

线性自抗扰控制在倒立摆系统的实现

高强¹, 陈莎莎¹, 李毅²

(1. 天津理工大学自动化学院 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384; 2. 南开大学 天津市智能机器人技术重点实验室, 天津 300071)

摘要: 针对自抗扰控制技术的实际应用以及对单入双出欠驱动系统的控制能力问题, 结合自抗扰控制器不依赖系统模型, 通过扩张观测器观测系统输入输出状态, 估计并补偿系统误差来消除误差的控制特性, 提出一种采用双LESO的LADRC控制方法。通过同时观测并估计补偿系统总扰动误差的方法, 结合双PD控制器共同作用的控制律, 实现对倒立摆系统的稳定控制。仿真实验表明该方法不仅对倒立摆摆杆角度和小车位移都能起到很好的稳定控制效果, 同时比传统自抗扰控制器简化了参数调试的问题。实时控制结果更加说明了该方法的有效性及其良好的鲁棒性。

关键词: 自抗扰控制技术; 线性扩张观测器; 倒立摆系统; 实时控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Application of LADRC on Inverted Pendulum System

GAO Qiang¹, CHEN Sha-sha¹, LI Yi²

(1. Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems, School of Electrical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Intelligent Robotics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Aiming the problem of the application of active disturbance rejection control (ADRC) and the problem to deal with the under actuated system with the one input double output system, a new method taking use of the double linear extended state observer (LESO) linear active disturbance rejection controller (LADRC) was proposed, which is combining with the characteristics of model independent and eliminating and compensating the total disturbance error by observing the state of system input and output. Through the method both to observe and eliminate the system total disturbance error at the same time, the stability control of inverted pendulum was realized by combining the double PD controller. Simulation results show that the proposed method not only can control the pendulum angle and the car displacement but simplifies the tuning process. Real-time control results further show the effectiveness and the better robustness of the proposed method.

Key words: active disturbance rejection control (ADRC); linear extended state observer (LESO); inverted pendulum; real-time control

倒立摆系统是一个高阶次, 不稳定, 强耦合, 多变量的非线性系统, 因此被控制领域专家学者当作典型对象进行科学理论研究^[1-2]。

自抗扰控制技术(ADRC)是一种不依赖系统模型的控制技术, 能实时估计并补偿系统在运行过程中受到的各种外扰以及系统本身决定的内扰的总和作用的影响, 结合特殊的非线性反馈

结构能够实现良好的控制品质^[3]。大量的数字仿真研究证明自抗扰技术具有超调小、响应速度快、精度高、抗干扰能力强及算法简单等特点。

采用自抗扰控制技术可以实现对倒立摆摆角的良好控制^[4]。通过增加一个跟踪微分器和增加一个被控变量控制律方法的自抗扰控制方法, 可以仿真实现倒立摆小车在给定位置上的稳定

基金项目: 天津市中青年骨干创新人才培养计划项目(20130830)

作者简介: 高强(1968-), 男, 研究生导师, Email: gaoqiang@tjut.edu.cn

控制^[5]。通过仿真试验证明了该方法对摆杆和角度的稳定控制效果。

1 线性自抗扰控制

1.1 自抗扰控制

自抗扰控制技术是韩京清教授在上个世纪80年代后,结合经典控制理论和现代控制理论的优点,提出一种观测加补偿的控制方法^[6]。是一种不依赖于被控对象精确模型、能够替代PID控制技术的新型实用数字控制技术。自抗扰控制器ADRC结构图(以二阶系统为例)如图1所示。

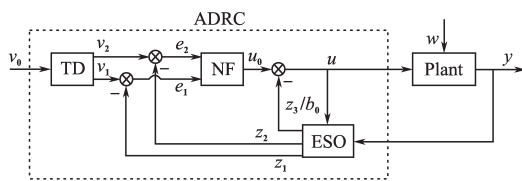


图1 自抗扰控制器ADRC结构图

Fig.1 The structure chart of ADRC

由图1可以看出,自抗扰控制器基本结构是由ESO扩张观测器,NF非线性组合和TD跟踪微分器组合而成。TD的作用是根据控制目标和对象的承受能力先安排合适过渡过程并给出此过程的微分信号;非线性误差反馈律NF中有一个自动检测系统模型和外扰实时作用并予以补偿的补偿分量。这个补偿分量不区分系统内扰和外扰,直接检测并补偿系统扰动的总合作用。ESO能够观测对象状态变量的估计 $z_1(t)$, $z_2(t)$,以及系统扰动的实时作用量 $a(t)=f(x,\dot{x},\dots,x^{(n-1)},w(t),t)$ 的估计 $z_3(t)$ 。而 $z_3(t)$ 即为系统总扰动的估计量, $z_3(t)$ 的反馈将起补偿扰动的作用。

自抗扰的特性是指能够实时估计扰动及补偿扰动的功能,实时估计扰动是最重要的特性。扩张观测器比传统状态观测器多了1维状态, n 阶系统观测器输出为 $n+1$ 维状态,第 $n+1$ 维状态是对系统不确定量的总和估计,是自抗扰控制的关键技术。

1.2 线性自抗扰控制器的设计

线性自抗扰技术^[7](LADRC)是在自抗扰技术理论的基础上,结合跟踪微分器,非线性PD控制器以及线性扩张观测器(LESO)补偿系统扰动的一种设计方法。

线性扩张观测器设计是基于状态空间模型的状态观测器,是为了简化参数调试的复杂性,减

少需要调节的参数数量,提出的一种设计方法^[8]。一般情况,二阶线性扩张观测器表示为

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = Cz \end{cases}$$

其中, L 为观测器增益向量,可以通过任意方法(如极点配置法)获得 $L = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T$ 。若令误差 $e_i = x_i - z_i$, $i = 1, 2, 3$ 。则误差方程为

$$\dot{e} = A_e e + E a$$

$$\text{其中} \quad A_e = A - LC = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 \\ -\beta_2 & 0 & 1 \\ -\beta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

安排所有观测器特征值在 w_0 处,使所有参数为 w_0 的传函,即

$$\lambda(s) = s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3 = (s + w_0)^3$$

则 $\beta_1 = 3w_0$, $\beta_2 = 3w_0^2$, $\beta_3 = w_0^3$,可配置系统的极点在 S 平面左半平面,实现观测器系统的稳定输出。

因此,取观测器状态变量为 $[z_1, z_2, z_3]$,观测器输入为 $[u, x_1]$,观测器输出为 $[z_1, z_2, z_3]$ 。则以系统输入输出为观测器输入,以系统输出、输出的变化速率以及系统扰动总和的估计值为观测器输出的线性扩张状态观测器的状态空间表达式,可以写成

$$\begin{cases} \dot{z} = \tilde{A}z + \tilde{B}u \\ y = \tilde{C}z \end{cases}$$

其中

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -3w_0 & 1 & 0 \\ -3w_0^2 & 0 & 1 \\ -w_0^3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 & 3w_0 \\ b & 3w_0^2 \\ 0 & w_0^3 \end{bmatrix} \\ \tilde{C} = eye(3)$$

控制律取

$$u_0 = k_p(r - z_1) - k_d z_2$$

其中, r 为设定值,用 $k_d z_2$ 代替 $k_d(\dot{r} - z_2)$ 避免设定值积分,且使可以闭环传函成为没有零点的二阶系统:

$$G_{cl} = \frac{k_p}{s^2 + k_d s + k_p}$$

$$\text{其中} \quad k_d = 2\zeta\omega_c \quad k_p = \omega_c^2$$

式中: ω_c 为设计的闭环回路自然震荡频率; ζ 为阻尼比,选择使系统不出现震荡的阻尼比。

2 倒立摆系统LADRC的设计仿真

2.1 倒立摆系统LADRC设计分析

倒立摆系统是一个单入双出的强耦合非线性的欠驱动系统,试验所采用的倒立摆系统模型

为加拿大 Quanser 公司的 IP02 倒立摆系统,该系统由水平移动的小车和安装在小车上的倒立摆摆杆组成。其控制输入为小车电机上的电压信号,被控的变量为摆杆的角度和小车的位移。为了仿真的需要,首先通过倒立摆系统的动力学分析,采用拉格朗日方程对其进行机理建模,得到其非线性系统方程如下:

$$\begin{cases} (M_c + M_p) \left[\frac{d^2}{dt^2} x_c(t) \right] - M_p l_p \cos[\alpha(t)] \left[\frac{d^2}{dt^2} \alpha(t) \right] + \\ M_p l_p \sin[\alpha(t)] \left[\frac{d}{dt} \alpha(t) \right]^2 = F_c - B_{eq} \left[\frac{d}{dt} x_c(t) \right] \\ - M_p l_p \cos[\alpha(t)] \left[\frac{d^2}{dt^2} x_c(t) \right] + (I_p + M_p l_p^2) \left[\frac{d^2}{dt^2} \alpha(t) \right] - \\ M_p g l_p \sin[\alpha(t)] = -B_p \left[\frac{d}{dt} \alpha(t) \right] \end{cases}$$

整理得,

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} \alpha(t) = & \{ (M_c + M_p) M_p g l_p \sin[\alpha(t)] - (M_c + M_p) \times \\ & B_p \left[\frac{d}{dt} \alpha(t) \right] - M_p^2 l_p^2 \sin[\alpha(t)] \cos[\alpha(t)] \times \\ & \left[\frac{d}{dt} \alpha(t) \right]^2 - M_p l_p \cos[\alpha(t)] B_{eq} \left[\frac{d}{dt} x_c(t) \right] + \\ & F_c M_p l_p \cos[\alpha(t)] \} / \{ (M_c + M_p) I_p + \\ & M_c M_p l_p^2 + M_p^2 l_p^2 \sin[\alpha(t)]^2 \} \\ \frac{d^2}{dt^2} x_c(t) = & \{ -(I_p + M_p l_p^2) B_{eq} \left[\frac{d}{dt} x_c(t) \right] - (M_p^2 l_p^3 + I_p M_p l_p) \times \\ & \sin[\alpha(t)]^2 - M_p l_p \cos[\alpha(t)] B_p \left[\frac{d}{dt} \alpha(t) \right] + \\ & (I_p + M_p l_p^2) F_c + M_p^2 l_p^2 g \cos[\alpha(t)] \sin[\alpha(t)] \} / \\ & \{ (M_c + M_p) I_p + M_c M_p l_p^2 + M_p^2 l_p^2 \sin[\alpha(t)]^2 \} \end{aligned}$$

由上式可以看出,倒立摆系统的摆杆角度与角度和位移变化率有着强烈的关联,同时位移的变化率也与摆杆角度的变化率有着强烈的耦合。可见倒立摆系统有着强烈的非线性特性且摆杆的角度与小车的位移状态之间有着强烈的耦合性。采用经典 PID 控制需要对系统进行解耦,方法虽简单,但计算和分析较复杂,难以实现。自抗扰控制技术的核心是把系统的未建模动态和未知外扰作用都归结为对系统的“总扰动”而进行估计并给予补偿^[9]。采用的方法是充分运用特殊的“非线性”效应,对未知模型的处理,解决了解耦的问题。

取状态向量为

$$\mathbf{x}^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] = [\alpha(t) \ \frac{d}{dt} \alpha(t) \ x_c(t) \ \frac{d}{dt} x_c(t)]$$

若假设系统输出为摆杆角度。则以有界的控制电压为输入的线性扩张系统的输出为有界,则闭环系统是稳定的^[10]。那么以摆杆角度为输

出,控制电压为输入,小车位移及其变化速度为扰动量的二阶系统是稳定的。其表示如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, x_4) + b(x_1)u \end{cases}$$

式中: $f(x_1, x_2, x_4)$ 为系统内部扰动之和; $b(x_1)$ 为系统已知输入。

从仿真实验和控制理论分析可知,假设 x_4 小车移动速度为系统外扰,将倒立摆系统按照二阶自抗扰控制器进行设计,则控制器将能够起到很好的抗扰效果,抑制小车位移变化并消除它,但不能对小车位移起到控制作用。

针对倒立摆系统单入双出欠驱动的特性,结合自抗扰控制器不依赖于系统模型的特性,不用对系统进行解耦实现的特点。假定系统控制电压的控制律的补偿输入是分别以小车位移和摆杆角度为输入建立的两个相同但独立的扩张观测器的扰动作用之和。系统扩张观测器的设计中除对倒立摆摆杆的观测补偿外,增加了一个以小车位移为输入的补偿观测器设计。控制规律采用 2 个 PD 控制器的共同作用实现对系统的控制。

双 LESO 控制原理框图如图 2 所示。

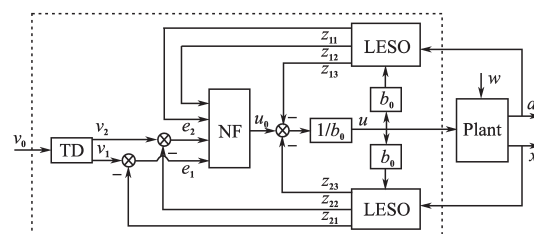


图2 双 LESO 控制原理图

Fig.2 The control principle diagram of double LESO

其中,LESO 采用 2 个参数相同的扩张观测器, z_{11}, z_{12} 为摆杆角度和摆杆角速度的状态估计输出, z_{13} 为以摆杆角度为输出建立的系统方程的扰动估计; z_{21}, z_{22} 为小车位移和小车运动速度的状态估计输出, z_{23} 为以小车位移为输出建立的系统方程的扰动估计; TD 的输入为小车位移设定值,是为小车位移安排的过渡过程。由于摆杆角度需始终保持零度平衡状态,其变化过程迅速且幅度较小,忽略 TD 设计; NF 模块采用 2 个 PD 控制器建立的线性控制律。

2.2 倒立摆系统 LADRC 控制器的仿真

采用双 LESO LADRC 的方法对倒立摆系统进行仿真,程序中需要调节的参数只有 b_0, w_0, w_c, w_{cl} 。比传统 ADRC 控制方法^[5]减少了很多。仿真调试过程中的一些控制规律总结如下。

1)增大 b_0 ,控制电压和小车位移的超调将会减小,但是摆杆角度的超调将会增加。由于增大 b_0 ,控制电压 $u=(-z_3+u_0)/b_0$ 将会减小,故控制作用将会减小。针对小车倒立摆系统,控制电压的直接作用影响较大的是小车位移,故小车位移的变化幅度将会减小。同时为了保持摆杆在平衡位置稳定,摆杆角度变化相对较大,超调增加。

2)增大 w_0 ,跟踪补偿作用将会更好。见图3。

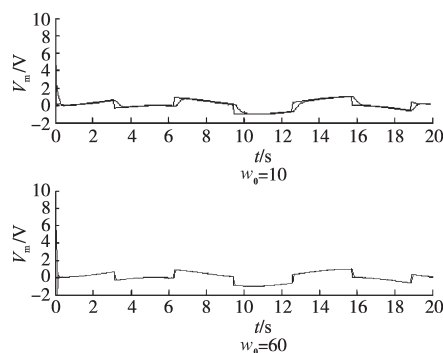


图3 $w_0=10$ 和 $w_0=60$ 的补偿作用

Fig.3 Compensation effect when $w_0=10$ and $w_0=60$

$w_0=60$ 时的补偿作用将比 $w_0=10$ 时更好。然而,增大 w_0 ,小车位移和摆杆角度的调节时间将会变得更长。同时补偿需要的控制电压将会增加。 w_0 太小系统将变得不稳定,太大会产生噪音。

3) w_c 和 w_{cl} 属于PD控制器参数。增加 w_c 的值将会增加对摆杆角度的影响作用,小车位移的影响作用将会减弱。同理,增大 w_{cl} ,将会增加对小车位移的影响作用,减弱对摆杆角度的影响作用。因此, w_c 和 w_{cl} 的选择应该是一个折中的控制参数。

针对倒立摆系统,双LESO LADRC控制方案的参数选取如下: $b_0=6$; $w_0=30$; $w_c=40$; $w_{cl}=7$; $v_0=0.1$; $r_1=10$; $k_1=-w_c^2$; $k_2=-10w_c$; $k_3=w_{cl}^2$; $k_4=16w_{cl}$ 。

仿真结果如图4~图6所示。

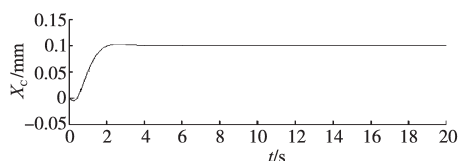


图4 小车位移及其估计值

Fig.4 Car displacement and its estimation

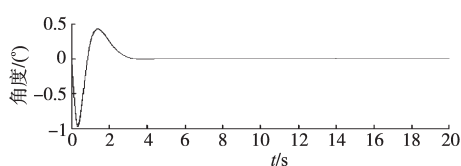


图5 摆杆角度及其估计值

Fig.5 Pendulum angle and its estimation

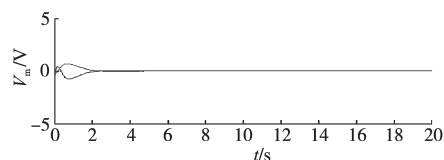


图6 扰动变化及其补偿估计值

Fig.6 System disturbance estimation and compensation

由仿真结果可知,利用双LESO的ADRC方法可以实现对小车位移和摆杆角度的稳定控制,调节时间分别为2 s和3 s,超调量小,总扰动的估计及补偿较为理想,能够实现系统扰动的补偿跟踪。仿真分析证明了该算法对小车倒立摆系统的可行性,可以设计实现实时控制。

3 LADRC实时控制的实现

目前,在控制领域控制算法的研究中,多数研究均停留在系统计算机数字仿真上。但计算机的数字仿真与实际的控制之间存在许多参数设置,以及实际的电压电流饱和等问题。故验证算法的有效性,需要对实际的系统进行实时地操作和控制,才能更有利地证明所选用算法的有效性。

为解决试验仿真与实时控制中会出现偏差等问题,本文结合自抗扰技术的实际应用特性,对倒立摆系统的自抗扰控制进行了实时控制的研究。通过对倒立摆系统的实时控制效果,进一步证明了双LESO LADRC控制方法的实际应用效果。

针对实验室设备Quanser公司的倒立摆系统,结合QUARC-Simulink组态软件,采用双LESO的ADRC控制技术,结合倒立摆系统的实际模型,建立倒立摆系统的半实物仿真系统程序实时控制图,如图7所示。

图7中,实际系统的输入信号通过功率放大器将信号输入到安装在倒立摆小车的电机上。反馈装置采用光电编码器,通过采集卡采集到小车位移和摆杆角度的实时变化情况,实时反馈到计算机系统。计算机系统通过控制器程序的计算分析,给出控制信号,实现对当前状态的控制。控制结果如图8~图10所示。

实时控制仿真结果表明,采用双LESO的ADRC控制技术可以实现对倒立摆小车的稳定控制,摆杆角度能够实现在平衡位置稳定,同时小车位移也能都在给定值附近做小范围的往返运动。该方法能够实现由小车倒立摆系统的稳定控制。

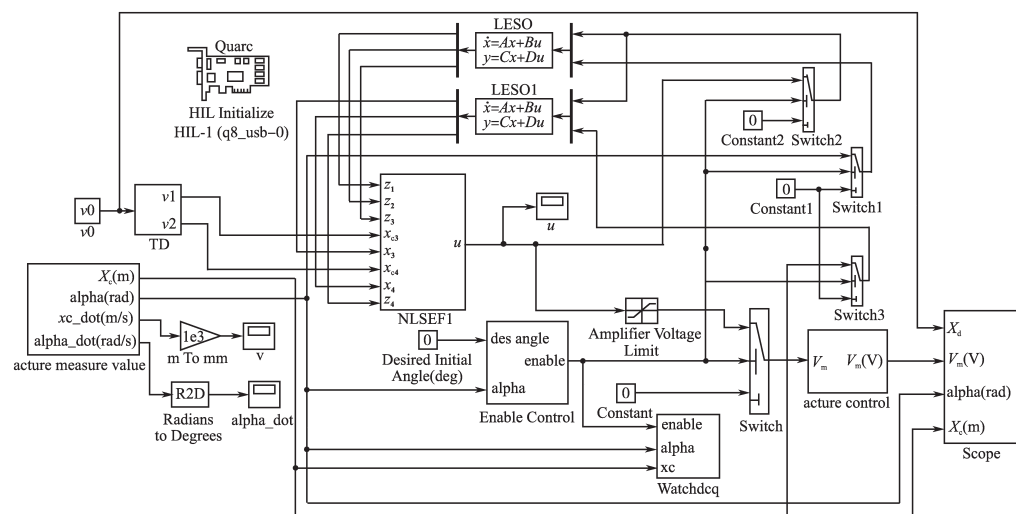


图7 基于双LESO LADRC的倒立摆实时控制Simulink程序图

Fig.7 Real-time control program of inverted pendulum based on double LESO LADRC

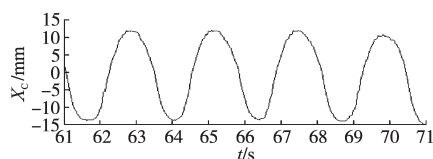


图8 小车位移的实时控制结果图

Fig.8 Real-time control results of car displacement

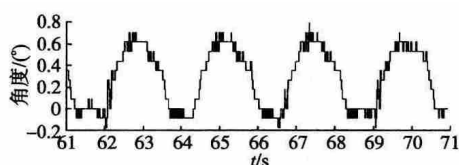


图9 摆杆角度的实时控制结果图

Fig.9 Real-time control results of pendulum angle

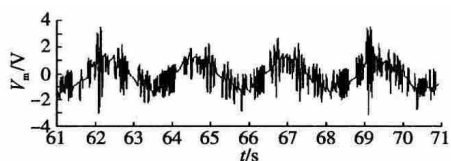


图10 实时控制电压变化图

Fig.10 Real-time control results of control voltage

4 结论

自抗扰控制技术继承并发扬了PID控制的优点,不仅能够对传统控制对象有着很强的工程应用,针对倒立摆系统也有着很强的鲁棒性。本文采用双LESO的ADRC技术实现了同时对小车摆杆和位移的稳定控制。仿真试验显示了该算法控制效果较好,实时控制试验进一步体现了该算法的有效性。通过对系统的仿真和实时控制分析可知,采用双LESO的ADRC技术可以实现对单

入双出非线性欠驱动的倒立摆系统的控制,有着很强的鲁棒性。但理论分析及其更广泛的应用有待下一步研究。

参考文献

- [1] 高强,李毅,陈莎莎. 二级旋转倒立摆的逐级模糊实时控制[J]. 合肥工业大学学报, 2012, 35(11): 1474-1480.
- [2] 高强,马光,董超. 基于T-S模糊控制的旋转型倒立摆实时控制的研究[C]//Proceeding of the Chinese Control and Decision Conference. Tianjin, 2006: 473-475.
- [3] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [4] 马燕,夏超英. 单级旋转倒立摆的自抗扰控制[J]. 电气传动, 2007, 37(6): 39-41.
- [5] 武利强,韩京清. 直线型倒立摆的自抗扰控制设计方案[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(5): 665-670.
- [6] 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.
- [7] GAO Z. Active Disturbance Rejection Control: A Paradigm Shift in Feedback Control System Design[C]// Proceedings of the 2006 American Control Conference. Minneapolis, Minnesota, 2006: 2399-2405.
- [8] GAO Z. Scaling and Bandwidth-parameterization Based Controller Tuning[C]//Proceeding of the American Control Conference, 2003: 4989-4996.
- [9] 黄一,薛文超. 自抗扰控制: 思想、应用及理论分析[J]. 系统科学与数学, 2012, 32(10): 1287-1307.
- [10] 陈增强,孙明玮,杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 574-580.

收稿日期: 2013-09-22

修改稿日期: 2014-04-04