

高技术前沿

今年初,我国科学家在量子传感领域取得重大进展。北京计算科学研究中心薛鹏教授团队联合东南大学等,首次在非么正光量子行走实验平台上,直接观测到临界点增强的量子传感效应,这为研发超高灵敏度量子传感装置提供了全新原理支撑,相关成果发表于国际权威期刊《物理评论快报》。

通俗地说,在这个量子实验中,科研人员就像给测量装置安装了“超级放大镜”,能把微小的物理变化测得更精准,还解决了过去测量耗费时间长的难题。

这意味着我国量子精密测量领域的发展有了全新技术路径支撑,将推动我国导航、地下成像等领域新的进步。这一技术进步也和国家“十五五”规划相“应和”;规划建议中,量子科技被列为未来重点布局的产业赛道之一,同时强调突破量子精密测量关键技术。

那么,量子精密测量技术是如何进行“测量”的?其背后的技术原理是什么?未来发展趋势如何?又将给社会生活带来哪些影响?请看本期关注。

量子精密测量技术——

捕捉万物最微小的“涟漪”

■赵林 李国亭



上图:应用 Tiqker 量子光学原子钟的 XV Excalibur 超大型无人潜航器。
左图:Tiqker 量子光学原子钟。
供图:阳明

突破传统测量精度极限

提到“测量”,想必大家并不陌生——用尺子量长度、用手表记时间、用温度计测体温,这些都是我们日常生活中常见的测量方式。

但如果想测出比尘埃还小若干个数量级的变化,捕捉到磁场、重力的微弱波动,我们该用什么来测量呢?

这就是我们今天要介绍的主角——量子精密测量技术。

量子精密测量技术是利用原子、光子等量子体系的相干叠加、量子纠缠等特性,实现高精度物理量感知与探测的先进技术。

它不借助任何宏观的机械零件,而是用微观世界的原子、光子、电子等当作“探针”,完成传统测量想都不敢想的高精度任务。

这些“探针”有着神奇的本事。

一方面,它们能同时处于多种状态。就像一枚被抛向空中快速旋转的硬币,它看起来像是同时显示着“正面”和“反面”——在硬币落地或被人抓住之前,你无法确切地说,它是哪一面朝上,哪一面朝下。粒子的“量子叠加”特性与之相似:一个粒子在没有被测量时,可以同时处于多种状态的“叠加”中,就像硬币同时拥有“自旋向上”和“自旋向下”两种可能。

另一方面,这些粒子还像心有灵犀的双胞胎,哪怕相隔很远,一个状态变化,另一个也会瞬间感知,这就是“量子纠缠”。

这两种特性正是实现量子精密测量的关键。利用“量子叠加”,单个微观粒子既能捕捉到多种信号,又能大幅提升测量的灵敏度;而“量子纠缠”能让多个微观粒子保持同步,哪怕受到外界微弱干扰,粒子也能通过粒子间的“联动反应”精准捕捉到干扰信号,抵消环境带来的测量误差。简单地说,“量子叠加”让测量“更高效”,“量子纠缠”让测量“更精准”,这就是量子精密测量技术的核心原理。

相较于传统测量手段,量子精密测量技术实现了许多突破性的进步。测量精度实现飞跃。例如,今年3

月,中国科学技术大学潘建伟团队在合肥发布新一代锶原子光晶格钟成果。依托超冷原子量子特性,这款量子时钟实现了极致精准计时,精度达到300亿年仅误差1秒。

抗干扰能力显著增强。应用量子精密测量技术的量子传感器采用无源工作模式,不向外辐射能量,也不依赖外部信号。因此,与传统测量技术相比,量子精密测量技术对各类干扰因素展现出异常强大的“免疫力”。2025年3月,中国电子技术标准化研究院牵头,联合多家科研院所开展国产冷原子量子惯性导航系统飞行试验。试验结果显示,在完全屏蔽GPS信号、强电磁干扰条件下,无人机能够持续飞行8小时,而最终定位误差仅0.8米。

应用场景不断拓展。量子精密测量技术应用广泛,在导航定位、地下勘探、时间测量、工业检测、医学检测等领域均有应用。2025年,中国五矿集团某团队深入辽宁鞍山陈台沟铁矿,借助量子重力仪系统精准捕捉千米深处岩石密度差异引发的微弱重力变化。让人惊喜的是,在依靠传统技术手段束手无策的深部区域,系统成功锁定一处千万吨级铁矿体,破解了找矿时“深度盲区”难题。

从“造尺子”到“用尺子量世界”

量子精密测量技术的发展,最早可以追溯到1955年。

这一年,英国国家物理实验室研制出了世界上第一台热铂束钟。这台钟不靠电池驱动,而是利用铂原子的量子特性来计时,真正实现了“用量子测时间”。它的出现,证明了将微观粒子的量子态用作测量所需的“尺子”和“探针”的可行性。

在此之前,人类对时间的计量主要依靠地球自转或机械摆动,测量精度极其有限。伴随热铂束钟的出现,人类掌握了利用微观粒子标定宏观物理量的能力,开启了人类利用量子力学基本原理进行精密传感和测量的先河。

不过,这一时期的量子设备都是十

分娇贵的实验室仪器,往往体积庞大、结构复杂,且大多只能在恒温恒湿的环境中运行,测量精度受到一定限制。

直到2010年,量子精密测量技术迎来了关键技术突破。

这一年,美国国家标准与技术研究院(NIST)研制出首台量子逻辑钟。这台逻辑钟刷新了当时的计时精度纪录,被认为是世界上最精确的时钟。后来,这项成果还被纳入NIST官方技术成果库,成为全球量子精密测量技术突破的重要标志。

在这一阶段,随着量子纠缠技术的成熟,量子精密测量进入了“多粒子协同”时代。

科学家们开始利用多个粒子之间的纠缠态,让粒子同时对微弱信号做出反应。同时,测量对象也从单一的时间频率,拓展到了重力、磁场、惯性等多个物理量,实现了从“单点突破”到“多维感知”的跨越,测量精度不断跃升。

不过,无论是世界上第一台热铂束钟的问世还是实验量子逻辑钟的出现,科研人员解决的问题都还集中在“造尺子”方面——提高量子精密测量技术的测量精度。

进入2015年以后,量子精密测量技术正式开始加速迈向实用化阶段,从“造尺子”逐步过渡到“用尺子量世界”。

与此同时,量子精密测量设备的形态也在逐渐趋向小型化、便捷化。早期的量子测量设备测量时,需要依靠庞大的真空系统和精密的激光冷却装置,经不起任何颠簸和干扰。

后期推出的量子测量设备体积大幅缩小,有的可以装入机载吊舱,还有一些芯片级的量子传感器,与之前相比体积甚至缩小了数百倍。

我国在量子精密测量技术领域起步较晚,但追赶速度极快。

2015年,中国科学技术大学杜江峰团队采用金刚石量子测量方法,成功测出了国际首张单蛋白质分子电子顺磁共振谱,看清了单个蛋白质分子内部的细微结构。这项成果不仅登上了国际顶级学术期刊《科学》,也让我国在量子微观探测领域跻身世界前列。

10年后,南方电网数字电网研究院股份有限公司牵头,联合中科院上海微系统所等20余家科研单位,攻关推出世界首台“±800千伏特高压直流量子电流”传感器并正式投运,这标志着量子

传感技术在我国电力领域取得重大技术突破。

捕捉万物最微小的“涟漪”,从热铂束钟、实验量子逻辑钟到量子传感器,量子精密测量技术不断发展,逐渐具备了进入各种复杂环境进行探测的能力,为导航定位、地下勘探、目标探测等实际应用提供了坚实的技术支撑。

精准感知环境,赋能未来战场

在复杂的战场环境下,传统测量手段测量时容易出现精度下降、信号中断等问题,难以满足实战需求。对此,世界多国军队纷纷把目光投向量子精密测量技术,利用其超高精度、强抗干扰性等特点,帮助武器平台精准导航、精准探测隐蔽目标、精准感知战场环境。

——地球的“CT扫描仪”。

利用量子精密测量技术进行地下探测时,科研人员只需把量子传感器部署在地面,就能精准捕捉地下物质的细微信号。这些搜集到的信号经过运算整理后,可以像拼图一样勾勒出地下地貌的真实模样。

2022年2月,由英国国家科研与创新署资助的“重力先锋”项目,完成世界首台非实验室条件下量子重力梯度仪的测试。该项目通过超冷原子捕捉地下微小重力异常,成功识别出地下的隐蔽隧道,为战场态势感知提供“地下维度”的关键信息。

——潜艇的“量子罗盘”。

由于卫星信号无法穿透深层海水,潜艇在水下航行时宛若人在黑暗中走路,很可能“越走越偏”。量子精密测量技术助力量子导航,有效破解了这一难题。2025年10月,英国皇家海军在XV Excalibur超大型无人潜航器上,成功完成Inleqtion公司Tiqker量子光学原子钟海试,验证了水下平台高精度量子授时与无源导航能力。

量子光学原子钟是实现量子导航的“心脏”,依托原子的特性实现超高精度授时,有效解决了传统导航误差持续累积、潜艇带上浮校准误差的难题,可显著提升水下作战平台的生存能力与行动隐蔽性。

——导弹的辅助“领航员”。

在辅助制导方面,量子精密测量技术可破解传统制导技术受电磁干扰、定位偏差大的难题,为巡航导弹、空地导弹等提供超高精度制导修正。2025年,美国国防高级研究计划局正式立项“鲁棒量子传感器”项目,该项目旨在把高精度的量子传感器部署在战斗机或导弹等高速机动平台上。该系统无需依赖卫星信号,就能在复杂环境下测算导弹的飞行姿态与位置。

除了以上应用外,量子精密测量技术还在水下目标探测、隐形目标探测、核活动监测、战场环境感知等方面具有较大应用。

量子精密测量技术在军事领域应用优势突出,但也存在诸多短板,如技术研发门槛极高,对科研实力、核心器件研发能力要求严苛;设备研发、生产及维护成本远超传统测量设备;在极端环境下的稳定性、耐久性仍需进一步实战验证等。

未来,量子精密测量技术或将持续向小型化、集成化、智能化迭代,加速从实验室走向战场。世界主要国家或将不断加大对相关技术设备的研发投入、抢占标准制定主导权,强化核心技术保密与安全防护等。可以预见,将来量子精密测量技术会深刻影响新域新质作战能力生成,成为智能化战争新中的焦点。

热点追踪

近期,工业和信息化部在发布会上明确表示,将支持开展太空算力技术前瞻性研究,有序推动相关产业发展。

当人工智能浪潮奔涌向前,地面算力遭遇能源、空间等多重制约,在此背景下,向太空拓展算力新空间,正逐渐成为大国科技竞争的前沿赛道。2025年5月14日,我国之江实验室与国星宇航成功发射“三体计算星座”,一次性将12颗计算卫星送入轨道,建成国内首个整轨互联、组网运行的太空算力集群,标志着中国太空计算从单星验证迈向组网运行的新阶段。

那么,究竟何为太空算力?未来,太空算力会给社会生活带来哪些改变?

简单来说,太空算力就是依托航天技术,在卫星、空间站等天基平台上计算、存储和智能分析的能力。过去,卫星的作用仅仅是采集数据,所有分析、运算、处理工作都必须传回地面机房完成。

如今,太空算力相当于把地面的数据中心、AI计算能力直接搬到卫星上,让卫星实现数据采集、处理、存储、输出全流程自主运行,彻底改变了天上采集、地面处理的传统模式。

把算力“种进”太空,不再是遥远的科幻概念,而是人工智能技术发展的刚需。如今,各国科研工作者正将算力的种子,一颗一颗种进太空。

——告别高能耗,打造绿色低碳算力。随着人工智能的爆发式增长,算力需求持续高涨,地面数据中心成为用电大户。以我国为例,数据显示,2022年到2025年,我国地面数据中心用电量从1300亿千瓦时增长至1960亿千瓦时,用电占比从1.5%升至1.9%。按照这个发展趋势,到2030年,地面数据中心用电量将突破7000亿千瓦时,占全社会用电量5%以上。

地面数据中心不仅运算时耗电量惊人,设备散热、机房运维也会消耗大量电力,成本高昂且碳排放巨大。而太空中拥有取之不尽的太阳能清洁能源,加上太空中天然的低温环境,可以大幅降低算力散热能耗,实现绿色低碳算力供给。

——破解传输拥堵,盘活海量太空数据。在轨卫星每天产生海量数据,以往卫星只负责采集数据,再把数据交由地面处理。但受限于星地通信带宽,这些数据中很多都无法实时传回地面。利用太空算力,卫星可以在轨直接筛选、整理、分析数据,只把有用的结果传回地面。这样一来,带宽消耗直接降低90%以上,极大盘活了太空数据资源。

——压缩响应时长,提升应急处置能力。传统卫星数据处理流程繁琐,需要经过卫星采集、数据回传、地面运算、结果推送多个环节,全程耗时从几十分钟到数小时不等。在应急救援、海洋监测、边境管控等场景里,几小时的延迟足以让工作人员错失最佳处置时机。依托太空算力技术,所有数据运算均可在轨完成,省去数据往返传输的复杂步骤,实现秒级响应,为各类应急处置、实时监测场景抢出宝贵时间,提升全域安全保障能力。

——筑牢空天防线,守护国家战略安全。以往,我国卫星数据依赖地面处理、通用信道传输,存在数据泄露、信号干扰等多重安全隐患。搭建自主可控的太空算力体系,可实现数据在轨处理、就地加密、全程可控,彻底摆脱外部技术依赖,筑牢空天数据安全防线。从战略维度看,太空轨道与通信频谱作为稀缺资源,遵循“先到先得”的国际规则。尽早布局太空算力,既能打破国外产业垄断、补齐基础

相关链接

“三体计算星座”

“三体计算星座”是由我国之江实验室协同全球合作伙伴共同打造的千星规模太空计算基础设施,是全球首个实现整轨互联的太空计算星座。该项目名称源自牛顿提出的“三体问题”,隐喻多对象协同的复杂关系。

该项目秉持“计算上天、星间互联、模型上天”三大核心理念:将算力直接部署到卫星上,通过星间激光链路实现卫星互联互通,并借助AI模型实现系统数据在轨动态更新,彻底改变了传统卫星“天感地算”的数据处理模式。

2025年5月14日,12颗计算卫星在

把算力“种进”太空

■黄嫣艳 江冉

设施短板,更能抢占空天科技战略高地,全面提升我国在全球空天领域的竞争力。

当前,全球太空算力格局呈现多极竞争态势,各国依托自身技术积累与产业优势,走出差异化的发展路径。

美国凭借深厚的商业航天基础与AI技术积淀,成为全球太空算力技术创新的策源地;SpaceX依托星链构建分布式太空算力网络,形成算力集群;英伟达推出专为太空极端环境研发的Vera Rubin算力模块,支撑在轨AI处理需求;美国军方将太空算力纳入国防智能化体系,着力打造天基作战算力中枢。欧盟推进太空数据中心建设,聚焦发展太空数据安全和在轨存储技术。俄罗斯升级“球体”卫星星座算力,强化其国土监测与国防应用能力。日本聚焦地球观测数据的在轨处理,深耕防灾减灾、环境监测等场景。

在太空算力部署方面,中国正走出一条具有鲜明特色的发展之路。我国依托完整的航天产业链与数字产业基础,初步构建起天地一体、全域覆盖、智能高效的算力新生态,在工程实践与商业落地速度上已走在世界前列,成为全球少数实现太空计算星座在轨组网运行的国家之一,整体发展势头良好。

展望未来,太空算力或将在3~5年内迎来规模化落地拐点。天地一体的算力网络,未来或将广泛赋能生态治理、智慧城市、应急保障、气象预测、智能国防等诸多领域。

下图:通过卫星组网搭建的覆盖全球的大空算力互联体系示意图。

资料图片



(江冉整理)