

“九章”量子计算原型机

刘金明 (华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室 上海 200241)

摘 要 本文从量子计算基本原理出发,简要介绍了量子计算的优越性,玻色采样与高斯玻色采样,阐述了“九章”量子处理器在高品质光子源、高精度锁相和规模化干涉仪三方面的技术突破,最后对“九章”及量子计算的应用进行了展望。

关键词 九章 玻色采样 量子计算机

文章编号 1002-0748(2022)1-0002

中图分类号 G633·7

文献标识码 A

1 量子计算

如果说计算机的诞生推动了信息化时代的来临,那么量子计算相关技术的突破势必会促使人类社会的发展走上新的阶段。原因在于,量子计算机处理某些问题的计算能力远超过传统计算机,可以高效快速地解决相关计算过程繁琐复杂的问题。

量子计算和经典计算之所以会出现如此巨大的差别,本质在于两者的信息单元特性不同。对于经典信息,每个比特仅代表“0”或“1”的一种,而量子信息中的量子比特则不仅可以是“0”或“1”,还可以是“0”和“1”的叠加态。量子比特 $|\psi\rangle$ 可用两个基矢 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的线性叠加来表示,即 $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$, 其中 a 和 b 表示叠加系数。

通俗来说,同样是两个基本单元组成的储存系统,经典计算机存储的是 00, 01, 10, 11 中的某一个,比特像是串联在了一起,储存的内容有四种可能性,但结果只能是四种中的一种,而量子算法则更像是比特间并联起来,有多少种可能性就能存储多少种信息,即 00, 01, 10, 11 都可被存储。当比特数目增加至 N 时,经典存储器记载的是 2^N 个数中的某一个,而量子存储器则可记载 2^N 个数字的全部,其存储能力大大增加, N 越大,量子存储器的优势就越明显。

计算机的数据处理过程相当于对所存储的数据进行变换。经典计算机对 N 个存储器操作一次,仅变换了一个数据,而量子计算机对 N 个存储器变换一次则可同时变换 2^N 个数据,表明量子计算过程处理数据的能力要比经典计算的能力强大得多,这就是量子并行计算。以著名量子计算算法之一的 Shor 算法^[1]为例,它是 Shor 提出的针对大数因式

分解的量子多项式算法,该算法的关键是利用数论中的一些定理,将大数因式分解转化为找到函数的周期。Shor 算法的提出引起了轰动,使得基于 RSA 加密算法的经典通信安全处在极大的挑战之中。Grover 算法^[2]是另一个著名的量子计算算法,主要针对无序数据库的遍历搜寻问题,经典算法是依次遍历数据库中的每一个来寻找目标,而 Grover 算法,则是基于量子计算的并行性,每一次搜寻都会对后续的量子操作产生影响,因此每搜寻一次便可同时检验所有目标,找到距离正确目标的次数不再是“减一”,而是“开根”。这样,采用 Grover 算法的量子计算机仅需要不到两秒钟的时间便可解决经典计算机大约需要 10 年时间才能解决的问题。

2 量子霸权

量子计算的优越之处在于其具有并行性,对于某些特定的计算问题,量子计算机可展现出对经典计算机的领先优势。科学家将其称为 quantum supremacy,译为“量子计算优越性”或“量子霸权”。目前,量子计算优越性主要体现在解决三类问题上,分别是随机量子线路采样^[3](Random Circuit Sampling)、IQP 线路(Instantaneous Quantum Polynomial)和玻色采样^[4, 5](Boson Sampling)。2019 年 9 月,谷歌首先宣布实现的量子霸权,实现的即是第一类量子计算优越性;在特定任务“随机线路取样”中,量子计算机“悬铃木”使用 3 分 20 秒完成了经典超算上万年才能完成的任务^[3]。而“九章”所展现的量子计算优越性^[6],则是在玻色采样领域:“九章”使用 3 分 20 秒采集到的样本,需要世界上最强的超算花费六亿年的时间。

3 玻色采样与高斯玻色采样

讲起玻色采样,我们要先从高尔顿钉板实验说起。高尔顿钉板实验常见于高中数学的教学中,是有关概率分布的实验。实验中在顶部放置一定数量的弹珠,使其自然下落。弹珠在下落过程中,每次撞到钉子便会随机选择向左或是向右继续下落,每个弹珠经过多次随机选择方向下落至底部,在弹珠足够多的情况下,最终底部各栏弹珠数量的分布接近正态分布。

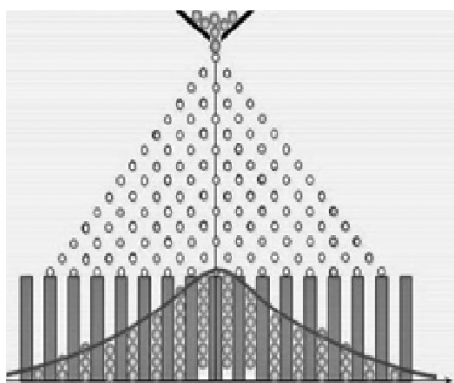


图 1 高尔顿钉板实验图(图源于维基百科)

玻色采样就像是在量子层面演绎高尔顿钉板实验,将弹珠换成光子,将钉板换成分束器,光子进入系统后,不断经过由分束器所组成的干涉仪,最后到达终点,被探测器所探测并记录,这就是一个采样。和高尔顿钉板类似,每个采样都对应着一个概率,可以得到由不同位置光子采样的概率构成的概率分布,即为输出态的态空间。

玻色采样和高尔顿钉板实验的基本原理看似相近,但实际操作起来,玻色采样问题要远比高尔顿钉板实验复杂。原因在于,要求得高尔顿钉板实验中弹珠经过某几条路径到达出口的概率,我们只需将对应路径的概率相加。而在玻色采样实验中,由于光子具有量子性,光子的不同路径间存在着相互叠加、相互抵消,或者部分叠加与抵消等各种状况,使得玻色采样的结果变得尤其复杂。同时,多个光子聚在一起,会产生量子统计效应。由于不同光子具有不同的相位,在经过分束器时,光子之间会存在干涉作用,而且分束器的参数也会对光子的走向产生影响。将以上各种影响因素构成一个系统的复数矩阵,初始光子分布经历该复数矩阵变换后形成最终的光子分布,这是极其复杂的积和式求解过程。科学家通过理论证明,“ n 个光子的玻色取样分布概率正比于 n 维矩阵积和式的模方”,即玻色采样问题求

解的复杂性随着光子数的增加呈指数型增长。因此,“玻色采样”对于经典计算机来说是难解问题,可被量子计算机用来展现量子计算的优越性。

玻色采样实验大致可分为三个基本过程:单光子源发射光子、光子经过线性干涉仪、光子到达探测器被捕捉。但在具体操作过程中,玻色采样存在一些目前技术水平无法克服的困难。比如:光辐射过程不受控制、辐射光子之间无关联性;实验中很难制备真正的单光子源,如果使用赝光子源,其中混有的多光子的成分又会降低玻色采样的效率,并不能体现量子计算的优越性。在这种背景下,高斯玻色采样^[7]进入了研究人员的视线。

在高斯玻色采样一文^[7]中,作者研究了从一般的高斯状态中采样光子的问题,并开发了一个被称之为高斯玻色采样的新协议。玻色采样输入的是单光子,而高斯玻色采样则利用参量下转换光源的高斯特性,以单模压缩态作为输入的非经典光源代替单光子。将 k 个单模压缩态注入一个 m 模的干涉仪,并利用阈值探测器对输出散射事件进行采样。对比玻色采样的单光子输入,其输出配置概率的计算涉及矩阵积和式,是经典 NP-Hard 问题,而高斯玻色采样使用高斯态输入,其输出配置的概率计算涉及矩阵 Hafnian(哥本哈根式,拉丁文),是经典 #P-Hard 问题。一般而言,NP-Hard 的计算复杂度高于 #P-Hard 问题。

4 “九章”的技术突破

2020 年 12 月,中国科学技术大学潘建伟团队宣布构建了一套 76 个光子的量子计算原型机^[6],在高斯玻色采样问题方面取得领先成就。这套光量子计算系统被命名为“九章”,以纪念在中国数学史上占有举足轻重地位的数学专著《九章算术》。

量子计算过程的实现需要量子计算机的硬件基础。“九章”量子处理器在硬件方面做了升级优化,同时在高品质光子源、高精度锁相、规模化干涉仪三大技术上实现了突破。

4.1 高品质光子源

玻色采样机输入的是独立的光子,而“九章”中则是一团团“量子光波”。“量子光波”通过采样机,大概率输出 2 个相干光子,出现 4、6、8 等其他偶数个光子的概率极小,由 2 个光子组成的“量子光波”就是“压缩光”。单模压缩态光源每次激发,输入的是“一团一团”的成对相干光子,一起进入干涉仪网络。实验中所用到的量子光源矩阵是平均功率为 1.4 W,

重复频率为 250 kHz 的激光脉冲,分成 13 条路径,聚焦于 25 个周期极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体,从而产生 25 组双模压缩态,相当于 50 个单模压缩态。

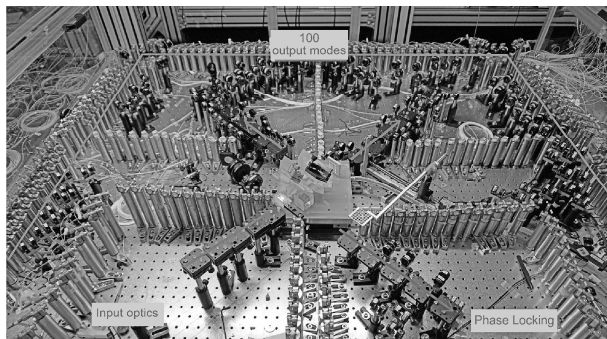


图 2 光子干涉网络实验装置

“九章”最多时可探测到 76 个光子的采样结果,故称为 76 光子的量子计算原型机,所使用的光源具备高全同性,即发射的同类光子不可分辨,同时还具备高效率与极高亮度,是具有大规模、可扩展特性的量子光源。

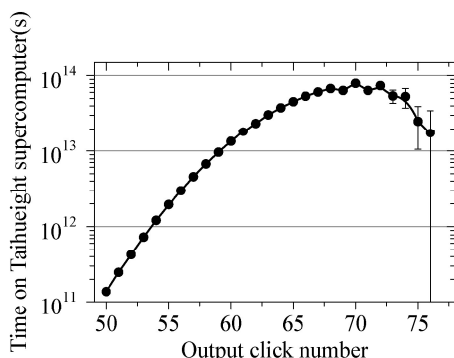


图 3 “九章”探测到的光子采样结果

4.2 高精度锁相

高斯玻色采样要求极高的锁相精度。我们知道,要产生光学干涉现象,前提条件之一是两束光要有恒定的相位差,锁相即是使不同光路之间的相位差保持恒定,以确保能观测到稳定的采样结果。“九章”为保证高精度锁相,使用的是主动锁相光学系统。在实验中,每路单模压缩光分别通过 2 米自由空间和 20 米光纤后进入干涉网络,要求路径中光程保持恒定。先使用同源激光经过压缩态光所走的相同路程,随后通过干涉的方法与标准参考激光进行对比,实时观测激光与标准参考光的相位差并进行相应的调整,锁相精度达到了光程抖动在 25 纳米之内,相当于进行雕刻时,雕刻刀精确到原子尺度。对于主动锁定,776 nm 激光器的相位锁定的标准偏差

仅为 0.04 rad。采用这种主动锁相系统后,相位不稳定导致的光子干涉可见度下降小于 1%。

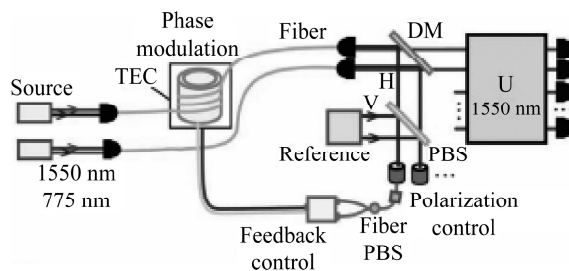


图 4 “主动锁相系统”构造示意图

4.3 规模化干涉仪

“九章”利用偏振和空间自由度构造了 100×100 的么正变换,并提出了一种 50 空间模三维干涉仪的设计方案,这种方案同时实现了近乎完美的相位稳定性和近乎统一的传输速率。该光纤网络由 300 个分束器和 75 个反射镜组成,实验测得的干涉仪传输速率为 97.7%,输出端口的平均耦合效率约为 90%。

基于量子并行性原理的量子计算机,利用某些特定算法后能在一些重大问题上实现指数级别的加速。“九章”解决的“高斯玻色采样”问题就是其中一种。“高斯玻色采样”算法的本质是计算概率分布,其计算难度随着光子数目的增加呈现指数级数增长,凭借现有的经典计算机很难解决。而潘建伟团队通过 76 个光子的“九章”量子计算原型机,快速求解了“高斯玻色采样”问题。

5 “九章”应用与展望

“九章”不仅体现了“量子计算优越性”,还在量子化学、图论里的部分组合数学,以及机器学习等领域具有不小的应用价值。比如:在研制新型生物药品时,药物是否起疗效需要对药物分子与受体分子的受体结合情况进行有效判断,这牵扯到量子力学的有关知识,要经历一个十分复杂的计算过程。而如果将大批的药物分子与受体中原子的匹配问题转化为数学问题中的“图论”,便可使用基于高斯玻色采样的量子计算机进行求解,这将极大地加快药品分子的筛选,对医学的进步会有重要的作用。

目前,公认的量子计算研究大致可分为三个阶段。第一个阶段是实现“量子计算优越性”,即在特定问题方面展现出传统超级计算机不可超越的优势。“九章”和“悬铃木”就处于此阶段,无论是谷歌的“悬铃木”处理“随机线路取样”问题,还是“九章”求

(下转第 39 页)

题所提供的条件中,我们可以看出,整个电路的“实验效果显示器”就是电流表,实验对象就是待测电阻 R_2 和电阻箱 R ,所能观察到的“效果”只有开关分别接在 a 点和 b 点时电流表的示数 I_A 和 I_B ,依据欧姆定律可知 $I_A = \frac{U}{R_A + R_0 + R_P}$ 、 $I_B = \frac{U}{R_2 + R_B + R_0 + R_P}$;通过这两个表达式,只要保持前后两次滑动变阻器阻值 R_P 不变,通过调节电阻箱 R 使得 $I_A = I_B$,则可以推得 $R_A = R_2 + R_B$,并最终得出 $R_2 = R_A - R_B$ 。

从上述对例 1 和例 2 及其后来跟进的问题串实验变式分析来看,学生要想真正掌握并自主应对“等效替代法”测电阻这一类问题,需要突破的关键点有二:一是在具体电路中要搞清楚“何为等效”“谁替代谁”;二是要结合题目条件,运用欧姆定律,建构起电表所测量的电学量与待测电阻、电阻箱之间的数学模型,通过对它们之间的数学关系的分析进而弄清实验的操作并得出待测电阻和电阻箱之间的数量关系。这两点就是各种不同形式的“等效替代法”测电阻问题之间所包含的共同联系——欧姆定律和“伏安法”测电阻——核心知识和核心思维方法(主线)。教师若能通过这一主线设计递进式的问题,以此来引导学生理解上述两个关键点并进行内化,则当他们面对这类问题时定能从容自如、游刃有余、开花结果。

(上接第 4 页)

解“高斯玻色取样”问题,都是在特定算法下求解某类计算问题。第二个阶段则是突破“量子计算优越性”只能“优越”在特定问题的限制,实现部分可控的量子模拟系统,在人工的、可控的量子系统中模拟需要的研究环境,具有一定的应用价值。量子模拟系统可以类比飞机的风洞试验,用可控的风洞模拟飞机真实飞行的未知环境,在这个过程中,可以通过操控风洞进行有效研究传统超级计算机难以计算的问题和实验条件无法观测的现象。这个阶段在机器学习等信息领域也有很可观的应用。第三个阶段则是在上述基础上,进一步地实用化,向制造出通用量子计算机的目标发展。通用量子计算机的优势在于能够进行编程计算,在开发出配套的新型算法后,凭借着量子计算的算力优势,将在密码破解方面发挥无比关键的作用;同时,进入第三阶段可提供模拟更精细化系统的可能。我们知道,最精密的系统是生命系统,而以目前的技术水平,细胞都不能人工制造,

4 结 语

利用化归思想,可以发现所谓的“等效替代法”测电阻和“伏安法”测电阻本质上均属于欧姆定律的应用范畴;而在此基础上要更好地实现学生的思维进阶,我们就不能局限于上述讨论的范围,需要更多地从实验的可操作性、安全性以及实验的精度要求等角度建构其他类型的所谓“特殊法”(变式)测电阻的问题串,让学生在面对不同的新问题情境中,再次抓住欧姆定律和“伏安法”测电阻这一核心主线,主动思考,深化对欧姆定律的理解和迁移应用,在解决新问题的同时实现思维的再次进阶,真正实现“不变与变”的物理辩证简约之美。

参考文献

- [1] 冯欢. 化归思想在高中函数教学中的应用研究[D]. 岳阳: 湖南理工学院, 2018.
- [2] 蒋宇莉. 建构物理模型实现高中物理科学思维进阶的研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2019.
- [3] 张兴安. 展现思维过程 激活思维活动[J]. 物理教师, 2019(2): 51—53.
- [4] 刘晟, 刘恩山. 学习进阶: 关注学生认知发展和生活经验[J]. 教学学报, 2012(2): 81—87.
- [5] 张宪魁. 物理科学方法教育[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2000. 3.
- [6] 卢义刚. 抓“两线”, 激思维, 显“味道”[J]. 物理教师, 2019(6): 36—39.

而到达量子计算的第三阶段,强大的计算能力或许能够模拟细胞、组织、系统等生命层次的人造物,也意味着真正的人工智能时代即将来临。

参考文献

- [1] A. Ekert and R. Jozsa. Quantum computation and Shor's factoring algorithm [J]. Rev. Mod. Phys. 1996, 68(3): 733—753.
- [2] L. K. Grover. Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack [J]. Phys. Rev. Lett. 1997, 79(2): 325—328.
- [3] F. Arute, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor [J]. Nature, 2019, 574: 505—510.
- [4] M. A. Broome, et al. Photonic boson sampling in a tunable circuit [J]. Science, 2013, 339(6121): 794—798.
- [5] J. B. Spring, et al. Boson sampling on a photonic chip [J]. Science, 2013, 339(6121): 798—801.
- [6] H. S. Zhong, et al. Quantum computational advantage using photons [J]. Science, 2020, 370(6523): 1460—1463.
- [7] C. S. Hamilton, et al. Gaussian boson sampling [J]. Phys. Rev. Lett. 2017, 119(17): 170501.