装上“内驱马达”，惯性导航再无“盲区”

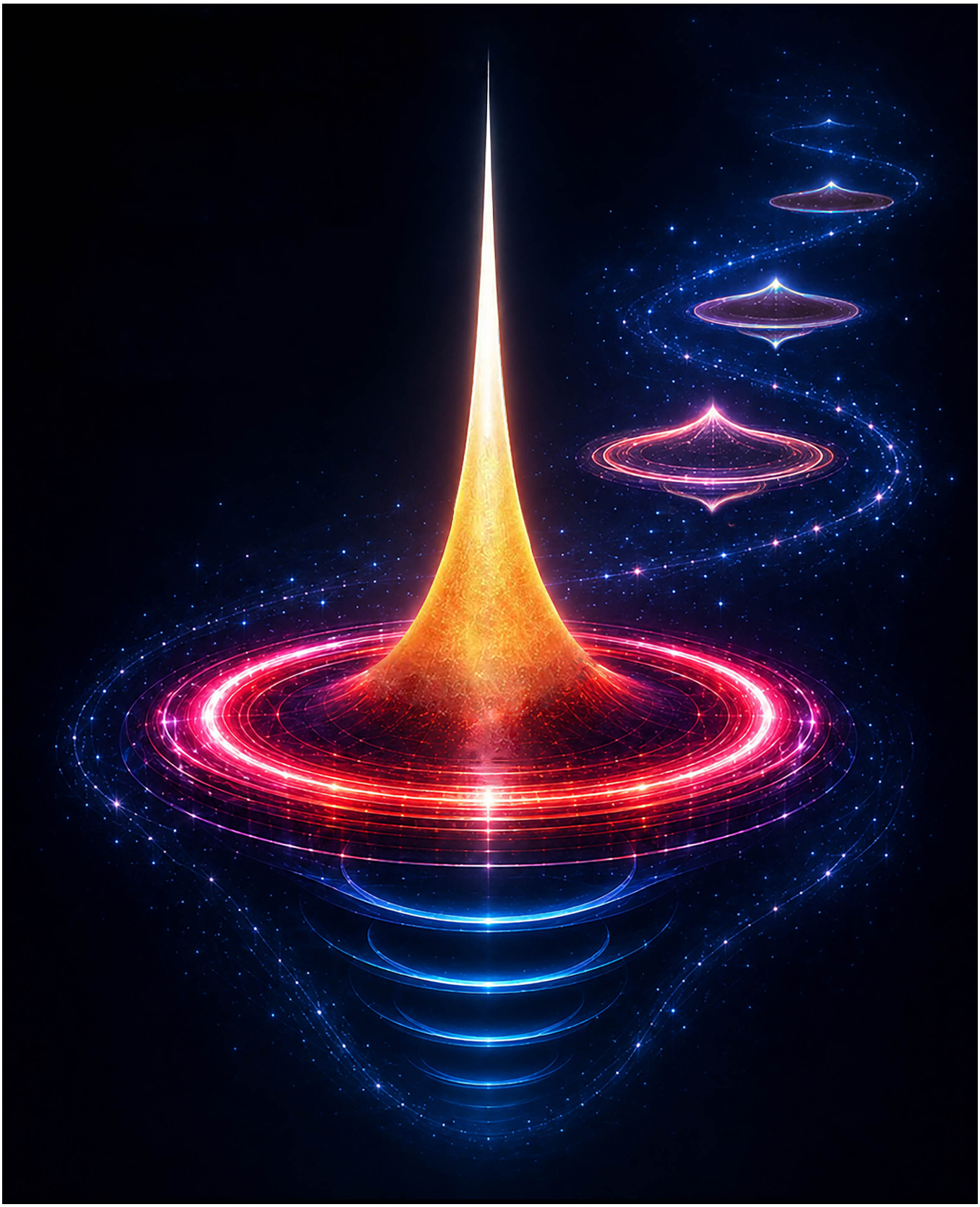
作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/40519.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

装上“内驱马达”，惯性导航再无“盲区”
。在惯性导航的世界里，有一个被称为“闭锁”的“幽灵”，能让最先进的激光陀螺在低速时“失明”——转得太慢时几乎测不到任何信号。时间一长，陀螺仪的误差就会像滚雪球一样越滚越大，导致定位严重漂移。

数十年来，全球科学家尝试用机械抖动、磁光晶体等“外力”与之对抗，却始终难以兼顾精度、可靠性与小型化需求。而国防科技大学、陆军工程大学、湖南师范大学等单位联合国际合作者，通过让光在腔内自发地“选择方向”，用物理的“对称破缺”击败这一幽灵，首次在完全兼容传统二频激光陀螺工艺的基础上，研制出无需任何偏置元件的自偏置激光陀螺。该成果6月24日发表于《自然》。



手性激光陀螺概念渲染图。受访者 供图

半个世纪的“ 闭锁 ”困局

惯性导航是指运用角速度和加速度等力学物理量，对物体进行自主定位的导航技术。上世纪六七十年代，意识到惯性导航对于国之重器的战略意义，我国著名学者钱学森以科学家的远见，将激光陀螺列为必须攻克的关键技术之一。这道“ 命题 ”也奠定了中国在此领域自力更生的初心。

接过重任的，是以中国工程院院士高伯龙为代表的国防科技大学激光陀螺团队。面对技术封锁，高伯龙带领团队选择了“ 四频差动 ”技术路径。他们从物理方程出发，历经数十年研制出拥有完全自主知识产权的激光陀螺，解决了从无到有的问题。高伯龙培养的首位博士生、国防科技大学教授龙兴武则在另一条主流技术路径“ 二频机械抖动 ”激光陀螺的工程化与实用化中取得重要突破。

“ 两位开拓者用不同的工程智慧，共同回应了钱学森先生的战略期待。 ”在国防科技大学激光陀螺团队成员看来，他们留下的不仅是成型的技术与装备，更是一种深入骨髓的科研文化，即面向国家重大需求，敢于挑战根本难题，坐得住“ 冷板凳 ”，啃得下“ 硬骨头 ”。

激光陀螺的工作原理并不复杂：一束光在环形谐振腔中分成两束，分别沿顺时针和逆时针方向传播。当腔体静止时，两束光的频率完全相同；一旦腔体发生旋转，萨格纳克效应会让两束光的频率产生微小差异，这个差异正比于旋转速率。测量这个拍频信号，就能精确感知角速度。

然而，一个看似无法绕过的障碍横亘于此。由于腔镜存在不可避免的背向散射，顺时针与逆时针两束光之间会产生耗散耦合。当旋转速率足够低时，这种耦合会“ 锁定 ”两束光的频率，使它们重新趋于一致，拍频信号就此消失。这个现象被称为闭锁效应，它意味着激光陀螺在近零转速区间存在无法测量的“ 盲区 ”。

半个多世纪以来，科学家想出多种办法来绕过“ 闭锁 ”这道难关。其中，包括机械抖动法，即给陀螺施加高频机械振动，使其快速“ 掠过 ”闭锁区间；磁光非互易法，即利用磁光晶体产生非互易相移，人为制造频率偏置。这两种技术路线分别催生的二频机抖激光陀螺和四频差动激光陀螺，至今仍是高端惯性导航市场的主流产品。

不过，问题远未解决。机械抖动引入的振动误差、磁光晶体的温度敏感性和体积重量，都使激光陀螺在深空探测、导弹制导等对可靠性和小型化要求极高的场景中“ 力不从心 ”。

“ 高院士、龙老师那代人，在近乎一穷二白的条件下，用无与伦比的工程实践能力，为我们开辟了道路，解决了生存与自主的问题。 ”作为龙兴武的关门弟子，论文第一作者兼通讯作者、陆军工程大学讲师毛元昊说，“ 站在他们的肩膀上，我们这一代科研工作者开始思考，除了用外部方案去‘ 对抗 ’或‘ 绕过 ’闭锁，能否从物理学的第一性原理出发，找到一种内生的、更根本的解决方案？ ”

从故障中听到“ 弦外之音 ”

许多突破性进展都始于对异常的追问。几年前，团队在改进一项工艺时发现，采用新型镜片的陀螺样机出现了非预期的输出跳变。在工程视野中，这是需要消除的故障。但毛元昊与合作者却从中听出了“ 弦外之音 ”——这强烈的跳变，或许揭示了被传统设计所压抑的、激光模式间强烈的非线性相互作用。

“光学谐振腔里的强非线性会诱导出自发手性破缺，这也是我与北京大学的合作者早在2017年就发现的新奇效应，但是一直没找到一个重要的应用场景。”论文通讯作者、湖南师范大学教授景辉表示。

团队做了一个大胆的反向操作——不仅不抑制这种相互作用，反而通过使用单同位素增益气体的特殊设计，将其激发到极致。结果，系统并未崩溃，而是优雅地步入了一种全新的稳定态——手性自发对称破缺，即环形激光器自发地选择让一束光强于另一束。

“我们首次在激光陀螺中，可控地诱导并利用了这种物理现象。”论文共同第一作者兼通讯作者、国防科技大学讲师徐纪鹏说，“这就像在一个绝对光滑的穹顶顶端放置一颗小球，哪怕只有最微小的扰动，它也会滚向某一侧。光在环形激光器中也是如此——它不再左右对称地传播，而是‘偏向’一方。”

这种“偏向”带来了一个意想不到的好处：两束光的强度差异会产生一个天然的频率偏置，就像给陀螺装了一个“内驱马达”，足以抵消导致闭锁的干扰。在实验中，这个内置的驱动力比闭锁阈值大了5倍多。

通俗地说，过去的陀螺在低速时需要外力推一把才能动起来，而现在的新方案则让陀螺自带内驱力，任何时候都能灵敏响应。

实验结果显示，接近零转速的范围内，陀螺拍频信号始终保持线性输出，彻底消除传统方案无法逾越的“盲区”；开环零偏稳定性达每小时0.022度，比地球自转角速度还低近3个数量级，意味着它甚至能感知地球自转那样微弱的转动。

研究团队还证实了手性态的双稳特性。在静止条件下，功率重启会因自发发射噪声产生随机的手性输出选择，两种手性态概率相等；而在连续泵浦下通过旋转调制，旋转方向的反转会诱导同步的手性切换。这一发现为手性态的主动控制奠定了物理基础。

新范式为惯性导航打开想象空间

研究团队证明，手性态下内生的光强不对称，会通过非线性效应自然形成强大的频率偏置。实验测试结果显示，这个自发偏置远大于导致闭锁的阈值。这意味着，仪器从此拥有了不依赖任何外部机械或磁光元件的、内生的“抗闭锁免疫力”。

据介绍，这一基础物理现象的发现，彻底扭转了激光陀螺必须借助外部偏置才能克服闭锁效应的传统技术路线。该方案无需改动现有主流工艺，为激光陀螺的结构简化与全固态化指明新方向。其更深远的意义在于，将非线性模式竞争与对称破缺物理引入惯性传感领域，从而为突破闭锁限制建立一种全新的物理机制。

值得关注的是，这项突破将为实际应用带来深刻变革。“首先是去外部元件化带来的可靠性与环境适应性跃升。”毛元昊说，传统机械抖动激光陀螺依赖高频振动电机“骗过”闭锁区间，手性激光陀螺则彻底摆脱了这些外部元件，意味着陀螺可以在更极端的温度、振动和辐射环境下保持稳定工作，而这恰恰是深空探测器和长航时无人机等最核心的需求。

“更关键的是，小型化与芯片化的技术通路被真正打开。”毛元昊表示，传统方案受限于外部偏置元件的物理尺寸，而手性自偏置方案无需任何插入元件，其核心物理机制可在更紧凑的光学结构中复现。结合当前快速发展的集成光子学技术，未来有可能将手性激光陀螺的原理移植到芯片尺度的光学谐振腔上。对于商业航天、无人机集群等成本敏感型应用场景而言，小型化带来的发射成本下降和部署灵活性提升，可能比精度提升本身更具颠覆性。

“基于手性自发对称性破缺的传感范式不局限于激光陀螺。”景辉表示，该机制可能推广到非线性动力学、集成光子学、量子精密传感等领域，为探索光子系统中非线性动力学与对称破缺的相互作用提供新框架。

相关论文信息：

https://doi.org/10.1038/s41586-026-10684-4

作者：王昊昊 来源：中国科学报

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发