

基于自适应 Backstepping 设计的 TCSC 非线性鲁棒控制器

李文磊¹, 张智焕¹, 井元伟², 刘晓平²

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 电力系统是强非线性的动态大系统, 在运行中总要受到外部干扰和内部干扰的影响, 从而对其稳定运行造成严重威胁. 本文针对带有 TCSC 单机无穷大母线系统的三阶鲁棒模型, 在考虑阻尼系数未知及系统受外部扰动的影响下, 将自适应 backstepping 方法与非线性 L_2 增益干扰抑制理论融合, 构造出系统的存贮函数, 并获得非线性自适应鲁棒控制器及参数替换律. 所得控制器不仅能够保证系统状态有界, 而且能够有效抑制干扰对系统输出的影响. 通过对单机系统的仿真结果表明采用该方法的控制器优于传统的控制器.

关键词: 电力系统; 灵活交流输电系统; 鲁棒控制; 参数不确定性; 自适应 backstepping 方法; 干扰抑制

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A

Nonlinear robust control based on adaptive backstepping design for TCSC

LI Wen-lei¹, ZHANG Zhi-huan¹, JING Yuan-wei², LIU Xiao-ping²

(1. Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China;

2. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: As nonlinear dynamic and large scale systems, electric power systems in operation are always influenced by the external and internal disturbances; and thus the serious threat to stable operation of systems exists. In this paper, based on the three-order robust models of single machine-infinite bus system with thyristor controlled series compensation (TCSC) and under the conditions that systems have unknown damping coefficient and external disturbances, the storage functions of the system are constructed by integrating nonlinear L_2 gain disturbances attenuation theory smoothly into backstepping design methodology. A nonlinear adaptive robust controller and a parameter update law are obtained. The derived controller can not only ensure that the system states are bounded, but also can attenuate the influences of disturbances on system output. The simulation results on single machine suggest that the controller designed by this methodology was superior to conventional controller in performances.

Key words: power systems; flexible AC transmission system; robust control; parameter uncertainty; adaptive backstepping; disturbance attenuation

1 引言(Introduction)

随着电力系统容量的不断增加和电网结构的日益复杂, 晶闸管控制串联补偿器(TCSC)作为柔性交流输电系统(FACTS)^[1]中的一员, 能够在远距离输电系统中经济、有效地减少输电线路的等效电气距离, 改善阻尼, 控制潮流, 提高电力系统的稳定性, 因此它的应用正日益广泛. 而对其先进控制方式进行研究, 以便进一步提高系统稳定性则显得十分重要.

传统的 TCSC 的控制方式是以近似线性化模型为基础, 没有考虑系统的非线性特性^[2,3]. 而反馈线

性化方法虽然基于系统的非线性模型进行设计^[4,5], 但它不仅对原系统进行了线性化, 且要求系统模型必须精确可知; 同时系统模型中又往往忽略了 TCSC 本身的电磁暂态过程^[6]. 尽管将该方法与其它鲁棒控制方法结合可望解决参数不确定性问题, 但最终所设计的控制器针对的毕竟也是线性化后的系统^[7].

自适应 backstepping 方法作为一种非线性控制的设计工具, 近来引起许多理论工作者的极大关注^[8-10]. 该方法不仅能够处理系统常参数的不确定

性,设计过程简明,易为工程人员所接受;而且反馈控制律及相关 Lyapunov 函数的构造过程是系统的^[11].其中文献[8]只针对励磁系统应用递推方法给出了带有内外扰动时的设计结果.

本文基于带有 TCSC 的单机无穷大母线系统,在阻尼系数不能精确测量及受外部扰动影响的情况下,使用自适应 backstepping 方法设计了 TCSC 非线性控制器.设计过程及仿真结果表明该控制器不仅能保证系统状态有界,而且能够抑制干扰对系统输出的影响.

2 系统鲁棒模型的建立 (Robust model of system)

考虑带有 TCSC 的单机无穷大母线系统 (SMIB),系统结构如图 1 所示.

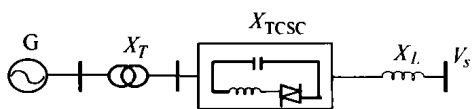


图 1 单机无穷大系统结构

Fig. 1 A single machine infinite bus system with TCSC

假设发电机用暂态电抗后的恒定电压源表示,利用一阶惯性环节等效 TCSC 本身的动态过程,则可建立 TCSC 控制系统的数学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} \left(P_m - E'_q V_s y_{\text{TCSC}} \sin \delta - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) \right) + w_1, \\ \dot{y}_{\text{TCSC}} = -\frac{1}{T_{\text{TCSC}}} (y_{\text{TCSC}} + y_{\text{TCSC}0} + u) + w_2. \end{cases} \quad (1)$$

其中, δ 为发电机转子运行角,单位 rad; ω 是发电机转子速度; P_m 为原动机输出的机械功率; H 为发电机转子的转动惯量,单位 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; T_{TCSC} 为 TCSC 的惯性时间常数,单位 s; D , E'_q 分别为阻尼系数和发电机 q 轴暂态电势; V_s 为无穷大母线电压; $y_{\text{TCSC}} = 1/(X'_{d\Sigma} - X_{\text{TCSC}})$ 为整个系统的导纳, $y_{\text{TCSC}0}$ 为其稳态值; $X'_{d\Sigma} = X'_d + X_T + X_L$, 为发电机与无穷大系统间的等值电抗; u 为控制. 其它无特殊说明的单位均为标么值. w_1 和 w_2 为属于 L_2 空间的未知函数,分别为发电机转子与系统导纳上叠加的干扰.

对于系统(1),为使其变为适合 backstepping 的形式,可令

$$x_1 = \delta - \delta_0, x_2 = \omega - \omega_0, x_3 = y_{\text{TCSC}} - y_{\text{TCSC}0}$$

其中 $\delta_0, \omega_0, y_{\text{TCSC}0}$ 表示对应变量的初始值. 则系统(1)转化为如下形式

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (2a)$$

$$\dot{x}_2 = \theta x_2 + k_1 P_m - k_2 (x_3 + y_{\text{TCSC}0}) \sin(\delta_0 + x_1) + w_1, \quad (2b)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{T_{\text{TCSC}}} (-x_3 + u) + w_2, \quad (2c)$$

$$z = \begin{bmatrix} q_1 x_1 \\ q_2 x_2 \end{bmatrix}. \quad (2d)$$

其中, $k_1 = \frac{\omega_0}{H}$, $k_2 = \frac{\omega_0 E'_q V_s}{H}$ 为已知常数; $\theta = -\frac{D}{H}$ 为未知参量; $z = [q_1 x_1 \quad q_2 x_2]^T$ 为调节输出; q_1 和 q_2 是非负的权重系数,它们表示 x_1 和 x_2 之间的加权比重.

3 非线性自适应鲁棒控制器的设计 (Design of nonlinear adaptive robust controller)

系统(2)是同时含有不确定参数及外部干扰的非线性系统,以下考虑如何应用自适应 backstepping 方法进行非线性鲁棒控制器的设计.如果能找到一个控制 u 使如下的耗散不等式成立,即

$$V(x(t)) - V(x(0)) \leq \int_0^t (\gamma^2 \|w\|^2 - \|z\|^2) dt, \quad (3)$$

则表明系统从干扰到调节输出的 L_2 增益不大于 γ , 亦即可以设计出所需要的鲁棒控制器

第1步 对于子系统(2a),将 x_2 看作虚拟控制,取镇定函数 $x_2^* = -c_1 x_1$, $c_1 > 0$ 为一设计常数; 令 $e_1 = x_1$, $e_2 = x_2 - x_2^*$, 则系统(2a)可表示为

$$\dot{e}_1 = e_2 - c_1 x_1. \quad (4)$$

取第一个存贮函数为

$$V_1 = \frac{\sigma}{2} e_1^2, \quad (5)$$

其中 $\sigma > 0$, 则 $\dot{V}_1 = \sigma e_1 (e_2 - c_1 x_1) = \sigma e_1 e_2 - \sigma c_1 e_1^2$.

第2步 对式(5)进行增广,从而形成第2个存贮函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2. \quad (6)$$

定义函数 $H_1 = \dot{V}_2 + \frac{1}{2} (\|z\|^2 - \gamma^2 \|w_1\|^2)$, 则有

$$\begin{aligned} H_1 = & -\alpha e_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2} w_1 - \frac{e_2}{\gamma} \right)^2 - \frac{1}{4} \gamma^2 w_1^2 + \\ & e_2 [m_1 x_1 + m_2 x_2 + \theta x_2 + k_1 P_m - \\ & k_2 (x_3 + y_{\text{TCSC}0}) \sin(\delta_0 + x_1)], \end{aligned}$$

其中

$$\alpha = \sigma c_1 - \frac{1}{2} q_1^2 - \frac{1}{2} q_2^2 c_1^2,$$

$$m_1 = \frac{c_1}{\gamma^2} - \frac{c_1}{2} q_2^2 + \sigma,$$

$$m_2 = \frac{1}{\gamma^2} + \frac{1}{2} q_2^2 + c_1.$$

取新的镇定函数

$$x_3^* = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \hat{\theta} x_2 + k_1 P_m}{k_2 \sin(\delta_0 + x_1)} - y_{\text{tsc}0},$$

其中 $\hat{\theta}$ 为参数 θ 的估计值. 则

$$H_1 = -ae_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2} w_1 - \frac{e_2}{\gamma} \right)^2 - \frac{1}{4} \gamma^2 w_1^2 + e_2 \hat{\theta} x_2.$$

第3步 增广(6)式形成下面的存贮函数

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} e_3^2 + \frac{1}{2\rho} \bar{\theta}^2, \quad (7)$$

其中 $\bar{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 为估计误差; $\rho > 0$ 为自适应增益系数; $e_3 = x_3 - x_3^*$.

定义函数 $H_2 = \dot{V}_3 + \frac{1}{2} (\|z\|^2 - \gamma^2 \|w\|^2)$;

令 $n_1 = \sin(\delta_0 + x_1)$, $n_2 = \cos(\delta_0 + x_1)$; 同时注意到 $\theta = \hat{\theta} + \bar{\theta}$ 及

$$\dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{x}_3^* =$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{T_{\text{tsc}}} (-x_3 + u) + w_2 - \\ & \frac{1}{k_2} \left(\frac{m_1 x_2 + (m_2 + \hat{\theta}) \dot{x}_2 + \dot{\hat{\theta}} x_2}{n_1} - \right. \\ & \left. \frac{(m_1 x_1 + m_2 x_2 + \hat{\theta} x_2 + k_1 P_m) x_2 n_2}{n_1^2} \right), \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} H_2 = & -ae_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2} w_1 - \frac{e_2}{\gamma} \right)^2 - \left(\frac{\gamma}{2} w_1 + \frac{(m_2 + \hat{\theta}) e_3}{k_2 n_1 \gamma} \right)^2 - \\ & \left(\frac{\gamma}{2} w_2 - \frac{e_3}{\gamma} \right)^2 - \frac{1}{4} \gamma^2 w_2^2 + \\ & \left(\frac{(m_2 + \hat{\theta}) e_3}{k_2 n_1 \gamma} \right)^2 + \left(\frac{e_3}{\gamma} \right)^2 - \frac{1}{\rho} \bar{\theta} \dot{\bar{\theta}} + e_2 \bar{\theta} x_2 - \\ & \frac{(m_2 + \hat{\theta}) e_3 \bar{\theta} x_2}{k_2 n_1} + e_3 (1/T_{\text{tsc}} (-x_3 + u) - \\ & (1/k_2) ((m_1 x_2 + (m_2 + \hat{\theta}) (\hat{\theta} x_2 + k_1 P_m - \\ & k_2 (x_3 + y_{\text{tsc}0}) \sin(\delta_0 + x_1)) + \dot{\hat{\theta}} x_2)/n_1 - \\ & (m_1 x_1 + m_2 x_2 + \hat{\theta} x_2 + k_1 P_m) x_2 n_2 / n_1^2)). \end{aligned}$$

因此,最终可选择反馈控制律

$$u =$$

$$\begin{aligned} & x_3 + T_{\text{tsc}} \left(\frac{1}{k_2} \left((m_1 x_2 + (m_2 + \hat{\theta}) (\hat{\theta} x_2 + k_1 P_m - \right. \right. \\ & \left. \left. k_2 (x_3 + y_{\text{tsc}0}) \sin(\delta_0 + x_1)) + \dot{\hat{\theta}} x_2) / n_1 - \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{(m_1 x_1 + m_2 x_2 + \hat{\theta} x_2 + k_1 P_m) x_2 n_2}{n_1^2} \right) - \right. \end{aligned}$$

$$\left(\frac{m_2 + \hat{\theta}}{k_2 n_1 \gamma} \right)^2 e_3 - \frac{e_3}{\gamma^2} \right). \quad (8)$$

参数替换律

$$\dot{\hat{\theta}} = -\dot{\bar{\theta}} = \rho \left(e_2 - \frac{(m_2 + \hat{\theta}) e_3}{k_2 n_1} \right) x_2, \quad (9)$$

通过合理选取 σ 使 $\alpha \geq 0$, 则

$$H_2 =$$

$$\begin{aligned} & -ae_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2} w_1 - \frac{e_2}{\gamma} \right)^2 - \left(\frac{\gamma}{2} w_1 + \frac{(m_2 + \hat{\theta}) e_3}{k_2 n_1 \gamma} \right)^2 - \\ & \left(\frac{\gamma}{2} w_2 - \frac{e_3}{\gamma} \right)^2 - \frac{1}{4} \gamma^2 w_2^2 \leq 0. \end{aligned}$$

令 $V(x) = 2V_3(e_1, e_2, e_3, \bar{\theta})$, 则

$$\dot{V}(x) \leq \gamma^2 \|w\|^2 - \|z\|^2. \quad (10)$$

将上式两侧分别积分得耗散不等式(3).

综上,可得出如下结论:当 $w = 0$ 时,在反馈控制律(8)及参数修正律(9)下的闭环误差系统(11)是渐近稳定的,且原系统(2)从干扰到输出具有 L_2 增益,其稳定性为: x_1, x_2 收敛于零, x_3 有界.

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - c_1 e_1, \\ \dot{e}_2 = - \left(\frac{1}{\gamma^2} + \frac{1}{2} q_2^2 \right) e_2 + (c_1 q_2^2 - \sigma) e_1 + \bar{\theta} x_2, \\ \dot{e}_3 = - \left(\left(\frac{m_2 + \hat{\theta}}{k_2 n_1 \gamma} \right)^2 + \frac{1}{\gamma^2} \right) e_3 + \bar{\theta} \frac{(m_2 + \hat{\theta}) x_2}{k_2 n_1}. \end{cases} \quad (11)$$

4 仿真研究(Simulation)

根据上文的设计结果,首先对闭环系统(11)进行了仿真.仿真参数为: $H = 8$, $c_1 = 2$, $\gamma = 0.5$, $\rho = 2$, $q_1 = 0.4$, $q_2 = 0.6$, $\sigma = 1$, $\omega_0 = 314.159$, $E'_q = 1$, $V_S = 1$. 仿真结果如图2.

从系统的状态响应曲线可以看出,系统收敛速度很快,在很短的时间内即进入稳定状态;同时,从仿真过程可以注意到 γ 的值越小,系统的参数自适应及干扰抑制效果越好.

其次,对图1所示的单机电力系统应用所设计的非线性自适应鲁棒控制器(NLARC)进行了仿真研究,并与传统PID控制器的控制性能进行了比较.系统扰动方式为 $t = 0$ s时线路首端发生三相对地短路, $t = 0.1$ s故障切除, $y_{\text{tsc}0} = 6.25$, $\delta_0 = 0.94$ rad, 功角的暂态响应曲线如图3,不确定参数的估计曲线如图4.

从系统的暂态响应曲线可以看出,与PID控制

器的作用效果相比,虽然故障发生引起系统参数的变化,但由于非线性自适应鲁棒控制器的作用,发电机功角对系统参数变化并不敏感,系统的振荡被有

效抑制,从而改善了系统的暂态特性.同时,对外加干扰也表现出较好的阻尼效果.相反,基于PID控制的仿真结果中系统因存在振荡而无法收敛.

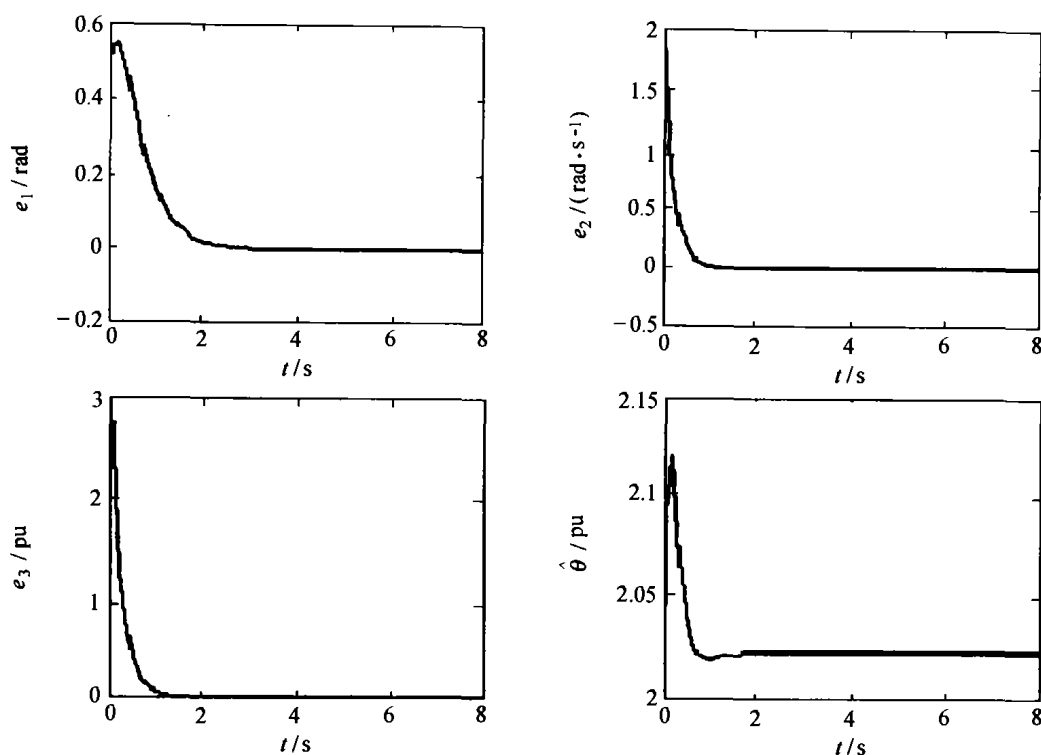


图2 闭环系统响应曲线

Fig. 2 Responding curves of the closed-loop system

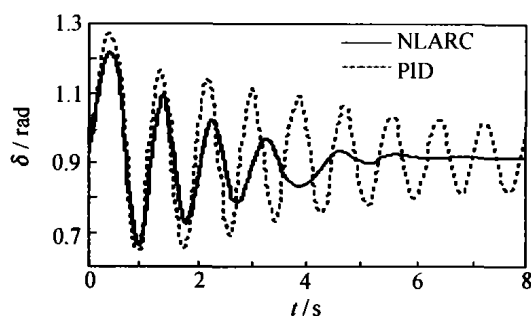


图3 单机无穷大系统的暂态响应

Fig. 3 Transient responses of the SMIB system

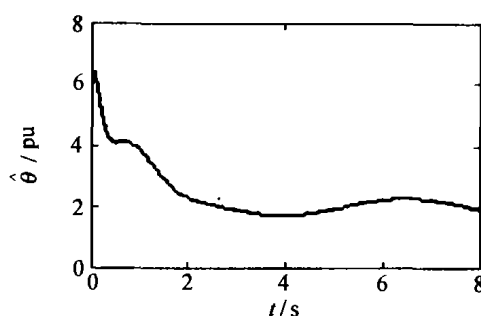


图4 未知参数的估计曲线

Fig. 4 Estimation curve of uncertain parameters

5 结论(Conclusion)

本文利用自适应 backstepping 方法设计了 TCSC 非线性自适应鲁棒控制器.由于没有对原系统进行任何线性化处理,因而完整保留了系统的非线性特性.由于该控制器的设计综合考虑了系统所受的内外扰动,因此该控制器不仅能保证系统状态有界,而且能够抑制干扰对系统输出的影响.其中在内部扰动中重点考虑了系统阻尼系数的不确定性,因此该控制器对系统参数变化具有很强的鲁棒性.同时 backstepping 方法的设计过程系统、简明,易为工程人员所接受.进一步的仿真证明了该控制器优于传统的控制器.

参考文献(References):

- [1] CIGRE and IEEE working groups on FACTS. *FACTS Overview*, IEEE Power Engineering Society [M]. New Jersey: IEEE Press, 1995.
- [2] TARANTO G N, CHOW J H. A robust frequency domain optimization technique for tuning series compensation damping controllers [J]. *IEEE Trans on Power System*, 1995, 10(3): 1219 - 1225.
- [3] SON K M, PARK J K. On the robust LQG control of TCSC for damping power system oscillations [J]. *IEEE Trans on Power System*, 2000, 15(4): 1306 - 1312.
- [4] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
(LU Qiang, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control of Power Systems* [M]. Beijing: Science Press, 1993.)

(下转第 160 页)

表1 新方法与时控制方法比较
Table 1 Comparison between new algorithm and timing control algorithm

交通量 veh/h	延误时间/(s·veh ⁻¹)		停车次数/%	
	新方法	定时控制	定时控制	新方法
8000	51.5	59.6	105	115
9000	78.8	85.8	119	128
10000	106	120	131	143
11000	130	156	147	159
12000	170	197	162	173
13000	220	240	175	187
14000	260	284	185	193
15000	315	326	190	194
16000	360	376	193	198

仿真结果表明:新方法具有较好的控制效果.

参考文献(References):

- [1] 刘智勇.智能交通控制理论及其应用[M].北京:科学出版社,2003.
(LIU Zhiyong. *Intelligent Traffic Theory and Its Application* [M]. Beijing: Science Press, 2003.)
- [2] 杜文吉,谢维信.基于证据理论的模式识别算法[J].西安电子科技大学学报,1999,26(4):533-536.
(DU Wenji, XIE Weixin. A pattern recognition method based on the theory of evidence [J]. *Journal of XiDian University*, 1999, 26(4): 533-536.)

- [3] 刘同明,夏祖勋,解洪成.数据融合技术及其应用[M].北京:国防工业出版社,1998.
(LIU Tongming, XIA Zhuxun, XIE Hongcheng. *Data Fusion Techniques and Its Applications* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.)
- [4] 乐寿长.道路交通控制[M].长沙:湖南科学技术出版社,1995.
(LE Shouchang. *Road Traffic Control* [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 1995.)
- [5] VINCE P. Real-time remedy [J]. *Traffic Technology International*, 2001, 7(6): 61-63.
- [6] 朱福喜,汤怡群,傅建明.人工智能原理[M].武汉:武汉大学出版社,2002.
(ZHU Fuxi, TANG Yiqun, FU Jianming. *Artificial Intelligence Principle* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.)
- [7] 任江涛,欧晓凌,张毅等.交通状态模式识别研究[J].公路交通科技,2003,20(2):63-67.
(REN Jiangtao, OU Xiaoling, ZHANG Yi, et al. Pattern recognition of traffic states [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2003, 20(2): 63-67.)
- [8] 刘智勇,李水友.基于信息融合技术的交通量检测方法[J].公路交通科技,2003,20(2):81-84.
(LIU Zhiyong, LI Shuiyou. Methods for the Traffic Volume Detection Based on Information Fusion Technique [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2003, 20(2): 81-84.)

作者简介:

李水友 (1978—),男,硕士,研究领域为智能控制,城市交通控制系统, E-mail: syli7884@163.com;

刘智勇 (1961—),男,博士,教授,研究领域为智能交通控制,模式识别与智能系统.

(上接第156页)

- [5] ZHOU X X, LIANG J. Nonlinear adaptive control of TCSC to improve the performance of power systems [J]. *IEE Proceedings-Generation Transmission Distribution*, 1999, 146(3): 301-305.
- [6] 尹建华,江道灼.可控串补的非线性控制对电力系统稳定性的影响研究[J].电工技术学报,1999,14(3):70-74.
(YIN Jianhua, JIANG Daozhuo. TCSC's nonlinear control influence on power system stability [J]. *Trans of China Electro Technical Society*, 1999, 14(3): 70-74.)
- [7] GAN D, QU Z, CAI H. Multimachine power system excitation control design via theories of feedback linearization control and nonlinear robust control [J]. *Int J of System Science*, 2000, 31(4): 519-527.
- [8] SHEN T L, MEI S W, LU Q, et al. Robust nonlinear control with L_2 disturbance attenuation for power system [C]// *Proc of the 38th Conf on Control and Decision*. Phoenix, USA: IEEE Press, 1999: 2491-2492.
- [9] TAN H L, CHANG J. Adaptive backstepping control of induction motor with uncertainties [C]// *Proc of American Control Conference*.

California, USA: IEEE Press, 1999: 1-5.

- [10] ALRIFAI M T, CHOW J H, TORREY D A. A backstepping nonlinear control approach to switched reluctance motors [C]// *Proc of the 37th Conf on Control and Decision*. Florida, USA: IEEE Press, 1998: 4653-4657.
- [11] KRSTIC M, KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P V. *Nonlinear and Adaptive Control Design* [M]. New York: Wiley, 1995.

作者简介:

李文磊 (1970—),男,副教授,2003年9月在东北大学获博士学位.研究兴趣为电力系统非线性控制, E-mail: liwenlei@etang.com;

张智焕 (1964—),男,副教授,浙江大学博士.目前主要从事过程建模与预测控制、智能控制和计算机集成控制等方面的研究;

井元伟 (1956—),男,教授,博士生导师.从事复杂控制系统的对称性、相似性、稳定性等的研究;

刘晓平 (1962—),男,教授,博士生导师.从事奇异系统、非线性鲁棒控制的研究.