

先进制造与新材料动态

ADVANCED MANUFACTURING AND MATERIALS NEWSLETTER

监测快报

2025 第9期
(总第463期)

本期要目

- 欧先进制造计量网络发布首个战略研究议程
- 欧芯片法案取得一系列新进展
- 英 UKRI 支持半导体硬件可行性研究
- 英 DSIT 发布半导体劳动力研究报告
- 兼具高强度和柔韧性的超材料

中国科学院武汉文献情报中心

目 录

战略规划

欧先进制造计量网络发布首个战略研究议程 1

项目资助

欧芯片法案取得一系列新进展 4

美优化关键矿产项目审批流程 5

英 UKRI 支持半导体硬件可行性研究 5

英启用欧首个半导体设施并推出相关技能计划 6

行业观察

英 DSIT 发布半导体劳动力研究报告 7

研究进展

法国学者开发出有机硅废料回收普适工艺 8

兼具高强度和柔韧性的超材料 9

具有拓扑绝缘晶格网络的高效热电材料 10

可预测化学反应过渡态的新机器学习模型 11

用于测试堆叠微电子器件冷却方案的新型芯片 12

C₆₀ 基离子盐界面强化技术实现高效能-长寿命协同突破 12

NIST-F4: 全球时间校准新突破 13

欧先进制造计量网络发布首个战略研究议程

4 月，“欧洲先进制造计量网络”（European Metrology Network for Advanced Manufacturing）发布首个战略研究议程，旨在明确先进制造领域的计量研究方向，推动欧洲先进制造业创新发展。该议程由欧洲先进制造计量网络成员与利益相关方共同制定，依据联合国可持续发展目标和欧洲绿色协议等政策，对计量研究需求进行了系统分析，未来将根据研究成果和新需求定期更新¹。

该议程指出，先进制造是欧洲经济的关键支柱，涉及 20 多个工业部门，在就业、经济增长和创新方面发挥着重要作用，且对实现联合国可持续发展目标意义重大。当前，先进制造正从“工业 4.0”向“工业 5.0”过渡，短期趋势包括数字化、自动化推进及个性化生产发展，长期趋势聚焦循环经济和“熄灯工厂”模式。计量是先进制造的核心支撑，可保障产品质量、提高生产效率并促进可持续发展。通过实时监测和反馈，计量能助力实现“零缺陷、零延迟、零意外、零浪费、零风险”的制造目标，推动先进制造技术的落地应用。该议程依照跨领域主题的结构，对以下八个关键行业领域的先进制造计量挑战和机遇进行了总结。

（1）智能产品设计 在维修、再利用、回收及高效可制造性设计等方面面临挑战，为推动循环经济发展，亟待解决长期服役后、维修过程中及回收场景下的材料性能相关的计量学问题。计量学在智能产品设计中蕴含巨大潜力，通过将制造全链条与产品全生命周期中的计量知识深度融合至产品设计流程中，实现制造链工艺步骤的动态调整，充分利用材料性能数据、过程及离线质量检测数据，以及覆盖产品全生命周期的性能指标数据，为多样化应用场景提供精准支撑。

（2）先进材料 在充分利用多种技术表征方法、开发具有更高复

¹ Advanced Manufacturing network publishes first Strategic Research Agenda.
<https://www.euramet.org/publications-media-centre/news/news/advanced-manufacturing-network-publishes-first-strategic-research-agenda>

杂性的合适参考材料、模拟真实条件下材料的可靠测量等方面均面临挑战。此外，涉及基于模型的数据融合方法，以及混合计量学、多尺度虚拟测试和材料信息学中计算机模拟模型的验证等计量学问题，也都亟待攻克。从计量学的应用前景来看，有望开发并表征出更具现实意义的方法，用于评估材料的质量、可靠性和安全性，这些方法将在复杂多变的环境中发挥重要作用，为先进材料的研究、生产和应用提供有力支持。

（3）智能制造与装备 要实现缺陷的 100%在线检测及精准的在机（on-machine）计量并非易事。计量学问题还包括研发具备足够检测灵敏度的高速非接触式传感器、能在恶劣制造环境中运行的在机传感器，以及统一计量数据格式的方法，从而实现企业内部及整个供应链中各系统的实时无缝对接。为了能够顺利采用“工业 4.0”和“工业 5.0”等变革性技术，必须以合理可控的成本来解决上述问题。计量学的应用机遇包括开发在使用点实现计量子系统直接溯源的先进技术，以及通过数字化的国际单位制将计量系统与相关标准有机连接的创新技术。

（4）质量控制与测试 在深入推进虚拟计量学概念的广泛应用，以及有效开展分布式测试方面，存在显著困难。从计量学角度出发，有关“校准”模型的精确应用，以及借助分布式在线测试手段，对制造链中的产品群体实施近 100%的全面检测等问题，都亟待解决。计量学的应用可促使测量仪器在精准输出测量数值的同时，提供可靠的测量不确定度信息，从而显著提升测量结果的科学性与可靠性。

（5）计量数字化与垂直整合 集成传感器与机器网络的实时通信和同步、测量数据分析软件的验证以及工业质量控制中完全数字化的工艺流程等方面面临挑战。需要解决的计量学问题包括：基于从整个制造链收集的计量数据实现自适应生产过程；打造用于预测控制的参考数据集；通过数字校准证书，在质量保证环节实现计量数据的开发与全面整合。只有解决这些问题，才能在柔性制造基础设施中充分运用数字化和人工智能等具有范式转变意义的前沿技术，推动制造业向智能化、高

效化方向迈进。

（6）法规与标准化 在纳米和微系统的接口技术研发以及安全标准制定方面存在困难。从计量学的角度来看，数字校准证书的规范使用以及计量数据的真实性验证等问题急需得到妥善解决，如此方能采用变革性方法实现对可追溯性的本地化处理，最大程度地减少甚至完全摒弃校准操作。计量学的应用契机包括基于常数的国际单位制、芯片实验室技术，以及对先进材料性能、可靠性和安全评估开展大量前置规范研究的迫切需求。

（7）健康与安全、环境和可持续发展 在复杂介质或生物环境中对材料进行精准表征，以及科学评估材料的可回收性与再利用潜力，均存在较大挑战。此外，如何制定有效的计量学策略，以系统评估先进材料对健康、安全和生态环境的影响，也是亟待解决的关键问题。计量学的应用机遇包括评估用于衡量材料（包括关键矿物）可回收性和再利用性的关键测量参数，以及开发支持可持续制造流程的测量方法。在新制造方法和系统的研发过程中，计量学能够为潜在风险的精准识别与量化分析提供重要支撑，助力实现生产过程的安全、环保与可持续发展。

（8）知识转移与可及性 亟需解决国家计量机构和指定机构校准服务信息更新滞后的问题，完善计量学专业培训体系，并构建先进制造相关研究成果的高效获取渠道。随着科研成果的不断涌现，开发一套能够系统分析海量研究产出及其质量指标的工具，将有助于全面梳理和总结计量学在先进制造领域的研究动态，从而为该领域的发展趋势研判和战略方向规划提供坚实依据，助力先进制造计量学研究迈向更高水平。

（吴文涛）

欧芯片法案取得一系列新进展

《欧洲芯片法案》是欧盟的重要战略计划，旨在增强欧洲的半导体设计和生产能力。自 2023 年 9 月 21 日生效以来，《欧洲芯片法案》取得了重大进展，确保欧洲能够满足其半导体需求²。

（1）支柱 I: 欧洲芯片倡议 已落实超 85% 的预算，推动研究成果转化。芯片联合组织正在为五条试点生产线提供总计 37 亿欧元的欧洲和国家资金支持。所有成员国和挪威都已或即将在其领土内建立能力中心，助力企业发展半导体解决方案。中小企业和初创企业可在今年年底前申请使用设计平台。另外，六项前沿项目入选欧盟 2 亿欧元量子芯片投资的一部分，将加速量子应用（如计算、通信和传感）方面的突破。欧洲创新理事会和选定的合作伙伴已通过芯片基金为半导体初创企业提供股权支持。

（2）支柱 II: 供应安全和韧性 《欧洲芯片法案》已促成超 800 亿欧元的芯片制造能力投资，以提升欧盟市场的竞争力。欧盟委员会批准了七项开创性的国家援助决定，公共和私人投资总额逾 315 亿欧元。此外，欧盟委员会还批准了一项“欧洲共同利益重要项目”，支持微电子和通信技术的研究、创新和在整个价值链中的首次工业部署，项目总投资额超 210 亿欧元。“综合生产设施”和“开放欧盟晶圆厂”的相关决定也即将出台，另有多个项目正在推进中。

（3）支柱 III: 监测和危机应对 欧洲半导体委员会积极统筹协调，推动成员国识别“关键市场参与者”，同时也对欧洲半导体供应链相关的经济安全要素进行了评估。通过分析欧盟在全球半导体领域的地位，供应链监测工作取得重要进展，有助于更好应对供应链风险。

（吴文涛）

² European Chips Act – Update on the latest milestones.
<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/european-chips-act-update-latest-milestones>

美优化关键矿产项目审批流程

4 月 18 日，美国联邦许可改进指导委员会（Federal Permitting Improvement Steering Council）宣布，将加强对密歇根钾盐项目与西南阿肯色项目等两个关键矿产项目的联邦审批流程透明度与问责机制，并纳入联邦审批追踪平台，确保项目在更高透明度、清晰时间表、高效审核流程及必要支持下顺利推进，以强化本土供应链、驱动经济增长，降低对外依存度，意图构建更安全、经济、可靠的能源体系，以实现美国能源的主导地位³。

（1）密歇根钾盐项目

获美国能源部贷款项目办公室支持，拟通过机械蒸汽再压缩技术与地下卤水地热能源，打造全美最大规模的高品质钾肥及食品级盐生产基地。项目投产后将减少钾肥进口依赖、保障农民利益、强化粮食安全。能源部已于 2025 年 1 月宣布对该项目提供最高 12.6 亿美元贷款担保的附条件承诺。

（2）西南阿肯色项目

由能源部制造业和能源供应链办公室推动，致力于建设世界级直接锂提取设施，利用北美富锂卤水资源生产电池级碳酸锂。项目投运后将夯实本土锂供应链。这两个能源部支持的项目建成后，将助力兑现特朗普总统关于提升美国丰富矿产资源本土化生产、创造更多就业岗位以及降低对外供应链依赖的承诺。

（黄 健）

英 UKRI 支持半导体硬件可行性研究

英国研究与创新署（UKRI）宣布，将从 UKRI 技术使命基金中拨出 500 万英镑，用于支持半导体硬件可行性研究项目的创新探索，挖掘具有推动半导体硬件创新潜力的前沿理念，以增强英国在关键科技领域的

³ ICYMI: Trump Administration Adds Two DOE Critical Minerals Projects to Federal Permitting Dashboard.
<https://www.energy.gov/articles/icymi-trump-administration-adds-two-doe-critical-minerals-projects-federal-permitting>

全球竞争力⁴。

本次资助聚焦技术包括但不限于以下方向：新型半导体材料/器件设计、半导体制造技术创新、生产设备研发突破、多技术融合与接口开发、新型封装材料与工艺、先进封装解决方案、热管理系统优化、前端工艺创新、后端工艺优化、在线/终测技术研发、工艺设计套件开发等。

申请方案需全面论证硬件设计或制造技术升级的可行性，并证明其能显著提升英国企业在关键科技领域竞争力。方案需包含技术和商业可行性分析，识别潜在市场推广障碍及机遇。单个项目资助金额为 7.5 万至 30 万英镑不等，项目周期不超过 6 个月，全部研发活动须在英国境内完成，研究成果须在英国本土实现产业化应用。

（黄 健）

英启用欧首个半导体设施并推出相关技能计划

4 月 30 日，英国宣布在南安普顿大学启用了一个新的电子束光刻设施。该设施是欧洲首个、全球第二个此类设施，主要用于在芯片上创建极小的图案，以推动人工智能和医疗技术等领域的发展。同时，英国政府拨款 475 万英镑推出半导体技能计划，旨在加强人才储备，填补技能缺口⁵。

此次资助措施包括：提供 300 万英镑的本科奖学金，资助 300 名学习电子和电气工程的学生；投入 120 万英镑用于芯片设计培训，开设新的芯片设计课程；拨款近 55 万英镑开展学校外联活动，为 7000 名 15 至 18 岁的学生和 450 名教师提供半导体实践经验。

（蒿巧利）

⁴ Developing Semiconductor Hardware For Critical Technologies.
<https://apply-for-innovation-funding.service.gov.uk/competition/2165/overview/a3740891-940f-449b-89c2-6bb5fdb80af>

⁵ European-first semiconductor facility launches in Southampton.
<https://www.gov.uk/government/news/european-first-semiconductor-facility-launches-in-southampton>

英 DSIT 发布半导体劳动力研究报告

4 月，英国科学、创新和技术部（DSIT）委托编制的《英国半导体劳动力研究报告》（*Semiconductor Workforce Research Report*）揭示了英国半导体行业面临的挑战，深入分析了半导体行业的劳动力现状。报告指出，人才短缺、技能断层和国际竞争加剧等问题都给英国扩大产业规模和高价值领域的竞争带来了风险。因此，报告呼吁政府、企业和学术界协同应对⁶。

（1）英国半导体行业现状

目前，英国半导体行业拥有约 27000 名劳动力，其中 69% 活跃在技术岗位。约 71% 的劳动力为英国本土人员。在技术岗位中，设计相关职位占据主导地位，占比达 64%，集成电路设计、软件开发和研发等领域尤为突出。从地域分布来看，半导体业务在伦敦、威尔士南部、苏格兰和北爱尔兰等地形成了产业集群。然而，报告也指出，预计 39% 的劳动力将在未来 15 年内退休，这对技能传承和继任规划构成了重大挑战。

（2）教育与渠道挑战

每年，英国预计有 870 名高等教育毕业生进入半导体行业，其中约 50% 来自电气和电子工程专业。但从长期来看，国际学生的留英情况仍不明朗，引发了对行业可持续性的担忧。此外，业界普遍认为当前大学课程与行业需求存在不匹配问题，学位学徒制和职业发展路径也未得到充分利用，缺乏针对半导体行业的专门框架。

（3）行业建议

报告强调，英国必须果断采取行动，打造一支具备韧性且能够适应未来的半导体劳动力，队伍为整个技术生态系统的增长提供坚实支撑。主要的干预措施包括：①提高半导体行业在电气和电子工程毕业生中的

⁶ UK Semiconductor workforce study: executive summary.
<https://www.gov.uk/government/publications/uk-semiconductor-workforce-study/uk-semiconductor-workforce-study-executive-summary>

知名度和吸引力，并提供短期转换课程，使其能够通过相关课程（如物理学、材料科学和软件工程）进入该领域；②通过针对性的教育奖学金和助学金等举措，吸引更多年轻人选择半导体行业；③通过学徒制和技术培训计划，吸引更多人才进入行业；④建立和推广共同的职业发展机会，明确技术管理和职业发展路径，提高早期专业人士的留存率。

（董金鑫）

研究进展

法国学者开发出有机硅废料回收普适工艺

受限于热力学条件和复杂的反应体系，有机硅中间体氯硅烷等的回收方法效率低、应用范围窄。法国国家科研中心 Vincent Monteil、Jean Raynaud 团队开发出一种普适性回收工艺，可将各种废旧有机硅材料通过化学方式回收得到氯硅烷⁷。

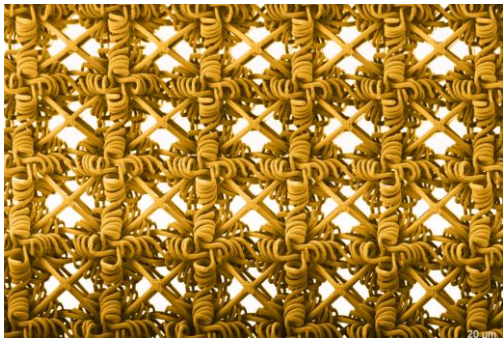
研究人员以 BCl_3 为氯源， GaCl_3 为催化剂，在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 下反应 30 分钟。该方法适用于多种端基不同的硅油，能够高效回收获得（甲基）氯硅烷，产率达到 90% 以上。同时，该研究工作规避了传统工艺高能耗、温室气体排放等问题。

上述研究工作发表在 *Science*（文章标题: Gallium-catalyzed recycling of silicone waste with boron trichloride to yield key chlorosilanes）。

（尹 伟）

⁷ A new recycling process for silicones could greatly reduce the sector's environmental impacts.
<https://www.cnrs.fr/en/press/new-recycling-process-silicones-could-greatly-reduce-sectors-environmental-impacts>

兼具高强度和柔韧性的超材料



具有独特双网络结构的超材料

传统超材料的设计注重强度和刚性，但往往牺牲了柔韧性，限制了实际应用范围。美国麻省理工学院 Carlos M. Portela 领导的研究团队通过结合坚硬的微观立柱结构和柔软的编织架构，创造出了一种独特的双网络结构，成功打印出一种新型合成超材料，兼具高强度和柔韧性，为开发抗撕裂纺织品或柔性半导体等应用提供了新思路⁸。

研究团队从兼具柔软性、弹性和高韧性的水凝胶制造方法中获得灵感，通过巧妙的双网络微结构设计，成功将原本刚性和脆性十足的材料转化为既强韧又具延展性的超材料。这种双网络结构的关键在于两部分的结合：一是传统的刚性晶格结构，由坚硬的立柱和横梁组成；二是环绕其间的柔软螺旋状编织层。两种架构均采用聚甲基丙烯酸甲酯制成，并通过高精度激光打印技术：双光子光刻术一体成型。这种设计使得材料在受力时，刚性部分提供支撑，而柔软的编织层吸收并分散应力。

研究团队对新开发的超材料进行了拉伸测试。该材料可拉伸至原长度的四倍，且不会完全断裂。相比传统晶格结构材料，其拉伸性能提高了 10 倍。在引入微小“缺陷”（如孔洞）后，材料的延展性和抗撕裂能力进一步提升。

上述研究工作发表在 *Nature Materials*（文章标题：Double-network-inspired mechanical metamaterials）。

（冯瑞华）

⁸ MIT engineers print synthetic “metamaterials” that are both strong and stretchy.
<https://news.mit.edu/2025/mit-engineers-print-synthetic-metamaterials-strong-and-stretchy-0423>

具有拓扑绝缘晶格网络的高效热电材料

热电材料可以直接将热能转化为电能，在物联网领域独具吸引力，例如可用于微传感器等小型电子元件的自主供电。为了提高材料效率，一方面必须抑制晶格振动传递热量，另一方面要增加载流子的迁移率。奥地利维也纳工业大学 Fabian Garmroudi 领导的国际研究团队成功研发出一种新型高效热电材料，性能可与最先进的材料媲美，具有更高的稳定性和更低的成本⁹。

该高效热电材料是一种杂化材料，通过将铁、钒、钽和铝合金粉末 ($\text{Fe}_2\text{V}_{0.95}\text{Ta}_{0.1}\text{Al}_{0.95}$) 与铋和锑粉末 ($\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}$) 进行混合，并在高温高压下压制成致密材料，从而获得新的特性。然而，由于两种粉末材料的化学和机械性质不同，其组分不会在原子水平上混合。相反，BiSb 材料会优先沉积在 FeVTaAl 合金晶粒之间的微米级界面上。由于两种材料的晶格结构差异较大，热振动不能简单地从一个晶体转移到另一个晶体，因而热量会在界面处受到强烈抑制。同时，由于电子结构相似，载流子的运动不受阻碍，并且沿界面显著加速。原因是 BiSb 材料形成拓扑绝缘体相，在内部是绝缘体，但在表面可以实现几乎无损耗的电荷传输。这种有针对性的热电分离使材料的效率提高超过 100%。因此，该热电材料既能减少晶格振动的相干性，又能增加载流子的迁移率。

上述研究工作发表在 *Nature Communications* (文章标题: Decoupled charge and heat transport in Fe_2VAl composite thermoelectrics with topological-insulating grain boundary networks)。

(冯瑞华)

⁹ New hybrid materials as efficient thermoelectrics.

<https://www.tuwien.at/en/tu-wien/news/news-articles/news/neue-hybridmaterialien-als-effiziente-thermoelektrika>

可预测化学反应过渡态的新机器学习模型

过渡态作为化学反应的瞬态结构，对于理解反应机制和设计开发高效催化剂至关重要，但在实验中难以捕获。目前用于预测化学反应过渡态和路径的方法不仅复杂，而且需要强大的计算能力。美国麻省理工学院、佐治亚理工学院、康奈尔大学联合开发出名为 **React-OT** 的机器学习模型，能够在不到一秒的时间内准确预测化学反应过渡态¹⁰。

研究团队曾在 2023 年提出了一种基于机器学习的策略，能够比传统方法更快地预测过渡态。然而，该模型仍需生成约 40 种结构并通过置信度模型（**confidence model**）筛选候选状态，效率有待提高。新开发的 **React-OT** 模型采用线性插值（**linear interpolation**）技术，通过将反应物和产物的原子位置各移动一半来估算初始过渡态结构，大幅减少了计算步骤。**React-OT** 生成的过渡态结构具有高度准确性，均方根偏差中位数为 0.053 Å，势垒高度误差中位数为 1.06 kcal mol⁻¹。与前一版本相比，新模型只需约五步即可完成预测，耗时仅 0.4 秒，准确率提升了 25%。

该模型基于一个包含 9000 种不同化学反应的数据集进行训练，涵盖有机和无机小分子的反应。测试表明，该模型在未参与训练的新反应上表现良好，并能够处理涉及较大分子或复杂结构的反应。未来，研究团队计划扩展模型能力，使其能预测含硫、磷等元素的分子之间的过渡态。这一突破不仅加速了化学反应机理的研究进程，也显著降低了高性能计算的需求，为计算化学领域带来了重要启示。

上述研究工作发表在 *Nature Machine Intelligence*（文章标题：**Optimal transport for generating transition states in chemical reactions**）。

（冯瑞华）

¹⁰ New model predicts a chemical reaction's point of no return.
<https://news.mit.edu/2025/new-model-predicts-chemical-reactions-no-return-point-0423>

用于测试堆叠微电子器件冷却方案的新型芯片

随着对高性能、高效率微电子系统需求的增长，3D 集成技术成为行业发展方向。3D 集成技术通过芯片堆叠，可将高性能处理器与其他专业芯片紧密封装，但芯片堆栈的过热问题是全球技术人员面临的重大挑战。

美国麻省理工学院林肯实验室 Ryan Keech 和 Chenson Chen 研究团队开发了一种专用芯片，用于测试和验证封装芯片堆栈的冷却解决方案，将有助于探索有效集成堆叠架构的方法，推动微电子技术的发展¹¹。

该芯片具备产生热量和感应温度两大功能。一方面，为了模拟高性能逻辑芯片在实际运行中的发热情况，芯片内部设计了高功率密度电路。该电路精准复刻了真实芯片的电路布局，能够产生与真实芯片相似的发热状况，从而为测试冷却解决方案提供更贴合实际的热源条件，确保测试结果的可靠性和有效性。另一方面，芯片利用了类似“微型温度计”的二极管作为温度传感元件，当温度改变时，二极管的电流-电压比相应变化，通过对这种变化的精确测量和分析，可快速、精准获取芯片各个位置的温度信息，为评估冷却技术的降温效果提供关键的温度数据支持。

（吴文涛）

C₆₀ 基离子盐界面强化技术实现高效能-长寿命协同突破

当前钙钛矿太阳能电池因层间界面稳定性不足导致性能快速衰减，制约了产业化应用进程。英国纽卡斯尔大学 Marina Freitag 领导的国际团队开发出一种由 C₆₀ 衍生的离子盐界面材料，通过分子工程强化电子传输层连接，实现高效能-长寿命协同突破，为光伏组件商业化提供关键技术支撑¹²。

研究团队基于 C₆₀ 分子设计新型碳基离子盐（CPMAC），采用溶液法制备电子传输层界面强化材料。通过离子键替代传统范德华力作用，

¹¹ New chip tests cooling solutions for stacked microelectronics.

<https://news.mit.edu/2025/new-chip-tests-cooling-solutions-stacked-microelectronics-0428>

¹² Newcastle scientists part of global team for solar energy breakthrough.

<https://www.ncl.ac.uk/press/articles/latest/2025/04/cpmacsolarenergy/>

界面机械强度显著提升。实验室级器件实现 26%功率转换效率，在 65 °C 下经 2100 小时连续运行后性能衰减小于 2%，放大模块在保持 23%效率的同时验证了工艺可扩展性。

上述研究工作发表在 *Science*（文章标题：C₆₀-based ionic salt electron shuttle for high-performance inverted perovskite solar modules）。

（董金鑫）

NIST-F4：全球时间校准新突破

自 1967 年铯原子的特定频率被用于定义秒以来，铯原子喷泉钟一直是时间测量的高精度工具。美国国家标准与技术研究院（NIST）Vladislav Gerginov 团队新开发出 NIST-F4 铯原子喷泉钟，其频率测量准确度高达 2.2×10^{-16} 。目前，NIST-F4 已提交至国际计量局（BIPM），作为全球主要频率标准之一，使全球时间测量更加稳定和安全。同时，NIST-F4 还有助于保持美国官方时间，对电信和运输系统、金融交易平台、数据中心运行等至关重要¹³。

NIST-F4 采用“喷泉”设计，通过激光将数千个铯原子冷却至接近绝对零度。然后抛射向上，原子在上升和下降过程中两次穿过充满微波辐射的腔室。第一次微波使原子进入铯共振频率的量子态，第二次微波与原子的相互作用用于校准微波频率。与 20 世纪 90 年代后期制造的 NIST-F1 相比，团队对测量铯原子的微波腔（时钟的核心）进行了重建，并添加和微调了新的电加热线圈、磁线圈、光学元件和微波元件。NIST-F4 计时精度极高，如果从 1 亿年前开始计时，至今误差不足 1 秒。

上述研究工作发表在 *Metrologia*（文章标题：Accuracy evaluation of primary frequency standard NIST-F4）。

（蒿巧利）

¹³ New Atomic Fountain Clock Joins Elite Group That Keeps the World on Time.
<https://www.nist.gov/news-events/news/2025/04/new-atomic-fountain-clock-joins-elite-group-keeps-world-time>

中国科学院武汉文献情报中心

先进制造与新材料情报研究



微信扫一扫，关注我们

编辑：中国科学院武汉文献情报中心战略情报部

地址：湖北省武汉市武昌区小洪山西 25 号

电话：027-8719 9180

传真：027-8719 9202

邮箱：[amto at whlib.ac.cn](mailto:amto@whlib.ac.cn)