轻量化液压双足机器人机械腿拓扑优化设计

朱佳怡[1] 高 杰[1*] 高 亮[2] 曹 淮[2]
1.华中科技大学航空航天工程学院,武汉,430074
2.华中科技大学机械科学与工程学院,武汉,430074

摘要:目前在双足机器人轻量化设计过程中,许多零件的优化设计仍未能获得理想的结构形态,最终只能依靠设计者的经验进行后续的调整和修正。基于此,对现有的拓扑优化方法进行了系统梳理,并将其引入机械大腿的结构设计中。通过构建机械大腿轻量化优化设计的数学模型,并按照拓扑优化的流程对机械大腿的初始设计几何模型进行了不同单元密度和优化最小尺寸的减重设计,最终获得了四种拓扑结构,分别使质量减小了535.4 g、494.3 g、423.8 g和569.2 g。根据实际工况和机加工工艺的要求,选择了第三种方案进行强度仿真校核,仿真结果表明,与已加工构型相比,在设定分布力的工况下,优化设计的最大位移变形量为0.9012 mm,明显小于原设计的最大位移变形量1.188 mm;在设定分布力及力矩合力的工况下,最大位移变形量为1.799 mm,也小于原设计的最大位移变形量2.377 mm。部件质量减小了38.45%,优化设计的性能表现优于原设计,验证了有限元模型的准确性及优化设计的有效性。

关键词:液压双足机器人;拓扑优化;结构设计;机械腿轻量化
中图分类号:TH16
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.011 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Topology Optimization for Lightweight Design of Mechanical Legs of Hydraulic Bipedal Robots

ZHU Jiayi[1] GAO Jie[1*] GAO Liang[2] CAO Huai[2]
1.School of Aeronautics and Astronautics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074
2.School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract: In lightweight design processes of bipedal robots, the optimization design of many parts had not yet achieved the ideal structural forms, and ultimately only rely on the designer's experiences for subsequent adjustments and corrections. Thus, the existing topology optimization methods were systematically sorted out and introduced into the structural design of mechanical thighs. By constructing a mathematical model for lightweight optimization design of mechanical thighs, and following the topology optimization processes, the initial design geometric model of the mechanical thighs was designed with different unit densities and optimized minimum sizes. Finally, four topological structures were obtained, which reduce the mass by 535.4 g, 494.3 g, 423.8 g and 569.2 g respectively. According to the actual working conditions and machining process requirements, the third scheme was selected for strength simulation verification. The simulation results show that compared with the processed configuration, under the condition of set distributed force, the maximum displacement deformation of the optimized design is 0.9012 mm, which is significantly smaller than that of the original design of 1.188 mm; under the condition of set distributed force and torque resultant force, the maximum displacement deformation is 1.799 mm, which is also smaller than that of the original design of 2.377 mm. The component mass is reduced by 38.45%, and the performance of the optimized design is better than that of the original design, which verifies the accuracy of the finite element model and the effectiveness of the optimized design.

Key words: hydraulic bipedal robot; topology optimization; structural design; lightweight mechanical leg

0 引言

机器人产业是未来重点发展的领域,其中双足机器人作为一种模仿人类行走与跑步的机器人,涉及多个关键技术。最为关键的技术之一是高动态性能的机械关节,其实现通常依赖于高动态响应能力和高负载的作动器,同时尽可能减小机器人结构的质量。此外,为了减少机械关节的

收稿日期:2025-04-11
基金项目:国家自然科学基金(52105255,52475258)

瞬间冲击，关节还需具备一定的柔性。近年来，国内外在双足机器人研究方面的投入持续增长，相关技术取得了显著突破，特别是在液压双足机器人的构型设计方面，逐步发展出更加先进和高效的结构[1]。

各式的双足机器人也被逐步用于军事、工业、服务业中[2-3]。传统足式机器人具有较强的越障能力，能够在台阶等非结构化环境中平稳移动和越障，且由于其仿人形态，能够无需大规模环境改造便可适应人居环境，因此被认为是最有潜力实现人类环境工作的机器人。然而，其结构复杂，驱动和控制系统也较为复杂，且由于机械性能限制，部分机器人质量过大，难以实现快速运动。

早期液压双足机器人构型主要包括以下几类。①线性执行器[4]：线性执行器用于驱动直线运动的关节，具有高控制精度，但体积大、质量大，限制了机器人的灵活性和效率。②结构优化：例如文献[5]，通过改变电机的位置来达到机器人腿部省力的效果。美国宇航局机器人Valkyrie[6]脚踝关节设计了并联机构，包括两个线性驱动器、连杆和关节轴承。③链关节：这种设计使用传统的铰链结构，类似于人类的膝关节和踝关节，关节的运动通过液压缸的伸缩来驱动。这种设计结构简单，但在复杂运动时效率较低，容易受到磨损和松动的影响。MIKOLAJCZYK等[7]设计了并联的踝关节，两个电机和减速器交错布置，连杆末端连接线性弹簧，可以用于储存和释放能量。

现代液压双足机器人在结构设计上有了显著的改进。①柔顺机构[8]：采用柔顺机构能够使关节在受到外部冲击时具有一定的变形能力，从而提高机器人的稳定性和抗冲击能力。这种设计能够更好地模拟人类的步态和动作[9]，提高机器人的灵活性。例如文献[10]，为了减少腿部的惯量，将膝关节的驱动电机布置在膝关节和髋关节之间，靠近髋关节侧，通过曲柄滑块机构实现膝关节运动。②多自由度关节[11]：现代设计倾向于使用多个自由度的关节，使机器人能够进行更复杂的动作。这些关节通常结合液压系统和先进的控制算法，以实现更精准和高效的运动控制。潘露等[12]设计了6自由度的腿部串并联构型，髋关节俯仰和膝关节俯仰通过2个驱动器和5连杆机构实现，以减少腿部的惯量。LIU等[13]开发了一个新的双足机器人，每条腿有5个自由度。

拓扑优化[14-15]通过在设计阶段对产品结构进行优化，以实现满足功能要求的同时降低材料使用量、提高制造效率和降低成本等目标。已有部分专家学者针对这一质量过大的问题使用拓扑优化方法进行轻量化设计[16-18]。国内外对机械腿轻量化设计主要集中基于整体机器人构型的部分，优化构型的后处理结果涉及较少。本文以文献[18]中的大腿结构件为例，进行了拓扑优化分析，考虑了加工工艺和支撑连接等因素，设计结果较好地满足了机器人使用需求。然而，由于仅依赖Abaqus进行优化，最终的大腿结构模型未达到预期效果，调整主要依赖于经验修正。为提高优化精度和结构合理性，本文通过改进拓扑优化参数设置，包括单元密度和最小尺寸耦合设计，提高了优化精度。同时，创新性地提出了几何重建规则用于后处理，确保结构更符合实际制造和使用需求。

本文引入拓扑优化设计，基于已加工构型并结合腿部关节参数，旨在提高关节集成化水平并减小整体质量。通过建立机械腿数学模型，在确保高动态性能的同时提升对未知环境的适应性。针对已加工构型在优化过程中未能得到理想大腿结构的问题，本文对4种较好构型模型进行后处理，并与已加工构型进行对比，最终验证改良设计的优越性和可行性。

1 双足机器人腿部概述

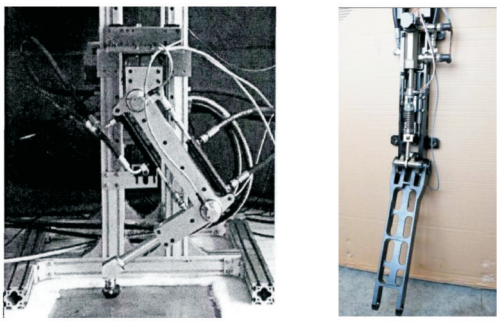
在人形机器人研究中，腿部结构设计是实现类人步态和环境适应性的关键，直接影响机动性、稳定性和多任务执行能力。主流设计通常借鉴仿生学，基于人体下肢解剖特征构建多自由度结构，并通过电驱、液压或气动驱动模拟人体肌肉与关节的协同工作[19]。运动学和动力学建模用于分析关节位姿变化及载荷传递、能量消耗。现代机器人还配备高灵敏度传感器和实时反馈的非线性控制算法，以实现姿态控制与平衡调节[20]。

在材料选择上，轻质高强度材料如铝合金和碳纤维复合材料被广泛采用，以减小质量并提高能效。腿部组件集成驱动单元、传感器和能源系统，满足形变约束和疲劳寿命要求[21]。控制系统结合PID调节、模糊控制和深度学习方法，以提高复杂环境中的感知与规划能力。动力系统则侧重于提高电机、电池和液压驱动系统的能效，延长续航时间并提高执行能力[22]。

综上所述，腿部结构的多学科设计策略为人形机器人在灾害救援、智能医疗、家庭辅助及工业协作等领域提供了广泛的应用潜力，尤其在替代

人类执行高风险或高精度任务方面展现出重要前景。

目前液压驱动式仿生腿部机构的结构形式主要可归类为直接驱动型与多连杆传动型两种典型方案[23]，其结构如图1所示。直接驱动型机械腿通过液压缸作用于腿部特定位置，直接输出直线推力并转化为关节的转动，以实现所需的运动行为。该方式具有结构简洁、传动路径短、驱动力矩大的优势，且在工程实现中表现出较高的系统稳定性和响应效率。然而，该方案的局限性在于其输出特性非线性明显，且液压缸在作动过程中需保持一定的摆动空间，因此在机构设计时需充分考虑运动干涉与布置冗余等问题[24-25]。



(a)直驱式液压机械腿　　(b)多连杆式液压机械腿

图1　液压机械腿

Fig.1　Hydraulic mechanical leg

多连杆驱动结构通过多个连接杆件将液压缸的直线输出转化为旋转运动，提供更复杂的驱动路径和可调的力矩-角度响应特性，适用于需要特定力学性能调控的应用。然而，该结构复杂，要求高精度制造与装配，且因传动路径延长导致能量传递效率下降。此外，系统体积和质量较大，限制了其在轻量化和高动态性能场景中的应用。

当前液压仿生腿驱动系统中，髋关节常采用齿轮齿条-同步带复合传动结构，而膝关节则基于摆动导杆变幅机构设计。同步带传动存在弹性，导致髋关节运动控制精度不足，易引发回程误差和抖动，影响系统稳定性。膝关节传动系统通过优化关节力矩-角度曲线，提供非线性力矩输出，虽然提高了仿生一致性，但也增加了非线性动力学行为，导致能效下降并提高控制系统复杂度。此类传动机构由多个精密构件组成，整体结构复杂，装配困难，导致单腿系统质量过大，未能实现轻量化目标。为解决这一问题，本文提出采用结构更简洁、可靠性更高的液压直接驱动方案，重新设计髋膝关节(图2)，以降低质量并提高系统稳定性和响应性能。



(a)膝关节传动设计　　(b)髋关节传动设计

图2　机械腿结构设计

Fig.2　Design of mechanical leg

2　机器人机械腿改良拓扑优化设计

2.1　机械腿拓扑优化过程

在双足仿生机器人系统中，大腿结构作为连接髋关节与膝关节的核心承力构件，承担着液压缸施加推力的主要传递任务。该构件不仅是承载机构力学路径的关键节点，还集成了多个功能组件，具有复杂的结构布置与受力特性。大腿结构通常呈现一定的杠杆传动特性，其几何分布对整体负载响应与运动性能具有重要影响。针对其结构中存在的冗余材料分布问题，采用拓扑优化方法有助于在不影响关键工作性能的前提下，有效剔除非承力区域，减小质量，同时提高材料利用效率与结构响应能力。

基于大腿构件自身的功能定位与轻量化设计需求，本文在开展结构优化前，首先构建了图3所示的拓扑优化流程示意图，以规范整个优化设计过程。优化分析初期，依据现有机器人系统的构型限制与安装空间约束，确定大腿构件的初步结构边界与几何轮廓，并结合运动功能要求定义关

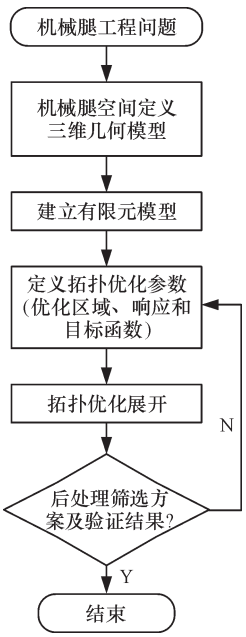


图3　机械腿拓扑优化流程图

Fig.3　Flow chart of robot leg topology optimization

键连接区域，包括旋转接头孔位与安装支撑面，进而建立用于拓扑分析的初始几何模型。随后，通过有限元方法对初始模型进行结构响应分析，获取关键载荷路径及应力分布信息，为合理设置优化域提供力学依据。优化求解器输入参数的设定包括可参与拓扑演化的设计区域、边界加载条件与性能目标函数的选取。按照预设流程实施拓扑迭代求解及后处理分析，若最终结果不满足设计要求，则需对优化参数或几何约束条件进行调整，并重新迭代求解，直至获得性能与质量均满足要求的结构构型，进入仿真验证阶段，评估其在实际工况下的结构力学表现。

2.2 机械腿已加工设计优化样式

图4展示了加工构型的优化与验证流程。首先，在载荷与边界条件设定方面，将髋关节连接处施加完全约束，上部8个安装孔和下部6个安装孔分别对应髋部与膝部液压缸支架的安装位置。膝部区域施加垂直向下的等效载荷，载荷值基于液压缸最大输出力，确保优化结果能反映实际受力工况。结构在拓扑优化前经过网格划分，并明确设计域与非设计域。为保护关键连接区域的结构完整性，所有安装孔区域被设为不可削减区，防止因优化造成功能损失。

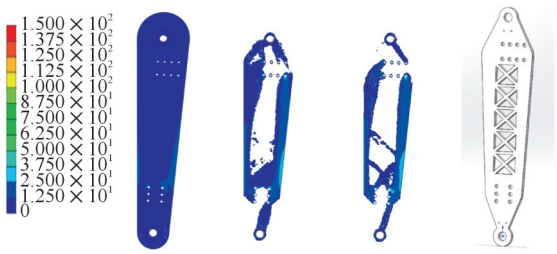


图4 已加工设计配置过程

Fig.4 Process of the processed design configuration

由于初始拓扑优化结果边界粗糙、形状不规则，难以直接应用于制造过程，因此本文采用CAD建模工具对优化结果进行几何重建，完成结构光顺与特征提取，得到可加工的精细模型。对最终模型再进行受力与变形分析，以验证其在典型工况下的结构性能。该流程在实现轻量化的同时确保了结构强度与工程可实现性，可为实际应用提供有效支撑。

2.3 机械腿初始构型的确定和分析模型的建立

本研究采用对称简化建模策略，以单侧大腿板替代整体结构进行拓扑优化分析，降低计算复杂度并提高仿真效率，如图5所示。考虑到腿部结构对称性，此简化方式不会显著影响分析结果的准确性。载荷与边界条件设定如下：髋关节处全约束，膝关节根据液压缸最大输出施加集中力和力矩，模拟典型受载情形。结构上设有孔位用于安装液压缸支架与固定支座。为确保连接部位的功能完整性，优化中将髋膝连接区域和孔位划定为非设计域。所用材料为7075铝合金，具备高比强度、低密度及良好加工性，适合高性能机械与航空结构应用。



图5 初始构型样式

Fig.5 Initial configuration style

拓扑优化目标设定为最小化结构体积分数，体积分数定义为优化后结构体积与原始体积之比，数值越低代表材料使用越高效。本设计中体积分数下限设定为0.3，以在结构轻量化与刚度之间取得平衡。此外，为进一步约束结构性能，优化中引入整体应变能限制。应变能反映结构在受载变形过程中储存的能量，其值越低表明结构刚性越高，抵抗变形能力越强。本研究将应变能上限设定为0.2J，以确保优化结果满足机械性能要求。

3 初始配置的静态分析

首先构建并分析初始有限元模型，在设定约束条件中，髋关节连接处设置为完全固定，膝关节加载方向取沿Z轴方向的集中力。在该边界与载荷条件下开展静力分析，得到结构在极限工况下的应力分布与位移分布情况，其结果如图6所示。仿真结果表明，最大等效应力值为1097 MPa，最大位移量为0.7332 mm。

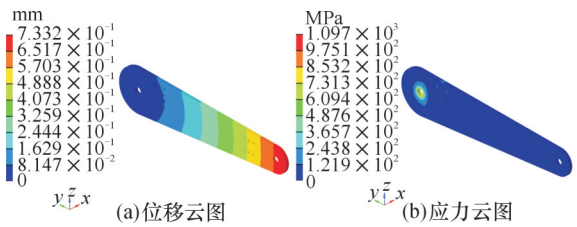


图6 机械大腿初始构型分析结果

Fig.6 Analysis results of the initial configuration of the mechanical thigh

所选材料为7075铝合金，其屈服强度为455 MPa。依据工程结构设计常用准则，可得当前结构的最小安全系数约为0.414，明显低于一般机械结构设计中建议的合理范围。这表明在当前设计状态下，结构存在局部过度强化的现象，材料利用率不高，存在显著的减重优化空间。后续将

基于此初始模型进一步开展拓扑优化，以提高材料分布效率，实现结构的轻量化与性能平衡。

4　机械腿部拓扑结构优化

4.1　机械腿拓扑优化方式

产品的结构优化有尺寸优化、形状优化和拓扑优化3种类型，其中拓扑优化主要用于研究产品内部结构的整体布局，是一种根据给定的负载情况、约束条件和性能指标在给定的设计区域内对材料分布进行优化的数学方法[26]。拓扑优化的目标是通过数学建模和优化，最大限度地提高零件的性能，主要用于改善产品或单个零件的性能、降低制造成本和提高生产效率[27-28]。

具体到双足机器人大腿部件结构设计方面，就是在删减部分区域材料、减重的基础上使其结构在载荷传递过程中仍安全可靠。目前，产品结构拓扑优化方法主要包括变厚度法、均匀化方法和变密度法。其中，变密度法在部件结构优化设计中应用较为广泛，尤其适用于复杂结构的优化。该方法通过灵活调整设计域内的材料分布，能够精确适应机械腿等形状复杂的结构。与变厚度法和均匀化方法相比，变密度法在处理复杂几何形状时具有更强的适应性，能够细致优化局部结构，且在量化与强度要求之间实现良好的平衡。

在变密度法中，对模型进行划分网格后，设计每个网格里的密度为0或1，其中0表示此处网格材料分布为空，1表示此处网格填充材料，由此可理解为求0～1离散变量组合的优化。再按照某类准则对一个单元集合的网格进行处理，保留对结构传递力路径用处大的单元，删除用处小的单元。从本质上说，基于变密度法的产品结构拓扑优化问题就是单元增减的离散型优化问题，其数学模型可表示如下：

$$\begin{aligned}&\text{find}\quad x=\{x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n\}\in\Omega\\&\min\quad C=\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{U}=\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{U}\\&\text{s.t.}\quad V\leqslant aV_0\\&\qquad\boldsymbol{F}=\boldsymbol{K}\boldsymbol{U}\\&\qquad 0<x_{\min}\leqslant x_i\leqslant 1\end{aligned}$$

式中：x_i为单元的设计变量；Ω为材料相对密度区域；C为结构的柔顺度；$\boldsymbol{F}$为外部负载；$\boldsymbol{U}$为位移矢量矩阵；$\boldsymbol{K}$为整体刚度矩阵；V_0为机械腿优化前体积；V为机械腿优化后体积；a为体积优化系数；$x_{\min}$为单元最小相对密度，取值为0.001，以避免求解出现奇异点位。

基于此基础数学模型，针对液压双足机器人大腿拓扑优化设计的具体模型如下：

设计变量为

$$X=dev(com_1)$$

式中：$dev(\cdot)$为单元网格密度变化；com_1为参与设计的设计域。

响应类型为

$$h(x)=d_{\mathrm{is}}$$
$$g(x)=V_{\mathrm{ol}}$$

式中：d_{is}为静力下位移；V_{ol}为体积分数，即当前迭代总体积与初始不参与设计的设计域体积相减，再除以初始参与设计的设计域体积。

约束条件为

$$g(x)\leqslant N$$

式中：约束中的质量分数上限为N。

目标函数是位移最小化，即

$$f(x)=\min(h(x))$$

4.2　机械腿拓扑优化区域设置

机械大腿初始模型的质量为1102.2 g，对其进行减重的拓扑优化，拓扑范围选择如图7所示，其中橙色区域为不施加设计的优化区域，其他部分为需要优化的受力面区域，优化的约束设置为所选区域的质量保留30%；力的施加为膝关节连接处孔洞内所有的点，优化过程中的网格单元密度分别为5和4；对应优化最小尺寸分别为对应网格单元密度的1.5倍和2倍，则得4种不同的拓扑结构。

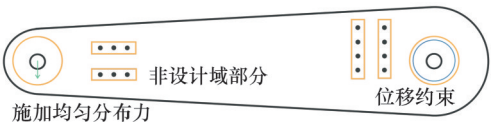


图7　拓扑结构优化区域设置

Fig.7　Topology optimization area settings

4.3　机械腿拓扑优化

本研究采用图3中拓扑优化设计的总体流程开展结构优化设计，首先根据液压双足机器人腿部的功能需求，明确优化目标与约束条件，构建三维几何模型并划分设计域与非设计域。随后建立有限元模型，施加实际载荷和边界条件，并设置拓扑优化参数，包括目标函数、体积分数和性能约束等。在优化迭代过程中，材料分布不断调整，逐步形成满足刚度与轻量化要求的结构形态。优化完成后，对结果进行后处理，保留主承力路径并简化局部细节，形成可制造的设计方案。最后，通过有限元仿真验证优化结构在既定工况下的性能，确保其满足工程应用需求。

图8所示为方案一拓扑优化结果。将此结构转化为三维模型，优化过程中的网格单元密度为5；此时模型被划分为7416个节点，28 142个有限单元，设置对应优化最小尺寸为10，根据拓扑优

化分析结果对轮廓进行后处理工作(包括修复弯曲的线条和合并面),并要求处理后结构尽量接近实际的拓扑结果,且表面光滑、结构规整和有利于机械加工。后处理过程中遵循以下准则:在保留优化结果中主要承力路径和应力传递结构特征的基础上,对局部不连续区域、细长悬臂或制造难度大的细节进行平滑、简化处理,以形成具有工程可实现性的结构形态。优化后结构经静力学有限元仿真验证,仍满足图8载荷边界条件,具备良好刚度与应力性能,功能约束均达成。

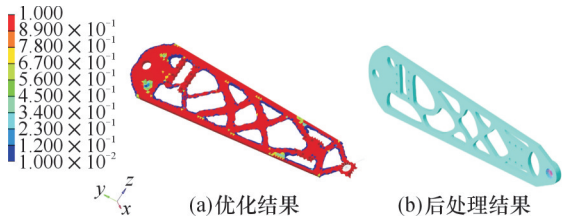


图8 方案一拓扑优化设计结果

Fig.8 Topology optimization design results of scheme 1

最终得到踏板几何空间如图8b所示,其质量为566.8 g(减少535.4 g),在设定分布力的工况情况下方案一最大位移变形量值为1.035 mm,在设定分布力及力矩合力的工况下方案一最大位移变形量值为2.171 mm,皆小于原始设计构型,详见表1。

表1 方案一机器人机械腿拓扑优化结果对比

Tab.1 Comparison of topology optimization results of robot legs in scheme 1

参数	初始结构	优化结构	优化比重/%
质量/g	1102.2	566.8	48.58
设定分布力的工况情况下位移变形量/mm	1.188	1.035	12.88
设定分布力及力矩合力的工况下位移变形量/mm	2.337	2.171	7.11

图9所示为方案二拓扑优化结果。将此结构转化为三维模型,优化过程中的网格单元密度为4;此时模型被划分为11 355个节点,44 582个有限单元,设置对应优化最小尺寸为8。按方案二轮廓后处理的原则,最终得到踏板几何空间如图9b所示,其质量为607.9 g(减少494.3 g),在设定分布力的工况下方案二最大位移变形量值为1.017 mm,在设定分布力及力矩合力的工况下方案二最大位移变形量值为2.034 mm,皆小于原始设计构型,详见表2。

图10所示为方案三拓扑优化结果。将此结构转化为三维模型,优化过程中的网格单元密度为5;此时模型被划分为7416个节点,28 142个有限单元,设置对应优化最小尺寸为7.5。按方案三

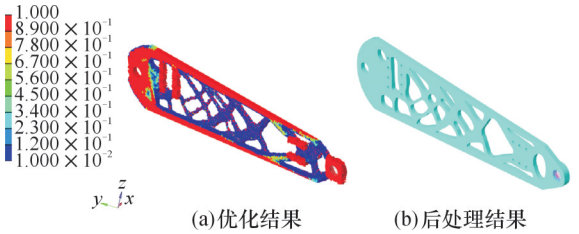


图9 方案二拓扑优化设计结果

Fig.9 Topology optimization design results of scheme 2

表2 方案二机器人机械腿拓扑优化结果对比

Tab.2 Comparison of topology optimization results of robot legs in scheme 2

参数	初始结构	优化结构	优化比重/%
质量/g	1102.2	607.9	44.85
设定分布力的工况下位移变形量/mm	1.188	1.017	14.4
设定分布力及力矩合力的工况下位移变形量/mm	2.337	2.034	12.97

轮廓后处理的原则,最终得到踏板几何空间如表3所示,其质量为678.4 g(减少423.8 g)。在设定分布力的工况下方案三最大位移变形量值为0.9012 mm,在设定分布力及力矩合力的工况下方案三最大位移变形量值为1.799 mm,皆小于原始设计构型。

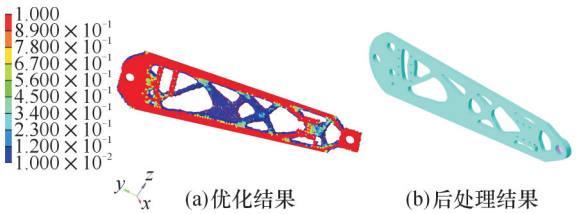


图10 方案三拓扑优化设计结果

Fig.10 Topology optimization design results of scheme 3

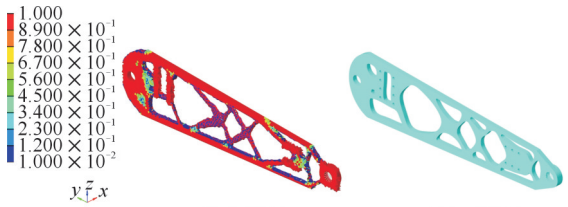
表3 方案三机器人机械腿拓扑优化结果对比

Tab.3 Comparison of topology optimization results of robot legs in scheme 3

参数	初始结构	优化结构	优化比重/%
质量/g	1102.2	678.4	38.45
设定分布力的工况下位移变形量/mm	1.188	0.9012	23.02
设定分布力及力矩合力的工况下位移变形量/mm	2.337	1.799	24.14

图11所示为方案四拓扑优化结果。将此结构转化为三维模型,优化过程中的网格单元密度为4;此时模型被划分为11 355个节点,44 582个有限单元,设置对应优化最小尺寸为6。按方案四轮廓后处理的原则,最终得到踏板几何空间如表4所示,其质量为533 g(减少569.2 g),在设定分布力的工况下方案四最大位移变形量值为1.103 mm,在设定分布力及力矩合力的工况下方

案四最大位移变形量值为2.206 mm，皆小于原始设计构型。



(a)优化结果　　(b)后处理结果

图11　方案四拓扑优化设计结果

Fig.11　Topology optimization design results of scheme 4

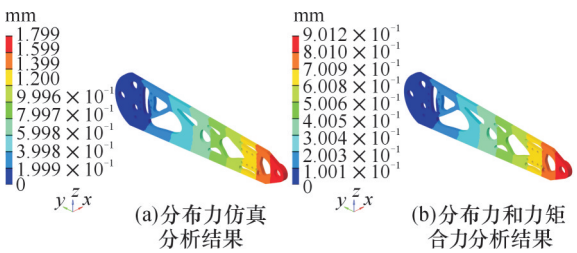
表4　方案四机器人机械腿拓扑优化结果对比

Tab.4　Comparison of topology optimization results of robot legs in scheme 4

参数	初始结构	优化结构	优化比重/%
质量/g	1102.2	533	51.64
设定分布力的工况下位移变形量/mm	1.188	1.103	7.15
设定分布力及力矩合力的工况下位移变形量/mm	2.337	2.206	5.61

4.4　优化方案选择和结果仿真验证

从4种方案优化结果可以看出，在体积分数限定为30%的条件下，方案三在仅施加分布力以及同时施加分布力与合力矩两种工况下，其位移变形量的优化幅度在4个方案中均为最大，体现出最优的结构性能，符合设计要求，由此选取方案三作为机器人大腿构件的结构进行静力分析。计算结果如图12所示。当对其施加约束和载荷与初始分析条件一致，最大位移变形量为0.9012 mm，满足设计的强度刚度要求。分布力及力矩合力的计算结果如图12所示。从图中可得：最大位移变形量为1.799 mm，应力及位移最大值都出现在髋关节连接处，满足设计的强度刚度的要求。



(a)分布力仿真分析结果　　(b)分布力和力矩合力分析结果

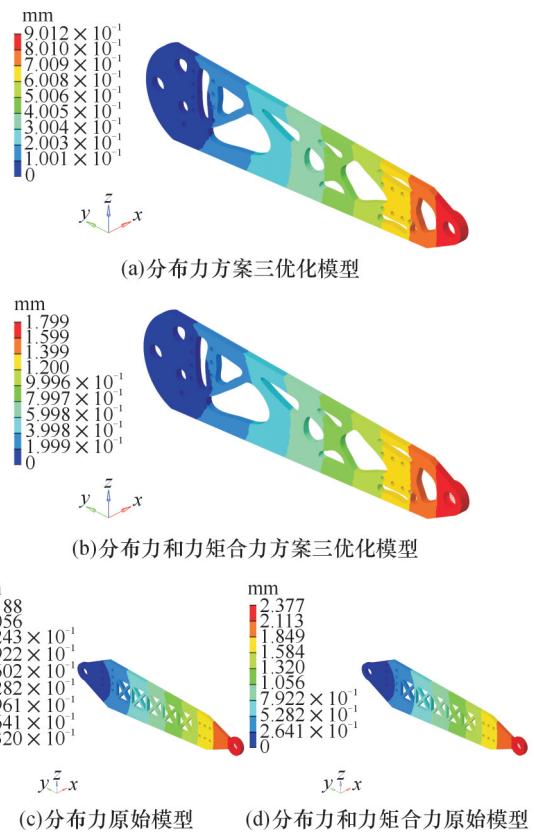
图12　仿真分析结果

Fig.12　Simulation analysis results

5　机器人机械腿优化对比

由于方案三设定较为合理，为达到优化目的，本文将方案三与原设计结果进行对比，分析了三个关键指标：最大位移变形、最大应力及分布均匀性、模态频率。

方案三在施加分布力的工况下，最大位移为0.9012 mm，明显小于原设计的1.188 mm。即使在同时施加分布力和力矩合力的工况下，方案三的最大位移为1.799 mm，较原设计的2.377 mm有所减小，如图13所示。这表明，优化后的结构在变形控制上表现更为优越，能够有效降低变形量。



(a)分布力方案三优化模型

(b)分布力和力矩合力方案三优化模型

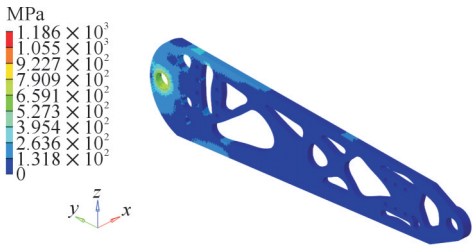
(c)分布力原始模型　　(d)分布力和力矩合力原始模型

图13　设计优化位移云图

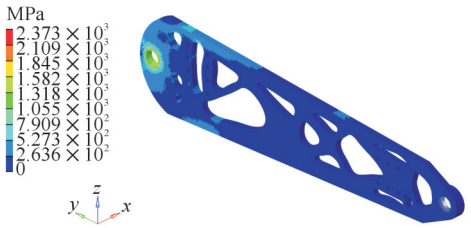
Fig.13　Design optimization displacement cloud diagram

图14展示了方案三与原设计结果的应力云图对比。在施加分布力的工况下，方案三的最大应力为1.186 GPa，与原设计的1.044 GPa接近；而在同时施加分布力和力矩合力的工况下，方案三的最大应力为2.373 GPa，略高于原设计的2.089 GPa。应力最大值出现在上孔内圈处，该区域为位移载荷的约束位置，其他部位的应力分布则相对均匀且合理，整体表现稳定且符合优化要求。

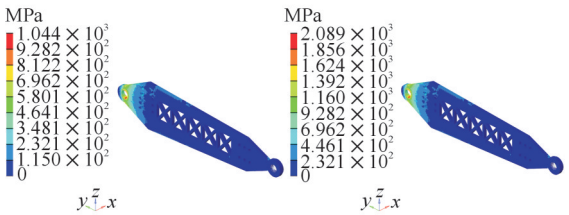
优化后的方案三在十阶频率上普遍高于原设计，如表5所示。这一改进主要归因于7075铝合金较高的硬度以及优化后更加合理的材料分布，提高了结构的整体刚度。根据基频公式，当刚度的提高幅度超过质量的减小时，基频会随之上升，这进一步验证了方案三在优化设计上的效果。



(a)分布力方案三优化模型



(b)分布力和力矩合力方案三优化模型



(c)分布力原始模型　　(d)分布力和力矩合力原始模型

图14　设计优化应力云图

Fig.14　Design optimization stress cloud diagram

表5　方案三与原始设计结果十阶频率数据对比

Tab. 5　Comparison of the tenth-order frequency data between scheme 3 and the original design results

阶数	原始设计	方案三
一阶	3.103 10×10^{-2}	3.259 70×10^{-2}
二阶	0.169 14	0.191 54
三阶	0.242 25	0.284 98
四阶	0.266 28	0.300 92
五阶	0.450 64	0.527 40
六阶	0.710 55	0.756 10
七阶	0.864 98	0.958 02
八阶	1.2801	1.2923
九阶	1.3956	1.4811
十阶	1.5418	1.7636

6　结论

1)本文在分析结构拓扑优化方法的基础上建立了液压机器人拓扑优化的数学模型,并根据现有加工设计配置的双足机器人大腿板的设计要求确定了其初始几何空间模型和分析模型。

2)通过建立的拓扑优化数学模型,对大腿组件初始几何模型进行4种不同单位密度和优化最小尺寸的减重优化,得到质量分别为535.4,494.3,423.8,569.2 g,并根据实际工作条件和加工工艺,选择第三种方案对仿真的强度、安全系数和寿命进行验证,结果表明虚拟设计设计的轻量化机器人大腿部件满足工作要求。

3)通过比较机械腿加工设计的优化结果,结果表明其最大应力值小于原设计结果。

本文主要聚焦于机械腿的优化,初步结果较为理想,但安全系数等因素尚需深入分析。由于安全系数涉及复杂约束,本文未能全面探讨,但将作为未来工作的重点,旨在优化结构设计的综合性能。

参考文献:

[1] 陈阳, 王洪玺, 张兰勇. 轮腿式平衡机器人控制[J]. 信息与控制, 2023, 52(5): 648-659.
CHEN Yang, WANG Hongxi, ZHANG Lanyong. Control of Wheel-legged Balancing Robot[J]. Information and Control, 2023, 52(5): 648-659.

[2] 王田苗, 陶永, 陈阳. 服务机器人技术研究现状与发展趋势[J]. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(9): 1049-1066.
WANG Tianmiao, TAO Yong, CHEN Yang. Research Status and Development Trends of the Service Robotic Technology[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2012, 42(9): 1049-1066.

[3] 刘松, 柴汇, 李贻斌, 等. 电动力液压驱动四足双臂机器人的设计与实现[J]. 机器人, 2022, 44(6): 649-659.
LIU Song, CHAI Hui, LI Yibin, et al. Design and Implementation of an Electro-hydraulic Quadruped Robot with Dual-arm[J]. Robot, 2022, 44(6): 649-659.

[4] OH H J, KIM K D, CHUNG H S, et al. Evolution of Humanoid Robots: Technological Milestones and Future Challenges[J]. Electronics and Telecommunications Trends, 2025, 40(3): 82-92.

[5] TSAGARAKIS N G, CALDWELL D G, NEGRELLO F, et al. WALK-MAN: a High-performance Humanoid Platform for Realistic Environments[J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(7): 1225-1259.

[6] ZHOU Chengxu, TSAGARAKIS N. On the Comprehensive Kinematics Analysis of a Humanoid Parallel Ankle Mechanism[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2018, 10(5): 051015.

[7] MIKOLAJCZYK T, MIKOŁAJEWSKA E, ALSHUKA H F N, et al. Recent Advances in Bipedal Walking Robots: Review of Gait, Drive, Sensors and Control Systems[J]. Sensors, 2022, 22(12): 4440.

[8] REHER J, COUSINEAU E A, HEREID A, et al. Realizing Dynamic and Efficient Bipedal Locomotion on the Humanoid Robot DURUS[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, 2016: 1794-1801.

[9] 钟浩然. 基于液压串联弹性驱动器的双足机器人运动控制方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
ZHONG Haoran. Bipedal Robot Motion Control Based on Hydraulic Series Elastic Actuator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[10] GIM K G, KIM J, YAMANE K. Design and Fabrication of a Bipedal Robot Using Serial-parallel Hybrid Leg Mechanism[C]//2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, 2019: 5095-5100.

[11] 蔡润铭, 张爱民, 周仁义. 双轮足机器人运动模式切换规划算法与仿真[J]. 机床与液压, 2024, 52(23): 26-31.

CAI Runming, ZHANG Aimin, ZHOU Renyi. Planning Algorithm and Simulation of Locomotion Mode Switching with a Biped Wheel-legged Robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(23): 26-31.

[12] 潘露，张恒华，刘桐，等. 仿人机器人小腿的拓扑优化和激光增材制造[J]. 应用激光，2023，43(2)：47-55.
PAN Lu, ZHANG Henghua, LIU Tong, et al. Topological Optimization and Laser Additive Manufacturing of the Humanoid Robot Calf[J]. Applied Laser, 2023, 43(2): 47-55.

[13] LIU Bin, SHA Liansen, HUANG Kun, et al. A Topology Optimization Method for Collaborative Robot Lightweight Design Based on Orthogonal Experiment and Its Applications[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2022, 19: 17298814211056143.

[14] ZHU Jiayi, XU Jie, ZHOU Xiaoqiang, et al. Principal Stress Lines (PSLS)-guided Discrete Topology Designs for Self-similar Porous Infills in Shell Structures with Fractal Geometry[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 210: 112915.

[15] ZHANG Xiao, GAO Liang, XIAO Mi, et al. T-splines-based Panel Method for Aerodynamic Topology Optimization of Engineering Shell Structures Using Isogeometric Analysis[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2025, 444: 118154.

[16] 祝海林，周扬驰，何宜玖，等. 外骨骼机器人膝部三铰点零件轻量化研究[J]. 常州大学学报(自然科学版)，2023，35(3)：71-77.
ZHU Hailin, ZHOU Yangchi, HE Yijiu, et al. Research on Lightweight of Three Hinge Parts of Exoskeleton Robot Knee[J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2023, 35(3): 71-77.

[17] 莫彦彬，单科臻，陈肖媛. 下肢外骨骼机器人大腿护板轻量化设计[J]. 机械研究与应用，2024，37(6)：60-62.
MO Yanbin, SHAN Kezhen, CHEN Xiaoyuan. Lightweight Design of Thigh Guard for Lower Limb Exoskeleton Robot[J]. Mechanical Research & Application, 2024, 37(6): 60-62.

[18] 董昊臻. 双足机器人步态仿真及腿部设计与控制研究[D]. 武汉：华中科技大学，2021.
DONG Haozhen. Research on Gait Simulation with Design and Control of Leg for Biped Robot[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[19] 许文琼，杨芳艳，李清都. 基于角动量的双足机器人稳定行走规划[J]. 电子科技，2025，38(8)：87-93.
XU Wenqiong, YANG Fangyan, LI Qingdu. Research on Stable Walking Planning of Biped Robot Based on Angular Momentum[J]. Electronic Science and Technology, 2025, 38(8): 87-93.

[20] 张彦凯，王雪松，金雨斌，等. 基于虚拟样机的双足机器人多目标步态规划研究[J]. 系统仿真学报，2024，36(12)：2984-2992.
ZHANG Yankai, WANG Xuesong, JIN Yubin, et al. Research on Multi-objective Gait Planning of Biped Robot Based on Virtual Prototype[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(12): 2984-2992.

[21] 郭凯. 模型预测控制下四足机器人的地形适应性优化[J]. 建模与仿真，2024，13(6)：6537-6551.
GUO Kai. Optimization of Terrain Adaptability for Quadruped Robots under Model Predictive Control[J]. Modeling and Simulation, 2024, 13(6): 6537-6551.

[22] XU Zhen, XIE Jianan, HASHIMOTO K, et al. Human-inspired Gait and Jumping Motion Generation for Bipedal Robots Using Model Predictive Control[J]. Biomimetics, 2025, 10(1): 17.

[23] 王森，姚燕安，武建昫. 一种新型可调整闭链多足机器人的设计与分析[J]. 机械工程学报，2020，56(19)：191-199.
WANG Sen, YAO Yan'an, WU Jianxu. Design and Analysis of a Novel Adjustable Closed-chain Multi-legged Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 191-199.

[24] 高惟鹰. 面向高机敏双足机器人的腿部设计与柔顺控制研究[D]. 重庆：重庆邮电大学，2020.
GAO Weiying. Research on Leg Design and Compliance Control for Highly Sensitive Biped Robots[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.

[25] 石照耀，丁宏钰，汪文广，等. 双足机器人腿部新构型设计与试验研究[J]. 机械工程学报，2023，59(1)：103-112.
SHI Zhaoyao, DING Hongyu, WANG Wenguang, et al. Design and Experimental Research on the Novel Leg Configuration of Bipedal Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(1): 103-112.

[26] CHENG Feiteng, ZHAO Qinghai, MAO Zibin, et al. Mechanical Response of Gradient Lattice Structures Based on Topology Optimization[J]. Advanced Engineering Materials, 2024, 26(8): 2301887.

[27] LIN Daji, GAO Liang, GAO Jie. The Lagrangian-Eulerian Described Particle Flow Topology Optimization (PFTO) Approach with Isogeometric Material Point Method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2025, 440: 117892.

[28] ZHANG Xiao, XIAO Mi, GAO Liang, et al. A T-splines-oriented Isogeometric Topology Optimization for Plate and Shell Structures with Arbitrary Geometries Using Bézier Extraction[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2024, 425: 116929.

（编辑　王旻玥）

作者简介：朱佳怡，女，2000年生，博士研究生。研究方向为拓扑优化。E-mail：zhujiayi@hust.edu.cn。高　杰*（通信作者），男，1993年生，副教授、博士研究生导师。研究方向为拓扑优化。E-mail：jiegao@hust.edu.cn。

本文引用格式：

朱佳怡，高杰，高亮，等. 轻量化液压双足机器人机械腿拓扑优化设计[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2185-2193.

ZHU Jiayi, GAO Jie, GAO Liang, et al. Topology Optimization for Lightweight Design of Mechanical Legs of Hydraulic Bipedal Robots[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(9): 2185-2193.