

1864年，法国作家儒勒·凡尔纳在其所著的科幻小说《地心游记》中，描写了一个有着大海、蘑菇森林和远古巨兽的地下世界，表露了人类对地球深部奥秘的揣测想象与强烈好奇。根据科学探测，地球深部蕴藏着丰富的油气和矿产，是支撑人类发展的重要资源库。20世纪70年代起，发达国家开始对地球深部展开探测，并将其视为前沿科技竞争的重要阵地。但是，地层深处遍布坚硬的岩石，还有高温高压的极端环境，让入地比登天、下海更难。2008年，我国启动“地球深部探测专项”，拉开了中国“入地计划”的序幕。历时10余年，已经取得了一系列重大突破。未来，向地球深部进军将成为我国保障国家安全和可持续发展的一项战略选择。那么，地球深部到底蕴藏着什么奥秘？

地球深处有“宝藏”

地球有着独特的构造和物质分布，然而人类对它还知之甚少。一直以来，我们都试图与地球“对话”，希望彻底解开这个有46亿年历史的蓝色星球的奥秘。事实上，迄今为止，人类发展所需的资源都来自于地球。现有的科学研究成果显示，地下深度2公里以内是地下水资源和人类可利用的空间；深度5000米到1万米左右则是能源和资源空间，这里有丰富的油气、矿产和地热资源，而1万米左右也是目前人类科技可以抵达的最深处；1万米再往下则是地震、火山爆发等自然灾害发生的空间。对地球深部的探索，有益于进一步解决人类发展的资源和能源需求，且从更长远看，如何预测地质灾害、应对全球气候变暖危机，也需要从尘封在地下的岩石中寻找答案。

人类的发展强烈地依赖于我们对矿产资源和能源的利用。新中国成立初期，我国要快速地从农业国家向一个工业化国家迈进。可是那时候我们基本没有石油，怎么办？当时在北京大街小巷，汽车头顶上都带一个大气囊，烧的是煤气。缺油成了当时中国的“卡脖子”问题。但是中国科学家通过长期的研究，提出了陆相生油理论，成功地发现了大庆油田等一系列油田。这种发现对我国的工业化建设起到了关键作用。

今天，信息技术产业、航天航空、轨道交通、新材料，都需要众多的元素来支撑才能完成。从这个意义上讲，人类已经进入元素周期表的全元素利用时代。到本世纪中叶，我国要进入中等发达国家行列，这就意味着需要更多的矿产资源来支撑我们

入地，我们能走多远？

□ 王成善



王成善，中国科学院院士，著名地质学家。他深入青藏高原30余年，从事地质科考和研究，提出青藏高原从中部率先隆起的新论断，受到国际地学界的广泛关注，被列为“中国地理百年大发现”之一。作为较早关注全球气候变暖的地质学家，他主持的国际大陆钻探项目“松辽盆地大陆科学钻探”，成功获取连续完整的8187米岩心，被誉为通往白垩纪的“金柱子”，为预测未来全球气候变化提供了科学依据。近年来，作为中方首席科学家，他主导发起了“深时数字地球国际大科学计划”，旨在为国际地学界构建数字化科研基础设施，实现地球演化数据的全球整合和共享。

的需求，而且会发生相当大的变化。以新能源汽车为例，以前传统汽车不需要的锂、钴、镍、石墨等，恰是新能源汽车需要的关键矿产。5年前全球只有50多万辆新能源汽车，可是今天已经到了几百万辆，10年之后，有可能是几千万辆。这就意味着我们对这些新的矿产资源，有时候把它们称为战略性矿产资源或者关键性元素的需求，会呈几倍、几十倍的增长。我们的能源和资源利用对外依存度太高，就处于一种危险状态。但是有一个办法，就是向地球深部要资源，因为我们所需要的资源可能在地下深部1万米以内都有分布。中国过去只是在500米以内开采资源，国内有一部分矿山到了1000米，但是国际上先进水平已经到了2000米到4000米左右。

向地球深部要资源，如果我们开采深度能够达到地下2000米，那么我国的固体资源供给将能够在现存基础上再翻一番。最近我们在塔里木不断地发现一些超深的大气田，都是在地下9000米到1万米之间发现的。这里头更重要的就是对于地热的利用，如果把热能置换出来用于发电，这就是零碳的能源，就可以取代现在的化石

能源。现在世界各国都在研发如何在地下开采热能转化成电能。对地球深部的利用和使用，不仅仅包括我们刚才讲的矿产资源和能源资源，也包括地下空间的利用。1991年在东京召开了一次地下空间利用大会，会后发表了一个《东京宣言》，这个《东京宣言》指出，19世纪是人类的桥梁世纪，20世纪是高层建筑世纪，21世纪将进入到地下空间利用世纪。西方发达国家在大城市建设过程中，对地下空间利用已经发展得非常快。比如日本、新加坡已经达到了200米，而我国一些主要城市的地下空间利用还不足50米。所以说，向深部要空间是我国城市发展和深地应用的重要方向之一。

依靠前沿科技与地球对话

“可上九天揽月，可下五洋捉鳖”一直是人类自古以来的梦想。然而，比起“上天”“下海”，“入地”之旅却困难重重。地球深处坚硬的岩石和高温高压的极端环境，成为我们的巨大障碍。目前人类直接钻探深度只有12

公里，而地球半径长达6000多公里，如果把地球比作一个鸡蛋，我们的探测目前还仅仅停留在鸡蛋壳上。为了了解地球深处的奥秘，许多国家的科学家进行了各种尝试，并获得了不少意想不到的发现。经过10余年的艰苦努力和探索，我国深部探测在地质科学研究、深部资源勘查、自然灾害预测等方面也取得了重大进展，技术水平进入国际前列。

上个世纪美国率先发起了一个国际大科学计划，叫作大洋钻探计划。这个大洋钻探计划，为验证大陆漂移和板块学说立下了汗马功劳，使人们意识到我们在实施大洋钻探计划的同时，可以实施大陆科学钻探计划。1996年中国与美国、德国三个国家共同发起了国际大陆科学钻探计划。大洋钻探计划我们是参与国，而到了大陆科学钻探计划的时候，我们是发起国，这是一个很了不起的进步。大陆科学钻探计划实施以来，中国大陆一共实施了三个在大陆科学钻探计划框架下的钻探工程，一个是江苏的东海钻，一个是青海湖的环境深钻，还有一个是松辽盆地的科学钻探。这些钻探工程不仅取得了大量的科学突破，也促进了我国钻探设备和技术的创新

与发展。

松辽盆地大陆科学钻探工程由松科一井、二井、三井共三井四孔组成，获得连续完整的岩心8187米。其中松科二井是我国松辽盆地大陆科学钻探工程的核心科学井，完井深度达到7018米，成为亚洲国家最深的大陆科学钻井和国际大陆科学钻探计划成立以来的最深钻井，代表了中国的“入地”能力。科学钻探虽然表面上看是打一口井，实际却是在考验一个国家的综合实力和科技发展水平。松科二井工程创造了深部钻探技术4项世界纪录，引领了全球白垩纪陆相古气候研究，使我国在地球深部钻探技术领域达到国际领先水平。



学习时报与央视中国经济大讲堂合办

更多精彩内容扫码看视频

后摩尔时代计算能力提升的解决方案 量子计算

□ 朱晓波 陆朝阳 潘建伟

量子计算是基于量子力学的全新计算模式，具有原理上远超经典计算的强大并行计算能力，为人工智能、密码分析、气象预报、资源勘探、药物设计等所需的大规模计算难题提供了解决方案，并可揭示量子相变、高温超导、量子霍尔效应等复杂物理机制。

与传统计算机使用0或者1的比特来存储信息不同，量子计算以量子比特作为信息编码和存储的基本单元。基于量子力学的叠加原理，一个量子比特可以同时处于0和1两种状态的相干叠加，即可以用于表示0和1两个数。推而广之，n个量子比特便可表示2ⁿ个数的叠加，使得一次量子操作原理上可以同时实现对2ⁿ个叠加的数进行并行运算，这相当于经典计算机进行2ⁿ次操作。因此，量子计算提供了一种从根本上实现并行计算的思路，具备极大超越经典计算机运算能力的潜力。

类似于经典计算机，量子计算机也可以沿用图灵机的框架，通过对量子比特进行可编程的逻辑操作，执行通用的量子运算，从而实现计算能力的大幅提升，甚至是指数级的加速。一个典型的例子是1994年提出的快速质因数分解量子算法（Shor算法）。质因数分解的计算复杂度是广泛使用的RSA公钥密码系统安全性的基础。例如，如果用每秒运算万亿次的经典计算机来分解一个300位的大数，需要10万年以上；而如果利用同样运算速率、执行Shor算法的量子计算机，则只需要1秒。因此，量子计算机一旦研制成功，将对经典信息安全体系带来巨大影响。

量子计算的发展阶段

量子计算机的计算能力随量子比特数目呈指数增长，因此量子计算研

究的核心任务是多量子比特的相干操纵。根据相干操纵量子比特的规模，国际学术界公认量子计算有如下发展阶段：

第一个阶段是实现“量子计算优越性”，即量子计算机对特定问题的计算能力超越经典超级计算机，达到这一目标需要约50个量子比特的相干操纵。美国谷歌公司在2019年率先实现超导线路体系的“量子计算优越性”。我国则分别于2020年在光量子体系、2021年在超导线路体系实现了“量子计算优越性”。目前，我国是世界上唯一在两种物理体系达到这一里程碑的国家。

第二个阶段是实现专用量子模拟机，即相干操纵数百个量子比特，应用于组合优化、量子化学、机器学习等特定问题，指导材料设计、药物开发等。达到该阶段需要5至10年，是当前的主要研究任务。

第三个阶段是实现可编程通用量子计算机，即相干操纵至少数百万个量子比特，能在经典密码破解、大数据搜索、人工智能等方面发挥巨大作用。由于量子比特容易受到环境噪声的影响而出错，对于规模化的量子比特系统，通过量子纠错来保证整个系统的正确运行是必然要求，也是一段时期内面临的主要挑战。由于技术上的难度，何时实现通用量子计算机尚不明确，国际学术界一般认为还需要15年甚至更长时间。

目前，国际上正在对各种有望实现可扩展量子计算的物理体系开展系统性研究。我国已完成了所有重要量子计算体系的研究布局，成为包括欧盟、美国在内的三个具有完整布局的国家（地区）之一。

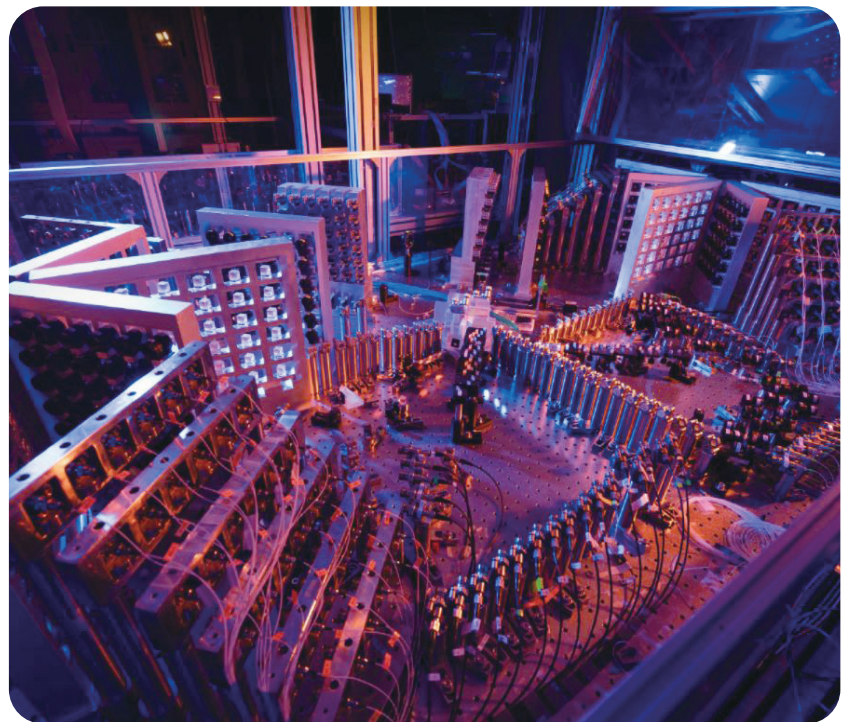
超导量子计算实现赶超

目前，美国谷歌公司、IBM公司

以及中国科学技术大学是全球超导量子计算研究的前三强。2019年10月，在持续重金投入量子计算10余年后，谷歌正式宣布实验证明了“量子计算优越性”。他们构建了一个包含53个超导量子比特的量子处理器，命名为“Sycamore（悬铃木）”。在随机线路取样这一特定任务上，“悬铃木”展现出远超超级计算机的计算能力。2021年5月，中国科学技术大学构建了当时国际上量子比特数目最多的62比特超导量子计算原型机“祖冲之号”，并实现了可编程的二维量子行走。在此基础上，进一步实现了66比特的“祖冲之二号”。“祖冲之二号”具备执行任意量子算法的编程能力，实现了量子随机线路取样的快速求解。根据目前已公开的最优化经典算法，“祖冲之二号”对量子随机线路取样问题的处理速度比目前最快的超级计算机快1000万倍，计算复杂度较谷歌“悬铃木”提高了100万倍。

其他体系的量子计算研究

离子、硅基量子点等物理体系同样具有多比特扩展和容错性的潜力，也是目前国际量子计算研究的热点方向。我国在离子体系的量子计算研究上起步较晚，目前整体上处于追赶状态，国内的优势研究单位包括清华大学、中国科学技术大学和国防科技大学等，在离子阱的制备、单离子相干保持时间、高精度量子逻辑门、多比特量子纠缠等量子计算的基本要素方面积累了大量关键技术。我国在硅基量子点的量子计算方向上与国际主要研究力量处于并跑水平。此外，由于拓扑量子计算在容错能力上的优越性，利用拓扑体系实现通用量子计算是国际上面向长远的重要研究目标。



2021年潘建伟团队成功研制出“九章二号”

目前国内外均在为实现单个拓扑量子比特这一“0到1”的突破而努力。

量子计算的未来发展

在实现了“量子计算优越性”的阶段目标后，未来量子计算的发展将集中在两个方面：一是继续提升量子计算性能。为了实现容错量子计算，首要考虑的就是如何高精度地扩展量子计算系统规模。在实现量子比特扩展的时候，比特的数量和质量都极其重要，需要实验的每个环节（量子态的制备、操控和测量）都要保持高精度、低噪声，并且随着量子比特数目的增加，噪声和串扰等因素带来的错误也随之增加，这对量子体系的设

计、加工和调控带来了巨大的挑战，仍需大量科学和工程的协同努力。二是探索量子计算应用。预计未来5年，量子计算有望突破上千比特，虽然暂时还无法实现容错的通用量子计算，但科学家们希望探索在带噪声的量子计算（NISQ）阶段，将量子计算应用于机器学习、量子化学等领域，形成近期应用。

中国在2008年启动了地球深部探测专项，后来在2016年又启动了深地资源勘查与开采的国家重点研发专项。通过这些项目的实施，使我国与国外的差距快速地拉近，使我们深部探测的整个技术系列，无论是在国产化、系统化，还是在工程方面，都可以跟发达国家相媲美。我们可以骄傲地说，具有完善的深部探测技术体系的国家，只有美国、加拿大、俄罗斯和中国这4个国家。

地心可能是我们永远想到又不到的，那我们的地心之旅怎么完成呢？我们能不能把地心搬到实验室来？1993年把地心搬到实验室取得重大进展，我们可以模拟实验核幔边界的温度。到了2010年，我们可以实验出相当于地心的温压，地心的压力有多大？大约是363万大气压，很难用数字来描述大气压力有多大。但是人们计算了一下，三个大象踩一个草莓，还不到1万大气压。我们可以想象363万大气压要能够实现出来，需要什么样的技术，什么样的装备。非常令人骄傲的是2010年首先进入到地核这种温压条件的实验，是由中国科学家来完成的。

60年前，我们老一代科学家对21世纪的梦想是要“上天”，要“入地”，要“下海”。向地球深部进军是我们必须要解决的战略科技问题，而“十四五”规划又专门提出来，要在深地、深海等前沿领域实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目。这实际上吹响了中国科学界向深地进军的集结号，我们要将入地梦融入到强国梦。