[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.01.006

轮腿可变式移动机器人的结构设计

谢 天,张守京*,丁冬冬,杨文彬

(西安工程大学 机电工程学院,陕西西安 710048)

摘 要:针对移动机器人在复杂多变环境下执行搜救侦察任务时机动性、越障性存在的不足,课题组提出了一种新型轮腿可变式移动机器人的设计方案。课题组通过对变径机构的设计使得机器人可以实现轮式和轮腿式2种工作模式的自如变换;采用修正的Kutzbach-Grubler公式对变径机构自由度进行了分析;利用速度瞬心法对移动机器人以轮式模式工作时进行运动学求解;利用拉格朗日法建立了移动机器人的动力学模型;最后通过 ADAMS 软件对移动机器人进行仿真实验分析。研究结果表明:该机器人整机结构设计合理,运动平稳,具有较强的机动性与地形适应性。该研究弥补了单一运动模式的机器人在地形适应能力上的不足。

关 键 词:移动机器人;变径机构;轮腿可变式;Kutzbach-Grubler 公式;速度瞬心法
 中图分类号:TP242;TH112
 文献标志码:A
 文章编号:1005-2895(2023)01-0035-07

Structural Design of Wheel-Legged Variable Mobile Robot

XIE Tian, ZHANG Shoujing*, DING Dongdong, YANG Wenbin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of mobile robot's mobility and obstacle surmount when performing search and reconnaissance tasks in complex and changeable environment, a new design scheme of wheel-legged variable mobile robot was proposed. Firstly, by designing the variable-diameter mechanism, the free transformation of wheel mode and wheel-legged mode was realized. Secondly, the modified Kutzbach-Grubler formula was used to analyze the degree of freedom of the variable-diameter mechanism. Then the kinematic analysis of the mobile robot working in wheel mode was elaborated by using the velocity instantaneous center method, the dynamics model of mobile robot was established by Lagrange method. Finally, ADAMS software was used to analyze the simulation experiment of mobile robot. The results show that the robot has reasonable structure design, smooth movement, strong maneuverability and terrain adaptability. This research makes up for the lack of terrain adaptability of single motion mode robot.

Keywords: mobile robot; variable-diameter mechanism; wheel-legged variable type; Kutzbach-Grubler formula; velocity instantaneous center method

移动机器人可以代替人类执行灾后搜救、军事侦察等特殊任务^[14],特别是在危险复杂的工作环境中展现出极大的优势^[5-7],这使得移动机器人的研究备受关注。

多运动复合式移动机器人的移动性能突出且环境 适应能力强^[8-10],典型代表有 Yoshioka 等^[11]研制了一 款轮腿混合式 6 足机器人,结合了轮式机器人的稳定 性和机动性与腿式机器人的爬障能力。Ding 等^[12]提 出了一种机动性强的轮式移动机器人,可实现平地行 走和垂直爬行。Altendorfer 等^[13]设计了一种新型仿生 6 足机器人,可以完成行走和奔跑的工作,具有极高的 机动性与稳定性。Bai 等^[14]基于折纸机构设计了一种

收稿日期:2022-07-04;修回日期:2022-10-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB1707205)。

第一作者简介:谢天(1994),男,湖北天门人,硕士研究生,主要研究方向为机器人结构设计。通信作者:张守京(1976),男,辽 宁葫芦岛人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为智能制造技术及系统、智慧物流与柔性生产调度。E-mail: zhangshoujing@ xpu. edu. cn

新型的轮腿可变形移动机器人,可根据地形主动触发 模式变换,实现平地行走和崎岖地形越障。Wu 等^[15] 提出了一种新型的8足机器人移动平台,机器人具有 行走模式和爬行模式2种工作形态,能够更好地适应 非结构化地形。Birglen 等^[16]设计了一款新型4足步 行机器人,可以高效稳定地攀爬楼梯台阶等复杂地形。 Chen 等^[17]提出了一种具有转换机构的轮腿式 4 足机 器人,可以克服室内环境中遇到的各种尺寸的台阶和 楼梯。李智卿等^[18]提出了一种对地形适应能力较强 的轮履混合移动机器人,在面对复杂多变地形时可通 过模式变换完成作业任务。甄伟鲲等^[19]研制了一种 具有可变形腰部的4足机器人,可以实现摆动直线行 走和原地转弯,在面对极端地形时具有较强的适应性。 郑辉等^[20]提出了一种轮腿式爬行机器人的设计方案, 机器人具有爬行和滚动行走2种工作模式。以上所提 及的机构都显著提高了移动机器人的越障能力,伴随

着越障能力以及地形适应性的提高,机器人运动效率 低下、运动稳定性差等一系列问题也亟待解决。

课题组提出一种轮腿可变式移动机器人的设计方 案,可以通过变径机构实现轮式与轮腿式的切换,使其 既具备了轮式机器人机动性强,运动平稳的特点,也同 时具备了腿式机器人越障性强的特点。

1 移动机器人的机械结构设计

1.1 整体结构设计

轮腿可变式移动机器人的总体结构如图 1 所示, 车身为矩形,搭载有直流伺服电机,整机由 2 个直流电 机负责提供动力(包括差速转向和行进功能),由另外 2 个电机负责变径轮的变径功能,驱动和变径独立进 行,互不干涉,互不影响。如图 1 所示,机构整体呈对 称状态,具备轮式和轮腿式 2 种工作模式。变径机构 在电机作用下完成模式切换过程,使机构针对不同地 形环境实现行走、转向和越障等功能。





如图 2 所示,该变径机构包含 3 组相同的弧形腿。 轮式模式时弧形腿与滑块附着于轮毂内,适用于平整 单一的地形环境;轮腿式模式时,在电机的作用下圆轮 上的弧形腿伸展开来转换为 3 辐条状,适用于非结构 化的复杂地形。r,r'分别为 2 种工作模式下的车轮半 径。弧形腿上附着有橡胶,增大了车轮与地面的摩擦, 提高了运动平稳性。

机器人处于平整单一的地形环境时,在直流电机 的作用下以轮式模式进行运动;机器人处于复杂多变 的地形环境时,电机带动变形齿轮转动,使曲柄旋转最 终将变形力传递到弧形腿上,机器人由轮式模式切换 为轮腿式模式。移动机器人在变径机构的作用下可以



留之 文任中におわれ 息音 Figure 2 Schematic diagram of variable diameter wheel structure

根据不同的地形环境自由地切换工作模式,从而使得 机器人的环境适应能力得到提高。

1.2 自由度分析

自由度主要是用来判断机构有无确定的运动,或 者是有无唯一的运动轨迹。变径轮由3组相同的平面 连杆机构组成,由修正的 Kutzbach- Grubler 准则,自 由度

$$F = 3N - 2P_1 - P_{\rm h\,\circ} \tag{1}$$

式中:F为自由度,N为活动构件数, P_1 为低副数, P_h 为高副数。

由公式(1)可求得,该机构的自由度为1,所以该 变径轮机构可以完成唯一且确定的运动,即轮式模式 和轮腿式模式的变换动作。

2 运动学分析

当机器人处于平坦路面上会采用轮式模式行进, 此时机器人具备轮式移动机器人高效的运动性能。在 这种情况下,以传统轮式机器人的分析方法为基础,将 机器人运动模型置于二维平面上,对机器人的运动学 模型进行求解,可得可变径轮腿式机器人在轮式模式 下的运动规律。

如图 3 所示,移动机器人在平整单一化的路面运 动时,主要研究其在 XOY 平面内的运动状态,OXY 为 大地坐标系, $O_Q X_Q Y_Q$ 为移动机器人局部坐标系。设机 器人左轮线速度为 V_1 ;右轮线速度为 V_2 ; V_Q 为中点 Q的线速度;T为左右车轮的距离; O_1 为移动机器人的旋 转中心; ω_1 , ω_2 分别为移动机器人的左右轮角速度;L为移动机器人绕点 O_1 的转弯半径; Ψ 为移动机器人运 动的方向角度; Ψ' 为移动机器人运动的方向角速度; x'_Q 为移动机器人中点 Q 在 x 方向的线速度; y'_Q 为移 动机器人中点 Q 在 y 方向的线速度;r 为移动机器人

2.1 机器人正运动学

对移动机器人整机状态下的运动学分析时,可将 其看作一个整体的刚性构件,移动机器人的运动学方 程为:

$$V_{1} = V_{Q} + \frac{T}{2}\Psi' = \omega_{1}r;$$

$$V_{2} = V_{Q} - \frac{T}{2}\Psi' = \omega_{2}r_{o}$$

$$(2)$$





求解式(2)可得:

$$\Psi' = (V_2 - V_1)/T; V_0 = (V_2 + V_1)/2_{\circ}$$
(3)

在同一瞬时时刻时移动机器人车身上任何一点的 角速度是相等的,所以其Q点的瞬时角速度为:

$$\omega_{Q} = (V_{2} - V_{1}) / T_{\circ}$$
(4)

可求得移动机器人左、右轮的瞬时角速度分别为:

$$\omega_1 = 2V_1 / (2L - T); \omega_2 = 2V_2 / (2L + T)$$
(5)

联立式(4)和式(5)可得移动机器人的转弯半 径为:

$$L = \frac{T(V_1 + V_2)}{2(V_2 - V_1)}^{\circ}$$
(6)

又因为移动机器人中点 Q 在 X 和 Y 方向的线速 度可以表示为:

$$\begin{cases} x'_{\varrho} = V_{\varrho} \cos \Psi; \\ y'_{\varrho} = V_{\varrho} \sin \Psi_{\circ} \end{cases}$$

$$(7)$$

联立式(3)和式(7)可得在大地坐标系下轮式模式移动机器人整体的运动学模型为:

$$\begin{bmatrix} x'_{\varrho} \\ y'_{\varrho} \\ \psi' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \Psi & \frac{r}{2} \cos \Psi \\ \frac{r}{2} \sin \Psi & \frac{r}{2} \sin \Psi \\ -r/T & r/T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}_{\circ}$$
(8)

轮式模式下移动机器人在任意时刻的位姿及运动

状态可以采用微分法进行描述,可表示为:

$$p' = J(p)q'_{\circ} \qquad (9)$$

$$p' = \begin{bmatrix} x'_{\varrho} & y'_{\varrho} & \Psi' \end{bmatrix}^{\mathrm{T}};$$

$$J(p) = \begin{bmatrix} \frac{r}{2}\cos\Psi & \frac{r}{2}\cos\Psi \\ \frac{r}{2}\sin\Psi & \frac{r}{2}\sin\Psi \\ -r/T & r/T \end{bmatrix};$$

$$q' = \begin{bmatrix} \omega_{1} \\ \omega_{2} \end{bmatrix}_{\circ} \qquad (10)$$

式中:p'为机器人速度,J(p)为机器人运动学雅可比 矩阵,q'为机器人线速度。

2.2 机器人逆运动学

根据方程(9),q'的解为:

$$\boldsymbol{q'} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{p})^{-} \boldsymbol{p'}_{\circ} \qquad (11)$$

式中, $J(p)^{-}$ 为J(p)的广义逆矩阵。

根据式(7)可知:

$$V_{Q} = x'_{Q} \cos \Psi + y'_{Q} \sin \Psi_{\circ}$$
(12)

联立式(2)和式(12)能够得到:

$$r\omega_1 = x'_{\varrho} \cos \Psi + y'_{\varrho} \sin \Psi + \frac{T}{2} \Psi'; \qquad (13)$$

$$r\omega_2 = x'_{\varrho} \cos \Psi + y'_{\varrho} \sin \Psi - \frac{T}{2} \Psi'_{\circ} \qquad (14)$$

以非线性方程组的形式表示式(13)和(14)可以 记作:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi & T/2 \\ \cos \Psi & \sin \Psi & -T/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_{\varrho} \\ y'_{\varrho} \\ \Psi' \end{bmatrix}, \quad (15)$$

或:

$$\boldsymbol{q'} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{p})^{-} \boldsymbol{p'}_{\circ} \qquad (16)$$

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{p})^{-} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \boldsymbol{\Psi} & \sin \boldsymbol{\Psi} & T/2 \\ \cos \boldsymbol{\Psi} & \sin \boldsymbol{\Psi} & -T/2 \end{bmatrix}_{\circ} \quad (17)$$

式(16)即为移动机器人的逆运动学表达式,为实 现机器人运动与位姿的稳定控制提供了理论依据。

由此可知移动机器人的运动状态和轨迹由 ω_1, ω_2 所影响决定,所以可以采用差速驱动的方案,实现其直线运动、圆弧运动和旋转运动。根据式(2)、式(3)、和

式(5)可以看出运动状态的3种情况分别为:

1) 当 $V_1 = V_2$ 时,即在 Δt 时间间隔内移动机器人 Q 点的速度 $V_Q = V_1 = V_2$, Q 点瞬时角速度为 0,移动机 器人此时做直线运动;

2) 当 $V_1 = -V_2$ 时,即在 Δt 时间间隔内移动机器人的左、右轮做速度相等的反向旋转,转弯半径 L = 0,移动机器人实现绕 Q 点做旋转运动;

3) 当 $|V_1| \neq |V_2|$ 时,即在 Δt 时间间隔内移动机器人的左、右轮速度不相等,此时移动机器人实现绕 Q点做半径相等的圆弧运动。

3 动力学分析

由式(7)化简可知移动机器人所受到的运动学约 束方程为:

$$x'\sin \Psi - y'\cos \Psi = 0_{\circ} \tag{18}$$

该约束方程为非完整约束,是移动机器人的非完 整约束系统。

以 Q 为参考点进行分析,移动机器人的位姿 p 和 移动机器人的速度 p'分别为:

$$\boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} x_Q & y_Q & \boldsymbol{\Psi}_Q \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}; \tag{19}$$

$$\boldsymbol{p'} = \begin{bmatrix} x'_{Q} & y'_{Q} & \boldsymbol{\Psi'}_{Q} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}_{\circ}$$
(20)

由式(18)整理可得移动机器人非完整约束为:

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{p})\boldsymbol{p}' = \begin{bmatrix} \sin \boldsymbol{\Psi} & -\cos \boldsymbol{\Psi} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \boldsymbol{\Psi}' \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{\circ} (21)$$

式中A(p)为运动约束方程中机器人速度的系数矩阵。

通过拉格朗日法对机器人整机的动力学模型进行 求解,其具体的函数是总动能 *E*_k和总势能 *E*_b做差:

$$L = E_{\rm k} - E_{\rm po} \qquad (22)$$

则其拉格朗日方程为:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{p}'} - \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{p}} = \boldsymbol{F}_{Q} + \boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{p}) \boldsymbol{\lambda}_{\circ}$$
(23)

式中: F_q 为相应于点 Q的广义力,M(p)为约束力, λ 为附加约束力,为了保证机器人 2 个移动轮不会产生 侧滑特意再加 1 个 λ 。

因为该移动机器人仅在平坦路面上运动,所以其 势能 *E*_p始终为一个常数,可以将其记作 *C*。另外可以 将移动机器人的转动惯量不予考虑,则该移动机器人 整机的拉格朗日函数可表示为:

$$L = E_{\rm k} - E_{\rm p} = \frac{1}{2}mx'_{Q}^{2} + \frac{1}{2}y'_{Q}^{2} + \frac{1}{2}I_{Q}\Psi'^{2} - C_{\circ} \quad (24)$$

式中:m为机器人的质量, I_Q 为绕Q点的转动惯量。

移动机器人整机在坐标系 Q 点处的广义等效力 向量为:

$$\boldsymbol{F}_{Q} = \begin{bmatrix} f_{Q_{x}} \\ f_{Q_{y}} \\ f_{Q_{y}} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \boldsymbol{\Psi} & \cos \boldsymbol{\Psi} \\ \sin \boldsymbol{\Psi} & \sin \boldsymbol{\Psi} \\ -l/2 & l/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{1} \\ \tau_{2} \end{bmatrix}_{\circ} \quad (25)$$

式中: *τ*₁和 *τ*₂分别为移动机器人左轮和右轮的驱动力 矩, *l*为2轮间距。

根据拉格朗日方程,联立式(21)和式(25)可以求 得移动机器人系统的动力学模型为:

$$mx''_{Q} - \frac{\tau_{1} + \tau_{2}}{r} \cos \Psi - \lambda \sin \Psi = 0;$$

$$my''_{Q} - \frac{\tau_{1} + \tau_{2}}{r} \sin \Psi + \lambda \cos \Psi = 0;$$

$$I_{Q}\Psi'' - \frac{(\tau_{2} - \tau_{1})l}{2r} = 0_{\circ}$$

$$(26)$$

由式(26)可得:

$$\lambda = m x''_0 \sin \Psi - m y''_0 \cos \Psi_0 \tag{27}$$

$$\lambda = -m(x_Q \cos \Psi + y_Q \sin \Psi) \Psi_o \qquad (28)$$

具有 n 维广义坐标 p 的移动机器人整机在非完整 约束条件下,由非完整约束的广义力学系统来描述,其 表达式为:

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{p})\boldsymbol{p}'' + \boldsymbol{D}(\boldsymbol{p},\boldsymbol{p}')\boldsymbol{p}' + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{p}) + \boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{p})\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{E}\boldsymbol{\tau}_{\circ}$$
(29)

式中:B(p)为系统正定惯性矩阵,D(p,p')p'为系统与 位置和速度有关的离心力和哥氏向心力矩阵,G(p)为 重力矢量, 7 为不考虑摩擦时左右2 轮施加的合力矩, E 为非奇异变换矩阵。

移动机器人在水平面运动时将其他对系统有影响的因素全部忽略不及,即有重力、摩擦阻力等因素,所以 D(p,p')p'与 G(p)项都等于0,则式(29)可以简化为:

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{p})\boldsymbol{p}'' + \boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{p})\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{E}\boldsymbol{\tau}_{\circ} \qquad (30)$$

$$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{p}) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_Q \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \Psi & \cos \Psi \\ \sin \Psi & \sin \Psi \\ -l/2 & l/2 \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}_{\circ}$$
(31)

所以式(30)即为以 Q 为参考点移动机器人的无 约束动力学模型。

4 基于 ADAMS 的运动仿真

4.1 机器人平坦地面直行运动仿真

如图 4 所示,为移动机器人平坦地面直行过程质 心位移曲线图,从图中可以看出越障机器人在 X 方向 上直线行进了约 1.335 m,而在 Y 和 Z 这 2 个方向上 基本没有发生位移,即在运动过程中其质心基本未发 生左右偏移的现象。既验证了移动机器人处于轮式模 式时理论模型和结构设计的正确性与合理性,也反映 了当移动机器人以轮式模式直线运动时具有较好的稳 定性。



图 4 移动机器人直线运动过程质心位移曲线 Figure 4 Centroid displacement curves of mobile robot in linear motion

4.2 机器人"S"型转向运动仿真

移动机器人平坦地面"S"型转向运动过程主要分为2个阶段。第1阶段如图5(a)所示,在0~5s时, 左车轮线速度小于右车轮线速度,移动机器人以一定的半径进行右转运动,此时移动机器人也以一定的位移量向前方移动。第2阶段如图5(b)所示,此时左车轮线速度大于右车轮线速度,机器人则以相同的转弯 半径进行左转运动,同时机器人依旧以一定的位移量

其中

向前方移动。且图中曲线光滑,波动较小,体现了移动 机器人在做"S"型转向运动时稳定性较好,进一步反 映了移动机器人结构设计的正确性与合理性以及其运 动的灵活性。





4.3 机器人模式变换仿真

机器人模式变换过程仿真如图 6 所示。图 6(a) 所示为移动机器人轮式模式下的状态,即变径轮机构 模式变换的初始状态,两侧的变径轮均为轮毂触地,为 的是将整个移动机器人支撑在地面上。图 6(b)所示 为弧形腿开始接触地面,即为模式变换开始,此时移动 机器人两侧的弧形腿支撑在地面。图 6(c)所示为模 式变换的最终形态,即机器人的轮腿式模式,弧形腿完 全展开,越障性能大大提高。图 6(d)所示为移动机器 人从轮腿式模式又变换为轮式模式。

由图 7 可知在模式变换过程中,时间约为 2 s 时, 其质心高度会随着弧形腿展开而上升;时间约为 4.2 s 时,其质心高度达到最大值,即此时变径轮机构完全展 开,机器人已处于轮腿式模式;从峰值至最终时刻,其 质心高度逐渐下降,移动机器人从轮腿式模式恢复为 轮式模式。移动机器人质心波动曲线光滑且没有突变 点,波动最大幅值为 73.5 mm。



Figure 6 Schematic diagram of mode transformation of wheel-legged variable mobile robot



Figure 7 Height change curve of centroid during mode transformation

5 结论

课题组设计了一种新型的轮腿可变式移动机器 人,通过变径机构的设计,使得移动机器人能够完成轮 式模式和轮腿式模式2种工作模式的切换。通过对模 式变换原理的分析,证明了该机器人工作模式切换的 可行性。建立了移动机器人轮式模式下的运动学和动 力学模型,并通过 ADAMS 仿真软件,对移动机器人直 行、"S"型转向以及模式变换过程进行仿真实验了分 析,结果表明:移动机器人整机设计合理,具有结构紧 凑,运动平稳,地形适应能力强的特点。本研究为后续 移动机器人控制系统的设计提供了基础和参考。后续 可针对机器人智能传感器以及全自动控制进行研究, 以应用于灾难救援、情报侦察等各种复杂多变环境中。 参考文献:

- [1] 芦红利,闫娟.基于 RecurDyn 的 4 旋翼摆臂式清洗机器人设计
 [J].轻工机械,2021,39(4):39-43.
- [2] 王鹏,董人全,孙铁成,等.四足机器人爬行凸起上坡的运动仿真 研究[J].机电工程,2021,38(5):639-644.
- [3] XU Z Y, XIE Y, ZHANG K, et al. Design and optimization of a magnetic wheel for a grit-blasting robot for use on ship hulls [J]. Robotica, 2017, 35(3):718.
- [4] YAN C F, SUN Z G, ZHANG W Z, et al. Design of novel multidirectional magnetized permanent magnetic adsorption device for wall-climbing robots [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(7):871-878.
- [5] QIAO G F, SONG G M, ZHANG Y, et al. A wheel-legged robot with active waist joint: design, analysis, and experimental results [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 83(3): 492.
- [6] MESSURI D, KLEIN C. Automatic body regulation for maintaining stability of a legged vehicle during rough-terrain locomotion [J].
 IEEE Journal on Robotics and Automation, 1985, 1(3):132 - 141.
- [7] QU M, WANG H, RONG Y. Statics performance evaluating and optimal design of a parallel mechanical leg of the wheel-leg hybrid quadruped robot [J]. ICIC express letters: Part B, Applications: International Journal of Research and Surveys, 2017, 8(7):1041 – 1049.
- [8] 贾云博,许勇,杜静思,等.基于2UU-UPU并联机构的4足机器人设计[J].轻工机械,2022,40(1):28-33.
- [9] 张强强,许勇,赵传森,等.3支链6自由度并联机构运动学研究
 [J].轻工机械,2020,38(3):8-14.
- [10] 王晓磊,王雪涛,孙丹丹,等.一种新型轮腿四足机器人腿部机构

结构参数优化[J]. 机电工程,2022,39(4):547-553.

- [11] YOSHIOKA T, TAKUBO T, ARAI T, et al. Hybrid locomotion of legwheel ASTERISK H [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2008,20(3):403-412.
- [12] DING X L, LI K J, XU K. Dynamics and wheel's slip ratio of a wheel-legged robot in wheeled motion considering the change of height [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25 (5):1060-1067.
- [13] ALTENDORFER R, MOORE N, KOMSUOGLU H, et al. Rhex: A biologically inspired hexapod runner [J]. Autonomous Robots, 2001,11(3):207-213.
- [14] BAI L, GUAN J, CHEN X H, et al. An optional passive/active transformable wheel-legged mobility concept for search and rescue robots [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 107:145 – 155.
- [15] WU J X, YANG H, LI R M, et al. Design and analysis of a novel octopod platform with a reconfigurable trunk [J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 156:104134.
- [16] BIRGLEN L, RUELLA C. Analysis and optimization of one-degree of freedom robotic legs [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014,6(4):041004.
- [17] CHEN S C, HUANG K J, CHEN W H, et al. Quattroped: a legwheel transformable robot [J]. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, 2013, 19(2):730-742.
- [18] 李智卿,马书根,李斌,等.具有自适应能力轮—履复合变形移动 机器人的开发[J].机械工程学报,2011,47(5):1-10.
- [19] 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.
- [20] 郑辉,王敏,王新杰,等.轮腿混合式四足机器人设计及运动学分析[J].机械传动,2015,39(1):57-61.

(上接第34页)

- [5] KIM S, LASCHI C, TRIMMER B. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics [J]. Trends in Biotechnology, 2013, 31(5): 287-294.
- [6] GU G Y, ZOU J, ZHAO R K, et al. Soft wall-climbing robots [J]. Science Robotics, 2018, 3(25): eaat2874.
- [7] ZHANG W D, ZHANG W, SUN Z G. A reconfigurable soft wallclimbing robot actuated by electromagnet [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2021, 18(2):1-10.
- [8] SCHILLER L, SEIBEL A, SCHLATTMANN J. Toward a geckoinspired, climbing soft robot [J]. Frontiers in Neurorobot, 2019,

13:106.

- [9] LU T Q, SHI Z B, SHI Q, et al. Bioinspired bicipital muscle with fiber-constrained dielectric elastomer actuator [J]. Extreme Mechanics Letters, 2016, 6: 75-81.
- [10] LU T Q, HUANG J S, JORDI C, et al. Dielectric elastomer actuators under equal-biaxial forces, uniaxial forces, and uniaxial constraint of stiff fibers [J]. Soft Matter, 2012, 8(22):6169.
- [11] ZHAO J W, ZHANG J M, MCCOUL D, et al. Soft and fast hopping-running robot with speed of six times its body length per second [J]. Soft Robot, 2019, 6(6):713-721.