

含有不灵敏区非线性系统的增益调度自适应变结构控制

胡剑波, 辛海良

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 针对具有控制输入不灵敏区及有界不确定性的非线性系统, 采用增益调度变结构控制策略, 研究其镇定问题. 利用增益调度策略和自适应参数估计方法, 在同时存在参数、结构及干扰的不确定性和未知控制输入不灵敏区的情形下, 提出了新的增益调度自适应变结构镇定控制律设计方法, 既节省了控制能量, 又消除了控制信号的颤振. 所提出的控制律可以保证闭环输出为一致终结有界, 并且算法比较简单, 便于实现. 用数字仿真方法验证了所得控制律设计方法的有效性.

关键词: 增益调度变结构控制; 不灵敏区; 非线性系统; 自适应控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

The gain-scheduled variable-structure tracking control of nonlinear systems with dead-zones and norm-bounded uncertainties

HU Jian-bo, XIN Hai-liang

(Engineering College, Air Force University of Engineering, Xi'an Shaanxi 710038, China)

Abstract: The tracking control for a class of nonlinear systems with unknown dead-zones and norm-bounded uncertainties is studied. To deal with structural and parametrical uncertainties, unknown disturbances and unknown dead-zones, we propose a new variable-structure controller based on the adaptive control method and the control approach of gain-scheduling. The controller ensures the closed-loop system output to be ultimately asymptotically bounded. Simulation results confirm the satisfactory performance.

Key words: gain-scheduled variable structure control; dead-zones; nonlinear systems; adaptive control

1 引言(Introduction)

变结构控制, 特别是滑动模态变结构控制, 以其对外部干扰和系统不确定性具有很强的鲁棒性而倍受国内外学者的关注^[1~3]. 增益调度作为一种控制系统的工程设计方法, 可以用来改进控制系统在较大参数变化范围内的控制性能^[4,5]. 目前, 研究的比较多的是采用模糊逻辑来调度控制器参数^[6~8], 以改进传统变结构控制器的控制性能, 避免控制信号颤振, 提高控制效率^[6~9]. 为了解决因为传统变结构控制信号的不连续而带来的控制信号颤振、控制效率低下、控制量变化速度太快等在控制系统实现上的困难, 提出了自适应变结构、模糊变结构、增益调度变结构等思想^[6~10]. 如: 采用边界层型的饱和函数来替代变结构控制项中的不连续控制项, 使控制信号平缓地改变^[3]; 采用变系数的切换平面来避免控制能量由于在切换平面上的频繁切换而带来的能量浪费^[7]; 采用控制增益参数的自动调节, 合理控制

控制信号的变化幅度, 减少控制信号的剧烈改变而带来的控制信号颤振^[8]. 文献[8]等采用模糊控制思想来完成控制器参数的选择与自动调节, 提出了用模糊控制逻辑来调度控制器系数、边界层厚度、滑动平面系数等.

不灵敏区(死区)是常规的非线性特性, 它一般包含在控制机构中, 位于控制系统输入端. 在线性系统中, 不灵敏区将会导致无法消除的稳态误差, 并降低系统的动态品质^[11,12]. 在实际系统中, 不灵敏区特性参数是不易精确测定的, 并可能是时变的. 为了解决这一问题, TAO G等采用控制器之后串接不灵敏区估计逆模型的方法, 为线性系统设计的不灵敏区逆函数自适应控制^[13~15], 这种控制律的结构十分复杂, 并较难推广到非线性系统. 事实上, 控制输入端所含有的不灵敏区会导致系统控制输入增益的改变和有界匹配不确定性的引入, 对此可以利用变结构控制方法来解决. 文献[12]提出了一种含有不灵敏

区非线性系统的变结构跟踪控制, 所得闭环控制系统具有一致终结有界性能。

本文在文献[12]研究的基础上, 对于存在参数不确定性和结构不确定性且含有不灵敏区的非线性系统, 综合采用了自适应控制、增益调度控制和变结构控制策略, 设计出其镇定变结构控制器。采用自适应估计算法来估计系统的不确定参数、干扰变化范围和控制增益参数。采用增益调度方法来调度切换函数系数 λ 、边界层厚度 ϕ 以及控制器增益系数 η 。所得到的新型变结构控制器既能降低控制能耗, 又能减少颤振, 具有实际应用价值。

2 问题描述(Problem statement)

考虑含有控制输入不灵敏区和有界不确定性的2阶非线性系统:

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) + \sum_{i=1}^p a_i f_i(x(t), \dot{x}(t)) = bu(t) + d(t), \\ u(t) = D(\nu(t)) = \begin{cases} m(\nu(t) - b_r), & \nu(t) \geq b_r > 0, \\ 0, & b_l < \nu(t) < b_r, \\ m(\nu(t) - b_l), & \nu(t) \leq b_l < 0. \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t)$ 为所关注的输出, 假设 $\dot{x}(t)$ 可测量。 $u(t)$ 是不可测的不灵敏区输出标量, $\nu(t)$ 为不灵敏区输入量标量; $f_i(x(t), \dot{x}(t))$ 为非线性函数; a_i, b 为未知常数, 且 b 的符号已知, 不妨设 $b > 0$; $d(t)$ 为系统所受到的未知外部干扰。对上述非线性系统(1)引入如下假设:

假设 1 函数 $f_i = f_i(x(t), \dot{x}(t))$ 为非线性函数, 且不严格知道, 仅知道它的估计 $\hat{f}_i = \hat{f}_i(x(t), \dot{x}(t))$ 。假设关于 $f_i(x(t), \dot{x}(t))$ 的估计误差以某个已知函数 $F_i = F_i(x(t), \dot{x}(t))$ 为界, 即

$$|\hat{f}_i - f_i| \leq F_i.$$

假设 2 不灵敏区的参数 m, b_r, b_l 均有界, 且为常数或慢时变参数, 并且已知 $m > 0, b_r > 0, b_l < 0$, 但是其数值未知。

假设 3 参数 a_i 是有界的, 且为常数或慢时变参数, 即存在正常数 θ_i , 使得 $|a_i| < \theta_i$, 但是 a_i 数值未知。

假设 4 参数 mb 的下界已知, 且为常数或慢时变参数, 即存在正常数 β , 使得 $mb \geq \beta$, 但是其数值未知。

假设 5 存在未知常数 D , 使得 $|d(t)| \leq D$ 。

于是根据假设1~5, 系统(1)可以描述为

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) + \sum_{i=1}^p a_i f_i(x(t), \dot{x}(t)) = b m \nu(t) + d(t) + d_0(t), \\ d_0(t) = \begin{cases} -b m b_r, & \nu(t) \geq b_r > 0, \\ -b m \nu(t), & b_l < \nu(t) < b_r, \\ -b m b_l, & \nu(t) \leq b_l < 0. \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

显然: $|d_0(t)| \leq \max(b m b_r, -b m b_l) = D_0$ 。因此, 系统(1)等效于下列系统:

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) + \sum_{i=1}^p a_i f_i(x(t), \dot{x}(t)) = b_1 \nu(t) + d_1(t), \\ b_1 = m b, \\ d_1(t) = d(t) + d_0(t), \\ |d_1(t)| \leq D_0 + D = D_1. \end{cases} \quad (3)$$

本文的任务是: 利用自适应参数估计、增益调度参数调节和变结构控制器相结合的设计方法, 选择合适的控制律 $\nu(t)$, 使得在同时存在参数不确定性和非参数不确定性及输入不灵敏区的情形下, 系统(1)的状态稳定。

3 主要结果(Main results)

定义一个时变的含有积分项的切换函数:

$$s = s(x, t) = \dot{x} + 2\lambda x + \lambda^2 \int_0^t x dt. \quad (4)$$

其中 λ 为一个严格正常数。令: $H = 2\lambda \dot{x} + \lambda^2 x$, 根据系统(1)的等效系统(3), 可以得到

$$\dot{s}(x, t) = b_1 \nu + d_1 - \sum_{i=1}^p a_i f_i + H.$$

故能实现 $\dot{s}(x, t) = -k_0 s$, $k_0 > 0$ 的连续控制律为

$$\nu = b_1^{-1} [\sum_{i=1}^p a_i \hat{f}_i - d_1 - H - k_0 s].$$

于是, 结合自适应控制方法和变结构控制方法, 有如下引理[12]:

引理 1 对于满足假设1~5的具有不灵敏区和参数、结构、扰动不确定性的非线性系统(1), 引入切换函数(4), 如果构造如下自适应变结构控制律:

$$\begin{cases} \nu(t) = \sum_{i=1}^p (\hat{\alpha}_i \hat{f}_i - k_i \text{sgn } s) - \hat{b}_1^{-1} H - \hat{\rho} \text{sgn } s - k_0 s, \\ \dot{\hat{\alpha}}_i = -\hat{f}_i s, \quad \dot{\hat{b}}_1^{-1} = H s, \quad \dot{\hat{\rho}} = q(-\sigma \hat{\rho} + |s|), \\ k_i = \frac{1}{\beta} (\theta_i F_i + \eta). \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\sigma > 0, q > 0, \eta \geq 0, k_0 > 0$ 为任意正数; $\hat{\alpha}_i$ 为 $\alpha_i = b_1^{-1} a_i$ 的估计值; $\hat{b}_1^{-1}$ 为 b_1^{-1} 的估计值; $\hat{\rho}$ 为 $\rho = b_1^{-1} D_1$ 的估计。那么, 闭环系统(1)(5)的状态 x 是一致终结有界的。

为了提高控制效率, 将增益调度方法应用到存在

参数不确定性和结构不确定性且含有不灵敏区的非线性系统中. 定理1给出了使闭环系统具有一致终结有界性能的增益调度变结构自适应控制律. 从而, 既能保证变结构控制系统的控制效率, 又能节省控制能耗、消除颤振、快速进入滑动模态、获取稳定滑动模态.

定理 1 对于满足假设1~5具有不灵敏区和参数、结构、扰动不确定性的非线性系统(1), 如果构造如下增益调度变结构自适应控制律:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu(t) = \sum_{i=1}^p (\hat{\alpha}_i \hat{f}_i - k_i \operatorname{sgn} s) - \\ \quad \hat{\rho} \operatorname{sgn} s - k_0 s - \hat{b}_1^{-1} H, \\ \dot{\hat{\alpha}}_i = -\hat{f}_i s, \dot{\hat{b}}_1^{-1} = Hs, \dot{\hat{\rho}} = q(-\sigma \hat{\rho} + |s|), \\ k_i = \frac{1}{\beta} (\theta_i F_i + \eta), H = 2\lambda \dot{x} + \lambda^2 x, \\ s = s(x, t) = \dot{x} + 2\lambda x + \lambda^2 \int_0^t x dt, \\ \lambda = -\frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2} \operatorname{sat}\left(\frac{2|s| - s_{\max}}{s_{\max}}\right) + \\ \quad \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}. \end{array} \right. \quad (6)$$

其中: $\sigma > 0$, $q > 0$, $\eta \geq 0$, $k_0 > 0$ 为任意正数; $\hat{\alpha}_i$ 为 $\alpha_i = b_1^{-1} a_i$ 的估计值; $\hat{b}_1^{-1}$ 为 b_1^{-1} 的估计值; $\hat{\rho}$ 为 $\rho = b_1^{-1} D_1$ 的估计. 那么, 闭环系统(1)(6)的状态 x 是一致终结有界的.

证 定义如下的Lyapunov函数:

$$V = \frac{1}{2} [s^2 + \sum_{i=1}^p b_1 (\hat{\alpha}_i - \alpha_i)^2 + b_1 (\hat{b}_1^{-1} - b_1^{-1})^2 + q^{-1} b_1 (\hat{\rho} - \rho)^2],$$

因为系统(1)等效于系统(3), 所以可根据闭环系统(3)(6)来分析闭环系统(1)(6)的稳定性, 可以得出

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \sum_{i=1}^p (b_1 \hat{\alpha}_i - a_i) \dot{\hat{\alpha}}_i + (b_1 \hat{b}_1^{-1} - 1) \dot{\hat{b}}_1^{-1} + \\ &\quad q^{-1} (b_1 \hat{\rho} - D_1) \dot{\hat{\rho}} = \\ &\quad -b_1 k_0 s^2 + \sum_{i=1}^p (b_1 \hat{\alpha}_i \hat{f}_i - a_i f_i) s - b_1 \sum_{i=1}^p k_i |s| + \\ &\quad (1 - b_1 \hat{b}_1^{-1}) Hs + d_1(t) s + \sum_{i=1}^p (b_1 \hat{\alpha}_i - a_i) \dot{\hat{\alpha}}_i - \\ &\quad b_1 \hat{\rho} |s| + (b_1 \hat{b}_1^{-1} - 1) \dot{\hat{b}}_1^{-1} + q^{-1} (b_1 \hat{\rho} - D_1) \dot{\hat{\rho}} + \\ &\quad s(2x + 2\lambda \int_0^t x dt) \dot{\lambda} \leq \\ &\quad -b_1 k_0 s^2 + \sum_{i=1}^p \theta_i F_i |s| + (D_1 - b_1 \hat{\rho}) |s| - \\ &\quad b_1 \sum_{i=1}^p k_i |s| + q^{-1} (b_1 \hat{\rho} - D_1) \dot{\hat{\rho}} + \\ &\quad s(2x + 2\lambda \int_0^t x dt) \dot{\lambda} \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-b_1 k_0 s^2 - p\eta |s| + s(2x + 2\lambda \int_0^t x dt) \dot{\lambda} + \\ &(D_1 - b_1 \hat{\rho}) \sigma \hat{\rho} \leq \\ &-b_1 k_0 s^2 - p\eta |s| - \frac{1}{2} \sigma b_1^{-1} (D_1 - b_1 \hat{\rho})^2 + \\ &\frac{1}{2} b_1^{-1} \sigma D_1^2 + s(2x + 2\lambda \int_0^t x dt) \dot{\lambda}. \end{aligned}$$

当 $|s| \geq s_{\max}$ 时, $\dot{\lambda} = 0$, s 将收敛到某个区域 $|s| \leq S_F$ 中; 当 $|s| < s_{\max}$ 时, $x, \int_0^t x dt$ 均有界, $\lambda, \dot{\lambda}$ 也有界, s 将保留在某个区域 $|s| \leq S_L$ 中.

于是根据文献[15]中关于一致终结有界的定义及判断方法, 可以得出 s 是一致终结有界的. 进一步根据式(4), 可以得出 x 也是一致终结有界的.

注 1 定理1中所给出的控制律中, 存在符号函数, 不易实现且容易引起控制信号的抖动. 为此需要用符号函数的近似函数来得到相应的近似控制律. 如用 $\operatorname{sat}(\frac{s}{\phi})$, $\frac{1 - \exp(-\frac{s}{\phi})}{1 + \exp(-\frac{s}{\phi})}$ 来代替 $\operatorname{sgn} s$.

注 2 采用的控制律中的滑动模参数 λ 是时变的. 对于给定的系统可以设置参数 λ 的允许取值范围, $\lambda \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, 当接近滑动模或者进入滑动模时, λ 选择得尽量大; 而当远离滑动模时, λ 选择得尽量小. 于是, 可确保系统在滑动模附近具有较好的稳定性. 在远离滑动模时, 因为比较小, 所以减缓了 s 的剧烈改变, 避免控制信号的剧烈改变.

注 3 为了保证控制系统具有满意的滑动模态性能、稳态性能以及避免控制信号的颤振, 为参数 ϕ 设置一个允许的变化区域 $[\phi_{\min}, \phi_{\max}]$. 人们应该在偏离滑动平面较远的地方时采用较大的 ϕ , 以确保系统快速地向滑动模态接近; 而在接近滑动模态时, 拟采用较小的 ϕ , 以保证控制系统具有满意的滑动模态性能和稳态精度.

注 4 如果在滑动模 $s = 0$ 附近采用比较小的 η , 那么就会降低系统的运行轨迹与滑动平面的相交机会, 也就降低了颤振, 同时能节约能耗, 此时应该采用尽量小的 η ; 而当远离滑动模时要尽量取比较大的 η , 使系统能够快速地接近滑动模.

注 5 $s_{\max}$ 可取合适常数或采用边界层估计值倍数. 当所选常数增大或倍数增大时, 将导致系统过渡过程时间增加, 但控制量变化很平滑. 相反, 过渡过程时间缩短, 控制量变化剧烈. 因此, 在实际应用中应根据实际情况来选择合适的 $s_{\max}$.

综合注1~5, 得到推论1和推论2, 以得到使闭环系统具有一致终结有界性能的改进控制律.

推论 1 对于满足假设1~5具有不灵敏区和参数、结构、扰动不确定性的非线性系统(1), 如果构造如下增益调度变结构自适应控制律:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu(t) = \\ \sum_{i=1}^p (\hat{\alpha}_i \hat{f}_i - k_i ch(s)) - \hat{b}_1^{-1} H - \hat{\rho} ch(s) - k_0 s, \\ \dot{\hat{\alpha}}_i = -\hat{f}_i s, \quad \dot{\hat{b}}_1^{-1} = Hs, \quad \dot{\hat{\rho}} = q(-\sigma \hat{\rho} + |s|), \\ k_i = \frac{1}{\beta} (\theta_i F_i + \eta), \quad H = 2\lambda \dot{x} + \lambda^2 x, \\ ch(s) = \text{sat}(\zeta \frac{1 - \exp(-s/\phi)}{1 + \exp(-s/\phi)}), \quad \phi > 0, \quad \zeta > 1, \\ s = s(x, t) = \dot{x} + 2\lambda x + \lambda^2 \int_0^t x dt, \\ \lambda = \\ -\frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2} \text{sat}(\frac{2|s| - s_{\max}}{s_{\max}}) + \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}, \\ \phi = \frac{\phi_{\max} - \phi_{\min}}{2} \text{sat}(\frac{2|s| - s_{\max}}{s_{\max}}) + \frac{\phi_{\max} + \phi_{\min}}{2}, \\ \eta = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{2} \text{sat}(\frac{2|s| - s_{\max}}{s_{\max}}) + \frac{\eta_{\max} + \eta_{\min}}{2}, \\ s_{\max} = \phi. \end{array} \right. \quad (7)$$

其中: $\sigma > 0$, $q > 0$, $\eta \geq 0$, $k_0 > 0$ 为任意正数; $\hat{\alpha}_i$ 为 $\alpha_i = b_1^{-1} a_i$ 的估计值; $\hat{b}_1^{-1}$ 为 b_1^{-1} 的估计值; $\hat{\rho}$ 为 $\rho = b_1^{-1} D_1$ 的估计. 那么, 闭环系统(1)(7)的状态 x 是一致终结有界的.

推论 2 对于满足假设1~5具有不灵敏区和参数、结构、扰动不确定性非线性系统(1), 如果构造如下增益调度变结构自适应控制律:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu(t) = \\ \sum_{i=1}^p (\hat{\alpha}_i \hat{f}_i - k_i ch(s)) - \hat{b}_1^{-1} H - \hat{\rho} ch(s) - k_0 s, \\ \dot{\hat{\alpha}}_i = -\hat{f}_i s, \quad \dot{\hat{b}}_1^{-1} = Hs, \quad \dot{\hat{\rho}} = q(-\sigma \hat{\rho} + |s|), \\ k_i = \frac{1}{\beta} (\theta_i F_i + \eta), \quad H = 2\lambda \dot{x} + \lambda^2 x, \\ ch(s) = \begin{cases} \frac{s}{\phi}, & \phi > 0, |s| < \phi, \\ \text{sgn } s, & |s| \geq \phi > 0, \end{cases} \\ s = s(x, t) = \dot{x} + 2\lambda x + \lambda^2 \int_0^t x dt, \\ \lambda = \\ -\frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2} \text{sat}(\frac{2|s| - s_{\max}}{s_{\max}}) + \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}, \\ \phi = \frac{\phi_{\max} - \phi_{\min}}{2} \text{sat}(\frac{2|s| - s_{\max}}{s_{\max}}) + \frac{\phi_{\max} + \phi_{\min}}{2}, \\ \eta = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{2} \text{sat}(\frac{2|s| - s_{\max}}{s_{\max}}) + \frac{\eta_{\max} + \eta_{\min}}{2}, \\ s_{\max} = \phi. \end{array} \right. \quad (8)$$

其中: $\sigma > 0$, $q > 0$, $\eta \geq 0$, $k_0 > 0$ 为任意正数; $\hat{\alpha}_i$ 为 $\alpha_i = b_1^{-1} a_i$ 的估计值; $\hat{b}_1^{-1}$ 为 b_1^{-1} 的估计值; $\hat{\rho}$ 为 $\rho = b_1^{-1} D_1$ 的估计. 那么, 闭环系统(1)(8)的状态 x 是一致终结有界的.

4 仿真算例(Simulation example)

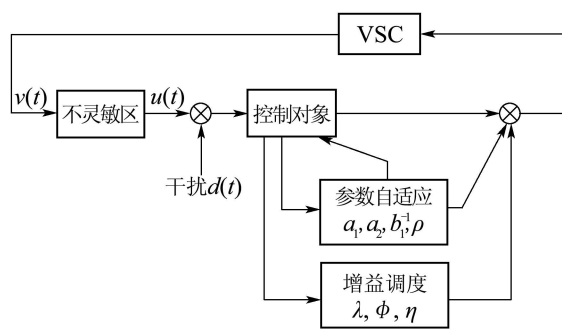
考虑如下含不灵敏区有界不确定性非线性系统:

$$\ddot{x} + a_1 \delta(t) \dot{x} + a_2 \kappa(t) x^2 = b D(\nu(t)) + d(t).$$

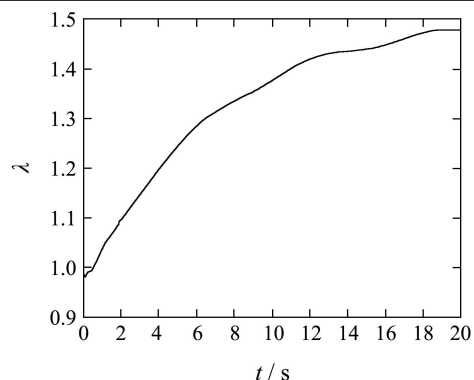
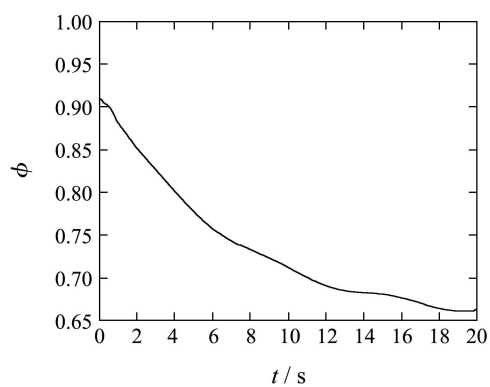
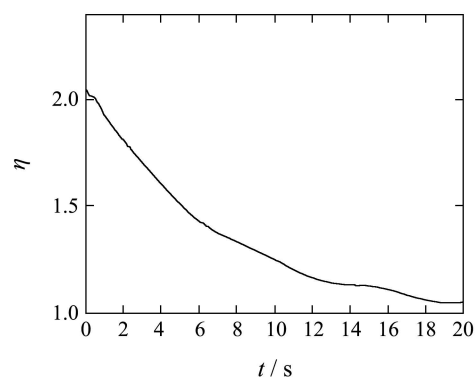
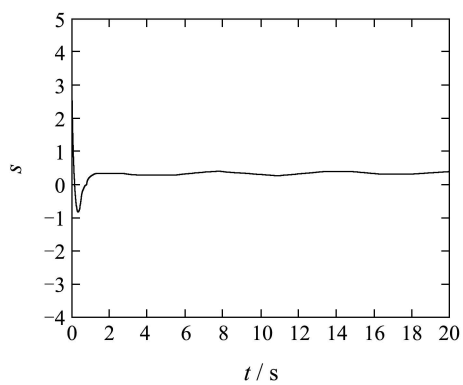
其中: 不灵敏区的参数实际值 $m = 1$, $b_r = 1.3$, $b_l = -1.4$ 未知, 但知道 $m > 0.5$, $b_r > 0$, $b_l < 0$. 系统模型中的实际参数 $a_1 = 1$, $a_2 = 10$, $b = 2$ 未知, 但知道其界限, 分别为 $\theta_1 = 3$, $\theta_2 = 14$, $\beta = 1$. 式中 $\delta(t) = 1.3$, $\kappa(t) = 2.6$ 未知, 但知道其满足 $1 \leq \delta(t) \leq 2$, $2 \leq \kappa(t) \leq 3$, 取: $\hat{f}_1 = 1.5\dot{x}$, $F_1 = 0.5|\dot{x}|$, $\hat{f}_2 = 2.5x^2$, $F_2 = 0.5x^2$. 扰动 $d(t) = 2\sin(2t) + 3$ 未知, 但知道其界限 $D = 5$. 系统初值为: $x(0) = 2$, $\dot{x}(0) = 0$. 取 $\zeta = 1.09$, $\lambda_{\max} = 2$, $\lambda_{\min} = 0$, $\eta_{\max} = 4$, $\eta_{\min} = 0$, $\phi_{\max} = 1.4$, $\phi_{\min} = 0.4$, $k_0 = 10$, $q = 1$, $\sigma = 0.5$. 控制律(9)如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu(t) = 1.5\hat{\alpha}_1 \dot{x} + 2.5\hat{\alpha}_2 x^2 - \hat{b}_1^{-1} H - \hat{\rho} ch(s) - \\ (k_1 + k_2) ch(s) - k_0 s, \\ s = s(x, t) = \dot{x} + 2\lambda x + \lambda^2 \int_0^t x dt, \\ \dot{\hat{\alpha}}_1 = -1.5\dot{x} s, \quad \dot{\hat{\alpha}}_2 = -2.5x^2 s, \quad \dot{\hat{b}}_1^{-1} = Hs, \\ \dot{\hat{\rho}} = q(-\sigma \hat{\rho} + s \text{sat}(s/\phi)), \\ k_1 = \frac{1}{\beta} (\theta_1 F_1 + \eta), \quad k_2 = \frac{1}{\beta} (\theta_2 F_2 + \eta), \\ H = 2\lambda \dot{x} + \lambda^2 x, \quad \theta_1 = 3, \quad \theta_2 = 14, \\ \beta = 1, \quad F_1 = 0.5|\dot{x}|, \quad F_2 = 0.5x^2, \\ ch(s) = \text{sat}(1.09 \frac{1 - \exp(-s/\phi)}{1 + \exp(-s/\phi)}), \\ \lambda = -\text{sat}(\frac{2|s| - \phi}{\phi}) + 1, \\ \phi = 0.5 \text{sat}(\frac{2|s| - \phi}{\phi}) + 0.9, \\ \eta = 2 \text{sat}(\frac{2|s| - \phi}{\phi}) + 2. \end{array} \right. \quad (9)$$

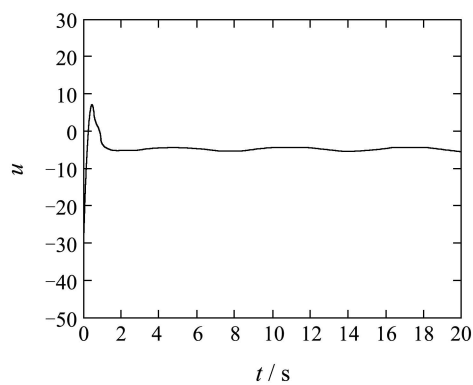
图1(a)给出了系统结构图, 图1(b)~(d)给出了参数 λ , ϕ 及 η 的变化曲线. 图2给出了系统仿真结果, 其中: 图(a)(b)(c)(d)(e)为采用增益调度滑动模, 图(f)(g)(h)(i)(j)为固定滑动模. 采用固定和可变时的结果比较如表1所示. 其中: 总仿真计算时间为20 s, $E = \int_0^{20} |u| dt$.



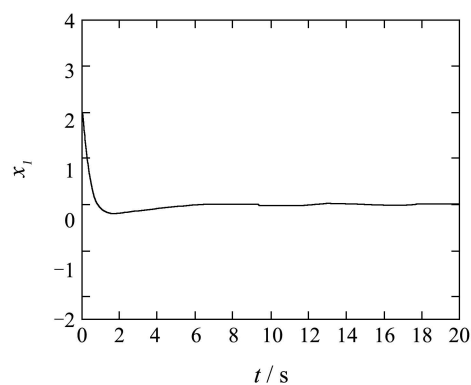
(a) 仿真系统结构图

(b) λ 随时间变化曲线(c) ϕ 随时间变化曲线(d) η 随时间变化曲线图1 系统结构图及 λ 变化时 λ, ϕ, η 的变化曲线Fig. 1 Structure of the system and the curve of λ, ϕ, η with variational λ 

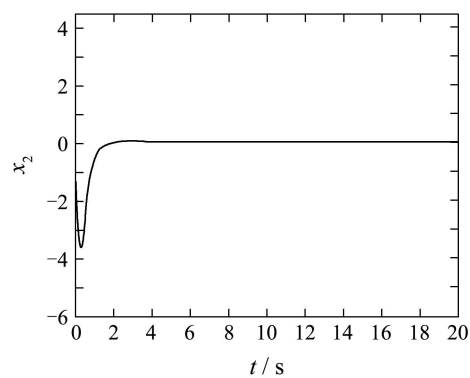
(a)



(b)



(c)



(d)

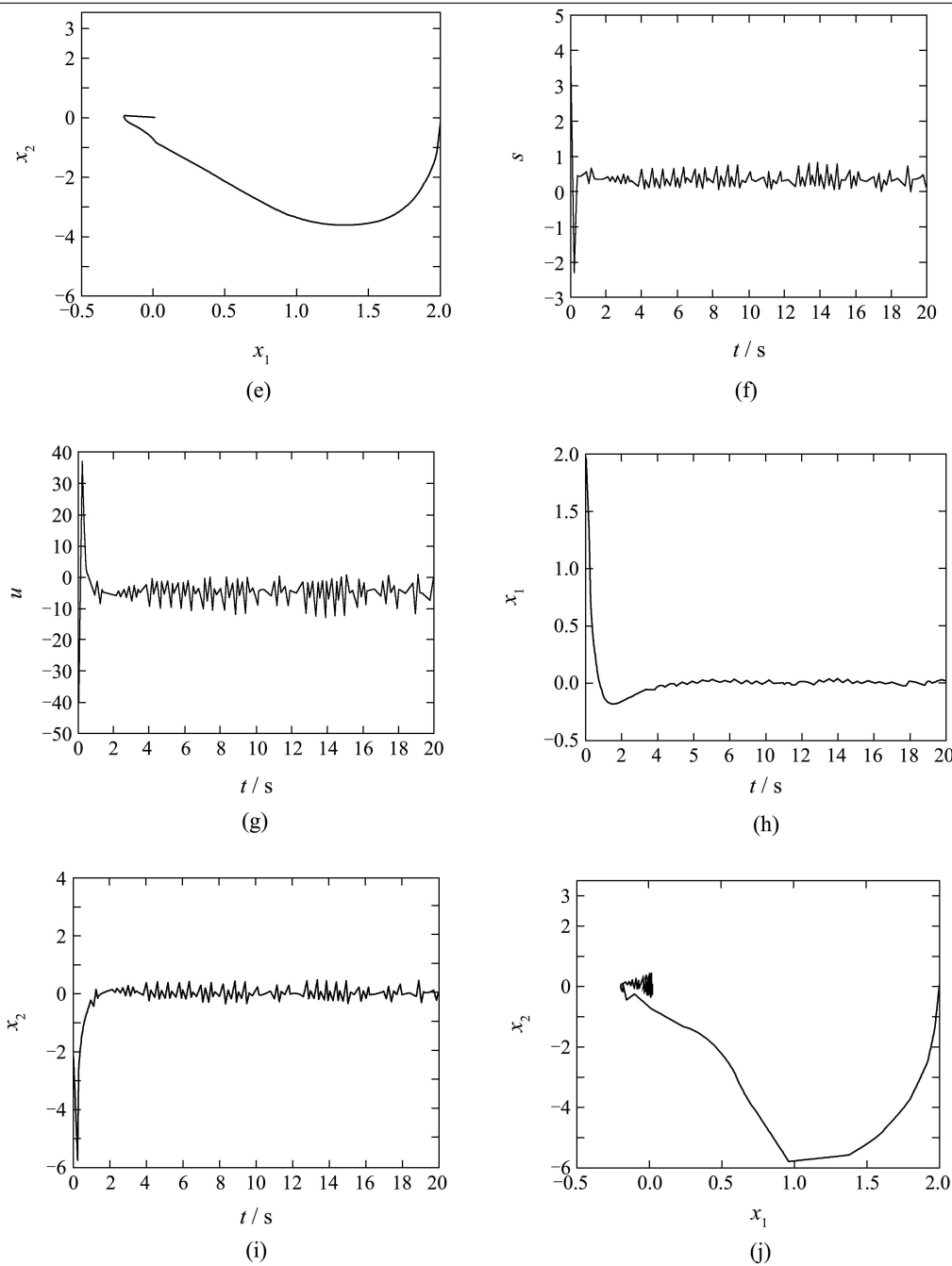


图 2 含死区时系统仿真结果

Fig. 2 The simulation results of the system with dead-zones

表 1 固定 λ 和可变 λ 的结果比较

Table 1 Comparison of the simulation results with constant λ and variable λ

情形	自适应变结构控制器 参数变化幅度	Δx_1	Δx_2	能耗 E	稳态 时间	控制量	稳态误差
固定 λ	76.9623	2.2336	6.1125	112.8843	3.94	$[-40.2871, 36.6752]$ 高频振荡	$[-0.38, 0.4]$ 高频振荡
可变 λ	37.0623	2.1999	3.7020	89.8309	1.65	$[-29.8951, 7.1681]$ 平稳变化	$[-0.015, 0.06]$ 平稳变化

从仿真结果可看出,所提出的方法大大降低了控制能耗,消除了控制信号的颤振和剧烈变化,系统能快速进入滑模运动,能够快速稳定,且几乎没有稳态误差。

5 结论(Conclusion)

本文针对具有不灵敏区的有界不确定非线性系统,利用自适应控制方法、增益调度和变结构控制方法,在不灵敏区和不确定性满足文中假设1~5的条件下,提出了保证非线性系统状态一致终结有界的镇定控制器。由于上述条件在实际系统中较容易满足,因此本文所提出的设计方法能得到较广泛的应用。

参考文献(References):

- [1] UTKIN V I. *Sliding Mode and Their Application in Variable Structure System*[M]. Moscow: Mir Publisher, 1987.
- [2] UTKIN V, JURGEN GULDNER, SHI J X. *Sliding Mode Control Electromechanical Systems*[M]. London: Taylor & Francis, 1999.
- [3] SLOVINE J J, LI W. *Applied Nonlinear Control*[M]. Engle-wood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.
- [4] LEITH D J, LEITHEAD W E. Gain-scheduled controller design: an analytic framework directly in corporation non-equilibrium plant dynamics[J]. *International Journal of Control*, 1998, 70(2): 249 – 269.
- [5] 胡剑波. 不确定系统的变结构控制和增益调度[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
(HU Jianbo. *Variable structure control theory and gain-scheduling*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.)
- [6] 段学超, 仇厚鹰, 盛英. 平面二级倒立摆的圆周行走与镇定控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(12): 1337 – 1340.
(DUAN Xuechao, QIU Huanying, SHENG Ying. Circular motion and balance control of the planar double inverted pendulum[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(12): 1337 – 1340.)
- [7] ZHANG Y X, ZHANG S Y. Fuzzy indirect sliding mode tracking control for a class of nonlinear interconnected systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(5): 658 – 665.
- [8] LIN C M, MON Y J. Decoupling control by hierarchical fuzzy sliding mode controller[J]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 2005, 13(4): 593 – 598.
- [9] YOUNG K D, UTKIN V I, OZGUNER U. A control engineer's guide to sliding mode control[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1999, 7(3): 328 – 342.
- [10] 胡剑波, 苏宏业, 褚健. 一种新的基于AVSC与模糊局部控制器网络的增益调度控制器[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(3): 465 – 468.
(HU Jianbo, SU Hongye, CHU Jian. A new gain-scheduling controller based on AVSC and FLCN[J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(3): 465 – 468.)
- [11] 高为炳. 非线性控制系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
(GAO Weibing. *Conspectus of Nonlinear System Control*[M]. Beijing: Beijing Science Press, 1998.)
- [12] 胡剑波, 辛海良. 含有不灵敏区非线性系统的增益调度变结构跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 1025 – 1028.
(HU Jianbo, XIN Hailiang. Robust tracking control of nonlinear systems with dead-zones and norm-bounded uncertainties[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(6): 1025 – 1028.)
- [13] TAO G, KOKOTOVIC P V. Discrete-time adaptive control of systems with unknown dead-zones[J]. *International Journal of Control*, 1994, 61(1): 1 – 17.
- [14] TAO G, KOKOTOVIC P V. Adaptive control of plants with unknown dead-zones[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(1): 59 – 68.
- [15] 黄琳. 稳定性理论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992: 16 – 43.
(HUANG Lin. *A Theory of Stability*[M]. Beijing: Peking University Press, 1992: 16 – 43.)

作者简介:

胡剑波 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为先进控制理论与应用、飞行控制、装备信息化等, E-mail: autosys@sina.vip.com;

辛海良 (1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为先进控制理论与应用, E-mail: zzlang314@163.com.