

# 超材料前沿研究一周精选

2025 年 1 月 6 日-2025 年 1 月 12 日

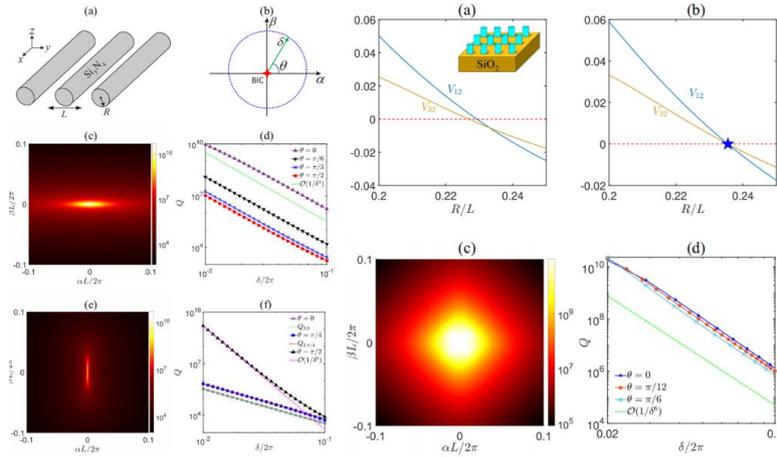
## 索引:

- 1 连续谱束缚态附近共振态的微扰理论
- 2 无需直流电源的通过可编程超表面实现无线微波到光转换
- 3 螺旋三层石墨烯中的拓扑带和关联态
- 4 单个 zigzag 边界具有局域态的 Janus 石墨烯纳米带
- 5 通过四重带简并性在锡硫化物晶体中实现高热电效率
- 6 量子 Zeno 引擎和热泵
- 7 基于自发弹跳的射流实现快速、灵活的水面及水下软体扑翼机器鱼

## 1 连续谱束缚态附近共振态的微扰理论

连续谱束缚态(BIC)因其独特的物理特性,在连续辐射态的光谱范围内依然能够维持波的局域化而备受关注。在光子晶体(PhC)薄膜中,BIC周围存在一系列共振态,其Q因子随着接近BIC趋于无穷大。高Q因子的共振态及其强局域场可显著增强光与物质的相互作用,在固态激光、传感器和非线性光学等领域具有广泛的应用前景。通过合并多个BIC,可形成一种特殊的BIC,即“超BIC”(Super-BIC),此类态能够在更宽的波矢范围内显著提升附近共振态的Q因子,同时抑制制造缺陷所导致的辐射损耗。在动量空间中,BIC对应于极化奇点,同时也是极化涡旋的中心,这种现象已在实验中被观察到。极化奇点可用于操控光场,从而实现涡旋光束的产生与光束偏移等现象。此外,围绕BIC的远场偏振态产生的拓扑电荷,可用于直观描述BIC的演化、产生与湮灭过程。BIC附近共振态的远场偏振特性和Q因子是理解共振增强波动现象及其应用的关键。然而,目前关于这些性质的研究主要集中在数值计算方面,尽管已有部分解析结果报道,但通常仅限于特定模型或特殊情形。

近日,香港城市大学张楠和陆雅言提出了一种微扰理论,用于分析光子晶体薄膜中接近BIC的共振态。这一理论能够严格确定Q因子的渐近行为以及远场偏振特性,这可能在手性发射与手性光学共振方面具有潜在的应用价值。研究发现,当散射矩阵满足特定条件时,BIC附近的共振态可呈现接近圆偏振的特性。此外,该理论提出了一种全新的超BIC视角,明确指出了在对称与非对称结构中识别超BIC的清晰且精确的条件,从而能够高效实现超BIC的发现,而无需依赖传统的BIC合并过程。在实际应用方面,团队在一个介电衬底上的方形棒阵列中成功识别出了一个超BIC结构。该理论不仅考虑了系统的非厄米特性,还可推广至支持BIC的其他结构,具有广泛的共振调控和手性光学应用潜力。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。(金梦成)

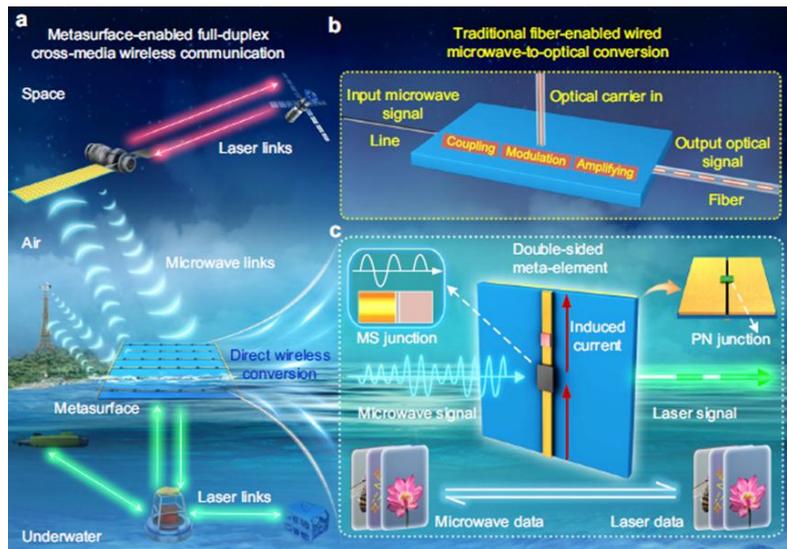


文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.013803>

## 2 无需直流电源的通过可编程超表面实现无线微波到光转换

从电信到新兴的量子技术,微波和光域之间的能量和信息转换在许多领域都是必不可少的。微波-光相互作用平台不仅可以连接电域和光域中的系统,还可以充分利用微波和光波在不同传播介质中的优势,实现无缝跨介质传输。然而,由于大于  $10^4$  的显著频率尺度失配导致能量的天然不兼容,对有效的微波-光相互作用带来了巨大的挑战。目前已演示的微波-光转换方案大多基于光纤和电路技术实现,需要外部电源进行多次中间过程,增加了成本、功耗和系统复杂度,限制了自由空间无线应用,且这些转换装置难以进一步开发用于实现从光到微波的逆向过程。与基于电路的解决方案形成鲜明对比的是,超表面是一种二维超材料,它为操纵自由空间电磁波提供了一种新范式。最近,光控微波超表面已经实现,其微波相位可以通过照射光强度进行操纵。然而,它们只能在低速下实现从光到微波的单向控制。为了提高速度,我们之前报道了具有高速信号转换的光控时域超表面,但它也以光到微波模式运行,需要外部电源。如何在一个超表面上实现自由空间微波到光的转换甚至双向操作是开发具有更高效率和容量的全双工数据传输的关键技术;无线和无电池操作可以释放很多限制,但两者都仍然具有相当大的挑战性。

近日,东南大学的张在琛教授、崔铁军院士、蒋卫祥研究员团队与新加坡国立大学仇成伟教授团队合作,提出了一种可编程超表面,可以实现直接、高速的自由空间微波到激光转换。此外,它还支持反向转换,实现双向操作。可编程超表面转换器通过将亚波长微波谐振结构、MS结和光电PN结组件集成在一起而实现,无需连接任何直流电源来提供驱动偏置。作者进一步展示了超表面转换器在跨介质链路中的巨大潜力,并开发了全双工空气-水无线通信系统。实验结果表明,通过空气-水边界建立了双向实时数据传输和交换。这项工作代表着朝着无线和无电池接口上的微波-光学相互转换迈出了决定性的一步。相关工作发表在《Nature Communications》上。(刘帅)

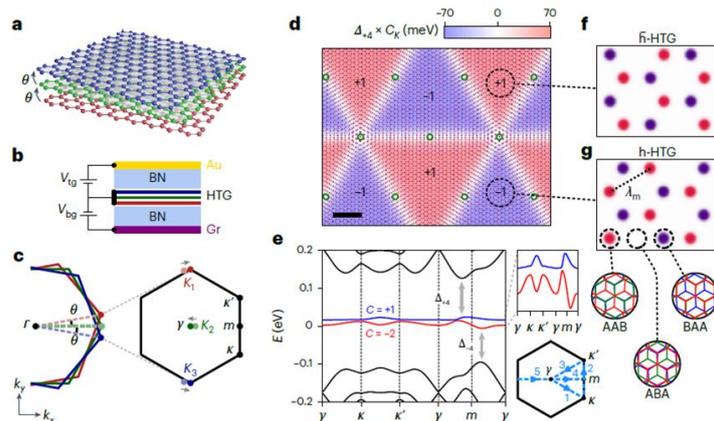


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-55940-9>

### 3 螺旋三层石墨烯中的拓扑带和关联态

强电子关联和非平凡能带拓扑的结合为奇异电子现象提供了沃土。在贝里曲率和轨道磁化的驱动下，非磁性材料中自发出现的反常霍尔效应(AHE)就是一个显著的例子。它需要一个破坏时间反转对称性(TRS)以及空间反转与TRS乘积的周期性系统。二维莫尔材料是实现这些条件的理想选择，因为具有特定对称性的组成层可以以受控方式组合，以设计电子能带结构及其拓扑。事实上，AHE已在各种 $xy$ 反转破坏莫尔平台中实现，包括基于石墨烯的系统和过渡金属二硫化物，其中至少一种范德华成分本质上破坏了 $xy$ 反转( $C_{2z}$ )对称性。这些系统依靠单个莫尔条纹来产生平带和强相关性，而堆叠的具有破坏 $C_{2z}$ 对称性的晶体部分(例如Bernal堆叠的双层石墨烯)会产生贝里曲率。三层石墨烯分别以两个独立的角度 $\theta_{12}$ 和 $\theta_{23}$ 扭曲，顶部两层(1和2)和底部两层(2和3)之间分别扭曲，通过组合多个莫尔条纹解锁新的工程自由度，开辟了产生贝里曲率的新方法。虽然大部分双角度空间( $\theta_{12}$ 、 $\theta_{23}$ )都充满了相互不相称的莫尔条纹，形成了莫尔准晶体，但一些角度组合会产生莫尔尺度上的周期性域。一旦考虑到晶格弛豫，一些相应的扭转角组合可能会局部摆脱准周期性。形成大型超莫尔畴，承载周期性的莫尔晶格。

近日，麻省理工学院的Li-Qiao Xia、Sergio C. de la Barrera、Aviram Uri与Pablo Jarillo-Herrero，表明本征反常霍尔效应体现在螺旋三层石墨烯中——三层石墨烯层，每层按相同的角度依次扭曲——尽管系统保留了全局平面内反转对称性。作者发现了魔扭角为 $1.8^\circ$ 时关联态和磁态的相图，这可以通过晶格弛豫来解释，这导致形成大的周期性畴，其中平面内反转对称性在莫尔尺度上被破坏。每个畴在两个谷中都包含具有相反陈数的平坦拓扑带。作者发现每个莫尔晶胞的多个整数和分数电子填充处存在关联态，其中的一个子集存在AHE。AHE在每个晶胞一个电子的临界电位移场之上消失，表明发生了拓扑相变。该工作建立了螺旋三层石墨烯作为一个平台，由于其出现的莫尔尺度对称性，该平台为设计拓扑提供了机会。相关工作发表在《Nature Physics》上。(刘帅)

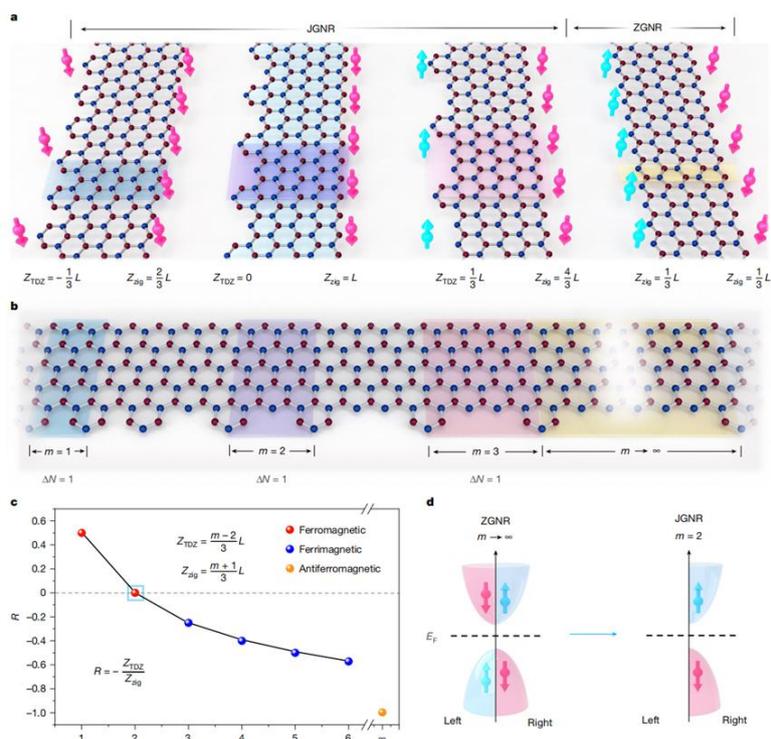


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02731-6>

#### 4 单个 zigzag 边界具有局域态的 Janus 石墨烯纳米带

“Janus”材料指在两个相对表面表现出不同物理或化学性质的材料。在二维材料研究中，通过打破顶层与底层对称性，Janus 材料可实现谷自旋分裂、垂直压电效应及二次谐波产生等特性，受到了广泛关注。研究者进一步探索了将 Janus 材料扩展至一维体系，通过在边缘引入不对称拓扑结构，赋予其独特的磁性和电子特性。Janus 型锯齿状石墨烯纳米带 (JGNRs) 因其不对称锯齿边缘，有望成为一维铁磁性量子自旋链和多量子比特组装的理想平台，并可在无需施加电场或化学修饰的情况下实现完全自旋极化电流运输。尽管已有理论尝试在 ZGNRs 的一侧附加三角形片段以打破对称性，但所得铁磁态较为离域化，且实验制备仍面临巨大挑战。这是因为前驱体设计需同时破坏结构与自旋对称性，而 ZGNRs 本身已因高度反应性和前驱体设计难度极具挑战性。目前，仅有两种对称 ZGNRs 成功制备，且均基于 U 形前驱体，宽度仅限于六条碳原子链。

近日，新加坡国立大学 Jiong Lu 教授、加州大学伯克利分校 Steven G. Louie 教授及日本京都大学 Hiroshi Sakaguchi 教授联合团队提出了一种普适方法，用于设计和制备具有铁磁性的 Janus 石墨烯纳米带 (JGNRs)。该材料通过在单侧锯齿边缘不对称地引入苯环阵列拓扑缺陷，同时保持另一侧完整，从而打破晶格对称性，形成了子格不平衡 ( $\Delta N=1$ )，诱导了自旋对称性破缺。团队设计了三种 Z 形前驱体分子，用于制备母体 ZGNR 及不同缺陷间距的 JGNR，以抑制缺陷边缘的磁性态。通过扫描探针显微镜、扫描隧道显微镜及非接触原子力显微镜等实验手段，结合第一性原理密度泛函理论计算，研究确认了在完整锯齿边缘形成的局域化铁磁基态。这一发现为自旋电子学器件与量子计算平台的开发奠定了基础。相关内容发表于《Nature》上。(金梦成)



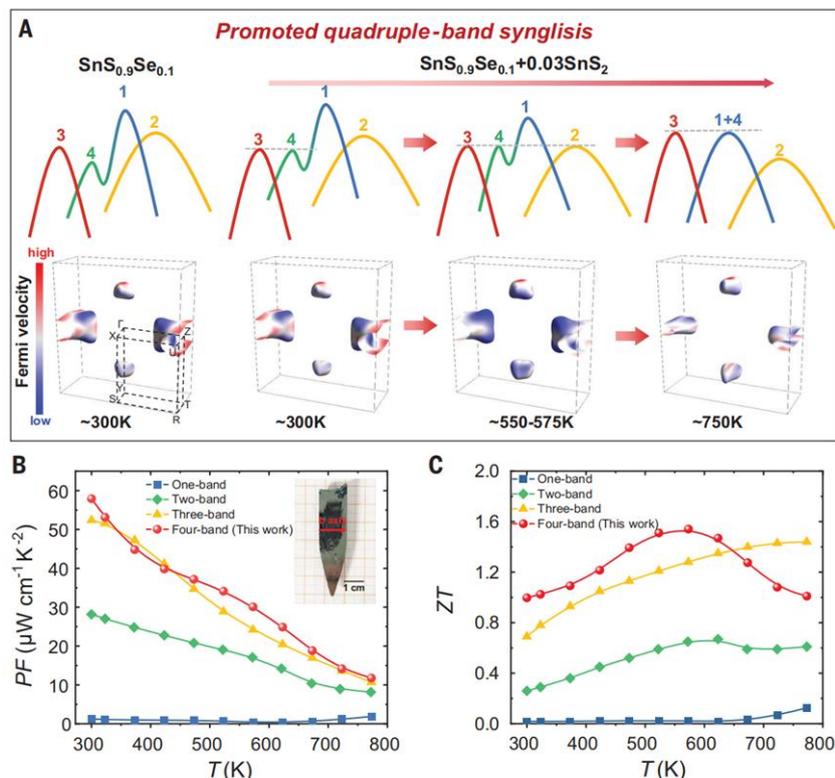
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08296-x>

## 5 通过四重带简并性在锡硫化物晶体中实现高热电效率

近年来,随着低碳和清洁能源需求的快速增长,热电技术作为一种能够将热能与电能直接转换的高效解决方案受到了广泛关注。这种技术通过热电材料直接将温差转化为电能,或反向利用电能实现制冷,因此在废热回收、空间探索和精密制冷等领域具有重要应用潜力。然而,现有热电材料大多依赖于稀缺且有毒的元素,例如铋(Bi)、碲(Te)和铅(Pb)等,这严重限制了其广泛应用。为了实现热电技术的可持续发展,研究人员逐渐将目光转向资源丰富、低成本且无毒的替代材料。在此背景下,锡硫化物(SnS)由于其丰富的储量、环境友好性以及优异的热电性能潜力,成为了一种备受瞩目的候选材料。SnS具有宽带隙( $E_g \approx 46$  kBT)和良好的载流子输运特性,理论上能够实现高效的热电性能。然而,如何进一步提升SnS的热电性能仍然是一个重大挑战。热电性能的优化通常依赖于材料的热电优值(ZT),该值由材料的热电功率因子(电导率与塞贝克系数的乘积)与热导率共同决定。通过设计和调控材料的电子能带结构,实现能量与动量的有效协同输运,是提升热电性能的关键。

近日,北京航空航天大学赵立东教授,秦炳超,常诚和国防科技创新研究院常超教授等人在提升SnS热电性能方面取得了重要进展。研究团队通过创新性的材料设计,成功实现了四价带协同效应(quadruple-band synglisis),显著提高了SnS晶体的热电性能。具体来说,他们通过引入Sn空位来激活四个价带,促进了多个价带在能量与动量上的有效汇聚。这种协同效应显著增强了载流子的输运能力,为实现高效的热电性能提供了新的途径。为了验证这一设计思路,研究团队在掺硒的SnS晶体中引入SnS<sub>2</sub>,这种方法有效改善了材料的载流子输运特性和电子态密度。实验结果表明,该方法使得SnS在300 K时的ZT达到约1.0,在773 K时则进一步提升至约1.3。这一结果显著高于传统SnS材料的热电性能,

展现了其在高温条件下的优异潜力。此外，为了进一步评估 SnS 在实际应用中的性能，研究团队还优化了 SnS 晶体的实验效率，达到了约 6.5% 的转换效率，并成功制造了一种热电制冷器，其最大温差可达 48.4 K。这种性能为 SnS 材料在废热回收和热电制冷领域的实际应用奠定了坚实基础。相关工作发表在《Science》上。（张琰炯）



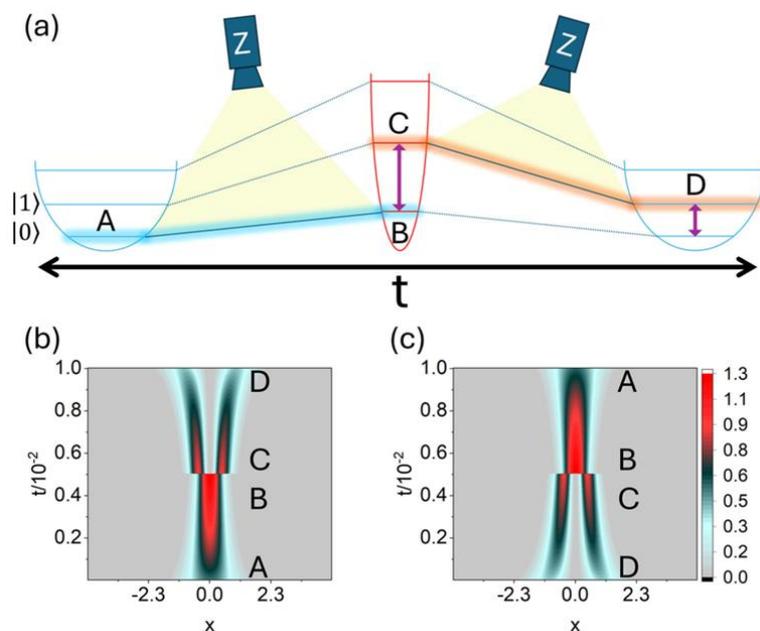
文章链接: <https://doi.org/10.1126/science.ad01133>

## 6 量子 Zeno 引擎和热泵

近年来，量子热力学作为一个新兴的多学科交叉领域吸引了广泛关注。量子热力学研究结合了热力学和量子力学的基本原理，为理解微观体系的热力学行为提供了新视角。在这个领域的前沿，量子发动机和热泵作为关键应用得到了深入探索。量子发动机是一种能够利用量子特性提取和转换能量的微型设备，在利用单原子或单自旋等系统中实现能量转换方面具有巨大潜力。然而，目前的量子热力学循环中，绝热变换通常是限制系统性能的关键因素。绝热变换需要较长的时间以避免耗散，这对提升量子发动机的功率输出形成了瓶颈。近年来，研究者提出了多种方法，例如利用近似绝热，试图在有限时间内实现理想的绝热变换，但这些方法也存在时间下限和效率上的限制。在量子热力学的研究中，另一个受到关注的重要方向是利用量子测量作为热力学过程中的资源。量子测量不仅能够改变系统的状态，还可以引入独特的非经典特性，例如量子相干性和纠缠。这些特性为设计更高效的量子循环提供了可能。例如，量子相干性可以增强热机的功率输出，而量子纠缠可以用于实现更高的能量传递效率。然而，如何在实践中充分利用这些量子特性仍然是一个具有挑战性的科学问题。

针对这些挑战，来自伯明翰大学物理与天文学学院的 Giovanni Barontini 教授课题组，提出了一种利用量子 Zeno 效应来提升量子发动机和热泵性能的新方法。

通过量子 Zeno 效应频繁测量选择性地阻止量子态间的跃迁，成功地在有限时间内实现了几乎理想的绝热变换。量子 Zeno 效应的核心在于，通过频繁测量系统的状态，可以“冻结”系统在某一特定量子态上的概率分布，从而避免因快速变换而引入的非绝热耗散。这种方法不仅能够实现更高效的热力学循环，还能够避免传统方法中对高精度控制的严格要求。具体而言，该研究以量子谐振子为工作介质，设计了基于量子 Otto 循环的热泵模型，并对其性能进行了详细表征。研究发现，与传统的快捷绝热方法相比，量子 Zeno 效应能够在更短的时间内实现高效的能量转换，从而显著提升系统的功率输出和效率。例如，在热泵运行中，通过控制测量频率和压缩比，该团队展示了如何在较低的时间范围内保持系统的绝热性能，从而实现更高的循环系数 (coefficient of performance, COP)。此外，通过调节测量次数与时间间隔，可以进一步优化 Zeno 循环的能量传递过程，使其在高压压缩比条件下仍然保持低耗散的特性。这种设计为量子热力学系统的高效运行提供了新的理论依据。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。(张琰炯)



文章链接: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.010407>

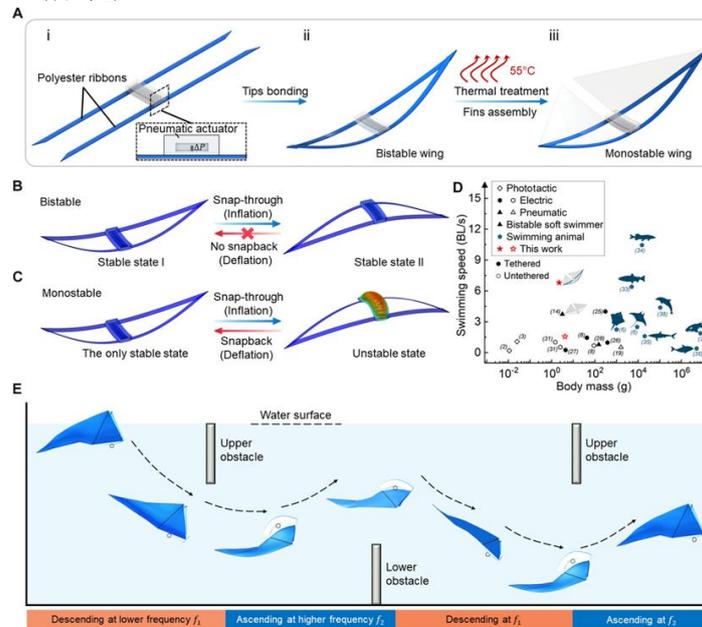
## 7 基于自发弹跳的射流实现快速、灵活的水面及水下软体扑翼机器

### 鱼

海洋动物多样的游泳模式为仿生软机器鱼提供丰富灵感，蝙蝠科鱼类独特外形对设计高性能机器人极具吸引力，其蝶泳以低频高幅鳍扑动实现快速、高效、高机动性。尽管已有所进展，如双稳态拍打翼软体游泳器，但仍面临挑战。双稳态策略能效低，使设计和控制复杂，特别是在周期性运动和定位方面。此外，软体机器鱼在非结构化水下环境中的可操作性，尤其是不同深度的游泳能力和抗碰撞能力，仍待探索。为了调节浮力，研究人员正探索集成液体鱼鳔的策略，但面临额外驱动力的需求。再者，虽然蝠鲼类机器鱼的鳍尖运动主要基于正弦波形，但研究表明非正弦运动能产生更高推力，这为提高软体机器鱼的游泳性能和效率提供

了新的策略，目前该领域仍待深入探索。

近日，北卡罗来纳州立大学尹杰教授团队报告了一种基于单稳态扑翼的自发弹跳式仿蝠鲮软体机器鱼。单稳态扑翼通过气动驱动瞬时弹跳以实现向下拍击，而在放气时，它将在弹性恢复力的驱动下自发跳回初始状态以实现向上拍击，而无需消耗额外的能量。这在很大程度上简化了设计、驱动和控制，从而实现了每秒6.8个体长的创纪录高速度、高效能以及高机动性和抗碰撞性，只需调整单输入驱动频率即可在有障碍物的水下非结构化环境中航行。相关研究发表在《Science Advances》上。(徐锐)



文章链接: QING H, GUO J, ZHU Y, CHI Y, HONG Y, QUINN D, DONG H, YIN J. Spontaneous snapping-induced jet flows for fast, maneuverable surface and underwater soft flapping swimmer[J]. Science Advances, 2024, 10(49): eadq4222.

<https://doi.org/10.1126/sciadv.adq4222>

(来源: 两江科技评论)