

超导量子计算中的玻色量子编码： 量子纠错与逻辑比特操控的实验验证

胡玲¹ 邹长铃^{2,†} 段路明¹ 孙麓岩^{1,††}

(1 清华大学交叉信息研究院 北京 100084)

(2 中国科学技术大学量子信息重点实验室 合肥 230026)

2019-05-09收到

† email: clzou321@ustc.edu.cn

†† email: luyansun@mail.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20190706

众所周知，量子计算机在某些问题上(比如大数因子分解^[1]和有序数据库搜索^[2])具有远超经典计算机的运算能力，因此受到了广泛关注。然而，在实际的物理系统中，存储量子信息的量子比特会不可避免地受到环境噪声的影响。所以，在计算的过程中量子比特会随机地发生错误，从而对计算结果造成致命的影响，而且发生错误的概率会随着系统规模的增加而增大。因此，一个实用的可扩展量子计算机最终要由量子纠错保护的逻辑量子比特构造，并且要能在逻辑量子比特层面上进行逻辑门操控，从而防止不必要的或不受控制的错误干扰，实现对量子信息的保护和操控^[3]。

尽管量子纠错被公认为是实现可扩展通用量子计算机的核心问题，但是这方面的实验进展缓慢^[4-13]。这是因为量子纠错需要高维度的量子系统、高保真度的非破坏性量子测量和量子操控，

以及实时量子反馈控制等技术，对实验来说是非常大的技术挑战。当前量子计算实验的一个迫切目标便是实现由量子纠错保护的逻辑量子比特，使其相干性能超过组成它的物理比特，进而实现对单个逻辑量子比特的门操作，并以此为基础扩展到在多个逻辑量子比特上执行量子算法^[14]。

在传统的量子纠错方案中^[15-17]，每个逻辑量子比特由多个物理比特组成，通过冗余的希尔伯特空间自由度实现纠错。这种方案对逻辑门出错率要求非常高，同时多级编码过程中资源的开销也非常大。为了克服实现超低出错率的困难，人们提出了表面编码的方案^[18]：利用大量物理比特排布成一个二维网格，通过系统编码的拓扑性质来对抗噪声的影响。这种表面编码是目前多数大型商业公司在超导量子计算系统中所采取的方案。这两种基于多比特的编码方案都需要首先将量子系统扩展，然后再来实现量子纠错。然而，

基于这种量子编码架构要真正实现一个相干性能得以提高的逻辑量子比特及其量子门是非常困难的。这是因为一方面，逻辑量子比特的错误通道数目正比于其组成物理比特的数量，因此会随着引入物理比特的数目增加而增加；另外一方面，对逻辑量子比特的量子门操控需要比较复杂的非局域化的多体相互作用。因此，大家期望可以不通过增加物理比特的数量而提升量子系统的维度，用一个单一的物理系统来进行量子编码，这样可以大大减少逻辑比特对硬件的要求，因此有望更早实现量子纠错并进行扩展。

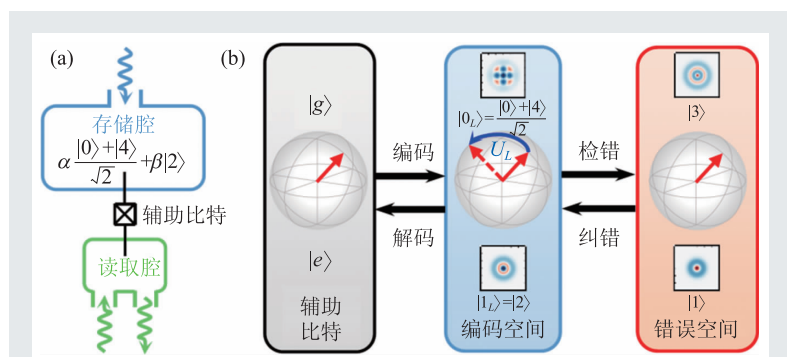


图1 玻色二项式量子纠错码示意图 (a)实验模型，由一个高品质的存储微波腔作为逻辑比特，一个超导量子比特作为辅助比特和一个低寿命的微波腔作为辅助比特的读取腔组成。逻辑比特的两个基矢分别为 $|0_L\rangle = (|0\rangle + |4\rangle)/\sqrt{2}$ 和 $|1_L\rangle = |2\rangle$ ；(b)玻色编码的完整量子纠错和逻辑比特的量子操作过程，包括量子信息由辅助比特到逻辑比特的编码和解码过程，以及对可能发生的错误进行检测和对发生错误的逻辑比特进行纠错恢复的过程。本图来自文献[21]

基于单个谐振子的量子信息编码是一个可能的解决途径。早在量子纠错理论建立之初,就已经有理论学家提出将量子信息编码到玻色模式中^[19, 20]。利用谐振子的无限大希尔伯特空间来进行冗余信息编码,可以实现量子比特甚至高维量子编码,但是错误通道的数目保持不变,主要为谐振子激发的丢失,所以只需实时监测一种错误症状。因此,玻色编码是一种节省硬件的量子纠错码,可以基于当前的实验技术在逻辑比特层面上探索量子操作和运算。

我们在实验^[21]中利用一个高品质的微波谐振腔来进行量子信息的存储,外加一个与其耦合的辅助超导量子比特,实现了基于微波光子数按二项式系数叠加的玻色纠错码^[22]。图1是玻色二项式量子纠错码的实验示意图。这种二项式编码可以严格地纠正光子损耗错误、光子增益错误和相位错误。相比于另外一种玻色编码——猫态编码^[23, 24],二项式编码具有以下优势:(1)逻辑比特的两个基矢是严格正交的;(2)两个基矢有严格相等的平均光子数;(3)可以实现确定性的么正变换来纠正光子损耗的错误;(4)有限的光子数截止空间,受克尔的影响更小。因此,该编码具有更大的发展潜力和广阔的应用前景,有益于实现可扩展的量子计算。

基于对超导量子系统的精确操控,我们实现了从辅助超导比特到微波谐振腔模式的高效编码和解码,实现了玻色二项式编码的逻辑量子比特。在实验中,我们发展了基于可编程逻辑门阵列的快速、实时量子反馈技术,同时利用接近量子极限的微波放大器实现了辅助超导量子比特快速、高保真度读取。基于这两项技术,可以快速实时地监测逻辑比特的错误症状,从而判断存储的量子态是否与环境纠缠(是否发生光子损耗),并通过量子反馈控制及时地纠正和恢复逻辑量子比特。通过对比不进行错误探测和纠正的逻辑比特编码,可以看到对逻辑量子比特进行连续量子纠错可以将其相干时间延长2.8倍。对比实验中

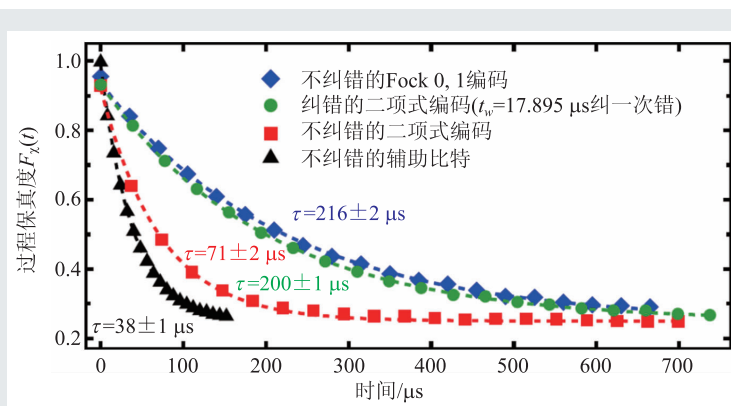


图2 基于玻色二项式编码的量子纠错实验结果。通过量子反馈控制实现了对逻辑量子比特的连续量子纠错,将相干时间延长为没有量子纠错时的2.8倍,超过辅助超导量子比特编码的5倍。本图来自文献[21]

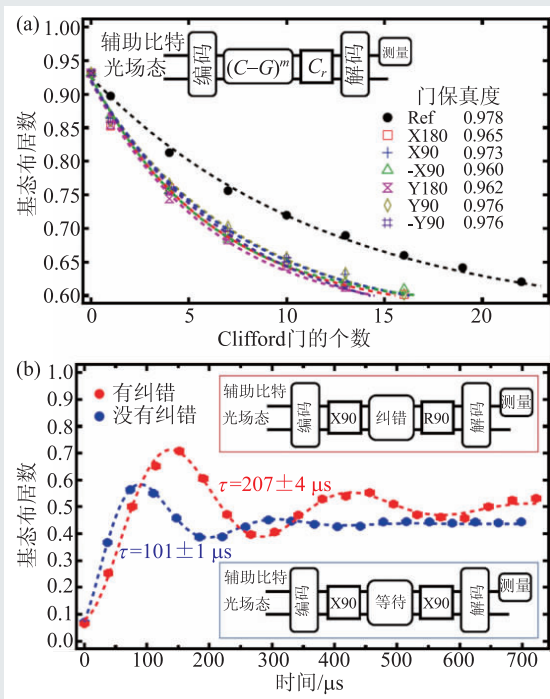


图3 基于二项式编码的逻辑量子比特的通用量子门操控和量子纠错保护下的拉姆齐干涉 (a)逻辑比特的量子门操作平均保真度为97.0%;(b)在量子纠错保护下的逻辑比特上的拉姆齐干涉实验将其相干时间提高了2倍。本图来自文献[21]

辅助超导量子比特,纠错保护的逻辑比特的相干时间是其5倍,如图2所示。

为了证明玻色编码的逻辑比特可以用于将来的量子信息处理,我们还实现了对单个逻辑比特高保真度通用量子门操作(图3(a))。实验结果表明,逻辑比特的量子门操作平均保真度高达97.0%,因此基于我们实验架构的玻色编码逻辑

比特具有很大的潜力。此外,我们首次实现了在量子纠错保护下的逻辑比特上的拉姆齐干涉实验,将其相干时间提高了2倍(图3(b))。拉姆齐干涉实验是精密测量中广泛应用的一种技术,实验证明玻色编码的量子纠错和量子操作可以在这个领域发挥作用,利用量子技术提高测量精度。

我们的实验证实了玻色二项式量子纠错码的优势和潜力,演示了量子纠错和单逻辑比特的普适量子门操作,是近几年来在量子纠错方面的一个重要进展,为基于玻色编码的可容错量子计算的实现奠定了基础。下一步,玻色量子纠错码将进一步扩展到多个逻辑比特并实现两逻辑比特量

子门。量子玻色编码实验不仅为超导量子计算提供了新的思路,也为其他的潜在量子计算机的实验系统提供了参考,例如玻色编码可以用于离子阱中的离子运动态、固态系统中高频机械振子的声子编码以及光学腔量子电动力学系统的光子态。而且,利用量子纠错码延长玻色模式的相干时间,不仅能用于量子计算的逻辑比特,还能用于基于光子的长距离量子通信^[25],或者提高基于机械谐振子和光学干涉仪的量子精密测量^[26]。

致谢 感谢清华大学交叉信息研究院的马雨玮等在实验中的贡献。

参考文献

- [1] Shor P W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. Proc. 35th Annu. Symp. Foundations of Computer Science, 1994. P. 124
- [2] Grover L K. Phys. Rev. Lett., 1997, 79:325
- [3] Nielsen M, Chuang I L. Quantum computation and quantum information, Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- [4] Chiaverini J *et al.* Nature, 2004, 432:602
- [5] Schindler P *et al.* Science, 2011, 332: 1059
- [6] Reed M D *et al.* Nature, 2012, 482:382
- [7] Walderherr G *et al.* Nature, 2014, 506:204
- [8] Taminiau T H *et al.* Nat. Nanotechnol., 2014, 9:171
- [9] Nigg D *et al.* Science, 2014, 345:302
- [10] Kelly J *et al.* Nature, 2015, 519:66
- [11] Corcoles A D *et al.* Nat. Commun., 2015, 6:6979
- [12] Riste D *et al.* Nat. Commun., 2015, 6:6983
- [13] Cramer J *et al.* Nat. Commun., 2016, 7:11526
- [14] Devoret M H, Schoelkopf R J. Science, 2013, 339:1169
- [15] Shor P W. Phys. Rev. A, 1995, 52:R2493
- [16] Steane A. Proc. Roy. Lond. A, 1996, 452:2551
- [17] Gottesman D. Proc. Symp. Appl. Math., 2010, 68:13
- [18] Fowler A G *et al.* Phys. Rev. A, 2012, 86:032324
- [19] Chuang I L *et al.* Phys. Rev. A, 1997, 56:1114
- [20] Gottesman D *et al.* Phys. Rev. A, 2001, 64:012310
- [21] Hu L *et al.* Nat. Phys., 2019, 15:503
- [22] Michael M H *et al.* Phys. Rev. X, 2016, 6:031006
- [23] Leghtas Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111:120501
- [24] Mirrahimi M *et al.* New J. Phys., 2014, 16:045014
- [25] Li L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119:030502
- [26] Zhou S *et al.* Nat. Commun., 2018, 9:78

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《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》!

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持,《物理》编辑

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

户名:中国科学院物理研究所

帐号:112 501 010 400 056 99

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话:010-82649470; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn