

关于意识的量子计算模型及其互补性问题

周昌乐

1 引言

20世纪90年代以来,国际学术界开始把意识问题作为自然科学多学科研究的重要领域之一,并日益受到自然科学家的重视。其中对意识进行人工建立模型加以研究是十分重要的一个方面。因为,通过某种模型对意识进行描述,我们可以从某个侧面更加深入地给出意识的某种定量或定性分析,为我们揭开意识之谜提供有力的科学手段。鉴于目前量子计算理论和技术日趋成熟,并已有不少理论量子图灵机模型和实际解决问题的量子算法。目前有关意识模型方面研究的一种途径是采用量子物理学方法来进行。因此,从量子模型角度,来描述神经动力学方程所刻画意识过程,是非常值得关注的事情。于是在这种背景下,我们通过比较意识与量子行为的对应性,比如在非定域性、自明性、不确定性、互补迭加性、逻辑纠缠性等特性方面,给出了一种意识的量子计算模型就能够很好反映意识的一些(当然不是全部)性质。本文通俗介绍这样的一种意识量子计算模型,并对这种模型的意识时空编码互补性原理作分析。

2 意识活动的量子特性

我们知道,一个系统要具备意识能力就要求具有精确的复杂系统结构,包括自组织和自适应能力、高度与环境直接相互作用的能力、把握控制系统结构相位变换参数关键值的高度复杂性、良性分别以及具有层间强耦合与层内匀称结构的大规模多层组织、具有可构造的同构状态和高级吸引子完形,即自涌结构的特定响应环境刺激的形式。

大量理论与实验表明,意识与量子

系统有密切关联。这里量子假设能够关联到意识过程的主要理由有以下四个:

(1) 量子系统是所有物理过程、生物过程和生理过程的微观基础,所有经典世界源自整个量子背景。

(2) 量子系统超越了粒子与波或相互作用与物质的分别。量子系统,特别是亚量子系统本质上是整体的。他们不可能被令人满意地解析为相互作用的基本元素,而且是以不可分割的并行分布式处理综合起作用的。非局域性和远距离相关性是量子特性。因此,量子整体就是同意识相关的最好候选者。

(3) 具有严格神经元和突触的神经网络,尽管有着十分细致的虚拟处理(常常理解不够),但却似乎过于数学化,过于离散及过于确定而难以描述意识和定性的感知经验。

(4) 超验的心灵学(例如心灵感应)现象认为意识不必局限于大脑之中,而是具有像量子一样的非局域性质。

一般“自我意识”或“纯”意识特别是超验(神秘的)意识是无意向性的(unintentional),即根本没有意识的对象,只是意识本身。其可能与量子场相对应,或更好的与“整体亚量子海”相对应。另一方面,关于意识对象意识(意向性意识)不能仅仅与一个特定的量子信息相对应。如果一个特定的心理表象在意识控制下处理,这个特定的表示,对应了一个神经激活图式,就可以被耦合或关联到一个特定的量子本征态,并由波函数坍缩来解释。

量子波函数坍缩是一种变迁,指量子波函数从众多量子本征态线性组合的描述态向一个本征纯态的变迁,简单的说众多量子图式的迭加波变换成单一的

量子图式。波函数坍缩意味着一种从亚意识记忆到显式记忆的意识表象的选择性投射。有两种可能的记忆和回忆的理论,上面提到的量子理论,或经典(神经)理论,记忆可能是突触连接系统的一种并行分布图式,但也可能是更精细的结构,比如由Everett提出的多世界解释量子理论的并行世界及玻姆的隐次序等。

如果把宏观上的认知对象看作是在量子信息状态的吸引子的自涌现,那么虽然由薛定谔方程决定的量子机制不能展示吸引子,但他们可以在波函数坍缩情况中形成吸引子。在那种情况下,因为经典宏观系统(测量仪器或环境或我们的感官)与量子系统的相互作用,波函数坍缩到一个特定的量子本征态(一个量子图式)作为一个吸引子而出现,所以这里也有量子虚拟结构且他们不可能被仅仅还原为一个量子本征态。因为他们仅作为与经典系统相互作用的结果出现。这样量子虚拟结构被重构为量子测量的结果,其中“测量仪器”可以直接是我们的感官并与神经系统联结,或者是一台由神经系统观察的机器——间接方法。不论是哪种情况,波函数坍缩作为一个与经典系统特定相互作用的结果而出现。

所以我们强调,虚拟结构不能被还原到一个神经或量子媒介的对应状态,尽管他们与其密切相关。虚拟状态总是非局域性的或并行分布的。他们不能被测量,或许仅能被间接测量,——在他们对应的神经或量子集群的状态上。为了建模和分析起见,我们必须区分神经的、量子的和虚拟的层次以及环境的影响。在一个有机组织的合成中,当然他

们涉及一个统一的过程，包括环境。那个统一过程就称为（意向性）意识。

3 意识过程的量子机制描述

我们的假设是：意向性意识（我们对意识某对象的意识）涌现于神经集群动力学系统，并由环境激发。神经生物系统具有这样对外部和内部环境刺激的一种特定自指影响的能力完全是进化的结果。另一方面，在心灵中具有神秘和静虑经验，我们可以认为这些特定的信息处理和更深的过程背景是无意向性（前）意识，是各种物质过程的基础。

实际上，与神经网络类似，我们同样可以有对应的量子意识神经活动的信息处理集群动力机制描述。也就是说，我们能够找到许多连接神经网络与量子理论之间的数学类比。由于我们的神经网络模拟完成的很好，我们能够在量子水平找到类似有效的认知信息处理能力。具体的对应性主要体现在以下这样一些方面：

首先，神经元状态向量可以用量子波函数描述。在神经网络理论中神经网络系统的状态是由一个向量描述的，正好反映的是神经元系统的随时间变化的活动性分布。特定的神经元图式代表一定的信息。在量子理论中量子系统的状态则可以用随时间变化的波函数描述。这样一来，神经元状态是神经元图式的一种迭加就可以变为是量子本征波函数的一种迭加了，并且迭加的量子本征波函数通常具有正交性和正则性的。在本征态的线性组合中，每一种本征态有一个对应的系数，描述在系统的实际状态中一种特定意义表达的可能性程度。

其次，神经元信号的时空整合可以用薛定谔方程的 Feynman 形式来描述。在非相对论量子力学中，描述这样动态方程可以用 Feynman 形式的薛定谔方程给出从初始态到终极态的并行分布变换。系统通过展示其构成量子点之间众多内部相互作用来变换自身。而动态方程的关联函数（作为参与不同图式中神经突触的两个神经元之间的关联描述）就由 Green 函数给出，来作为单个“量子图式”的自关联之和描述。关联函数

的动态调整（学习）则用密度矩阵替代。其中根据联结学习普遍适用的 Hebb 规则，同样可以推出有关的量子信息处理方法，即分别是量子概率密度矩阵或量子统计学。

还有，神经系统从潜意识到意识转变对应到“波函数坍塌”。当然同神经图式解构一样，这个过程完全是系统环境影响的结果，环境选择那些最类似于（或关联于）环境状态的量子图式。即波函数坍塌是从隐序到显序转变的结果。隐序代表众多可能状态或过程的组合。其可以类比到一组所谓的“并行世界”或由 Everett 提出的一般波函数并行亚支。另一方面，显序代表着当下物理实际的一个状态或过程，其源自于隐序的坍塌。

最后，在量子力学中海森堡测不准原理现在就相当于在神经元系统中的图式与在相互作用或连接于系统中的图式之间缺乏同时确定能力。这也是意识的一个重要性质，我们一次只能意识一个事物。

当然，用量子理论来描述意识活动还有许多神经网络难以具备的性质。其中一个基本的差别是量子方程中包括虚数单位。由于量子系统不具有良定义的基本粒子及其相互作用，因此量子系统更加精细和灵活。量子系统是由耦合复数（实加虚）描述的，而通常神经网络仅仅用实数描述的（目前为止）。

另外，在量子力学中，波函数不同部分的相位差可以具有一种跨越尺度的作用。他们概率分布的时间演化，包括不同固定本征波函数贡献的干涉。也就是说量子模型具有神经全息性质，我们可以具有相关神经小波的干涉图式。这种量子全息性质可以使相位关系对应到突触的强度。这样一来，改变本征波函数之间的相位关系可以实现神经网络中的学习过程，并将新的图式关联增加到突触关联矩阵之中。同时，这种全息小波所具有的相位耦合或频率耦合（相关行为）可以用于振荡神经活动的描述，而传统的神经网络理论没有将振荡活动与神经元结合，尽管在大脑中观察到了这一现象。

当然，量子全息性质蕴涵着更多事情，比如其提供了引入小波复共轭形式的机会。这样，在量子世界中我们拥有许多可能网络、过程和“时间箭头”的迭加。但只有一个网络、过程和“时间箭头”可显式地在测量过程中实现。

此外，在连续的量子模型中，我们能够谈论具有不同朝向耦自旋（或磁极）或者谈论具有不同活动率的神经元。我们必须知道自旋本身是十分不同于神经元的，特别是生物神经元。但是，如果我们忽略他们的内部结构，并关系到信息处理的集群动力学等级层次，即在大脑中自旋系统与神经网络存在于不同的尺度，并因而形成一种类分形的多层次结构。很明显，具有这种描述能力是非常重要的。

总之，用量子机制来描述意识活动具有更大的优越性，如果在此基础上能够结合神经网络模型的方法，那么就可能得到更为理想的效果。实际上，一个复杂系统的每一个集群状态可以形成特定的完形结构，其不可能简单地归结为系统构成要素。这时就需要解决这样一个广泛的问题，就是一种特定同构（即分形）多层次相关性的构成问题。

4 意识过程的量子计算

有了意识过程的量子机制描述，现在的问题是要利用量子计算方法来给出这样一种意识过程的量子计算模型。我们知道借助于量子编码理论，我们可以给出神经系统状态相应的量子编码描述。从而，进一步利用量子机制，以复杂性对付复杂性的方法，就可以通过量子计算理论和技术在一定范围和程度上来实现意识过程的计算描述。

首先对于具体由 n 个神经元组成的神经网络集群系统（比如某个足够复杂的神经回路）并给定了神经回路的连接矩阵，如果各神经元所处位置给定，那么容易给出各神经元随时间变化的激活情况的描述。而 n 个神经元构成了有 n 个自由度的神经网络状态空间，其随时间变化的系统激活状态（表象）可用 Hilbert 空间积来给出整体的量子编码。

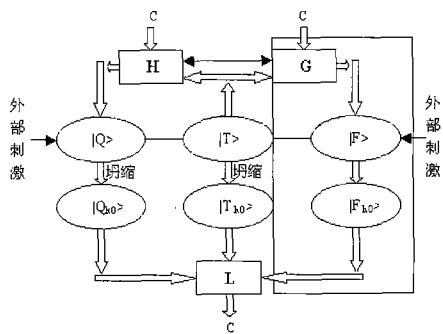
不失一般性，我们用 $|1\rangle$ （表示自

旋向上)和 $|0\rangle$ (表示自旋向下)分别表示神经元激活情况中的激活和抑制,这样系统的状态就可以用二进制量子位来编码。于是利用给定的神经回路的连接矩阵,根据 Beniff 的量子图灵机理论,就可以给出计算神经系统全时程迭加态的量子图灵机。并依据神经回路的连接矩阵来构造一个量子图灵机单步算子H并假设其为清晰路径生成的,这样的H正是实现了神经系统活动计算的全部迭加。

同理,对于系统随时间变化的激活频谱(ρ 表象)也可给出相应的量子编码描述,并通过傅立叶变换,相应地给出量子图灵机单步算子G(也是清晰路径生成的),其计算的是神经系统某时刻的激活频谱。

在上述H和G算子的基础上,我们就可以给出一种意识过程的量子计算模型,如图A所示,图中虚线部分表示虚拟隐式机制。模型的主要部分分别说明如下。

首先,H和G即为上述的两个量子计算单步算子,具有互补性关联关系(互补性关联图中用 \longleftrightarrow 表示)。 $|T\rangle$ 为时间量子寄存器,可把所有时刻的迭加态置于该量子寄存器中(单位取为微妙级)。 $|Q\rangle$ 为神经系统状态量子寄存器,存放经H算子对每个时刻作用结果态的全部迭加。而 $|F\rangle$ 则为神经系统频谱量子寄存器,存放经G算子对每个时刻作用结果态的全部迭加。这三个量子寄存器同处一个量子系统中,因此相互之间具有量子纠缠性关联关系(纠缠性关联图中用 --- 表示)。



图A 一种意识过程的量子计算模型

当外部刺激作用于系统时(感知和

认知活动,相当于在给定的经典环境中的测量),系统状态 $|Q\rangle$ 坍缩为某个本征态,对应的激活图式代表着某种意义内容(即意识对象)。此时,由于纠缠性关联, $|T\rangle$ 和 $|F\rangle$ 也分别相应坍缩为对应的本征态,代表着意识活动的时间结构信息。

模型中,L代表系统的学习适应调节算子(泛函算子,或称元算子),具体的量子计算算法可以根据密度矩阵的调节规律来构造,结果则是对H和G算子进行修正。并在一次坍缩后重新启动系统,开始新一轮的感知和认知活动。

在这样的模型中,意识过程主要体现在隐式的时间结构信息编码的获取上,系统则在意识状态下启动L算子的作用。模型的主要特点是利用了量子机制的迭加性和纠缠性,这是经典计算所无法完成的。而由于量子系统的坍缩与神经网络系统的解构相对应,因此模型所描述的意识活动也是有理想的直观意义的。

5 意识时空编码的互补性分析

毫无疑问,我们上述给出的意识模型是建立在量子机制之上的,因此其行为要受到量子物理规律的支配,当然其中最重要的就是H和G算子之间具有量子互补性关系。由于H和G算子作用对象分别是神经系统的 r 表象和 p 表象,因此涉及到意识活动,其反映的便是意识过程中时间和空间信息编码和测量之间的互补性,即意识与意识对象之间的互补性。

根据量子理论,当两个物理量算子相互不对易时,那么对他们物理量测量的精度就有海森堡测不准原理的约束。很明显,由于 r 表象和 p 表象之间本身是相互不对易的,因此H和G算子之间也满足这里的海森堡测不准关系,具有量子互补性。

事实上,现有的神经科学研究早已揭示过这种量子互补性的神经活动现象,对应到我们量子计算模型中,体现H和G算子互补性主要表现在其量子单步算子的清晰路径生成性之上。

必须注意,在构造H或G算子时,为了量子计算成为可能,我们要求这些

算子是清晰路径生成的。所谓清晰路径生成的算子,其要求算子所对应的连接矩阵满足充分连接条件,即矩阵中每行每列至多只能有一个零元素。现在由于互补性限制,两算子不可能同时是清晰路径生成的。如果H为清晰路径生成的,那么就不可能同时也找到清晰路径生成的G量子计算算子;反之亦然,如果G为清晰路径生成的,那么就不可能同时找到清晰路径生成的H量子计算算子。当然也可能两个都不是清晰路径生成的。

由于H和G算子分别对应于空间和时间结构信息编码的计算,因此他们之间的这种互补性实际上指出的是这两种信息计算的测不准关系。也就是说,对于意识和意识对象,我们不可能同时精确的把握。这也是我们每个人都有的经验,您越是过度地注意某种体验,对这种体验的感觉就越模糊。也正因为这样,整个神经活动才会有无意识和有意识之别,以及存在一个意识程度的刻画问题等等。

与其他已有的意识模型相比较,我们给出模型的最大特点就是真正刻画了意识活动的互补性时空信息编码。例如,Taylor的三阶段模型和Aleksander的三种神经元模型,实际上只是一种元感知模型,不是通过后阶段来对前阶段的感知进行“标记”,就是通过某类特定的神经元来对感知类神经进行“标记”。因此从根本上讲都没有能够刻画意识活动的量子互补性质。

总之,我们认为,意识活动是显式心智活动过程中的一种伴随性现象,一方面对意识对象的感知或认知等是通过神经元集群激活图式的空间编码得到体现;另一方面,对意识对象的意识本身(这里主要指意向性意识),则通过与空间编码互补性的时间编码来体现。只有这样才能说明丰富的意识活动现象和规律,如无意识的心智活动、意识活动的时间性、同步振荡与意识的关系、注意的串行性以及意识本身的不可意识性等等。■

(国家自然科学基金项目资助(批准号:60275023))

多学科的 认知科学研究

人类进入21世纪,有两大秘密将要被揭开,一是生命的奥秘,二是心智的奥秘。美国为此正在实施“人类基因组计划”,并积极建议实行“人类认知组计划”。在这种前提下,破解人类心智的奥秘也越来越成为人们探求的目标。从而,认知科学(Cognitive Science)的研究也就越来越引起人们的重视。

新世纪开始,美国国家科学基金会(NSF)和美国商务部(DOC)共同资助了一个雄心勃勃的计划“聚合四大技术,提高人类性能”(Convergent Technology for Improving Human Performance),将纳米技术、生物技术、信息技术和认知科学看作21世纪四大前沿技术,并将认知科学视为最优先发展领域,主张这四大技术融合发展,并描绘了这样的科学前景:“聚合技术以认知科学为先导。因为一旦我们能够在如何(how)、为何(why)、何处(where)、何时(when)这四个层次上理解思维,我们就可以用纳米科技来制造它,用生物技术和生物医学来实现它,最后用信息技术来操纵和控制它,使它工作。”可见认知科学研究在其科学发展战略中占有重要地位。

当前国际公认的认知科学的核心包括心理学、神经科学、计算机科学、语言学、人类学、哲学6个相关学科。这些相关学科互相交叉,又产生出众多的分支学科,如控制论、神经语言学、神经心理学、认知过程仿真、计算语言学、心理语言学、心理哲学、语言哲学、人类语言学、认知人类学、脑进化等等。

为促进我国认知科学的发展,亟需促进多学科的认知科学研究。国内一批与认知科学相关学科有关的专家学者正在积极发起召开若干次高层的国内和国际的认知科学会议。这些会议以多学科的认知科学为特征,积极探索认知科学的规律,寻找符合我国认知科学研究现状和发展趋势的新的生长点。这个倡议得到国内认知科学领域的多位知名专家学者的积极响应。

当前的认知科学研究,既要反映国际主流的认知科学研究成果,又要反映我国认知科学最具特色的若干领域。最近即将召开的一次国内认知科学会议以“经验在认知中的作用”为主题,因为这是当前认知科学研究的主要倾向。本次会议的中心议题设计为4个板块:1)脑、计算机与认知;2)心理、行为与认知;3)语言、逻辑与认知;4)文化、艺术与认知。这些研究领域,涵盖了认知科学的若干最活跃的领域,突出了认知的经验基础与多学科特征。

本刊约请会议综述报告和四个主题的发言人,从多学科角度撰写了有关认知科学的一组文章,予以发表。

本选题策划人:清华大学 李学勤 蔡曙山
本刊编辑部 王继红



李学勤 教授、博士生导师。先后任中国科学院历史研究所副所长、所长,现任清华大学思想文化研究所、国际汉学研究所所长,“夏商周断代工程”专家组组长、首席科学院,中国先秦史学会理事长等。曾获“有突出贡献的中青年专家”称号、“九五国家重点科技攻关计划突出贡献者”,“全国杰出专业技术人才”称号。1997年当选为国际欧亚科学院院士。



蔡曙山 教授、博士生导师。清华大学文科建设处处长、清华大学哲学系教授,清华大学科学技术与社会研究中心研究员,博士生导师。兼任中山大学逻辑与认知研究所学术委员会副主任,中山大学、中国人民大学、苏州大学、西南师范大学兼职教授,中共深圳市委党校客座教授。研究方向逻辑学、科学技术哲学。主要学术著作有:《言语行为和语用逻辑》,在国内外核心期刊发表学术论文60余篇。



周昌乐 毕业于北京大学理论计算机科学专业,获理学博士学位。毕业后曾任浙江大学人工智能研究所副所长、教授、博士生导师。现为厦门大学软件学院院长、人工智能研究所所长、教授、博士生导师,长期从事人工智能及其应用技术领域的研究工作。目前主要从事隐喻逻辑、类脑计算和机器诗歌等研究工作;并热衷于探讨有关心智、语言、计算的哲学问题。



傅小兰 研究员、博士生导师。1984年毕业于北京大学心理学系,1987年获得北京大学理学硕士学位,1990年获得中国科学院理学博士学位。现任中国科学院心理研究所认知与复杂信息实验室主任、中国心理学会国际学术交流工作委员会主任、北京市青联常委。主要采用心理学实验和计算机模拟方法研究人的认知活动规律和信息加工机制,也关注技术发展过程中的各种心理、行为问题。



苏彦捷 北京大学心理学系教授、博士生导师、副系主任。1983年考入北京大学,1987年获理学和法学学士学位,1992年获理学博士,并留校任教至今,讲授神经解剖、动物心理学、环境心理学等课程,并承担国家自然科学基金,教育部十五规划项目等。研究内容主要涉及心理认知能力的发生发展研究,动物的社会行为、社群结构及其与它们智慧水平发展之间的关系。1996年起任北京大学心理学系副系主任,1998年起任北京心理学会秘书长。