

重载足式机器人变缩放比例腿设计

索喆 李想 刘建峰 王继新*

吉林大学机械与航空航天工程学院, 长春, 130025

摘要:分析了二自由度比例缩放机构的运动特性,对比了多种变缩放比例设计方案及其优缺点,提出了一种变缩放比例腿,设计了非线性腿长调整机构,仅用一个驱动器即可实现大腿杆和小腿杆的长度按照非线性比例关系进行调整,进而在保证缩放特性的同时实现了缩放比例的调整。变缩放比例腿无需进行拆卸和更换零部件即可完成缩放比例的调整,改变了足端运动空间和机器人的承载能力。

关键词:重载足式机器人;腿足行走装置;变缩放比例腿;非线性长度调整机构

中图分类号: TP242

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of Scale-changeable Pantograph Legs for Heavy-duty Robots

SUO Zhe LI Xiang LIU Jianfeng WANG Jixin*

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun, 130025

Abstract: The motion characteristics of the 2 DOF (degree-of-freedom) scale-changeable pantograph leg mechanisms were analyzed, different designs for scale change were compared. A scale-changeable pantograph leg with a nonlinear length adjustment mechanisms was proposed. The length of the thigh and shank link could be adjusted with a single driver according to the nonlinear proportion relation. Thus, the scale could be changed while preserving the pantograph mechanism properties. The scale-changeable pantograph leg may change the scale without disassembling, adjust the foot working space and the carrying capacity of the robots.

Key words: heavy-duty legged robot; legged locomotion device; scale-changeable pantograph leg; nonlinear length adjustment mechanism

0 引言

足式机器人适合在地形崎岖、环境复杂的条件下作业,在抢险救灾、山地运输、森林消防、军事作战等领域中发挥着重要作用^[1]。闭链连杆机构腿具有驱动数目少、结构刚度高以及负载大的优势,常被应用于重载足式机器人^[2-3],同时,它也存在足端可达空间有限和步行模式单一的缺陷,尤其是采用 Chebyshev 机构、Jansen 机构等单自由度闭链连杆机构的腿部构型。为了提高足式机器人的地形适应性,研究人员通过增加调整环节来改变闭链连杆机构的运动特性。王森等^[4]提出一种新型的可调整闭链腿部机构,在 Klann 六杆机构的基础上增加一个可调整其机架铰链位置的自由度,获得足端轨迹的连续性变化,并改变抬腿高度以增强越障能力。WU 等^[5-6]为了提高单自由度腿机构对未知地形的适应性,同时保持其控制简单、节能和整体刚度的优势,提出了具有可变拓扑结构的闭环机构作为单腿,在 Watt-I 型腿部机构的基础上增加一个杆长调节自由度,调整单

自由度腿机构足端轨迹,实现越障能力的提升。ZHANG 等^[7]在凸轮驱动的单自由度比例缩放腿机构上,通过调整凸轮机构的倾斜角和比例缩放腿机构的铰点位置实现了两种足端轨迹配置和足端轨迹的俯仰,从而实现攀爬楼梯动作。NAN-SAI 等^[8]为了克服 Jansen 连杆平面腿机构只能遵循一种足端轨迹且运动能力有限的问题,通过增加 4 个调整杆长的滑块机构产生多种足端轨迹,使得该机构在保持机械简单性的同时提高了地形适应性。SHEBA 等^[9-10]提出了一种新型可重构 Klann 机构,通过改变腿连杆的长度比产生多种有用的足端轨迹,使得单自由度可重构机器人在粗糙和不规则的地形上具有良好的运动性能,且控制方案简单。

本文在二自由度比例缩放腿机构的基础上设计了比例调整环节,使得重载足式机器人具备多种行走模式,在空载或轻载工况下能够高抬腿、大跨度迈步快速行走,在重载工况下能够低抬腿、小跨度迈步稳健行走。

1 构型方案设计

1.1 比例缩放腿机构原理

比例缩放腿机构足端水平和竖直方向运动分

收稿日期:2024-03-18

基金项目:国家自然科学基金(52272434);吉林大学研究生创新基金(2024CX086)

别由独立的驱动器控制,相比于开链式串联腿部机构,具有足端水平和竖直运动解耦的优点^[11-12]。

比例缩放腿机构如图 1 所示,图中铰点 A 与竖直驱动器铰接,铰点 B 与水平驱动器铰接,C 点为足端位置。杆 AE 对应大腿杆,杆 CE 对应小腿杆,铰点 B、D、E 和 F 构成平行四边形,C 点在 A 与 B 连线的延长线上,各段长度比例关系为

$$\frac{l_{DE}}{l_{AD}} = \frac{l_{CF}}{l_{EF}} = \frac{l_{BC}}{l_{AB}} = k \quad (1)$$

式中:k 为缩放比。

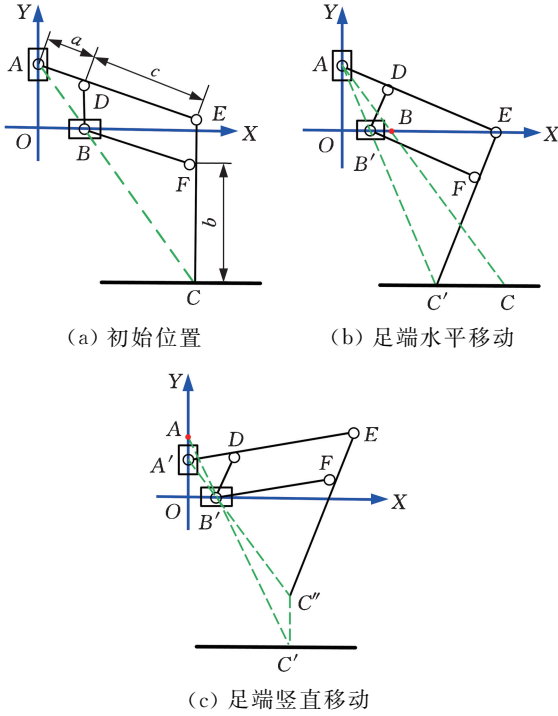


图 1 比例缩放腿机构几何关系示意图

Fig.1 Geometric relation of pantograph leg mechanism

两自由度比例缩放腿机构的驱动为铰点 A 沿着竖直 Y 方向的移动以及铰点 B 沿着水平 X 方向的移动。足端 C 点沿水平 X 方向移动距离与关节 B 移动距离之比为 k + 1,即图 1b 中的 CC' 距离与 BB' 距离之比等于 k + 1,即

$$\frac{l_{CC'}}{l_{BB'}} = k + 1 \quad (2)$$

足端 C 点沿竖直 Y 方向移动距离与关节 A 移动距离之比为 k,即图 1c 中的 C'C'' 距离与 AA' 距离之比等于缩放比 k,即

$$\frac{l_{C'C''}}{l_{AA'}} = k \quad (3)$$

关节 B 沿 X 方向的载荷与足端 C 点沿 X 方向的载荷之比为 k + 1,关节 A 沿 Y 方向的载荷与足端 C 点沿 Y 方向的载荷之比为 k。

比例缩放腿机构可在驱动关节行程和承载能力不变的情况下,通过改变缩放比来调整足端运动范围和负载能力。

1.2 变缩放比例方案

根据比例缩放腿机构的几何关系,要想保持驱动解耦特性的同时改变缩放比例,需满足以下两个条件:① 铰点 B、D、E 和 F 连线始终为平行四边形;② 足端 C 点始终在驱动关节 A 与驱动关节 B 连线的延长线上。图 2 列出了几种可实现缩放比例调整的方案。

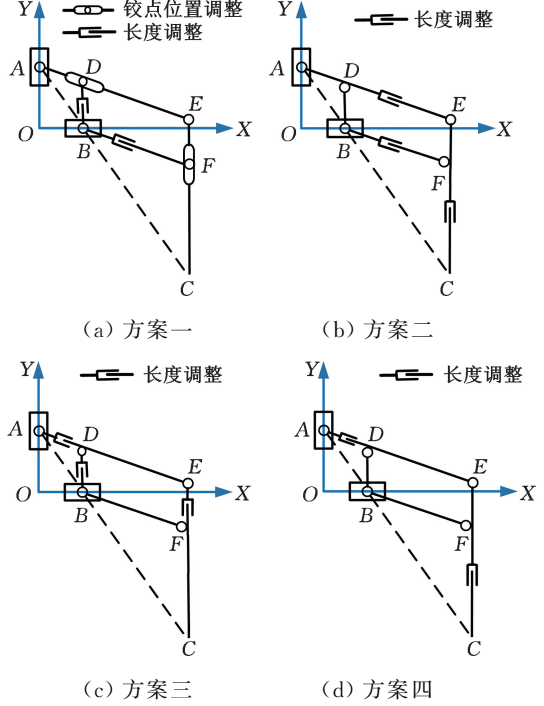


图 2 变缩放比例方案

Fig.2 Scale-changeable scheme

方案一需要调整 BD 段和 BF 段长度,同时改变铰点 D 和铰点 F 的位置。该方案需要增加 4 个调整机构,调整机构之间需要协调控制,保持 BD 段与 EF 段长度相等,BF 段与 DE 段长度相等,以满足条件 ①,AD 段与 BD 段长度之比不变,以满足条件 ②,同时铰点位置调整后还需要考虑铰点的固定。该方案需要的调整机构复杂,调整过程控制难度大。

方案二需要调整 DE、BF 和 CF 段的长度,调整机构之间需要协调控制,保持 DE 和 BF 段长度始终相等,以满足条件 ①,DE 段和 CF 段长度之比不变,以满足条件 ②。该方案需要增加 3 个调整机构,而且调整机构位置靠近足端,调整机构质量对整个腿部惯量的影响较大,会增加行走控制难度和能耗。

方案三需要调整 AD、BD 和 EF 段的长度,调整机构之间需协调控制,保持 BD 和 EF 段长度始终相等以满足条件 ①,AD、BD 段长度之比不变以满足条件 ②。该方案同样需增加 3 个调整机构,相比方案二,调整机构更靠近机体,调整机构

的质量对整个腿部惯量的影响较小。

方案四需要调整 AD 和 CF 段的长度, 铰点 B、D、E 和 F 始终为平行四边形未发生变化, 即始终满足条件 ①, 调整机构之间只需协调控制保持 AD 段和 CF 段长度成反比, 以满足条件 ②。该方案需要增加两个调整机构, AD 段上的调整机构靠近机体, 对摆动惯量的影响较小, 但 CF 段靠近足端, 增加调整机构对腿部惯量的影响较大。

多足机器人单腿数量多, 增加调整机构会带来驱动器数量的大量增加。此外, 调整机构驱动器布置在单腿的杆件上, 承力情况复杂, 且增加了腿部质量。因此, 应尽量减少调整机构驱动器的数量, 尽量将调整机构设置在靠近机体的位置。

2 详细设计

本文根据方案四, 在 AD 段增加一个带有驱动的调整机构来调整 AD 段的长度, 设计非线性腿长调整机构, 由 AD 段长度的变化通过传动机构来调整 CF 段的长度。该方案通过控制一个驱动器即可完成缩放比例的调整, 控制简单且对腿部惯量的影响较小。

2.1 整体结构设计

比例缩放腿由大腿杆、小腿杆、长连杆和短连杆组成, 本文在比例缩放腿的基础上将大腿杆和小腿杆设计为上下两段, 增加了改变大腿杆和小腿杆长度的调整机构, 设计了变缩放比例腿, 如图 3 所示。大腿杆和小腿杆装配图如图 4 所示, 二者上下两段之间均采用螺纹结构连接, 具有较好的承载能力, 同时使得调整机构只需要克服零部件之间的摩擦力, 不用承担大载荷, 从而减小了调整机构零部件和驱动器的结构尺寸, 使得调整机构

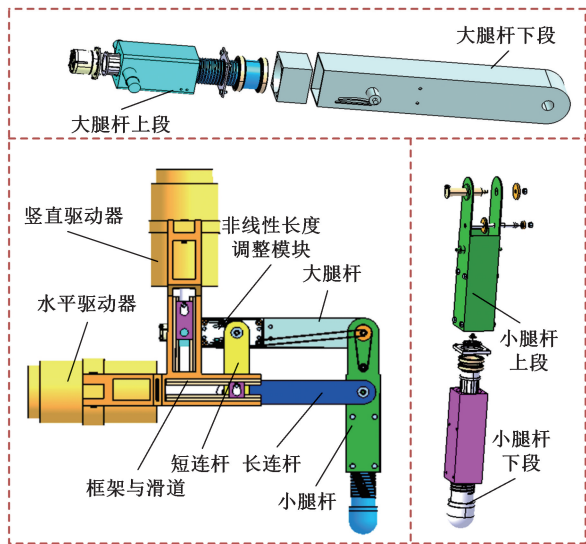
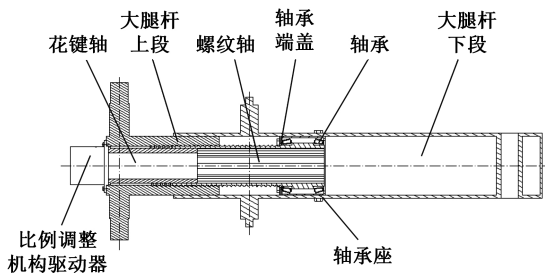


图 3 整体结构示意图

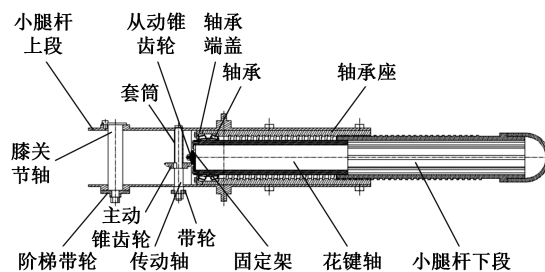
Fig.3 Schematic diagram of the overall structure

便于安装, 且对腿部惯量的影响较小。

大腿杆结构如图 4a 所示, 比例调整机构驱动器电机驱动花键轴和螺纹轴转动, 使得大腿杆下段沿着螺纹轴的轴线移动, 从而改变大腿杆的长度。非线性腿长调整模块结构如图 5 所示, 固定板通过螺钉与大腿杆上段连接, 保持不动, 安装板通过螺钉固定在大腿杆侧面, 跟随大腿杆下段移动。上下两组压板通过螺栓分别将同步带压紧在固定板和浮动板的异形轴上, 两组压板左侧的同步带长度始终保持不变, 两组压板右侧的同步带长度也同样保持不变。安装板牵引同步带移动, 同步带牵引带轮、阶梯带轮和浮动板移动, 安装板和浮动板移动时导轮轴沿着调整槽移动。小腿杆结构如图 4b 所示, 阶梯带轮的转动通过大腿杆同步带和小腿杆同步带驱使小腿杆的锥齿轮组转动, 进而带动花键轴和小腿杆下段转动, 使得小腿杆下段沿轴线移动, 从而改变小腿杆的长度。变缩放比例腿详细结构见文献[13]。



(a) 大腿杆装配图



(b) 小腿杆装配图

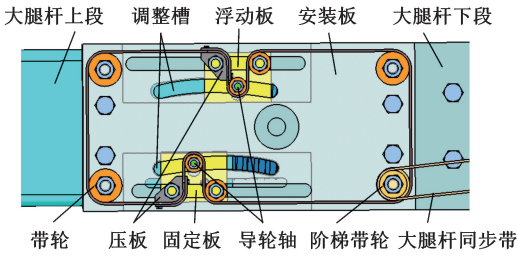
图 4 大腿杆和小腿杆装配图

Fig.4 Assembly drawing of thigh and shank link

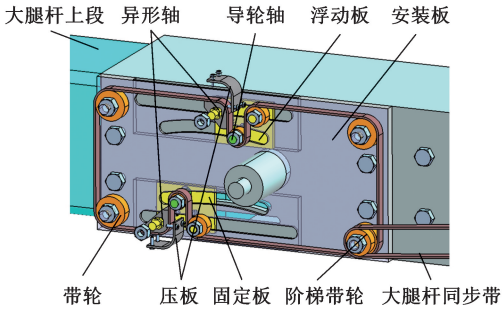
2.2 非线性腿长调整模块原理

本文采用同步带和导向槽相结合的方式设计了非线性腿长调整模块。大腿杆长度由比例调整机构驱动器直接控制, 小腿杆长度由比例调整机构驱动器经过非线性腿长调整模块和定比例放大环节进行调整, 如图 6 所示。设图 6 中的 AD 段杆长为 a , 初始长度 a_0 为 AD 段最短状态, AD 段长度最长为 a_1 。设 CF 段杆长为 b , 初始长度 b_0 为 CF 段最长状态, CF 段长度最短为 b_1 。

AD 段杆长和 CF 段杆长关系如图 7 中曲线 S



(a) 非线性腿长调整模块结构正视图



(b) 非线性腿长调整模块结构轴测图

图 5 非线性腿长调整模块结构示意图

Fig.5 Diagram of nonlinear length adjustment module

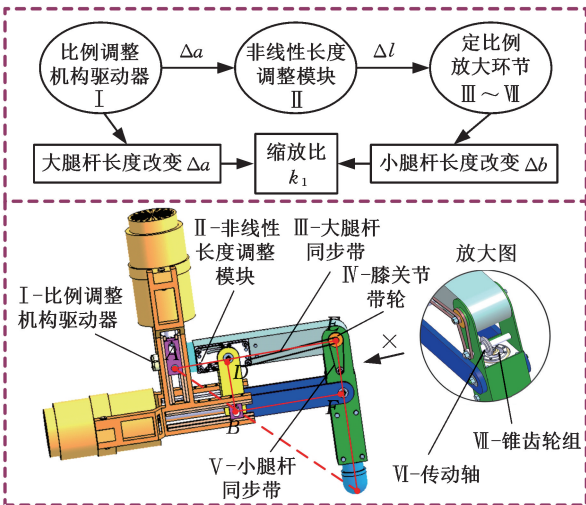


图 6 非线性腿长调整路线图

Fig.6 Nonlinear length adjustment route map

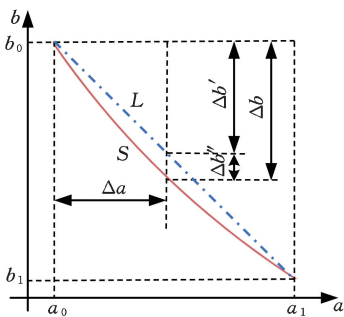


图 7 杆长调整关系示意图

Fig.7 Link length adjustment relationship diagram

所示,曲线 S 的表达式为

$$b_s = a_0 b_0 / a \quad (4)$$

当 AD 段杆长由初始长度 a_0 增加 Δa 时,CF 段杆长由 b_0 减小了 Δb , Δb 与 Δa 的关系为

$$\Delta b = b_0 - \frac{a_0 b_0}{a} = b_0 - \frac{a_0 b_0}{a_0 + \Delta a} \quad (5)$$

过点 (a_0, b_0) 和 (a_1, b_1) 作直线 L,表达式为

$$b_L = b_0 + \frac{b_0 - b_1}{a_0 - a_1}(a - a_0) = b_0 + \frac{b_0 - b_1}{a_0 - a_1}\Delta a \quad (6)$$

Δb 可分为 $\Delta b'$ 和 $\Delta b''$ 两段,其中, $\Delta b'$ 与 Δa 成线性关系, $\Delta b'$ 与 Δa 的关系为

$$\Delta b' = b_0 - b_L = \frac{b_0 - b_1}{a_1 - a_0}\Delta a \quad (7)$$

$\Delta b''$ 与 Δa 成非线性关系, $\Delta b''$ 与 Δa 的关系为

$$\Delta b'' = \Delta b - \Delta b' = b_0 - \frac{a_0 b_0}{a_0 + \Delta a} - \frac{b_0 - b_1}{a_1 - a_0}\Delta a \quad (8)$$

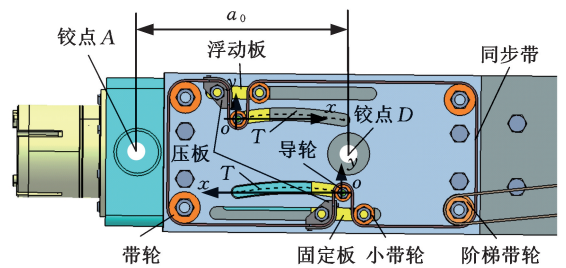
$\Delta b''$ 需要通过调整槽实现,调整槽的形状如图 8 所示,以 AD 段为初始长度时导轮轴的中心为原点,建立图 8 所示的坐标系,设调整槽中心曲线 T 的表达式为

$$y = \frac{1}{2}(b_0 - \frac{a_0 b_0}{a_0 + x} - \frac{b_0 - b_1}{a_1 - a_0}x) \frac{a_1 - a_0}{b_0 - b_1} \quad (9)$$

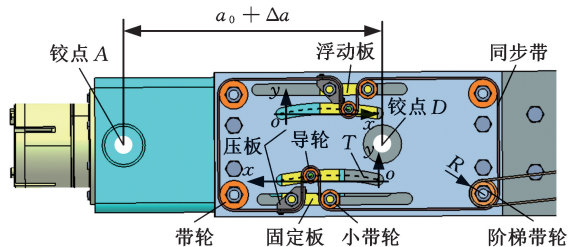
当 AD 段长度由 a_0 增加 Δa 时,导轮轴沿着 y 轴移动的距离 t 为

$$t = \frac{1}{2}\Delta b'' \frac{a_1 - a_0}{b_0 - b_1} \quad (10)$$

如图 8 和图 9 所示,当 AD 段长度由 a_0 增加 Δa 时,两组压板左侧 l_0 长度减小 Δa , l_1 增加 Δa ,即两组压板左侧同步带经过带轮的移动量为 Δa 。两组压板右侧 l_2 长度增加 Δa ,固定板上导轮轴在调整槽限制下沿 y 轴移动距离 t, l_3 减小 Δa ,浮动板上导轮轴同样在调整槽限制下沿 y 轴移动距离 t,即两组压板右侧同步带经过阶梯带轮的移动量 Δl 为



(a)AD 段初始长度状态示意图



(b)AD 段长度增加 Δa 后状态示意图

图 8 非线性腿长调整模块不同状态
Fig.8 Nonlinear length adjustment module in different states

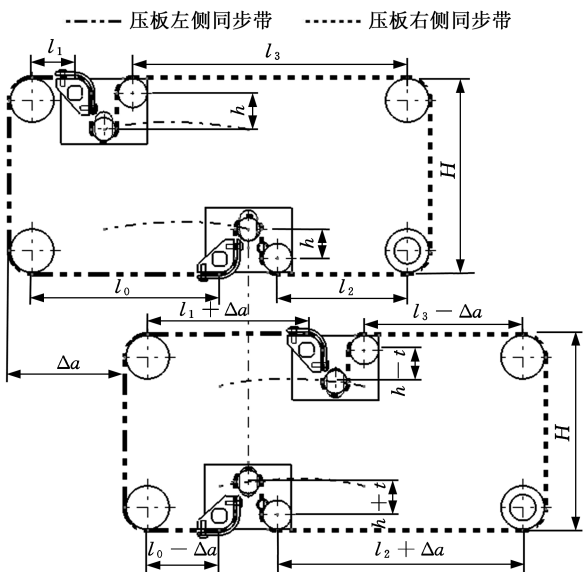


图 9 同步带移动量示意图

Fig.9 Synchronization belt movement diagram

$$\Delta l = \Delta a + 2t = \Delta a + \Delta b'' \frac{a_1 - a_0}{b_0 - b_1} \quad (11)$$

将式(8)代入式(11),得

$$\Delta l = (b_0 - \frac{a_0 b_0}{a_0 + \Delta a}) \frac{a_1 - a_0}{b_0 - b_1} \quad (12)$$

设阶梯带轮与同步带配合部分半径为 R , 阶梯带轮转动的角度 θ 为

$$\theta = \frac{\Delta l}{R} = \frac{1}{R} (b_0 - \frac{a_0 b_0}{a_0 + \Delta a}) \frac{a_1 - a_0}{b_0 - b_1} \quad (13)$$

AD 段长度增加时, 两组压板右侧同步带拉动浮动板运动; 当 AD 段长度减小时, 两组压板左侧同步带拉动浮动板运动。

由图 9 所示几何关系可知, 浮动板的移动量能使同步带始终处于张紧状态, 从而保障固定板右侧同步带的移动量能够全部传递给阶梯带轮, 阶梯带轮的转动量仅与 AD 段长度增加量 Δa 相关。

非线性腿长调整模块上阶梯带轮的转动经同步带和锥齿轮传动带动小腿杆上的花键轴转动, 令阶梯带轮至小腿杆下段之间的传动比为 i , 阶梯带轮转动的角度 θ 通过带传动和齿轮传动放大 i 倍之后, 小腿杆下段的转动角度 β 为

$$\beta = \theta i = \frac{i}{R} (\Delta a + \Delta b'' \frac{a_1 - a_0}{b_0 - b_1}) \quad (14)$$

设小腿杆上段和小段之间配合的螺纹导程为 P , 则小腿杆下段移动距离 l_4 为

$$l_4 = \beta P = \frac{iP}{R} (\Delta a + \Delta b'' \frac{a_1 - a_0}{b_0 - b_1}) \quad (15)$$

当半径 R 、传动比 i 和螺纹导程 P 满足

$$\frac{iP}{R} = \frac{b_0 - b_1}{a_1 - a_0} \quad (16)$$

时, 由

$$l_4 = \frac{b_0 - b_1}{a_1 - a_0} \Delta a + \Delta b'' = \Delta b' + \Delta b'' = \Delta b \quad (17)$$

可得小腿杆下段移动距离为 Δb , 即 CF 段杆长减小 Δb 。此时, 比例缩放腿机构在保持驱动解耦特性的同时缩放比例由 k_0 减至 k_1 , 设 DE 段长度为 c , 则 k_0 和 k_1 的表达式分别为

$$k_0 = \frac{l_{DE}}{l_{AD}} = \frac{c}{a_0} \quad (18)$$

$$k_1 = \frac{l_{DE}}{l_{AD}} = \frac{c}{a_0 + \Delta a} \quad (19)$$

同理, 也可实现缩放比的增大。

3 不同缩放比例对比

采用变缩放比例腿的六足运载机器人整体布局如图 10 所示。图 11 是行走装置的缩放比例分别为 3.0、2.5 和 2.0 时的状态示意图。足式机器人在摆动相时腿部载荷较小, 故调整机构仅在摆动相时工作调整缩放比, 避免调整机构承受大载荷。

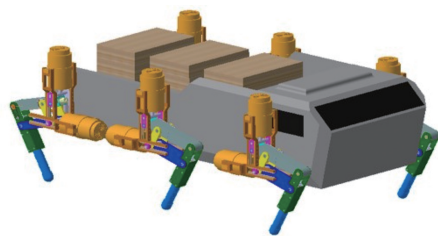


图 10 六足运载机器人整体布局

Fig.10 Overall layout of a heavy-duty legged robot

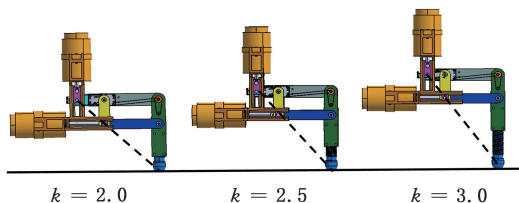


图 11 三种缩放比例状态示意图

Fig.11 Scale-changeable pantograph leg in three states

不同缩放比例足端运动空间对比如图 12 所示, 缩放比例越大, 足端运动空间越大, 图中 D_x 为水平驱动器的行程范围, D_y 为竖直驱动器的行程范围。驱动器行程范围不变的情况下, 缩放比例由 2.0 增加到 3.0 时, 足端水平运动范围增加约 33%, 足端竖直运动范围增加约 50%, 足端运动空间的增加可显著提高足式机器人的越障能力和地形适应性。

足端运动空间增加的同时, 腿的最大承载能力也相应减小。以缩放比为 2.0 时变缩放比例腿的运动范围和承载能力为基础, 随着缩放比的增加, 变缩放比例腿的性能变化如图 13 所示。缩放比由 2.0 增至 3.0 时, 足端水平方向承载能力减小约 25%, 足端竖直方向承载能力减小约 33%。因此, 变缩放比例腿在大负载时应尽量选择小的缩放比, 减小驱动器的负载, 负载较小时可选择较大

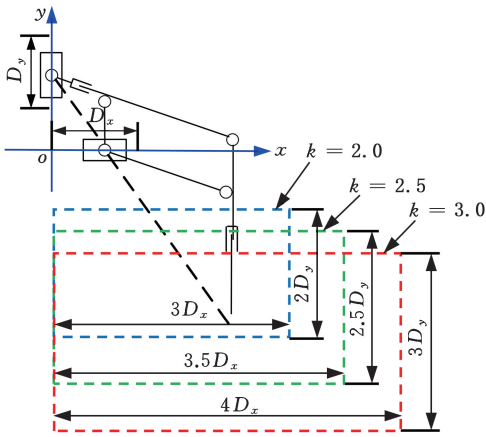


图12 不同缩放比例下足端运动范围对比

Fig.12 Comparison of motion range with different scales

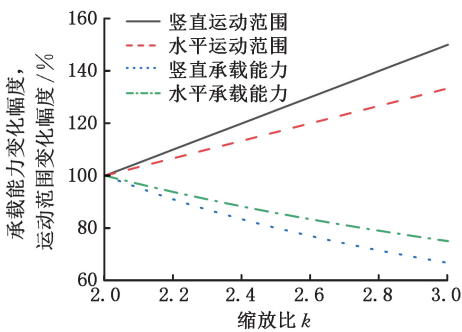


图13 缩放比例改变时变缩放比例腿性能变化

Fig.13 The performance of the scale-changeable pantograph leg in different ratio states

的缩放比,以提高行走效率。

4 结语

本文基于比例缩放腿机构设计了一种变缩放比例腿。通过理论推导证明了在保持机构解耦特性的同时实现缩放比例调整的可行性,对比了不同缩放比例的运动范围和负载能力,为后续重载足式机器人的研发奠定了基础。

参考文献:

- [1] HE Jun, GAO Feng. Mechanism, Actuation, Perception, and Control of Highly Dynamic Multi-legged Robots: a Review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1):79.
- [2] ZHUANG Hongchao, GAO Haibo, DENG Zongquan, et al. A Review of Heavy-duty Legged Robots[J]. Science China(Technological Sciences), 2014, 57(2):298-314.
- [3] WILCOX B H. ATHLETE: a Cargo-handling Vehicle for Solar System Exploration[C]// 2011 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2011:1-8.
- [4] 王森, 姚燕安, 武建响. 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.

- [5] WU Jianxu, YAO Yanan. Design and Analysis of a Novel Walking Vehicle Based on Leg Mechanism with Variable Topologies[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 128:663-681.
 - [6] 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.
 - [7] ZHANG Y, ARAKELIAN V, Le BARON J P. Design of a Legged Walking Robot with Adjustable Parameters [J]. Advances in Mechanism Design, 2017, 44:65-71.
 - [8] NANSAI S, ROJAS N, ELARA M R, et al. On a Jansen Leg with Multiple Gait Patterns for Reconfigurable Walking Platforms[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(3):1-18.
 - [9] SHEBA J K, ELARA M, MARTÍNEZ-GARCÍA E, et al. Trajectory Generation and Stability Analysis for Reconfigurable Klann Mechanism Based Walking Robot[J]. Robotics, 2016, 5(3):13.
 - [10] SHEBA J K, ELARA M R, MARTÍNEZ-GARCÍA E, et al. Synthesizing Reconfigurable Foot Traces Using a Klann Mechanism[J]. Robotics, 2017, 35(1):189-205.
 - [11] GUO Wei, CAI Changrong, LI Mantian, et al. A Parallel Actuated Pantograph Leg for High-speed Locomotion[J]. Journal of Bionic Engineering, 2017, 14(2):202-217.
 - [12] SONG S, WALDRON K J. Machines that Walk: the Adaptive Suspension Vehicle[M]. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1989.
 - [13] 王继新, 索喆, 李想. 一种可变缩放比例的腿足行走装置及缩放比例变换方法:CN116513337A[P]. 2023-08-01.
- WANG Jixin, SUO Zhe, LI Xiang. A Scale-changeable Pantograph Leg and Scale Ratio Transformation Method: CN116513337A [P]. 2023-08-01.

(编辑 陈 勇)

作者简介:索 喆,男,1997年生,博士研究生。研究方向为足式机器人。王继新*(通信作者),男,1975年生,教授、博士生导师。研究方向为智能机械系统设计等。E-mail: jxwang@jlu.edu.cn.

本文引用格式:

索喆,李想,刘建峰,等.重载足式机器人变缩放比例腿设计[J].中国机械工程,2025,36(2):191-196.
SUO Zhe, LI Xiang, LIU Jianfeng, et al. Design of Scale-changeable Pantograph Leg for Heavy-duty Robots[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2):191-196.