

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 200328030

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

觉醒的脑神经机制及其计算模拟

The Neural Mechanism of Arousal and
Its Computational Simulation

张俊俊

指导教师姓名: 周昌乐 教授

专 业 名 称: 计算机应用技术

论文提交日期: 2006 年 5 月

论文答辩时间: 2006 年 5 月

学位授予日期: 2006 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2006 年 5 月

觉醒的脑神经机制及其计算模拟

张俊俊

指导教师 周昌乐教授

厦门大学

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版,有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅,有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索,有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密 (), 在 年解密后适用本授权书。

2、不保密 ()

(请在以上相应括号内打“√”)

作者签名:

日期: 年 月 日

导师签名:

日期: 年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

意识一直是人们所关心的问题，近年来，随着神经科学等学科的发展，对意识的研究已经进入了科学的层面。我们知道，人类可以处于不同的意识状态，例如觉醒、睡眠、癫痫等等，在这些状态下人们的意识水平是不一样的。本文即从这一点出发，按照生理学上的依据，以 Hodgkin-Huxley 模型为基础，建立了模仿丘脑-皮层活动的模型，这个模型可以从一定程度上模拟出不同意识水平下脑电的活动。

首先，通过调整参数，模型可以依次模拟出清醒阶段、浅睡阶段（睡眠梭形波）、慢波睡眠阶段以及局部癫痫发作阶段的脑电特性。从离子通道的角度，我们分析了各种状态产生的原因，尤其是睡眠梭形波的初始、维持和终止。此外，我们还用 C0 复杂度对模型的结果作了度量，结果显示对于相同的输入，当处于不同意识状态时，模型的复杂度和意识清醒程度成正比；对于不同的输入，当处于意识清醒状态时，模型的复杂度有所不同，当处于意识丧失状态时，模型的复杂度基本相同。

通过模型的学习，我们提出这样一个观点：对于丘脑-皮层系统来说，处于意识清醒阶段时，可以接受上行性的输入，大脑的反应也和相应的输入有关，但是当处于意识丧失阶段时，它通过自发性的活动来遏制了上行的信息，这时大脑的活动基本上和输入的信息无关。

关键词：丘脑-皮层系统；意识状态；复杂度度量

Abstract

Consciousness has been concerned for many years. Recently, along with the development of neuroscience, consciousness became a focus in science. Human beings can be under many kinds of consciousness states, such as arousal, sleep-spindle sleep, slow oscillation sleep and seizure. Under these different states, the level of our awareness is also different. In this article, based on the physiology of our brain and the Hodgkin-Huxley model, we build a model to simulate the activity of thalamocortical system. On a certain extent, this model can exhibit the EEG in different levels of consciousness.

First, by adjusting several parameters, we can simulate the EEG of arousal, sleep-spindle sleep, slow oscillation and partial seizure. On the level of ion channel, we analyze the neural mechanism of different states, especially the generation, maintenance and termination of sleep-spindle oscillation. Furthermore, the C0 complexity is introduced into this studying. The result indicates that, on one hand, with the same afferent and under different consciousness states, the complexity of the model decreases with the losing of consciousness; on the other hand, with different afferent, the complexity becomes different and remains the same when under the states of consciousness and unconsciousness, respectively.

From the study, we can get this conclusion: The thalamocortical system is able to process the afferent stimulus under the consciousness state; meanwhile, the activity of the brain is related to the information carried by the afferent stimulus. Under the unconsciousness state, the thalamocortical system can block the afferent stimulus by spontaneous activity; in the meantime, the activity of the brain is almost independent of the afferent stimulus.

Keywords: Thalamocortical System; the Level of Consciousness; the Measure of Complexity.

目录

第一章 引言	1
第二章 意识与脑电	3
2.1 神经元及其动力学特性.....	3
2.2 脑电的生理学基础.....	4
2.3 意识的不同状态与脑电的关系.....	6
2.4 脑电的复杂度度量.....	9
第三章 基于 H-H 方程的丘脑皮层模型	11
3.1 模型的结构.....	11
3.2 模型的构造.....	13
3.2.1 TC 的动力学特性.....	13
3.2.2 RE 的动力学特性.....	14
3.2.3 PY 的动力学特性.....	15
3.3 模型的参数.....	18
第四章 实验结果	20
4.1 觉醒阶段的模拟结果.....	20
4.2 睡眠梭形波的模拟结果.....	22
4.3 慢波睡眠的模拟结果.....	26
4.4 参数对于模型行为的影响.....	28
4.5 局部癫痫的脑电模拟.....	29
4.6 对不同刺激的响应以及 C0 复杂度度量.....	31
第五章 总结	36
附录	38
TC 中离子电流的动力学特性.....	38
RE 中离子电流的动力学特性.....	40
PY 中离子电流的动力学特性.....	42
参考文献	43
致谢	45

Content

CHAPTER 1 - INTRODUCTION	1
CHAPTER 2 - CONSCIOUSNESS AND ELECTROENCEPHALOGRAPH(EEG)	3
2.1 NEURON AND ITS DYNAMICS	3
2.2 PHYSIOLOGY UNDERLYING EEG	4
2.3 RELATIONS BETWEEN CONSCIOUSNESS AND EEG	6
2.4 THE COMPLEXITY MEASURE OF EEG.....	9
CHAPTER 3 - THALAMOCORTICAL MODEL BASED ON H-H EQUATION.....	11
3.1 STRUCTURE OF THE MODEL.....	11
3.2 CONSTRUCTION OF THE MODEL.....	13
3.2.1 Dynamics of TC population	13
3.2.2 Dynamics of RE population	14
3.2.3 Dynamics of PY population.....	15
3.3 PARAMETERS OF THE MODEL.....	18
CHAPTER 4 - RESULTS OF EXPERIMENT	20
4.1 SIMULATION RESULTS OF AROUSAL.....	20
4.2 SIMULATION RESULTS OF SLEEP-SPINDLE.....	22
4.3 SIMULATION RESULTS OF SLOW OSCILLATION SLEEP	26
4.4 THE IMPACT OF PARAMTERS ON THE RESULTS.....	28
4.5 SIMULATION RESULTS OF PARTIAL SEIZURE.....	29
4.6 RESPONSES TO DIFFERENT STIMULI AND THE MEASURE OF C0 COMPLEXTY	31
CHAPTER 5 - DISCUSSION	36
APPENDIX	38
DYNAMICS OF ION CHANNELS IN TC.....	38
DYNAMICS OF ION CHANNELS IN RE.....	40
DYNAMICS OF ION CHANNELS IN PY	42
REFERENCES	43
ACKNOWLEDGMENT	45

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 引言

早在古希腊时期，意识问题就是先哲们重点研究的对象，从那时候起一直被人们所关注。近些年来，随着神经科学和信息科学的发展，科学家们已经开始通过自然科学的途径来研究意识问题。来自于神经科学，计算机科学，心理学，机器人学等各个学科的学者都汇集于此，尤其是一批诺贝尔获奖者（如 F. Crick, G. Edelman 等）也都转向专门研究意识问题，并取得了重大的成就。上世纪末，美国，欧共体以及日本都分别提出了他们研究脑的十年计划或是二十年计划。Crick 在他《惊人的假说》一书中指出：“从人类发展的角度看，脑研究的主要目标不仅是理解和治疗各种各样的脑疾病（尽管这是很重要的），更重要的是掌握人类灵魂的本质。” [1]可见对于意识问题，在科学界已经得到了相当的重视。

我们知道，在人处于清醒，睡眠，昏厥以及癫痫等不同意识状态下时，意识水平是不一样的。为什么会有不同的意识水平？不同的意识水平可以通过哪些可测量的值来标识？度量意识，成了研究意识问题的重点方向之一。

本文按照生理学上的依据，以 Hodgkin-Huxley 模型为基础，建立了模仿丘脑-皮层活动的仿真模型，这个模型可以从一定程度上模拟出不同意识水平下脑电的活动。首先，通过调整参数，模型可以依次模拟出清醒阶段、浅睡阶段（睡眠梭形波）、慢波睡眠阶段以及局部癫痫发作阶段的脑电特性。从离子通道的角度，我们分析了各种状态产生的原因，尤其是睡眠梭形波的初始、维持和终止。此外，我们还用 C0 复杂度对模型的结果作了度量，结果显示对于相同的输入，当处于不同意识状态时，模型的复杂度和意识清醒程度成正比；对于不同的输入，当处于意识清醒状态时，模型的复杂度有所不同，当处于意识丧失状态时，模型的复杂度基本相同。

本文第二章介绍了模型相应的生理学上的基础以及本文工作思路的根据；第三章是对模型的详细描述，模型中具体的数学公式见附录；第四章是实验结果及分析；最后第五章阐述了本工作的意义以及对下一步工作的展望。

本文通过对已有模型的学习，提出如下几点创新：

1. 从丘脑-皮层的范围进行建模，并且大脑皮层部分的活动不再是被动的，

对其中参数的调节可以改变整个模型的活动特性；

2. 对模型的结果进行了复杂度度量，从理论上分析了不同意识状态下丘脑-皮层系统对不同刺激的反应特性；
3. 在模型学习的基础上，提出了大脑对于外界信息传入和内在活动之间的处理过程是感觉觉知基础的观点。

厦门大学博硕士论文摘要库

第二章 意识与脑电

2.1 神经元及其动力学特性

我们的大脑是由神经元 (neuron) 和神经胶质细胞 (neuroglial cell) 所构成的。其中的神经元被认为是大脑处理信息的主要工作单元。在人的大脑中, 神经元的数量达到了十的十次方之多, 但是它们的结构却大体相似。一般来说, 一个神经元是由胞体 (soma)、树突 (dendrite) 以及轴突 (axon) 所构成。

神经元膜 (neuronal membrane) 作为一个屏障把细胞质包裹于神经元内, 并阻止细胞外的某些物质进入膜内。但是膜上“镶嵌”着一些离子通道 (ion channel), 它们是一些特异性的蛋白质, 允许某个或者某些个离子在其中通过, 由此我们可把它们分为钠通道、钾通道等等。这些离子通道的开放和关闭是动态的, 可以由电压大小或者一些化学物质来控制。一般来说, 神经元的内外部虽然保持着渗透压的平衡, 但是内外的离子浓度是不同的, 而某些离子可以通过离子通道进出细胞, 这使得在静息状态下神经元内外部存在着电压差, 这被称为静息电位 (resting potential), 因神经元类型不同而位于 -40mV 到 -90mV 之间。

在神经元内, 信息的处理都是通过电信号来介导的。首先, 神经元通过其胞体和树突来接受其他神经元传递的信息, 引起局部的膜两侧电压差的变化。这种电信号的变化在神经元内部通过整合, 如果所引起的总效应达到了阈值 (一般为 -30mV), 就会引发动作电位 (action potential) 的产生。动作电位被认为是神经元的输入信号, 它通过轴突进行无损的传输, 到达终末 (bouton) 后, 将信息传递给其他的神经元。

动作电位作为神经系统中远距离传递信息的信号, 有着重要的意义。神经元之所以区别于其他的细胞, 也就是因为只有它才能产生动作电位。一般认为, 动作电位通过其频率 (frequency) 和时机 (timing) 来编码信息, 而不是它的幅度 (altitude)。在 20 世纪 50 年代, Hodgkin 和 Huxley 在实验和理论上对动作电位进行了细致的研究, 并提出了描述动作电位工作机制的 Hodgkin-Huxley 模型。由于这些工作成果, 他们在 1963 年获得了诺贝尔奖。

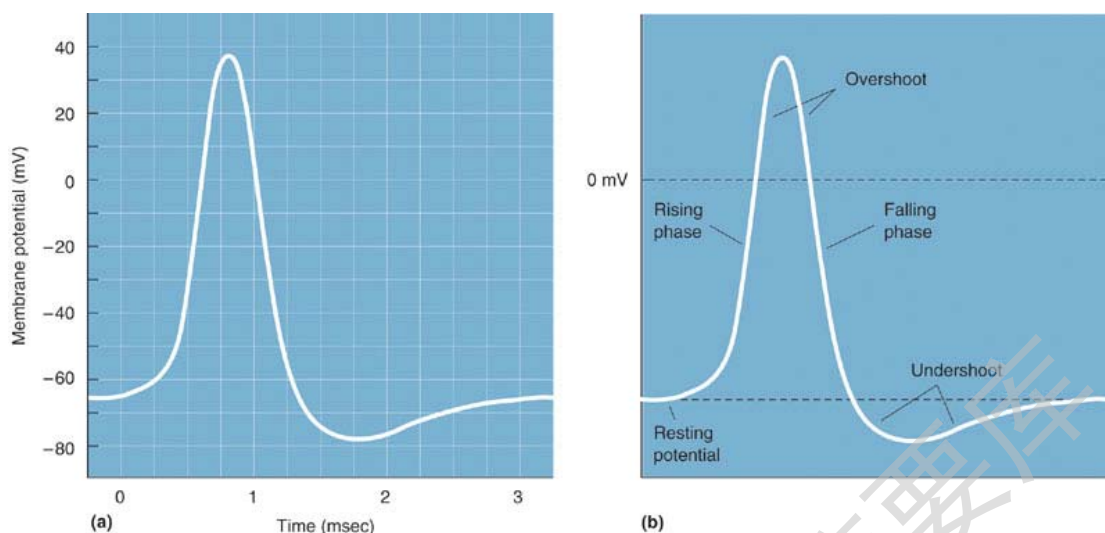


图 2.1 动作电位（引自[2]）

(a) 示波器上显示的单个动作电位。(b) 动作电位的组成成分。

图 2.1 描述的是示波器下的动作电位过程和理论上动作电位的组成成分。动作电位上升相(rising phase)的特征是膜的快速去极化,直到膜电位达到约 40mV;下降相(falling phase)是一个快速的复极化过程,直到膜电位比静息电位更负。最后,膜电位逐步恢复到静息电位水平。整个动作电位的时程大约 2ms。

通过对乌贼巨轴突的研究,Hodgkin 和 Huxley 发现,动作电位是一个对跨膜电荷进行大幅再分配的过程。动作电位过程中细胞的去极化是由钠离子跨膜内流引起的,而复极化是由钾离子的外流所致。当钠离子通道被打开时,它的通透性变得非常高,比钾还高,所以此时产生内向的钠电流,会使神经元去极化,直至膜电位接近于钠的平衡电位(62mV),这就是动作电位的上升相;而下降相则是由于钠通道的再次快速关闭,以及钾通道的开放而造成的。

不同类型的神经元产生的动作电位大同小异,各个神经元的电生理特性取决于其膜上离子通道的特性及其数目。从而使神经元具有不同的选择性电行为。

Hodgkin 和 Huxley 不仅对动作电位作了生物学上的研究,更进一步的,他们建立了描述动作电位的方程。这项工作意义深远,被认为是计算神经科学(computational neuroscience)的开端,并直至现在仍被广泛使用。

2.2 脑电的生理学基础

脑电图(electroencephalogram, EEG)是指从人(或动物)头皮记录到的脑

的电活动。EEG 信号是大脑神经元电活动的直接反应，具有很高的时间分辨率，可达毫秒级。对 EEG 信号的研究不仅可以使我们有可能了解大脑活动的部位，还使我们能够了解大脑信息传递、处理的过程。一般认为，我们在头皮记录的 EEG 信号是电极下大量神经元共同活动的结果，主要来自皮层 III、V 层的锥体细胞，其树突方向平行一致，垂直于头皮表面。这些神经元不断受到其他神经元的刺激，产生兴奋性或抑制性突触后电位。突触处产生的电流经由树突、细胞体、轴突，并通过细胞膜形成细胞外电流。大量神经元产生的细胞外电流所形成的综合电位就是 EEG。

EEG 信号的振幅主要取决于电极下面神经元活动的同步性（synchronous）而不是活动强度。只有当一群细胞同时兴奋时，微小的信号才能被综合起来产生一个较大的皮层表面信号。但如果每一个细胞受到与上述情况相同程度的兴奋，而却把这些兴奋及时地扩散开，那么综合信号仍是微弱的和不规则的。

EEG 信号具有节律性，这是大量神经元协同活动的结果。节律性活动可能是具有节律振荡特性的起步神经元（pacemaker neurons）与本身不能产生节律，但由于与起步神经元之间的兴奋性或抑制性的连接，其活动达到同步化的神经元共同产生。皮层中的神经元振荡器按其固有频率发放，产生的细胞外电流在头皮综合，形成 EEG 信号。如果对 EEG 信号进行频谱分析，将 EEG 信号分解，就得到 EEG 信号的频谱图。通常可以将 EEG 信号分为如下几个频段： δ 节律（2-4Hz）， θ 节律（4-8Hz） α 节律（8-13Hz） β 节律（13-30Hz） γ 节律（30Hz 以上）。这些节律在大脑不同结构中广泛分布。

EEG 对于衡量意识程度是很重要的，因为大脑皮层的电活动反映了丘脑皮层系统的发放模式。我们知道，EEG 所测量的值，实际上是皮层锥体细胞树突上的突触后电位的总和，也就是投射到皮层细胞的丘脑皮层神经元的同步化活动。所以可以说，EEG 的产生是由丘脑以及皮层的互相作用所产生的，这是 EEG 的生理学基础。

丘脑是间脑中最大的部分，在感觉和运动系统的整合功能中起重要作用。在丘脑中，主要有三种重要的神经核团，它们分别是：

- 特异性感觉接替核：接受各种特异的感觉投入，与特异的感觉皮层有定位的往返性联系，在特定的大脑皮层产生特异的感觉；

- 联络性核团：在进化上最新，不直接接受外周的感觉投入，而与其他丘脑核团联系广泛，与大脑的联络皮层有定位的往返性联系，汇聚和整合各种感觉；
- 非特异性感觉接替核：在进化上古老，不直接接受外周的感觉传入，是脑干网状结构的上续，与其他丘脑核团联系，投射到广泛的大脑皮层，不产生特异性感觉，调制大脑皮层的兴奋性水平。

各种感觉的输入（除了嗅觉），都会先进入丘脑，在丘脑中经过初级的处理，再通过丘脑皮层(thalamocortical)神经元传递到大脑皮层。同时，丘脑也接受大脑皮层的反馈性投射，而且有证据表明来自大脑皮层的下行性投射大于来自感觉系统的上行性传入[3]。

近年发现，丘脑对于大脑皮层整体活动的影响至关重要，各种状态下人们的 EEG 活动，都是以丘脑-皮层为基础的[4-6]，例如睡眠时的睡眠梭形波（sleep spindle）[7]以及 δ 节律的睡眠慢波（slow-wave）[5]，都可以由丘脑-皮层的活动来解释。可见，丘脑对于 EEG 的形成有着关键的作用。

2.3 意识的不同状态与脑电的关系

意识问题，长久以来只在哲学层面上进行着探讨。随着科学的进步，我们已经可以在心理学甚至神经科学的领域来研究意识问题了。虽然我们都还不能给意识下一个明确的定义，但我们很清楚，我们自身是有意识的，而且唯物的来说，意识是由我们大脑的活动所产生的。

关于意识问题的研究，有着很多的观点。1981年，Von der Malsberg 提出了相关编码理论[8]。从理论角度推测脑内不同部位神经元之间可能通过同步振荡的方式连接。各自振荡的神经元所编码的局部信息，通过振荡的相位同步而捆绑起来。这些彼此相关、在给定时间一起协同工作的动态神经元群编码着特定信息。1989年 C.M.Gray 和 W.Singer 等在 Nature 上发表了关于视皮层神经元活动的 40Hz 同步振荡的研究结果[9]，为 Malsberg 的理论提供了有力的生理基础。不少科学家认为脑通过同步振荡解决感之中的特征捆绑问题。Crick 等也从理论上推测 40Hz 同步振荡可能是意识和注意的神经基础。另一位 Nobel 得主 Edelman 提出了“神经达尔文主义”，认为意识的产生在于神经系统内部形成各种集群，在外界的不断刺激下，这些集群不断竞争、淘汰，类似于达尔文的进化论。他认为

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库