

one way Quantum Computing (MBQC)

量子变分求解器

Liu Kuncheng

中国科学技术大学

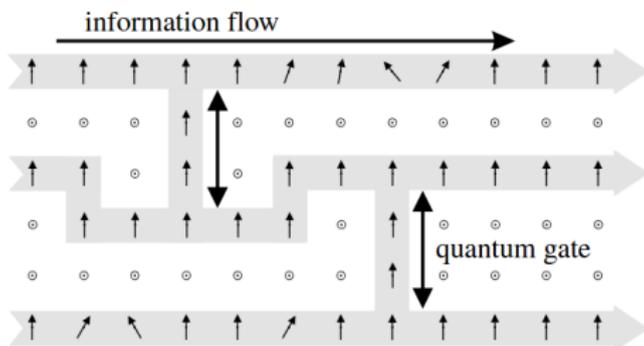
2025 年 2 月 28 日

目录

- 1 基于测量的量子计算
- 2 Experimental Realization
 - 实验一: 检测 cluster 的生成质量
 - 实验二: Grover' s algorithm
 - 实验三: Quantum Gate

基于测量的量子计算

The one-way quantum computer 不是在单个 qubits 上进行逻辑计算. 而是通过制备 cluster state, 对 cluster state 进行测量.
在 cluster state 上将量子信息驱赶到临近的比特处, 因此我们可以在 cluster 平面上用测量操作“刻蚀”出一条量子信息流动的路径



具体的分为这几步

- 1 制备 “cluster state” , 并划分为 S_1 和 S_2 两部分
- 2 依次对 S_1 部分执行适应性单 qubit 测量, 即该过程中的测量操作都是作用在单 qubit 上的, 且后一步测量操作的设置依赖于前一步的测量结果
- 3 对 S_2 中 qubit 进行泡利修正, 根据第 (2) 步 S_1 中测量的结果, 对作为输出态的 S_2 部分执行的泡利操作 X 和 Z , 从而确定性地得到目标态

图态 $|G\rangle$ 的具体制备过程为：

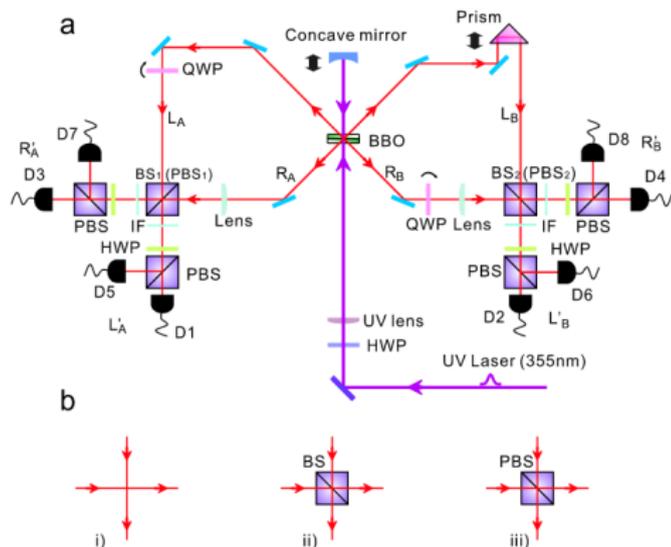
- 1 首先将所有顶点处的 qubit 制备为叠加态 $|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/2$
- 2 然后对所有邻接顶点上的一对 qubit 执行 $CZ^{(ab)}$
 $\rightarrow |G\rangle = \left(\prod_{\{a,b\} \in E} CZ^{(ab)} \right) \otimes |+\rangle$
- 3 例如如果要实现任意旋转门 $U = HR_z(-\gamma)R_x(-\beta)R_z(-\alpha)$ 可以用 CZ 制备如图的图态



以上线路等效于先用 3 个 CZ 门作用到输入态 $|+\rangle_1|+\rangle_2|+\rangle_3|+\rangle_4$, 再分别在基 $|\pm\alpha\rangle, |\pm\beta\rangle, |\pm\gamma\rangle$ 中测量 qubit 1, 2 和 3 并得到 qubit 4 的态为实现任意旋转门的效果 $|\psi_{out3}\rangle = e^{-i(\alpha+\beta+\gamma)/2} U|+\rangle$

Experimental Realization

- (UV) light 进入 BBO 并经过镜子反射再次经过 BBO, 产生了极化方向纠缠的一对光子. 纠缠态为 $(|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle)/\sqrt{2}$ (path mode L)
 $(|0\rangle|0\rangle - |1\rangle|1\rangle)/\sqrt{2}$ (path mode R)
- 获得 state $\frac{(|H\rangle_A|H\rangle_B + |V\rangle_A|V\rangle_B)|L\rangle_A|L\rangle_B + e^{i\theta}(|H\rangle_A|H\rangle_B - |V\rangle_A|V\rangle_B)|R\rangle_A|R\rangle_B}{2}$ 调整镜子的距离使得 $\theta = 0$ 得到 cluster state
 $|C_4\rangle = \frac{(|0000\rangle_{1234} + |0011\rangle_{1234} + |1100\rangle_{1234} - |1111\rangle_{1234})}{2}$,
- 实验一: 检测 cluster state 生成状态**
- 评价 quality of the state, 引入 witness:
 $\mathcal{W} = \frac{[4I^{\otimes 4} - (XXIZ + XXZI + IIZZ + IZXX + ZIXX + ZZII)]}{2}$



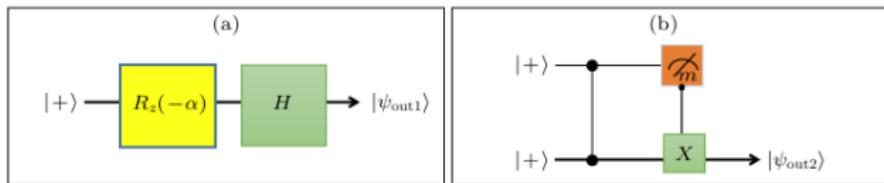
- ⑤ 4 个 qubit 的状态为 $|H(V)\rangle |H(V)\rangle |R(L)\rangle |R(L)\rangle$
- ⑥ 分别对 XXIZ XXZI IIZZ IZXX ZIXX ZZII 六种实验设置进行测量
 - ① (i) 用于 Z measurement , (ii) 用于 X measurement (spatial mode $|R(L)\rangle$)

- ② (iii) 同时用于 (spatial mode $|R(L)\rangle\rangle$) 和 (polarization $|H(V)\rangle\rangle$) Z measurement
- ③ α phase shifter(半波片旋转特定角度) 在 (ii) 之前插入用于 an arbitrary measurement along basis B
- ④ **问题**:对具体量子实现测量的线路不熟悉, I and X measurement for (polarization $|H(V)\rangle\rangle$) 不知道具体装置
- ⑦ 从 D1-D8 读取数据, 得到 6 种不同设置下的 visibility value(**问题**:如何从 photon detector 的数据计算 visibility value? 是: 接受光子数/发射脉冲数 吗?)

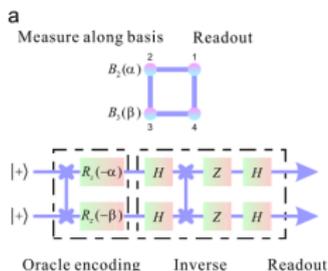
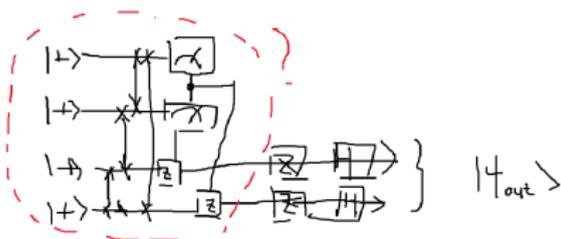
实验二:Grover's algorithm

- 光子经过 BS 得到 $|+\rangle = |0\rangle + |1\rangle$ (50%50% 反射 or 透射)
- 图态中 connect line 相邻的 node 进行 CZ 操作 (问题: 具体的光学实现是什么?)
- 对第一个 qubit 执行基 $|\pm_\alpha\rangle = (|0\rangle \pm e^{i\alpha}|1\rangle)/\sqrt{2}$ 的测量, 所得结果 $m \in \{0, 1\}$, 相应第 2 个 qubit 所处态为 $(|+\rangle + (-1)^m e^{-i\alpha}|-\rangle)/\sqrt{2}$. 因此为了确定性得到 $|\psi_{out1}\rangle$, 图 2(b) 中以 m 作为控制位对第 2 个 qubit 做泡利 X 修正, 所得输出态为

$$\begin{aligned}
 |\psi_{out2}\rangle &= X^m(|+\rangle + (-1)^m e^{-i\alpha}|-\rangle)/\sqrt{2} \\
 &= (|+\rangle + e^{-i\alpha}|-\rangle)/\sqrt{2} \\
 &= e^{-i\alpha/2} |\psi_{out}\rangle.
 \end{aligned}$$



这就相当于在 (b) 上第一个 qubit 进行测量然后结果 m 影响到第二个 q-bit, 等价于实现 (a) 电路 旋转门 +H 门 (问题: 具体如何实现 b? 在 fig1 中)



- 通过以上方法, 制备图 a 中电路和图态 (问题: a 中电路是否与上图 (左) 对应?)
- 进行量子搜索 Grover 算法

- ① 形成 (a) 图态, 制备 $|+\rangle_1 |+\rangle_4$, 在 $|00\rangle |01\rangle |10\rangle |11\rangle$ 种标记搜索态例如 $|00\rangle$
 - ② 通过操作 U 的作用, 把想要搜索的态的幅值翻转过来, 其他正交的态完全不变
 - ③ 可以根据各个基态的幅值计算出均值, 然后按照这个均值镜像翻转各个基态的幅值
 - ④ 重复上面步骤
- ⑥ 文章通过调整 2,3qubit 测量态为 π 搜索 $|00\rangle$, (问题:具体如何实现图态 a, 并且如何迭代)

实验三:Quantum Gate

- 1 制备相应图态,
- 2 测试 fidelities of output states(问题:具体实现)
- 3 (不懂:对 qubit 的各种测量操作形成如图电路)

References