

# 基于分数阶 $PI\alpha D\beta$ 的飞机永磁同步电机转速控制技术

毕森森, 王心宇, 任培培

(航空工业西安飞机工业集团有限公司, 西安 710089)

**摘要:** 当前飞机永磁同步电机控制技术电流干扰性大、且电机鲁棒性较差, 存在控制速度慢的问题; 据此, 提出基于分数阶  $PI\alpha D\beta$  研究了一种新的飞机永磁同步电机转速控制技术, 通过分数阶  $PI\alpha D\beta$  的比例积分对飞机永磁同步电机的输入电流与输出电流进行抗干扰处理, 采用分数阶  $PI\alpha D\beta$  积分技术更能提高控制系统的抗干扰性, 相同开环增益环境下, 使用控制器提高电机的鲁棒性, 通过分数阶  $PI\alpha D\beta$  的微分技术处理控制飞机永磁同步电机的转速; 为检测控制技术效果, 设定对比实验, 结果表明, 基于分数阶  $PI\alpha D\beta$  的飞机永磁同步电机转速控制技术以分数阶  $PI\alpha D\beta$  为基础, 通过进行相关的分数阶计算, 选择最匹配的控制模式, 使飞机永磁同步电机能够更高效的工作, 控制速度提高了 12.81%。

**关键词:** 分数阶比例积分控制; 整数阶比例积分控制; 永磁同步电机; 转速控制

## Speed Control Technology of Aircraft Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Fractional Order $PI\alpha D\beta$

Bi Sensen, Wang Xinyu, Ren Peipei

(Avic Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China)

**Abstract:** The current aircraft permanent magnet synchronous motor control technology has large current interference and poor motor robustness, and there is a problem that the control speed is slow. Based on this, a new aircraft permanent magnet synchronous motor speed control technology based on fractional order  $PI\alpha D\beta$  is proposed. The input current and output current of the permanent magnet synchronous motor of the aircraft are anti-interference processed by the proportional integral of fractional order  $PI\alpha D\beta$ .  $PI\alpha D\beta$  integration technology can improve the anti-interference of the control system. In the same open-loop gain environment, the controller is used to improve the robustness of the motor. The differential speed of the fractional-order  $PI\alpha D\beta$  is used to control the rotational speed of the permanent magnet synchronous motor. In order to detect the control technology effect, the contrast experiment is set up. The results show that the speed control technology of the aircraft permanent magnet synchronous motor based on the fractional order  $PI\alpha D\beta$  is based on the fractional order  $PI\alpha D\beta$ , and the relevant matching step control is selected to select the best matching control mode. The aircraft permanent magnet synchronous motor can work more efficiently and the control speed is increased by 12.81%.

**Keywords:** fractional proportional proportional integral control; integer order proportional integral control; permanent magnet synchronous motor; speed control

## 0 引言

飞机是人们目前经常使用的交通工具, 其安全性能的保障是人们一直关注的焦点。永磁同步电机是飞机结构中不可缺失的一部分, 而永磁同步电机的转速对飞机整体的影响十分巨大, 哪怕一个小小的故障甚至误差都有可能造成十分可怕的后果, 因此我国对飞机永磁同步电机转速的控制要求十分苛刻<sup>[1]</sup>。目前对飞机永磁同步电机进行控制的控制器大部分应用了整数阶控制技术, 但其效果并没有达到预期要求。分数阶比例积分学具有高效率, 高精准率的优势<sup>[2]</sup>, 逐步被更多的领域所接受, 因此便有了分数阶控制器的诞生。将分数阶比例积分学应用在永磁同步控制

器电机的控制器上则更加彰显了其具备的独特优势<sup>[3]</sup>。飞机永磁同步电机的转速受多方面影响, 如输入电流的跟随性、输出电流的抗干扰性、增益变化的鲁棒性、转速的控制性能等, 要想对飞机永磁同步电机转速进行精准控制, 则需从以上几个方面进行研究<sup>[4]</sup>。

本文研究的飞机永磁同步电机分数阶控制技术主要应用了分数阶  $PI\alpha D\beta$  的比例积分与分数阶  $PI\alpha D\beta$  的比例微分原理, 对永磁同步电机的转速进行控制, 具有较强的快速性与稳定性, 综合性能远远强于目前使用比较广泛的整数阶控制器, 经过长久以来的观察与总结, 可以发现飞机的永磁同步电机的大部分实际系统都是分数阶的, 因此采用分数阶对飞机永磁同步电机的转速进行控制能够达到更好的效果, 不但受干扰性小, 而且在未来高性能发展与使用中能够提供更大的助力, 同时也对目前飞机永磁同步电机转速控制的研究提供大量的数据与更多的示例参照, 具有

收稿日期: 2019-10-17; 修回日期: 2019-11-07。

作者简介: 毕森森(1992-), 男, 河南项城人, 助理工程师, 主要从事航空供电系统网络架构方向的研究。

极大的推动作用与积极意义。

### 1 基于分数阶 $PI_{\alpha}D_{\beta}$ 比例积分的电机转速控制

飞机的永磁同步电机在进行转速控制时, 其抗干扰性主要由输入电流带来的指令直接控制, 控制系统在稳定运行过程中, 由于电动机电压负载的持续变化, 会不时产生电压波动, 引起输出电流的变化, 持续一段时间后, 控制系统会再次稳定运行<sup>[5]</sup>。因此保证输入电流带来指令的准确性是增强电机转速控制过程中抗干扰性的重点。分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的比例积分便主要应用于飞机永磁同步电机的输入电流跟随性与输出电流的抗干扰当中<sup>[6]</sup>, 飞机永磁同步电机的电流包含着多种信息, 有转速指令值  $X$ , 转速反馈系数  $Y$ , 电流指令值  $Z$ , 电流滤波时间  $T_1$ , 转速滤波时间  $T_2$ 。

控制传递函数  $W$  在电流的传输过程中, 会产生对应的电流滤波, 而永磁同步电机在工作时也会产生相应的转速滤波, 二者的匹配程度反映了输入电流的跟随性, 因此, 依据电流与转速控制传递函数  $W_1$  计算相关分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的比例积分<sup>[7]</sup>。

计算得出电流指令滤波与转速滤波的匹配稳定率  $V$ , 与整数阶控制器计算得到的匹配率相比较可得到匹配率如图 1 所示。

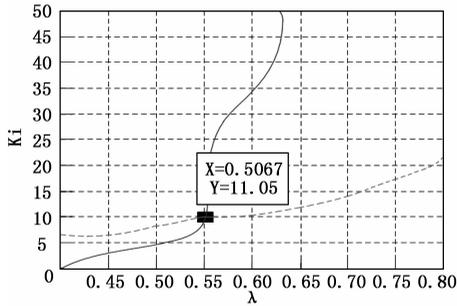


图 1 电流指令滤波与转速滤波与整数阶控制器匹配率

图 1 中实线代表整数阶控制器控制的电流指令滤波与转速滤波的匹配稳定率, 虚线代表应用分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  比例积分的分数阶控制器控制的电流指令滤波与转速滤波的匹配稳定率, 根据图 1 可以看出, 应用分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  比例积分的分数阶控制器控制的电流指令滤波与转速滤波的匹配稳定性远远高于整数阶控制器控制的稳定性, 对飞机永磁电机转速控制抗干扰效果更强<sup>[8]</sup>。

控制系统的抗干扰性强弱主要取决于控制系统对电压波动处理能力, 电压波动来源于电动机电压负载, 受转速快慢的影响, 电压负载随时会突加或者突减, 因此, 及时判断负载突变情况、处理电压波动, 便可提高控制系统的抗干扰性, 进而增强对飞机永磁电机转速的控制<sup>[9]</sup>。控制过程中, 可以记录到电压波动变化  $U$  从开始到再稳定的时间  $T$  以及负载电压随时间的变化。整数阶控制器时采用相关整数阶公式  $W_2$ ,  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  比例积分的分数阶控制器应用分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的比例积分公式  $W_3$ , 二者抗干扰性能如图 2

所示。

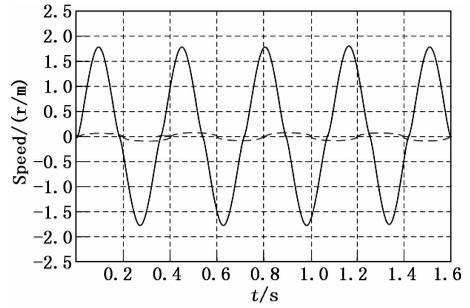


图 2 抗干扰性能对比结果

图 2 中, 抗干扰性能波动较大的为整数阶控制器的处理情况, 波动较小的为  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  比例积分的分数阶控制器的处理的情况, 由图 2 可以看出, 采用分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  积分技术更能提高控制系统的抗干扰性<sup>[10]</sup>。由此说明  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  比例积分的分数阶控制器对飞机永磁同步电机的转速控制效果更强。

### 2 基于分数阶 $PI_{\alpha}D_{\beta}$ 的比例微分的电机鲁棒性及转速控制

鲁棒性是维持飞机永磁同步电机稳定运行的一种特性, 是电机在异常及危险情况下能维持系统工作的关键<sup>[11]</sup>。负载电压突增或者突减的现象也会造成飞机永磁同步电机运行不稳定的现象, 而此时也能够体现出整数阶与分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  两种控制器系统对飞机永磁同步电机鲁棒性的增强作用<sup>[12]</sup>。在控制过程中, 动态降落  $\Delta C$  和恢复时间  $t$  是检查维护鲁棒性的重要物理量依据, 两种控制器的性能比较如表 1。

表 1 维护鲁棒性指标

控制器	$\Delta C$	$t$
整数阶	-1.51~1.51	0.12
分数阶	-0.56	0

表 1 数据直观地显示了两种飞机永磁同步电机控制器对电机系统鲁棒性的增强作用, 整数阶控制器的动态降落  $\Delta C$  数值较大, 所需的恢复时间也更长, 故相较于整数阶控制器, 分数阶控制器对电机鲁棒性具有更好的增强作用<sup>[13]</sup>。对于两种飞机永磁同步电机控制器鲁棒性的比较, 可以观察两种控制器在比例调节系数  $K_p$  变化时的阶跃响应图示, 如图 3。

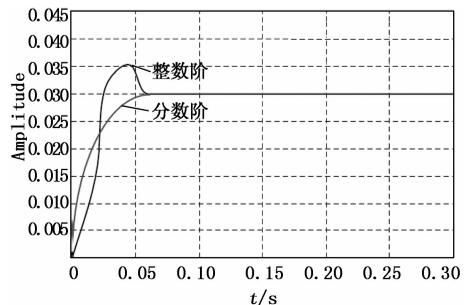


图 3 两种控制器在  $K_p$  变化时的阶跃响应图示

如图 3 所示, 在相同开环增益环境下, 两种控制器都是具有鲁棒性的, 不过当开环增益环境发生变化时, 整数阶控制器控制的飞机永磁同步电机的超调变化量明显更大。超调变化量越小, 系统鲁棒性越强, 因此分数阶控制器控制下的飞机永磁同步电机的鲁棒性更优<sup>[14]</sup>。图 3 也能再次证明分数阶的跟随性、抗干扰性、节能性都具有一定的优势<sup>[15]</sup>。

飞机永磁同步电机的转速的控制性能是考量电机性能的关键指标, 具体表现为电机控制器与电机同时受到外界条件的变化能迅速调节转速来使电机稳定。衡量转速控制性能的强弱有三个要素: 调速、稳速、快速性<sup>[16]</sup>。调速即调整转速的效果, 稳速是指转速的稳定性, 快速性是指调整转速的速度, 因此可以在这三个要素上比较整数阶控制器与分数阶控制器两者的转速控制性。

首先在调速方面对比, 引入两个参数  $m$  与  $n$ , 整数阶是分数阶的一个特例, 因此可以认为整数阶中的  $m$  和  $n$  为两个固定常数, 而分数阶会有更多的参数选择, 因此分数阶飞机永磁同步电机的调速效果更佳。而对于稳速性与快速性, 就需要参考比例微分横频曲线来进行分析对比, 两者对比图如图 4。

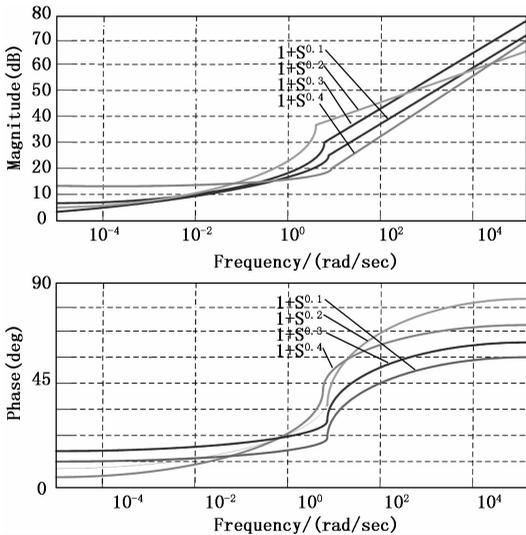


图 4 比例微分横频曲线

由图 4 看出分数阶控制器横频曲线的斜率要小于整数阶控制器, 说明分数阶控制器系统的稳速性与快速性更好<sup>[17]</sup>。通过上述分析得出, 分数阶控制器的转速控制性优于整数阶控制器。

### 3 基于分数阶 $PI_{\alpha}D_{\beta}$ 的比例微分的电机调速

分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的积分与微分技术对飞机永磁同步电机的转速控制都提供了巨大的帮助, 但二者相比, 分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的微分技术不但能够对飞机永磁同步电机的转速进行控制, 同时也能对飞机永磁同步电机的调速进行控制, 其效果也远远强于目前传统的整数阶 PID 调节器<sup>[18]</sup>。

传统的 PI 调节器主要依靠整数阶调节技术, 依据电流

指令的接收分析对飞机永磁同步电机的调速系统进行控制, 从而达到调速的目的<sup>[19]</sup>。但是整数阶控制器的接收分析算法过于简单, 并且只能在一定范围内达到控制要求, 若超出其可承受范围, 则有可能造成整数阶调速器故障, 导致对电流指令接收分析错误或者调速错误等后果, 甚至有可能造成整个飞机无法正常运行的现象。而飞机永磁同步电机又是一个多变量、非线性、多变参数的复杂对象, 在实际应用中还要受到外界因素干扰与内部扰动等不确定因素的影响, 因此传统的整数阶 PID 调速控制器很难满足高性能控制的要求<sup>[20]</sup>。而应用分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的微分技术的调速器则可以对多种电流指令进行接收分析, 扩大了承受范围, 加强了调速系统的性能。其中整数阶调速器与应用分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的微分技术的调速器具体工作流程如图 5 所示。

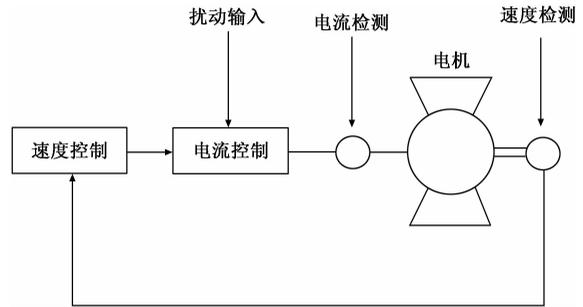


图 5 分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  微分技术的调速器具体工作流程

无论整数阶调速器还是应用分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的微分技术的分数阶调速器都存在于如图所示的电机中, 其两端的端点一个是对电流指令的接收分析点, 另一个则是对时速的检测与调速点, 二者的工作流程虽然一样, 但是对电机的控制能力差距却十分巨大。相比较二者检测到的电流指令  $X_1$  与  $X_2$ 、扰动输入电流  $Y_1$  与  $Y_2$ 、实时速度大小  $V_1$  与  $V_2$  数量都存在着一定的差异, 应用分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的微分技术的调速器检测到的数据相当于整数阶调速器的二到三倍, 而整数阶调节器应用相关整数阶关系式  $W_6$  得到的结果与应用分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的微分技术的调速器应用的相关分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的微分式  $W_7$  计算得到的结果相比较, 无论是计算数据的效率性还是检测结果精准性, 应用分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的微分技术的调速器展现出的能力都远远强于整数阶调速器。

## 4 控制技术性能分析实验

### 4.1 实验目的

为检测研究的基于分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的飞机永磁同步电机转速控制技术的控制性能, 设计对比试验, 选用传统技术和本文研究的技术对同一飞机永磁同步电机转速进行对比, 分析二者的控制能力。

### 4.2 实验参数

设计的实验参数如表 2 所示。

实验环境如图 6 所示。

表 2 实验参数

项目	参数
操作系统	Windows
工作电压	220V
工作电流	2A
控制软件	PC 软件
计算方式	分数阶
处理芯片	TF41 处理芯片



图 6 实验环境

### 4.3 实验结果与分析

根据上述实验参数, 进行对比实验。选用本文研究的基于分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的飞机永磁同步电机转速控制技术和传统的控制技术对同一飞机永磁同步电机的转速进行控制, 二者的控制效果对比如图 7 所示。

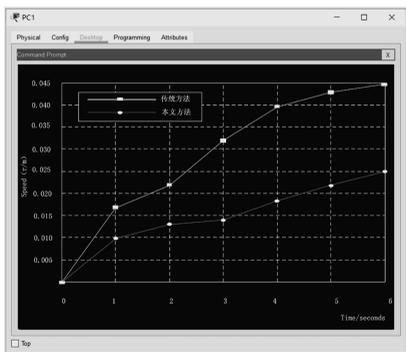


图 7 控制效果对比图

由图 7 可以看出, 本文研究的控制技术对转速的控制效果明显高于传统技术, 体现了本文研究的控制技术具有更强的抗干扰能力, 能够敏感的感知输入电流的变化。以分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  为基础, 通过进行相关的分数阶计算, 选择最匹配的控制模式, 使飞机永磁同步电机能够更高效的工作。

由于转速的快慢主要取决于输入电流的携带指令, 为检测本文研究的基于分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的飞机永磁同步电机转速控制技术对电流携带指令分析计算的准确性, 进行准确率实验检测, 得到的实验结果如图 8 所示。

根据图 8 可知, 本文研究的控制技术对输入电流携带指令分析计算结果的准确率大约为 99%, 由于电流谐波的干扰, 可能导致实验结果存在误差, 经过多次实验与结果统计, 分析误差性质, 发现存在的可能性误差均在误差范围内, 进一步体现了本文研究的控制技术的高效稳定性,

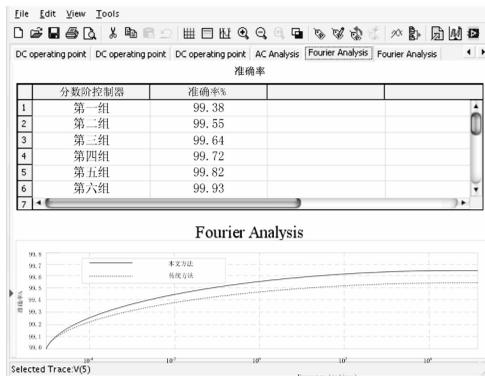


图 8 准确率实验结果图

相较于传统技术, 本文研究的技术不仅成本低且控制效果更显著, 能够广泛用于未来应用市场。

### 5 结束语

本文所提到的分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的积分技术与微分技术在飞机永磁同步电机转速控制与调速方面均有着一定的作用, 在转速控制方面, 分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的积分技术凭借其相关积分公式的高精确计算, 不但扩大了输入电流指令的接收范围, 更好的保证接收分析输入电流指令, 提高了控制器的精准性, 还增强了其控制系统的抗干扰性。分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的微分技术的应用不但能够在飞机永磁同步电机转速控制维护鲁棒性这一方面做出贡献, 还为飞机永磁同步电机调速提供了巨大的帮助, 充分证明了分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的相关积分技术与微分技术的优越性, 得到的数据具有研究价值, 也是本文的意义所在。

虽然目前我国分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的积分技术与微分技术的应用并不完善, 仍处于逐步探索的阶段, 但从长远方向来看, 对于类似于本文提到的飞机永磁同步电机等机器设施, 高精度检测性高安全保障控制性是这些机器设施的基本要求, 整数阶相关技术的应用已经达不到该方面的预期效果, 因此分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的积分技术与微分技术的应用会在该领域收到更高的重视, 在未来的研究中, 会以飞机永磁同步电机的调速控制精度为重点, 进一步完善所提的分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的相关积分技术与微分技术。

### 参考文献:

- [1] 庞科旺, 张 明, 郭长兴. 基于分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的船用永磁同步电机控制策略研究 [J]. 舰船科学技术, 2018, 40 (4): 94-98.
- [2] 宋代广, 庞科旺, 张 明, 等. 基于分数阶  $PI_{\alpha}D_{\beta}$  的永磁同步电机控制策略研究 [J]. 微电机, 2017, 50 (7): 49-52.
- [3] 唐 鉴, 丁跃尧, 陈 曦. 基于可调分数阶  $PI_{\lambda}D_{\mu}$  的无刷直流电动机转速控制器设计 [J]. 湖南理工学院学报: 自然科学版, 2019, 32 (1): 37-42.
- [4] 王 东, 宋保业, 徐继伟. 永磁同步电机的分数阶 PI 控制器设计 [J]. 煤炭技术, 2018, 37 (11): 2245-2250.
- [5] 缪仲翠, 张 昊, 党建武. 基于 A-W  $PI_{\lambda}$  永磁同步电动机的

速度控制器设计 [J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46 (4): 903-910.

[6] 郭来功, 戴广龙, 李桂阳, 等. 基于 FPGA 的分数阶  $PI\lambda D^\mu$  控制器设计与实现 [J]. 测控技术, 2018, 37 (1): 214-218.

[7] 刘辉昭, 陈晓霞. 分数阶同步磁阻电机的混沌与控制 [J]. 河南师范大学学报 (自然版), 2017, 22 (4): 47-52.

[8] 李亮, 李庆宾, 毛北行. 分数阶同步发电机系统的混沌同步 [J]. 河南科学, 2017, 35 (3): 350-354.

[9] 缪仲翠, 党建武. 基于分数阶滑模观测的感应电机无速度传感器矢量控制 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22 (5): 84-93.

[10] 胡凯, 黄家才, 季希宁. 电机分数阶 PI 控制及 DSP 实现 [J]. 南京工程学院学报: 自然科学版, 2018, 16 (4): 13-17.

[11] 李双双, 崔艳伟, 许明鑫. 基于分数阶全局滑模控制的永磁同步电动机的研究 [J]. 电力科学与工程, 2017, 33 (11): 1-6.

[12] 晓山, 伊利峰, 肖云阁. 分数阶  $PI^\alpha$  控制器在直流调速中的应用 [J]. 电力科学与工程, 2019, 35 (1): 17-22.

[13] 周小壮, 王孝洪. 永磁同步风力发电系统的分数阶比例积分控

制算法研究 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44 (7): 92-97.

[14] 张瑶, 刘树青, 盛国良. 基于分数阶  $PI\lambda D^\mu$  控制的机器人焊缝跟踪控制 [J]. 控制工程, 2019, 33 (6): 1192-1196.

[15] 周凯杰, 陈华宝, 熊树. 基于分数阶模糊滑膜控制永磁同步电机的研究 [J]. 淮阴师范学院学报: 自然科学版, 2018, 17 (3): 217-220.

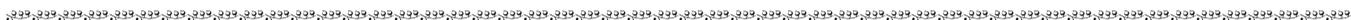
[16] 钱虹, 郑子彬, 郑秒. 基于内分泌分数阶  $PI\lambda D^\mu$  的核电站稳压器压力控制 [J]. 核动力工程, 2018, 2 (3): 90-94.

[17] 王少鹏, 张安堂, 王君力. 基于模糊分数阶  $PI\sim\lambda D\sim\mu$  控制的 AC/DC 变换器 [J]. 测控技术, 2017, 36 (8): 78-81.

[18] 赵明, 叶建华, 李晨晶. 基于短反馈分数阶  $PI\lambda D^\mu$  的核电厂稳压器压力优化控制 [J]. 核动力工程, 2017, 16 (3): 99-103.

[19] 徐益飞, 张鹏, 张博. 异步电机全分数阶矢量控制系统的设计与实现 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51 (3): 111-115.

[20] 陈鹏飞, 徐耀良, 王悦. 基于分数阶  $PI\lambda D^\mu$  重复控制的多 SOGI 锁相环设计 [J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32 (2): 134-139.



(上接第 113 页)

实验结果说明在执行器攻击威胁和不确定性因素影响下, 所提方法网络化运动控制系统仍具有较好的同步控制精度和鲁棒性, 因而该方法在工程上具有一定的应用价值<sup>[14-16]</sup>。

参考文献:

[1] Shao S, Yang H, Jiang B, et al. Decentralized fault tolerant control for a class of interconnected nonlinear systems [J]. Transactions on Cybernetics, 2018, 48 (1): 178-186.

[2] Zhong M Y, Han Q L. Fault-tolerant master-slave synchronization for Lur'e systems using time-delay feedback control [J]. Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2009, 56 (7): 1391-1404.

[3] Negash L, Kim S H, Choi H L. Distributed observers for cyber-attack detection and isolation in formation-flying unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2017, 14 (10): 551-565.

[4] Cao W, Zhang J, Ren W. Leader-follower consensus of linear multi-agent systems with unknown external disturbances [J]. System & Control Letters, 2015, 82: 64-70.

[5] Wang X, Yang G H. Cooperative adaptive fault-tolerant tracking control for a class of multi-agent systems with actuator failures and mismatched parameter uncertainties [J]. IET Control Theory & Applications, 2015, 9 (8): 1274-1284.

[6] Zuo Z, Zhang J, Wang Y. Adaptive Fault Tolerant Tracking Control for Linear and Lipschitz Nonlinear Multi-Agent Systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (6): 3923-3931.

[7] Chen S, Ho D W C, Li L, et al. Fault-tolerant consensus of multi-agent system with distributed adaptive protocol [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014: 1-1.

[8] Zhang K, Jiang B, Shi P. Adjustable parameter-based distributed fault estimation observer design for multi-agent systems with directed graphs [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47 (2): 306-314.

[9] Ren C E, Shi Z, Du T. Distributed observer-based leader-following consensus control for second-order stochastic multi-agent systems [J]. IEEE Access, 2018, 6: 20077-20084.

[10] Li M, Chen Y. Robust adaptive sliding mode control for switched networked control systems with disturbance and faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018: 1-1.

[11] Zhu J, Yang G, Zhang W, Yu L. Cooperative fault tolerant tracking control for multiagent systems: An intermediate estimator-based approach [J]. Transactions on Cybernetics, 2018, 48 (10): 2972-2980.

[12] Zhu J W, Yang G H, Zhang W A, et al. Cooperative tracking control for linear multiagent systems with external disturbances under a directed graph [J]. International Journal of Systems Science, 2017, 48 (13): 2683-2691.

[13] Zhu J W, Yang G H, Wang H, et al. Fault estimation for a class of nonlinear systems based on intermediate estimator [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61 (9): 2518-2524.

[14] 唐红雨, 陈飞, 王翠军. 多电机同步控制系统设计与实现 [J]. 电气传动, 2017, 47 (6): 45-49.

[15] 李慧, 刘星桥, 李景, 等. 多电机同步协调系统控制策略 [J]. 电机与控制应用, 2014, 41 (4): 6-11.

[16] 吴祥, 王军晓, 王瑶为, 等. 基于 ADRC 的网络化运动控制系统高精度轮廓跟踪控制 [J]. 高技术通讯, 2018, 28 (Z1): 835-842.