

文章编号: 1000-8152(2009)06-0601-06

## 考虑输入约束的发电机汽门非线性自适应控制

孙丽颖, 赵 军

(东北大学 信息科学与工程学院 流程工业综合自动化教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 研究具有汽门控制和阻尼系数不确定的单机无穷大系统的暂态稳定性问题. 通过引入切换机制, 解决了输入控制量幅值约束问题. 基于主汽门控制和快速汽门控制思想, 建立了一个由汽门控制的单机无穷大汽轮发电机切换系统模型. 应用本文提出的改进自适应Backstepping方法设计了切换子系统的非线性自适应控制器和参数替换律, 同时构造出切换系统的共同Lyapunov函数, 从而保证了切换系统的稳定性. 由于设计过程中, 未用到任何线性化方法, 因而所得控制器充分利用了系统的非线性特性. 仿真结果表明了设计方法的有效性和优越性.

**关键词:** 输入约束; 切换系统; 改进自适应Backstepping; 非线性自适应控制; 汽门控制

中图分类号: TM712 文献标识码: A

## Nonlinear adaptive control for the turbine steam valve with input constraints

SUN Li-ying, ZHAO Jun

(Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry, Ministry of Education, School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

**Abstract:** We consider the transient stability of a single-machine-infinite-bus system with damping coefficient uncertainties in the turbine steam valve control. The control input constraints are solved by introducing a switched mechanism, the model of which is developed based on the concept of main steam-valve control and the fast-steam-valve control. The nonlinear adaptive controllers and parameter updating laws of the subsystems are also obtained simultaneously using the proposed modified adaptive Backstepping method. Furthermore, a common Lyapunov function of the switched system is constructed to guarantee the stability of the switched system. Since the controller design is based completely on the nonlinear dynamic system without any linearization, the nonlinear property of the dynamic system is well preserved. Finally, the simulation results demonstrate the effectiveness and advantages of the proposed control method.

**Key words:** input constraints; switched system; modified adaptive Backstepping; nonlinear adaptive control; steam valve control

### 1 引言(Introduction)

电力系统运行稳定性问题一直是至关重要的. 近代大型汽轮机的汽门开度控制不仅对电力系统大干扰稳定性的改善有极其重要的作用, 而且在改善系统小干扰稳定性、抑制低频振荡方面也有不可低估的作用, 因而越来越受到关注<sup>[1~7]</sup>.

近年来发表的一些关于汽门开度非线性控制的文章, 大都没有考虑在工程实际中输入控制量的幅值约束问题. 然而, 实际的物理系统控制输入幅值约束限制是普遍存在的. 显然, 考虑控制量限幅的汽门控制更具实际意义, 但这方面研究的文献相对较少<sup>[8~11]</sup>, 主要是由于缺少有效的方法. 文献[8]设计了多机系统励磁和汽门综合非线性分散饱和控制

器; 文献[9]采用极大值原理求解快速汽门的最优控制策略, 考虑了控制量的受约束特性, 但是其采用系统的线性化模型, 在大扰动期间, 控制器难以产生满意的控制效果; 文献[10]应用李雅普诺夫稳定性理论求解发电机快速汽门的最优控制策略, 也考虑了控制量的受约束特性, 但李雅普诺夫函数的构造是一个关键性问题; 文献[11]针对多机系统考设计了非线性分散汽门控制器, 将控制量限幅转化为任一时间点上求解一个具有不等式约束的线性最优化问题, 由于所需在线计算量过大而难以实现. 同时文献[4~11]中都未考虑阻尼系数的不确定性.

本文为了保证输入控制量幅值约束引进切换策略, 同时考虑高压缸和中低压缸的汽门控制, 设计出

输入限幅的非线性自适应控制器. 其设计思想是将汽轮机调速系统转化为一个同时含有主汽门控制子系统和快速汽门控制子系统的切换系统. 首先, 在考虑阻尼系数不能精确测量的情况下, 应用本文提出的改进自适应Backstepping方法设计切换子系统的非线性自适应控制器和参数替换律, 同时构造出切换系统的共同Lyapunov函数. 然后, 进一步设计逻辑切换律, 保证子系统控制器输入约束不被破坏. 仿真结果表明了设计方法的有效性.

## 2 问题描述(Problem statement)

考虑带有汽门控制的单机无穷大系统(SMIB), 系统结构如图1所示.

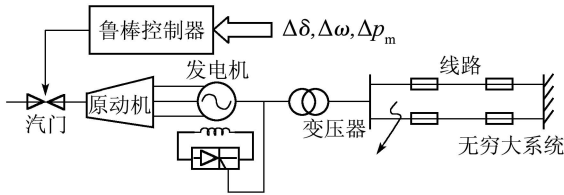


图1 具有汽门控制的单机无穷大系统

Fig. 1 A single machine infinite bus system with turbine steam valve control

对于图1所示汽轮机调速系统, 可看作是一个由主汽门控制(子系统1)和快速汽门控制(子系统2)组成的切换系统, 状态变量为: 发电机转子运行角 $\delta$ , 转子角速度 $\omega$ 和原动机总的输出机械功率 $P_m$ .

假设高压缸输出功率只受高压缸调节门, 即主汽门控制, 其约束为 $u_{1\min} \leq u_1 \leq u_{1\max}$  ( $u_1$ 为主汽门控制器,  $u_{1\min}$ 和 $u_{1\max}$ 分别为其最小和最大值), 中低压缸输出功率只受中低压缸调节门, 即快速汽门控制, 其约束为 $u_{2\min} \leq u_2 \leq u_{2\max}$  ( $u_2$ 为快速汽门控制器,  $u_{2\min}$ 和 $u_{2\max}$ 分别为其最小和最大值).  $P_m = P_H + P_{ML}$  ( $P_H$ 和 $P_{ML}$ 分别为高压缸和中低压缸输出机械功率). 由于子系统1只调节主汽门, 因而中低压缸输出功率不变, 即 $\dot{P}_{ML} = 0$ , 则 $\dot{P}_m = \dot{P}_H$ ; 子系统2只调节快速汽门, 因而高压缸输出功率不变, 即 $\dot{P}_H = 0$ , 则 $\dot{P}_m = \dot{P}_{ML}$ . 则子系统1状态方程<sup>[1]</sup>为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{H}(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{H}(P_H + P_{ML} - \frac{E'_q V_s}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta), \\ \dot{P}_m = \dot{P}_H = -\frac{1}{T_{H\Sigma}}(P_H - C_H P_{m0}) + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} u_1, \\ u_{1\min} \leq u_1 \leq u_{1\max}. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $T_{H\Sigma}$ 为高压缸等效时间常数;  $C_H$ 为高压缸功率分配系数, 约为0.3;  $H$ 为发电机转子的转动惯量;

$D, E'_q$ 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;  $X'_{d\Sigma}$ 为发电机与无穷大系统之间的等值电抗;  $P_{m0}, \omega_0$ 为总机械功率和角速度稳态值.

子系统2状态方程<sup>[1]</sup>为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{H}(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{H}(P_H + P_{ML} - \frac{E'_q V_s}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta), \\ \dot{P}_m = \dot{P}_{ML} = \\ -\frac{1}{T_{ML\Sigma}}(P_{ML} - C_{ML} P_{m0}) + \frac{C_{ML}}{T_{ML\Sigma}} u_2, \\ u_{2\min} \leq u_2 \leq u_{2\max}. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $T_{ML\Sigma}$ 为中低压缸等效时间常数;  $C_{ML}$ 为中低压缸功率分配系数, 约为0.7,  $C_H + C_{ML} = 1$ .

通常情况下阻尼系数 $D$ 难以精确测量<sup>[3]</sup>, 因此其中不可避免包含一定的不确定性, 现假设 $D$ 为不确定常参数, 从而 $\theta = -D/H$ 亦为不确定常参数.

对于切换子系统1和子系统2, 选取状态变量:

$$z_1 = \delta - \delta_0, z_2 = \omega - \omega_0, z_3 = P_m - P_{m0},$$

其中 $(\delta_0, \omega_0, P_{m0})$ 表示系统稳态运行的工作点(两个子系统的共同平衡点). 为了便于设计, 下面进行变量替换, 令 $x_1 = z_1, x_2 = z_2, x_3 + x_4 = z_3$ , 其中

$$x_3 = P_H - C_H P_{m0}, x_4 = P_{ML} - C_{ML} P_{m0},$$

将状态变量增维, 变成4阶系统. 令

$$\frac{\omega_0}{H} = k_1, \frac{\omega_0}{H} P_{m0} = a_0, -\frac{\omega_0 E'_q V_s}{H X'_{d\Sigma}} = k_2,$$

则动态方程(1)和(2)分别转化为(3)和(4):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \theta x_2 + k_1 x_3 + k_1 x_4 + a_0 + k_2 \sin(x_1 + \delta_0), \\ \dot{x}_3 = -\frac{1}{T_{H\Sigma}} x_3 + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} u_1, u_{1\min} \leq u_1 \leq u_{1\max}, \\ \dot{x}_4 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \theta x_2 + k_1 x_3 + k_1 x_4 + a_0 + k_2 \sin(x_1 + \delta_0), \\ \dot{x}_3 = 0, \\ \dot{x}_4 = -\frac{x_4}{T_{ML\Sigma}} + \frac{C_{ML}}{T_{ML\Sigma}} u_2, u_{2\min} \leq u_2 \leq u_{2\max}. \end{cases} \quad (4)$$

本文的控制目标是在考虑内部不确定参数及输入幅值受约束条件下, 设计非线性自适应控制器, 以调节发电机功角和频率至稳态运行点的某个领域.

### 3 发电机汽门非线性自适应控制(Nonlinear adaptive control for the turbine steam valve)

#### 3.1 控制器和参数替换律设计(Controller and parameter updating law design)

下面将对于阻尼系数不确定的切换子系统(3)和(4), 应用改进自适应Backstepping方法设计发电机汽门非线性自适应控制器, 同时构造出共同Lyapunov函数.

由于子系统1和子系统2的前两阶动态相同, 因而前2步设计过程也相同.

控制器的设计步骤为

**第1步** 对于系统(3)和(4)的第1阶, 定义 $e_1 = x_1$ , 其动态为

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 = x_2. \quad (5)$$

将 $x_2$ 视为虚拟控制并且定义 $e_2 = x_2 - x_2^*$ , 选择 $x_2^* = -(\varphi_1(|e_1|) + c_1)e_1$ ,  $c_1 > 0$ 为一设计常数,  $\varphi_1(\cdot)$ 为待设计的 $K$ 类函数, 则 $e_1$ 的动态可表示为

$$\dot{e}_1 = -(\varphi_1(|e_1|) + c_1)e_1 + e_2. \quad (6)$$

令系统(3)和(4)第1阶的共同Lyapunov函数为 $V_1 = \frac{1}{2}e_1^2$ , 则 $V_1$ 沿系统(6)解轨迹, 对时间的导数

$$\dot{V}_1 = e_1\dot{e}_1 = -(\varphi_1(|e_1|) + c_1)e_1^2 + e_1e_2,$$

选择 $\varphi_1(|e_1|) = \frac{1}{3}\varepsilon_1 e_1^2$ ,  $\varepsilon_1 > 0$ 为一设计常数. 很显然, 当 $e_2 = 0$ 时, 有 $\dot{V}_1 < 0$ .

**第2步** 对 $V_1$ 进行增广, 形成子系统1和子系统2前两阶的共同Lyapunov函数为 $V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2$ .

注意到

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{x}_2^* = \\ &\theta x_2 + k_1 x_3 + k_1 x_4 + a_0 + \\ &k_2 \sin(x_1 + \delta_0) + \varepsilon_1 e_1^2 x_2 + c_1 x_2, \end{aligned}$$

且有 $x_3 + x_4 = z_3$ , 则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = \\ &-(\varphi_1(|e_1|) + c_1)e_1^2 + e_2[e_1 + \theta x_2 + k_1 x_3 + \\ &k_1 x_4 + a_0 + k_2 \sin(x_1 + \delta_0) + \varepsilon_1 e_1^2 x_2 + c_1 x_2]. \end{aligned}$$

将 $x_3$ 视为虚拟控制并且定义 $e_3 = z_3 - z_3^*$ , 令

$$\begin{aligned} z_3^* &= \frac{1}{k_1}[-e_1 - a_0 - k_2 \sin(x_1 + \delta_0) - \hat{\theta} x_2 - \\ &\varepsilon_1 e_1^2 x_2 - c_1 x_2 - (\varphi_2(|e_2|) + c_2)e_2], \end{aligned}$$

$c_2 > 0$

为一设计常数,  $\varphi_2(\cdot)$ 为待设计的 $K$ 类函数,  $\hat{\theta}$ 为 $\theta$ 的估

计值, 定义估计误差 $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ , 则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -(\varphi_1(|e_1|) + c_1)e_1^2 - (\varphi_2(|e_2|) + c_2)e_2^2 + \\ &\tilde{\theta}e_2x_2 + k_1e_2e_3, \end{aligned}$$

选择 $\varphi_2(|e_2|) = \frac{1}{3}\varepsilon_2 e_2^2$ ,  $\varepsilon_2 > 0$ 为一设计常数.

**第3步** 对 $V_2$ 进行增广, 形成切换系统的共同Lyapunov函数为

$$V = V_2 + \frac{1}{2}e_3^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\theta}^2, \quad (7)$$

式中 $\gamma > 0$ 为给定的自适应增益系数.

下面分别设计各子系统的控制器:

对于子系统1, 注意到

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 &= \dot{z}_3 - \dot{z}_3^* = \\ &-\frac{1}{T_{H\Sigma}}x_3 + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}}u_1 + \frac{1}{k_1}[x_2 + k_2 \cos(x_1 + \\ &\delta_0)x_2 + \hat{\theta}x_2 + 2\varepsilon_1 e_1 x_2^2 + \hat{\theta}x_2 + \varepsilon_1 e_1^2 x_2 + \\ &c_1 x_2 + \varepsilon_2 e_2^2 e_2 + c_2 e_2], \end{aligned}$$

且 $\theta = \hat{\theta} + \tilde{\theta}$ 则有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_2 + e_3 \dot{e}_3 - \frac{1}{\gamma}\tilde{\theta}\dot{\hat{\theta}} = \\ &-(\varphi_1(|e_1|) + c_1)e_1^2 - (\varphi_2(|e_2|) + \\ &c_2)e_2^2 + \tilde{\theta}[-\frac{1}{\gamma}\dot{\hat{\theta}} + e_2x_2 + \frac{1}{k_1}(\varepsilon_1 e_1^2 + \\ &c_1 + \varepsilon_2 e_2^2 + c_2 + \hat{\theta})e_3x_2] + e_3\{k_1e_2 - \\ &\frac{1}{T_{H\Sigma}}x_3 + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}}u_1 + \frac{1}{k_1}[x_2 + 2\varepsilon_1 e_1 x_2^2 + \\ &k_2 \cos(x_1 + \delta_0)x_2 + \hat{\theta}x_2 + \\ &(\varepsilon_2 e_2^2 + c_2)(\varepsilon_1 e_1^2 + c_1)x_2 + (\hat{\theta} + \varepsilon_1 e_1^2 + \\ &c_1 + \varepsilon_2 e_2^2 + c_2)(k_1 z_3 + a_0 + \\ &k_2 \sin(x_1 + \delta_0) + \hat{\theta}x_2)\}. \end{aligned} \quad (8)$$

最终可选择反馈控制律

$$\begin{aligned} u_1 &= \\ &\frac{T_{H\Sigma}}{C_H}\{-k_1e_2 + \frac{1}{T_{H\Sigma}}x_3 - \frac{1}{k_1}[\hat{\theta}x_2 + 2\varepsilon_1 e_1 x_2^2 + \\ &x_2 + k_2 \cos(x_1 + \delta_0)x_2 + (\varepsilon_2 e_2^2 + c_2)(\varepsilon_1 e_1^2 + \\ &c_1)x_2 + (\hat{\theta} + \varepsilon_1 e_1^2 + c_1 + \varepsilon_2 e_2^2 + c_2)(k_1 z_3 + a_0 + \\ &\hat{\theta}x_2 + k_2 \sin(x_1 + \delta_0))\} - (\varphi_3(|e_3|) + c_3)e_3\}. \end{aligned} \quad (9)$$

其中:  $c_3 > 0$ 为一设计常数,  $\varphi_3(\cdot)$ 为待设计的 $K$ 类函数, 可选择 $\varphi_3(|e_3|) = \frac{1}{3}\varepsilon_3 e_3^2$ ,  $\varepsilon_3 > 0$ 为一设计常数. 选择参数替换律

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma[e_2 + \frac{1}{k_1}(\hat{\theta} + \varepsilon_1 e_1^2 + c_1 + \varepsilon_2 e_2^2 + c_2)e_3]x_2.$$

在反馈控制律(9)下,子系统1的闭环误差系统为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\left(\frac{1}{3}\varepsilon_1 e_1^2 + c_1\right)e_1 + e_2, \\ \dot{e}_2 = k_1 e_3 - \left(\frac{1}{3}\varepsilon_2 e_2^2 + c_2\right)e_2 - e_1 + \tilde{\theta}x_2, \\ \dot{e}_3 = -k_1 e_2 - \left(\frac{1}{3}\varepsilon_2 3e_3^2 + c_3\right)e_3 + \\ \frac{1}{k_1}(\hat{\theta} + \varepsilon_1 e_1^2 + c_1 + \varepsilon_2 e_2^2 + c_2)\tilde{\theta}x_2. \end{cases} \quad (10)$$

对于子系统2,可以采用同样的方法进行设计,为了避免重复,只给出设计结果.

反馈控制律为

$$\begin{aligned} u_2 = & \frac{T_{ML\Sigma}}{C_{ML}} \left\{ -k_1 e_2 + \frac{1}{T_{ML\Sigma}} x_4 - \frac{1}{k_1} [\dot{\hat{\theta}}x_2 + \right. \\ & 2\varepsilon_1 e_1 x_2^2 + x_2 + k_2 \cos(x_1 + \delta_0)x_2 + \\ & (\varepsilon_2 e_2^2 + c_2)(\varepsilon_1 e_1^2 + c_1)x_2 + (\hat{\theta} + \varepsilon_1 e_1^2 + \\ & c_1 + \varepsilon_2 e_2^2 + c_2)(k_1 z_3 + a_0 + \hat{\theta}x_2 + \\ & \left. k_2 \sin(x_1 + \delta_0)) \right\} - (\varphi_3(|e_3|) + c_3)e_3. \end{aligned} \quad (11)$$

参数替换律仍为

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma[e_2 + \frac{1}{k_1}(\hat{\theta} + \varepsilon_1 e_1^2 + c_1 + \varepsilon_2 e_2^2 + c_2)e_3]x_2.$$

闭环误差系统

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\left(\frac{1}{3}\varepsilon_1 e_1^2 + c_1\right)e_1 + e_2, \\ \dot{e}_2 = k_1 e_3 - \left(\frac{1}{3}\varepsilon_2 e_2^2 + c_2\right)e_2 - e_1 + \tilde{\theta}x_2, \\ \dot{e}_3 = -k_1 e_2 - \left(\frac{1}{3}\varepsilon_2 3e_3^2 + c_3\right)e_3 + \\ \frac{1}{k_1}(\hat{\theta} + \varepsilon_1 e_1^2 + c_1 + \varepsilon_2 e_2^2 + c_2)\tilde{\theta}x_2. \end{cases} \quad (12)$$

从系统(10)和(12)可以看出,切换子系统所对应的闭环误差系统是相同的.

**注 1** 改进自适应Backstepping设计方法,在反馈控制律的递推设计中,对虚拟镇定函数的选取,引入了K类函数 $\varphi_i(\cdot)$ ,  $i = 1, 2, 3$ ,使得在误差较大时加快了系统的收敛速度(因 $\dot{V}$ 较传统的更小),但随着 $t$ 增加,误差减小, $\dot{V}$ 逐渐接近传统自适应Backstepping设计的 $\dot{V}$ (K类函数的作用),从而控制器增益也趋于传统自适应Backstepping所设计的.

**注 2** 反馈控制律(9)和(11)中的参数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 都取0时,则退化为传统自适应Backstepping方法的结果.

### 3.2 稳定性分析(Stability analysis)

对于切换系统的共同Lyapunov函数(7),分别沿

子系统1和子系统2的闭环误差系统的解轨迹,对时间的导数均为

$$\dot{V} = -\sum_{i=1}^3 (\varphi_i(|e_i|) + c_i)e_i^2 \leq -\sum_{i=1}^3 c_i e_i^2 \leq 0.$$

由LaSalle-Yoshizawa定理<sup>[12]</sup>可知,闭环系统的平衡点是局部渐近稳定的.又由共同Lyapunov函数保证切换系统在任意切换律下都是渐近稳定的<sup>[13]</sup>.

### 3.3 切换律设计(Switching law design)

由于共同Lyapunov函数保证了切换系统在任意切换律下的稳定性,因而可以设计逻辑切换律,保证控制器的幅值约束不被破坏.本文采用磁滞切换律<sup>[14]</sup>.

磁滞切换律为 $\sigma(0) = 1$ ,对于 $t > 0$ ,如果 $\sigma(t^-) = i \in \{1, 2\}$ 并且 $u_{i \min} \leq u_i \leq u_{i \max}$ ,则保持 $\sigma(t) = i$ .另一方面,如果 $\sigma(t^-) = 1$ 但是 $u_1 < u_{1 \min}$ 或 $u_1 > u_{1 \max}$ ,则 $\sigma(t) = 2$ ;类似地,如果 $\sigma(t^-) = 2$ 但是 $u_2 < u_{2 \min}$ 或 $u_2 > u_{2 \max}$ ,则 $\sigma(t) = 1$ .其中 $\sigma(t) : [0, \infty) \rightarrow \{1, 2\}$ 表示切换信号,是分段常值的, $\sigma(t) = 1$ 表示运行第1个子系统, $\sigma(t) = 2$ 表示运行第2个子系统; $u_{i \min}$ 和 $u_{i \max}$ 分别表示主汽门或快速汽门开度的最小和最大值.

**注 3** 当同时考虑高压缸和中低压缸控制时,汽门控制是一个有冗余控制量的问题<sup>[11]</sup>,即 $u_1, u_2$ 不能同时超出约束条件,可以避免来回切换,但存在各控制量如何在各自的限幅范围之内协调配合以达到控制目标要求.

### 4 仿真结果(Simulation results)

根据上节的设计结果,对图1所示系统,进行暂态稳定性仿真实验.并将本文提出的发电机汽门非线性自适应控制策略与传统自适应Backstepping方法设计的主汽门控制器的作用效果进行比较.

系统参数<sup>[7]</sup>为

$$V_s = 1, E'_q = 1.2804, T_{H\Sigma} = 0.2,$$

$$T_{ML\Sigma} = 0.35, X'_d = 0.3, X_T = 0.1,$$

$$X_L = 0.08, C_H = 0.3, C_{ML} = 0.7, H = 10,$$

$u_1$ 和 $u_2$ 的上限为0.148,下限为-0.852;系统稳态运行工作点选为: $\delta_0 = 57.3^\circ$ ,  $\omega_0 = 314.159 \text{ rad/s}$ ,  $P_{m0} = 0.852$ .

下面给出汽门开度幅值越限和没有越限情况下,在两种控制作用下系统暂态响应仿真实验结果.

1) 发电机汽门开度幅值越限(大扰动)时的情况,仿真初始条件为: $\delta(0) = 71.2^\circ$ ,其他状态变量不变.仿真结果如图2和图3所示.

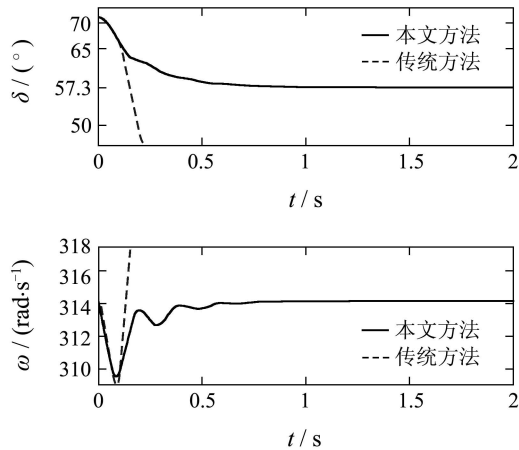


图 2 初始条件为1)时状态响应曲线

Fig. 2 State response curves with the initial condition 1)

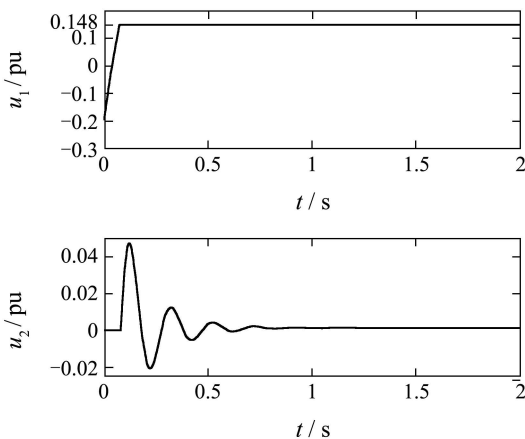


图 3 初始条件为1)时控制输入曲线

Fig. 3 The control input curves with the initial condition 1)

从图2可以看出, 采用基于传统自适应Backstepping设计的单个主汽门控制已经不能使系统稳定运行, 而采用本文设计的控制器和切换策略仍能在较短的时间内使系统稳定运行, 具有更强的鲁棒性. 图3表示在切换信号 $\sigma(t)$ 作用下控制输入曲线, 开始运行子系统1, 主汽门控制起作用. 当主汽门控制 $u_1$ 超出约束(0.148 pu)时, 切换到子系统2, 由快速汽门控制 $u_2$ 继续作用使整个汽轮机调速系统镇定. 在逻辑切换律 $\sigma(t)$ 的控制作用下, 保证了实际控制系统中的限幅约束不被破坏.

2) 发电机汽门开度幅值没有越限(小扰动)时的情况, 仿真初始条件为:  $\delta(0) = 57.8^\circ$ 其他状态变量不变. 仿真结果如图4所示.

从图 4 可以看出, 虽然使用基于传统自适应Backstepping方法设计的单个主汽门控制器, 也可以使系统镇定, 但是采用本文提出的改进自适应Backstepping方法设计的控制器, 系统收敛速度更快( $K$ 类函数的作用).  $K$ 类函数中的可调参数 $\epsilon_i$ ,

可以自由调节来改变系统的响应速度, 用以满足实际的需求. 当误差较大时可以选取较小的 $\epsilon_i$ , 使得初期控制器增益不会增加很多, 当误差较小时可以选取较大的 $\epsilon_i$ , 提高暂态响应性能. 这个性质是基于传统自适应Backstepping设计所没有的, 这是由于 $K$ 类函数的选择而得到含有 $\epsilon_i$ 的误差动态所致.

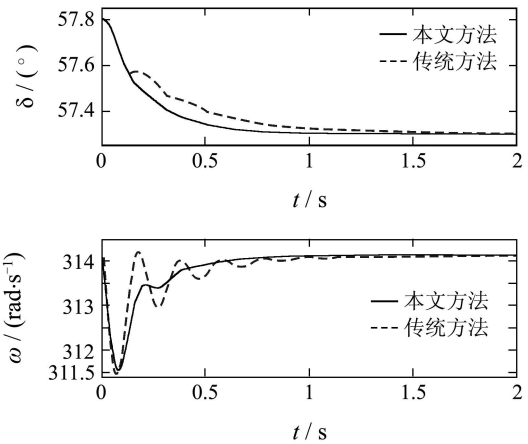


图 4 初始条件为2)时状态响应曲线

Fig. 4 State response curves with the initial condition 2)

**注 4** 单独使用主汽门控制或快速汽门控制时的闭环系统前两阶动态相同. 本文以主汽门控制为例说明.

### 5 结论(Conclusions)

本文利用改进自适应Backstepping方法设计了发电机主汽门控制子系统和快速汽门控制子系统非线性自适应控制器, 同时构造出切换系统的共同Lyapunov函数, 保证了系统在任意切换律下的稳定性, 进一步的逻辑切换律的设计, 保证了每个控制器的物理约束不被破坏, 从而稳定有效地工作, 更具实际意义. 同时, 在控制器设计过程中, 重点考虑了系统中的阻尼系数不确定性, 并给出其动态估计. 通过 $K$ 类函数的引入, 改善了系统的暂态响应. 在切换律的设计过程中, 采用磁滞切换, 避免了由于频繁切换而造成机械阀门的损坏老化. 仿真结果证明了本文设计方案的有效性和优越性.

### 参考文献(References):

[1] 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.)  
 [2] CHEN H, JI H B, WANG B, et al. Coordinated passivation techniques for the dual-excited and steam-valving control of synchronous generators[J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2006, 153(1): 69 - 73.

- [3] LI W L, LIU S R, JIANG G Y, et al. Adaptive robust Backstepping design for turbine valve controller[C] // *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006, 2: 7439 – 7443.
- [4] 蒋铁铮, 陈陈, 艾芊. 汽轮发电机主汽门开度的非线性最优预测控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 458 – 462.  
(JIANG Tiezheng, CHEN Chen, AI Qian. Nonlinear optimal predictive controller for main steam valve of turbine generator[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 458 – 462.)
- [5] 马进, 席在荣, 梅生伟. 基于哈密顿理论的发电机汽门鲁棒非线性控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(18): 7 – 15.  
(MA Jin, XI Zairong, MEI Shengwei. Nonlinear robust controller design for the steam-valving system based on Hamiltonian energy theory[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(18): 7 – 15.)
- [6] 李文磊, 井元伟, 刘晓平. 汽轮发电机主汽门开度非线性鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(3): 387 – 390.  
(LI Wenlei, JING Yuanwei, LIU Xiaoping. Nonlinear robust control for turbine main steam valve[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(3): 387 – 390.)
- [7] 黎浩荣, 李东海, 李立勤, 等. 中间再热式汽轮发电机组汽门开度全程非线性控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(10): 84 – 87.  
(LI Haorong, LI Donghai, LI Liqin. Reheat-type turbo-generator steam valve whole-range non-linear control [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2000, 40(10): 84 – 87.)
- [8] XI Z R, FENG G, CHENG D Z, et al. Nonlinear decentralized saturated controller design for power systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(4): 539 – 547.
- [9] 曹全喜, 于达仁, 于松海, 等. 采用极大值原理的汽轮发电机快速汽门控制[J]. 电力系统自动化, 1993, 17(8): 17 – 22.  
(CAO Quanxi, YU Daren, YU Songhai, et al. An optimal control method for fast turbine valving using maximum principle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1993, 17(8): 17 – 22.)
- [10] 刘国贤, 林宪枢, 杨奇逊. 应用李雅普诺夫理论求解发电机快速汽门非线性控制[J]. 电力自动化设备, 1996, 16(1): 11 – 14.  
(LIU Guoxian, LIN Xianshu, YANG Qixun. Apply Lyapunov theory to solve turbine fast valving non-linear control[J]. *Electric Power Automation Equipments*, 1996, 16(1): 11 – 14.)
- [11] 常乃超, 郭志忠. 考虑控制量限幅的发电机非线性分散鲁棒汽门控制[J]. 继电器, 2003, 31(12): 1 – 4.  
(CHANG Naichao, GUO Zhizhong. Nonlinear decentralized robust valve controller constrained by control limits for turbo-generator[J]. *Relay*, 2003, 31(12): 1 – 4.)
- [12] KRSTIC M, KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P. *Nonlinear and Adaptive Control Design*[M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 1995.
- [13] LIBERZON D, MORSE A S. Basic problems in stability and design of switched systems[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1999, 19(5): 59 – 70.
- [14] LU B, WU F, KIM S W. Switching LPV control of an F-16 aircraft via controller state reset[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(2): 267 – 277.

#### 作者简介:

**孙丽颖** (1972—), 女, 副教授, 博士研究生, 从事电力系统非线性控制、鲁棒控制的研究, E-mail: lgsunliying@163.com;

**赵军** (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂非线性系统、切换系统等研究, E-mail: zhaojun@ise.neu.edu.cn.