

忆阻Chay神经网络系统同步转迁与时空动力学特性研究

王其霞^{1*}, 马娟娟², 吴改艳¹, 刘莎莎¹, 王昱婷¹

¹新疆理工职业大学通识学院, 新疆 喀什

²塔里木大学信息工程学院, 新疆 阿拉尔

收稿日期: 2026年7月21日; 录用日期: 2026年8月14日; 发布日期: 2026年8月27日

摘 要

为了探究电学突触与初始扰动对神经网络同步转迁的调控机制, 本文基于磁控忆阻器模拟神经元电磁感应效应, 构建含电耦合忆阻环状神经网络模型。利用双参同步云图、时空动力学图和时域图, 分析不同参数与初始扰动下神经网络的集群动态演化规律。仿真结果表明, 电耦合是决定网络同步能力的核心参数, 增大电耦合强度可有效拓宽同步区间, 正向磁耦合强度有利于促进神经元同步。全域梯度初值扰动下, 网络仍可依靠耦合作用实现稳定全域簇放电; 局部神经元初始扰动在弱耦合条件下会破坏同步, 诱发无序放电与行波传播。随着耦合持续增强, 神经元间的相互作用逐渐抵消初始相位偏差, 系统重新收敛至全局簇同步, 揭示电耦合与初始异常电位扰动协同调控神经集群动力学的内在机理。

关键词

磁控忆阻器, 神经网络, 电学突触, 初始扰动, 同步动力学

Research on Synchronous Transition and Spatiotemporal Dynamics Characteristics of Memristor Chay Neural Network System

Qixia Wang^{1*}, Juanjuan Ma², Gaiyan Wu¹, Shasha Liu¹, Yuting Wang¹

¹School of General Education, Xinjiang Vocational University of Technology, Kashgar Xinjiang

²School of Information Engineering, Tarim University, Alar Xinjiang

Received: July 21, 2026; accepted: August 14, 2026; published: August 27, 2026

*通讯作者。

文章引用: 王其霞, 马娟娟, 吴改艳, 刘莎莎, 王昱婷. 忆阻 Chay 神经网络系统同步转迁与时空动力学特性研究[J]. 应用数学进展, 2026, 15(8): 337-346. DOI: 10.12677/aam.2026.158357

Abstract

To explore the regulatory mechanism of electrical synapses and initial disturbances on the synchronous transition of neural networks, a magnetically controlled memristor is used to simulate the electromagnetic induction effect of neurons, and a ring neural network model with electrically coupled memristor is constructed. By using two-parameter synchronous cloud maps, spatiotemporal dynamics maps and time-domain maps, the dynamic evolution laws of neural network clusters under different parameters and initial disturbances are analyzed. The simulation results show that electrical coupling is the core parameter determining the synchronization ability of the network. Increasing the electrical coupling strength can effectively broaden the synchronization interval, and the positive magnetic coupling strength is conducive to promoting the synchronization of neurons. Under global gradient initial value perturbation, the network can still achieve stable global cluster discharge by relying on coupling effects. Under weak coupling conditions, the initial disturbances of local neurons will disrupt synchronization, induce disordered discharge and traveling wave propagation. As the coupling continues to strengthen, the interaction between neurons gradually cancels the initial phase deviation, and the system converges back to global cluster synchronization, revealing the intrinsic mechanism by which electrical coupling and initial abnormal potential disturbance jointly regulate the dynamics of neural clusters.

Keywords

Magnetic Control Memristor, Neural Network, Electrical Synapse, Initial Disturbance, Synchronous Dynamics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

神经元是神经系统的基本组成单元，各神经元通过突触完成信息传递，实现神经信号的编码、处理与整合，协同维系神经网络的整体调控功能。神经元依靠膜电位的变化产生脉冲，形成静息态、尖峰放电、簇放电等丰富的放电模式，不仅能够有效编码外界刺激信息，还可通过集群同步、节律振荡等群体行为完成信息的传递与整合[1][2]。因此，深入探究神经元的放电节律与同步演化规律，对揭示神经系统异常放电机理、阐释各类神经性疾病的致病原理具有重要的理论价值[3][4]。

由于离子的跨膜运动会形成电位差，并伴随电磁感应现象，而磁控忆阻器是关联了电荷与磁通之间的非线性本构关系，可有效模拟膜电位与感应电流之间的耦合作用，被广泛用于构建含电磁感应的神经元动力学模型[5]。在众多神经元模型中，Chay 神经元模型能够完整描述离子的跨膜动力学过程，能模拟出生物神经元丰富的放电类型，是研究神经元放电节律与网络同步行为的经典模型[6]。Shadizadeh 等人研究了两个 Chay 神经元分别在电学突触、化学突触、混合突触耦合下不同参数值对系统同步转迁行为的影响，揭示电耦合强度对神经系统同步机制的影响[7]。Joseph 等人以电磁激励下 Chay 神经元模型为研究对象，构建规则网络、小世界网络、随机网络三类拓扑结构的神经网络，系统探究了电磁感应、耦合强度、网络拓扑及初始条件对神经元放电模式、同步行为与斑图演化的影响[8]。安等人基于电磁感应下的四维 Chay 神经元模型中引入控制策略，建立 Filippov Chay 神经元模型，研究了两个子系统的放电模式并结合 Matcont 软件分析了关键参数对系统平衡点分布的影响[9]。

近年来, 同步转迁与时空动力学特性是当前神经网络领域的研究热点, 包括同步、异步、相干共振和随机共振等现象[10] [11]。同时, 也有文献[12] [13]探讨了神经网络的集群行为、斑图形成、网络异质性及能量演化规律。Guo 等人以双曲正切磁控忆阻器作为耦合突触, 构建含两个时滞的异质神经网络, 阐明了时滞对系统 Hopf 分岔、放电节律与相位同步特性的调控规律[14]。相关研究[15]表明, 网络拓扑与耦合强度是塑造神经网络集体动力学行为、决定时空斑图形态的核心要素。Ma 等人以 HR 神经元为基础, 研究了自突触作用下神经元脉冲激发与行波传播机制, 为阐释神经信号单向传输及异常放电机理提供了仿真支撑[16]。Lv 等人搭建场耦合 HR 链式网络模型, 研究了不同的外部刺激对神经网络同步状态和行波演化过程的影响[17]。当前很少有人研究由电突触耦合的双曲正切忆阻 Chay 神经网络模型的同步转迁规律和集群动态特性。

基于上述内容, 本文结合磁控忆阻器与 Chay 神经元模型构建环状神经网络, 进一步探究电耦合与初始扰动共同作用下神经网络的同步调控规律及时空演化过程。利用双曲正切型磁控忆阻器模拟电磁感应效应, 建立环状忆阻 Chay 神经网络动力学模型; 借助双参同步云图、时空波图、时域图等分析手段, 分析耦合强度与初始扰动对同步转迁、行波传播、斑图分布的影响。

2. 环状神经网络系统同步集群动态

环状拓扑结构是神经网络最简单的闭环连接构型, 是从双神经元耦合向大规模复杂脑网络过渡的经典中间模型。对比于随机、小世界等复杂网络, 简单环状结构连接规则清晰、变量可控, 可揭示大脑局部神经环路集群同步的产生、跃迁机制, 可为后续复杂网络放电模式的研究奠定基础。

2.1. 系统构建

为了揭示电学突触、忆阻参数值对神经网络集群动态特性的影响, 建立环状耦合忆阻 Chay 神经网络模型, 如(1)式所示:

$$\begin{cases} \frac{dV_i}{dt} = g_I m_\infty^3 h_\infty (V_I - V_i) + g_{KV} (V_K - V_i) n_i^4 + g_{KC} \frac{C_i}{1+C_i} (V_K - V_i) + g_L (V_L - V_i) + I_{ext} \\ \quad - k_1 (\alpha - 2\beta \tanh(\varphi_i)) V_i + D \sum_{j=i-1}^{j=i+1} (V_j - V_i) \\ \frac{dn_i}{dt} = \frac{n_\infty - n_i}{\tau_n} \\ \frac{dC_i}{dt} = \rho (m_\infty^3 h_\infty (V_C - V_i) - k_C C_i) \\ \frac{d\varphi_i}{dt} = -k_2 \varphi_i + V_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中, } i=1, 2, \dots, N, \quad m_\infty = \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \beta_m}, \quad h_\infty = \frac{\alpha_h}{\alpha_h + \beta_h}, \quad n_\infty = \frac{\alpha_n}{\alpha_n + \beta_n}, \quad \tau_n = \frac{1}{\lambda_n (\alpha_n + \beta_n)}, \quad \alpha_m = \frac{0.1(25 + V_i)}{1 - e^{-0.1V_i - 2.5}},$$

$$\beta_m = 4e^{\frac{V_i + 50}{18}}, \quad \alpha_h = 0.07e^{-0.05V_i - 2.5}, \quad \beta_h = \frac{1}{1 + e^{-0.1V_i - 2}}, \quad \alpha_n = \frac{0.01(20 + V_i)}{1 - e^{-0.1V_i - 2}}, \quad \beta_n = 0.125e^{\frac{-(V_i + 30)}{80}}.$$

研究中, $i=1, 2$ 表示神经元节点数目。系统参数值分别为 $V_I = 100 \text{ mV}$ 、 $V_K = -75 \text{ mV}$ 、 $V_L = -40 \text{ mV}$ 、 $V_C = 145 \text{ mV}$ 、 $g_I = 1800 \text{ mS/cm}^2$ 、 $g_{KV} = 1700 \text{ mS/cm}^2$ 、 $g_{KC} = 10 \text{ mS/cm}^2$ 、 $g_L = 7 \text{ mS/cm}^2$ 、 $I_{ext} = 6$ 、 $k_C = 3.3/18$ 、 $\rho = 0.27$ 、 $\lambda_n = 230$ 、 k_1 是磁耦合强度, k_2 是忆阻反馈系数, D 表示电耦合强度, 双耦合神经系统在任意时刻膜电位值都满足 $V_0 = V_N$ 关系。

2.2. 单参同步分析

为了研究电耦合忆阻神经元系统的同步程度的影响, 引入一个同步统计因子^[17] R , 其表达式如(2)式所示:

$$\begin{cases} F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \\ R = \frac{\langle F^2 \rangle - \langle F \rangle^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\langle V_i^2 \rangle - \langle V_i \rangle^2)} \end{cases} \quad (2)$$

其中, N 表示神经元个数, V_i 表示第 i 个神经元的膜电位值。当 $R \rightarrow 1$, 耦合系统处于完全同步状态; 当 $R \rightarrow 0$, 耦合系统呈现出完全不同步的状态。

当 $N = 5$ 时采用变步长四阶 Runge-Kutta 方法对环状神经网络进行数值仿真, 数值计算时间区间为 $[100, 130]$, 选取电耦合强度 D 为可变参数, 得到如图 1 所示的单参同步统计因子 R 图。当电耦合强度较小时, 同步因子 R 微小震荡, 神经网络整体同步程度弱, 神经元放电节律不一致, 系统处于非同步状态。随着耦合强度 D 持续提升, R 整体呈单调上升趋势, 环状网络内神经元耦合作用不断增强, 集群同步水平平稳改善, 系统由无序非同步缓慢向同步过渡, 直到 $D = 4.2$ 时, 即耦合强度超过临界值后, R 瞬间跃升至 1 并保持恒定, 神经网络实现全域完全同步, 此后继续增大 D , 系统始终维持稳定的完全同步状态。

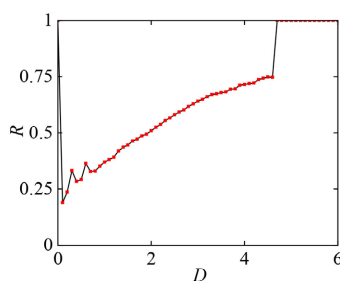
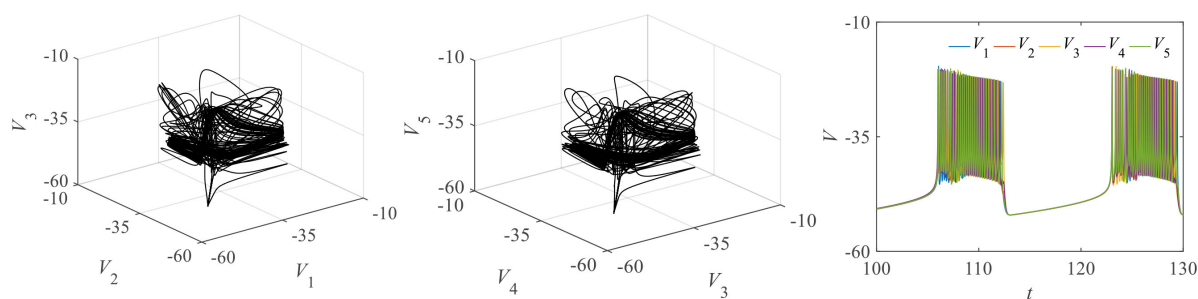


Figure 1. Synchronization factor diagram
图 1. 同步因子图

选取电耦合强度 $D = 2, 3, 4, 5$, 从三维相轨迹、时域膜电位波形两个维度验证环状网络同步演化规律: 每一行左、中为不同神经元配对的三维相图, 右侧(a3)~(d3)为 5 个神经元膜电位的时间序列曲线图。随着电耦合强度 D 由 2 逐步增至 5, 环状神经网络从无序非同步, 经渐进式不完全同步过渡, 最终在强耦合下达到集群完全同步状态, 与图 2 同步统计因子 R 的变化规律一致。



(a1) $D = 2$ 时的 (V_1, V_2, V_3) 相图

(a2) $D = 2$ 时的 (V_3, V_4, V_5) 相图

(a3) $D = 2$ 时的 $(V_1, V_2, V_3, V_4, V_5)$ 时间历程图

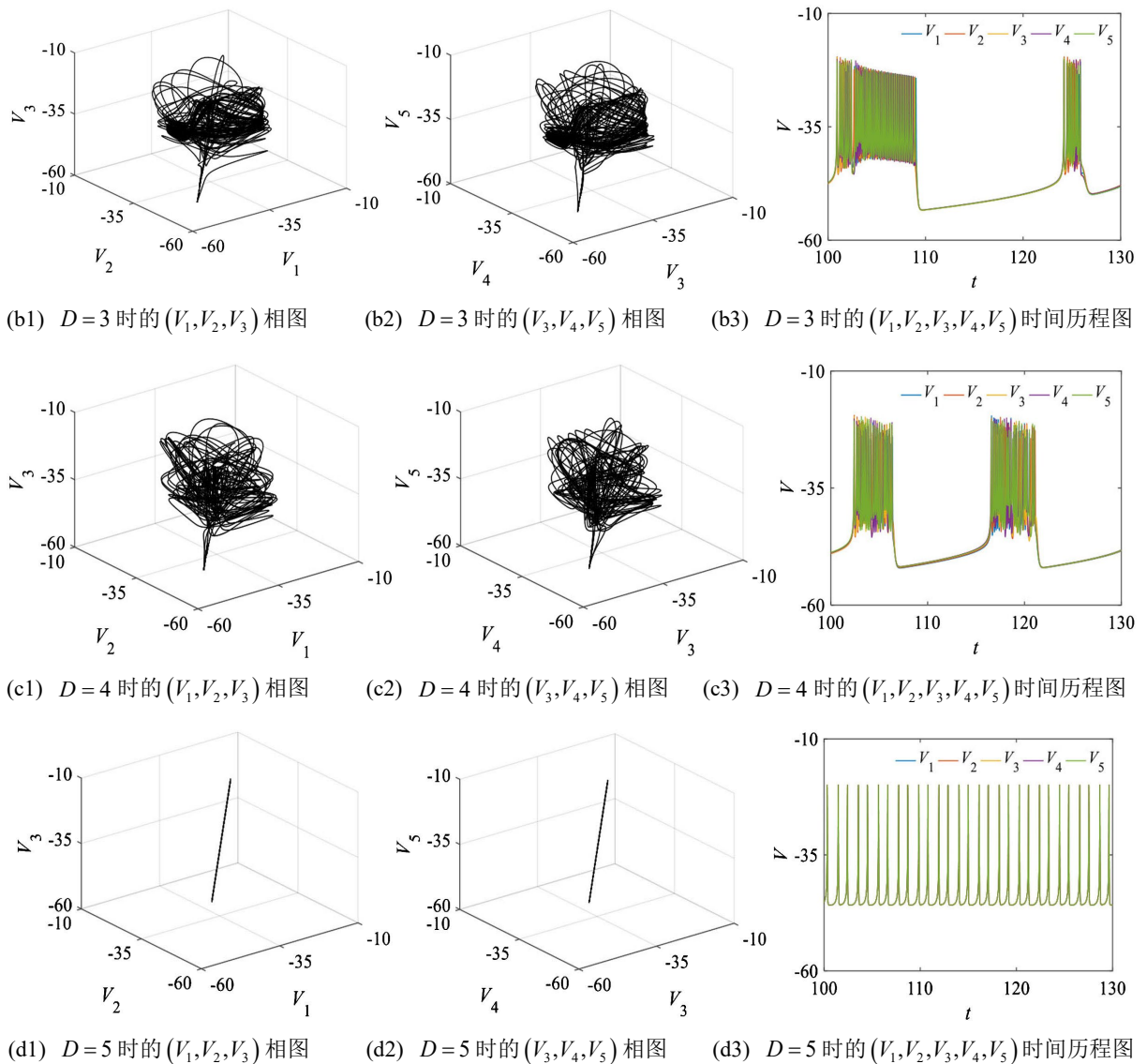


Figure 2. Synchronous verification diagrams

图 2. 同步验证图

2.3. 双参同步分析

选取电耦合强度 $D=2, 3, 4, 5$ 四个参数值, 研究耦合强度对系统同步参数域 (k_1, g_{KV}) 的调控规律得到如图 3 所示的同步因子 R 云图。当 $D=2$ 时, 全参数平面以黄、浅绿色为主, R 整体处于偏低区间, 无大片深红色区域, 说明弱电耦合下, 在全部 k_1 与 g_{KV} 取值范围内, 环状神经网络均无法实现完全同步; 当 $D=3$ 时, 整体颜色转为橙黄色, R 数值整体抬升, 但全域仍无深红色, 同步程度小幅提升, 全参数域依旧难以形成全域完全同步; 当 $D=4$ 时, 参数平面右上角率先出现连片深红色高值区, 同步域产生, 左下角仍为橙红低同步区域, 表明仅在高 g_{KV} 值、正向磁耦合的局部参数范围, 神经网络可实现完全同步状态; 当 $D=5$ 时, 深红色高 R 区域大幅向左下侧扩张, 且大部分 (k_1, g_{KV}) 参数域均可使环状神经网络达到完全同步。总之, 当耦合强度 D 跨过临界值后, 增大磁耦合强度 k_1 和 g_{KV} 能够有效促进环状网络同步, 同步参数区域不断扩张。

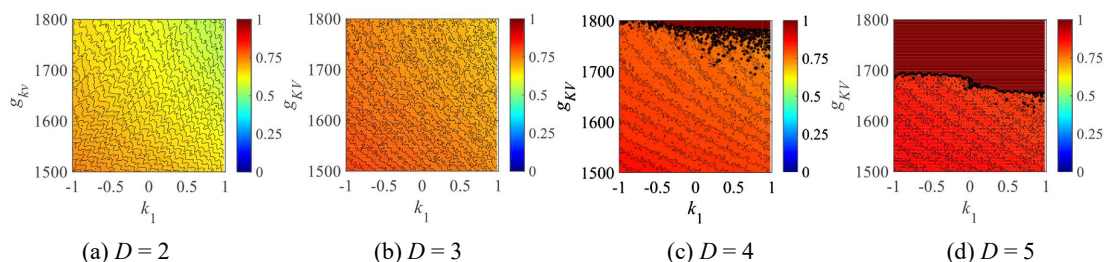


Figure 3. R diagrams (1) for dual-parameter simultaneous statistical factors

图 3. 双参同步统计因子 R 图(1)

同理, 以耦合强度为控制变量, 研究不同耦合强度对同步参数域 (λ_n, α) 的影响, 得到如图 4 所示的同步统计因子 R 图。当 $D=2$ 时, 全域以绿、浅黄色为主, R 整体处于低值区间, 全部 λ_n 、 α 参数下神经网络均无法实现完全同步; 当 $D=3$ 时, 整体变为橙黄色, R 小幅提升, 仅在参数左下角极小范围出现深红色区域, 绝大部分参数域无法达到同步状态; 当 $D=4$ 时, 参数平面左侧形成连片深红色同步区, 随 λ_n 的增大同步区向右快速收缩, 但大部分参数域依旧非同步; 当 $D=5$ 时, 左侧深红色同步区域继续向右扩张, 且绝大多数参数值均可实现全网络完全同步。综上所述, 电耦合强度 D 跨过临界值后, 减小 λ_n 、增大 α , 能够持续拓宽环状神经网络的完全同步参数范围。

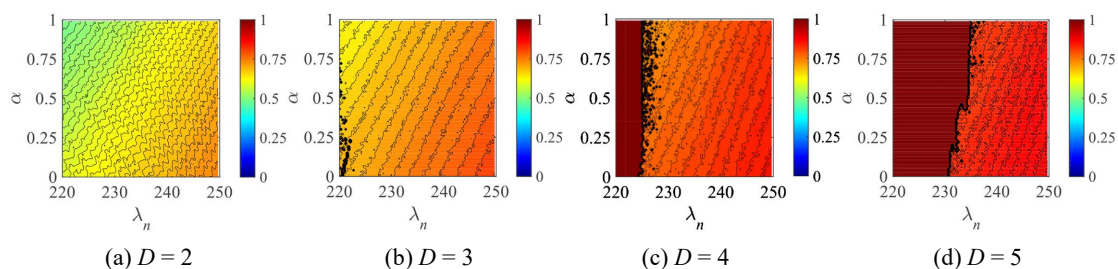


Figure 4. R diagrams (2) for dual-parameter simultaneous statistical factors

图 4. 双参同步统计因子 R 图(2)

3. 时空动态分析

大脑由数十亿个神经元经过电学突触和化学突触耦合, 形成环状、链状和层状复杂的神经网络。因此, 本节构建由 100 个 Chay 神经元节点组成的简单环状神经网络, 进行时空动力学分析, 探究电耦合强度对时空动态的演化机制, 为揭示脑部病态异常同步机理提供参考价值。

3.1. 相同初值仿真

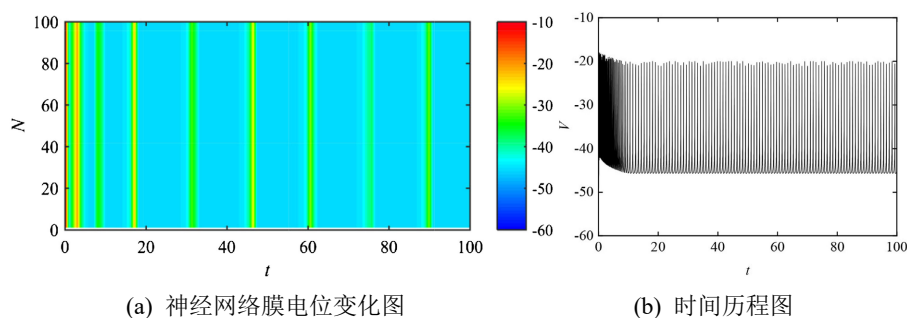


Figure 5. Spatiotemporal dynamics diagrams (1)

图 5. 时空动态图(1)

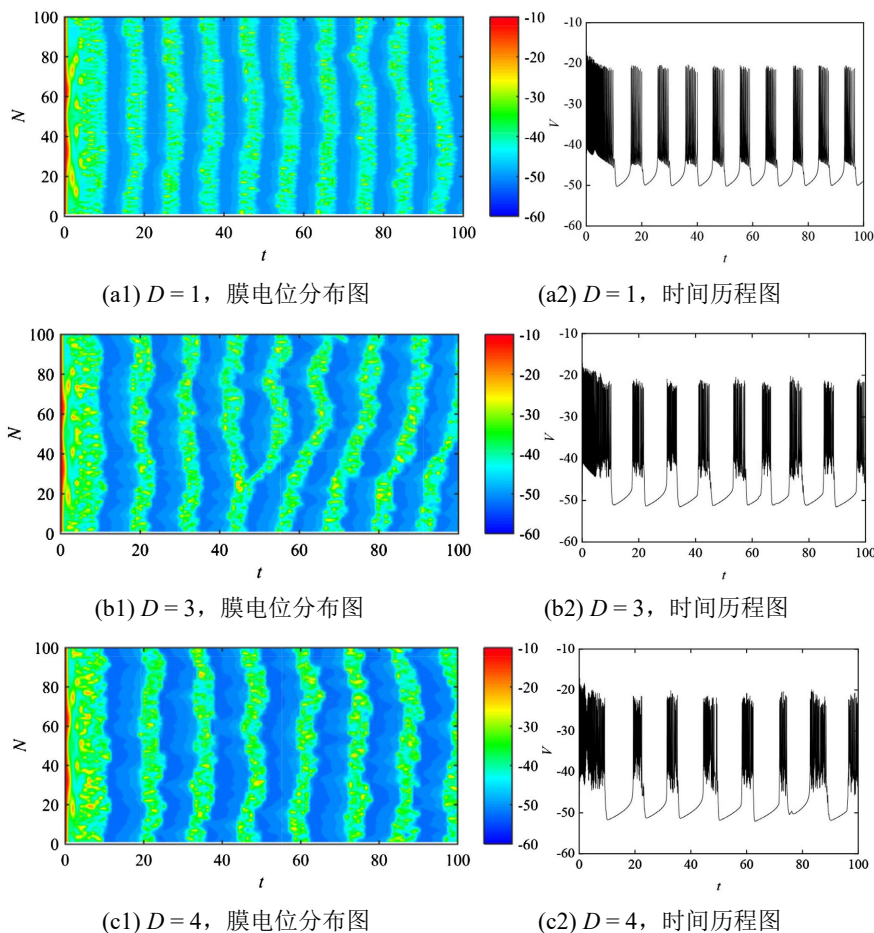
设所有神经元的初始条件为 $(0.1, 0.1, 0.1, 0.1)$ ，电耦合强度 $D=1$ ，其余参数值与双神经元系统取值一致，数值计算时间区间取 $t \in [0, 100]$ ，得到如图5所示的膜电位分布图和时间历程图，图5(a)右侧颜色栏表示膜电位值。可以得出，在统一初始条件下，神经网络中所有神经元的放电节律一致，实现全域同步放电，膜电位分布图呈现出整齐的行波，每个神经元处于峰放电状态。

3.2. 全域梯度初值扰动仿真

设方程(1)的初始值为

$$\begin{cases} i \leq \frac{N}{2}, (V_i, n_i, C_i, \varphi_i) = (0.0050 \times (49 - i), 0.0010 \times (49 - i), 0.0015 \times (49 - i), 0) \\ i > \frac{N}{2}, (V_i, n_i, C_i, \varphi_i) = (0.0012 \times (i - 49), 0.0020 \times (i - 49), 0.0020 \times (i - 49), 0) \end{cases} \quad (3)$$

选取 $D=1, 3, 4, 8$ ，从时空动态图和时域波形共同揭示耦合强度对神经网络集群簇放电的调控规律，数值计算结果如图6所示。当 $D=1$ 时，仿真时段内一共出现10次簇放电，时域波形脉冲簇间隔均匀、节律整齐；当 $D=3, 4$ 时，簇放电数量依次降为9次、8次，时域簇脉冲的静息态拉长，簇发放频次逐步降低；耦合继续增大，全时段仅7次簇放电，单个簇放电时长增加；当 $D=8$ 时，即强耦合条件下，簇发放合并效应最显著，仿真区间仅剩6次簇放电，膜电位分布图中蓝色条带宽度变长，时域波形簇脉冲间隔变大。因此，增大电耦合 D 可有效调控集群放电节律，表现为簇放电频次减少、单次簇放电时长增加的时空动力学特征。



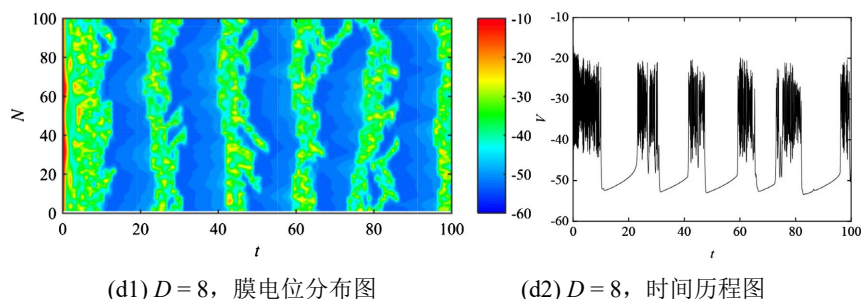
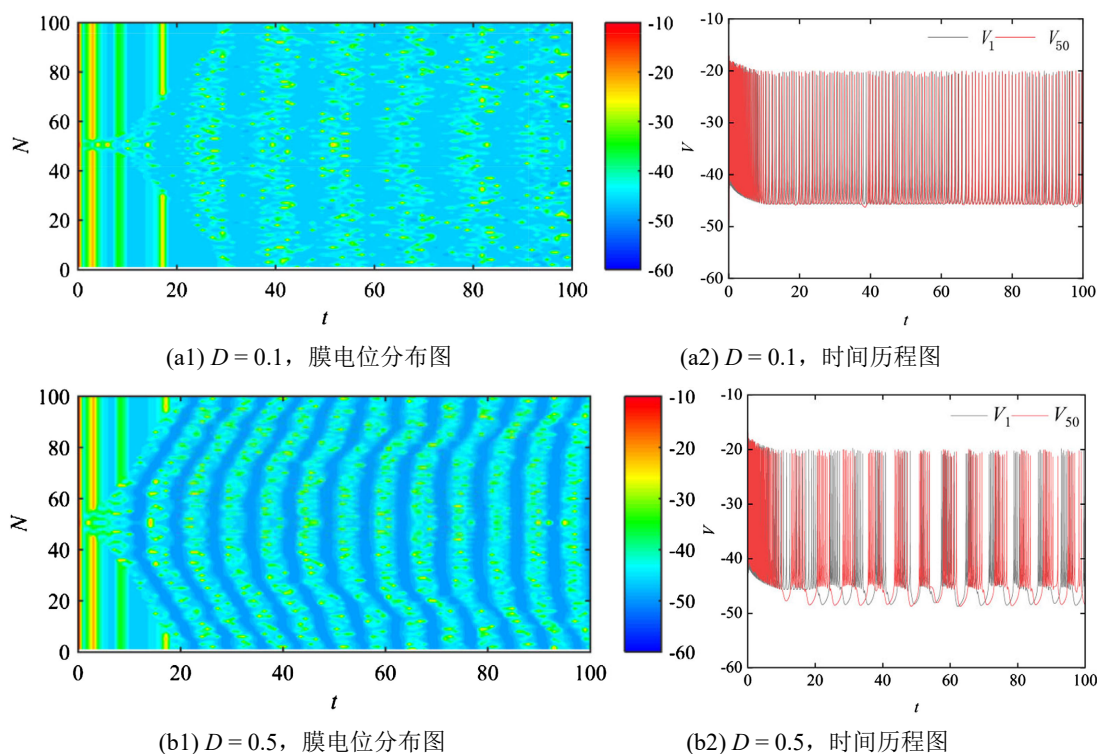


Figure 6. Spatiotemporal dynamics diagrams (2)
图 6. 时空动态图(2)

3.3. 局部定点初值扰动仿真

为了产生局部差异, 设第 50、51 个神经元的初值条件为 $(0,0,0,0)$, 其余 98 个神经元的初始条件为 $(0.1,0.1,0.1,0.1)$, 选取 $D = 0.1, 0.5, 1, 3$, 分析局部初始扰动对神经网络时空同步的演化规律, 得到如图 7 所示的时空动态图。当 $D = 0.1$ 时, 受局部差异的影响, $t = 10$ 时, 第 50、51 个神经元所形成的局部扰动逐渐扩散, 形成相位偏移, 随着时间的递推, 行波图中连续条纹消失, 所有神经元的放电模式被破坏, 失去协同节律, 时域膜电位脉冲排布密集杂乱。当 $D = 0.5$ 时, 增大耦合强度, 局部差异形成的相位差有序传播, 膜电位分布图出现倾斜波浪状行波, 时域波形簇放电分界清晰, 系统形成稳定行波传播的时空模式, 局部扰动由无序扩散转变为规律性行波演化。随着耦合强度的持续增大, 神经元之间的相互作用不断增强, 耦合带来的作用力逐渐超过局部扰动诱发的相位差, 可抑制扰动在网络中的扩散, 且时域簇放电个数减少、簇间静息周期变长, 电耦合时系统从无序放电状态向全局同步的核心因素。



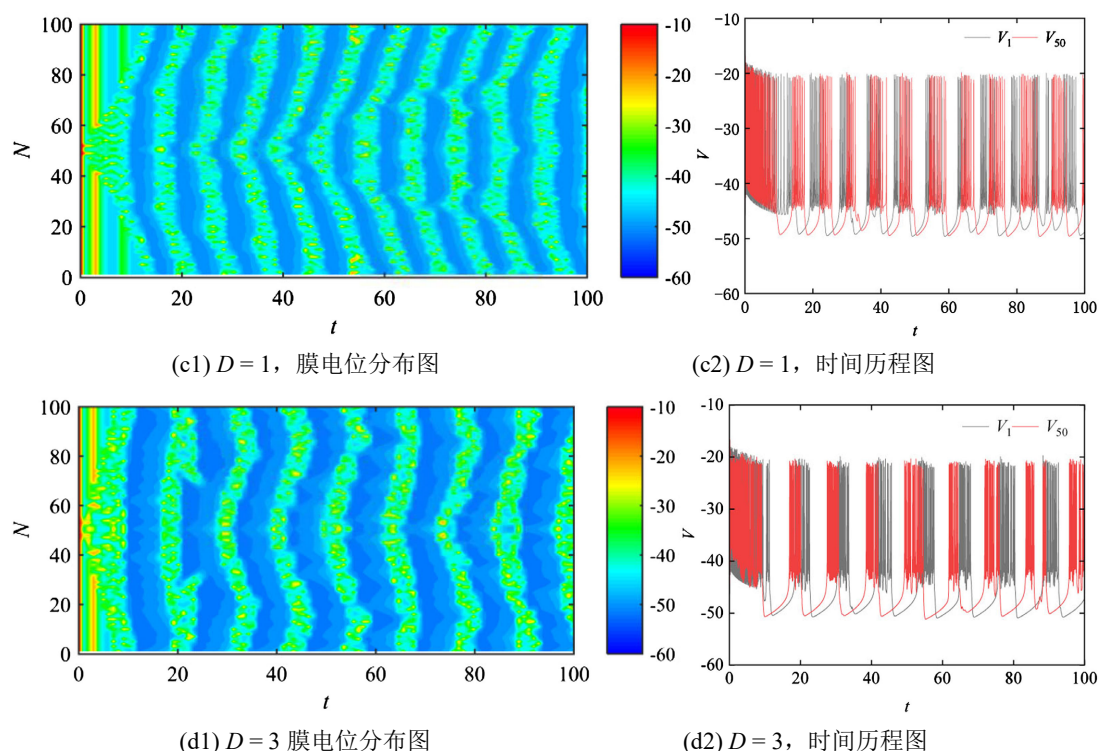


Figure 7. Spatiotemporal dynamics diagrams (3)
图 7. 时空动态图(3)

4. 结论

利用磁控忆阻器模拟电磁感应效应, 构建电耦合双神经元系统、环状神经网络模型, 通过改变电耦合强度、磁耦合系数、基准参数值, 借助相似函数图、同步因子云图研究神经元系统的同步转迁过程, 可以得出随着电耦合强度的增大, 系统同步参数域由局部区域逐步向全参数平面扩张, 增大 g_{KV} 值和减小 λ_n 时, 会促进双神经元系统同步的生成。利用膜电位分布图和时域图等时空动态图, 研究由 100 个神经元节点组成的环状神经网络模型的集群同步与时空放电力学演化规律, 得出在梯度扰动的初始条件下, 增大电耦合强度神经网络簇放电频次下降, 单次簇放电时间变长; 在布局扰动的初始条件下, 弱耦合下网络呈现出杂乱无章的放电状态, 强耦合下神经元间相互作用超过初始扰动产生的相位差, 逐步抵消局部扰动影响, 使得行波慢慢退化, 系统重新收敛至全域同步。

基金项目

新疆理工职业大学校长基金项目(XGZDZK202535)。

参考文献

- [1] 寿天德. 神经生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 王青云, 石霞, 陆启韶. 神经元耦合系统的同步动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [3] Womelsdorf, T. and Fries, P. (2007) The Role of Neuronal Synchronization in Selective Attention. *Current Opinion in Neurobiology*, **17**, 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.02.002>
- [4] Jiruska, P., de Curtis, M., Jefferys, J.G.R., Schevon, C.A., Schiff, S.J. and Schindler, K. (2013) Synchronization and Desynchronization in Epilepsy: Controversies and Hypotheses. *The Journal of Physiology*, **591**, 787-797. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.239590>

-
- [5] Chua, L. (1971) Memristor—The Missing Circuit Element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, **18**, 507-519. <https://doi.org/10.1109/tct.1971.1083337>
- [6] Chay, T.R. (1985) Chaos in a Three-Variable Model of an Excitable Cell. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **16**, 233-242. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(85\)90060-0](https://doi.org/10.1016/0167-2789(85)90060-0)
- [7] Shadizadeh, S.M., Nazarimehr, F., Jafari, S. and Rajagopal, K. (2022) Investigating Different Synaptic Connections of the Chay Neuron Model. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **607**, Article ID: 128242. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.128242>
- [8] Joseph, D., Kumar, R., Karthikeyan, A. and Rajagopal, K. (2024) Dynamics, Synchronization and Traveling Wave Patterns of Flux Coupled Network of Chay Neurons. *BioSystems*, **235**, Article ID: 105113. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2023.105113>
- [9] 安新磊, 任雁澜. 基于阈值控制策略的 Filippov Chay 神经元动力学及其耦合同步[J]. 力学学报, 2024, 56(4): 1068-1087.
- [10] Mehrabbeik, M., Jafari, S. and Perc, M. (2023) Synchronization in Simplicial Complexes of Memristive Rulkov Neurons. *Frontiers in Computational Neuroscience*, **17**, Article 1248976. <https://doi.org/10.3389/fncom.2023.1248976>
- [11] Zhou, P., Xu, Y. and Ma, J. (2023) Dynamical and Coherence Resonance in a Photoelectric Neuron under Autaptic Regulation. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **620**, Article ID: 128746. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128746>
- [12] Wei, L., Li, D. and Zhang, J. (2025) Dynamics and Synchronization of the Morris-Lecar Model with Field Coupling Subject to Electromagnetic Excitation. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, **140**, Article ID: 108457. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2024.108457>
- [13] Ma, J. (2023) Biophysical Neurons, Energy, and Synapse Controllability: A Review. *Journal of Zhejiang University-Science A*, **24**, 109-129. <https://doi.org/10.1631/jzus.a2200469>
- [14] Guo, Z., Li, Z., Wang, M. and Ma, M. (2023) Hopf Bifurcation and Phase Synchronization in Memristor-Coupled Hindmarsh-Rose and Fitzhugh-Nagumo Neurons with Two Time Delays. *Chinese Physics B*, **32**, Article ID: 038701. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/aca601>
- [15] Sriram, S., Rajagopal, K., Karthikeyan, A. and Akgul, A. (2023) Memristive Field Effect in a Single and Multilayer Neural Network with Different Connection Topologies. *Applied Mathematics and Computation*, **457**, Article ID: 128171. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2023.128171>
- [16] Ma, J., Song, X., Tang, J. and Wang, C. (2015) Wave Emitting and Propagation Induced by Autapse in a Forward Feedback Neuronal Network. *Neurocomputing*, **167**, 378-389. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.04.056>
- [17] Lv, M., Ma, J., Yao, Y. and Alzahrani, F. (2019) Synchronization and Wave Propagation in Neuronal Network under Field Coupling. *Science China Technological Sciences*, **62**, 448-457. <https://doi.org/10.1007/s11431-018-9268-2>