arXiv:2603.01128v1 [cs.RO] 1 Mar 2026

一种可部署仿生柔顺腿设计，可提升四足机器人的跳跃能力

Yiyang Chen[1†]、Yuxin Liu[1†]、Jinzheng Zhou[1†]、Fanxin Wang[1*]、Qinglei Bu[1],Jie Sun[1] 和Yikun Cheng[2]

摘要——四足机器人在工业巡检和灾害搜救等多种应用中正变得日益重要。这些场景要求机器人具备更强的灵活性和障碍物导航能力。然而，当前平台的性能往往受限于电机峰值功率不足，因而难以实现爆发式跳跃。为应对这一挑战，本文提出了一种仿生方法，模仿沫蝉腿部的储能机制。我们采用一种特殊的3D打印弹性材料——聚醚嵌段酰胺（PEBA），设计了可展开柔顺腿（DCL），其内部具有轻质晶格结构。该结构的作用类似于生物肌腱，在机器人下蹲阶段储存弹性势能，并在跳跃时迅速释放，以增强电机输出。所提出的机械设计显著提升了机器人的垂直跳跃能力。通过有限元分析（FEA）和实验验证，我们证明垂直跳跃高度相对提升了17.1% 。

I. 引言

四足机器人已在工业巡检和应急响应等多种应用中展现出出色的性能 [1]–[3]。其腿式设计在穿越非结构化和复杂地形方面相较轮式系统具有显著优势。然而，提升其爆发性运动能力，尤其是跳跃，仍是一项关键挑战。跳跃需要在短时域内快速产生速度，而这从根本上受到执行器扭矩容量、关节运动学限制以及地面摩擦锥约束等物理约束的限制 [4]。

尽管目前由电动机驱动的四足机器人能够展现出强劲的跳跃性能，但它们严重依赖刚体动力学和高扭矩关节执行器，尤其是直接驱动电机和准直接驱动电机 [5]–[7]，，其扭矩密度性能已达到或接近实际极限 [5]。动态运动，尤其是腾跃，对于跨越重大障碍和提升整体灵活性至关重要。传统工业系统能够采用额定功率高的执行器。相比之下，腿式机器人经常在动态复杂环境中运行，需要快速响应运动指令 [8]。其主要限制在于难以产生足够的爆发性驱动力，这通常需要使用峰值扭矩高的电机，而这会增加重量和成本。这种“驱动瓶颈”在概念上如图1所示，其中基准系统无法跨越势能障碍。此外，还需要精确控制和协调，以应对其中涉及的高冲击力。

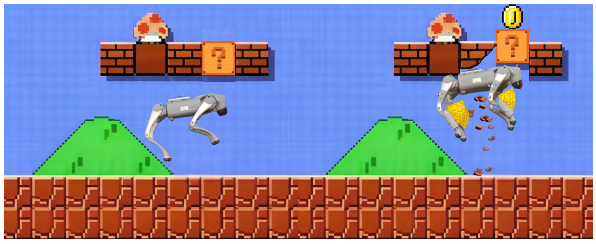


图1：**跳跃驱动挑战示意图。（左）**受电机扭矩饱和限制的基准机器人无法达到临界高度。**（右）**所提出的系统通过增设 DCL，释放额外储存的弹性能并完成任务（以硬币表示）。

为解决这一问题，研究人员探索了多种途径。一种方法是采用并联弹性元件来提高功率密度。近期研究表明，关节式软结构 [9] 和优化后的并联弹性执行器 [10] 能够通过缓冲冲击并释放储存的能量，显著提升爆发性跳跃性能。另一种更具仿生性的方法是利用被动柔顺元件储存和释放能量，模仿生物系统。例如，机电一体化领域的近期研究表明，柔顺性有助于通过形态可变结构实现自适应运动，例如模仿生物肌肉的柔顺执行器 [11]。

然而，现有采用被动柔顺性的硬件方案存在根本性的机械权衡。并联弹性执行器（PEA）和柔性结构虽然能有效提升峰值功率密度 [9], [10], ，但通常会永久集成到机器人的运动链中。这种持续接合在标称运动期间会带来一个关键问题：被动弹性会形成**寄生刚度**，需要电机持续克服。这种寄生效应不仅会增加运输成本（CoT），还会限制非爆发性任务中的关节控制带宽。尽管变刚度执行器（VSA）理论上可通过调节柔顺性来解决这一问题，但它们往往需要复杂的传动机构和额外的重型电机 [13],，因此不适用于紧凑、轻量化的四足机器人腿部。因此，

†这些作者对本研究做出了同等贡献。[1]Yiyang Chen、Yuxin Liu、Jinzheng Zhou、Fanxin Wang、Qinglei Bu 和 Jie Sun 就职于西交利物浦大学机电与机器人系，苏州 215123，中国。[2]Yikun Cheng 就职于伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校机械科学与工程系，美国伊利诺伊州尚佩恩。*通讯作者：Fanxin WangFanxin.Wang@xjtlu.edu.cn

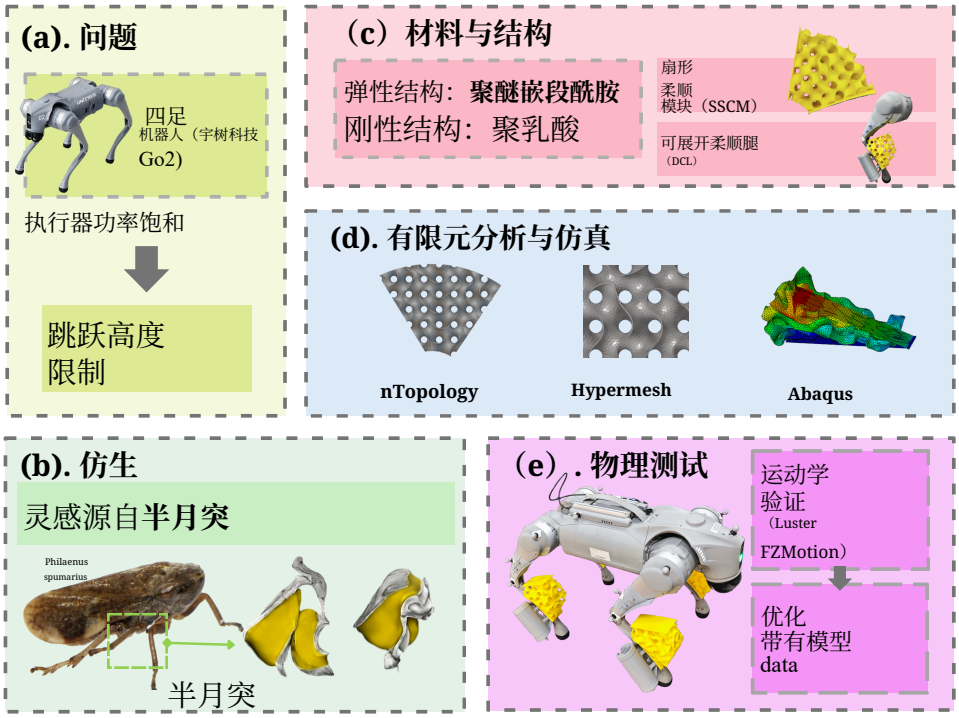


图 2：(a-e) 仿生四足机器人跳跃增强的设计流程；(b) 生物原型 [12]。

目前仍缺乏实用的结构设计，能够按需提供高密度储能，同时不牺牲机器人主要运动步态的效率。

在本研究中，我们将整个腿部组件称为可展开柔顺腿（DCL），其集成了一个称为扇形柔顺模块（SSCM）的专用储能组件。DCL 的完整设计流程如图 2 所示。本研究的主要贡献如下：

- **创新结构设计：**一种仿生 DCL，集成了优化后的 Gyroid 陀螺曲面晶格结构，可实现高效能量储存。借助高性能材料聚醚嵌段酰胺，SSCM 能够储存大量弹性势能。
- **可展开翻转机构：**一种新型翻转机构，可在节能的行走构型（收纳状态）与大幅度跳跃构型（展开状态）之间快速、高效地重新构型，从而增强腿式机器人系统的动态敏捷性。
- **集成建模与测试：**一种全面集成的设计到制造框架，结合了结构优化、有限元分析参数化和真实环境验证，使垂直跳跃高度提升了 **17.1%** 。

本文其余部分组织如下：第二节详述DCL的设计。第三节描述该结构的有限元分析仿真、表征与设计优化。第四节给出实验验证与结果。最后，第五节总结全文并讨论未来工作。一段展示我们工作的视频可以可见于：https://b23.tv/lj5qQBw。

II. 可展开柔顺腿的设计

本节详述所提出的可展开柔顺腿的机械架构与设计方法。如图1所示，该系统将仿生储能模块与可展开翻转机构相结合，以实现两个主要功能目标：用于爆发式跳跃的高密度能量释放，以及按需重构以消除标称运动期间的寄生刚度。

A. 仿生概念与总体架构

该设计的灵感源自沫蝉（*Philaenus spumarius* 图 3a）的生物力学；这种昆虫以爆发式跳跃能力著称。与主要依靠肌肉力量的哺乳动物不同，这些昆虫利用由**半月突**（或侧胸弓） [12]驱动的弹射机构。如图 3b 所示，这种复合结构由弹性蛋白橡胶蛋白（黄色）和坚硬的角质层（灰色）组成，在转节关节周围形成了独特的**弯曲扇形几何形状**。

关键在于，这种扇形形态不仅具有结构作用，也具有功能作用。在下蹲阶段（屈曲）中，拱形结构发生弯曲，通过材料压缩和结构屈曲，将弹性势能储存在橡胶蛋白中。这种几何形状形成了非线性刚度特性：初始阶段较为柔顺，便于屈曲；随后刚度逐渐增大，从而储存高密度能量，完美匹配腿部关节的运动学约束 [14]。

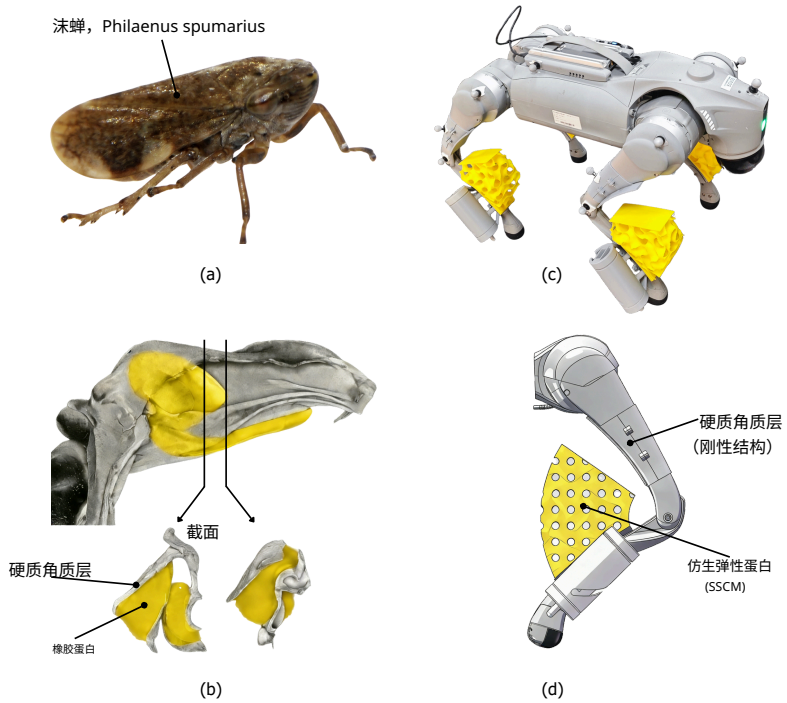


图 3：机器人腿的仿生设计概念。(a) 作为生物原型的 Philaenus spumarius [12]。(b) 展示刚性硬质角质层与储能节肢弹性蛋白之间相互作用的生物机制 [12]。(c) 集成 SSCM 的拟议四足机器人。(d) 机械设计概览。

我们通过构建与机器人肢体相连的 SSCM 来实现这一方法，如集成系统视图（图 3c）所示。构建 SSCM 时，使用 Arkema Pebax®3533 SP 01 作为仿生弹性蛋白（SSCM），并使用聚乳酸作为硬质角质层（刚性结构），具体结构布局详见图 3d。能量在四足机器人下蹲阶段和跳跃过程中储存。拱形结构在跳跃过程中形成，其作用类似于沫蝉的半月突。

B. 材料选择

该结构由Arkema Pebax® 3533 SP 01制成，这是一种因其高弹性、耐久性和重量轻而被选用的热塑性弹性体。这些特性使其非常适合用于快速原型制作弹性支撑结构，以模拟沫蝉体内橡胶蛋白的力学性能。选用热塑性弹性体（TPE）作为弹性结构，商用TPE材料主要分为四类：聚苯乙烯弹性体、聚氨酯弹性体、聚酯弹性体和聚酰胺弹性体 [15]。聚醚嵌段酰胺是一类热塑性弹性体，兼具轻质、柔韧、滞后极小以及出色的抗弯曲疲劳性 [16]。它由聚酰胺（硬段）和橡胶态聚醚（软段）构成。硬段充当物理交联，提高硬度和刚度，而软段则提供柔韧性和弹性。调节这些链段的比例，即可定制聚醚嵌段酰胺的硬度 [17]。

与热塑性聚烯烃弹性体（TPO）和热塑性聚氨酯（TPU）等传统热塑性弹性体相比，聚醚嵌段酰胺表现出更低的材料密度和能量损耗因子。较低的能量损耗因子和极小的滞后使聚醚嵌段酰胺能够作为仿生弹性蛋白，在跳跃阶段像弹簧一样释放能量。聚醚嵌段酰胺的低密度可尽量减轻对机器人造成的质量负担，而其卓越的抗疲劳性则确保了更长的使用寿命。

C. SSCM 与晶格结构

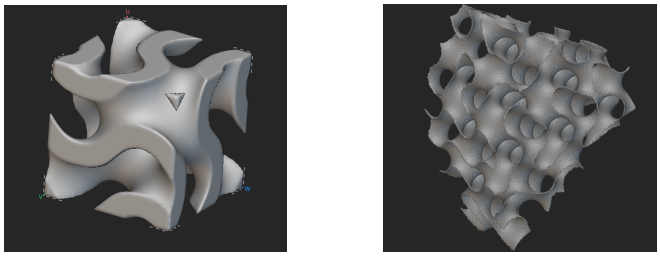
为复现半月形过程的生物力学功能，本节提出了**SSCM**设计。与传统圆柱弹簧不同，这种扇形几何结构经过优化，可适配机器人小腿段与大腿在深蹲过程中形成的角度空间（约为 30° 至 90°）。该构型具有两项关键功能：1）**几何兼容性**：在紧凑的关节约束下，最大限度地为吸能晶格留出空间。2）**渐进刚度**：扇形结构发生非均匀压缩——内半径的压缩程度高于外半径——从而形成非线性刚度曲线，模拟生物原型的特性，避免过早压缩到底，同时确保能量迅猛释放。

为了精确控制力学性能并最大化比能量吸收，我们使用 nTopology (nTop) 生成并优化内部晶格结构。在三周期极小曲面（TPMS）系列中，

我们对金刚石、Schwarz原始曲面、Lidinoid 和 Gyroid 晶格结构进行了比较分析。

虽然金刚石结构具有较高的刚度，但其节点连接处容易产生应力集中。相比之下，Gyroid结构由方程 $\sin x \cos y + \sin y \cos z + \sin z \cos x = t$定义，因其恒定平均曲率以及有利于增材制造的自支撑特性而被选用（如图4所示）。近期研究 [18], [19] 表明，Gyroid点阵在不同载荷矢量下具有更优异的各向同性和结构稳定性。这些特性降低了在不同角度下测试结构性能的复杂度。

Gyroid点阵也具有自身的制造优势。Maconachie等人 [20]证明，gyroid基体相几何具有很高的可制造性，尤其是在胞元数量增加时。本研究所检验的试样仅出现轻微缺陷，例如台阶效应。他们的研究还表明，与其他胞元拓扑相比，采用gyroid单胞的点阵结构具有诸多潜在优势，包括其结构与骨骼相似，这有利于生物医学应用；此外，支柱倾斜角连续变化，也提升了可制造性 [20]。这些特性降低了制造难度，尤其是我们原型所采用的3D打印工艺。由于该几何结构具有自支撑特性，晶格结构的点阵空隙内无需支撑结构，从而提高打印质量并减少后处理工作量。



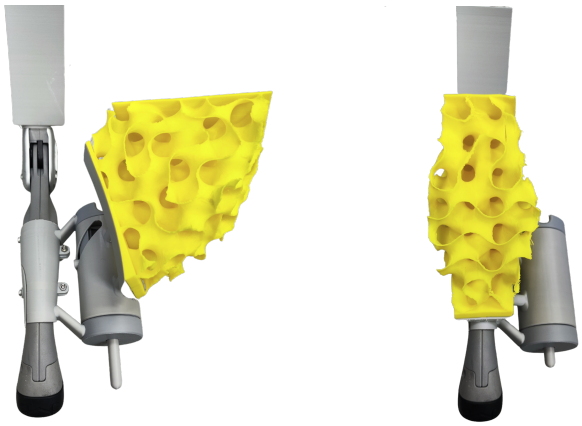
(A) (B)

图 4：在 nTop 中设计的 Gyroid点阵结构，展示了 (A) 单位晶胞，以及 (B) 将其作为柔顺结构的内部填充。

D. 可展开翻转机构

为解决标称运动过程中寄生刚度这一关键问题，我们设计了一种**双稳态可展开翻转机构**。如图 5 所示，该紧凑组件可使扇形柔顺模块（SSCM）在两种截然不同的工作模式之间切换：

- **收纳状态（图 5a）：** 该模块收回并贴靠在机器人小腿的外侧，为常规步态行走时提供必要的间隙，避免与地面或大腿发生干涉。
- **展开状态（图5b）：** 模块旋转 90° 至与大腿对齐，充当硬限位，使PEBA点阵在深蹲阶段参与能量储存。



(a) 收纳状态 (b) 展开状态

图5：**可展开机构的工作状态**。(a) 在收纳状态下，机构回缩以消除寄生刚度。(b) 在展开状态下，模块旋转90度，与股骨对齐，以实现弹道能量储存。

为在紧凑的空间内实现这种复杂的空间构型变化，该机构采用直线驱动的空间凸轮系统。内部运动链的细节见图6中的爆炸图。

运动传递依赖于垂直平移与螺旋旋转的耦合：

1) **垂直驱动：** 外部驱动直接作用于**推杆 (2)**，进而推动**滑块 (8)**。在**内固定柱 (6)**的约束下，滑块被迫沿垂直方向平移。2) **旋转转换：** 当滑块平移时，安装在其侧面的**导向销 (7)** 同步移动。该直线运动通过螺旋凸轮约束迫使**外旋转套筒 (4)**旋转，从而将垂直输入转换为所需的角输出。

复位弹簧 (5) 维持系统张力，确保内部**锁定销 (9)** 卡入指定的定位槽。该设计形成双稳态特性，可在无需持续驱动扭矩的情况下，将系统机械锁定在收纳状态或展开状态。

III. 有限元分析与刚度表征

A. 有限元建模

为验证晶格结构在大变形下的结构完整性，并推导用于控制的刚度模型，我们在**Abaqus/Explicit**中建立了高保真有限元模型。

1）本构建模与离散化：扇形柔顺模块（SSCM）由 Arkema Pebax 3533 SP 01 制成。为准确捕捉其超弹性响应，基于制造商提供的单轴测试数据 [21] 构建了**Marlow势**。选择该本构模型是为了严格复现实验

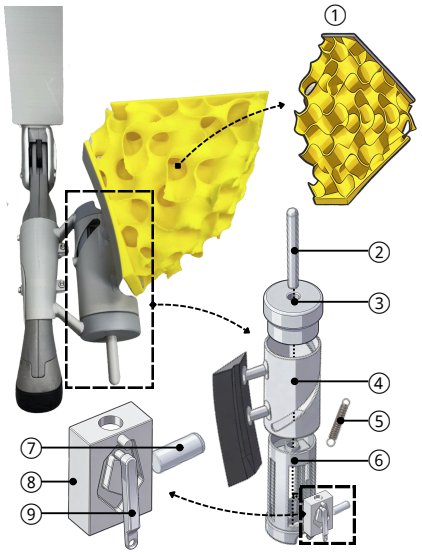


图 6：**运动链的爆炸图**。关键组件：（1）SSCM晶格，（2）推杆，（3）顶盖，（4）旋转套筒，（5）复位弹簧，（6）内固定柱，（7）导向销，（8）滑块，以及（9）锁定销。该机构通过螺旋凸轮约束将线性输入转换为精确的 90 度旋转。

应力-应变响应，避免高应变下多项式型势函数（如 Yeoh）通常会出现的曲线拟合振荡。采用 0.48 的泊松比对材料的近不可压缩性进行建模，同时防止体积锁定。

几何体采用修正二次四面体单元（C3D10M）进行离散化。与线性近似相比，这种单元公式在大变形条件下能够更好地抵抗网格畸变和接触不稳定性。

2）边界条件和仿真设置：在膝关节旋转中心建立了运动学耦合，以复现 Unitree Go2 的物理关节力学特性。标准跳跃的名义工作范围约为压缩 $29°$，而仿真范围扩展至 $45°$。这一扩展范围确保特性分析涵盖安全裕度，并识别结构密实化的起始点，从而验证极限条件下的机械可靠性。

B. 用于控制集成的刚度建模

1) 扭矩-变形表征：有限元分析结果（图7）揭示出明显的非线性刚化行为。为便于控制集成，机械响应被划分为两个区域：工作区域（$0° < \theta \leq 29°$），即发生动态跳跃的区域；以及安全裕度（$29° < \theta < 39°$），作为致密化区域（$> 39°$）之前的缓冲区。

2) 解析模型辨识：为实现实时前馈控制，我们建立了高保真解析模型。与可能损害局部精度的全局拟合方法不同，我们采用了严格限定在工作区域内的**领域特定拟合策略**。扭矩响应采用三**阶** 多项式进行近似：

$$\tau_{\text{exo}}(\theta) = \alpha_3\theta^3 + \alpha_2\theta^2 + \alpha_1\theta + \alpha_0 \tag{1}$$

其中 α_i 为识别出的刚度系数。

如图7所示，该模型在工作边界内具有出色的拟合度（$R^2 \approx 0.87$）。超出工作范围后，有限元分析结果证实，该结构在.....范围内保持刚度曲线单调递增

安全裕度可防止突然压缩到底。

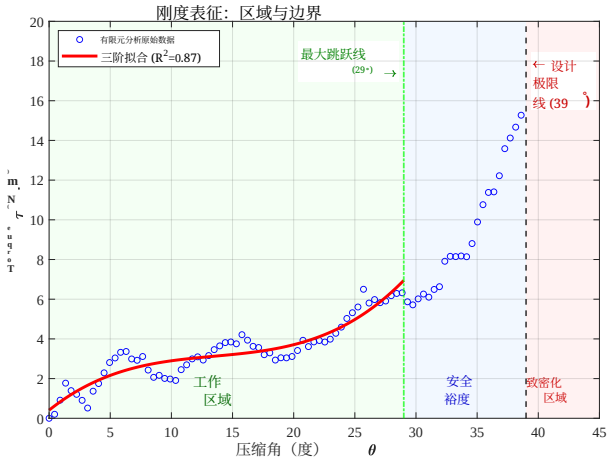
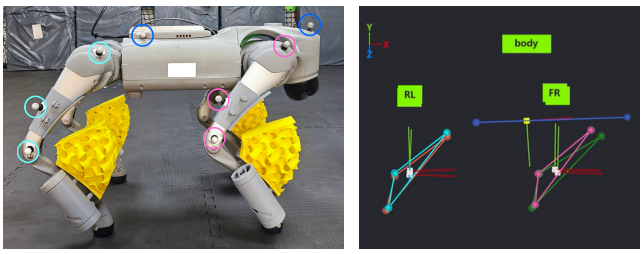


图7：严格的刚度表征与工作边界。有限元分析原始数据（蓝色圆圈）验证了结构完整性，直至 $45°$。**解析模型**（红色实线）是针对**工作区域**（$0°$–$29°$）拟合的 3^{rd}阶多项式，其最大扭矩为 $6.8N \cdot m$。**安全裕度**（蓝色区域）在**设计极限线**（红色， $39°$）之前提供 $\approx$ $10°$ 缓冲区；超过该线后，结构将进入**致密化区域**（红色区域）。

IV. 实验验证

A. 实验装置

实验在一台实体 Unitree Go2 机器人上进行。柔顺结构组件采用 3D打印



(A) (B)

图8：实体实验装置。(A) 安装的跟踪球（每个刚体以一种颜色圈出）。(B) 在Luster FZMotion动作捕捉系统中建立的Unitree Go2模型。

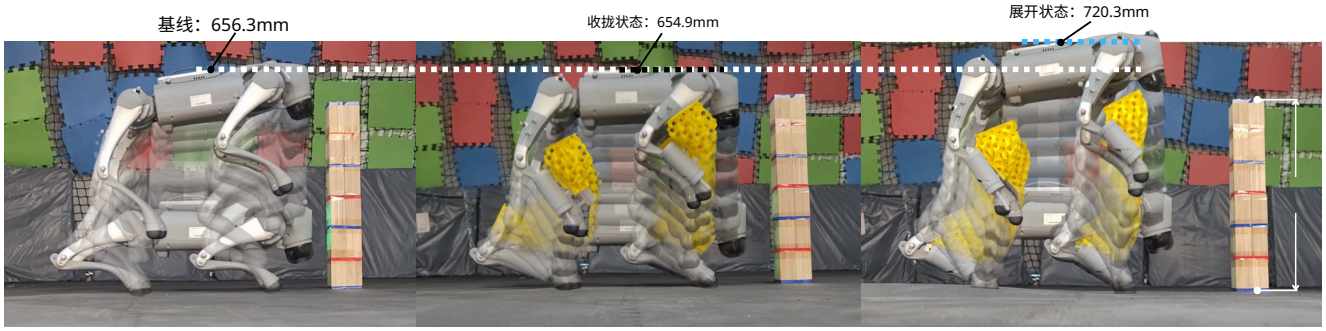


图 9：垂直跳跃实验的合成延时摄影。**(左)** 基线 组（未负载的 Unitree Go2）达到 656.3 mm 的峰值高度。**(中)** 收拢状态 组（被动质量）达到 654.9 mm，表明增加质量产生的寄生效应可以忽略不计（降低 0.33%）。**(右)** 展开状态 组利用 PEBA 晶格能量释放，达到 720.3 mm 的峰值高度，比基线提高 17.1%。白色虚线表示基线峰值高度。

Arkema Pebax® 3533 SP 01 制成。所有运动均使用高精度动作捕捉系统（Luster FZ-Motion）进行跟踪，以 0.1 mm 的骨架点跟踪精度提供真实值性能验证。为捕捉机器人的运动学信息，共在系统上安装了 15 个动作捕捉跟踪球。躯干上放置了三个标记点（一个位于前背侧，两个位于侧面），每条大腿上则沿近端、中段和远端各放置一个标记点（图 8A）。这种三标记点配置为每个节段定义了唯一的刚体，使动作捕捉系统能够解析每个组件完整的六自由度位姿（图 8B）。

B. 垂直跳跃性能验证

为评估机器人搭载柔顺机构后的跳跃能力，我们进行了三组垂直跳跃实验（图 9）：

1) **基线：** 未安装附加结构的Unitree Go2机器人进行跳跃（图9，左）。2) **收拢组：** 安装了SSCM但处于收回状态的机器人。该对照组用于隔离机构额外重量对跳跃性能的影响（图9，中）。3) **展开组：** 模块处于展开状态的机器人，利用电机扭矩与结构弹性能量释放的协同作用（图9，右）。

为确保在机械约束下进行一致的比较，所有试验的下蹲高度均标准化为 $H_{\text{base}} = 283.1\text{mm}$。此外，为消除电池电压下降对电机转矩-转速包络的混杂影响，电能状态也进行了严格标准化。每组试验开始前，机器人电池均保持满电状态（$> 95\%$ 荷电状态），以确保母线电压可稳定满足峰值功率输出需求。有效跳跃高度定义为 $\Delta H = H_{\max} - H_{\text{base}}$。为降低实验偏差并确保统计可靠性，进行了五次试验（

$N = 5$) 针对每种实验场景（基线、收拢状态和展开状态）均进行了测试。

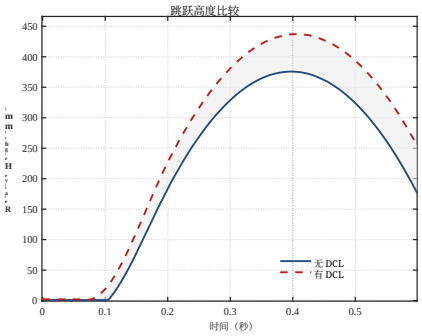


图1：基于运动捕捉数据的有效跳跃高度比较。

本研究所呈现的结果为这些试验所得的平均值。为量化性能提升，我们定义相对于基线组的**相对性能变化 (**δ)：

$$\delta = \frac{\Delta H - \Delta H_{\text{baseline}}}{\Delta H_{\text{baseline}}} \times 100\% \tag{2}$$

实验结果汇总于表 I 和图10。**基线** 组的有效跳跃高度为 $\Delta H = 373.1$毫米。**收拢状态** 组达到$\Delta H = 371.7$毫米。比较这两组可知，增加的重量仅造成 0.4%（$\delta = -0.4\%$）的相对性能下降，表明该结构的质量惩罚极小。

相比之下，**展开状态**组达到了 $\Delta H = 437.1\text{mm}$ 的有效跳跃高度。在该机构的综合作用下，相较于基线，跳跃高度增加了64.0mm。这相当于显著**的相对性能提升，达到**17.1%（$\delta = +17.1\%$）。

V. 结论

本文设计、建模、仿真并实验验证了一种新型可展开柔顺腿

实验组	最大高度 ($H_{\max}$)	有效跳跃高度 (ΔH)	相对变化（与基线相比）
基线	656.3 毫米	373.1 毫米	N/A
收拢状态	654.9 毫米	371.7 毫米	−0.4%
展开状态	**720.3 毫米**	**437.1 毫米**	**+17.1%**

表 I：垂直跳跃实验结果（ $N = 5$ 次试验的平均值）

（DCL），用于四足机器人。通过将基于聚醚嵌段酰胺的3D打印Gyroid填充结构与解析能量模型和分段PD控制策略相结合，我们的系统在垂直跳跃高度上实现了显著且可量化的17.1%提升。

我们已经成功证明，该系统能够提升爆发性能，同时得益于其可展开机构，不会牺牲标称运动。我们以有限元分析驱动的设计框架将解析建模（式 1）与有限元分析参数化联系起来，为未来设计提供了一种稳健的方法。目前，展开过程由手动触发。未来工作将聚焦于将该过程自动化，可能通过由特定关节构型（例如深蹲）触发的被动机械闩锁，或由机器人高层状态机控制的微执行器来实现。未来，我们将部署先进控制策略，例如模型预测控制（MPC）[22] 或强化学习（RL） [23],，以充分利用该柔顺系统复杂的非线性动力学，并进一步提升跳跃性能。

致谢

本研究得到西交利物浦大学（XJTLU）夏季本科生研究奖学金（SURF）项目的支持，项目编号为 SURF-2025-0179，以及西交利物浦大学创业家学院（太仓）创新工厂（IF）的支持，项目编号为 IF-36。

参考文献

[1] Y. Fan、Z. Pei、C. Wang、M. Li、Z. Tang 和 Q. Liu，“四足机器人的综述：结构、控制与自主运动”，*Advanced Intelligent Systems*，第6卷，第6期，文章编号2300783，2024年。[2] J. Lee、J. Kim、W. Ubellacker、T. G. Molnar 和 A. D. Ames，“用于复杂环境自主巡检的滚动臂四足机器人安全关键控制”，载于*2024*年*IEEE*机器人与自动化国际会议（*ICRA*）。IEEE，2024年，第3485–3491页。[3] N. Li、J. Cao 和 Y. Huang，“用于灾后搜救行动的救援四足机器人的制造与测试”，载于*2023*年*IEEE*第三届电子技术、通信与信息国际会议（*ICETCI*）。IEEE，2023年，第723–729页。[4] K. Wang、H. Zhao、F. Meng 和 X. Zhang，“仿生四足机器人的跳跃控制方法研究”，仿生学，第8卷，第1期，文章编号36，2023年。[5] K. Ye 和 K. Karydis，“采用预加载弹性棱柱形脊柱的四足机器人立定跳远建模与轨迹优化”，载于*2021*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。IEEE，2021年，第902–908页。[6] J. Luo、S. Ye、J. Su 和 B. Jin，“用于高负载能力动态四足运动的棱柱形准直驱机构”，国际机械科学杂志，第235卷，文章编号107698，2022年。[7] N. Kau、A. Schultz、N. Ferrante 和 P. Slade，“Stanford doggo：一款开源准直驱四足机器人”，载于*2019*年机器人与自动化国际会议（*ICRA*）。IEEE，2019年，第6309–6315页。

[8] F. Meng、Q. Huang、Z. Yu、X. Chen、X. Fan、W. Zhang 和 A. Ming，“腿式机器人的爆发式电动执行器及其控制”，*Engineering*，第12卷，第39–47页，2022年。[9] G. Apostolides、W. Pan、J. Kober、C. Della Santina 和 J. Ding，“通过示例引导的强化学习实现刚性及关节式柔性四足机器人的爆发式跳跃”，*arXiv*预印本 *arXiv:2503 16197*，2025年。。[10] S. Liu、J. Ding、C. Lu、Z. Wang、B. Su 和 Z. Guo，“腿式机器人双滑块并联弹性执行器的新型优化设计”，*IEEE/ASME*机电一体化汇刊，第29卷，第4期，第2886–2894页，2024年。[11] H. Yang、G. Wei、L. Ren、L. Yan 和 D. Caldwell，“模仿生物肌肉性能的柔顺执行器及其在高度仿生机械臂中的应用”，*Advanced Bionics*，第1卷，第1期，第2–18页，2025年。[12] G. Sutton 和 M. Burrows，“昆虫跳跃弹簧”，*Current Biology*，第28卷，第4期，第R142–R143页，2018年。[13] C. Wang、B. Sheng、Z. Li、M. Sivan、Z.-Q. Zhang、G.-Q. Li 和 S. Q. Xie，“一种具有可变刚度的轻质串联弹性执行器：设计、建模与评估”，*IEEE/ASME*机电一体化汇刊，第28卷，第6期，第3110–3119页，2023年。[14] M. Burrows 和 G. P. Sutton，“蝗虫利用橡胶蛋白与硬质角质层的复合结构储存能量，以用于跳跃和踢击”，*Journal of Experimental Biology*，第215卷，第19期，第3501–3512页，2012年。[15] C. C. Honeker 和 E. L. Thomas，“形态取向对三嵌段共聚物体系力学性能的影响”，*Chemistry of Materials*，第8卷，第8期，第1702–1714页，1996年。[16] G. Wang、G. Zhao、G. Dong、Y. Mu、C. B. Park 和 G. Wang，“采用带开模工艺的高压泡沫注射成型制备的轻质、超弹性、隔热隔音生物基PEBA泡沫”，*European Polymer Journal*，第103卷，第68–79页，2018年。[17] Z. Xu、G. Wang、J. Zhao、A. Zhang 和 G. Zhao，“通过微孔发泡制备的超弹性、结构可调聚醚嵌段酰胺泡沫”，*Journalof CO2* 101807，2022年，第55卷，*Utilization*，第。[18] Y. Lyu、T. Gong、T. He、H. Wang、M. Zhuravkov 和 Y. Xia，“不同承载角度下三周期极小曲面（TPMS）结构吸能性能的研究”，仿生学，第9卷，第7期，文章编号392，2024年。[19] S. Z. Ahmad、M. H. Masood、M. U. Khattab、S. S. Ahmad、S. A. A. Zaidi 和 S. Z. Khan，“新型TPMS晶格材料的最新进展：设计优化、性能调控及其在仿生支架中的应用”，*Materials*，第18卷，第22期，文章编号5209，2025年。[20] T. Maconachie、R. Tino、B. Lozanovski、M. Watson、A. Jones、C. Pan-delidi、A. Alghamdi、A. Almalki、D. Downing、M. Brandt等，“熔融沉积成型制造的ABS陀螺晶格结构的压缩行为”，*The International Journal of Advanced ManufacturingTechnology*，第107卷，第11期，第4449–4467页，2020年。[21] *PEBAX® 3533 SP 01*技术数据表，Arkema，2026年1月，访问日期：2026-02-06。[在线]。获取地址：https://hpp.arkema.com/assets/arkema/TDS PEBAX%C2% AE% 203533%20SP%2001 en WW.pdf [22] F. Wang、H. Jiang、C. Tao、W. Wan 和 Y. Cheng，“DBaS-Log-MPPI：通过障碍状态实现高效安全的轨迹优化”，载于*2025*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*），2025年，第1194–1201页。[23] Y. Cheng、P. Zhao、F. Wang、D. J. Block 和 N. Hovakimyan，“利用L1自适应控制提高强化学习策略的鲁棒性”，*IEEE*机器人与自动化快报，第7卷，第3期，第6574–6581页，2022年。