

R 瞰前沿·@科学家

超导：让电流“零阻力”奔跑的奇迹

薛其坤

邀你@科学家 你好奇科学将如何改变生活吗？你对哪些科学问题感兴趣？本版今起开设“瞰前沿·@科学家”栏目，欢迎广大读者打开脑洞、敞开提问，我们将邀请科学家回答，一起探索科技新知。
来稿邮箱：rmbwhb@peopledaily.cn

网友：最近看到一则新闻：国际热核聚变实验堆组织宣布已完成世界最大、最强的脉冲超导电磁体系统的全部组件建造，其中直径9至25米的超导磁环由中国参与制造。我对“超导磁环”很好奇，能否讲讲超导的原理是什么、有哪些应用？

编辑：这是一个很好的问题。超导，一种能让电流“零阻力”奔跑的“魔法材料”，正悄然塑造未来图景。可控核聚变、磁悬浮列车、量子计算机……探索前沿的阵地上，超导的身影无处不在。本期我们邀请到中国科学院院士、南方科技大学校长薛其坤，请他带我们走进超导的“神奇世界”。

从点亮灯泡到驱动高铁，电流的顺畅流动是社会生活的命脉。然而，铜、铝等传统导电材料总伴随着能量损耗，就像水管中的水流遭遇摩擦阻力。有没有一种材料能让电流“零阻力”奔跑？

答案是超导材料——这个凝聚人类百年智慧的科学奇迹，正在重塑能源与科技的版图。

我们为什么需要超导

导电性是材料传输电流的能力，材料的电阻小，材料的导电能力就强，反之亦然。铜、银和铝等金属因内部自由电子活跃，成为电线、芯片生产的主要材料。但即便导电性最好的银，电阻也并非为零。电流流过时，由于电阻的存在，部分电能会以热量的形式耗散。据统计，全球每年因输电损耗的电量高达总发电量的5%—10%。

随着算力需求爆炸式增长，电力需求也逐步攀升，数据中心、超算中心的芯片发热已成为技术瓶颈。例如，传统半导体芯片中，约40%的电能转化为热量，既浪费能源，又需庞大的散热系统。如何把这部分能量节省下来？超导技术是答案之一。

1911年，荷兰物理学家卡末林昂内斯发现，汞在零下269摄氏度时，电阻突然消失，电流可永续流动而不衰减，他将这一现象命名为“超导电性”。超导体的零电阻特性，如同为电子铺设了一条无摩擦的“高速公路”。

这一特性已悄然改变生活。医院中的核磁共振成像仪就是经典案例：其核心的超导线圈通电后产生强磁场，用于人体成像。若用普通铜线圈，不仅耗电量巨大，还需要持续供电制冷来抵消电阻发热，而超导线圈一旦通电，可永久维持磁场，能耗近乎为零。

更宏大的应用已经落地。广东深圳平安大厦于2021年启用了自主研发的三相同轴高温超导电缆，这是世界上首次将超导电缆应用于超大型城市中心区。这条电缆在零下196摄氏度的液氮保护环境下工作，电流承载量是同等粗细铜缆的5倍，输电损耗降低约80%。未来，城市电网若全面改用超导电缆，输电效率将跃升，停电事故或将大大减少。

图①：常压下镍基高温超导电性科研成果示意图。
南方科技大学供图
图②：薛其坤（中）与研发团队在实验室进行高温超导研究。
王璇摄
图③：部分超导科学原理及应用示意图。段乐晴供图

超导会如何影响人类生活？

王亚伟

R 趣科普

想象一下，未来超导可能如何影响人类生活？

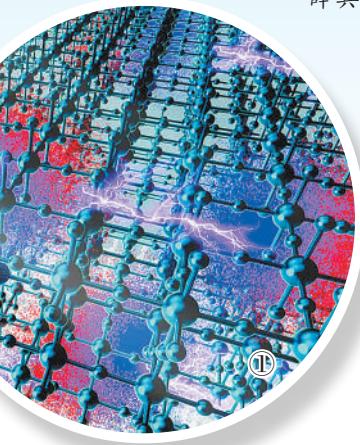
晨光中，城市道路行驶的汽车，正通过地下的超导无线充电设备实时补能。

搭载超导推进系统的电动飞机掠过江面，向远处飞去。

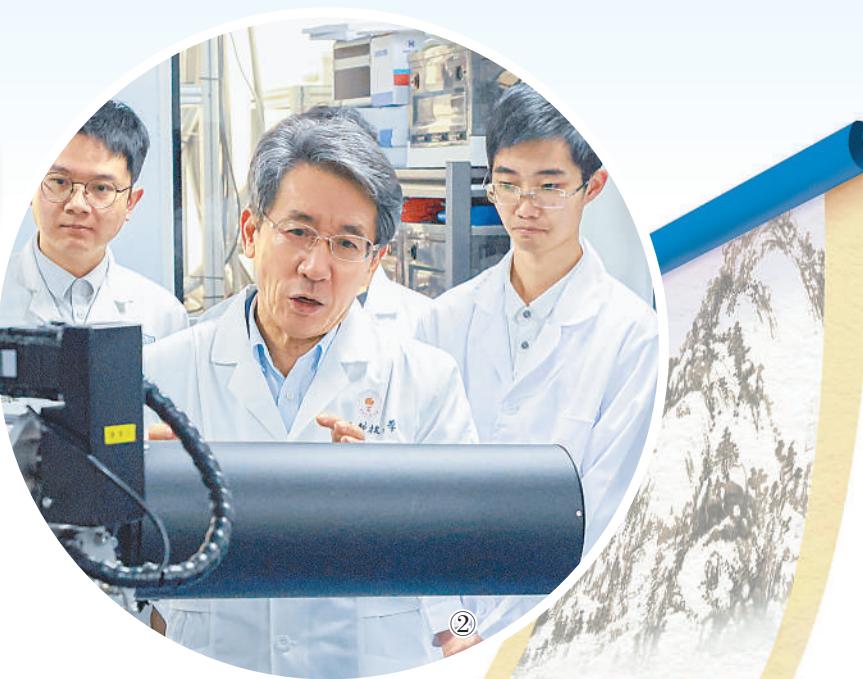
超导磁悬浮列车以时速1000公里平稳行驶，北京至上海只需一个多小时。

列车驶出隧道，从车窗外看去，塔克拉玛干沙漠的超级农田尽收眼底，悬浮在上空的聚变光球，源源不断地为作物提供能量，昔日荒漠变成绿色粮仓……

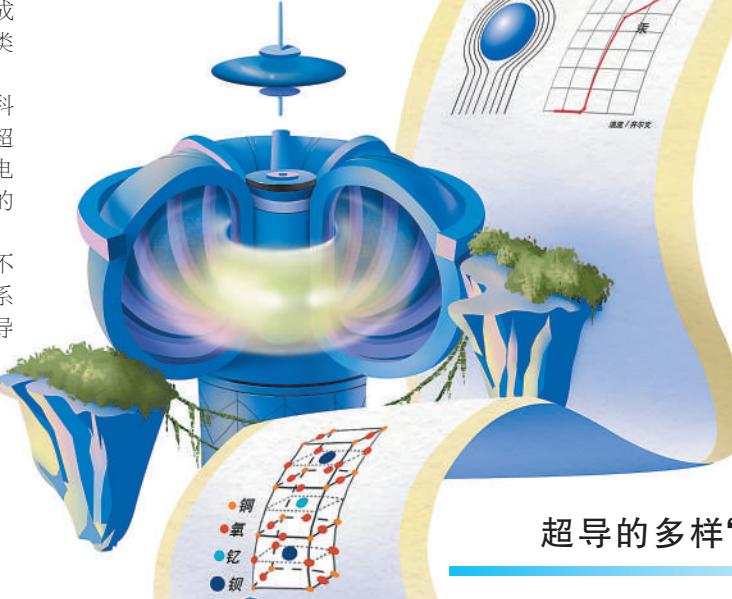
从可控核聚变的无限能源，到电动飞机的绿色革命，超导以其神奇的物理特性，改变科技和生活。



寻找超导材料之路

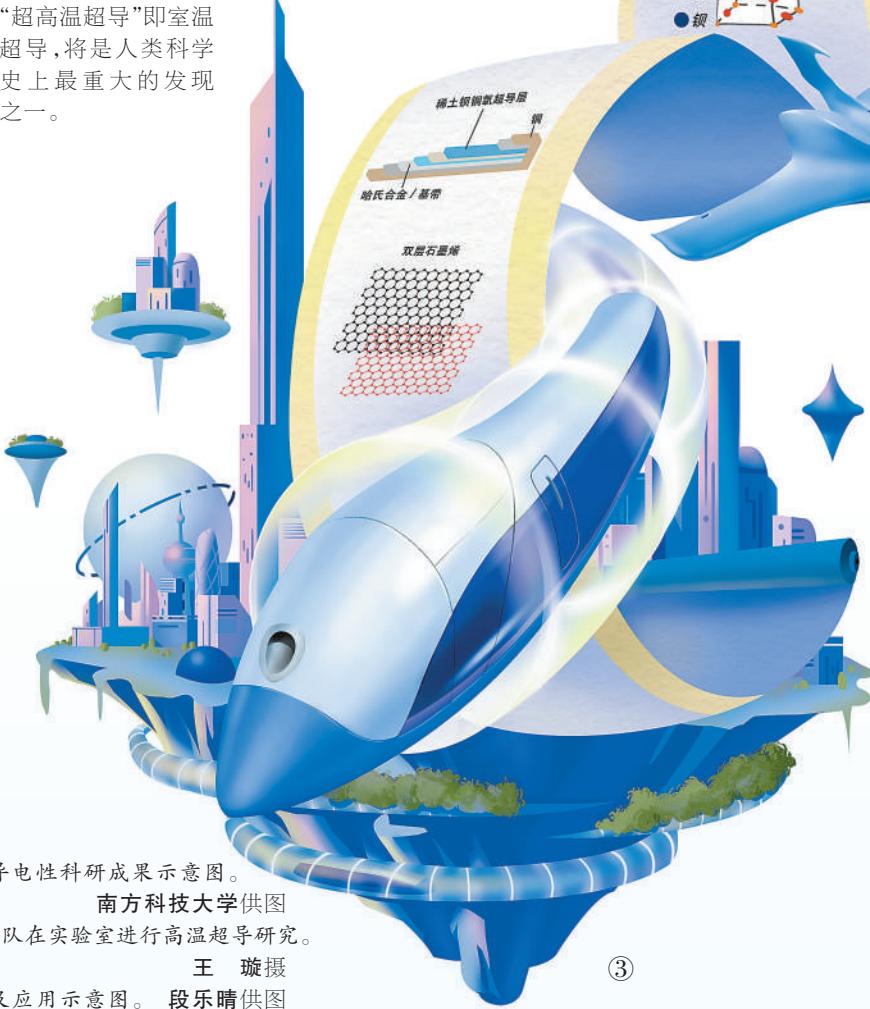


迈斯纳效应 零电阻效应



超导的多样“魔力”

“谁解开高温超导之谜，谁就掌握了21世纪能源革命的钥匙。”诺贝尔物理学奖得主安东尼·莱格特曾经这么预言。在铜基、铁基、镍基三类高温超导材料的发现和研究中，中国科学家正从跟跑变为领跑。如果最终实现了“超高温超导”即室温超导，将是人类科学史上最重大的发现之一。



超导的“魔力”不止于零电阻。1933年，物理学家迈斯纳发现，超导体能完全排斥外部磁场，仿佛被无形之力托起。这一“完全抗磁性”现象被称为“迈斯纳效应”，它是磁悬浮技术的物理基石。

上海磁浮示范线已运行近20年，线上的列车依靠常规电磁铁悬浮，需持续供电维持磁场。而若采用超导磁悬浮，列车可“自发”悬浮于轨道之上，能耗可以大幅降低。2021年，中国在成都建成全球首条高温超导磁悬浮试验线，车辆在液氮温区实现自稳定悬浮，为下一代磁悬浮高铁奠定基础。

超导不仅是工程奇迹，更是量子物理的“宏观展厅”。在超导体中，无数的电子会结成“库珀对”，步调一致地运动，形成宏观尺度的量子态。这种特性让超导体成为量子科技的“核心元件”。例如，超导单光子探测器能捕捉单个光子的信号，是量子通信的“火眼金睛”；超导量子比特可长时间保持量子叠加态，科学家正在利用超导量子比特设计量子计算机，实现复杂超高速运算。如果可纠错的通用超导量子计算机最终被研制成功，它将提供比目前世界上最快速的超级计算机还快百万倍以上的运算能力，并带来信息技术的重大变革。

超导研究已推动了低温物理、量子力学、材料科学的交叉融合。未来，随着高温超导机制的明晰与制备工艺的优化，这项“低温奇迹”或将成为连接基础科学与产业变革的重要纽带。

（作者为中国科学院院士、南方科技大学校长）

推进系统的功率密度和轻量化技术是制约其发展的瓶颈。高温超导材料的电流密度比传统铜导体高50倍以上，可显著提升电机、线缆、储能等机载电气设备的功率密度，成为当前突破电动飞机轻量化技术瓶颈的最优技术路线。

法国、美国、俄罗斯等已经开始利用高温超导技术循序渐进地对飞机进行电气化改造。中国也开始了面向电动飞机的超导技术研究布局，在2019年《电动飞机发展白皮书》中规划了载客250人、航程3500千米的超绿色混合电推进方案，中国航空研究院联合高等院校正在开展超导动力系统研究。

当前全球共性技术难题在于缺乏高效超导电机与发电机，导致电动飞机研发进程受阻。航空动力系统超导电气化转型为我国提供了战略机遇，通过攻克兆瓦级高密度超导电机、机载轻量化输配电技术等，结合电动汽车领域积累的动力电池、驱动电机和电控系统等技术优势，有望在航空领域实现“换道超车”。

历经百年时间，超导技术从液氦罐线圈演变为突破能量损耗限制的关键钥匙。

超导，正以其“无阻”特性，迈向无限未来。

（作者为上海交通大学电气工程学院副教授，《超导（英文）》期刊副主编）

可控核聚变

超导磁悬浮列车

可控核聚变可以从根本上解决人类的能源问题，被许多国家列为未来能源的重要战略方向。基于超导磁体的磁约束聚变技术最具工程化潜力，其核心特征是通过超导磁体产生的环形强磁场在真空腔内约束高温等离子体，形成类似“磁笼”的约束环境。

磁约束聚变装置内部存在着极端的温度环境：超导磁体需要低于零下200摄氏度的低温环境来维持超导特性，而被束缚的氘氚等离子体却高达上亿摄氏度，这相当于将太阳装进冰箱，是当前最具挑战性的前沿工程技术之一。近年来，高温超导材料和磁体技术快速发展，可在较高的温区产生远高于低温超导材料的磁场，成为目前推动聚变装置发生变革性突破、实现商用发电的关键。

电动大飞机

交通电气化的进程从未停止。与水陆交通工具不同，飞机对重量极其敏感，电力

R 哆『科』

想象未来某天，你的保姆机器人接下楼买咖啡的指令，自主完成开门、乘坐电梯、寻找便利店、取咖啡、付钱等一系列动作，最后将咖啡递到你手里。

这不是科幻电影，而是具有自主进化能力的AI智能体带来的可能——不再局限于在固定场景里完成特定动作，而是能像人类一样在陌生环境里“自主学习”，并根据场景变化做出相应的动作。

作为人工智能最主要的载体，智能体由硬件、软件等多种要素组成，能够感知周围环境，并根据自身所处环境做出判断和决策。在我们的日常生活中，一辆辅助驾驶的汽车是智能体，可以根据路况自主地踩油门或者刹车；家里的扫地机器人也是智能体，能识别地板上是纸屑果皮还是灰尘，并选择合适的清洁方式。

实际上，智能体并非向来智能，它们的进化史就像一个人的成长史。早期，智能体只会“死记硬背”。例如，1997年击败国际象棋冠军的超级电脑“深蓝”，其实是存储了几十万局棋谱的“复读机”，遇到规则外的招式就会卡壳。2014年，谷歌研发的AlphaGo开启了“思维训练”的模式，智能体开始通过自我学习提升自身能力，并逐渐进阶为某个专项领域的高手。2022年，以ChatGPT为代表的大语言模型横空出世，标志着智能体发展出较高的智能水平。例如，借助AI大模型破译甲骨文时，它会自主调取青铜器纹样数据来“脑补”生僻字的字义，甚至根据上下文的意思“创造”新字符。

与智能体进化相对应的，是智能体训练方法的变化。

AI大模型依赖于人工收集的数据进行训练。“投喂”给它们什么训练数据，就学习什么知识。例如，给它们提供100万张猫和狗的图像，并且标注清楚哪些是猫、哪些是狗，经过长时间的训练，它们就能很好地分辨猫和狗，但对于没见过的动物依然无法识别。

而下一代智能体将具备自主学习的能力——通过观察这个世界、和周围的环境互动，来学习各种技能。不需要收集和标注好100万张图像，只用几张图像教会它们最基本的知识，它们就可以自己学习更丰富的知识。例如，如果想教智能体骑自行车，只需要示范一次，它就会自己尝试不同的骑行动作，并不断试错，最终学会骑行的技巧。这意味着下一代智能体将在自主性和适应性方面更上一个台阶，能够主动获取信息，进行信息加工，然后分解任务、完成任务。

基于这种方式，若干年后智能体或将彻底融入我们的生活：厨房里，智能灶台不仅能烹饪美味佳肴，还能记住你的口味偏好；医院里，AI医生为病人诊断出病症，带着“定制方案”找主刀医生讨论……

不过眼下，智能体的发展还远未达到人们所期望的“耳聪目明、心灵手巧”，它们只能在固定场景中完成特定任务，并不具备跨场景完成任务的能力：一个智能体可以为汽车拧螺丝，但换成轮船可能做不到了；可以在平地上翩翩起舞，但换成山路也许就“四肢不协调”了。因此，“跨任务、跨场景、跨本体”是下一代智能体的发展目标。

随着人工智能从数字世界走向物理世界，智能体的可信性变得愈发重要。在智能体技术不断发展的过程中，我们始终需要守护“技术进步须服务于人性温暖”的文明底线，从源头上界定其行为边界与伦理规范。

（作者为复旦大学智能机器人与先进制造创新学院副院长，本报记者黄晓慧采访整理）

我科学家发布苹果属遗传多样性全景图

中国科学报北京电 （记者李晨）记者从中国农业大学获悉：近日，该校教授韩振海团队联合国内外团队，基于30份苹果属物种高质量基因组，系统解析了苹果属数千万年的演化历程，并构建了首个苹果属图形泛基因组，发布了苹果属遗传多样性全景图。这一成果发表于期刊《自然—遗传》。

这项研究发现，苹果属可划分为7个系统发育类群，其起源可追溯至约5600万年前的亚洲地区。作为重要的温带果树，栽培苹果的遗传基础相对狭窄，但是通过构建苹果属图形泛基因组，研究团队发现苹果属的30多个物种具有丰富的遗传多样性，是天然的苹果抗性基因库。

研究鉴定出物种特异的结构变异，并开发了一套选择清除分析流程，用于挖掘与驯化相关的关键基因位点。例如，研究团队在多花海棠中发现一个基因组的结构变异，很可能与抗苹果黑星病密切相关，还成功鉴定到影响苹果耐寒性和抗病性的关键驯化基因。这些“黄金”遗传位点的发现不仅深化了对苹果驯化过程中功能性变异的理解，也为培育抗逆苹果品种提供了重要的基因资源。

《自然—遗传》对该成果进行重点推介。西班牙农业基因组研究中心一名科学家评价指出，该研究凭借其高质量基因组和图形泛基因组的构建，为苹果研究与育种提供了卓越的资源支撑，并显著增进了对苹果属复杂系统发育关系和进化历程的认知。

柔性可植入式电子贴片给内脏“闪送”药物

本报北京电 （记者吴月）记者从北京航空航天大学获悉：近日，北京航空航天大学生物与医学工程学院常凌乾教授团队，联合北京大学、香港城市大学等机构的研究者，研发了一种柔性可植入式电子贴片NanoFLUID。该贴片融合了柔性电子、微纳加工等前沿技术，具有无线控制、轻薄、易贴附的特点，可以像创可贴一样贴在生物体器官上，将药物精准送达靶器官和细胞内。

传统的口服或者静脉给药方式效率有限，药物在全身循环中容易“迷路”，难以精准到达病灶部位。此外，大分子药物如基因药物很难穿过“天然屏障”细胞膜。对此，研究团队利用纳米电穿孔技术，结合柔性电子材料，研发了一种有5层微纳结构的电子贴片，可直接附着在器官表面。对比传统的递送方法，该贴片将药物分子递送速度提升上万倍，还能通过调控电参数精准控制药物进入器官的深度及剂量。目前，该技术已实现成果转化，应用在皮肤创伤修复等领域。

本版责编：智春丽 陈圆圆 董映雪

版式设计：张芳曼

下一代智能体如何跨界进化

吴祖煊