

离子阱量子计算机新突破！Quantinuum推出迄今最高精度商用量子计算机Helios

中国物理学会期刊网 2025年11月17日 10:02 北京

以下文章来源于量子沙龙，作者秦雅雯

量子沙龙
量子沙龙是中国科学技术大学上海研究院于2016年起举办的沙龙活动，主要以面向大...



Helios量子计算机是如何工作的？

大家可能会很好奇量子计算机具体是如何工作的呢？

我们知道，**经典计算机的核心部分由中央处理器（CPU）和存储器组成**，而Helios的设计也具有相似的结构，是由运算区（图1中的quantum logic区域）和存储区组成。

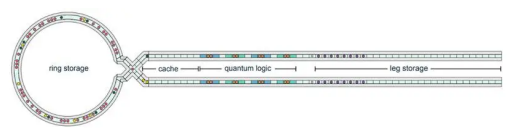
Helios所使用的芯片离子阱包含三个关键区域：环形区、X形枢纽以及两条直线“跑道”。其中，Helios的“CPU”（即运算区）位于两条直线“跑道”的中间位置，用于执行量子线路中的各类量子操作。就像经典计算机CPU的字长一样，Helios的“CPU”最多可以并行操作16个量子比特。因此，如果我们想要在全局98个量子比特上执行一层线路，就需要要把它们从存储区分批次地送入“CPU”区域进行运算。

与前代H2系统相比，Helios在芯片设计上的最大提升体现在存储区结构。具体来说，Helios包含三种类型的存储区：

环形存储区（ring storage）：类似于经典计算机中的随机存取存储器（RAM），用以临时存放需要被处理的量子比特，等待“CPU”的调用。

直线存储区（leg storage）：位于两条直线“跑道”的最右端，作为一个“先进后出”式的存储器，用来暂存已经完成运算的量子比特。

缓存区（cache）：用来缓存预先从环形“RAM”里筛选好的、即将送入“CPU”进行运算的量子比特。它的作用类似经典计算机中的CPU缓存，用于加速“CPU”对环形“RAM”中量子比特的访问过程，从而显著提升整体计算效率。



▲图1. Helios 2D 芯片结构

QCCD：量子比特“工厂流水线”

对于离子阱量子计算处理器来说，量子信息被存储在一个个离子上。而对这些量子信息进行操作和存储，就是通过存储区和“CPU”之间物理地移动离子来实现的，也就是说，携带量子信息的一个个离子会在不同区域之间被反复输运。

这种基于离子输运的量子计算实现架构被称为**量子电荷耦合器件（QCCD）架构**。

QCCD架构可以看作是一种“量子比特流水线”。它在不同的物理区域划分出存储区与运算区，然后通过“传送带”式的离子移动，将量子比特在不同区域间传输，实现量子计算的流程。

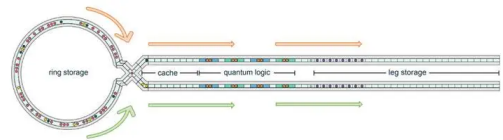
那么在Helios中，这条量子比特“工厂流水线”是如何运转的呢？

在一层量子线路开始时，量子比特会排成一队，在环形存储区里循环打转。当量子比特路过连接环形区和直线“跑道”的十字路口时，会做出一个选择：是继续留在环形存储区？还是跳出循环，进入某一条直线“跑道”？这个选择过程我们称之为“**量子比特筛选**”。被筛选出来的量子比特进入十字路口之后的缓存区，等待下一步指令。



▲图2. Helios 量子比特筛选示意图

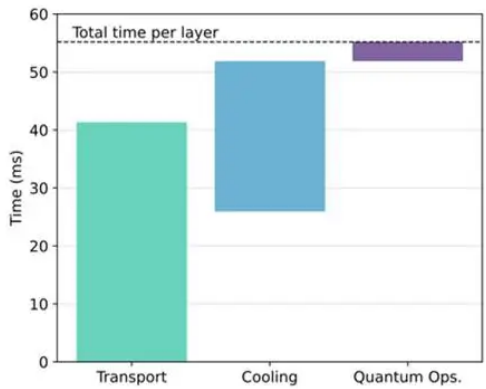
被筛选出来的量子比特等到了“CPU”的召唤之后，就可以从缓存区进入直线“跑道”中的运算区，开始进行冷却、量子门以及态读取等各类操作。在进行操作的同时，下一次量子比特筛选也开始了，新一批量子比特从环形存储区填入缓存区。在当前一轮运算结束之后，运算区的量子比特会被送入“跑道”右端的直线存储区，而下一批量子比特也从缓存区进入运算区，新一轮的运算开始。



▲图3. Helios 量子比特“传送带”运行方向

等到一层线路里所有的量子比特运算都结束之后，直线存储区的量子比特会全部回到环形存储区，等待下一层量子线路的开始。

当然，这种浩浩荡荡的“量子比特游行”也非常耗时，图4展示了单层线路平均运行时间的构成，可见主要耗时来源于量子比特运输和冷却。由于Helios中量子比特筛选和运算区的冷却操作可以并行，使得运输和冷却的时间有部分重叠，从而显著缩短了线路平均运行时间。**这种冷却和筛选的并行操作是Helios相比于H2的一项重要改进。**此外，Helios还通过引入更多的电极与离子囚禁区域，优化了量子比特的调度效率。综合这些改进，Helios在98个量子比特上运行单层线路所需的平均时长约55ms，而H2运行56个量子比特的单层线路就需约70ms。



▲图4. Helios 单层线路运行时间

为什么我们需要QCCD?

在QCCD架构之前，离子阱量子计算机像一间“一居室”，所有活动——存储、计算、冷却——都在一个房间里完成。

所有量子比特（离子）都挤在一个狭窄的空间中，当需要用激光对其中两个离子进行操作（逻辑门）时，激光可能会干扰到旁边“围观”的其他离子，导致它们出错（我们称之为“**串扰**”）；随着离子数量增加，离子之间互相排挤，振动也会变得更复杂（我们称之为“**模式拥挤**”），使得精确控制每一个离子变得极其困难；若直接对存储数据的离子进行激光冷却，就像在图书馆里边学习边让人给你吹风扇，可能会扰乱你学到的知识（我们称之为“**破坏量子态**”）。

这种“一居室”架构存在根本性矛盾，稳定存储和精确操作的需求很难同时满足，严重限制了其可扩展性。离子数量增加到几十个时，系统就变得难以管理。

而QCCD架构通过“分工”和“运输”，将离子阱量子计算机从一个杂乱无章的“一居室”，变成了一个规划有序、交通便利的“现代化城市”，让建造规模更大、更稳定、错误更少的量子计算机成为可能。



▲图5. Helios量子比特分流轨道 vs 城市立交桥

QCCD有多难?

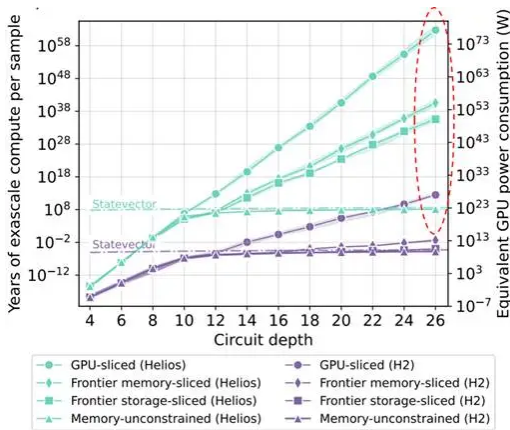
把QCCD想象成一个要在原子尺度上运作的、全自动且极为精密的“快递分拣系统”：它的任务是把一只只极其珍贵、一碰就碎的“古董玻璃杯”（离子/量子比特），在微小的“传送带”上，快速、准确、无损地运送——从“仓库”（存储区）送往“加工站”（操作区），完成量子操作后再完好无损地送回原位。

离子对外界极为敏感，用电场传送它就像用气流托举并移动一片羽毛——要让它既快速又不晃动，几乎是互相矛盾的。速度太慢，计算效率下降；太快，则会使离子被加热、降低量子门保真度，严重时甚至可能逃逸、丢失量子信息。

因此，必须设计出一条既迅速又平稳的“传送带”，让离子在启动、加速与停止的每个瞬间都保持丝滑过渡——哪怕一丝颠簸，都可能让那只“古董玻璃杯”碎裂。

要实现这一切，还需攻克多项工程难题：如何在微米尺度上制造复杂电极阵列以产生精确可控的电场（即“传送带”）？如何完成成百上千根电极的布线？如何编写如同“交通管制中心”般的控制系统，实现对所有离子的实时、高效调度，避免“交通堵塞”和“交通事故”？而**这些工程问题，正是将概念化的QCCD架构真正转化为可运行离子阱量子计算机的关键挑战。**

而在这些重重困难之下，Helios依然展现出惊人的算力：在随机线路采样任务中，Helios仅用1秒即可完成一次采样，而经典计算机需要至少10⁸年才能达到同样结果。



▲图6. 经典计算机实现同等的Helios和H2的随机线路采样任务的成本对比

离子阱量子计算的未来？

基于QCCD架构的离子阱量子计算，被认为是**实现大规模容错量子计算最有前景的方案之一**，然而，要让这一构想真正落地，仍有诸多挑战亟待解决。随着量子比特数量增加，系统的复杂性将急剧增长。如何在扩展规模的同时保持高保真度量子门操作、实现离子的快速平稳传输、并开发能管理大规模量子比特资源的经典控制核心，从而最终实现量子纠错与容错运算，都是需要攻克的难题。

如果说操控几十个离子的QCCD已经很难了，那么实现具有实用价值的大规模量子计算，则意味着需要控制成千上万个离子、众多存储区和操作区，以及它们之间复杂的传送路径。这就像从管理一个只有两三个机械臂的小仓库，扩展到运营一个像亚马逊中央仓库那样庞大的、全自动的物流中心，每一个环节的复杂度都呈指数级增长。

虽然未来仍有很长的路要走，但这条技术路线确实为通用量子计算的实现，照亮了一个充满希望的方向。

参考文献

[1].Helios: A 98-qubit trapped-ion quantum computer

[2].Etienne Granet, Sheng-Hsuan Lin, Kevin Hémerly. et al. Superconducting pairing correlations on a trapped-ion quantum computer

[3].M. DeCross, R. Haghsheenas, M. Liu, E. Rinaldi, J. Gray, Y. Alexeev, C. H. Baldwin, J. P. Bartolotta, M. Bohn, E. Chertkov, et al., Computational power of random quantum circuits in arbitrary geometries, Phys. Rev. X 15, 021052 (2025).

[4]. J. M. Pino, J. M. Dreiling, C. Figgatt, J. P. Gaebler, S. A. Moses, M. S. Allman, C. H. Baldwin, M. FossFeig, D. Hayes, K. Mayer, et al., Demonstration of the trapped-ion quantum ccd computer architecture, Nature 592, 209 (2021).



墨子沙龙由中国科学技术大学上海研究院及上海市浦东新区南七量子科技交流中心主办，受到北京中国科学技术大学新创公益基金会、中国科学技术大学教育基金会、浦东新区科学技术协会、中国科学技术协会及浦东新区科技和经济委员会等支持。

@墨子沙龙-新媒体平台（微信号mozi-meiti） 原创转载、投稿、合作

@墨子沙龙-活动（微信号mozi-huodong） 线下活动、线上直播合作



给小墨喵点个赞和心吧

本文转载自《墨子沙龙》微信公众号

// 《物理》50年精选文章

- 中子弹是怎么回事？ | 《物理》50年精选文章
- 晶体缺陷研究的历史回顾 | 《物理》50年精选文章
- 相变和临界现象(I) | 《物理》50年精选文章
- 相变和临界现象(II) | 《物理》50年精选文章
- 相变和临界现象(III) | 《物理》50年精选文章
- 凝聚态物理的回顾与展望 | 《物理》50年精选文章
- 声学 & 海洋开发 | 《物理》50年精选文章

模型在物理学发展中的作用 | 《物理》50年精选文章
我对吴有训、叶企孙、萨本栋先生的点滴回忆 | 《物理》50年精选文章
国立西南联合大学物理系——抗日战争时期中国物理学界的一支奇葩(I) | 《物理》50年精选文章
国立西南联合大学物理系——抗日战争时期中国物理学界的一支奇葩(II) | 《物理》50年精选文章
原子核裂变的发现: 历史与教训——纪念原子核裂变现象发现60周年 | 《物理》50年精选文章
回顾与展望——纪念量子论诞生100周年 | 《物理》50年精选文章
我的研究生涯——黄昆 | 《物理》50年精选文章
中国理论物理学家与生物学家结合的典范——回顾汤佩松和王竹溪先生对植物细胞水分关系研究的历史性贡献(上) | 《物理》50年精选文章
中国理论物理学家与生物学家结合的典范——回顾汤佩松和王竹溪先生对植物细胞水分关系研究的历史性贡献(下) | 《物理》50年精选文章
为了忘却的怀念——回忆晚年的叶企孙 | 《物理》50年精选文章
从分子生物学的历程看学科交叉——纪念金燧旋论文发表50周年 | 《物理》50年精选文章
美丽是可以表述的——描述花卉形态的数学方程 | 《物理》50年精选文章
爱因斯坦: 邮票上的画传 | 《物理》50年精选文章
趣谈球类运动的物理 | 《物理》50年精选文章
转瞬九十载 | 《物理》50年精选文章
一本培养了几代物理学家的经典著作——评《晶格动力学理论》 | 《物理》50年精选文章
朗道百年 | 《物理》50年精选文章
以天之道, 解物之道 | 《物理》50年精选文章
软物质物理——物理学的新学科 | 《物理》50年精选文章
宇宙学这80年 | 《物理》50年精选文章
熵非商——the Myth of Entropy | 《物理》50年精选文章
物理学中的演生现象 | 《物理》50年精选文章
普渡瑛记——从2010年诺贝尔化学奖谈起 | 《物理》50年精选文章
我的学习与研究经历 | 《物理》50年精选文章
天气预报——由经验到物理数学理论和超级计算 | 《物理》50年精选文章
纪念Bohr的《伟大的三部曲》发表100周年暨北京大学物理专业建系100周年 | 《物理》50年精选文章
同步辐射历史及现状 | 《物理》50年精选文章
麦克斯韦方程和规范理论的观念起源 | 《物理》50年精选文章
空间科学——探索与发现之源 | 《物理》50年精选文章
麦克斯韦方程组的建立及其作用 | 《物理》50年精选文章
凝聚态材料中的拓扑相与拓扑相变——2016年诺贝尔物理学奖解读 | 《物理》50年精选文章
我所熟悉的几位中国物理学大师 | 《物理》50年精选文章
量子力学诠释问题 | 《物理》50年精选文章
高温超导研究面临的挑战 | 《物理》50年精选文章
非常规超导体及其物性 | 《物理》50年精选文章
真空不空 | 《物理》50年精选文章
通用量子计算机和容错量子计算——概念、现状和展望 | 《物理》50年精选文章
谈书说人之一: 《理论物理学教程》是怎样写成的? | 《物理》50年精选文章
奋斗 机遇 物理 | 《物理》50年精选文章
关于量子力学的基本原理 | 《物理》50年精选文章
时空奇点和黑洞——2020年诺贝尔物理学奖解读 | 《物理》50年精选文章
凝聚态物理学的新篇章——超越朗道范式的拓扑量子物态 | 《物理》50年精选文章
物理学思维的艺术 | 《物理》50年精选文章
对于麦克斯韦方程组, 洛伦兹变换的低速极限是伽利略变换吗? | 《物理》50年精选文章
杨振宁先生的研究品味和风格及其对培育杰出人才的启示 | 《物理》50年精选文章
庞加莱的狭义相对论之一: 洛伦兹群的发现 | 《物理》50年精选文章

•○○○○

轻松阅读 享受物理

中国物理学会期刊网

ID: cpsjournals

