

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.02.050

基于模糊 WMR 优化 PID 方法的电机转速控制优化分析

段晓伟¹, 叶小晖²

(1. 江苏省南京市中石化金陵分公司, 江苏 南京 210033; 2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要:针对白噪声下传统 PID 控制模式造成的输出转速显著波动变化的问题, 开发一种通过无刷直流电机转速进行调节的模糊 WMR-PID 技术。采用模糊推理的方式确定输出变量, 根据重心分析法解模糊处理, 并建立模糊 WMR-PID 控制模型。研究表明: 模糊 WMR-PID 控制方式可以实现快速跟随要求, 当初始指令速度为 2 450 r/min 时, 指令在 8 s 时迅速增大至 3 540 r/min, 14 s 时又迅速降低至 1 930 r/min。相对模糊 PID 方法, 模糊 WMR-PID 能够大幅降低控制动态的超调量, 说明模糊 WMR-PID 控制器可以实现理想的控制效果并达到优异鲁棒性。该研究提高了无刷直流电机转速调节能力, 表现出良好控制效果。

关键词:无刷直流电机; 转速控制; 模糊自整定; 超调量; 鲁棒性

中图分类号:TP273 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)02-0239-04

Optimization Analysis on Speed Control of DC Motor Based on Fuzzy WMR-PID Algorithm

DUAN Xiaowei¹, YE Xiaohui²

(1. Sinopec Nanjing Jinling Branch Company, Nanjing 210033, China;

2. Department of Electrical Engineering and Applied Electronic Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to solve the obvious fluctuation of the output speed caused by traditional PID control mode under white noise, a fuzzy WMR-PID technology is developed to adjust the speed of brushless DC motor. The output variable is determined by fuzzy reasoning method, the fuzzy processing is solved by gravity analysis method, and the fuzzy WMR-PID control model is established. The research results show that the fuzzy WMR-PID control mode can achieve the requirement of fast following. When the initial command speed is 2 450 r/min, the command rapidly increases to 3 540 r/min at 8 s, and rapidly decreases to 1 930 r/min at 14 s. Compared with fuzzy PID method, fuzzy WMR-PID can greatly reduce the overshoot of control dynamics, which indicates that fuzzy WMR-PID controller can achieve ideal control effect with excellent robustness. The research improves the speed regulation ability of brushless DC motor and has good control effect.

Keywords: brushless DC motor; speed control; fuzzy self-tuning; overshoot; robustness

0 引言

采用无刷直流电机(BLD-CM)进行动力传输时能够促进转矩的显著提高, 同时形成紧密连接结构, 促进系统功率的显著提升。到目前为止, 无刷直流电机已在军工设备、航空器材、车辆系统部件、精密检测仪器等多种领域都获得了越来越广泛使用^[1-3]。利用 PID 方法、滑模分析、模型自动调节^[4]等方式建立系统模型时, 通常容易受到外界噪声等因素作用, 而导致测试结果存在明显偏差^[5]。还有一些学者利用小波变换的模式设计了电机模型, 再进行实验测试, 确保噪声数据被充分去除, 并准确估算得到 LDCM 转速^[6]。

相关方面的研究吸引了很多的研究学者。KHAN M A 等^[7]根据电机转速参数调节的方式建立了小波多分辨 PID 控制器。但以上研究都是关于 WMR-PID 控制器调速方面内容, 并没有实现以 WMR-PID 控制器对各频率信号进行处理效果, 并且也无法对 WMR-PID 控制参数起到自适应调节作用。针对以上研究结果, 文献[8]以小波转换与神经网络共同优化处理性能, 但考虑到网络的训练过程需占用大量计算时间, 而且尚未克服网络系统过于复杂的缺陷。采用模糊算法进行计算分析时, 可以通过建立简单模型的方式来实现, 能够有效调节非线性特征的复杂系统。唐伟等^[9]设计了一种模糊自整定小波多分辨 PID 技

第一作者简介:段晓伟(1972—), 男, 安徽砀山人, 高级工程师, 本科, 研究方向为电气设备及运行工作, xiangkoujiu14105@163.com。

术来实现无刷直流电机转速调节的功能,该方法可以精确处理含噪信号,具有良好的抗干扰效果。张瑞成等^[10]利用单神经元 PID 神经网络构建得到一种可以自主调节的负荷平衡器并同时实现负荷观测功能,实现了同步性能的显著提升。王婷婷等^[11]开发了一种通过自适应模糊 PID 方法实现的智能混合控制器,大幅提升了无刷直流电机的转速跟踪能力与动态适应性。经过上述优化后系统鲁棒性、动态适应性与抗干扰效果都获得了明显改善。以模糊控制算法进行处理时只需设置简单的结构,可以满足对非线性变化的复杂系统进行有效调控。

本文设计了一种利用无刷直流电机转速对模糊 WMR-PID 进行调节的方法,可以完成 WMR-PID 验证并对各频率信号达到准确测定的性能,之后利用模糊控制的模式完成 WMR-PID 控制器的数据整定,接着通过仿真分析综合评价了控制器性能。

1 WMR-PID 控制原理

以本研究设计算法测试了 BLDCM 的转速控制性能。进行实际应用时,传感器会产生高频噪声,同时会形成明显的低频指令和干扰信号,无法有效抵抗不确定性外部因素影响,采用 WMR-PID 方法进行分析则可以获得更理想的性能。这是由于经过多分辨(MRA)处理后能够使信号分解为平滑过渡分量和更精确分量。

通过 MRA 分解速度差值 u 组成 N 层结构,以此确定趋势分量 e_{c_j} 和细节分量 e_{d_j} ,之后利用增益 k_{c_j} 和 k_{d_j} 进行缩放,以下给出了具体计算式:

$$u = k_{c_j} e_{c_j} + \sum_{j=1}^N k_{d_j} e_{d_j} \quad (1)$$

采用 db4 小波设置小波基函数并完成二层结构的分解计算。图 1 给出了 WMR-PID 算法的调控过程,控制量计算式如下:

$$u = k_{d1} e_{d1} + k_{d2} e_{d2} + k_{c2} e_{c2} \quad (2)$$

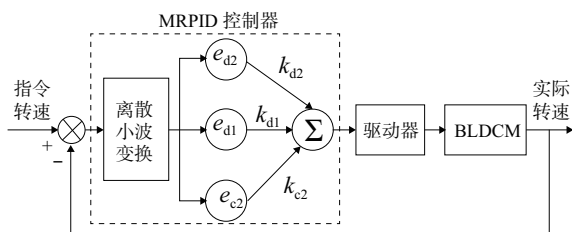


图 1 WMR-PID 控制原理

将阶跃信号数据输入后测试,并与 PID 控制

器对比,从而确定噪声在各控制参数下引起电机转速变化,结果如图 2 所示。由图 2 可以发现,存在白噪声影响情况下,以传统 PID 方式进行控制时会出现输出转速的大幅波动,以 WMR-PID 方式进行控制时则获得了稳定输出转速。这是由于当 WMR-PID 高频参数在 0 情况下能够使输入信号高频噪声被有效去除。相对传统 PID 控制方法,WMR-PID 算法对于高频噪声表现出了更强抗噪能力。

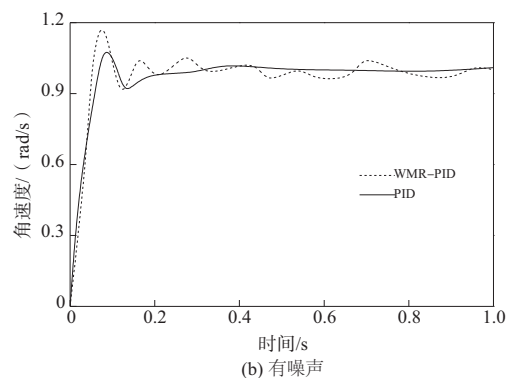
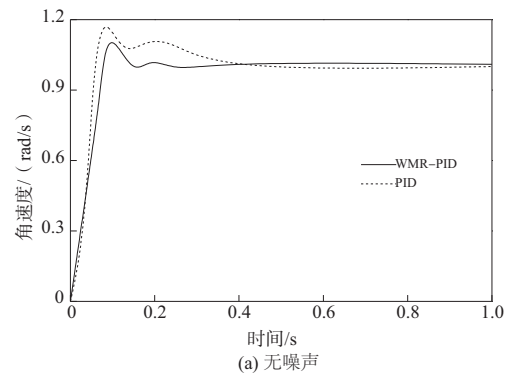


图 2 无噪声、有噪声下的阶跃响应

2 模糊 WMR-PID 控制器设计

WMR-PID 控制器能够对高频噪声起到良好滤除效果,也可通过提高高低频分量系数的方式来获得更优鲁棒性能。设置 k_{d1} 、 k_{d2} 、 k_{c2} 参数时则应根据系统的实际运行参数和误差数据来调节,可采用模糊自适应算法对参数开展调节,获得最优控制性能^[12]。组成模糊控制系统的各部依次为模糊推理机制、模糊化接口、规则库,具体组成结果如图 3 所示。

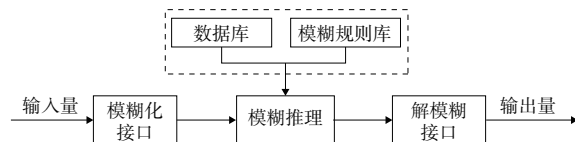


图 3 模糊控制器结构

输入项中存在速度偏差 u 和变化率 u_0 ,输出项由 k_{d1} 、 k_{d2} 、 k_{c2} 构成,按照模糊控制模式对 WMR-PID 参数进行优化后建立模糊 WMR-PID 调节系统。之后根据输入语言速度差、变化率和输出语言变量确定三角形隶属函数。

经过仿真和实验推理后完成控制策略的加工过程,利用输入、输出变量,从而确定各个 u 和 u_0 条件下的 k_{d1} 、 k_{d2} 、 k_{c2} 模糊自整定规则。

1) 当 BLDCM 启动或停止时,会造成转速偏差增加,为了促进响应速率的快速提高,将 k_{c2} 设定在较大值;为避免转速在初始阶段偏差快速增大超出实际允许界限,需将 k_{d1} 设定在合适的值;最后保持 $k_{d2} = 0$,确保转速不会出现大幅超调的问题。

2) BLDCM 在正常运转状态下只产生很小转速偏差,因此将 k_{c2} 设定在较小值,实现超调幅度的有效控制;当 k_{d1} 较小时,系统获得了更大响应速率, k_{d2} 也达到较小的取值。

3) 当 BLDCM 保持恒定的转速时,转速波动很小,此时为了对系统进行稳定控制,应适当提高 k_{c2} 和 k_{d2} 取值。同时为了保证系统获得优异抗干扰能力,将 k_{d1} 取值设置为 0。结合以上研究结果得到如表 1 所示的模糊推理规则。

表 1 模糊推理规则

du	u														
	NB	NS	ZE	PS	PB	NB	NS	ZE	PS	PB					
NB	PB	PS	NB	PB	NS	NB	PB	ZE	NB	PS	PS	NB	ZE	PS	ZE
NS	PB	NBNB	PS	ZE	NS	PS	ZE	NS	ZE	ZE	ZE	NB	PS	ZE	
ZE	PS	NB	NS	PS	ZE	NS	ZE	ZE	NS	ZE	PS	NB	PS	PS	
PS	PS	NB	NS	ZE	ZE	ZE	NS	ZE	PS	NS	ZE	PS	NB	PS	PB
PB	ZE	PS	ZE	NS	NS	PS	NS	ZE	PS	NB	PS	PB	NB	PS	PB

采用模糊推理的方式确定输出变量,接着根据重心分析法解模糊处理,表达式如下:

$$v_{\tau} = \frac{\int_a^n v \mu_c(v) dv}{\int_a^n \mu_c(v) dv}, \quad R = [a, b] \quad (3)$$

式中: v_{τ} 是模糊集 C 隶属度函数 $\mu_c(v)$ 的重心。

建立模糊 WMR-PID 控制模型如图 4 所示。这是利用 BLDCM 转速控制的过程实现控制功能的系统结构图。以指令转速与转速差值作为输入参数,同时利用转速偏差 u 和变化率 u_0 计算 WMR-PID 参数 k_{d1} 、 k_{d2} 、 k_{c2} ,从而得到指令转矩。

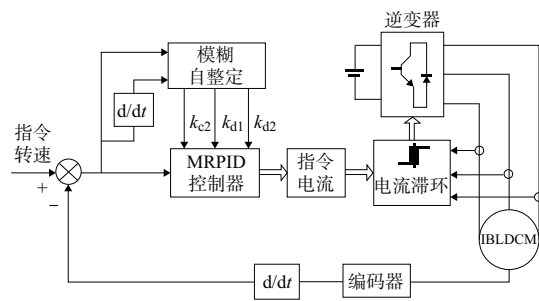


图 4 模糊 WMR-PID 控制系图

3 实验分析

为评价模糊 WMR-PID 控制器对 BLD-CM 转速的调控效果,以模糊 WMR-PID 方法设定速度环。表 2 给出了电机的各项性能参数,在模糊 WMR-PID 控制器中设定初始分量参数分别为 3.5、1.1、0。

表 2 电机规格参数

参数	数值
额定功率/W	120
额定转速/(r/min)	3 000
额定电压/V	36
极对数	4
相数	3
转子转动惯量/(kg·m ²)	0.018 2

遇到指令速度突变时,形成了如图 5 所示的速度跟随曲线。测试发现,当初始指令速度在 2 450 r/min 的条件下,指令在 8 s 时迅速增大至 3 540 r/min,14 s 时又迅速降低至 1 930 r/min。说明模糊 WMR-PID 控制方式可以实现快速跟随的要求。

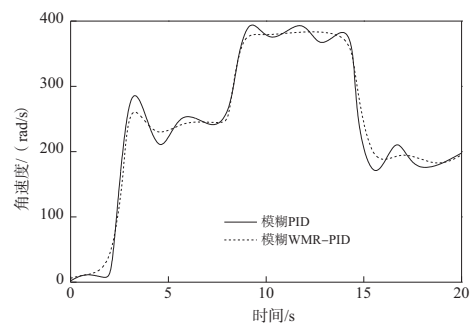


图 5 速度跟随曲线

图 6 是对电机转速在时变复合信号下进行转速测试的结果。通过测试分析可以确定,模糊 WMR-PID 和模糊 PID 方法都能对时变复合信号

起到理想跟踪效果。选择模糊 WMR-PID 方法处理的时候能够大幅降低控制动态的超调量,说明模糊 WMR-PID 控制器可以实现理想的控制效果,并达到优异鲁棒性。

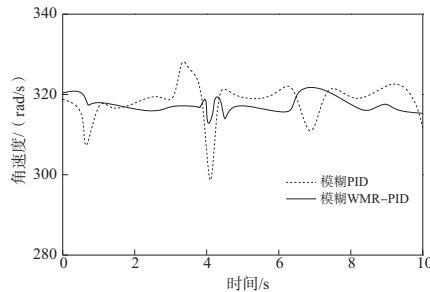


图6 干扰下控制速度曲线

4 结语

1) 采用模糊推理的方式确定输出变量,根据重心分析法解模糊处理,并建立了模糊 WMR-PID 控制模型。

2) 模糊 WMR-PID 控制方式可以实现快速跟随要求,当初始指令速度为 2 450 r/min 时,指令在 8 s 时迅速增大至 3 540 r/min,14 s 时又迅速降低至 1 930 r/min。

3) 相对模糊 PID 方法,模糊 WMR-PID 能够大幅降低控制动态的超调量,说明模糊 WMR-PID 控制器可以实现理想控制,并达到优异鲁棒性。

参考文献:

- [1] 徐鹏,曾俊杰,张伟. 直流无刷电机的改进型滑模控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2021(11): 182-188.
- [2] 任志斌,周运逸,朱杰,等. 基于无刷直流电机的无位

置传感器控制[J]. 传感器与微系统,2021,40(11): 100-102,107.

- [3] 吕中正,张兰红,曹克强. 电动汽车增程器用无刷直流电机控制系统设计与研究[J]. 电子器件,2021, 44(5):1149-1154.
- [4] 刘乐平,袁林中,曾昭韦,等. 自旋飞行器 IMU 隔离的装置设计及其解旋性能[J]. 机械设计与研究,2021, 37(5):197-202.
- [5] 张淑芳,宋香明,朱彬华. 结合改进 PSO-BP 神经网络的无刷直流电机控制[J]. 南开大学学报(自然科学版),2021,54(4):62-67.
- [6] 刘雨豪,廖平. 基于 MFO 算法的无刷直流电机模糊控制设计[J]. 仪表技术与传感器,2021(4):107-111.
- [7] KHAN M A, RAHMAN M A. A new wavelet-based speed controller for induction motor drives[J]. Electric Power Components and Systems, 2008, 36(12): 1282-1298.
- [8] KHAN M A S K, RAHMAN M A. A novel neuro-wavelet-based self-tuned wavelet controller for IPM motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010,46(3):1194-1203.
- [9] 唐伟,王立忠,庄健,等. 无刷直流电机的模糊自整定 MRPID 转速控制方法研究[J]. 中国机械工程,2021, 32(15):1786-1792,1800.
- [10] 张瑞成,赵铭. 模糊 PID 轧机单辊传动系统负荷平衡控制的研究[J]. 机械设计与制造,2022,371(1): 37-41.
- [11] 王婷婷,胡黄水,赵宏伟,等. 无刷直流电机转速智能混合控制器设计[J]. 吉林大学学报(理学版), 2020,58(3):659-665.
- [12] 刘晋霞,王莉,刘宗锋. 四驱电动轮汽车模糊逻辑控制的再生制动系统[J]. 机械设计与制造,2021, 370(12):164-168.

收稿日期:2022-08-12

(上接第 178 页)

4 结语

本文提出了基于指针排序的中值滤波算法,通过设计环形数据窗口进行滤波窗口数据的快速更新,通过基于指针排序的窗口中值获取算法进行窗口中值的快速获取,实现了中值滤波算法运算速度的大幅提升。由于基于指针排序的中值滤波算法不涉及元素数值的相等判断操作,因此该算法适用于任意数据类型的中值滤波。该算法除了能够获取窗口中值元素外,能够获取窗口任意位置的元素,具有较为广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 俞莎莎,朱如鹏,李苗苗,等. 基于机器视觉的齿面点

蚀面积特征提取的研究[J]. 机械制造与自动化, 2020,49(1):87-90.

- [2] 吴小培,柴晓冬,张德龙. 一种中值滤波的快速算法[J]. 数据采集与处理,1995,10(2):151-155.
- [3] 叶晓东,朱兆达. 中值滤波的快速算法[J]. 信号处理,1997,13(3):227-230.
- [4] 靳斌,郭永彩,杨冠玲,等. 一种中值滤波的快速算法[J]. 重庆大学学报(自然科学版),1999,22(5):13-16.
- [5] 朱冰莲,潘哲明,李单单. 一种中值滤波的快速算法[J]. 信号处理,2008,24(4):684-686.
- [6] 鲍祥生,尹成,田继东,等. 中值滤波的一种快速算法[J]. 石油物探,2005,44(4):325-328.
- [7] 梅各各,靳斌,龚伟. 一种快速中值滤波算法[J]. 西华大学学报:自然科学版,2012,31(6):77-80.

收稿日期:2022-09-27