# 航空泵试验台驱动变结构控制

白国长 王占林 陈 娟

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

**摘 要**: 飞机液压系统泵源需进行地面试验, 采用变频调速器+异步电机+增速箱的驱动形式是航空泵进行地面试验最先进有效的方法之一. 建立了矢量控制变频调速驱动下航空泵试验台驱动系统的数学模型, 针对航空泵试验时由于负载变化泵转速不能保持恒定的问题, 采用积分滑模面的滑模变结构控制策略, 并构造 Lyapunov函数证明其稳定性. 为降低输出抖振现象, 提出采用模糊控制监督下的滑模变结构控制和伪微分反馈(PDF, Pseudo Derivative Feedback)控制相结合的控制策略, 仿真及实验结果表明, 该控制方法有很高的控制精度, 在保持滑模变结构控制鲁棒性强的前提下降低了输出抖振现象.

**关 键 词**: 航空泵试验台; 滑模变结构控制; 去抖振措施; 伪微分反馈控制

中图分类号: TP 271

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2008) 06-0652-04

# Variable structure control of testing bed drive for aero hydraulic pump

Bai Guochang Wang Zhanlin Chen Juan

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract**: It is necessary to test the hydraulic power on ground, the method of frequency inverter+asynchronous motor+increasing gear box is one of advanced and effective way in the testing of aero hydraulic pump on ground. The mathematical model of drive system with vector control inverter of aero testing bed was established. Aiming at problems that the pump rotate speed did not keep constant if the load variable at the process of experiment on ground, a control algorithms called sliding mode control(SMC) with integral sliding surface was adopted, and Lyapunov function was constructed to prove the stability. To debase the chatting phenomenon, a control algorithm combine SMC and pseudo derivative feedback(PDF) control supervised by fuzzy control was put forward. The simulation and test results show that this control method has high speed precision and can decrease chatting phenomenon under the condition of retaining the robustness of SMC.

**Key words**: aero hydraulic pump testing bed; variable structure with sliding mode control; anti chatting method; pseudo derivative feedback control

液压动力系统是飞机操作系统最关键的系统之一. 飞机的操作性能和故障率很大程度上取决于该系统, 故有必要对飞机液压系统在地面进行深入的试验研究. 飞机上的泵源系统是由发动机通过连接匣, 由恒速装置驱动, 由于飞机发动机功率很大, 泵负载变化对发动机转速的影响可以忽略不计. 而地面试验采用变频调速器+变频专用交流电机+增速齿轮箱来驱动液压泵是目前最经济也是最先进的方法之一. 在地面对泵进行加载试验时, 转速就会下降并波动, 这和航空泵在飞机上的实际工作状况存在差别, 所以如何模拟飞机上航空泵的工作状况, 即提高调速系统的性能是保证实验数据可靠的基础. 良好的调速性能不仅需要性能优良的硬件设施作基础, 更需要合适的控制策略和能够实现该控制策略的控制器. 所以, 设计对负载不敏感的控制策略, 即保证转速的鲁

收稿日期: 2007-06-05

基金项目: 高新工程建设资助项目

作者简介: 白国长(1968- )男, 河南许昌人, 副教授, bai_guochang@126.com. 现工作于郑州大学机械工程学院.

棒性是该驱动系统首先应解决的问题.

## 1　系统数学模型的建立

对于地面的试验驱动系统, 如图 1所示, 是由电力电子、机械和液压组成的综合系统. 下面建立各个环节的数学模型.

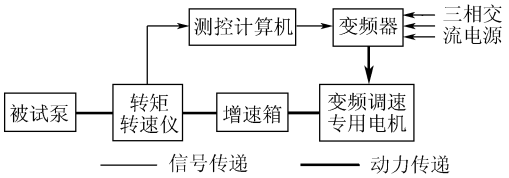



图 1　驱动系统原理图

### 1.1　变 频 器

变频调速采用矢量控制, 可以分解成为速度环、磁链环, 实现了转矩电流和励磁电流的解耦控制. 若不进行弱磁调速, 则励磁电流恒定, 变频器的传递函数为一阶惯性环节, 其时间常数 (约十几 ms)相对于电机、负载泵等机电液压器件来说很小, 常忽略不计. 这时变频器可以简化为一比例环节. 变频器输入的是控制电压 $u_c$, 输出为对应电机转速的频率 $f$, 故有

$$f = k_c u_c \tag{1}$$

$$\omega_s = 2\pi f / p_n = (2\pi k_c / p_n) u_c \tag{2}$$

式中, $k_c$ 为给定电压速度转换系数, Hz/V; $\omega_s$ 为电机同步转速, rad/s; $p_n$ 为电机极对数.

### 1.2　电　机

对于矢量控制的变频器, 有

$$\omega_s - \omega_r = \frac{T_e L_r}{p_n T_r \Psi_r^2} \tag{3}$$

$$T_e = \frac{p_n T_r \Psi_r^2}{L_r}(\omega_s - \omega_r) = \frac{p_n T_r \Psi_r^2}{L_r}(2\pi f u_c - \omega / i) = k_1 u_c - k_2 \omega \tag{4}$$

式中, $T_e$ 为电磁转矩; $\omega$ 为泵转速; $i$ 为增速箱传动比; $\omega_s$ 为电机同步转速; $\omega_r$ 为电机转速; $k_1 = 2\pi \dfrac{k_c p_n T_r \Psi_r^2}{L_r}$; $k_2 = \dfrac{p_n T_r \Psi_r^2}{i L_r}$.

### 1.3　转矩平衡方程

$$\frac{J}{p_n}\frac{\mathrm{d}\omega_r}{\mathrm{d}t} = T_e - T_{df} - B\omega_r - T_p \tag{5}$$

式中, $J$ 为电机和传动装置及负载转动惯量折合到电机轴上等效转动惯量之和, kg·m$^2$; $T_p$ 为电机的负载转矩, N·m·s$^2$/rad; $T_{df}$ 为电机的非线性摩擦转矩, N·m;

### 1.4　传动系统

传动系统包括增速齿轮箱、金属叠片联轴器及中间安装的转矩转速仪. 由于传动环节长, 中间包括的传动器件多, 若把每个器件都包括进去, 则整个系统的阶次过高, 不利于分析研究, 故把整个传动环节当作刚性来处理, 其中各个传动环节的弹性变形和齿轮间隙的影响当作干扰信号来处理, 这时 $\omega = i\omega_r$.

### 1.5　负载系统

考虑到机械传动损失, 有:

$$T_p = i\frac{q_p p_p}{2\pi\eta_m} \tag{6}$$

式中, $p_p$ 为泵出口压力, MPa; $q_p$ 为泵的排量, cm$^3$/rad; $\eta_m$ 为机械传动效率, $\eta_m = 0.85$; 试验时 $p_p$ 需要从 0到最大值之间变化, 所以 $T_p$ 在大范围内变化.

根据以上分析, 影响转速的因素有电机自身参数变化, 如电阻变化引起转速的不稳定; 传动环节如联轴器、转矩转速仪和传动轴等的弹性变形、齿轮间隙等非线性因素的影响; 被试液压泵由于 $p_p$ 或 $q_p$ 变化引起的 $T_p$ 变化等.

对于电机的调速系统, 虽然许多先进且性能优良的控制策略都有应用的报导, 但由于种种原因, 现在工业所用的调速系统大多为 PID 控制或分段的 PID 控制, 由于其鲁棒性有限, 当 $T_p$ 大范围变化时泵的转速不能恒定, 这和航空泵在飞机上实际工况不同. 滑模变结构控制 (SMC, Sliding Mode Control)有很强的鲁棒性, 其特性由预先设定的模态决定, 与负载干扰和自身参数的变化无关, 但存在输出抖振现象. 这里采用变结构控制和伪微分反馈 (PDF, Pseudo Derivative Feedback)控制相结合的控制策略, 由模糊控制器作为上层监督控制, 实时调节这两项在输出控制中的比例. 结果表明这种控制方法能有效消除常规滑模变结构控制的抖动, 且响应速度快, 抗干扰能力强, 能满足试验所需的转速精度要求.

## 2　转速的滑模变结构控制

### 2.1　滑模线的设计

由式 (5)可以看出, 泵的速度系统为一阶系统, 若按常规的方法构造切换面为

$$s = c\boldsymbol{x} = 0 \tag{7}$$

式中, $c$ 为切换系数; $\boldsymbol{x}$ 为状态变量. 这时滑动模态仅出现在原点, 在达到原点之前, 系统仅为一个线性反馈系统运行. 这意味着系统的动态特性不能由滑动模态预先规定, 动态时的鲁棒性不能得到保证, 为此需要定义一个特殊的滑模面. 这里采用一种对状态 $\boldsymbol{x}$ 积分的滑模切换线:

$$s = \boldsymbol{x} + c\int_{-\infty}^{t}\boldsymbol{x}(t)\,\mathrm{d}t = 0 \tag{8}$$

则滑模运动方程为

$$\dot{\boldsymbol{x}} = -c\boldsymbol{x} \tag{9}$$

式(10)表示状态 $\boldsymbol{x}$ 以时间常数 $1/c$ 指数趋于0, 因此, 滑模运动的动态特性可以通过选择系数 $c$ 预先规定, 对于不同的积分项初始值, 积分型滑模变结构系统的动态响应也不同, 选择如下的积分初始值:

$$I_0 = \int_{-\infty}^{0}\boldsymbol{x}(t)\,\mathrm{d}t = -\frac{x_0}{c} \tag{10}$$

则所选的滑动面为

$$s = \boldsymbol{x} + c\int_{0}^{t}\boldsymbol{x}(t)\,\mathrm{d}t - \frac{x_0}{c} \tag{11}$$

当 $t=0$时, $s=0$, 系统在初始时刻就进入滑动模态, 保证了在整个动态过程中的完全鲁棒性.

2.2 SMC控制器设计

考虑到 $\omega = i\omega_n$, 把式(5)可改写成如下形式:

$$\dot{\omega} = \frac{\dot{p}_n}{J}\left(T_e - \frac{B}{i}\omega - T_p - T_{df}\right) \tag{12}$$

把式(4)代入, 考虑到参数的变化, 并把 $T_{df}$ 折算到 $T_p$ 参数变化, 式(12)可以写成

$$\dot{\omega} = (a+\Delta a)\omega + (b+\Delta b)u_c + (f+\Delta f)T_p \tag{13}$$

式中, $a = -\dot{p}_n\dfrac{k_2 + B/i}{J}$; $b = \dot{p}_n\dfrac{k_1}{J}$; $f = -\dfrac{\dot{p}_n}{J}$; $\Delta a$, $\Delta b$, $\Delta f$ 分别为 $J$, $B$ 及 $T_p$ 等参数变化引起的系数偏差. 式(13)可以写成

$$\dot{\omega} = a\omega + b(u_c + d) \tag{14}$$

式中, $d = [\Delta a\omega + \Delta b u_c + (f+\Delta f)T_p]/b$, 为 $T_p$ 及参数摄动总的偏差.

取状态变量: $x_e = \omega^{ref} - \omega$

代入式(14)得

$$\dot{x}_e = \dot{\omega}^{ref} - a\omega - b(u_c + d) = ax_e - b(u_c + d) + \dot{\omega}^{ref} - a\omega^{ref} \tag{15}$$

将积分型切换函数设计为

$$s(t) = x_e - \int_0^t (a+bk)x_e(t)\,\mathrm{d}t \tag{16}$$

式中, $k$ 为线性反馈增益. 为保证在整个动态过程中处于滑模状态, 积分项初始值取为

$$I_0 = \int_{\infty}^{0}(a+bk)x_e\,\mathrm{d}x_e = x_e(0) \tag{17}$$

由 $s(t) = \dot{s}(t) = 0$得滑模运动方程为

$$\dot{x}_e = (a+bk)x_e \tag{18}$$

通过选取增益 $k$ 使式(16)的极点位于左半平面, 则速度误差 $x_e(t)$ 指数收敛于0, 且能保证系统一开始就进入滑模面, 按预定的轨迹运动.

对于滑模控制输出, 这里采用基于等效控制的输出形式, 它包括两部分: 等效输出 $u_{eq}$ 和切换部分 $u_{sw}$. 等效部分是针对确定性系统和无干扰设计, 使切换面 $s$ 不变, 当出现外界干扰和系统参数发生变化及建模误差部分由切换部分来消除.

由 $\dot{s}=0$, $d=0$及式(16)得

$$\dot{x}_e - (a+bk)x_e = 0$$

把式(15)代入上式, 得

$$u_{eq} = -kx_e - \frac{a}{b}\omega^{ref} + \frac{1}{b}\dot{\omega}^{ref} \tag{19}$$

控制输出为

$$u = u_{eq} + u_{sw} \tag{20}$$

式中, $u_{sw} = l\,\mathrm{sgn}\,s$ 为干扰作用下的切换项. 下面证明其稳定性, 并推导出切换项的取值范围.

选取 Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2}s^2 \tag{21}$$

$$\dot{s} = \dot{x}_e - (a+bk)x_e = \dot{\omega}^{ref} - (a\omega + bu + bd) - (a+bk)x_e = \dot{\omega}^{ref} - [a\omega + b(u_{eq} + u_{sw}) + bd] - (a+bk)(\omega^{ref} - \omega) = -b(d + l\,\mathrm{sgn}\,s)$$

由 $\dot{V} = \dot{s}s = -b(d + l\,\mathrm{sgn}\,s)s \leqslant 0$, 得出稳定条件为

$$l \geqslant \left|\frac{d_{max}}{b}\right| \tag{22}$$

也就是说只要开关控制增益取为干扰的上界, 则式(20)的控制输入就能保证滑动模态的存在性和可达性.

滑模控制器的输出为

$$u = -kx_e - \frac{a}{b}\omega^{ref} + \frac{1}{b}\dot{\omega}^{ref} + l\,\mathrm{sgn}\,s \tag{23}$$

对阶跃参考输入, 有 $\dot{\omega}^{ref}=0$, 所以,

$$u = \begin{cases} k(\omega - \omega^{ref}) + l - \dfrac{a}{b}\omega^{ref} & s > 0 \\ k(\omega - \omega^{ref}) - l - \dfrac{a}{b}\omega^{ref} & s < 0 \end{cases} \tag{24}$$

2.3 抖动的智能处理

滑模变结构控制虽然有不依赖于对象的模型, 对系统参数摄动及外部干扰具有不变性的优点, 但单纯采用 SMC时, 由于滑模变结构控制是以开关高频切换而工作的, 由于计算机有限的计算速度和输出器件的频宽不是无穷高, 执行元件开关的滞后和计算控制量引起的滞后及系统惯性的共同作用, 因此在滑模面上产生了抖动, 抖动将严重影响控制的精确性, 还可能会激起系统的未建模部分的动态特性, 使系统不稳定, 而且增加了能量消耗. 由于抖振是变结构控制本身所固有的

特性, 不可能完全消除, 应采取一些措施使其限制在允许的范围内. 文献[1]提出常用的去抖动措施, 这里提出一种结合鲁棒控制和智能控制的滑模变结构控制策略.

在系统从初始点向滑模面移动时采用变结构控制, 使系统按照预定的轨迹迅速移动到滑模面, 充分发挥变结构控制响应速度快, 与参数摄动和外部干扰无关的特性; 在滑模线附近, 一种鲁棒性很强的 PDF控制方法也起作用, 它们之间的切换由模糊控制来实现: 根据 $s$的值来实时地调整滑模控制和 PDF控制的作用比例成分, 既要发挥出变结构控制抗摄动能力强的优点, 又要在滑模线附近减轻其抖动. 仿真表明这种强强联合的控制方法比单纯采用任何一种方法都有更好的控制精度和效果. 其原理如图 2所示.

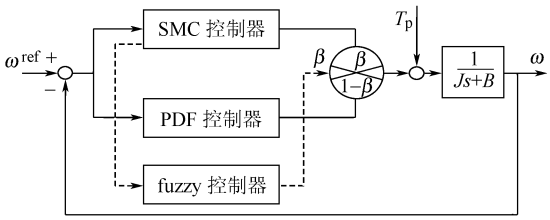



图 2　*SMC*和 *PDF* 的联合控制

模糊控制器的输入变量为 $|s|$, 输出为 β, 描述输入和输出变量的模糊子集均为: {ZR, PS, PM, PB}, 其中 ZR 为零; PS为正小; PM 为正中; PB为正大. 输入 $|s|$的论域 $U$ 和输出 β的论域 $Y$ 的大小都量化为 4个等级, 即{0, 1, 2, 3}, 模糊控制规则如表 1所示.

表 **1**　模糊控制规则表

| $\|s\|$ | ZR | PS | PM | PB |
|---|---|---|---|---|
| β | ZR | PS | PM | PB |

清晰化方法采用重心法. 清晰化的控制量由下式计算:

$$\beta = \sum_{i=1}^{m} \mu_i y_i \Big\backslash \sum_{i=1}^{m} \mu_i \qquad (25)$$

式中, $m$ 为控制规则数; $\mu_i$ 为对应规则 $R_i$ 的隶属函数值; $y_i$ 为第 $i$条准则下的输出值. 整个输出为

$$u = \beta u_{SMC} + (1-\beta) u_{PDF} \qquad (26)$$

对于 PDF控制, 这里不作详细介绍, 参见文献[2]等.

## 3　仿真与实验

### 3 1　仿　真

对该矢量控制的变频电机速度控制系统, 采用上述的变结构控制算法, 为验证控制效果, 对其进行仿真试验. 采用 MATLAB仿真软件, 编程仿真.

所采用的电机参数为: 额定功率 $P = 250\,\mathrm{kW}$; 额定转矩 $T = 1\,603\,\mathrm{N\cdot m}$; $p_n = 2$; 额定电流 $I = 460\mathrm{A}$; 转动惯量 $J_m = 6\ 01\,\mathrm{kg\cdot m^2}$; 定子电阻 $R_s = 0\ 011\,2\,\Omega$; 转子电阻 $R_r = 0\ 0116\,\Omega$; 互感 $L_m = 0\ 432\,\mathrm{mH}$; 转子绕组电感 $L_r = 0\ 716\,\mathrm{mH}$; 定子电感 $L_s = 0\ 346\,\mathrm{mH}$; $i = 3$; $J = 8\ 01\,\mathrm{kg\cdot m^2}$.

为验证所设计的控制器的效果, 对所设计的控制器加正弦周期信号干扰仿真试验. 考虑到本试验台运转时转动惯量不变, 故不作转动惯量变化的仿真试验, 电阻等参数的变化可以等效折合到负载扰动. 分别采用以下状况仿真:

参考输入 $\omega^{ref} = 600\ \mathrm{r/min}$, $T_p = 750 + 150\sin(10t)\,\mathrm{N\cdot m}$, 略大于作为负载的泵的额定转矩 50%, 并上下 20%波动.

图 3为速度响应仿真曲线, 滑模变结构控制速度响应曲线与采用智能去抖动处理后的速度响应曲线几乎重合, 都具有快响应速度和很强的抗负载干扰能力. 但控制器的输出存在比较大的差别, 图 4为变结构控制的电流输出; 图 5为采用智能去抖动处理后的电流输出.

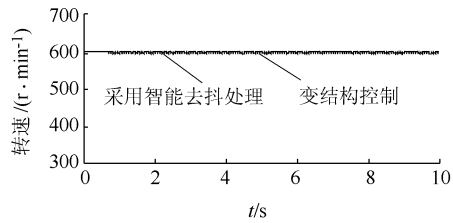



图 3　速度响应仿真曲线

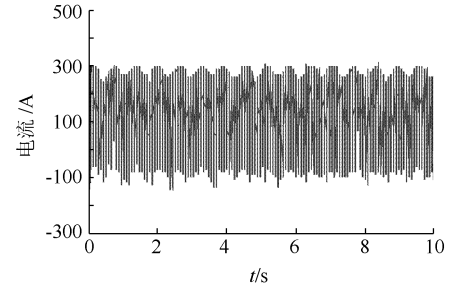



图 4　变结构控制的电流输出

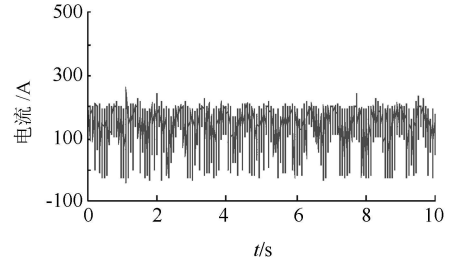



图 5　变结构控制采用智能去抖动处理后的电流输出

(下转第 **660**页)

## 参考文献 (References)

[1] 梁晓辉. 计算机生成角色行为建模研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 计算机学院, 2002
Liang Xiaohui. The research on human behavior representation of computer generated actor[D]. Beijing: School of Computer, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002(in Chinese)

[2] Cao Y U, Fukunage A S, Kahng A B. Cooperative mobile robotics: antecedents and directions[C]//Published in Autonomous Robots, 1997, 4(1): 7-27

[3] Bennewitz M, Burgad W, Thrun S. Optimizing schedules for prioritized path planning of multi-robot systems[J]. Proc Int Conf on Robotics and Automation, 2001, 1: 271-276

[4] Hogg R W, Rankin A L, Romelitis S I, et al. Algorithms and sensors for small robot path following[C]//Proc 2002 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Washington D C: [s n.], 2002: 3850-3857

[5] Reynolds C W. Flocks, birds and schools: a distributed behavioral model[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 25-34

[6] Anthony Lewis M, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures autonomous[J]. Autonomous Robots, 1997, 4: 387-403

[7] Kamphuis A, Overmars M H. Finding paths for coherent groups using clearance[C]//In Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2004: 19-28

[8] Tabuada P, Pappas G J, Lima P. Motion feasibility of multi-agent formations[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(3): 387-391

[9] Hao Yongxing, Agrawal S K. Planning and control of UGV formations in a dynamic environment: a practical framework with experiments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 51: 101-110

[10] 王凤林. 坦克兵营连战术教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991
Wang Fenglin. The course for tank camp tactics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991(in Chinese)

[11] 赵沁平. DVENET分布式虚拟现实应用系统运行平台与开发工具[M]. 北京: 科学出版社, 2005
Zhao Qinping. DVENET distributed virtual environment application system runtime platform and development tools[M]. Beijing: Science Press, 2005(in Chinese)


(责任编辑: 张 嵘)

(上接第 655页)

对比图 3中的 2条曲线、图 4和图 5,可以看出采用智能去抖动处理后的滑模变结构控制具有很强的鲁棒性,且输出的抖动现象明显减小.

### 3.2 实 验

对上述算法进行离散化处理,在工控机上实现. $p_p = 25 + 5\sin(10t)$ MPa, 实测速度曲线如图 6所示. 数据显示系统在干扰的作用下速度的变化小于 0.5%.

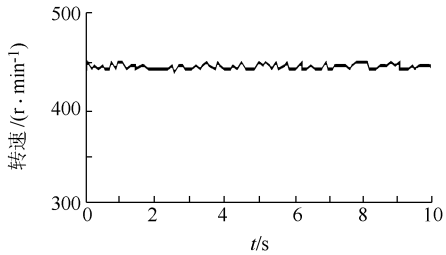



图 6 干扰作用下的速度曲线

## 4 结束语

对于地面试验采用变频调速驱动的航空泵试验台, 为使试验时和飞机上工作状态相同, 采用模糊控制监督下结合 SMC和 PDF的控制方法, 系统具有响应速度快, 与干扰和参数变化无关的优点, 且能降低抖振. 仿真与实验结果表明这种方法能有效地消除由于负载变化等因素对泵速度的影响.


## 参考文献 (References)

[1] Young K D, Utkin V I. A control engineer's guide to sliding mode control[J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 1999, 7(3): 328-342

[2] Phelan R M, Chen L. Subvariable control 1983, technical report MSD-84-02[M]. Ithaca, NY: Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, 1984

[3] Utkin V I. Variable structure systems with sliding modes[J]. IEEE Transactions Automatic Control, 1977, 22(2): 212-222

[4] Barrero F, Gonzalez A, Torralba A, et al. Speed control of induction motors using a novel fuzzy sliding-mode structure[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002, 10(3): 375-383

[5] 王岩, 付永领. 模糊滑模迭代学习控制算法在液压系统中应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(1): 87-89
Wang Yan, Fu Yongling. Application of fuzzy sliding mode iterative learning control algorithm in hydraulic servo system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(1): 87-89(in Chinese)


(责任编辑: 赵海容)