

● [美] 沃尔特·J. 弗利曼 著
顾凡及 梁培基等 译

Neurodynamics

神经动力学

对介观脑动力学的探索

浙江大学出版社

神经动力学

对介观脑动力学的探索

[美] 沃尔特·J. 弗利曼 著
顾凡及 梁培基等 译

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

神经动力学：对介观脑动力学的探索 / [美]弗利曼著；顾凡及，梁培基等译. —杭州：浙江大学出版社，2004.6
ISBN 7-308-03258-2

I. 神... II. ①弗...②顾... III. 脑—机能(生物)
—研究 IV. Q983

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 011929 号

浙江省版权局著作权合同登记号：(图字)11—2001—71 号

出版发行 浙江大学出版社
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(网址：<http://www.zjupress.com>)
(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

责任编辑 沈国明

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 .

印 张 19

字 数 462 千

版 次 2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-308-03258-2/Q·036

定 价 36.00 元

译者的话

人们常说 21 世纪是脑的世纪,人们也常说 21 世纪是信息的世纪。不管这些话是否确切,无疑的一点是,脑科学和信息科学的交叉领域已成为当前最重要的科学前沿之一。认识脑,也就是认识人类自己,已成为对当代科学的最大挑战,并将对解决人类社会所面临的老龄化和信息化两大问题起重要作用。长期以来,脑科学和信息科学被割裂开来,直到 20 世纪下半叶,人们才开始把两者结合起来进行研究,特别是在最近十几年中,一大批各行各业的专家投身其中,并取得了显著的成绩。然而研究难度很大,因为需要把不同一级学科的知识、理论、方法和手段融会贯通,有机地结合起来才能做到。要做到这一点很不容易,但学习别人的成功经验可以使我们少走很多弯路。

美国伯克利加州大学的弗利曼教授(Walter J. Freeman)以其 40 多年的工作,在这方面给我们树立了一个榜样。他成功地把控制理论和非线性动力学理论与嗅觉生理及脑电研究结合了起来,成为神经动力学这一领域的奠基者。他的工作使我们得以深入窥探动物和人的认知操作,而当把这些知识应用于计算机工程时,则使我们得以建立新型的、得到极大改善的机器智能的基础。2000 年他把自己已发表的最为重要的 14 篇代表作有机地组织成书,向读者介绍了以前没有认识到的有关脑功能介于宏观和微观之间的“介观”的概念;一步一步地介绍了认识和学习生物系统中的模式辨认所需要的概念和资料;描述了原始实验以及后续实验、有关的理论思考;解释了每组实验结果是如何导致下一阶段的探索的,并从理论的高度加以概括。当我们阅读该书时似乎在追随作者的思想发展,循迹他的学术生涯,不仅学到了具体的知识,更从中领悟到他的治学之道。

阅读本书不仅对于从事人工智能、认知科学、神经物理学、计算神经科学、模式分类,以及非线性控制理论的研究人员、应用人员和高年级学生是极为必要的,而且对于任何在神经生理学、神经病学、精神病学和心理学领域中活跃的人也都有教益。

2000 年 11 月当弗利曼教授访问中国时,我们得知他的这一新著刚刚出版,深感如能翻译出版,一定能对推动这一交叉领域在我国的发展大有裨益,就向他询问了翻译出版此书的可能性。弗利曼教授热情地支持了我们的这一设想,帮助我们和施普林格出版社取得联系,并以优惠的条件允许我们出版该书的中译本。为了更好地帮助中国读者理解他的思想,他又为我们约请了英国的曹天予博士为本书用中文撰写了引言,他自己也特别为本书撰写了中文版序。2001 年他再次来沪讲学时,又为在上海的译者解答了他们在翻译过程中所遇到的疑难问题。没有他的支持,本书的出版是不可能的,我们愿在此首先向弗利曼教授表示由衷的感谢。我们愿在此向浙江大学出版社表示衷心的感谢。我们也要感谢施普林格出版社对本书中文版出版的支持。

为了保证这一高水平的专著能以尽可能高的质量翻译出版,我们约请了国内在这个领域工作多年的一批同行共同译校此书。他们的分工是:中文版序(顾凡及译);前言(顾凡及译,汪云九校);第一章(沈公羽译,梁培基校);第二章(梁培基译,张立明校);第三章(黄秉宪译,梁培基校);第四章(黄秉宪译,梁培基校);第五章(沈公羽译,梁培基校);第六章(汪云

九译,顾凡及校);第七章(赵似兰译,齐翔林、田心校);第八章(梁培基译,王如彬,张立明校);第九章(顾凡及译,汪云九校);第十章(唐孝威译,汪云九校);第十一章(欧阳楷译,顾凡及校);第十二章(童勤业译,顾凡及校);第十三章(田心译,齐翔林、赵似兰校);第十四章(王如彬译,顾凡及校);结语(汪云九译,顾凡及校)。黄秉宪、沈公羽、欧阳楷审阅了部分译文。由于本书的高难度,许多章在译完之后由另1~2位译者作了校阅,以尽可能减少错误。最后由顾凡及、梁培基作了总校,其中梁培基负责1,2,3,4,5,7,8,13各章的总校,并由顾凡及对全部译文作了统稿,对绝大多数译名作了统一。但是也还有少数术语,可能有几种经常为人所用的译名在各章中不尽统一,如delay。但由于各个译名的意义十分明显,不致引起误解,就未一一加以统一。

虽然我们已经尽了我们最大的努力,囿于水平,另外再加上本书的高难度,不足之处以至错误在所难免,敬请读者批评指正。

顾凡及

2004年6月于复旦大学

中文版序

世事的起伏本来是波浪式的，
人们要是能趁着高潮一往直前，
一定可以功成名就；
要是不能把握时机，
就要终身蹭蹬，一事无成。

——威廉·莎士比亚：裘力斯·凯撒
第四幕第三场第 217 行^①

仅仅 4 个世纪之前，欧洲科学家的思想还束缚在古希腊留传下来的静态世界观之中。芝诺悖论(Zeno's paradox)考虑了运动问题。这一悖论说的是，箭首先得飞过一半路程，再飞过余下路程的一半，再飞过余下一半的一半的一半，如此无限重复，那么箭怎么还能射中目标呢？与此成对照的是，中国科学家形成了富有远见和影响深远的动态世界观。这种世界观是用和西方相同的有关物质的唯物论概念来表述的，这些概念是土、空气、水和火，再加上木，而不是欧洲的以太^②。和西方不同的是，中国科学家认为，存在能量流使世界生机勃勃，他们现在把这称之为“气”。

中国科学家对气的本质的认识，对他们建立关于周围世界和人是完整宇宙的不同方面的动态概念是至关重要的。他们认为人的身体和精气的状态是通过气和周围世界之间的相互作用来决定的。古埃及医生建立了一套唯物主义的医学体系，其基础是认为由四种元素的不同组合形成四种体液，但这是一种静态的体系。他们认为疾病是由体液之间的不平衡引起的，通过放血或泄泻的方式除去多余的部分就可以治病。由于当时在西方没有更好的医学体系，所以这个体系延续了 25 个世纪之久而一直没有什么变化，直到上个世纪才为基于当时新出现的化学和生物学科学的新体系所代替。与此不同，中医认为医生可以通过按压、针刺和火灸穴位来控制经络中的动态的气，并由此创立了实用的针灸体系。针灸作为医疗实践中一种至今仍富有成效的方法，仍然在不断发展之中。

公元 16 世纪末，就在莎士比亚通过布鲁特斯(Brutus)之口说出前面那些话的时候，中国陷入沉睡，而欧洲则开始觉醒。以伽利略、开普勒、牛顿和莱布尼兹为首的科学家们通过研究星星、太阳、月亮和海洋潮汐而深入到解决世界如何运动的基本问题。数学理论开始指导实验。微积分的发明解决了芝诺悖论，在微积分中，不断减小的距离区间是和不断减小的时间区间匹配

^① 译文引自朱生豪译《莎士比亚全集》第八卷第 284 页(人民文学出版社,1978 年)。

^② 译者注：以太是古代和中世纪西方哲学中认为除空气，水，火和土以外充满一切事物并构成天体的第五要素。中国古代哲学中的五个要素中除了木和以太不同之外，它不包括空气，而把金当作要素。

起来的,因而它们的比值趋近于某个实数——速度。这些由新的数学和物理学所掀起的潮流迅速扩布到科学的几乎所有领域,其中包括生物学和社会科学,并导致产生新的工业和军事装备。当时这一潮流使欧洲在全球占据主宰地位。

现在到了 21 世纪,那股地缘政治学潮流的高潮已经过去并且开始退潮。中国已经觉醒,中国科学家开始取得他们在国际合作的广阔舞台上应有的位置,而国际合作一直是全球科学界最引以为荣的传统。在所有的国家中,神经科学家在这个舞台上都占有突出的位置,这是因为,正如我们从神经科学的成就中所看到的那样,脑科学在以下诸方面都起着关键作用:搞清楚我们人类究竟是谁;如何得知我们关于脑和世界能知道些什么;这些知识如何对我们应用科学来影响、指导和控制世界事务(包括心理学、人类学、经济学以及医学一些领域中的研究)产生影响。

但是请稍安毋躁,还有别的一些潮流要讲,其中一个微观细胞神经生物学的领域,另一个是宏观脑成像的领域。在西方,从牛顿的“力”的概念演化而来的“能量”概念一直在这两个潮流中起着关键作用。在 19 世纪中叶之前,关于能量和动量守恒的热力学第一定律已经在物理学中稳固地建立了起来,并被推广到脑功能中去,认为沿着神经流动着“神经能”。这一观点可以和中国科学家关于流动着气的看法相比拟,只是完全采用了西方不变性的一套说法。这种不变性在当时几十年中构成了西方神经学、神经精神病学、精神分析的基础,但这种不变性很难捉摸,并最终被证明是不对的。这一失败毁坏了诸如精神分析和杰克逊神经学等思想学派的名声,这些学派的基础是神经能守恒。

与此成对照的是,细胞神经生物学发现了神经动作电位在神经元彼此通讯中所起的作用,由此而取得了成功。人们一开始以为这些所谓的“单元”是以能量波的形式沿着轴突以有限的速度传播,但是由于不满足守恒定律,上述概念就为动作电位是信息单元的思想所取代,也就是说,动作电位是二进制数字。这一推论并不正确,因为动作电位序列是某种通过脉冲频率调制进行能量传播的方式。虽然这种新的想法在脑科学中是不对的,却导致产生了神经网络和数字计算机。这些装置已经为信息时代的国际社会提供了技术基础,这说明一种理论要有成果并不一定非要正确不可。目前和细胞神经生物学同样的一股浪潮正在涌入分子神经生物学,分子神经生物学认为 DNA 分子是由四种核苷酸编码而成的一串信息单位。现在神经物理学家和神经遗传学家正致力于解释触发动作电位的量子机制,以及微观神经元通过释放量子份额的神经递质化合物影响网络中神经元之间通讯的方式。某些大胆科学家甚至提议把意识解释为脑中量子相干的突现性质。

与此同时,上一世纪中临床神经学家还在继续他们关于脑损伤病人的研究,这些病人由于一部分脑受到损害,或部分脑之间失去联络而在他们的行为中表现失常或有缺陷。临床神经学家在基础神经科学方面的同事用手术切除和化学阻断的方法在实验动物上再现了这些失常的行为模式。在过去 20 年中,物理学和计算机科学领域的科学家和工程师的工作大大推进了在这些方面所取得的成就,这些科学家和工程师引进了一些无创伤观察正常人以及病人脑解剖和脑功能的革命性技术。脑成像的这些新技术引发了新一波的热情和生产浪潮。特别有关系的是功能脑成像,其中包括功能磁共振成像(fMRI),正电子发射断层扫描(PET)和单光子发射计算机断层扫描(SPECT),用这些方法可以辨认出在进行某些有临床和科学价值的行为时脑血流增加的部位。能量又一次成为关键性的概念,因为神经活动不论是兴奋性的还是抑制性的,都要消耗代谢能量。为了维持对执行所观察到的行为所必需的多个脑区中的活动,必须输送带有氧和葡萄糖的额外的血流。

这两股研究浪潮都很汹涌,并有充分理由去期望还会继续涌现新的数据,因为科学家和临床专家都在热情地追求着新的研究手段。但是,现在这两个领域都已显示出在取得新进展方面有将要下降的迹象。潮流正在退落。最明显的情形正发生在他们取得成功的那些方面。新的数据有了爆炸性的增长,但是因为没有能用新的理论来对这些数据适当地加以整合、解释,新知识的增长赶不上数据的增长。

缺乏新理论的一个明显的原因是这两股浪潮之间缺少相互支持和有效的交流。将神经活动量和所调用的代谢能量以及局部血流控制联系起来的细胞机制是什么?这一点基本上还不知道而流于猜测。兴奋性神经元和抑制性神经元所需要的能量之间的差别现在还不能用脑成像显示出来。这两种神经元都需要能量,但有着完全相反的脑活动水平。快速的神经活动的时间尺度和缓慢的血流模式的时间尺度不匹配。

或许更成问题的是神经科学中的这两股潮流的认识论基础相距甚远:微观对宏观;神经元对脑叶或脑回中的一群组织;“单元”动作电位对局部斑块(或代谢要求的“热点”)。神经元的基本组成部分是膜和细胞器,它们在时间和空间尺度上与整个脑的叶、神经束和核团极不相同。这些尺度相互之间要差4个数量级:毫秒对几十秒,微米对厘米。实验方法也相差很大:微电极、组织染色以及神经化学实验对外科手术、脑成像和行为学测试。这两个领域的实验证据来自一些截然不同的关键实验:一个来自离体的组织片而另一个则来自以一定行为方式活动的动物和病人。如Thomas Kuhn(1962)在他有关科学革命的杰出著作中所定义的,这两股潮流在其各自的领域——细胞生物学和脑成像中确实差别很大,因而可以被当作是两个并存而互不影响的领域。这两股不同潮流中的神经科学家彼此还没有进行过有意义的交流,也还没有建立起理论来概括他们的大量数据。

本书为神经物理学家和神经工程师勾画出一门新科学——介观脑动力学——的要素,为促进在细胞生物学微观领域中工作的神经科学家和在脑成像宏观领域中工作的神经学家进行交流提供某种基础。本书的目的是构建一些条件,在这些条件下,一种新的研究浪潮有可能得以兴起,创造出一种能把从量子科学到神经精神病学的所有层次都统一起来的更强有力的脑科学。这一新领域尚处于婴儿期,因此也为立志于神经科学的年轻的中国科学家大展鸿图提供了机会。在这里他们有机会去作出新的发现,把他们新的,包括至今还不能预见的知识应用于治疗神经和精神失常等方面的疾病,并根据神经科学的知识构建新装置,这种装置能满足信息时代对真正的智能机器所提出的技术和工业要求。

在决定献身于任何一个新的科学领域之前,应该问一下自己:为什么现在只有较少的科学家在这一领域工作?如果这个领域这么有前景,为什么研究得那么少?这里有三条理由要加以考虑:对于介观脑动力学来说,第一条,也是比较明显的理由是,它所需要的技术来自范围极广的各种学科,其中包括动物学、解剖学、生理学、生物化学、药理学、神经学、神经外科、精神病学、实验心理学、认知科学、计算机科学、物理学、电子学、电气工程、数学,以及并非无关紧要的历史学和神经哲学。其中有些技术可能需要两三年的实习才能达到熟练,而所需技术之多更令人望而生畏。但是,这些困难是可以合作来加以解决的,并不要求研究者一身就是好几个领域的专家。

关于为什么脑研究工作者这么少的第二条,也是更有力的一条理由是,无论从智力上还是从财力上来说,已有建树的研究者在他们所受训练的学科上都已经作了大量的投资。无疑地,他们对此也有很强和很深的个人感情,这对要在任何一个科学领域中取得成功都是必要的,这些科学家满足于用他们熟悉的技术沿着早已看到成效的研究路线继续扩大战果。除非有明显

的和很大的好处,否则不会有勇气去改变领域。上述考虑使我们有理由认为,要想使介观脑动力学这一新领域快速发展成为一股新的浪潮,最有希望的途径是募集那些还没有坚定地执着于某种已有观点的科学家。还在成长阶段的年轻人还没有背上某个现成学科的大量知识的重荷,在这一点上他们比成熟的科学家可能更有优势。

第三条理由是介观神经动力学强烈地依赖于脑理论,许多实验神经科学家对脑理论不信任或抱有怀疑。在21世纪开始时的这种情形使人想起20世纪初的类似情形。那时有些理论物理学家(其中波尔茨曼是最值得怀念的一位(Cercignani 1998; Lindley 2001))试图根据决定某些事件是否出现的概率的统计规律来建立一种新的宇宙观。特别地,他们试图通过分子和原子的物理性质来解释热力学第二定律。在当今的知识背景下,统计力学这一领域几乎已被普遍接受,然而在那个时候以恩斯特·马赫为代表的最负盛名的物理学家却认为分子和原子概念是没有得到实验证实的猜测。1897年马赫在维也纳的一次有关热力学的学术会议上确实明确地说过下面的话:“我不相信有原子存在!”他同意逻辑实证主义的观点,认为科学只应该对可以用实验检验的关系感兴趣,例如像被称之为“万有气体定律”的压力-温度-容积-质量关系。

类似地,目前绝大多数的神经生物学家坚持神经元学说,这一学说把神经元当作为脑的最重要的建筑砖块。他们可以用高尔基染色法看到它,他们可以用微电极穿刺它,他们可以记录动作电位得到一个个清楚的脉冲——全或无。波理论家拿不出这样的实证主义实验品。拿得出的最好的范例是介观波包,它是动作电位的集体等价物,正如温度是水的(介观)性质而不是(微观的)有动能的水分子的性质。然而,波包并没有解剖上的边界,也没有容易看得见的特征,它们必须要用统计的方法来加以表述。这对绝大多数的实验科学家和临床医生来说是不能令人满意的。

1905年爱因斯坦发表了他有关布朗运动的分析,解决了波尔茨曼和马赫有关热力学和统计力学之间的争论,开辟了通向量子力学的道路。要想建立波包理论和介观神经动力学的主体也需要相应的说明。为了给出令人信服的范例,本书给出了有关度量和证实其存在和性质所必需的一些工具的例子。本书中文版特别希望能吸引整个新一代的神经科学家的注意和参与,他们正在登上世界舞台寻求有希望的新方向,他们的头脑中并不背负由于过去的巨大成功而带来的包袱。进行一项新的工作时,我的建议是,用你手头的工具去进行你自己的实验,作你自己的观察,而尤其重要的是建立你自己的理论。要做到这一点,对实验室设备的要求并不如对头脑的要求那么高。虽然要想改变价值观、态度和观点往往比更新实验室的仪器和计算机更为困难,但新的思想体系并不需要大量的国家资助,也不需要庞大的合作研究梯队,每个人都有这样的条件,每个人都可以对这股新浪潮作出贡献,并可以从自己对此所作的贡献中感受乐趣。让我们乘上这股洪流的浪头,并随之作一番智力的新历险吧!

沃尔特·J. 弗利曼

2001年6月21日

于加利福尼亚大学伯克利分校

参考文献

- Freeman WJ. Neurodynamics. An Exploration in Mesoscopic Brain Dynamics. London UK: Springer-Verlag, 2000
- Cercignani C. Ludwig Boltzmann: The Man Who Trusted Atoms. New York: Oxford University Press, 1998
- Kuhn T S. The Structure of Scientific Revolutions. Chicago IL: University of Chicago Press, 1962
- Lindley D. Boltzmann's Atom: The Great Debate That Launched a Revolution in Physics. New York: Free Press, 2001

引 言

(一)

Walter J. Freeman 教授的新著《神经动力学——对介观脑动力学的探索》(Neurodynamics: An Exploration in Mesoscopic Brain Dynamics)的中译本问世,对我国学术界来说,是一件值得庆幸的大事。Freeman 教授不仅是举世闻名的专攻嗅觉的实验神经生理学家,而且是视野宽广、思想深刻的神经科学理论家。他在神经科学的方法论基础、认识论含义及心灵哲学含义等方面的探讨上著作宏富,独树一帜,在世界范围内引起了广泛的重视,对神经科学的发展产生了并将继续产生深远的影响。

Freeman 教授认为,不同于其他自然科学,神经科学可以帮助我们认识人类自身、认识人类与环境的相互作用以及在这种相互作用中人类的认识(广义的智力)结构是如何发生发展起来的。这是一个宏伟的目标。为了实现这一目标,Freeman 教授作出了极大的努力,为神经科学奠定了一个扎实的方法论基础。这个基础有两块基石:其一是找准神经科学研究的切入点,其二是建立并发展一个有效的数学-动力学模型,以便从这个切入点突破,对各类脑神经过程获得系统的理解。

按照 Freeman 教授的看法,神经科学研究的适当切入点,既不在“微观”水平(分子、细胞或神经元)上的生理生化现象(这可以用理化手段来探索),也不在“宏观”水平(作为心理现象生理基础的脑神经过程)上的脑功能(这可以用磁共振成像技巧或脑功能摄像技巧来研究)。前者的研究虽然是基础性的研究,因而十分重要,但并不涉及神经活动的最本质的特征:意向性(intentionality)。后者的研究对象过于复杂,不能帮助我们理解心理功能的神经活动结构基础及其发生发展。因此,Freeman 教授认为,虽然近年来在这两个领域内的研究发展迅速,数据积累得很多很快,但这类数据的积累,并不能帮助我们发展出一个有解释力的系统的神经科学的理论体系,以帮助我们实现前面提到的人类达到自我认识的宏伟目标。

为了实现理论上的突破,Freeman 教授提出了一个天才的富有洞察力的见解。这就是我们必须把注意力放在介观(mesoscopic,在时空尺度上相差一万倍的“微观”与“宏观”之间)现象上,如处于局部和整体之间的知觉过程。从概念上来看,着眼于“介观”而不是“微观”现象,是与方法论上的反还原论立场联结在一起的。这里的要点在于如何理解介观神经活动的相对稳定的结构,或者说神经元活动的模式,从微观理化过程中突现(emergence)出来。

这里,Freeman 教授把模式的突现理解为一个自然的建构过程:它是“微观”神经元活动的理化过程的结果,但又并不预先存在于这类过程之前或之中。这样,一个进一步的方法论上的难题就被提出来了:有没有可能为模式的突现提供一个(反还原论的,建构论的)科学的说明?

早在 1975 年,Freeman 教授就开风气之先,提出用非线性的动力学系统理论来研究高级脑功能的神经动力学基础。这里,神经过程的非线性特征是由其研究对象的特殊性所决定的。这里指的是,神经事件与荷载这些事件的介质(media)或神经组织并不是互不相关的,而是存在着一种相互作用。当荷载神经事件的神经组织中的神经元间的联结密度(作为一种新的序参

数)超过一定的阈值时,介质的状态就会发生一种跃迁,类似物理学中的“相变”现象就会出现,其结果往往是介质的一种相对稳定的结构状态的突现,而这就导致知觉的产生。如果介质并不只是事件的消极的荷载体,它的状态会随着事件(神经元间的联结)的变化而变化,那末在介质与事件之间就可能存在着一种非线性的关联。

在过去 25 年间,Freeman 教授在这方面的独创性探索具有开拓性,并已逐渐发展成为一个极富生命力的研究纲领。这个研究纲领的基本点是用非线性随机混沌理论来处理介观脑神经动力学现象。随机混沌理论是一个极为有用的数学工具,可以用来研究物理学系统中的复杂性(complexity)现象,特别是研究宏大物理系统中复杂的定性结构如何作为其成分系统的集体行为(特别是其自组织行为)的结果而突现出来,能否把这个数学工具有效地应用于“介观”脑神经现象,是一个需要研究的重要问题。这里,Freeman 研究纲领的一个基本假设是:介观脑神经现象(各种模式的突现,包括知觉结构和各种更高级的亚稳定结构,如模块的突现)可以看作是一种生物复杂性(biocomplexity)现象,并用处理物理复杂性现象的方法来处理,把它们看作是神经元集体行为(自组织行为)的产物。神经元活动自组织行为的结果是整体性的(holistic)、非定域性的(non-local)网络结构的突现。这些结构,按照 Freeman 教授的看法,恰恰是生物学适应行为(组织主体的活动和组织环境)或广义的生物学智力的神经结构基础。

这是一个大胆的假设,一个极具挑战性的研究纲领。如果得到证实,将对神经科学理论的建设,并对心灵哲学和认识论中一系列核心问题的重新认识,产生巨大而深远的影响,因而在国际学术界引起了广泛的重视和讨论。

(二)

在西方思想史中,心身问题二元论的出现是与现代科学的兴起及其一定的发展阶段分不开的。随着 16~17 世纪科学革命的兴起和培根实验哲学思想的普及,西方思想家普遍认为物理现象可以通过经验科学方法(观察、实验、归纳、推理等等)来把握,但心理现象却不能,只能借助于传统的内省方法。对经验科学把握物理现象能力的深刻信念与确认其对心理现象无能为力观点的奇特结合,是心身问题二元论的最深刻的根源。这意味着,在经验科学不能对心理现象作出适当的唯物主义的解释的情况下,二元论的根子是挖不掉的。当代颇有影响的科学哲学家如卡尔·波普(Karl Popper)和希拉里·普特南(Hilary Putnam)之所以坚持二元论立场,其原因正在于此。

Freeman 研究纲领在哲学上的重要性在于,突现的模式可以被看作是意向性(intentionality,作为心理现象的最原始形式)从物理世界(神经元间的理化过程)中突现出来的本体论基础。更具体地说,一般认为意向性有三大特征:①能动性(active)与建构性(constructive);②作为一种开放的面向未来的潜在可能性(potential);③预设意义和其他意向性主体的存在,因而具有社会的和语义学的特征。Freeman 教授认为,这些特征是通过一种特殊的神经活动,即具有统一性(unity)、整体性(wholeness)和(通过外探以求内摄的)意向性的活动而实现的。

Freeman 模型的基点是机体与环境的动力学关系,因此其考察的出发点是机体在环境中的实践活动。首先,新陈代谢的必要性要求机体在环境中找到养分,因此机体的基本行为是面向环境的运动。这种运动的时空定向由一种脑神经活动的内在结构来调节,而这种结构的实现正是通过神经元活动的自组织行为,特别是模式的实现而实现的。这里,神经元对介观的秩序

和结构形成作出了贡献,而又被这种秩序、结构所控制。各种亚稳定的神经元集合通过轴突(axons)丛(bundles and tracks)而在脑部各区间互相作用,因而各种模式间会形成一种在整个脑部(通过各模式间协调而达成)一致、但又不断变迁的宏观结构。

这种叠床架屋式结构的最重要特色可由“预先传入”(pre-efference)来表征。根据他在嗅觉研究中的实验发现,Freeman 教授告诉我们,形成模式的神经元集合的发放总是同时既传向运动系统(motor system)以导致探索动作,又传向所有感知皮层,以便使它们对意向性活动的结果,特别是对特定的有所期待的刺激类型有所准备。这样,神经元活动模式在脑中的突现就表现为一种意向性的知觉。虽然这种意向性的知觉仍然又被看作是由上述神经元活动模式的发放的双重传递所引起的,或看作是这种双重传递的另一种表达,但在这种情况下“意向性现象”的出现本身,确实为我们提供了一种机制,通过这种机制,心理性的意向性从物理性的因果(理化)过程中突现了出来,并且具有一般同等过程所没有的特色。

Freeman 模型的建构性是从他的基本发现中派生出来的:引起感受器向大脑皮层传递神经冲动的刺激,会引起神经元集合的状态跃迁。在这一阶段,神经过程可以理解为对外界刺激的一种表象(反映)。但是,这种表象或反映特征在中枢很快就消失了,而被代之以一种在种种约束下经由非线性动力学过程而产生的皮层活动的新模式。后者与前一阶段不同的最重要特征是其与刺激之间没有一一对应关系。(有些学者认为这是嗅觉过程的特征。在视觉过程中这种一一对应关系要强烈得多。)所以,我们对外部世界的知识只是在我们脑中制造出来的东西,神经过程的这一特点,正是主观性或认识论中唯我论的神经生理基础。

在知觉阶段,这种主观建构是不可避免的,并具有重要的生物学意义。环境中的信息太丰富复杂了,其中只有极小一部分可以作为机体行为的基础,而这一部分随机体而异,因此信息必须被在过去经验(种族史与个体发展史)基础上建立起来的特有的期望与注意力所选择,而这种选择恰恰是由神经毡的突触结构所决定的。Freeman 的结论是,机体从模式中作出的反应并不是刺激的表象(或反映),而是刺激首先被同化到过去经验结晶于其中的模式后的结果。更具体地说,决定皮层输出的宏观模式只有小部分与外界刺激(通过微观输入)有关,而大部分却是由过去经验所决定的预先存在的突触网络和神经元集合在当前的(由各种神经激素和调制因素决定的)可激发性所决定的。因此,即使是恒常的刺激反应关系,也得由脑活动的不自洽模式所中介。这里的不自洽性来源于由意向性的统一性所规定的变化着的相互关系(perspective)和背景(context)。换句话说,各种知觉都被过去经验所影响。这种反应对行为史和当前脑状态的背景依赖性表明,皮层输出实际上规定了刺激的意义与价值。因此知觉构成性论点的哲学含义在于:与神经活动的宏观模式有关的并不是刺激本身,而是刺激对机体的意义。也就是说,神经活动的本质是意义而不是信息。而这正是意向性结构统一性的根源。

Freeman 模型中意向性结构的一大特色是,感知方面的每一新的状态的跃迁,都会导致一种局部模式的建构;这一建构既有赖于现存的整体性的意向性结构,又对后者作出修正。

按照意向性结构的这一动力学建构理论,每一意向结构性必然是唯我论的。那末,是什么机制使得分享私人经验、交流、互相理解与合作成为可能的呢?根据 Freeman 的答案,首先是一些特有的生物学性质。比如说,意向性结构可以通过(经由进化过程而形成的、支持人类繁衍的)一些化学机制而得到调整,以致感觉皮层可以倾向于与(像气味这一类)繁殖信号联结在一起的吸引子(混沌理论中的术语)。这一类机制也可用于操纵异性行为以建立交流渠道,克服唯我倾向并形成配偶。其次是达尔文、乔姆斯基等人提出的“人同此心、心同此理”一类的所谓全人类共有的行为语言结构特征。因此,唯我论的神经活动起点并不一定与意向性过程的内容与

意义的社会性相背悖。

概括地说,Freeman 模型试图表明,第一,神经元活动的非线性动力学过程可以导致一些整体性模式的突现以及这些模式在机体-环境作用过程中(由过去经验结晶于其中的一些吸引子引导的)变迁。第二,整个意向性过程的突现是通过模式的形成与转变作为其本体论基础而实现的。从科学哲学的角度来看,Freeman 模型,如果得到证实的话,将表明心理性的意向性结构和过程是经验科学可以处理、可以验证的。这样,心身问题二元论的基础就被彻底摧毁了。

(三)

从认识论的角度看,Freeman 的既反对先验论的唯理论又反对经验论的反映论的结构建构论,显然对皮亚杰(Jean Piaget)的发生认识论提供了强有力的神经科学方面的支持。皮亚杰的发生认识论强调活动的重要性,认为主体与客体都是从机体的活动中分化出来的,主体仅当机体能对自身活动作自我调节时才真正形成;而客体是由知觉对象对活动的意义(顺应或违抗主体活动)所建构出来的。这里,调节与建构必须从其机体起源来说明,而机体起源本质上或最终说来是一个神经活动起源的问题。Freeman 的介观脑动力学所提供的,恰恰是皮亚杰所需要但却没有提供的有关调节与建构的这种神经起源方面的说明。

皮亚杰极端重视认识的能动性与建构性,强调主体认识结构在活动的调节与客体的建构、在认识与认识能力的发生发展中的决定性作用。他认为,这种结构是机体先前活动经验的结晶,是生物智力的本质,是主体主观能动反应能力的具体体现。与 Freeman 一样,皮亚杰认为,外界刺激必须首先被同化到这种结构中才有意义与价值,才能构成反应的基础。这种认识结构有一个由弱到强的阶梯:每一个低级的较弱的结构都被整合到一个高一级的较强的结构并接受其调节;而每一层结构都成为对外界一定认识的主观中介,同时接受高一级结构的引导,成为一个统一的主观主体的一部分。显然,Freeman 模型正是这一反还原论的建构论在神经科学中的实体表现,同时又为之提供了神经科学方面的支持。

(四)

我在前面提到,Freeman 的研究纲领极富生命力又极具挑战性。它的生命力的源泉不仅在于它调动了数学、物理学、心理学等自然科学中一系列前沿的强有力的概念工具来研究复杂微妙的神经现象,而且更重要的是在于它在认识论与方法论上的敏感性与洞察力。跨学科地综合性地运用数学等自然科学前沿中的复杂而强有力的概念来处理一大堆杂乱无章的神经现象数据,本身已是相当困难的任务,但相对于认识论方法论上的洞察力而言,还是比较容易学习、领会、掌握的。由于种种历史原因,我国学者在指导认识论方法论方面的起点比在数学等自然科学研究的科学方面的起点要低得多,虽然对于大多数国外的自然科学家来说,情况也并没有好得太多。这些困难,使得这一极富生命力的研究纲领,对于很多研究者来说,又成为一个极其重大的挑战。只有当神经科学家与数学家、物理学家、心理学家及科学哲学家进行深入而广泛的讨论与合作,才能富有成效地应付这一挑战。

Freeman 教授深刻地认识到这一跨学科合作的必要性。除了与各国数学家、物理学家合作之外,他也多次提议与作为一个科学哲学家的我长期合作。由于种种原因,这种合作直到最近才起步。现在,他的新著的中译本问世,必将吸引更多的我国学者参与这一极具挑战性,并有广

阔前景的智力合作,并能帮助我国学者不仅了解在神经科学研究中所使用的从各种数学等自然科学中移植过来的各种概念工具,而且了解到我们很不熟悉的各种认识论方法论上的立场和观点及其在科学研究中所起的积极的有时是决定性的倡导作用。

波士顿大学科学哲学
与科学史研究中心

曹天予

2001年10月31日

目 录

前言	1
----------	---

第一部分 神经相互作用和传输的动力学

1 从诱发脑电位和脑电到一群状态变量的空间投射	19
2 用于测量脉冲响应的线性输入和线性基函数的线性模型	35
3 复平面上对超越线性算子的拉普拉斯变换的有理逼近	46
4 对具有多个反馈回路和单边或双边饱和的分段线性化模型的根轨迹分析	62
5 通过手术和麻醉断开反馈回路;通过加噪声闭合反馈回路	86
6 神经群体中的三自由度:唤醒,学习和双稳	96
7 基于线性整合,可修饰突触和非线性触发区的模型响应的模拟计算	112
8 对导出和调节负反馈回路内稳态给定点的稳定性分析	120

第二部分 内容是意义而不是信息

9 以多道记录揭示皮层“代码”:介观载波幅度调制(AM)的空间模式	147
10 通过在已知 EEG 幅值的条件下计算脉冲概率得出非对称 S 形函数,揭示微观层次 和介观层次之间的关系	168
11 用 64 维空间中的欧氏距离及行为相关物来优化用于 γ 调幅模式分类滤波器	184
12 应用介观混沌神经动力学对 γ 波形,AM 模式和 $1/f^\alpha$ 谱进行仿真	204
13 对新皮层 EEG 优化时间片段和自适应滤波器参数评估的调谐曲线	222
14 数字仿真中随机微分方程和随机数发生器的最小化数值不稳定	252

结语:进一步发展介观脑动力学中的一些问题	265
----------------------------	-----

参考文献	270
------------	-----

前 言

在非线性脑动力学中引入介观模型的必要性

脑系统是在许多组织层次上运作的,每个层次都有它自己的时间尺度和空间尺度。动力学对变化建模,可以应用到各种层次,从原子到分子,从大分子细胞器到由细胞器组成的神经元都可应用。神经元又形成各种群体,这些群体形成脑的子集群,如此往上一直到形成有意识的脑,然后有目的地与物质环境、人际环境以及政治-社会环境相互作用。每个层次对低于它的层次来说都是宏观的,而对高于它的层次来说则都是微观的。鉴于不同层次的时空尺度相差很大,它们之间的因果关系比起同一层次内部的因果关系来说要远远模糊不清得多,当不同层次相隔较远时情形更是如此,思索和描述不同层次之间的相互关系就成了科学家所面临的最困难的任务之一。神经元和脑之间的关系就是这样的一种关系,要解决这种困难,最佳途径就是去思索、去找出介于这二者之间的层次,并对此建模,物理学家把这种层次称为介观层次(Ingber 1992; Namba *et al.* 1992; Imry 1997)。本书的任务就是介绍脑动力学介观研究的结果、模型和实验技术。

目前认识到的脑的主要层次是神经元及其网络层次。由于在上一世纪中脑研究进展神速,我们已经清楚地认识到神经元及其局部网络的结构和功能特性及其种种复杂性(Koch and Laurent 1999)。人们已经探索出用各种巧妙的数学工具去建立单个神经元的动力学模型(Johnston and Wu 1995)、轴突动力学模型(Hodgkin 1964)和树突模型(Rall 1995),以及各种各样的神经网络模型(Traub and Miles 1991; Churchland and Sejnowski 1992),其中包括神经元数目从2个到超过10000个(Bower and Beeman 1995)的具有前馈和反馈拓扑结构的网络。对这些功能的生物化学机制也有了很清楚的认识,识别出了许许多多神经递质分子和神经调质分子,释放它们以及与之结合而起作用的膜细胞器,制造、降解和吸收它们的酶系统,通过神经调质的作用使神经元的功能和结构发生长期变化的种种途径,以及供给它们能量的氧化代谢作用。鉴于神经元是用显微镜和微电极来进行研究的,出于我的目的,我称此为微观层次。

就宏观层次而言,目前在用正电子发射断层扫描(PET)、单光子发射计算机断层扫描(SPECT)和功能磁共振(fMRI)等非侵入性脑功能成像技术观察与各种目的行为有关的代谢和血流空间模式(这些不如神经元活动来得直接)方面有了进步(Pfurtscheller and Lopes da Silva 1988; Hayman 1992; Roland 1993),这使得我们在检测清醒志愿者脑中与各种认知状态以及与任务有关的显示出高代谢水平的区域方面取得了巨大的进展。这样得到的定位远优于颅相学。但这些方法并不能使我们对引起这些代谢需求和相关行为的神经动力学机制有所了解。应用脑的电场和磁场的时空分布的脑成像——脑电图(EEG)和脑磁图(MEG)——提供