量子计算

—基础篇

Quantum Computing

网址：www.qubits.top

Calvin Tang

179209347@qq.com

介绍

教程简介：
- 面向对象：量子计算初学者
- 依赖课程：线性代数，量子力学（非必需）

知乎专栏：
https://www.zhihu.com/column/c_1501138176371011584

Github & Gitee 地址：
https://github.com/mymagicpower/qubits
https://gitee.com/mymagicpower/qubits

*** 版权声明：**
- 仅限用于个人学习
- 禁止用于任何商业用途

介绍

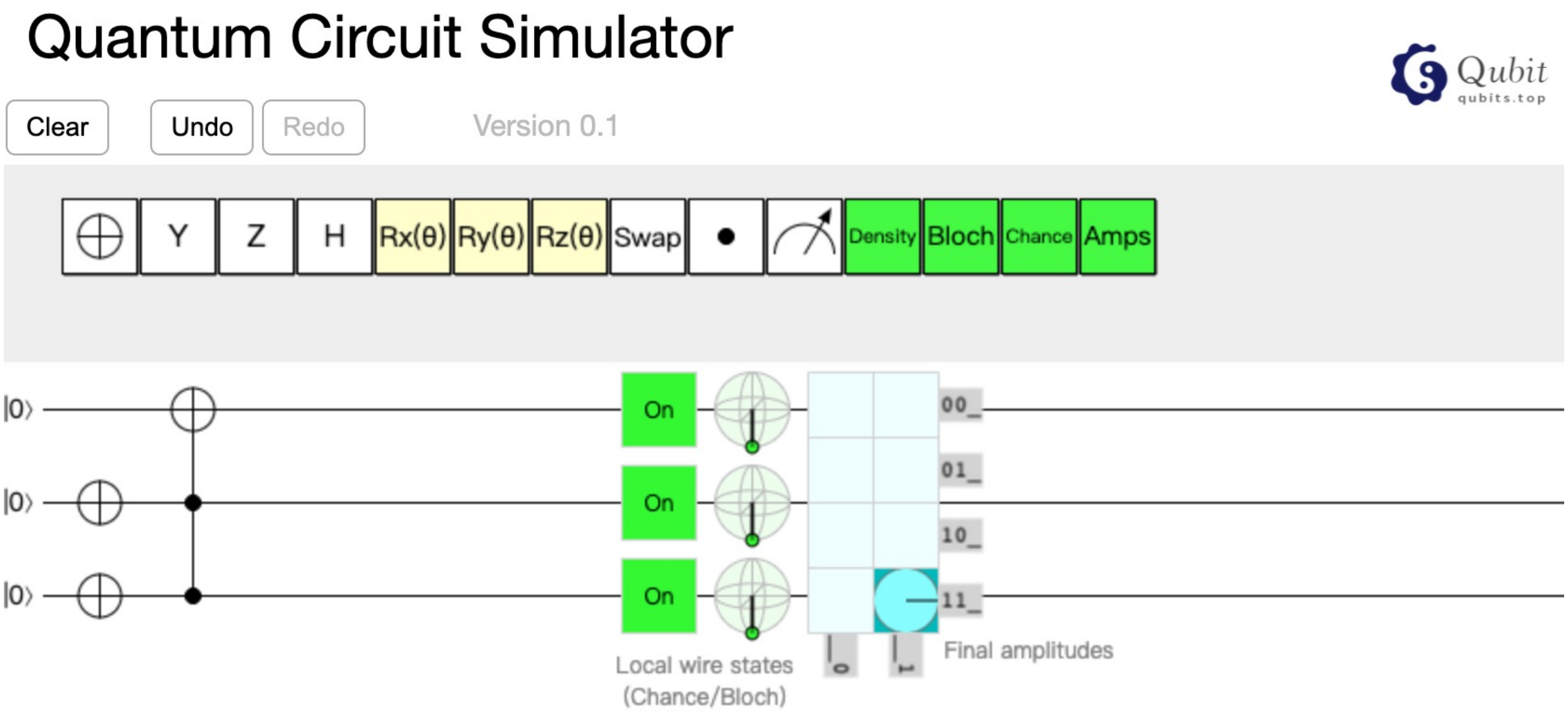
本开发教程基于我开源的量子线路模拟器 – **circuit_weaver** 编写。

- 项目价值：学习基本的线路设计，直观了解量子门与量子态演化

Github & Gitee 代码地址：
https://github.com/mymagicpower/qubits/tree/main/circuit_weaver
https://gitee.com/mymagicpower/qubits/tree/main/circuit_weaver

量子线路模拟器

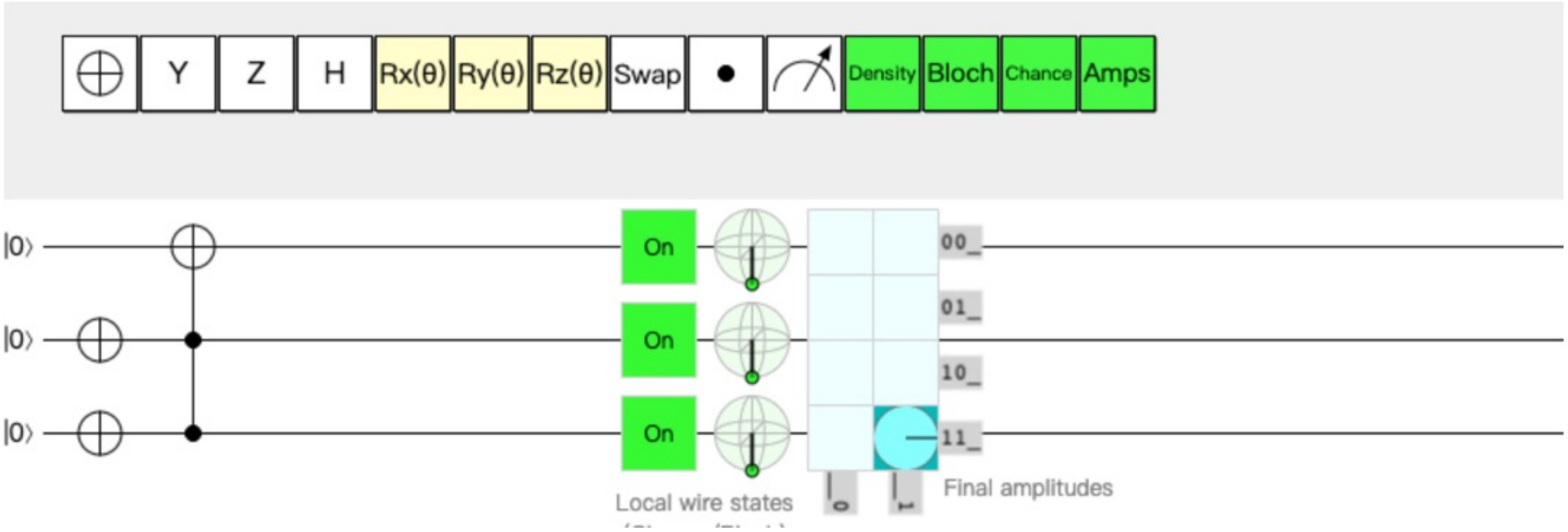
本节内容基于开源的QuantumWeaver编写，可以在线测试使用。
http://qubits.top/CircuitWeaver.html



量子线路介绍

所谓量子线路，从本质上是一个量子逻辑门的执行序列，它是从左至右依次执行的。

量子线路，也称量子逻辑电路是最常用的通用量子计算模型，表示在抽象概念下，对于量子比特进行操作的线路。组成包括了量子比特、线路（时间线），以及各种逻辑门。最后常需要量子测量将结果读取出来。



Pauli-X (NOT) 门

Pauli-X 作用在单量子比特上，跟经典计算机的 NOT 门的量子等价，将量子态翻转，量子态变换规律是：

$$|0\rangle \rightarrow |1\rangle$$
$$|1\rangle \rightarrow |0\rangle$$

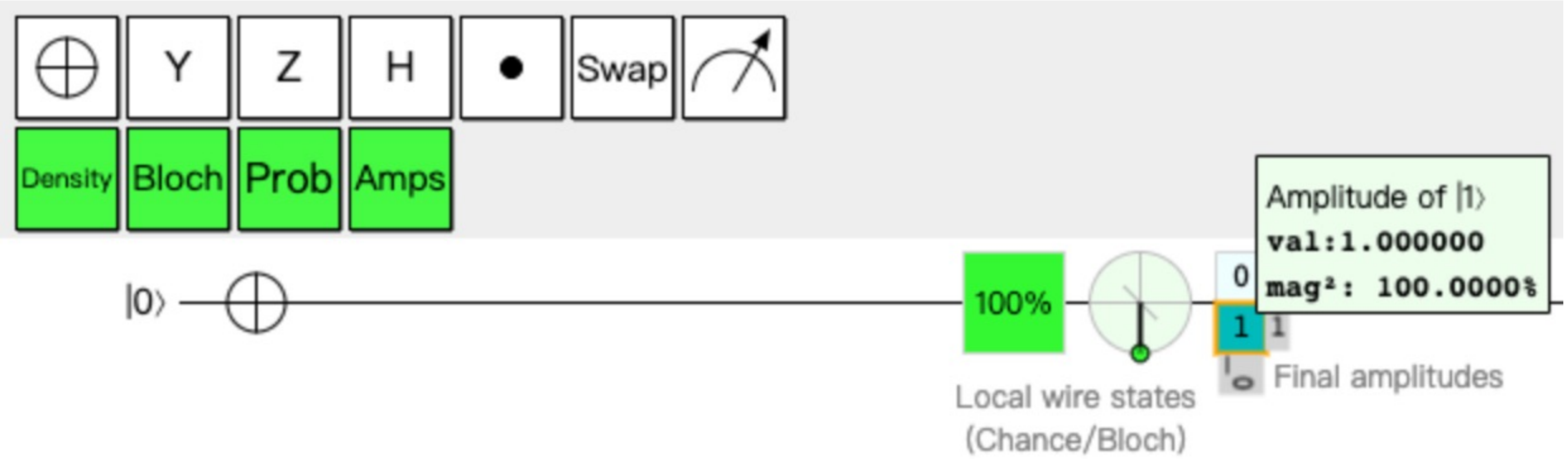
Pauli-X 门矩阵形式为泡利矩阵σ_x，即：

$$X = \sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Pauli-X 门又称为NOT门，其量子线路符号：

X 门作用在基态 $|0\rangle$：

$$X|0\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = |1\rangle$$



Pauli-Y 门

Pauli-Y 作用在单量子比特上，作用相当于绕布洛赫球 Y 轴旋转角度π.

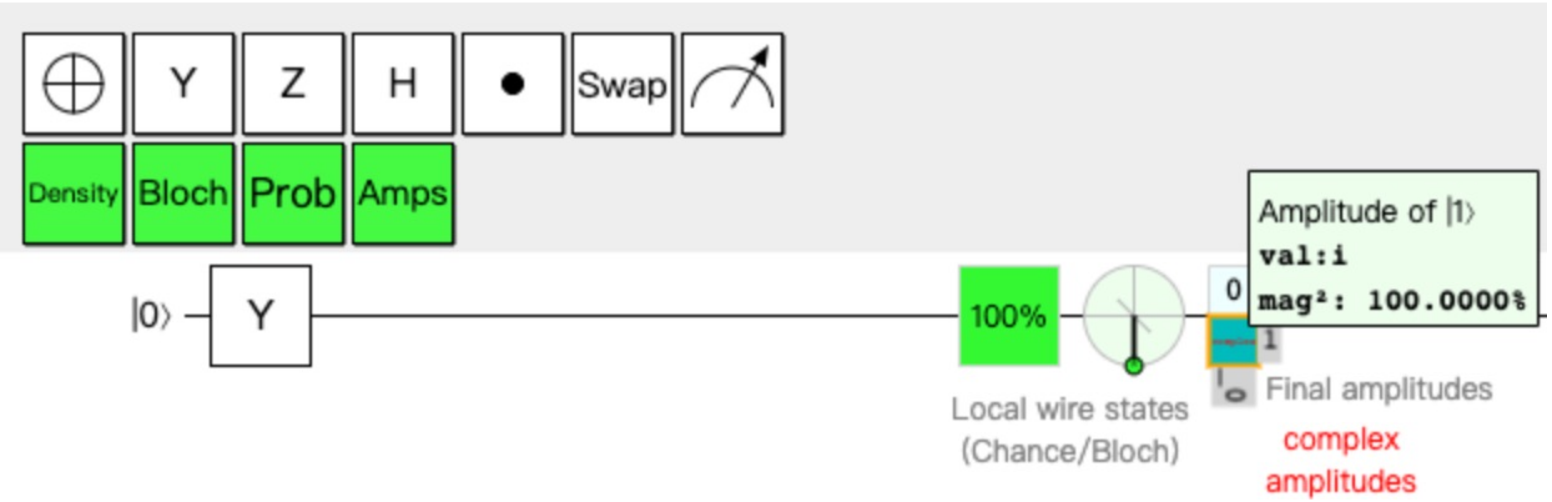
Pauli-Y 门矩阵形式为泡利矩阵σ_y，即：

$$Y = \sigma_y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$$

Pauli-Y 门，其量子线路符号：

Y 门作用在基态 $|0\rangle$：

$$Y|0\rangle = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ i \end{bmatrix} = i \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = i|1\rangle$$



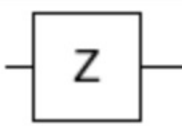
Pauli-Z 门

Pauli-Z 作用在单量子比特上，作用相当于绕布洛赫球 Z 轴旋转角度π.

Pauli-Z 门矩阵形式为泡利矩阵σ_z，即：

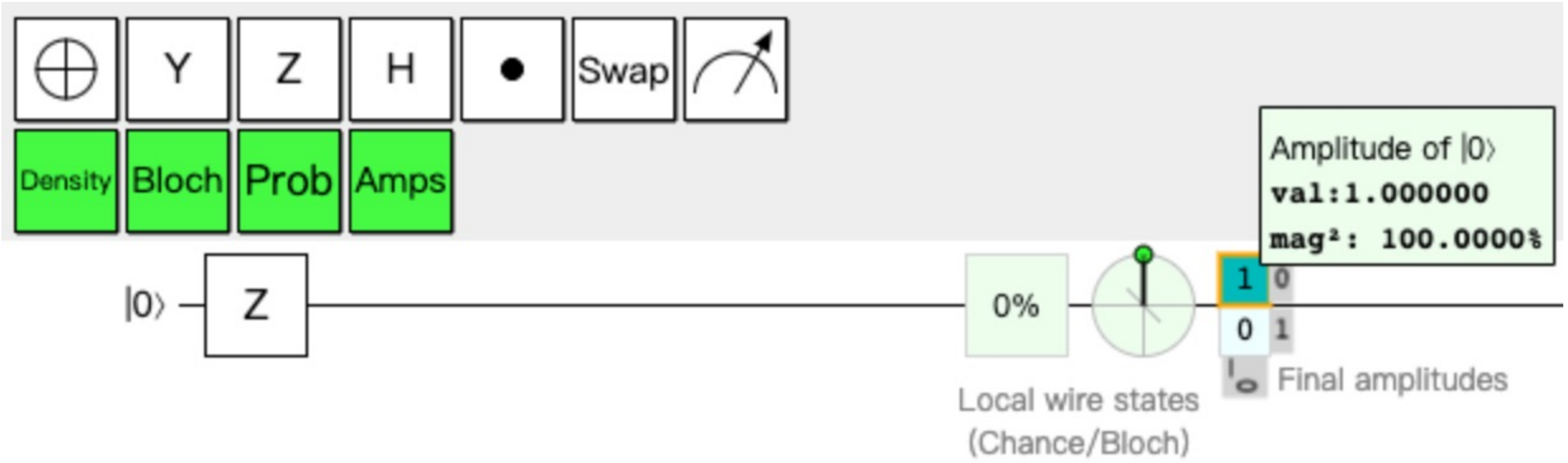
$$Z = \sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Pauli-Z 门，其量子线路符号：



Z 门作用在基态 |0⟩ ：

$$Z|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = |0\rangle$$

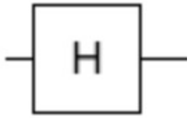


H (Hadamard) 门

Hadamard 门是一种可以将基态变为叠加态的量子逻辑门，简称H门。

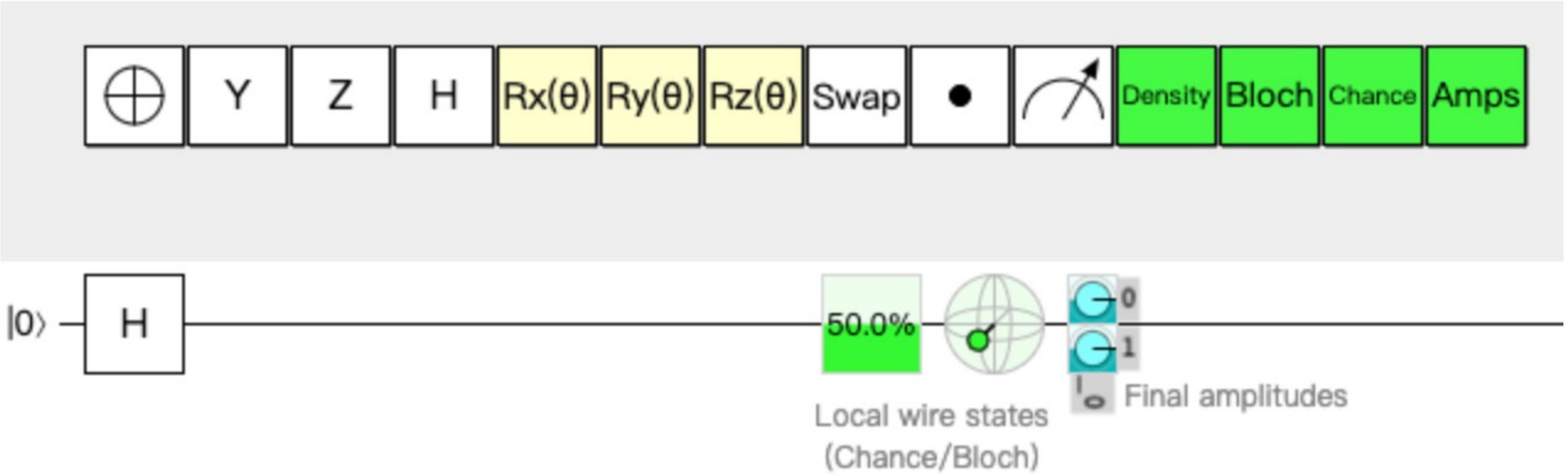
Hadamard 门矩阵形式： $\mathrm{H}=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1 & 1\\ 1 & -1\end{bmatrix}=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1\\ 1\end{bmatrix}\langle 0|+\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}1\\ -1\end{bmatrix}\langle 1|$

Hadamard 门，其量子线路符号：



H 门作用在基态 $|0\rangle$ ：

$$\mathrm{H}|0\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\,|0\rangle+|1\rangle\,\right)$$

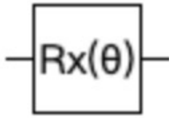


RX(θ) 门

RX门由Pauli-X 矩阵作为生成元生成，其矩阵形式为：

$$R_x(\theta) = e^{-i\theta X/2} = \cos(\theta/2)\, I - i\sin(\theta/2) X$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) & -i\sin(\theta/2) \\ -i\sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) \end{bmatrix}$$

其量子线路符号：

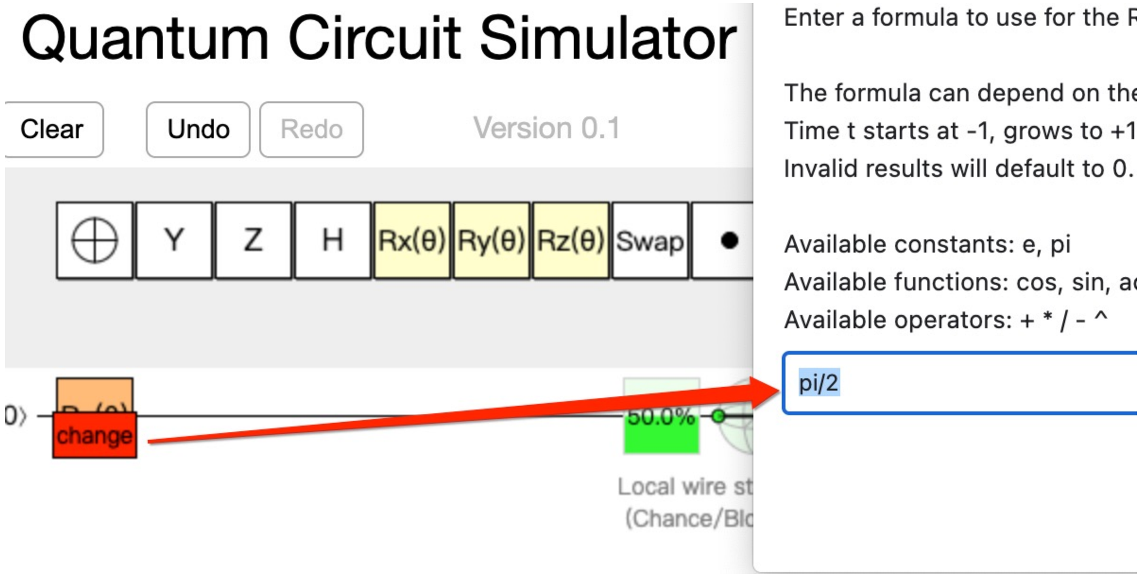
RX(π/2)门作用在基态：

$$R_x(\theta)\,|0\rangle = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) & -i\sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \\ -i\sin\left(\frac{\pi}{4}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)|0\rangle - i\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)|1\rangle$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} i\,|1\rangle$$

设置参数 $\theta = \pi / 2$：

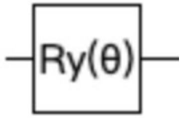


RY(θ) 门

RY门由Pauli-Y 矩阵作为生成元生成，其矩阵形式为：

$$R_y(\theta) = e^{-i\theta Y/2} = \cos(\theta/2)\,I - i\sin(\theta/2)Y$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta/2) & -\sin(\theta/2) \\ \sin(\theta/2) & \cos(\theta/2) \end{bmatrix}$$

其量子线路符号：

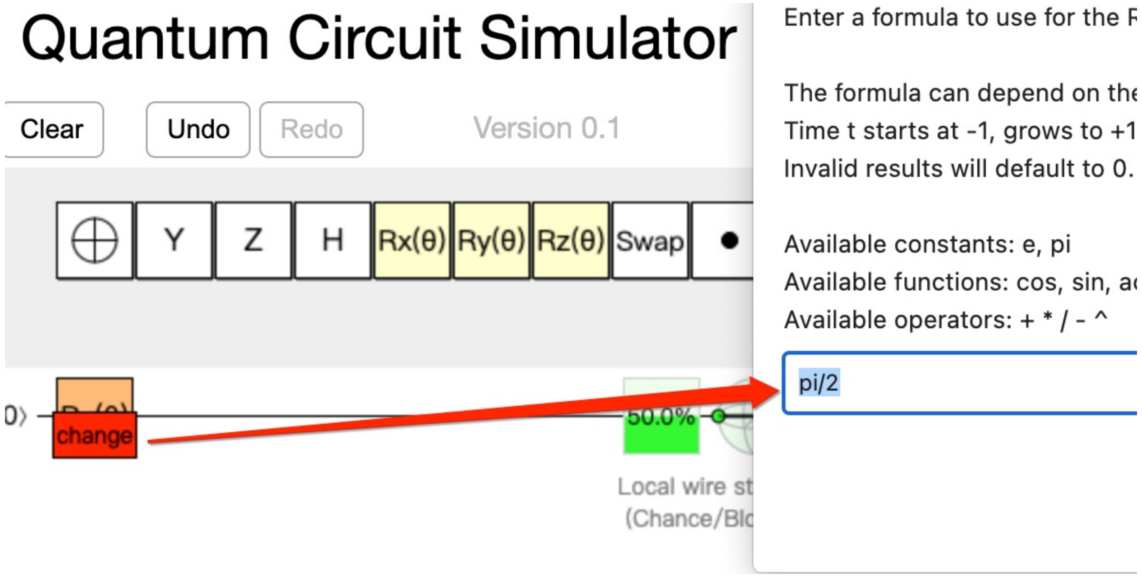
RY(π/2) 门作用在基态：

$$R_y(\theta)\,|0\rangle = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)|0\rangle + \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)|1\rangle$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$$

设置参数 $\theta = \pi / 2$：

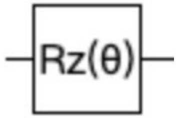


RZ(θ) 门

RZ门又称为相位转化门(phase-shift gate)，由Pauli-Z 矩阵作为生成元生成，其矩阵形式为：

$$R_z(\theta) = e^{-i\theta Z/2} = \cos(\theta/2)\,\mathrm{I} - \mathrm{i}\sin(\theta/2)\mathrm{Z}$$

$$= \begin{bmatrix} e^{-i\theta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\theta/2} \end{bmatrix} = e^{-i\theta/2}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{bmatrix}$$

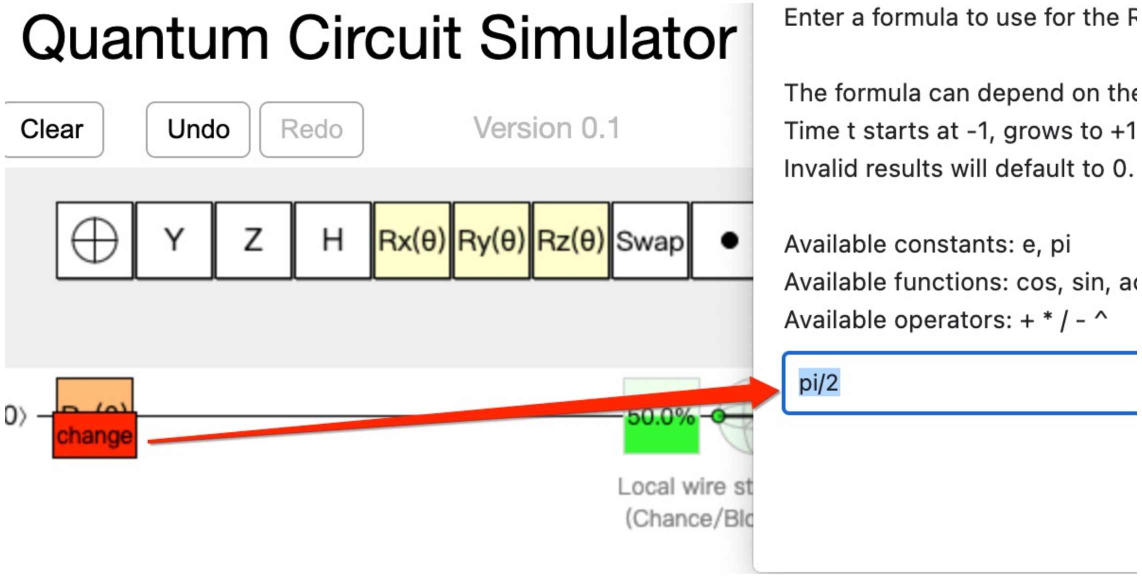
其量子线路符号：

RZ门作用在基态：

$$R_z(\theta)\,|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = |0\rangle$$

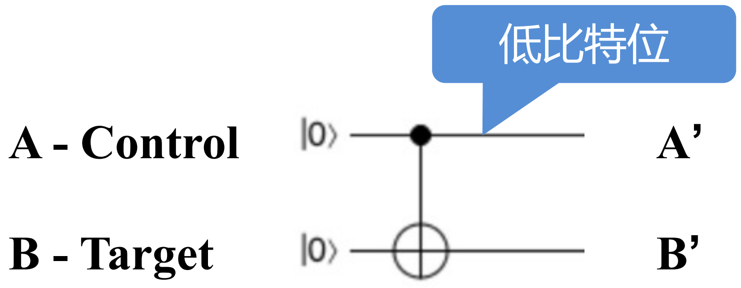
$$R_z(\theta)\,|1\rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ e^{i\theta} \end{bmatrix} = e^{i\theta}\,|1\rangle$$

设置参数 $\theta = \pi / 2$：

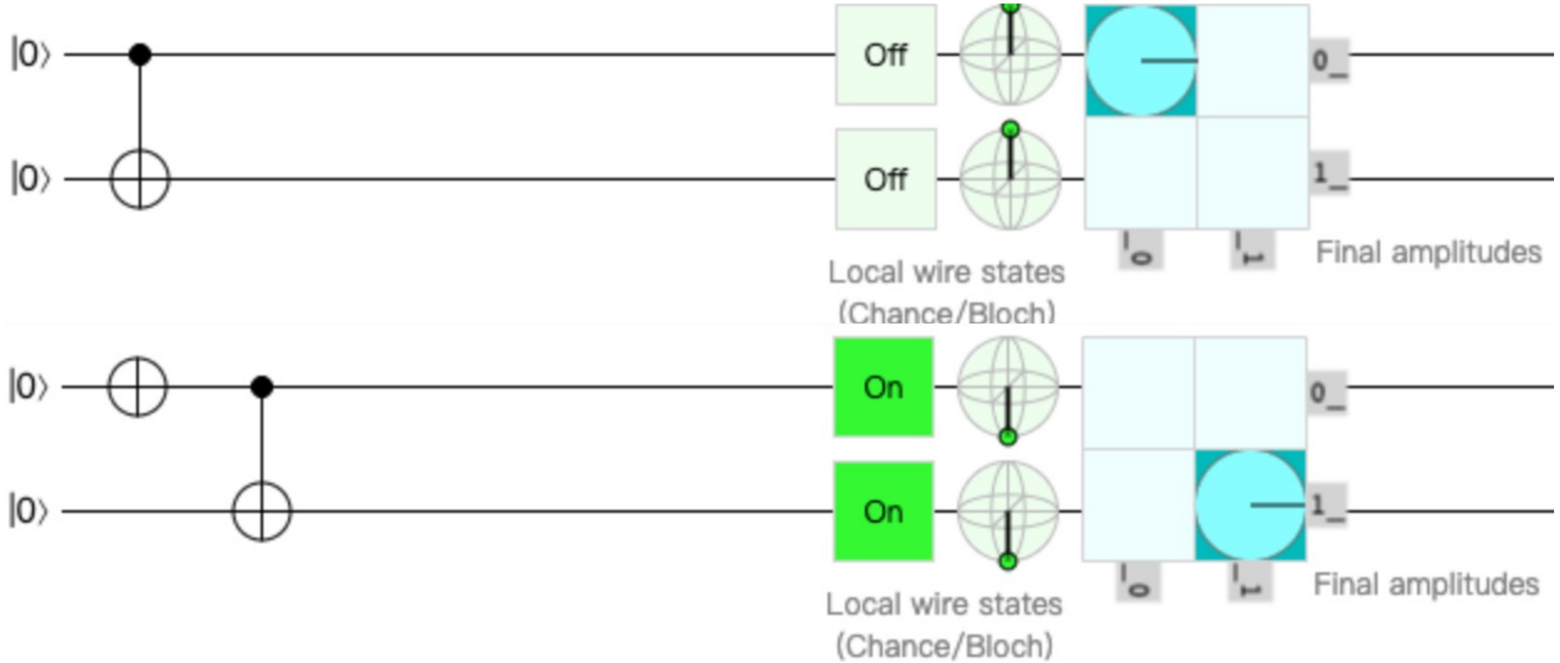


CNOT 门

控制非门(Control - NOT)，通常用 CNOT 表示，是一种普遍使用的两量子比特门。
如果低位作为控制比特，则有：



Input		Output	
A	B	A’	B’
0	0	0	0
1	0	1	1
0	1	0	1
1	1	1	0

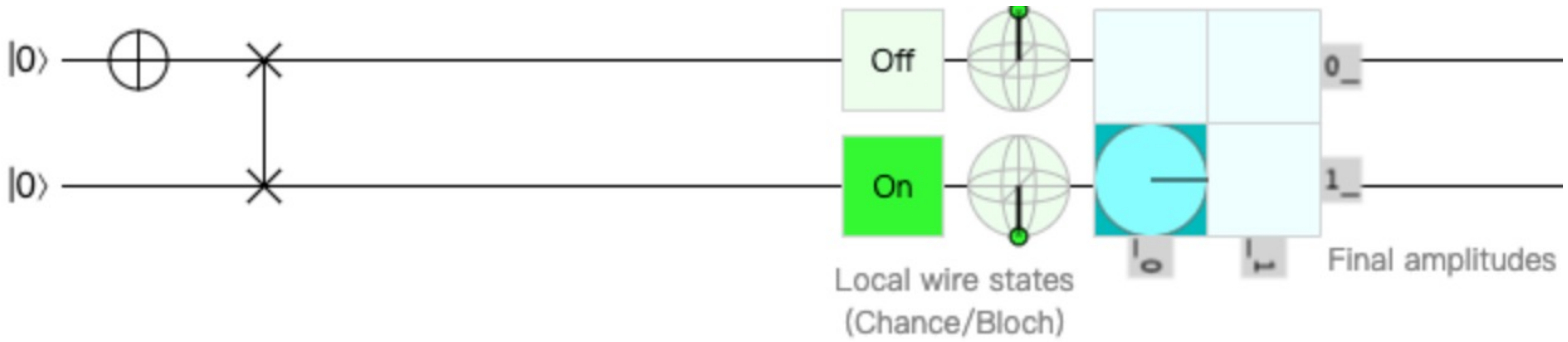


SWAP 门

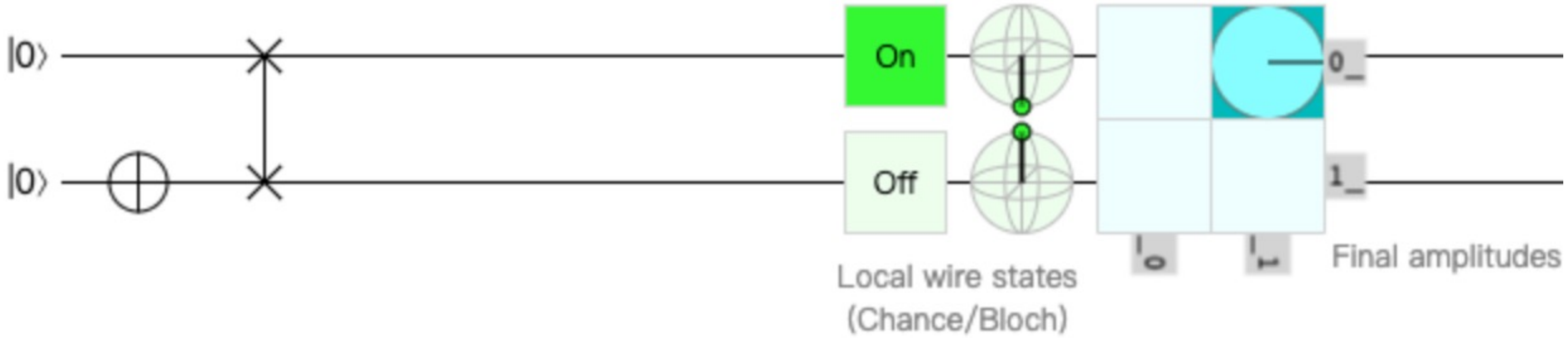
SWAP门可以将 $|01\rangle$ 态变为 $|10\rangle$ ， $|10\rangle$ 变为 $|01\rangle$，它的矩阵形式：

$$\mathrm{SWAP}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&0&1&0\\0&1&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}$$

$$|\psi'\rangle = \mathrm{SWAP}\,|01\rangle$$
$$=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&0&1&0\\0&1&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\1\\0\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\0\\1\\0\end{bmatrix}=|10\rangle$$



$$|\psi'\rangle = \mathrm{SWAP}\,|10\rangle$$
$$=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&0&1&0\\0&1&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\0\\1\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\0\\1\\0\end{bmatrix}=|01\rangle$$



Toffoli（CCNOT）

Toffoli门即CCNOT门，它涉及3个量子比特，两个控制比特，一个目标比特，它的矩阵形式：

$$\text{Toffoli} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{CCNOT}\,|110\rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = |111\rangle$$

Qubits
qubits.top

Thank You