一体化重构闭链腿机构的设计与越障性能分析

赵顺卿[1] 翁铭泽[2] 武建昫[1*] 姚燕安[1]
1.北京交通大学机械与电子控制工程学院,北京,100044
2.中国航天空气动力技术研究院,北京,100071

摘要:为解决传统闭链腿机构攀爬越障性能不足的问题,基于 Watt 型闭式运动链开展了构件元的尺度重构设计,采用间歇机构耦合行走动力与重构动力,设计了一体化重构闭链腿机构。分析了杆件的重构灵敏度和调节极值,确定了重构杆件和杆件参数最优解。搭建了四双足步行平台,分析了平台的重构策略与跨越攀爬策略。样机的行走与越障试验结果表明基于一体化重构闭链腿机构搭建的步行平台在保障整体刚性的同时提高了越障性能。

关键词:一体化重构;间歇机构;不完全齿轮;闭链腿机构;跨越攀爬策略
中图分类号:TH112
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.01.005 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Design and Obstacle-surmounting Performance Analysis of an Integrated Reconfigurable Closed-chain Leg Mechanism

ZHAO Shunqing[1] WENG Mingze[2] WU Jianxu[1*] YAO Yan'an[1]
1.School of Mechanical,Electronic and Control Engineering,Beijing Jiaotong University,Beijing,100044
2.China Academy of Aerospace Aerodynamics,Beijing,100071

Abstract: To address the insufficient climbing and obstacle-surmounting performance of traditional closed-chain leg mechanisms, a scaled reconfigurable design of component elements was developed based on the Watt-type closed kinematic chain. An intermittent mechanism was adopted to couple walking power with reconfigurable power, and an integrated reconfigurable closed-chain leg mechanism was proposed. The sensitivity of linkage reconfiguration and the interval of parament adjustment were analyzed, and the optimal solutions for the reconfigurable linkages and their parameters were determined. A four-biped walking platform was built to analyze the platform's reconfigurable strategies and obstacle-surmounting strategies. A prototype was developed, and walking and obstacle-surmounting experiments were conducted for validation. The results indicate that the walking platform constructed on the basis of the integrated reconfigurable closed-chain leg mechanisms, enhances obstacle-surmounting performance while ensuring overall rigidity.

Key words: integrated reconfigurable; intermittent mechanism; incomplete gear; closed-chain leg mechanism; climbing strategy

0 引言

相较于轮式机器人和履带机器人,足式机器人的足端和地面离散接触,具有较好的地形适应性,面对障碍路面、崎岖山路等非结构化复杂地形时,具有更好的通过性能,在山地物资运输和灾难救援等领域具有广阔的应用前景[1]。

根据腿部构型的不同,足式机器人可分为串联式、并联式和闭链式。基于串联式腿机构的足式机器人具有较好的机动性能,如波士顿动力公司研发的 BigDog[2-3]、LS3[4]、Spot[5]。Spot 采用电驱动,自重 30 kg,最大行进速度为 5.74 km/h,可负载 14 kg 实现奔跑步态。BOUMAN 等[6]基于 Spot 实现了四足机器人的大尺度和长周期自主运动。KATZ 等[7]研制的 Mini Cheetah 高约 0.3 m,自重 9 kg,速度可达 2.45 m/s。YANG 等[8]研制的"绝影"具有较强的机动性能,能自主进行连贯的小跑、转向和倾倒自复,并能通过机器学习实现未知场景的自适应。荣学文[9]、柴汇[10]研制的 Scalf 自重 123 kg,具有 12 个驱动自由度、4 个被动自由度,最大负载为 120 kg,负载 50 kg 的最大速度可达 5.04 km/h。ZHANG 等[11]研制的 HITCR-Ⅱ有效提高了六足机器人在非结构化地形行走的稳定裕度,仿真结果表明躯干的俯仰

收稿日期:2023-09-16 **修回日期**:2024-09-03
基金项目:国家自然科学基金(52205007);中央高校基本科研业务费专项资金(2024JBZY005)

角、横滚角分别减小了 54%和 53%，稳定裕度提高了 39%。空间并联式腿机构[12-14]将多杆支撑末端构件作为腿部结构，该机构比串联机构刚度大、稳定性强，在相同的自重/体积下具有较高的承载能力。基于三自由度单环路并联机构，LI 等[15]完成的步行机器人可通过调整步长和步高实现不同速度的行走并跨越不同大小的障碍。GAO 等[16]研制的六足机器人 Baby Elephant 最大载荷可达 100 kg，最大速度为 1.8 km/h。LI 等[17]研制的新型六足机器人 Hexapod 具有更好的稳定性、有效载荷和容错能力，实现了 45°楼梯的攀登。MAO 等[18]研制的新型多足机器人“青骓”实现了不同地形的穿越。郭为忠等[19]研究了六足轮腿式机器人的步态拓扑规划策略和步态拓扑矩阵生成流程。闭链式腿机构系统采用多连杆耦合的结构形式，具有良好的整体刚度，简化了运动控制系统[20]。国内外研究人员基于三种经典的闭链腿机构（Chebyshev 机构[21]、Jansen 机构[22]、Klann 机构[23]）构建了多种足式机器人。WU 等[24]提出整体闭链机构的概念，并将其用于设计步行车辆[25]的行走模块，基于整体闭链行走机构构建的双四足步行车辆可实现 22°纵坡攀爬，300 mm 壕沟跨越，150 mm 垂直墙越障，最大速度为 8.15 km/h。

传统单自由度闭链腿机构固定不变的几何形态特征、构件邻接关系与行走步态轨迹在应对未知多变的地面环境时，所构造的多足载运平台会出现地形适应性不足或通过效能较低的问题[25]。重构设计可改变原有机构的运动轨迹，有效改善机构的地形适应性。KANG 等[26-27]设计了具有丰富运动分支的多种可重构机构，基于螺旋理论分析了单环与多环机构的重构机理及其运动学原理，提出了机构的重构识别方法[28]，完善了可重构机构自由度分析与分岔特性理论，为可重构机构应用打下了坚实的基础，研发的多款基于可重构躯干的变胞机器人[29-30]可实现多种仿生步态，并具有通过纵坡、垂直墙和壕沟等多种地形的高适应移动能力。KUO 等[31]对可重构机构与可变拓扑机构进行了比较论述，将机构的重构方式归结为以下四种：①连杆机构的有效杆件或运动副的数量改变；②运动副性质改变；③连杆机构的有效杆件与运动副的邻接关系改变；④连杆机构运动副的相对布置关系改变。

针对足式平台高可靠性、强地形适应性、高机动性的需求，笔者结合传统闭链腿机构的优势，设计出可重构闭链腿机构。分析了杆件重构灵敏度和调节极值，确定了重构杆件及相关参数，并采用不完全齿轮间歇机构耦合行走动力和重构动力，得到一体化重构闭链腿机构。基于一体化重构闭链腿机构搭建了四双足步行平台，并建立了平台应对典型垂直障碍的攀爬重构策略，分析了步行平台越障概率，开展了样机试验。

1 闭链腿机构的设计与运动学分析

根据现有闭链腿机构的共有构造特性，得到闭链腿机构的设计约束[25]：① 机构自由度为单自由度，且所有运动副均为平面低副；② 至少包括曲柄、机架、大腿杆件、小腿杆件，且曲柄整周转动驱动，曲柄两端分别与机架和三副杆相连，大腿杆件分别与机架、三副杆和小腿杆件相连，曲柄与大腿杆件和小腿杆件不直接相连，机架与小腿杆件不直接相连；③ 小腿杆件足端位置生成封闭无交叉的轨迹曲线。本文研究的 Watt 型闭链腿机构采用全转动副关节，图 1 为其运动简图，图中，r_0 表示机架，r_1 表示曲柄，r_2、r_4、r_5 表示三副杆的三条边，r_3、r_6 表示大腿杆的两条边，r_7 表示二副杆，r_8、r_9 表示小腿杆的两条边，上述部件对应的杆件长度为 $L_0 \sim L_9$，θ_0 为机架和横轴之间的夹角，θ_{2_5} 为 r_2 和 r_5 的夹角，θ_{3_6} 为大腿杆 r_3 和 r_6 的夹角，θ_{8_9} 为小腿杆 r_8 和 r_9 的夹角。

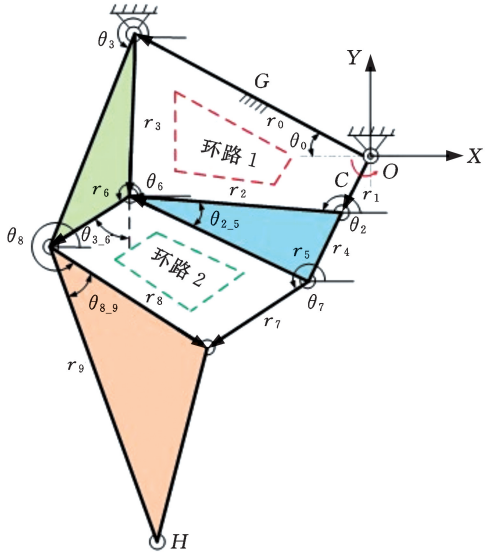


图 1 环路参数

Fig.1 Loop parameters

在机架上建立坐标系 OXY，其中，原点 O 设置在曲柄与机架的转动轴中心处。该机构包含 2 个闭合环路（环路 1、环路 2），利用矢量环路法分别对 2 个环路进行运动学分析求解。环路 1、环路 2 的矢量表达式分别为

$$\boldsymbol{r}_0 + \boldsymbol{r}_3 - \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 = 0 \tag{1}$$

$$\boldsymbol{r}_5 + \boldsymbol{r}_6 + \boldsymbol{r}_8 - \boldsymbol{r}_7 = 0 \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{r}_0 \sim \boldsymbol{r}_3$、$\boldsymbol{r}_5 \sim \boldsymbol{r}_8$ 为部件 $r_0 \sim r_3$、$r_5 \sim r_8$ 对应杆件的矢量，将各个矢量进行正交分解可得单腿机构的角位移

$$\theta_i = \begin{cases} 2\arctan\dfrac{(-1)^i\sqrt{b_{i-1}(b_{i-1}-4a_{i-1})}-b_{i-1}}{2a_{i-1}} & i=2,3 \\ 2\arctan\dfrac{(-1)^i\sqrt{b_{i-4}(b_{i-4}-4a_{i-4})}-b_{i-4}}{2a_{i-4}} & i=7,8 \end{cases} \tag{3}$$

$$a_i = L_{i+1}^2 - L_i^2 - (L_1\cos\theta_1 - L_0\cos\theta_0)^2 - (L_1\sin\theta_1 - L_0\sin\theta_0)^2 + 2L_{i+1}(L_1\cos\theta_1 - L_0\cos\theta_0)$$

$$b_i = -4L_{i+1}(L_1\sin\theta_1 - L_0\sin\theta_0)$$

对 θ_2、θ_3、θ_7、θ_8 进行一阶求导，可得单腿机构的角速度

$$\omega_i = \begin{cases} \dfrac{L_1\omega_1\sin(\theta_3-\theta_1)}{L_2\sin(\theta_2-\theta_3)} & i=2,3 \\ \dfrac{L_2\omega_2\sin(\theta_2-\theta_8)+L_4\omega_4\sin(\theta_8-\theta_4)+L_6\omega_6\sin(\theta_6-\theta_8)}{L_7\sin(\theta_7-\theta_8)} & i=7,8 \end{cases} \tag{4}$$

对 ω_2、ω_3、ω_7、ω_8 进行一阶求导，可得单腿机构的角加速度：

$$\left.\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{E\cos\theta_3 + F\sin\theta_3}{L_2\sin(\theta_2-\theta_3)} \\ \alpha_3 &= \frac{E\cos\theta_2 + F\sin\theta_2}{L_3\sin(\theta_2-\theta_3)} \\ \alpha_7 &= \frac{G\cos\theta_8 + H\sin\theta_8}{L_7\sin(\theta_7-\theta_8)} \\ \alpha_8 &= \frac{G\cos\theta_7 + H\sin\theta_7}{L_8\sin(\theta_7-\theta_8)} \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

$$E = L_0\omega_0^2\cos\theta_0 - L_1\omega_1^2\cos\theta_1 - L_2\omega_2^2\cos\theta_2 + L_3\omega_3^2\cos\theta_3$$

$$F = L_0\omega_0^2\sin\theta_0 - L_1\omega_1^2\sin\theta_1 - L_2\omega_2^2\sin\theta_2 + L_3\omega_3^2\sin\theta_3$$

$$G = L_2\omega_2^2\cos\theta_2 + L_4\omega_4^2\cos\theta_4 + L_6\omega_6^2\cos\theta_6 - L_7\omega_7^2\cos\theta_7 + L_8\omega_8^2\cos\theta_8 + L_2\alpha_2^2\sin\theta_2 - L_4\alpha_4^2\sin\theta_4 + L_6\alpha_6^2\sin\theta_6$$

$$H = L_2\omega_2^2\sin\theta_2 - L_4\omega_4^2\sin\theta_4 + L_6\omega_6^2\sin\theta_6 - L_7\omega_7^2\sin\theta_7 + L_8\omega_8^2\sin\theta_8 - L_2\alpha_2^2\cos\theta_2 - L_4\alpha_4^2\cos\theta_4 + L_6\alpha_6^2\cos\theta_6$$

利用遗传算法优化杆长和夹角。首先，设置基因长度为 7，杆长变化范围为 ± 12 mm，角度变化范围为 ± 7.5°，交叉概率为 0.75，变异概率为 0.02。然后，利用矢量环路法求解足端轨迹，足端点的矢量表达式为

$$\boldsymbol{r}_h = \boldsymbol{r}_1 + \boldsymbol{r}_2 + \boldsymbol{r}_6 + \boldsymbol{r}_9 \tag{6}$$

足端轨迹的优劣采用适应度函数表达，由质心波动与跨步长度 L_{step} 联合表征。质心波动为负向指标，数值越小越好，因此需对其进行正向化处理。质心波动的计算时间长、迭代多，故改用曲柄角度 θ_c 来衡量足端轨迹的优劣。根据质心波动与跨步长的变化范围及设计需求，主动给出质心波动与跨步长的权重，将多目标转化为单目标。足端轨迹的优劣适应度函数为

$$f = L_{step} + 3\theta_c \tag{7}$$

将曲柄不存在及轨迹出现交叉的个体适应度函数赋值 0，得到每个个体的适应度函数后进行归一化处理：

$$f_{st}(i) = f(i)/\sum f(i) \tag{8}$$

式中：$f_{st}(i)$ 为某一特定条件下自变量 i 的适应度函数值；$f(i)$ 为通用条件下自变量 i 的适应度函数值；$\sum f(i)$ 为所有可能条件下的适应度函数值总和。

复制过程利用轮盘赌算法计算复制概率，根据随机复制的概率生成新的个体，并将通过交叉变异形成的新个体作为子代。为防止最优解丢失，将父代中的最优解保留，随机赋值给子代，形成新的种群。反复迭代计算最优解，得到杆长（$L_0 \sim L_9$）和夹角（θ_0、θ_{2_5}、θ_{3_6}、θ_{8_9}），如表 1 所示。

表 1　机构尺寸最优解

Tab.1　The optimal solution

变量	数值	变量	数值	变量	数值
L_0/mm	90.00	L_6/mm	36.00	θ_0/(°)	37.5
L_1/mm	26.33	L_7/mm	64.33	θ_{2_5}/(°)	22.0
L_2/mm	78.67	L_8/mm	62.33	θ_{3_6}/(°)	29.0
L_3/mm	56.67	L_9/mm	79.36	θ_{8_9}/(°)	29.8
L_4/mm	29.48				

2　一体化重构机构的设计

2.1　设计思路

对 Chebyshev 机构、Klann 机构、Jansen 机构组成的双足闭链腿组进行越障性能和支撑平直度分析，结果如表 2 所示，其中，越障性能为越障高度和腿长的比值，支撑平直度为足端轨迹的支撑相最大垂向位移和支撑相长度比值的剩余分率。

表 2　闭链腿机构性能对比

Tab.2　Performance comparison of closed-chain leg mechanism　%

机构类型	越障性能	支撑平直度
Chebyshev 机构	10.2	98.4
Klann 机构	26.3	95.8
Jansen 机构	5.0	83.2

表 2 中的越障性能数据显示，单自由度闭链腿机构的运动特性恒定不变导致越障能力不足。基于单自由度闭链腿机构搭建的多足平台需具备较强的机动性，以更好地适应复杂地形，此外，为保障承载性能和可靠性，多足平台应具有较少自

由度。笔者针对多足平台的强机动性和高可靠性需求，提出单动力可重构闭链腿机构的概念，设计重构和动力耦合机构，分析重构策略和越障概率，设计样机并开展越障实验，具体研究技术路线如图 2 所示。

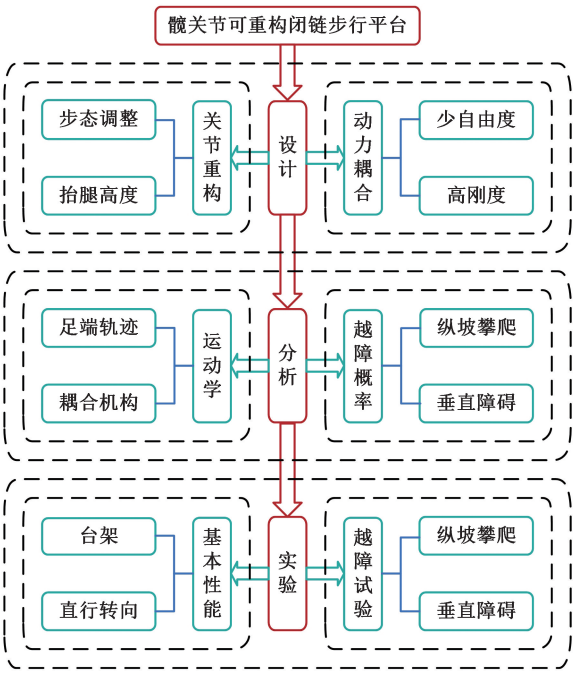
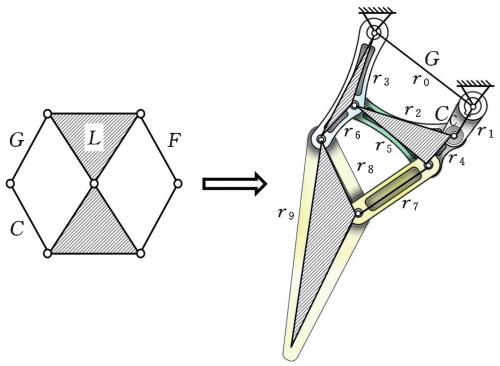


图 2　技术路线图

Fig.2　Technical route

2.2　重构方案设计

采用可重构机构实现腿部运动模式的切换，由 Watt 型运动链构造而成的全转动副单自由度闭链腿机构如图 3 所示。可重构闭链腿机构通过运动副之间的位置关系变化实现足端轨迹重构，呈现不同的运动模式。将可重构思想引入 Watt 型闭链腿机构设计，在原有的六杆七副腿机构上增加 1 个杆件和 1 个运动副，以改变腿机构的足端轨迹，提高越障能力。常见的闭链腿机构重构有构件元重构、连接元重构、关联关系元重构。构件元重构是重构腿机构中的某一构件，通过增加 1 个移动自由度来调节杆件长度，最终提高越障能力。构件元重构的本质是改变某一杆件的长度，结构相对简单，控制复杂度低，故本文选择构件元重构的方法进行闭链腿重构设计。



(a) 机构拓扑图　　(b) 机构简图

图 3　Watt 型闭链腿机构

Fig.3　Watt type closed chain leg mechanism

单自由度闭链腿机构包含杆长和角度等多个参数。腿机构足端轨迹可分为 4 个相位区间(支撑相阶段、摆动相阶段、过渡阶段 1、过渡阶段 2)，如图 4 所示。目标足端轨迹的曲线形态在支撑相阶段对应的质心波动应最小，在摆动相阶段对应的抬腿高度应最大，这样通过改变不同阶段的杆长就能在提高越障能力的同时保证较好的平稳性。

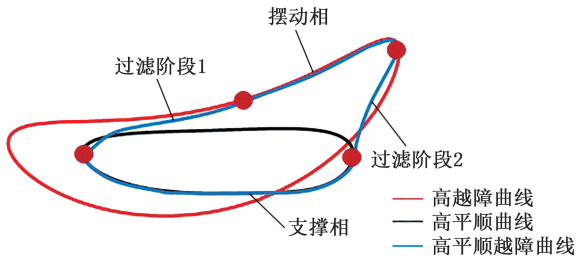


图 4　足端轨迹相位区间划分

Fig.4　Phase interval division of trajectory

确定腿机构构型、基础尺寸、构件元重构方案后，对单腿机构中各杆件的长度进行灵敏度分析，确定杆件长度变化对机构抬腿高度的影响。建立单腿机构的运动学模型，分析各杆件的长度变化对足端轨迹抬腿高度的灵敏度，得到的杆件灵敏度是杆件长度改变前后的灵敏度均值：

$$S_i = \frac{1}{2}\left(\frac{W_{i+1}-W_i}{x_{i+1}-x_i}+\frac{W_i-W_{i-1}}{x_i-x_{i-1}}\right) \tag{9}$$

式中：S_i 为灵敏度均值；W 为足端轨迹的目标值即抬腿高度 W_y，$W_y = y_{\max} - y_{\min}$；$y_{\max}$、$y_{\min}$ 分别为足端轨迹最高点和最低点的高度；x 为变量即杆件长度；下标 i 为迭代次数。

根据整体安装和工作尺寸限制，将杆件变化量取值范围定为[0 mm，20 mm]。

选择重构参数时，为保证平台的稳定性且便于后续的动力耦合设计，选择结构简单且易发生长度变化的杆件进行设计与分析，因此分别将机架 r_0、曲柄 r_1、三副杆的两条边边 r_2 与 r_4、大腿杆的两条边 r_3 与 r_6、二副杆 r_7 的对应杆长 L_0 ～ L_4、L_6、L_7 在数值的基础上增加 20 mm 并生成足端的空转轨迹，根据杆长变化量 ΔL 对抬腿高度的影响程度可得杆长变化对抬腿高度的灵敏度曲线，如图 5 所示，其中灵敏度由 S 表示。

杆长变化量为 0 ～ 20 mm 时，r_0 ～ r_4、r_6、r_7 的灵敏度均值分别为 −1.24、0.713、1.744、0.063、

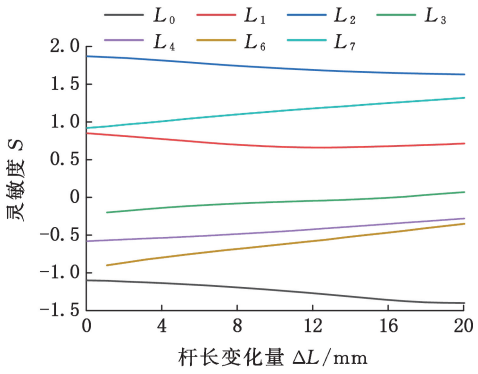


图 5　杆件灵敏度曲线

Fig.5　The sensitivity curve of rod

−0.446、0.586 和 1.136，其中，正数表示足端轨迹的抬腿高度随着杆件长度的增大而增大，负数表示足端轨迹的抬腿高度随着杆件长度的减小而增大。由杆件灵敏度均值可以看出，r_2 的灵敏度最大，即杆件长度变化相同时，r_2 对抬腿高度的影响最大；机架杆 r_0 的灵敏度次之，但抬腿高度随 r_0 的减小而增大。

由杆件灵敏度可确定杆件长度化对抬腿高度的影响。基于杆件灵敏度对杆件长度调节的极值进行分析，其中，灵敏度正相关的计算极大值，负相关的计算极小值。选取重构杆件应遵循以下设计原则：① 尽量选择灵敏度大的杆件，以提高调节效率，降低调节复杂程度；② 尽量选择杆件长度调节极值范围较大的杆件，以尽可能增大抬腿高度；③ 尽量选择与机架相邻的杆件作为重构杆件，以利于动力耦合设计。根据各杆件的灵敏度和极值范围内的最大抬腿高度，并基于重构参数设计原则，在充分考虑调节效率、可调整设计对整机稳定性能影响、动力耦合等因素的前提下，最终选择机架 r_0 作为重构杆件进行可重构设计，如图 6 所示。依据单腿机构目标足端轨迹及杆长，采用 MATLAB 优化各杆件长度的极大值和极小值，优化结果显示机架长度的极小值为 56.5 mm，对应的最大抬腿高度为 86.5 mm。

对机架杆重构后的闭链腿机构足端轨迹（图 7）进行分析。重构后的支撑相长度为 80 mm，支撑相垂向最大位移为 5.1 mm，支撑平直度为 93.6%。在保证腿机构支撑直线度不变的前提下，最大抬腿高度从重构前的 28 mm 增大至重构后的 86.5 mm。重构设计在保证行驶平顺性的前提下提高了越障能力。

2.3　动力耦合设计

机架杆重构设计引入新的自由度，为保持闭链腿机构原有的单动力和高刚度优势，设计动力耦合机构将重构动力与行走动力耦合，使单动力

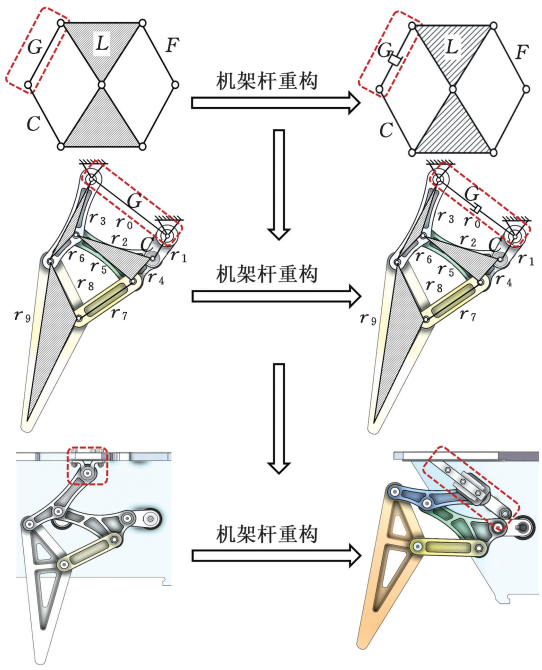


图 6　重构设计

Fig.6　Reconfiguration design

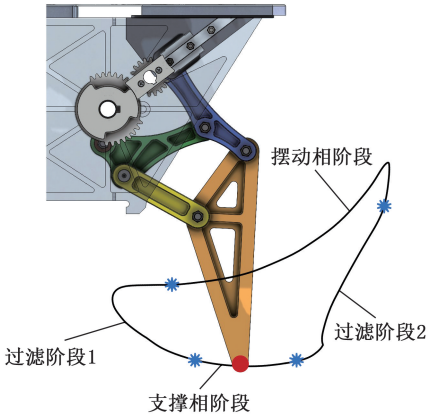


图 7　足端轨迹仿真曲线

Fig.7　Foot trajectory simulation curve

驱动的闭链腿机构兼顾支撑平直度和抬腿跨越度。笔者利用间歇机构的周期性运动和停歇，实现腿组的动力耦合和足端轨迹耦合：在支撑相和摆动相阶段间歇机构的主动件与从动件脱离接触，不产生运动，杆件长度不变，以保障行驶平顺性和越障稳定性；在过渡阶段间歇机构主动件与从动件相接触激活机构运动，通过间歇机构与可重构杆件的配合运动将杆件长度调整至所需尺寸，保障越障通过性。

本文采用不完全齿轮间歇机构实现重构和行走的动力耦合，不完全齿轮机构具体设计要求如下：①为避免根切，齿轮的齿数不小于 17；②齿轮的模数、压力角、齿根高、齿顶高系数等尽量采用国家标准。

行走机构的曲柄转动一周，对应的足端点轨迹包含支撑相阶段、摆动相阶段、过渡阶段 1、过

渡阶段 2，基于足端轨迹在各个阶段连接位置的平顺性分析不同阶段对应的曲柄相位区间，设计不完全齿轮，如图 8 所示。

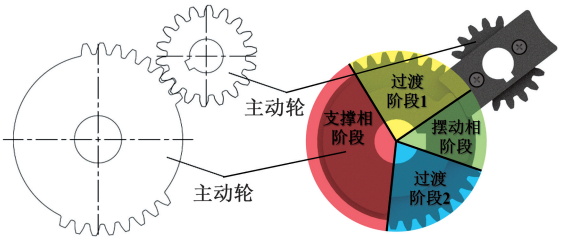


图 8　不完全齿轮对应的曲柄相位区间

Fig.8　The crank phase interval corresponding to anincomplete gear set

绘制并分析足端轨迹曲线得到曲柄的相位间隔为 40°。足端轨迹区间转换时，足端轨迹斜率没有突变，2 个阶段之间的轨迹连接平顺，因此机架长度调整对应的曲柄转动相位间隔为 40°，足端轨迹不同阶段对应的曲柄转角相位区间如表 3 所示。

表 3　机架变化过程所对应的曲柄转角相位区间

Tab.3　The phase interval of crank angle corresponding to the frame change process

	变化阶段			
	摆动相阶段	过渡阶段 1	支撑相阶段	过渡阶段 2
转角区间	[0°,50°]	[50°,90°]	[90°,320°]	[320°,360°]

由机架长度调整区间可知，在不完全齿轮传动过程中，主动轮旋转 40°，从动轮需旋转 180°，因此齿轮组的传动比为 4.5，通过设计计算得出不完全齿轮的参数，如表 4 所示。

表 4　不完全齿轮参数表

Tab.4　Incomplete gear parameter list

齿轮	齿数	模数/mm	压力角/(°)	锁止弧半径/mm	齿顶高系数	顶系系数
主动轮	81	2	20	79.3142	1	0.25
从动轮	18	2	20	79.3142	1	0.25

综上所述，动力耦合具有以下特性：①动力耦合包含 4 个阶段；②调节动力具有间歇特性；③动力的调节时间节点及时长满足重构要求。动力耦合的设计方案如图 9 所示，行走动力输出齿轮为普通渐开线齿轮，重构输出齿轮组中的主动齿轮为不完全齿轮（与行走机构中的普通渐开线齿轮固连），被动齿轮为普通渐开线齿轮（与可变机架中的曲柄相连）。

上述重构方案设计的本质为通过调节机架的长度来调整足端轨迹，即对机架引入等效移动副来代替固定长度的原始链路。移动副与转动副进行动力耦合的难度较大，因此将曲柄滑块机构作

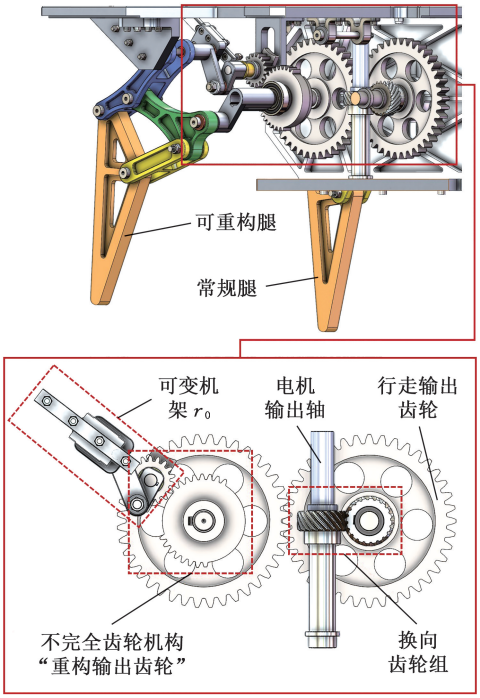


图 9　动力耦合设计方案

Fig.9　Dynamic coupling design scheme

为等效移动副来代替原始机架，将用于机架重构调整的直线驱动替换为回转驱动。采用不完全齿轮机构将重构曲柄的转动与行走曲柄的转动耦合，避免增加额外的输入动力，如图 10 所示。不完全齿轮间歇机构和动力耦合设计的核心优势是将足端轨迹的支撑相和跨越相拆分。跨越相状态下，不完全齿轮机构处于激活状态，实现腿部重构，增大抬腿高度；支撑相状态下，不完全齿轮处于非激活状态，一体化重构闭链腿机构完全等效于六杆闭链腿机构，保证了机构的承载能力。

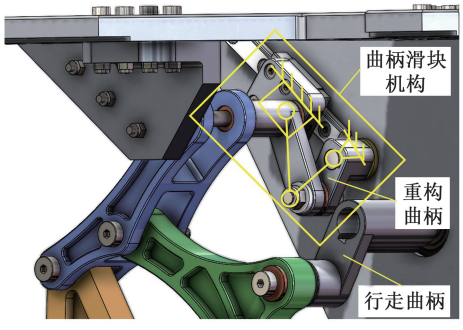
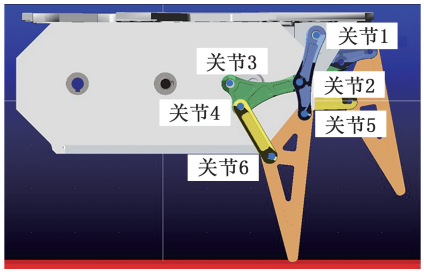


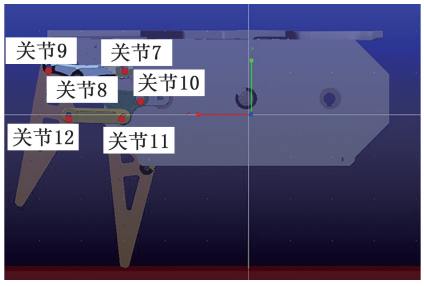
图 10　曲柄滑块重构机构

Fig.10　Crank slider reconfiguration mechanism

基于拉格朗日方程建立双足模块的动力学模型，如图 11 所示，对曲柄转动频率 1 Hz 下的空转工况关节力进行仿真分析，结果如图 12 所示；对曲柄转动频率 1 Hz 下的接地行走工况的关节力和足端接触力进行仿真分析，结果如图 13、图 14 所示。



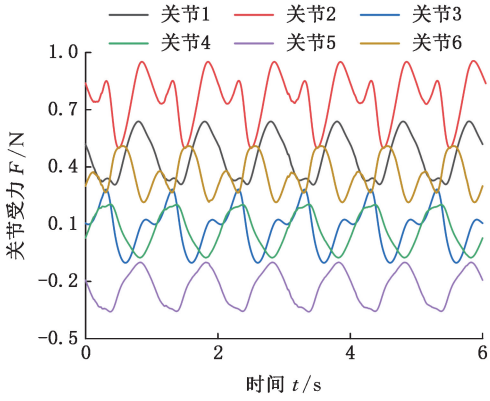
(a)关节 1—6



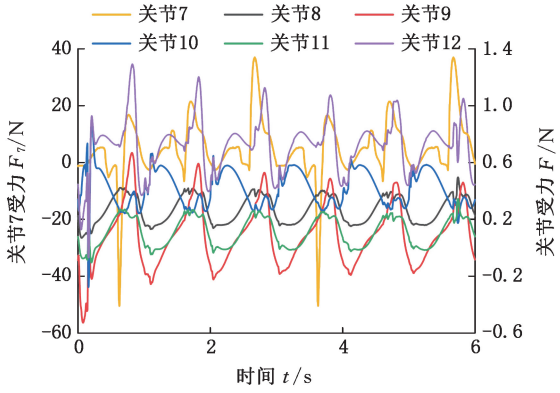
(b)关节 7—12

图 11　双足模块动力学模型

Fig.11　Bipedal dynamics model



(a)关节 1—6 受力



(b)关节 7—12 受力

图 12　空转工况的关节力

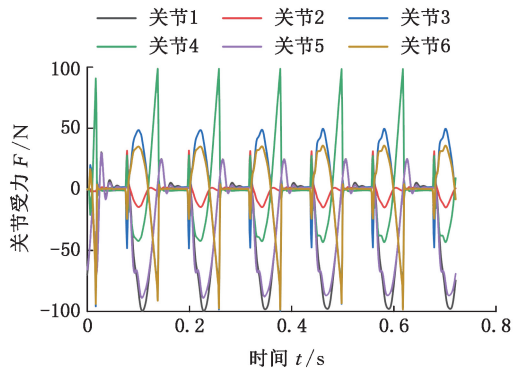
Fig.12　Joint force under idling work condition

3　越障仿真分析

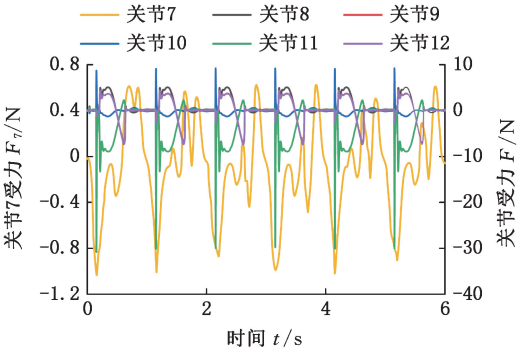
3.1　垂直障碍越障分析

垂直障碍(垂直墙)作为典型障碍,是多足行走系统在保证运载平顺性的基础上需要克服的主要障碍[32-34],因此对由一体化重构闭链腿机构组成的四双足步行平台进行垂直障碍越障策略的仿真分析。在整机布局层面,首先采用 1 个双出轴减速电机连接左右两侧单腿(对应曲柄的相位差为 180°),组成双足模块;然后将 4 个双足模块集成在机身上,构成四双足步行平台,如图 15 所示。

四双足步行平台的越障过程分析可等效为单侧四足即行走模块 1 和行走模块 2 的越障分析。每个行走模块均由常规单腿和重构单腿组成。将攀爬垂直墙的越障过程分为图 16 所示的 5 个状态:状态 1,整机接近障碍,行走模块 1 进入越障周期;状态 2,行走模块 1 的重构单腿踏上垂直墙面,常规单腿处于腾空状态;状态 3,行走模块 1 的常规单腿踏上垂直墙面,重构单腿处于腾空状态;状态 4,行走模块 2 的重构单腿踏上垂直墙



(a)关节 1—6 受力



(b)关节 7—12 受力

图 13　行走工况的关节力

Fig.13　Joint force under walking condition

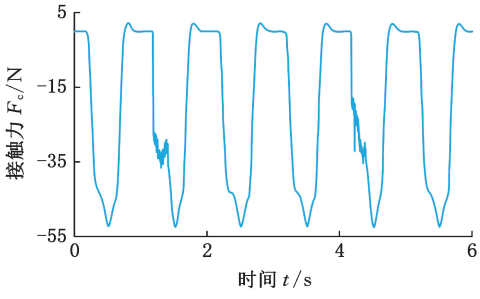


图 14　行走工况的接触力

Fig.14　Contact force under walking conditions

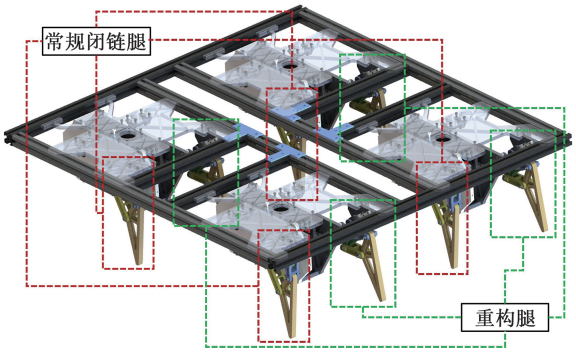
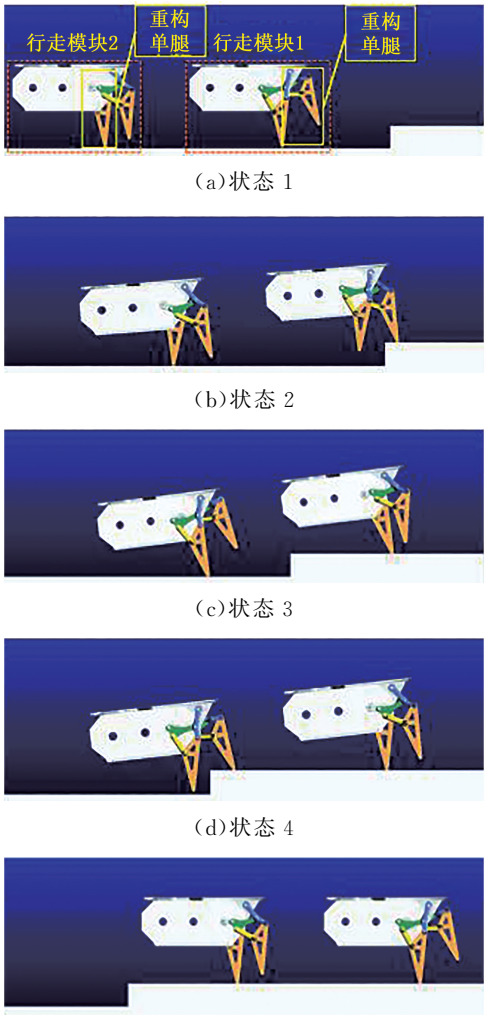


图 15　步行平台

Fig.15　Walking platform



(a)状态 1

(b)状态 2

(c)状态 3

(d)状态 4

(e)状态 5

图 16　垂直墙越障过程

Fig.16　Vertical obstacle crossing process

面，常规单腿处于腾空状态；状态 5，整机继续行进，直至行走模块 2 完全踏上垂直墙面，完成整个越障过程。

利用 Adams 仿真软件进行 75 mm 垂直障碍的攀爬仿真，基于仿真结果得到的整机质心的波动曲线（图 17），单个模块的越障功率如图 18 所示。

此外，通过越障概率模型[20]评估所设计腿的

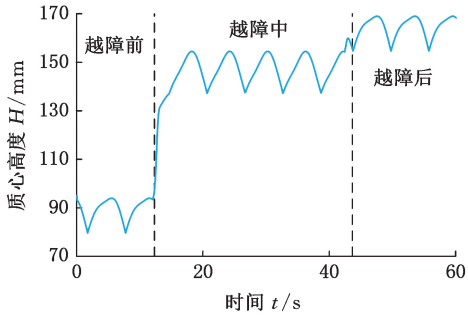


图 17　垂直障碍越障过程中的整机质心波动曲线

Fig.17　The fluctuation curve of centroid during vertical obstacle surmounting

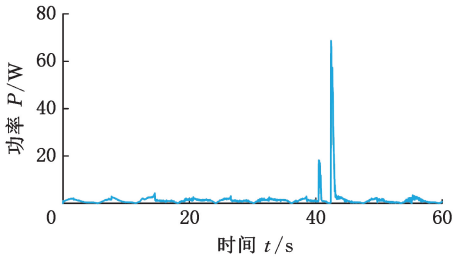


图 18　垂直障碍越障功率

Fig.18　Vertical obstacle surmounting power

越障综合指标，绘制双腿机构跨越区间，如图 19 所示，其越障概率密度为

$$g(x)=\begin{cases}1/(x_1-x_0) & x_0\leqslant x\leqslant x_1\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{10}$$

越障概率为

$$P(Y\geqslant h)=P(x_2\leqslant x\leqslant x_3)=\int_{x_2}^{x_3}\frac{1}{x_1-x_0}\mathrm{d}x=\frac{x_3-x_2}{x_1-x_0} \tag{11}$$

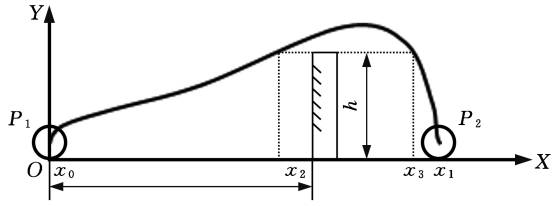


图 19　跨越区间

Fig.19　Obstacle-surmounting interval

采用最小二乘法进行多项式逼近得到跨越轨迹拟合函数，计算得出越障期望值为 54.3 mm。

3.2　纵坡仿真分析

将纵坡障碍攀爬过程分为 4 个状态：状态 1，整机接近障碍，行走模块 1 进入越障周期；状态 2，行走模块 1 的重构单腿踏上坡面，所有单腿轮换支撑地面行走；状态 3，行走模块 2 的重构单腿踏上垂直墙面，所有单腿轮换支撑地面行走；状态 4，整机继续行进，直至行走模块 2 完全踏上坡面，完成整个越障过程。利用 Adams 仿真软件进行 30°纵坡攀爬仿真，根据整机不同模块分别踏上障碍的顺序，越障过程的 4 个状态如图 20 所示。

基于纵坡障碍攀爬的仿真结果，得到纵坡障



(a)状态 1



(b)状态 2



(c)状态 3



(d)状态 4

图 20　纵坡攀爬过程

Fig.20　Slope climbing process

碍攀爬过程中整机质心波动，如图 21 所示，单个模块最大爬坡功率为 6.6 W，如图 22 所示。

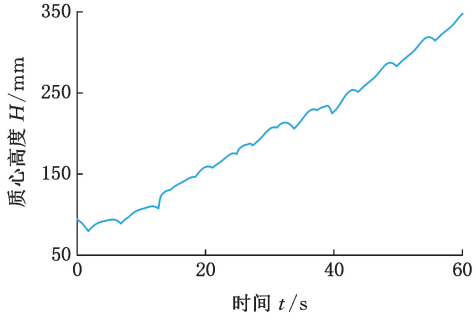


图 21　纵坡障碍越障过程中整机质心的波动曲线

Fig.21　The fluctuation curve of centroid during slope crossing

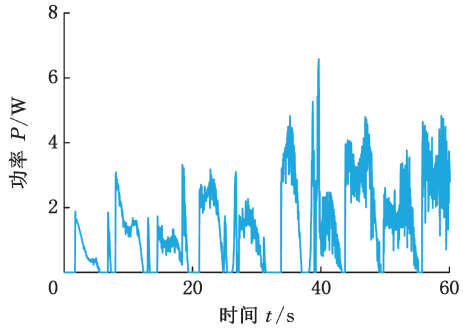


图 22　纵坡攀爬功率

Fig.22　Slope climbing power

4　样机与试验

对一体化重构腿机构进行三维模型设计，并以四双足布局模式搭建平台整机模型。根据仿真分析中的数据对电机进行选型，同时对电池、控制板、滑轨等外购件进行选型并设计控制系统，设计机械零件并加工组装出一体化重构闭链双足模块。每个双足模块包含 1 个重构腿机构和 1 个常规腿机构，4 个双足模块装配在同一机身，构成一体化重构闭链步行平台样机，如图 23 所示。基于行走和重构动力的耦合设计，平台整机采用 4 套由 60 系列闭环步进电机、行星减速器(PX57 标准系列减速器，减速比 40∶1)组合而成的减速电机。驱动控制系统中，驱动器为 HB808C 数字式混合伺服驱动器，控制器采用具有蓝牙模块的 ESP32 芯片。动力系统由 2 块电压 24 V、容量 2200 mA·h 的 TCB 航模电池串联组成。一体化重构闭链步行平台样机参数如表 5 所示。

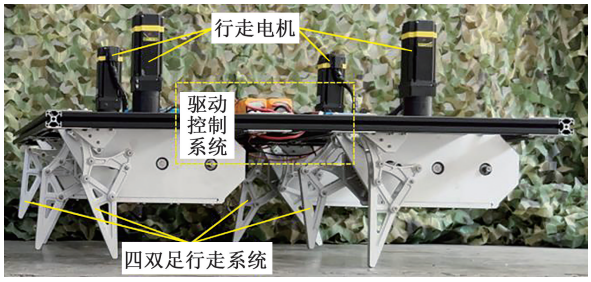


图 23　可重构闭链步行平台样机

Fig.23　Reconfigurable closed-chain walking platform prototype

表 5　样机参数

Tab.5　Parameters of the prototype

参数	参数类别	数值
整机	外形尺寸/mm	1005×945×500
	平台质量/kg	45
	续航时间/h	3
机动性能	纵坡障碍/(°)	30
	垂直障碍/mm	75

针对一体化重构闭链步行平台样机，搭建 75 mm 垂直障碍和 30°纵坡试验场景开展攀爬试验，如图 24、图 25 所示。根据越障策略，在越障过程中，通过 4 个双腿单元的轮换支撑和腾空实现完整的垂直障碍和纵坡障碍攀爬。样机完成了 75 mm 垂直障碍和 30°纵坡的稳定攀爬，验证了重构设计的合理性与越障策略的可行性。此外，还开展了直行加速和转向试验，加速 5 s 即可达到最大行驶速度 2.3 m/s，并实现了零半径转向。垂直越障和纵坡攀爬过程中，单电机功率曲线如图

26 所示。重构前后的越障参数对比如表 6 所示，重构闭链腿机构越障性能为 38%，明显优于 Chebyshev 机构的 26.3%、Klann 机构的 10.22%和 Jansen 机构的 5%。

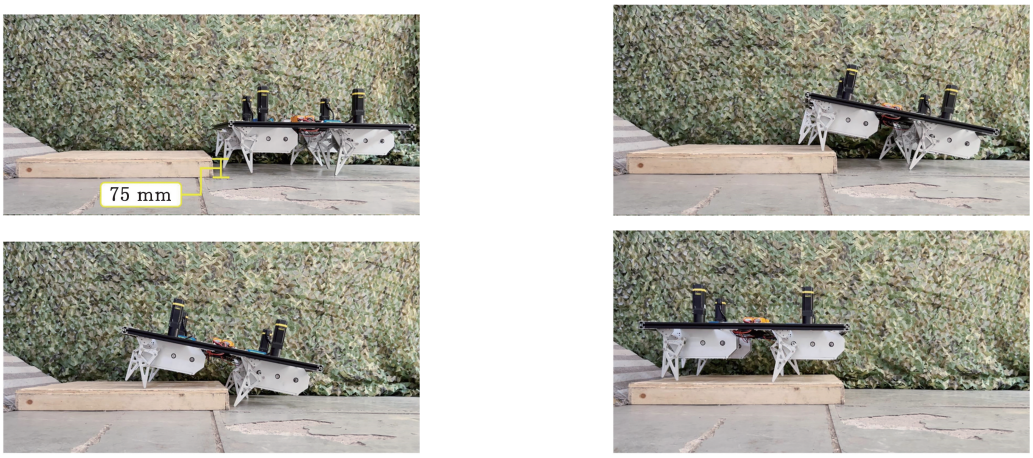


图 24　样机攀爬垂直墙试验

Fig.24　Climb the vertical obstacle test of prototype



图 25　样机攀爬纵坡试验

Fig.25　Climb the slope test of prototype

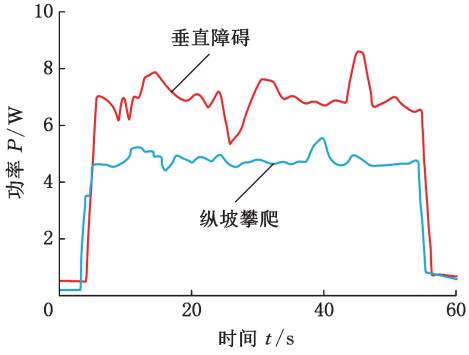


图 26　电机功率

Fig.26　Motor power

表 6　重构前后越障参数对比

Tab.6　Comparison of obstacle crossing parameters

	重构后	重构前
垂直墙高度/mm	75	25
纵坡角度/(°)	30	20

5　结论

1)基于 Watt 型闭式运动链设计出一体化重构单闭链腿机构，利用不完全齿轮传动机构实现了行走和重构的动力耦合。

2)对一体化重构闭链单腿机构、整机重构策略和整机越障概率的分析表明，重构后的闭链腿机构有效提高了步行平台的越障能力。

3)设计了双足模块，搭建四双足步行平台样机进行了纵坡和垂直墙攀爬试验。试验结果表明重构后的步行平台可完成 75 mm 垂直墙和 30°纵坡的攀爬，较重构前的 25 mm 垂直障碍、20°纵坡，攀爬性能分别提高 200%和 50%，且重构闭链腿机构越障性能(越障高度/腿长)达到 38%，越障性能优于常规闭链腿机构。

参考文献：

[1] ITO K, YANG Zhixiao, SAIJO K, et al. A Rescue Robot System for Collecting Information Designed for Ease of Use—a Proposal of a Rescue Systems Concept[J]. Advanced Robotics, 2005, 19(3):249-

272.

[2] RAIBERT M, BLANKESPOOR K, NELSON G, et al. BigDog, the Rough-terrain Quadruped Robot [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10822-10825.

[3] 丁良宏，王润孝，冯华山，等. 浅析 BigDog 四足机器人[J]. 中国机械工程，2012，23(5):505-514.
DING Lianghong, WANG Runxiao, FENG Huashan, et al. Brief Analysis of a BigDog Quadruped Robot[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(5):505-514.

[4] SIMON P. Military Robotics: Latest Trends and Spatial Grasp Solutions[J]. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 2015, 4(4):9-18.

[5] 刘京运. 从 Big Dog 到 Spot Mini:波士顿动力四足机器人进化史[J]. 机器人产业，2018(2):109-116.
LIU Jingyun. From Big Dog to Spot Mini:Evolution of Boston-powered Quadruped Robots[J]. Robot Industry, 2018(2):109-116.

[6] BOUMAN A, GINTING M F, ALATUR N, et al. Autonomous Spot: Long-range Autonomous Exploration of Extreme Environments with Legged Locomotion[C]// 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Las Vegas, 2020:2518-2525.

[7] KATZ B, Di CARLO J, KIM S. Mini Cheetah: a Platform for Pushing the Limits of Dynamic Quadruped Control[C]// 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, 2019:6295-6301.

[8] YANG Chuanyu, YUAN Kai, ZHU Qiuguo, et al. Multi-expert Learning of Adaptive Legged Locomotion[J]. Science Robotics, 2020, 5(49):eabb2174.

[9] 荣学文. SCalf 液压驱动四足机器人的机构设计与运动分析[D]. 济南:山东大学，2013.
RONG Xuewen. Mechanism Design and Motion Analysis of SCalf Hydraulic Driven Quadruped Robot[D]. Jinan:Shandong University, 2013.

[10] 柴汇. 液压驱动四足机器人柔顺及力控制方法的研究与实现[D]. 济南:山东大学，2016.
CHAI Hui. Research and Implementation of Compliance and Force Control Method for Hydraulic Driven Quadruped Robot [D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[11] ZHANG He, LIU Yubin, ZHAO Jie, et al. Development of a Bionic Hexapod Robot for Walking on Unstructured Terrain[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(2):176-187.

[12] 黄真，孔令富，方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京:机械工业出版社，1997.
HUANG Zhen. Mechanism Theory and Control of Parallel Robot[M]. Beijing:China Machine Press, 1997.

[13] KONG Xianwen, GOSSELIN C. Type Synthesis of Parallel Mechanisms [M]. Berlin: Springer, 2007.

[14] DAI J S, HUANG Zhen, LIPKIN H. Mobility of Overconstrained Parallel Mechanisms[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128(1):220-229.

[15] LI Luquan, FANG Yuefa, GUO Sheng, et al. Type Synthesis of a Class of Novel 3-DOF Single-loop Parallel Leg Mechanisms for Walking Robots [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 145: 103695.

[16] GAO Feng, QI Chenkun, SUN Qiao, et al. A Quadruped Robot with Parallel Mechanism Legs [C]// 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, 2014:2566.

[17] LI Huayang, QI Chenkun, GAO Feng, et al. Mechanism Design and Workspace Analysis of a Hexapod Robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 174:104917.

[18] MAO Liheng, GAO Feng, TIAN Yuan, et al. Novel Method for Preventing Shin-collisions in Six-legged Robots by Utilising a Robot—Terrain Interference Model[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 151:103897.

[19] 郭为忠，汤耘，高峰. 轮腿式机器人步态生成的拓扑矩阵方法[J]. 机械工程学报，2017，53(21):1-8.
GUO Weizhong, TANG Yun, GAO Feng. Topology Matrix Method for Gait Generation of Wheel-legged Robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(21):1-8.

[20] 武建昫. 连杆式整体闭链多足载运平台的设计与应用研究[D]. 北京:北京交通大学，2019.
WU Jianxu. Research on Design and Application of Multi-legged Carrying Platform with Link Integral Closed Chain[D].Beijing:Beijing Jiaotong University, 2019.

[21] ARTOBOLEVSKII I I. Mechanisms for the Generation of Plane Curves[M]. Amsterdam:Elsevier, 2013.

[22] JANSEN T. The Great Pretender[M]. Rotterdam: 010 Publishers, 2007.

[23] KLANN J C. Walking Device: US, 6364040[P]. 2002-04-02.

[24] WU Jianxu, YAO Yanan, RUAN Qiang, et al. Design and Optimization of a Dual Quadruped Vehicle Based on Whole Close-chain Mechanism[J].

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 231(19): 3601-3613.

[25] WU Jianxu, YAO Yanan, LI Yibin, et al. Design and Analysis of a Sixteen-legged Vehicle with Reconfigurable Close-chain Leg Mechanisms[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(5): 055001.

[26] KANG Xi, DAI J S. Relevance and Transferability for Parallel Mechanisms with Reconfigurable Platforms[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(3): 031012.

[27] KANG Xi, ZHANG Xinsheng, DAI J S. First- and Second-order Kinematics-based Constraint System Analysis and Reconfiguration Identification for the Queer-square Mechanism[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(1): 011004.

[28] LÓPEZ-CUSTODIO P C, MÜLLER A, KANG X, et al. Tangential Intersection of Branches of Motion[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 147: 103730.

[29] 甄伟鲲，康熙，张新生，等. 一种新型四足变胞爬行机器人的步态规划研究[J]. 机械工程学报，2016, 52(11): 26-33.
ZHEN Weikun, KANG Xi, ZHANG Xinsheng, et al. Gait Planning of a Novel Metamorphic Quadruped Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(11): 26-33.

[30] TANG Zhao, QI Peng, DAI J. Mechanism Design of a Biomimetic Quadruped Robot[J]. Ind. Robot, 2017, 44: 512-520.

[31] KUO C H, DAI J S, YAN Hong Sen. Reconfiguration Principles and Strategies for Reconfigurable Mechanisms[C]// Proceedings of the 2009 ASME/IFToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots. London, 2009: 1-7.

[32] BAI Shaoping, LOW K H, GUO Weimiao. Kinematographic Experiments on Leg Movements and Body Trajectories of Cockroach Walking on Different Terrain[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, 2000: 2605-2610.

[33] LIU C H, LIN M H, HUANG Y C, et al. The Development of a Multi-legged Robot Using Eight-bar Linkages as Leg Mechanisms with Switchable Modes for Walking and Stair Climbing[C]// 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Nagoya, 2017: 103-108.

[34] HIROSE S, KUNIEDA O. Generalized Standard Foot Trajectory for a Quadruped Walking Vehicle[J]. The International Journal of Robotics Research, 1991, 10(1): 3-12.

（编辑 张 洋）

作者简介：赵顺卿，男，1990 年生，博士研究生。研究方向为机器人机构学。E-mail: 22110401@bjtu.edu.cn。武建昀*（通信作者），男，1989 年生，副教授、博士研究生导师。研究方向为机器人机构学。发表论文 25 篇。E-mail: wujx@bjtu.edu.cn。

本文引用格式：
赵顺卿，翁铭泽，武建昀，等. 一体化重构闭链腿机构的设计与越障性能分析[J]. 中国机械工程，2025，36(1)：47-58.
ZHAO Shunqing, WENG Mingze, WU Jianxu, et al. Design and Obstacle-surmounting Performance Analysis of an Integrated Reconfigurable Closed-chain Leg Mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1): 47-58.

（上接第 46 页）

[30] LIU Rui, WANG Liang, JIN Jiamei, et al. A Novel 3-DOF Piezoelectric Robotic Pectoral Fin: Design, Simulation, and Experimental Investigation[J]. Smart Material Structures, 2022, 31(6): 065003.

[31] ZHANG Anti, WANG Liang, JIN Jiamei, et al. A Novel Piezoelectric Actuated 2-DOF Joint for Underwater Manipulator: Design, Simulation, and Experimental Investigation[J]. Smart Material Structures, 2021, 30(10): 105032.

（编辑 张 洋）

作者简介：潘志泳，男，1995 年生，博士研究生。研究方向为压电精密驱动及其理论。E-mail: pzy1271987483@nuaa.edu.cn。王 亮*（通信作者），男，1990 年生，教授、博士研究生导师。研究方向为精密驱动与振动利用、超声电机技术。发表论文 60 余篇。E-mail: lwang@nuaa.edu.cn。

本文引用格式：
潘志泳，王亮，金家楣，等. 贴片式圆盘定子多自由度超声电机的设计与实验[J]. 中国机械工程，2025，36(1)：38-46.
PAN Zhiyong, WANG Liang, JIN Jiamei, et al. Design and Experiments of Bonded-type Disc Stator Multi-degree-of-freedom Ultrasonic Motor[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1): 38-46.