

超导量子计算云平台*

于海峰[†]

(北京量子信息科学研究院 北京 100193)

2023-10-08 收到

[†] email: hfyu@baqis.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20231102

Superconducting quantum cloud computing

YU Hai-Feng[†]

(Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China)

摘要 量子计算云平台将量子计算机以分时服务的形式通过互联网向用户开放,降低了量子计算资源的获取门槛,提高了量子计算资源的利用率,是连接量子计算科研机构 and 外界用户之间的纽带,对量子计算机的普及以及应用生态的培养起到了重要的推动作用,是未来量子计算机走向应用的一种重要且有效的运行形式。文章从超导量子计算云平台的概念、运行原理、组成部分、发展历史和现状、未来的发展趋势和困难等角度进行简要介绍,便于大家对这一新生事物有更多的了解。

关键词 超导量子计算, 量子计算云平台, 量子编译器, 量子体积, 量子逻辑门

Abstract Quantum cloud computing allows users around the globe to gain access to quantum computing hardware at little cost by providing time-sharing services via the internet, which greatly enhances the utilization of prohibitively expensive quantum hardware resources. This technology brings together the quantum research community and all outsiders who are enthusiastic about quantum computing. Hence, quantum cloud computing has become the driving force for promoting the popularization of quantum computers and cultivating quantum ecosystems. The advance of quantum cloud technology will enable users to implement quantum computing for real-world applications in an effective way. In this article, we focus on the concept of quantum cloud computing based on superconducting architectures. The working principles and hardware of this technology, both past and present, will be briefly discussed. A roadmap for its development, including scientific and technical challenges, will be delivered as the last part of our discussion. It is our hope that the content presented here can help readers grasp the general idea of quantum cloud computing this unprecedented but exciting and rapidly evolving field.

Keywords superconducting quantum computing, quantum cloud computing, quantum compiler, quantum volume, quantum logical gate

* 国家自然科学基金(批准号: 11890704; 92365206)、北京市自然科学基金(批准号: Z190012)资助项目

1 概述

随着互联网技术的发展，云平台逐渐走进了人们的生产生活之中，用户足不出户便可通过网络访问远程的硬件资源来完成相应的任务，而不需要自己建设和维护昂贵的硬件资源，这是信息时代经典计算机和网络技术融合的产物。而量子计算云平台，则是把传统云平台中的经典计算机换成量子计算机，为科研机构、企业和相关人员开展研究提供量子算力资源。这种量子计算机加互联网的运行模式，很有可能是实用化量子计算机服务大众的最终运行形式。虽然当前量子计算机的发展还处于非常初级的阶段(严格意义上讲还不能称之为量子计算机)，还在进行原型机的原理性验证，不能像经典计算机那样提供实质性的应用算力，但它可以完成量子算法的演示和验证，挖掘其实用化的潜力，同时也是普及量子计算和量子力学知识的一个极佳平台。

超导量子计算是目前国际上进展最快、研发投入最多的技术路线之一，随着近些年超导量子比特相干时间的大幅改善(20年提升了6个数量级，从纳秒迈向了毫秒)，这条路线目前已经没有明显的技术短板。它的优点是基于固态体系，和传统的半导体工艺兼容，容易规模化。2016年，美国IBM公司把一个五比特的芯片接入互联网，正式开启了这种云运行模式，随后五年间共上线了20多台不同比特数量的量子计算机，服务了45万个客户，执行了2.2万亿次量子线路^[1]，发表了超过一千篇的科研论文，取得了很大的成功。同经典计算机程序员不需要知道中央处理器(CPU)是怎样运行的一样，用户也不需要知道量子比特是如何工作的，只需要关心自己的量子线路(程序)运行的结果。这种把造量子计算机和用量子计算机的人员分隔开的方式，极大地降低了量子计算机的使用门槛，成功地拉近了量子计算机制造者和用户之间的距离，同时用户不断提出的新需求也促进了量子计算机制造

者们的积极研发，形成了正反馈，推动和带动了量子计算领域的发展。

2 工作原理和组成部分

下面以一个任务为例，描述超导量子计算云平台的工作流程：用户上网登录用户界面(User Interface, UI)，提交一个计算任务。假定任务是利用五个量子比特演示一种算法，用户编辑好想要运行的量子线路并提交后，剩下的事情就是等待运行结果返回。当云平台接收到用户提交的任务后，先通过编译器对用户任务进行分析和资源分配，并基于分配的硬件对线路进行优化和重新编译。执行的操作包括选择映射到哪五个“状态良好”的量子比特来执行任务，以及根据量子芯片的连通结构和两比特门的形式对线路做简化和优化，以更好地满足需求。编译好后，把新的量子线路通过调度系统分发给超导量子计算机的操作软件，操作软件把编译好的任务转换成一系列的脉冲序列并发送给电子学仪表，通常是数模转换器(Digital-to-Analogue Converter, DAC)，DAC发出相应的模拟信号，经过测量系统的室温、低温线路以及层层衰减、滤波后到达量子芯片的输入端，实现对量子比特的门操作和读取。芯片输出端的相应读取信号再通过低温、室温线路的滤波、放大、混频后到达接收端，即模数转换器(Analogue-to-Digital Converter, ADC)，ADC解调判定后形成相应的数据文件，操作系统对这些数据文件处理后，再返回给用户界面，这样用户就得到了他的运算结果。

从上述执行任务的流程可以看出，超导量子计算云平台主要由后端、前端和中间层三部分组成。后端就是超导量子计算机，它包括量子芯片、极低温测试系统、室温电子学仪表 DAC/ADC、

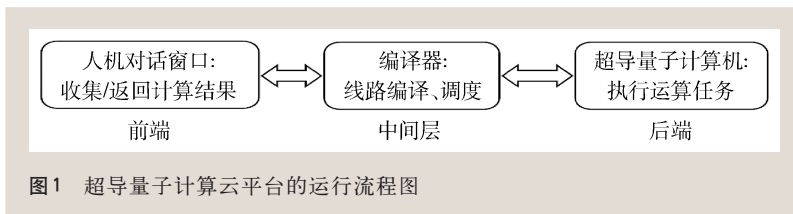


图1 超导量子计算云平台的运行流程图

量子操作软件等,是云平台的硬件主体。前端则是网络的用户界面,是人机对话窗口,负责收发任务,同时也兼顾用户的使用培训功能。中间层是连接前端和后端的桥梁,类似于“作战指挥部”,负责用户任务和硬件任务之间的编译、优化和调度。虽然不同科研机构企业的超导量子计算云平台部分环节名称和功能略有不同,但整体上都使用相同的流程(图1)。

3 发展现状

近几年,随着IBM公司超导量子计算云平台取得的成功,国内外多家企业和科研机构也推出了自己的后端产品,其中包括美国Rigetti公司的Aspen平台^[2]和英国OQC公司的Lucy平台^[3],分别在微软的Azure Quantum(一个全栈式开源量子云生态系统)和Amazon Braket(亚马逊量子计算云平台)前端上线。美国谷歌(Google)公司的量子人工智能团队也把其实现“量子霸权”的“Sycamore”处理器接入量子云,但目前并没有对外完全开放。同样还有日本理化研究所(RIKEN)的产品。国内的科研机构和企业也先后推出了自己的云平台,其中包括中国科学院量子信息与量子科技创新研究院的“Xiaohong”^[4]、本源量子的“悟源”^[5]、百度公司的“乾始”^[6]以及中国科学院物理研究所和北京量子信息科学研究院联合团队推出的“Quafu”^[7]等。如果按照经典云平台的分类标准,Google公司和日本RIKEN的云平台属于“私有云”,只开放给特定的用户使用。而其他的属于“公有云”,即面向公共的注册用户。

就像用市场份额来衡量产品一样,衡量量子云平台是否成功,主要看用户的数量以及执行任务量,换句话说就是有用户使用,并且使用用户有产出。在这方面IBM公司可谓一枝独秀,一方面是其量子计算云平台的规模够大、质量够硬;另一方面是该公司在量子计算生态打造方面做了很多工作,包括一段时间的免费推广、会议培训以及考试认证。尤其是其推出的基于Python语言的开源工具包Qiskit,里面丰

富的内容和犹如教科书般的案例介绍已经在世界各地被教育、科研、企业用户广泛接受并使用,培育了大量的用户。

从科学的指标来衡量一个云平台,主要从量子比特的数量和质量两个方面来看。数量即为可在同一线路中进行操控和读取的比特数量,而且这些量子比特是彼此耦合的,即构成一个连通图。在超导量子芯片的设计上,主要有一维链状结构、二维网格结构和全连通结构等,一般来说连通性越高,意味着执行相同的任务所花费的线路深度越浅,线路的选择越灵活。质量需要从多个角度来衡量,包含量子比特的相干时间、量子态制备、读取以及操控精度等,而这些衡量结果都会反映到一个指标——门的错误率上(和保真度的概念互补,数值上等于1减去保真度,越低越好),从这个意义上讲,质量等同于量子门的错误率。由于任何复杂的门线路总可以拆分为单比特门和两比特门的组合,而超导量子芯片中单比特门的错误率普遍比两比特门低一个量级,所以目前一般用两比特门的错误率来衡量量子云平台的质量。量子比特的质量和数量是一对矛盾体,一方的提高要以牺牲另一方为代价,要辩证地看待,二者要均衡发展,单一用质量或数量的指标来衡量超导量子计算机的性能都具有片面性。为了横向对比相同或者不同技术路线的量子计算机性能,人们提出了量子体积(Quantum Volume, QV)的概念^[8]。量子体积是一个衡量量子计算机综合性能的指标,和量子芯片比特的数量、结构的连通性、量子门错误率和线路的深度息息相关,定义为 $QV=2^{\min(d, m)}$,即系统上能以一定保真度执行的、宽度(m)和深度(d)相等的、最大的随机线路的“体积”。它可以简单地理解为量子比特的数量和线路深度的乘积,量子体积越大,代表量子计算机性能就越好,解决问题的能力就越强。目前在超导体系,最高的量子体积达到了512^[1]。但量子计算机毕竟是一个硬件、软件的综合体,仅用量子处理器的比特数量、质量的指标还不能完全描述量子计算机的性能,从上面我们提到的量子云平台工作流程可以看出,软件系统的效率、电子学硬

件的反应速度以及软硬件的协同程度都会影响到用户提交任务的执行速度，所以从速度的角度，2021年人们又提出了电路层每秒操作数(Circuit Layer Operations Per Second, CLOPS)的概念^[9]，CLOPS描述了在每秒的时间内可以在量子计算系统上执行的电路数量，考验了量子计算机软件(编译调度)、硬件(量子芯片、电子学的反应速度以及不同通道间的交互能力)和软硬件协同的能力，目前超导量子计算机的最高CLOPS值为15000^[1]。

高保真度的两比特门是超导量子计算云平台建设的核心内容，保真度与量子比特的寿命、量子门的类型和速度息息相关，它的值正比于相干时间，反比于门操作时间。目前主要有两种类型的两比特门在量子云平台上开展：一种是基于变频量子比特的受控相位门(CZ gate)，它的优点是通过调节比特频率可以获得一阶的相互作用，如共振或近共振，所以门的速度比较快，在量子比特有限的相干时间内可以进行更多次操作。缺点是由于比特需要变频，引入额外控制通道的同时也带来了噪声；另外，一旦工作频率偏离了量子比特的相位非敏感点，容易发生退相干，所以变频比特的相干时间普遍低于固定频率比特的相干时间。利用单比特旋转门和CZ门，可以衍生出其他类型的两比特门，如受控非门(CNOT gate)和交换门(i-SWAP gate)，所以CZ门也称该云平台的原生门，只校准好它即可。“Sycamore”、“Xiaohong”、“悟源”、“乾始”以及“Quafu”云平台的10比特、18比特芯片就是采用CZ门作为原生门。另一种是基于定频比特的全微波操作门，如交叉共振门(CR gate)或全微波受控相位门(AMCZ gate)，它的好处是需要的测试系统线路简单，不容易引入额外噪声，且定频比特容易获得较长的相干时间。缺点是比特不能调频，耦合

相对较弱，导致门的速度变慢。IBM公司的绝大部分平台、“Lucy”、日本理化研究所的平台以及“Quafu”云平台的136比特芯片就是采用CR或AMCZ门作为原生门。

4 基于超导量子云平台的代表性工作

据不完全统计，从2016年开始，利用超导量子云平台发表的科研论文数量已超过了一千篇，其中大部分是量子算法的演示，也有一部分是数字化的量子模拟，给理论物理工作者、计算机程序员以及量子信息从业人员提供一个很好的实验平台，把本应该在实验室完成的科学实验通过云平台完成，给领域的发展带来新的契机，既提升了超导量子计算领域论文的数量，又提升了其质量，促进了领域的高速发展。在这里，我们各介绍一项基于国外、国内超导量子计算云平台所开展的且论文已经发表的代表性工作。

2023年6月，美国IBM公司的研究人员在*Nature*上发表了题为“实现容错量子计算前的量子计算应用证据”的论文^[10](图2)。论文采用了错误缓解的技术，在127比特芯片上演示了二维横

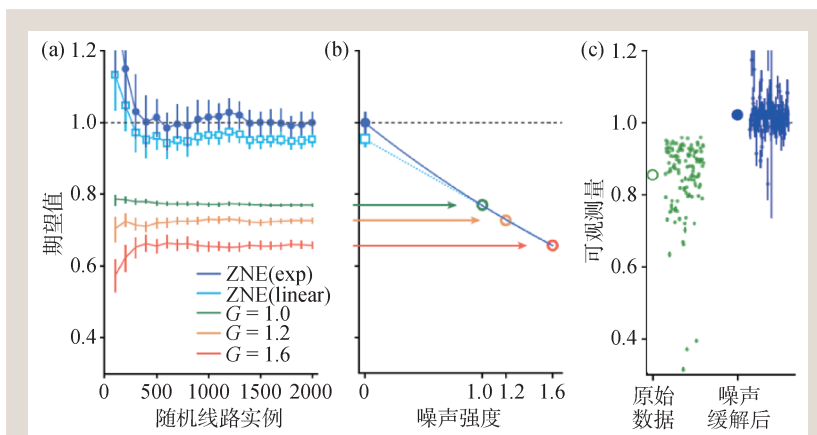


图2 IBM团队的127比特噪声缓解实验结果数据图。图中ZNE(exp)和ZNE(linear)分别表示指数零噪声外推法和线性零噪声外推法，红黄绿三种颜色分别表示噪声增益因子 G 为1.6、1.2和1.0时，实验中测量得到的物理量期望值。通过这种噪声放大的方法，再选取合适的外推法(ZNE)，就可以外推得到噪声增益因子为0时的结果。(a)和(b)为对某一量子比特做错误缓解和测量操作之后得到的期望值；(c)为对所有127个量子比特重复同样的错误缓解和测量操作之后得到的平均结果。根据理论推导可知，在无噪声和错误的情况下，所有量子比特的期望值均应为1，结果显示，使用了零噪声外推法进行数据处理之后的结果接近于理想结果^[10]

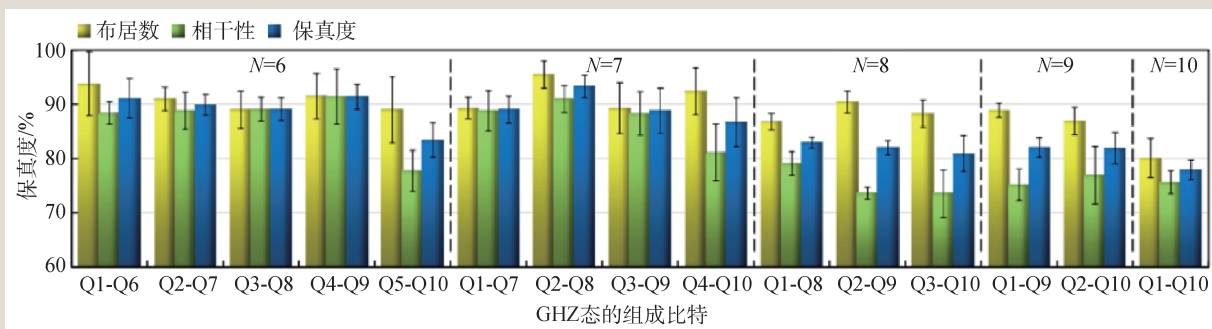


图3 中国科学院物理研究所超导量子计算团队的10比特GHZ态实验结果数据图^[11]。从左至右给出了量子比特数从6到10的GHZ制备的保真度， Q_i-Q_j 表示实验用到的量子比特的编号。图中展示出了实验制备末态的布居数、相干性和保真度，其中，保真度是由布居数和相干性两个实验数据计算得到的

场伊辛模型近似求解问题，使用的线路深度最高达到60层，这种规模的量子线路展示出即使没有纠错技术，现阶段中等规模含噪声量子计算机也初步具备实用价值的潜力。这项工作是基于该公司127比特量子计算云平台开展的，其两比特门保真度中位数达到99%。虽然后续工作证明用经典计算机也可以模拟类似的结果，甚至更好，但在笔者看来这项工作的意义不在于经典和量子计算机计算能力之争，而是它展示出当下一个具有代表性的高质量云平台，并在云端操作的基础上开展出了有效的错误缓解研究。量子错误缓解是一种在线路层面或软件层面估计和补偿量子线路运行过程中产生的噪声的方法，它的目标是在量子操控的保真度还不能实现容错量子计算之前的过渡期内，通过对大量含噪声样例线路进行采样并获取错误模型，然后推测零噪声下的期望，以获得演化结果的精度提升，满足近期应用算法的需求。目前常用的量子错误缓解方案有零噪声外推、概率误差消除、读取错误缓解和随机编译等，以及在研究对象为具有特定对称性的系统时所使用的数据后选择等方法，这项工作主要用到了随机旋转和零噪声外推。

在2022年11月，中国科学院物理研究所团队在《中国科学：物理学、力学、天文学》上撰文，利用“Quafu”云平台的十比特芯片，通过云量子计算模式，制备了具有全局纠缠的Greenberger—Horne—Zeilinger (GHZ)多比特纠缠态^[11]，并通过云平台扫参数功能实现了多比特纠缠态保真度的

验证(图3)，其十比特GHZ态的保真度达到77.05%，超过了2017年在实验室里实现的66.8%的保真度^[12]，接近2019年最好的实验室指标81.70%^[13]。这个结果表明国内云平台的质量已经能够满足一些近期量子算法的需求。

5 未来的发展趋势和困难

随着用户对量子计算云平台日益增长的需求，它未来的发展将呈现以下趋势：

(1)提升保真度。量子云平台的比特质量和数量哪个更重要？笔者看来在现阶段人们对云平台质量的需求更为迫切。质量主要取决于两比特门和读取保真度，如果质量上不去，量子线路的深度不够，可开展的量子算法研究将大幅受限。即使是浅电路，运行的结果保真度也不高，影响了用户体验和积极性。以50层电路深度为例粗略估计，现阶段最好云平台两比特门保真度是0.99，运行50层后结果保真度仅为0.6，但如果是0.999的保真度，则运行结果保真度为0.95，显然后者更为可信。即使是在中等规模含噪量子计算机上开展实用化的量子算法，如果不考虑错误缓解，对两比特门保真度的要求也要0.9999^[14]，现有的指标与它相比还差两个数量级，还有很长的路要走。实际上提高量子比特的质量也是超导量子计算研究永恒的课题，当前人们正在进行量子纠错的研究，即利用多个物理比特编码构建通用量子计算机的基本单元——逻辑量子比特，物理比特

的保真度越高，编码一个逻辑比特需要的物理比特数量就越少，进而减少了规模化的压力。与初期相比，现阶段超导量子计算的研究已经进入“深水区”，两比特门保真度每提升千分之一都不容易，需要不断优化量子比特的相干时间、量子门的速度和抑制串扰及泄漏，而这些内容都是超导量子计算研究的“硬骨头”。数量方面，目前50比特规模已经突破经典计算机内存的限制，可以开展超越经典计算机极限的量子算法研究，不断向实用化靠近。所以未来高质量的50—100比特规模的量子计算云平台可以满足绝大部分用户的需求，是后续建设的重点。目前也有相关机构提出千或者万比特规模的研究规划并正付诸行动，但这和高质量的发展并不矛盾，长远来看，超导量子计算的研究肯定要走向规模化，其中有很多工程性的问题需要解决，如规模化芯片的封装、大功率稀释制冷机、规模化低温线路、集成化的室温/低温电子学等许多问题需要不断地探索和尝试。

(2)提高稳定性。在实验室里的量子计算科学实验，我们总可以通过多次运行不断修正从而获得最优的实验结果。而量子计算云平台不同，用户没有底层的操作权限，不能自行优化。所以在量子云平台运行结果的保真度上限不会高于实验室，因此稳定性是超导量子计算云平台运行的基本条件。稳定体现在较低的故障率，以年为单位的长时间开放运行且运行结果长期保持一致，不能时好时坏。我们知道超导量子比特十分脆弱，很容易受到电磁环境的扰动进而导致保真度变差，甚至高能宇宙射线都会引起量子比特的错误关联。对于外部引入的电磁噪声，人们可以通过滤波、屏蔽、隔离和接地等手段抑制，但是对于芯片内部的电磁噪声，尤其是来自约瑟夫森结势垒层中的两能级缺陷系统噪声，目前还没有很好的解决办法。这种两能级缺陷不仅会和超导量子比特耦合导致退相干，而且也会导致比特的参数随着时间发生缓慢的漂移。参数漂移带来的问题是之前已经校准好的参数失效，需要重新校准后把新的校准好的参数反馈给脉冲编译。根据漂移的特征时间相对于用户任务的时间长短，甚至可能

执行一次任务便需要校准一次。对于规模化的芯片，这种校准是需要一定时间的，严重影响用户任务的执行效率。这种问题的解决一方面要靠不断提高量子芯片的质量，减少样品的缺陷，另一方面，要靠不断完善和优化自动校准程序，实现快速地智能化校准，减少对人工干预的需求。

(3)扩大底层开放程度。现在的量子计算云平台，大多采用的是校准好的单比特门和特定类型的两比特门，用户只需要编写量子线路即可，虽然这可以满足绝大部分用户演示量子算法的需求，但是人们还是更加期待底层开放度更高的量子云平台，以满足专业的科研工作者更高的要求，如开展量子模拟实验。众所周知，超导量子芯片是研究量子多体问题一个极佳的平台。开展这类问题研究需要用户根据芯片的结构，构造出想要研究的哈密顿量，然后制备特定的初态，通过改变相应的相互作用让量子态演化，一段时间后对末态进行测量并提取相应的物理量如纠缠熵等，分析不同的演化时间、相互作用强度等参数下的规律，可以得到诸如相变、动力学演化等信息。要完成上述过程，用户需要对底层参量进行调控，例如用户自行设定比特的频率、控制比特间的相互作用以及外场的施加等等。底层的开放程度越高，所能开展的物理实验就越丰富，就会吸引更多的物理学者开展相应的科学研究，对于量子模拟的研究将起到极大的推动作用。

(4)实现国际标准化。目前不同机构和企业量子计算云平台上没有统一的语言，也没有统一的执行标准，对用户而言，增加了学习成本，对云平台的提供方来说，也增加了开发成本，不利于量子云平台的推广。云平台的标准化并不存在技术问题。由于量子信息是一个新兴的行业，国际上也没有一个权威的组织来实施制定，而且由于云平台带有行业竞争和商业属性，最大的困难在于如何让国内、国外的各提供方达成一致。

(5)培养量子计算应用生态。建设量子云平台的目的是应用，无论是对于科研、教学还是科普，用户永远都是云平台的生命力所在。量子计算目前还是一个新兴领域，其实用价值迫切需要开发，仅靠量子计算机的制造者是远远不够的，因为只

有各行业的从业者才知道本行业的痛点和需求，才能不断挖掘量子计算机的应用价值。打造良好的云平台应用生态圈是未来的发展趋势，这些生态圈包括金融安全、量子化学、生物制药、大数据、人工智能等。通过产学研结合，才能不断挖掘量子计算机实用的潜力，促进量子计算行业的不断发展。

超导量子计算云平台架起了研发人员和用户

参考文献

- [1] <https://www.ibm.com/quantum/systems>
 [2] <https://www.rigetti.com>
 [3] <https://oxfordquantumcircuits.com>
 [4] <https://quantumcomputer.ac.cn>
 [5] <https://qcloud.OriginQC.com.cn>
 [6] <https://quantum.baidu.com>
 [7] <https://quafu.baqis.ac.cn>
 [8] Cross A W, Bishop L S, Sheldon S *et al.* Phys. Rev. A, 2019, 100: 032328

之间的桥梁，双方的共同进步也促进了量子计算学科的发展。虽然当前它还处于比较初级的发展阶段，随着科学和技术的不断进步，我们期盼实用化量子计算机和云平台早日到来！

致谢 感谢北京量子信息科学研究院张颖珊博士、王睿侠博士和金贻荣博士对文章部分内容的修改建议。

- [9] Wack A, Paik H, Javadi-Abhari A *et al.* Quality, Speed, and Scale: three key attributes to measure the performance of near-term quantum computers, 2021, arXiv:2110.14108
 [10] Kim Y, Eddins A, Anand S *et al.* Nature, 2023, 618: 500
 [11] Chen C T, Shi Y H, Xiang Z C *et al.* Science China-Phys. Mech. & Astron., 2022, 65: 110362
 [12] Song C, Xu K, Liu W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 180511
 [13] Song C, Xu K, Li H *et al.* Science, 2019, 365: 574
 [14] Cai Z Y. Phys. Rev. A, 2020, 14: 014059

读者和编者

订阅《物理》得好礼

—超值回馈《岁月留痕—
—〈物理〉四十年集萃》

部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠物理类科普图书或《岁月留痕—〈物理〉四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏。

希望读者们爱上《物理》！

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址：北京市中关村南三街8号中科院物理所，100190

收款人姓名：《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行：农行北京科院南路支行

为答谢广大读者长期以来关爱和支持，《物理》编辑

户名：中国科学院物理研究所

帐号：11 250 1010 4000 5699

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话：010-82649029；82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

