

第11讲

第11讲：量子计算与类脑计算的融合

牛温佳 教授

北京交通大学·网络空间安全学院

本讲内容

- 1 11.1 量子神经网络 (QNN)
- 2 11.2 量子-经典混合计算
- 3 11.3 从QNN到量子脉冲神经网络 (QSNN)
- 4 11.4 量子类脑计算的发展趋势
- 5 思考题与小结

🎯 学习目标

了解量子神经网络的基本架构

理解量子-经典混合计算范式

认识量子类脑计算的发展趋势

11.1 量子神经网络 (QNN)

Section 11.1 量子神经网络 (QNN)

11.1 量子神经网络 (QNN)

11.1.1 为什么要用量子神经网络?

经典深度神经网络虽然强大，但在处理高维数据或大规模模型时，计算复杂度急剧上升，训练成本高昂。量子神经网络 (QNN) 通过引入量子计算的潜力，为神经网络的发展提供了全新的方向——利用量子叠加和纠缠原理，理论上可以在某些任务上实现超越经典的性能。

11.1.2 QNN的基本架构

一个通用的QNN包含三个核心组件：

1. **输入层 (编码)**：将经典数据转换为量子态。这可以通过角度编码、振幅编码等方式实现。
2. **变分量子线路 (Ansatz)**：由一系列包含可训练参数的量子门组成，是QNN的核心计算单元。参数化的旋转门 (RX、RY、RZ) 配合纠缠门 (CNOT、CZ) 构成基本的计算层。

11.1 量子神经网络 (QNN) (续)

3. **测量层**: 通过泡利算符测量从量子态中提取经典可读的信息。

11.1.3 QNN的训练

QNN的训练在概念上与经典神经网络类似——使用梯度下降方法优化参数。不同的是, QNN的梯度计算需要使用特殊的**参数偏移规则** (Parameter-Shift Rule), 这是专门为量子机器学习设计的梯度计算方法。

参数偏移规则的核心思想是: 对于参数化量子门, 可以通过将参数分别正向和负向移动固定值 (通常是 $\pi/2$), 运行量子线路得到输出, 再计算差值来获得精确梯度。

11.2 量子-经典混合计算

Section 11.2 量子-经典混合计算

11.2 量子-经典混合计算

11.2.1 为什么需要混合?

当前量子计算机处于NISQ (含噪中型量子) 时代:

- 量子比特数量有限 (几十到几百个)
- 门操作有较大噪声
- 退相干时间短

因此, 直接用量子计算机完成端到端的计算任务并不现实。量子-经典混合计算将计算任务分解: 量子部分处理适合量子加速的子任务, 经典部分处理其余任务。

11.2 量子-经典混合计算（续）

11.2.2 PennyLane平台

PennyLane是目前最主流的量子-经典混合编程框架之一。它的核心特点包括：

- **可微分量子线路**：量子线路可以像经典神经网络层一样参与梯度计算
- **与PyTorch/TensorFlow集成**：量子层嵌入到经典的深度学习 workflows 中
- **多硬件支持**：同一段代码可以在不同量子模拟器或真实量子硬件上运行

11.2 量子-经典混合计算（续）

11.2.3 一个简单的混合模型

在PennyLane中，你可以创建一个嵌入经典深度学习框架的量子节点（QNode），就像添加一个特殊的神经网络层。这种量子-经典混合模型在图像分类、生成对抗网络等任务中已展现出独特的性能。

11.3 从QNN到量子脉冲神经网络 (QSNN)

Section 11.3 从QNN到量子脉冲神经网络 (QSNN)

11.3 从QNN到量子脉冲神经网络 (QSNN)

将量子计算的并行性与脉冲神经网络的时空编码能力结合起来，就形成了**量子脉冲神经网络** (Quantum Spiking Neural Network, QSNN)。这是一种新兴的混合计算范式，兼具以下优势：

- **量子优势**：高维希尔伯特空间中的特征映射和并行计算
- **类脑优势**：脉冲编码的时序信息处理和低功耗特性
- **防御潜力**：非连续的信息编码方式天然阻断了对抗梯度传播

11.4 量子类脑计算的发展趋势

Section 11.4 量子类脑计算的发展趋势

11.4 量子类脑计算的发展趋势

量子类脑计算通过融合量子叠加、纠缠等独特效应与类脑智能的脉冲编码、神经网络自组织机制，有望实现信息处理方式的革命：

- **量子增强特征提取**：利用量子态的高维空间进行更强大的特征学习
- **脉冲编码的量子实现**：用量子比特直接编码脉冲序列
- **混合计算架构**：量子神经网络与脉冲神经网络的深度协同

📖 延伸阅读

📖 PennyLane 官方文档: <https://pennylane.ai/>

📖 Bergholm, V. et al. PennyLane: Automatic differentiation of hybrid quantum-classical computations. arXiv, 2018.

1. 量子神经网络的"可训练参数"和经典神经网络的"权重"在本质上有什么不同?
2. 为什么在NISQ时代, 量子-经典混合计算是实用的选择?
3. 量子脉冲神经网络 (QSNN) 相比单独的量子神经网络或脉冲神经网络, 可能有什么独特优势?

本讲小结

- ✓ 11.1 量子神经网络 (QNN)
- ✓ 11.2 量子-经典混合计算
- ✓ 11.3 从QNN到量子脉冲神经网络 (QSNN)
- ✓ 11.4 量子类脑计算的发展趋势
- ✓ 思考与讨论

感谢聆听

第11讲 · 量子计算与类脑计算的融合