

华为开发者大赛

量子计算赛道初赛试题

比赛作品提交说明：

1. 选手提交的作品应该包含 PDF 说明文档和 Python 程序两部分，文档和程序输入输出的格式需要符合题目给定的参数格式和命名规范。文档用于阐述解题过程、必要的推导、所使用的外部程序和解题的结果（包含必要的图示），以 doc.pdf 命名。所提交的 Python 程序必须能够在华为量子计算 HiQ 云平台上完整运行，平台统一提供 Python 3 的运行环境。如果题目没有指定程序名，主程序默认需要命名为 problemx.py（其中 x 对应于问题一、问题二、问题三分别为 1、2、3），以便于自动评分系统运行选手所提交的程序。不按照给定输入输出格式和命名规则要求提交程序的选手将失去参评资格。作品以队长邮箱命名打包成 zip 文件（如：hiqinfo@huawei.com.zip）。

名称	压缩前	压缩后	类型	修改日期
.. (上级目录)			文件夹	
doc.pdf	26.3 KB	24.5 KB	Foxit Reader PDF...	2019-07-30 21:14
problem1.py	1.8 KB	1 KB	PY 文件	2019-07-30 21:13
problem2.py	2.8 KB	1.1 KB	PY 文件	2019-07-30 21:11
problem3.py	102.8 KB	5.9 KB	PY 文件	2019-07-30 21:17

2. 请勿修改压缩包中的已定义函数名称和输入输出接口（允许添加函数），否则有可能导致程序无法正确运行。
3. 支持使用 HiQ 或者 Projectq 解题，示例中使用了 HiQ；如果想使用 Projectq，可将下面示例中 eng 的定义替换为 eng = MainEngine()，然后删除 HiQ 相关引入库(最后 3 个 import 项)。
4. 量子编程大赛初赛试题包将在论坛上同步更新，论坛快速入口：<https://bbs.huaweicloud.com/forum/forum-797-1.html>
5. 比赛时间为 2019.07.31 上午 08:00 至 2019.08.01 上午 08:00，请提前上传赛题解答，以免网络拥塞问题造成提交失败。

作品评分细则：

总分：机器打分（70%）+评委打分（30%）；

每道题目总分相同；

三道题目中选取**两道较高得分题目**计入总分（推荐完成两道题目），并依此推荐到下一轮对其进行评委评分。

机器打分：按照题目要求排序，不能解出正确答案的不合格（按0分算），完成题目按照性能等从60到100分线性给出原始分，然后每道题目按照加权比例归一化到总分得分。

评委打分原则：

选两道题目分别打分，每道题目分数平权计入评委得分总分；
 评委按照如下评分表对每队选手、每道题目打分（原始分，满分100分）；
 其他需要评委参与评分的情况，比如某道题目没有选手正确解出，交由评委综合评分。

选手队伍-题目	思路正确性 (30)	创新性（40）	普适性（20）	算法潜在价值 (10)
AA-1				

初赛试题

1. 量子绝热演化的数字化模拟

背景知识：利用量子退火机可以得到伊辛（Ising）模型的基态能量，求解功能材料和药物设计、统筹优化等复杂问题。本题考虑由 N 个自旋为1/2量子比特组成的一维链式哈密顿量，

$$H(s) = (1-s)H_0 + sH_I,$$

其中，

$$H_0 = -B \sum_i^N \sigma_x^i$$

$$H_I = -\alpha \sum_i^N \sigma_x^i - \beta \sum_i^N \sigma_z^i - J \sum_i^{N-1} \sigma_x^i \sigma_x^{i+1} - J \sum_i^{N-1} \sigma_z^i \sigma_z^{i+1}$$

我们已设定普朗克常数为 $\hbar = 1$ ，其他参数都取无量纲量。 s 是系统调制参数，随时间变化。初始时 $s=0$ ，系统哈密顿量为 H_0 ，这时量子态也处于其基态，即 $|+\rangle^{\otimes N}$ 态。这里，我们取 H_0 对应的基态能量为 $E_0 = 0$ 。随后， s 缓慢增大并满足绝热近似条件，量子态基本为哈密顿量的瞬时基态，当到演化最终时间 T 时，调制参数 $s=1$ ，系统量子态为 H_I 的基态，系统的能量测量值可以近似为 H_I 对应的基态能量。在量子计算机上模拟这个过程要用到哈密顿离散演化的方法。实验室内超导系统的实现可以参考[1]。

本题要求参赛选手利用HiQ模拟比特数为 $N=13$ 的量子绝热演化过程，将 s 随时间 t 离散化为 M 个值，并参考Trotter-Suzuki方法[2,3]将每一个时间片段的系统演化算符分解为量子电路形式，并求出最终系统演化到 H_I 的基态能量。本题中假定 s 从时间 $t=0$ 到 $t=T$ 线性变化，比特间耦合系数 J 为2，系统演化强度 $\alpha = 0.5$ ， $\beta = 1.0$ ， $B=0.5$ 。系统演化时间 T 与 J 满足关系 $JT = 6$ ，整个过程共取 $M=21$ 个时间离散点（包含 $t=0$ 和 T 两端）。

程序需利用求得的分片离散化量子电路输出由此演化方法得到的最终基态能量 E_D ，以及在理想连续演化情况下得到的最终系统基态能量 E_C ，并通过保留到一定的近似阶数使得两者的相对误差控制在 10^{-2} 以内，即保证 $\left| \frac{\delta E}{E_C} \right| = \left| \frac{E_D - E_C}{E_C} \right| < 1\%$ 。比赛机器打分将按照量子

电路模拟运行时间（三次结果平均）进行排序。运行时间差距不足1微秒的，将继续根据峰值内存资源占用情况细化排序。需提交的程序代码模板见附件一（不完整的地方由选手补全）。

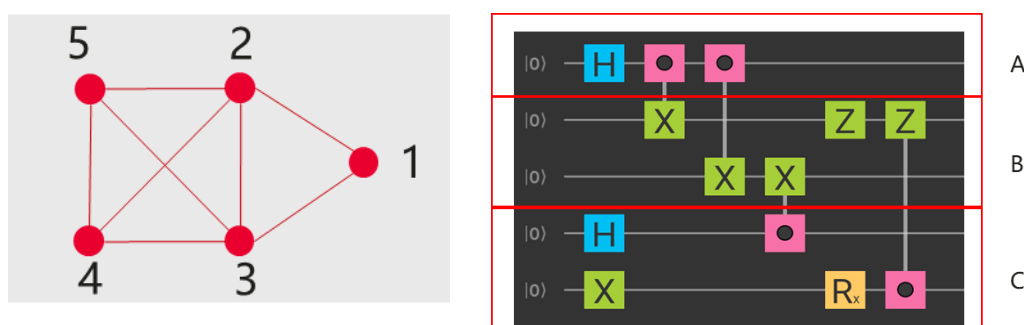
提示：这一题关键是把演化算符按照题目要求的近似算法写成一组乘积的形式， $U(T, 0) \approx U(T, T - \Delta t)U(T - \Delta t, T - 2\Delta t) \cdots U(\Delta t, 0)$ 。其中，每一个演化算符片段只包含一个单比特和两比特操作的指数形式。

参考文献：

- [1] R. Barends, A. Shabani, L. Lamata, etc. Digitized adiabatic quantum computing with a superconducting circuit, *Nature* **534**, 222–226 (2016)
- [2] H. Trotter. On the product of semi-groups of operators. *Proc. Am. Math. Soc.* 10, 545 (1959)
- [3] M. Suzuki. Fractal decomposition of exponential operators with applications to many-body theories and Monte Carlo simulations. *Phys. Lett. A* 146, 319 (1990).

2. 基于特定结构量子芯片的目标态制备

对于量子计算机而言，最理想的情况是能够在任意两个量子比特之间可以直接实现两比特量子门操作，然而，由于芯片结构和底层原理的一些限制，实际很多量子芯片只允许实现某些最近邻两比特量子门操作。左下图**示意**了一个受限5比特的量子芯片简化图，红点表示量子比特，红线表示比特间的耦合（可以在这两比特之间施加两比特操作）。因此在该量子芯片上要实现量子算法，需要对量子线路编译过程做出限制。右下图以一个实例展示了以模块化思路简化这种限制，将比特1到5自上到下排布，可以在线路图上对应分为A、B、C三个模块，A模块和B模块任意两个量子比特间可以施加两比特量子门操作，B模块和C模块中任意两个量子比特间也可以施加两比特量子门操作；A模块量子比特和C模块中量子比特间不能直接施加两比特量子门操作。



本题要求参赛选手在受限量子芯片上设计算法制备任意目标量子态，这里假定初始量子态为全零态 $|0000000 \dots\rangle$ ，量子算法最终以只含单比特量子门和两比特量子门的量子电路呈现，其中 $|0\rangle$ 定义为 $[1,0]$ 的计算基基矢，量子门操作限定在集合（X，Y，Z，H，S，T，CX，CZ，Rx，Ry，Rz）内。选手的程序problem2.py需以任意目标量子态矢量（list类型）和给定结构的量子芯片无向图(undigraph，数据类型为str类型)为输入，打印出一组符合HiQ或ProjectQ量子电路规范的量子电路。比赛自动计分排名按照结果准确度、速度、内存消耗依次排序。

注：一个量子芯片无向图代码示例（代码可以保存在一个文本文件里以供调取）

```
5
1, 2
1, 3
2, 3
2, 4
2, 5
3, 4
3, 5
4, 5
```

该示例为上图5量子比特的量子芯片的无向图代码表示。以此芯片为例，如果选手输出的量子门序列中包含CX |(qubit1, qubit4)这样的不符合比特间连接方式的两比特量子门，程序将会被判定无效（得分为0）。需要注意的是，这里给出的芯片结构仅是一个示例，选手提交的代码需要能够自适应给定的不同无向图连接结构。最终评分系统的测试规模在20qubit以下，选手本地测试时最好测试一次12qubit或以上的算法执行性能。

参考文献：

[1] Martin Plesch, Časlav Brukner. Quantum-state preparation with universal gate decompositions, PRA 83, 032302 (2011)

3. 优化含参数量子线路

给定一个含有一系列参数的量子电路，规模为14个量子比特，已知此电路由基本量子门X, Y, Z, H, S, T, CX, CZ, 和单量子比特旋转操作Rx, Ry和Rz组成。其中部分旋转操作Rx, Ry, Rz的旋转角 $\theta[i]$, $i=0, \dots, N$ 是可变参数。请基于给定的程序，自行设计参数优化算法，找到一组 $\{\theta[i]\}$ 使量子电路能从全零初态 $|00000000000000\rangle$ 制备到出现概率最大的二进制基矢为 $|00111100000011\rangle$ ，且其概率值大于1.8%。作为自我验证，本题要求选手自行确认按照所求的电路参数演化生成的最大概率基矢确实为本题给定的基矢，并输出该最大概率值。比赛成绩将以三次平均运行时间进行排序，其中每次计算的最大概率态矢结果将跟目标态矢进行比较，不能保证实现题目目标的将直接出局。若排名出现并列或运行时间差距不超过1微秒的情况，则将进一步依次按照出现该最大概率态的概率值、峰值内存使用情况和代码效率进行综合细分排序。

附 circuit3.txt: 参数为 $\theta[0]$, $\theta[1]$, ..., $\theta[4]$ 的线路程序定义

