

分布时滞脉冲控制策略的混沌神经网络的同步

李露燕, 宾红华, 黄振坤

(集美大学理学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 提出一个新的分布时滞脉冲控制器, 研究具有分布时滞的混沌神经网络的同步。基于新的脉冲时滞不等式, 建立混沌神经网络的同步准则。通过数值算例, 验证了分布时滞控制的有效性。

[关键词] 脉冲控制; 分布时滞; 同步; 混沌神经网络

[中图分类号] O 193

Synchronization of Chaotic Neural Networks Based on Distributed Delay Impulse Control Strategy

LI Luyan, BIN Honghua, HUANG Zhenkun

(School of Science, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In this paper, a new distributed delay impulse controller was proposed to study the synchronization of chaotic neural networks with distributed delay. Based on a new impulsive delay inequality, the synchronization criterion of chaotic neural network was established. The effectiveness of distributed delay control was verified by numerical examples.

Keywords: impulse control; distributed delay; synchronization; chaotic neural network

0 引言

近年来, 混沌神经网络在各个领域都有应用, 如联想记忆、信息加密、模式识别和复杂系统控制等^[1-2]。由于神经网络中神经元之间固有的信息传递和执行器的切换速度有限, 神经网络中不可避免地存在时滞。为了研究时滞给系统造成的不良动力学性能问题, 许多研究者致力于探索时滞神经网络的动力学行为。例如, 文献[3]研究了三维 Hopfield 神经网络时滞的混沌行为, 不仅证实了神经网络中存在混沌, 而且在一定条件下, 系统的混沌特性与罗斯勒混沌系统非常相似; 文献[4]研究了输入饱和条件下具有离散和分布时滞的混沌神经网络的指数同步问题, 重点研究饱和反馈控制器的设计, 使同步误差系统局部指数稳定, 并且在线性矩阵不等式的框架下, 基于时滞相关条件和增广 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 建立了时滞相关条件的充分条件。

混沌复杂网络的同步控制发展非常迅速, 因此它也成为了研究重点。例如, 文献[5]提出了一种基于最优结构的神经网络群的神经同步方法, 将其用于在两个授权个体之间创建和定义密钥的最佳神经网络体系结构; 文献[6]研究了量子化控制下时滞混沌神经网络的扩展耗散同步问题。同步作为神经网络的一种重要的动态行为, 许多有趣的控制方法已经被提出, 如间歇控制、切换控制、脉冲

[收稿日期] 2021-09-19

[基金项目] 国家自然科学基金项目(61573005); 福建省自然科学基金项目(2018J01417)

[作者简介] 李露燕(1998—), 女, 硕士生, 从事复杂网络分析与控制研究。通信作者: 宾红华(1966—), 女, 教授, 硕导, 从事复杂网络分析与控制研究。E-mail: hbbin@jmu.edu.cn

控制等。其中脉冲控制是一种重要的不连续控制方案^[7], 它的主要思想是通过突然的跳跃瞬间改变系统的状态, 对于某些系统无法承受连续扰动情况, 脉冲控制提供了一种更为高效的策略。文献 [8] 在执行器饱和的混合脉冲控制下, 研究了一类非线性动态网络的局部同步问题, 设计了饱和脉冲采样控制器, 并估计了驱动-响应误差系统的吸引域, 同时对不含执行器饱和的非线性动态网络给出了指数同步条件和控制器设计。文献 [9] 讨论时滞输入控制下参数失配神经网络的准同步性问题。文献 [10] 研究一般非线性时滞系统的脉冲稳定问题, 提出了一种分布时滞非线性脉冲控制器, 然而对脉冲区间的上下界有很多限制, 这导致了其非常有限的应用。

近些年的研究对分布时滞、脉冲的应用较少, 如文献 [11] 研究了具有无限分布时滞的脉冲系统的全局指数稳定性, 但是只考虑两个连续脉冲次数之间的间隔很小的情况, 应用条件比较严格。本文结合分布时滞和脉冲, 提出了一种分布时滞混沌神经网络, 利用新的分布时滞微分不等式, 取消分布时滞与系统时滞之间关系的限制, 去掉对脉冲区间的限制, 基于驱动-响应的理论和一种分布时滞脉冲不等式实现分布时滞混沌神经网络的同步。

1 模型描述和预备知识

1.1 模型描述

基本符号: \mathbf{R} 、 \mathbf{R}_+ 、 \mathbf{Z} 、 \mathbf{Z}_+ 分别表示实数集、正实数集、整数集、正整数集; \mathbf{R}^n 表示具有欧几里德范数的 n 维实空间; $\|\cdot\|_\xi$ 表示在 $[t_0 - \xi, t_0]$ 区间上的上确界范数。对于任意区间 $T_1 \subseteq \mathbf{R}$, 集合 $T_2 \subseteq \mathbf{R}^i (1 \leq i \leq n)$, $PC(T_1, T_2) = \{\varphi: T_1 \rightarrow T_2 \text{ 几乎处处连续, 除了 } \varphi(t^+) \text{ 和 } \varphi(t^-) \text{ 存在的有限点, 并且 } \varphi(t^+) = \varphi(t)\}$; $a \vee b$ 表示 a 和 b 中的最大值。

考虑神经网络

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -Ax(t) + Bg(x(t)) + C \int_{t-\tau}^t g(x(s))ds + J, t \geq t_0, \\ x(s) = \phi(s), s \in [t_0 - \tau, t_0]. \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x(t) \in \mathbf{R}^n$ 表示神经网络在 t 时刻的状态向量; $A = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 表示满足 $a_i > 0 (i = 1, 2, \dots, n)$ 的对角矩阵; B 、 C 表示连接权矩阵和时滞权矩阵; $t > 0$ 表示传输过程中发生的时滞; J 表示外部输入; $g(x) = (g_1(x_1), g_2(x_2), \dots, g_n(x_n))^T$ 表示满足 $|g_j(u) - g_j(v)| \leq l_j^g |u - v| (u, v \in \mathbf{R}, j = 1, 2, \dots, n)$ 的神经元激活函数, $l_j^g > 0$ 是 Lipschitz 常数; $\phi \in PC([t_0 - \tau, t_0], \mathbf{R}^n)$ 。

把式 (1) 叫作驱动系统, 那么对应的响应系统为

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = -Ay(t) + Bg(y(t)) + C \int_{t-\tau}^t g(y(s))ds + u(t) + J, t \geq t_0, \\ y(s) = \varphi(s), s \in [t_0 - \tau, t_0]. \end{cases} \tag{2}$$

其中: $\varphi \in PC([t_0 - \xi, t_0], \mathbf{R}^n)$; $\xi = t \vee \tau$; $u(t)$ 表示脉冲控制器。

为了让驱动系统 (1) 和响应系统 (2) 可以实现同步, 设计了一个合适的分布时滞控制器, 即

$$u(t) = \sum_{n=1}^\infty [K \int_{t-r_n}^t w(s)ds - w(t)]\delta(t - t_n). \tag{3}$$

其中: $w(t) = y(t) - x(t)$; r_n 为脉冲输入中的分布时滞; $\delta(\cdot)$ 为 Delta 函数; $K \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是要设计的增益矩阵。重新定义式 (1) 中的初始条件, 得到误差系统为

$$\begin{cases} \dot{w}(t) = -Aw(t) + B(g(y(t)) - g(x(t))) + C \int_{t-\tau}^t (g(y(s)) - g(x(s)))ds, t \neq t_n, \\ w(t) = K \int_{t-\tau}^t w(s)ds, t = t_n, \\ w(s) = \phi(s) - \varphi(s), s \in [t_0 - \xi, t_0]. \end{cases} \tag{4}$$

1.2 预备知识

定义 1^[12] 如果存在 $a > 0$ 和 $L > 1$, 使得 $\|w(t)\| \leq L\|\phi - \varphi\|_{\xi} e^{-a(t-t_0)} (t \geq t_0)$ 成立, 那么称驱动系统 (1) 与响应系统 (2) 指数同步。

假设 1 D^+ 表示右上方的 Dini 导数, $f \in PC(\mathbf{R}, \mathbf{R}_+)$, $\bar{f}(t) := \sup_{t-\tau \leq s \leq t} f(s) (\tau > 0)$ 为时滞, $p \in \mathbf{R}$, $q \geq 0$, λ_n 是常数。时滞 $r_n (n \in \mathbf{Z}_+)$ 满足 $0 < r_n \leq r$, 其中 r 是一个实常数。

脉冲序列 $\{t_n, n \in \mathbf{Z}_+\}$ 满足 $0 < t_1 < t_2 < \cdots < t_n, t_n \rightarrow \infty, n \rightarrow \infty$, 用集合 χ_0 表示这类脉冲时间序列, 对于任意 $\kappa > 0$, 用 $\chi(\kappa)$ 表示对任意 $n \in \mathbf{Z}_+$ 在 χ_0 中满足 $t_n - t_{n-1} \leq \kappa$ 的所有脉冲时间序列的集合。

若假设 1 成立, 考虑分布时滞脉冲不等式

$$\begin{cases} D^+ f(t) \leq pf(t) + q \int_{t-\tau}^t f(s) ds, t \neq t_n, \\ f(t) \leq \lambda_n \int_{t-t_n}^t f(s) ds, t = t_n, n \in \mathbf{Z}_+, \end{cases} \quad (5)$$

则有引理 1 和引理 2。

引理 1 若假设 1 成立, 并且存在 $\delta > 1$ 、 $\kappa > 0$, 使得

$$p + q\tau\delta < \ln \delta / \kappa, \quad (6)$$

$$0 < \gamma < \ln \delta / \kappa - p - q\tau\delta \exp(\gamma\tau) \quad (7)$$

成立。若 $f \in PC(\mathbf{R}, \mathbf{R}_+)$ 是不等式 (5) 的解, 令 $h(t) = \begin{cases} f(t) \exp(\gamma(t-t_0)), t \geq t_0 \\ f(t), t_0 - \tau \leq t \leq t_0 \end{cases}$, 如果对于某些

$i \in \mathbf{Z}_+$, 存在 $t_*, t^* \in [t_{i-1}, t_i] (t_* < t^*)$, 并且对于 $\forall s \in [t_* - \tau, t], t \in [t_*, t^*]$, 有 $\delta h(t) \geq h(s)$, 则 $\delta \geq h(t^*)/h(t_*)$ 。

证明 $\forall t \in [t_*, t^*]$, 存在 $\bar{t} \in [0, \tau]$, 有 $\bar{f}(t) = f(t - \bar{t})$, 那么 $D^+ h(t) = (D^+ f(t)) \exp(\gamma(t-t_0)) + \gamma f(t) \exp(\gamma(t-t_0)) \leq [pf(t) + q \int_{t-\tau}^t f(s) ds] \exp(\gamma(t-t_0)) + \gamma f(t) \exp(\gamma(t-t_0)) \leq (pf(t) + q\tau \bar{f}(t)) \exp(\gamma(t-t_0)) + \gamma f(t) \exp(\gamma(t-t_0)) = (p + \gamma) f(t) \exp(\gamma(t-t_0)) + q\tau f(t - \bar{t}) \exp(\gamma(t - \bar{t} - t_0)) \exp(\gamma\bar{t}) \leq (p + \gamma) h(t) + q\tau \delta h(t) \exp(\gamma\tau) = (p + \gamma + q\tau\delta \exp(\gamma\tau)) h(t)$ 。

对于 $\forall t \in [t_*, t^*]$, 基于一些简单的不等式, 有 $\ln \delta = \kappa \ln \delta / \kappa \geq (t^* - t_*) \ln \delta / \kappa > (t^* - t_*) (p + \gamma + q\tau\delta \exp(\gamma\tau)) = \int_{t_*}^{t^*} (p + \gamma + q\tau\delta \exp(\gamma\tau)) dt \geq \int_{t_*}^{t^*} 1/h(t) dh(t) = \ln(h(t^*)) - \ln(h(t_*)) = \ln(h(t^*)/h(t_*))$, 所以 $\delta \geq h(t^*)/h(t_*)$ 。

注 1 不等式 (6) 意味着, 存在 $\lambda \in \mathbf{R}$, 使不等式 (7) 成立。定义一个连续函数 $g: \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$, $g(x) := \ln \delta / \kappa - p - q\tau\delta \exp(\gamma x) - x$, 有 $g(0) := \ln \delta / \kappa - p - q\tau\delta > 0$, 因此存在 η , 使得对所有 $x \in (-\eta, \eta)$, 有 $g(x) > 0$, 那么只需要选取 $\gamma \in (0, \eta)$ 来验证不等式 (7)。

引理 2 若假设 1 成立, 存在常数 $\delta > 1$ 、 $\kappa < 1$, 使得分布时滞脉冲微分不等式 (5) 成立, 那么不等式 (5) 的解在 $\chi(\kappa)$ 类满足

$$f(t) \leq \delta \bar{f}(t_0) \exp(-\gamma(t-t_0)), t \geq t_0. \quad (8)$$

其中: $\gamma \in (0, \eta)$ 是一个满足不等式 (7) 的正常数; $\eta := \inf_{n \in \mathbf{Z}_+} \{-\ln(\lambda_n r_n \delta) / r_n\}$ 。

证明 构造一个辅助函数

$$F(t) = \begin{cases} f(t) \exp(\gamma(t-t_0)), t \geq t_0, \\ f(t), t \in [t_0 - \xi, t_0). \end{cases} \quad (9)$$

如果 $F(t) \leq \delta \bar{f}(t) (\forall t \geq t_0)$ 成立,那么不等式 (8) 成立。很显然,当 $t \in [t_0 - \xi, t_0)$ 时,不等式 (9) 成立。

考虑当 $t = t_0$ 时,有 $F(t_0) = f(t_0) \leq \bar{f}(t_0)$ 。假设当 $t \in [t_0, t_1)$ 时,不等式 (9) 不成立。由于 $F(t_0) \leq \bar{f}(t_0) < \delta \bar{f}(t_0)$,那么存在 $t^* = \inf\{t \in [t_0, t_1), F(t) > \delta \bar{f}(t_0)\}$,使得 $F(t^*) = \delta \bar{f}(t_0)$ 和 $F(t) < \delta \bar{f}(t_0) (t \in [t_0, t^*))$ 。由于 $F(t)$ 的连续性和 t^* 的定义,存在 $t_* = \sup\{t \in [t_0, t^*), F(t) \leq \bar{f}(t_0)\}$,使得 $F(t_*) = \bar{f}(t_0)$ 和 $F(t) \geq \bar{f}(t_0) (t \in [t_*, t^*])$ 。那么可以推导出,当 $s \in [t_0 - \xi, t^*] (t \in [t_*, t^*])$ 时,有 $\delta F(t) \geq \delta \bar{f}(t_0) \geq F(s)$ 。根据引理 1, $\delta > F(t^*)/F(t_*) = \delta$,产生矛盾,所以当 $t \in [t_0, t_1)$ 时,不等式 (9) 成立。

假设 $t \in [t_N, t_{N+1})$,对一些 $N \in \mathbf{Z}_+$,有不等式 (9) 成立,则当 $t \in [t_0 - \xi, t_{N+1})$ 时,不等式 (9) 成立。当 $t = t_{N+1}$ 时,有 $F(t_{N+1}) \leq \mu_{N+1} e^{\gamma(t_{N+1}-t_0)} \int_{t_{N+1}-r_{N+1}}^{t_{N+1}} f(s) ds$,那么存在以下 2 种情况。

1) 当 $t_0 - \xi \leq t_{N+1} - r_{N+1} < t_0$ 时, $F(t_{N+1}) \leq \mu_{N+1} \exp(\gamma(t_{N+1} - t_0)) \int_{t_{N+1}-r_{N+1}}^{t_0} F(s) ds + \mu_{N+1} \int_{t_0}^{t_{N+1}} F(s) \exp(\gamma(t_{N+1} - s)) ds \leq \mu_{N+1} \int_{t_{N+1}-r_{N+1}}^{t_{N+1}} F(s) \exp(\gamma(t_{N+1} - s)) ds \leq \mu_{N+1} r_{N+1} \delta \bar{f}(t_0) \exp(\gamma r_{N+1})$ 。

2) 当 $t_0 \leq t_{N+1} - r_{N+1} < t_{N+1}$ 时, $F(t_{N+1}) = \mu_{N+1} \int_{t_{N+1}-r_{N+1}}^{t_{N+1}} F(s) \exp(\gamma(t_{N+1} - s)) ds \leq \mu_{N+1} r_{N+1} \delta \bar{f}(t_0) \exp(\gamma r_{N+1})$ 。

由已知条件,得到 $F(t_{N+1}) \leq \bar{f}(t_0)$ 。

假设当 $t \in [t_{N+1}, t_{N+2})$ 时,不等式 (9) 不成立。由于 $F(t_{N+1}) \leq \bar{f}(t_0) < \delta \bar{f}(t_0)$,那么存在 $t^* = \inf\{t \in [t_{N+1}, t_{N+2}), F(t) > \delta \bar{f}(t_0)\}$,使得 $F(t^*) = \delta \bar{f}(t_0)$ 和 $F(t) < \delta \bar{f}(t_0) (t \in [t_{N+1}, t^*))$ 。由于 $F(t)$ 的连续性和 t^* 的定义,存在 $t_* = \sup\{t \in [t_{N+1}, t^*), F(t) \leq \bar{f}(t_0)\}$,使得 $F(t_*) = \bar{f}(t_0)$ 和 $F(t) \geq \bar{f}(t_0) (t \in [t_*, t^*])$,那么可以推导出,当 $s \in [t_0 - \xi, t^*] (t \in [t_*, t^*])$ 时,有 $\delta F(t) \geq \delta \bar{f}(t_0) \geq F(s)$ 。根据引理 1, $\delta > F(t^*)/F(t_*) = \delta$,矛盾,所以当 $t \in [t_{N+1}, t_{N+2})$ 时,不等式 (9) 成立。由数学归纳法,当 $t \in [t_0, \infty)$ 时,不等式 (9) 成立,那么不等式 (8) 成立。

推论 1 若假设 1 成立,存在常数 $\delta > 1, \kappa > 0$,使得不等式 (6) 和条件 $\lambda_n r_n < \inf(1/\delta) (n \in \mathbf{Z}_+)$ 成立,那么不等式 (5) 的解在 $\chi(\kappa)$ 类上满足不等式 (8)。

推论 2 若假设 1 成立,如果脉冲强度 λ_n 和分布时滞 r_n 在每个脉冲时刻都是常数,存在常数 $\delta > 1, \kappa > 0$,使得不等式 (6) 和条件 $\lambda_n < 1/(r_n \delta)$ 成立,那么不等式 (5) 的解在 $\chi(\kappa)$ 类上满足不等式 (8),其中 $\gamma \in (0, -\ln(\lambda_n r_n \delta)/r_n)$ 是一个满足不等式 (7) 的正常数。

2 主要结论及其证明

定理 1 若假设 1 成立,存在常数 $\delta > 1, \kappa > 0, n \times n$ 的矩阵 $L > 0, n \times n$ 的对角矩阵 $D_1 > 0, D_2 > 0, n \times n$ 的矩阵 $H > 0$,使得式 (6)、 $N^g D_2 N^g \leq qL$ 和条件

$$\begin{bmatrix} A & LB & LC \\ * & -D_1 & 0 \\ * & * & -D_2 \end{bmatrix} \leq 0, \begin{bmatrix} -L/\delta & rH \\ * & -L \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

成立,其中: $A = -LA - AL + N^g D_1 N^g - qL; N^g = \text{diag}(l_i^g), i = 1, \dots, n$ 。则在控制增益矩阵 $K =$

$L^{-1}H^T$ 的情况下, 系统 (2) 可以在 $\chi(\kappa)$ 上与系统 (1) 指数同步。

证明 考虑 Lyapunov 函数 $V(t) = w^T(t)Lw(t)$ 。当 $t \neq t_n (n \in \mathbf{Z}_+)$ 时, $D^+V(t) = -w^T(t)(LA + AL)w(t) + 2w^T(t)LB(g(y(t)) - g(x(t))) + 2w^T(t)LC \int_{t-\tau}^t (g(y(s)) - g(x(s)))ds \leq w^T(t)(-LA - AL + LBD_1^{-1}B^TL + LCD_2^{-1}C^TL + N^gD_1N^g)w(t) + \int_{t-\tau}^t w^T(s)N^gD_2N^gw(s)ds \leq p w^T(t)Lw(t) + q \int_{t-\tau}^t w^T(s)Lw(s)ds = pV(t) + q \int_{t-\tau}^t V(s)ds$ 。

当 $t = t_n (n \in \mathbf{Z}_+)$ 时, 根据式 (10) 可知, 存在常数 $\bar{\delta} > \delta$, 使得 $-L/\bar{\delta} + r_n^2 K^T LK \leq 0$, 那么 $V(t_n) = (\int_{t_n-r_n}^{t_n} w(s)ds)^T K^T LK \int_{t_n-r_n}^{t_n} w(s)ds \leq \lambda_n \int_{t_n-r_n}^{t_n} w^T(s)Lw(s)ds = \lambda_n \int_{t_n-r_n}^{t_n} V(s)ds$ 。其中 $\lambda_n = 1/\lambda_n \bar{\delta}$, 那么 $\lambda_n r_n \delta = \delta/\bar{\delta} < 1$ 。由推论 2 可以推导出, $V(t) \leq \delta \bar{V}(t_0) e^{-\gamma(t-t_0)}, \forall t \geq t_0$, 其中 $\bar{V}(t) = \sup_{t-\tau \leq s \leq t} V(s)$ 。这意味着系统 (1) 可以在 $\chi(\kappa)$ 类上与系统 (2) 实现指数同步。

注 2 文献 [11] 的结果只讨论分布时滞不大于系统时滞的情况, 并且脉冲区间的上界和下界都是严格限制的, 这导致了非常有限的应用。本文的主要优点在于完全消除了分布时滞 r_n 与时间时滞 τ 之间关系的限制, 去掉脉冲区间的限制, 去除每个区间 $[t_n - r_n, t_n) (n \in \mathbf{Z}_+)$ 的脉冲数量限制。因此, 本文的结果具有更广泛的应用范围和更少的保守性。

3 仿真实例

为了验证以上理论分析, 本节给出一组参数进行数值模拟。

考虑混沌神经网络

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -Ax(t) + Bg(x(t)) + C \int_{t-\tau}^t g(x(s))ds, t \geq t_0, \\ x(s) = \phi(s), s \in [t_0 - t, t_0]. \end{cases} \quad (11)$$

令 $\tau = 1, g(x) = \tanh(x), A = \begin{pmatrix} 0 & -2 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} -1.9 & 0.1 \\ 8.6 & 2.9 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1.7 & 0.1 \\ 6.0 & -1.5 \end{pmatrix}$, 初始条件 $\phi(s) = [-1, 2]^T, s \in [-1, 0]$, 那么混沌神经网络如图 1 所示。

考虑响应系统

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = -Ay(t) + Bg(y(t)) + \\ C \int_{t-\tau}^t g(y(s))ds + u(t), t \geq t_0, \\ y(s) = \varphi(s), s \in [t_0 - \xi, t_0]. \end{cases} \quad (12)$$

其中: 初始条件 $\varphi(s) = [1, -1]^T, s \in [-1, 0]$ 。当没有控制输入时, 系统 (11) 和系统 (12) 不能实现同步, 同步误差如图 2 所示。当考虑分布时滞脉冲控制 $u(t)$ 来实现系统 (11) 与系统 (12) 的同步, 选择 $r_n = 1, K = \begin{pmatrix} 0.221 & 0.021 \\ 0.012 & 0.123 \end{pmatrix}$, 那么

系统 (11) 可以与系统 (12) 指数同步, 同步误差如图 3 所示。

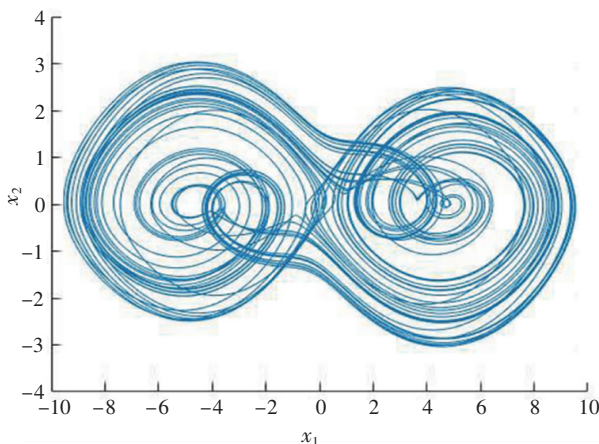


图 1 系统 (11) 的混沌状态
Fig.1 The chaotic state of system (11)

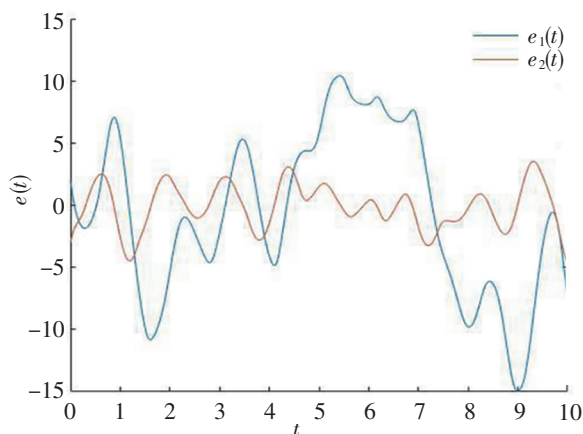


图2 无脉冲控制下的误差轨迹

Fig.2 The error trajectory without impulse control

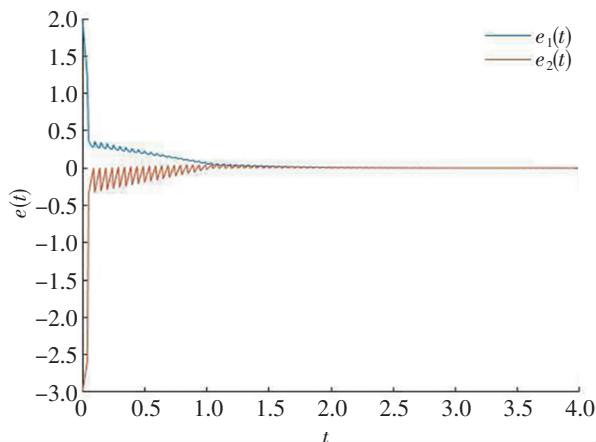


图3 脉冲控制输入(3)下的误差轨迹

Fig.3 The error trajectory under control input (3)

4 结论

本文研究具有分布时滞脉冲控制的混沌神经网络指数同步问题。给出分布时滞脉冲不等式及其解的指数估计,借助一种分布时滞脉冲微分不等式,推导了混沌神经网络同步的两个引理,实现驱动系统和响应系统的指数同步。最后,通过仿真实例验证了所得结果的有效性。

[参考文献]

- [1] LIU K L, ZENG H L. Stability in impulsive cohen-grossberg-type BAM neural networks with time-varying delays: a general analysis[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2010, 80(12): 2329-2349.
- [2] MA M J, YANG J H. A novel finite-time q -power recurrent neural network and its application to uncertain portfolio model[J]. Neurocomputing, 2021, 461: 137-146.
- [3] LU Y, LUO R, ZOU Y, et al. Morphological analysis for three-dimensional chaotic delay neural networks[J]. Journal of Mathematics, 2020, 2020: 4302505.
- [4] CHEN L Y, CHEN Y G, ZHANG N W. Synchronization control for chaotic neural networks with mixed delays under input saturation[J]. Neural Processing Letters, 2021, 53: 3735-3755.
- [5] SARKAR A. Neural synchronization of optimal structure-based group of neural networks[J]. Neurocomputing, 2021, 450(8): 156-167.
- [6] WANG Y, ZHOU Y M, ZHOU J P, et al. Quantized control for extended dissipative synchronization of chaotic neural networks: a discretized LKF method[J]. ISA Transactions, 2022, 125: 1-9.
- [7] JIN X H, WANG J R, SHEN D. Convergence analysis for iterative learning control of impulsive linear discrete delay systems[J]. Journal of Difference Equations and Applications, 2021, 27(5): 739-762.
- [8] HE Z L, LI C D, LI Y, et al. Local synchronization of nonlinear dynamical networks with hybrid impulsive saturation control inputs[J]. Applied Mathematics and Computation, 2021, 410(5): 126452.
- [9] HUANG J J, LI C D, HUANG T W, et al. Finite-time lag synchronization of delayed neural networks[J]. Neurocomputing, 2014, 139: 145-149.
- [10] LIU X Z, ZHANG K X. Stabilization of nonlinear time-delay systems: distributed-delay dependent impulsive control[J]. Systems and Control Letters, 2018, 120: 17-22.
- [11] ZHAO Y S, LI X D, CAO J D. Global exponential stability for impulsive systems with infinite distributed delay based on flexible impulse frequency[J]. Applied Mathematics and Computation, 2020, 386(1): 125467.
- [12] CHEN Y G, WANG Z D, SHEN B, et al. Exponential synchronization for delayed dynamical networks via intermittent control: dealing with actuator saturations[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 30(4): 1000-1012.

(责任编辑 马建华 英文审校 黄振坤)