

《物理学报》创刊 90 周年

离子阱量子计算规模化的研究进展*

吴宇恺¹⁾²⁾ 段路明^{1)2)3)†}

1) (清华大学交叉信息研究院, 北京 100084)

2) (合肥国家实验室, 合肥 230088)

3) (新基石科学实验室, 北京 100084)

(2023 年 7 月 13 日收到; 2023 年 10 月 19 日收到修改稿)

离子阱系统是当前实现量子计算最为领先的物理系统之一, 已经在数十量子比特的规模下实现了保真度达到容错量子计算阈值的量子态制备、测量、通用量子逻辑门等基本量子操作. 未来离子阱量子计算的一个重要研究方向, 是在保持量子比特高性能的同时, 进一步扩展量子比特的数量, 最终达到解决实际问题所需的规模. 本文介绍当前离子阱量子计算研究中主流的规模化方案, 如离子输运方案和离子-光子量子网络方案等, 以及各方案中存在的限制因素, 进而探讨如二维离子阵列、双重量子比特等新的规模化方案及其前景.

关键词: 量子计算, 离子阱, 量子比特**PACS:** 03.67.Lx, 03.67.-a, 37.10.Ty, 32.80.Qk**DOI:** 10.7498/aps.72.20231128

1 引言

近年来, 量子计算以其潜在的超越经典计算机的性能获得了广泛的关注. 离子阱是当前在实现量子计算方面最为领先的物理系统之一, 具有量子比特全同性好、量子操作保真度高、量子态相干存储时间长、支持长程量子纠缠逻辑门等优势. 自从 1995 年最早的量子计算实施方案在离子阱系统提出以来^[1], 离子阱量子计算机的研究取得了显著的进展, 已经在 32 个量子比特系统中实现了保真度达到容错量子计算阈值的通用量子操作^[2], 且逻辑比特的容错量子纠缠逻辑门保真度已超越了物理比特^[3]. 然而, 与其他主要的量子计算平台类似, 现有的离子阱量子计算机的规模距离解决大量实际问题所需的上百万个量子比特仍有较大的差距. 如何在保持当前量子比特的高性能的前提下, 进一步扩展量子比特的数量, 将是今后离子阱量子计算研

究的重要方向. 本文将探讨离子阱量子计算机规模化的一种可能的途径, 以期激发更多该领域的研究工作.

2 离子阱量子计算研究现状与挑战

离子阱量子计算机^[4]采用射频电场和静电场结合, 将离子约束在真空中, 使其在库仑力作用下排列成稳定的阵列. 离子量子比特编码在各个离子的稳态或亚稳态能级上, 利用激光或微波可控制不同能级之间的跃迁, 实现任意的单比特量子逻辑门. 此外, 利用合适频率的激光还可以将离子的内部能级和离子在空间中的振动耦合在一起, 产生一个自旋相关力 (spin-dependent force). 不同离子的振动通过离子之间长程的库仑力耦合在一起, 进而将不同离子的内部能级耦合起来, 由此可以实现两个离子之间的双比特量子纠缠逻辑门. 当前, 离子阱系统已实现单比特量子逻辑门保真度 99.9999%^[5],

* 科技创新 2030—“量子通信与量子计算机”重大项目 (批准号: 2021ZD0301601)、新基石科学基金会 (新基石研究员项目)、教育部、清华大学自主科研计划、清华大学笃实专项和清华大学科研启动基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lmduan@tsinghua.edu.cn

以及 2 离子系统中单比特量子逻辑门保真度 99.99%、双比特量子逻辑门保真度 99.9%^[6,7].

为了获得可独立操控的多个量子比特, 主流的离子阱量子计算实验通常设计合适的约束电场, 让离子沿着离子阱的轴线方向排列成间距几微米的一维阵列, 从而可以利用聚焦的激光束对各个离子进行单独寻址操控. 利用该方法, 国际上已实现了对 13 个离子的单比特量子逻辑门平均保真度 99.98%, 以及全连通的双比特量子逻辑门保真度 98.5%—99.3%^[8], 并在 53 离子^[9] 和 61 离子^[10] 的一维阵列上演示了量子模拟实验. 然而, 一维构型所能提供的离子数并不能满足离子阱量子计算机的规模化需求. 受限于离子阱所能提供的最大径向约束电场强度, 为了将更多的离子维持在一维构型, 需要降低轴向的约束电场, 而这将使离子的轴向运动更易受到环境电磁噪声的影响, 最终限制所能稳定约束的离子数^[11]. 目前, 室温离子阱系统通常只能稳定约束数十个离子的一维阵列, 而进一步降低环境温度、提高系统真空度的低温离子阱系统, 通常也只能稳定约束 100—200 个离子的一维阵列^[12,13]. 这远低于未来的大规模通用量子计算机所需的数百万量子比特的规模.

为了进一步扩展离子量子比特的数量, 国际上目前有两种主流的研究思路. 一种是离子输运方案, 也称为 QCCD (quantum charge-coupled device) 方案^[11,14], 设置多个空间区域分别用于进行逻辑门、量子比特存储、量子态测量等操作, 通过精密调控约束电场来实现离子在这些空间区域之间的输运, 例如将来自不同存储区域的两个离子移动到同一个逻辑门区域进行量子纠缠, 再将一个移回存储区域用作后续操作, 而将另一个移动到探测区域进行测量, 通过这些操作的组合可实现大规模通用量子计算. 该方案的优势在于, 每个逻辑门或探测区域内只容纳少量离子, 而不同区域之间的间距较大, 从而有效抑制了不同区域间离子的串扰误差, 使得每个基本量子操作的保真度不随总离子数的增加而降低. 近期, Quantinuum 公司利用该方案实现了 32 离子单比特量子逻辑门平均保真度 99.997%、全连通的双比特量子逻辑门保真度 99.8%^[2]. 然而, 该方案也面临一些技术上的挑战与限制. 为了准确控制离子的输运路径, 需要精确设计加工离子阱的电极并进行精密的电压控制, 一方面希望提高离子的输运速度以缩短量子计算的时间, 另一方

面又需要避免输运过程显著加热离子的振动, 否则将会降低后续的量子逻辑门的保真度. 通常, 在输运结束后, 还需要对编码量子比特的离子 (称为“计算离子”) 进行协同冷却, 即采用另一些离子进行激光冷却 (称为“冷却离子”), 在不干扰编码的量子比特信息的前提下把计算离子的运动状态冷却下来. 以上述 32 离子为例, 在多种典型的量子线路中, 离子输运和协同冷却所消耗的时间, 都占据了总运行时间的 98% 以上^[2]. 在一维的离子输运架构中, 为实现量子比特全连通性所需的输运时间还将随离子数进一步增长, 而二维的离子输运架构则需要更为复杂的电极设计, 面临新的技术挑战. 此外, 为了独立控制各个量子操作区域并降低离子间的串扰误差, 不同区域之间的距离需要在数十到数百微米以上, 远大于单个离子阱中典型的数微米的离子间距, 这也限制了相同空间内所能容纳的离子量子比特数.

另一种主流的离子阱量子计算规模化方案是离子-光子量子网络方案^[15], 将多个离子阱作为独立的量子计算模块, 在各个离子阱中让一部分离子量子比特与光子纠缠, 再对来自不同离子阱的光子进行纠缠交换 (entanglement swapping), 从而把不同离子阱中的离子量子比特纠缠在一起. 方案中通常也需要两种不同种类的离子, 一种“计算离子”编码量子比特信息, 用于模块内的量子计算; 另一种“通信离子”用于产生与光子的纠缠, 从而进行与其他离子阱的连接. 该方案的优点在于, 单个离子阱的结构设计较为简单, 且不同离子阱的操控相对独立. 当前, 实验上已实现了不同离子阱中的两个离子通过光子产生量子纠缠, 保真度达到 78%^[16] 和 94%^[17]. 但是, 受限于光子的产生、收集和探测效率, 该方案中不同离子阱之间的量子纠缠产生效率较低, 典型的时间尺度在 10 ms 以上, 远长于单个离子阱中的量子纠缠逻辑门的数十到数百微秒的时间. 如果每个离子阱中的离子量子比特数量较少, 利用该方案进行规模化时, 模块间的通信速率将成为总量子计算时间的制约因素.

此外, 在上述方案中所用的“计算离子”和其他“冷却离子”、“通信离子”以及量子纠错中用于实时检测所发生的错误的辅助离子 (以下统称“辅助离子”), 通常需要采用不同种类的离子, 例如镱和钡两种不同的元素^[2], 或是钙-40 和钙-43 两种不同的同位素^[18], 从而使得不同离子之间的共振跃迁频

率不同,避免了在协同冷却、量子比特状态测量或产生离子-光子量子纠缠时散射的光子对计算离子所编码的量子信息造成串扰误差.但这也使离子阵列失去了部分的全同性,需要合适的技术来准确地控制各类离子的位置和比例.另外,对于协同冷却,由于不同种类的离子质量不同,也将影响离子之间的集体振动模式,使得冷却效率降低^[19].而对于离子-光子量子网络方案,在生成了通信离子之间的量子纠缠后,会需要进一步在计算离子和通信离子之间执行量子纠缠逻辑门,其难度也高于同种离子之间的逻辑门^[18,20,21].

3 离子阱量子计算规模化的新思路

由于上述主流的规模化方案中存在的技术挑战,近年来,一些新的规模化思路也开始引起了研究人员的关注.

针对一维离子阵列在规模化上的困难,可以采用二维离子阵列来扩展量子比特数.通过设置合适的约束电场,可以让一个空间方向的约束明显强于另两个方向,从而使离子形成二维阵列,由此可将单个离子阱中容纳的量子比特数扩展至数百乃至数千.此前,实验中已实现过150以上离子的二维阵列^[22],近期我们也在低温离子阱中实现了约500个离子的二维阵列,如图1所示.此前一般认为,由于二维阵列中离子在射频电场作用下会表现出高频的微运动(micromotion),将阻碍对离子执行高保真度的逻辑门.但我们的理论研究工作表明,离子的微运动并不引起退相干效应,可以将其包含在激光序列的设计中,实现高保真度的逻辑门^[23-25].此外,二维离子阵列的量子计算也需要解

决二维平面上的任意寻址问题.如图2所示,可以通过一对正交放置的声光偏转器(acousto-optic deflector)分别控制水平和竖直方向的寻址^[26],以获得对二维离子阵列的任意单独寻址,从而实现通用量子逻辑门.

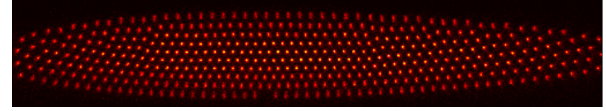


图1 清华大学实验团队获得的约500个离子的二维阵列
Fig. 1. A 2D ion crystal with about 500 ions at Tsinghua University.

对于实验中使用不同种类的离子的困难,可以采用同种离子的不同亚稳态能级来实现所需的计算离子和辅助离子^[27].如图3所示,采用镱-171离子的 $S_{1/2}$ 和 $F_{7/2}$ 两对超精细结构能级,来承担大规模量子计算中所需的不同角色,称为S-量子比特和F-量子比特,合称为“双重类型量子比特”(dual-type qubit)方案.利用双色窄线宽激光,可实现S-量子比特和F-量子比特之间的相干转换,保真度达到了99.5%.由此,可以将量子计算过程中需要保护的计算离子实时地转移到F态,而利用留在S态的离子承担辅助离子的任务.本工作中演示了S态离子进行协同冷却、量子态初始化与测量、单比特逻辑门,验证其对F态离子的串扰误差小于0.06%,满足容错量子计算的需求.基于该方案,可以有效提高大规模离子阵列的全同性,回避了调节不同种类离子的位置和比例的困难,也提高了协同冷却的效率.此外,在该工作公开后,Allcock等^[28]也发布了类似的利用同种离子编码多种量子比特的技术蓝图,并认为其在离子阱量子计算中有广阔的前景.

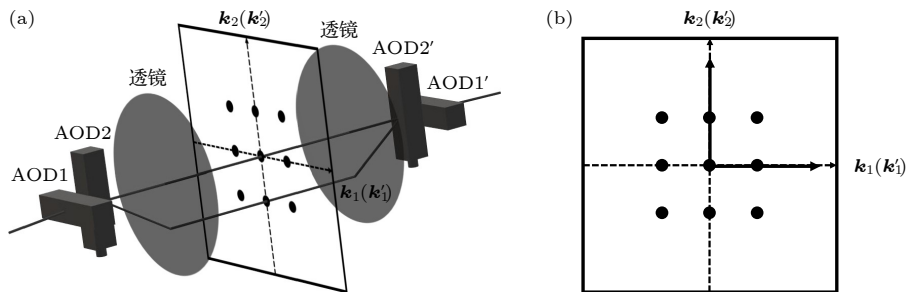


图2 利用一对正交放置的声光偏转器进行二维单独寻址^[26].图中AOD1和AOD2, AOD1'和AOD2'各为一对正交放置的声光偏转器,各自可进行水平和竖直方向的单独寻址

Fig. 2. Individual addressing in 2D through a pair of cross-placed AODs^[26]. Here AOD1 and AOD2, and AOD1' and AOD2', are two pairs of cross-placed AODs, each of which can achieve individual addressing in the horizontal and vertical directions.

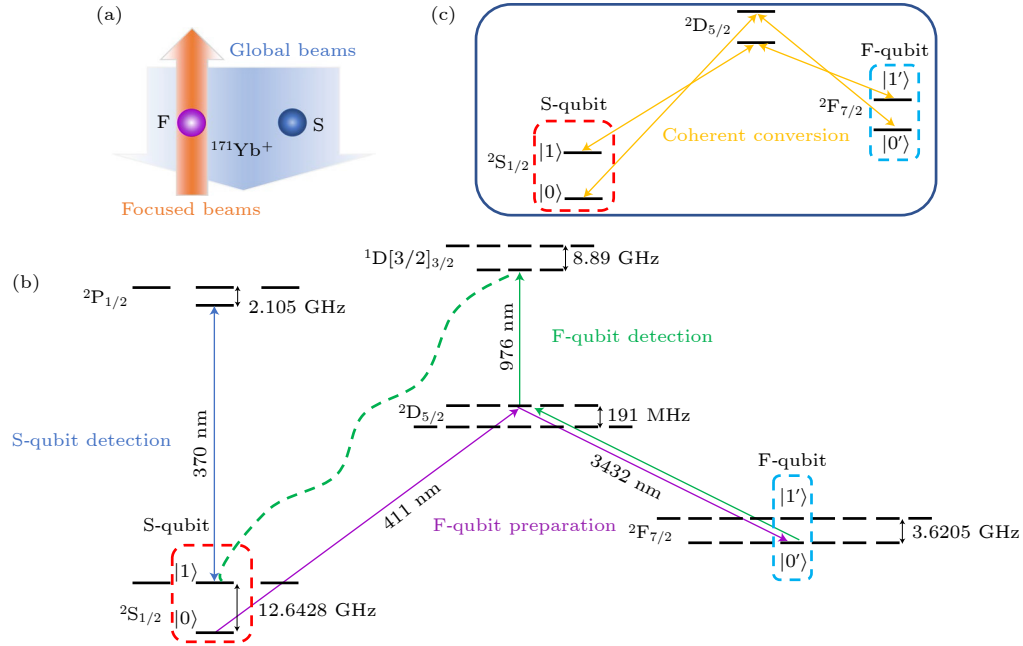


图 3 镱-171 离子的双重类型量子比特方案^[27], 编码在 $\text{S}_{1/2}$ 和 $\text{F}_{7/2}$ 超精细能级上的量子比特共振频率不同, 串扰误差小于量子纠错阈值, 且可通过双色窄带激光进行经由 $\text{D}_{5/2}$ 能级过渡进行相干转换

Fig. 3. Dual-type qubit scheme for $^{171}\text{Yb}^+$ ion^[27]. Qubits encoded in $\text{S}_{1/2}$ and $\text{F}_{7/2}$ hyperfine levels have distinct resonant frequencies, thus leading to a crosstalk error below the threshold of fault-tolerant quantum computing. The two qubit types can be coherently converted into each other by bichromatic narrow-band laser via intermediate $\text{D}_{5/2}$ levels.

采用二维离子阵列, 并用双重类型量子比特的方案辅助进行协同冷却, 有望在单个离子阱中将可相干操控的量子比特数迅速扩展到数百至数千的规模, 但是离大规模的通用量子计算所需的上百万量子比特仍有较大差距. 因此, 上述方案仍需与离子-光子量子网络方案结合, 才能实现最终的规模化. 如前文所述, 离子-光子量子网络方案目前主要受限于模块间的量子纠缠效率. 通过采用二维阵列, 将单个离子阱中的量子比特数提升 1—2 个数量级, 将能够显著减少模块间所需要的纠缠连接次数, 提高量子计算的速率.

4 总结与展望

离子阱系统是极具前景的实现通用量子计算的物理系统之一, 也已有多种技术路线来实现离子量子比特的规模化. 但应注意, 当前的量子比特数距离最终能通过量子纠错解决实际问题所需的规模还有较大差距, 而包括离子输运、离子-光子量子网络、二维离子阵列与双重类型量子比特等在内的各种技术路线都只在小规模系统中获得了部分的演示, 这些技术路线都有可能在未来的发展中遇到新的问题, 需要新的理论方案与实验技术来加以解

决. 对于双重类型量子比特方案, 笔者团队近期演示了用 S 态的通讯离子产生离子-光子量子纠缠的同时, 将计算离子置于 F 态进行保护, 也实现了低于容错阈值的串扰误差^[29]. 而对于二维离子阵列方案, 下一个里程碑将是实现单独寻址的高保真度量子纠缠逻辑门. 此外, 针对各种规模化技术路线, 设计最优的量子纠错编码, 缩短所需的量子线路, 也将是未来重要的研究方向.

感谢清华大学交叉信息研究院侯攀宇教授和周子超博士的讨论.

参考文献

- [1] Cirac J I, Zoller P 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 4091
- [2] Moses S A, Baldwin C H, Allman M S, et al. 2023 arXiv 2305.03828
- [3] Ryan-Anderson C, Brown N C, Allman M S, et al. 2022 arXiv 2208.01863
- [4] Bruzewicz C D, Chiaverini J, McConnell R, Sage J M 2019 *Appl. Phys. Rev.* **6** 021314
- [5] Harty T P, Allcock D T C, Ballance C J, Guidoni L, Janacek H A, Linke N M, Stacey D N, Lucas D M 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 220501
- [6] Ballance C J, Harty T P, Linke N M, Sepiol M A, Lucas D M 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 060504
- [7] Gaebler J P, Tan T R, Lin Y, Wan Y, Bowler R, Keith A C, Glancy S, Coakley K, Knill E, Leibfried D, Wineland D J

- 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 060505
- [8] Egan L, Debroy D M, Noel C, Risinger A, Zhu D, Biswas D, Newman M, Li M, Brown K R, Cetina M, Monroe C 2021 *Nature* **598** 281
- [9] Zhang J, Pagano G, Hess P W, Kyprianidis A, Becker P, Kaplan H, Gorshkov A V, Gong Z X, Monroe C 2017 *Nature* **551** 601
- [10] Li B W, Wu Y K, Mei Q X, Yao R, Lian W Q, Cai M L, Wang Y, Qi B X, Yao L, He L, Zhou Z C, Duan L M 2023 *PRX Quantum* **4** 010302
- [11] Wineland D J, Monroe C, Itano W M, Leibfried D, King B E, Meekhof D M 1998 *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **103** 259
- [12] Pagano G, Hess P W, Kaplan H B, Tan W L, Richerme P, Becker P, Kyprianidis A, Zhang J, Birkelbaw E, Hernandez M R, Wu Y, Monroe C 2019 *Quantum Sci. Technol.* **4** 014004
- [13] Yao R, Lian W Q, Wu Y K, Wang G X, Li B W, Mei Q X, Qi B X, Yao L, Zhou Z C, He L, Duan L M 2022 *Phys. Rev. A* **106** 062617
- [14] Kielpinski D, Monroe C, Wineland D J 2002 *Nature* **417** 709
- [15] Duan L M, Monroe C 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 1209
- [16] Hucul D, Inlek I V, Vittorini G, Crocker C, Debnath S, Clark S M, Monroe C 2015 *Nat. Phys.* **11** 37
- [17] Stephenson L J, Nadlinger D P, Nichol B C, An S, Drmota P, Ballance T G, Thirumalai K, Goodwin J F, Lucas D M, Ballance C J 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 110501
- [18] Ballance C J, Schäfer V M, Home J P, Szwer D J, Webster S C, Allcock D T C, Linke N M, Harty T P, Aude Craik D P L, Stacey D N, Steane A M, Lucas D M 2015 *Nature* **528** 384
- [19] Sosnova K, Carter A, Monroe C 2021 *Phys. Rev. A* **103** 012610
- [20] Tan T R, Gaebler J P, Lin Y, Wan Y, Bowler R, Leibfried D, Wineland D J 2015 *Nature* **528** 380
- [21] Drmota P, Main D, Nadlinger D P, Nichol B C, Weber M A, Ainley E M, Agrawal A, Srinivas R, Araneda G, Ballance C J, Lucas D M 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 090803
- [22] Szymanski B, Dubessy R, Dubost B, Guibal S, Likforman J P, Guidoni L 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 171110
- [23] Shen C, Duan L M 2014 *Phys. Rev. A* **90** 022332
- [24] Wang S T, Shen C, Duan L M 2015 *Sci. Rep.* **5** 8555
- [25] Wu Y K, Liu Z D, Zhao W D, Duan L M 2021 *Phys. Rev. A* **103** 022419
- [26] Duan L M, Yang H X 2022 China Patent CN112749808B(in Chinese)[段路明, 杨蒿翔 2022 中国专利 CN112749808B]
- [27] Yang H X, Ma J Y, Wu Y K, Wang Y, Cao M M, Guo W X, Huang Y Y, Feng L, Zhou Z C, Duan L M 2022 *Nat. Phys.* **18** 1058
- [28] Allcock D T C, Campbell W C, Chiaverini J, Chuang I L, Hudson E R, Moore I D, Ransford A, Roman C, Sage J M, Wineland D J 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 214002
- [29] Feng L, Huang Y Y, Wu Y K, Guo W X, Ma J Y, Yang H X, Zhang L, Wang Y, Huang C X, Zhang C, Yao L, Qi B X, Pu Y F, Zhou Z C, Duan L M 2023 *arXiv* 2306.14405

The 90th Anniversary of *Acta Physica Sinica*

Research progress of ion trap quantum computing^{*}

Wu Yu-Kai¹⁾²⁾ Duan Lu-Ming^{1)2)3)†}

1) (*Institute for Interdisciplinary Information Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*Heifei National Laboratory, Heifei 230088, China*)

3) (*New Cornerstone Science Laboratory, Beijing 100084, China*)

(Received 13 July 2023; revised manuscript received 19 October 2023)

Abstract

Ion trap is one of the leading physical platforms to implement quantum computation. Currently, high-fidelity elementary quantum operations above the fault-tolerant threshold, including state preparation, measurement and universal gates, have been demonstrated for tens of ionic qubits. One important future research direction is to further enlarge the qubit number to the scale required for solving practical problems while maintaining the high performance of individual qubits. This paper introduces the current mainstream schemes for scalable ion trap quantum computation like quantum charge-coupled device (QCCD) and ion-photon quantum network, and describes the main limiting factors in current research. Then we further explore new schemes to scale up the qubit number like two-dimensional ion crystals and dual-type qubit, and discuss the future research directions.

Keywords: quantum computation, ion trap, qubit

PACS: 03.67.Lx, 03.67.-a, 37.10.Ty, 32.80.Qk

DOI: [10.7498/aps.72.20231128](https://doi.org/10.7498/aps.72.20231128)

^{*} Project supported by the Innovation Program for Quantum Science and Technology, China (Grant No. 2021ZD0301601), the New Cornerstone Science Foundation through the New Cornerstone Investigator Program, the Ministry of Education of China, the Tsinghua University Initiative Scientific Research Program, China, the Tsinghua University Dushi Program, China, and the Tsinghua University Start-up Fund, China.

[†] Corresponding author. E-mail: lmduan@tsinghua.edu.cn

离子阱量子计算规模化的研究进展

吴宇恺 段路明

Research progress of ion trap quantum computing

Wu Yu-Kai Duan Lu-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 230302 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231128

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231128>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

量子计算与量子模拟中离子阱结构研究进展

Advances in the study of ion trap structures in quantum computation and simulation

物理学报. 2022, 71(13): 133701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220224>

基于测量的量子计算研究进展

Research progress of measurement-based quantum computation

物理学报. 2021, 70(21): 210301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210923>

量子计算与量子模拟

Quantum computation and quantum simulation

物理学报. 2018, 67(12): 120301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180710>

连续变量量子计算和量子纠错研究进展

Research advances in continuous-variable quantum computation and quantum error correction

物理学报. 2022, 71(16): 160305 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220635>

两量子比特系统中相互作用对高阶奇异点的影响

High-order exceptional point in a quantum system of two qubits with interaction

物理学报. 2022, 71(13): 130303 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20220716>

色散和杂质对双参量非对称高斯势量子点量子比特的影响

Influence of dispersion and impurity on double-parameter asymmetric Gaussian quantum dot qubit

物理学报. 2019, 68(24): 247803 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190960>