

# 航空永磁电驱动系统比例谐振型 自抗扰速度控制器设计



陈哲<sup>1</sup>, 陈沛阳<sup>1</sup>, 滕国飞<sup>2</sup>, 李金程<sup>1</sup>, 骆光照<sup>1</sup>

1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072

2. 航空工业西安航空计算技术研究所, 陕西 西安 710065

**摘要:**襟缝翼机电作动器是飞机高升力系统中的关键运动部件,其速度控制对襟缝翼的姿态调节十分重要。然而,襟缝翼机电作动器易受到翼面周期性或非周期性气动载荷干扰,传统的比例积分型速度控制器性能实现受限。为此,本文提出一种基于比例谐振自抗扰控制器(ADRC),在抑制非周期性干扰基础上还可抑制特定次周期性干扰。周期性干扰通过采用比例谐振控制的扩展状态观测器来估计。通过试验,比较了比例积分型控制器、传统线性自抗扰控制器和比例谐振型自抗扰控制器的控制性能,验证了本文所提出的方法可以显著抑制干扰、提高机电作动器的速度控制精度,为飞机平稳起降提供技术支撑。

**关键词:**机电作动器; 永磁同步电机; 速度控制器; 周期性干扰; 比例谐振

中图分类号: TM34

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.12.008

随着全电/多电飞机的快速发展,高功率密度机电作动器(EMA)在飞机飞行控制系统中得到了极大的推广,其大多采用具有高功率密度和高效率的永磁同步电机(PMSM)<sup>[1-3]</sup>。在飞机高升系统的襟缝翼EMA中,需要加、减速度快和速度控制精度高<sup>[4]</sup>。襟缝翼翼面在飞行中的气弹性载荷表现为周期性扭矩载荷<sup>[5]</sup>,对PMSM驱动器的速度控制精度产生很大影响。根据文献[6]、文献[7]中的分析,气动载荷或颤振的频率范围为25~250rad/s,并高度依赖其翼型的几何设计和材料特性。因此,设计出一种抗干扰能力强的速度控制器对提升航空EMA性能具有重要意义。

现有的比例积分微分(PID)速度控制器在周期性负载扰动存在时控制性能受限。为了设计一种更具抗周期干扰能力的速度控制器,许多学者尝试采用基于模型的控制策略,如模型预测控制<sup>[8]</sup>和内部模式控制<sup>[9]</sup>,以及无模型速度控制策略,如重复控制(RC)<sup>[10]</sup>和迭代学习控制(ILC)<sup>[11]</sup>。在过去的10年中,自抗扰控制器(ADRC)在EMA领域中也

得到了广泛关注,其中线性型ADRC(LADRC)的数学描述直观,并且方便采用传递函数进行分析<sup>[12]</sup>。本文采用LADRC作为速度控制器。为了抑制速度环的周期性负载干扰,在ADRC中加入比例谐振控制作为扩张状态观测器的一部分。本文提出的速度控制器保持了传统LADRC的优势,并对特定次周期性干扰有较强的抑制能力,可以实现襟缝翼机电作动器高精度的速度控制,为飞机平稳起降提供技术支撑。

## 1 机电作动器速度控制

### 1.1 系统结构

图1所示为机电作动系统的示意图,其主要包括飞控计算机、作动器控制单元、供电电源、PMSM、减速器和丝杠等组成部分。首先由飞控计算机下达位置或者速度指令,作动器控制单元采集永磁同步电机的位置信息和线性可变差动变压器(LVDT)的直线位移信息,最终完成高动态的位置或者速度闭环控制,使舵面偏转到指定的角度。

收稿日期: 2023-06-09; 退修日期: 2023-08-07; 录用日期: 2023-09-27

基金项目: 航空科学基金(201919053002)

引用格式: Chen Zhe, Chen Peiyang, Teng Guofei, et al. Design of proportional resonant active disturbance rejection speed controller for aviation permanent magnet electric drive system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(12): 69-74. 陈哲, 陈沛阳, 滕国飞, 等. 航空永磁电驱动系统比例谐振型自抗扰速度控制器设计[J]. 航空科学技术, 2023, 34(12): 69-74.

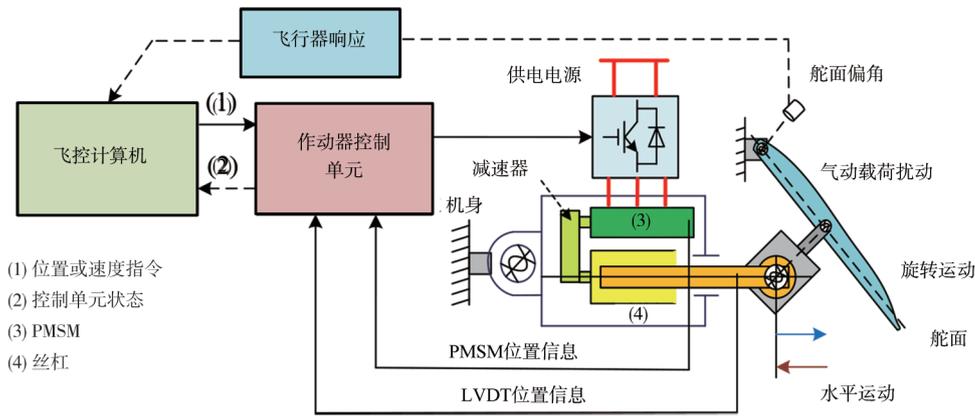


图1 机电作动系统示意图

Fig.1 Diagram of flight EMA system

永磁同步电机控制系统如图2所示,主要包括位置环、速度环、电流环三个控制回路。

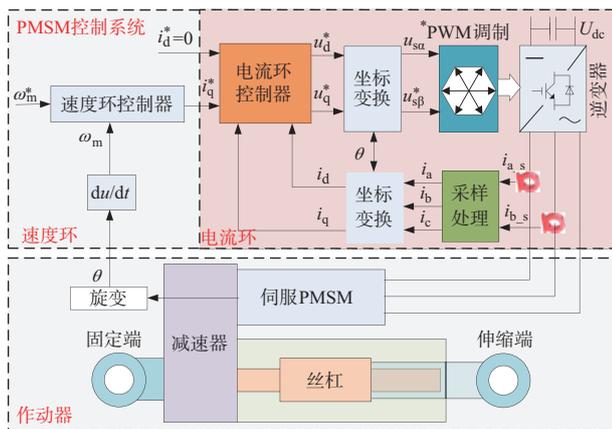


图2 PMSM控制系统框图

Fig.2 Diagram of PMSM control system

### 1.2 速度环扰动分析

永磁同步电机驱动器中速度环扰动包括非周期性扰动和周期性扰动。非周期性扰动主要由阶跃等非周期性负载转矩引起。另外,电机参数的变化、电流回路跟踪误差,摩擦力矩、未模型化的电机转子及减速器和丝杠的动力学特性等也会产生周期性扰动。周期性扰动通常由诸如齿槽转矩、磁通谐波等齿槽效应和涡流效应引起。本文着重考虑气动周期性负载扰动。

## 2 比例谐振型ADRC速度控制器

### 2.1 速度环解耦型ADRC控制器设计

永磁同步电机机械方程为

$$T_e - T_L = \frac{Jd\omega_e}{p_n dt} + B \frac{\omega_e}{p_n} + g(t) \quad (1)$$

式中,  $T_L$  为负载转矩;  $J$  为转动惯量;  $p_n$  为极对数;  $\omega_e$  为电角速度;  $B$  为黏性摩擦系数;  $g(t)$  为其他扰动,包括非周期性和周期性扰动;  $T_e$  为电磁转矩,可表示为

$$T_e = 1.5p_n i_q \psi_r = K_t i_q \quad (2)$$

式中,  $i_q$  为定子电流的  $q$  轴分量;  $\psi_r$  是转子磁链;  $K_t$  为转矩系数。式(1)可以改写为

$$\begin{cases} \dot{\omega}_e = b i_q^* + d(t) \\ \dot{d}(t) = a \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $d(t) = -b(i_q^* - i_q) - \frac{B}{J}\omega_e - \frac{p_n}{J}(T_L + g(t))$ ; 系数  $b = 1.5p_n^2 \psi_r / J$ ,  $i_q^*$  为  $q$  轴参考电流;  $a$  为总扰动  $d(t)$  的微分。  $d(t)$  为总扰动,包括负载转矩变化、参数变化和其他未知的非周期性或周期性扰动。

### 2.2 PR-ADRC的设计

为了抑制周期性的负载转矩扰动,本文提出了PR-ADRC的速度环,与传统LADRC相比,有两步改进,如图3所示。

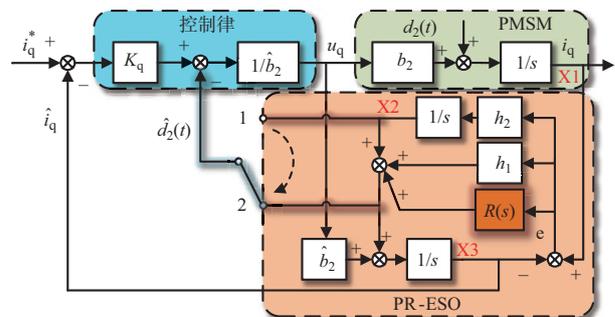


图3 基于LADRC的速度环和提出的PR-ADRC框图

Fig.3 Block diagram of speed controller based on LADRC and the proposed PR-ADRC

(1) 扰动前馈通道改进

在传统LADRC中,扰动传递函数 $G_{f1}(s)$ 如下

$$G_{f1}(s) = \frac{s^2 + (h_1 + K_p)s}{(s + K_p)(s^2 + h_1s + h_2)} \quad (4)$$

式中,  $h_1 = 2\omega_{\text{eso}}$ ,  $h_2 = \omega_{\text{eso}}^2$ ,  $\omega_{\text{eso}}$  为观测器带宽,  $K_p$  为LADRC控制器的整体带宽。由于扰动传递函数 $G_{f1}(s)$ 依赖于 $K_p$ 和 $\omega_{\text{eso}}$ ,速度跟踪性能与抗干扰能力是耦合的。为了解决这个问题,图3中提出的ESO,估计扰动的前馈通道从1改为2。相应的扰动估计可以表述为

$$\begin{cases} \dot{\omega}_e = bi_q^* + d(t) \\ \dot{d}(t) = h_1\dot{e} + h_2e \end{cases} \quad (5)$$

相应的新系统的状态空间函数为

$$A = \begin{bmatrix} -h_1 & -1 & -K_p + h_1 \\ h_2 & 0 & h_2 \\ 0 & 0 & -K_p \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (7)$$

因此扰动传递函数 $G_{f1}(s)$ 改为

$$G_{f2}(s) = \frac{s}{s^2 + h_1s + h_2} \quad (8)$$

与 $G_{f1}(s)$ 相比, $G_{f2}(s)$ 仅与 $\omega_{\text{eso}}$ 有关。然而,对于一个给定频率为 $\omega_{\text{load}}$ 的正弦负载扰动,速度响应 $g(t)$ 为

$$g(t) = L^{-1} \left[ G_{f2}(s) \frac{\omega_{\text{load}}}{s^2 + \omega_{\text{load}}^2} \right] = \frac{(\omega_{\text{load}}\omega_{\text{eso}}^3 - \omega_{\text{load}}^3)\cos\omega_{\text{load}}t}{(\omega_{\text{load}}^2 + \omega_{\text{eso}}^2)^2} + \frac{2\omega_{\text{load}}^2\omega_{\text{eso}}\sin\omega_{\text{load}}t}{(\omega_{\text{load}}^2 + \omega_{\text{eso}}^2)^2} + \frac{\omega_{\text{load}}^3 - \omega_{\text{load}}\omega_{\text{eso}}^2}{(\omega_{\text{load}}^2 + \omega_{\text{eso}}^2)^2} e^{-\omega_{\text{eso}}t} - \frac{\omega_{\text{load}}\omega_{\text{eso}}t}{(\omega_{\text{load}}^2 + \omega_{\text{eso}}^2)^2} e^{-\omega_{\text{eso}}t} \quad (9)$$

式中, $L^{-1}$ 为传递函数的拉普拉斯逆变换,显然 $g(t)$ 的前两项不会随时间变化趋于0。

(2) 带谐振控制器的ESO

LADRC的ESO中加入了一个谐振控制器,可以被设计为

$$R(s) = \frac{2K_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_{\text{load}}^2} \quad (10)$$

式中, $K_r$ 为系数, $\omega_c$ 为谐振控制器的带宽。

$$\begin{cases} \dot{\omega}_e = bi_q^* + d(t) \\ \dot{d}(t) = (h_1 + R(t))\dot{e} + h_2e \end{cases} \quad (11)$$

式中, $h_1 + R(t)$ 组成了ESO中的PR控制器。一旦估计得到了周期性的负载转矩扰动频率 $\omega_{\text{eso}}$ ,提出的带PR控制器的ESO可以更有效地估计相应的扰动。

$$R(t) = L^{-1}[R(s)] =$$

$$K_r\omega_c e^{-\omega_c t} \left[ \left( 1 - \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 - \omega_{\text{load}}^2}} \right) e^{\sqrt{\omega_c^2 - \omega_{\text{load}}^2} t} + \left( 1 + \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_c^2 - \omega_{\text{load}}^2}} \right) e^{-\sqrt{\omega_c^2 - \omega_{\text{load}}^2} t} \right] \quad (12)$$

扰动传递函数 $G_{f1}(s)$ 最终变成了 $G_{f3}(s)$ 。

$$G_{f3}(s) = \frac{s}{s^2 + (h_1 + R(s))s + h_2} = \frac{s(s^2 + 2\omega_c s + \omega_{\text{load}}^2)}{(s^2 + h_1s + h_2)(s^2 + 2\omega_c s + \omega_{\text{load}}^2) + 2\omega_c K_r s^2} \quad (13)$$

$G_{f3}(s)$ 仅与隐藏在 $h_1$ 和 $h_2$ 中的 $\omega_{\text{eso}}$ 有关。它取决于 $K_r$ , $\omega_c$ 和 $\omega_{\text{load}}$ 。

图4展示了相同条件下, $\omega_{\text{load}}$ 设置为100rad/s时, $G_{f1}(s)$ 、 $G_{f2}(s)$ 和 $G_{f3}(s)$ 的波特图的对比。显然,在谐振频率, $G_{f3}(s)$ 有更好的抗扰动能力。

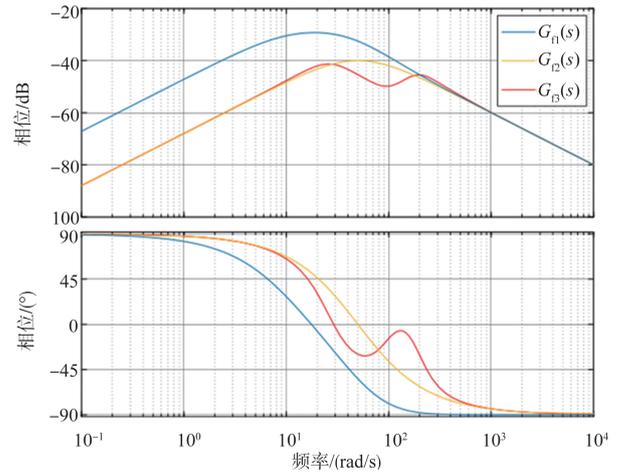


图4  $G_{f1}(s)$ 、 $G_{f2}(s)$ 和 $G_{f3}(s)$ 的波特图对比

Fig.4 Bode diagram comparison between  $G_{f1}(s)$ ,  $G_{f2}(s)$  and  $G_{f3}(s)$

### 3 试验验证

本文在基于Higale的实时仿真平台上对提出的速度环比例谐振型自抗扰控制算法进行了试验验证。试验电机参数见表1,控制系统参数见表2。为了保证试验验证结果对比的合理性,本文参考文献[13]中的PI参数计算方法统一设置了电流内环带宽。PI速度环和LADRC速度环带宽设置和PR-ADRC保持一致。

表1 试验永磁同步电机参数

Table 1 Parameters of PMSM under test

参数	值
额定功率/W	200
永磁体磁链/(V·s)	0.01497
额定电压/V	48
额定电流/A	5.7
额定转矩/(N·m)	0.64
额定转速/(r/min)	3000
定子电感/mH	0.689
极对数	4
转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	1.75×10 <sup>-5</sup>

表2 控制系统参数

Table 2 Parameters of PMSM controller

参数	值
开关频率/kHz	8
直流母线电压/V	48
电流环带宽/(rad/s)	500
PR-ADRC $K_p$ /(rad/s)	60
PR-ADRC $\omega_{cso}$ /(rad/s)	300
比例谐振带宽 $\omega_p$ /(rad/s)	300
比例谐振增益 $K_r$	1600

### 3.1 额定转速下周期性扰动试验

在额定转速 3000r/min 况下,设置负载转矩由初始的  $0.1\sin(100t)\text{N}\cdot\text{m}$  变为  $0.1\sin(200t)\text{N}\cdot\text{m}$ ,测试三种不同速度控制方式下转速控制的性能,试验结果如图 5 所示,从上至下分别为负载转矩、PI 控制器、LADRC 控制器和提出的 PR-ADRC 控制器的转速控制效果。从图 5 中可以看出,在负载转矩为  $0.1\sin(100t)\text{N}\cdot\text{m}$  时,PI 控制器、LADRC 控制器和 PR-ADRC 控制的转速波动分别为 66r/min、59r/min 和 21r/min。当周期性负载变为  $0.1\sin(200t)\text{N}\cdot\text{m}$  后,这三种速度环控制方法的转速波动最大值分别为 76r/min、66r/min 和 25r/min。可以明显看出,本文所提出的 PR-ADRC 在变周期性负载扰动下对转速的控制更为平稳。

### 3.2 周期性负载下负载阶跃试验

在转速为 1000r/min 条件下,根据气动载荷或颤振的频率范围<sup>[7]</sup>选取负载转矩为  $0.1\sin(200t)\text{N}\cdot\text{m}+0.15\text{N}\cdot\text{m}$ ,即在固定周期性负载条件下叠加一个阶跃负载,同样对三种速度环控制方法的速度控制性能进行对比验证,试验结果如图 6 所示,从上至下分别为负载转矩、PI 控制器、LADRC 控制器和

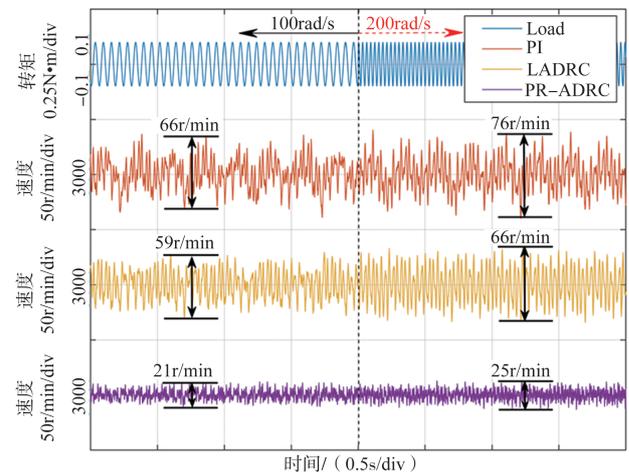


图5 额定转速下周期性负载转矩变化三种控制方法试验结果

Fig.5 Experimental results at rated speed with load torque frequency variation for three different control strategies

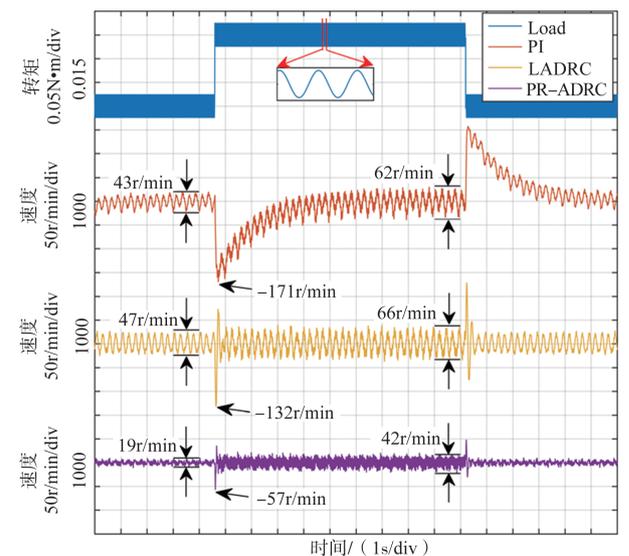


图6 周期性转矩下转矩阶跃试验结果

Fig.6 Experimental results under two different load torque disturbance with three different control strategies

提出的 PR-ADRC 控制器的转速控制效果。从图 6 中可以看出,在负载转矩为  $0.1\sin(200t)\text{N}\cdot\text{m}$  时,PI 控制器、LADRC 控制器和 PR-ADRC 控制的转速波动分别为 43r/min、47r/min 和 19r/min。当阶跃负载  $0.15\text{N}\cdot\text{m}$  叠加以后,三种速度环控制方法的转速跌落最大值分别为 171r/min、132r/min 和 57r/min。待动态调节过程结束,实际转速恢复至设定值 1000r/min 后,三种速度环控制方法的转速波动分别为 62r/min、66r/min 和 42r/min。从该试验中也可以明显看出,本文提出的 PR-ADRC 速度控制器有着优异的转速控制性能。

## 4 结论

本文提出了一种 PR-ADRC 速度控制器,以抑制周期性负载扰动并提高速度控制精度。为了解决现有 PI 和 LADRC 速度控制器的缺点,本文所提出的 PR-ADRC 速度控制器更改了反馈路径,并在 ESO 中添加了谐振控制器。试验结果表明,本文所提出的方法可以显著抑制非周期性干扰和周期性干扰,并且对电机参数变化具有良好的鲁棒性。同时,本文的研究成果还对于永磁同步电机控制系统在速度控制精度高和加、减速度快的场合下的应用实现具有工程意义。

**AST**

## 参考文献

- [1] Li Zhihui, Shang Yaoxing, Jiao Zongxia, et al. Analysis of the dynamic performance of an electro-hydrostatic actuator and improvement methods [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(12):2312-2320.
- [2] 张峻涛. 高压直流电机驱动系统电磁兼容设计改进技术研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(3): 59-67.  
Zhang Juntao. Research on electromagnetic compatibility test rectification technology of high voltage DC motor driving system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(3):59-67. (in Chinese)
- [3] 王宏喆, 甘醇, 倪锴, 等. 基于 SMO 和 RLS 的航空电推进永磁电机驱动系统[J]. 航空科学技术, 2023, 34(1):97-104.  
Wang Hongzhe, Gan Chun, Ni Kai, et al. Research on sensorless control of SPMSM in aviation electric propulsion drive system based on SMO and RLS[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(1):97-104. (in Chinese)
- [4] 韩复振. 襟缝翼 EMA 高功率密度驱动系统研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.  
Han Fuzhen. Research on high power density drive system of flap-slat EMA[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese)
- [5] 刘春强. 基于自抗扰的机电作动系统高动态控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.  
Liu Chunqiang. Active disturbance rejection based high dynamic control for electro-mechanical actuators [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020. (in Chinese)
- [6] 毛一青, 杨飞, 谷迎松. 15m 翼展太阳能飞机机翼颤振分析和刚度设计[J]. 航空工程进展, 2019, 10(4):536-541.  
Mao Yiqing, Yang Fei, Gu Yingsong. Research on flutter characteristics and stiffness design for 15m span wing of a solar-powered aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(4):536-541. (in Chinese)
- [7] 李秋彦, 李刚, 魏洋天, 等. 先进战斗机气动弹性设计综述[J]. 航空学报, 2020, 41(6):44-70.  
Li Qiuyan, Li Gang, Wei Yangtian, et al. Review of aeroelasticity design for advanced fighter [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6):44-70. (in Chinese)
- [8] Yan Yunda, Yang Jun, Sun Zhengxing, et al. Non-linear-disturbance-observer-enhanced MPC for motion control systems with multiple disturbances [J]. IET Control Theory & Applications, 2020, 14(1):63-72.
- [9] Liu Chunqiang, Luo Guangzhao, Xue Zhao, et al. A pmsm speed servo system based on internal model control with extended state observer [C]. IECON 2017 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017.
- [10] Cui Peiling, Zhang Guoxi. Modified repetitive control for odd-harmonic current suppression in magnetically suspended rotor systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10):8008-8018.
- [11] Wang Yangrui, Xu Yongxiang, Zou Jibin. Ilc-based voltage compensation method for PMSM sensorless control considering inverter nonlinearity and sampling current DC bias [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5980-5989.
- [12] Zhang Xuxuan, Chen Zhe, Liu Chunqiang, et al. Robust speed controller design of PMSM drives by a proportional resonant-based ADRC [C]. 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2021.
- [13] Instruments T. TI InstaSPINTM motor control solutions[Z]. Texas Instruments, 2013.

## Design of Proportional Resonant Active Disturbance Rejection Speed Controller for Aviation Permanent Magnet Electric Drive System

Chen Zhe<sup>1</sup>, Chen Peiyang<sup>1</sup>, Teng Guofei<sup>2</sup>, Li Jincheng<sup>1</sup>, Luo Guangzhao<sup>1</sup>

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. AVIC Xi'an Aviation Computing Technology Research Institute, Xi'an 710065, China

**Abstract:** Flap-slat electromechanical actuator is a key motion part in the aircraft high lift system, and its speed control is very important for the opening and closing precision of the flap-slat. However, the speed control loop of electromechanical actuator is prone to periodic or aperiodic interference of external aerodynamic load and the traditional proportional integral speed controller cannot guarantee satisfactory control performance. Therefore, a speed controller based on a proportional resonance Active Disturbance Rejection Control(ADRC) is proposed. It can not only suppress aperiodic interference but also suppress specific periodic interference. The periodic interference is estimated by an extended state observer using a proportional resonance term. By comparing the control performance of proportional integral controller, traditional linear ADRC controller and proportional resonant controller, it is proved that the proposed method can significantly suppress the interference, improve the control performance of flap-slat electromechanical actuator, and enhance the smoothness of aircraft take-off and landing.

**Key Words:** electromechanical actuator; permanent magnet synchronous motor; speed controller; periodic interference; proportional resonance

---

**Received:** 2023-06-09; **Revised:** 2023-08-07; **Accepted:** 2023-09-27

**Foundation item:** Aeronautical Science Foundation of China (201919053002)