

AMT 北京交通大学、新加坡国立大学：植入式生物电子系统中的摩擦起电

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41837.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！

AMT 北京交通大学、新加坡国立大学：植入式生物电子系统中的摩擦起电。



研究背景：

将摩擦起电效应融入植入式生物电子系统，为在动态生物环境中实现自主电功能提供了一条独特的途径。尽管过去十年取得了快速进展，但现有的植入式摩擦电装置仍常被零散地讨论，对激励源、功能作用和预期植入时长等因素的区分有限。此外，目前的研究主要侧重于电输出指标，而缺乏具有临床意义的性能基准，这限制了系统性比较和转化评估。本综述探讨了基于摩擦电效应的植入式生物电子系统的发展，重点关注其体内运行和治疗相关性。机械激励源分为内源性和外源性两类，涵盖了内在的生理运动以及外部施加的刺激。通过将电源供应、原位传感和信号传输以及原位治疗干预作为不同的运行模式，进一步阐明了植入式摩擦电装置的功能格局。此外，还讨论了与长期植入和短期植入治疗目标相关的植入式运行周期。基于上述分类，本文提出了前瞻性的设计考量，重点关注特定部位的整合、功能定位和以结果为导向的性能指标。这一结构化框架旨在支持合理的设备设计，实现有意义的跨研究比较，并促进摩擦电植入式生物电子系统的临床转化。

ADVANCED MATERIALS TECHNOLOGIES

REVIEW

Triboelectric Property in Implantable Bioelectronic Systems

[Yijun Hao](#), [Chengkuo Lee](#) ✉, [Xiuhua Li](#) ✉

First published: 08 April 2026 | <https://doi.org/10.1002/admt.70972> |

[VIEW METRICS](#)

文章概述：

北京交通大学电子信息工程学院李修函教授、研究生郝逸君联合新加坡国立大学Chengkue Lee教授为植入式摩擦电生物电子系统的合理设计和转化开发提供了概念上的清晰框架和实用指导。

图文导读：

诊断、治疗和康复植入式医疗器械在现代医疗保健中发挥着核心作用，但其临床应用仍受到电源供应、设备寿命以及与生物组织机械兼容性等方面的限制。传统的植入式系统通常依赖电池或有线供电，这限制了设备的微型化，并且通常需要二次手术进行更换或维护。此外，刚性电子元件与柔软、动态的生物环境之间的机械不匹配也对长期稳定性和功能可靠性构成挑战。为了应对这些挑战，人们探索了各种物理转换平台，以实现生物电子系统的自响应或自供电运行。总的来说，这些平台旨在将机械、热、磁或电相互作用与功能性电子输出耦合起来，从而减少对传统电池和刚性电源架构的依赖。虽然每个平台都具有独特的优势，但它们在材料限制、信号适应性、结构复杂性或与动态环境的集成灵活性方面也存在固有的权衡。生物环境。在这些新兴方法中，摩擦电代表了一种截然不同的范式，因为它能够直接从普遍存在的界面机械相互作用中产生电荷和信号，而无需预先设定材料极化、持续偏置或复杂的转换路径。这种固有的简单性，加上其对微弱和不规则运动的高灵敏度、机械柔顺性以及与软材料系统的兼容性，使得摩擦电机成为生物界面驱动电子功能的理想选择。因此，摩擦电平台提供了其他转换策略难以实现的机遇，从而激发了人们对将其用于植入式生物电子应用的浓厚兴趣。

植入式摩擦纳米发电机（TENG）最初被探索作为体内能量收集器，利用心脏活动、呼吸和肌肉骨骼运动等生理运动。近年来，摩擦电相互作用已实现自驱动传感、信号传输和局部治疗刺激，从而拓展了摩擦电器件的功能，使其不再局限于发电。然而，与其他生物电子平台相比，植入式摩擦电系统仍未得到充分研究，其设计原理和功能边界尚未明确。机械激励机制的讨论往往缺乏区分，即其源自内源性生理活动还是超声波等外部激励源。同样，植入式摩擦电器件经常被笼统地归类为能量收集，掩盖了供电、传感和治疗操作之间重要的功能差异。此外，许多研究并未明确考虑器件是用于长期植入还是用于临时性、目的性治疗，而这对于材料选择、封装策略和评估标准有着深远的影响。

图1.工作流程和概念路线图。分析框架的示意图，其中包含主要模糊之处以及由此以指导原则为

导向的摩擦电植入式生物电子系统分类

如图2所示，植入式摩擦电生物电子系统的持续发展将受益于以下三个方面的转变：

部位特异性设计考量：

部位特异性设计范式将是下一代植入式摩擦电生物电子系统的基础。未来的设计不再采用通用器件架构，而是必须将器件的几何形状、机械顺应性和变形模式与目标植入部位的解剖学和生物力学特征进行精确匹配。精确的解剖学匹配可以显著提高机械耦合效率，增强信号鲁棒性，并减少机械失配引起的衰减。此外，运动约束或方向选择性变形策略使器件能够优先采集或转换相关的生理动态信号（例如心脏运动、呼吸周期或局部组织位移），而不是无差别地响应环境机械扰动。同样重要的是，固定和封装策略也需要与植入部位进行协同设计。稳定的锚定方法必须能够适应组织的持续运动，同时最大限度地减少应力集中和炎症反应。封装材料和几何形状应提供足够的机械保护和生物相容性，同时不抑制摩擦电相互作用或改变界面电荷转移动力学。综上所述，这些考虑因素强调，特定部位的设计不仅仅是一个几何优化问题，而是一个系统级的集成挑战，它将解剖结构、力学、材料和摩擦电功能整合到一个统一的设计框架中。

功能靶向考虑：

除了解剖结构的适应性之外，植入式摩擦电系统还必须锚定到明确定义的功能靶点上。展望未来，在设备设计的早期阶段区分功率导向型和信息导向型运行模式将变得越来越重要。未来的系统不应将植入式TENG笼统地归类为能量收集器，而应明确定义其主要作用是提供电能、实现自供电传感和信号传输，还是通过电刺激主动调节生理过程。尤其对于治疗应用而言，摩擦电功能应直接映射到特定的疾病场景和临床干预策略。这种功能锚定使得器件架构、工作频率、刺激波形和植入策略能够根据具体的治疗目标进行定制，而非仅仅用于展示可行性。通过将功能靶向性融入设计逻辑，摩擦电系统可以从多用途原型发展成为具有明确临床作用的、以目标为导向的生物电子平台。

结果导向的指标考量：

植入式摩擦电生物电子系统的评估也必须朝着结果导向的性能指标发展，以更准确地反映生理相关性和治疗效果。虽然传统的电输出参数（例如开路电压、短路电流和功率密度）仍然可用于评估器件的物理特性，但它们不足以评估体内功能或临床潜力。未来的研究应优先考虑在特定的生理环境下定义有效传感、刺激或信号传输所需的功能阈值。建立与疾病相关的基准并采用标准化的评估方案对于实现有意义的跨研究比较和长期可重复性至关重要。评估指标应考虑生理运动下的信号稳定性、长期性能衰减、组织-设备相互作用动态以及系统层面的功能结果等因素。重要的是，符合监管和转化要求的评估框架将有助于从实验室验证向临床可行技术的过渡。

图2.展望未来在特定部位设备设计、功能导向的系统集成和结果导向的性能指标方面的发展方向

，以指导基于 TENG 的植入式生物电子平台的临床转化

如果这些方向能够协调一致地推进，植入式摩擦电生物电子系统有望从孤立的功能演示发展成为具有明确功能和可衡量治疗效果的临床整合平台。通过将设备设计与解剖结构和预期临床目标更紧密地结合起来，摩擦电系统可以作为生理环境的嵌入式组件运行，而不是作为外部施加的能量或传感单元。建立基于生理相关性和治疗结果的评估框架，将进一步促进不同研究之间的有效比较，支持监管转化，并加速将摩擦电平台整合到自适应和情境感知型医疗技术中。总而言之，这些进展将使摩擦电成为植入式生物电子学中一种成熟且用途广泛的转换机制，从而实现更具适应性、微创性和目标导向性的医疗技术（图3）。

图3.用于精准生物电子疗法的植入式摩擦电平台展望。该工作流程展示了从靶向材料和器件设计

到集成多功能操作，最终实现临床疗效的整个过程。关键里程碑包括精准治疗、部位自适应治疗、自主原位生物电子干预、疾病特异性生物电子调控、临床可解释的性能评估，以及转化为具有实际治疗价值的植入式摩擦纳米发电机平台

论文信息：

Triboelectric Property in Implantable Bioelectronic Systems

Yijun Hao, Chengkuo Lee*, Xiuhan Li*

Advanced Materials Technologies

DOI:10.1002/admt.70972

原文链接：

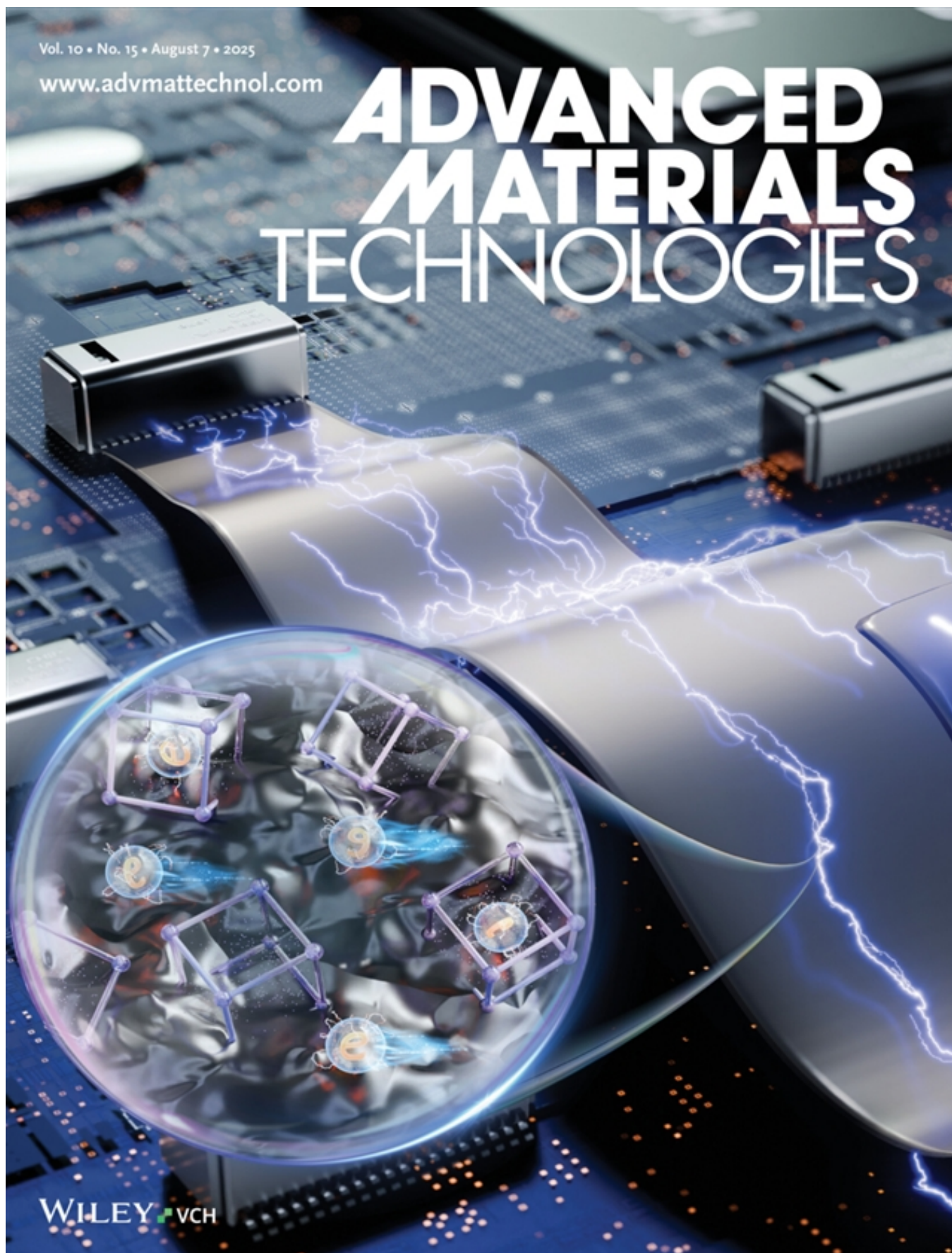
<https://doi.org/10.1002/admt.70972>

期刊介绍：

Vol. 10 • No. 15 • August 7 • 2025

www.advmattechnol.com

ADVANCED MATERIALS TECHNOLOGIES



WILEY-VCH

Advanced Materials Technologies聚焦连接材料科学、创新技术与实际应用的多学科研究，涵盖各类应用材料领域，重点关注先进器件的设计、制备与集成。



来源：Advanced Materials Technologies

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](https://www.iikx.com)转发