

忆容膜神经元的能量特征与电路实现

王斌驰^{1,2}, 郭奕彤³, 任国栋^{1,2}, 马军²

¹兰州理工大学微电子现代产业学院, 中国兰州市, 730050

²兰州理工大学物理系, 中国兰州市, 730050

³中北大学数学学院, 中国太原市, 030051

摘要: 在神经元电路中, 电容型元件的输出电压可被映射为无量纲变量, 其放电模式与生物神经元中检测到的膜电位特征相似。为进一步考虑细胞膜形变效应, 在神经元电路中引入忆容器, 从而提高模型在不同生理与环境条件下模拟神经元行为的能力。将电容器与忆容器通过线性电阻连接, 并与包含电感器和非线性电阻的其它支路电路并联。通过将该神经元电路的物理方程等效转换为神经元理论模型, 系统讨论了具有双层膜结构和两个电容变量的神经元电活动特征。推导了一个无量纲神经元模型及其对应的能量函数。将神经元电路的场能量函数转化为等效的哈密顿能量函数, 并通过赫姆霍兹定理进一步验证。哈密顿能量函数的平均值可作为预测随机共振发生的指标, 并通过分析变异系数分布曲线进行验证。结果表明, 神经元放电模式与能量水平密切相关。因此, 提出一种自适应控制策略来调节神经元电活动的模态转迁。构建了等效模拟电路以验证数值结果, 进而证明了该神经元模型的可靠性。

关键词: 神经元电路; 神经元模型; 哈密顿能量; 忆容器; 相干共振

<https://doi.org/10.1631/ENG.ITEE.2025.0024>