
融合代数、几何与拓扑方法的量子纠错理论研究获进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/35239.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！

融合代数、几何与拓扑方法的量子纠错理论研究获进展

量子纠错是在有噪声硬件上实现可靠量子计算机的基石。基于拓扑码的传统方法已取得了实验进展，但由于编码率低，通常需要数百万个物理量子比特才能够支撑实际应用。为突破这一瓶颈，学界转向对量子低密度奇偶校验码的研究，这类编码在理论上可降低量子纠错所需的资源开销。其中，双变量双循环量子纠错码尤为引人注目。它在近期可实现的量子硬件条件下，有望将资源需求减少一个数量级。

近日，中国科学院理论物理研究所研究团队与中国科学技术大学、北京大学的科研人员，在此类量子纠错码的理论研究方面取得进展。该研究融合代数、几何与拓扑方法，建立了研究BB码的拓扑理论框架。

研究团队注意到BB码与分形子物理在研究方法上的共通性，借鉴分形子领域发展出的代数工具，并结合Gröbner基等方法，实现了对任意给定BB码拓扑性质的高效表征。研究发现，这类量子纠错码普遍具有以任意子为特征激发的拓扑序，但其任意子激发在短程移动中呈现出类似分形子的特征，即移动过程必然伴随能量的改变。

进一步，该研究揭示了一种在BB码中普遍存在的“拓扑阻挫”现象。不同于传统拓扑码，BB码在环面上的基态简并度一般小于任意子总数。研究认为，该现象与任意子的准分形移动行为相关，二者共同反映平移对称性富化拓扑序这一深层次的拓扑物态结构。同时，研究利用Koszul复形的对称性质，阐明了阻挫情形下逻辑算符与任意子激发之间的精确对应关系。

在方法论层面，该研究利用Gröbner基等代数方法实现了对BB码的逐个高效表征，并引入基于Bernstein-Khovanskii-Kushnirenko定理的代数几何方法，揭示了在近环面码布局下BB码拓扑序的一般变化规律。通过Bernstein-Khovanskii-Kushnirenko定理，任意子的种类可通过计算由相互作用形式决定的牛顿多面体的混合体积获得。

上述研究揭示了量子纠错、任意子激发、对称性与拓扑物态之间的内在联系，为发展新型高性能量子纠错码提供了理论支撑。利用这些数学物理原理，科研人员在同期发表于《物理评论X辑-量子》(PRX Quantum)的相关工作中，将BB码推广到扭转边界条件情形，实现了纠错效率的提升。

相关研究成果发表在《物理评论快报》（Physical Review Letters）上。研究工作得到国家自然科学基金委员会和中国科学院等的支持。

[论文链接](#)

环面上任意子的类分形子移动行为，以及通过牛顿多面体（红色与绿色三角形）的混合体积（紫色平行四边形）计算任意子种数的代数几何方法，其中牛顿多面体由相互作用量子比特的相对位置确定。

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