

陀螺仪系统同步控制的参数自适应滑模控制

杜肖丰[†], 曾喆昭, 程 婷, 程启芝, 王凤琴

(长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对带有内部不确定性及外部扰动的陀螺仪混沌系统的同步问题, 提出了一种参数自适应滑模控制方法, 并给出参数自适应律. 该方法不依赖被控混沌系统的数学模型, 可以快速跟踪主混沌系统. 时域及复频域理论分析表明, 由参数自适应滑模控制器组成的闭环控制系统是全局渐近稳定的, 而且参数自适应滑模控制器具有良好的抗扰动鲁棒性. 仿真结果表明该控制方法计算量小、响应速度快、控制精度高、抗扰动鲁棒性强, 在非线性不确定系统控制领域具有广泛的应用价值.

关键词: 陀螺仪混沌同步; 参数自适应; 滑模控制; 时域及复频域分析; 全局稳定性

引用格式: 杜肖丰, 曾喆昭, 程婷, 等. 陀螺仪系统同步控制的参数自适应滑模控制. 控制理论与应用, 2020, 37(4): 801 – 808

DOI: 10.7641/CTA.2019.80870

Parameter adaptive sliding mode control for synchronous control of gyroscope system

DU Xiao-feng[†], ZENG Zhe-zhao, CHENG Ting, CHENG Qi-zhi, WANG Feng-qin

(College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410114, China)

Abstract: A parameter adaptive sliding mode control method was proposed for synchronization with internal parameter and external disturbances of the gyroscopic chaotic system, and parameter adaptive law was provided. The proposed method is not dependent on the mathematical model of the controlled plants, and can fast track the master chaotic system. The theoretical analysis of time domain and the complex frequency domain showed that the closed-loop control system composed of the parameter adaptive sliding mode controller is globally asymptotically stable and the parameter adaptive sliding mode controller has good anti-disturbance robustness. The simulation results show that the proposed method has small amount of calculation, fast response, high control precision, good anti-disturbance robustness, which has wide application value in the field of nonlinear uncertain system control.

Key words: gyroscopic chaotic synchronization; parameter adaptive; sliding mode control; time domain and complex frequency domain analysis; global stability

Citation: DU Xiaofeng, ZENG Zhezhaoh, CHENG Ting, et al. Parameter adaptive sliding mode control for synchronous control of gyroscope system. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(4): 801 – 808

1 引言

陀螺仪系统是一个典型的非线性混沌系统, 针对混沌系统的控制和同步问题, 早在1990年Pecora和Carroll首次对其进行了研究^[1], 近几十年也吸引了众多研究人员的关注并将实验成果应用于各种领域, 如物理学、信息学、生物学等^[2-6]. 到目前为止, 已经研究了不少控制混沌的方法, 如主动控制、环状脉冲控制、鲁棒自适应控制、滑模控制等^[7-10].

陀螺仪系统在机器人、汽车、航海、航空等领

域^[11-14]都起着重要的作用. 从1996年开始, GE等人对于对称陀螺仪的非线性行为及混沌同步控制进行了详细研究^[15-23]. 其中, 文献[16]基于主动控制, 通过两个控制输入达到同步的效果, 在完全已知参数的基础上合成控制器, 控制结果有明显的高频抖振现象. 存在明显的局限性, 在工程实践中不切实际. 基于共轭梯度法的多项式函数模型的补偿控制方法^[17]通过拟合好的多项式函数模型对不确定混沌系统进行前馈补偿控制, 基于径向基函数神经网络的反馈补偿控

收稿日期: 2018-11-06; 录用日期: 2019-09-12.

[†]通信作者. E-mail: 1270806160@qq.com; Tel.: +86 15211028571.

本文责任编辑: 孙长银.

国家自然科学基金项目(61040049), 湖南省教育厅重点项目(17A006)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61040049) and the Key project of Education Department of Hunan Province (17A006).

制方法^[18]用训练好的径向基函数神经网络模型对混沌系统进行反馈补偿控制,这两种控制方法不仅具有较强的抑制混沌系统参数摄动能力和抗干扰能力,而且不需要被控混沌系统的数学模型.文献[19]基于模糊滑模控制,通过将模糊控制器替换滑模控制器中的符号函数sgn s 来解决其引起的抖振现象,控制效果好,但滑模控制器依赖陀螺仪系统精确参数的数学模型,局限性太大.文献[20]提出的径向基函数神经滑模控制是将滑模切换函数作为神经网络的输入,网络权值根据滑模趋近条件在线调整,有效抑制了抖振并对参数扰动和外部干扰表现出较好的鲁棒性,但以牺牲系统稳定时间为代价.文献[21]基于高斯径向基自适应变结构控制,该方法为了减少系统抖动,用饱和函数代替符号函数,能够在短时间内达到混沌同步的效果,但控制结果中高频抖振现象依然严重,甚至会使系统崩溃,且算法结构复杂,计算量大,依赖陀螺仪系统精确的数学模型,难以应用于工程实际.文献[22]采用自适应控制方法对分数阶系统的自适应问题进行了研究,提出了一个新的具有双翼和四翼吸引子共存的混沌系统,其中控制参数 k 和 λ 分别影响系统的同步速度及参数识别速度,仿真实验取得了良好的控制结果.

与本文控制方法相比,自适应鲁棒滑模控制方法^[23]的控制信号依然存在高频抖振现象,抗干扰性差且同步跟踪效果不理想;自适应滑模控制方法^[24]利用特殊幂次函数 $\text{fal}(s, \alpha, \delta)$ 及反双曲正弦函数 $\text{arsh}(s)$ 代替符号函数有效削弱控制输入的高频抖振现象,然而,该方法以增加计算量为代价的,凭经验给定参数,因而有明显的局限性.

针对陀螺仪混沌同步控制存在的问题,本文提出了参数自适应的滑模控制方法,并进行了详细的理论分析.复频域和时域分析表明,本文控制方法不仅能够保证混沌同步控制系统的全局稳定性,而且本文设计的控制器还具有良好的抗扰动鲁棒性;不仅有效避免了传统滑模控制的高频抖振现象,而且结构简单、计算量小,因而是一种不依赖于被控对象模型的通用控制方法.仿真结果不仅有效验证了理论分析的正确性,而且也有力表明了本文控制方法在不确定混沌系统同步控制中的有效性.

2 陀螺仪系统模型

本文考虑了具有线性阻尼的安装在振动基座上对称陀螺仪系统的混沌同步控制,该系统同样被用于飞机,船只和战略防御系统中.陀螺仪系统的运动方程用角度 θ 描述为^[25]

$$\ddot{\theta} + \alpha^2(1 - \cos \theta)^2 / \sin^3 \theta - \beta \sin \theta + c_1 \dot{\theta} + c_2 \dot{\theta}^3 = f \sin(\omega t) \sin \theta, \quad (1)$$

其中: $\alpha^2(1 - \cos \theta)^2 / \sin^3 \theta - \beta \sin \theta$ 是一种非线性弹

性力; $c_1 \dot{\theta}$ 是线性阻尼; $c_2 \dot{\theta}^3$ 是非线性阻尼; $f \sin(\omega t)$ 是参数激励.

考虑到模型的不确定性为 $\Delta f(x, t) \in \mathbb{R}$ 以及外部有界扰动 $d_1(t) \in \mathbb{R}$,分别设

$$\begin{aligned} x_1 &= \theta, \quad x_2 = \dot{\theta}, \\ g(x_1) &= -\alpha^2(1 - \cos x_1)^2 / \sin^3 x_1, \\ w_x &= f(x, t) + \Delta f(x, t) + d_1(t), \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} f(x, t) &= g(x_1) - c_1 x_2 - c_2 x_2^3 + \beta \sin x_1 + \\ & f \sin(\omega t) \sin x_1. \end{aligned}$$

则系统(1)转换成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = w_x. \end{cases} \quad (2)$$

文献[25]在 $c_1 = 0.5$, $c_2 = 0.05$, $\alpha^2 = 100$, $\beta = 1$, $\omega = 2$, $32 < f < 36$ 的条件下,对陀螺仪系统复杂的动力学特性所表现出的混沌行为进行了深入的研究.其中,图1和图2是在不确定性和外部扰动为零且初始状态为 $(x_1, x_2) = (0.5, 0.8)$, $f = 35.5$ 的情况下表现出的混沌行为.

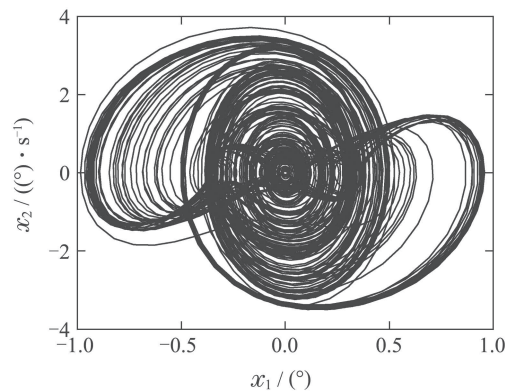


图1 陀螺仪轨迹的相位图

Fig. 1 Phase diagram of gyroscope track

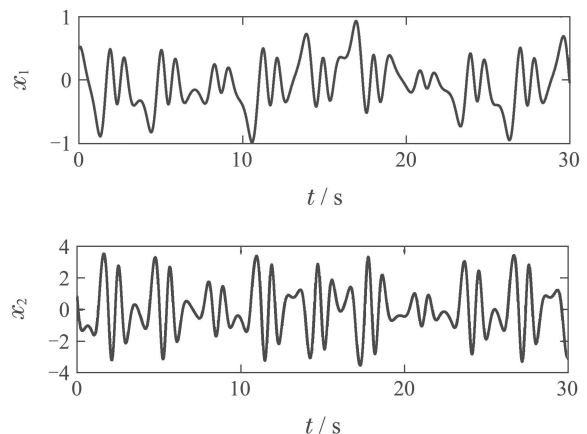


图2 陀螺仪系统随时间的响应

Fig. 2 Response of gyroscope system with time

设从系统模型为

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, \\ \dot{y}_2 = w_y + b_0 u, \\ y = y_1, \end{cases} \quad (3)$$

其中: $b_0 \neq 0$ 是从系统控制系数; 从混沌系统不确定总和扰动为

$$w_y = g(y, t) + \Delta g(y, t) + d_2(t),$$

且

$$g(y, t) = -\alpha^2(1 - \cos y_1)^2 / \sin^3 y_1 - c_1 y_2 - c_2 y_2^3 + \beta \sin y_1 + f \sin(\omega t) \sin y_1,$$

$\Delta g(y, t) \in \mathbb{R}$ 是不确定因素; $d_2(t) \in \mathbb{R}$ 是外部扰动; u, y 分别是系统的控制输入和实际输出。

3 指数趋近滑模控制器

设期望轨迹为主系统信号 $x_1(t)$, 从系统为被控对象, 其输出为 $y(t)$. 设同步跟踪误差为 $e_1 = x_1 - y$, 则有

$$\dot{e}_1 = e_2 = \dot{x}_1 - \dot{y} = \dot{x}_1 - \dot{y}_1 = x_2 - y_2, \quad (4)$$

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{y}_2 = w_x - w_y - b_0 u. \quad (5)$$

设滑模函数为

$$s = c_0 e_1 + e_2, \quad (6)$$

则有

$$\dot{s} = c_0 \dot{e}_1 + \dot{e}_2 = c_0 \dot{e}_1 + w_x - w_y - b_0 u. \quad (7)$$

设滑模趋近律为

$$\dot{s} = -c_1 s. \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)可定义指数趋近滑模控制律为

$$u = (c_0 e_2 + c_1 s) / b_0, \quad (9)$$

其中: $c_0 > 0, c_1 > 0$.

4 稳定性分析

定理 1 假设主从系统的总和扰动均有界: $|w_x| < \infty, |w_y| < \infty$, 则当且仅当 $c_0 > 0, c_1 > 0$ 时, 由指数趋近滑模控制器(9)组成的闭环控制系统是全局渐近稳定的, 且滑模控制器(9)具有良好的抗扰动鲁棒性。

4.1 稳定性分析

为了方便分析, 设主从系统总和扰动偏差 $w = w_x - w_y$, 因为 $|w_x| < \infty, |w_y| < \infty$, 所以 $|w| < \infty$. 由式(4)–(5)可得

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2, \\ \dot{e}_2 = w - b_0 u. \end{cases} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10), 可得闭环控制系统

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2, \\ \dot{e}_2 = w - c_0 e_2 - c_1 s. \end{cases} \quad (11)$$

将式(6)代入式(11), 可得

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2, \\ \dot{e}_2 = w - (c_0 + c_1)e_2 - c_0 c_1 e_1. \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知, 闭环控制系统(12)实际上是一个在总和扰动偏差 w 激励下的误差动力学系统。

考虑到系统初始误差 $e_1(0^-) \neq 0, e_2(0^-) \neq 0$, 对式(12)取拉氏变换, 可得

$$\begin{cases} sE_1(s) - e_1(0^-) = E_2(s), \\ sE_2(s) - e_2(0^-) = \\ W(s) - c_0 c_1 E_1(s) - (c_0 + c_1)E_2(s). \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)整理得

$$E_1(s) = E_{1x}(s) + E_{1w}(s), \quad (14)$$

其中: 零输入响应 $E_{1x}(s)$ 为

$$E_{1x}(s) = [e_2(0^-) + (c_0 + c_1)e_1(0^-)]H(s) + e_1(0^-)sH(s); \quad (15)$$

零状态响应 $E_{1w}(s)$ 为

$$E_{1w}(s) = H(s)W(s); \quad (16)$$

而且误差动力学系统传输函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{1}{(s + c_0)(s + c_1)}. \quad (17)$$

由系统(17)可知, 当 $c_0 > 0, c_1 > 0$ 时, 误差动力学系统(17)的两个极点 $s_1 = -c_0, s_2 = -c_1$ 均在 s 平面的左半平面, 因此当且仅当 $c_0 > 0, c_1 > 0$ 时, 误差动力学系统(17)是全局渐近稳定的。

4.2 抗扰动鲁棒性分析

1) 当 $c_0 \neq c_1$ 时, 由系统(17)可得系统冲击响应 $h(t)$ 为

$$h(t) = \frac{1}{c_1 - c_0} e^{-c_0 t} - \frac{1}{c_1 - c_0} e^{-c_1 t}, \quad t > 0. \quad (18)$$

由式(18)可得

$$\dot{h}(t) = -\frac{c_0}{c_1 - c_0} e^{-c_0 t} + \frac{c_1}{c_1 - c_0} e^{-c_1 t}, \quad (19)$$

$$\ddot{h}(t) = \frac{c_0^2}{c_1 - c_0} e^{-c_0 t} - \frac{c_1^2}{c_1 - c_0} e^{-c_1 t}. \quad (20)$$

由式(14)–(18)可知误差动力学系统(12)或(13)的时域解为

$$e_1(t) = e_1(0^-) \dot{h}(t) + b_1 h(t) + h(t) * w(t), \quad (21)$$

$$e_2(t) = \dot{e}_1(t) = e_1(0^-) \ddot{h}(t) + b_1 \dot{h}(t) + \dot{h}(t) * w(t), \quad (22)$$

其中 $b_1 = e_2(0^-) + (c_0 + c_1)e_1(0^-)$.

当 $c_0 > 0, c_1 > 0$ 时, 由式(18)–(20)可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{h}(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{h}(t) = 0. \quad (23)$$

由于 $|w| < \infty$, 因此当 $c_0 > 0$, $c_1 > 0$, 且 $c_0 \neq c_1$ 时, 由式(21)和(22)分别有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_2(t) = 0. \quad (24)$$

上述表明, 只要 $|w| < \infty$, 则当 $c_0 > 0$, $c_1 > 0$, 且 $c_0 \neq c_1$ 时, 误差动力学系统(13)可以从任意不为零的误差初始状态 $[e_1(0^-) \neq 0, e_2(0^-) \neq 0]$ 向稳定的平衡点原点 $(0, 0)$ 趋近, 表明滑模控制器(9)具有良好的抗扰动鲁棒性。

2) 当 $c_0 = c_1$ 时, 由系统(17)可得系统冲击响应 $h(t)$ 为

$$h(t) = te^{-c_0 t}, \quad t > 0. \quad (25)$$

由式(25)可得

$$\dot{h}(t) = (1 - c_0 t)e^{-c_0 t}, \quad (26)$$

$$\ddot{h}(t) = (c_0^2 t - 2c_0)e^{-c_0 t}. \quad (27)$$

由式(14)–(17)和式(25)可知误差动力学系统(12)或(13)的时域解为

$$e_1(t) = e_1(0^-)\dot{h}(t) + b_1 h(t) + h(t) * w(t), \quad (28)$$

$$e_2(t) = \dot{e}_1(t) =$$

$$e_1(0^-)\ddot{h}(t) + b_1 \dot{h}(t) + \dot{h}(t) * w(t), \quad (29)$$

其中 $b_1 = e_2(0^-) + 2c_0 e_1(0^-)$.

当 $c_0 = c_1 > 0$ 时, 由式(25)–(27)可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{h}(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{h}(t) = 0. \quad (30)$$

由于 $|w| < \infty$, 因此当 $c_0 = c_1 > 0$, 由式(28)和式(29)分别有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_2(t) = 0. \quad (31)$$

上述表明, 只要 $|w| < \infty$, 则当 $c_0 = c_1 > 0$, 误差动力学系统(12)可以从任意不为零的误差初始状态 $[e_1(0^-) \neq 0, e_2(0^-) \neq 0]$ 向稳定的平衡点原点 $(0, 0)$ 趋近, 表明滑模控制器(9)具有良好的抗扰动鲁棒性。

上述时域分析表明, 只要 $|w_x| < \infty$, $|w_y| < \infty$, 则当且仅当 $c_0 > 0$, $c_1 > 0$ 时, 由滑模控制器(9)构成的闭环控制系统(12)可以从任意不为零的初始误差状态 $[e_1(0^-) \neq 0, e_2(0^-) \neq 0]$ 向稳定的平衡点原点 $(0, 0)$ 趋近, 因此, 滑模控制器(9)具有良好的抗扰动鲁棒性。

证毕。

5 参数自适应律

由定理1的分析可知, 只要 $|w_x| < \infty$, $|w_y| < \infty$, 则当且仅当 $c_0 > 0$, $c_1 > 0$ 时, 闭环控制系统是全局稳定的, 同时也表明 c_0 和 c_1 具有很大的整定范围, 理论上而言, 为了提高响应速度和抗扰能力, 要求增益参数 c_0 和 c_1 越大越好. 然而, c_0 和 c_1 太大可能会因微分峰值问题引起超调或振荡现象, 因此, 需要利用自适应参数整定规则:

$$c_0 = h^{-\alpha}(1 - 0.9e^{-\beta t}), \quad (32)$$

$$c_1 = c_0 + \delta, \quad \delta \geq 0,$$

其中: h 为采样步长, $0 < \alpha < 1$, $\beta > 0$, α 主要与积分步长有关: 如果积分步长 h 较大, 则要求 α 也较大; 否则反之. 此外, 参数 β 则与系统的时间常数 τ 有关, 即 $\beta \approx 1/\tau$. 对于未知系统而言, 由于其系统时间常数 τ 也是未知的, 因此, 只能使用估计值来确定 β . 比如: 如果实际要求在1 s时间内实现稳态跟踪控制, 则可设 $\beta = 1$. 设 $h = 0.001$ s, $\alpha = 0.65$, $\beta = 1$ 时, 根据参数自适应律 $c_0 \approx 89(1 - 0.9e^{-t})$, 参数 c_0 随时间的变化曲线如图3所示.

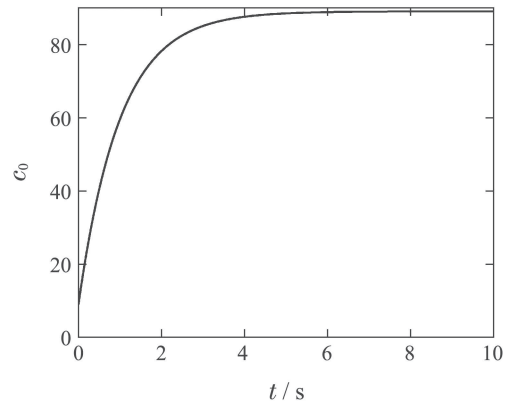


图3 参数自适应变化曲线

Fig. 3 Parameter adaptive change curve

6 仿真分析

为了验证本文算法对同步不确定混沌系统的有效性, 以混沌陀螺仪系统^[26]为例进行仿真实验.

陀螺仪系统的初始状态, 相关参数以及不确定性等, 分别为:

1) 初始状态:

$$x_1(0) = 0.5, \quad x_2(0) = 0.8, \quad y_1(0) = 0.1, \quad y_2(0) = 0.$$

2) 系统参数:

$$c_1 = 0.5, \quad c_2 = 0.05, \quad \alpha^2 = 100,$$

$$\beta = 1, \quad \omega = 2, \quad f = 35.5.$$

3) 不确定因素:

$$\Delta f(x, t) = 0, \quad \Delta g(y, t) = 0.6 \sin y_1.$$

4) 外部扰动:

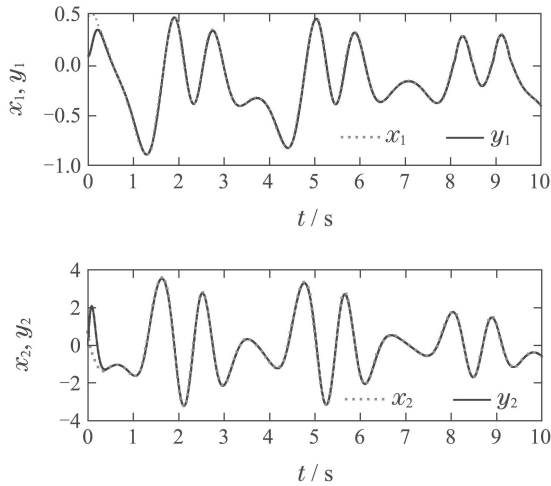
$$d_1(t) = 0.4 \sin(\pi t), \quad d_2(t) = 0.2 \cos(\pi t).$$

6.1 仿真实验

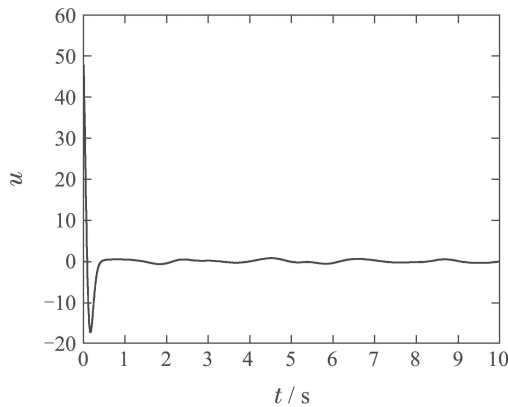
仿真过程中, 设采样步长 $h = 0.001$ s, $b_0 = 1$, $\delta = 1$, 根据参数自适应律, 设置本例的增益参数为

$$\begin{cases} c_0 = 89(1 - 0.9e^{-t}), \\ c_1 = c_0 + 1. \end{cases} \quad (33)$$

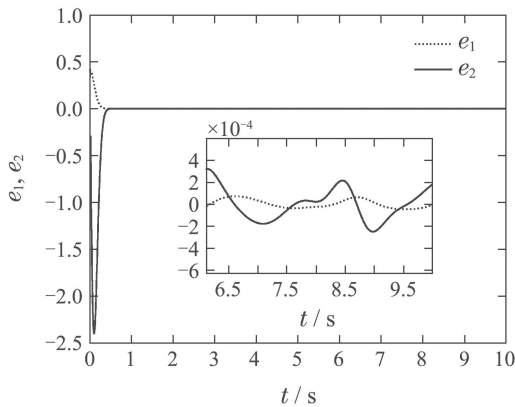
参数自适应滑模控制实验结果如图4所示.



(a) 系统同步跟踪的时间响应



(b) 系统输入信号的时间响应



(c) 系统同步跟踪误差的时间响应

图4 参数自适应滑模控制的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of parameter adaptive sliding mode control

参数自适应滑模控制方法的仿真结果基本在0.4s趋于稳定,且不存在高频抖振现象.仿真实验表明,本文的控制方法不仅可以快速跟踪被控对象,而且避免了因符号函数引起的高频抖振.

6.2 3种控制方法的对比实验

为验证参数自适应滑模控制的优势,在其他条件不变的情况下,与自适应鲁棒滑模控制方法^[23]和自适

应滑模控制方法^[24]做对比实验.

1) 本文控制方法:

$$u = (c_0 e_2 + c_1 s) / b_0, \quad (34)$$

其中: $s = c_0 e_1 + e_2$, $c_0 = 89(1 - 0.9e^{-t})$, $c_1 = c_0 + 1$, $b_0 = 1$.

2) 自适应鲁棒滑模控制:

$$u = -\hat{\theta}(\dot{x}_2 - c_2 e_2) + k_1 s + \eta \operatorname{sgn} s, \quad (35)$$

其中: $s = c_2 e_1 + e_2$; 自适应律 $\dot{\hat{\theta}} = -\gamma s(\dot{x}_2 - c_2 e_2)$; $c_2 = 8$; $\gamma = 50$; $k_1 = 10$; $\eta = 5$.

3) 自适应滑模控制:

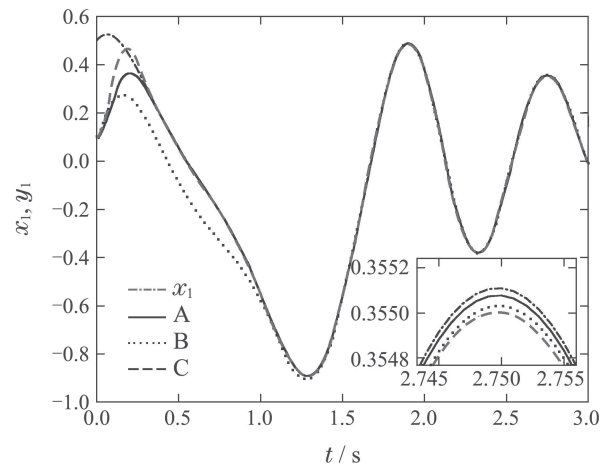
$$u = \beta \cdot \operatorname{fal}(s, \alpha, \delta) + k_2 \cdot \operatorname{arsh}(s) - \hat{J} \dot{p}, \quad (36)$$

$$\operatorname{fal}(s, \alpha, \delta) = \begin{cases} |s|^\alpha \cdot \operatorname{sgn} s, & |s| > \delta, \\ \frac{s}{\delta^{1-\alpha}}, & |s| \leq \delta, \end{cases} \quad (37)$$

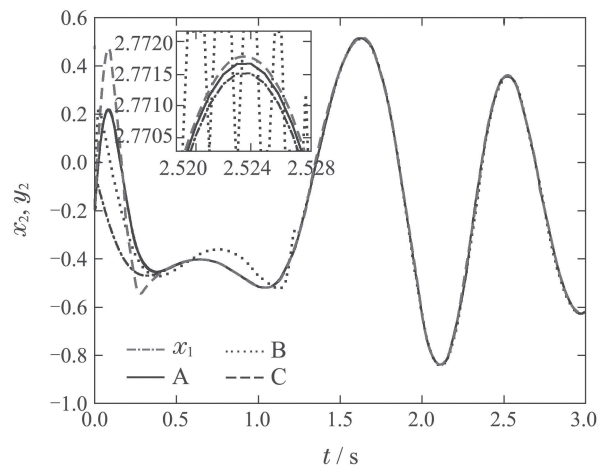
其中: $s = c_3 e_1 + e_2$, $p = x_2 - c_3 e_1$; 自适应律 $\dot{\hat{J}} = -\gamma \dot{p} s$, $c_3 = 15$, $\beta = 15$, $k_2 = 10$, $\alpha = 0.5$, $\delta = 0.01$, $\gamma = 10$, $\operatorname{arsh}(s)$ 为反双曲正弦函数.

6.2.1 无扰动下的控制结果

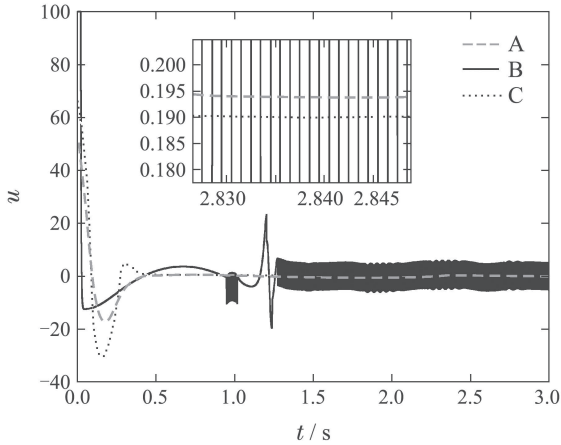
在无扰动下的仿真结果如图5所示,图中有参数自适应滑模控制方法A、自适应鲁棒滑模控制方法B及自适应滑模控制方法C.



(a) 系统状态 x_1, y_1 同步的时间响应



(b) 系统状态 x_2, y_2 同步的时间响应



(c) 系统控制输入的时间响应

图5 3种自适应滑模控制方法对比图

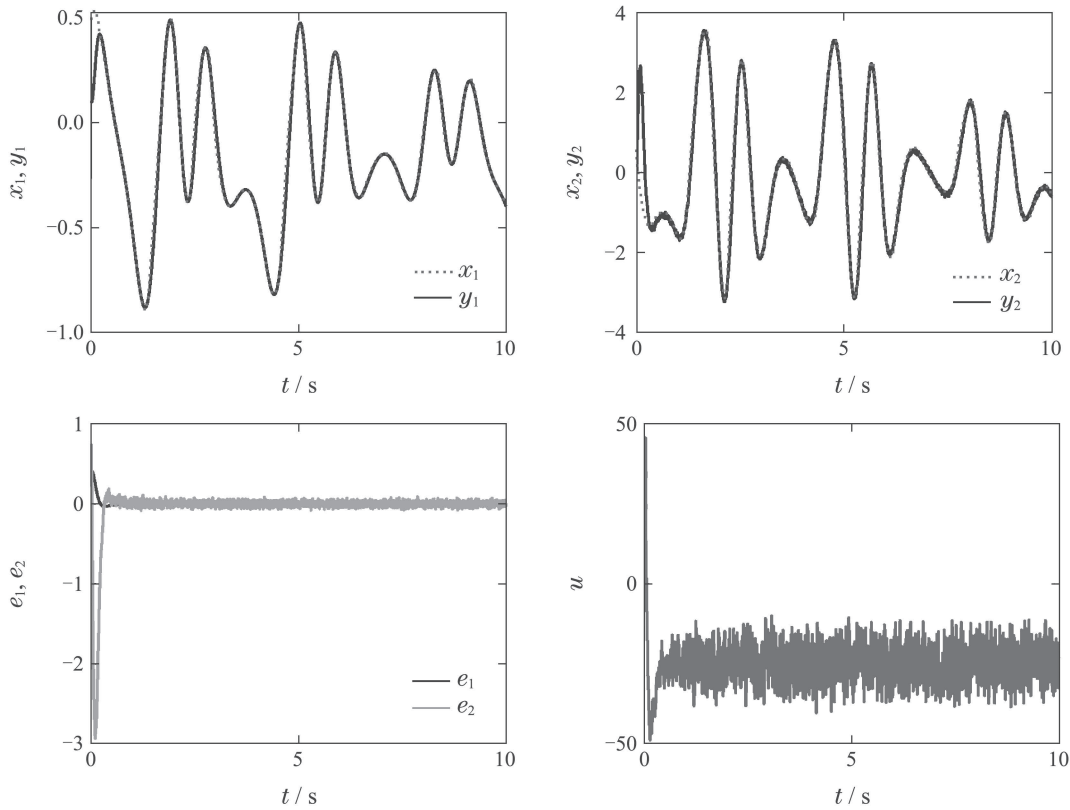
Fig. 5 Comparison of three adaptive sliding mode control methods

由仿真结果可知,自适应鲁棒滑模控制因符号函数而导致高频抖振现象,控制结果较差;自适应滑模控制虽然取得了良好的控制结果,但因其涉及特殊幂次函数和反双曲正弦函数,计算量大。

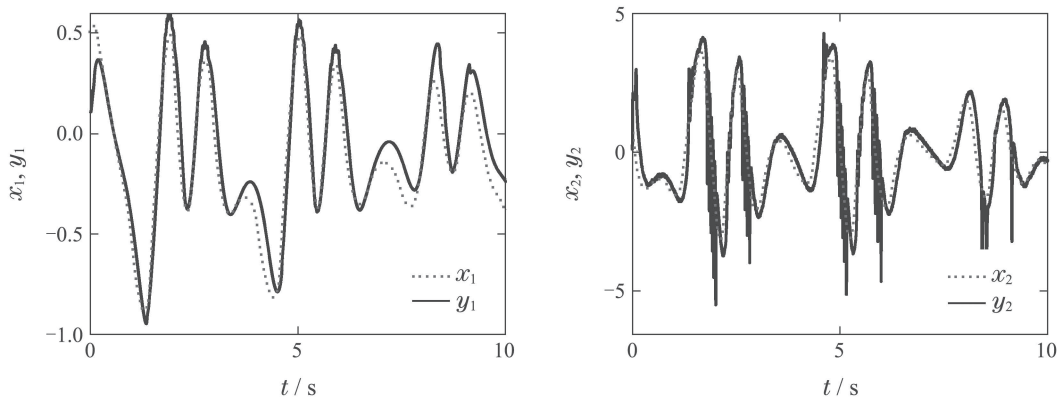
此外,以上这两种控制方法中自适应律只对特定的参数变量 $\hat{\theta}$ 或 \hat{J} 起作用,而其他参数的取值全凭经验给定,并不能很好地体现出自适应控制的优点.而本文的控制方法不仅可以取得良好的控制效果,不存在高频抖振现象,而且结构简单、计算量小,控制器参数完全自适应。

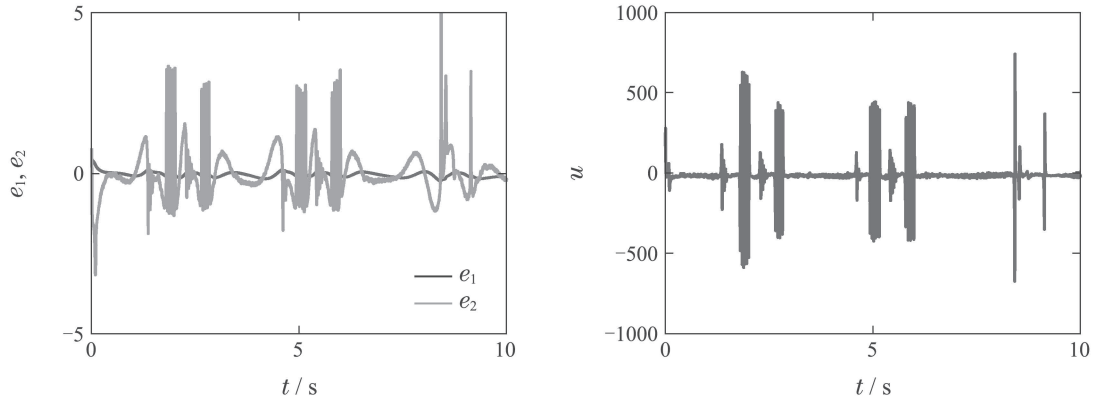
6.2.2 强扰动下的控制结果

为了验证本文方法的强抗扰性,在被控系统的外部扰动 $d_2(t)$ 的基础上,增加了随机强干扰,即 $50\text{rand}nX(1)$,仿真结果如图6所示。

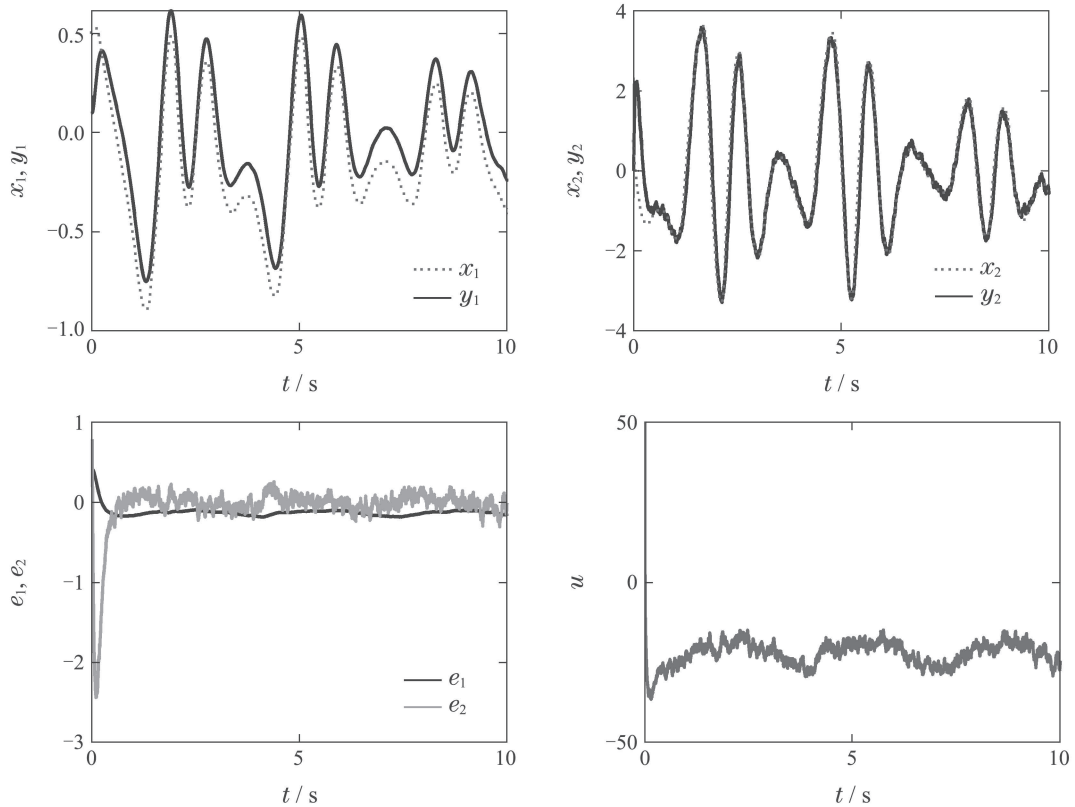


(a) 本文控制方法的仿真结果





(b) 自适应鲁棒滑模控制方法的仿真结果



(c) 自适应滑模控制方法的仿真结果

图 6 随机强扰动下的仿真结果

Fig. 6 Simulation results under strong disturbance

由仿真结果可知, 在外部扰动的基础上增加随机强干扰的情况下, 本文控制方法和自适应滑模控制方法仍然取得了较好的控制效果, 表明本文控制方法和自适应滑模控制方法都具有很强的抗扰鲁棒性; 自适应鲁棒控制方法的实验结果并不理想, 控制输入信号抖振幅度太大, 不仅会对系统造成一定影响, 甚至会损坏机器设备。

7 结论

针对陀螺仪系统混沌同步问题, 本文提出了参数自适应滑模控制方法, 从时域和复频域层面分别分析了全局渐近稳定性和抗扰动鲁棒性能, 并给出了参

数自适应律。仿真结果表明, 本文的控制方法响应速度快、控制精度高、无超调和波动现象。与自适应鲁棒滑模控制自适应滑模控制相比, 本文的控制方法不仅在控制性能方面具有突出的优势, 而且计算量小、结构简单。由于本文提出的参数自适应滑模控制方法不仅在保证强抗扰动能力的同时有效消除了现有滑模控制普遍存在的高频抖振现象且不依赖于被控对象模型和属性, 因此, 不仅在混沌系统特别是不确定混沌系统的控制领域具有广阔的应用前景, 而且在非线性不确定系统的控制领域也具有广阔的潜在应用价值。对混沌系统的研究在通信、神经网络、生物系

统、电子线路、金融等领域具有巨大的发展潜力和应用前景。

参考文献:

- [1] PECORA L M, CARROLL T L. Synchronization in chaotic systems. *Physical Review Letters*, 1990, 64(8): 821 – 824.
- [2] CICEK S, FERIKOGLU A, PEHLIVAN I. A new 3D chaotic system: dynamical analysis, electronic circuit design, active control synchronization and chaotic masking communication application. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(8): 4024 – 4030.
- [3] LIU Lezhu, ZHANG Jiqian, XU Guixia, et al. Chaotic secure communication method based on partial sequence parameter identification of chaotic system. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(1): 32 – 37. (刘乐柱, 张季谦, 许贵霞, 等. 一种基于混沌系统部分序列参数辨识的混沌保密通信方法. *物理学报*, 2014, 63(1): 32 – 37.)
- [4] LIU W, WANG Z M, NI M K. Controlled synchronization for chaotic systems via limited information with data packet dropout. *Automatica*, 2013, 49(8): 2576 – 2579.
- [5] LI Zhenbo, TANG Jiashi. Chaotic synchronization with parameter perturbation and its secure communication scheme. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(5): 592 – 600. (李震波, 唐驾时. 参数扰动下的混沌同步控制及其保密通信方案. *控制理论与应用*, 2014, 31(5): 592 – 600.)
- [6] MOADDY K, RADWAN A G, SALAMA K N, et al. The fractional-order modeling and synchronization of electrically coupled neuron systems. *Computers and Mathematics with Applications*, 2012, 64(10): 3329 – 3339.
- [7] AHMAD I, BIN S A, IBRAHIM A B, et al. The synchronization of chaotic systems with different dimensions by a robust generalized active control. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(11): 4859 – 4871.
- [8] ZANG Qunli. Synchronization of multi-chaotic systems via ring impulsive control. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(2): 226 – 232. (张群力. 环状脉冲控制下的多个混沌系统同步(英文). *控制理论与应用*, 2010, 27(2): 226 – 232.)
- [9] WANG Hongwei, YU Shuanghe. Robust adaptive synchronization of chaotic systems based on Chebyshev orthogonal function neural network. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(10): 1100 – 1104. (王宏伟, 于双和. 基于Chebyshev正交函数神经网络的混沌系统鲁棒自适应同步. *控制理论与应用*, 2009, 26(10): 1100 – 1104.)
- [10] YAHYAZADEH M, RANJBAR N A, GHADERI R. Synchronization of chaotic systems with known and unknown parameters using a modified active sliding mode control. *ISA Transactions*, 2011, 50(2): 262 – 267.
- [11] LEE H K, CHOI K, PARK J, et al. Self-calibration of gyro using monocular SLAM for an indoor mobile robot. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2012, 10(3): 558 – 566.
- [12] NONOMURA Y, FUJIYOSHI M, OMURA Y, et al. SOI rate gyro sensor for automotive control. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 132(1): 42 – 46.
- [13] DONAIRE A, PEREZ T. Energy-based nonlinear control of ship roll gyro-stabiliser with precession angle constraints. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, 46(33): 328 – 333.
- [14] JIKUYA I, FUJII K, YAMADA K. Attitude maneuver of spacecraft with a variable-speed double-gimbal control moment gyro. *Advances in Space Research*, 2016, 58(7): 1303 – 1317.
- [15] GE Z M, CHEN H K, CHEN H H. The regular and chaotic motions of a symmetric heavy gyroscope with harmonic excitation. *Journal of Sound and vibration*, 1996, 198(2): 131 – 147.
- [16] LEI Y M, XU W, ZHENG H C. Synchronization of two chaotic nonlinear gyros using active control. *Physics Letters A*, 2005, 343(1/2/3): 153 – 158.
- [17] ZENG Zhezhaoh, LEI Ni, SHENG Lizeng. Compensation control on chaotic systems with uncertainties based on polynomial basis functions model. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(15): 74 – 81. (曾喆昭, 雷妮, 盛立程. 不确定混沌系统的多项式函数模型补偿控制. *物理学报*, 2013, 62(15): 74 – 81.)
- [18] ZENG Zhezhaoh. Feedback compensation control on chaotic system with uncertainty based on radial basis function neural network. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(3): 68 – 73. (曾喆昭. 不确定混沌系统的径向基函数神经网络反馈补偿控制. *物理学报*, 2013, 62(3): 68 – 73.)
- [19] YAU H T. Chaos synchronization of two uncertain chaotic nonlinear gyros using fuzzy sliding mode control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(2): 408 – 418.
- [20] YAN Xiaomei, LIU Ding, GUO Huijun. Chaos control of fractional order Chen system via radial basis function neural network. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(3): 344 – 349. (阎晓妹, 刘丁, 郭会军. 分数阶Chen混沌系统的径向基函数神经网络控制. *控制理论与应用*, 2010, 27(3): 344 – 349.)
- [21] FARIVAR F, SHOOREHDELI M A, NEKOUI M A, et al. Chaos control and generalized projective synchronization of heavy symmetric chaotic gyroscope systems via Gaussian radial basis adaptive variable structure control. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2012, 45(1): 80 – 97.
- [22] XIAN Yongju, XIA Cheng, XU Changbiao. New chaotic system and the adaptive synchronization control of its fractional order system. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(6): 878 – 886. (鲜永菊, 夏诚, 徐昌彪. 新混沌系统及其分数阶系统的自适应同步控制. *控制理论与应用*, 2018, 35(6): 878 – 886.)
- [23] LIU J K. *Sliding Mode Control Design and MATLAB Simulation – The Basic Theory and Design Method*. Three edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 116 – 118.
- [24] ZHOU Tao. Adaptive sliding control based on a new reaching law. *Control and Decision*, 2016, 31(7): 1335 – 1338. (周涛. 基于一种新型趋近律的自适应滑模控制. *控制与决策*, 2016, 31(7): 1335 – 1338.)
- [25] CHEN H K. Chaos and chaos synchronization of a symmetric gyro with linear-plus-cubic damping. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, 255(4): 719 – 740.
- [26] MOHAMMADPOUR S, BINAZADEH T. Robust finite-time synchronization of uncertain chaotic systems: application on Duffing-Holmes system and chaos gyros. *Systems Science & Control Engineering*, 2018, 6(1): 28 – 37.

作者简介:

- 杜肖丰 硕士研究生, 目前研究方向为智能控制, E-mail: 1270806160@qq.com;
- 曾喆昭 博士, 教授, 目前研究方向为智能计算与智能控制, E-mail: 508984293@qq.com;
- 程婷 硕士研究生, 目前研究方向为智能控制, E-mail: chengting96@outlook.com;
- 程启芝 硕士研究生, 目前研究方向为智能控制, E-mail: 1431344701@qq.com;
- 王凤琴 硕士研究生, 目前研究方向为智能控制, E-mail: 1129763954@qq.com.