



量子计算，即将到来

备战颠覆性技术的五大战略

IBM 商业价值研究院



本报告摘要

详细介绍量子计算潜在的革命性业务影响

说明企业为何需要立即采取行动

通过量子计算获得业务优势的
五步路线图

IBM 如何提供帮助

IBM 正在为商界和学术界构建第一台通用量子计算机。通过 IBM Q Experience and Qiskit，大众可以免费访问 IBM 量子计算机、模拟器、教育资源以及参与探索量子计算的协作社区。通过加入 IBM Q Network，企业可借助 IBM Cloud 协作开发和访问更高级的技术，包括更大规模的 IBM Q 量子系统。IBM Q Consulting 能够帮助客户制定量子战略，动员咨询顾问、量子科学家和行业专家，共同定义高性能的量子计算如何创造优势。如欲了解更多信息，请访问：ibm.com/ibmq。

借力量子计算完成飞跃

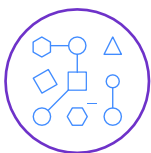
量子计算已接近商业化阶段，有很大的潜力改变我们的世界。利用量子计算的独特能力来解决特定类型问题的早期采用者，有可能在建立新型业务模式方面实现突破。富有远见卓识的企业已经开始调整战略方向，为新兴的量子计算生态系统做好准备，成为“量子就绪型企业”。这些具有前瞻性思维的企业正在探索用于解决复杂业务问题的用例和相关算法。本报告将讨论量子计算给企业带来的模式转变，说明企业为何需要立即采取行动，并提出五项建议，推动企业走上利用量子计算创造业务优势之路。

何为量子计算？

量子计算利用了自然科学中发现的量子力学定律，有潜力从根本上改变传统的信息处理方式。量子行为的两个特性，也就是叠加和纠缠，使量子计算机有能力解决目前的常规或传统机器无能为力的问题：

- **叠加**。传统计算机使用的是只包含“1”或“0”的二进制位。而量子计算机则使用量子位，可以描述“1”、“0”或者量子位的可能状态的任意组合（称为“叠加”）。因此，具有 n 个量子位的量子计算机通过这些量子位彼此叠加，形成了 2^n 种可能性。这使量子计算机具有指数级数量的状态，因此能够比传统计算机更有效地解决一些特定类型的问题。
- **纠缠**。在量子世界，甚至相距光年的两个量子位仍能以强相关的方式发挥作用。量子计算正是借助这种纠缠特性，利用量子位之间的相互依赖性破解问题。

量子的叠加和纠缠特性使量子计算机能够快速研究一系列可能性，以确定有助于推动业务价值的最佳答案。由于未来的量子计算机在计算某些问题时，速度要比传统计算机快上几个指数级（见图 1），因此有望解决极为复杂的业务难题。尽管传统计算机存在局限性，但在可以预见的未来，量子计算机并不会完全取代它们的作用。相反，结合了量子与传统架构的混合型计算机有望浮出水面，将一部分难题“外包”给量子计算机。



要使传统计算机的理论计算能力翻一番，需要将晶体管数量增加一倍。要使量子计算机的理论计算能力翻倍，只需为某些应用额外添加一个量子位即可。



未来的量子处理器可模拟咖啡因分子 — 传统计算机要想做到这一点，个头要比地球大上 10% 才行。



近期内，量子计算机也许可以帮助设计一些新材料，用于在将来创建更强大的量子计算机。

图 1

量子计算为运算加速的潜力远远超过传统计算机¹

范围类型	解决问题所需的时间				
采用指数运行时的传统算法	10 秒	2 分钟	330 年	3300 年	宇宙的寿命
采用多项式运行时的量子算法	1 分钟	2 分钟	10 分钟	11 分钟	约 24 分钟

量子计算有潜力彻底转变某些行业。例如，鉴于传统计算机无法精确求解方程，导致当前的计算化学方法严重依赖于近似值。而量子算法有望在更长的时间范围内进行准确的分子模拟，从而实现目前无法做到的精确建模。这有助于更快发现能够挽救生命的药物，并显著缩短药物开发周期。

此外，量子计算还有望解决当前令人束手无策的复杂的物流优化问题，从而实现可观的成本节省，显著减少碳排放。我们以量子计算帮助价值数十亿美元的航运业改善全球航线为例。即使量子计算只能将集装箱利用率和运输量提高哪怕一点点，也能为运输企业节省数亿美元的成本。为了利用量子计算的优势获得更多利润，领先竞争对手，前瞻性的企业已开始培养专业能力，探索能给自己的行业带来好处的用例。

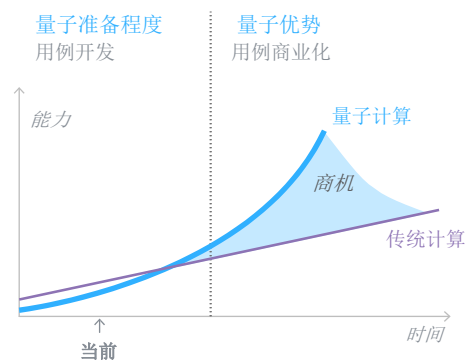
量子优势迎来曙光

量子计算机能够解决传统计算机无能为力的一些业务问题 — 我们通常将这种能力称之为“量子优势”，而实现这一优势的时刻离我们越来越近了。例如，“恒定深度”的量子电路已展现出远超传统电路的优势。² 图 2 说明了面向特定业务用例的量子优势。确切地说，由于面向特定用例的量子优势尚不明确，因此，有关未来五年内量子计算市场价值的预测也天差地别 — 从大约 5 亿美元到 290 亿美元不等。³

由于人们对这项新技术所能创造的商机充满期待，导致量子计算生态系统呈现出加速发展态势。初创企业不断涌现，研究机构与技术提供商之间的合作层出不穷，大家都在希望将量子研究成果转化为商用能力。开发量子计算机的科技公司已经开始与企业合作，以确定潜在用例，开发量子算法，并在真正的量子计算机上测试解决方案。随着量子技术的商业合作如雨后春笋般不断涌现，第一批量子商业应用指日可待。

图 2

量子用例的商业化



量子 — 最小的物质的量或单位，
尤其指能量。⁴

为企业选择合适的量子计算机

量子计算机各不相同，解决的问题也各有偏重。从限制最多的类型到最通用的类型，量子计算机主要分为三类：量子退火、嘈杂中型量子 (NISQ) 计算，⁵ 以及容错型通用量子计算。

科学界普遍认为，相较于传统计算，量子退火法的提速效果并没有多么明显。⁶ 此外，量子退火计算机最终也无法发展成为容错型通用量子计算机。因此，量子退火计算机不能算作真正的量子计算机。

在短期内，NISQ 计算机最有可能创造业务优势，并且业界已针对这种计算机调整了许多新的算法。此外，随着 NISQ 计算机不断扩展，它们正朝着量子计算的终极目标迈进 — 成为容错型通用量子计算机，能够处理重要的商业和科学问题，而且计算速度通常比传统计算机有指数级的提高。

迎接未来的冲击 — 为何需要立即采取行动

为何需要立即开始为量子计算做准备？在技术力量和竞争力量的双重作用下，量子时代的到来要比你想象中早得多。若能立即开始关注量子计算，企业就能占得先机，拉开与同行之间的距离。以下是企业应该立即开始备战量子计算的三个理由：

- 量子计算机具有转变行业价值链的潜力，特别是在化学、生物、医疗保健、材料科学、金融和人工智能 (AI) 等领域。
- 由于量子计算的学习难度非常大，因此，“快速跟随”的方法不仅花费巨大，而且只会被先行者越拉越远。
- 建立内部“量子能力中心”需要一定时间。

量子计算机具有转变行业价值链的潜力

量子计算机有潜力解决传统计算机无能为力的超级复杂的问题，因此有望转变整个行业的面貌。未来的量子计算机有能力在化学、生物、医疗保健、金融、人工智能和材料科学等领域实现产品突破，帮助富有战略眼光、采用量子计算的企业快速抢占市场份额，提高盈利能力。因此，量子计算的问题解决能力能够彻底重新定义竞争优势，转变企业运营模式和价值链，最终彻底颠覆整个行业。

“如果改变看待事物的方式，
相关的事物也会发生变化。”

马克斯·普朗克，量子物理之父⁷

例如，物流系统的优化通常基于“中心辐射”型网络模型。要在大规模物流网络中，设计一条能够满足各种不同需求的点到点最优路线，是非常复杂的问题，完全超出传统超级计算机的能力范围。即使对于只有几百个集散地的物流网络，要逐一探索所有的可能性，传统计算机也要花上数十亿年的时间。而量子计算有能力显著缩短这种探索所需的时间。例如，为了优化航空公司的调度工作，量子计算可以创建专为在特定日期飞往数百个目的地的数千名乘客而量身定制的每日航班时刻表，从而帮助旅客缩短旅行时间、避免空中交通拥堵并降低航空燃油成本。如果企业能为物流网络设计优化工作开发量子解决方案，那么，在物流作为关键成功因素的所有行业，这样的企业都能够迅速成为市场领导者。

“快速跟随”的方法不仅花费巨大，而且只会被先行者越拉越远

量子计算不同于线性或渐进式的技术进步，“快速跟随”的方法不太可能奏效。原因有以下几点：

- 量子计算的学习难度非常大
- 与“追赶”领先者相关的成本过高

可以考虑以下用例：通过量子计算机为电子或运输行业设计比现有物质更轻、更强韧的专用材料，而且与传统计算机相比，解决问题的速度呈指数级提升（见图 2）。这种革命性材料的加速发展可以帮助制造商在短时间把竞争对手远远甩在身后。

借助量子技术成功上位的新晋市场领导者以既有知识为基础，学习难度相对较低，因此能够更上一层楼，进一步优化其突破性的材料，以及发现专为其他应用领域量身定制的新材料，不断扩大与竞争对手的差距。

虽然只是假设，但这个示例却生动说明了由于存在巨大的学习难度，使得所谓的“快速追随者”极难赶上先行企业，从而可能导致某些行业出现“赢者通吃”的情景。即便对于特定用例，快速追随者有可能追上先行企业，也需为此付出高昂的代价，例如，培养内部专业知识，采购最合适的基础设施，投资与实力派企业建立合作关系和/或收购具有相关能力的企业等。

建立内部“量子能力中心”需要一定时间

尽管大多数企业现在都听说过量子计算，但他们中有许多都因缺乏相关人才和专业知识而无法充分利用即将到来的业务转型的优势，而且获得量子计算技术也并非易事。量子计算的人才供不应求，高技能资源更是炙手可热。

即使招聘到了合适的人才，也可能需要数年时间才能深入了解量子计算对特定业务的潜在影响。最近发生的技术转变，例如，为加速处理大数据工作负载而迁移到图形处理器 (GPU) 的过程花了近十年时间，使得我们深深了解到，为采用新技术而培养专业能力是一个漫长的过程。

鉴于量子计算有潜力彻底转变行业，能够以指数级提升解决问题的速度，再加上量子领域的专业人才难以获得，因此，领先的企业应考虑立即采取行动。

“任何巨大的技术进步都无异于魔法。”

Arthur C. Clarke, 未来主义者和作家⁸

量子计算，即将到来

把握量子优势，助推企业前进

量子计算的商业化对贵公司意味着什么？从中短期看，量子计算可在以下三个方面带来商业利益：量子模拟、量子优化和量子辅助机器学习（见图 3）。

量子模拟

鉴于量子力学描述了自然界最基本的运行原理，因此，量子计算非常适合模拟自然界中出现的过程和系统（请参阅第 9 页的“IBM 案例研究”）。这种强大的能力可帮助电动汽车制造商开发出寿命更长的电池。生物科技初创企业能够为个别患者量身定制对症之药。电力公司能够降低输电成本。化肥厂能够更高效地生产肥料，从而对全球农作物种植产生惊人的影响。

图 3

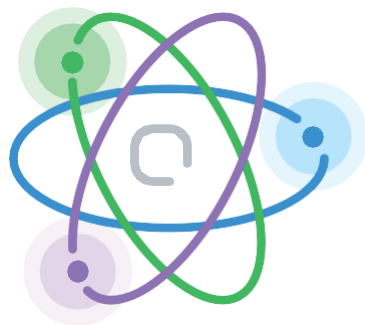
NISQ 量子计算的预期用途

机器学习

抽样
自适应供应商/
客户互动
决策支持
培训

模拟

化学
制药
材料
电池



优化

旅行和运输
物流/供应链
网络基础设施
空中交通管制
工作安排
金融服务

量子优化

解决优化问题需要从可能存在的诸多答案中找到最佳或“最优”的解决方案。我们以制定包裹投递时间表为例。从数学上讲，在相邻时段安排 10 次包裹投递可能有超过 360 万种选项。⁹但是，根据收件人的时间要求、可能产生的延误以及所运货物的保质期等变量，哪个时间表才是最佳解决方案呢？即使应用近似值技术，可能的选项对传统计算机而言仍然太多而无法处理。

因此，目前的传统计算机采用大量的快捷方式来解决大规模的优化问题。遗憾的是，这些解决方案往往并不理想。可受益于量子优化的企业包括：

- 希望升级网络基础设施的电信公司
- 希望优化患者治疗效果的医疗服务提供方
- 希望改善空中交通管制的政府机构
- 希望定制营销推荐的消费品和零售企业
- 希望加强风险优化的金融服务公司
- 希望制定员工工作时间的企业
- 希望安排课程的大学院校

IBM 研究人员在量子计算机上模拟有史以来最大的分子

2017 年 9 月 14 日出版的《自然》杂志封面上，刊登了 IBM 科学家在量子计算机上模拟有史以来最大的分子“氢化铍” (BeH_2) 的照片。¹⁰ 通过使用 7 量子位 IBM Q 系统 (NISQ 计算机) 中的 6 个量子位，研究人员能够测量出 BeH_2 的最低能态，这也是理解化学反应的一个关键指标。虽然这个 BeH_2 模型也能在传统计算机上进行模拟 (用于验证量子计算机的结果)，但这一成就标志着近期量子系统在模拟更复杂的化学反应方面又更进了一步。随着更强大量子系统的建立，以及相应的工具和技术的不断发展，化学和生命科学领域有望实现突破性的应用。

摩根大通探索量子优势

面对大量的投资工具、投资组合及潜在金融方案，目前的金融顾问无法建立和管理定制的金融投资组合，因为这需要对几乎所有可能的选项进行评估。

但量子计算机能评估海量的投资选项，根据每位客户的具体绩效标准对其运行量身定制的估值和风险方案。

摩根大通与 IBM 合作，已经开始量子计算试验，在贸易战略、投资组合优化、资产定价和风险分析等领域利用量子优势。¹¹ 这事关重大。如果金融机构能够通过量子计算获得竞争优势，那么，在竞争对手赶上之前，他们很有可能已经为客户和股东积累了数十亿美元的财富。

虽然还没有数学方法可以证明量子计算能够以指数级提升优化问题的解决速度，但研究人员正努力通过启发式方式来证明这一点。富有远见的企业已开始探索如何利用量子计算来解决优化问题，以期超越竞争对手。一旦量子优势在解决优化问题方面的能力得到确认，这些企业的远见卓识便会给他们带来切实的回报（请参阅摩根大通案例研究）。

量子增强型人工智能

量子计算可以探索传统计算机无法处理的海量可能性，因此有助于提升人工智能的熟练度。事实上，人工智能与量子计算之间的共生关系已开始在这两个领域实现良性循环。例如，量子算法可增强机器学习在数据聚类领域的能力，¹² 而机器学习则可用于更好地理解量子系统。¹³

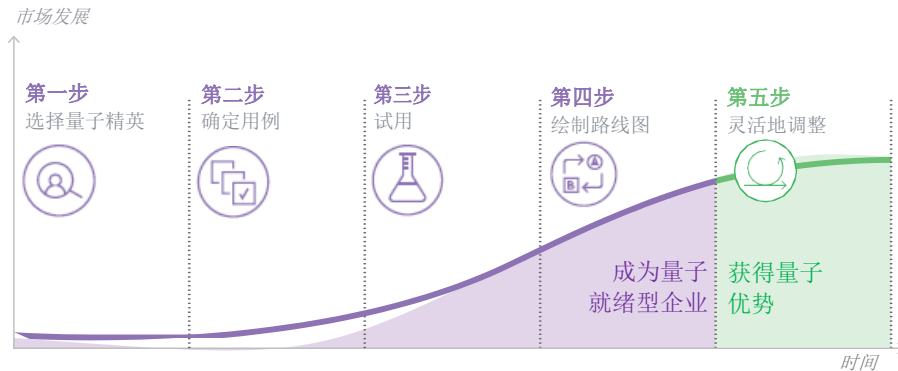
基于量子的认知计算机最终能够渗透到几乎所有行业，主动为专业人士提供高级决策支持；为员工提供针对性的响应式培训；为客户提供专门定制的自适应式供应商关系。

通过五项战略迎接量子的未来

NISQ 的早期采用者通过颠覆性地创新运营模式，打造首创产品，让同行望尘莫及。如果您想率先成为量子就绪型企业，是时候采取行动了（见图 4）。

图 4

通往量子未来之路



“大自然并不适合用传统计算方式去理解.....如果要模拟大自然，最好采用量子力学的方法.....”

Richard Feynman，美国物理学家，1981¹⁴

快速启动企业的量子计算路线图

为了帮助企业绘制量子计算的采用路线图，您需要：

- 了解量子计算是什么及其如何影响您的行业。
- 确定可通过量子计算获得竞争优势的业务挑战。
- 评估 NISQ 计算技术在应对业务挑战方面可以为贵公司带来哪些潜在的业务价值。
- 制定与贵公司战略意图相符的量子计算路线图，包括后续步骤。

IBM Q Consulting 会举办互动研讨会，旨在动员顾问、量子科学家和行业专家，帮助贵公司了解如何将量子计算融入业务战略，推动未来发展。¹⁵

1. 选择量子精英团队

贵公司可能需要进一步了解量子计算的预期收益。以下是入门方法：

- 将企业内的一些领军专业人才指定为“量子精英”。
- 为这些“量子精英”充电，帮助他们了解何为量子计算、对行业的潜在影响、竞争对手的应对方式以及贵公司的业务如何从中受益（请参阅侧边栏）。
- 要求“量子精英”定期向高层领导汇报工作，以便在整个企业中开展量子计算教育，确保该计划始终与战略目标保持一致。

2. 开始确定量子计算用例和相关价值主张

待量子精英团队了解了量子计算的原理及其如何助您应对业务挑战和把握机遇之后，让他们开始确定贵公司可在哪些领域借助量子计算领先竞争对手。

根据量子系统的独特能力及其加速解决问题的优势来评估机遇。要求量子精英团队监控量子应用的进展，确定哪些用例可以更快地实现商业化。为确保量子探索与业务成果紧密联系在一起，请选择前景最光明的量子计算应用，例如创建突破性产品和服务或者以全新方式优化供应链。

3. 试用真正的量子系统

通过试用真正的量子计算机，揭开量子计算的神秘面纱（请参阅侧边栏）。要求量子精英团队了解量子计算如何解决业务问题，以及如何与现有工具互动。单一量子解决方案并不能“包治百病”。量子精英团队应专注于解决传统计算机无法有效解决的最高优先级用例。

4. 绘制量子路线图

绘制量子计算路线图，包括可行的后续步骤，目的是解决可能会对企业参与竞争以及获得可持续业务优势产生巨大阻碍的问题。为了加速备战量子计算，应考虑加入新出现的量子社区。这样能够帮助您更好地接触了解技术基础架构、不断发展的行业应用，以及有助于增强特定量子应用开发能力的研究人员。

5. 灵活敏捷地应对未来量子格局的变化

量子计算在迅速发展。应寻找有望成为行业标准并且推动生态系统整合的技术和开发工具包。应认识到，新的技术突破可能会促使企业调整量子开发方法，包括更换生态系统合作伙伴。应留意企业的量子计算需求如何与时俱进，特别是当您进一步深入地了解哪些业务问题可从量子计算解决方案中获得最大收益之后。

试用量子计算机

IBM Q Experience and Qiskit 支持大众免费访问 IBM 的 16 量子位量子计算机、模拟器、培训资料以及参与探索量子计算的协作社区。¹⁶ 我们的量子算法和实验是使用基于 Python 的开源编程框架 Qiskit 开发的。我们提供丰富的资源，包括解决模拟和优化问题的 Jupyter Notebook 教程¹⁷ 以及超过 120 篇研究论文，涉及为量子计算发现新应用和构建新功能（如量子编译器）等诸多主题。不熟悉量子计算的化学、人工智能和优化方面的专家，可借助可扩展的量子算法开源库“Qiskit Aqua”，研究真实世界的应用。迄今为止，来自七大洲（包括南极洲）的诸多企业和教育机构的超过 10 万名用户已借助 IBM Cloud 在 IBM Q Experience 上开展了超过 650 万次量子实验。

加入新出现的量子计算社区

技术提供商与富有远见的企业之间的合作关系在不断扩大，旨在开发量子计算用例和相应应用，以解决之前无能为力的棘手问题。

IBM Q Network 是由《财富》500 强企业、领先的学术机构、初创企业和国家研究实验室共同组成的全球生态系统，由 **IBM** 的量子计算机、科学家、工程师和顾问提供支持。参与者共同努力，推动量子计算加速取得进步，生成早期商业应用。¹⁸

通过加入 **IBM Q Network**，企业将能够尝试如何通过真正的量子计算机来解决重大问题。现在，他们能够通过 **IBM Cloud** 访问 20 量子位的 **IBM Q** 量子处理器。将来，**IBM Q Network** 还将推出 50 量子位的量子计算机。

贵公司是否已为建立量子优势做好准备？

有些业务问题是传统计算机无法解决的 — 永远都无法解决。现在，贵公司通过备战量子计算来把握住未来量子优势的时机已经成熟：

贵公司目前对量子了解多少？知识水平如何？

贵公司所在的行业，尤其是贵公司的价值链，可能如何被量子计算所颠覆？

哪些模拟、优化或机器学习问题对贵公司获得竞争优势至关重要？

哪些量子计算用例会给贵公司带来最高的业务价值和竞争优势？

如果竞争对手抢先一步利用量子解决方案取得优势，将会怎样？

作者

Dario Gil 博士是 IBM 研究院的首席运营官，IBM 研究院是全球性组织，在 13 个实验室中拥有 3,000 多位研究人员，致力于推动信息技术的发展。他还兼任人工智能和量子计算副总裁，负责 IBM 在人工智能方面的全球研究工作以及 IBM 的量子计算项目。**Dario** 的联系方式为：Twitter [@dariogila](#)，LinkedIn [linkedin.com/in/dario-gil-58575713](#)，电子邮件 dgil@us.ibm.com。

Jesus Mantas 是 IBM 全球企业咨询服务部的管理合伙人，负责监督全球战略、产品、认知资产、兼并购和收购以及 IBM 商业价值研究院的工作。在通过技术帮助客户实现业务转型方面，他拥有超过 35 年的工作经验。他是 IBM 西班牙裔多元化主席，领导着向年轻女孩教授人工智能技术的计划。**Jesus** 的联系方式为：LinkedIn [linkedin.com/in/jmantas](#)，Twitter [@jmantas](#)，电子邮件 jesus.mantas@us.ibm.com。

Robert Sutor 博士是 IBM 研究院的量子计算战略和生态系统副总裁。他是锐意创新的领导和技术专家，在量子计算、人工智能、区块链、分析、数据科学、移动应用和技术、云计算、社交媒体、开源和工业研究方面拥有深厚的专业知识。**Bob** 的联系方式为：Twitter [@snarky_android](#)，LinkedIn [linkedin.com/in/bobsutor/](#)，电子邮件 sutor@us.ibm.com。

Lynn Kesterson-Townes 是 IBM 商业价值研究院的全球云和量子业务负责人。她在管理咨询、业务开发、战略规划、市场营销以及并购等领域拥有超过 20 年的从业经验。**Lynn** 的联系方式为：Twitter [@LynnKesterson](#)，LinkedIn [linkedin.com/in/lynnkesterson](#)，电子邮件 lkt@us.ibm.com。

Frederik Flöther 博士是 IBM Q Consulting 的全球生命科学负责人，拥有量子物理学博士学位。他与客户合作，通过下一代技术，特别是量子计算和人工智能来帮助客户创造价值。**Frederik** 的联系方式为：LinkedIn [linkedin.com/in/frederikfloether](https://www.linkedin.com/in/frederikfloether)，电子邮件 frederik.floether@ch.ibm.com。

Chris Schnabel 是 IBM 全球量子计算产品经理。他是分析领域的资深领导，在制定和执行战略以及领导 IBM 量子计算产品和服务方面拥有丰富的技术和工程经验。**Chris** 的联系方式为：Twitter [@chrisschnabel](https://twitter.com/chrisschnabel)，LinkedIn [linkedin.com/in/Schnabel](https://www.linkedin.com/in/Schnabel)，电子邮件 chris.schnabel@us.ibm.com。

合作者

作者感谢 **Anthony Annunziata** 博士、**Jerry Chow** 博士、**Jay Gambetta** 博士和 **Joe Raffa** 对于编写本执行报告所做的贡献。

分析方法

除了对已发表的学术论文和文章进行全面审阅之外，我们在编写本报告时还采访了 IBM 高管、科学家、研究人员以及从事 IBM Q 的产品经理和顾问。我们还与量子初创企业、风险投资公司、大学院校和量子技术平台提供商的主题专家进行了访谈。

相关报告

Robert Sutor 与 Heather Higgins 合著，“借力量子计算完成飞跃：为何要立即行动？”，IBM 商业价值研究院，2018 年 2 月。

ibm.biz/whyquantum

Walid Rjaibi、Sridhar Muppidi 与 Mary O'Brien 合著，“量子计算 — 一把双刃剑：现在着手为量子世界的网络安全做好准备”，IBM 商业价值研究院，2018 年 7 月。ibm.biz/quantumsecurity

我们会将最新的量子研究成果发布于：ibm.biz/ibvquantum

了解更多信息

欲获取 IBM 研究报告的完整目录，或者订阅我们的每月新闻稿，请访问 ibm.com/iibv。

从应用商店下载免费“IBM IBV”应用，即可在手机或平板电脑上访问 IBM 商业价值研究院执行报告。

访问 IBM 商业价值研究院中国网站，免费下载研究报告：<http://www-935.ibm.com/services/cn/gbs/ibv/>

选对合作伙伴，驾驭多变的世界

在 IBM，我们积极与客户协作，运用业务洞察和先进的研究方法与技术，帮助他们在瞬息万变的商业环境中保持独特的竞争优势。

IBM 商业价值研究院

IBM 商业价值研究院隶属于 IBM 服务部，致力于为全球高级业务主管就公共和私营领域的关键问题提供基于事实的战略洞察。

备注和参考资料

- 1 IBM internal analysis based on a polynomial function (a^n for $a=1$) and an exponential function (a^k^n for $a=1$ and $k=10$).
- 2 Sergey Bravyi, David Gosset, Robert Koenig. “Quantum Advantage with Shallow Circuits.” Cornell University Library. <https://arxiv.org/abs/1704.00690>
- 3 “Quantum Computing Market by Revenue Source, Application (Simulation, Optimization, and Sampling), Industry (Defense, Banking & Finance, Energy & Power, Chemicals, and Healthcare & Pharmaceuticals), and Geography—Global Forecast to 2023.” marketsandmarkets.com. August 2017. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/quantum-computing-market-144888301.html?gclid=EALalQobChMI9qarxla_2glVkJFuGCh022AfdEAAYASAAEgKnxfD_BwE, Vlastelica, Ryan. “Why Goldman sees veggie burgers among the future’s most exciting technologies.” MarketWatch. Dec. 15, 2017. <https://www.marketwatch.com/story/why-goldman-sees-veggie-burgers-among-the-futures-most-exciting-technologies-2017-12-13>
- 4 Definition of “quantum.” Cambridge Dictionary. <http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/quantum>. Accessed July 9, 2018.
- 5 Preskill, John. “Quantum computing in the NISQ era and beyond.” Cornell University Library. July 31, 2018. <https://arXiv.org/abs/1801.00862v3>
- 6 Vincent, James. “Biggest ever quantum chip announced, but scientists aren’t buying it.” The Verge. Sept. 28, 2016. <https://www.theverge.com/2016/9/28/13057414/quantum-computer-d-wave-2000-qubit-chip>

-
- 7 goodreads. "Max Planck > quotes."
https://www.goodreads.com/author/quotes/107032.Max_Planck.
Accessed July 9, 2018.
 - 8 "Arthur C. Clarke quotes." BrainyQuotes.
https://www.brainyquote.com/quotes/arthur_c_clarke_101182. Accessed July 9,
2018.
 - 9 $10! = 3.63$ million
 - 10 IBM press release. "IBM Pioneers New Approach to Simulate Chemistry with
Quantum Computing." Sept. 13, 2017. [https://www-
03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/53137.wss](https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/53137.wss)
 - 11 IBM press release. "IBM Announces Collaboration with Leading Fortune 500
Companies, Academic Institutions and National Research Labs to Accelerate
Quantum Computing." Dec. 14, 2017. [https://www-
03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/53483.wss](https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/53483.wss). Kahn, Jeremy. "IBM Taps
Samsung, JPMorgan, Daimler in Quantum Computing Push." Bloomberg.
Dec. 14, 2017. [https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-12-14/ibm-
taps-samsung-jpmorgan-daimler-in-quantum-computing-push](https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-12-14/ibm-taps-samsung-jpmorgan-daimler-in-quantum-computing-push)
 - 12 Marr, Bernard. "How Quantum Computers Will Revolutionize Artificial Intelligence,
Machine Learning and Big Data." Forbes. Sept. 5, 2017.
[https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/09/05/how-quantum-computers-
will-revolutionize-artificial-intelligence-machine-learning-and-big-
data/#1cb5483e5609](https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/09/05/how-quantum-computers-will-revolutionize-artificial-intelligence-machine-learning-and-big-data/#1cb5483e5609). Biamonte, Jacob, Peter Wittek, Nicola Pancotti, Patrick
Reberntrost, Nathan Wiebe, Seth Lloyd.
"Quantum machine learning." Nature. Sept. 13, 2017.
<https://www.nature.com/articles/nature23474>

- 13 Torlai, Giacomo, Guglielmo Mazzola, Juan Carrasquilla, Matthias Troyer, Roger Melko, Giuseppe Carleo. "Neural-network quantum state tomography." Nature. Feb. 26, 2018. <https://www.nature.com/articles/s41567-018-0048-5>
- 14 Feynman, Richard. "On quantum physics and computer simulation." Los Alamos Science. Number 27 2002. <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-02-4969-02>
- 15 "Jump-start quantum computing with IBM Q Consulting." ibm.com. <https://www.research.ibm.com/ibm-q/consulting/> Accessed July 9, 2018.
- 16 "Welcome to the IBM Q experience!" ibm.com. <https://quantumexperience.ng.bluemix.net/> Accessed July 9, 2018.
- 17 Available through the open-access Qiskit GitHub repository at <https://github.com/Qiskit>
- 18 "IBM Q Network: Bringing quantum out of the lab and into the world." ibm.com. <https://www.research.ibm.com/ibm-q/network/#/>. Accessed July 9, 2018.

© Copyright IBM Corporation 2018

IBM Corporation
New Orchard Road
Armonk, NY 10504

美国出品
2018 年 11 月

IBM、IBM 徽标、ibm.com 和 Watson 是 International Business Machines Corp. 在全球许多司法管辖区域的注册商标。其他产品和服务名称可能是 IBM 或其他公司的商标。以下 Web 站点上的"Copyright and trademark information"部分中包含了 IBM 商标的最新列表：ibm.com/legal/copytrade.shtml。

本档为自最初公布日期起的最新版本，IBM 可随时对其进行更改。IBM 并不一定在开展业务的所有国家或地区提供所有产品或服务。

本档内的信息“按现状”提供，不附有任何种类（无论是明示还是默示）的保证，包括不附有关于适销性、适用于某种特定用途的任何保证以及非侵权的任何保证或条件。IBM 产品根据其提供时所依据协议条款和条件获得保证。

本报告的目的仅为提供通用指南。它并不旨在代替详尽的研究或专业判断依据。由于使用本出版物对任何组织或个人所造成的损失，IBM 概不负责。

本报告中使用的数据可能源自第三方，IBM 并不独立核实、验证或审计此类数据。此类数据的使用结果均为“按现状”提供，IBM 不作出任何明示或默示的声明或保证。

国际商业机器中国有限公司
北京市朝阳区北四环中路 27 号
盘古大观写字楼 25 层
邮编：100101

IBM