

DOI: 10.11992/tis.201801022

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20190321.0916.008.html>

冠状动脉系统的微分积分终端滑模混沌抑制

钱殿伟, 席亚菲

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘 要: 冠状动脉系统的混沌现象会导致严重的健康问题。以非线性冠状动脉系统为研究对象, 建立了不确定性冠状动脉系统动力学模型, 提出了不确定性冠状动脉系统的微分积分终端滑模混沌抑制方法, 针对该模型的不确定性设计了扰动观测器, 根据 Lyapunov 理论证明了所设计控制系统的稳定性, 通过仿真实验验证了所提出的混沌抑制方法的有效性和可行性。

关键词: 混沌抑制; 冠状动脉系统; 非匹配不确定性; 滑模控制; 扰动观测器

中图分类号: TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2019)04-0650-05

中文引用格式: 钱殿伟, 席亚菲. 冠状动脉系统的微分积分终端滑模混沌抑制 [J]. 智能系统学报, 2019, 14(4): 650-654.

英文引用格式: QIAN Dianwei, XI Yafei. Chaos suppression in coronary artery systems using differential-integral terminal sliding mode[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2019, 14(4): 650-654.

Chaos suppression in coronary artery systems using differential-integral terminal sliding mode

QIAN Dianwei, XI Yafei

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The chaos phenomenon of coronary artery systems can lead to serious health problems. Taking nonlinear coronary artery systems as the research object, a dynamics model of uncertainty in coronary artery systems was established, and the differential-integral terminal sliding mode control (DI-SMC) was investigated for the uncertain coronary artery system. The disturbance observer was designed for the uncertainty of the model. Stability of the designed control system was proven according to the Lyapunov theory. The feasibility and effectiveness of the proposed chaos suppression method was verified using simulation results.

Keywords: chaos suppression; coronary artery system; non-matching uncertainty; sliding mode control; disturbance observer

近年来, 混沌抑制作为生物工程界的关键技术受到了越来越多的关注。将混沌抑制原理应用到生物医学领域取得了很多理论成果。冠状动脉是为心脏提供氧气的肌型血管。血管痉挛是造成心肌梗死、心绞痛等冠状动脉疾病的根本原因^[1-2]。而血管痉挛在数学角度上看就是血管的混沌状态^[3]。血管混沌现象可能会对身体带来致命威胁^[4]。所以, 研究冠状动脉系统的混沌特性, 实现冠状动脉系统的混沌抑制具有理论意义和实用价值。

混沌抑制控制方法主要有线性法^[5]、非线性

方法^[6-8]、局部线性方法^[9]等。其中线性、局部线性方法只适用于线性或线性化的系统。冠状动脉系统是一类非线性生物系统, 需要设计非线性控制器来实现混沌抑制。采用非线性方法, 已经提出的混沌抑制方法包括高阶自适应滑模控制^[6]、时滞状态反馈控制^[10]、滑模控制^[11]等。

在现实中, 冠状动脉系统易受体温、血压等多种不确定性的影响^[1], 这更增大了其混沌抑制的难度。微分积分终端滑模是一种滑模控制设计方法, 消除了滑动模态的到达时间, 适用于高相对阶系统, 这种设计方法不存在奇异现象, 能精确估计误差收敛时间^[12]。

虽然滑模控制在滑动模态下对匹配不确定性

收稿日期: 2018-01-31. 网络出版日期: 2019-03-22.

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(2018MS025).

通信作者: 钱殿伟. E-mail: dianwei.qian@ncepu.edu.cn.

具有不变性,但是冠状动脉系统的复杂性导致其难以满足滑模控制的匹配条件。已证明,扰动观测器可以有效地克服非匹配不确定性对滑模控制系统的影响,因此本文结合微分积分终端滑模控制方法和扰动观测器来解决不确定性冠状动脉系统的混沌抑制问题。

1 数学模型及问题描述

冠状动脉本质上是一类肌型血管,其动态集总参数模型为:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -bx_1 - cx_2 \\ \dot{x}_2 &= -\lambda(1+b)x_1 - \lambda(1+c)x_2 + \lambda x_1^3 + E \cos \omega t\end{aligned}\quad (1)$$

式中: x_1 是血管内径变化差; x_2 是血管压力差; t 是时间变量; b, c, λ 为冠状动脉系统的集总参数; $E \cos \omega t$ 表示系统受到周期性刺激。

图1表示冠状动脉系统随着参数 c 变化的分岔图。其中,初始条件为 $[x_1(0) \ x_2(0)]^T = [0.2 \ 0.2]^T$; 其他参数为 $b=0.15, \lambda=-0.65, E=0.3$ 和 $\omega=1$; 时间序列为 $2\pi, 4\pi, 6\pi, 10\pi$ 和 12π ; 时间周期为 2π 。类似地,冠状动脉系统随着 λ 和 b 的变化也存在分岔现象。选取参数 $b=0.15, \lambda=-0.65, c=-1.7, E=0.3$ 和 $\omega=1$, 在同样的初始条件下,冠状动脉系统相平面图如图2所示。从图1、图2可见,冠状动脉系统在某些参数下处于混沌状态,其混沌抑制问题具有挑战性。

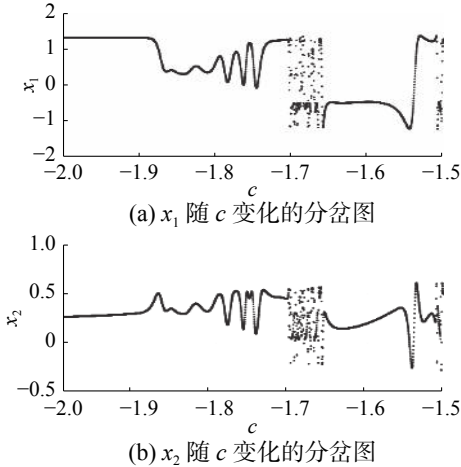


图1 状态随着参数 c 变化的分岔图

Fig. 1 Bifurcation diagrams of the states with respect to the change of c

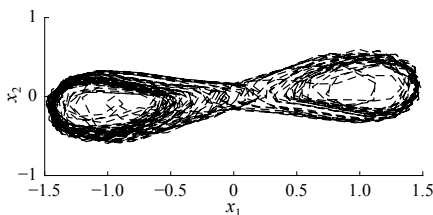


图2 冠状动脉系统的相平面图

Fig. 2 Phase plane of the coronary artery system

定义(1)为标称系统,其不确定性系统为

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}}_1 &= -b\bar{x}_1 - c\bar{x}_2 + d_1 \\ \dot{\bar{x}}_2 &= -\lambda(1+b)\bar{x}_1 - \lambda(1+c)\bar{x}_2 + \lambda\bar{x}_1^3 + \\ &\quad E \cos \omega \tau + u + d_2\end{aligned}\quad (2)$$

式中: $\bar{x} = [\bar{x}_1 \ \bar{x}_2]$ 为状态变量; $d = [d_1 \ d_2]$ 代表系统的不确定性; u 表示控制器的控制输入。

假设1 系统不确定性 d 有界, 即 $\|d\|_\infty \leq d^*$, d^* 是未知的正实数。

假设2 d 是慢时变扰动, 即 $\dot{d} \approx 0_{2 \times 1}$ 。

冠状动脉系统混沌抑制的目的是通过设计控制器使得不确定性系统与标称系统同步, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0_{2 \times 1} \quad (3)$$

式中: $0_{2 \times 1} = [0 \ 0]^T$, $e = [e_1 \ e_2]^T$, $e_1 = \bar{x}_1 - x_1$ 和 $e_2 = \bar{x}_2 - x_2$ 。

根据式(3)的误差定义, 由式(1)、(2)可得

$$\begin{aligned}\dot{e}_1 &= -be_1 - ce_2 + d_1 \\ \dot{e}_2 &= -(\lambda + b\lambda)e_1 - (\lambda + c\lambda)e_2 + \lambda e_1^3 \\ &\quad + 3cx_1\bar{x}_1e_1 + u + d_2\end{aligned}\quad (4)$$

定义 $\tilde{x}_1 = e_1$, $\tilde{x}_2 = \dot{e}_1$, 对 \tilde{x}_1 和 \tilde{x}_2 分别求导, 并将式(4)代入 $\dot{\tilde{x}}_2$, 可得

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}_1 &= \tilde{x}_2 \\ \dot{\tilde{x}}_2 &= \lambda(c-b)\tilde{x}_1 - (b+\lambda+c\lambda)\tilde{x}_2 - \lambda c\tilde{x}_1^3 - \\ &\quad 3cx_1\bar{x}_1\tilde{x}_1 - cu - cd_2 + \dot{d}_1 + \lambda(1+c)d_1\end{aligned}\quad (5)$$

根据假设2, $\dot{d}_1 \approx 0$, 式(5)可以写成

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}} &= F(\tilde{x}, d) + Bu \\ y &= H(\tilde{x})\end{aligned}\quad (6)$$

式中: $d = -cd_2 + \lambda(1+c)d_1$; $B = [0 \ -c]^T$; $\tilde{x} = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2]^T$;

$f(\tilde{x}) = \lambda(c-b)\tilde{x}_1 - (b+\lambda+c\lambda)\tilde{x}_2 - \lambda c\tilde{x}_1^3 - 3cx_1\bar{x}_1\tilde{x}_1$;

$F(\tilde{x}, d) = [\tilde{x}_2 \ f(\tilde{x}) + d]^T$; $H(\tilde{x}) = \tilde{x}_1$ 。

假设3 $F(\tilde{x}, d)$ 和 $H(\tilde{x})$ 光滑且李导数存在。

根据假设3, 可计算如下李导数 $L_B H(\tilde{x}, d) = 0$, $L_B L_F H(\tilde{x}, d) = -c \neq 0$ 。可见式(4)的相对阶为2, 因此模型(6)适用微分积分终端滑模方法。进一步, 该模型的输入输出方程可表示为:

$$\ddot{y} = L_F^2 H(\tilde{x}, d) + L_B L_F H(\tilde{x}, d)u \quad (7)$$

式中: $L_F^2 H(\tilde{x}, d) = \frac{\partial(L_F H(\tilde{x}, d))}{\partial \tilde{x}}$, $F = f(\tilde{x}) + d$ 。根据

式(6)、(7), 该模型的输入输出方程可写为

$$\ddot{y} = f(\tilde{x}) + d - cu \quad (8)$$

2 控制设计

本文采用微分积分终端滑模控制方法抑制冠状动脉系统的混沌状态, 设计微分积分终端滑模面为

$$s = e_{D_1} + \alpha e_{I_1} \quad (9)$$

式中: α 是控制器设计参数; $e_{D_0} = e_1$, $e_{I_1} = -e_{D_1}(0)/\alpha$;

$e_{D_1} = \dot{e}_{D_0}^{p_{11}/q_{11}} + \beta e_{D_0}$; $e_{I_1} = \int_0^t e_{D_{11}}^{q_{21}/p_{21}}(\tau) d\tau$; $\beta > 0$; $p_{11} > q_{11} > 0$; $p_{21} > q_{21} > 0$; 且 p, q 均为正奇数。

定理1 若定义式(9)为滑模平面, 则状态变

量 $\begin{bmatrix} \tilde{x}_1 & \tilde{x}_2 \end{bmatrix}^T$ 将在有限时间 T_{D_1} 内收敛至 $\mathbf{0}_{2 \times 1}$, 其中 T_{D_1} 为:

$$T_{D_1} = \frac{|e_{D_1}(0)|^{1-q_{21}/p_{21}}}{\alpha(1-q_{21}/p_{21})} + \frac{|e_{D_0}(t_{11})|^{1-q_{11}/p_{11}}}{\beta(1-q_{11}/p_{11})} \quad (10)$$

式中 t_{11} 是滑模 $e_{D_1} = 0$ 的到达时间。

证明 所设计的滑动模态开始于 $t=0$, 所以 $e_{D_1} = -\alpha e_{t_1}$ 成立。由于 $e_{t_1} = \int_0^t e_{D_{11}}^{q_{21}/p_{21}}(\tau) d\tau$, 所以

$$\dot{e}_{t_1} = -\alpha^{q_{21}/p_{21}} e_{t_1}^{q_{21}/p_{21}}(t) \quad (11)$$

式中 $e_{t_1}(0) = -e_{D_1}(0)/\alpha$ 。解式 (11) 可得 e_{t_1} 的收敛时间为

$$t_{11} = \frac{|e_{D_1}(0)|^{1-q_{21}/p_{21}}}{\alpha(1-q_{21}/p_{21})} \quad (12)$$

在滑模面 $s=0$ 上 $e_{D_1} = -\alpha e_{t_1}$, 表明滑模 e_{D_1} 需要花费时间 t_{11} 收敛至零。当 $e_{D_1}=0$ 时, e_{D_0} 也会成功收敛至零。在 $t=t_{11}$ 时, e_{D_1} 可被描述为

$$\dot{e}_{D_0}(t_{11}) = -\beta^{q_{11}/p_{11}} e_{D_0}^{q_{11}/p_{11}}(t_{11}) \quad (13)$$

由式 (13), $e_{D_0}(t_{11})$ 到 $e_{D_0}=0$ 时间为

$$t_{01} = \frac{|e_{D_0}(t_{11})|^{1-q_{11}/p_{11}}}{\beta(1-q_{11}/p_{11})} \quad (14)$$

式 (9) 的微分项和积分项相互独立, 从 $s=0$ 到 $e_{D_0}=0$ 的时间为 t_{11} 和 t_{01} 之和, 即有限收敛时间为 $T_{D1}=t_{11}+t_{01}$ 。

进一步, 对式 (9) 求导并将式 (8) 代入可得

$$\dot{s} = \frac{p_{11}}{q_{11}} \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} (f(\tilde{x}) + d - cu) + \psi \quad (15)$$

式中: $\psi = \beta \dot{e}_{D_0} + \alpha (\dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} + \beta e_{D_0})^{q_{21}/p_{21}}$ 。

为了获取微分积分终端滑模控制律, 选取李雅普诺夫函数 $V_0 = s^2/2$, 对其求导可得 $\dot{V}_0 = s\dot{s}$, 并代入式 (15), 令 $\dot{V}_0 < 0$ 可得微分积分终端滑模控制律

$$u = \frac{-1}{c} \left[-k_e |\psi| \left(\frac{q_{11}}{p_{11}} \right) A^{-1} \frac{s}{|s|} - f(\tilde{x}) - [k \operatorname{sgn}(s) + \eta s] - d_0^* \right] \quad (16)$$

式中: $A = \begin{cases} \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)}, & |\dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)}| \geq \varepsilon \\ \varepsilon & \text{其他} \end{cases}$; $k > 0$; $\eta > 0$; $k_e > 0$ 。考虑 A , 参数 $\phi > 0$ 满足:

$$\| (A - \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)}) A^{-1} \| \leq \phi < 1 \quad (17)$$

为了保证 $\dot{V}_0 < 0$, 参数 k_e 应满足 $k_e > 1/(1-\phi)$ 。

将式 (16) 代入式 (15), 并考虑条件 (17), 可得当 $k > d_0^*$ 时, $\dot{V}_0 < 0$ 。但在假设 1 中, d^* 是未知的, 所以 d_0^* 也是未知的, 因此通过选取 k 保证 $\dot{V}_0 < 0$ 具有保守性, 而过于保守的 k 会恶化抖振现象, 降低控制性能。

为解决 d^* 是未知的问题, 本文设计扰动观测器估计系统不确定性, 从而同时保证控制系统的稳定性和控制性能。设计扰动观测器如下:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -LB_2 P - L(B_2 L \tilde{x} + A \tilde{x} + B_1 u + M) \\ \hat{d} &= z + L \tilde{x} \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $z \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$ 是观测器的状态变量; $\hat{d} \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$ 为不确定性估计值; $L \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ 为观测器增益变量。各参数矩阵描述为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \lambda(c-b) & -(b+\lambda+c\lambda) \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -c \end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 \\ -\lambda c \tilde{x}_1^3 - 3c x_1 \tilde{x}_1 \tilde{x}_1 \end{bmatrix}。$$

定义估计误差 e_d 为

$$e_d = d - \hat{d} \quad (19)$$

假设 4 e_d 有界, 即 $|e_d| \leq e_d^*$, 其中 e_d^* 是未知的正实数。

由假设 2 可知 $\dot{d} \approx 0$ 。对式 (19) 求导, 并将式 (18) 代入 e_d 的导数, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{e}_d &\approx LB_2 P + L(B_2 L \tilde{x} + A \tilde{x} + B_1 u + M) - \\ &\quad L(A \tilde{x} + B_1 u + B_2 d + M) = \\ &\quad LB_2(\hat{d} - L \tilde{x}) + L^2 B_2 \tilde{x} - LB_2 d = \\ &\quad LB_2(\hat{d} - d) = -LB_2 e_d \end{aligned} \quad (20)$$

解式 (20) 可得

$$e_d = \exp(-LB_2)e_d(0) \quad (21)$$

可见, 通过选取向量 L 保证 LB_2 是正常数, 可保证估计误差 e_d 在 $t \rightarrow \infty$ 时指数收敛。因此, 可由扰动观测器输出 \hat{d} 代替式 (16) 中的 d_0^* 。

定理 2 在假设 1 至 4 下, 针对冠状动脉系统模型 (2), 利用输入-输出动态方程 (8), 定义微分积分终端滑模面 (9), 采用扰动观测器 (18), 设计微分积分终端滑模控制律 (22), 则闭环混沌抑制系统是渐近稳定的。

$$u = -\frac{1}{c} - k_e |\psi| \frac{q_{11}}{p_{11}} A^{-1} s/|s| - f(\tilde{x}) - [k \operatorname{sgn}(s) + \eta s] - \hat{d} \quad (22)$$

式中 $k > e_d^*$ 。

证明 采用同样的李雅普诺夫函数 $V_0 = s^2/2$, 对其求导并将式 (15) 代入, 可得

$$\dot{V}_0 = s \frac{p_{11}}{q_{11}} \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} [f(\tilde{x}) + d - cu] + s\psi \quad (23)$$

将式 (22) 代入式 (23) 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= s\psi - s \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} k_e |\psi| A^{-1} s/|s| + \\ &\quad s \frac{p_{11}}{q_{11}} \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} [d - \hat{d} - (k \operatorname{sgn}(s) + \eta s)] \end{aligned} \quad (24)$$

由于 $p_{11} > 0$, $q_{11} > 0$, 且 $p_{11} > q_{11}$, 所以式 (24) 中所有 $\dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)}$ 满足 $\dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} > 0$ 。式 (24) 中的第 1 项和第 2 项满足不等式 (25):

$$\begin{aligned} s\psi - s \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} k_e |\psi| A^{-1} s/|s| &= \\ s\psi - k_e |\psi| s + k_e |\psi| A A^{-1} s - \\ s \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} k_e |\psi| A^{-1} s/|s| &\leq \\ |\psi| s - k_e |\psi| s + k_e |\psi| (A - \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)}) A^{-1} s &\leq \\ |\psi| s - k_e (1 - \phi) |\psi| s \end{aligned} \quad (25)$$

选择 $k_e > (1-\phi)$ 进而 $s\psi - s \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} k_e |\psi| A^{-1} s/|s| < 0$ 。

进一步, 式 (24) 中第 3 项可描述为:

$$s \frac{p_{11}}{q_{11}} \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} [d - \hat{d} - (k \operatorname{sgn}(s) + \eta s)] = \frac{p_{11}}{q_{11}} \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} [e_d s - k|s| - \eta s^2] \leq \frac{p_{11}}{q_{11}} \dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)} [(e_d^* - k)|s| - \eta s^2] \quad (26)$$

为使 $s(p_{11}/q_{11})\dot{e}_{D_0}^{(p_{11}/q_{11}-1)}[d - \hat{d} - (k \operatorname{sgn}(s) + \eta s)] < 0$ 成立, 可选择 $k > e_d^*$ 。

由式 (25) 和式 (26) 可得 $\dot{V}_0 < 0$, 满足滑模动态的可达性条件。

虽然式 (22) 中同样需要选择 k 大于未知的 e_d^* 以保证控制系统的稳定性, 但是由于 e_d 是指数收敛的, 因此其最大值存在于 $e_d(0)$ 。较之于式 (16) 完全依靠经验保守地选择 k , 采用扰动观测器技术可以在保证系统稳定性的前提下减少滑模控制的抖振现象, 提高控制系统的性能。

3 仿真结果

在标称系统 (1) 和不确定性系统 (2) 中, 系统集总参数取为 $b=0.1$ 、 $\lambda=-0.65$ 、 $c=-1.7$ 、 $E=0.3$ 和 $\omega=1$ 。初始状态为 $[x_1(0) \ x_2(0)]^T = [0.2 \ 0.2]^T$ 。所设计的微分积分终端滑模器参数为 $\alpha=2$ 、 $\beta=2$ 、 $p_{11}=p_{21}=11$ 、 $q_{11}=q_{21}=13$ 、 $k_e=2$ 、 $\eta=0.1$ 、 $k=2$; 所设计的扰动观测器参数为 $L=[0 \ 5]^T$ 。

式 (2)、式 (5) 中, d_1 属于非匹配扰动而 d_2 属于匹配扰动。由于滑模控制在滑动模态下对匹配扰动具有不变性, 因此在仿真中仅考虑非匹配扰动的对系统性能的影响, 取 $d_1=2\sin(t)$ 和 $d_2=0$ 。

采用文献 [6] 中的高阶自适应滑模控制方法、微分积分终端滑模控制方法以及本文提出的控制方法进行对比实验, 仿真结果如图 3~7 所示。如定理 2 所证, 采用所设计的控制策略, 冠状动脉系统在非匹配不确定性的影响下能够实现混沌抑制。

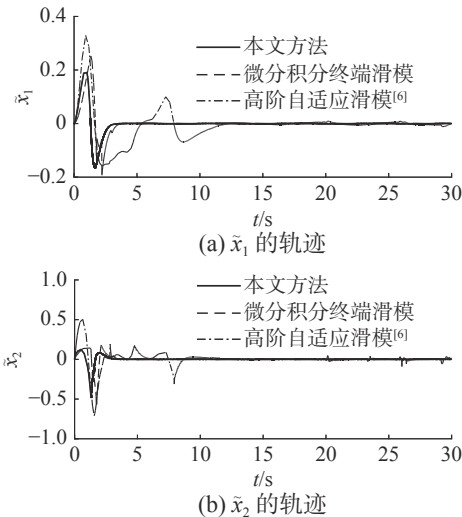


图 3 状态轨迹

Fig. 3 Trajectories of the states

从图 3 可知, 微分积分终端滑模控制方法和扰动观测器可以有效地抑制冠状动脉系统中的混沌现象, 具有较高的跟踪精确度。而高阶自适应滑模控制系统受非匹配不确定性的影响较大, 动态响应时间较长。图 4 表示滑模平面变量, 如定理 1 所证, 微分积分终端滑模控制方法能够保证系统误差在有限时间内收敛到零。扰动观测器的估计误差示于图 5。标称系统 (1)、不确定性系统 (2) 和误差系统 (5) 的相平面图示于图 7。

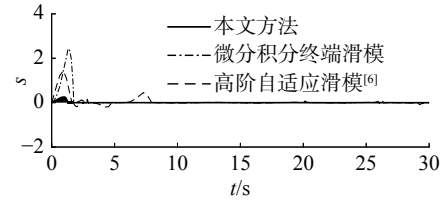


图 4 滑模面

Fig. 4 Sliding surface

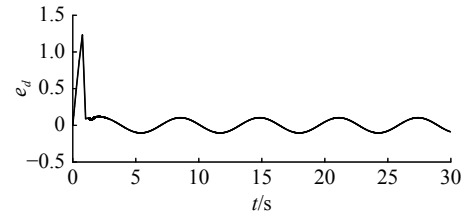


图 5 扰动误差

Fig. 5 Estimate error

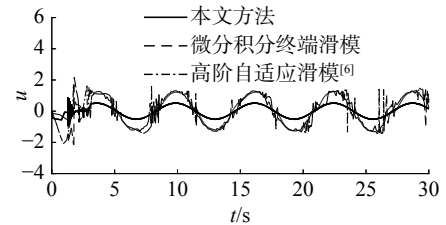


图 6 控制量

Fig. 6 Control input

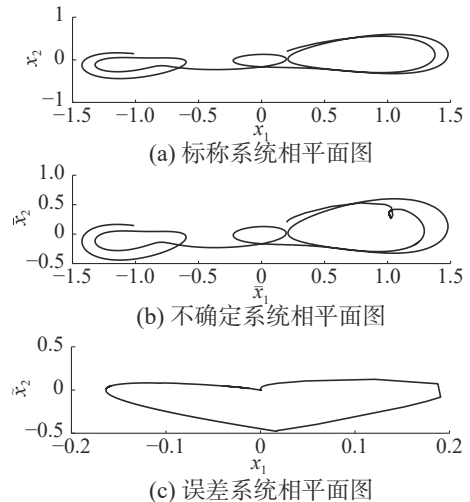


图 7 标称系统、不确定系统与误差系统的相平面图

Fig. 7 Phase plane trajectories of the error system, the nominal system and the uncertain system

4 结束语

本文针对冠状动脉系统的混沌抑制问题,提出了微分积分终端滑模控制方法,建立了冠状动脉系统的混沌同步动力学模型,采用扰动观测器克服系统中不确定性的不利影响,利用李雅普诺夫理论分析了所设计混沌抑制控制系统的稳定性,通过与高阶自适应滑模的仿真对比,验证了所提出的控制方法的有效性与可行性。

参考文献:

- [1] OZAKI K, TANAKA T. Molecular genetics of coronary artery disease[J]. *Journal of human genetics*, 2016, 61(1): 71–77.
- [2] HE Guowei, TAGGART D P. Spasm in arterial grafts in coronary artery bypass grafting surgery[J]. *The annals of thoracic surgery*, 2016, 101(3): 1222–1229.
- [3] SCHAUER T, NEGARD N O, PREVIDI F, et al. Online identification and nonlinear control of the electrically stimulated quadriceps muscle[J]. *Control engineering practice*, 2005, 13(9): 1207–1219.
- [4] LI Wenlei. Tracking control of chaotic coronary artery system[J]. *International journal of systems science*, 2012, 43(1): 21–30.
- [5] RAFIKOV M, BALTHAZAR J M. On control and synchronization in chaotic and hyperchaotic systems via linear feedback control[J]. *Communications in nonlinear science and numerical simulation*, 2008, 13(7): 1246–1255.
- [6] 赵占山, 张静, 丁刚, 等. 冠状动脉系统高阶滑模自适应混沌同步设计[J]. *物理学报*, 2015, 64(21): 210508.
ZHAO Zhanshan, ZHANG Jing, DING Gang, et al. Chaos synchronization of coronary artery system based on higher order sliding mode adaptive control[J]. *Acta physica sinica*, 2015, 64(21): 210508.
- [7] CHITHRA A, MOHAMED I R. Synchronization and chaotic communication in nonlinear circuits with nonlinear coupling[J]. *Journal of computational electronics*, 2017, 16(3): 833–844.
- [8] GHOSH D, CHOWDHURY A R. Nonlinear observer-based impulsive synchronization in chaotic systems with multiple attractors[J]. *Nonlinear dynamics*, 2010, 60(4): 607–613.
- [9] YU Yonggang, LI Hanxiong, DUAN Jian. Chaos synchronization of a unified chaotic system via partial linearization[J]. *Chaos, solitons and fractals*, 2009, 41(1): 457–463.
- [10] WU Wenshu, ZHAO Zhanshan, ZHANG Jing, et al. State feedback synchronization control of coronary artery chaos system with interval time-varying delay[J]. *Nonlinear dynamics*, 2017, 87(3): 1773–1783.
- [11] 潘光, 魏静. 一种分数阶混沌系统同步的自适应滑模控制器设计[J]. *物理学报*, 2015, 64(4): 040505.
PAN Guang, WEI Jing. Design of an adaptive sliding mode controller for synchronization of fractional-order chaotic systems[J]. *Acta physica sinica*, 2015, 64(4): 040505.
- [12] CHIU C S. Derivative and integral terminal sliding mode control for a class of MIMO nonlinear systems[J]. *Automatica*, 2012, 48(2): 316–326.

作者简介:



钱殿伟, 男, 1980 年生, 副教授, 博士, 主要研究方向为非线性系统理论与控制。承担中央高校科研业务费项目 1 项。发表学术论文 80 余篇。



席亚菲, 女, 1993 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为变结构控制理论与应用、智能机器人技术。