

# 谷歌超导量子芯片取得新进展

本报记者 张心怡

当地时间12月9日，谷歌公布其最新超导量子芯片 Willow，在随机电路采样(RCS)基准测试中，Willow在5分钟内完成了当前最强大的超级计算机之一需要 $10^{25}$ 年(比宇宙年龄还长)才能完成的计算任务。谷歌首席执行官桑达尔·皮查伊在社交平台发布这一消息后，收到了SpaceX创始人马斯克、OpenAI首席执行官奥特曼的留言互动，皮查伊还与马斯克在评论区探讨了利用星舰在太空构建量子集群的可能性。

除了在RCS基准测试上取得惊人的成绩，Willow在量子纠错、相干时间、系统工程等方面，也取得了突破性进展。



## 破解困扰量子纠错领域

### 近30年的关键问题

虽然有“ $10^{25}$ 年”这一具有冲击力的高光亮点时，谷歌量子AI团队首推在量子纠错领域实现的进展，并称其“解决了量子纠错领域近30年来的关键挑战”。

错误率一直是量子计算最大的挑战之一。微软Azure Quantum团队表示，相比标准计算机CPU每十亿一次(EPB)到每万亿一次(EPT)的错误率，量子计算机的错误率要高得多。量子门中的噪声、退相干和缺陷，都可能导致量子计算出错。当前最先进的量子计算机的错误率通常在1%~0.1%，这意味着平均每100到1000次量子门操作中就会导致一次错误。

针对这一问题，麻省理工学院应用数学教授彼得·肖尔(Peter Shor)在1995年提出量子纠错理论，核心思想是将多个物理量子比特编码为逻辑量子比特，基于两者的映射关系，使逻辑比特能够检测并纠正某些错误。肖尔开发了第一个量子纠错码(肖尔码)，用九个量子比特编码逻辑量子比特，以纠正比特翻转和相位翻转错误。

基于量子纠错理念，各种类型的量子纠错码被陆续提出。其中，表面码被认为是工程实现价值较高的编码方式。表面码是一种拓扑纠错码，用二维量子比特阵列编码逻辑量子比特，具有较高的纠错能力。北京量子信息科学研究院研究员金贻荣曾撰文指出，表面码模

块化的设计方法使得拓扑码具有良好的可扩展性，符合工程化实现的要求。表面码只需要近邻耦合，对错误率的阈值要求比较低，尽管其编码效率不高，但已成为目前最具工程实现价值的编码方法之一，特别适合超导量子芯片。

而表面码要在量子纠错中发挥效用，就要使物理错误率低于表面码的错误率临界阈值。当低于阈值时，逻辑错误率将随着量子比特的增加呈指数级抑制。谷歌 Willow 的关键进展就在于，实现了逻辑量子比特以低于量子纠错阈值的错误率运行。这是“低于阈值”理论自20世纪90年代提出以来，量子计算产业长期追求的目标。在测试中，Willow使用的量子比特越多，错误就越少，系统的盈亏平衡点，实现了逻辑量子比特的寿命比参与编码的所有物理量子比特的寿命都长。该系统为构建可扩展的逻辑量子比特提供了原型，也让通过添加更多量子比特来构建

更庞大复杂的量子芯片成为可能。

## 计算能力和工作时间

### 显著进步

除了在量子纠错的显著进展，Willow还在基础测试中展现出更强的计算能力和相干时间。

凭借105个量子比特，Willow在随机电路采样(RCS)基准测试中，以不到5分钟的时间完成了一项计算，而当前最快的超级计算机之一需要 $10^{25}$ 年才能完成同一任务——而这一时长已经超过了物理学中已知的时间尺度，也远远超过宇宙的年代。

谷歌量子AI创始人哈特穆特·乃文(Hartmut Neven)表示，Willow的RCS测试结果，为量子计算发生在多个平行宇宙的观点提供了可信度。牛津大学教授大卫·多伊奇相信量子计算机将为平行宇宙的存在提供证据。

RCS是谷歌量子AI团队开创新的基准测试。被乃文描述为目前量子计算机最难的经典基准测试，能够评估量子计算机超越经典超级计算机的能力。在2019年10月的RCS测试中，谷歌量子处理器 Sycamore 大约需要200秒对量子电路的一个实例进行100万次采样，当时最先进的经典超级计算机需要1万年才能完成同等任务。相比之下，Willow展示了更惊人的计算性能。

Willow取得突破的另一个重要性能指标是相干时间，也就是量子比特保持预期状态的时间长度。肖尔曾指出，量子计算的主要困难之一是退相干破坏了量子计算机中

包含的状态叠加信息，从而使长时间的计算变得难以实现。

在测试中，Willow将量子相干时间提高了5倍，达到100微秒，是Sycamore的5倍，且没有牺牲系统的任何功能。

从具体来看，Willow提升的相干时间是T1时间。据仪器量子介绍，量子计算的相干时间通常关注两个参数：T1时间和T2时间。T1时间决定了能在多长时间内区分量子比特的状态1和状态0。当一个量子比特被激发到高能级(激发态)时，类似经典比特从0到1。在T1时间内，量子比特会从高能态返回到低能态，即从1变回0。这意味着量子比特会失去携带的信息。

基于此，Willow能够维持比Sycamore更长的计算“工作时间”，完成更多的计算。

Willow的性能跃升，也离不开制造技术的进步。Willow的生产是在谷歌位于圣巴巴拉的新制造工厂完成的。乃文表示，设计和制造量子芯片时，系统工程是关键。芯片的所有组件，如单量子比特门和双量子比特门、量子比特重置和读取，都必须经过精细的设计和集成。如果任何一个组件滞后，或者两个组件难以协同，就会拖累整体的系统性能表现。

面向未来的发展，乃文表示，量子计算芯片的下一个挑战是在实际应用中展现“有用、超越经典”的计算。在Willow的RCS基准测试中，并没有运行已知的实际应用。“我们的目标是同时做到这两点——踏入经典计算机无法企及且对现实世界、商业相关问题有用的算法领域。”乃文说道。

## 2024年全球芯片设备销售额将创新高

本报讯 近日，国际半导体产业协会(SEMI)在SEMICON Japan 2024上发表了2024年全球芯片设备市场预测报告，预估2024年全球芯片设备(新品)销售额将增长6.5%至1130亿美元。这一数字不仅高于其今年7月所预测的1090亿美元，还将超越2022年的1074亿美元，创下历史新高。此外，SEMI进一步预测，全球芯片设备(新品)销售额增幅在未来两年还将继续扩大，2025年将增长7%至1210亿美元、2026年将大增15%至1390亿美元，不断刷新历史新高。

SEMI CEO 阿吉特·马诺查(Ajit Manocha)表示：“半导体制造领域的投资预计将连续3年呈现增长态势，这反映了该产业在支撑全球经济、推动技术创新方面所扮演的重要角色。特别是自2024年年中以来，芯片设备销售的前景变得更为乐观，尤其是中国大陆和AI相关领域

的投资超乎预期。”

SEMI指出，在细分市场中，2024年全球芯片前制程制造设备(晶圆厂设备、WFE)销售额预计将同比增长5.4%至1010亿美元，同样高于年中预估的980亿美元，并创下历史新高。此番上调主要归因于AI运算需求推动DRAM(动态随机存取存储器)及HBM(高带宽存储器)投资的持续强劲。此外，中国投资对WFE市场的持续扩大也做出重大贡献。

SEMI还预测，至2026年，中国大陆、中国台湾和韩国有望继续保持芯片设备采购额前三的位置。尽管中国大陆经济增速预计将放缓，但设备采购额将持续稳健。2024年，中国大陆市场的设备出货额预计将创历史新高，达到490亿美元，进一步巩固其在该领域的领先地位。

(文编)

## IBM发布新一代光电共封装工艺有望提高AI模型训练速度

本报讯 记者张心怡报道：近日，IBM发布了其在光学技术方面的最新进展——新一代光电共封装(co-packaged optics, CPO)工艺。据介绍，该工艺通过光学技术实现数据中心内部的光速连接，可为现有的短距离光缆提供补充，有望提升数据中心的训练和运行生成式AI模型的效率。

当前，光纤技术已被广泛用于远距离高速数据传输，实现了“以光代电”，支撑着全球几乎所有的商业和通信传输。尽管数据中心的外部通信网络已经采用光纤，但其内部机架间的通信仍主要依赖铜质电线，以至于通过电线连接的GPU加速器往往有一半以上的时间处于闲置状态，在大型分布式训练过程中需要等待来自其他设备的数据，导致高昂的成本和能源浪费。

对此，IBM研究人员发现了一种将光学的速度和容量引入数据中心的新技术。

从具体来看，该创新将实现三方面的突破。一是降低规模化应用生成式AI的成本。与中距电气互连装置相比，能耗降低5倍以上，同时将数据中心互连电缆的长度从1米延长至数百米。

二是提高AI模型训练速度。与传统电线相比，使用光电共封装技术训练大型语言模型的速度快近5倍，从而将标准大语言模型的训练时间从3个月缩短到3周；用于更大的模型和更多的GPU，性能将获得更大提升。

三是提高数据中心能效。在最新光电共封装技术的加持下，每训练一个AI模型所节省的电量，相当于5000个美国家庭年耗电量

的总和。

IBM高级副总裁、IBM研究院院长达里奥·吉尔(Dario Gil)表示：“生成式AI需要越来越多的能源和处理能力，数据中心必须随之升级换代，而光电共封装技术可以帮助数据中心从容面向未来。随着光电共封装技术取得突破，光纤电缆将大幅提升数据中心的传输效率，芯片之间的通信、AI工作负载的处理也会更高效，我们将进入一个更高速、更可持续的新通信时代。”

同时，光电共封装技术能够扩大加速器之间的互连密度，帮助芯片制造商在电子模组上添加连接芯片的光通路，从而超越现有电子通路的限制。IBM论文所述的新型高带宽密度光学结构和其他创新成果，比如，通过每个光通道传输多个波长，有望将芯片间的通信带宽提高至电线连接的80倍。

与目前最先进的光电共封装技术相比，IBM的创新成果可以使芯片制造商在硅光子芯片边缘增加6倍数量的光纤，即所谓的“鬃发密度(beachfront density)”。每根光纤的宽度约为头发丝的3倍，长度从几厘米到几百米不等，可传输每秒万亿比特级别的数据。IBM团队采用标准封装工艺，在50微米间距的光通道上封装高密度的聚合物光波导(PWG)，并与硅光子波导绝热耦合。

论文还指出，上述光电共封装模块采用50微米间距的聚合物光波导，首次通过了制造所需的所有压力测试。这些模组需要经受高湿度环境、零下40°C至125°C的温度以及机械耐久性测试，以确保互连装置即使弯曲，也不会断裂或丢失数据。

# 奋力谱写新型工业化发展新篇章

