

噪声是量子计算的天敌

—读 Nature Physics 上的一篇文章有感

文 | 徐令予

2026 年 4 月 2 日，顶级期刊 Nature Physics 发表了一篇关于量子计算的重要论文：[《Noise-induced shallow circuits and the absence of barren plateaus》](https://doi.org/10.1038/s41567-026-03245-z)

作者来自 Freie Universität Berlin、École Polytechnique Fédérale de Lausanne、Massachusetts Institute of Technology、University of Chicago 等多家一流机构。无论从期刊层级还是作者背景来看，这都是一篇具有较高可信度的重磅论文。

nature physics



Article

<https://doi.org/10.1038/s41567-026-03245-z>

Noise-induced shallow circuits and the absence of barren plateaus

Received: 3 December 2024

Accepted: 5 March 2026

Published online: 02 April 2026

Check for updates

Antonio Anna Mele¹, Armando Angrisani^{2,3}, Soumik Ghosh⁴,
Sumeet Khatri¹, Jens Eisert^{1,5}, Daniel Stilck França^{6,7} & Yihui Quek⁸

Without a successful implementation of fault-tolerant quantum error correction, calculations on quantum computers are subject to noise that limits their capabilities. Here, motivated by realistic near-term hardware considerations, we study the impact of uncorrected local noise on logical quantum circuits. We first show that, in the task of estimating observable expectation values, any noise effectively truncates most quantum circuits to logarithmic depth. We then prove that quantum circuits under any non-unital noise do not exhibit barren plateaus for cost functions composed of local observables. However, by using the effective shallowness, we also design an efficient classical algorithm to estimate observable expectation values within any constant additive accuracy, with high probability over the choice of the circuit, in any circuit architecture. Taken together, our results establish that, unless we carefully engineer quantum circuits to take advantage of the noise, noisy quantum circuits are unlikely to offer an advantage over shallow ones for algorithms that output observable expectation value estimates, such as many variational quantum machine learning proposals.

但这篇论文真正值得关注的，不是技术细节，而是它提出的一个更为根本性的问题：在尚未实现容错纠错的前提下，量子计算究竟还能保留多少真正的优势？

一、噪声会降低量子线路深度[1]

过去几年，量子计算领域一个重要方向是“变分量子算法”。它的基本思路并不复杂：给量子计算过程引入一组参数，通过不断调整，使输出结果逐步逼近目标，这一点与机器学习中的训练过程相似。

但很快，一个困难显现出来。随着系统规模增加，优化过程往往陷入停滞：参数变化变得越来越不明显，几乎无法判断下一步该如何调整。这种现象常被称为“梯度消失”[2]。

在这样的背景下，一个看似合理的判断逐渐形成：如果这种“难以优化”的问题能够避免，那么量子算法或许还有希望发挥一定的作用。

这篇论文的出发点，正是对这一判断进行重新审视。不过作者并没有直接讨论优化技巧，而是把问题往前推了一步：在现实噪声条件下，这种原本层层展开的计算过程的复杂度——量子线路深度，是否还能顺利地保留下来？

二、别被表象所迷惑

论文从一个非常现实的前提出发：在尚未实现纠错的情况下，量子计算不可避免地受到噪声影响，而且这种干扰是分散在每个量子比特上的，也就是说，每个基本单元都会各自受到影响。

在这一条件下，作者得到一个关键结论。对于一类很常见的任务——不是关心单次计算结果，而是关心重复多次之后的平均结果——计算过程中越早发生的操作，其影响会迅速衰减。结果是，无论原本的计算过程有多复杂，真正能够对最终结果产生作用的，只剩下最后少数几步。从效果上看，一个复杂而漫长的计算过程，会退化为一个相当“浅”的过程[2]。

这个结论直接动摇了量子计算中一个被认为非常重要的优势：通过增加计算步骤来提升能力。在现实噪声环境下，这种优势并不会自然保留下来，而是会被系统性压缩。

在此基础上，论文给出一个看似反直觉的结果：在这种条件下，优化过程并不会出现“完全失去方向”的情况，也就是说，上面提到的“梯度消失”现象反而不再明显。

但这一点并不能简单理解为好消息。原因恰恰在于前述的压缩效应：由于只有最后少数步骤仍然对结果有影响，真正参与调整的部分已经大幅减少。换句话说，之所以“容易调整”，并不是因为系统更强，而是因为它已经变得更简单了。

从这个角度看，优化变得容易，并不意味着能力提升，反而可能说明原本依赖复杂结构的计算能力已经明显减弱。

三、噪声环境中的量子算法对经典算法不具优势

如果真正起作用的只是一个被压缩后的“浅层”结构，那么一个自然的问题是：这样的计算，还需要量子设备吗？

论文的回答相当直接。正是由于这种结构上的简化，可以构造出相应的经典算法，在合理精度范围内完成同样的平均值计算。这意味着，在当前噪声条件下，一类常见量子算法并不必然具备稳定的优势。

更进一步，作者还比较了不同类型的噪声。过去不少分析依赖一种较为理想化的模型，而现实系统中的噪声往往更加复杂。一个自然的期待是，更接近真实情况的噪声，是否会带来不同甚至更有利的结果。

论文给出的结论是，在所讨论的任务范围内，这些不同类型的噪声在效果上是相似的，都会导致计算过程被压缩到类似的“浅层”结构。虽然在理论上可以通过精心设计来利用噪声，从而获得某些特殊优势，但这种情况并不具有普遍性。

结语

综合来看，这篇论文传达的信息相当明确：在没有容错纠错的前提下，量子计算并不会自然保留其“深度优势”。相反，在噪声作用下，这一优势往往被压缩，使得典型量子计算过程在效果上更接近一个浅层次的简单结构，它们可以被经典算法替代。

自量子计算研究起步，噪声问题就如影相随一直困扰着研究者。希伯来大学的数学教授 Gil Kalai 是量子计算领域著名的“怀疑论者”。他的核心观点并非基于工程实现的难度，而是从数学逻辑和计算复杂性的角度出发，认为在大规模系统中，噪声（Noise）是不可逾越的障碍[3]。今日这篇论文无疑为 Gil Kalai 的观点提供了新的证据，看来，噪声确实是量子计算难以战胜的天敌。

注释：

[1] 量子线路深度

指量子计算中操作步骤的层数。深度越大，意味着计算过程越长。

[2] 梯度消失

在优化过程中，指参数应如何调整的方向和大小。梯度接近零时，优化会变得困难。

[3] 著名学者 Gil Kalai 对量子计算质疑的核心要点：

1. 噪声的相关性难题

主流观点认为噪声是随机且独立的，可以通过纠错抵消。但 Kalai 认为，在大规模量子系统中，噪声必然是高度相关的。这种相关噪声会随规模呈指数级增长，最终彻底破坏计算。

2. 量子纠错的“门槛悖论”

实现量子纠错需要操作精度达到一个极高的阈值。Kalai 预言，物理学上存在一个误差下限，这个下限高于纠错所需的阈值。这意味着我们永远无法跨入“自我修复”的门槛。

3. 计算能力的“平庸化”

他从计算复杂性理论推断，受噪声干扰的量子系统在本质上只能处理简单的数学问题。在处理复杂任务时，其表现并不优于经典计算机，所谓的“量子优越性”在现实应用中难以实现。

4. 噪声灵敏度

量子态极其脆弱，对微小扰动有着极高的噪声灵敏度。Kalai 认为，试图在大规模系统中维持相干性，就像在狂风中搭建纸房子，违背了自然的基本规律。

核心结论：

Gil Kalai 认为量子计算在本质上是不可容错的。他承认小规模量子实验的成功，但断定大规模、可用的容错量子计算机在物理和数学逻辑上都是行不通的。

