

神经动力学与力学

陆启韶[†]

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院,北京 100083)

摘要 本文回顾力学研究体系的发展,简要介绍神经动力学的主要内容及其作用,探讨神经动力学与力学的密切关系,并提出一些研究展望.

关键词 力学, 脑科学, 神经动力学, 神经调控, 神经疾病, 类脑智能

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-004

引言

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.人们必须深入研究神经系统复杂的网络结构和丰富的动力学行为,阐明神经认知行为和心理活动的内在机制,才能深刻揭示脑神经信息和功能的奥秘,并为战胜各种神经疾病提供科学原理和治疗途径.此外,各种智能装备等也涉及大量与神经信息活动相关的动力学与控制问题.

神经科学(脑科学)是一门对动物和人体的神经系统进行生物学研究的综合性学科.随着神经实验和计算技术手段的创新,神经科学研究取得迅速进展^[1].不过,传统的神经科学研究结果主要是依靠实验现象的观察和实验/临床数据的统计分析得到的,由于实验技术和条件的限制,以及数据分析的难度,往往难以对神经系统的生理和认知行为获得规律性的全面认识.正如著名物理学家薛定谔精辟地指出的那样:“所有的科学知识都来源于感官感知;但是我们得到的科学理论却不包含感官感知部分,而且也不能解释相关的感知”^[2].为了获得对于大脑活动规律的全面深入的认识,现在人们已经认识到建立神经科学的理论体系的重要性,需要开展多学科交叉融合的创新性研究.

力学是最古老的科学部门之一,并且一直持续发展.它是人类认识自然界的重要工具,也是现代工程技术的基础,对人类社会发展和进步做出了重大贡献.神经科学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.从表面上看来,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.然而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、理论分析、数值计算、实验、工程应用等方面都积累了十分丰富的成功经验,它们对神经科学的学科发展应当有重要的启示和指导作用.本文从学科发展的角度,简要介绍生物神经系统的生理、信息和认知活动中的一些动力学问题,并回顾力学研究体系的发展,探讨神经动力学与力学之间的内在联系,对今后的发展作些展望.

1 力学研究体系的发展

我国著名力学家周培源先生说过:“力学是关于物质宏观运动规律的科学”,力学学科的发展过程充分证实这个论断的正确性.在 20 世纪以前相当长的时期里,力学主要研究质点或质点系的机械运动的基本规律,即机械力和位形(如位移、速度等)变化之间的关系,属于经典的牛顿力学体系.在

19世纪后期,庞加莱、李雅普诺夫等通过天体力学、流体力学稳定性等研究,率先开辟了动力学的定性研究途径,建立了动力系统的初步基础.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,力学研究对象从“质点或质点系”拓展到一般性的“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”.爱因斯坦说过:“牛顿的成就的重要性,并不限于为实际的力学科学创造了一个可用的和逻辑上令人满意的基础;而且直到19世纪末,它一直是理论物理学领域中每一个工作者的纲领.”在力学的原理和方法的引领下,不仅在宏观物质系统的不同范畴内相继出现了热力学、统计力学、电动力学、相对论力学等新学科,甚至对微观世界的量子力学理论的诞生也有重要影响,因此力学成为近代物理的深刻根源和重要基础.到了20世纪中叶以后,力学进一步在自然科学和工程技术,以至社会科学的更多领域中发挥重要的作用,形成更多新的交叉学科分支(如化学动力学、生态动力学、经济动力学、非线性动力学等),这些巨大成就充分表明了“广义”力学体系有力地推动现代科学技术的发展.

经典力学不仅在认识自然和社会发展方面做出了重大贡献,而且开创了影响深远的力学方法论.它以客观的观测和实验事实为基础,抓住物理本质去建立数学模型,充分运用数学理论和手段,通过分析获得精确化的普遍性规律,提出了以功能原理、守恒原理、变分原理等为代表的自然界基本原理,并在后续研究和应用中进一步证实和发展.力学方法论对力学学科的完善和各门自然科学与工程技术的精确化产生了极为深远的影响^[3].

力学具有坚实可靠的实验基础、简洁优美的数学模型和完整严密的理论体系,其原理和方法有普遍的指导意义,是人类的重要知识库.“广义”力学体系的建立使得力学的基本概念、理论和方法可以从机械系统推广到一般的动力学系统,从而力学本身得到进一步发展,并能够应用到更广泛的自然

现象和工程问题,为力学与其他学科的交叉融合开辟了广阔前景.

2 神经动力学的内涵

生物神经系统是包括分子、细胞、集群、脑区等不同层次的超大型信息系统,是目前宇宙中已发现的最复杂的非线性网络系统^[4-7].神经信息活动主要是通过电生理过程实现的,因此人们需要从动力学的观点去深入探讨脑神经网络系统的复杂放电活动,进一步理解脑神经信息传导过程和高级认知功能.基于现代神经科学研究得到的丰富资料,神经动力学作为神经科学的理论基础的重要组成部分适时地诞生了.20世纪后期,在2000年,著名神经科学家W.J.Freeman最早在专著^[8]中正式提出“神经动力学”(neurodynamics)的名称,其后得到广泛的学术响应,很快就成为21世纪的活跃的跨学科分支.

神经动力学的基本任务是运用动力系统、复杂网络和控制科学、信息科学的理论和方法,开展生物神经系统的生理、信息和认知活动的动力学建模、行为和机理分析,包括以下基本内容^[9-16]:

(1)神经元和耦合神经网络系统的放电模式的动力学分析.生物神经系统的基本单元是神经元,神经元放电活动主要表现为产生和传输电脉冲序列(动作电位)的过程,神经信号是通过神经元动作电位的时间节律和振荡模式反映的.神经元放电活动主要有峰放电和簇放电两大类.簇放电表现为静息状态与反复放电状态的相互转化,是神经系统特有的最常见的多尺度快慢动力学现象,存在大量的复杂振荡模式,并在神经信息编码方式中起着关键作用.神经系统的信息活动是由神经元集群组成的网络系统的复杂时空动力学行为.生物神经元的类型和连接形式的多样性使得神经网络系统具有复杂的拓扑结构和连接关系,系统的内、外噪声的存在,神经电信号传输速度的有限性和化学突触中神经递质释放过程的延迟性,突触连接的可塑性,这些都会对神经系统的时空动力学行为产生十分重要的影响.为此我们需要深入研究神经元和突触的电生理建模和动力学行为、耦合神经元系统的网络动态特性(包括同步特性、时空模式、结构特性、统计特性、信息特性、控制特性、优化特性等)以及各种外界激励和内部参数对神经放电活动的影

响、随机性和时滞效应等因素的作用等。

(2) 脑神经网络系统的建模和认知功能的动力学分析。不同的脑功能对应各自的网络系统,对它们进行动力学建模和分析极为重要。首先,基于神经网络的解剖性质和现代神经电生理实验结果,拼接出大脑皮层的一些区域的网络精细结构图景,确定典型神经功能区的连接结构和电生理特征,构建各种跨层次的真实脑神经网络动力学模型(例如,感知觉神经模型、学习记忆神经模型、运动认知神经模型、认知功能障碍模型等)。然后,利用非线性动力学和复杂网络系统的理论与方法去研究大脑联合皮层的典型神经回路中的神经放电活动,阐明不同的神经网络的结构和动力学特征。最后,在此基础上深入研究神经系统的各种功能的活动规律和内在机制。

(3) 与神经活动有关的分子生物网络动力学分析。神经活动(如离子通道的功能特性和运转方式、神经递质的合成、释放及其与受体的相互作用、突触可塑性、胶质细胞等)、神经细胞的生长、发育和衰亡都有深刻的分子生物学机理,人们构造相应的分子生物网络(例如蛋白质、基因、钙等分子网络)并进行动力学分析,从微观的角度探讨其对神经电活动和认知活动的重要影响。

(4) 生物神经信息的编码问题。生物神经系统通过动作电位(特别是簇放电)的发放去承载和传递信息,具有独特的高效信息编码方式。尽管人们提出了一些神经编码模式,但是存在着各种不同的缺陷,至今还没有建立一个合理有效的神经编码理论。为此需要深入研究大脑的神经信息编码和解码问题,即如何依据神经放电模式和时空分布去表征外界刺激的信息,以及在感觉、学习、记忆、思维、决策等认知活动和运动控制过程中如何处理、加工和转化神经信息。基于动作电位时间序列的神经编码的研究难点主要来自神经系统的高维性、多层次和多时间尺度等因素,因此探讨新的神经编码原理和方法(例如基于大脑的能量耗散机制的神经能量编码等)也有重要的指导意义。

生物神经系统的结构和行为十分复杂,电生理、信息、认知和控制活动具有非线性、复杂性、随机性和整合性的本质,呈现多层次、多时间尺度、大系统的特征,同时涉及物质和信息两大领域(而通常的力学系统只涉及物质活动),研究难度极大,加

上研究历史短等原因,神经科学的建模水平还是很原始的,尚未建立完整的理论体系,许多本质性问题尚待长期艰苦探究才能得到解决。神经动力学利用动力系统的思想、理论和方法去研究生物神经系统的电生理、信息和认知活动的动力学与控制问题,创造性地运用力学的思想、原理和方法,这表明神经动力学属于“广义”力学体系的范畴,是动力学与控制领域中新的学科分支。神经动力学是研究神经系统中不同层次的丰富复杂动力学行为的理论基础,构成了现代神经科学的“理论、实验、计算”相结合的研究模式的重要组成部分。

3 神经动力学的外延

当前在世界范围内开展的脑研究计划的目标不仅是揭示脑生理活动过程和脑认知功能的原理,而且还要在此基础上提供神经疾病和脑功能异常行为的诊治新手段,并为开发具有类脑功能的计算系统和智能化装备等提供关键性技术支持,因此神经动力学在深入研究脑神经电生理、信息和认知行为的现象和规律之外,还应当积极探索其在神经医学和人工智能领域中的应用,在神经功能调控、神经疾病和类脑智能研究上发挥理论指导作用。

(1) 神经功能调控与神经疾病的精准诊疗

生物运动、睡眠、心脏、呼吸的节奏等都与生物神经活动密切相关。在生物运动过程中,肌肉、骨骼、关节等的力学活动都是在神经系统的控制下进行的,从而形成了各种力学-神经耦合作用和网络结构,在复杂的外界环境和刺激下生物运动神经发挥着重要的调控作用^[17]。生物的其他器官(如视觉和听觉等感知系统、循环系统、呼吸系统、心脏系统、消化系统等)与神经系统之间同样存在大量力学-神经耦合作用和相应的神经调控问题。人类在特殊生存环境(如在飞船、航天站等的失重环境、外星环境、深海或高空环境等)中生活,或者残障人士发生认知障碍,都会呈现不同的神经功能失调或异常行为,这时需要通过施加外界刺激、改变环境和内部参数等不同手段合理调节神经功能。因此人们有必要深入分析神经功能调控的动力学问题。

神经系统的疾病种类繁多(例如癫痫症、帕金森症、阿尔茨海默症、抑郁症、自闭症等),临床表现复杂多变,诊断鉴别和治疗难度很大。目前已经有了大量先进的神经医学设备和多种神经疾病疗法

(如药物治疗、电刺激疗法、植入体疗法、基因疗法等),取得了初步效果.为了实现神经疾病的精准诊疗,人们需要积极开展神经疾病的病理分析和精准诊治手段的动力学研究.首先,建立神经系统的生物电和化学活动与神经病态表征之间的联系,探讨关键性生理因素对神经网络放电模式和生物基因通路特性的影响.然后,研究神经疾病发作的动力学机制,揭示病态的复杂演化过程和影响因素.最后,设计有效的控制方案去调控病态网络,用以预防或抑制神经功能的退化和病变,为深入认识和诊治精神疾病提供可靠的理论依据.应当指出,当前神经科学的跨越式发展和丰富的临床医疗实践,已经积累了海量的多尺度、跨层次、多模态临床医学数据.因此当务之急是发展针对临床大数据的合理有效的统计分析方法和理论模型,开展神经疾病诊断的大数据精准分析,优化临床大数据的多学科融合的精准医疗控制策略,形成高效系统的临床应用解决方案,这是重要的多学科前沿交叉科学问题.

(2)类脑智能的原理与方法及其在智能装备中的应用

智能行为本来是高级生物的功能,其智能水平是衡量生物进化程度的重要标志.人脑具有最高级的生物智能,尤其是在卓越的认知能力方面.随着计算机和机电等近代科学技术的发展,人们在科学技术活动中模仿大脑神经系统的功能,开发了人工智能技术,出现了各种具有人工智能功能的计算、信息和控制系统.人工智能研究通过计算机来模拟人的某些思维过程和智能行为(如学习、记忆、推理、思考、规划等)^[18].自从20世纪50年代诞生以来,人工智能经过60多年取得很大进展,依靠计算机的强大数据处理能力结合大样本的深度学习神经网络,在图像处理、语音识别、对弈决策等方面取得了惊人的成就,展示出空前广阔的前景.人类的智能是在自然界中长期的生物进化过程中缓慢形成的;但是随着人工智能的出现,可以预期人类的智能将以崭新的方式飞跃发展,科学技术将发生翻天覆地的变化,人类社会也将进入一个空前的智能新时代.

但是,目前的人工智能技术主要依赖基于大量样本的大数据去训练神经网络和深度学习算法去仿效脑功能进行工作,但其信息处理机制往往是与脑的工作过程不同的,在学习、思维、推理、情感等

方面的能力更无法与人脑相比,因此还存在许多严重不足之处,远远不能满足新一代的智能技术的需求.鉴于生物智能具有主动灵活的思维创造能力、强大的自学能力和自适应性、高度稳定性和鲁棒性等无可比拟的优点,人们必须进一步借鉴脑神经结构及信息处理机制,大力促进人工智能和生物智能相互融合,深入开展类脑智能研究,包括建立类脑的信息编码、处理、记忆、学习与推理理论与算法;开发从事类脑智能计算的人工神经网络和认知功能模型;在此基础上努力提升装备的类脑智能化程度,研制类脑智能元件和类脑智能装备,新一代智能装备将向无人自主智能、人机协同增强智能、群体集成智能的方向发展.类脑智能研究提出了大量新的多学科的挑战性问题.神经动力学关于生物智能的机理的研究可以为类脑智能提供新原理、新途径和新方法,在类脑智能系统的动力学与控制问题中发挥重要作用.

4 结束语

神经动力学是研究神经系统的动力学与控制问题的重要理论基础,涉及脑神经电生理、信息和认知活动的动力学建模和行为分析等,是国际前沿研究领域.它向脑科学和智能科学提供新概念、新思想和新途径,体现着非线性动力学、信息科学、控制科学、复杂网络科学等多学科的有机交叉融合.目前神经动力学在神经元及其耦合系统、神经网络的电生理活动,以及神经编码、神经认知和运动控制功能等方面的研究上已经取得了很大进展.

我国近年制定的《脑科学计划》和《新一代人工智能发展规划》明确指出,智能科学技术(包括脑科学和人工智能技术)是新一轮科技革命和产业变革的核心驱动力,装备智能化是创新驱动的现代化国民经济和国防建设的一个重要战略目标.为了进一步探讨脑神经信息和功能,人们必须在分子、细胞、网络直到整体的不同层次上全面深入地研究各种神经系统的结构和动力学行为,揭示神经功能活动的规律和内在机制;在此基础上认识神经系统的生理功能的动力学调控机制和异常行为,为神经功能的调控、神经疾病的医学临床诊断和精准治疗等提供可靠的理论指导;此外,还要探索类脑智能的工作原理和手段,以最终实现机制类脑、行为类人的新一代人工智能系统的目标.神经动力学将为

这些跨学科交叉研究奠定坚实的理论基础,也对非线性科学、网络科学和智能科学技术等领域的发展具有重要理论意义和应用前景.

参 考 文 献

- 1 Bear M F, Connors B W, Paradiso M A. Neuroscience: exploring the brain. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2006
- 2 埃尔温·薛定谔.薛定谔生命物理学讲义.赖海强,译.北京:北京联合出版公司,2017(Schrodinger E. What is life mind and matter autobiographical sketches. Lai H Q. Beijing: Beijing United Publishing Company, 2017 (in Chinese))
- 3 武际可.力学史.重庆:重庆出版社,2000,257~267(Wu J K. History of mechanics. Chongqing: Chongqing Publishing House, 2000, 257~267 (in Chinese))
- 4 Chay T R, Fan Y S, Lee Y S. Bursting, spiking, chaos, fractals, and universality in biological rhythms. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1995, 5(3): 595~635
- 5 Koch C, Laurent G. Complexity and the nervous system. *Science*, 1999, 284(5411): 96~98
- 6 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
- 7 Byrne J H, Roberts J L. From molecules to networks: an introduction to cellular and molecular neuroscience. New York: Elsevier, 2004
- 8 Freeman W J. Neurodynamics: an exploration in mesoscopic brain dynamics. New York: Springer, 2000
- 9 Dayan P, Abbot T. Theoretical neuroscience: computational and mathematical modeling of neural systems. Cambridge: The MIT Press, 2001
- 10 Gerstner W, Kistler W M. Spiking neuron models: single neurons, populations, plasticity. Cambridge: Cambridge University Press, 2002
- 11 Izhikevich E M. Dynamical systems in neuroscience: the geometry of excitability and bursting. Cambridge, MA: the MIT Press, 2005
- 12 DeSchutter E. Computational modeling methods for neuroscientists. Cambridge: the MIT Press, 2010
- 13 胡三觉,徐健学,任维,等.神经元非线性活动的探索.北京:科学出版社,2017(Hu S J, Xu J X, Ren W, et al. Neuron and the exploration of its nonlinear activities. Beijing: Science Press, 2017 (in Chinese))
- 14 Lu Q S, Gu H G, Yang Z Q, et al. Dynamics of firing patterns, synchronization and resonances in neuronal electrical activities: experiments and analysis. *Acta Mechanica Sinica*, 2008, 24(6): 593~628
- 15 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):366~393(Lu Q S, Liu S Q, Liu F, et al. Research on system dynamics and function of biological neuronal networks. *Mechanical Progress*, 2008, 38(6): 366~393 (in Chinese))
- 16 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. Synchronization dynamics of neuronal coupling system. Beijing: Science Press, 2008 (in Chinese))
- 17 Enoka R M. Neuromechanics of human movement (3rd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics, 2002
- 18 史忠植.智能科学(第2版).北京:清华大学出版社,2013(Shi Z Z. Intelligence science (2nd ed.). Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2013 (in Chinese))

NEURODYNAMICS AND MECHANICS

Lu Qishao[†]

(School of Aeronautical Sciences and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract A survey on the frames of mechanical research is made, and the main content and role of neurodynamics are introduced briefly. The close relation between neurodynamics and mechanics with the prospect of development of neurodynamics is considered.

Key words mechanics, brain science, neurodynamics, neural control, neural decease, brain-like intelligence