

生物神经系统的一些动力学问题

陆启韶

北京航空航天大学航空科学与工程学院动力学与控制系, 北京 100191; E-mail: qishaolu@buaa.edu.cn

摘要 生物神经系统具有极其复杂的多尺度、多层次的超级网络结构, 承担着生物体的感知、认知、运动控制等重要功能, 存在十分丰富的动力学行为。作者对生物神经系统的时空动力学、网络动力学建模、智能活动等几个基本的动力学问题进行简要综述, 探讨它们与力学之间的内在联系, 并在此基础上对神经动力学的今后发展进行展望。

关键词 动力学; 神经系统; 网络

中图分类号 O31; O193; Q427

Some Dynamical Problems in Biological Neural Systems

LU Qishao

Department of Dynamics and Control, School of Aeronautical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191;
E-mail: qishaolu@buaa.edu.cn

Abstract Biological neural systems are extremely complex super-network structures with multiple time scales and spatial levels and carry out the biological functions of sensitivity, cognition, motion control and so on. There are ubiquitous dynamical phenomena in biological neural systems, and some basic problems, including spatiotemporal dynamics, dynamical modeling of networks and intelligence activities, which are surveyed briefly in the implicit connection with mechanics. Prospects of the development of neurodynamics are also concerned.

Key words dynamics; neural system; network

生物神经系统承担着感受外界刺激, 产生、处理、传导和整合信号, 从事各种感觉、学习、记忆和思维等认知活动, 以及控制生物体运动和内分泌等重要功能, 是生物体的关键性器官之一, 特别地, 大脑是生物的司令部和信息中心。为了进一步探讨脑神经信息和功能的需要, 必须深入研究其中丰富动力学的行为, 包括从分子、细胞、网络直到整体行为的不同层次, 研究神经系统的结构和功能、生长和发育等方面的活动, 最终阐明认知行为和心理活动的内在机制, 同时为战胜各种神经和精神疾病提供科学原理和治疗途径^[1-2]。此外, 仿生系统和智能机器人等的研究也需要处理与神经信息活动相关的大量动力学与控制问题。神经系统的动力学问

题是神经科学与力学、网络科学、信息科学等多学科有机融合的交叉研究领域。

力学是现代科学中最早和最成熟的学科, 是人类认识自然界的重要工具。力学也是现代工程技术的基础, 对人类现代文明和社会发展做出了难以估量的卓越贡献。力学的发展进程充分表明其基本原理和方法有广泛的适用性和指导作用。经典力学简洁优美的数理模型和完整严密的理论体系为其他学科树立了榜样。神经科学则是在神经解剖学和生理学的丰富实验成果基础上, 在 20 世纪中叶诞生的新兴学科, 也是 21 世纪最有活力的前沿学科之一。从表面上来看, 经典力学的主要研究背景是天体运动和地面机械运动, 与神经科学的研究对象

——生物神经系统活动(生物电和化学活动、神经认知行为等)相距甚远。但是生物神经系统作为非线性动力系统,从动力学的本质来说,与力学系统有许多共同点。在长期发展过程中,力学在建模、逻辑推理、理论分析、数值计算、实验、工程应用等方面积累了丰富的经验,对神经科学的学科发展有重要的启示和借鉴作用。本文针对生物神经系统的几个基本动力学问题进行简要综述,探讨它们与力学之间的内在联系,并在此基础上进行展望。

1 生物神经系统的时空动力学

生物神经元的类型和连接形式的多样性使得神经系统具有复杂的拓扑结构和动态特性,表现出很强的非线性和复杂性。在整个神经系统中,神经元对信息的反应是由神经元集群共同完成的,而不是单一神经元的功能。因此,我们需要从复杂网络动力学的观点去考察耦合神经元系统放电的复杂同步活动和时空动力学行为,进而深入理解神经高级认知功能^[3]。

同步是自然界、工程技术和社会中普遍存在的现象,又是产生其他大量合作行为的机制。早期同步研究的对象主要是各种耦合振动系统的周期运动的锁相或锁频问题。在混沌运动发现以后,对同步的研究又拓展到耦合混沌通讯系统。迄今为止,人们已发现完全同步、相位同步、广义同步、滞后同步、测度同步等不同类型的同步。考虑到神经系统有峰放电和簇放电两种基本放电模式,因此耦合神经元系统的放电同步又可分为峰放电同步和簇放电同步两大类。从本质上说,峰放电同步对应着快变量的节律同步,而簇放电同步对应着慢变量的节律同步,后者在神经信息传导中起主要作用。近年来,对于耦合神经元系统的完全同步和相位同步活动特征及稳定性判据等进行了较多研究,簇放电同步的机理和转迁问题有待深入探讨^[4-5]。

由于神经信号传输速度的有限性和突触中神经递质释放过程的延迟性,在神经系统中,时滞因素是普遍存在的,因此时滞对神经元网络的非线性动力学行为影响引起广泛关注。研究揭示,小时滞可能增强神经元间的同步,还发现时滞可以诱发耦合丰富的神经放电模式^[4]。

神经系统中的内、外噪声不仅会影响神经元本身的动力学行为,还会诱导出确定性神经网络系统

不具有的时空动力学行为,包括随机共振、相关共振和时空斑图等。比如,改变噪声强度,系统就会出现小规模振荡、倍周期、混沌和峰放电等复杂现象;小噪声会增强神经元间的同步;发现在噪声环境下神经元间的有序簇同步和复杂的转迁现象。近年来的研究还表明存在优化的噪声强度,使得神经元网络的空间模式呈现极大的共振结构^[6-9]。

近年来,系统神经科学家在大脑联合皮层的功能方面还做了大量研究,把神经元的放电活动与实验动物的认知行为联系起来,真正开始探究脑认知行为的动力学机制。人们开始建立有关的生物物理模型,研究大脑联合皮层(如顶叶和前额叶)神经回路中的典型神经放电活动,阐明大脑工作记忆和抉择过程的神经动力学机制及网络结构特征等^[10]。

显然,同步、共振、时空斑图、多时间尺度、时滞和噪声都是常见的基本力学现象,有关的力学理论和方法已经比较成熟。在生物神经系统中广泛存在类似的现象,有力地说明力学研究的思想和方法的普遍性和重要性。但是,面对神经系统复杂的生理功能和现象,研究难度很大,相应的理论和方法都有待进一步发展。例如,与神经电活动密切联系的簇同步、集群同步、神经元间的去同步化机制等的研究尚少,神经网络系统的动态特性(包括稳定性、鲁棒性、功能效率、控制特性、动态行为、时空演化模式等方面)都很值得深入开展研究。时滞和噪声是真实生物神经网络中不可忽略的重要因素,除此之外,我们还应当进一步考虑突触可塑性、神经网络复杂结构等对于系统的动力学行为的影响。

2 生物神经网络的动力学建模问题

生物神经系统是具有海量单元、极其复杂的拓扑连接关系和统计特性的多层次网络系统,特别地,人类大脑也是目前已发现的最复杂的非线性网络系统。因此,合理地构建神经网络系统模型对于神经科学理论分析和计算至关重要,也是极为繁重艰巨的任务。如何结合真实的生物神经网络特点和认知功能需求开展网络建模研究,包括解剖连接(考虑空间限制)和功能连接(考虑信息交换和整合),是值得关注的问题。

从神经信息学的角度来看,大脑网络可大致分为以下3种类型。

1) 结构性网络。基于神经解剖学原理,通过实体解剖或核磁影像等方法,可以确定神经元之间直到脑功能区之间的连接关系的大脑网络解剖图。网络分析(特别是图论方法)给出了定量地表征这些解剖结果的方法。大脑的结构性网络可用拓扑图表示,神经元(或脑功能区)是神经网络的基本节点,它们之间的物理联结给出连接边,以进行信息传递和交流。

2) 功能性网络。基于傅立叶分析、相位同步分析和互相关等方法,利用神经生理实验结果(如 EEG, MEA, MEG, fMRI 信号等)构建无向网络来描述神经元集群(例如皮层区域)之间的统计性连接关系所产生的信息结果。

3) 效用性网络。这是考虑神经网络各节点动力学行为之间的相互影响或信息流向的有向网络,与功能性网络相比,更强调节点之间相互因果作用,其研究内容除各脑功能区域之间相互关系外,还要考察它们内部的相互作用关系。

在生物神经系统的动力学理论和应用研究中,可以根据研究需要和实验数据的具体情况构建合适的网络类型。结构性网络有助于了解神经网络的几何联结关系,只有通过功能性或效用性网络,才能认识如何实现其神经生理功能。目前关于大脑功能性网络的研究多于效用性网络的研究,这是因为关于无向网络的度量方法和理论分析成果比较多,而对有向网络的刻画和理论分析的难度较大。研究结果表明,生物神经网络往往具有非均匀性和小世界性质的功能性连接,还发现学习及疾病等能改变大脑的结构性网络,这些都对网络建模问题提出更高的要求^[11-12]。

力学中通常遇到的多质点系统、多体系统、连续介质系统的离散化计算格式都是网络系统,在网络建模中使用的互相关、相干、互信息量、相位同步分析等方法都有重要的力学渊源,因此网络概念本身具有十分深刻久远的力学背景。20 多年来,人们在不同学科中进一步发现许多具有不同拓扑和统计特征的复杂网络,并对现代科技和社会生活产生重要影响。本质上说,复杂网络系统是单元数量极大且耦合连接关系极其复杂的离散系统,与通常的离散力学系统的主要区别在于其“相互作用”需要考虑网络连接的整体性质(拓扑结构)和统计特征的影响,使得有些常规的力学网络建模和分析方法不再

适用。作为巨型超级复杂网络系统,神经网络也不例外。为了深入开展感知、学习和记忆、认知功能障碍等大脑功能的研究,人们需要构建各种跨层次的真实脑网络模型。目前通过 EEG, MEG, MRI, fMRI, CT, PET 等现代实验手段,连同理论模型及其计算仿真一起,拼接人类大脑皮层的网络精细结构图景的研究正在进行^[13-14]。真实神经网络系统通常是动态的,因此需考虑节点动力系统的高度非线性和复杂性、网络拓扑结构的时变性、鲁棒性和易损性等问题。目前,神经网络考虑的是基本上不依赖于时间的连接方式。实际上,大脑连接可以由神经元的性质变化或通过突触可塑性来调节,例如长期记忆就与脑皮层神经元间连接强度的变化有关,因此要求计算模型能够考虑如何受时变连接方式影响。在大多数神经网络建模中,连接方式都没有考虑空间距离。在大的神经元网络中,空间长距离连接意味着很高的能量消耗,所以现实的神经网络模型应该考虑空间限制。此外,目前的研究大多考虑对称和无权连接矩阵,但实际上,加权和非对称耦合矩阵描述神经元的相互作用更为合理。这些都是真实脑网络模型构建过程中需要认真考虑的问题。

3 生物智能活动

智能行为本来是生物系统特有的功能,生物体活动是智能行为与力学运动的有机结合。随着计算机和机电等近代科学技术的发展,人们模仿大脑神经网络的功能,开发了人工智能技术,在国民经济和国防事业中发挥着越来越重要的作用。鉴于生物智能在生物运动中的关键作用,并且具有高度稳定性和鲁棒性、卓越的自学习能力和自适应性、节能性等无可比拟的优点,可以为人工智能发展提供丰富的知识源泉,人们对于生物智能活动的研究方兴未艾。

与人工智能活动相比,生物智能活动具有以下显著特点。

1) 生物神经信息编码和信息流。

神经系统通过动作电位承载和传递信息,因此需要考虑电脉冲信号的峰峰间期(相邻电脉冲的时间间隔,记为 ISI)序列的节律编码。神经认知活动对应神经信息空间上的时空动力学行为,即用“神经信息流”进行描述^[15]。动作电位的主要模式是簇放电,这是多时间尺度导致的快慢动力学效应,相

应的神经元放电 ISI 序列可以归结为多维的离散动力系统,而生物神经网络的 ISI 序列也可用神经信息空间上的时空离散动力系统表示。

生物神经信息与通常人工智能的机电信号在编码方式和处理机制上完全不同,但依然有着很强的力学背景。我们将描述物理空间中的神经电活动的连续动力系统转化为神经信息空间中的高维离散动力系统,这为理论分析带来很大的方便。由于高维数和高度非线性的缘故,建立生物神经的多时间尺度信息编码规律和神经信息流的离散动力系统等基本问题难度很大,远未解决。

2) 生物高级认知功能。

生物智能可以实现感觉、学习、记忆、思维等生物高级认知功能,支配和控制生物体的外部(生物运动)和内部(内分泌)行为,这是目前人工智能技术难以做到的。

3) 分子生物调控机制。

生物神经的离子通道、神经递质、钙信号等都与生物化学活动密切相关,一些认知功能障碍也与生物基因缺陷有关,因此生物智能的分子生物调控机制充分体现着生物“活性”,这也是与人工智能在本质上不同。

生物智能体的基本活动是力学、神经和生命活动的有机组合,只有全面充分考虑三者的相互关系,才能真正地研究生物智能体的动力学行为,体现力学与信息、生命等学科交叉融合的发展趋势。在生物智能体研究中,应特别重视生物活性、能量、随机性等生物智能和生物力学行为的多样性和复杂性中的重要作用,并思考人工智能技术如何更好地学习生物智能的优点,以提高仿生功效的问题。

4 结束语

总的来说,生物神经系统的结构和行为极为复杂,其电生理、信息、认知和控制活动具有非线性、复杂性和随机性的本质以及多层次、大系统、跨学科的特征。生物神经系统的动力学同时涉及物质和信息两方面的问题,研究难度极大,研究历史较短,并且,神经科学的建模和理论体系正在建立,许多本质性问题还需要经过长期探索才能得到解决。目前,作为重要的国际前沿研究领域,生物神经系统中的动力学问题已经在神经元及其耦合系统、神经网络和神经编码、认知和运动控制功能的

研究上取得很大进展。关于神经网络系统的复杂动力学行为的跨学科交叉研究不仅为开展神经科学奠定了坚实的理论基础,对非线性科学、网络科学和智能科学技术等的发展也具有重要理论意义和广阔的应用前景。

除本身的巨大贡献外,力学在人类历史上的另一个伟大作用是推动了现代科学的发展,为数学、物理、化学、天文、地理、生物诸多学科的发展奠定了坚实基础。经典力学是近代理论物理学的重要基础和深刻根源。在经典力学的原理和方法的启发和引领下,相继出现热力学、分子动力学、统计力学、电动力学、相对论力学和量子力学等新学科。20 世纪中叶以后,力学继续在自然科学和社会科学领域中发挥基础性作用,将理论框架从传统的“经典”力学范畴进一步拓展到“广义”力学范畴,使得经典力学的基本概念、理论和方法可以从机械运动推广到一般系统的动力学规律研究,从而使力学原理具有更大的普遍性和适用性,为开展力学与其他学科的交叉和合作展示了广阔前景。神经动力学将继承和发扬力学的优良传统,创造性地运用和拓展力学的基本原理、理论和方法,紧密结合生物神经系统的信息和生命特征,重视非线性和复杂性的深刻影响,必定能够在非线性科学、脑科学和智能科学的领域做出应有的贡献。

参考文献

- [1] Bear M F, Connors B W, Paradiso M A. Neuroscience: exploring the brain. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2006
- [2] Koch C, Laurent G. Complexity and the nervous system. Science, 1999, 284: 96–98
- [3] Lu Q, Gu H, Yang Z, et al. Dynamics of firing patterns, synchronization and resonances in neuronal electrical activities: experiments and analysis. Acta Mechanica Sinica, 2008, 24(6): 593–628
- [4] Mukeshwar D, Jirsa V K, Ding A M. Enhancement of neural synchrony by time delay. Physical Review Letters, 2004, 92(7): 074104
- [5] Wu Y. Synchronous behaviors of two coupled neurons

- // Proceedings of the Second international conference on Advances in Neural Networks: Lecture Notes in Computer Science 3496. Chongqing, 2005: 302–307
- [6] Douglass J K, Wilkens L, Pantazelou E, et al. Noise enhancement of information transfer in crayfish mechoreceptor by stochastic resonance. *Nature*, 1993, 365: 337–340
- [7] Longtin A. Autonomous stochastic resonance in bursting neurons. *Physical Review E*, 1997, 55(1): 868–876
- [8] Baltana J P, Casado J M. Noise-induced resonances in the Hindmarsh–Rose neuronal model. *Physical Review E*, 2002, 65: 041915
- [9] Faisal A A, Selen L P J, Wolpert D M. Noise in the nervous system. *Nature Reviews*, 2008, 9(4): 292–303
- [10] 陆启韶, 刘深泉, 刘锋, 等. 生物神经网络系统动力学与功能研究. *力学进展*, 2008, 38(6): 766–793
- [11] Barrat A, Boccaletti S, Caldarelli G, et al. Complex networks: from biology to information technology. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2008, 41(22): 220301
- [12] Bullmore E, Sporns O. Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems. *Neuroscience*, 2009, 10(3): 186–198
- [13] Wang X J. Neurophysiological and computational principles of cortical rhythms in cognition. *Physiological Reviews*, 2010, 90(3): 1195–1268
- [14] De Schutter E. *Computational Modeling Methods for Neuroscientists*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2010
- [15] Borst A, Theunissen F E. Information theory and neural coding. *Nature Neuroscience*, 1999, 2(2): 947–957