

文章编号: 1001-0920(2011)12-1824-05

一种新型滑模变结构增益调度控制器设计方法

辛海良, 胡剑波

(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘要: 研究影响一般滑动模态变结构控制性能的因素, 并给出了根据切换函数选择滑动模态系数、边界层厚度以及控制器增益系数的一般要求. 针对一类含参数不确定性的非线性系统, 采用新型增益调度变结构控制策略进行控制, 以切换函数作为调度变量对滑动模态系数、边界层厚度以及控制器增益系数进行调度, 以提高滑动模态变结构控制系统的控制性能, 抑制颤振, 降低控制能耗. 仿真算例验证了所提出控制策略的有效性.

关键词: 增益调度; 变结构控制; 边界层; 颤振; 能耗

中图分类号: TP273

文献标识码: A

A new design method for gain-scheduling variable structure controllers

XIN Hai-liang, HU Jian-bo

(College of Engineering, Air Force University of Engineering, Xi'an 710038, China. Correspondent: XIN Hai-liang, E-mail: zzlang314@163.com)

Abstract: The factors are given, which effect the performance for sliding mode variable structure control. A new design method for a class of nonlinear system with uncertainties is presented by using the gain-scheduling variable structure controllers. In order to improve the control performance, restrain the chattering of the controller and decrease the cost of control power, the parameters of the sliding mode, the layer and the control gain are scheduled by the switch function. The simulation results show the effectiveness of the proposed approach.

Key words: gain-scheduling; variable structure control; boundary layer; chattering; control power

1 引言

变结构控制(VSC)是一种对外界扰动和系统参数的时变性能具有不敏感性的鲁棒控制方法,近年来引起了诸多学者的关注,并在多个领域得到应用^[1-3].增益调度作为一种控制系统的工程设计方法,可用于改进控制系统在较大参数变化范围内的控制性能,以获得满意的控制效果^[4-5].将增益调度方法用于变结构控制,主要有两个研究领域:一是将变结构控制器作为基本控制器,再采用增益调度方法根据系统实际运行状态来调度控制器,一般由变结构控制器网络通过增益调度策略来实现^[4-6];另一个是将增益调度思想用于变结构控制器参数的调度,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^[7-11].目前,研究较多的是采用模糊逻辑来调度控制器参数^[7-9].

实际上,自变结构控制方法出现以来,人们一直在努力解决因传统变结构控制信号的不连续而带来

的控制信号颤振、控制效率低下以及控制量变化速度太快等问题,相继提出了自适应变结构、模糊变结构、增益调度变结构等思想^[3, 7-11].比较常用的方法是: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, 10];采用变系数的切换平面来避免控制能量因在切换平面上的频繁切换而带来的能量浪费^[8];利用趋近率参数的自动调节,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^[9].上述工作均是为了提高控制系统的物理可实现能力,提高控制系统设计方法的工程实用性^[11].

为了消除控制系统颤振、克服控制信号的突变、减少能耗,针对传统变结构控制方法在实际应用中亟待解决的问题,文献[7-9]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增益系数、边界层厚度和滑动模态系数,取得了较为满意的结果.但这些方法的计算量大,

收稿日期: 2010-07-16; 修回日期: 2010-09-30.

基金项目: 空军工程大学学术基金项目(XS0901008); 上海市重点学科建设项目(J50103).

作者简介: 辛海良(1982-),男,博士生,从事先进控制理论与应用的研究; 胡剑波(1965-),男,教授,博士生导师,从事先进控制理论与应用、飞行控制等研究.

不能保证控制信号的连续性, 而且有些方法仅仅是经验方法, 缺少理论分析和必要的证明.

本文分析了影响一般滑动模态变结构控制性能的因素, 给出了根据切换函数来选择滑动模态系数、边界层厚度以及控制器增益系数的一般要求. 以一类含有参数不确定性和外部干扰的单输入非线性系统为研究对象, 提出一种新型增益调度滑动模态变结构控制器, 将切换函数作为调度变量, 对影响滑动模态变结构控制器性能的滑动模态系数、边界层厚度以及控制器增益系数进行增益调度. 该新型增益调度变结构控制器能减少控制能耗, 消除颤振, 提高系统的控制性能, 使得系统能够快速进入并获取稳定的滑动模态. 由于采用了增益调度的控制思想, 本文方法比模糊逻辑方法更加简便, 物理意义更加明确, 更便于物理实现和工程应用.

2 一类不确定非线性系统的变结构控制

考虑如下—类具有参数不确定性和外部干扰的单输入/单输出仿射非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n, \\ \dot{x}_n = f(x, t) + B(x, t)u(t) + d(t), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$f(x, t) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \hat{f}(x, t) + \Delta f(x, t),$$

$$B(x, t) = B(x_1, x_2, \dots, x_n) = \hat{B}(x, t)(1 + \Delta B(x, t)),$$

$d(t)$ 为系统所受到的未知外部干扰, $\hat{f}(x, t)$ 为不确定参数 $f(x, t)$ 的估计, $\hat{B}(x, t)$ 为不确定参数 $B(x, t)$ 的估计, $\Delta f(x, t)$ 和 $\Delta B(x, t)$ 为系统的不确定性. 假设该系统的不确定性和干扰有界, 即

$$|\Delta f(x, t)| \leq F(x, t); \quad (2)$$

$$|\Delta B(x, t)| \leq \gamma, \text{ 且 } \gamma < 1; \quad (3)$$

$$|d(t)| \leq D_0(t). \quad (4)$$

控制的目的是系统存在参数 $f(x, t)$ 不确定和外部干扰 $d(t)$ 的情况下, 使得系统 (1) 在有界不确定性 (2) ~ (4) 的前提下, 具有稳定的滑模运动.

定理 1 对于式 (1) 所述系统, 选择切换函数

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} x_1 = \sum_{p=0}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p x_{n-p}.$$

其中: λ 为正数, d/dt 为微分算子. 采用如下控制规律:

$$u(t) = \hat{B}^{-1}(x, t)(\hat{u} + \tilde{u}), \quad \tilde{u} = -k(x, t)\text{sgn}(s),$$

$$\hat{u} = -\hat{f}(x, t) - \sum_{p=1}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p x_{n-p+1},$$

$$\begin{aligned} \hat{g}(x, t) &= \hat{f}(x, t) + \sum_{p=1}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p x_{n-p+1}, \\ k(x, t) &= \frac{D_0(t) + F(x, t) + \gamma|\hat{g}(x, t)| + \eta}{1 - \gamma}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\eta > 0$ 称为滑模运动的控制器增益系数. 则系统 (1) 采用控制律 (5) 时具有稳定的滑模运动.

证明 因切换函数为

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} x_1 = \sum_{p=0}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p x_{n-p},$$

故有

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= \sum_{p=0}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p \dot{x}_{n-p} = \\ &\sum_{p=1}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p x_{n-p+1} + f(x, t) + d(t) + \\ &\hat{B}(x, t)(1 + \Delta B(x, t))\hat{B}^{-1}(x, t)(\hat{u} + \tilde{u}) = \\ &- \frac{1 + \Delta B(x, t)}{1 - \gamma}(D_0(t) + F(x, t) + \gamma|\hat{g}(x, t)| + \\ &\eta)\text{sgn}(s) + \Delta f(x, t) + d(t) - \Delta B(x, t)\hat{g}(x, t). \end{aligned}$$

取 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2}s^2$, 考虑式 (2) ~ (4), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} &\leq \\ &|\Delta f(x, t)||s| + |d(t)||s| + \\ &|\Delta B(x, t)||\hat{g}(x, t)||s| - \frac{1 + \Delta B(x, t)}{1 - \gamma} \times \\ &(D_0(t) + F(x, t) + \gamma|\hat{g}(x, t)| + \eta)|s| \leq \\ &-\frac{\gamma + \Delta B(x, t)}{1 - \gamma}(D_0(t) + F(x, t) + \\ &\gamma|\hat{g}(x, t)|)|s| - \frac{1 + \Delta B(x, t)}{1 - \gamma}\eta|s| \leq -\eta|s|. \end{aligned}$$

因此, 系统具有稳定的滑模运动. \square

注 1 显然控制规律 (5) 是不连续的, 导致控制系统中存在高频的控制信号颤振. 为了减弱控制系统的颤振, 引入如下采用边界层函数的修正控制律:

$$u(t) = \hat{B}^{-1}(x, t)(\hat{u} - k(x, t)\text{sat}(s/\phi)). \quad (6)$$

其中

$$\text{sat}(s/\phi) = \begin{cases} s/\phi, & |s| \leq \phi; \\ \text{sgn}(s), & |s| > \phi. \end{cases} \quad (7)$$

边界层参数 ϕ 为大于零的正数. 根据文献 [3] 的研究结果, 该控制律将保证系统状态的一致有界稳定.

3 影响 VSC 性能的因素和增益调度规则

本质上, 变结构控制系统的响应由趋近滑动模态阶段、滑动模态阶段和稳定状态阶段组成, 这 3 个阶段均有特殊的性质^[12]. 事实上, 变结构控制系统的性能 (如鲁棒性、干扰抑制能力等) 是由一些参数确定的, 其中包括: 滑动模态系数 λ , 控制器增益系数 η 以

及边界层厚度 ϕ 等. 这些参数决定了系统在不同模式下的响应特性及其在颤振消减等方面的能力^[3]. 本文基于文献[13]给出了参数 λ , η 及 ϕ 对控制系统的性能影响和调度规则.

3.1 λ 对控制系统的性能影响和增益调度规则

λ 的选取将带来以下影响: 1) 对于固定的边界层厚度, 当增大 λ 时, 将减小系统的稳定误差; 2) λ 的增大会增加系统带宽, 可能激活系统的未建模高频动力学模式; 3) 当增大该系数时, 致使控制量变化率过高, 而实际的控制器可能无法达到所要求的控制量变化速度要求. 因此, 实际系统均设置了 λ 的最大允许值, 文献[3]给出了一些确定参数 λ_{\max} 的算法.

对于给定系统, 可设置参数 λ 的允许取值范围为 $\lambda \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$. 为了达到满意的控制性能, 应在偏离滑动平面较远的地方采用较小的 λ ; 否则, 相反.

3.2 η 对控制系统的性能影响和增益调度规则

η 越大, 系统将以越快的速度接近滑动平面; η 越小, 越能降低系统颤振, 同时可节约能耗.

参数 η 的选取原则是: 在距滑动平面较远的地方采用较大的 η , 而在距滑动平面较近的地方采用较小的 η . 值得注意, 参数 η_{\max} 取决于控制系统执行器的最大允许控制量.

3.3 边界层厚度 ϕ 对控制系统的性能影响和增益调度规则

参数 ϕ 的选取将带来以下影响: 1) 对于固定的 λ , 增大 ϕ 将降低控制系统按照滑模运动模式进入稳定状态的速度, 增大系统的稳态误差; 2) 减小 ϕ 致使控制量变化率过高, 而实际的控制器可能无法达到所要求的控制量变化速度要求, 将带来无法避免的控制信号颤振, 造成控制能耗增大、控制效率降低.

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, 应在偏离滑动平面较远的地方采用较大的 ϕ , 以确保系统快速地向滑动模态接近; 在接近滑动模态时采用较小的 ϕ , 以保证控制系统具有满意的滑动模态性能和稳态精度.

4 新型增益调度变结构控制规律

选择单调递增函数 $T(|s|)$, 按照滑动模态系数 λ , 控制器增益系数 η 以及边界层厚度 ϕ 对变结构控制系统控制性能的影响, 分别给出如下参数 λ , η 以及 ϕ 的调度函数:

$$\lambda = -\frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2} \text{sat}\left(\frac{2T(|s|) - s_{\max}}{s_{\max}}\right) + \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2},$$

$$\eta = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{2} \text{sat}\left(\frac{2T(|s|) - s_{\max}}{s_{\max}}\right) + \frac{\eta_{\max} + \eta_{\min}}{2},$$

$$\phi = \frac{\phi_{\max} - \phi_{\min}}{2} \text{sat}\left(\frac{2T(|s|) - s_{\max}}{s_{\max}}\right) + \frac{\phi_{\max} + \phi_{\min}}{2}, \quad (8)$$

其中 $s_{\max} > 0$ 为系统允许的最大滑动模偏移量.

对于含不确定和未知外界干扰的非线性系统(1), 基于参数 λ , η 及 ϕ 对变结构控制系统控制性能的影响以及式(8), 可得如下新型增益调度变结构控制规律:

定理 2 对于式(1)所述具有参数不确定和未知外界干扰的非线性系统变结构控制, 采用增益调度方法来调度滑动模态系数 λ , 控制器增益系数 η 及边界层厚度 ϕ . 系统采用如下控制规律:

$$u(t) = \hat{B}^{-1}(x, t)(\hat{u} + \tilde{u}),$$

$$\hat{u} = -\hat{g}(x, t), \quad \tilde{u} = -k(x, t)\text{sat}(s/\phi),$$

$$\hat{g}(x, t) = \hat{f}(x, t) + \sum_{p=1}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p x_{n-p+1} + \sum_{p=0}^{n-1} p C_{n-1}^p \lambda^{p-1} x_{n-p} \cdot \dot{\lambda},$$

$$k(x, t) = \frac{D_0(t) + F(x, t) + \gamma|\hat{g}(x, t)| + \eta - \dot{\phi}}{1 - \gamma},$$

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} x_1 = \sum_{p=0}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p x_{n-p},$$

$$\lambda = -\frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2} \text{sat}\left(\frac{2T(|s|) - s_{\max}}{s_{\max}}\right) + \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2},$$

$$\eta = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{2} \text{sat}\left(\frac{2T(|s|) - s_{\max}}{s_{\max}}\right) + \frac{\eta_{\max} + \eta_{\min}}{2},$$

$$\phi = \frac{\phi_{\max} - \phi_{\min}}{2} \text{sat}\left(\frac{2T(|s|) - s_{\max}}{s_{\max}}\right) + \frac{\phi_{\max} + \phi_{\min}}{2}. \quad (9)$$

于是, 闭环系统(1)和(9)的状态一致最终有界.

证明 由式(7)可知, 当系统的状态轨迹在 $|s| > \phi$ 区域时, $\text{sat}(s/\phi) = \text{sgn}(s)$. 由于切换函数为

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} x_1 = \sum_{p=0}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p x_{n-p},$$

有

$$\dot{s}(t) = \sum_{p=0}^{n-1} p C_{n-1}^p \lambda^{p-1} x_{n-p} \cdot \dot{\lambda} + \sum_{p=0}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p \dot{x}_{n-p} = \sum_{p=0}^{n-1} p C_{n-1}^p \lambda^{p-1} x_{n-p} \cdot \dot{\lambda} + \sum_{p=1}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p x_{n-p+1} +$$

$$\begin{aligned} & \hat{B}(x, t)(1 + \Delta B(x, t))\hat{B}^{-1}(x, t)(\hat{u} + \tilde{u}) + \\ & f(x, t) + d(t) = \\ & - \frac{1 + \Delta B(x, t)}{1 - \gamma} (D_0(t) + F(x, t) + \gamma|\hat{g}(x, t)| + \eta - \\ & \dot{\phi})\text{sgn}(s) + \Delta f(x, t) + d(t) - \Delta B(x, t) \cdot \hat{g}(x, t). \end{aligned}$$

进一步考虑到式 (2)~(4), 可得

$$\begin{aligned} s\dot{s} & \leq |\Delta f(x, t)||s| + |d(t)||s| + \\ & |\Delta B(x, t)||\hat{g}(x, t)||s| - \frac{1 + \Delta B(x, t)}{1 - \gamma} \times \\ & (D_0(t) + F(x, t) + \gamma|\hat{g}(x, t)| + \eta - \dot{\phi})|s| \leq \\ & - \frac{\gamma + \Delta B(x, t)}{1 - \gamma} (D_0(t) + F(x, t) + \gamma|\hat{g}(x, t)|)|s| - \\ & \frac{1 + \Delta B(x, t)}{1 - \gamma} (\eta - \dot{\phi})|s| \leq -(\eta - \dot{\phi})|s|. \end{aligned}$$

由文献 [14] 可知, 此时饱和带外的系统状态轨迹会很快被吸引至饱和带内部。

当系统的状态轨迹在 $|s| \leq \phi$ 区域时, 采用增益调度变边界饱和特性代替开关特性, 边界层宽度可以动态改变, 这样不仅能减少变结构系统的颤振, 而且能保证系统具有满意的滑动模态性能和稳态性能, 从而有效克服常规边界层法的缺点。

综上可知, 系统 (1) 和 (9) 的状态一致最终有界。□

注 2 s_{\max} 可以理解为增益调度厚度, 可以选择边界层厚度, 或距滑动模距离的倍数, 或初始值的倍数, 或随着参数 λ 的增加而减少。 $T(|s|)$ 为增益调度变量, 要求是 $|s|$ 的单调递增函数, 可以选择 $T(|s|) = |s|$, 或 $T(|s|) = 0.5|s|^2 + 0.5|s|$ 。当选择 $T(|s|) = |s|$ 时, 将在增益调度厚度范围内具有同样的调度变化率; 当选择 $T(|s|) = 0.5|s|^2 + 0.5|s|$ 时, 将在增益调度厚度范围内, 具有随着 $|s|$ 增大而递增的调度变化率^[15]。这里取 $s_{\max} = \phi, T(|s|) = |s|$ 。

注 3 式 (8) 中所给出的控制律中含有增益调度参数 λ 及 ϕ 的导数, 可能会导致系统瞬时所需的控制量过大。因此, 可用连续可导函数

$$[g(H)]_{cd} = e^{-t} \cdot \frac{1 - \exp(-\mu H)}{1 + \exp(-\mu H)}$$

来替代饱和函数 $\text{sat}((2|s| - \phi)/\phi)$, 这里取 $H = (2|s| - \phi)/\phi$ 。

综合注 2 和注 3, 得到如下使闭环系统具有一致最终有界性能的改进控制律:

定理 3 对于式 (1) 所述具有参数不确定性和未知外界干扰的非线性系统变结构控制, 采用增益调度方法来调度滑动模态系数 λ , 控制器增益系数 η 及边界层厚度 ϕ 。系统采用如下控制律:

$$\begin{aligned} u(t) & = \hat{B}^{-1}(x, t)(\hat{u} + \tilde{u}), \\ \hat{u} & = -\hat{g}(x, t), \tilde{u} = -k(x, t)\text{sat}(s/\phi), \end{aligned}$$

$$\hat{g}(x, t) = \hat{f}(x, t) + \sum_{p=1}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p x_{n-p+1} +$$

$$\sum_{p=0}^{n-1} p C_{n-1}^p \lambda^{p-1} x_{n-p} \cdot \dot{\lambda},$$

$$k(x, t) = \frac{D_0(t) + F(x, t) + \gamma|\hat{g}(x, t)| + \eta - \dot{\phi}}{1 - \gamma},$$

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} x_1 = \sum_{p=0}^{n-1} C_{n-1}^p \lambda^p x_{n-p},$$

$$\lambda = - \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2} \cdot [g(s)]_{cd} + \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2},$$

$$\eta = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{2} \cdot [g(s)]_{cd} + \frac{\eta_{\max} + \eta_{\min}}{2},$$

$$\phi = \frac{\phi_{\max} - \phi_{\min}}{2} \cdot [g(s)]_{cd} + \frac{\phi_{\max} + \phi_{\min}}{2},$$

$$[g(s)]_{cd} = e^{-t} \cdot \frac{1 - \exp(-\mu H)}{1 + \exp(-\mu H)}, H = \frac{2|s| - \phi}{\phi}.$$

(10)

于是, 闭环系统 (1) 和 (10) 的状态一致最终有界。

5 仿真分析

考虑如下具有参数不确定性和未知干扰的仿射非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x, t) + B(x, t)u(t) + d(t), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (11)$$

其中: 非线性函数 $f(x, t)$ 未知, 但其估计值为 $\hat{f}(x, t) = -2x_1^2$, 且其估计误差界限为 $F(x, t) = 0.25x_1^2$; 非线性函数 $B(x, t)$ 未知, 但其估计值为 $\hat{B}(x, t) = 5$, 且其不确定性 ΔB 界限为 $\gamma = 0.3$; 扰动 $d(t) = \sin t + 1$ 未知, 但其界限 $D(t) = 2$; 系统初始值为 $x_1(0) = 1, x_2(0) = 1$ 。取 $\lambda_{\max} = 3, \lambda_{\min} = 0, \eta_{\max} = 4, \eta_{\min} = 0, \phi_{\max} = 0.8, \phi_{\min} = 0.1$ 。从而可得如下控制律:

$$u(t) = \frac{1}{5}(\hat{u} + \tilde{u}), \hat{u} = -\hat{g}(x, t),$$

$$\tilde{u} = -k(x)\text{sat}(s/\phi),$$

$$\hat{g}(x, t) = -2x_1^2 + \lambda x_2 + x_1 \dot{\lambda},$$

$$k(x) = \frac{2 + 0.25x_1^2 + 0.3|\hat{g}(x, t)| + \eta - \dot{\phi}}{1 - 0.3},$$

$$s = x_2 + \lambda x_1, \lambda = -1.5[g(s)]_{cd} + 1.5,$$

$$\eta = 2[g(s)]_{cd} + 2, \phi = 0.35[g(s)]_{cd} + 0.45,$$

$$[g(s)]_{cd} = e^{-t} \cdot \frac{1 - \exp(-5H)}{1 + \exp(-5H)}, H = \frac{2|s| - \phi}{\phi}. \quad (12)$$

图 1 给出了参数 λ, η 及 ϕ 随时间的变化曲线; 图 2 给出了采用增益调度策略时闭环系统的仿真曲线; 图 3 给出了采用固定参数时闭环系统的仿真曲线。采用固定和可变参数时的仿真结果比较如表 1 所示, 其中, 总仿真时间为 20 s, 能耗计算公式为

$$E = \int_0^{20} |u| dt.$$

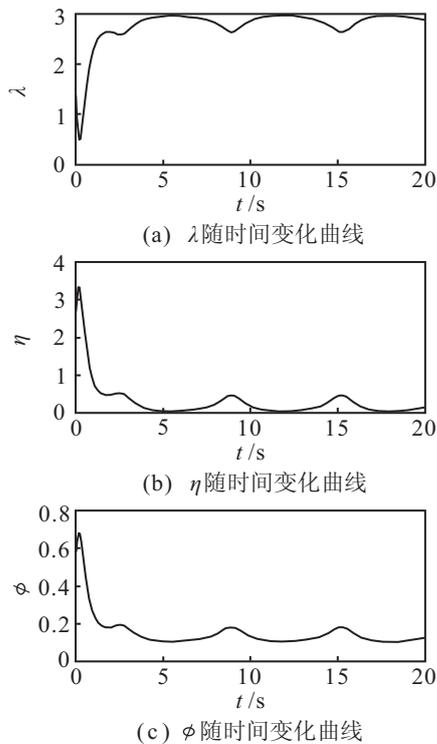


图 1 λ, η 及 φ 增益调度变化曲线

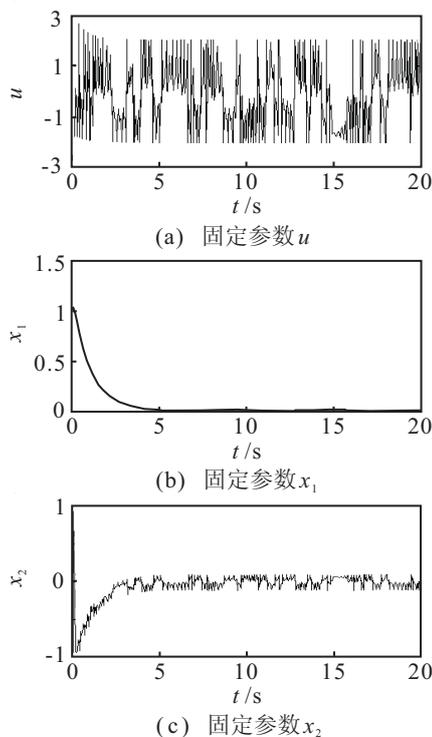


图 3 固定参数时系统仿真结果

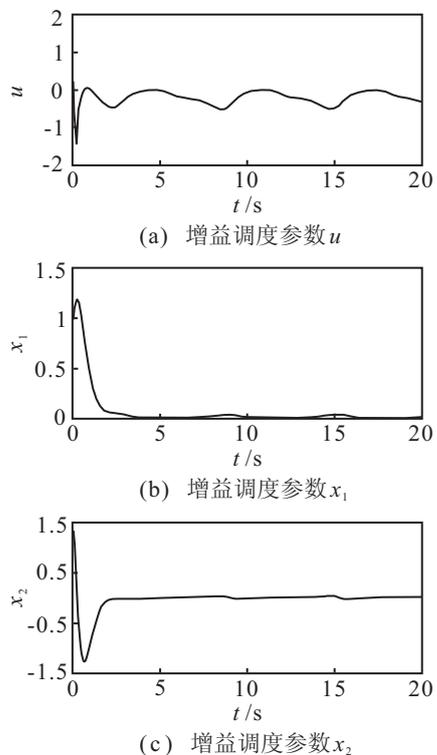


图 2 增益调度策略时系统仿真结果

表 1 系统仿真结果比较

情形	控制量	能耗 $\times 10^{-1}$	稳态时间/s
固定	$[-2.0281, 2.6812]$	109.316	4.4842
λ, η, ϕ	高频震荡		
增益调度	$[-1.4348, 1.9333]$	42.020	3.4932
λ, η, ϕ	平稳变化		

从仿真结果可知,采用新型增益调度变结构控制策略可大大降低系统的控制能耗,消除控制信号的颤

振,同时系统能快速进入并保持稳定的滑模运动,而且几乎没有稳态误差,提高了控制系统的性能。

6 结 论

本文针对有界不确定非线性系统,采用增益调度变结构控制策略对其进行控制,基于参数 λ, η 及 ϕ 对变结构控制系统性能的影响,给出了该有界不确定非线性系统的新型增益调度变结构控制器设计方法. 仿真结果表明,本文设计的新型滑动模态变结构控制器具有稳定的滑模运动、没有颤振、控制量变化幅度较小、控制能耗较低和满意的控制性能等优点. 但本文所提出的控制策略计算量有所增大,且相关参数的调度规则是描述性的,其数学表达式有多种形式. 这些问题有待于进一步研究。

参考文献(References)

- [1] Utkin V I. Sliding mode and their application in variable structure system[M]. Moscow: Mir Publisher, 1987.
- [2] Vadim Utkin, Jurgen Guldner, Shi J X. Sliding mode control electromechanical systems[M]. London: Taylor & Francis, 1999.
- [3] Slotine J J, Li W. Applied nonlinear control[M]. Englewood Cliffs: 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]. Int J of Control, 1998, 70(2): 249-269.

(下转第1834页)