

可穿戴超声贴片诊疗设备开发与临床应用：技术、现状与未来趋势 综合报告

第一章 问题概要与技术概述

1.1 引言

可穿戴超声贴片技术，作为一项颠覆性创新，正预示着医疗监护与治疗领域的深刻变革。它将传统大型、静态的超声设备转化为轻便、柔性、可长时间佩戴的形态，旨在实现对人体深层组织生理信号的连续、动态、无创监测与干预。本报告旨在全面、深入地剖析可穿戴超声贴片技术的全景，内容涵盖其技术原理、临床价值、全球主要研究团队的进展、关键技术瓶颈、产业化现状以及未来发展趋势，为相关领域的科研人员、临床医生、投资者及产业决策者提供一份详实的战略情报参考。

1.2 传统超声技术的局限性

传统超声成像技术，如 B 超和多普勒超声，是现代医学诊断不可或缺的工具，以其无辐射、实时、成本相对低廉的优势被广泛应用¹。然而，其应用模式存在固有的局限性，这些局限性也正是可穿戴超声技术力图突破的痛点：

- **设备笨重与场景限制**：传统超声系统体积庞大、移动性差，通常固定在医院的特定科室，患者需前往指定地点接受检查，难以应用于院外、家庭或动态活动等场景²。
- **操作者依赖性**：超声检查的效果在很大程度上依赖于操作技师的专业技能和经验。技师需要手动寻找最佳的声学窗口，并保持探头与皮肤的稳定接触和合适角度，这导致了测量结果存在操作者间差异，影响了检查的可重复性和标准化³。

- **静态“快照”式监测**：常规超声检查提供的是特定时间点的“解剖快照”或短暂的生理过程记录，无法进行长时间的连续监测。这对于需要捕捉偶发性异常事件或了解生理参数在一天内动态变化的临床需求（如血压波动、心功能变化）而言，存在明显的监测空白³。

这些限制使得传统超声技术在实现对人体生理状态的长期、动态、无人值守的监测方面力不从心，从而催生了对新型超声技术形态的迫切需求。

1.3 可穿戴超声的出现：一场范式转移

可穿戴超声贴片的出现，标志着医学监测领域的一次根本性范式转移：从间歇性、依赖操作者的成像，转向连续性、自动化的深层组织生理学监测³。这一转变的核心价值在于，它将超声技术从提供“解剖快照”的工具，升级为能够录制“生理电影”的平台。

更重要的是，可穿戴超声为穿戴式传感器开辟了“第三维度”的感知能力。目前主流的基于光学（如光电容积描记法，PPG）或电学（如心电图，ECG）的穿戴设备，其感知深度通常局限于皮下数毫米，主要监测表层信号²。而超声波凭借其优越的穿透性，能够无创地探测深达数厘米的组织，直接监测深层血管、肌肉和内脏器官的结构与功能，获取传统穿戴设备无法企及的、更具临床核心价值的生命体征信息⁸。这种能力的实现，并非简单的将探头小型化，而是通过材料科学与机械工程的革新，实现了设备与人体的

共形集成（Conformal Integration）。这种皮肤般的柔性使得贴片能够与动态的、弯曲的人体表面保持稳定、持久的声学耦合，从而摆脱了对操作员的依赖，是实现连续、动态监测的真正技术基石。

1.4 可穿戴超声技术的核心原理

1.4.1 换能器与材料科学

可穿戴超声贴片的核心是其独特的材料体系和结构设计，它将刚性的功能元件与柔性的基

底完美结合。

- **压电材料**：压电材料是实现电能与声能相互转换的核心。传统超声探头多采用锆钛酸铅（PZT）等含铅陶瓷，性能优异但存在生物相容性顾虑。新兴研究开始转向高性能的无铅压电材料，如 PIN-PMN-PT 单晶，以提升器件性能和安全性⁶。
- **柔性基底与封装**：贴片的主体由柔软、可拉伸的材料构成，如硅酮弹性体（silicone elastomer）或苯乙烯基共聚物（如 SEBS），使其具备类似皮肤的机械特性，能够与皮肤表面实现共形贴合，适应身体的自然运动⁶。
- **可拉伸电极与互连**：为了在柔性基底上连接刚性的压电换能器阵列，研究人员设计了能够承受机械形变而不失效的导电通路。常见的方案包括蛇形或弹簧状的金属（如铜）网络结构，这些结构在拉伸时可以通过几何形变来吸收应力，保证电路的完整性⁴。

1.4.2 声学原理与耦合

- **超声物理基础**：超声波是频率高于人耳听阈（通常在 2-18 MHz 之间）的机械波。当它在生物组织中传播时，会发生反射、散射和衰减。通过接收这些回波信号，可以重建组织的图像或分析其运动状态¹。超声的频率决定了其穿透深度和分辨率，高频超声分辨率高但穿透浅，低频则反之。
- **声学耦合挑战与解决方案**：超声波在空气中衰减极快，无法直接从探头传入人体。因此，必须使用声学耦合剂（如医用凝胶）来填充探头与皮肤之间的空气间隙。对于需要长时间佩戴的贴片而言，液体凝胶易挥发、易流动，并不适用。该领域的一大技术创新是开发了固态的、具有皮肤黏附性的声学耦合层，例如使用特殊的声学水凝胶或利用弹性体基底本身作为耦合介质，从而实现稳定、长效的干式声学耦合³。

1.4.3 可穿戴形式下的工作模式

传统超声的多种工作模式被成功地适配到可穿戴贴片中，以满足不同的监测需求：

- **A 模式 (Amplitude Mode)**：显示沿单一方向的回波强度，可用于精确测量距离，如血管壁的位移。
- **M 模式 (Motion Mode)**：记录一段时间内 A 模式线上各点回波强度的变化，常用于追踪运动的结构，如心脏瓣膜的活动。
- **B 模式 (Brightness Mode)**：通过扫描构建二维的、灰度编码的组织解剖图像，是应用最广的成像模式¹⁴。
- **多普勒模式 (Doppler Mode)**：利用多普勒效应测量移动物体（主要是血液）的速度和方向，是评估血流动力学的关键¹⁴。

不同的可穿戴超声应用会侧重于一种或多种模式的组合，例如，血压监测主要利用 A 模式追踪血管直径变化，而血流监测则依赖多普勒模式⁶。

第二章 研究背景与临床价值

可穿戴超声技术的发展正沿着两条主线并行推进：一是以高保真、数据密集型为特征的**诊断应用**，旨在实现连续生理监测；二是以低强度、长时程为特征的**治疗应用**，旨在提供持续的物理干预。这两条路径拥有不同的技术挑战、临床目标和商业模式。

2.1 诊断应用：连续生理监测

可穿戴超声诊断应用的核心价值在于填补了现有医疗监测手段的空白，即在传统超声无法覆盖的动态、长时程场景下，提供对深层组织器官功能状态的连续洞察。

2.1.1 心血管监测

心血管疾病是全球首要的健康威胁，对其进行有效监测是预防和管理的关键。

- **中心血压 (CBP) 与血流动力学**：这是可穿戴超声最成熟的诊断应用之一。通过佩戴在颈部或前臂等位置的贴片，可以实时追踪颈动脉或桡动脉等深层大动脉的直径搏动，并结合脉搏波速度等信息，无创地重建出完整的中心动脉血压波形⁶。临床研究表明，相比于传统袖带式血压计测量的外周动脉压，中心动脉压能更准确地反映心脏后负荷和主要器官的灌注情况，是预测心血管事件和全因死亡率的更优指标⁹。加州大学圣迭戈分校（UCSD）的研究团队已在一项涉及超过 117 名受试者（包括 ICU 重症患者）的严格临床验证中，证明其超声贴片的测量结果与有创动脉导管这一“金标准”高度一致，标志着该技术从实验室走向临床应用的重要里程碑⁶。
- **心脏成像与功能评估**：研究人员开发出可直接贴于胸前、实现“移动心超”的贴片设备。这类设备能够实时、动态地监测心脏四个腔室的结构和收缩舒张过程，并结合人工智能算法，自动计算心输出量、射血分数等关键功能指标²。其独特优势在于，患者可以在日常活动甚至运动状态下佩戴，捕捉传统静态心超检查难以发现的、与活动相关的心功能异常，这对于心力衰竭等疾病的早期诊断和管理具有革命性意义¹⁹。

2.1.2 脑血管监测

中风等脑血管疾病具有高致残率和高致死率，及时发现血流异常至关重要。

- **脑血流 (CBF) 连续监测**：通过将柔性超声贴片佩戴于颞部，可无创地穿透颅骨，连续监测大脑中动脉等主要血管的血流速度⁴。这项技术解决了当前临床实践中的一个关键缺口：缺乏对脑血流的连续监测手段⁴。如果患者在夜间或无人看护时发生脑血管痉挛或血流中断，这种贴片能够提供及时的预警信息，为抢救赢得宝贵时间⁴。
- **技术突破：超快成像**：由于颅骨对超声信号的衰减和畸变非常严重，为了获取足够信噪比的血流信号，研究人员采用了**超快成像技术**（Ultrafast Imaging）。与每秒采集约 30 帧的标准超声不同，超快成像能以每秒数千帧的速率采集数据，通过相干叠加等算法处理，显著增强了穿透颅骨后的信号强度，从而实现了对脑血流的可靠监测⁵。

2.1.3 呼吸与肌肉骨骼监测

- **呼吸健康**：将超声贴片佩戴于肋骨间，可以精确监测膈肌的运动幅度和厚度变化。膈肌是人体最重要的呼吸肌，其功能状态直接反映了呼吸系统的健康水平。这项技术可用于辅助诊断哮喘、肺炎、慢性阻塞性肺疾病（COPD）等呼吸系统疾病，评估机械通气患者的脱机时机，其提供的空间分辨率和特异性优于传统的肌电图（EMG）²⁰。
- **肌肉骨骼活动**：可穿戴超声也被用于“超声肌动描记”（Echomyography），即通过超声实时追踪肌肉在运动中的收缩、形变和激活模式。这为运动康复评估、优化运动员训练方案、以及开发更精准的人机交互界面（如通过识别前臂肌肉活动来控制假肢手完成复杂手势）提供了全新的、高分辨率的传感手段³。

2.1.4 其他新兴诊断靶点

学术界还在探索更多的创新应用，例如：用于高危妊娠的连续胎儿心率监测，以期预防死产³；以及由麻省理工学院（MIT）团队开发的、用于无创监测膀胱充盈度的贴片，可帮助有排尿功能障碍的患者进行管理²²。

2.2 治疗应用：持续声学医学 (SAM)

与诊断应用不同，治疗性可穿戴超声旨在利用超声波的生物学效应，向病变组织持续输送能量，以达到治疗目的。

2.2.1 作用机制

治疗性超声主要通过以下两种机制发挥作用：

- **热效应**：超声能量在组织中传播时被吸收并转化为热能，导致局部组织温度升高。适度的热效应可以扩张血管、增加局部血流量、促进新陈代谢和组织修复²³。
- **非热效应（机械效应）**：超声波的机械振动可以产生声流（acoustic streaming）和

空化（cavitation）等效应。声流是指声场驱动下液体产生的微小流动，可以改变细胞膜的通透性；空化是指组织中微小气泡在声场作用下的振荡、生长甚至破裂，产生的微射流和剪切力可以刺激细胞活动、松解粘连组织²⁴。 **低强度连续超声

（LICUS） **是可穿戴治疗设备采用的主要模式，它能在最小化热损伤风险的同时，充分利用非热效应来促进组织再生²⁵。

2.2.2 疼痛管理与组织再生

这是目前商业化最为成熟的治疗应用领域。临床证据表明，可穿戴 LICUS 设备对于治疗肌腱炎、韧带扭伤、关节炎等肌肉骨骼系统损伤和慢性疼痛具有显著疗效²³。

- **商业案例：ZetrOZ Systems 的 sam®设备**：作为该领域的标杆产品，sam®是首个获得美国食品药品监督管理局（FDA）批准的、可用于家庭处方使用的长时程（每次可持续治疗长达 4 小时）可穿戴超声治疗设备。大量临床研究和超过 30 万名患者的使用数据证实，sam®通过每日向病变组织（如膝关节）输送数万焦耳的声能，能够有效减轻骨关节炎等疾病引起的疼痛、改善关节功能、促进软组织修复，成为传统药物和手术治疗之外的一种有效的非侵入性选择²³。

2.2.3 增强药物与化妆品递送

可穿戴超声也展现出“诊疗一体化”（Theranostics）的潜力。研究表明，利用超声的机械效应（特别是空化效应）可以暂时性地增加皮肤角质层的通透性，这一过程被称为“声致通透”（Sonophoresis）。MIT 等研究机构正在开发能够利用这一原理的超声贴片，以实现药物、护肤品等活性成分的无创、高效透皮递送，为皮肤科治疗和医学美容开辟新途径²²。

第三章 全球研究格局：顶尖学术团队评述

可穿戴超声领域的研究由全球少数顶尖学术机构引领，它们在基础材料、器件工程、临床转化和产业化方面各有侧重，形成了特色鲜明的研究范式。

3.1 美国加州大学圣迭戈分校 (UCSD) - 徐升教授实验室

徐升教授 (Sheng Xu) 领导的实验室是全球公认的可穿戴超声技术，特别是诊断应用方向的开拓者和领导者。其研究特点是系统性的工程创新与严格的临床转化并重，致力于打造一个可扩展的、通用的技术平台。

- **核心创新：**

- **基础性工作：**开创性地开发了柔软、可拉伸的超声贴片，首次实现了对人体中心动脉血压的连续无创监测，奠定了该领域的技术基础⁶。
- **全集成无线系统：**率先研制出全球首个**完全集成、无线的可穿戴超声系统芯片 (USoP)**。该系统将传感器阵列、控制电路、电源和无线通信模块全部集成在一个邮票大小的柔性贴片上，彻底摆脱了传统超声设备和早期原型机所需的线缆束缚，是实现真正意义上“移动监测”的关键一步¹⁸。
- **应用广度：**系统性地展示了其技术平台在多个领域的应用潜力，包括心血管（血压、心功能）、脑血管（血流）、肌肉骨骼（肌电描记）和呼吸系统（膈肌监测）等⁴。
- **临床验证：**其研究最显著的特点之一是极为重视临床验证。多项研究均在大型患者队列和真实的、要求严苛的临床环境中（如重症监护室 ICU、心导管室）进行，并与临床金标准（如有创动脉导管）直接对比，为其技术的准确性和可靠性提供了强有力的循证医学证据⁶。
- **代表性论文：**该团队在《自然》 (*Nature*)²、《自然·生物医学工程》 (*Nature Biomedical Engineering*)⁶、《自然·生物技术》 (*Nature Biotechnology*)³² 和《自然·电子学》 (*Nature Electronics*)²⁰ 等顶级期刊上发表了一系列里程碑式的论文，总引用数极高，彰显了其在该领域的学术影响力³⁶。

- **资金来源：**其研究获得了美国国立卫生研究院（NIH，包括 NIBIB 和 NHLBI 分部）、美国国防部高级研究计划局（DARPA）等联邦机构的长期、稳定支持²⁰。

3.2 美国麻省理工学院 (MIT) - Canan Dagdeviren 教授实验室 (Conformable Decoders)

Canan Dagdeviren 教授领导的 Conformable Decoders 研究组以其高度的创造性和针对特定临床痛点的“解决方案驱动”模式而闻名。其研究特色在于设计新颖的器件形态（form factor），以解决传统医疗设备难以应对的挑战，尤其是在女性健康和神经科学领域。

- **核心创新：**
 - **乳腺癌筛查：**开发了一款可集成在文胸内的可穿戴超声扫描仪。该设备形似一个带有微型扫描仪的贴片，旨在让高风险女性能够在家中频繁、便捷的乳腺组织自查，以期实现肿瘤的早期发现²²。
 - **膀胱容量监测：**设计了一款共形相控阵超声贴片，可无创地实时监测膀胱的充盈程度，为神经源性膀胱等排尿功能障碍患者提供了一种新的管理工具²²。
 - **深脑刺激：**研制了名为 ImpULS 的可植入式压电器件，利用微型超声换能器阵列对大脑深部核团进行精准的神经调控，为神经和精神疾病的治疗提供了新思路²²。
 - **透皮递送：**探索了利用超声空化效应增强药物和化妆品透皮吸收的贴片技术，展示了其在诊疗一体化方面的潜力²²。
- **代表性论文与认可：**该团队在《自然·通讯》（*Nature Communications*）、《先进材料》（*Advanced Materials*）和《自然·电子学》（*Nature Electronics*）等知名期刊上发表了众多研究成果³⁰。实验室及其成员获得了包括 BBC 百大女性、美国国家工程院前沿研讨会成员在内的多项荣誉和奖项，显示出其研究工作的高度的社会和学术认可度²²。

3.3 中国的研究布局

中国在可穿戴超声领域的研究发展迅速，不仅在基础研究方面紧跟国际前沿，更在推动技术向产业化转化方面展现出强大的战略布局。

- **清华大学：**

- **基础研究：**清华大学在柔性电子材料和仿生器件方面有深厚积累⁴⁰。其研究团队开发了柔性多普勒超声贴片，可用于深层血流的连续监测，并与商用设备进行了性能对比，验证了其可行性¹⁵。
- **产业化平台：**浙江清华柔性电子技术研究院是中国在该领域推动产业化的一个典型范例。该研究院不仅是科研机构，更是一个集“基础研究-工程转化-产业孵化”于一体的综合性平台。它建成了国际首条柔性集成器件制造中试线，拥有超过 800 项国内外专利，并成功孵化和吸引了 54 家上下游企业落户嘉兴，形成了区域性的柔性电子产业集群。这种模式为高校科研成果的快速转化和规模化生产提供了关键的基础设施和生态系统支持⁴¹。

- **中国科学院 (CAS)：**

- 中科院下属的多个研究所也在积极布局。例如，深圳先进技术研究院 (SIAT) 在**超声换能器技术上取得了重要突破，成功研制出高性能的透明超声换能器**。这种换能器由 PIN-PMN-PT 透明压电单晶制成，其灵敏度和带宽远超以往报道，性能可与传统不透明换能器媲美。其透明特性为超声与光声、光学等多种成像模态的融合提供了可能，未来有望发展为可佩戴在头部的“声学颅窗”，用于脑功能成像¹⁰。
- 此外，中科院其他团队也在研究用于监测深层组织力学性能的柔性超声系统，可用于癌症进展监测或运动损伤诊断¹²。

综合来看，UCSD 的徐升实验室和 MIT 的 Canan Dagdeviren 实验室代表了两种不同的创新策略。徐升团队采取的是“平台驱动”模式，开发一个通用性强、性能卓越的技术平台 (USoP)，然后将其应用于广泛的临床问题。这种策略可能催生更广泛的授权机会和更通用的技术栈。而 Dagdeviren 团队则采用“问题驱动”模式，从一个具体的临床难题出发，设计高度定制化的解决方案（如超声文胸）。这种策略可能更快地切入特定细分市场，形成高价值的初创公司，但技术的可扩展性相对较窄。

与此同时，以清华大学为代表的中国研究力量则展示了一种“生态系统驱动”的模式。通过建立从基础研究、中试验证到产业孵化和集群建设的垂直整合体系，中国正在为可穿戴电子技术的规模化制造和商业化铺平道路。虽然目前在顶级期刊的发表数量上美国团队仍占优势，但中国在制造基础设施和产业生态方面的战略布局，可能使其在未来的商业化竞争中占据重要地位。

表 3.1 全球主要可穿戴超声研究团队对比分析

机构/实验室	主要研究方向	关键技术创新	主要应用领域	代表性论文发表期刊/年份	已知资金来源
UCSD / 徐升实验室	全集成无线诊断系统	完全集成无线超声系统芯片 (USoP) ; 严格的临床验证	心血管、脑血管、肌肉骨骼、呼吸系统	<i>Nat. Biotechnol.</i> 2023, <i>Nat. BME</i> 2024, <i>Nature</i> 2018	NIH, DARPA
MIT / C. Dagdeviren 实验室	应用驱动的定制化器件	可穿戴超声文胸；膀胱容量监测贴片；植入式深脑刺激器	乳腺癌筛查、泌尿科学、神经科学、透皮递送	<i>Nat. Commun.</i> 2024, <i>Adv. Mater.</i> 2023, <i>Nat. Electron.</i> 2023	NSF, NIH, 私人基金会
清华大学 / 柔电院	柔性材料与产业化	柔性多普勒超声器件；柔性器件中试线与产业集群	血管监测、重大装备监测、机器人传感	-	中国政府、地方政府、企业合作
中科院 / 深圳先进院	新型换能器技术	高性能透明压电单晶超声换能器	多模态融合成像（光声/超声）、脑成像	<i>PNAS</i>	中国科学院、国家自然科学基金

第四章 关键技术瓶颈分析

尽管可穿戴超声技术前景广阔，但其从实验室走向大规模临床应用和市场普及，仍需克服一系列严峻的技术瓶颈。这些挑战贯穿于器件设计、系统集成、数据处理和安全监管等各个环节。

4.1 器件工程与性能权衡

- **声学耦合与运动伪影**：维持稳定、可靠的声学耦合是可穿戴超声面临的首要挑战³。在没有液体凝胶的情况下，贴片需要仅依靠固态耦合层与皮肤紧密贴合。在用户自由活动，身体的运动、皮肤的拉伸和汗液的分泌都可能导致贴片与皮肤间产生微小间隙，从而严重衰减超声信号，引入噪声和伪影³。此外，运动本身也会导致目标器官（如颈动脉）发生位移，可能移出传感器的有效探测范围。为了应对这一挑战，开发具备自动目标追踪功能的人工智能算法已成为必然选择¹⁸。
- **成像质量与柔性的权衡**：这是一个根本性的物理限制。为了实现器件的柔性和可拉伸性，刚性的压电换能器单元之间必须留有足够的间距（即增大阵元间距）。根据声学理论，这会降低阵列的聚焦能力，导致横向分辨率下降，并可能产生栅瓣伪影，使得图像质量通常劣于采用密集阵列的传统刚性探头³。此外，用于封装的柔性材料（如硅酮）相比传统探头的声学匹配层，往往具有更高的声衰减，进一步削弱了信号强度³。
- **材料的耐久性与生物相容性**：要实现数天甚至更长时间的连续佩戴，贴片材料必须具备出色的耐久性和生物相容性。黏合剂需要在潮湿（汗液）、动态（拉伸）的环境下保持稳定的粘附力，同时不能引起皮肤过敏或损伤。器件本身也需要能抵抗反复机械形变带来的疲劳和性能衰减³。UCSD 团队发表的一项研究展示了其贴片在经历运动、淋浴等日常活动后仍能保持 24 小时稳定工作的能力，这代表了在该方向上的重要进展¹⁶。

4.2 系统级集成与微型化

- **功耗与电源管理**：超声成像，特别是需要高帧率的多普勒或三维成像模式，是能量密

集型应用。为小巧的贴片提供持久的电力是一个巨大的瓶颈。目前已报道的无线原型机，其连续工作时间有限，例如 USoP 为 12 小时¹⁸。虽然可以通过占空比（duty-cycling）等方式间歇性工作以节省电量，但这会牺牲数据的时间连续性³。开发更高能量密度的柔性电池和更高效的管理电路是该领域亟待解决的问题。

- **数据带宽与无线传输：**一个多阵元的超声贴片每秒产生的原始射频（RF）数据量是惊人的，每个通道的数据率可达数十兆比特每秒（Mbps）。要将如此庞大的数据流实时、无损地无线传输出去，需要高速（如 802.11ac Wi-Fi）和高功耗的通信链路，这与设备小型化、低功耗的目标背道而驰³。因此，在贴片上进行**本地化的数据预处理和压缩**成为必然趋势，即在传输前就利用板载芯片对数据进行初步处理，只传输最关键的信息。

4.3 数据处理与解读：人工智能的必要性

可穿戴超声产生的连续、海量数据，引出了一个核心问题：如何从这些数据中提取有临床价值的信息？人工智能（AI）和机器学习（ML）在此扮演了不可或缺的角色，它并非一个锦上添花的附加功能，而是使这项技术得以实现的核心组成部分。

- **海量数据挑战：**连续监测一天产生的数据量，可能是传统检查的数千倍，远超人力所能分析的范畴。AI 算法的首要任务是从混杂着噪声和伪影的庞大数据流中，自动识别出有意义的临床信号³。
- **AI/ML 的关键作用：**
 - **信号与图像重建：**利用深度学习模型，可以从因功耗和带宽限制而采集的稀疏或低质量数据中，重建出高清晰度的图像。这对于在资源受限的穿戴设备上实现高质量成像至关重要¹⁴。
 - **自动化目标追踪：**如前所述，开发能够自动识别并锁定移动解剖目标（如跳动的动脉）的 AI 算法，是解决运动伪影问题的关键。这通常需要一个机器学习模型来实时分析回波信号，动态调整数据采集区域，确保传感器始终“对准”目标¹⁸。
 - **自动化解读与分析：**训练 AI 模型自动进行图像分割（如勾画心腔轮廓）、提取

临床参数（如血流速度、心输出量），甚至识别异常模式并向医生发出警报。为了让模型能够适用于不同个体，研究人员还采用了**域自适应（domain adaptation）**等先进技术，使在一个受试者身上训练的模型能够以最少的再训练成本成功应用于其他受试者，提高了模型的泛化能力³²。

这种趋势表明，硬件（传感器）的局限性正越来越多地通过软件（AI 算法）来弥补。未来的竞争优势将不仅体现在材料或器件设计上，更体现在集成 AI 算法的复杂度和效率上。一个公司的 AI 技术栈可能成为其最核心的知识产权。

4.4 安全性与法规障碍

- **长期使用的生物效应**：这是监管机构和临床医生最为关注的问题。超声波长时间作用于人体，可能产生潜在的生物学效应。**热效应**（组织升温）和**非热效应**（如空化）的累积风险需要被严格评估。现有的安全标准和指南，如热指数（TI）和机械指数（MI），是基于传统诊断超声的短时程（分钟级）应用场景制定的，它们是否完全适用于长时程（小时甚至天级）的穿戴式应用，尚需进一步研究和验证³。
- **质量控制 (QC) 与校准**：当设备由患者在院外环境自行使用时，如何保证其测量的准确性和安全性是一个巨大挑战。在没有专业技师和标准 QC 体模的情况下，设备的老化、性能漂移、用户佩戴位置不当等因素都可能影响结果的可靠性³。为了建立临床信任，研究团队必须主动解决这些问题。UCSD 团队开展的为期一年的校准稳定性跟踪研究，正是为了证明其设备在长期使用中的可靠性，为未来的监管审批和临床采纳设定了高标准¹⁶。

第五章 产业化与商业格局

在顶尖学术研究的推动下，可穿戴超声技术正逐步走出实验室，进入商业化探索阶段。一批初创公司开始涌现，它们分别瞄准诊断和治疗两大市场，并采取了不同的市场切入策略。

5.1 国际商业化案例（诊断领域）

诊断类可穿戴超声的商业化路径，呈现出首先切入高风险、高价值的院内急重症监护场景，再逐步向院外慢性病管理扩展的趋势。

- **Flosonics Medical (加拿大) :**

- **产品：**FloPatch，号称“全球首款无线可穿戴多普勒超声设备”⁴⁵。
- **临床定位：**专注于 ICU 等急重症环境下的血流动力学评估，特别是为脓毒症休克等危重患者的液体复苏提供精准、实时的决策支持⁴⁵。这是一个典型的“高精尖”市场定位，其临床需求迫切，价值主张清晰（替代或补充有创监测），且支付体系相对成熟。
- **商业状态：**已获得 FDA 批准，并成功商业化。公司已完成多轮融资，包括 2000 万美元的 C 轮融资和后续的风险债务融资，显示出资本市场对其技术和市场策略的认可⁴⁵。

- **Sonus Microsystems (加拿大) :**

- **产品：**一款由人工智能驱动的、用于远程心脏监测（移动心超）的可穿戴贴片⁴⁸。
- **核心技术：**基于其专有的聚合物基 MEMS 换能器技术（“Sonus Array Technology”），旨在提供高分辨率的院外心脏成像⁴⁸。
- **商业状态：**产品尚处开发阶段。公司已与 Providence Health Care Ventures 等医疗投资机构建立战略合作关系，以加速其产品的开发、验证和商业化进程，表明其技术获得了来自临床终端的强烈兴趣和支持⁴⁸。

- **Pulsify Medical (比利时) :**

- **产品：**“Smart Patch”，一款旨在同时服务于院内和家庭场景的实时心脏监测贴片⁵¹。
- **技术背景：**该公司是欧洲顶尖微电子研究中心 imec 和医学影像算法强校鲁汶大学（KU Leuven）的共同衍生公司，拥有强大的技术基因⁵¹。
- **商业状态：**已完成 A 轮融资，筹集了至少 540 万欧元，为其技术研发和临床试

验提供了资金保障⁵¹。

5.2 商业化案例（治疗领域）

治疗领域的商业化模式与诊断领域截然不同，其产品更接近于一种可长期使用的处方医疗器械。

- **ZetrOZ Systems (美国) :**

- **产品：**sam[®] (Sustained Acoustic Medicine) 系列设备，是可穿戴超声治疗领域最成熟的商业典范²⁶。
- **临床定位：**专注于利用长时程低强度连续超声（LICUS）进行疼痛管理和软组织损伤修复，主要适应症包括骨关节炎、肌腱炎、运动损伤等²³。
- **商业状态：**已获得 FDA 批准作为处方家庭使用设备，拥有超过 30 项临床研究支持，治疗患者超过 30 万人，并已成功进入医保报销体系。ZetrOZ Systems 已成为一家拥有稳定收入的成熟企业，其成功验证了可穿戴超声在治疗市场的商业可行性²⁶。

5.3 国内（中国）产业化努力

中国的产业化策略展现出与欧美以风险投资驱动的初创公司模式不同的特点，更侧重于由政府 and 顶尖高校主导，构建完整的产业生态系统。

- **浙江清华柔性电子技术研究院模式：**该研究院不仅是研发中心，更是产业“发动机”。通过建立公共的中试平台和制造产线，它为众多中小型柔性电子企业提供了关键的工程化和试生产能力，降低了初创公司的技术和资金门槛。通过这种模式，研究院成功在嘉兴地区孵化和吸引了数十家上下游企业，形成了产业集群效应⁴¹。
- **衍生公司：**在这种生态系统的支持下，一些商业实体开始涌现。例如，由清华博士创立的迈沐智能公司，专注于将智能检测技术商业化，其产品已应用于工业领域⁴¹。这表明，中国的策略是通过打造一个强大的技术和制造平台，来系统性地催生一批商业化公司。

表 5.1 全球主要商业化可穿戴超声设备概览

公司(国家)	产品名称	技术/模式	目标临床应用	监管状态	融资/商业状态	商业模式
ZetrOZ Systems (美国)	sam®	治疗性 LICUS	疼痛/骨关节炎/软组织修复	FDA 批准 (治疗类)	盈利, 已商业化	处方器械 销售及耗材
Flosonics Medical (加拿大)	FloPatch	诊断性多普勒超声	ICU 液体管理/血流动力学	FDA 批准 (诊断类)	C 轮融资 (\$20M), 已商业化	医院系统 销售
Sonus Microsystems (加拿大)	Sonus Patch	诊断性成像 (聚合物 MEMS)	远程心脏病学/心衰监测	开发中/合作验证	种子轮/战略合作	器械销售/ 数据服务
Pulsify Medical (比利时)	Smart Patch	诊断性成像 (PZT)	院内/外心脏监测	开发中	A 轮融资 (€5.4M)	器械销售/ 数据服务

第六章 未来发展与展望

可穿戴超声技术正站在从技术验证迈向广泛应用的关键节点。展望未来, 其发展将呈现出技术深度集成、应用场景持续拓展和核心算法不断演进的趋势。

6.1 技术发展轨迹

- **完全的“片上系统” (USoP)** : 未来的终极目标是实现所有功能部件——包括传感器、处理单元、电源、无线通信甚至显示——都集成在一张超薄、完全自主的柔性贴片

上。徐升教授实验室的 USoP 是朝此方向迈出的关键一步，未来的研发将致力于进一步提升集成度、降低功耗和延长续航时间¹⁸。

- **多模态融合传感**：单一参数的监测往往不足以全面评估复杂的生理状态。未来的可穿戴设备将趋向于在同一平台上集成多种传感技术。例如，将超声贴片与用于心电监测的 ECG 电极、用于体温监测的温度传感器、以及用于汗液中生物标志物分析的化学传感器相结合，从而提供一个包含血流动力学、电生理和生化信息的、更全面的个人健康视图¹¹。
- **诊疗一体化 (Theranostics)**：这是该领域最令人兴奋的前景之一，即诊断与治疗的闭环融合。可以设想未来的智能贴片能够实时监测到指示炎症的生物标志物，然后自动启动局部的超声治疗程序，或触发贴片上的微针阵列进行精准的药物递送，实现个性化、自动化的疾病干预¹³。

6.2 临床与消费应用的拓展

- **从医院到家庭的场景延伸**：虽然当前诊断类产品的商业切入点是院内急重症监护，但其长远愿景是成为管理慢性病（如心力衰竭、高血压、肾病等）的家庭健康工具，实现从被动治疗到主动预防的转变¹⁸。
- **医学影像的普惠化**：随着人工智能辅助操作和自动化解读技术的发展，可穿戴超声有望大幅降低使用门槛。未来，非专业的基层医生甚至患者本人，可能都可以在 AI 的引导下完成一次高质量的超声检查，这将极大地推动即时诊断（POCUS）的普及，尤其是在医疗资源匮乏的地区¹。
- **超越医疗健康**：技术的应用边界将不止于医疗。在专业体育科学领域，可穿戴超声可用于实时监测运动员的肌肉疲劳、募集模式和损伤风险，以优化训练和预防伤害²¹。此外，在兽医学、先进人机交互等领域也存在广阔的应用空间²⁰。

6.3 生成式 AI 与未来算法

当前的人工智能主要用于分析和解读数据，而下一代**生成式 AI（Generative AI）**将为该领域带来新的可能性。例如，利用生成式 AI 技术，可以根据少量真实的临床数据，生成海量的、多样化的合成超声数据，用于训练更鲁棒、泛化能力更强的诊断模型，从而解决医疗领域高质量标注数据稀缺的难题⁴²。此外，生成式 AI 还可用于超分辨率图像增强、伪影去除，甚至构建能够基于连续生理数据流的细微变化来预测未来临床事件（如心衰急性发作）的预测模型。

6.4 总结

可穿戴超声技术正从一个前沿的科学概念，迅速演变为经过临床验证、初具商业规模的现实。它通过将传统超声的强大探测能力与柔性电子的便携性、舒适性相结合，有望从根本上改变我们监测和管理健康的方式。这一转变的核心驱动力在于两个方面：一是**硬件的持续创新**，包括新材料、新器件结构和系统集成技术的突破；二是**软件（人工智能）的深度融合**，AI 不仅是数据分析工具，更是克服硬件物理限制、实现设备智能化的关键。

未来，该领域的成功将取决于能否有效解决功耗、数据处理、长期安全性和可靠性等核心技术瓶颈，并建立起清晰的临床价值主张和可行的商业模式。随着技术的不断成熟和应用场景的持续拓展，可穿戴超声贴片有望将医疗实践从当前以疾病为中心的、偶发式的诊疗模式，推向以健康为中心的、连续主动的管理新时代。

第七章 参考文献

6

<https://today.ucsd.edu/story/researchers-develop-clinically-validated-wearable-ultrasound-patch-for-continuous-blood-pressure-monitoring>

1

<https://www.mdpi.com/2075-1702/11/3/325>

32

<https://www.nibib.nih.gov/news-events/newsroom/wireless-wonder-wearable-ultrasound->

patch-goes-completely-cable-free

3

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11416895/>

4

<https://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/51044-wearable-ultrasound-patch-enables-continuous-noninvasive-monitoring-of-cerebral-blood-flow>

13

https://www.researchgate.net/publication/381756354_See_how_your_body_works_in_real_time_-_wearable_ultrasound_is_on_its_way

53

https://www.stdaily.com/web/gdxw/2024-11/21/content_261906.html

7

<https://hit-webinar.com/>

2

https://most.gov.cn/ztl/gnwkjdt/202302/t20230221_184658.html

5

<https://news.bioon.com/article/1fa882e51856.html>

22

<https://conformabledecoders.media.mit.edu/>

37

<https://xugroup.eng.ucsd.edu/group-news/>

20

<https://today.ucsd.edu/story/wearable-ultrasound-tech-for-muscle-monitoring-opens-new-possibilities-in-healthcare-and-human-machine-interfaces>

18

<https://scitechdaily.com/engineers-develop-the-first-fully-integrated-wearable-ultrasound-system-for-deep-tissue-monitoring/>

19

<https://www.medicaldesignandoutsourcing.com/ucsd-researchers-wearable-ultrasound-device/>

48

<https://www.mpo-mag.com/breaking-news/sonus-microsystems-providence-health-care-ventures-collaborate-on-cardiac-ultrasound-tech/>

51

<https://www.imec-int.com/en/press/pulsify-medical-closes-second-round-series-funding-eur-54-million-wearable-ultrasound-heart>

45

<https://www.businesswire.com/news/home/20250303854231/en/Flosonics-Medical-Secures-%247.5-Million-CAD-Venture-Debt-from-RBCx-to-Scale-Transformative-Wearable-Ultrasound-Technology>

47



<https://www.massdevice.com/flosonics-raises-20m-wearable-ultrasound-patch/>

49

<https://www.businesswire.com/news/home/20250422738622/en/Sonus-Microsystems-Announces-Partnership-with-Providence-Health-Care-Ventures-to-Advance-Wearable-Cardiac-Ultrasound-Technology>

11

<https://www.plasticsengineering.org/2023/05/diagnostics-to-go-researchers-eye-wearable-heart-scan-patch-000303/>

1

<https://www.mdpi.com/2075-1702/11/3/325>

23

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7802764/>

25

<https://www.mdpi.com/2077-0383/10/12/2698>

21

https://xugroup.eng.ucsd.edu/wp-content/uploads/2024/03/90_IEEE.pdf

24

<https://www.ultrasoundandmrforcancertherapy.ca/wp-content/uploads/2017/03/2012-12..pdf>

42

https://www.researchgate.net/publication/389799049_Generative_AI_Techniques_for_Ultrasound_Image_Reconstruction

14

<https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/1907.02994>

43

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36635192/>

44

<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1634543/7ha3yampjv3zl0o1usv6brjb5.Walter%20Arthur%20Simson%20final.pdf>

9

https://xugroup.eng.ucsd.edu/wp-content/uploads/2018/12/52_Nat_Biomed_Eng.pdf

36

<https://scholar.google.com/citations?user=87EG-zcAAAAJ&hl=en>

16

https://www.researchgate.net/publication/385981458_Clinical_validation_of_a_wearable_ultrasound_sensor_of_blood_pressure

17

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39567702/>

35

<https://www.sciencedaily.com/releases/2024/10/241031124459.htm>

34



<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37217752/>

38

<https://news.mit.edu/topic/wearables?type=2>

30

<https://www-prod.media.mit.edu/people/canand/publications/>

39

<https://www.cbsnews.com/tag/mit/>

31

<https://www.researchgate.net/profile/Canan-Dagdeviren>

26

<https://samrecover.com/>

54

<https://zetroz.com/sam-sport/>

27

<https://samrecover.com/sam-treatment/sam/>

28

<https://www.accessnewswire.com/newsroom/en/healthcare-and-pharmaceutical/zetroz-systems-samr-wearable-ultrasound-helps-osteoarthritis-patients-1029539>

41

<https://www.tsinghua-zj.edu.cn/news/comprehensive/zhe-jiang-qing-hua-rou-dian-yuan-gai-ge-shi-jian-ru-xuan-chuang-xin-zhe-jiang-dian-xing-an-li>

15

http://ifet-tsinghua.com/xyxw/info_itemid_433.html

40

<https://fet.tsinghua.edu.cn/>

12

https://www.cas.cn/kj/202305/t20230505_4886068.shtml

33

https://www.cas.cn/kj/202305/t20230523_4889016.shtml

8

<https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2023/6/502946.shtm>

10

https://www.siat.ac.cn/siatxww/kyjz/202412/t20241213_7457313.html

32

<https://www.nibib.nih.gov/news-events/newsroom/wireless-wonder-wearable-ultrasound-patch-goes-completely-cable-free>

22

<https://conformabledecoders.media.mit.edu/>

3

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11416895/>

46

<https://www.flosonicsmedical.com/>

50

<https://www.sonusmicrosystems.com/>

52

<https://pulsify-medical.com/>

32

<https://www.nibib.nih.gov/news-events/newsroom/wireless-wonder-wearable-ultrasound-patch-goes-completely-cable-free>

29

<https://zetroz.com/>

引用的著作

1. Review on Wearable System for Positioning Ultrasound Scanner - MDPI, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/3/325>
2. 科学家开发出一种新型可穿戴超声贴片设备, 可实现对心脏的实时动态监测, 访问时间为 六月 19, 2025, https://most.gov.cn/ztzl/gnwkjdt/202302/t20230221_184658.html
3. Clinical, Safety, and Engineering Perspectives on Wearable ..., 访问时间为 六月 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11416895/>
4. Wearable Ultrasound Patch Enables Continuous, Noninvasive Monitoring of Cerebral Blood Flow - Medical Design Briefs, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.medicaldesignbriefs.com/component/content/article/51044-wearable-ultrasound-patch-enables-continuous-noninvasive-monitoring-of-cerebral-blood-flow>
5. Nature : 新开发的可穿戴超声贴片可连续、无创监测大脑血流 - 生物谷, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://news.bioon.com/article/1fa882e51856.html>
6. Researchers Develop Clinically Validated, Wearable Ultrasound Patch for Continuous Blood Pressure Monitoring - UC San Diego Today, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://today.ucsd.edu/story/researchers-develop-clinically-validated-wearable-ultrasound-patch-for-continuous-blood-pressure-monitoring>
7. HIT Webinar, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://hit-webinar.com/>
8. 全球首个!“95 后”中国博士生历时 5 年完成, 计划回国执教 - 新闻- 科学网, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2023/6/502946.shtm>
9. A wearable ultrasonic sensor of blood pressure - Sheng Xu, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://xugroup.eng.ucsd.edu/wp->



[content/uploads/2018/12/52_Nat_Biomed_Eng.pdf](#)

10. 新型超灵敏宽带透明超声换能器助力高质量光声及声光多模态成像, 访问时间为 六月 19, 2025, https://www.siat.ac.cn/siatxww/kyjz/202412/t20241213_7457313.html
11. Diagnostics to Go: Researchers Eye Wearable Heart-Scan Patch - Plastics Engineering, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.plasticsengineering.org/2023/05/diagnostics-to-go-researchers-eye-wearable-heart-scan-patch-000303/>
12. 可穿戴超声贴片监测深层组织 - 中国科学院, 访问时间为 六月 19, 2025, https://www.cas.cn/kj/202305/t20230505_4886068.shtml
13. See how your body works in real time — wearable ultrasound is on its way - ResearchGate, 访问时间为 六月 19, 2025, https://www.researchgate.net/publication/381756354_See_how_your_body_works_in_real_time_-_wearable_ultrasound_is_on_its_way
14. [1907.02994] Deep learning in Ultrasound Imaging - ar5iv - arXiv, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/1907.02994>
15. 图 1. 柔性多普勒超声电子器件原理及结构示意 - 浙江清华柔性电子技术研究院, 访问时间为 六月 19, 2025, http://ifet-tsinghua.com/xyxw/info_itemid_433.html
16. Clinical validation of a wearable ultrasound sensor of blood pressure - ResearchGate, 访问时间为 六月 19, 2025, https://www.researchgate.net/publication/385981458_Clinical_validation_of_a_wearable_ultrasound_sensor_of_blood_pressure
17. Clinical validation of a wearable ultrasound sensor of blood pressure - PubMed, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39567702/>
18. Engineers Develop the First Fully Integrated Wearable Ultrasound System for Deep-Tissue Monitoring - SciTechDaily, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://scitechdaily.com/engineers-develop-the-first-fully-integrated-wearable-ultrasound-system-for-deep-tissue-monitoring/>
19. UCSD researchers develop wearable ultrasound device - Medical Design & Outsourcing, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.medicaldesignandoutsourcing.com/ucsd-researchers-wearable-ultrasound-device/>
20. Wearable Ultrasound Tech for Muscle Monitoring Opens New Possibilities in Healthcare and Human-machine Interfaces - UC San Diego Today, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://today.ucsd.edu/story/wearable-ultrasound-tech-for-muscle-monitoring-opens-new-possibilities-in-healthcare-and-human-machine-interfaces>
21. Clinical, Safety and Engineering Perspectives on Wearable Ultrasound



- Technology: A Review - Sheng Xu, 访问时间为 六月 19, 2025,
https://xugroup.eng.ucsd.edu/wp-content/uploads/2024/03/90_IEEE.pdf
22. Conformable Decoders, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://conformabledecoders.media.mit.edu/>
23. Therapeutic ultrasound: myths and truths for non-portable in-clinic and portable home use ultrasound, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7802764/>
24. Overview of Therapeutic Ultrasound Applications and Safety Considerations, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.ultrasoundandmrforcancertherapy.ca/wp-content/uploads/2017/03/2012-12..pdf>
25. Low-Intensity Continuous Ultrasound Therapies—A Systematic Review of Current State-of-the-Art and Future Perspectives - MDPI, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.mdpi.com/2077-0383/10/12/2698>
26. Sustained Acoustic Medicine: Home, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://samrecover.com/>
27. sam® 2.0 - Sustained Acoustic Medicine, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://samrecover.com/sam-treatment/sam/>
28. ZetrOZ Systems' sam(R) Wearable Ultrasound Helps Osteoarthritis Patients Return to Regular Activities - ACCESS Newswire, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://www.accessnewswire.com/newsroom/en/healthcare-and-pharmaceutical/zetroz-systems-samr-wearable-ultrasound-helps-osteoarthritis-patients-1029539>
29. ZetrOZ Systems – Healing Technologies, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://zetroz.com/>
30. Publications < Canan Dagdeviren - MIT Media Lab, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://www-prod.media.mit.edu/people/canand/publications/>
31. Canan DAGDEVIREN | Professor (Associate) | Doctor of Philosophy | Massachusetts Institute of Technology, Cambridge | MIT | MIT Media Laboratory | Research profile - ResearchGate, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://www.researchgate.net/profile/Canan-Dagdeviren>
32. Wireless wonder: wearable ultrasound patch goes completely cable ..., 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.nibib.nih.gov/news-events/newsroom/wireless-wonder-wearable-ultrasound-patch-goes-completely-cable-free>
33. 首个完全集成的可穿戴超声系统问世 - 中国科学院, 访问时间为 六月 19, 2025,
https://www.cas.cn/kj/202305/t20230523_4889016.shtml
34. A fully integrated wearable ultrasound system to monitor deep tissues in moving



- subjects - PubMed, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37217752/>
35. Wearable ultrasound tech for muscle monitoring opens new possibilities in healthcare and human-machine interfaces | ScienceDaily, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.sciencedaily.com/releases/2024/10/241031124459.htm>
36. Sheng Xu - Google Scholar, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://scholar.google.com/citations?user=87EG-zcAAAAJ&hl=en>
37. News – Xu Research Group | UC San Diego, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://xugroup.eng.ucsd.edu/group-news/>
38. Wearables | MIT News | Massachusetts Institute of Technology, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://news.mit.edu/topic/wearables?type=2>
39. MIT news - Today's latest updates, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://www.cbsnews.com/tag/mit/>
40. 清华大学柔性电子技术实验室, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://fet.tsinghua.edu.cn/>
41. 浙江清华柔电院改革实践入选创新浙江典型案例, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://www.tsinghua-zj.edu.cn/news/comprehensive/zhe-jiang-qing-hua-rou-dian-yuan-gai-ge-shi-jian-ru-xuan-chuang-xin-zhe-jiang-dian-xing-an-li>
42. Generative AI Techniques for Ultrasound Image Reconstruction - ResearchGate, 访问时间为 六月 19, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/389799049_Generative_AI_Techniques_for_Ultrasound_Image_Reconstruction
43. Ultrasound Signal Processing: From Models to Deep Learning - PubMed, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36635192/>
44. Physics-Informed Deep Learning for Advanced Medical Ultrasound - mediaTUM, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1634543/7ha3yampjv3zl0o1usv6brjb5.Walter%20Arthur%20Simson%20final.pdf>
45. Flosionics Medical Secures \$7.5 Million CAD Venture Debt from RBCx to Scale Transformative Wearable Ultrasound Technology - Business Wire, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://www.businesswire.com/news/home/20250303854231/en/Flosionics-Medical-Secures-%247.5-Million-CAD-Venture-Debt-from-RBCx-to-Scale-Transformative-Wearable-Ultrasound-Technology>
46. Flosionics Medical: Home, 访问时间为 六月 19, 2025,
<https://www.flosionicsmedical.com/>
47. Flosionics raises \$20M for wearable ultrasound patch - MassDevice, 访问时间为



- 六月 19, 2025, <https://www.massdevice.com/flosonics-raises-20m-wearable-ultrasound-patch/>
48. Sonus Microsystems, Providence Health Care Ventures Collaborate on Cardiac Ultrasound Tech - Medical Product Outsourcing, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.mpo-mag.com/breaking-news/sonus-microsystems-providence-health-care-ventures-collaborate-on-cardiac-ultrasound-tech/>
49. Sonus Microsystems Announces Partnership with Providence Health Care Ventures to Advance Wearable Cardiac Ultrasound Technology - Business Wire, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.businesswire.com/news/home/20250422738622/en/Sonus-Microsystems-Announces-Partnership-with-Providence-Health-Care-Ventures-to-Advance-Wearable-Cardiac-Ultrasound-Technology>
50. Sonus Microsystems | wearable cardiac ultrasound imaging, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.sonusmicrosystems.com/>
51. Pulsify Medical closes second round Series A funding of EUR 5.4 million for wearable ultrasound heart monitor patch | imec, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://www.imec-int.com/en/press/pulsify-medical-closes-second-round-series-funding-eur-54-million-wearable-ultrasound-heart>
52. pulsify.medical | monitoring technology, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://pulsify-medical.com/>
53. 科技新突破 | 经临床验证的可穿戴超声波贴片问世 - 科技日报, 访问时间为 六月 19, 2025, https://www.stdaily.com/web/gdxw/2024-11/21/content_261906.html
54. sam® Sport - ZetrOZ Systems, 访问时间为 六月 19, 2025, <https://zetroz.com/sam-sport/>