

# 神经元 Hodgkin-Huxley 模型和突触连接模型

## 一、基于电导的神经元 Hodgkin-Huxley 模型

在静息状态下，神经元膜内外的离子浓度不同形成神经细胞的膜电位。当神经系统受到外界刺激时，膜电位产生的动作电位可以形成电位发放。这些动作电位的峰发放和簇发放形成神经系统的信息传递编码，典型的神经元膜电位可由 Hodgkin-Huxley 模型描述如下：

$$C \frac{dV}{dt} = -g_{Na} m^3 h (V - V_{Na}) - g_K n^4 (V - V_K) - g_L (V - V_L) + I_{\text{external}} + I_{\text{synapse}}$$

$$\frac{dm}{dt} = -(a_m + b_m)m + a_m,$$

$$\frac{dh}{dt} = -(a_h + b_h)h + a_h,$$

$$\frac{dn}{dt} = -(a_n + b_n)n + a_n$$

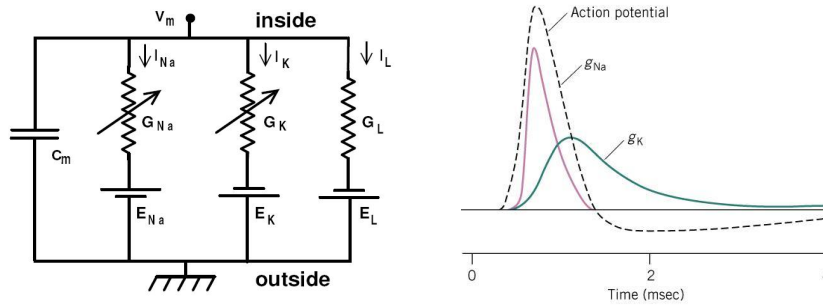


图1 Hodgkin-Huxley 神经元轴突的等效电路和电位图

在 Hodgkin-Huxley 模型中

- (1)  $C$  表示神经元的膜电容， $C = 1 \mu F$ 。
- (2)  $V(t)$  表示神经元的膜电位。
- (3)  $m(t)$ ,  $h(t)$ ,  $n(t)$  描述细胞膜内外离子通道的电导特性。
- (4)  $g_{Na} = 120 mS/cm^2$ ,  $g_K = 36 mS/cm^2$ ,  $g_L = 0.3 mS/cm^2$  分别对应钠离子、钾离子和泄漏电流关于细胞膜的电导系数的最大值。
- (5)  $V_{Na} = 50 mV$ ,  $V_K = -77 mV$ ,  $V_L = -54.5 mV$  分别对应分别对应钠离子、钾离子和泄漏电流的反向电压。
- (6) 模型中离子通道的开关函数分别是

$$a_m = \frac{0.1(V+40)}{1-e^{-0.1(V+40)}}, \quad a_h = 0.07e^{-0.05(V+65)}, \quad a_n = \frac{0.01(V+55)}{1-e^{-0.1(V+55)}}$$

$$b_m = 4e^{-(V+65)/18}, \quad b_h = \frac{1}{1+e^{-0.1(V+35)}}, \quad b_n = 0.125e^{-(V+65)/80}$$

(7)  $I_{\text{external}}$  对应外界对神经元的刺激影响。

(8)  $I_{\text{synapse}}$  对应神经元之间的化学突触电流，一般包含兴奋突触和抑制突触两类。

## 二、化学突触模型

神经元之间的突触连接有化学突触和电突触两类，电突触比较简单，就是直接的耦合连接。化学突触分为兴奋突触和抑制突触两类，兴奋型突触模型的代表是 AMPA，抑制型突触模型的代表是 GABA（ $I_{\text{synapse}}^{\text{AMPA}}$  是兴奋突触电流， $I_{\text{synapse}}^{\text{GABA}}$  是抑制突触电流）。

### (1) 兴奋型突触模型-谷氨酸能突触（AMPA）

$$\begin{cases} I_{\text{synapse}}^{\text{AMPA}} = g_{\text{AMPA}} * r * (V_{\text{post}} - E_{\text{AMPA}}), \\ \frac{dr}{dt} = \alpha * S(V_{\text{pre}}) * (1-r) - \beta * r, \\ S(V_{\text{pre}}) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{V_{\text{pre}} - V_p}{k_p}\right)}. \end{cases}$$

参数： $g_{\text{AMPA}}=0.35 \sim 1 \text{ nS}$  是最大电导， $r$  受体开放状态的比例， $V_{\text{pre}}$  和  $V_{\text{post}}$  是突触前和突触后电压， $E_{\text{AMPA}}=0 \text{ mV}$  是逆转电位， $\alpha=1.1 \times 10^6 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ， $\beta=190 \text{ s}^{-1}$ ， $V_p=2 \text{ mV}$ ， $K_p=5 \text{ mV}$ 。

### (2) 抑制型突触模型-GABA 能突触（GABA）

$$\begin{cases} I_{\text{synapse}}^{\text{GABA}} = g_{\text{GABA}} * r * (V_{\text{post}} - E_{\text{GABA}}), \\ \frac{dr}{dt} = \alpha * S(V_{\text{pre}}) * (1-r) - \beta * r, \\ S(V_{\text{pre}}) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{V_{\text{pre}} - V_p}{k_p}\right)}. \end{cases}$$

参数： $g_{\text{GABA}}=0.25 \sim 1.2 \text{ nS}$  是最大电导， $r$  是受体开放状态的比例， $V_{\text{pre}}$  和  $V_{\text{post}}$  是突触前和突触后电压， $E_{\text{GABA}}=-80 \text{ mV}$  是逆转电位， $\alpha=5 \times 10^6 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ， $\beta=180 \text{ s}^{-1}$ ， $V_p=2 \text{ mV}$ ， $K_p=5 \text{ mV}$ 。