



超越“不可能三角”： 量子计算在流体力学领域的应用

□ 郭国平

在全球科技竞争聚焦前沿突破与自主可控的今天，量子计算作为颠覆性技术，其工程化应用能力已成为衡量国家科技实力的重要标尺。2024年10月，合肥综合性国家科学中心人工智能研究院、中国科学技术大学、本源量子等单位依托第三代自主超导量子计算机“本源悟空”模拟了网格规模为 41×41 非定常声波传播问题，求解的线性方程组维度高达5043，成功展示了在超导量子计算机上进行大规模流体模拟的潜力。这也是迄今为止国际上采用量子计算的最大规模计算流体力学（CFD）案例。

量子计算为流体力学开辟新路径

在流体力学领域，长期以来存在一个难题，即精度、规模和效率难以同时兼顾，被称为“不可能三角”。传统CFD方法在进行高精度流体模拟时，如对飞机机翼形状进行优化设计，需要处理数亿个网格单元，计算成本极其昂贵，可能耗费数月甚至数年的计算资源。

量子计算技术的出现为这一难题提供了潜在的解决方案。量子计算凭借其强大的并行处理能力，能够显著降低解大规模线性方程组运算的复杂度。以线性方程组的量子算法（HHL算法）为例，它将复杂度从传统的 $O(N)$ 降低至 $O(\log N)$ ，即从线性增长转变为对数增长，极大地提升了计算效率。量子计算还能在保证精度的同时扩大模拟规模，为流体力学领域提供更高效、更精准的解决方案。这将为流体力学领域的研究和实际工程应用开辟全新的可能性。

在国内，本源量子很早就开始了量子计算流体力学探索。2019年，法国空中客车公司发起全球量子计算挑战赛，邀请了全球36个量子计算团队、超过800名研究人员，旨在利用量子算力加快飞机机翼设计。在此次比赛中，本源量子团队构建了一个在量子计算机上求解计算流体力学问题的算法，成为唯一入围该挑战赛五强名单的中国企业。

在国际方面，2023年，英伟达、罗尔斯·罗伊斯与量子技术公司Clas-

siq合作设计全球最大规模量子计算流体力学电路，显著提升航空发动机效率。法国空中客车公司联合英国囚禁离子量子计算技术开发商（Oxford Ionics）和多物理场模拟软件提供商（Quanscient）公司推进航空量子流体技术，计划2025年将量子CFD集成至飞机设计流程，目标是将高超声速气动热仿真时间从数周缩短至小时级。

量子计算或成驱动 高端制造业升级的关键引擎

计算流体力学广泛应用于航空航天、汽车工程、船舶设计等领域，与飞行器、汽车及船舶的外形设计都紧密相关。在该领域，量子计算展现出巨大潜力。

在能源装备领域，风电叶片复杂气动载荷模拟方面，量子计算能够更精准地预测叶片在不同工况下的受力情况，从而优化叶片设计，提高发电效率；对于核反应堆冷却系统多相流优化，量子模拟可帮助精确控制冷却剂的流动特性，提升核反应堆的安全性和运行效率。量子计算的高效模拟能力，可为这些重大工程提供更快、精准的解决方案，保障国家能源与国防安全，推动项目高效实施。

在航空航天领域，通过高精度量子流体模拟，可大幅压缩飞行器外形迭代周期。我国已依托超导量子计算机“本源悟空”完成全球最大规模（网格规模 41×41 ）的量子计算流体力学仿真，将线性方程组求解维度提升至5043，验证了超导量子硬件在复杂工程问题上的潜力。我国开发的“本源量禹”软件也已验证量子计算在复杂气动仿真问题上的可靠性。通过高精度的量子流体模拟，优化飞行器的气动外形，提升其空气动力学性能，加速新型号的迭代研发，增强我国航空航天产业的全球竞争力，将使我国在国际航空航天领域占据更为有利的地位。

在汽车船舶工业领域，借助量子优化的流体仿真，高效探索数以百万计的设计参数组合，实现汽车和船舶气动/水动力性能的极致优化。有望将新车、新船的研发周期缩短，促使油耗/

排放降低、续航里程提升等显著经济效益。这将推动汽车产业向绿色低碳和高性能方向发展，助力船舶工业进一步提升在国际市场的份额，促进我国汽车船舶工业的转型升级。

在环境工程领域，法国空中客车公司与超导量子计算公司IQM等合作，利用量子计算提升CFD性能，从而优化飞机设计、降低燃油消耗与碳排放等。丹麦开发高分辨率拉格朗日模型（DALM），结合量子算法后可实现污染物扩散动态预警。通过量子计算对污染扩散过程进行快速、准确的模拟，为环境监测和污染防治提供及时、科学的决策依据。这将助力环境工程领域在应对大气污染等环境问题更加高效，为我国生态环境保护提供有力的技术支撑。

机遇、挑战与自主发展路径

当前，欧美商业CFD软件（如Ansys Fluent、CFX）占据中国市场份额超90%，我国工业软件国产化率不足10%。量子计算为我国提供了打破垄断、实现“弯道超车”的战略机遇。发展自主可控的量子计算流体力学技术，将有效降低对国外软件和技术依赖，提升高端制造业核心竞争力，并保障关键领域技术安全与工业体系的自主稳定发展。

尽管前景光明，量子计算在流体力学应用仍面临理论与技术双重挑战。一是理论框架还需“打好地基”。量子流体力学基础理论体系、量子—经典混合算法的数学基础等问题需深入探索。二是硬件还需“练内功”。当前量子计算机（NISQ中等规模阶段）尚不成熟，量子比特数量少、相干时间短、错误率高，制约了大规模复杂问题求解能力。三是算法离工程化有“最后一公里”。算法的可扩展性、容错性及实际工程接口设计均需重大突破。四是复合型人才稀缺。既懂量子计算又精通流体力学尖端问题的跨学科人才严重不足，培养速度远远跟不上技术发展需求。

为巩固我国来之不易的先发优势、抢占战略制高点，建议采取以下关键举措。

建设国家级协同创新平台。集聚合肥、北京、上海等地的优势科研力量，成立国家量子流体力学重点实验室或创新中心。优先向流体力学领域开放“本源悟空”等国家自主量子算力平台，集中资源开展核心算法、软件框架与工程化验证的联合攻关。打破部门和地域限制，形成协同创新的合力，加速量子计算在流体力学领域的技术突破和应用推广。这样的平台建设将汇聚各方优势资源，为量子计算与流体力学的深度融合提供坚实的物质基础和科研环境。

强化基础研究与核心技术攻关。设立量子计算流体力学国家专项基金，重点支持量子—经典混合算法、高效量子态制备与测量、面向流体问题的专用量子硬件以及误差缓解等底层技术的研发。同时，鼓励顶尖高校设立量子流体力学交叉学科，加强跨学科人才培养，制定相关专业课程体系和培养方案，为该领域源源不断输送高素质复合型人才。

加速产业融合与应用示范。在国家重大工程、第四代核电站等国家重大工程以及新能源汽车、船舶制造、清洁能源等优势产业中，设立量子计算流体力学（QCFD）应用示范项目。以实际工程需求为牵引，推动量子计算技术与产业应用的深度融合。建立“产学研用”紧密协同机制，促进龙头企业与量子计算团队深度合作，将前沿算法快速转化为实际的工程设计力和生产力。

积极参与全球治理与标准制定。在坚持核心技术自主可控的前提下，积极参与量子计算流体力学国际标准、基准测试等制定工作。支持国内科研团队和专家主导国际会议与期刊，提升我国在该领域的学术影响力和国际话语权。通过参与国际合作与交流，推动形成开放、包容、互利共赢的量子计算流体力学国际合作生态。（作者系中国科学技术大学教授，安徽省量子计算工程研究中心主任）



在新一轮科技革命和产业变革深度交融的当下，科技成果转化成为激活创新势能、赋能经济发展的关键环节，是连接科技创新体系与现代化产业体系的重要纽带，也是推动科技创新与产业创新深度融合的有效途径。党的二十届三中全会《决定》提出“鼓励和引导高校、科研院所按照先使用后付费方式把科技成果许可给中小微企业使用”，体现了我国科技成果转化改革从聚焦供给侧“转得出、转得好”，向供给与需求双侧发力、重视“落得地、有需求”的深度进阶，成为科技成果转化机制重塑的标志性突破。科技成果许可先使用后付费方式的明确，有利于产学研紧密结合，促使科学到技术再到产业的通道更加顺畅，从而为我国新质生产力的发展注入源源不断的动力。

从供给到双侧：制度突破的战略信号

长期以来，科技成果转化的政策着力点聚焦供给侧，通过深化职务科技成果赋权改革、强化高校院所转化激励，试图破解“转得出”难题。但成果转化的“最后一公里”，往往卡壳于需求侧企业的不敢用、用不起。中小微企业受资金、风险承受力掣肘，对陌生科技成果望而却步；成果供给与企业需求存在信息差，优质技术难以精准匹配市场刚需。

先使用后付费方式的出现，是一次供给侧与需求侧的双向奔赴。它将政策重心从激发科研人员供给端积极性，延伸至激活企业需求端活力，让企业以零前期成本尝试新技术，用市场验证代替行政判断，倒逼成果供给侧关注技术实用性与市场适配度。这是一场从推成果到找需求的逻辑变革，标志着科技成果转化从供给主导的单边突进迈向供需协同的生态重塑，为打通科技成果转化堵点提供了制度密钥。

从探索到定型：制度演进的实践轨迹

回溯先使用后付费方式的发展脉络，作为推进中关村新一轮先行先试改革工作落地的重要举措，2022年9月印发的《关于在中关村国家自主创新示范区核心区开展高校院所、科研机构、医疗卫生机构科技成果转化先使用后付费改革试点实施方案》以政策形式对先使用后付费进行了系统安排。2023年9月修订的《浙江省科学技术进步条例》将“科技成果先试用后转化”写入地方性法规。2024年科技成果转化许可先使用后付费被写入党的二十届三中全会《决定》之后，天津、江苏、福建、四川、内蒙古、陕西、广东等地方政府纷纷出台相关政策加以推广实施。

通过前期制度和实践探索，企业可先拿技术验证、再按效果付费，打破资金枷锁，让中小微企业敢尝“创新螃蟹”。一批生物医药、人工智能的冷门成果，因企业敢于试用，催生出抗癌新药研发、工业智能升级等应用场景。同时，通过构建低门槛接入、市场化结算的转化通道，高校院所的专利转化周期缩短，企业技术获取成本降低，沉睡专利加速苏醒。这些探索证明，先使用后付费以风险共担、收益共享的机制，激活了供需两端积极性，为制度定型积累了实践经验。

从落地到深化：制度完善的现实命题

先使用后付费方式要真正嵌入科技成果转化生态，需跨越信任构建、风险平衡和政策协同三重门槛。

一是加强供需信任，解决信用体系的补位之困。企业“先使用”的底气，源于信用体系的支撑。当前，企业信用评价分散在金融、政务等领域，缺乏针对“科技成果使用”的专属信用画像。若企业“试用赖账”，高校院所维权成本高；若高校院所“技术注水”，企业损失难追偿。需构建跨部门、标准化的科技信用平台，整合企业研发实力、信用记录，关联高校院所成果质量、履约历史，用数据编织“信任网络”，让守信者便捷使用、失信者寸步难行。

二是加强风险平衡，解决权责边界的厘清之难。高校院所作为公益属性机构，面临“后付费收不

以先使用后付费方式破解科技成果转化难题

□ 吕昌宁 肖尤丹

回”的资金风险。企业试用失败、恶意拖欠，会让高校研发投入“打水漂”，削弱转化积极性。这需要政府从公共服务角度破局：一方面，设立科技成果转化风险补偿基金，对高校院所因企业失信产生的损失给予一定比例补贴；另一方面，探索“保险+转化”模式，引入保险公司开发成果试用履约险，用市场化手段分摊风险，让高校院所敢放、企业敢用。

三是加强政策协同，解决协同联动的畅通之堵。先使用后付费方式的效能释放，需要加强与相关政策的协同联动，形成撬动成果转化的政策杠杆组合，打通资源供给与转化通路的协同堵点。要推动已完成声明的财政资助科研项目形成专利采用先使用后付费许可方式，让公共财政支持的科技成果更好惠及社会；要引导中小微企业深度参与高校和科研机构存量专利盘活工作，以先使用后付费方式推动企业需求与技术供给精准匹配、有效对接；要在专利开放许可中嵌入先使用后付费条款，激活规模化推广与低门槛试用双通道。

先使用后付费方式，是科技成果转化改革的“小切口”，却撬动着“供需协同”的大变革。从党的二十届三中全会释放的战略信号，到实践探索积累的经验，再到落地深化面临的挑战，这条制度演进之路，本质上是一场重塑创新生态的攻坚战。唯有以信用体系为基、风险共担为翼，让供给侧与需求侧在“先试”中互信、在“后付”中共赢，才能真正让科技成果从“书架”走向“货架”，让创新势能转化为高质量发展发展的澎湃动能。这不仅是一项制度的落地，更是中国科技成果转化生态从蹒跚学步到奔跑前行的关键一跃，值得我们以改革之智、协同之力持续深耕。

（作者单位：中国科学院科技战略咨询研究院）



人工智能是年轻的事业，也是年轻人的事业

□ 彭一杰

习近平总书记在上海考察时强调：“人工智能是年轻的事业，也是年轻人的事业。”这一论断不仅是对人工智能产业发展规律的深刻洞察，也表达了对年轻一代的殷切期望。在全面推进强国建设、民族复兴伟业的关键时期，这一重要论断为我们把握人工智能发展机遇、激发年轻一代展示才华、大显身手指明了方向、提供了遵循。

纵观科技发展史，每一次重大技术革命都呈现出鲜明的“年轻”特征——不仅是技术本身的快速迭代，更是创新主体的代际更替。人工智能作为第四次工业革命的核心驱动力，其“年轻”属性尤为突出。从20世纪中叶人工智能概念诞生至今，这一领域经历了多次理论范式的革新，每一次突破都伴随着认知边界的拓展和应用场景的重构。特别是近年来，随着计算能力、算法创新、数据资源的协同突破，人工智能正在实现从模仿人类智能到拓展智能边界的历史性跨越。这种加速演进的态势，使人工智能成为人类历史上发展最为迅猛、影响最为深远的技术领域。

更深层的“年轻”在于人工智能对人类认知体系的持续挑战与重塑。从最初对智能本质的探索，到如今对创造力、理解力、意识等核心问题的追问，人工智能不断推动我们重新审视智慧的内涵与边界。这不仅是技术层面的革新，更是认识论层面的变革——它促使我们思考：智能的本质是什么？理解与创造的边界在哪里？人

机协同的未来将如何展开？这些永恒而常新的命题，赋予人工智能以持久的生命力和无限的可能性。

人工智能之所以是年轻人的事业，根源于创新规律与青年特质的内在契合。创新理论告诉我们，颠覆式创新往往来自对既有范式的突破，而青年群体恰恰最少受到思维定式的束缚。当代青年成长于数字文明的浪潮之中，他们的认知结构、思维模式与智能时代的要求高度契合。更重要的是，青年群体具有独特的创新优势——思维活跃开放、学习能力强劲、敢于挑战未知。在人工智能这个高度交叉融合的领域，需要的正是这种跨越边界、融会贯通的创新精神。

从全球人工智能发展的实践看，青年已成为推动技术突破的中坚力量。无论是基础理论的重大突破，还是应用创新的快速迭代，青年研究者和创业者都扮演着关键角色。在我国各地的人工智能创新高地，活跃着大批青年才俊，他们以敢为人先的勇气和追求卓越的精神，在算法优化、模型创新、应用落地等各个环节贡献智慧。这绝非偶然现象，而是创新规律的必然体现。青年时期是创造力的黄金期，思维最为活跃，最容易产生原创性成果。正如科学史所揭示的，重大科学发现往往诞生于研究者的青年时期，在需要大量创新突破的人工智能领域，青年的作用更加凸显。

站在国家战略高度审视，让青年成为人工智能发展的主力军，关系到能否在新一轮科技革命和产业变革中

占据制高点。当前，全球人工智能竞争已从单点技术竞争演变为体系化能力竞争。主要国家和地区都在加快布局，力图在这场关乎未来的竞赛中占得先机。我国虽然在应用创新、场景落地等方面形成了一定优势，但在原始创新能力、核心技术掌控等方面仍需加快追赶。实现从跟跑、并跑到领跑的转变，需要的不是简单模仿，而是原创性突破。这恰恰需要年轻一代的创新勇气和开拓精神。

培养青年人工智能人才，需要构建适应智能时代特征的新型教育体系。要打破传统学科界限，推动数理基础、计算思维、系统工程、人文素养的深度融合。国内高校在培养模式创新方面已有诸多探索，通过设立交叉学科专业、开展项目制教学、强化实践环节等方式，努力培养具有综合素质的创新人才。同时，要构建开放协同的创新生态，让青年在真实的研发环境和产业实践中成长。各地建设的人工智能创新平台，通过提供技术支持、资源对接、成果转化等全链条服务，为青年创新创业搭建了广阔舞台。

值得深思的是，技术发展必须始终坚持正确的价值导向。人工智能在极大提升生产力的同时，也带来了诸多挑战。算法的公平性、数据的隐私保护、技术的伦理边界等问题，需要我们在发展中不断探索答案。青年科技工作者必须树立正确的科技观，在追求技术创新的同时，始终坚守人文关怀和社会责任。要深刻认识到，人

工智能的发展目标是增进人类福祉、促进文明进步，而非制造对立或加剧不平等。只有坚持科技向善，才能确保人工智能真正造福全人类。

“青年兴则国家兴，青年强则国家强。”人工智能时代的竞争，归根结底是人才的竞争、创新的竞争。谁拥有了一批富有创造力的青年人才队伍，谁就掌握了未来发展的主动权。广大青年要深刻认识自己肩负的历史使命，以开拓进取的精神状态和永不懈怠的奋斗姿态，在人工智能发展的征程中勇当先锋。既志存高远，瞄准世界科技前沿开展原创性研究，又脚踏实地，聚焦国家重大需求解决实际问题。要在开放合作中提升能力，在自主创新中贡献力量，努力成为推动人工智能发展的生力军。

历史的车轮滚滚向前，时代的号角催人奋进。在这个充满机遇与挑战的智能时代，年轻一代大有可为、必有作为。在以习近平总书记为核心的党中央坚强领导下，在一代代青年的接续奋斗中，我国人工智能事业必将实现新的跨越，为推进中国式现代化、构建人类命运共同体作出新的更大贡献。

（作者系北京大学人工智能研究院多智能体与社会智能中心主任）

