

DOI: 10.3901/JME.2024.04.420

基于拓扑优化和晶格填充的四足机器人 肢腿单元轻量化设计*

纵怀志¹ 艾吉昆¹ 张军辉¹ 江磊^{1,2} 谭树杰³
刘余贤¹ 苏琦¹ 徐兵¹

(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 230027;
2. 中兵智能创新研究院 北京 100072;
3. 南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要: 液压四足机器人具有离散的落足点和较大的负重能力等特点, 在无人监测、灾难救援和物资运输等场景中具有广阔的应用前景和重要的研究价值。作为四足机器人最关键的运动单元, 肢腿单元的重量直接影响其动态性能。因此, 根据肢腿单元的运动特点开展轻量化设计显得尤为重要。针对 Spurlos II 肢腿单元的大腿结构存在较多冗余重量的问题, 利用变密度惩罚法对其进行拓扑优化, 通过基于 B 样条拟合二维切片轮廓的方法对优化后的网格型模型进行重构。针对模型重构带来的局部应力集中问题, 引入晶格填充结构, 实现局部优化。优化后, 大腿部件的重量为 1 007.19 g, 降低了 36.01%; 大幅度减重的同时, 大腿部件的最大等效应力降低了 1.41%。最后, 优化后的肢腿单元在不同频率下的轨迹跟踪试验中表现出的更好的动态特性, 证明所提出方法的有效性。

关键词: 液压四足机器人; 拓扑优化; 晶格填充; 模型重构; 轻量化设计

中图分类号: TH137

Lightweight Design of Limb Leg Units for Hydraulic Quadruped Robots by Topology Optimization and Lattice Filling

ZONG Huaizhi¹ AI Jikun¹ ZHANG Junhui¹ JIANG Lei^{1,2} TAN Shujie³
LIU Yuxian¹ SU Qi¹ XU Bing¹

(1. State Key Laboratory of and Mechatronics Systems, Zhejiang University, Hangzhou 230027;
2. China North Artificial Intelligence and Innovation Research Institute, Beijing 100072;
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: Hydraulic actuated quadruped robots have bright application prospects and significant research values in unmanned area investigation, disaster rescue, material transport and other scenarios, due to their discrete landing positions and large payloads. As the most critical movement unit of a quadruped robot, the mass distribution of limb leg unit directly affects the dynamic performance of the robot, calling for a compact and lightweight design. This study focuses on the problem of excessive redundant weight in the thigh structure of the limb leg unit of Spurlos II robot. The solid isotropic material with penalization algorithm is adopted to the thigh structure topology optimization, and the optimized mesh model is reconstructed using a method based on B-spline fitting approach for two-dimensional cross-sectional profiles. Then, to solve the problem of local stress concentration caused by model reconstruction, lattice filling structures are introduced to achieve further optimization. After optimization, the weight of the thigh structure component

* 国家自然科学基金(U21A20124)和浙江省重点研发计划(2022C01039)项目
资助。20230815 收到初稿, 20231211 收到修改稿

reduces by 36.01% to 1007.19 g, and its maximum equivalent stress decreases by 1.41%. Finally, the optimized leg limb unit demonstrated better dynamic performance in trajectory tracking experiments with different frequencies, proving the effectiveness of the proposed lightweight design method.

Key words: hydraulic quadruped robot; topology optimization; lattice filling; model reconstruction; lightweight design

0 前言

高速奔跑的猎豹、灵活攀岩的山羊和搬运货物的马等,呈现出卓越的运动和作业能力。受四足动物的启发,多款四足机器人样机被开发出来。与轮式机器人或履带式机器人相比,四足机器人在非结构化环境中表现出更好的灵活性和地形适应性^[1-2],被证明可以在山区、丛林或冰雪覆盖的土地上运动。四足机器人凭借其出色的步态稳定性和抗干扰能力,受到相关领域学者的普遍关注^[3-5]。其中,液压四足机器人以其大功重比和高控制带宽等特点^[6],在通讯组网、物资运输、无人探测等场景具有广阔的应用前景。

作为四足机器人关键的运动单元,肢腿单元的重量大小及分布直接影响其动态性能^[7]。目前,多数液压四足机器人直接选用工业场景中的元件进行组装,存在较多的冗余重量,功率密度有待提升。对机器人高动态运动和高续航能力的迫切需求促使许多学者对液压四足机器人肢腿单元进行轻量化设计。

集成化设计是实现轻量化的主要手段之一,主要包括执行器的集成设计和驱动-结构一体化设计。

作为液压足式机器人的里程碑, BigDog 开发了一款定制开发的低摩擦液压缸^[8],集成了伺服阀、单轴拉压力传感器、位移传感器等,满足机器人安装空间紧凑、输出力大的需求。但本质上仍是多个元件的叠加,集成度有待提升。意大利技术研究院利用增材制造技术开发了一款高度集成的智能液压执行器^[9],将伺服阀、溢流阀、位移和压力传感器等全部组件都集成到 3D 打印的钛合金缸筒上,大幅度降低重量的同时,实现包络尺寸的减少和可靠性的增加,并应用于 HyQ2Max 四足机器人。燕山大学采用执行器和腿部结构件集成的方法,设计了缸-腿一体化结构,并应用于四足机器人样机。与 HyQ2Max 相比,其髋关节质量减轻 11%,膝关节减

轻 7%,并能实现更大输出功率^[10]。集成化设计主要依赖功能需求和工程经验,集成后的结果仍存在一定的优化空间。

为了进一步实现集成化结构的轻量化设计,常采用拓扑优化方法。该方法可以根据给定的约束条件,如力学特性等,在特定的设计区域对材料布局进行优化分布^[11]。美国波士顿动力公司开发的 Atlas 双足机器人^[12],经由拓扑优化后,其躯干骨架、肢腿结构、脚掌等重量大幅度减轻,整机重量减少了约 47.4%。得益于重量的减轻,Atlas 能够实现后空翻、奔跑跳跃、体操等高难度动作。浙江大学徐兵教授团队利用拓扑优化对肢腿单元的结构件进行轻量化,重量减少了 24.5%,进一步提升了肢腿单元的动态性能^[13]。此外,针对肢腿单元用碳纤维液压伺服缸端盖重量冗余的问题,通过拓扑优化技术对其进行了轻量化,端盖重量减少 50% 以上^[14]。上述案例均在轻量化方面取得较好的效果,并在机器人上得到性能验证。

随着增材制造技术的不断发展,晶格填充型结构得以实现,进一步拓宽了拓扑优化的轻量化潜力。具体而言,晶格结构利用由梁或支柱与节点组合而成的体系结构获得优良的力学性能^[15],通过在结构件内部填充晶格,可以在保证关键区域结构强度的前提下,提高结构的强度/重量比,最大化地提升产品性能。目前多数研究集中在晶格的构型上,有关晶格应用的液压机器人案例较少。综上可预见:在集成化设计的基础上,合理利用拓扑优化、晶格填充等方法,将进一步激发增材制造的轻量化优势。

本文针对 Spurlon II 肢腿单元质量占比最大的大腿部件进行轻量化设计。首先通过有限元分析确认肢腿单元的应力分布,然后利用变密度惩罚法对大腿部件进行拓扑优化减重,进而通过基于 B 样条拟合二维切片轮廓的方法对模型重构,再针对优化结果产生的应力集中问题,采用晶格填充方法进行局部优化,最终实现大腿部件的轻量化设计。最后通过试验验证了轻量化肢腿单元的

性能。综上所述,拓扑优化和晶格填充的结合可以有效实现液压四足机器人肢腿单元的轻量化,并提高其动态性能。

1 Spurlos II 肢腿单元及其有限元分析

为了避免液压缸驱动三角形带来的非线性和结构复杂等问题,Spurlos II 四足机器人在结构尺寸相似的基础上,选用双叶片式摆动缸作为髋关节的驱动执行器,便于关节控制,并避免了驱动三角形因连杆摩擦所产生的能量损失。两种肢腿单元模型如图 1 所示。



图 1 两代肢腿单元模型图(左:一代;右:二代)

Spurlos II 肢腿单元的结构组成如图 2 所示,双叶片摆动缸装入大腿部件上端,通过配油端盖中的内嵌流道传输给膝关节内嵌缸,大腿部件通过铰接端连接小腿部件。作为最主要的承力部件,质量占比最大,该部件的静态特性将直接决定机器人整机性能,因此对其进行重点优化设计。

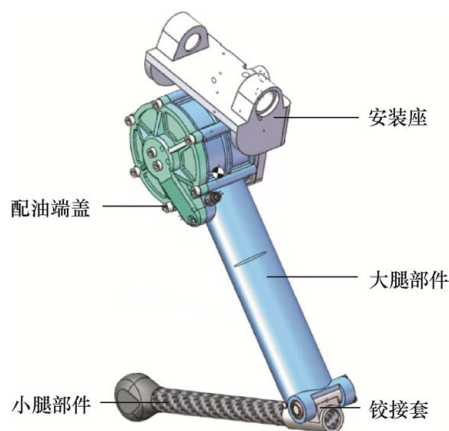


图 2 Spurlos II 肢腿单元结构示意图

Spurlos II 大腿部件除与抗扭配油盖相连的圆柱结构外,下部的壳体部分还包括内嵌的输油管路

与运动活塞相配合的膝关节液压缸腔体结构,如图 3 所示。另外,腔体内设计了筋结构,在减重的同时保持结构的强度。

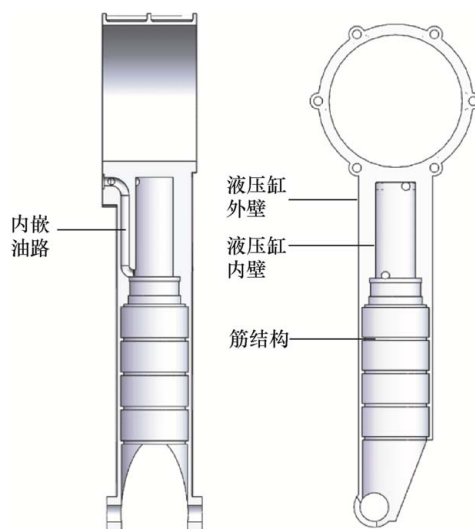


图 3 大腿部件剖视图

根据肢腿单元的使用工况,大腿部件受力主要来自:① 内嵌油路和运动活塞组成的腔体结构内壁受到垂直于表面、均匀分布的压力,最大压力为 21 MPa;② 小腿结构传递过来的扭矩,根据多体动力学仿真可知,作用于大腿部件下端的铰接端结构的最大扭矩为 400 N·m,大腿部件构件所受载荷分布情况如图 4 所示。其中,红色箭头代表液压油作用产生的压力位置及方向,紫色箭头则代表扭矩作用的位置及方向。

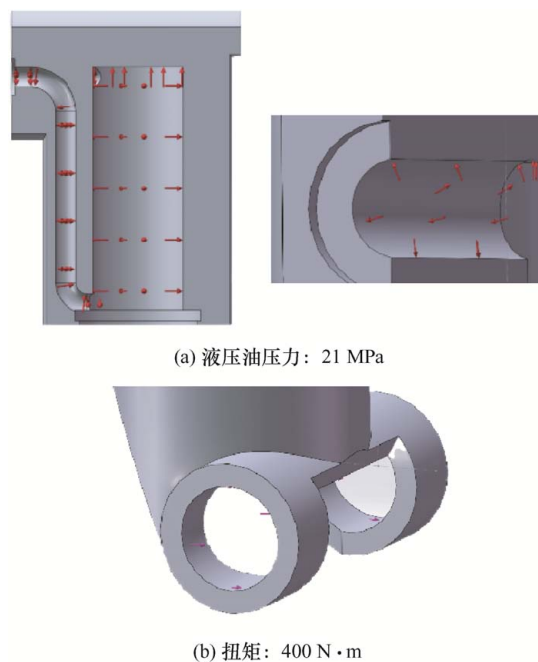


图 4 大腿部件受力分析

利用有限元软件对大腿部件进行静力学分析。首先对大腿部件模型进行简化,去除模型中的螺纹、

倒角等特征以减少计算时间。然后导入大腿部件三维模型, 设定材料属性为 TC4 钛合金, 具体参数如表 1 所示。继而添加约束条件, 由于大腿部件上部通过螺栓与抗扭配油盘相连接, 在上部圆盘状结构周围均布的螺栓孔表面添加固定约束。考虑到该圆盘状结构内壁通过滚针轴承与安装座铰接, 其内壁表面也需要添加固定铰接约束, 其他载荷设置参照图 4 所示。采用网格无关性验证的方法对网格进行设置, 网格尺寸 1 mm, 单元数 1 919 148 个。最后进行有限元计算, 得到大腿部件的变形、应变和应力, 结果如图 5 所示。

表 1 TC4 钛合金材料属性

属性	数值
密度/(kg/m ³)	4 450
弹性模量/GPa	110
泊松比	0.33
屈服强度/MPa	920
抗拉强度/MPa	1 100

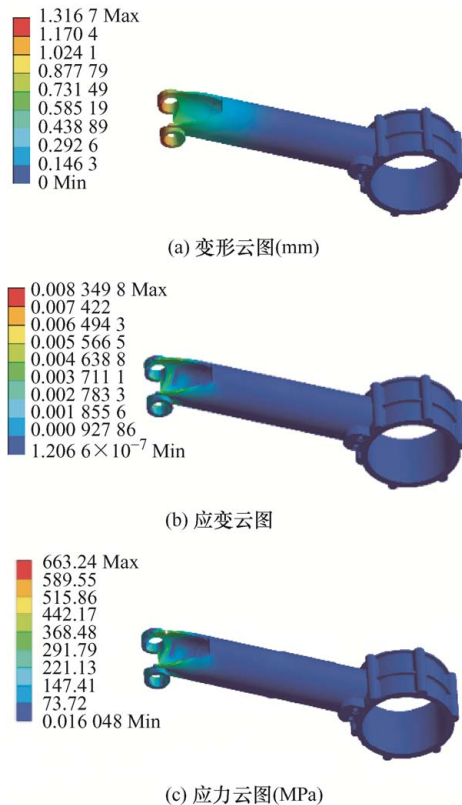


图 5 大腿部件仿真云图

变形云图结果显示该大腿部件的最大变形为 1.32 mm, 出现在大腿部件的下端铰接结构处。这是由于固定约束施加于零件上部与安装底座连接处, 载荷施加于下部与小腿关节连接处, 由于累积效应产生了此结果。从应力云图中可得最大等效应力值

为 663.24 MPa, 在 1.2 倍的安全系数下仍有很大的轻量化空间。

2 基于变密度惩罚法的大腿结构拓扑优化

常用的拓扑优化方法包括均匀化方法、结构进化法、密度惩罚法和水平集法^[16]。其中, 密度惩罚法逻辑简单, 对于复杂的结构设计域具有很强的普适性。因此, 本研究采用该方法对大腿部件进行拓扑优化设计。

该方法具体通过罚函数法对材料的中间单元密度进行操作, 使其收敛于 0 和 1 两端, 生成清晰的材料拓扑优化边界^[17]。相对密度和弹性模量关系表示为

$$\begin{cases} E(\rho) = \rho^p E \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, E 为材料的弹性模量, ρ 为最小相对密度, p 为大于 1 的惩罚因子。

进一步引入罚函数法对拓扑方程进行求解, 建立单元密度、弹性模量、响应等变量之间的函数关系, 求解每个单元密度

$$\rho = X_e \rho_0 \quad (2)$$

式中, ρ_0 为设计域单元固有密度, X_e 为达标设计域中各单元的相对密度, 范围为 0~1, 用来量化对单元的优化目标的贡献。选用各向同性材料惩罚函数模型为理论基础, 选择设计变量为相对单元密度, 优化目标为结构刚度最大, 约束设定为设计域的体积分数, 建立数学模型如下

$$\begin{cases} \text{Find } \rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) \\ \min c(\rho) = \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} = \sum_{e=1}^n (\rho_e)^p \mathbf{u}_e^T \mathbf{K}_e \mathbf{u}_e \\ \text{s.t. } \mathbf{K}(\rho) \mathbf{u} = \mathbf{P} \\ V(\rho) \leq \lambda \cdot V_0 \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho_i \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $c(\rho)$ 为结构柔顺度, \mathbf{u} 为有限元模型中节点位移, \mathbf{K} 为结构整体刚度矩阵, \mathbf{u}_e 为单元的节点位移, \mathbf{K}_e 为单元的刚度矩阵, \mathbf{P} 为施加的载荷向量, $V(\rho)$ 为优化后的体积, V_0 为原始体积, λ 为保留的体积分数。

选用集成了拓扑优化功能的 CAE 软件 Autodesk Fusion360 对大腿部件模型进行拓扑优化设计。设定优化目标为减轻零件质量, 采用密度惩

罚法进行优化求解。模型文件、材料属性、固定约束和载荷等设置与第 1 节相同。

拓扑优化开始前首先将待优化的区域分为非设计区域和设计区域。非设计区域不需要优化, 这些区域的材料将被保留。设计区域需要根据拓扑优化算法来决定材料单元的保留与删除。区域划分如图 6 所示, 红色区域的膝关节内嵌缸的内壁、输油管、安装座、配油端盖以及小腿连接处都被标记为非设计区域。我们将灰色区域标记的腿干下端, 包括内部筋结构, 全部划定为设计区域, 以最大程度地轻量化大腿部件。接下来需要在平衡计算精度和计算效率的前提下划分网格。然后对模型添加响应、约束及优化目标。根据式(3), 设置响应为柔顺度和体积, 体积分数 $\leq 50\%$, 优化目标为刚度最大。

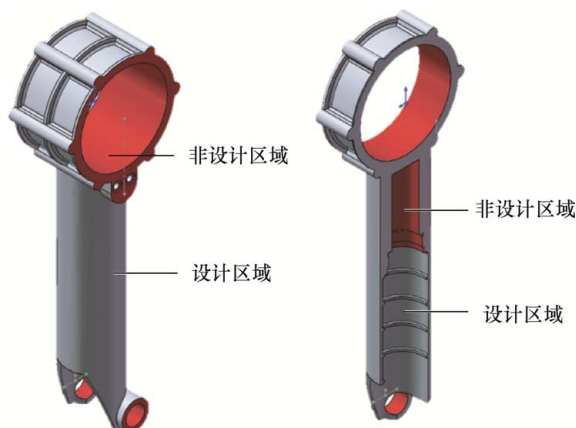


图 6 模型设计域

前处理完成后, 对有限元模型进行变密度拓扑求解, 获得单元密度云图结果, 如图 7 所示。优化过程中, 删除密度趋近于 0 的材料单元, 保留密度趋近于 1 的材料单元。蓝色区域表示材料单元的优化贡献小, 可以考虑删除; 而红色区域则需要保留。从右图可以直观地看到, 膝关节内嵌缸的外壁材料被大量去除, 而对于起到承力作用的膝关节内嵌缸的内壁、输油管等结构基本保留。此外, 非设计区域也被很好地保留, 优化后的模型以 STL 格式导出。

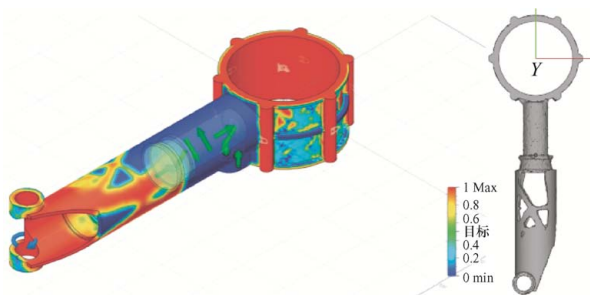


图 7 拓扑密度云图及优化模型

3 模型重构与晶格填充

3.1 模型重构

基于变密度惩罚法生成的拓扑优化结果是非连续的网格型模型, 转换为 STL 文件后, 其表面是粗糙的三角面片。由于其缺乏基本的点、线和面等几何特征, 模型无法直接用于金属 3D 打印, 且难以用于如有限元分析和形状优化的后续研究中。因此需要对其进行网格光滑处理。

采用 Taubin 光滑^[17]和 Laplacian 光滑^[18]组合的算法对模型进行光滑处理, 结果如图 8 所示。光滑后的模型体积分数为优化前的 49.98%, 光滑前为 50%, 前后体积差仅为 0.02%。说明该种组合可以在特征信息丢失较小的情况下更好的光滑网格模型。

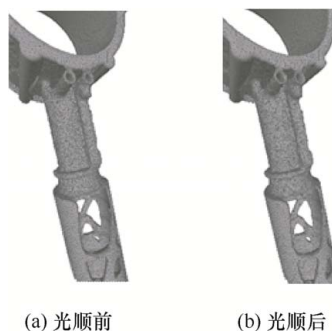


图 8 迭代组合光滑结果

然后, 对光滑后的模型进行切片处理以获得二维轮廓模型。由于 STL 模型为多个三角面片组成, 因此切片算法需要先计算平面与三角面的交线后再对其进行拼接。使用基于扫描平面的求交算法^[19]进行计算, 然后基于字典排序算法^[20]对计算得到的线段进行拼接处理。考虑到切片后结构特征的完整性和后续拟合的工作量, 选取切片厚度为 2 mm。

为了获得更好的拟合精度, 采用三次均匀 B 样条拟合方法^[21], 要求曲线逼近型值点进行逼近拟合, 进而得到二维轮廓。首先根据数据点进行插值拟合构造节点矢量, 令曲线起始点同起始数据点重合, 设数据点为 $p_i (i=0, 1, \dots, n)$, 则 $n+3$ 个控制点 $d_i (i=0, 1, \dots, n+2)$ 的节点矢量为 $(u_0, u_1, \dots, u_{n+6})$ 。采用均匀化参数法求解数据点处的参数值 $u_{i+3} (i=0, 1, \dots, n)$ 。

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_3 \\ u_{i+3} = \frac{i}{n} & i=1, 2, \dots, n-1 \\ u_{n+3} = u_{n+4} = u_{n+5} = u_{n+6} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

$n+1$ 个数据点将具有 $n+3$ 个控制顶点的三次 B 样条曲线分成了 n 段, 采用均匀化参数法求节点向

量 U , 曲线定义域为 $u \in [u_3, u_{n+3}]$, 得到其中一段的曲线起始点

$$p_i(u_{i+3}) = (B_i(u_{i+3}) \ B_{i+1}(u_{i+3}) \ B_{i+2}(u_{i+3}) \ B_{i+3}(u_{i+3})) \begin{pmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ V_{i+2} \\ V_{i+3} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, $p_i(u_{i+3})$ 为第 i 段起始点, $i \in [0, n-4]$, B 代表样条基函数, V 为控制顶点。

由于节点具有重复度, 可得

$$\begin{pmatrix} B_{1,3}(u_3) & B_{2,3}(u_3) & & B_{0,3}(u_3) \\ B_{1,3}(u_3) & B_{2,3}(u_3) & B_{3,3}(u_3) & \\ \cdots & & & \\ \cdots & B_{n-4,3}(u_3) & B_{n-3,3}(u_3) & B_{n-2,3}(u_3) \\ B_{n-1,3}(u_3) & B_{n-3,3}(u_3) & B_{n-2,3}(u_3) & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{n-3} \\ V_{n-4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ \vdots \\ p_{n-4} \\ p_{n-3} \end{pmatrix} \quad (6)$$

通过求解式(6)即可求出曲线的控制顶点。采用常用的三次均匀 B 样条曲线进行插值拟合, 反求控制点方程组如下

$$\begin{pmatrix} 1 & 4 & 1 & & & 1 \\ & 1 & 4 & 1 & & \\ & & & \cdots & & \\ & & & & 1 & 4 & 1 \\ 1 & & & & 1 & 4 & 1 \\ 4 & 1 & & & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{n-3} \\ V_{n-2} \\ V_{n-1} \end{pmatrix} = 6 \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{n-2} \\ p_{n-1} \\ p_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

设 $V_0 = V_n$, $V_{n+1} = V_1$ 为补充条件, 则该方程组有唯一解, 根据输入的型值点求解式(7)即可求得全部的控制点。

利用 Matlab 软件反求控制顶点并拟合得到轮廓线, 并导出 IGES 格式的拟合轮廓线。将 IGES 文件导入 SOLIDWORKS 软件中, 利用“扫略”操作进行模型重构。具体为选取数据点作为顶点, 通过射线法判断内外轮廓, 从而区分实体和孔洞; 引用文献[22]方法实现三维实体模型重构, 最终得到大腿部件的 CAD 模型, 重构后的大腿部件重量减轻了 49.22%。

最后对重构后的大腿部件进行有限元分析, 结果如图 9 所示。重构后的模型存在应力集中问题, 应力极值出现在液压缸处, 为 1 557.16 MPa。除应力集中区域外, 应力最大为 865.07 MPa, 仍在许用应力范围内。

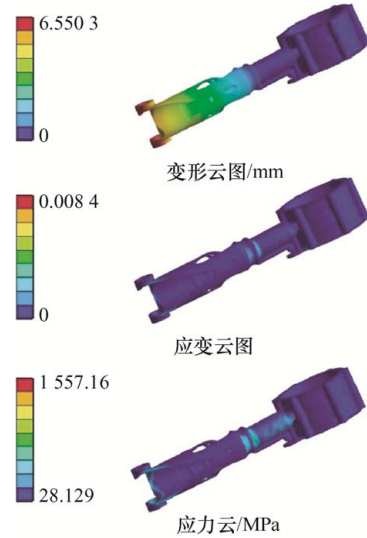


图 9 大腿部件拓扑重构模型仿真结果

3.2 基于晶格填充的局部优化

图 9 中的应力云图结果显示, 膝关节内嵌缸处会产生应力集中现象, 因此还需要对内嵌缸处进行二次优化。考虑到晶格填充结构具有高强度质量比和优异的吸能特性^[15], 广泛用于轻量化设计中, 尤其是结构件的局部填充。因此, 可以考虑利用晶格结构具有的周期性质来减弱应力集中现象, 使得应力分布更均匀。

首先, 删除液压缸处的拓扑优化结果, 并将内外壁之间进行镂空作为待填充区域, 同时设置排粉孔便于后期加工。此外, 保留其他部分的拓扑优化结果。基于上述操作, 进而恢复优化掉的下半部分的筋结构, 待填充区域如图 10 所示。

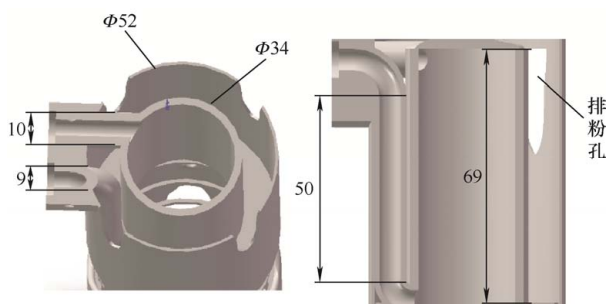


图 10 待填充区域

作为晶格填充结构中重复的单元,胞元的构型决定了晶格填充结构的造型,直接影响到结构的各项性能。胞元构型按照设计原理可分为杆件类构型和隐式曲面构型等^[23]。相较于隐式曲面结构,杆件类结构具有更好的承力性能,更适合作为承力结构使用。考虑到大腿部件模型受到沿液压缸壁结构均匀分布的液压油径向压力以及小腿传递的扭矩产生的轴向拉、压力,选用杆件类胞元构型中的八角桁架构型进行晶格填充,如图 11 所示。八角桁架构型结构稳定、传力均匀,八角桁架构型结构稳定、传力均匀^[24],此外还具有吸能特性、自支撑性和各向同性的特点,被广泛用于晶格填充设计中,其也被认为是一种有潜力替代蜂窝、泡沫结构的胞元构型^[25]。设置八角桁架晶格结构长度 L 为 7.23 mm,杆径 D 为 0.58 mm,进行局部拓扑优化,等效模型如图 12 所示。

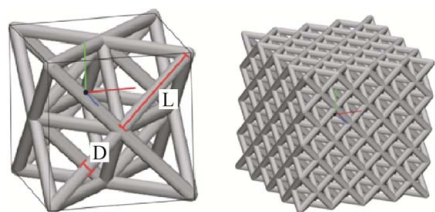


图 11 八角桁架胞元及其组成的晶格结构

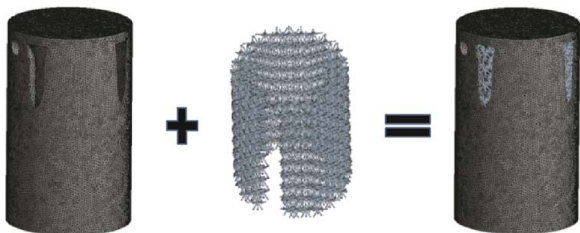


图 12 晶格填充等效模型

对最终得到的拓扑优化和点阵填充结合的大腿部件模型进行有限元分析,结果如图 13 和表 2 所示。相较于初始未进行优化设计的模型,优化后结构最大等效应力减少了 1.41%,质量减少了

36.01%,最大变形相较于大腿部件的结构尺寸可近似忽略。综上,所提优化方法实现了大腿部件的轻量化。

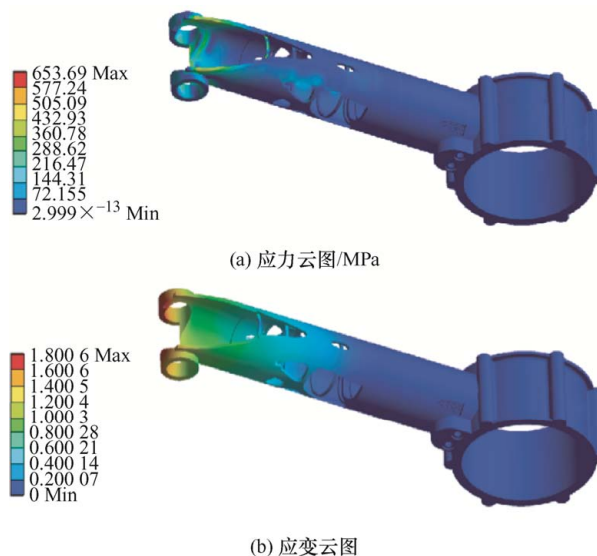


图 13 优化结果仿真云图

表 2 优化前后大腿部件性能对比

参数	优化前	优化后	效果(%)
最大等效应力/MPa	663.24	653.89	-1.41
最大变形/mm	1.32	1.80	+36.80
质量/g	1 574.09	1 007.19	-36.01

4 试验验证

大腿部件采用选区激光熔化技术进行增材制造,粉末材料选用 Ti150 单激光金属打印机和 TC4 钛合金金属,打印完成后,对大腿部件进行精加工和后处理,最终实物图如图 14 所示。



图 14 待装配的大腿部件

为了测试优化后肢腿单元的动力学性能,搭建如图 15 所示的试验台。控制框架采用 SIMULINK 设计,并在 Code Composer Studio 环境下转换成 C 语言。下位机由 TMS320F28335 等数字信号处理芯片组成,通过 CAN 总线接收指令信号。两个执行器的伸缩由两个伺服阀 Domin S4 Pro 实现。在转轴处安装两个绝对角度编码器 OIDC3815S24S,用于测量髋关节和膝关节的角度。

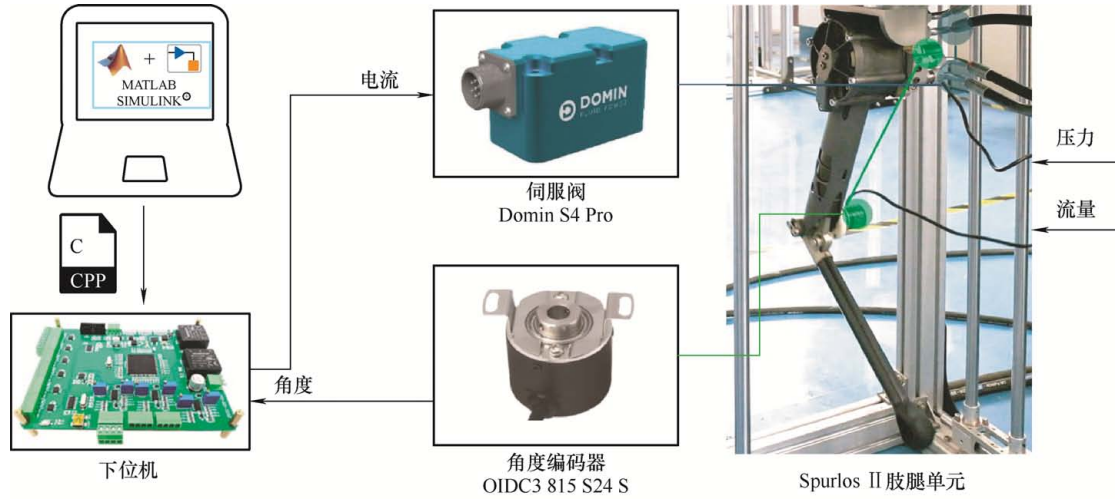


图 15 肢腿单元测试试验台

通过轨迹跟踪试验对系统的动态性能进行了评价。所有试验均在相同压力为 10 MPa 的条件下进行。利用 PID 控制方法对足端轨迹进行闭环控制，足端轨迹采用五次多项式轨迹。步态占空比为 0.5，步长 S 为 0.3 m。步幅 H 为 0.1 m，髋关节初始高度为 0.49 m。足端轨迹方程如下

$$x(t) = \begin{cases} 0.3(6t^5 - 15t^4 + 10t^3) - 0.5S & 0 < t \leq T/2 \\ 0.3(6(1-t)^5 - 15(1-t)^4 + 10(1-t)^3) - 0.5S & T/2 < t \leq T \end{cases}$$

$$y(t) = \begin{cases} 0.49 - 0.1(6t^5 - 15t^4 + 10t^3) & 0 < t \leq T/4 \\ 0.49 - 0.1(6(0.5-t)^5 - 15(0.5-t)^4 + 10(0.5-t)^3) & T/4 \leq t \leq T/2 \\ 0.49 - 0.1(6(t-0.5)^5 - 15(t-0.5)^4 + 10(t-0.5)^3) & T/2 \leq t \leq 3T/4 \\ 0.49 - 0.1(6(1-t)^5 - 15(1-t)^4 + 10(1-t)^3) & 3T/4 \leq t \leq T \end{cases} \quad (9)$$

在给定五次多项式轨迹的情况下，测量了不同运动频率下两个关节的角度跟踪数据。试验结果如图 16 所示，当运动频率为 0.25 Hz 时，髋关节和膝

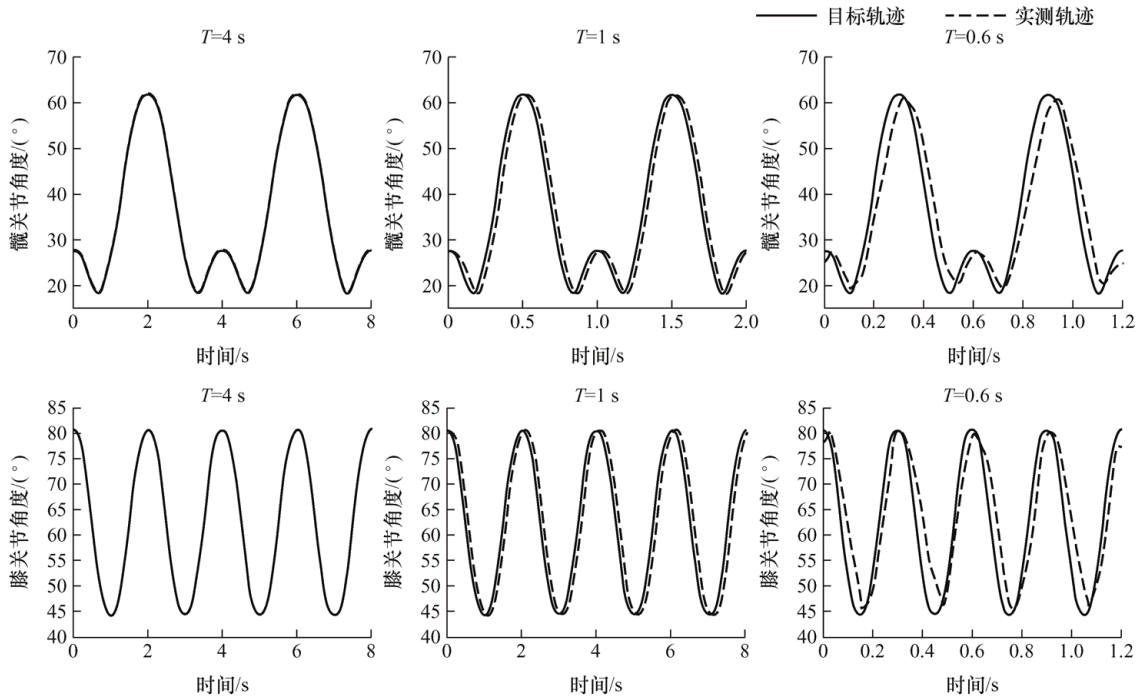


图 16 不同运动频率下关节角度的变化

关节的实时角度数据与给定的轨迹吻合良好。随着运动频率的增加,幅值降低,相位滞后。当运动频率增加到 1.67 Hz 时,频率对轨迹的跟踪性能的影响更为显著:峰值附近的相位延迟增大,实际峰值与理论峰值之间的差距增大;曲线出现抖动,且周期之间的一致性变差。

两代肢腿单元的角度跟踪误差如表 3 所示。利用相同的算法执行相同的轨迹跟踪指令时,优化后的 Spurlos II 肢腿单元在各个频率下的关节误差均小于 Spurlos I,尤其在高运动频率时(1.67 Hz),髋关节和膝关节的平均角度误差分别降低了 61.54%和 93.33%。

表 3 两代肢腿关节角度误差对比

周期/s	频率/Hz	测试对象	髋关节平均角度误差/(°)	膝关节平均角度误差/(°)
4.00	0.25	Spurlos I	0.89	0.53
		Spurlos II	0.11	0.14
1.00	1.00	Spurlos I	0.99	1.23
		Spurlos II	0.22	0.19
0.60	1.67	Spurlos I	2.34	4.35
		Spurlos II	0.90	0.29

在不同的运动频率下,多周期的试验均显示:优化后的肢腿单元的落足点更集中于理论轨迹的期望落足点,散布范围更小。这表明,优化后的肢腿单元具有更精确的运动轨迹,可实现更稳定的摆动。综上,基于拓扑优化和晶格填充的肢腿单元获得较好的轻量化效果,有利于机器人动态性能的提升。

5 结论

本文基于拓扑优化和晶格填充技术对 Spurlos II 肢腿单元质量占比最大的大腿部件进行轻量化设计。结果表明,优化设计的大腿部件质量减少了 36.01%,最大等效应力减少了 1.41%。并针对集成了轻量化设计部件的肢腿单元进行轨迹跟踪试验以验证其运动性能,进一步说明了所提的轻量化设计方法能够促进机器人整机性能的提升。

拓扑优化可以实现结构的轻量化,但优化后的模型在重构后可能存在应力集中,超出许用应力范围。本文引入了晶格填充方法对应力集中区域进行局部性能优化,使得结构应力分布更均匀。

复合材料替代金属^[26]是一种轻量化效果显著的方法,下一步,将复合材料、晶格填充和拓扑优化三者有机地结合起来,实现结构件的局部性能定制值得深入的研究。

参 考 文 献

- [1] JIN Y, LIU X, SHAO Y, et al. High-speed quadrupedal locomotion by imitation-relaxation reinforcement learning[J]. Nature Machine Intelligence, 2022, 4(12): 1198-1208.
- [2] HONG S, UM Y, PARK J, et al. Agile and versatile climbing on ferromagnetic surfaces with a quadrupedal robot[J]. Science Robotics, 2022, 7(73): 1017.
- [3] 丁良宏. BigDog 四足机器人关键技术分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 1-23.
DING Lianghong. Key technology analysis of BigDog quadruped robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 1-23.
- [4] SAPATY P. Military robotics: Latest trends and spatial grasp solutions[J]. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 2015, 4(4): 9-18.
- [5] HE J, GAO F. Mechanism, actuation, perception, and control of highly dynamic multilegged robots: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1): 1-30.
- [6] CHO J, KIM J T, KIM J, et al. Simple walking strategies for hydraulically driven quadruped robot over uneven terrain[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2016, 11(5): 1433-1440.
- [7] 刘志浩. 液压四足机器人腿部结构拓扑仿生轻量化设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
LIU Zhihao. Hydraulic quadruped robot leg structure topology bionic lightweight design[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [8] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822-10825.
- [9] BARASUOL V, VILLARREAL-MAGANA O A, SANGIAH D, et al. Highly-integrated hydraulic smart actuators and smart manifolds for high-bandwidth force control[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2018, 5: 51.
- [10] 孔祥东, 朱琦歆, 姚静, 等. “液压元件与系统轻量化设计制造新方法” 基础理论与关键技术[J]. 机械工程学报, 2022, 57(24): 4-12.
KONG Xiangdong, ZHU Qixin, YAO Jing, et al. Basic theory and key technology of “New method for lightweight design and manufacturing of hydraulic components and systems”[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(24): 4-12.
- [11] YANG J, GU D LIN K, et al. Laser additive manufacturing of bio-inspired metallic structures[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2022, 1(1): 100013.

- [12] BOSTON D. Atlas[EB/OL]. [2023-07-20]. <https://www.bostondynamics.com/atlas>.
- [13] ZONG H, ZHANG J, JIANG L, et al. Bionic lightweight design of limb leg unit for hydraulic quadruped robots by additive manufacturing and topology optimization[EB/OL]. [2023-8-20]. <https://doi.org/10.1007/s42242-023-00256-0>.
- [14] HUANG H, ZHANG J, XU B, et al. Topology optimization design of a lightweight integrated manifold with low pressure loss in a hydraulic quadruped robot actuator[J]. *Mechanical Sciences*, 2021, 12(1): 249-257.
- [15] ZHANG J, HUANG H, LIU G, et al. Stiffness and energy absorption of additive manufactured hybrid lattice structures[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2021, 16(4): 428-443.
- [16] KRISHNA L S R, MAHESH N, SATEESH N. Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(2): 1414-1422.
- [17] TAUBIN G. A signal processing approach to fair surface design[C]// In: *Computer Graphic Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California*, 1995: 351-358.
- [18] FIELD D. Laplacian smoothing and Delaunay triangulations[J]. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 1988, 4(6): 709-712.
- [19] TIAN R, LIU S, ZHANG Y. Research on fast grouping slice algorithm for STL model in rapid prototyping[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1074(1): 012165.
- [20] 何明昕, 炊向军, 李家禹, 等. 繁简体汉字按拼音与混合字符按字典序排序[J]. *计算机工程与设计*, 2014, 35(6): 2009-2012.
HE Mingxin, CHUI Xiangjun, LI Jiayu, et al. Sorting of simplified chinese characters by Pinyin and mixed characters in lexicographic order[J]. *Computer Engineering and Design*, 2014, 35(6): 2009-2012.
- [21] 周超骏, 刘鼎元, 曹沅. 船体数学线型设计—B 样条曲面法[J]. *上海交通大学学报*, 1985(3): 1-10.
ZHOU Chaojun, LIU Dingyuan, CAO Yuan. Mathematical design of hull lines with B-spline surfaces[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 1985(3): 1-10.
- [22] TANG P, KUANG H. Integration of topology and shape optimization for design of structural components[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2001, 22(1): 65-82.
- [23] MUSENICH L, STAGNI A, LIBONATI F. Design of hierarchical lattice structures attainable by additive manufacturing techniques[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2023, 1275(1): 012003.
- [24] DONG L, DESHPANDE V, WADLEY H. Mechanical response of Ti-6Al-4V octet-truss lattice structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 60: 107-124.
- [25] GANGIREDDY S, KOMARASAMY M, FAIERSON E J, et al. High strain rate mechanical behavior of Ti-6Al-4V octet lattice structures additively manufactured by selective laser melting (SLM)[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 745: 231-239.
- [26] 徐兵, 纵怀志, 张军辉, 等. 碳纤维复合材料液压缸研究现状与发展趋势[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(2): 446-459.
XU Bing, ZONG Huaizhi, ZHANG Junhui, et al. Research status and development trend of carbon fiber reinforced polymer hydraulic cylinder[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(2): 446-459.

作者简介: 纵怀志, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为轻量化液压元件(碳纤维液压缸、轻量化蓄能器、新型摆动缸)、足式机器人节能控制等方面。

E-mail: hzzong@zju.edu.cn

苏琦(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为智能液压阀、电液比例伺服控制等。

E-mail: 471068186@qq.com