{\alpha} (\alpha=1,2)$ 服从一条马尔可夫链。

假设潜在的惯性矩受到工作环境突变的影响, 可以采用模糊马尔可夫系统描述以 J_1 和 J_2 为惯性矩的改进直流电动机模型, 其中非线性用 T-S 模糊逻辑来描述。

选择隶属度函数: $x_2(t) \in [N_1, N_2]$

$$M_1 = \frac{N_2 - x_2(t)}{N_2 - N_1}, \quad M_2 = \frac{-N_1 + x_2(t)}{N_2 - N_1}$$

选择采样周期 $T=0.03 \text{ s}$, 有离散时间模糊马尔可夫系

$$\text{统}_{\Pi} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0.6 & 0.4 \end{bmatrix}$$

$$x(k+1) = \sum_{\mu=1}^2 \chi_{\mu}(\rho(k)) \bar{A}_{\mu, \alpha} x(k) \quad (10)$$

$$A_{1,1} = \begin{bmatrix} 0.253 \ 9 & -1.982 \ 3 \\ 0.010 \ 8 & -0.043 \ 6 \end{bmatrix}, \quad A_{1,2} = \begin{bmatrix} 0.892 \ 0 & -0.498 \ 8 \\ 0.030 \ 7 & -0.021 \ 9 \end{bmatrix}$$

$$A_{2,1} = \begin{bmatrix} 0.253 \ 9 & 1.982 \ 3 \\ -0.010 \ 8 & -0.043 \ 6 \end{bmatrix}, \quad A_{2,2} = \begin{bmatrix} 0.892 \ 0 & 0.498 \ 8 \\ -0.030 \ 7 & -0.021 \ 9 \end{bmatrix}$$

求解控制器增益为: $k_{11}=[0.703 \ 4 \ 0.491 \ 2]$, $k_{12}=[14.057 \ 0 \ -7.954 \ 4]$, $k_{21}=[-0.498 \ 7 \ -4.990 \ 8]$, $k_{22}=[40.985 \ 5 \ -7.945 \ 0]$

2.2 结果分析

无刷直流电机中惯性矩变化是典型的参数不确定性和外部扰动源, 传统 PID 控制会直接导致控制器响应滞后, 而在模糊马尔可夫控制下, 具有随机过程处理能力, 将不同的 J 视为不同模态, 模态变化如图 5 所示。若系统能识别出 J 发生了模态跳变, 可切换到预设的模糊规则集。系统状态如图 6 所示, 实时调整控制输出, 通过自适应调整, 维持系统稳定并达到可接受的精度水平。

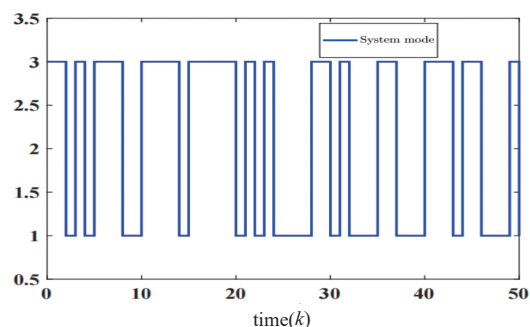


图 5 模态变化

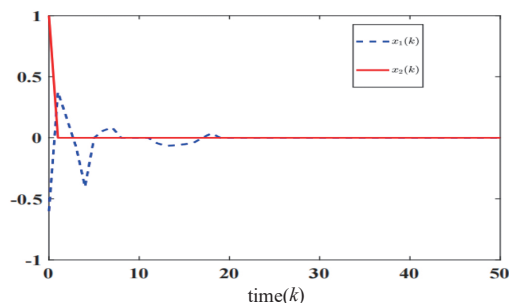


图 6 系统状态 $x(k)$

相比固定参数 PID, 模糊马尔可夫控制能显著改善 J 变化时的动态响应性能, 使系统具备鲁棒优化能力。

3 结语

本文提出的模糊马尔可夫控制为 BLDC 提供了一种强大的智能解决方案, 模糊逻辑系统能更好地补偿因惯性矩变化引起的系统非线性特性变化, 马尔可夫决策提供处理多模态管理和随机扰动的能力。两者结合, 显著提升系统在参数不确定和随机干扰下的综合性能, 是处理此类问题的有效的控制方法之一。

参考文献:

- [1] 冯和平, 李翠翠, 王宽方. 基于自整定模糊控制无刷直流电机调速系统算法研究 [J]. 内燃机与配件, 2023(12):92-94.

基于滤波 - 锚稀疏自编码器的滑轨音频异常检测

彭 瑜^{1,2} 刘豪睿²
PENG Yu LIU Haorui

摘 要

随着工业设备智能运维需求的提升，如何在缺乏故障标注的条件下实现高可靠的音频异常检测成为重要研究问题。文章以 MIMII 数据集中滑轨工况（6 dB 低噪场景）为主要研究对象，提出一种滤波 - 锚稀疏自编码器模型。实验在 MIMII 滑轨 6 dB 数据集上表明，相较多种典型自编码器，滤波 - 锚稀疏自编码器在 AUC 和 pAUC 指标上均获得提升，尤其在低假阳性率区间表现出更优的检测鲁棒性。研究结果表明，引入频域可学习滤波与稀疏锚注意力的自编码器框架，能够有效提升滑轨音频异常检测的精度与工程适用性。

关键词

异常检测；自编码器；音频信号；无监督学习

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.017

0 引言

随着人工智能、智慧城市和物联网等技术的高速发展，社会逐渐步入数字化和自动化的阶段，自动化的异常声音检测也日益广泛地应用到工厂机器的日常安全监测工作中。但是异常声音种类繁多，存在难以收集且收集成本昂贵等难点。考虑到实际应用的特点，业界更多考虑的是通过无监督学习的方法来解决异常声音检测这项任务，即在训练集中不包含任何异常声音，只用正常声音来训练异常声音检测模型^[1]。

本文以 MIMII 数据集中滑轨工况为主要研究对象^[2]，提出一种滤波 - 锚稀疏自编码器（filter-anchor sparse

autoencoder, FA-SAE）用于无监督声学异常检测。该模型构建在注意力自编码器框架之上，首先在频域引入可学习滤波模块，对输入 Mel 频谱进行任务自适应的频带重加权，以突出与设备运行状态高度相关的关键频段、抑制冗余或噪声成分；随后在解码器施加锚点式稀疏约束，使少量“锚特征”集中编码正常工况下的主导声学模式，从而在重构误差空间中放大异常样本与正常样本的区分度。

总体而言，本文旨在结合频域滤波增强与锚式稀疏编码，构建面向滑轨工况的轻量化无监督声学异常检测模型，并在 MIMII 滑轨数据集上系统评估其在 AUC 与 pAUC 指标下的性能表现。通过将模型输出映射为对异常程度更为敏感的重构误差与评价指标，期望为工业滑轨等关键部件的早期故障预警提供具有工程可落地性与部署友好的声学监测方案。

1. 吉林化工大学信息与控制工程学院 吉林吉林 132022
2. 德州学院计算机与信息学院 山东德州 253023

[2] 孙崇智, 吴永伟, 安建民, 等. 基于模糊 T-S 型内模 PID 控制算法的无刷直流电机仿真分析 [J]. 现代电子技术, 2024, 47(24): 18-24.

[3] 古刚. 基于模糊 PID 的无刷直流电机控制方法 [J]. 电气技术与经济, 2025(2): 223-225.

[4] 王光瑞, 李国洪, 张晓阳, 等. 基于模型预测的无刷直流电机控制研究 [J/OL]. 天津理工大学学报, 1-7[2025-12-18]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1374.N.20251013.1838.016>.

[5] NGUANG S K, ASSAWINCHAICHOTE W, SHI P. Robust H_{∞} control design for fuzzy singularly perturbed systems with Markovian jumps: an LMI approach[J]. IET control theory & applications, 2007, 4(1): 893-908.

【作者简介】

张灿（1998—），女，山东临沂人，硕士研究生，助教，研究方向：随机切换系统、模糊控制，email: zhangcan19981224@sina.com。

朱晓飞（1987—），男，山东德州人，博士研究生，讲师，研究方向：智能制造、数字孪生、数字化设计与仿真，email: zxfei1987@126.com。

胡红伟（1990—），男，河南周口人，硕士研究生，讲师，研究方向：深度学习、模糊控制，email: hongwei_hu20170706@alu.hit.edu.cn。

（收稿日期：2025-07-03 修回日期：2025-12-30）