

观点与展望：量子计算纠错取得突破性进展

范桁

中国科学院物理研究所

摘要：

谷歌团队利用超导量子芯片，实现了两种规模的量子纠错表面码，利用辅助比特进行多次测量和初始化操作进行纠错，表明使用更多量子比特表面码的逻辑比特，其性能表现更好，达到了量子纠错规模化的盈亏平衡点，本文将简要回顾量子纠错的机制，讨论谷歌量子纠错结果的意义，以及系列量子纠错进展，最后将展望量子计算的发展方向。

关键词：量子纠错，量子计算，逻辑量子比特

1. 引言

近日，谷歌量子人工智能团队关于量子纠错的文章在 Nature 发表^[1]，并迅速引起关注，文章展示了基于量子纠错表面码所构建的逻辑比特，随着编码使用的物理比特数目的增加，性能变得更好，即期望随着编码规模的继续扩展，我们将能获得足够好的逻辑比特，为容错性通用量子计算奠定基础。谷歌团队也宣称，这是其在 2019 年实现“量子霸权”目标之后^[2]，所取得的第二个里程碑式的成果。当然，这一成果的解读和意义，也还需要多方面的分析。

大家普遍认为量子纠错是量子计算机发展中重要的一步，那么为什么量子计算需要纠错呢？实际上我们现在使用的计算机，在发展早期，人们也对纠错进行了深入的研究，但是现有计算机的错误率非常低，纠错并不必要。而量子计算机由于不可避免的退相干影响，以及操作精度的限制，量子纠错就显得必要，特别是对通用量子计算机而言就更是如此。

2. 量子纠错机制

那么怎样进行量子纠错呢？可以先考察经典信息的纠错，考虑一个比特“0”或者“1”，假设有一定的概率发生错误，比如“0”改变成了“1”，可以考虑的纠错方案是用“000”和“111”来代表“0”和“1”，这样如果“000”中有一个比特发生了翻转，我们通过读出这三个比特发现错误，就可以纠正它，当然如果两个比特同时发生了错误，通过纠错则导致一个最终的错误，但是考虑到两个错误同时发生的概率是一个错误概率的平方，我们即知道，通过“000”和“111”这样的重复编码，可以把错误从一个小的概率降低为这个小概率的平方，这就是纠错的基本机制。

量子纠错遵循和经典同样的思想，比特翻转错误被定义为 X 错误，量子比特除了 X 错误，还会发生相位翻转类型的错误，可定义为 Z 错误，这两种错误也有可能同时发生。我们可以试着用“000”和“111”编码来纠正 X 错误，而用三个重复的“0”和“1”的叠加态“+++”和“---”来纠正 Z 的错误，那么采取某种聪明的嵌套形式，比如“+++”中每个叠加态“+”都是用“000”和“111”来实现，就可以同时纠正 X 和 Z 的错误，这个嵌套式的编码用 9 个量子比特来代表一个逻辑量子比特，应该是大家可以预期的结果。确实，9 比特的这种编码就是第一个量子纠错码^[3]，是由舒尔（Shor）提出的，这个由 9 个物理比特所构成的一个逻辑量子比特，其性能表现就比一个物理比特更好，当然前提是纠错本身并不会发生错误。这个纠错码的距离是 $d=3$ ，是描述其编码结构的，同时 $2t+1=d$ ，意味着可以纠正 t 个比特上

的 X, Z 或者 XZ 错误。如果一个纠错码是 $d=5$, 意味着可以纠正两个物理比特上的错误。注意这个舒尔就是大数分解舒尔算法的提出者, 曾获得麦克阿瑟奖、狄拉克奖等诸多荣誉。后续有更多、更高效的纠错码被提出和研究。由于量子比特的读出会引起量子态的塌缩, 所以量子纠错还需要辅助比特以探测错误的具体类型和位置。

从实际操作的角度考虑, 基塔耶夫 (Kitaev, 曾获基础物理学奖、狄拉克奖等) 提出了量子纠错表面码^[4], 通过使用二维方格上布局的量子比特来进行编码和探测, 纠错性质良好。由于超导量子芯片、离子阱和光镊等技术可以实现这种比特布局, 实现表面码纠错成为近期的研究热点。

量子纠错需要编码、制备辅助比特、探测错误和纠正错误等多种操作, 而每一步都会带来额外的错误, 为了避免越纠越错, 则需要操控的精度非常高。在纠错精度高于某个阈值时, 假设量子纠错可以很好的完成, 我们可通过多重级联编码, 使得错误率成指数降低, 从而实现超高精度的逻辑比特, 并最终以大规模逻辑比特构建通用量子计算机。

各种纠错码的实验实现非常多, 包括 2000 年前后核磁共振系统纠错^[5,6], 以及后期的离子阱系统^[7,8], 最近的里德堡原子系统^[9], 其它组在超导量子计算系统纠错的工作^[10,11]等等, 都是非常好的进展, 也表明量子纠错在量子计算中的重要性, 但实现越纠越好仍然是一个挑战。

3. 量子纠错盈亏平衡点

可以看出, 量子纠错跨过盈亏平衡点是实现通用量子计算的重要一步, 谷歌团队这次的成果, 就是在纠错编码的扩展性方面达到了盈亏平衡点, 他们使用了具有 72 个超导量子比特的芯片, 这个芯片是实现量子霸权 54 比特芯片^[2]的升级版, 但这次纠错实验中最多只用了芯片中的 49 个量子比特, 团队实现了距离分别是 $d=5$ 和 $d=3$ 两种逻辑比特, 结果表明, 使用 25 个量子比特编码 ($d^2=25$), 24 个辅助比特进行纠错的 $d=5$ 的一个逻辑比特, 其性能稍优于 9 个比特编码和 8 个辅助比特的 $d=3$ 的一个逻辑比特, 首次在实验中展示了, 随着规模的扩展, 逻辑比特的性能会变得更好, 也预示着如果规模继续扩展, 我们将有望达到理想中的逻辑比特。

这次谷歌成果在技术上主要的特色是: 量子纠错过程循环了多次, 而在多次纠错循环操作中逻辑比特原则上是可以使用的, 其中每次循环过程中涉及辅助比特和编码比特间的逻辑门操作, 对辅助比特的门操作、测量和初始化, 这个技术在过去的超导量子计算实验中并无展示, 而这次能高效、高精度的实现, 技术上前进了一大步, 具体在谷歌实验中, 每次辅助比特的测量会探测到所发生的错误, 并最终来判断不同编码的错误率。

当然大家也会注意到, 实验并没有操作这个逻辑量子比特, 比如实现非门或者更一般的旋转门操作, 因此实验中实现的逻辑比特只是一个静态的、处于存储状态中的量子比特, 在文章的简介中, 团队也表示下一步会朝着操作逻辑比特努力。

谷歌文章作者有 150 多个, 比量子霸权文章^[2]的作者数量翻倍了, 涉及的作者地址除了谷歌量子人工智能团队, 还包括其它 10 个高校地址, 但是除一个作者外, 其他全部作者的第一地址都是谷歌团队, 包括表面码的提出者, 在加州理工工作的基塔耶夫, 表明谷歌以自身团队为核心, 实质性纳入诸多科研力量进行攻关的模式。

4. 总结与展望

总之，量子纠错这个成果具有重要的意义，谷歌称其为六个里程碑目标中的第二个，但只有在六个目标都实现时，量子计算机才有望具有商业价值，即达到 1000 个逻辑比特，一百万物理比特的水平，表明量子计算后续发展仍然有很多的困难需要克服。当然，这种里程碑式工作的划分也只是谷歌团队自己的标准。另一方面，文章也展示了实验的挑战性，其 $d=5$ 和 $d=3$ 两种逻辑比特性能的提升历程，随着实验技术的优化，最终才实现了 $d=5$ 逻辑比特性能超越了 $d=3$ ，实验中确实有诸多不确定性因素。考虑到量子计算机最终需要实用化，这种阶段性成果如何能稳定实现，或者实现更大优势，还需要继续探索，如果能应用于可通过互联网使用的量子计算云平台，将能大大推进领域的发展。另外，谷歌实现的这个逻辑比特并不比用来编码的物理比特更好，这个盈亏平衡点最近被中国的合作团队在另一种超导比特系统实现^[12]。

什么时候可以使用量子计算机？实际上，大家对量子计算发展的时间表、路线图等都有不同的看法，在现阶段含噪中等规模量子计算的背景下^[13-15]，量子纠错显得尤为必要，但能否在低噪音下就能发展出具有实用价值的量子计算应用，也是一个开放的课题。现今，量子计算技术上以提升规模化，降低错误率为主要目标，面向应用可以发展云平台。但现阶段应聚焦扩展还是纠错，是先提升单比特精度还是先增加比特数，应瞄准在实验室发展至成熟的量子计算机，还是现阶段就推广使用专用机等等，这些目标各团队都各有侧重，无疑，经典计算机的发展历程和模式，为量子计算发展提供了借鉴和方向。

参考文献

- [1] Google Quantum AI 2023 *Nature* **614** 676
- [2] Arute F, Arya K, Babbush R, et al. 2019 *Nature* **574** 505
- [3] Shor P W S 1995 *Phys. Rev. A* **52** R2493
- [4] Kitaev A Y 2003 *Ann. Phys.* **303** 2
- [5] Cory D G, Price M D, Maas W, Knill E, Laflamme R, Zurek W H, Havel T F, Somarooet S S 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 2152
- [6] Knill E, Laflamme R, Martinez R, Negrevergne C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5811
- [7] Nigg D, Müller M, Martinez E A, Schindler P, Hennrich M, Monz T, Martin-Delgado A, Blatt R 2014 *Science* **345** 302
- [8] Ryan-Anderson C, Bohnet J G, Lee K, et al. 2021 *Phys. Rev. X* **11** 041058
- [9] Bluvstein D, Levine H, Semeghini G, et al. 2022 *Nature* **604** 451
- [10] Krinner S, Lacroix N, Remm A, et al. 2022 *Nature* **605** 669
- [11] Zhao Y W, Ye Y S, Huang H L, et al. 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 030501
- [12] Ni Z C, Li S, Deng X W, et al. 2022 arXiv: 2211.09319 [quant-ph]
- [13] Preskill J 2018 *Quantum* **2** 79

[14] Kai X, Fan H 2022 *Chin. Phys. B* **31** 100304

[15] Fan H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 120301 (in Chinese) [范桁 2018 物理学报 **67** 120301]

Views and Perspectives: Breakthrough in quantum error correction

Heng Fan

Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract:

By using a superconducting processor, Google quantum AI group demonstrates that a logic qubit realized by surface code of quantum error correction performs better when the number of physical qubits increases. The experiment realized two surface codes to encode logic qubits for scaling, with multiple cycles of quantum error correcting assisted by ancillary qubits. This result can be considered as an important step toward fault-tolerant quantum computers. Here in this views and perspectives, we will introduce briefly the mechanism of quantum error correction. As an example, Shor's nine-qubit error correction code will be explained. Then, the new experiments of Google quantum AI group will be introduced to show its significance for scaling. The advances of other quantum error correction experiments will be also reviewed. Finally, the development of quantum computers will be discussed.

Key words: Quantum error correction, quantum computation, logic qubit