

# 点亮量子优势

(北京量子信息科学研究院 金贻荣 编译自 Philip Ball. *Physics World*, 2022, (10): 33)

IBM 量子部副总裁 Jay Gambetta 与 Philip Ball 谈论了该公司过去 20 年来在量子领域取得的诸多进展，以及最近宣布的“量子优势”五年路线图。

当下，全球各地的很多公司和实验室都在致力于将他们最新的量子技术推出实验室，走进现实世界。这其中，美国科技巨头 IBM 是一个非常关键的参与者。就在今年 5 月，IBM 量子公布了他们最新的未来十年量子计算路线(图 1)，而且，这家公司还设置了一些雄心勃勃的目标。在去年他们推出了包含 127 个量子比特(qubits)的 Eagle 处理器之后，该公司正在开发包含 433 个量子比特的 Osprey 处理器，并将于今年年底首次亮相，随后将于 2023 年推出包含 1121 个比特的 Condor 处理器。

在那之后，IBM 公司说，玩法将切换到将这些处理器组装成模块

化的电路，其中量子芯片将通过稀疏的量子或经典互联方式连接起来。这方面的艰苦尝试，将在 2025 年他们提到的 4158 个量子比特 Kookaburra 处理器上达成。再往后，IBM 预言了包含 10 万或更多量子比特的模块化量子处理器，它们将能够在无错的情况下进行计算，而不像现在的量子计算那样，需要在嘈杂的物理比特上寻求各种变通。在这个路径下，该公司的量子计算团队对实现通用的“量子优势”信心满满。所谓通用的“量子优势”，意味着量子计算机将始终超越经典计算机，并且能够进行超出经典设备能力范围的复杂计算任务。

正当 Jay Gambetta 前往布鲁塞尔举办的第 28 届索尔维会议的路上，我们赶上了这位物理学家，IBM 量子部副总裁，而这次索尔维会议的主题正是量子信息。在谈了很多他们公司过去二十年的进展之后，Gambetta 解释了为什么这些目标能够实现，以及他们又将在量子计算的未来中承担什么。

IBM 量子的最新进展如何？你们目前最关注的重要参数有哪些？

IBM 的路线图是关于规模化的——不仅是量子比特的数量，也包括它们的速度、质量以及电路架构。我们现在的相干时间(量子比特保持相干性，能够进行量子计算的



图1 前行的路。IBM的路线图显示了该公司将如何扩大，不仅扩大量子位的数量，而且扩大其速度、质量和电路架构

特征时间)已经达到了 100 ms(作为对比, 2010 年大约是 10  $\mu$ s), 而下一代器件将达到 300 ms。而且, 我们的量子比特(采用超导金属制成)现在已经具有差不多 99.9% 的保真度(每 1000 次操作仅带来一次错误, 错误率为  $10^{-3}$ )。我认为明年底达到 99.99% 不是不可能。

不过, 采用更聪明的方法来做事, 而不仅仅是堆指标, 将变得更加重要。处理器的架构在未来将更为关键。我认为我们不会在单芯片超过 1000 个量子比特(正如 Condor 芯片)之后能走更远, 所以现在将目光看向了模块化。采用这一方案, 我们可以在这个十年(到 2030 年)将处理器的量子比特数推到 10000 规模。我们将同时采用芯片间经典通信通道(用于控制电子学)和用于产生纠缠的量子通道(用于执行计算)。这些芯片间的通道会变得更慢——可能要比电路本身慢上 100 倍。而这些通道上的保真度也将很难达到 95% 以上。

对于高性能计算而言, 真正有意义的是如何最小化其运行时间, 也就是说, 最小化它得到一个问题的解所需的时间。量子计算机成熟

度最终的试金石是量子的运行时间是否可以与经典运行时间相匹敌。我们已经从理论上分析并显示了, 当你想运行一个大线路, 而将它拆分成了很多小线路, 那么每做一次分割, 可以看成是增加了一份经典成本, 而这个成本将导致运行时间的指数增加。所以, 我们的目标就是要将这个指数做到尽可能地接近 1。

对于一个给定线路, 其运行时间指数依赖于一个参数, 我们称之为  $\bar{\gamma}$ , 它随着  $nd$  幂指数增加, 这里的  $n$  指量子比特数, 而  $d$  为线路深度(线路从输入到输出的最大距离, 或者等效地说, 线路运行所需的时间步数)。所以如果我们能让  $\bar{\gamma}$  尽可能接近 1, 就达到了真正实现量子优势的临界点。我们可以通过提升相干性和门保真度(内禀的错误率)来降低  $\bar{\gamma}$ 。最终, 我们将触碰到那个盈亏平衡点, 此时, 尽管错误缓解的开销是指数级的, 但我们获得了相对经典计算机更高效的运行时间。如果能够将  $\bar{\gamma}$  降低到 1.001, 运行时间就将短于用经典计算机模拟这一线路所需的时间。我对做到这一点很有信心——基于我们在门保

真度和比特间串扰抑制方面的进展。我们已经在 Falcon r10 (包含 27 个量子比特)芯片上测到 1.008 的  $\bar{\gamma}$ 。

你们怎么针对错误缓解去做这些提升呢?

为了提升保真度, 我们采用的方法是所谓的概率性错误消除法。它的思想在于, 你发送给我一份任务, 我就会返回处理后的结果给你, 并对结果进行无噪声估计。你说想要我运行这个线路, 我则对系统错误进行全面表征, 然后运行许多次, 再把所有的结果放在一起处理, 最后给你一个关于线路输出的无错估计。我们通过这种方式来展示, 从错误抑制和错误缓解, 也就是我们现在所处的阶段, 到未来完全的错误纠正, 很可能是一个连续发展的过程。

那就是说, 你们不用构建完全纠错的逻辑量子比特也能够达到目标?

什么才算是一个逻辑量子比特? 大家在说这个概念的时候到底想表达什么? 实际上真正重要的是: 你是否能够运行逻辑线路, 以及你以什么方式来运行它们, 从而使得运行时间总是更快? 与其想着要构建逻辑量子比特, 我们更关心的是该如何运行线路并且向用户给出结果的估计, 然后用运行时间来进行量化。

当你做常规的纠错, 你纠正的是你认为到那时为止结果会是什么。你在不断更新着参照系。但是, 我们可以通过错误缓解来实现错误纠正。当  $\bar{\gamma}$  等于 1 时, 就相当于做到了纠错, 因为你可以随心所欲地提高(无错)估计而不会增加任何额外的开销。

这样, 我们将等效于有了逻辑量子比特, 但它们是被连续插入的。所以, 我们开始从更高的层面上来思考它。我们的看法是, 从用

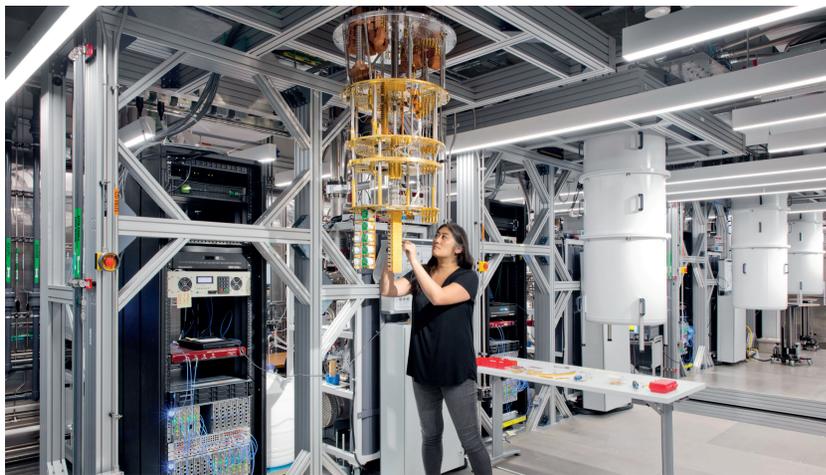


图2 沉稳的操作人员。实验研究人员 Maika Takita 正在 IBM 量子实验室内一台极低温制冷设备前工作

户角度来创造一个越来越快的连续统一体。而测试量子计算机成熟度的试金石，就是它的运行时间相对经典计算机而言是否有竞争力。

这与其他量子公司所做的很不一样，但是如果这没能成为共识，我会感到很惊讶。我敢打赌，你会发现大家开始比较运行时间，而不是纠错率了。

要是你们通过经典连接来实现模块化器件，这会不会意味着未来其实不是量子对战经典，而是量子携手经典？

是的。将经典和量子合到一起可以让你做更多的事。我把这叫成量子顺差：利用量子资源，以更聪明的方式进行经典计算。

假如由我来挥舞那支魔法棒，我可能不会叫它量子计算机。我想回过头来说，我们在做的，其实就是一般意义上的计算，而我们正在用量子处理器来加速它。我一直在用“以量子为中心的超级计算”这个口号。其实我们是通过加入量子来(让计算)更进一步。这将是最终的架构，我确实是这么想的。

现在的技术障碍有哪些？比如说，这些器件需要极低温制冷，这会不会是个问题？

这还真算不上大问题。一个更大的问题是，如果继续沿着我们的路线图走下去，我担心电子学系统的价格，以及所有与之相关的周边产品。要想降低这些成本，我们必须发展出一个生态系统，而作为一个社群，我们在创造那样一个环境上做得还不够。我没看到很多人只聚焦于电子学开发，但我觉得这事是会发生的。

是不是所有的科学问题都已经解决了，现在只是工程化的问题了？

永远有科学的问题需要解决。

特别是当你在探索从错误缓解到错误纠正的路线时。你想将什么样的连接做到你的芯片中去？这些连接形式又是什么？这些都是很基本的科学问题。我觉得我们还有空间将错误率降低到 $10^{-5}$ 。就个人而言，我不喜欢给事物贴上“科学”或“技术”的标签，我们正在建立的是一种新事物。我认为肯定会有一个转变，这些器件将变成工具，而问题则变成我们要如何将这些工具用于科学，而不是关于创造工具的科学。

你是否担心会出现量子泡沫？

不会，我认为量子优势可以分成两方面来看。第一，你怎么在量子硬件上，真正更快地运行线路？对此我可以很自信地作出肯定的预言。第二，你又如何真正利用这些线路，并且将他们与实际应用关联起来？为什么基于量子的方法要比仅用经典的方法更好？这些是非常困难的科学问题。并且也是高能物理学家、材料科学家和量子化学家们都关心的问题。我觉得它们必然成为一种需求——我们已经看到了。我们还发现一些商业公司对此也感兴趣，不过还需要些时日来寻找现实的解决方案，而不仅是将量子作为搞科研的工具。

我觉得这会是一个渐变过程。一个很大的潜在应用领域是那些数据具有某种结构的问题，特别是经典上很难找到关联性的数据。金融和医药都面临类似的问题，而量子的方法，例如量子机器学习，非常擅长寻找关联。这将会是一条长路，但值得投资。

如何保持计算的安全性，防止受到来自，比如Shor的质因数分解算法的攻击？这个算法利用量子方法来破解当前基于大数不可分的公钥密码体系。

大家都想保持对Shor算法的安

全性——现在这已经被称之为“量子安全”。对此我们已经做了很多深入的基础研究，也一直在研究如何将它构建到我们的产品中去，而不是作为一个插件。此外，我们还要回答该怎样确保经典设施是量子安全的。接下来几年中，这个问题的未来进展如何会变得格外重要——要如何从底层构建起量子安全的硬件。

你对量子计算的发展速度感到惊讶吗？

对像我这样从2000年就开始深度参与的人来说，它的发展轨迹与预测惊人的相似。回顾IBM 2011年的内部路线图，我发现它非常准确。我那时还以为就是瞎编呢！总的来说，我觉得人们似乎高估了它所需要的时间。随着进展越来越多，加上大家将越来越多的量子信息思想运用到这些器件上，接下来几年我们将能够运行更大的线路。那时候就要考虑你需要构建什么类型的架构，多大的集群，该用什么类型的通信信道，等等。这些问题将由你要运行的线路来驱动：我们怎样根据特定类型的线路来建造机器？届时将会出现专门化的线路。

到2030年量子计算会是什么样子？

当大多数用户压根就不知道他们正在使用量子计算机时，我认为就成功了，因为它将被构建到一个与经典计算无缝衔接的架构中去。那时候，成功的衡量标准将变成，它对绝大多数人而言不可见，但又以某种方式改善了他们的生活。也许你的手机上会运行某个应用程序，而它是用量子计算机来进行评估的。到2030年，也许还达不到那个水平，但是我想，我们会有非常庞大的(量子)机器，并且它们所能做的将远远超过经典计算机。