

中东沙漠牵引式四足仿生机器人构型与机理

周琛知

中国广电湖南网络股份有限公司, 湖南 长沙 410003

DOI: 10.61369/TACS.2025140003

摘 要 : 中东沙漠环境的高温松散沙土以及复杂地形对机器人运动系统提出了严峻挑战。受灰狼高效奔跑能力启发, 研究提出了一种牵引式四足仿生机器人系统构型。通过对狼类动物的运动生物力学分析, 建立了适应沙漠环境的仿生足端结构与步态协调机制, 沙漠环境模拟实验验证了系统在温差剧烈, 沙尘侵蚀等极端条件下的环境适应性, 牵引式构型通过将动力系统与负载舱分离, 在保证机动性的同时实现了更大载重能力与能源效率优化, 研究成果为极端环境下四足机器人的设计提供了理论依据与工程参考, 对推动沙漠地区智能装备发展具有重要意义。

关 键 词 : 仿生机器人; 牵引式构型; 沙漠环境; 运动机理; 四足步态; 环境适应

Configuration and Mechanism of Traction Bionic Robot with Four Legs for Middle East Desert

Zhou Chenzhi

China Radio and Television Hunan Network Co., Ltd. Changsha, Hunan 410003

Abstract : The high-temperature loose sand, soil and complex terrain in the Middle Eastern desert environment pose severe challenges to the robot motion system. Inspired by the efficient running ability of gray wolves, this research proposes a system configuration of traction-type quadruped bionic robot. Through the kinematic biomechanical analysis of canids, a bionic foot end structure and gait coordination mechanism adapted to the desert environment are established. Desert environment simulation experiments have verified the system's environmental adaptability under extreme conditions such as severe temperature differences and sand-dust erosion. The traction-type configuration separates the power system from the load cabin, which achieves a larger load capacity and optimized energy efficiency while ensuring mobility. The research results provide a theoretical basis and engineering reference for the design of quadruped robots in extreme environments, and are of vital significance for promoting the development of intelligent equipment in desert areas.

Keywords : bionic robot; traction-type configuration; desert environment; motion mechanism; quadruped gait; environmental adaptability

引言

中东地区蕴藏着丰富的能源资源然而恶劣的沙漠环境对基础设施建设, 资源勘探以及应急救援等活动构成了显著制约, 沙漠地形的松散性高温环境以及频繁的风沙暴使传统轮式与履带式机器人面临严重的机动性退化问题, 近年来四足仿生机器人因其出色的地形适应能力成为沙漠环境应用的研究热点。牵引式构型通过将动力单元与负载舱分离, 在提升载重能力的同时优化了能源分配策略。该构型允许机器人在执行长距离运输任务时保持较低的能量消耗同时增强了系统的模块化特性。研究旨在结合狼类运动生物力学原理与牵引式系统优势, 构建适用于中东沙漠环境的四足机器人平台为极端环境智能装备的发展提供新的技术路径。

一、狼类运动特征的生物力学分析

(一) 足端形态特征与接触力学

灰狼的足部结构展现出显著的环境适应性特征。足垫由多个肉趾组成形成类似多点接触的分布式结构。这种形态能够在松散基底上增大接触面积从而降低接触压力, 减少下陷深度相较于单一刚性接触点, 多趾结构在沙土中产生的应力分布更为均匀避免

了局部过载引起的失稳现象, 足趾末端的爪部结构在运动中发挥着关键作用, 当足端与沙土接触时爪部向下弯曲并嵌入基底形成锚固效应, 这种机械锁定机制显著提升了切向牵引力, 使狼类在松散地形上仍能保持稳定的推进力, 足垫的柔性特性允许其根据地形起伏进行被动调整维持最优的接触状态, 这对于应对沙漠中的微地形变化具有重要意义(如图1)。

作者简介: 周琛知(1974.08—), 男, 汉, 湖南省长沙市, 硕士, 工程师, 研究方向电子计算机。

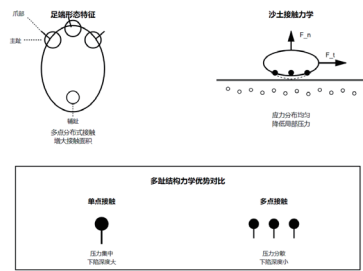


图1 狼类足端结构与接触力学

（二）肢体运动协调机制

狼类采用典型的对角步态进行移动该步态模式在四足动物中表现出优异的稳定性与效率。在对角步态中，对侧的前后肢几乎同时着地，形成两个稳定的支撑三角形交替切换的运动模式，这种步态模式使得身体质心始终位于支撑多边形内部最大程度降低了侧向摆动与能量损耗，肢体的运动幅度通过股骨的前后摆动以及胫骨的屈伸动作实现。前肢在摆动相时向前伸展增大步幅以提高移动速度后肢则在支撑相提供主要推进力，这种前后肢功能分化的协调机制使得运动系统能够兼顾速度与稳定性的双重需求。在松散沙土中步幅的精确控制尤为关键，过大的步幅可能导致足端落入未固结区域引发失稳而过小的步幅则会降低运动效率。

（三）脊柱柔性姿态调节

脊柱的横向摆动是狼类运动系统的重要组成部分在行走过程中脊柱随着步态周期产生左右摆动，这种摆动与四肢运动形成协同效应，脊柱摆动能够扩大步幅范围使肢体能够达到更远的支撑点从而提升移动效率，同时脊柱柔性还起到缓冲作用吸收来自不平整地形的冲击载荷保护内部结构^[1-2]。在转向运动中，脊柱柔性展现出更为显著的功能优势通过调整脊柱弯曲程度，狼类能够在保持运动连续性的前提下实现快速转向，这种姿态调节能力在复杂地形中尤为重要能够使机器人在遭遇障碍时灵活调整运动轨迹避免碰撞以及翻倒风险。脊柱机构的引入为四足机器人提供了额外的自由度增强了系统的环境适应能力。

二、牵引式机器奔狼的系统构型设计

（一）整体构型方案

牵引式机器奔狼系统由动力单元与负载舱两个主要模块构成。动力单元采用四足仿生构型搭载驱动系统感知模块以及控制单元，负责提供移动能力负载舱则用于承载任务设备，能源供应系统以及通信装置，两者通过柔性连接机构耦合既保证了运动协调性又实现了结构解耦提升了系统的模块化程度，这种分离式设计带来了多方面的优势，动力单元可以采用轻量化设计降低自身惯量提升运动敏捷性，负载舱则可以根据任务需求进行定制化配置不受动力单元尺寸的限制。能源系统集中布置于负载舱中有利于散热管理与维护操作，此外在执行侦察等轻载任务时可以脱离负载舱单独运行动力单元进一步提高机动性。

（二）仿生足端结构设计

足端结构是决定沙漠环境适应性的关键要素受狼类足垫形态启发，设计采用三主趾加一辅趾的多点接触构型^[3]。主趾均匀分布

于足端周围辅趾位于内侧形成稳定的支撑框架。每个趾端配备可弯曲爪状结构，通过微型驱动器实现主动抓握动作，足垫材料选用具有适度柔性的高分子复合材料在保证结构强度的同时允许一定的形变，这种被动柔顺特性使足端能够自适应地贴合不规则表面增大实际接触面积，爪部采用耐磨合金材料确保在反复嵌入沙土的过程中保持结构完整性，足端总重量被严格控制，以降低支撑相对沙土的法向载荷减少下陷趋势。

（三）肢体驱动与悬架系统

每条腿部由髌关节膝关节以及踝关节三个主要自由度构成，髌关节采用双自由度球铰结构，实现前后摆动与横向展开，膝关节为单自由度旋转副控制腿部屈伸踝关节则通过柔性机构提供被动适应能力。关节驱动采用高转矩密度的无刷电机配合谐波减速器在保证输出扭矩的同时实现紧凑布局。主动悬架系统集成于髌关节位置，通过实时调节髌部高度实现负载均衡，当某一足端遭遇局部下陷时控制系统调整其他三足的支撑高度维持躯干姿态稳定。这种主动调节机制能够有效应对沙漠地形的不均匀性，避免因单点失稳导致的整体倾覆悬架系统还集成力传感器，实时监测各足端的接地力为步态规划提供反馈信息。

（四）脊柱仿生机构

脊柱机构采用多节段串联结构每个节段通过弹性元件连接允许相对转动。整体脊柱具备沿身体纵轴的侧向弯曲能力，摆动幅度通过节段数量与弹性系数协同控制，在直线运动中脊柱保持适度摆动以配合四肢步态，转向时脊柱增大弯曲角度以缩小转弯半径，脊柱机构的引入使得机器人在保持四足支撑的同时获得了额外的运动灵活性。通过脊柱与肢体的协同运动系统能够实现更大的步幅范围，提升移动速度。

三、沙漠环境适应性运动机理

（一）松散沙土力学特性

沙漠沙土呈现出显著的颗粒流动性其力学行为介于固体与流体之间。当施加法向载荷时沙粒之间的摩擦力与咬合力提供支撑，施加切向力时沙粒发生相对滑移表现出类流体特征，这种双重特性要求足端在支撑相保持较低的法向压力以减少下陷同时在推进相产生足够的切向牵引力。沙土的承载能力与其密实度密切相关，未受扰动的自然沙面具有一定的结壳层能够提供较好的支撑，而经过扰动的松散区域承载能力显著下降，机器人在沙漠中移动时后续足端容易踏入前足扰动后的松散区域导致下陷加剧，因此步态规划需要考虑足端落点的选择，尽可能避开已扰动区域维持在相对固结的表面上行走。

（二）足端-沙土交互机制

多趾足端与沙土的接触过程可分为三个阶段，初始接触阶段足端以较低的速度接近沙面，趾端首先触及表层产生轻微下陷随后进入加载阶段身体重量逐渐转移至该足端，沙粒在法向压力作用下被压密形成承载区域，推进阶段趾爪向后刨动嵌入沙土深处形成锚固点产生向前的推进力。多趾结构的核心优势在于接触压力分散。相比单点接触多趾分布使法向载荷被多个区域共同承

担，每个区域的单位压力降低从而减少了局部过度下陷的风险，同时多个接触点在空间上的分布提高了抗侧倾能力，即使某一趾端发生轻微下陷，其他趾端仍能维持稳定支撑避免整体失稳。

（三）步态优化策略

沙漠环境下的步态规划需综合考虑稳定性与效率，基于对角步态的基本框架引入步频与步幅的自适应调节机制，当检测到某足端下陷加剧时系统降低该腿的步频，延长支撑相时间使沙粒有足够时间压密形成稳固支撑，同时缩短摆动相的步幅减少足端着地时的冲击速度避免进一步扰动沙土。脊柱摆动与四肢运动的协调对步态性能具有显著影响，通过调节脊柱摆动的幅度与相位可以优化四肢的运动范围，使足端能够到达更远的支撑点从而增大有效步幅，研究表明适度的脊柱摆动能够使步幅提升约15%至20%，在保持相同步频的条件下显著提高移动速度。这种协同机制在长距离运输任务中具有重要的能效优势^[4-5]。

（四）牵引力与能量效率分析

牵引力的产生主要依赖于趾爪与沙土之间的机械咬合作用，当趾爪嵌入沙土后推时在爪前方形成沙粒堆积区，这些堆积的沙粒对爪部产生反作用力形成推进力来源^[9]。多趾结构使得每条腿能够同时产生多个推进点总牵引力为各趾推进力的矢量和，合理控制各趾的嵌入深度以及推进时序能够优化牵引力输出避免相互干涉。能量效率是评估沙漠机器人性能的重要指标，在松散沙土中移动涉及大量的能量耗散包括足端下陷造成的势能损失，沙粒摩擦产生的热能损失以及扰动沙土的塑性变形能损失，优化步态参数以及足端结构能够在一定程度上降低这些损耗，牵引式构型通过分离动力单元与负载，使动力单元保持较轻的质量减少了运动惯性从而降低了加速与减速过程中的能量消耗。

四、中东沙漠环境特征与系统适应性

（一）环境挑战因素

中东沙漠呈现出极端的温度条件夏季地表温度可超过60摄氏度，而夜间温度可能降至10摄氏度以下昼夜温差达到50摄氏度以上，这种剧烈的温度波动对机械系统的材料性能润滑特性以及密封可靠性提出了严峻考验。电子元件在高温下面临散热困难驱动电机效率下降，传感器精度漂移等问题，低温环境则可能导致润滑油脂黏度增大影响关节运动的灵活性，沙尘侵蚀是另一个显著

的环境威胁，中东地区频繁出现沙尘暴，大量细小沙粒在风力作用下形成高速气流对暴露表面产生持续磨损。

（二）热管理策略

针对高温环境系统采用被动与主动相结合的散热方案。外壳采用高反射率涂层降低太阳辐射的热量吸收，关键热源部件如电机以及控制器配备热管散热器，利用相变传热原理快速将热量传导至外壳表面，负载舱内部设置强制通风系统通过风扇循环促进热交换，能源系统采用锂电池组，配置温度管理电路^[6-7]。当温度接近上限时自动降低放电功率保护电池免受热损伤，低温环境下润滑系统采用宽温度范围的合成润滑脂，保证在低温条件下仍具备良好的流动性关键关节处设置加热片，在环境温度过低时启动预热程序使润滑脂恢复至工作温度后再启动运动，电池组外包裹保温材料减少热量散失维持最佳工作温度区间。这些热管理措施共同确保了系统在极端温差环境下的稳定运行。

（三）防尘密封设计

运动关节采用多级密封结构，第一级为迷宫密封利用复杂的曲折通道阻挡粗大沙粒，第二级为橡胶密封圈提供弹性接触密封阻止细小颗粒渗入，第三级为油封防止润滑剂泄漏的同时进一步隔绝外部污染^[8-10]。传感器窗口采用硬质玻璃覆盖，表面施加疏水疏尘涂层减少沙尘附着配合定期的压缩空气清洁系统，保持传感器表面清洁电子舱采用正压设计，内部气压略高于外界形成向外的气流阻止沙尘通过缝隙进入进气口设置多层过滤网逐级拦截不同粒径的颗粒。

五、结语

研究通过对灰狼运动生物力学的深入分析，提出了适用于中东沙漠环境的牵引式四足仿生机器人系统构型。多趾柔性足端设计有效降低了接触压力减少了在松散沙土中的下陷深度，脊柱仿生机构与四肢运动的协同增强了步幅范围与运动稳定性，牵引式构型实现了动力单元与负载舱的分离，提升了载重能力与能源效率。运动学建模与仿真分析验证了系统设计的合理性，表明该构型能够在沙漠环境中保持较高的移动效率与稳定性，未来研究可进一步探索机器学习方法在步态优化中的应用，利用环境交互数据提升自适应能力开展实物样机的沙漠环境测试，验证系统在真实条件下的性能表现拓展牵引式构型在其他极端环境中的应用，推动四足机器人技术向更广泛领域发展。

参考文献

[1] 丁杨. 融合足端反射的六足机器人结构与柔顺运动控制研究 [D]. 河北工业大学, 2023.
[2] 孙震源. 仿生运动坐站辅助机器人设计与优化 [D]. 吉林大学, 2020.
[3] 刘文博, 王韞, 朵有宁, 等. 基于柔性传感的软体机器人交互研究进展 [J]. 机器人, 2024, 46(02): 195-218.
[4] 许朋, 伍亮. 基于四足机器狗的智能巡检系统设计 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(09): 31-33.
[5] 梁长燕. 基于形态仿生的管道探测机器人造型设计研究 [D]. 长春工业大学, 2025.
[6] 王蕾, 陆小龙, 赵世平, 等. 电力铁塔攀爬机器人直线推杆机构设计与分析 [J]. 机械设计与制造, 2012, (03): 52-54.
[7] 孟奇. 主动式下肢外骨骼机器人的构型与控制策略研究 [D]. 西安理工大学, 2025.
[8] 胡旭宇, 许宝卉, 毛飞龙, 等. 基于有限旋量的2R球面并联机器人构型综合 [J]. 运城学院学报, 2025, 43(03): 46-53.
[9] 孙千然. 液压四足机器人仿生腿部驱动构型分析与设计方法研究 [D]. 燕山大学, 2025.
[10] 张柯. 考虑绳驱迟滞的连续型机器人准静态建模与轨迹跟踪研究 [D]. 青岛理工大学, 2025.