

量子计算与航空发动机

Quantum Computation and Its Potential Application in Aero Engine

■ 项洋 刘婷 付强/中国航发研究院

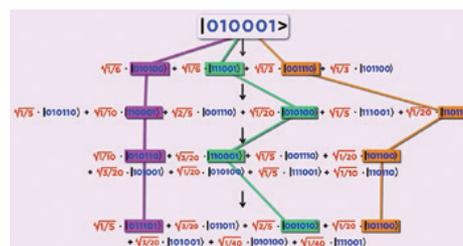
量子计算 (Quantum Computation) 是一种遵循量子力学规律, 调控量子信息单元进行计算的新型计算模式, 其目标是构建出一种高度复杂、高度可控的人造量子系统——量子计算机 (Quantum Computer)。量子计算机不是经典计算机的升级版, 而是人类当前设想中最复杂、实现难度最大的量子机器, 一旦建成对科学和社会的影响也将是深远的。

从1946年2月15日世界上第一台电子数字式计算机诞生至今, 计算机技术的发展突飞猛进, 主要表现在计算机的体积和耗电量越来越小, 功能越来越强, 应用范围向社会各个领域扩展。在过去的半个世纪里, 计算机技术的发展遵循摩尔定律, 即集成电路的集成度每年会翻一番, 相应的信息处理能力也会大幅提高, 可以说, 信息化技术的迅速提升归功于半导体工业的飞速发展。然而, 当代计算机 (经典计算机) 的发展遇到了瓶颈: 一方面, 集成电路集成度的增加和体积的缩小已经越来越接近于其物理极限; 另一方面, 经典计算机均基于图灵理论, 受计算原理的限制, 即使是功能强大的超级计算机也无法解决计算时间呈指数级增长的问题。

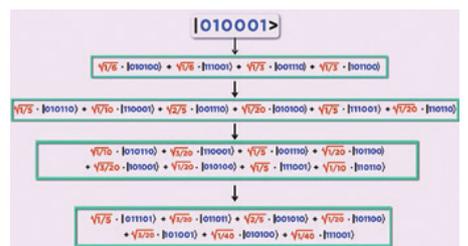
超级计算机强大的计算能力主要依赖于并行技术, 假设计算机有500万个核, 那么计算速度最多快500万倍, 即计算速度与计算核之间呈常数加速的关系。但量子计算机的计算速度具有指数加速规律, 这

是因为量子叠加现象使得量子计算机能够在一步骤中并行进行大量计算。理论上一台具有 n 个量子比特 (Qubit) 的量子计算机能够同时进行 2^n 种不同的计算。试想, 当量子计算机有10个量子比特时, 就有 2^{10} 种基态, 在一个步骤中进行的计算数量是1024, 计算能力低于当前的超级计算机; 但当量子计算机有100个量子比特时, 将有 2^{100} 种基态, 意味着计算速度将可能加速亿亿次, 远远超过当今最先进的高性能计算能力; 当有1000个量子比特时, 计算速度将趋于无穷大。这种指数级加速的特性使得量子计算机能够快速处理计算时间呈指数级增长的

问题。当然, 由于指数级加速的特征, 使得量子计算机的加速倍数依赖于问题的规模: 问题规模越小, 加速特征越不明显; 问题规模越大, 计算速度将会呈指数级增长。经典计算若要遍历所有可能的状态, 需要数千步的计算; 而量子计算同时计算所有的状态, 只需要少数几步计算。量子计算将有可能使计算机的计算能力大大超过经典计算机, 但仍然存在很多障碍。大规模量子计算所存在的重要问题是, 如何长时间地保持足够多的量子比特的量子相干性, 同时又能够在这个时间段内做出足够多的具有超高精度的量子逻辑操作。



(a) 经典计算



(b) 量子计算

经典计算与量子计算区别

量子计算的类型

目前，量子计算主要有量子退火、量子模拟和通用量子计算3种类型。

量子退火是一种基于量子涨落特性的元启发式算法，来源于经典计算机中的模拟退火法，不同的是量子退火可以在目标函数拥有多组候选解的情况下，迅速找到全局最优解。值得一提的是，量子退火的实现并不是通过操作量子门，而是首先将量子比特置入其最低能量的初始状态，然后将表征问题的横磁场施加在系统上，使得量子比特进入叠加状态，随后将横磁场缓慢撤去，以实现所谓的量子退火。当系统最终达到稳定后，能量最低的量子态就是该问题的最优解。由于量子退火系统会同时验证每一个可能答案的正确性，理论上它就能以更快的方式解决难题。反之，如果使用传统计算机解决这个难题，每增加一个变量，其难度会呈指数增长。量子退火主要用于解决离散空间有多个局部最小值的问题，是解决优

化问题的最佳选择，适用于一系列工业问题。

量子模拟算法是指模拟复杂的量子现象，探索量子物理学中超出传统计算系统能力的特定问题。目前的热点应用领域是燃烧化学动力学反应过程模拟、基于单个原子排列的材料特性模拟等。

通用量子计算是指可以指导计算机进行任何复杂的计算，包括上述量子退火和量子模拟算法。因此，通用量子计算的难度远高于量子退火和量子模拟，其核心之一是开发应用于不同计算领域的量子算法，目前已开发出包括肖尔（Shor）算法在内的50余种算法。最近的研究显示已经产生了可以作为量子机器学习基石的量子算法，例如，量子傅里叶变换是比快速傅里叶变换(FFT)快 2^n 倍的加速算法。未来，通用量子计算机可能彻底改变人工智能领域，实现比传统计算机更快的机器学习。

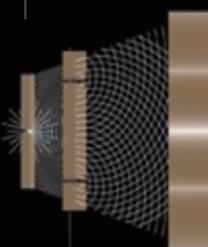
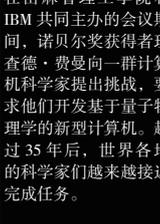
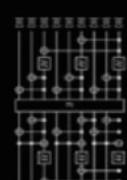
量子计算的发展现状

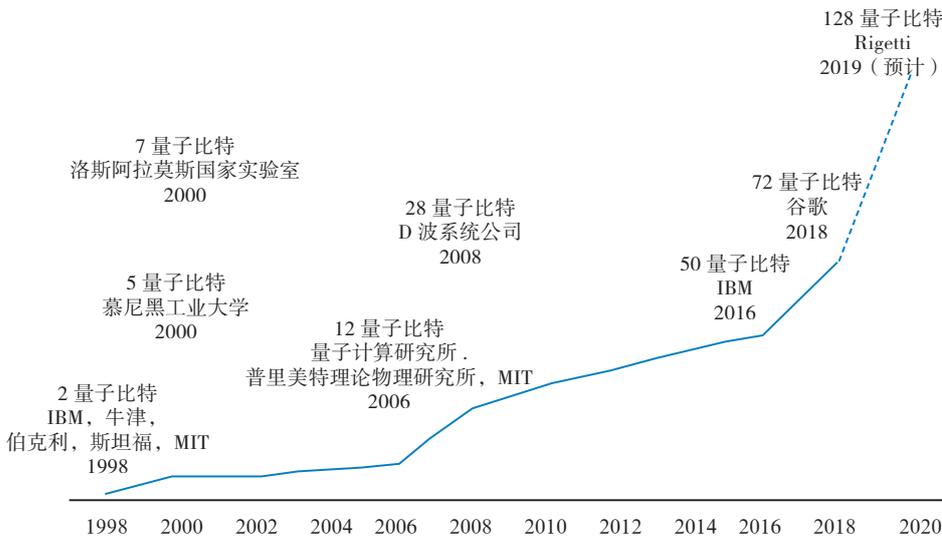
自20世纪80年代美国阿贡国家实验室的贝尼奥夫第一次提出量子计算概念以来，量子计算经历了从抽象的物理本质探讨到基本算法研究、架构设计和硬件开发的艰辛过程，虽然目前仍处于起步阶段，但理论研究和实践都在持续开展。

在算法方面，已有大约50种新的量子算法被陆续提出来，例如，肖尔的因式分解算法、格罗弗的快速搜索非结构化和海量数据集的算法、西蒙的概率算法等。在基础架构方面，提出了许多量子系统，例如，光子的偏振、腔量子电动力学、离子阱以及核磁共振等。

在量子计算机硬件方面，2005年密歇根大学的研究人员建造了一个半导体芯片离子阱；2008年加拿大初创企业D波（D-Wave）系统公司建立了世界上第一台量子退火计算机；2009年布里斯托大学的研究团队创建了一个基于量子光学的硅芯片，同年耶鲁大学的研究人员创

量子计算发展历程

1927	1935	1964	1970	1981	1994	1995	1996
<p>不确定性原理</p> <p>德国物理学家维尔纳·海森堡提出了量子力学的机要理论—不确定性原理（Uncertainty Principle），即粒子的位置与动量不可同时被确定，位置的不确定性越小，则动量的不确定性越大，反之亦然。</p>  <p>悖论</p> <p>阿尔伯特·爱因斯坦、鲍里斯·波多尔斯基和纳森·罗森为论证量子力学不完备性提出的一个佯谬，即一个完整的理论必须兼具定域论和时域论，在承认定域实在论的前提下，量子力学的描述是不完备的。</p> 	<p>贝尔不等式</p> <p>约翰·贝尔是第一个按照EPR的要求正确建立本地隐藏变量模型思想试验的人，并展示了事物之间有多么强大的相关性。有趣的是，量子力学可以违反这一界限，并且测量结果具有比任何局部隐藏理论更大的相关性。量子力学允许这些纠缠态的相关性。</p> 	<p>量子信息理论的诞生</p> <p>哈佛大学的研究生斯蒂芬·维森纳和查理·贝内特讨论的笔记中第一次使用了“量子信息理论”这一短语，以及将其作为沟通资源的首次建议。这些笔记还描述了最终由维森纳和贝内特于1992年发表的超密编码原理。</p> 	<p>量子力学挑战</p> <p>在由麻省理工学院和IBM共同主办的会议期间，诺贝尔奖获得者理查德·费曼向一群计算机科学家提出挑战，要求他们开发基于量子物理学的新型计算机。超过35年后，世界各地的科学家们越来越接近完成任务。</p> 	<p>肖尔的因式分解算法</p> <p>麻省理工学院的彼得·肖尔表明，有可能在量子计算机上有效地将一个数字纳入其质数，当数字非常大时需要经典计算机“以指数长时间”求解。他的算法在量子计算机领域引发了理论和试验兴趣的爆炸式增长。</p> 	<p>量子纠错</p> <p>量子纠错已被全球多个团体实现，包括IBM。该理论表明，可以使用冗余来防止环境噪声，使量子计算的物理实现更加稳固。</p> 	<p>临界条件</p> <p>IBM研究员大卫·迪文森概述了创建量子计算机的5个最低要求：定义明确的可扩展量子位阵列；将量子位的状态初始化为简单的基准状态的能力；一套“通用”量子门；长相干时间，比门操作时间长得多；单量子比特测量。</p> 	



1998—2020 年能实现的量子比特数量变化 (来源: MIT, 量子比特计数器)

造了第一个固态量子处理器；2016 年马里兰大学的科学家成功构建了第一台可重编程量子计算机；2017 年年底至 2018 年年初，IBM、英特尔和谷歌公司各自宣称其分别测试了包含 50、49 和 72 个量子比特的量子处理器；此外，位于美国伯克利的 Rigetti 计算公司开发了可以使用 19 个量子比特的芯片，该公司的下

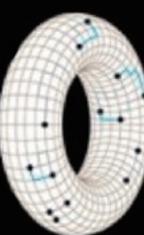
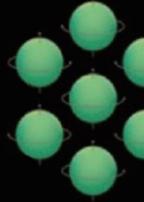
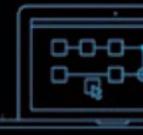
一个目标是在 2019 年达到 128 个量子比特。

尽管国内外学者对于量子计算技术进行了大量的研究，但距离用量子计算机的物理实现还有很长的路，面临的巨大挑战是硬件和算法。

首先是量子系统硬件的开发，目前主流的量子计算机系统有两类：

固体系统（超导、自旋、拓扑量子计算）和离子/光学系统，当前硬件方面的关键技术点一方面是如何产生足够多的量子比特（研究表明，量子比特数小于 50 时，量子计算机的性能将低于现有的超级计算机），另一方面是如何对量子态进行精准的控制，包括退相干、容错-纠错、量子门设计和量子叠加态初始化等。

其次是量子算法的开发，量子计算的优势是其指数加速特性，但实际上要实现指数加速并不容易。只有测量后才能知道量子态的信息，但测量会导致其叠加性能消失，系统将退化成为一种基本状态，这就相当于并行的多个状态中只有一种状态起作用。要克服这一难点，需要利用不同状态间的相干性，设计出合理的量子算法，使得通往正确态的概率能够迅速叠加增长，经过若干次重复运行后其概率就能趋近于 1，此时进行测量，结果即为正确状态所对应的结果。目前已开发出的量子算法数量较少、应用范围有

<p>1997</p>  <p>拓扑代码</p> <p>第一个拓扑量子纠错码，称为表面码，由加州理工学院教授阿列克谢·凯特提出。表面代码目前被认为是实现可扩展的容错量子计算机的最有前途的平台。</p>	<p>2001</p> <p>因式分解试验</p> <p>肖尔的算法首次在真实的量子计算试验中得到证明，求解了非常简单的教学问题：15=3×5。IBM 系统使用核中的量子比特，类似于 MRI 机器。</p> 	<p>2004</p>  <p>电路量子动力学</p> <p>耶鲁大学的罗伯特·舍尔科夫及其合作者发明了电路 QED，这是一种研究光子与人工量子物体在芯片上相互作用的方法。随着系统的不断扩展，他们的工作确立了耦合和读出超导量子比特的标准。</p>	<p>2007</p> <p>超导量子比特</p> <p>舍尔科夫及其合作者发明了一种超导量子比特，皆在降低对电荷噪声的敏感度，这是长相干性的主要障碍。超导量子比特已被许多研究超导量子的团队采用，包括 IBM。</p> 	<p>2012</p>  <p>一致性时间改善</p> <p>改进了使用 transmon 量子位的量子信息处理的几个重要参数。IBM 扩展了一致性时间，即量子位保持其量子态的持续时间，最长可达 100 μs。</p>	<p>2015</p>  <p>代码</p> <p>IBM 量子团队进行了一项试验，演示了最小的、接近于量子纠错的检测代码。在单量子状态稳定的情况下，可以检测两种类型的量子误差：位翻转和相位翻转。该代码以 4-量子比特晶格排列实现，其作为未来量子计算系统的构建模块。</p>	<p>2016</p> <p>云平台支持量子计算</p> <p>IBM 科学家构建了 IBM Q 量子计算体验平台，这是第一个通过 IBM 云提供并可通过桌面或移动设备访问的量子计算平台。它使用户能够在 IBM 的量子处理器上运行试验，使用单个量子比特，并探索量子计算的奇妙。</p> 	<p>2017</p>  <p>推出</p> <p>推出了第一个构建商用通用量子计算系统的行业计划。IBM Q 系统将被设计用于解决当前经典计算无法实现的看起来过于复杂且具有指数性的问题。目标是展示量子计算的可行性及其在各个行业中的实用性。</p>
---	--	---	--	---	--	---	--

限，大多应用在数学领域，对于航空发动机等工业领域中面临的复杂物理问题，如何设计算法更是巨大的挑战。

量子计算在航空航天领域的应用

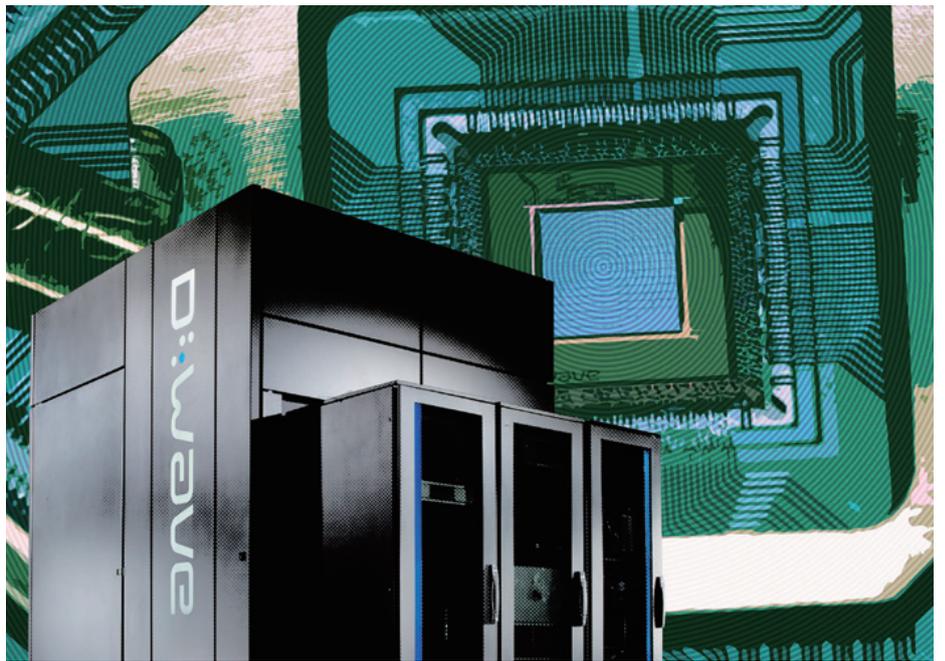
鉴于量子计算巨大的潜在价值，许多国家政府和军事机构都在为量子计算研究提供资金，以进一步开发用于民用、商业、贸易、环境和国家安全目的的量子计算机。一些航空航天领域的世界知名企业也在涉足量子计算硬件和软件，旨在通过量子计算激发本行业的技术革命。

NASA 量子人工智能实验室

美国国家航空航天局（NASA）设立了量子人工智能实验室（QuAIL）来证明量子计算和量子算法有朝一日可以显著提高该机构解决航空、地球和空间科学以及太空探索任务中出现的困难优化和机器学习问题的能力。QuAIL与量子计算企业、科技企业和大学紧密合作，包括D波系统公司、谷歌公司、大学空间研究学会（USRA）等。

该组织的研究领域包括算法、量子噪声及其他一些潜在的应用：

- 算法，是指量子计算领域的一个主要开放性问题是是否存在有效的量子启发式算法，以解决NASA在许多任务中发现的用经典方法难以解决的组合优化问题；
- 量子噪声，是指QuAIL关注量子噪声如何影响高维优化问题中的绝热量子计算的精度；
- 其他潜在的应用，是指QuAIL正在探索规划和调度领域应用量子算法，以解决在有限时间内最高效地利用有限资源的一类问题。



D-Wave量子退火计算机

洛马公司量子计算中心

洛马公司很早就开始关注量子计算领域，是D波系统公司的早期投资者之一。2010年，洛马公司成为D波系统公司的第一个客户，相继购买了后者生产的D-Wave One和D-Wave Two量子退火计算机，并成立了量子计算中心（QCC）来测试和使用这些计算机。此外，洛马还投资了一家名为QRA的量子计算机应用软件开发商。

洛马公司认为，量子计算机可以通过一次性探索所有可能的方案来解决复杂问题，而不是像通常那样，单独测试每个解决方案。量子计算的潜在应用包括处理复杂系统和大量数据的任何领域，包括软件验证与确认（V&V）。软件V&V是为了确保质量和可靠性而完成的工作，包括消除集成系统的计算层和物理层的错误。该公司的统计显示，超大型软件开发的成本中约有一半

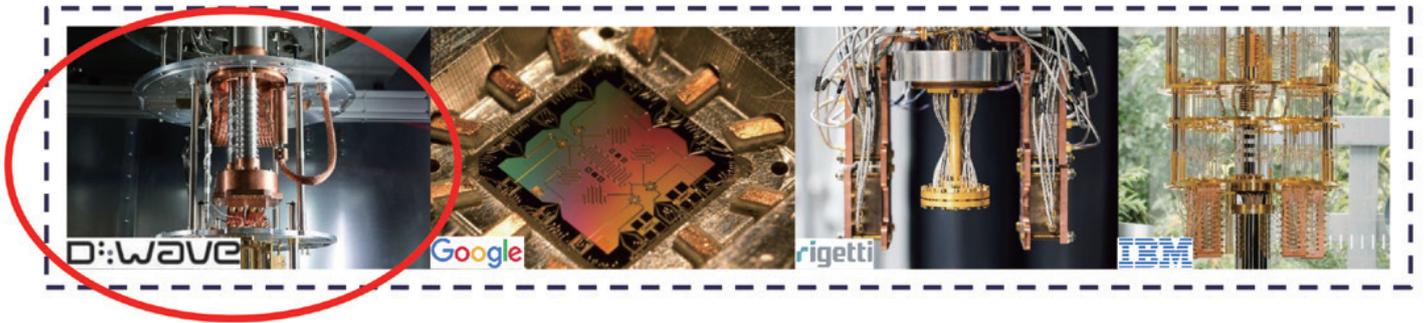
花费在V&V上。量子计算所具有的独特优点将有助于满足日益增长的软件V&V需求。

空客公司发起量子计算挑战赛

2015年年底，空客公司在威尔士纽波特建立了一个量子计算团队，研究将量子力学相关的技术应用于航空航天工业中的特定问题，即那些需要处理和存储大量数据的问题。空客与D波系统公司合作进行了故障树分析（FTA）相关的研究，有资料表明，空客已证实量子计算在这类问题上的潜在价值。

为了进一步拓展量子计算在航空领域的应用，空客公司于2019年年初发起了量子计算挑战赛，将量子力学新生技术应用于关键飞行物理问题，包括：

- 飞机爬升期间燃料使用优化，即通过量子计算获得低成本指数-时间和燃料的相对成本-爬升效率等指标组合的最优解；



空客公司用D-Wave 2000Q进行量子计算的应用

• 使用量子计算或量子-传统混合计算运行CFD仿真，解决适应仿真复杂性和计算资源扩展的量子计算算法问题，从而改进计算流体动态仿真；

• 多学科设计优化，通过同时评估不同的参数，量子计算为探索更广泛的设计空间提供了可能，从而在优化质量的同时保持结构完整性；

• 翼盒设计优化；

• 计算耦合操作约束下的最佳飞机载荷配置，例如，有效载荷能力、重心和机身载荷限制等。

波音公司颠覆性计算和网络部门

波音公司于2018年10月成立了颠覆性计算和网络（DC&N）部门。波音公司认为，通过量子通信和计算、神经形态处理和高级传感器技术，DC&N部门将使得波音在安全通信、人工智能和复杂系统优化等领域开发出颠覆性的解决方案。波音公司首席技术官表示，该部门不会研制量子计算机硬件，但会开发运行在量子计算机上的用于解决困难问题的算法。例如，波音在下一代空中交通管理系统的研发中面临着与网络优化相关的挑战，该部门将探索运用量子计算机与人工智能的解决方案。

量子计算与航空发动机

航空发动机的设计研发越来越依赖于计算能力，各大航空发动机企业都配置了自己的高性能计算资源，旨在降低航空发动机的研发时间和成本，大幅提高设计质量。即便如此，现有计算资源也难以满足不断增长的航空发动机复杂性和运行性能要求。可以预见，随着量子计算机的诞生和商业化普及，其优异的指数加速性能将在航空发动机的设计研发中发挥重要作用。基于量子计算的内涵和功能特点，推测其未来可能在航空发动机中的应用场景包括气体动力学模拟、多学科设计优化（MDO）、集成材料计算工程（ICME）、健康管理机器学习、系统安全性分析、软件V&V等方面。

气体动力学模拟

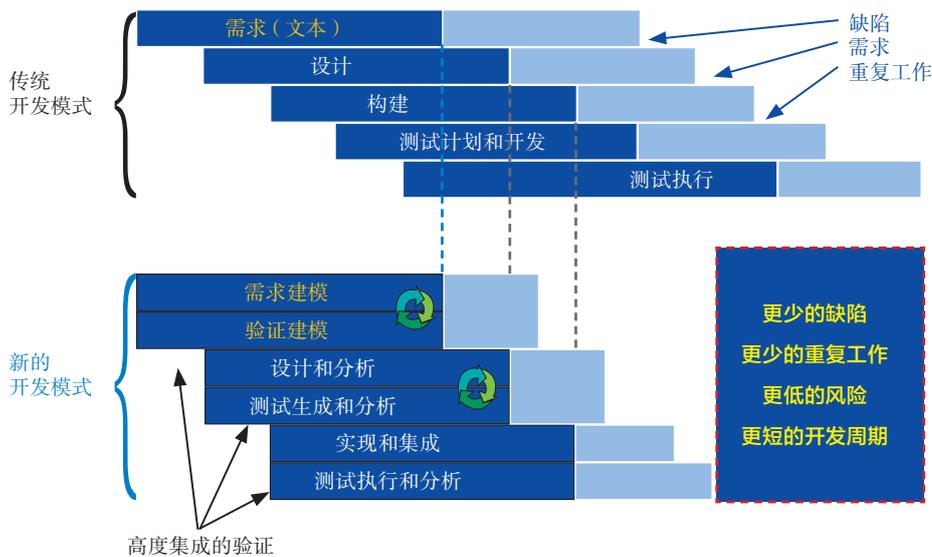
目前，航空发动机中的气体动力学模拟受限于计算资源的不足，对求解问题的规模、分辨率和数学模型都进行了一定的简化，导致计算精度和可靠性不足。利用量子计算的加速特性可以克服上述难点，但描述计算流体力学的纳维-斯托克斯方程具有强非线性，传统的差分方法不能用于量子算法求解非线性方程，利用格子玻尔兹曼方法可以通过线性方程和随机方法逼近非线性项，因此可以用量子算法实现

加速。此外，针对大规模微分方程系统求解的难点，利用量子计算，对于线性偏微分方程（PDE），可以利用有限差分法或有限元法，对空间离散化后可化为常微分方程组，再使用哈密顿模拟或量子线性系统算法（QLSA）求解。例如，通过量子有限元求解泊松方程，应用于热传导分布问题；利用哈密顿模拟求解波动方程模型，应用于电磁散射问题等。

上述气体动力学模拟是从介观尺度描述流体的运动规律。未来利用通用量子计算机，基于量子力学基本原理，可能可以从微观层面模拟出航空发动机中每一个气体分子的运动规律，这将为航空发动机的设计人员提供更加准确的依据，最大程度逼近设计极限。

多学科设计优化(MDO)

发动机多学科设计优化理论的方法和工程应用已有多年的发展，但由于发动机的设计变量众多，设计空间范围宽广，当前的计算能力难以满足计算需求，只能在小范围的设计空间中寻找到局部最优解。借助量子计算的优化算法，例如模拟退火算法，有可能在更加宽广的设计空间内寻找到全局最优解，从而实现设计指标的最大化。



量子V&V对软件研发流程的影响

集成材料计算工程 (ICME)

集成材料计算工程是指将材料从纳观、微观、介观到宏观的多个尺度范围的模型链接起来，进行多尺度计算，建立材料制备工艺—组织—性能关系，从而最大化结构性能。然而当前的集成材料计算仍然是基于连续介质力学假设，未考虑微观层面材料分子和原子性能及相互作用，导致仿真的精度不足。未来利用通用量子计算机，基于量子力学基本原理，可以实现对由单个分子/原子按一定规则排列形成材料的过程进行精确仿真，从而实现用于任何目的和材料的设计。

健康管理机器学习

机器学习技术正在航空发动机的设计、试验、生产、运行和维护过程中发挥越来越大的作用，将QLSA和量子优化算法与机器学习结合将进一步提高机器学习的效率，这就是量子机器学习。许多经典的优化算法可以利用量子计算的特性进行加速，例如，利用QLSA求解

线性方程组，监督学习的线性回归，支持向量机等；利用Grover搜索算法，改进无监督学习的K-means和K最近邻(KNN)算法；利用MCMC采样算法训练玻尔兹曼机，实现量子深度学习以及基于量子特性实现的量子强化学习等。

系统安全性分析

航空发动机是一个大型复杂系统，其适航符合性认证需要进行可靠性与安全性评估。故障树分析(FTA)和马尔可夫分析(MA)是复杂系统安全性工程中的重要分析方法。故障树表示连接大型复杂的子系统和节点之间的点工程结构，通过FTA可发现导致全局系统故障的本地故障组合，以排除任务安全隐患，或者是确认某一安全事故或特定系统失效的发生率。马尔可夫过程则是通过绘制状态转移图并求解状态转移微分方程来获得复杂系统的失效概率。

在FTA中，定量计算所有可能的故障模式和识别可导致安全关键性

事件的故障组合在数学上是一个NP困难问题（这类问题具有极高的计算复杂度，因其不能在多项式时间内验证解的正确性）。在MA中，当系统由 n 个单元组成时，系统状态将达到 2^n 个，可见当组成系统的单元数量增长时，系统状态的数量将呈指数增长，从而使得状态转移方程的求解异常复杂，甚至不可解。由于量子计算具有可以由纠缠的量子比特来表示随机变量的特性，从而在求解这两类问题时潜在的好处。

软件验证和确认(V&V)

现代飞机和发动机的正常运行需要大量软件，这些软件在飞行之前都必须经过严格的检查，以确保安全性和可靠性，这就是软件V&V。基于量子计算的软件V&V无须创建特定的测试用例，就可以发现软件的隐藏缺陷，因此将有助于减少软件缺陷和重复工作，降低风险，从而缩短研发周期。

结束语

量子计算由于其优异的指数加速性能，在处理大量复杂的数据集方面有着天然的优势，能够解决经典计算机无法解决的难题，在先进制造业、通信和网络安全等社会各个领域都有巨大的潜在应用价值，甚至有望颠覆整个行业。航空发动机是制造业的尖端，若能克服量子计算机的物理实现和高效算法的开发等关键技术和障碍，并将量子计算应用于航空发动机的设计研发中，势必能推动发动机行业的创新发展和技术变革。

航空动力

(项洋, 中国航发研究院, 工程师, 主要从事航空发动机仿真技术研究及仿真软件开发)