

单轴稳定平台的自抗扰控制器设计

刘二豪, 王俊清, 乔丽丽

(西安硕源光电科技有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 制导火箭弹中,常采用永磁同步电动机(PMSM)直驱稳定平台的控制方式实现稳定平台的解旋控制。自抗扰控制器(ADRC)算法中的扩张状态观测器(ESO)不依赖于控制系统的精确模型,能够实时估计载体转速和一些不确定的扰动。依据自抗扰控制技术,设计了单轴稳定平台的ADRC,对控制器优化处理,并进行了Matlab仿真以及实验验证。结果表明,该系统具有较强抗干扰能力及较高的控制品质。

关键词: 永磁同步电动机;单轴稳定平台;自抗扰控制器;仿真

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25096

Design of ADRC Based on Single-axis Stable Platform

LIU Erhao, WANG Junqing, QIAO Lili

(Xi'an Shuoyuan Optoelectronic Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor (PMSM) driving stable platform directly is often used in guided rockets to realize the decoupling control of stable platform. Due to the extended state observe (ESO) contained in the active disturbance rejection controller (ADRC), it can accurately estimate the speed of the rotated carrier and the uncertain disturbances accurately without requiring exact mathematic model of system. Based on active disturbance rejection control technique, an ADRC for single-axis stable platform was designed, and optimized the controller. The Matlab simulation and experimental verification show that the system has strong anti-interference ability and high control quality.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); single-axis stable platform; active disturbance rejection controller (ADRC); simulation

稳定平台用于隔离载体扰动,精确保持载体动态姿态基准,使平台稳定在惯性空间,并保证平台的设备能够正常工作。弹载单轴稳定平台的设计必须考虑飞行中的高速旋转和高横滚角加速度等因素的影响,不但要求平台具有良好的动态品质和很高的稳态精度,而且还要具有足够大的适应范围和抗干扰能力^[1-2]。

经典PID控制器不依靠对象模型,根据目标与系统行为之间的误差来消除此误差的控制策略。随着控制对象结构越来越复杂,控制要求越来越苛刻,致使经典PID控制性能不理想或失效。为了提高控制性能,新型的控制方法应运而生,如鲁棒控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制等,虽然这些算法能够不同程度地改善控制性能,但其结构复杂,计算量大。基于经典PID控制器存在的问题,韩京清研究员提出自抗扰控制技

术^[3],自抗扰控制技术是运用现代控制理论的先进思想来改造经典PID技术发展出来的。尤其在恶劣环境中要求实现高精度控制,自抗扰控制技术更能显示其优越性。

文献[4]将自抗扰控制用在永磁同步电机矢量控制系统中,阐述了改进型自抗扰控制的优点。文献[5]将ADRC运用到光电稳定平台上,对摩擦干扰观测并补偿,提高了稳定精度。文献[6]研制了一种单轴稳定试验台,采用经典PID,实现其在静止、恒速、高滚转加速度下保持稳定。文献[6-7]将滑模变结构控制算法引入稳定平台的控制器,提高了平台稳态精度。文献[8-12]研究了ADRC在机载光电系统中的应用,结果表明该方法具有高控制精度和鲁棒性。

结合文献[6-7],本文将ADRC引入到单轴稳定平台伺服控制中,通过位置-速度环一体化

ADRC设计,并对其优化,实现了角度和角速度的高精度伺服控制。

1 系统模型

1.1 永磁同步电动机的数学模型

假设永磁同步电动机空间磁场呈正弦波分布、磁路线性且不饱和、忽略涡流损耗和磁滞损耗,在 $d-q$ 坐标系下,PMSM数学模型如下:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s i_d}{L_d} + \frac{n_p \omega i_q L_q}{L_d} + \frac{u_d}{L_d} \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s i_q}{L_q} - \frac{n_p \omega i_d L_d}{L_q} - \frac{n_p \omega \Psi_f}{L_q} + \frac{u_q}{L_q} \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K_t i_q}{J} - \frac{B\omega}{J} - \frac{T_l}{J} \quad (3)$$

式中: ω 为转子机械角速度; K_t 为转矩常数; u_d, u_q 分别为定子 d, q 轴电压; i_d, i_q 分别为定子绕组 d, q 轴电流; n_p 为电机的极对数; B 为黏滞系数; T_l 为负载转矩; J 为转动惯量; R_s 为定子电阻; L_d, L_q 分别定子绕组为 d, q 轴电感; Ψ_f 为永磁体磁链。

1.2 自抗扰控制器模型

一般自抗扰控制器由3部分组成,即非线性跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)、和非线性状态误差反馈(NLSEF)。首先,TD用来跟踪输入信号,并给出良好的微分信号;其次,ESO对系统的状态和扰动进行估计;最后,利用NLSEF得到控制律。其结构如图1所示。

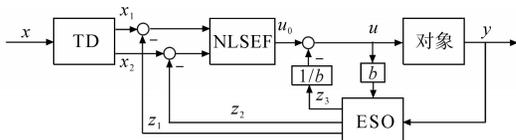


图1 自抗扰控制器结构图

Fig.1 The structure of ADRC

1)跟踪微分器TD。采用符号函数sign的二阶跟踪微分器(second-order tracking differentiator, SONTD)为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -r \text{sign}[x_1 - \vartheta(t) + x_2 |x_2|/(2r)] \end{cases} \quad (4)$$

其中,变量 x_1 在加速度因子 r (r 越大,加速跟踪越快)的限制下跟踪输入信号 $\vartheta(t)$;变量 x_2 作为输入信号 $\vartheta(t)$ 的微分。

2)扩张状态观测器ESO。考虑如下二阶对象:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f[x_1, x_2, \varpi(t), t] + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\varpi(t)$ 为外扰作用; $f[x_1, x_2, \varpi(t), t]$ 为系统的总扰动,是有界函数。

令 $x_3 = f[x_1, x_2, \varpi(t), t]$ 作为未知的被扩张的状态变量,式(5)变成如下线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = \varpi_0(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\varpi_0(t)$ 为扰动初始值。

在此无需关注 $\varpi_0(t)$,对式(6)建立如下状态观测器:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}fal(e, \alpha_1, \delta) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}fal(e, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$fal(e, a, \delta) = \begin{cases} e/\delta^{1-a} & |e| \leq \delta \\ \text{sign}(e)|e|^a & |e| > \delta \end{cases}$$

式中: a 为非线性因子,取值 $0 \sim 1$ 之间常数; δ 为滤波系数。

增加 δ 可使滤波效果变好,但也增加了跟踪延迟;选取适当的参数 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$,扩张状态观测器的状态量 z_i 能够很好地跟踪式(6)的状态变量 x_i ,系统总扰动 x_3 的估计可以对系统进行补偿。

3)非线性状态误差反馈NLSEF。根据式(4)和式(7)进行误差组合,得到控制律:

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - z_1 \\ e_2 = x_2 - z_2 \\ u_0 = k(e_1, e_2) \end{cases} \quad (8)$$

4)扰动补偿计算如下:

$$u = u_0 - z_3/b \quad (9)$$

2 单轴稳定平台ADRC控制

2.1 单轴稳定平台工作原理

永磁同步电动机直接驱动单轴稳定平台结构如图2所示。永磁同步电动机定子与载体固连,转子通过联轴器与平台固连,平台上装有陀螺仪,用来测量平台的角速度和角度;永磁同步电动机带有光电编码器,测量电机本体的电角度,用矢量控制算法中的坐标变换,通过反伺服来实现平台的伺服控制。

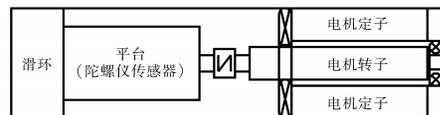


图2 单轴稳定平台结构图

Fig.2 The structure of the single-axis stable platform

2.2 ADRC控制器实现

常规的伺服控制为位置—速度—电流三闭

环控制,根据永磁同步电动机数学模型,将位置和速度进行一体化闭环ADRC设计,电流环也采用ADRC设计,单轴稳定平台自抗扰控制结构如图3所示。

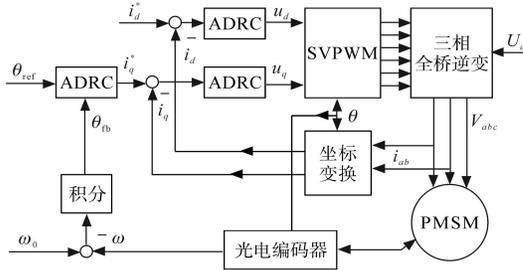


图3 单轴稳定平台自抗扰控制结构图

Fig.3 The ADRC for the single-axis stable platform

对于单轴稳定平台,因为 \$\theta_{ref} = 0\$, 给定位置的微分为0,因此TD是不必要的。取系统状态变量 \$x_1 = \theta_{ref} - \theta_{fb} = -\theta_{fb}, x_2 = \omega_0 - \omega\$, 得到:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f[x_1, x_2, \varpi(t), t] + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (10)$$

其中 $b = K_t/J \quad u = i_q^*$

$$f[x_1, x_2, \varpi(t), t] = \frac{K_t(i_q - i_q^*)}{J} - \frac{B\omega}{J} - \frac{T_l}{J} - \omega_0$$

根据式(10)建立状态观测器,如式(7)所示。\$z_1\$ 跟踪 \$x_1\$, 即平台的角度; \$z_2\$ 跟踪 \$x_2\$, 即平台的角速度; \$z_3\$ 跟踪 \$f[x_1, x_2, \varpi(t), t]\$, 即系统的实时扰动。

根据式(8)设计控制律:

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - z_1 \\ e_2 = x_2 - z_2 \\ u_0 = k_1 fal(e_1, \alpha_1, \delta) + k_2 fal(e_2, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (11)$$

式中: \$e_1\$ 为状态变量 \$x_1\$ 与观测变量 \$z_1\$ 的误差; \$e_2\$ 为状态变量 \$x_2\$ 与观测变量 \$z_2\$ 的误差; \$k_1, k_2\$ 为控制律的误差组合参数。

如果非线性因子 \$\alpha_1, \alpha_2\$ 取值1, 该控制律退化为经典PD控制, 即线性反馈 (linear state error feedback, LSEF); 否则该控制律为非线性PD控制 (NLSEF)。最后对控制律根据式(9)进行扰动补偿后作为电流环的控制信号 \$i_q^*\$。简化的ADRC位置—速度控制器结构图如图4所示。

针对非线性PD控制器的设计, 需要考虑稳

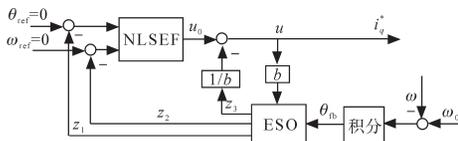


图4 简化的ADRC位置—速度控制器结构图

Fig.4 Simplified ADRC for position—speed loop

定性。

经过ESO补偿后被控对象变为二阶积分串联型系统:

$$b\ddot{y} = u_0 \quad (12)$$

令

$$P(e_1) = \frac{k_1 fal(e_1, \alpha_1, \delta)}{e_1}$$

$$Q(e_1) = \frac{k_2 fal(e_2, \alpha_2, \delta)}{e_2} = \frac{k_2 fal(\dot{e}_1, \alpha_2, \delta)}{\dot{e}_1}$$

则式(12)变形为

$$-b\dot{e}_1 = e_1 P(e_1) + \dot{e}_1 Q(e_1) \quad (13)$$

构造Lyapunov函数:

$$V = \int_0^{e_1} e_1 P(e_1) de_1 + 1/2 b\dot{e}_1^2 \quad (14)$$

由于 \$e_1 P(e_1) = k_1 fal(e_1, \alpha_1, \delta)\$, 是奇函数, 且 \$e_1 > 0\$ 时, \$e_1 P(e_1) > 0\$, 所以 \$\int_0^{e_1} e_1 P(e_1) de_1 > 0\$, 因此满足 \$V > 0\$。

对式(14)求导, 可得:

$$\dot{V} = e_1 P(e_1) \dot{e}_1 + b\dot{e}_1 \ddot{e}_1 = -Q(e_1) \dot{e}_1^2 \quad (15)$$

\$Q(e_1)\$ 是偶函数, 且 \$Q(e_1) > 0\$, 故满足 \$\dot{V} < 0\$。

经过以上证明可知, 只要选取参数 \$k_1 > 0, k_2 > 0\$, 非线性PD控制器就满足稳定性要求。

3 仿真与实验

为验证上述方法的有效性, 使用Matlab搭建单轴稳定平台ADRC控制模型, 选用的永磁同步电动机参数为: 额定电压 \$U_{ac} = 24\$ V, 额定电流 \$I = 4.33\$ A, 定子电阻 \$R_s = 0.307 \Omega\$, 定子电感 \$L_d = L_q = 0.188\$ mH, 极对数 \$n_p = 7\$, 黏滞系数 \$B = 0.0001\$ N·m·s/rad, 转矩常数 \$K_t = 53.4\$ mN/A, 转动惯量 \$J = 1210\$ g·cm\$^2\$。经过优化的PID控制器参数如下: 位置环: \$k_p = 210, k_i = 10\$; 速度环: \$k_p = 0.9, k_i = 1.4\$; 电流环: \$k_p = 1.5, k_i = 310\$。ADRC控制器参数如下: ESO: \$\beta_{01} = 40000, \beta_{02} = 1000000, \beta_{03} = 50000000\$; LSEF: \$k_1 = 2000, k_2 = 5\$; NLSEF: \$k_1 = 800, k_2 = 5\$; 仿真步长 \$h = 0.000005; b = 441\$。

载体的速度变化曲线如图5所示。0 s—0.35 s 负载转矩保持 \$0.5\$ N·m, 0.35 s—0.5 s 负载转矩保持 \$0.7\$ N·m。

3.1 ADRC控制器与PID控制器对比

根据载体速度的变化, 从图6和图7中可以看出, 载体转速波动和转矩波动均会影响平台角速度变化和角度变化。ADRC控制器将载体转速

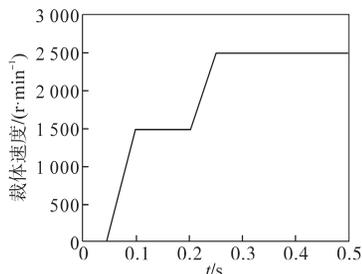


图5 载体速度变化曲线

Fig.5 The change curve of carrier speed

波动和转矩波动看作系统的扰动进行补偿,该控制器的鲁棒性较强,控制精度优于经典PID控制器。

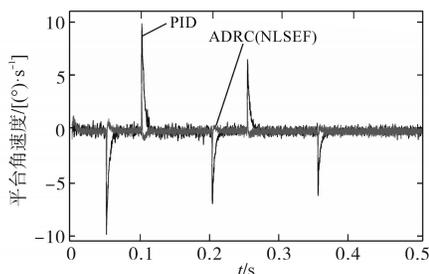


图6 ADRC控制器和PID控制器下的平台角速度

Fig.6 Platform angular velocity based on PID controller and ADRC

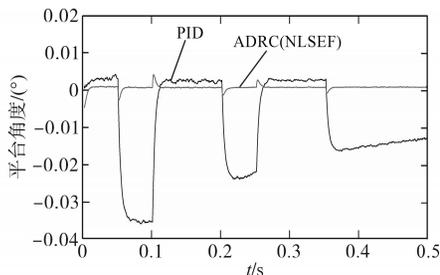


图7 ADRC控制器和PID控制器下的平台角度

Fig.7 Platform angle based on PID controller and ADRC

3.2 ADRC线性反馈与非线性反馈对比

从图8和图9中可以看出,ADRC控制器采用简化的线性反馈与非线性反馈,在控制精度和抑制系统扰动方面区别不大,使用线性反馈使控制参数易于整定。

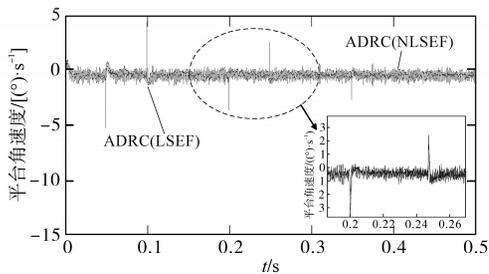


图8 基于LSEF和NLSEF ADRC控制器下的平台角速度

Fig.8 Platform angular velocity based on LSEF and NLSEF ADRC

3.3 实验验证

本文设计的单轴稳定平台测试装置如图10

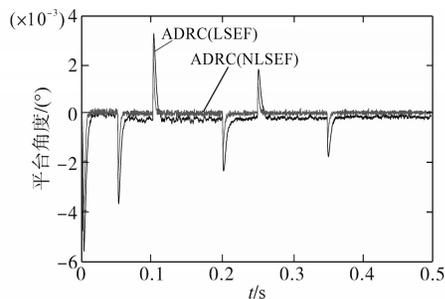


图9 基于LSEF和NLSEF ADRC控制器下的平台角度

Fig.9 Platform angle based on LSEF and NLSEF ADRC

所示。通过该装置将平台载体按要求曲线拖动,使用上位机记录稳定平台的角度和角速度。

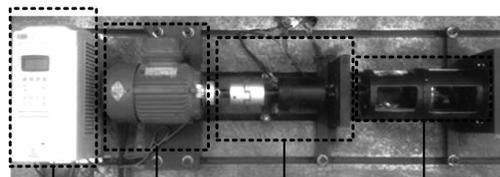


图10 单轴稳定平台专用测试台

Fig.10 The test stand of the single-axis stable platform

测试装置由4部分组成:载体,用于放置单轴稳定平台;机械连接结构,将载体与异步电机连接;异步电机,用于驱动载体旋转;变频器,按上位机给定指令控制异步电机旋转。实验中载体转速加速到1500 r/min稳定,最后减速到0。单轴稳定平台使用三环PID控制实验结果如图11所示,使用ADRC控制结果如图12所示。

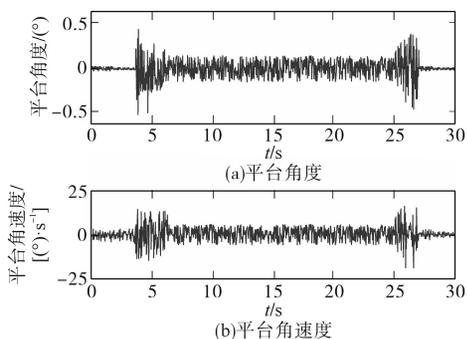


图11 PID控制平台实验结果

Fig.11 The experimental result of PID control

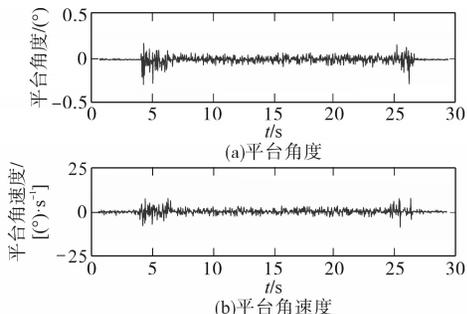


图12 ADRC控制平台实验结果

Fig.12 The experimental result of ADRC control

对比图 11 和图 12 可以看出,在载体突然启动和突然减速时,ADRC 控制相比 PID 控制,系统自适应能力和鲁棒性强。

4 结论

本文提出了简化的 ADRC 控制策略,位置—速度一体化 ADRC 控制器作为外环,用于单轴稳定平台,实现了角度和角速度的高精度伺服控制,从仿真结果可以得到:

1)在抗扰性和鲁棒性方面,ADRC 控制策略优于经典 PID 控制,在载体扰动不确定时,ADRC 对平台稳定回路进行控制,系统动态精度和稳态精度高。

2)根据系统要求,对 ADRC 控制策略进行简化,在满足控制性能的情况下减少参数整定。

3)利用扩张观测器进行估计补偿扰动,把原系统补偿为线性积分器串联型系统,使用非线性误差反馈(NLSEF),可以使系统得到满意的控制性能。在一定条件下,可以使用线性误差反馈(LSEF)代替效率更高的非线性误差反馈,同样可以获得满意的控制性能。

参考文献

- [1] 李贤涛,张葆,沈宏海.基于自抗扰控制技术提高航空光电稳定平台的扰动隔离度[J].光学精密工程,2014,37(8):2223-2231.
LI Xiantao, ZHANG Bao, SHEN Honghai. Improvement of isolation degree of aerial photoelectrical stabilized platform based on ADRC[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 37(8): 2223-2231.
- [2] 丛爽,孙光立,邓科,等.陀螺稳定平台扰动的自抗扰及其滤波控制[J].光学精密工程,2016,24(1):169-177.
CONG Shuang, SUN Guangli, DENG Ke, et al. Active disturbance rejection and filter control of gyro-stabilized platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(1): 169-177.
- [3] 韩京清.自抗扰控制技术[M].北京:国防工业出版社,2008.
HAN Jingqing. Active disturbance rejection control technique [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [4] 林立,吕金培,林敏之.基于自抗扰控制的永磁同步电机矢量控制系统研究[J].电气传动自动化,2023,45(1):6-9.
LIN Li, LÜ Jinpei, LIN Minzhi. Research on permanent magnet synchronous motor control based on active disturbance rejection control[J]. Electric Drive Automation, 2023, 45(1): 6-9.
- [5] 王春阳,彭业光,史红伟,等.光电稳定平台线性自抗扰控制器设计[J].电光与控制,2018,25(11):112-115,119.
WANG Chunyang, PENG Yeguang, SHI Hongwei, et al. Design of a linear disturbance rejection controller for photoelectric stabilized platform[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11): 112-115, 119.
- [6] XU Xuyao, LIN Hui. Theory and design of one-axis stable platform for rotation[C]//2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, 2011.
- [7] 刘二豪,林辉,龙蛟.单轴稳定平台滑模变结构伺服控制研究[J].微特电机,2014,42(4):61-63,66.
LIU Erhao, LIN Hui, LONG Jiao. The research of sliding mode variable structure servo control for single-axis stabilized platform[J]. Small & Special Electrical Machines, 2014, 42(4): 61-63, 66.
- [8] 张越杰,张鹏,冉承平,等.扰动分离自抗扰控制在光电稳定平台上的应用[J].红外与激光工程,2021,50(10):236-244.
ZHANG Yuejie, ZHANG Peng, RAN Chengping, et al. Application of a disturbance separation active disturbance rejection control in photoelectric stabilized platform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(10): 236-244.
- [9] 王春阳,赵尚起,史红伟,等.机载光电稳瞄平台的线性自抗扰控制[J].红外与激光工程,2019,48(12):248-254.
WANG Chunyang, ZHAO Shangqi, SHI Hongwei, et al. Linear active disturbance rejection control of airborne photoelectric stabilized platform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(12): 238-244.
- [10] 邝平,李军,雷阳,等.高精度稳定平台伺服系统的自抗扰控制[J].工业仪表与自动化装置,2016(1):14-18.
KUANG Ping, LI Jun, LEI Yang, et al. Active disturbance rejection control of high precision stabilized platform servo control system[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2016(1): 14-18.
- [11] WEN Jianping, HUANG Yuchun. Robust speed control of permanent magnet synchronous motor[C]//2013 8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013.
- [12] 林海军,杨兆鹏,王贺,等.基于自抗扰控制器的稳定平台控制策略研究[J].电测与仪表,2015,55(5):75-80.
LIN Haijun, YANG Zhaopeng, WANG He, et al. Control strategy research of stabilized platform based on active disturbance rejection controller (ADRC)[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 55(5): 75-80.

收稿日期:2023-04-18

修改稿日期:2023-07-15