人工皮肤的逆向设计

Zhiguang Liu[1,2,8], MinkunCai[1,8], ShendaHong[3,8], Junli Shi[1,8], SaiXie[1], Chang Liu[2], HuifengDu[2], JamesD. Morin[2], Gang Li[1], Wang Liu[7], HongWang[1], Ke Tang[6], Nicholas X. Fang[2,5]*, Chuan Fei Guo[1,4]*

作者单位：

[1] 南方科技大学材料科学与工程系，中国深圳 518055

[2] 麻省理工学院机械工程系，美国马萨诸塞州剑桥 02139

[3] 北京大学国家健康数据科学研究院，中国北京 100191[4] MIT和南方科技大学机械工程研究与教育中心，南方科技大学，中国深圳 518055[5] 香港大学机械工程系，中国香港 999077[6] 广东省类脑智能计算重点实验室，南方科技大学计算机科学与工程系，中国深圳 518055[7] 中国科学技术大学近代力学系，中国合肥 231600。[8] 这些作者贡献相同：Zhiguang Liu、Minkun Cai、Shenda Hong、Junli Shi。*通讯请联系 N.X.F.（电子邮件：nicfang@mit.edu）或 C.F.G.（电子邮件：guocf@sustech.edu.cn）

模仿人体皮肤机械感受器的感知功能，人工皮肤或柔性压力传感器能够将触觉刺激转换为定量电信号[1-3]。此类器件的传统设计方法遵循从结构到性能的正向流程，

依赖反复试错的实验/仿真，往往需要数月甚至更久，才能为某种特定材料确定一个可行方案。目标导向的逆向设计具有高得多的产出效率，已在其他领域证明有效[4,5]，但由于难以获取大数据集，这种方法尚未应用于人工皮肤。本文报告了一种基于小数据集机器学习的人工皮肤性能到结构逆向设计，其综合效率至少比传统流程高四个数量级。该逆向流程可在数小时内预测数百种方案，克服线性响应中的固有信号饱和问题，而且这些方案适用于多种材料。我们的研究结果表明，由小数据集实现的逆向设计是一种高效且强大的工具，可满足人工皮肤的多种应用需求，并有望推动智能机器人、先进医疗保健和人机界面等领域的发展。

关键词：逆向设计、人工皮肤、机器学习、线性度。

正文:

触觉是人类在皮肤机械感受器[6]的作用下与周围环境互动的最重要感官之一。模仿机械感受器以收集触觉信息的人工皮肤或柔性压力传感器阵列正在迅速发展，并广泛推动了机器人学[7,8]，、健康监测[9,10]，、人机界面[11,12], 和元宇宙[13,14]等领域的发展。设计和制造柔性压力传感器的传统方法基于正向流程——通过不确定的试错过程，凭经验探索材料和结构对传感器性能的协同效应（图1a），通常需要开展大量实验。 然而，传统流程往往需要数月甚至数年才能确定一种优化的器件结构，而该结构通常仅对某一种特定材料有效，性能偏差仍可能发生（图1b）[15,16]。此外，在处理复杂问题时，传统流程的效率会进一步降低，例如设计具有综合性能（灵敏度、线性度、工作范围等）的传感器。

逆向设计是一种反转传统设计流程的方法，以期望的输出为目标来预测输入参数。基于机器学习（ML）的逆向设计已在力学、光子学和材料科学领域取得良好进展[17-19]，但在柔性传感器方面仍缺少成功案例。主要原因在于，器件的多学科关联（材料-微结构-性能）使问题更加复杂，因而需要大量数据（数千甚至数百万）来探索整个设计范围；然而，实验和/或模拟数据的获取既耗时又不可靠（图1b）。因此，要推动柔性电子学领域的发展，迫切需要减少数据集规模，将其降至最小数量，以便构建目标导向的逆向设计模型。

在此，我们报告了一种高效的基于机器学习的逆向流程，用于设计具有目标特性的柔性压力传感器。该模型基于仅包含 100 个案例的小型数据集构建。我们使用一种双-

采用多管齐下的方法，尽可能减少对数据的需求（图 1c）：我们通过应用降阶模型，以解析方式确定内部约束，从而无需进行任何高成本的实验和仿真，缩小设计范围；同时，我们提出“跳跃选择”方法，并将其与迭代代理模型相结合，提高数据收集效率，使效率达到传统随机搜索的六倍。数小时内，我们便成功预测出数百种适用于多种材料的有效方案；相比之下，传统流程需要数月甚至数年才能为一种材料确定一个方案。

在本研究中，我们利用基于机器学习的逆向流程预测一系列结构，以验证该流程在解决柔性压力传感器非线性响应问题上的有效性。非线性源于软材料的固有刚化效应，而这种效应与其不可压缩性有关（扩展数据图 1）。随着压力增加，这种刚化效应会导致信号饱和（即非线性响应），并因此造成工作范围狭窄[20,21]。在工业应用中，非线性信号通常需要额外校准，从而增加传感系统中电路和算法的复杂性[2,22]。目前只有少数研究致力于开发能够抑制信号饱和的微结构和材料，但这些研究均基于传统的正向设计[23-27]。在本研究中，我们采用柱状突起（柔性压力传感器中常用的一种几何形状[28-31]）作为微结构模型（图 1d）。我们使用几何参数——两端的半径 x_1, y_1 和 x_2, y_2，以及长度 l——来定义该微结构的轮廓。我们引入离子电子传感机制，其中电容信号幅值（C）与电极和微结构离子层之间的界面接触面积（A）成正比，即 C~A，从而实现接触面积调控（扩展数据图 2）。这一简单的接触面积模型使我们的方法适用于各种离子材料。

构建机器学习模型时，数据集应涵盖设计范围各个角落的案例，因此，通过内部约束缩小设计范围，是精简数据集的有效方法。如图 2a 所示，微结构受载时，其顶面会演变为一个平坦的接触区域，其面积接近水平横截面积（CSA）。因此，我们将 CSA 视为 A 的降阶模型，用于探究压力作用下的结构变形，并确定几何参数之间的内部约束。

尽管不同微结构的 CSA 与其 A 对应项并未完全重合，但随着压缩距离 (d) 的增加，它们呈现出相似的增长趋势（图 2b）。这种趋势可用 CSA-d 曲线的凸性表示，其定义如下（补充图 1）：

$$\text{Convexity} = (CSA_{y_1/2} + CSA_0) - 2 \cdot CSA_{y_1/4} \quad (1)$$

该定义源自数学中凸函数的定义[32]。图 2c 展示了通过扫描几何参数 x_1/x_2 和 y_1/y_2得到的凸性分布图。负凸性、近零凸性和正凸性这三种代表性情况分别标记为 A、B 和 C，其 CSA-d 曲线如图 2b 所示。具体而言，正凸性曲线（情况 C）表明，随着结构刚化效应的增强，CSA 的增长逐渐趋于抵抗压力。图 2d 展示了沿分布图 x 轴和 y 轴的平均凸性值。曲线显示，正凸性情况主要位于 $y_1>y_2$ 和 $x_1<x_2$, 的区域，因此采用这两条边界将设计范围合理地限制为原范围的 1/4。此外，还施加了另一项内部约束 $y/x\leq4$，以避免发生屈曲，因为屈曲会导致接触面积突然变化（扩展数据图 3）。

一种高效的数据收集方法，我们称之为“跳跃选择”，能够以更小的数据集进一步学习输入输出关系。随机选取的初始数据集（图 2e，左上）构建了一个代理模型，这是一种用于生成估算数据的机器学习方法，作为代理代替原始数据。

获得难以获取的真实数据[33]。该模型可在数秒内快速估算一百万种几何结构的属性，随后通过“跳跃式选择”挑选几何结构，作为数据集的补充，以增强数据多样性（详情见方法、补充文本 1 和图 2）。图 2e 展示了分别通过跳跃式选择和传统随机选择挑选的数据集，以供比较。几何结构分为合格组（R^2>0.995）和不合格组（R^2<0.995），其中 R^2 是所关注压力范围（0-300 千帕）内的线性拟合指标，该范围充分涵盖了灵巧操作和健康监测[22,34]中的应用需求。值得注意的是，观察到线性度与凸度呈正相关（图 2e 左下部分和补充图 3），证明了降阶模型的有效性。经过五轮迭代（共 100 个案例，耗时数小时）后，合格几何结构的比例显著从 15% 提高至 45%，这是因为跳跃式选择能够在全局范围内筛选出合格案例。当阈值进一步收紧至 0.999 时，随机数据集中仅有两种几何结构合格，不足以建立有效模型。相比之下，跳跃式选择数据集的效率提高了六倍（十二个案例）（补充图 4）。其中呈现线性响应的四个案例进一步通过实验进行了验证（补充图 5）。

基于选定的Small数据集，我们构建了一个机器学习模型，用于估计输入几何参数（x_1, y_1, x_2, y_2）与输出传感性能之间的关系，并进一步逆向预测可能呈现线性响应的微结构。图2f 展示了跳跃选择数据集中一个代表性微结构（百万种情况中的优选结构）的模拟压缩性能，以及其在随机数据集中的对应结构。尽管在这两种情况下，由于增硬效应，抗压能力均随位移增加而增强，但跳跃选择数据集中的微结构呈现出与接触面积-位移曲线（红线）一致的增长趋势，从而实现了超高线性度（R^2=0.999）。相比之下，随机数据集中的微结构仍未解决这种不匹配问题

（蓝线）因为模型被少数符合条件的案例误导，因此该结构仍表现出饱和非线性响应。

我们通过电化学蚀刻实验探究微结构界面的接触面积演变。离子层的微结构采用3D打印环氧模具（补充图6）进行模板复制制备，形状具有高度保真度（补充图7和图8）。该装置由沉积在硅片上的铜膜层（作为阳极）、平面金属压头（作为阴极）以及置于阳极和阴极之间的离子凝胶（聚乙烯醇-磷酸，PVA-H_3PO_4）微结构层（作为电解质）组成（图2g）。在铜膜上施加加载压力和电压（2 V）后，只有与微结构电解质接触的区域会被氧化并发生颜色变化（补充文本2、图9和图10）。图2g展示了两种具有线性响应和非线性响应的微结构在特定压力（50、100、200和300千帕）下形成的蚀刻图案（图2f），其与仿真结果（补充图11）高度吻合。

宽度（x）和高度（y）的梯度是接触面积调控的关键参数。具体而言，微结构的高度梯度控制接触区域的长度，即只有高于加载平面的部分才会与顶部电极接触。宽度梯度决定每个接触段对整体面积的贡献权重。当这两个梯度按照机器学习模型的预测进行设计后，可以观察到接触面积呈梨形二维扩展，如图2g中白色虚线椭圆所标示。由于权重（宽度）较小，接触从头部一侧缓慢开始。随着压缩距离增加，这种稳定微结构中会出现刚化效应，使压力呈现正凸性趋势；与此同时，新加入的、具有更大权重的接触区域使整体接触面积能够追上压力，从而补偿信号饱和并产生线性响应。没有这种协同梯度的微结构将无法补偿这种不匹配。当纵向没有扩展时（图中白色三角形。

2g），宽度梯度并不会改变接触面积的增长趋势。在缺乏宽度梯度的情况下，接触长度的增加在一定程度上补偿了这种不匹配，但仍滞后于压力增量，同样未能实现线性响应（扩展数据图4）。

该逆向设计能够高效预测具有线性响应的离子电子传感器几何形状。图 3a 展示了前 1000 个具有目标性能的预测解的广泛分布。选取其中 6 个解并打印出来，以验证结构的有效性（分别从前 100、前 300 和前 1000 个解中各选 2 个）。所有采用这些微结构的离子电子传感器在宽广的压力范围（0–300 千帕）内均表现出超高线性度（R^2=0.999）和高灵敏度（1.78–47.37 pF·kPa^{-1}）。

我们进一步确认了动态和重复加载下的线性响应。图3b展示了几组重复加载-卸载循环下的电容信号，不同加载组之间以~56 千帕为步进增量。压力增量导致电容稳定增加~0.3 nF，表明在线性动态加载过程中仍能保持线性度。在较高基础压力下解析微小压力变化的能力也得到了确认（200 千帕下为 0.2 千帕，即0.1%）（补充图12）。此外，如图3c 所示，在不同测试频率（1~100 千赫兹）下，信号的线性特征仍得以保持。

我们的解决方案适用于多种具有接触面积调控特性的材料。如图 3d 所示，将一种结构应用于六种不同的离子材料时，传感器实现了较高的线性度，R^2>0.996（低于设计值，但仍可接受）。这六种材料包括聚（4-苯乙烯磺酸）（PSS）、聚（4-苯乙烯磺酸钠）（PSSS）、聚（二烯丙基二甲基氯化铵）（PDADMAC）、聚乙烯吡咯烷酮（PVP）、甲基纤维素（MC）和羟丙基甲基纤维素（HPMC）（补充表 1）。我们有理由认为，逆向设计范式能够为微结构和材料提供更广泛的选择。

我们的柔性传感器能够提供两个表面之间的接触信息，例如实时监测全膝关节置换术中股骨与胫骨之间的压力分布。与难以部署在曲面上的商用刚性传感器相比，柔性传感器具有更好的贴合性，可实现压力分布的原位监测，从而帮助外科医生评估间室间载荷并纠正组装不平衡。我们将采用逆向方法设计微结构的压力传感器阵列用于全膝关节置换术中的压力映射（图 4a）。我们选择杨氏模量较高的离子凝胶（~96 MPa，补充图 13）作为传感器中的离子层，以拓宽线性范围（图 4b）。通过采用蛇形互连线，传感器实现了应变不敏感——即使传感器拉伸至 30% 应变，其电容与压力的响应仍保持不变（图 4b 和 c），因此无需将应变诱导信号与压力诱导信号解耦，也能在曲面上准确进行压力传感。

我们使用两个 4×4 传感器阵列，绘制仿真股骨与胫骨内侧和外侧间室之间的压力分布（扩展数据图 5）。阵列中的传感单元在传感性能方面偏差很小（补充图 14）。对于每个间室，其宽广的线性范围有助于测量高达 ~50 磅的载荷，并满足全膝关节置换术[35,36]的工作范围要求。当股骨垂直加载并与两个间室接触时，在 10 至 40 N 的不同载荷下均可观察到平衡压力（图 4d 和补充图 15）。测量载荷（F_M）定义为所有传感单元测得的压力与传感面积乘积之和，其数值接近实际施加载荷（F_A）（图 4e），证实了较高的测量精度。

此外，传感器阵列可用于判断不同的接触状态。如图 4f所示，当股骨偏转至不同角度时，压力仍保持平衡，但接触点会发生轻微变化。当股骨与胫骨之间形成不当的倾斜角时，则会呈现出明显不平衡的压力分布（图 4g 和 h）。这种实时且精确的压力映射可以帮助外科医生

纠正全膝关节置换术中的接触状态，并进一步避免因装配不当而可能造成的磨损或损伤。

总之，我们开发了一种基于机器学习的高通量逆向设计流程，用于设计柔性压力传感器。我们的方法可在数小时内构建基于小型数据集的模型，并在一秒内预测数百种解决方案，使其在宽压力范围内具有目标线性响应。逆向设计的效率至少比传统的试错式正向设计高四个数量级。该方法还具有很强的材料普适性，并且其有效性已在测试的全部七种材料中得到验证。逆向设计还可用于定制人工皮肤的其他特性（而不仅仅是应对信号饱和），这有望推动智能机器人、先进医疗保健和人机界面领域的发展。我们期待将逆向设计拓展至其他类型器件的设计中。

参考文献

1 Araromi, O. A.等。用于软体机器的超灵敏且富有韧性的柔顺应变计。《自然》587，219-224（2020年）。 2 Lee, Y.等。仿真人类和生物皮肤的多功能皮肤电子学。Adv. Funct.Mater. 30，1904523（2019年）。3Lee, Y. & Ahn, J.-H.基于纳米材料的仿生触觉传感器。ACSNano 14，1220-1226（2020年）。 4 Bai, Y. 等。具有自我演化形变能力的动态可重编程表面。《自然》609，701-708（2022年）。 5Jumper, J.等。利用AlphaFold进行高度准确的蛋白质结构预测。《自然》596，583-589（2021年）。 6Johansson,R.S.& Vallbo,A.B.人手的触觉敏感性：无毛皮肤中四类机械感受单位的相对密度和绝对密度。J. Physiol. 286，283-300（1979）。

7 Shih, B. 等。用于智能软体机器人的电子皮肤和机器学习。《Science Robotics》5，eaaz9239（2020年）。8 Rus, D. & Tolley, M. T. 软体机器人的设计、制造与控制。《自然》521，467–475（2015年）。9 Schwartz, G. 等。用于电子皮肤和健康监测的高压力灵敏度柔性聚合物晶体管。《Nature Communications》4，1859（2013年）。10 Kim, J. 等。用于逐搏血压监测的柔性可穿戴压力传感器。Advanced Healthcare Materials 8，e1900109（2019年）。11 Guo, Y. 等。具有仿生微裂纹和互锁结构、用于全范围人机交互的柔性可穿戴压力传感器。Small 14，e1803018（2018年）。12 Lee, S. 等。用于无感觉干扰监测手指操作的纳米网压力传感器。《科学》370，966–970（2020年）13 Liu, Y. 等。作为机器人虚拟现实无线人机界面的电子皮肤。《科学进展》8，eabl6700（2022年）。14 Yu, X. 等。用于虚拟现实和增强现实的皮肤集成式无线触觉界面。《自然》575，473–479（2019年）。15 Bai, N. N. 等。用于在宽范围内实现高灵敏度和高线性度的离子电子压力传感器的梯度互锁结构。ACS Nano 16，4338–4347（2022年）。16 Lu, P. 等。基于柔性微柱电极、在宽压力范围内具有高灵敏度和线性响应的离子电子压力传感器。《科学通报》66，1091–1100（2021年）。17 Molesky, S. 等。纳米光子学中的逆向设计。Nature Photonics 12，659–670（2018年）。18 Fan, Z. C. 等。机械引导组装形成的三维表面的逆向设计策略。Adv. Mater. 32，e1908424（2020年）。19 Zunger, A. 为寻找具有目标功能的材料而进行的逆向设计。Nature Reviews Chemistry 2，1–16（2018年）。20 Boutry, C. M. 等。一种分级图案化的仿生电子皮肤，能够检测施加压力的方向，用于机器人学。《Science Robotics》3，eaau6914（2018年）。21 Bai, N. N. 等。基于梯度可填充结构、具有超宽范围高灵敏度的离子电子压力传感器。《Nature Communications》11，1–9（2020年）。22 Zang, Y. P.、Zhang, F. J.、Di, C. A. & Zhu, D. B. 面向人工智能和医疗保健应用的柔性压力传感器进展。Materials Horizons 2，140–156（2015年）。

23 Wu,J.N.等。理性设计具有宽压力传感范围内高度线性响应的柔性电容式传感器。Nanoscale12，21198–21206（2020年）。24Lee,Y.等。具有超高压力灵敏度和超宽压力范围内线性响应的柔性铁电传感器。ACS Nano12，4045–4054（2018年）。25Ji,B. 等。梯度结构赋能的高灵敏度和超宽线性范围电容式触觉传感器。Small 17，2103312（2021年）。26 Lee, Y.等。用于超灵敏电子皮肤的仿生梯度电导率和刚度。ACSNano 15，1795-1804（2020年）。27Bae,G. Y. 等。基于仿生层级结构阵列的线性且高压力灵敏度电子皮肤。Adv. Mater. 28，5300–5306（2016年）。38 Kim, T.、Park, J.、Sohn,J.、Cho,D.和 Jeon,S.基于一维-二维混合碳纳米复合材料的仿生、仿生、高度可拉伸且导电的干式黏合剂，用于一体化心电图电极。ACS Nano 10，4770–4778（2016年）。29Pang, C. 等。用于脉搏信号放大的高度贴合皮肤的微毛传感器。Adv. Mater.27，634–640（2015年）。30Pang, C. 等。利用规则排列的高长径比聚合物纤维制备的仿生可逆互锁结构。Adv.Mater. 24，475–479（2012年）。31 Zhu, P. 等。用于力学传感的皮肤-电极离子电子界面。Nat. Commun. 12，1-10（2021年）。32 Donoghue, W. F.分布与傅里叶变换。（ElsevierScience，2014年）。33 Shahriari, B.、Swersky, K.、Wang,Z.、Adams,R. P.和 de Freitas, N. 将人类移出闭环：贝叶斯优化综述。Proc. IEEE 104，148–175（2016年）。34 Gerratt, A. P.、Michaud,H.O. 和 Lacour,S. P. 用于假肢触觉的弹性体电子皮肤。Adv.Funct. Mater. 25，2287–2295（2015年）。35Park,C.H.和 Song, S. J.传感器辅助全膝关节置换术：叙述性综述。Clin. Orthop. Surg. 13，1–9（2021年）。36 Song, S.J.、Lee, H.W.、Kim,K. I.和Park,C. H.全膝关节置换术中使用张力计进行常规间隙平衡后，由传感器确定存在负载不平衡。Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc. 28，2953–2961（2019年）。

致谢：

我们感谢MIT和南方科技大学机械工程研究与教育中心（MIT和南方科技大学的MechERE中心）提供的支持。

资助：本研究得到中国国家自然科学基金（编号：T2225017、52073138 和62102008）、“深圳市《科学》技术创新委员会”（资助编号：CYJ20210324120202007）、深圳市科技研发资金（编号：KYTDPT20181011104007）、“广东省重点实验室计划”（编号：2021B1212040001）以及MIT和南方科技大学机械工程研究与教育中心的支持。

作者贡献：Z.L.、N.X.F.和C.F.G.构思了这一概念。Z.L.设计了微结构。Z.L.和J.D.M.进行了有限元分析。Z.L.、S.H.和K.T.开展了机器学习方法研究。Z.L.、M.C.、J.S.、S.X.和G.L.进行了实验。J.S.和S.X.制备了阵列并进行了压力映射。Z.L.撰写了论文。C.F.G.和N.X.F.修改了稿件。所有作者均审阅并对稿件提出了意见。

利益冲突：作者声明不存在任何利益冲突。

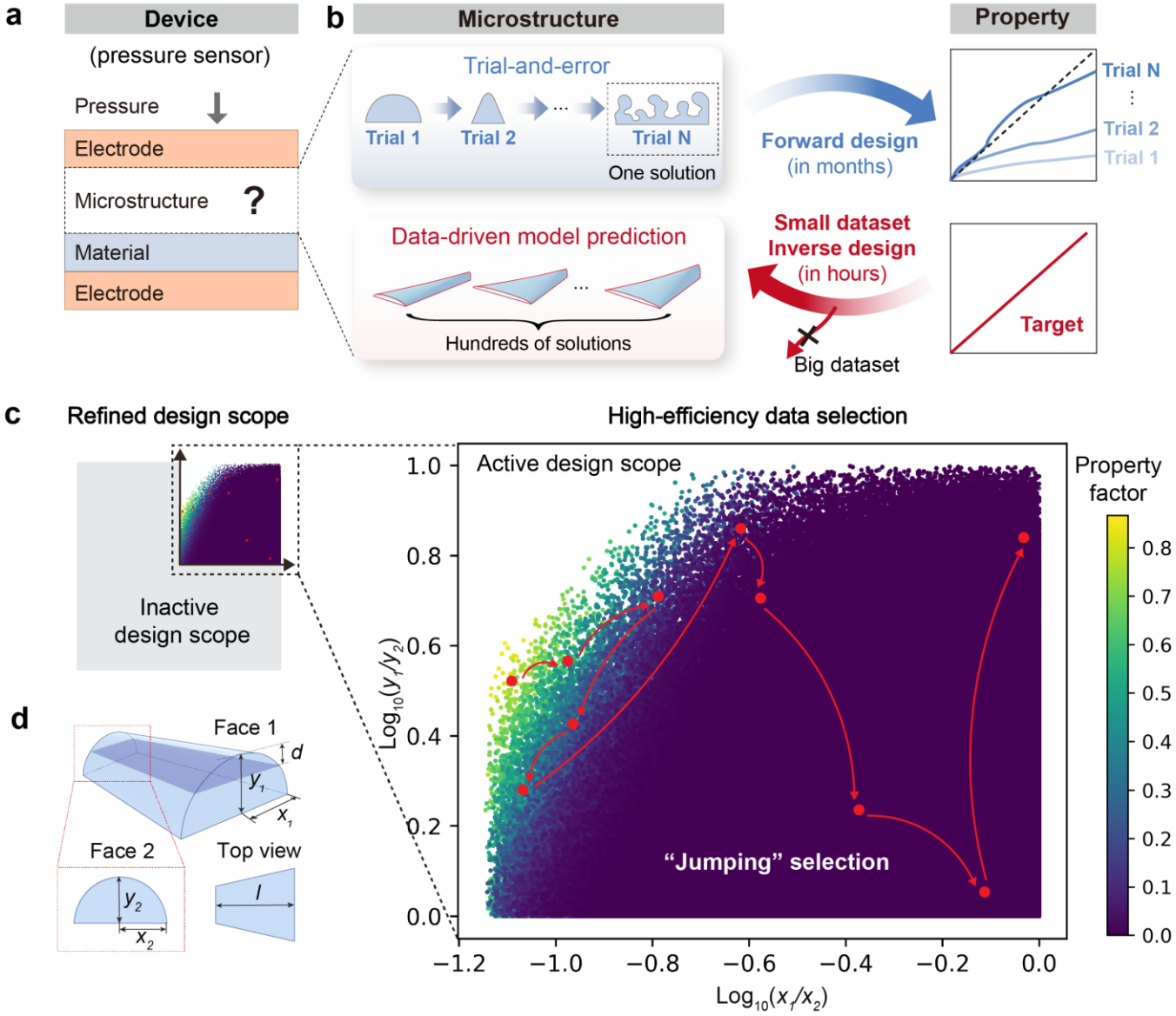


图 **1** | 使用 Small 数据集对人工皮肤进行逆向设计。a，柔性压力传感器的一种常见器件结构。b，传统正向设计（从结构到性能）与本研究中的"从性能到结构"逆向设计的比较。c，降低对数据集规模要求的方法示意图。d，本研究的微结构模型。所有相关几何参数均已标示。

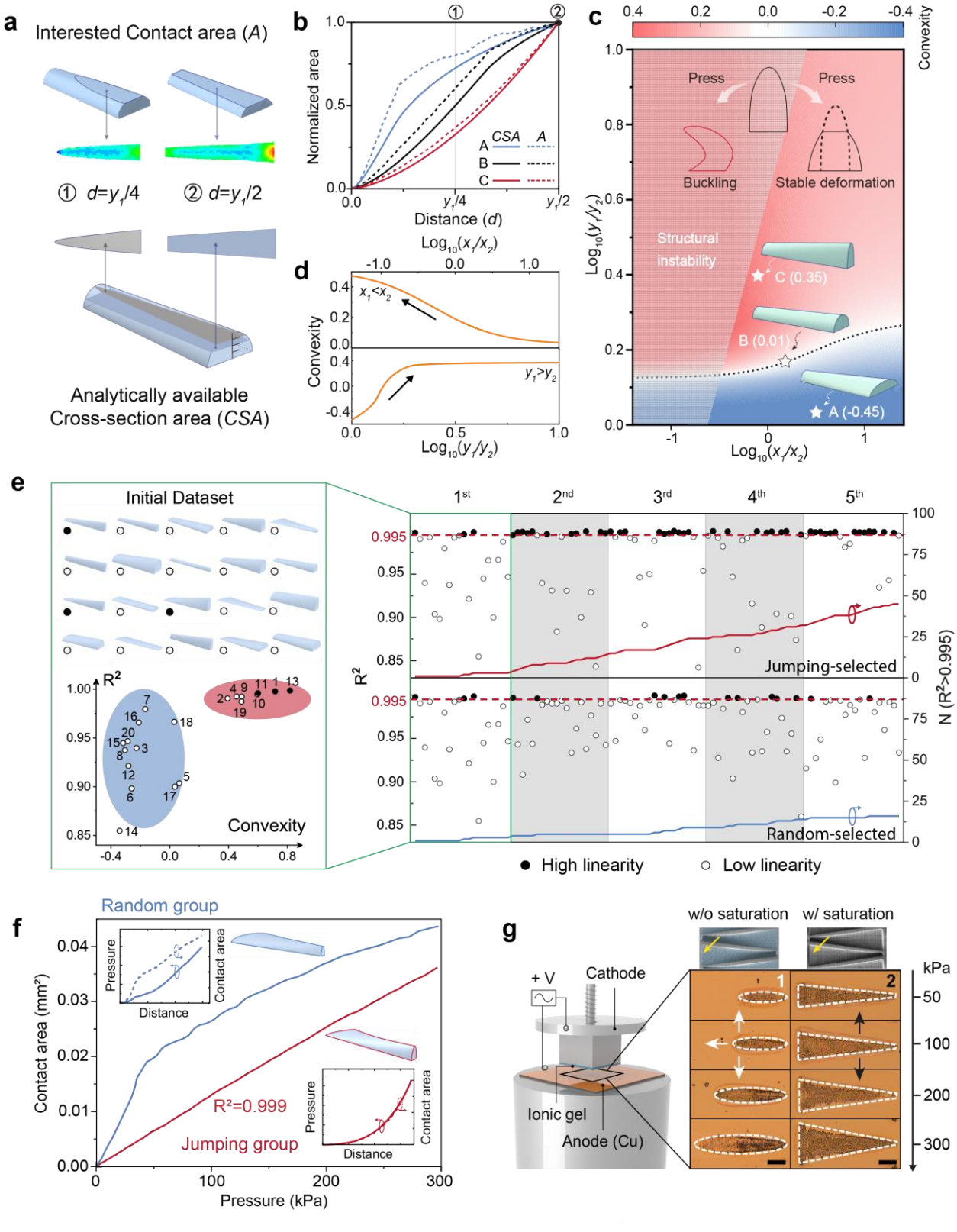

a
Interested Contact area (A)
① d=y1/4
② d=y1/2
Analytically available
Cross-section area (CSA)
b
Normalized area
Distance (d)
CSA
A
A
B
C
c
Convexity
Press
Press
Buckling
Stable deformation
Structural instability
C (0.35)
B (0.01)
A (-0.45)
Log10(y1/y2)
Log10(x1/x2)
d
x1<x2
y1>y2
Convexity
Log10(y1/y2)
e
Initial Dataset
R2
Convexity
1st
2nd
3rd
4th
5th
Jumping-selected
Random-selected
N (R2>0.995)
High linearity
Low linearity
f
Random group
Contact area (mm²)
Pressure (kPa)
R²=0.999
Jumping group
Pressure
Contact area
Distance
g
w/o saturation
w/ saturation
+ V
Cathode
Ionic gel
Anode (Cu)
kPa

图 **2** | 逆向设计的模型、设计范围、效率和验证。a，同一微结构在压缩距离（d）为 $y_1/4$ 和 $y_1/2$ 时的接触面积（A）和截面面积（CSA）示意图。b，三个代表性微结构的 A 和 CSA 随 d 的变化，分别表现为负凸性（A，凸性=–0.45）、接近零凸性（B，凸性=0.01）和正凸性（C，凸性=0.35）。案例 A、B 和 C 所对应的几何参数（$\lg(x_1/x_2)$、$\lg(y_1/y_2)$）分别为（0.5，0.05）、（0.2，0.17）和（–0.15，0.4）。c，通过遍历几何参数 x_1/x_2 和 y_1/y_2，计算得到的凸性图，其中 x_2 和 y_2 的值均经过归一化。由于结构对称性，此处仅展示 $y_1>y_2$。虚线表示正凸性区域与负凸性区域之间的边界。d，平均凸性分布随几何参数的变化。e，高效的数据采集。左：作为初始数据集的 20 个随机生成微结构，以及其相对于凸性的线性度。右：5 次迭代（共 100 个案例）中，跳跃选择组和随机选择组的 R^2 分布及符合条件的几何结构的累积数量（$R^2>0.995$）。f，跳跃数据集和随机数据集中的代表性微结构，以及其计算得到的 A–压力曲线。插图显示了计算得到的压力和接触面积随压缩距离的变化。几何参数：跳跃选择：$x_1=10.66$，$y_1=40.34$；$x_2=135.66$，$y_2=10.00$。随机选择：$x_1=10.15$，$y_1=39.42$；$x_2=139.78$，$y_2=37.36$。（g）用于验证接触面积变化的电蚀刻图案显微图。具有线性响应的结构在加载过程中表现出接触面积的纵向和横向扩展，而对照样品仅表现出横向扩展。

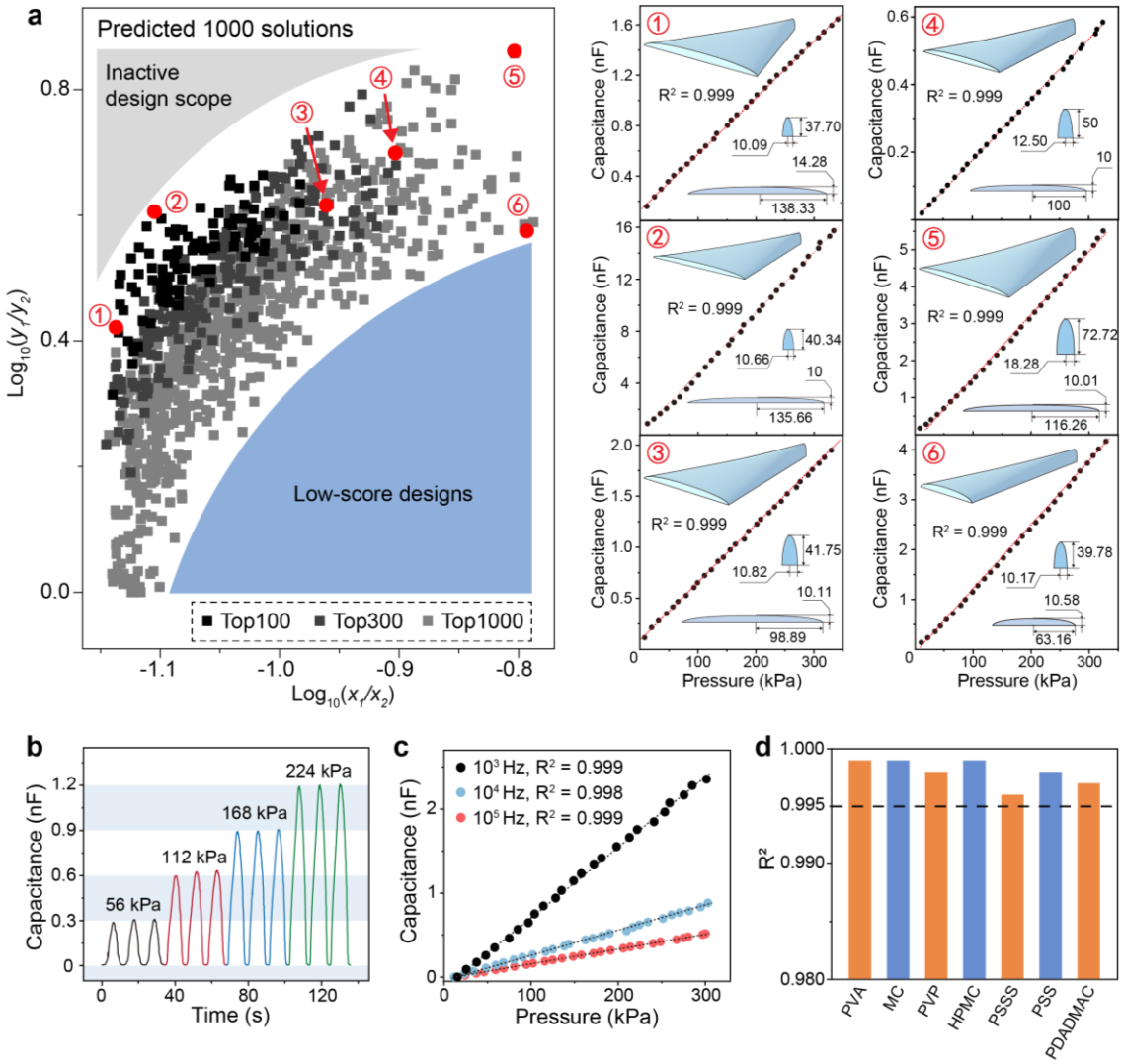


图 **3** | 线性响应传感器逆向设计的有效性与普适性。a，机器学习模型预测的排名前 1000 个解的几何参数分布。选取了六种微结构，并通过实验验证其在 300 千帕以上具有线性响应。所用离子材料为 PVA-H_3PO_4。b，在 56、112、168 和 224 千帕阶梯式加载下的响应。c，在不同测量频率下仍保持线性响应。d，使用图 a 中一种微结构（编号 4）的不同离子凝胶传感器的 R^2 值，显示所有情况下均具有较高的线性度（R^2>0.996）。

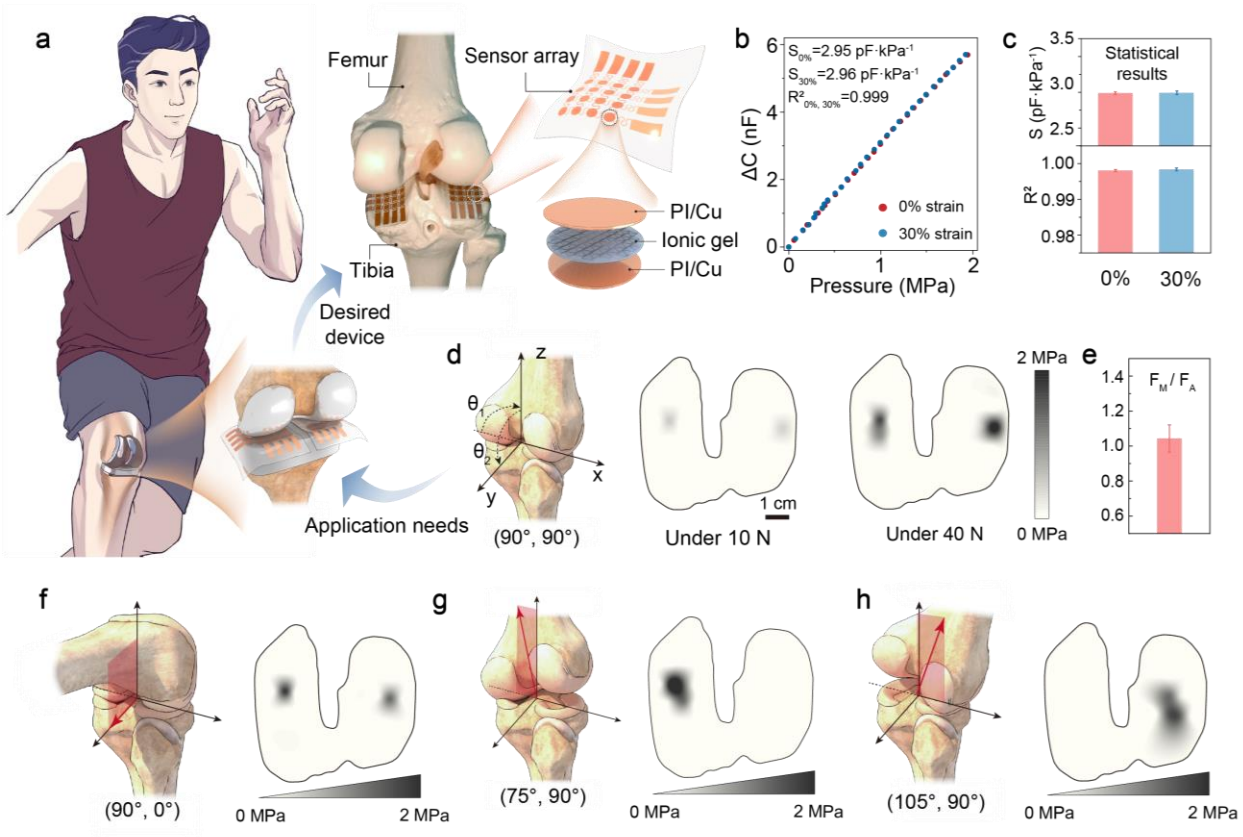
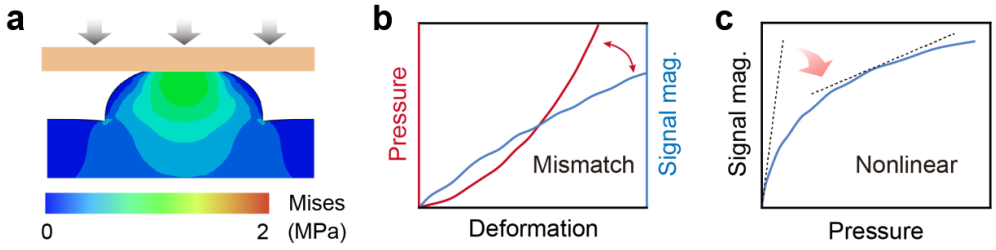


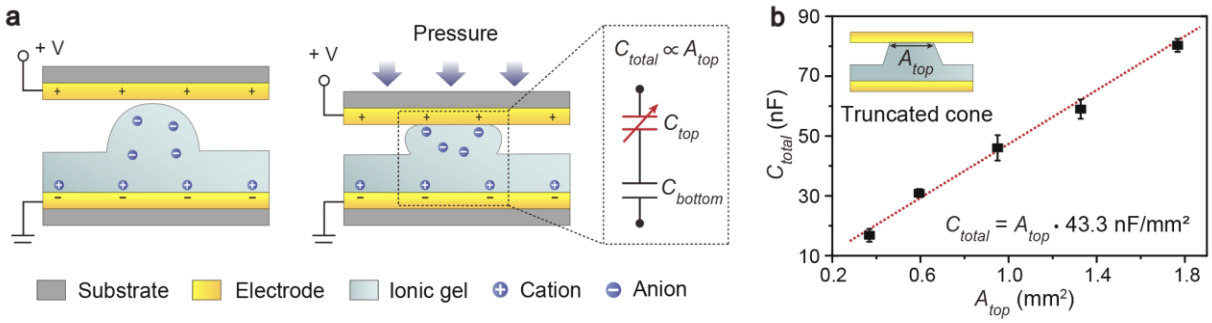
图 **4** | 采用逆向设计为全膝关节置换术（TKA）应用设计的人工皮肤。a，使用柔性压力传感器阵列进行 TKA 手术压力传感的示意图，传感器阵列放置于仿真股骨与胫骨之间。b，传感器在无应变状态和 30% 应变下，电容随压力变化的关系，压力范围超过 2 MPa。c，传感器阵列中各传感单元测得的灵敏度和线性度的统计结果。d，仿真股骨垂直放置时，在 10 N 和 40 N 载荷下的压力映射。e，测得的 F_M/F_A。理想值为 1。f-h，仿真股骨与胫骨处于不同接触状态时的压力映射。

扩展数据

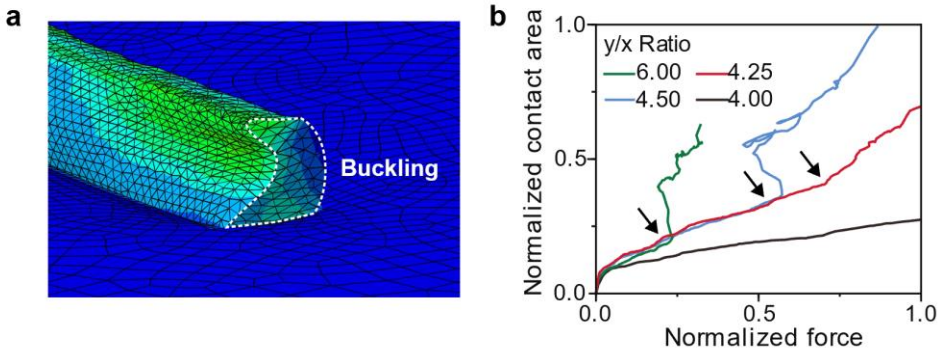


扩展数据图1. 不可压缩半球的变形。a、不可压缩半球的模拟变形

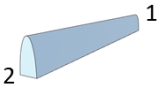
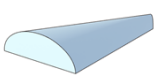
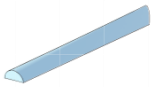
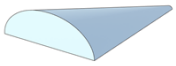
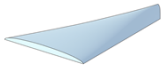
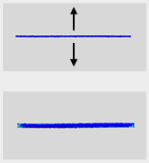
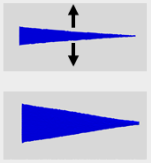
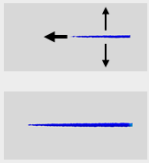
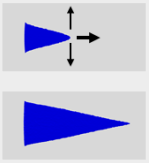
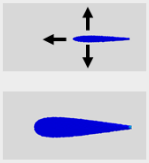
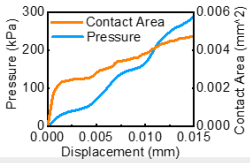
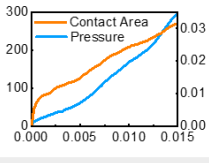
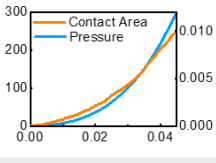
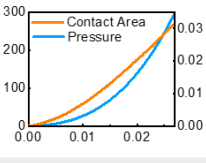
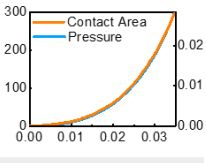
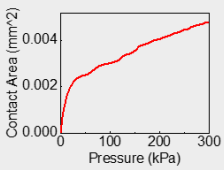
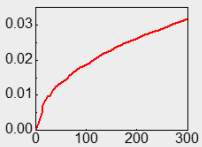
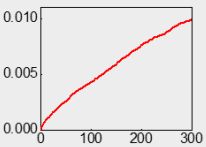
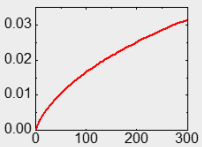
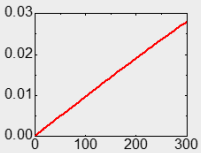
a受压的二维半球。b，输入压力和输出信号（接触面积）相对于半球形变的模拟曲线。可以观察到明显的不匹配。c，由刚化效应产生的非线性响应曲线，表现为饱和响应。



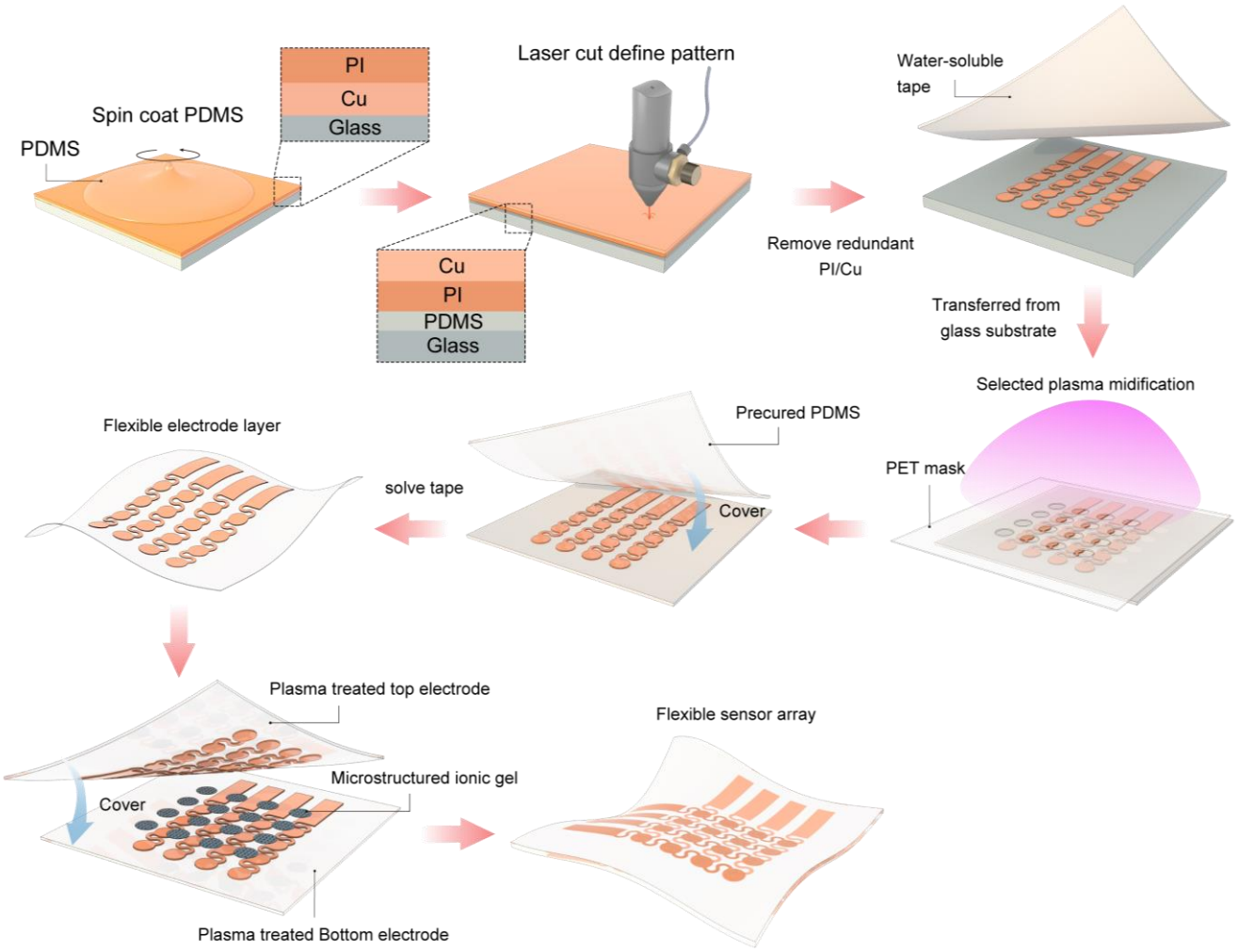
扩展数据图2。a，离子电子压力传感器及其传感机制的示意图。总电容（C_{total}）可近似表示为 $C_{total} \approx C_{top} \propto A_{top}$，因为底部界面的接触面积远大于顶部界面的接触面积（$A_{bottom} >> A_{top}$）。b，顶部界面的接触面积与测得电容之间关系的实验结果。PVA- H_3PO_4 用作离子层。



扩展数据图 3。压缩过程中微结构的屈曲。a，压缩过程中屈曲的示意图。b，在不同 y/x 比值（4.00、4.25、4.50 和 6.00）下，归一化接触面积随归一化力的变化，假设 $x_1=x_2$, $y_1=y_2$。高 y/x 比值（4.25、4.50 和 6.00）情况下会发生屈曲，应予避免。

Type	No gradient	X gradient	Y gradient	XY synchronous gradient	XY opposite gradient
Parameters (μm)	x_1=x_2=12.5 y_1=y_2=50	x_1=12.5 x_2=100 y_1=y_2=50	x_1=x_2=12.5 y_1=50 y_2=10	x_1=12.5 x_2=100 y_1=10 y_2=50	x_1=12.5 x_2=100 y_1=50 y_2=10
3D model					
Contact area increment (Top view)					
Pressure/Area vs Distance					
Area vs Pressure					

扩展数据图4。几何特征、接触面积增量与响应曲线之间的相关性。



扩展数据图5. 传感器阵列制造流程图。