
研究提出基于统计物理的量子纠错码严格解码方法

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33506.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

研究提出基于统计物理的量子纠错码严格解码方法

。量子计算因在密码学、量子化学模拟等领域的潜在优势而备受关注。目前，量子计算机在硬件层面易受到噪声干扰，导致计算中产生错误，难以实现高精度量子计算。量子纠错作为连接量子硬件与算法的桥梁，其核心目标是利用多个物理比特编码少量逻辑比特，通过测量辅助比特来推断并修正逻辑比特的错误，从而抑制逻辑错误率。

通常，逻辑比特通过量子纠错码进行保护。根据辅助比特的测量结果来推断逻辑错误的过程称为解码。精确的解码方法有助于进一步降低逻辑错误率，提升量子计算的可靠性。但是，最优解码在计算复杂性理论中被归类为#P难问题，求解难度高。因此，构造既高效又精确的解码算法是量子计算领域的重要挑战。

例如，在谷歌量子计算团队的纠错实验中，科研人员采用经典的近似解码方法——最小权重匹配算法（

MWPM）

开展研究。此前，

谷歌团队使用码距为25的重复码，借

助MWPM实现了约 10^{-6}

的逻辑错误率。后续研究提出，这一微小错误率的来源主要是宇宙射线中的高能粒子。而在最近的实验中，他们进一步使用

码距为29的重复码，将错误率降低至约 10^{-10} ，并推测错误主要源自未知的相关噪声。

为实现较低逻辑错误率，解码算法的精度至关重要。如果解码算法存在偏差，便可能引入额外的逻辑错误。虽然MWPM具有较高的计算效率，但并非理论上的最优方法。因此，MWPM可能成为系统误差的来源。这引出了一个问题：是否存在一种理论最优的解码方法，能够最大限度地消除算法本身带来的误差？

近期，中国科学院理论物理研究所研究员张潘，联合中国科学院大学、新加坡科技设计大学以及北京量子信息科学研究院的科研人员，解决了上述难题。团队借助统计物理中伊辛模型的严格解，提出了名为Planar的解码算法，实现了在电路级噪声下重复码的严格最优解码，并精确给出了电路噪声下重复码的纠错阈值。

该团队将Planar算法应用于谷歌的量子纠错实验数据以及北京量子信息科学研究院的超导量子芯

片实验，获得了优于经典MWPM算法的逻辑错误率。进一步，团队提出，谷歌实验至少有四分之一的错误并非源自其宣称的未知噪声，而是由于所采用的非最优解码算法所引入的误差。

Planar方法将纠错码的最优解码问题映射为统计物理中伊辛模型的配分函数计算问题，并利用平面图伊辛模型的精确解法进行求解。研究通过大量数值实验验证了这一算法的优越性，展示了其在解码精度和运算速度方面的双重优势。同时，研究检验了该方法的可扩展性，实验结果表明该算法的纠错时间复杂度约为 $O(N^{0.82})$ 并可适用于更高码距的纠错场景。同时，Planar解码算法具有广泛的适用性，可推广至所有能够映射为平面图自旋玻璃模型的最大似然解码问题的量子纠错码体系。

相关研究成果作为编辑推荐文章，发表在《物理评论快报》（Physical Review Letters）上。

研究团队单位：理论物理研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发