

第16届中国神经网络学术会议

神经计算 与神经科学

史忠植

shizz@ics.ict.ac.cn

<http://www.intsci.ac.cn/>

中国科学院计算技术研究所

内容提要

- 一、引言
- 二、神经元模型
- 三、离子通道模型
- 四、树突模型
- 五、神经元群
- 六、结束语

自主创新

胡锦涛总书记指出：

“**科技创新能力是一个国家科技事业发展的决定性因素，是国家竞争力的核心，是强国富民的重要基础，是国家安全的重要保证**”

。



RoboCup Challenge

2050年机器人足球队打败明星队！



2006-8-15

史忠植 神经计算

4

2004 & 2009



2006-8-15

史忠植 神经计算

5

Europa Mission ~ 2018

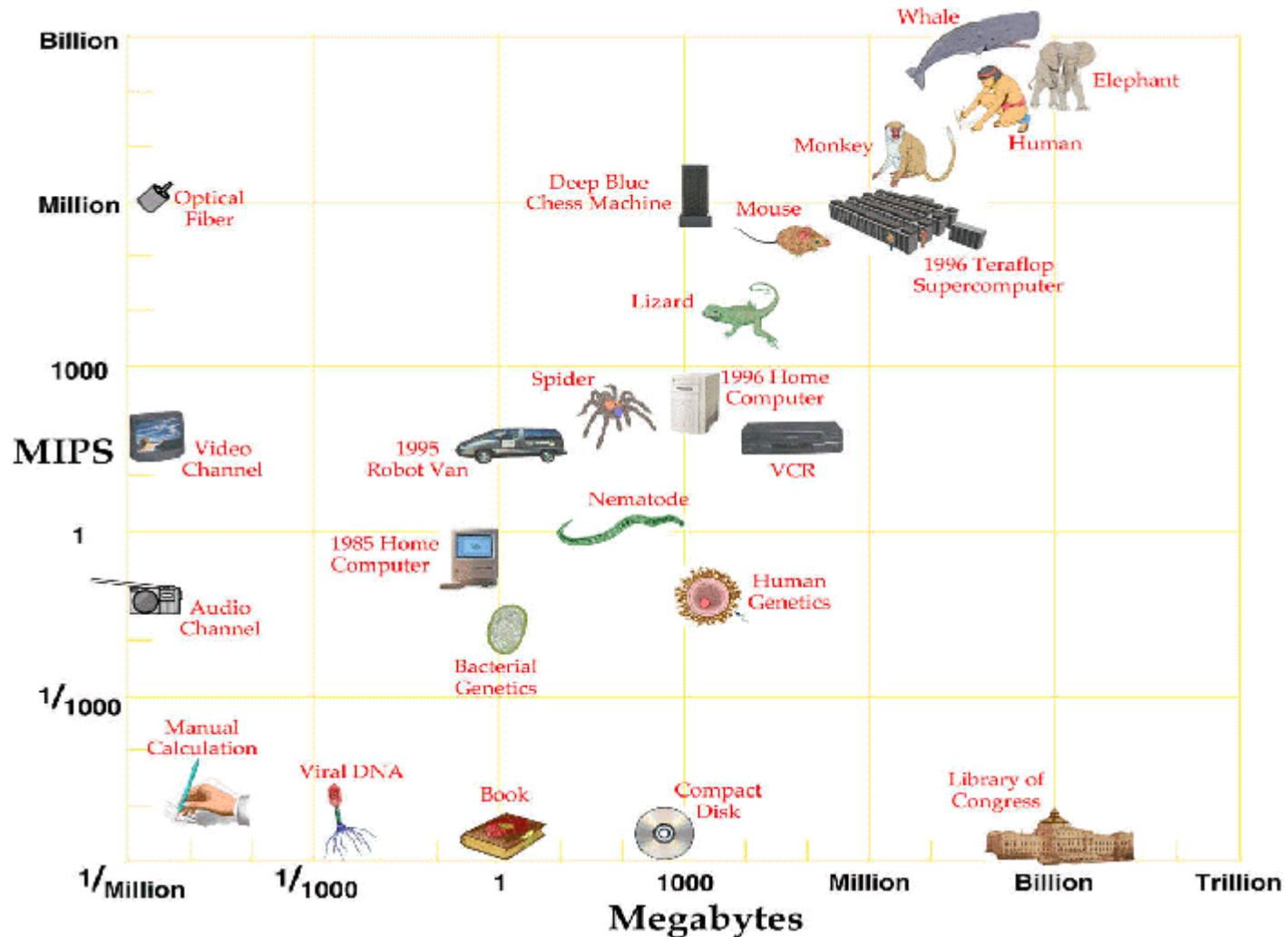


2006-8-15

史忠植

Computer vs. Brain

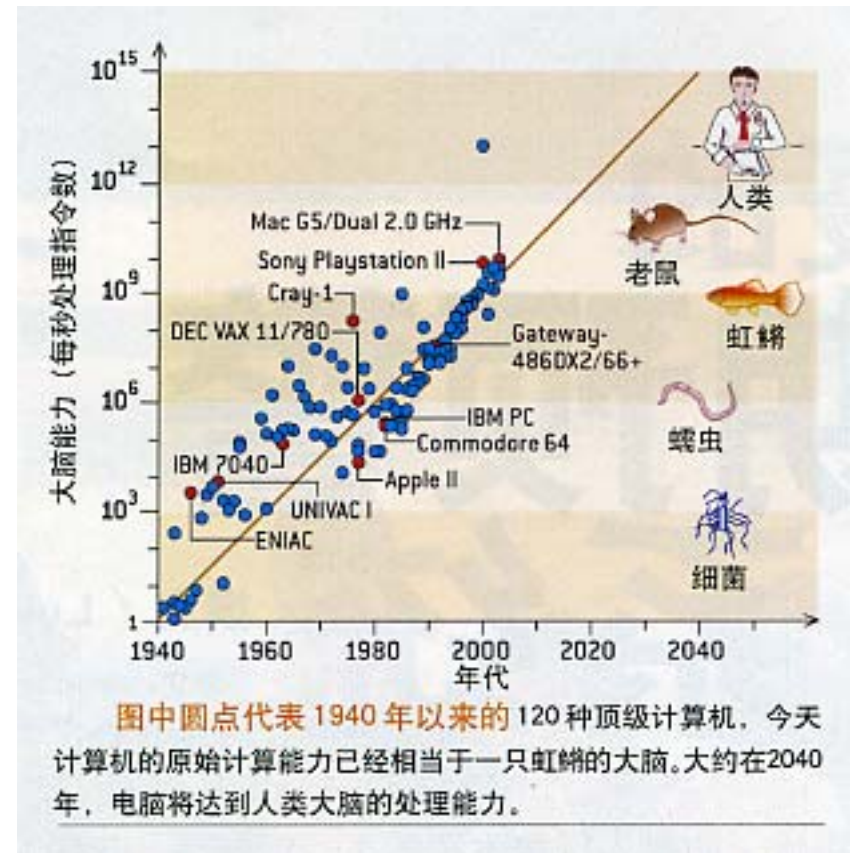
All Thinks, Great and Small



信息处理技术发展面临的挑战

计算机的处理方式与人脑的信息处理方式存在很大差距。

如何广泛地模拟人的智能对信息进行智能加工和利用，使机器能够认知环境、正确接收和理解人给予的指令是信息处理技术发展的挑战。



引自《科学美国人》，2005 (3)

智能科学研究

国内外现状

美国

纳米技术、生物技术、信息技术、认知科学四大汇聚 (NBIC)。

日本

“脑科学时代”计划，总预算200亿美元。

国际组织

“国际人类前沿科学计划”，100亿美元。

欧盟

第6次研究与技术发展框架

中国

国家中长期科学与技术发展规划-“以人为中心”的智能信息处理技术。



智能科学 (Intelligence Science)

智能科学研究智能的基本理论和实现技术，是由脑科学、认知科学、人工智能等学科构成的交叉学科。21世纪智能科学的研究将会取得突破性进展，进一步揭示人类智能的本质，使信息社会实现智能化。

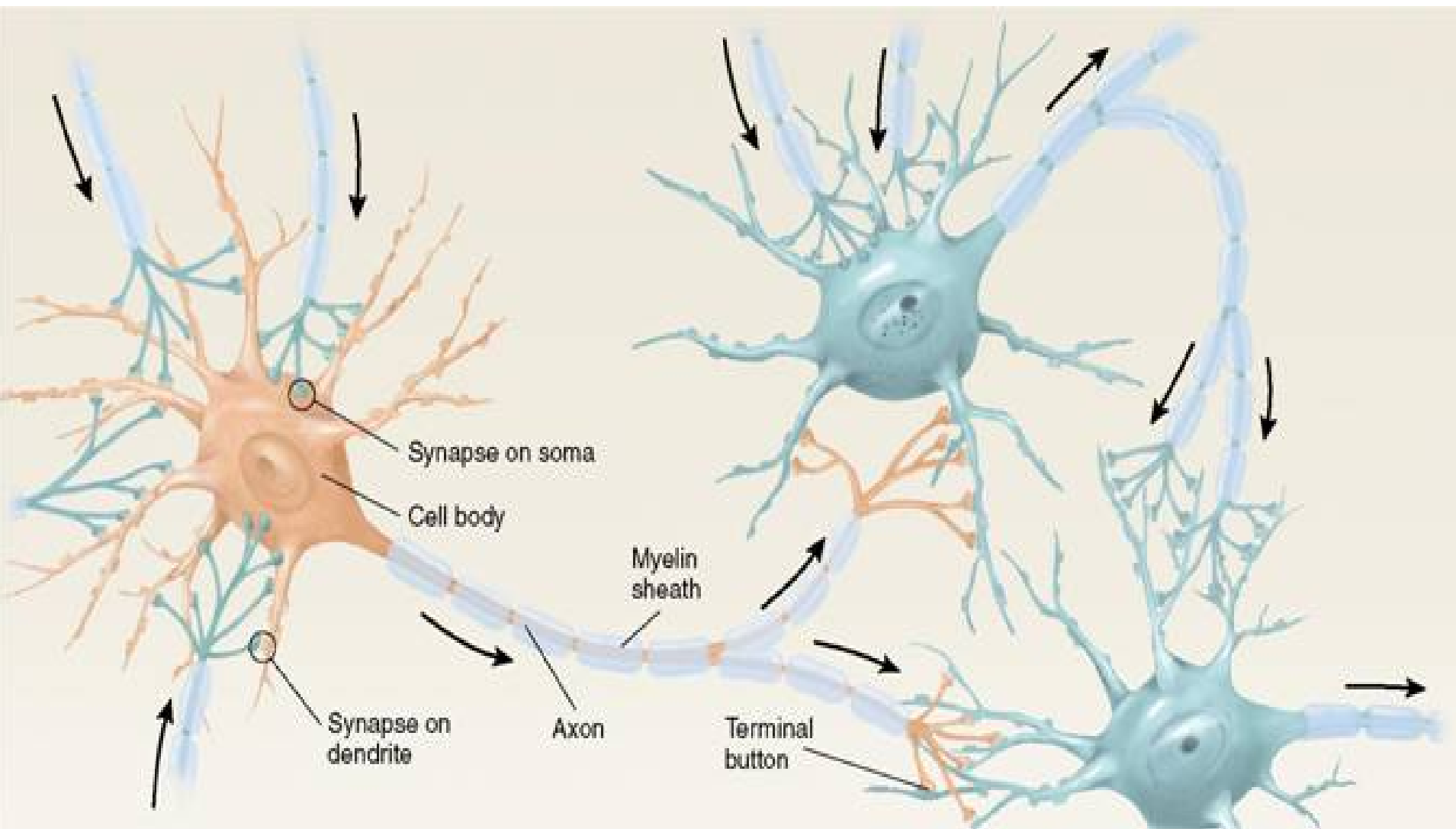
内容提要

- 一、引言
- 二、**神经元模型**
- 三、离子通道模型
- 四、树突模型
- 五、神经元群
- 六、结束语

神经科学

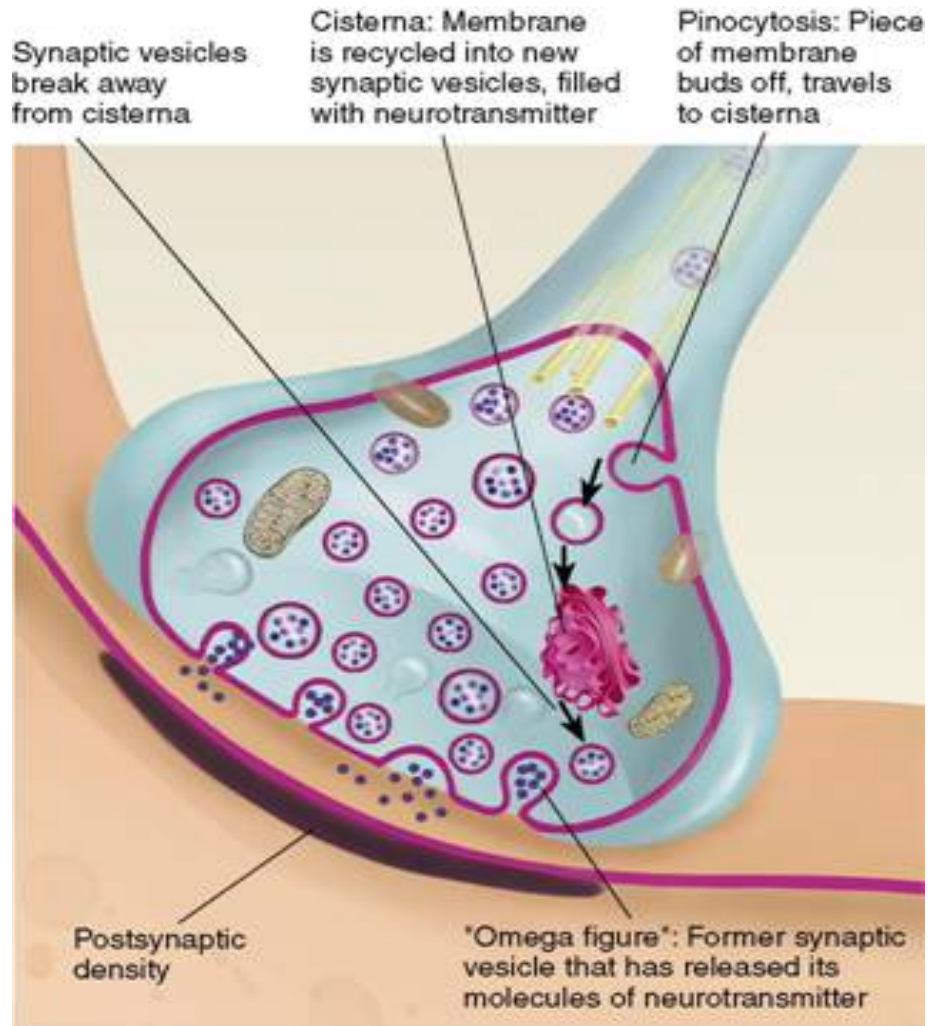
- ➡ Cajal 的神经元学说
- ➡ 20 世纪 60 年代后期 “神经科学”
- ➡ 细胞与分子水平的研究
- ➡ 20 世纪 90 年代开始，脑科学研究中整合性

神经元



突触可塑性

突触的结构可分突触前成分、突触间隙和突触后成分三部分。突触前、后成分彼此相对的细胞膜分别称为突触前膜和突触后膜，两者之间在宽约**15~30nm**的狭窄间隙为突触间隙，内含糖蛋白和一些细丝。突触前成分通常是神经元的轴突终末，呈球状膨大，附着在另一神经元的胞体或树突上，称突触扣结。

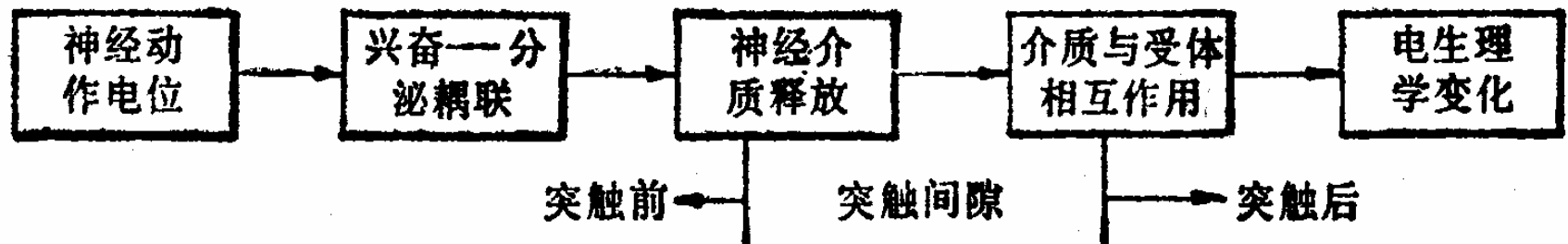


Hebb学习假说

- 1949年，Hebb的书《行为组织学》，他在里面第一次清楚说明了突触修正的生理学习规则。特别是Hebb提出大脑的连接随着生物学会不同功能任务而连续地变化的，神经组织就是由这种变化创建起来的。Hebb 继承了Ramony 和 Cajal 早期的假设并引入自己的现在著名的学习假说，两个神经元之间的可变突触被突触两端神经元的重复的激活加强了。Hebb的书在心理学家中有广泛的影响，但遗憾的是对工程界却影响很少或没有。

电—化学—电的传递过程

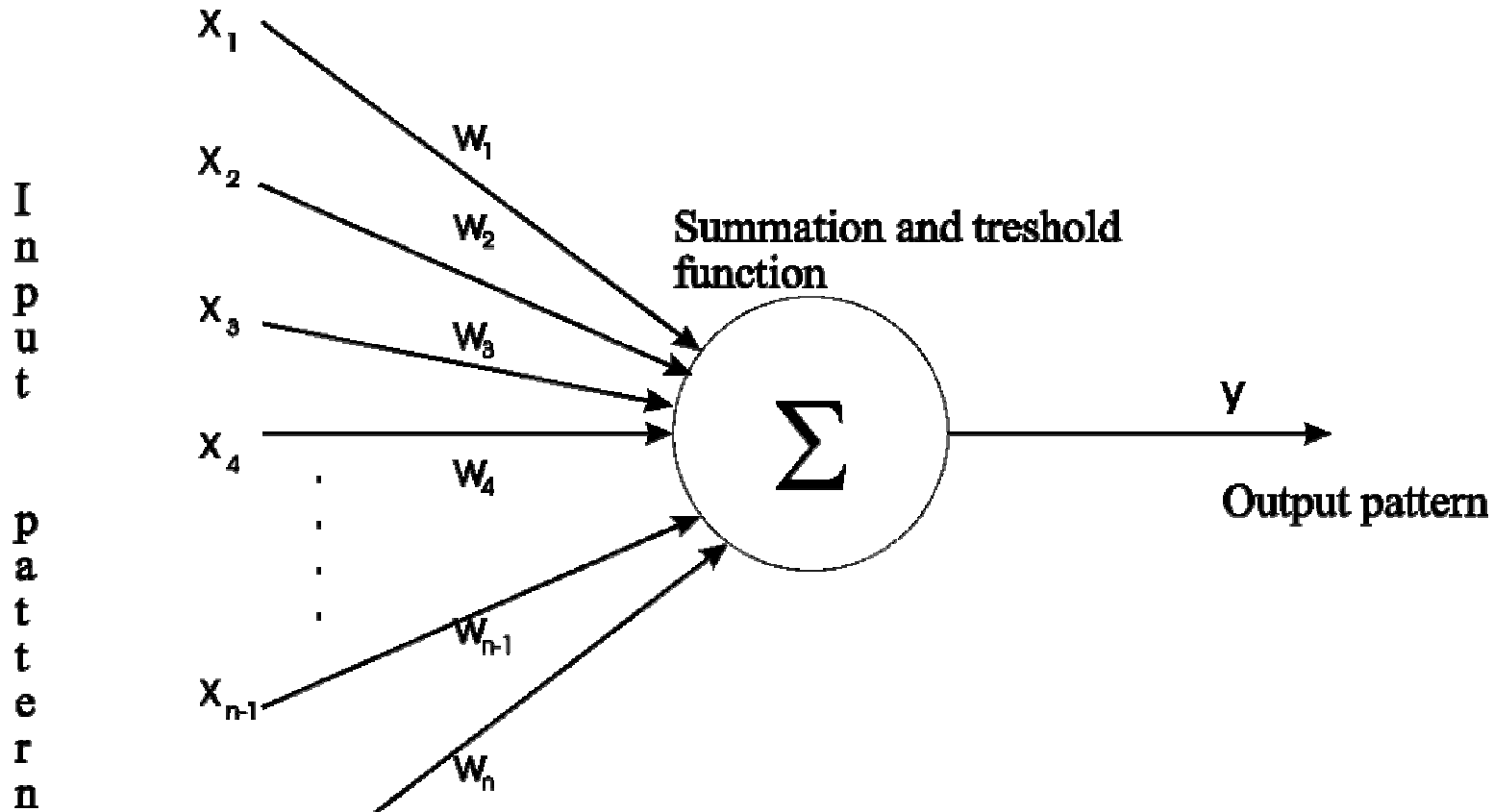
突触前神经元兴奋→突触前膜去极化 →细胞外 Ca^{2+} 进入前膜→递质释放并在突触间隙内扩散→与后膜上的受体结合→ 后膜上某些离子通道开放→ 某些离子进入胞内→突触后膜去极化或超极化。



McCulloch-Pitts 神经元

- 现代的神经网络开始于McCulloch, Pitts (1943) 的先驱工作。在他们的经典论文里，McCulloch, Pitts结合了神经生理学和数理逻辑的研究描述了一个神经网络的逻辑分析，他们的神经元模型假定遵循有-无模型律。如果如此简单的神经元数目足够多和适当设置连接权值并且同步操作，McCulloch, Pitts证明这样构成的网络原则上可以计算任何可计算函数。这是一个有重大意义的结果，有了它标志着神经网络和人工智能的诞生。

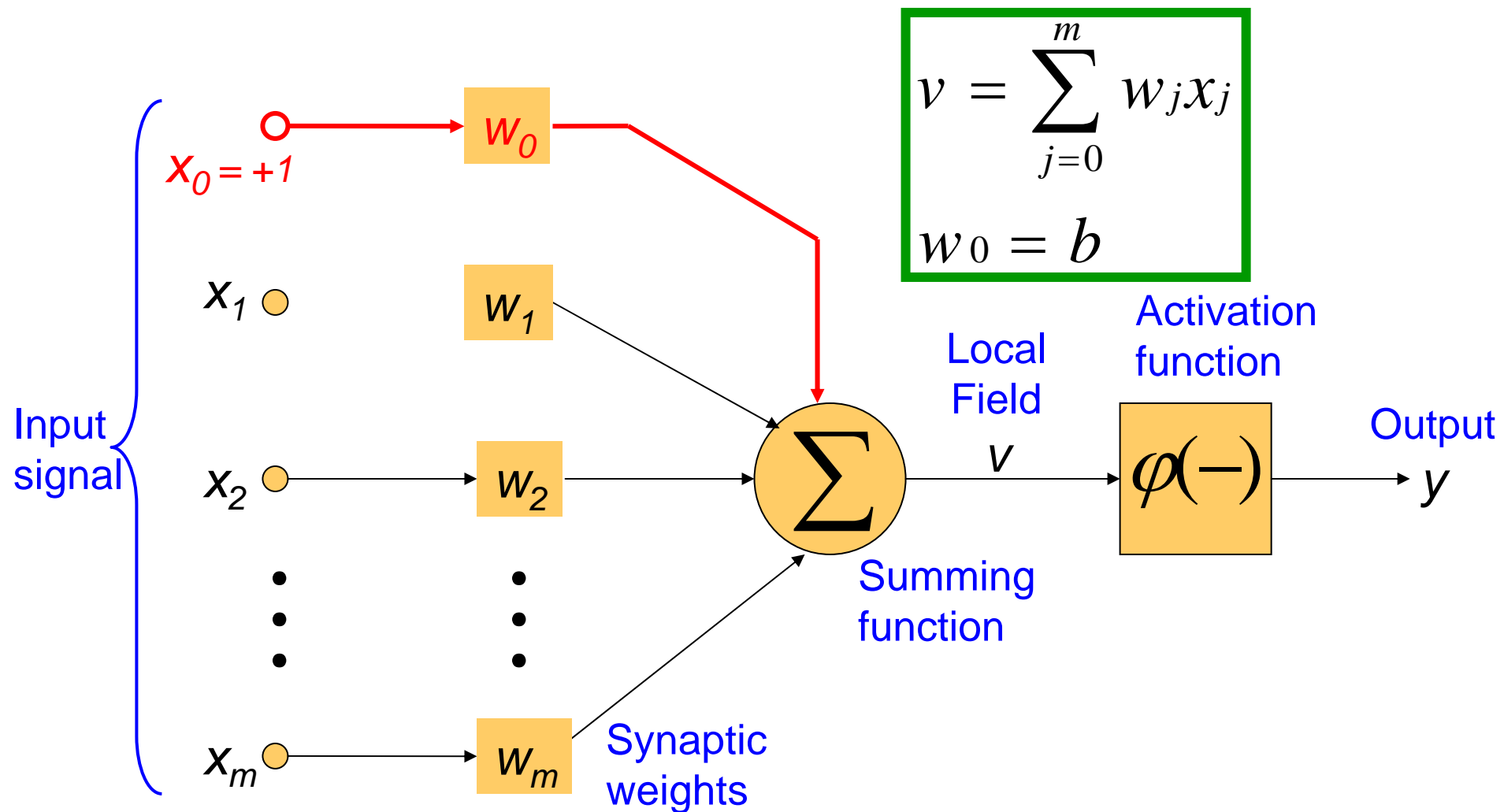
McCulloch-Pitts 神经元



感知器

- Rosenblatt (1958) 在他有关感知器的研究著作中提出了模式识别问题的新方法，一种新的监督学习方法。所提出的感知器收敛定理使Rosenblatt的工作取得圆满的成功。他于1960年提出感知器收敛定理的第一个证明（1960）。Widrow和Hoff介绍了最小平均平方（least mean square, LMS）算法并用它构成了Adaline (adaptive linear element)。感知器和Adaline的区别在于训练过程。

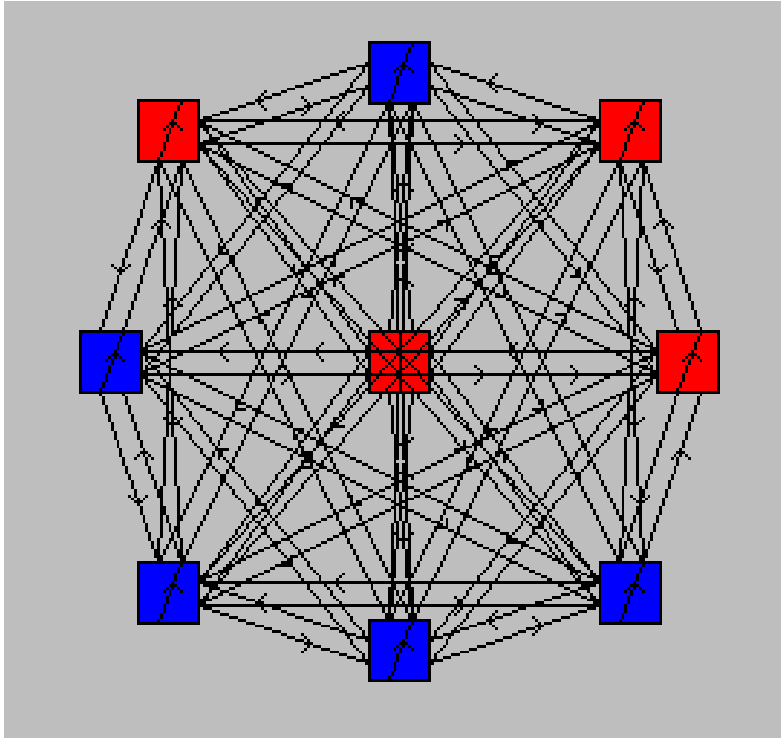
神经元模型



感知器隐层

- 1969年，Minsky和Papert合作发表了颇有影响的Perceptron一书，得出了消极悲观的论点，加上数字计算机正处于全盛时期并在人工智能领域取得显著成就，70年代人工神经网络的研究处于低潮。

Hopfield 网络

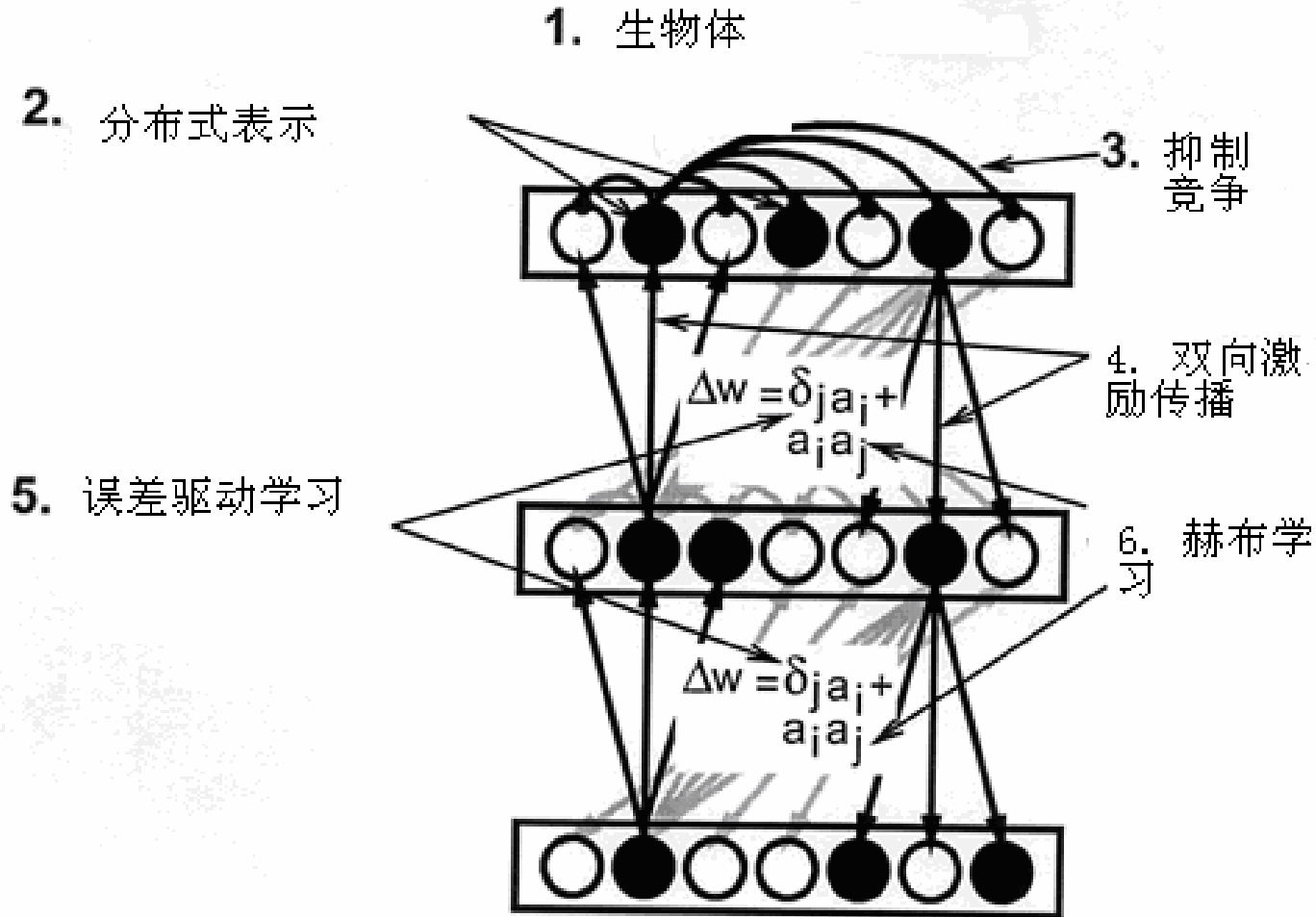


- 1982年，Hopfield用能量函数的思想形成一种具有对称连接的递归网络所执行的计算的新方法。这类具有反馈的特殊神经网络在80年代引起了大量的关注，产生了著名的Hopfield网络。尽管Hopfield网络不可能是真正的神经生物系统模型，他们包涵的原理，即在动态的稳定网络中存储信息原理的，是极深刻的。

神经计算

- 自适应共振理论 (ART)
- 自组织特征映射理论
- Hinton 等人最近提出了 Helmboltz 机
- 徐雷提出的 Ying-Yang 机理论模型
- 甘利俊一 (S. Amari) 开创和发展的基于统计流形的方法应用于人工神经网络的研究

神经网络



内容提要

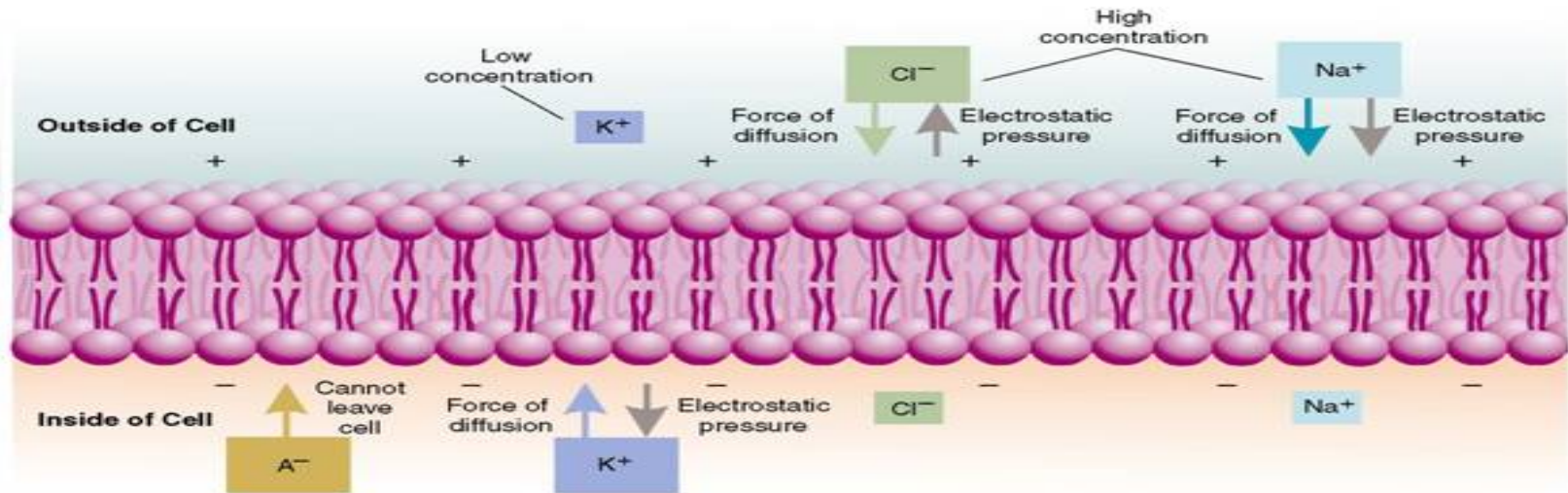
- 一、引言
- 二、神经元模型
- 三、离子通道模型
- 四、树突模型
- 五、神经元群
- 六、结束语

生物神经元模型

- Conductance-based
 - Examples:
 - Hodgkin-Huxley Neuron Model
 - FitzHugh-Nagumo Neuron Model
 - Hindmarsh-Rose Neuron Model
 - Difficult to analyze
 - Requires large number of parameters
 - Has complex dynamics
- Spiking neuron models
 - Examples:
 - Integrate-and-Fire Neuron Model
 - Quadratic Integrate-And-Fire Neuron Model
 - Spike Response Neuron Model
 - Simple phenomenon
 - Highly popular for studies of neural coding, memory, and network dynamics.

离子通道

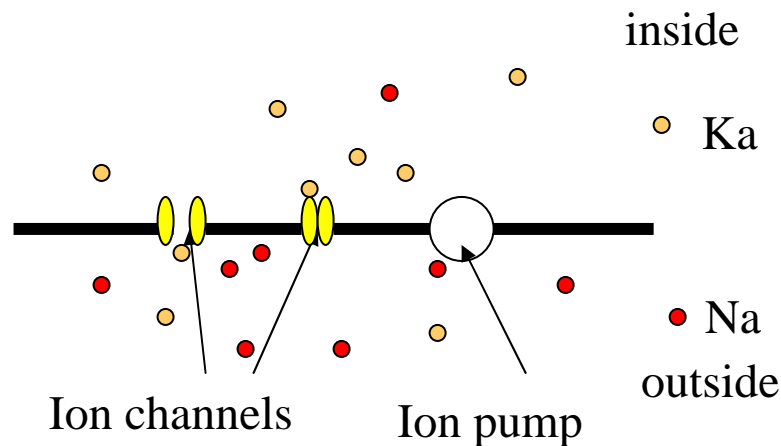
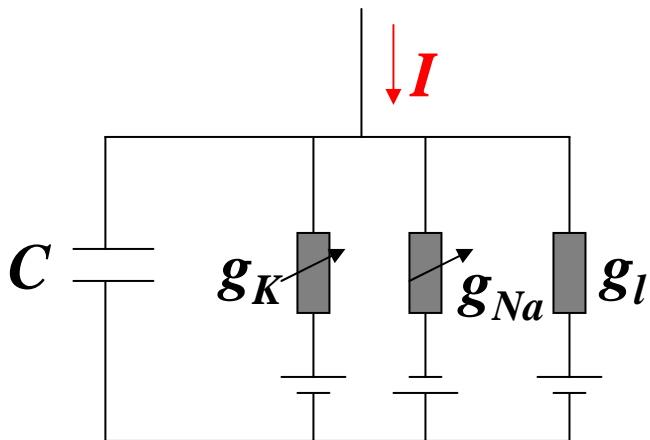
- 1991年10月7日年诺贝尔奖金颁奖大会上，诺贝尔生理学奖授予给了尼赫(Erwin Neher) 和萨克曼(Bert Sakman)，因为他们的重大成就-----细胞膜上单离子通道的的发现。
- 离子通道是广泛分布在多种膜上的一种跨膜蛋白，其空间结构所具有的孔径即是离子进出膜的通道。



离子通道

- 离子通道典型特征：
 - 特异门控行为
 - 离子选择通透性
 - 失活特性
 - 特异药理学阻断
- 离子电导性：
 - 产生动作电位
 - 放电模式：延迟、节律、震荡

Hodgkin-Huxley Model



$$C \frac{du}{dt} = \underbrace{g_{Na} m^3 h (u - E_{Na})}_{I_{Na}} + \underbrace{g_K n^4 (u - E_K)}_{I_K} + \underbrace{g_l (u - E_l)}_{I_{leak}} + I(t)$$

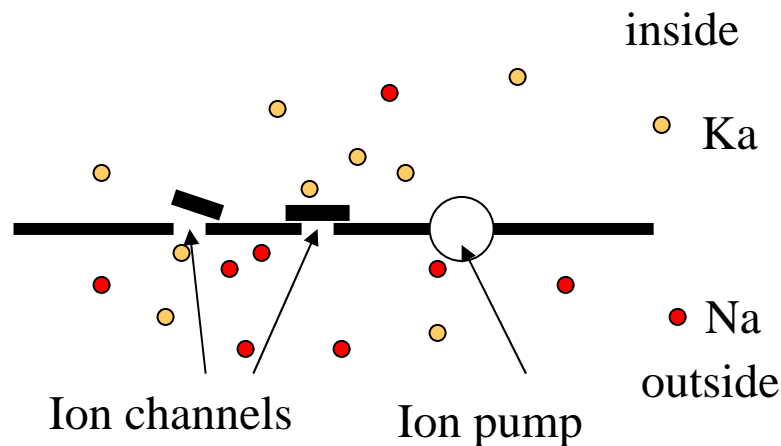
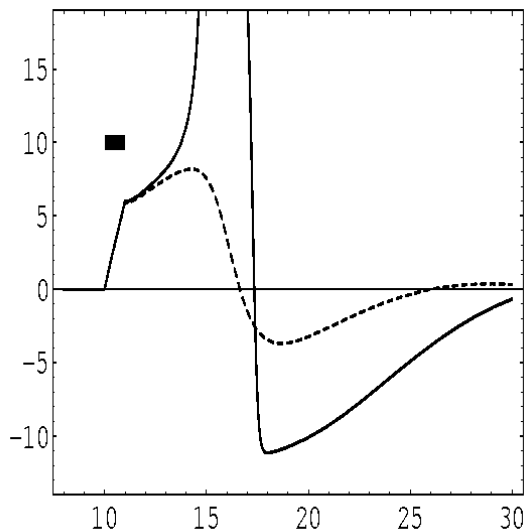
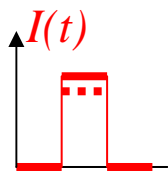
stimulus ↓

$$\frac{dm}{dt} = \tau_m^{-1} \alpha_m(u) \beta_m(u) - m$$

$$\frac{dn}{dt} = \tau_n^{-1} \alpha_n(u) \beta_n(u) - n$$

Hodgkin-Huxley Model

pulse input

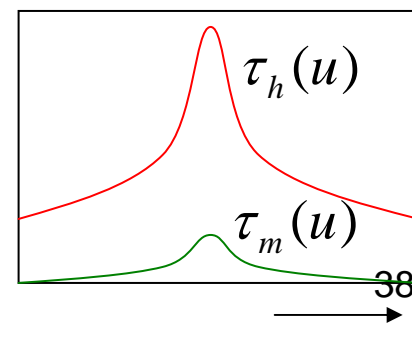
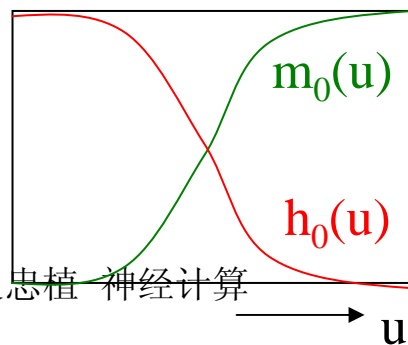


$$C \frac{du}{dt} = \underbrace{g_{Na} m^3 h (u - E_{Na})}_{I_{Na}} + \underbrace{g_K n^4 (u - E_K)}_{I_K} + \underbrace{g_l (u - E_l)}_{I_{leak}} + I(t)$$

stimulus



$$\frac{dm}{dt} = \frac{m_{\infty}(u) - m}{\tau_m(u)}$$

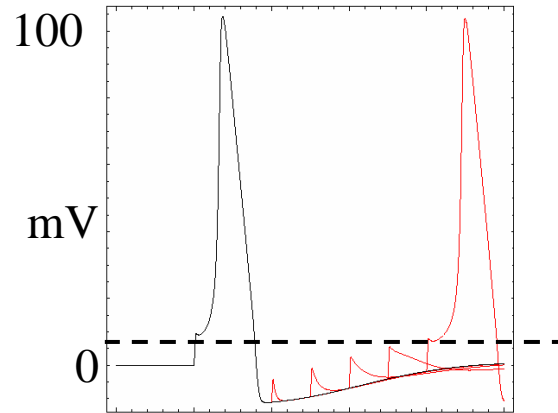


2006-8-15

史忠植 神经计算

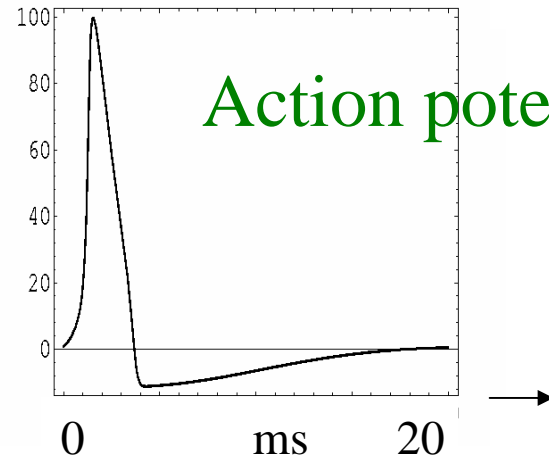
Hodgkin-Huxley Model

refractoriness

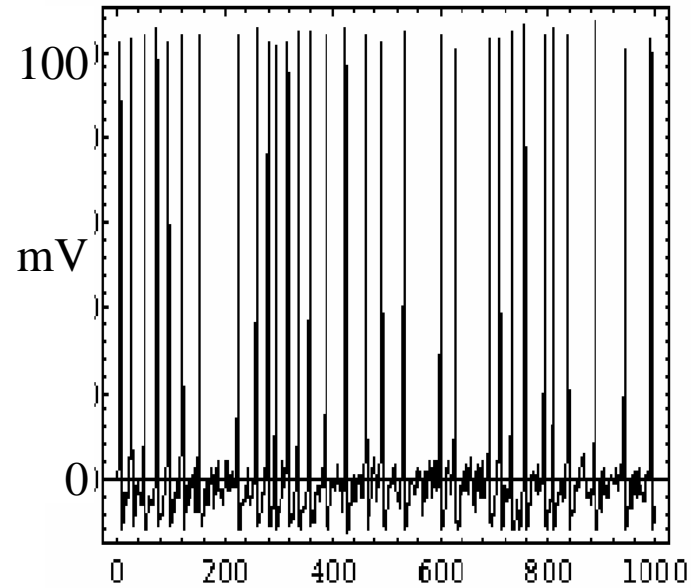


strong stimuli

Strong stimulus



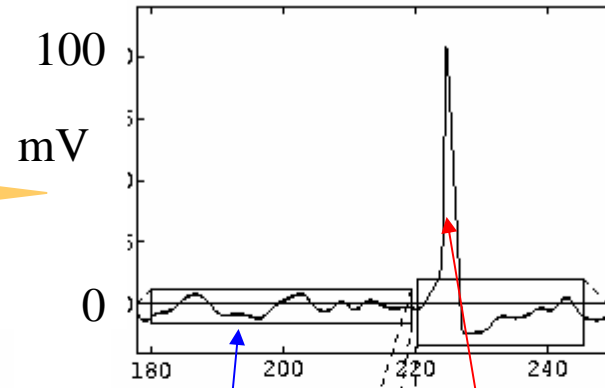
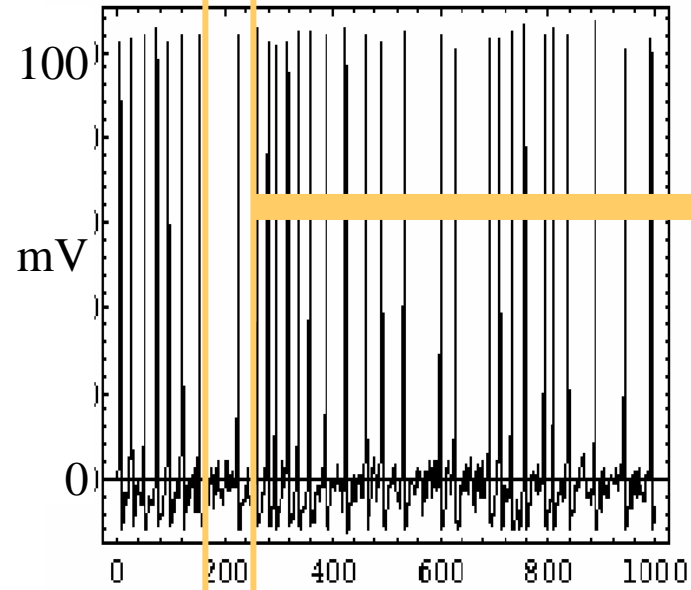
Hodgkin-Huxley Model



Stimulation with
time-dependent
input current



Hodgkin-Huxley Model

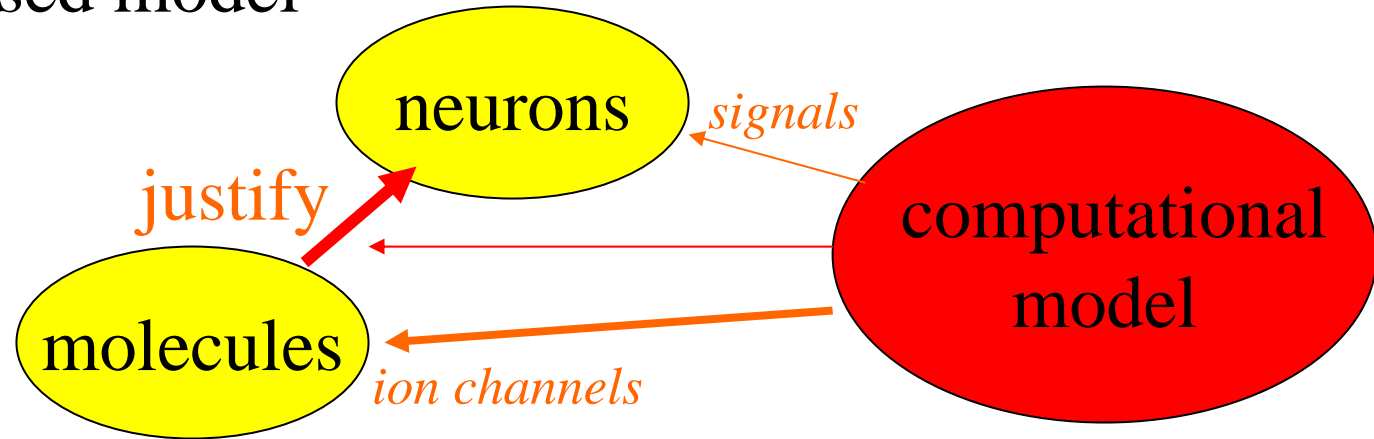


**Subthreshold
response**

Spike

从分子到神经元模型

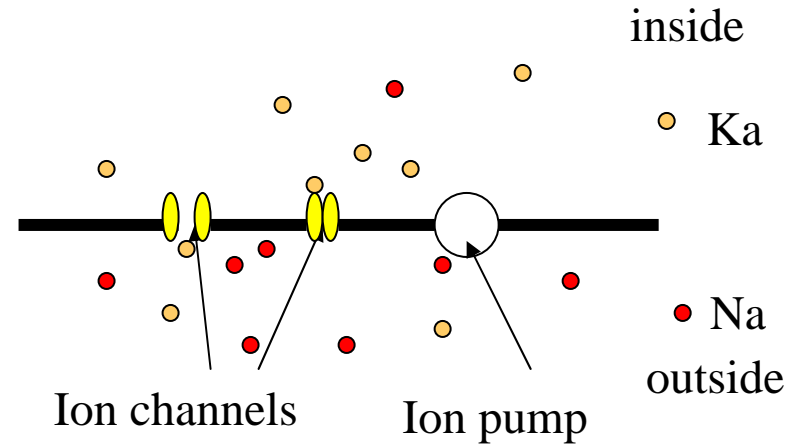
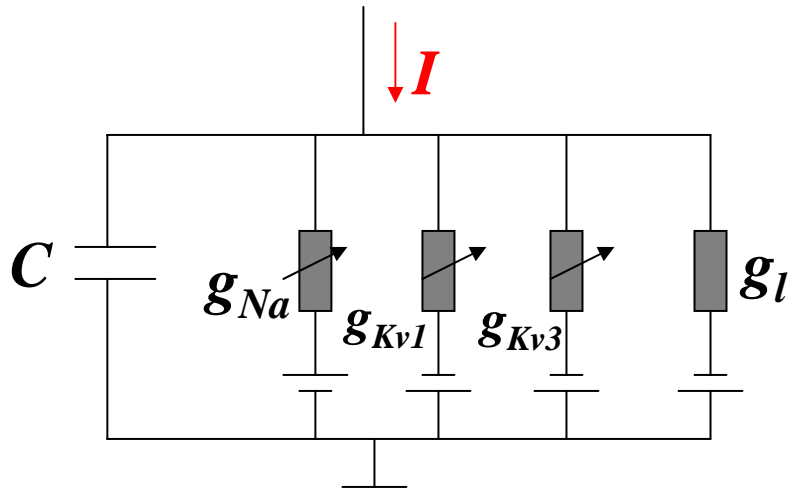
Ion channel based model



Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL

Laboratory of Computational Neuroscience, LCN, CH 1015 Lausanne

Model of fast spiking interneuron



$$C \frac{du}{dt} = \underbrace{-g_{Na} m^3 h (u - E_{Na})}_{I_{Na}} - \underbrace{g_{Kv1} n_{Kv1}^4 (u - E_K) - g_{Kv3} n_{Kv3}^2 (u - E_K)}_{I_K} - \underbrace{g_l (u - E_l)}_{I_{leak}} + I(t)$$

stimulus ↓

$$\frac{dm}{dt} = \tau_m^{-1} m_{\infty}(u) - m$$

$$\frac{dn}{dt} = \tau_n^{-1} n_{\infty}(u) - n$$

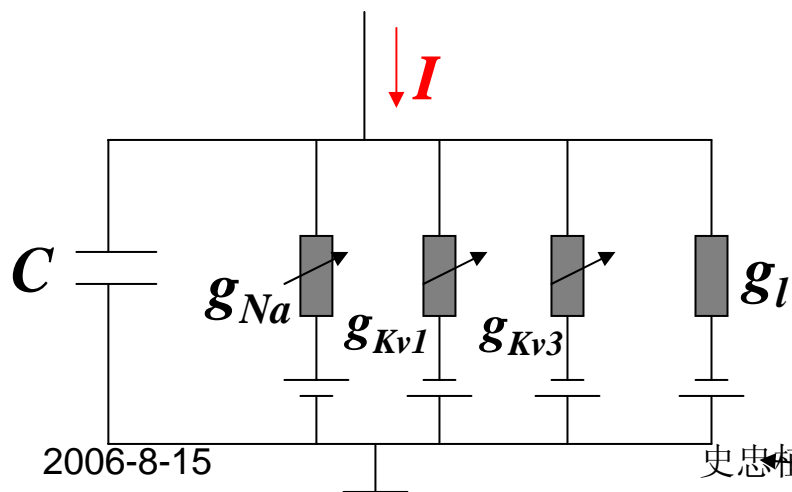
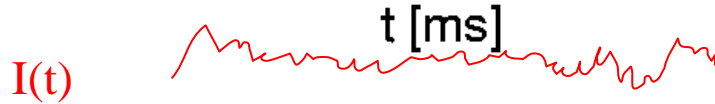
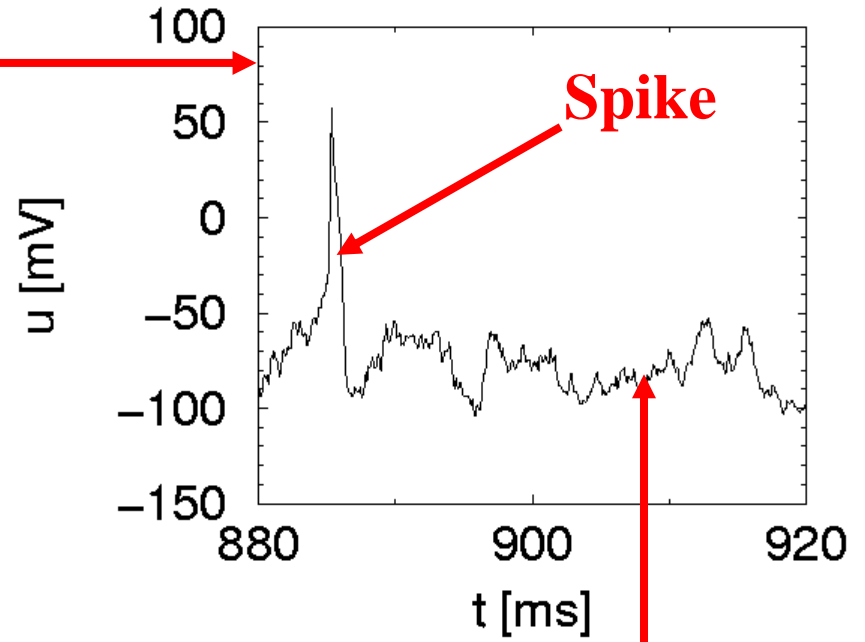
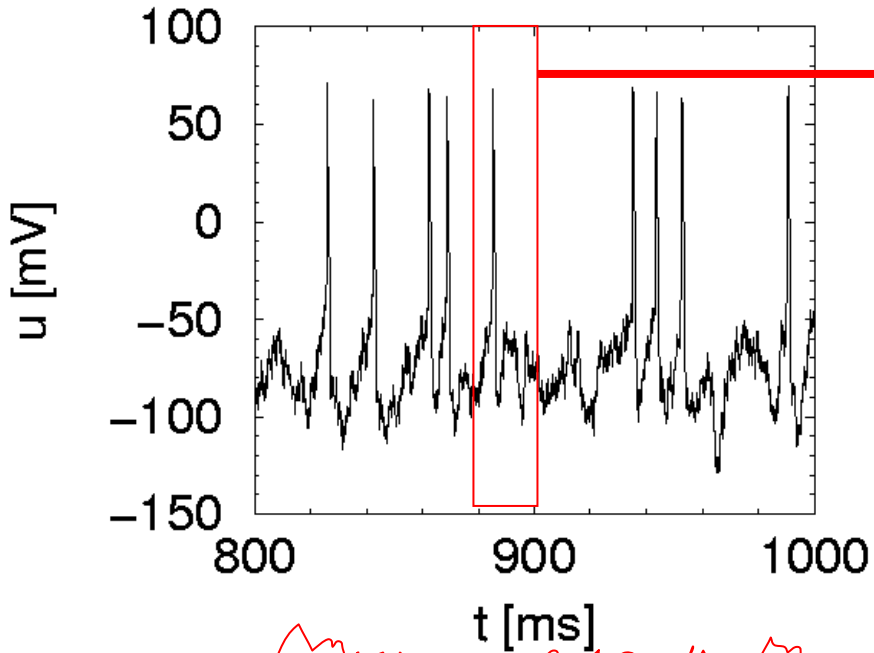
2006-8-15

史忠植 神经计算

Erisir et al, 1999

Hodgkin and Huxley, 1952

Model of fast spiking interneuron

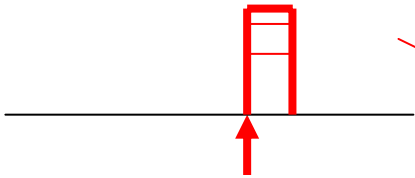


Subthreshold

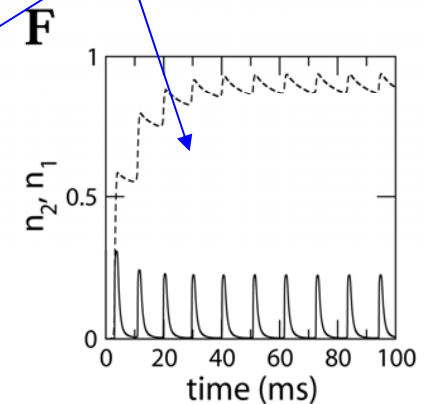
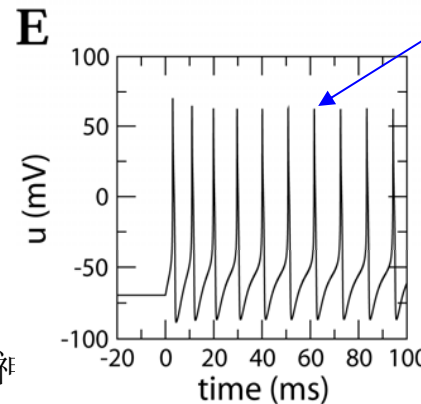
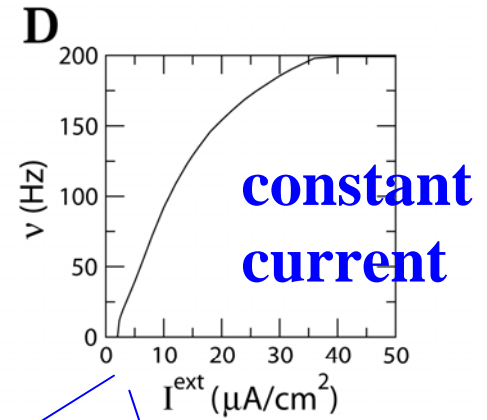
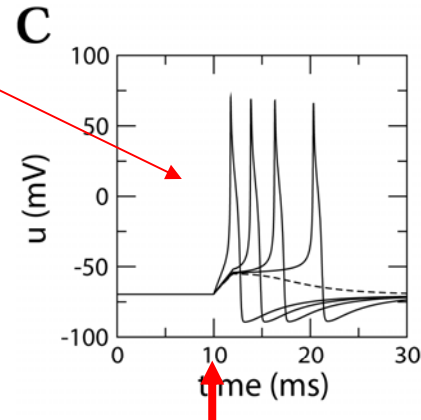
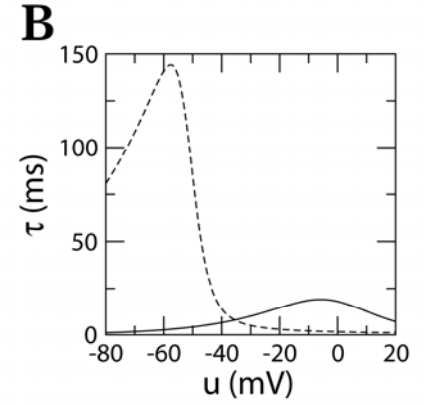
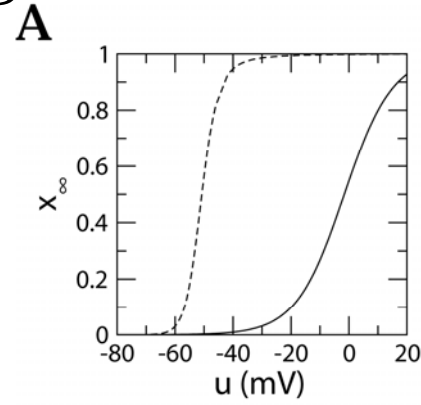
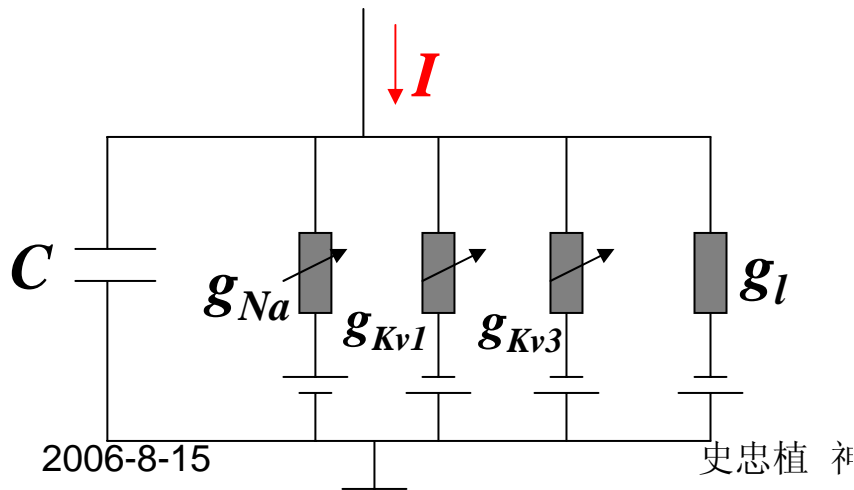
Detailed model, based on ion channels

Model of fast spiking interneuron

Current pulse



Detailed model, based on ion channels



内容提要

- 一、引言
- 二、神经元模型
- 三、离子通道模型
- 四、树突模型
- 五、神经元群
- 六、结束语

Modeling Dendrites – Historical background

The cable equation

Originally developed in the 1850s in the context of Lord Kelvin's calculations regarding the spread of potential in the submarine trans-Atlantic telegraph cable
The study of such PDEs led to the development of *cable theory*

Can be used to describes the dynamics of V_m in thin, elongated neuronal structures

Application of cable theory

1st applied to axons in the 1930's and 40's (Hodgkin and Rushton, 1946; Davis and Lorente de No, 1947)

Application to dendrites began in the 1950's and flourished in the 60's and 70's primarily due to the work of Wilfrid Rall

Linear cable theory

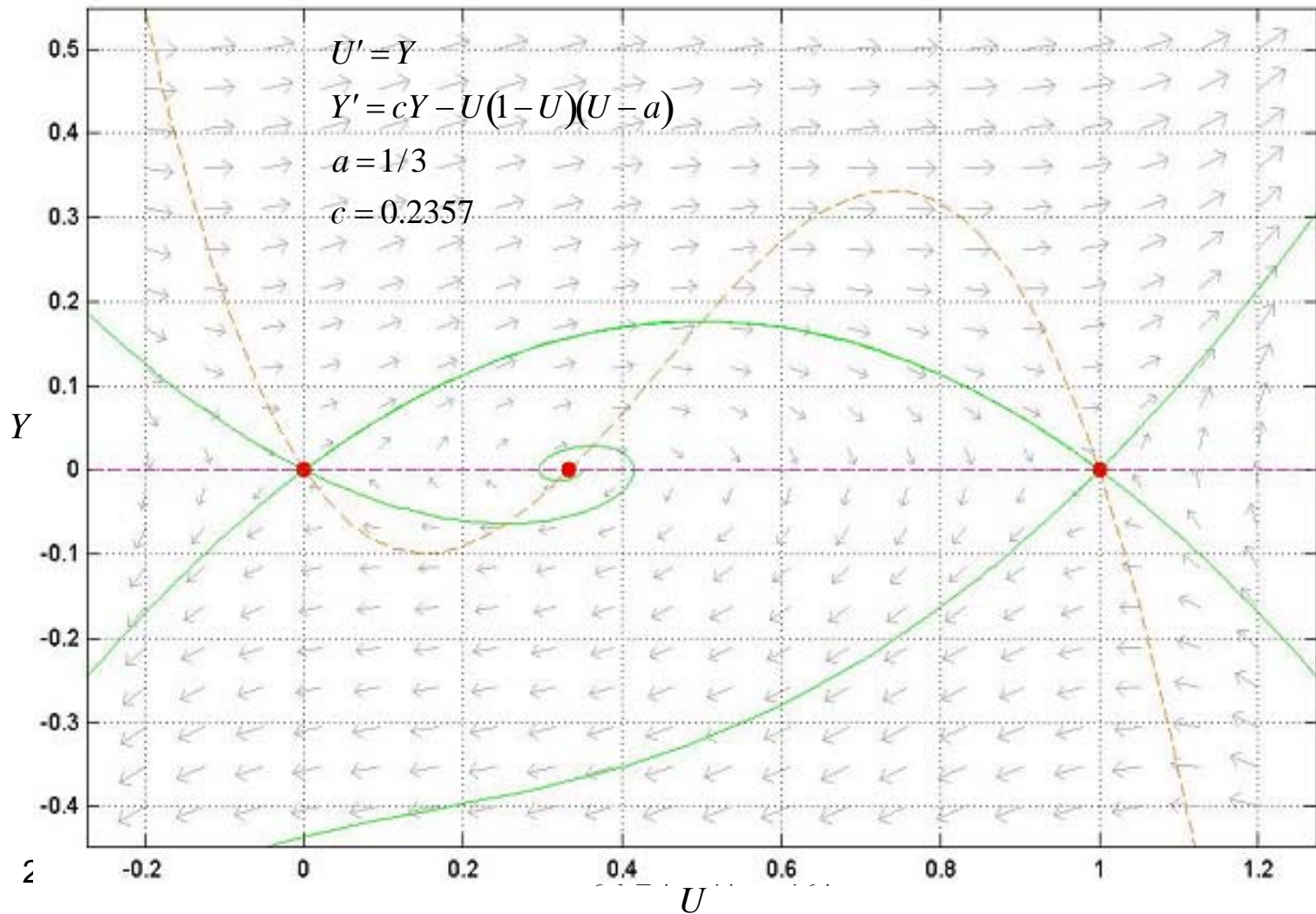
Assumes neuronal processes contain only voltage-independent components

Specifically, we will consider only resistances and capacitance - i.e. a *passive membrane*

Mathematical Modeling

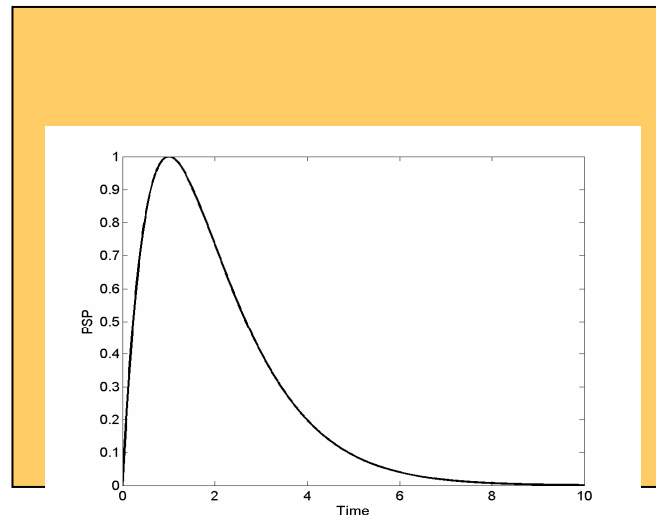
- Mathematical Model Equations
 - Bistable Equation
 - FitzHugh-Nagumo (1961-62)
 - Qualitative, but representative
 - Morris-Lecar (1981)
 - Physiologically motivated
 - Hodgkin-Huxley (1952)

Singular Homoclinic Orbit



Spiking Neuron Model

- Spiking neurons are represented by
 - Voltage across the cell membrane
 - Threshold
- Spikes are generated
 - When membrane potential v crosses some threshold θ
 - Moment of threshold crossing defines the firing time $t^{(f)}$



A Typical Shape of Postsynaptic Potential

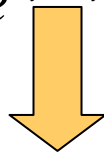
Spiking Neuron Model

- $x(t)$ is internal state variable
- Considering nonlinear dendritic interaction at dendrites (multiplication)

$$x(t) = \sum_{i=1} w_i \varepsilon(t - t_i)$$

$$= \sum_{i=1}^n w_i \frac{t - t_i - \delta_i}{\tau_i} e^{1 - (t - t_i - \delta_i) / \tau_i}$$

$$x_{net} = \sum_{i=1}^n \left[\left(a_i + \frac{b_i t_i}{\tau_i} \right) \left(e^{c_i + d_i t_i} \right) \right]$$



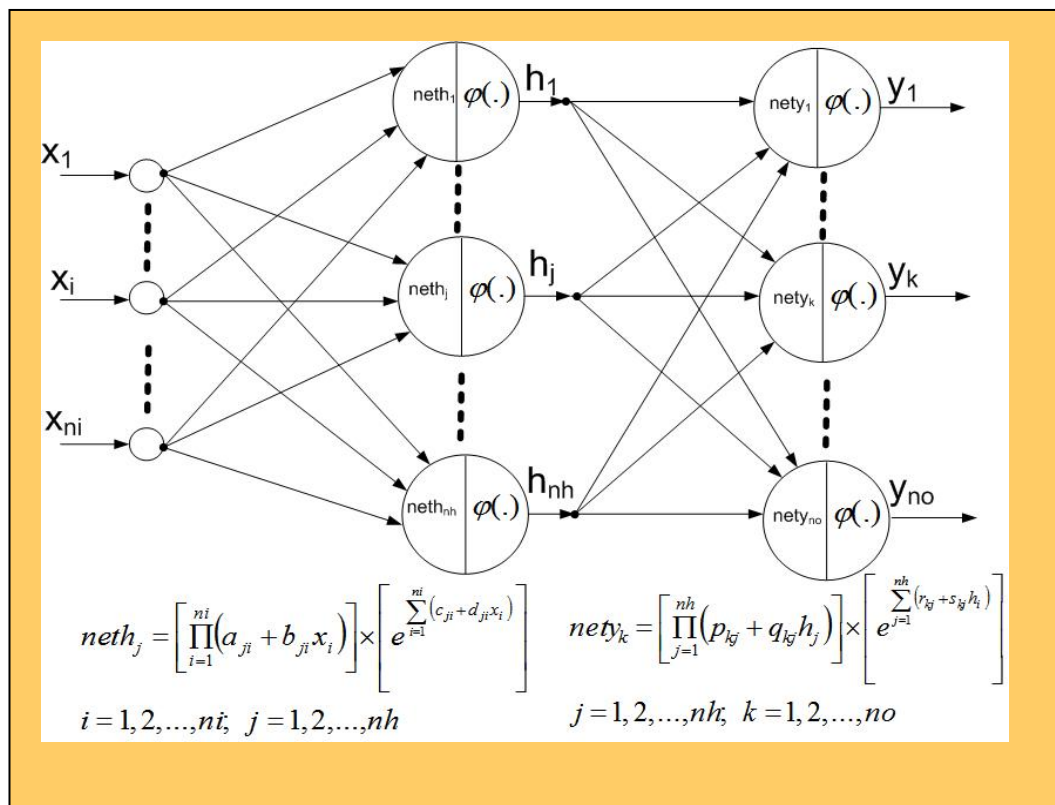
$$x_{net} = \left[\prod_{i=1}^n (a_i + b_i t_i) \right] \times \left[e^{\sum_{i=1}^n c_i + d_i t_i} \right]$$

$$\varepsilon(t) = \frac{t}{\tau} e^{1 - t/\tau}$$

commonly used
spike response function

Artificial Neural Networks Motivated by Spiking Neuron Model

Proposed artificial neural network architecture motivated by spiking neuron model



Prof. Prem K. Kalra & Deepek Mishra, 2006

内容提要

- 一、引言
- 二、神经元模型
- 三、离子通道模型
- 四、树突模型
- 五、**神经元群**
- 六、结束语

功能柱

20世纪60年代末，美国科学家发现，在大脑视觉皮层中，具有相同图像特征选择性和相同感受野位置的众多神经细胞，以垂直于大脑表面的方式排列成柱状结构——功能柱。30多年来，脑研究领域一直将垂直的柱状结构看作大脑功能组织的一个基本原则。但是，传统的功能柱研究还不能阐释视觉系统究竟是如何处理大范围复杂图像信息的。

功能柱

- 1972年：Wilson-Cowan方程来描述功能柱；
- 1990年：Shuster等人模拟视皮层中发现的同步振荡；
- 1993年：Jansen等人提出了耦合功能柱模型产生了类EEG波形和诱发电位；
- 1994年：Fukai设计了功能柱式的网络模型来模拟视觉图样的获取；
- 1997年：Hansel等人根据视皮层朝向柱的结构构建了一个超柱模型，研究其中的同步性和混沌特性，并对朝向选择性的功能柱机理做出解释；
- 1998年：Fransén等人把传统网络中的单细胞代换成多细胞构成的功能柱，来模拟工作记忆

功能柱

中国科学院生物物理所 视觉信息加工重点实验室

中国科学院计算研究所

李速^① 齐翔林^① 胡宏^② 汪云九^①

功能柱结构神经网络模型中的同步 振荡现象

功能柱是一个振荡子，而且表明功能柱可以成为皮层多样化的节律活动的发生源，EEG中的各种节律均可以在结构具有普遍性的功能柱中找到生理基础。

功能柱

Rose-Hindmarsh方程来描述单神经元:

$$\dot{x} = y + ax^3 - bx^2 - z + I_{syn} + I_{stim}$$

$$\dot{y} = c - dx^2 - y$$

$$\dot{z} = r[s(x - x_0) - z]$$

x : 代表膜电位,

y : 表示快速回复电流,

z : 描述慢变化的调整电流,

I_{syn} 表示突触电流,

I_{stim} 表示外界输入

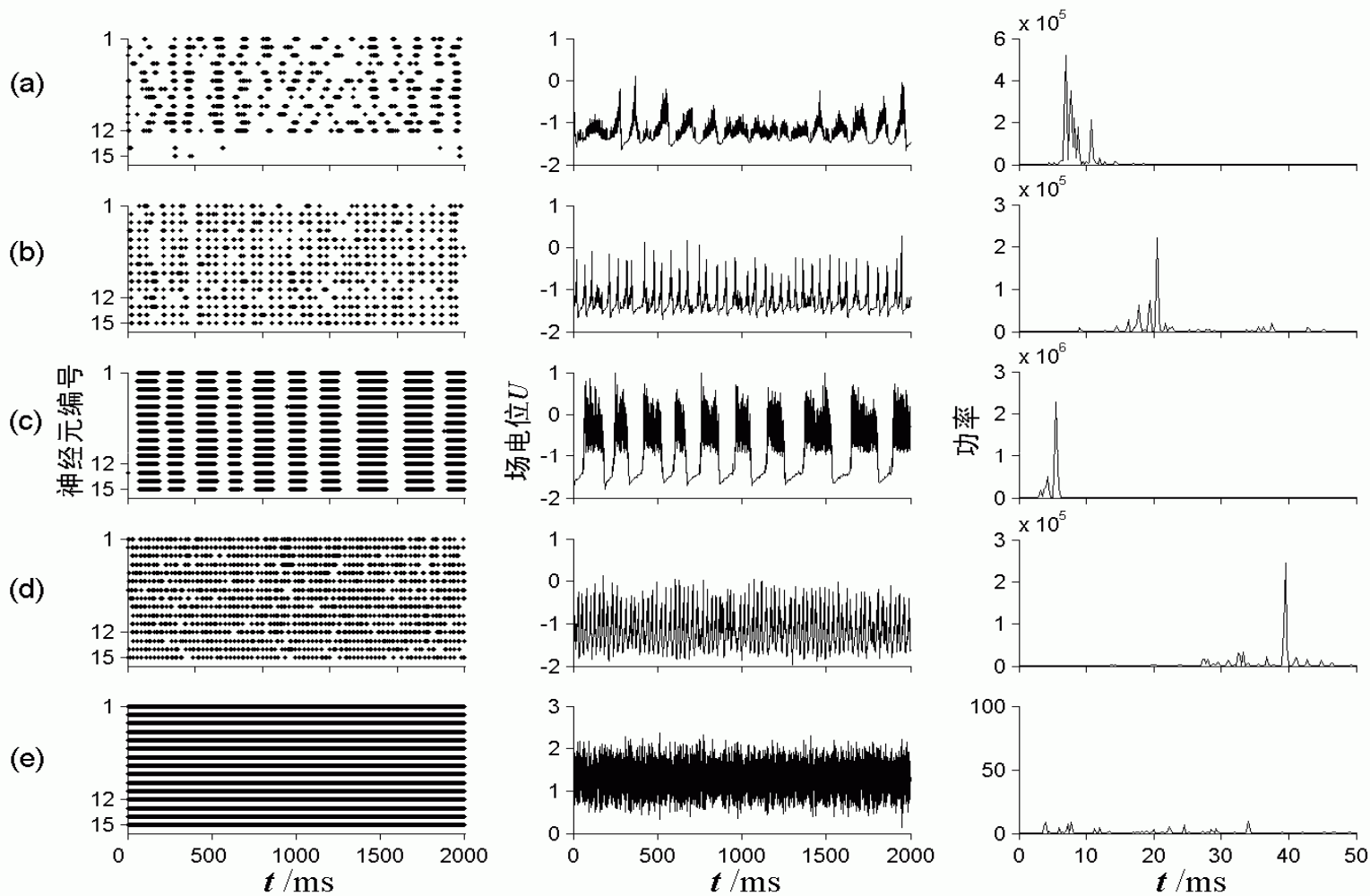
功能柱

模型采用基于电流的突触模型，在突触前细胞的每个动作电位都将触发突触后细胞的 I_{syn} 输入。突触电流 I_{syn} 表示为：

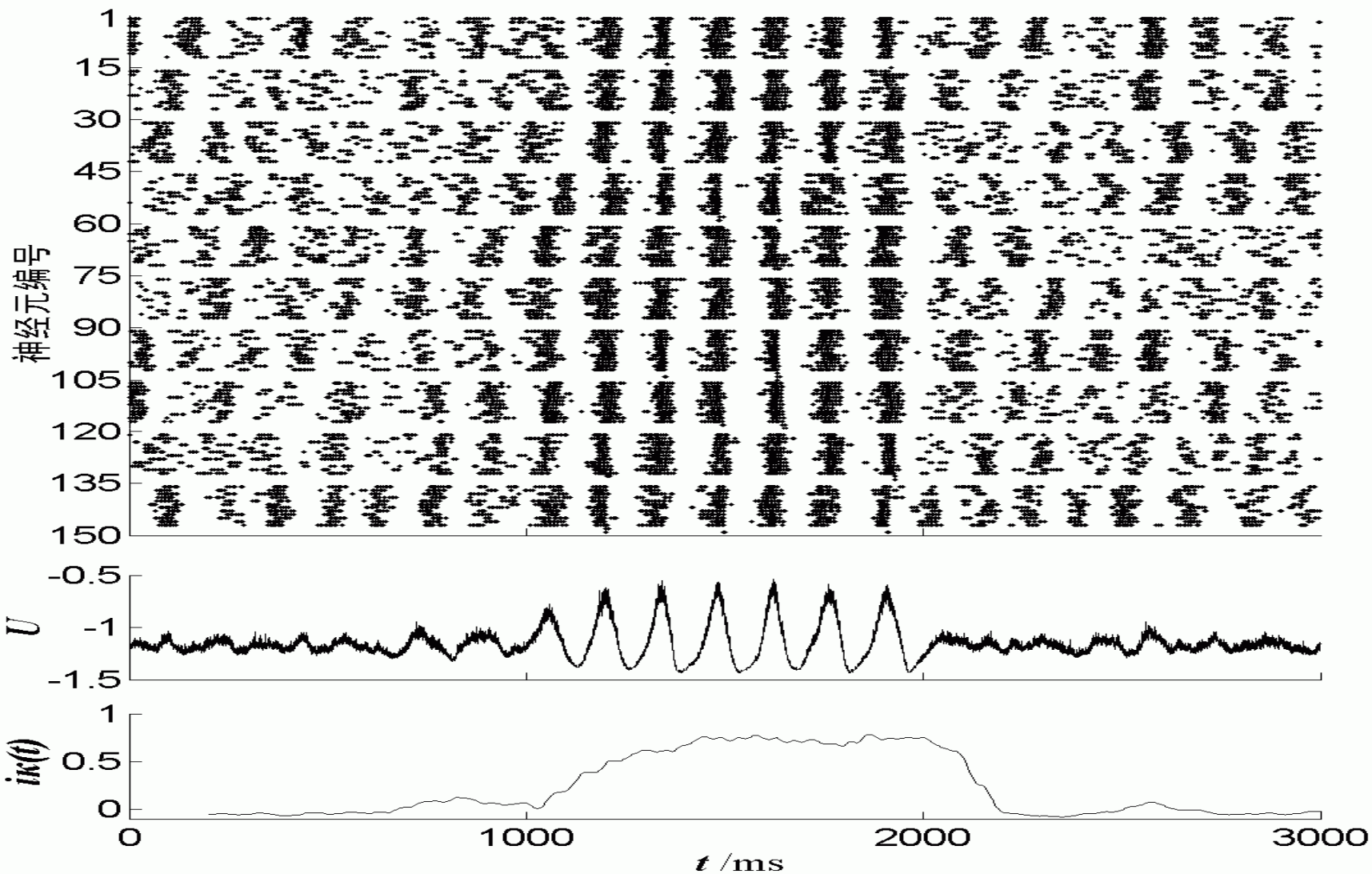
$$I_{syn} = g_{syn} V_{syn} (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2})$$

g_{syn} 为膜电导
 τ_1, τ_2 时间常数
 V_{syn} 表示突触后电位

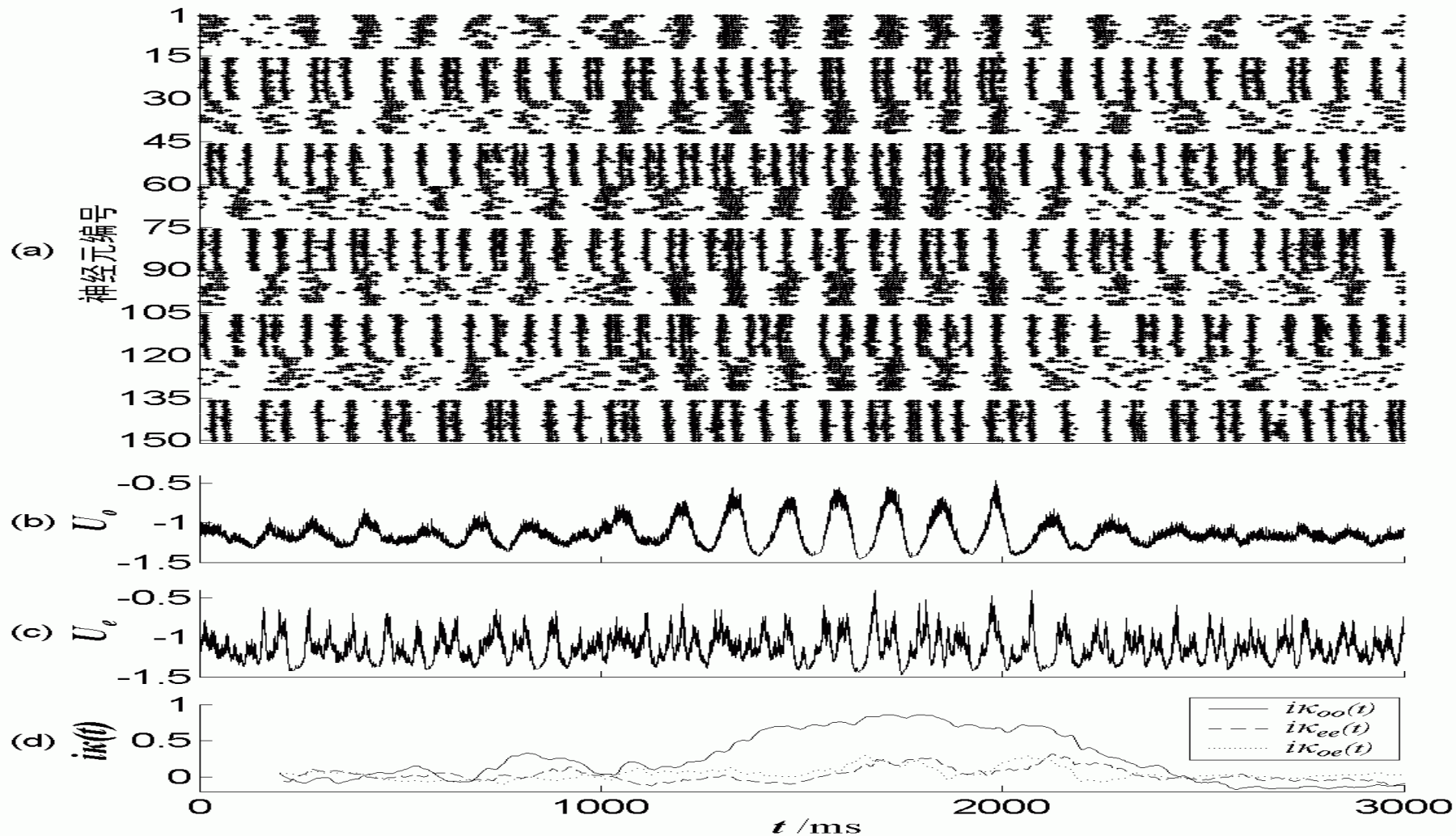
功能柱



同源功能柱



异源功能柱



功能柱

功能柱是一个振荡子，而且表明功能柱可以成为皮层多样化的节律活动的发生源，EEG中的各种节律均可以在结构具有普遍性的功能柱中找到生理基础。

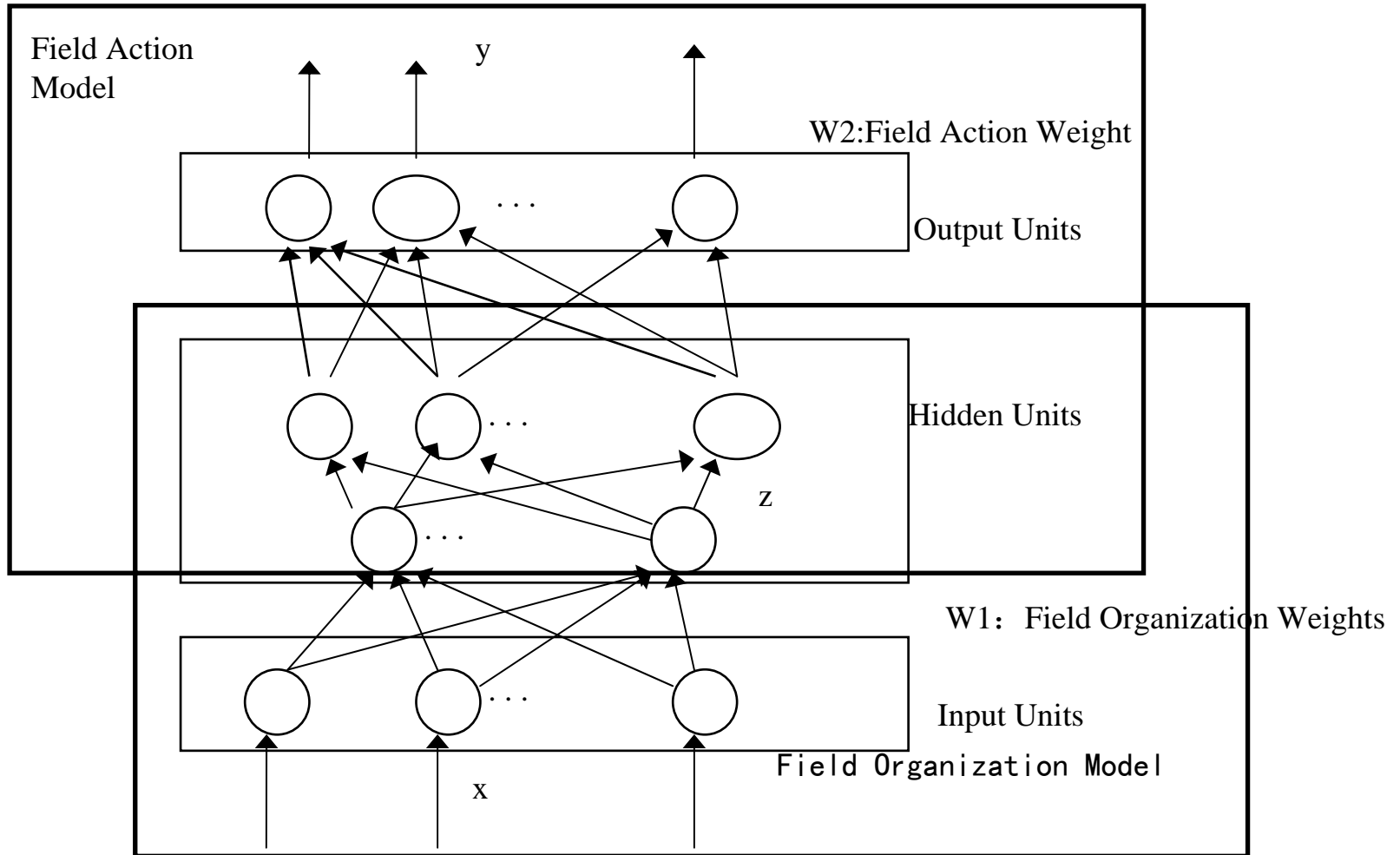
功能柱

功能柱是介于单神经元和皮层脑区之间的一种中间层次的单元，理解这种中间层次的单元的活动特点，能够为脑科学中微观现象和宏观现象的研究之间建立一座桥梁

神经场

神经场研究的出发点是信息处理系统的整体结构，一般的系统表示为非欧氏空间（在一定拓扑结构下形成流形）。研究的一个关键就是建立环境结构流形与神经流形的耦合关系，用流形的思想、拓扑的概念和统计推理来研究整体结构所具有的性质，利用整体不变性质，处理和分析表示结构与神经流形的优化逼近过程。

神经场



神经场

神经场理论框架，体现整体信息处理的结构在两方面：一方面，表示结构的编码和模型结构通过拓扑结构进行表示，具有层次化、模块化的组织，形成树型链结构，模型结构具有扩展成无限模型的性质和分维组织机理，分解成层次化的结构。我们试图用代数拓扑的方法来描述这种结构，体现整体不变性质，神经网络具有对于结构进行模型化的机理，对于系统结构的逼近。另一方面，复杂的模型由简单的模型集成，简单的模型嵌入更复杂的结构中，信息几何研究局部和整体不变度量的关系，研究全局不变量，即研究学习的全局优化过程。

结束语

- 基于神经科学的最新研究成果，开展神经计算的研究
- 神经计算是智能科学的重要部分，需要与神经科学紧密结合，开展交叉研究

Thank You

Question!

Intelligence Science

<http://www.intsci.ac.cn/>

