

一种基于转矩前馈补偿的自抗扰控制算法

刘亚云^{*1}, 刘峰², 张志磊¹, 黄刚¹

(1. 中国航空工业集团公司 雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063)

(2. 解放军 63752 部队, 陕西 渭南 714000)

摘要:针对不平衡力矩对雷达伺服系统的影响,提出了一种基于转矩前馈补偿的自抗扰控制方法。该控制方法在速度环中采用自抗扰控制器代替传统的比例积分微分(PID)控制器,以提高系统的鲁棒性能;同时,采用了降阶转矩观测器来实时估计负载转矩,并将观测值补偿到电流环控制器,实现电机对负载扰动的快速响应。仿真和实验结果表明,该控制方法有效地抑制了不平衡力矩扰动的影响,提高了系统的鲁棒性能。

关键词:自抗扰控制; 转矩观测器; 不平衡力矩; 永磁同步电机

中图分类号:TM341;TP273 文献标志码:A 文章编号:1004-7859(2022)04-0084-06

引用格式:刘亚云, 刘峰, 张志磊, 等. 一种基于转矩前馈补偿的自抗扰控制算法[J]. 现代雷达, 2022, 44(4): 84-89.

LIU Yayun, LIU Feng, ZHANG Zhilei, et al. An active disturbance rejection control algorithm based on load torque feed-forward compensation[J]. Modern Radar, 2022, 44(4): 84-89.

An Active Disturbance Rejection Control Algorithm Based on Load Torque Feed-forward Compensation

LIU Yayun^{*1}, LIU Feng², ZHANG Zhilei¹, HUANG Gang¹

(1. AVIC Leihua Electronic Technology Institute, Wuxi 214063, China)

(2. The Unit 63752 of PLA, Weinan 714000, China)

Abstract: Aiming at the unbalanced torque in the radar servo system, an active disturbance rejection control (ADRC) method is proposed based on load torque feed-forward compensation. The ADRC technology is applied to the speed loop control instead of traditional proportion integration differentiation (PID) controller in order to improve the robustness of the control system. Meanwhile, reduced order load torque observer is designed to estimate the load torque, and the observed value is used for compensation of the current loop controller to realize quick response to load disturbance. The simulation and experiment results show that the proposed control strategy can effectively suppress the disturbance of the unbalanced torque and improve the robustness of the control system.

Key words: active disturbance rejection control; load torque observer; unbalanced torque; permanent magnet synchronous motor

0 引言

永磁同步电机具有体积小、调速范围宽和功率密度高等优点,在机载雷达伺服系统中得到了广泛应用。但是由于机载设备使用环境的特殊性,雷达体积和重量都会受到限制,且需要承受较大的加速度冲击。俯仰扫描的雷达,由于重量和空间结构的限制,天线负载的旋转中心和质心无法保证一致,从而产生不平衡力矩。尤其是在天线负载较重或者旋转中心和负载质心距离较大的情况下,不平衡力矩比较大,成为系统的主要干扰力矩。此时传统的比例积分微分(PID)控制算法不能有效克服不平衡力矩扰动的影响,难以满足系统的快速性和高精度要求。随着现代控制理论的发展,出现了模糊控制^[1]、滑模变结构控制^[2]和鲁棒控制^[3]等多种先进控制策略,但由于控制结构复杂、运算量大等问题,限制了在雷达伺服系统中的应用^[4]。

自抗扰控制器(ADRC)是由韩京清提出的一种新型非线性控制策略,它能够通过状态观测器观测系统的内外扰动并加以补偿,并采用非线性状态误差反馈实现误差的快速收敛,具有较强的适应性和鲁棒性^[5-6]。但是当不平衡力矩较大时,会加重观测器的负担,降低观测精度,因此不能完全补偿不平衡力矩。有些学者提出了负载转矩前馈补偿策略,利用转矩观测器估计负载转矩,并将负载转矩补偿到电流环中^[7-8],可以有效提高系统的抗负载扰动能力。

基于以上分析,为了减小不平衡力矩扰动的影响,提高系统的抗扰动能力,本文提出了一种基于转矩前馈补偿的自抗扰控制算法。该算法采用自抗扰控制器实现电机转速环控制,使用降阶转矩观测器对系统的负载转矩进行实时估计,并将观测的负载转矩直接前馈补偿给电流控制器。该方法能够有效提高系统的动态性能,减小不平衡力矩对系统性能的影响,提高系统

的稳态精度。

1 不平衡力矩分析

不平衡力矩在伺服系统中是普遍存在的。一般情况下当负载重心和旋转中心距离较大时,会在负载上添加配重块进行配平,使得旋转中心和负载中心基本重合,不平衡力矩基本可以忽略。但是在机载雷达中,有时由于重量和空间结构的限制,使得负载重心和旋转中心距离较大,此时如果负载重量也较大,不平衡力矩就成为影响伺服控制精度的重要因素。

在某雷达俯仰伺服机构中,负载为雷达的天线及附属支架,其重心 M 离俯仰的转轴 O 较远,如图 1 所示。当俯仰位于 0° 位置时,系统负载的重心通过俯仰负载轴中心,引起的不平衡力矩为零;当俯仰转动一个角度时,系统负载的重心不再通过俯仰负载轴中心,产生不平衡力矩^[9]。

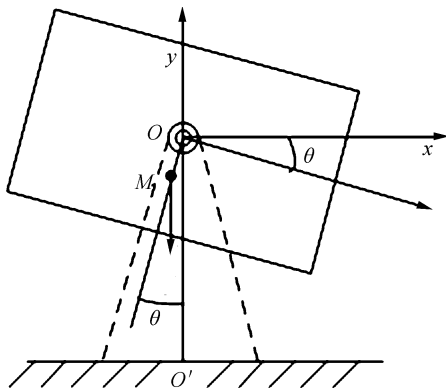


图 1 不平衡力矩示意图

不平衡力矩公式为

$$T_g = mgd \sin \theta \quad (1)$$

式中: m 为负载质量; g 为重力加速度; θ 为转动角度; d 为负载重心与俯仰转轴中心之间的距离。

天线负载在顺时针旋转过程中,当 θ 角从 0° 向 180° 变化时,不平衡力矩为正,不平衡力矩阻碍电机转动;当 θ 角从 180° 到 360° 变化时,不平衡力矩为负,对电机的转动起加速作用。

雷达在机载环境下,一般要求承受较大的加速度冲击,以最大冲击为 5 个 g 来计算,此时不平衡力矩最大为

$$T_{g\text{Max}} = 5mgd \quad (2)$$

2 降阶转矩观测器设计

要实现转矩前馈补偿,需要对负载转矩进行实时观测,本文采用一种降阶转矩观测器来实时观测负载转矩。

永磁同步电机采用 $i_d=0$ 的矢量控制方法,电机的机械运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} P_n \psi i_q - T_1 - B\omega \quad (3)$$

式中: J 表示转动惯量; ω 表示转子旋转的角速度; ψ 表示转子永磁体产生的磁链; P_n 表示电机极对数; i_q 表示定子绕组的 q 轴电流; T_1 表示负载转矩; B 表示摩擦系数。

在实际控制器中,矢量控制算法的采样频率很高,一般在 $10 \text{ kHz} \sim 20 \text{ kHz}$ 之间。在采样周期内,一般认为负载转矩未发生变化^[10]。即

$$\frac{dT_1}{dt} = 0 \quad (4)$$

由式(3)和式(4)选取变量 $\mathbf{x} = [\omega \quad T_1]^T$, 建立系统的状态方程

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix}$, $u = \frac{3}{2} P_n \psi i_q$, $\mathbf{C} = [1 \ 0]$, $y = \omega$ 。

针对该系统设计状态观测器,即

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\mathbf{x}}}{dt} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u + \mathbf{K}(y - \hat{y}) \\ y = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{\omega} \quad \hat{T}_1]^T$, 表示被估计的状态变量; $\mathbf{K} = [k_1 \quad k_2]^T$, 表示状态反馈增益矩阵。

观测器的特征方程可表示为

$$\det[s\mathbf{I} - (\bar{\mathbf{A}} - \mathbf{K}\bar{\mathbf{C}})] = s^2 + \left(k_1 + \frac{B}{J}\right)s - \frac{k_2}{J} \quad (7)$$

假设观测器的期望极点为 α_1 和 α_2 , 则观测器的特征多项式为

$$s^2 - (\alpha_1 + \alpha_2)s + \alpha_1\alpha_2 = 0 \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可得

$$\begin{cases} k_1 = -(\alpha_1 + \alpha_2) - B/J \\ k_2 = -\alpha_1\alpha_2 J \end{cases} \quad (9)$$

根据式(6),转矩观测器原理如图 2 所示。

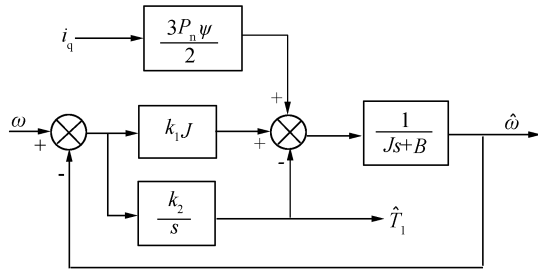


图2 降阶转矩观测器原理图

3 转矩前馈补偿自抗扰控制器设计

自抗扰控制器包括跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO) 和非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)。跟踪微分器主要用来安排过渡过程,实现快速无超调地跟踪系统给定的输入信号,并且按照阶数获取微分信号;扩张状态观测器则对系统输出状态和扰动进行实时观测估计;非线性状态误差反馈控制律用来产生扰动补偿后的最终控制量,实现扰动补偿^[11]。

速度环作为位置环和电流环中间的一环,其性能好对系统的抗扰动性能具有很大影响。本文针对速度环设计了一阶自抗扰控制器^[12-13]。

将式(3)改写成

$$\dot{\omega} = b i_q + f(\omega, T_1) \quad (10)$$

其中, $b = \frac{3 P_n \psi}{2 J}$, $f(\omega, T_1) = \frac{-T_1 - B\omega}{J}$ 。

由式(10)可知,永磁同步电机的速度环是一阶模型,只需采用一阶自抗扰控制器,相应的扩张状态观测器为二阶^[14],状态观测器的周期为矢量控制算法采样周期。

跟踪微分器

$$\begin{cases} \dot{e}_0 = \omega_1 - \omega^* \\ \dot{\omega}_1 = -r \text{fal}(e_0, \alpha_0, \delta_0) \end{cases} \quad (11)$$

式中: ω^* 为给定速度; ω_1 为 ω^* 的过渡过程; r 为跟踪速度因子。

扩张状态观测器为

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - \omega \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} \text{fal}(e_1, \alpha_1, \delta_1) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02} \text{fal}(e_1, \alpha_2, \delta_2) \end{cases} \quad (12)$$

式中: ω 表示电机实际转速; z_1 表示转速的状态估计; z_2 表示扰动信号的观测值; β_{01} 和 β_{02} 表示扩张状态观测器的增益系数; u 表示 q 轴电流设定控制量。

非线性误差反馈控制律为

$$\begin{cases} e_2 = \omega_1 - z_1 \\ u_0 = \beta_{03} \text{fal}(e_2, \alpha_3, \delta_3) \\ u = u_0 - z_2/b_0 \end{cases} \quad (13)$$

式(11)~式(13)中非线性函数定义为

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e) & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (14)$$

式中: e 为误差信号; α 为可调参数; δ 为滤波因子,且 $\delta > 0$,表示 fal 函数线性段的区间长度; $\text{sign}(e)$ 为符号函数。

基于转矩前馈补偿的自抗扰控制结构框图如图3所示。速度环采用一阶自抗扰控制器,输出控制量 u 作为 q 轴电流环给定输入,电流环仍采用 PID 控制。降阶转矩观测器观测得到系统的负载转矩 T_1 , T_1 乘以比例系数 K_1 并前馈到 q 轴电流的输入端,作为负载转矩扰动的补偿信号^[15]。电流环前馈补偿可以加快电流环对负载变化的响应速度,同时减少扩张状态观测器的干扰补偿量,可以有效提高系统的抗负载扰动能力。

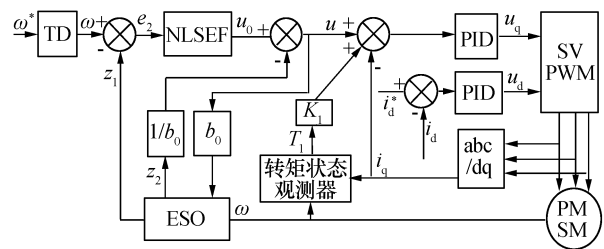


图3 基于转矩前馈补偿的自抗扰控制框图

4 仿真和实验验证

利用 MATLAB/Simulink 对基于转矩前馈补偿的自抗扰控制策略进行仿真。仿真中使用的伺服系统参数如表1所示。

表1 雷达伺服系统参数

参数	数值
额定功率 P_N/W	318
额定电压 U_N/V	48
额定力矩 T_N/Nm	20
转动惯量 $J_m/(kg \cdot m^2)$	0.014 1
额定转速 $n/(r/min)$	20
定子电阻 R_s/Ω	1.18
d 轴和 q 轴电感 L/mH	2.9
电机极对数 p_n	32
负载重量 m/kg	30
偏心距离 d/m	0.004
观测器系数 K_1	150
观测器系数 K_2	-80

4.1 负载转矩辨识

为验证降阶转矩观测器设计的有效性,电机施加

5 Nm 的负载转矩,负载转矩观测响应曲线如图 4 所示。

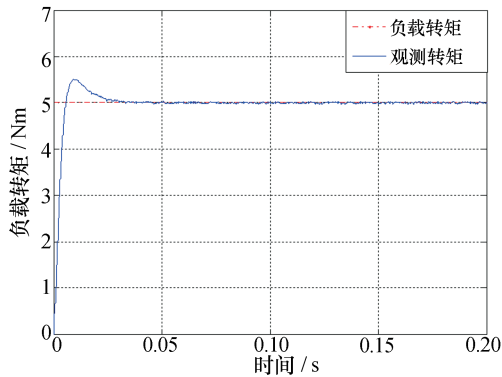


图4 负载转矩观测响应曲线图

由图4可知,转矩观测器的调节时间为0.03s,超调量为0.51Nm,稳态误差为0.03Nm。该观测器动态响应速度快,超调量小,稳态精度高,可以实时观测系统的负载转矩。

4.2 基于转矩前馈补偿的自抗扰控制

为了验证系统的自抗扰性能,给定转速为20 r/min,天线旋转一周过程中,负载转矩是随角度变化的正弦曲线,其幅值为6 Nm,周期为1.5 s,如图5所示。

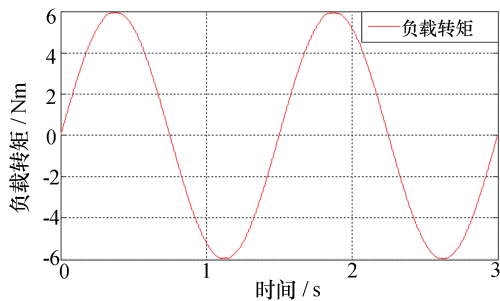


图5 负载转矩周期变化图

速度环分别使用ADRC控制算法和基于转矩前馈补偿的ADRC控制算法,两种控制算法的速度阶跃响应曲线如图6所示。

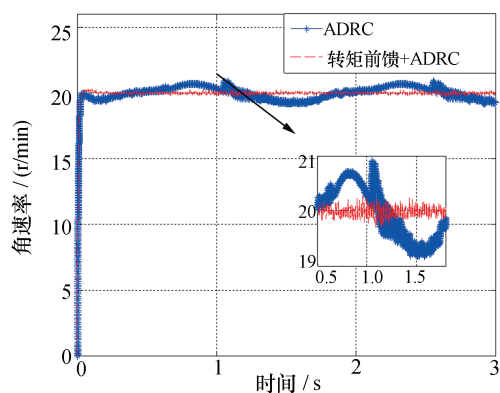


图6 速度阶跃响应曲线图(仿真)

从图6可以看出,ADRC控制算法的调节时间为0.04s,无超调,稳态误差为0.91 r/min,有效减小了不

平衡力矩扰动的影响。ADRC控制算法虽然可以减小不平衡力矩扰动,但由于不平衡力矩变化比较大,加重了状态观测器的观测负担,导致状态观测器估计精度下降,从而引起速度上的小幅值波动。基于转矩前馈补偿的ADRC控制算法,调节时间为0.045s,超调量为1.5%,稳态误差为0.3 r/min,基本消除了不平衡力矩引起的正弦波动。

本文对所提出的控制方案进行了实验验证。实验平台是基于某型雷达伺服系统,系统硬件结构框图如图7所示。

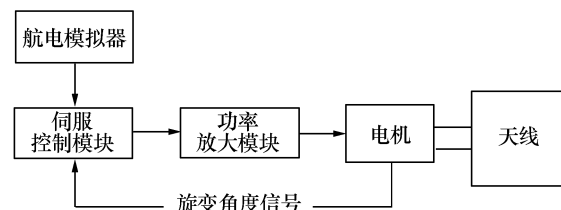


图7 系统硬件结构框图

实验中采用的参数与仿真参数相同,航电模拟器给定扫描速度为30°/s,控制天线进行360°环扫。分别使用PID控制算法和基于转矩前馈补偿的ADRC控制算法,速度阶跃响应曲线如图8所示。

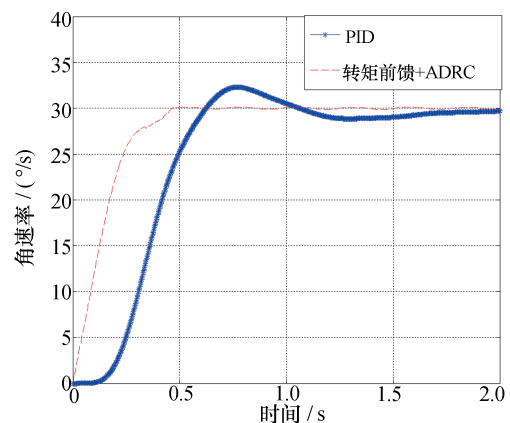


图8 速度阶跃响应曲线图(实验)

从图8可以看出,PID控制超调量为7.6%,调节时间为0.94s,稳态误差为0.35°/s;基于转矩前馈的ADRC控制,无超调,调节时间为0.5s,稳态误差为0.1°/s。

速度到达30°/s后,天线旋转一周,在不平衡力矩影响下的速度稳态响应曲线如图9所示。

从图9可以看出,由于不平衡力矩的影响,PID控制算法速度波动较大,成周期性变化,稳态误差最大为2.89°/s;基于转矩前馈的ADRC控制算法速度稳态误差最大为0.44°/s,有效降低了不平衡力矩对速度的影响。

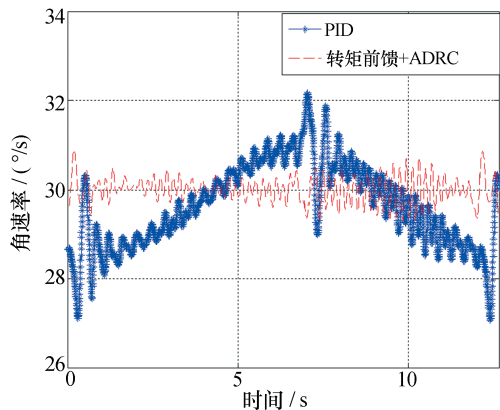


图9 速度稳态响应曲线图

由比较结果可知,基于转矩前馈自抗扰控制算法一方面保留了ADRC算法的优点,超调小,动态响应速度快,调节时间短,抗扰动能力强;另一方面又通过降阶转矩观测器估计负载转矩,并进行前馈补偿,进一步降低了负载转矩扰动的影响,提高了系统稳态精度和鲁棒性能。

5 结束语

仿真和实验结果表明,本文给出的降阶转矩观测器结构简单,能够实时地对负载转矩进行观测。基于转矩前馈的自抗扰控制策略,具有响应速度快、调节时间短、转速波动小等优点,可以有效减小不平衡力矩的影响,进一步提高系统的抗负载扰动能力,增强系统的鲁棒性能,具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 孙强,张为堂. 磁通切换永磁电机模糊自适应PI控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6611-6618.
SUN Qiang, ZHANG Weitang. An adaptive-fuzzy PI control strategy for flux-switching permanent magnet motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6611-6618.
- [2] 戴鹏,徐楠,谢后晴,等. 永磁同步电机调速系统的快速幂次趋近律控制[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(11): 32-38.
DAI Peng, XU Nan, XIE Houqing, et al. PMSM sliding mode control based on fast power reaching law [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(11): 32-38.
- [3] 王闻喆,吴冰,李小璐,等. 一种浮空平台雷达伺服系统的设计[J]. 现代雷达, 2016, 38(8): 64-69.
WANG Wenzhe, WU Bing, LI Xiaolu, et al. Design of aerostat radar servo system [J]. Modern Radar, 2016, 38(8): 64-69.
- [4] 姜仁华,刘闯,宁银行,等. 雷达伺服系统的高跟踪精度改进型自抗扰控制器[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(5): 102-109.
JIANG Renhua, LIU Chuang, NING Yinhang, et al. Improved auto-disturbance rejection controller of radar servo-system with high tracking accuracy [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(5): 102-109.
- [5] 韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
HAN Jingqing. Active disturbance rejection control technique—the technique for estimating and compensating the uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [6] HAN Jingqing. From PID to active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [7] 尚敬,年晓红,刘可安,等. 负载转矩前馈的电励磁同步电机定子磁链定向矢量控制[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(11): 25-31.
SHANG Jing, NIAN Xiaohong, LIU Kean, et al. Stator flux oriented vector control of excited synchronous motor based on load torque observer feed-forward control [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(11): 25-31.
- [8] 关欣,李叶松. 基于实时负载转矩反馈补偿的永磁同步电机变增益PI控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 38-45.
GUAN Xin, LI Yesong. Variable gain PI control method for permanent magnet synchronous motor based on load torque feedback real-time compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 38-45.
- [9] 李延斌,向东,高有华. 重力引起的3自由度气浮台各类不平衡力矩关系及影响[J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 7-14.
LI Yanbin, XIANG Dong, GAO Youhua. Relation and influence of all kinds of unbalance torques of three degrees of freedom air-bearing spacecraft simulator caused by gravity [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 7-14.
- [10] 盖江涛,黄守道,黄庆,等. 基于负载观测的永磁电机驱动系统自抗扰控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 29-35.
GAI Jiangtao, HUANG Shoudao, HUANG Qing, et al. Active-disturbance rejection controller for permanent magnet motor drive system control based on load observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 29-35.
- [11] 刘春强,骆光照,涂文聪,等. 基于自抗扰控制的双环伺服系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 7032-7039.
LIU Chunqiang, LUO Guangzhao, TU Wencong, et al. Servo systems with double closed-loops based on active disturbance rejection controllers [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 7032-7039.
- [12] 周凯,孙彦成,王旭东,等. 永磁同步电机的自抗扰控

- 制调速策略[J]. 电机与控制学报,2018,22(2):57-63.
- ZHOU Kai, SUN Yancheng, WANG Xudong, et al. Active disturbance rejection control of PMSM speed control system [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(2):57-63.
- [13] 谢 洋,姜仁华,刘亚云. 基于级联一阶自抗扰控制器的机载雷达伺服系统的设计[J]. 微电机, 2018, 51(5):36-42.
- XIE Yang, JIANG Renhua, LIU Yayun. Airborne radar servo system design using cascading first-order active disturbance rejection controller[J]. Micromotors, 2018, 51(5):36-42.
- [14] 左月飞,符 慧,刘 闯,等. 考虑转速滤波的永磁同步电动机转速伺服系统改进型自抗扰控制器[J]. 电工技术学报,2016,31(9):137-145.
- ZUO Yuefei, FU Hui, LIU Chuang, et al. A modified active disturbance rejection controller concerning speed filter for PMSM speed servo system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9):137-145.
- [15] 张海洋,许海平,方 程,等. 基于负载转矩观测器的直驱式永磁同步电机新型速度控制器设计[J]. 电工技术学报,2018,33(13):2923-2934.
- ZHANG Haiyang, XU Haiping, FANG Cheng, et al. Design of a novel speed controller for direct-drive permanent magnet synchronous motor based on load torque observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13):2923-2934.

作者简介:

刘亚云 男,1986年生,硕士,工程师,研究方向为天线伺服控制;

刘 峰 男,1985年生,大学本科,高级技师,研究方向为天线伺服控制;

张志磊 男,1990年生,硕士,工程师,研究方向为天线伺服控制;

黄 刚 男,1978年生,大学本科,高级工程师,研究方向为天线伺服控制。