

神经动力学研究进展

王如彬[†]

(1. 华东理工大学 认知神经动力学研究所, 上海 200237) (2. 杭州电子科技大学 计算机学院, 杭州 310018)

摘要 本文着重介绍了神经动力学理论在脑科学领域中的地位与作用, 它的现状和我国的原始创新, 存在的问题以及它的历史使命. 强调了力学在神经科学与生命科学中的内在联系、重要性和它的影响力, 特别指出了脑科学领域中的原始创新离不开力学的作用、导向与贡献. 本文还重点概述了这期专刊的主要研究成果, 这些研究成果的作者分别从不同的视角阐述了他们是如何应用神经动力学理论来揭示神经系统中的一些独特的、在实验中不可能被发现的某些新的现象和规律, 以及在探索退行性神经疾病和认知障碍方面所表现出来的独特威力.

关键词 脑理论, 力学与神经动力学, 理论神经科学的功能与作用, 退行性神经疾病与认知障碍

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-013

自从 20 多年前美国伯克利大学分子神经生物学家 Walter Freeman 教授提出了神经动力学概念以来^[1], 用力学的理论和方法来研究认知与神经系统的活动已经成为了一个崭新的研究领域^[2-12], 科研成果像雨后春笋一样层出不穷. 神经动力学在欧美各国更多的被称之为计算神经科学, 而在日本被称之为神经力学^[13]. 但是在实验神经科学研究领域内科学家们更喜欢用神经信息学来定性或定量地表述神经信息处理的基本规律^[14,15]. 但是无论我们使用什么样的名称都改变不了这样一个基本事实, 即神经科学家和人工智能领域内的科学家与工程师已经深刻地认识到认知神经科学的发展不仅越来越依赖于实验技术手段的进步和严格的实验数据, 而且还需要从理论的高度用定量的方法来理解和挖掘大脑网络信号处理与传输的原理、洞察神经编码发放模式的内部机制, 从而发现浩瀚的实验数据背后所蕴藏的规律和本质以便能够更多的了解和掌握大脑的运筹方式以及能够应对各种脑疾患的发病机制, 并对潜在的退行性脑疾病患者做出准确的前期预报^[16,17].

遗憾的是以实验作为基本研究方法的认知神经科学长期以来重点关注了实验现象、实验数据和实验技术手段的提高而忽略了理论的重要性. 这导致了已经具有几百年历史的脑科学至今没有自己的一个系统的、完备的理论体系. 这种极不正常的

现象使得脑科学迄今为止发展到了今天依然是一门不成熟的学科. 虽然 20 多年前诞生了理论神经科学, 但是仅仅冠以一个理论还是无法被学术界广泛接受. 虽然在今天, 理论神经科学家已经做出了一系列优秀的研究成果, 但仍然很难广泛地与实验神经科学家们进行有效的合作, 互相促进、融合发展. 尽管如此, 脑研究领域内大量未解的科学问题以及它们的复杂程度还是引起了越来越多的其它许多领域内科学家们的关注, 并激起了他们的强烈兴趣, 这其中也包括了許多优秀的力学工作者.

在力学科学领域内的动力学与控制学报上发表神经动力学专刊尚属首次. 这一方面在于我们力学特别是在动力学与控制学术领域内神经动力学研究势头发展强劲, 另一方面在国家自然科学基金委的强力资助下这支队伍已经取得了一系列令人瞩目的优秀的研究成果. 因此, 在《动力学与控制学报》上发表一期神经动力学专刊不仅可以集中展示我们这支队伍的神经动力学研究现状, 以便吸引更多的力学工作者和其他学科领域的专家学者关注并融入到这个大学科交叉的研究之中, 而且对于推动我国特别是在力学领域内如何将力学的理论与方法运用于认知神经科学和生命科学, 创造性地构建大脑的理论体系和类脑智能理论体系都具有重要的现实意义和深远的意义.

本专刊通过严格的同行评审汇集了 14 篇优秀

的专业研究论文,其中包括神经动力学与力学内在关系的深刻评述的综述性论文1篇,理论神经科学类论文9篇,用动力学理论和方法研究退行性神经疾病与认知障碍的论文4篇.实际上,近10年以来在动力学与控制学报上已经陆续发表了许多关于神经动力学的优秀论文^[18-31],这些论文对于后续的神动力学研究都产生了深刻的影响.

神经动力学的基本思想已经越来越多的渗透和体现在神经科学、人工智能、类脑计算、生物信息、医学诊断、图像处理、控制科学、复杂网络以及工程应用等诸多方面^[32-36].一个典型例子是我们把经典力学中关于动力学系统建模的方法推广到了神经元系统,创造性地构造了一个与 Hodgkin-Huxley (H-H) 模型等价的新的神经元模型^[5].并由此揭示了神经元活动的从未被发现的新的工作机制^[5,6],这个新的工作机制揭示了神经元活动的二个规律.第一个是神经元的膜电位发放和神经能量有唯一的对应关系;第二个是神经元在阈值以下活动时以消耗能量为主,而在阈值以上活动时以吸收能量和消耗能量并存.第一个规律揭示了神经元膜电位的功能获取与能量函数之间的独特的对应关系^[5],这一发现得到了 H-H 模型的有力证实^[6].第二个规律验证了这样一种神经科学目前无法解释的实验现象,即大脑区域激活后血流增加 31%,而耗氧量仅增加 5-6%^[37-40].建立在实验数据基础之上的新的神经元模型使得我们原创性的提出了能量编码的概念及理论和方法^[41-46].这个新的概念和编码理论不仅可以解释神经科学一些至今无法解释的实验现象以及量化揭示一些实验数据背后的规律,而且还能够预测一些神经科学发现不了的现象.这充分体现了力学对于推动神经科学的进步以及神经科学、生命科学领域中处处存在着力学的影响与作用.

目前神经动力学理论上的进步与应用结果之间的相互作用导致了与神经计算和应用目的和范围相一致的协同结果.在本期专刊中这 14 篇被接受的论文大致可分为三类:

(1) 神经动力学与力学内在关系的深刻评述

由陆启韶教授选写的“神经动力学与力学”的综述性评论文章深刻地阐述了神经动力学与力学之间的内在联系.阐明了经典力学如何向广义力学的转化,以及广义力学与神经动力学之间一一对应的关系.他指出“进入 20 世纪以后,动力系统理论

和方法得到进一步发展,并成功地用于各种力学系统,以至非线性微分方程描述的一般系统具有普遍的理论意义和重要的应用价值.这表明近代力学研究突破了经典力学体系的传统范畴,开拓了“广义”力学体系的新范畴.也就是说力学的研究对象从“质点或质点系”拓展到了一般性的“动力学系统”,“力”的概念从“机械力”拓展到一般性的“相互作用”,“运动”的概念也从几何空间中的“位形变化”拓展到在状态空间中的“状态演化”.这个思想澄清了神经动力学与力学之间没有关联的不正确观点,它对于力学的思想在认知神经科学中的建模与计算,以及对于类脑智能理论体系的构建都是重要的和带有指导意义的.国内外大量的研究成果已经表明,用力学(固体力学、流体力学以及生物力学)以及动力学与控制的理论和方法(一般力学基础)研究认知和神经系统主要体现在神经元与耦合神经网络系统的放电模式的动力学分析;脑神经网络系统的建模和认知功能的动力学分析;与神经活动有关的分子生物网络动力学分析;生物神经信息的动力学编码;神经功能调控与神经疾病的精准诊疗以及类脑智能的原理与方法及其在智能装备中的应用等诸多方面.实际上,研究表明即使经典力学也与神经动力学之间有千丝万缕的联系^[47,48].

(2) 理论神经科学研究进展

神经动力学属于理论神经科学范畴,需要在神经科学的各个层次以及各个层次的结合上构建大尺度神经科学理论与神经模型.然而,研究的现状表明各个层次上的神经科学研究成果之间似乎有一条看不见的、无法跨越的鸿沟.使得它们之间的研究成果很难互相利用、相互影响、相互促进.这些问题的存在对于推动认知神经科学在各个方面取得重大突破是一个很大的障碍.尤其在意识、思维、智能、预测、视知觉产生机制、创造力的起源与本质、记忆的存储与调用等领域研究进展缓慢,有的甚至没有任何进展.要想推动上述领域的研究取得有效的进展,不仅有赖于神经科学技术的快速发展,更有赖于理论神经科学的取得实质性的进步.

本专刊学术成果的展示,部分体现了上述的这样一个指导思想.例如作者诸振宇,王如彬的“基于核聚类嗅觉神经网络对气味模式的识别”;司皓、赵欣桐、孙晓娟的“前馈型神经网络中的放电频率传递分析”;曹金凤、杨梅晨、韩芳等研究的“考虑

STDP 学习率的树突整合型神经元网络的放电同步”等。然而,我们还需要进一步从大尺度神经科学的范畴出发,从还原论的角度研究大范围全局脑功能的神经活动。我们可以将研究的重点瞄准、聚焦在探索脑功能的全局神经模型和构建可用于大脑认知功能全局神经编码和解码的研究方向上。换句话说所谓的全局脑功能模型是可以用来构建、分析、描述各个层次上的神经科学实验现象,使得各个层次上的计算结果不再是互相不能利用,互相矛盾和毫无关系的^[42]。

虽然我们离上述目标还相距甚远,但是工作需要一步一步的推进。在本专刊中,作者郑前前和申建伟研究了边界条件下 Fitzhugh-Nagumo (FHN) 模型的斑图动力学。给出了 FHN 模型斑图的一个新的机制,这个机制对于今后研究神经细胞的定位动力学和调控方法提供了一个崭新的思路。作者曲良辉和都琳研究了电磁刺激对 FHN 神经元系统的调控作用。这项研究的可取之处在于从理论上证明了电磁刺激和电磁感应对单个神经元和神经元网络系统的动力学行为的演化具有显著的调控能力。梁桐桐,段利霞的“前包钦格复合体中钙动力学对放电模式的影响”一文,用动力学的方法证明了钙离子的周期性波动和非特异性阳离子电流都会影响簇放电的类型以及它们是产生复杂簇放电模式的关键因素。王松,茅晓晨的文章“含时滞的忆阻耦合 HR 神经元的复杂放电行为”,对耦合的 Hindmarsh-Rose 神经元系统从时滞的角度研究了多种簇放电等丰富的动力学行为,通过理论分析和数值计算相吻合的结果得出了时滞是影响系统稳定性和放电模式变化的重要因素的结论。

(3) 动力学理论与方法研究退行性神经疾病

作者王智慧、郑艳红和王青云的“皮层 GABA 受体诱导的失神发作”是一项很有意义的研究。他们通过一个改进的皮质-丘脑平均场模型,来探索抑制性受体对失神的影响以便进一步掌握癫痫发作的潜在机制。数值计算结果表明抑制性受体 GABA 的相对强度以及时滞对于失神的发作有重要影响。作者独盟盟和吴莹等研究的“星形胶质细胞膜电位门控钙离子通道调控神经元癫痫放电”专门研究了星形胶质细胞膜电位变化引起的电压门控离子通道(VGCCs)电流增强会诱发神经元产生自发性癫痫放电活动实验现象的内在机理,这项研究对

于为什么星形胶质细胞钙离子代谢紊乱会诱发神经系统自发性癫痫放电提供了一种新的可能的解释。作者刘楠、毕远宏等研究了“皮质-基底神经节-丘脑网络的振荡动力学”,用以分析帕金森病发病的动力学机理,他们根据实验数据和解剖结构建立了帕金森病的神经网络模型。计算结果与生物实验数据基本一致,这项成果对于今后从理论角度并结合临床数据深入研究帕金森病的发病机理是很有实际意义的。作者杜莹等用数值计算的方法研究了丘脑垂体-肾上腺轴系统疼痛的分类以及疼痛程度的转化,给出了转化的轨迹。这项研究不仅对于疼痛的临床诊断而且对于疼痛的定量化分析都是很有用的研究成果。

上述理论研究成果都需要我们进一步与实验神经科学家以及临床医学专家密切合作,以取得更为丰富、更为可靠的研究结果。

参 考 文 献

- 1 Freeman W J. Neurodynamics. Berlin:Springer, 2000
- 2 Basar E. Brain function and oscillators. Berlin:Springer, 1999
- 3 Tass P A. Phase Resetting in Medicine and Biology. Berlin:Springer, 2008
- 4 Basar E. Brain-Body-Mind in the nebulous cartesian system: a holistic approach by oscillations. Berlin:Springer, 2011
- 5 Wang R B, Tsuda I, Zhang Z K. A new work mechanism on neuronal activity. *International Journal of Neural Systems*, 2015,25(3):1450037
- 6 Wang R B, Wang Z Y. The essence of neuronal activity from the consistency of two different neuron models. *Nonlinear Dynamics*, 2018,92(3):973~982
- 7 Ravishankar R A. An oscillatory neural network model that demonstrates the benefits of multisensory learning. *Cognitive Neurodynamics*, 2018,12(5):481~499
- 8 Haken H. Principles of brain functioning. Berlin:Springer, 2012
- 9 Kawato M. The computational theory of brain. Tokyo: Sankyo press, 2000
- 10 汪云久. 神经信息学. 北京:高等教育出版社,2006 (Wang Y J. Neuroinformatics. Beijing: Higher Education Press, 2006(in Chinese))
- 11 顾凡及,梁培基. 神经信息处理. 北京:北京工业大学出版社,2007(Gu F J, Liang P J. Neural information processing. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2007(in Chinese))
- 12 王青云,石霞,陆启韶. 神经元耦合系统的同步动力学.

- 北京:科学出版社,2008(Wang Q Y, Shi X, Lu Q S. Synchronous dynamics of neuron coupling system. Beijing: Science Press, 2008(in Chinese))
- 13 Takeda G. Brain and physics. Tokyo: Shokabo press, 1999
- 14 David W, Laughlin M. Ruling out and ruling in neural codes. *PNAS*. 2009,106(14):5936~5941
- 15 Abbott L F. Theoretical neuroscience Rising. *Neuron*, 2008,60(3):489~495
- 16 Byrne J H, Roberts J L. From Molecules to Networks. Amsterdam:Elsevier, 2010
- 17 Gazzaniga M S, Ivry R B, Mangun G R. Cognitive neuroscience: The biology of the mind. New York:W.W. Norton & Company, 1998.
- 18 焦贤发,王俊琦,王如彬.突触噪声作用下的 IF 阈值神经元模型的随机共振.动力学与控制学报,2010,8(3):273~276(Jiao X F, Wang J Q, Wang R B. Stochastic resonance of an integrate and fire neuron model with threshold driven by synaptic noise. *Journal of Dynamics and Control*, 2010,8(3):273~276(in Chinese))
- 19 韩春晓,王江,常莉,等.外电场作用下改进的 Leaky Integrate And Fire 模型的峰放电频率适应性研究.动力学与控制学报,2013,11(1):46~52(Han C X, Wang J, Chang L, et al. Spike-frequency adaptation in the modified leaky integrate-and-fire model under external electric field. *Journal of Dynamics and Control*, 2013,11(1):46~52(in Chinese))
- 20 王如彬,王关政,倪力,等.神经元膜电位噪声取值范围的评估.动力学与控制学报,2014,12(4):359~367(Wang R B, Wang G Z, Ni L, et al. An exploring of the range of noise intensity in membrane potential of neurons. *Journal of Dynamics and Control*, 2014,12(4):359~367(in Chinese))
- 21 汪雷,刘深泉.皮层锥体神经元模型的动力学分析.动力学与控制学报,2011,9(1):49~53(Wang L, Liu S Q. Dynamical analysis of cortical pyramidal neuron model. *Journal of Dynamics and Control*, 2011,9(1):49~53(in Chinese))
- 22 王海侠,陆启韶,郑艳红.神经元模型的复杂动力学:分岔与编码.动力学与控制学报,2009,7(4):293~296(Wang H X, Lu Q S, Zheng Y H. Complex dynamics of the neuronal model: bifurcation and encoding. *Journal of Dynamics and Control*, 2009,7(4):293~296(in Chinese))
- 23 王如彬,张志康,沈恩华.大脑皮层内神经元集团的能量演变.动力学与控制学报,2008,6(1):55~60(Wang R B, Zhang Z K, Shen E H. Energy evolution of neural population in cerebral cortex. *Journal of Dynamics and Control*, 2008,6(1):55~60(in Chinese))
- 24 徐旭颖,王如彬.神经元高低状态切换发放的神经动力学.动力学与控制学报,2015,13(1):62~67(Xu X Y, Wang R B. Neurodynamics of up and down transitions. *Journal of Dynamics and Control*, 2015,13(1):62~67(in Chinese))
- 25 王如彬,张志康,谢智刚,等.多个神经振子群网络的相位动力学编码.动力学与控制学报,2009,7(3):217~225(Wang R B, Zhang Z K, Xie Z G, et al. Dynamic coding of phase on multi populations of neural oscillators. *Journal of Dynamics and Control*, 2009,7(3):217~225(in Chinese))
- 26 沈恩华,王如彬,张志康.θ 相移在单次学习过程中促进神经网络对空间位置顺序记忆的研究.动力学与控制学报,2009,7(2):183~187(Shen E H, Wang R B, Zhang Z K. Theta phase precession enhancing memory of place sequence in single trial learning. *Journal of Dynamics and Control*, 2009,7(2):183~187(in Chinese))
- 27 朱雅婷,王如彬.基于 spikes-LFP 相关性的相位同步化研究.动力学与控制学报,2015,13(2):118~123(Zhu Y T, Wang R B. Research on phase synchronization with spike LFP coherence analysis. *Journal of Dynamics and Control*, 2015,13(2):118~123(in Chinese))
- 28 刘义,刘深泉.Pre-Böttinger 中间神经元模型的动力学分析.动力学与控制学报,2011,9(3):257~262(Liu Y, Liu S Q. Dynamic analysis of interneuron model in the Pre-Böttinger complex. *Journal of Dynamics and Control*, 2011,9(3):257~262(in Chinese))
- 29 薛焕斌,张继业.时滞切换不确定神经网络系统的指数稳定性.动力学与控制学报,2018,16(1):65~71(Xue H B, Zhang J Y. Exponential stability of time-delayed switched uncertain neural networks systems. *Journal of Dynamics and Control*, 2018,16(1):65~71(in Chinese))
- 30 叶伟杰,刘深泉.基于学习的多目标脑决策模型研究.动力学与控制学报,2018,16(1):72~79(Ye W J, Liu S Q. Research on learning-based multiple choice decision-making model of brain. *Journal of Dynamics and Control*, 2018,16(1):72~79(in Chinese))
- 31 王青云,陆启韶.兴奋性化学突触耦合的神经元的同步.动力学与控制学报,2008,6(1):35~39(Wang Q Y, Lu Q S. Synchronization of coupled neurons with excitory chemical synapse. *Journal of Dynamics and Control*, 2008,6(1):35~39(in Chinese))
- 32 Wang R B, Gu F J, Shen E H. Advances in cognitive neurodynamics. Berlin:Springer, 2008
- 33 Wang R B, Gu F J. Advances in cognitive neurodynamics (II). Berlin:Springer, 2011
- 34 Omori T, Yoko Y, Yutaka S, et al. Advances in cognitive neurodynamics(III). Berlin:Springer, 2013
- 35 Wang R B, Pan X C. Advances in cognitive neurodynamics(V). Berlin:Springer, 2016
- 36 Jose M, Delgado G, Pan X C, et al. Advances in cognitive neurodynamics(VI). Berlin:Springer, 2018
- 37 Raichle M E, Gusnard D A. Appraising the brain's energy budget. *PNAS*, 2002,99(16):10237~10239
- 38 Moore C I, Cao R. The Hemo-Neural hypothesis: on the role of blood flow in information processing. *Journal of*

- Neurophysiology*, 2008,99(5):2035~2047
- 39 Smith AJ, Blumenfeld H, Behar K L, et al. Cerebral energetics and spiking frequency: The neurophysiological basis of MRI. *PNAS*, 99(16):10765~10770
- 40 Laughlin S B. Energy as a constraint on the coding and processing of sensory information. *Current Opinion in Neurobiology*, 11(4):475~480
- 41 Wang Z Y, Wang R B. Energy distribution property and energy coding of a structural neural network. *Frontiers in computational neuroscience*, 2014,8:14
- 42 Zhu Z Y, Wang R B, Zhu F Y. The energy coding of a structural neural network based on the Hodgkin-Huxley model. *Frontiers in Neuroscience*, 2018,12:122
- 43 Wang R B, Zhu Y T. Can the activities of the large scale cortical network be expressed by neural energy? A brief review. *Cognitive Neurodynamics*, 2016,10(1):1~5
- 44 Wang Z Y, Wang R B, Fang R Y. Energy coding in neural network with inhibitory neurons. *Cognitive Neurodynamics*, 2015,9(2):129~144
- 45 Wang Y H, Xu X Y, Wang R B. The place cell activity is information-efficient constrained by energy. *Neural Networks*, 2019,116:110~118
- 46 Wang Y H, Xu X Y, Wang R B. An energy model of place cell network in three dimensional space. *Frontiers in Neuroscience*, 2018,12:264
- 47 Wang R B, et al. An exploration of dynamics on moving mechanism of the growth cone. *Molecules*, 2003,8:127~138
- 48 Rong W F, Wang R B, Zhang J H, et al. Neurodynamics analysis of cochlear cell activity. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*, doi: 10.1016/j.taml.2019.06.007

RESEARCH ADVANCES IN NEURODYNAMICS

Wang Rubin[†]

(1. Institute of Cognitive Neurodynamics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

(2. School of Computer Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract This paper mainly introduces the position and function of neurodynamic theory in the field of brain science, its present situation and the original innovation of our country, the existing problems and its historical mission. It emphasizes the intrinsic connection, importance and influence of mechanics in neuroscience and life sciences, especially points out that the original innovation in the field of brain science cannot be separated from the role, guidance and contribution of mechanics. The paper also focuses on the main research findings in the special issue. The authors of these findings have separately elaborated from different perspectives on how they apply neurodynamic theory to reveal some unique new phenomena and rule that cannot be discovered in experiments, and the unique power shown in exploring degenerative neurological diseases and cognitive impairment.

Key words brain theory, mechanics and neurodynamics, function and action of theoretical neuroscience, degenerative neurological disorders and cognitive impairment