

带辅助轮摆臂的履带式机器人越障能力分析

安治国,周志鸿

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院,重庆 400074)

摘要:履带式移动机器人因具有良好的环境适应性被广泛应用于军事和安全领域。为了改善现有摆臂履带式机器人结构复杂、重量和体积较大等不足,进一步提高其越障能力,提出一种带辅助轮摆臂的履带式移动机器人,设计该机器人的几何模型,分析其越障机理,推导摆臂的正逆运动学方程,分别建立有/无滑移条件下机器人的运动学模型。采用柔性体有限段模型法建立履带的多体动力学仿真模型。通过履带滑转率、机器人主体质心高度,履带与地面接触力及摆轮受力的变化,综合分析该机器人越障时的动力性能。在越阶、爬坡和越沟壑不同工况下,提出的带辅助轮摆臂的履带式机器人表现出良好的越障性能。

关键词:摆臂;履带式移动机器人;柔性体;有限段模型;多体动力学;越障能力

中图分类号:TH113.2

文献标志码:A

Analysis of obstacle-crossing ability of swing arm tracked robot with auxiliary wheels

AN Zhiguo, ZHOU Zhihong

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Tracked mobile robots are widely used in military and security fields because of their good environmental adaptability. To overcome the shortcomings of complex structure, huge weight and large volume of traditional swing arm tracked robots and improve their obstacle-crossing ability, this paper proposed a swing arm tracked mobile robot with auxiliary wheels. The geometric model of the robot was first designed to analyze the obstacle-crossing mechanism of the robot and deduce the forward and inverse kinematic equations that applied to the swing arm. The kinematic models of the robot under the conditions of non-slip and slip were established respectively. A multi-body dynamic simulation model of the track was then established by using the finite body segment model for the flexible body. The dynamic performance of the robot was finally analyzed comprehensively through the variations in the track slip rate, the height of the centroid, the track contact force with ground and the swing wheel force. The proposed swing arm tracked mobile robot with wheels shows good obstacle-crossing performance under step-climbing, hill-climbing and gap-crossing conditions.

Key words: swing arm; tracked mobile robot; flexible body; finite segment model; multi-body dynamics; obstacle-crossing ability

移动机器人已广泛用于空间探索、灾害救援、侦察和监视等^[1-2]。移动机器人构型丰富,可分为轮式^[3]、履带式^[4]、足式^[5]以及混合式^[6]四大类。其中,履带式移动机器人因具有良好的地形适应性、优良的移动和越障能力^[7-8],被广泛应用于军事和安全领域。

履带式机器人可分为固定履带式、摆臂履带式、多履带式以及混合式等。Sun 等^[9]受昆虫腿结构的启

收稿日期:2022-12-13

基金项目:重庆市科委项目(cstc2019jcyj-msxmX 0761);重庆市研究生导师团队建设项目(JDDSTD2019007)

作者简介:安治国(1976—),男,山西太原人,副教授,博士,主要从事新能源汽车研究。

周志鸿(1997—),男,四川巴中人,硕士研究生,主要从事机电装备智能控制研究,本文通信作者。

E-mail:3218434465@qq.com

发,设计出一种新型仿生腿悬架履带式移动机器人,可有效抑制振动且承载能力强。Fieden等^[10]结合典型履带驱动和全向轮(麦克纳姆轮)的优点,开发出一款全向履带式移动机器人,该机器人可在不改变主体方向的情况下向任意方向移动。Bai等^[11-12]研发出一种多级自适应横向变形履带式机器人,通过自适应变形增强了其机动性和地形通过能力,不足是机器人变形后需手动恢复。然而,上述固定履带式机器人均存在越障能力较弱的问题。帅立国等^[13]提出一种模块化的轮-履式移动机器人,具有纯轮式、纯履带式及轮履混合式三种运动模式,地形适应能力较强。Luo等^[14]提出一种基于Watt II型六杆机构的可重构轮履混合式移动机器人,通过重构可实现纯轮式、纯履带式和翻滚三种运动模式的切换以适应不同环境。Sasaki等^[15]设计出一种六足履带式移动机器人,并配置红外位移测量系统,跨越沟壑时由前后四足支撑履带行驶,中间两足托住物体,可自适应不同沟壑宽度。上述混合式机器人将履带驱动与其他移动方式相结合,越障能力和环境适应性均得到了提高,但结构和控制系统较复杂,可靠性仍需要提升。Zhang等^[16]提出一种可重构履带式蛇形机器人,由三个模块组成,可通过对接机构实现相邻模块的连接或断开。Gong等^[17]提出一种并联多履带移动机器人系统,该系统采用6自由度结构,并根据载荷质量和楼梯高度提出爬楼策略。Zong等^[18]提出一种在非结构环境下具有人机交互的可变角度履带式机器人,机器人前后段之间配有被动自适应装置的摆动关节,可实现角度改变,适用于多种复杂地形。上述机器人将多个履带组合,使整个系统的鲁棒性增强、性能提高,但存在重量、尺寸大,系统复杂等问题。

以上几种构型中,摆臂履带式机器人控制系统相对简单,且越障能力和对复杂地形适应性较好,得到广泛关注。目前已有研究提出的摆臂履带式机器人的主要构型有四履带双摆臂机器人^[19]、四摆臂-六履带机器人^[20]、被动摆臂四履带机器人^[21]和四摇臂履带式巡检机器人^[22],如表1所示,可以看出,现有构型的结构较复杂、重量和体积较大。针对以上不足,本研究提出一种带辅助轮摆臂的履带式机器人构型,与文献^[19]、^[21]提出的构型相比,该构型省去了摆臂后轮和摆臂履带等结构,重量更轻、结构更简单;与文献^[20]、^[22]提出的构型相比,该构型只配有前摆臂,重量和体积大大减小。本研究使用柔性体有限段模型法建立履带的多体动力学仿真模型,在越阶、爬坡和越沟壑不同工况下,分别研究了所提新型机器人构型的履带滑转率、主体质心高度、履带与地面接触力及摆轮受力,综合分析了越阶、爬坡和越沟壑工况下的越障能力。

表1 不同构型机器人特点
Table 1 Features of different robots

构型	结构	重量	体积	最大越障高度/mm	最大跨沟宽度/mm
四履带双摆臂机器人 ^[19]	一般	中	中	130.00	258.00
四摆臂-六履带机器人 ^[20]	复杂	大	大	150.00	—
被动摆臂四履带机器人 ^[21]	一般	中	中	170.39	—
四摇臂履带式巡检机器人 ^[22]	复杂	大	大	180.00	347.15
带辅助轮摆臂的履带式机器人(本研究)	简单	小	小	175.00	430.00

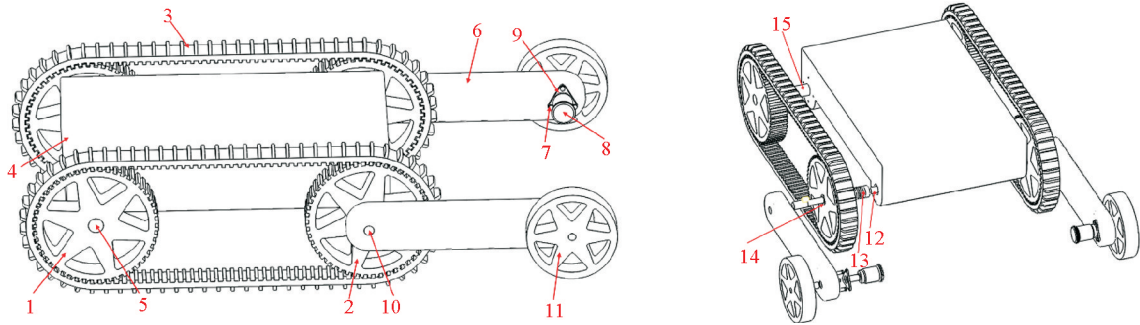
1 模型与方法

1.1 几何模型

带辅助轮摆臂的履带式移动机器人三维模型如图1所示,机器人由两台履带电机提供行进动力,使用后置驱动增加履带的张紧力。为提高机器人的越障性能和对复杂环境的适应性,考虑配置辅助摆臂,同时为了减轻重量、简化结构以及降低控制系统的复杂性,仅配备前摆臂。与传统摆臂相比,设计的摆臂省去了摆臂驱动轮、履带和连杆等结构,重量更低、结构更简单。

传统摆臂通过履带电机经多级传动控制摆臂驱动轮转动,由摆臂驱动轮驱动摆臂履带运动实现越障,使得传动效率较低且能耗较大。本研究设计的摆臂配有辅助轮,越障时由摆轮电机控制辅助轮运动,无需履带电机驱动摆臂履带运动,机器人的传动损耗降低、能耗减少,且运动速度更快。机器人摆臂由左右两台摆臂

电机控制,为使摆臂与从驱动轮的运动互不影响,使用传动轴套、滚动轴承和传动轴组合,各电机与传动轴之间采用弹性联轴器连接轴和减震,其关键部件尺寸参数见表2。



1—主驱动轮;2—从驱动轮;3—履带;4—机架;5—主传动轴;6—摆臂;7—固定螺栓;8—摆轮电机;
9—固定板;10—从传动轴;11—辅助摆轮;12—摆臂电机;13—联轴器;14—传动轴套;15—履带电机

图1 带辅助轮摆臂的履带式移动机器人三维模型

Fig. 1 Three-dimensional geometric model of swing arm tracked mobile robot with auxiliary wheels

1.2 履带式机器人越障机理

机器人成功越过障碍的本质是其质心顺利通过障碍的关键边界线,并且在此过程中机器人不发生倾倒,越过障碍后能够继续保持稳定的运动状态。基于此建立机器人的质心运动模型用于越障分析。机器人的质心分布如图2(a)所示,以机器人主驱动轮轴心为坐标原点,建立坐标系 XO_1Z 。设机器人主从驱动轮间距 O_1O_2 为 l ,主体部分质量为 m_a ,其质心 G_a 坐标为 (l_a, h_a) ;摆臂质量为 m_b ,其质心为

G_b ,与从驱动轮轴心 O_2 的距离为 l_b ;驱动轮的半径为 r_1 ,辅助摆轮的半径为 r_2 ,摆臂的摆角为 β 。机器人越过台阶时主要受力为机器人总重力 $G_{\text{总}}$ 、地面对主驱动轮作用力 N_2 、摩擦力 F 和台阶接触点对摆轮的作用力 N_1 ,其中 N_1 可分解水平方向的力 F_0 和竖直方向的力 N 。机器人质心 G 的坐标 (x_G, z_G) 可表示为:

$$x_G = \frac{m_a l_a + m_b l}{m_a + m_b} + \frac{m_b l_b}{m_a + m_b} \cos \beta, \quad z_G = \frac{m_a h_a}{m_a + m_b} + \frac{m_b l_b}{m_a + m_b} \sin \beta. \quad (1)$$

将式(1)整理后可得:

$$\left(x_G - \frac{m_a l_a + m_b l}{m_a + m_b}\right)^2 + \left(z_G - \frac{m_a h_a}{m_a + m_b}\right)^2 = \left(\frac{m_b l_b}{m_a + m_b}\right)^2. \quad (2)$$

由式(2)可知,摆角 β 的变化会改变机器人的质心位置,进而影响机器人的越障能力,并且变化轨迹是半径为 $\frac{m_b l_b}{m_a + m_b}$ 的圆。由于越障时摆臂是绕着机器人主体摆动,因此,为更好地分析摆臂特性,将机器人主体与摆臂简化成连杆机构进行运动学分析,如图2(b)所示。图2(b)中, l_m 和 l_n 分别为驱动轮轴距和摆臂长度, β_1 和 β_2 为关节角度,故摆臂末端执行点 O_3 的坐标 (x, z) 可表示为:

$$x = l_m \cos \beta_1 + l_n \cos(\beta_1 + \beta_2), \quad z = l_m \sin \beta_1 + l_n \sin(\beta_1 + \beta_2). \quad (3)$$

由式(3)可知,根据关节角度得到的摆臂末端空间位置为正运动学方程,整理可得其逆运动学方程:

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{z}{x}\right) - \arctan\left(\frac{l_n \sin \beta_2}{l_m + l_n \cos \beta_2}\right), \quad \beta_2 = \arccos\left(\frac{x^2 + z^2 - l_m^2 - l_n^2}{2l_m l_n}\right). \quad (4)$$

表2 履带式移动机器人主要参数

Table 2 Key parameters of the tracked mobile robot

参数	数值
主体质量/kg	34
前后轮轴距/mm	539
摆臂长度/mm	350
摆臂前轮直径/mm	180
驱动轮直径/mm	248

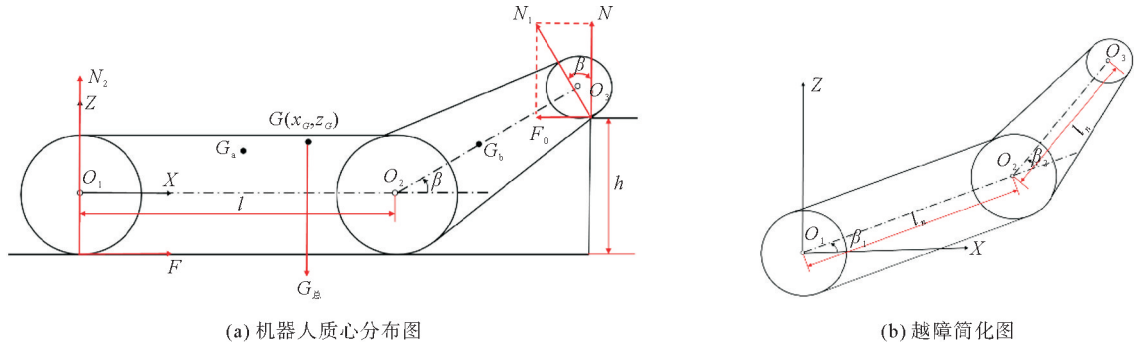


图2 机器人越障原理图

Fig. 2 Obstacle-crossing schematic diagram of the robot

1.3 运动学模型

1.3.1 基本运动学模型

由于摆臂主要在越障时使用,因此分析时忽略摆臂的影响,进行适当的简化和假设,如图3(a)所示。机器人重心的坐标为 \$(x_{OA}, y_{OA})\$,其航向角为 \$\phi\$,两侧驱动轮之间的距离为 \$c\$,左右履带的线速度分别为 \$v_1\$ 和 \$v_2\$。忽略滑移效应,以 \$O_R\$ 为转动中心,可得机器人在惯性参照系 \$XOY\$ 下的运动学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{OA} = \frac{v_1 + v_2}{2} \cos \phi, \\ \dot{y}_{OA} = \frac{v_1 + v_2}{2} \sin \phi, \\ \dot{\phi} = \frac{v_2 - v_1}{c}. \end{cases} \quad (5)$$

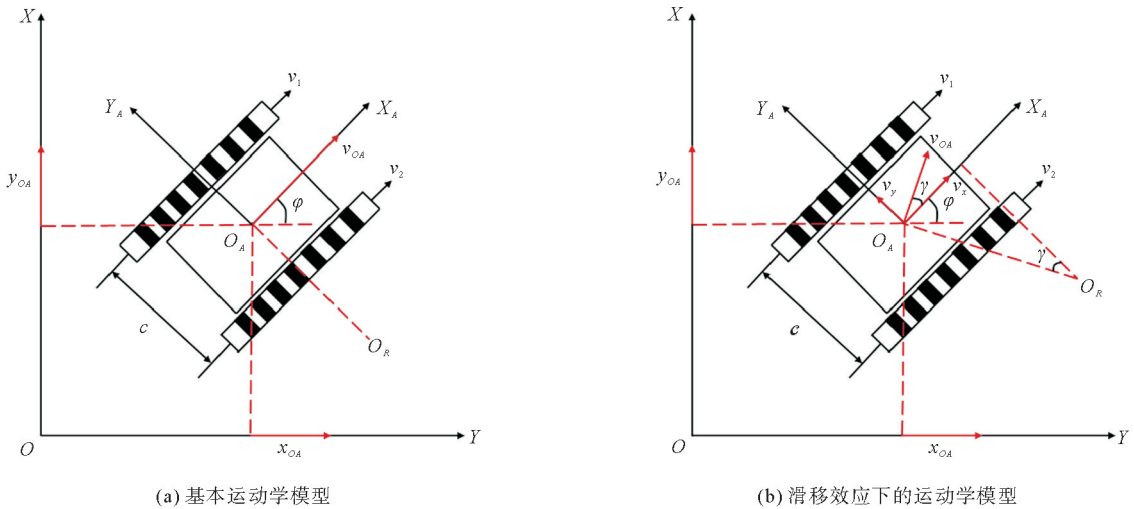


图3 履带式移动机器人运动学模型

Fig. 3 Kinematics model of the tracked mobile robot

1.3.2 滑移效应下的运动学模型

机器人产生滑移效应的原因是履带与地面的摩擦力与主驱电机输出力矩之间的不平衡,考虑滑移效应后,其行驶速度 \$v_{OA}\$ 用矢量 \$[v_x, v_y]^T\$ 表示,故滑移角 \$\gamma\$ 为 \$\tan^{-1}(v_y/v_x)\$。如图3(b)所示,用左右两侧履带的滑移率来描述机器人的滑移效应为:

$$\eta_1 = 1 - \frac{v'_1}{v_1}, \quad \eta_2 = 1 - \frac{v'_2}{v_2}. \quad (6)$$

式中, v'_1 和 v'_2 分别代表两侧履带与地面间接触点的线速度。故机器人在惯性参照系 XOY 中的运动学方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{OA} = v_x \cos \phi - v_y \sin \phi = \frac{v_1(1-\eta_1) + v_2(1-\eta_2)}{2} \cos \phi - \frac{v_1(1-\eta_1) + v_2(1-\eta_2)}{2} \tan \gamma \sin \phi, \\ \dot{y}_{OA} = v_x \sin \phi + v_y \cos \phi = \frac{v_1(1-\eta_1) + v_2(1-\eta_2)}{2} \sin \phi + \frac{v_1(1-\eta_1) + v_2(1-\eta_2)}{2} \tan \gamma \cos \phi, \\ \dot{\phi} = \frac{v_2(1-\eta_2) - v_1(1-\eta_1)}{c}. \end{cases} \quad (7)$$

整理可得机器人运动学状态空间模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1-\eta_1)(\cos \phi - \tan \gamma \sin \phi)}{2} & \frac{(1-\eta_2)(\cos \phi - \tan \gamma \sin \phi)}{2} \\ \frac{(1-\eta_1)(\sin \phi + \tan \gamma \cos \phi)}{2} & \frac{(1-\eta_2)(\sin \phi + \tan \gamma \cos \phi)}{2} \\ -\frac{1-\eta_1}{c} & \frac{1-\eta_2}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

设置各零部件密度、弹性模量和泊松比材料属性参数如表 3 所示。对各部件之间的相对运动关系进行设定, 主要包括主驱动轮与履带电机之间添加旋转副, 履带电机和摆臂电机与机架之间分别添加固定副, 辅助摆轮与摆轮电机之间添加旋转副, 如表 4 所示。

表 3 零部件材料属性

Table 3 Material properties of components

名称	材料	密度/(g/cm ³)	弹性模量/Pa	泊松比
主/从驱动轮	旋转副	2.77	7.20×10^{10}	0.32
辅助摆轮	铝合金	2.77	7.20×10^{10}	0.32
机架	铝合金	2.77	7.20×10^{10}	0.32
履带/摆臂/摆轮电机	合金钢	7.85	2.00×10^{11}	0.30
主/从传动轴	合金钢	7.85	2.00×10^{11}	0.30
传动轴套	合金钢	7.85	2.00×10^{11}	0.30
履带	高分子橡胶	1.00	7.84×10^6	0.47

为了更准确地模拟履带与路面之间的相互作用, 采用柔性体有限段模型法^[23] 建立仿真模型。具体方法是将履带分成若干单元, 基于轴套力将各履带块进行柔性连接, 如图 4 所示。轴套力是定义构件间作用力和作用力矩的 6 个分量($F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$), 不会改变构件间的自由度, 但当构件相对运动时, 会分别产生与相对位移和相对速度成正比的力矩和阻尼力, 其数学模型为:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \\ T_{x0} \\ T_{y0} \\ T_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & & & & & \\ & K_{22} & & & & \\ & & K_{33} & & & \\ & & & K_{44} & & \\ & & & & K_{55} & \\ & & & & & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \\ \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{11} & & & & & \\ & C_{22} & & & & \\ & & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式中: F_{j0}, T_{j0} 表示预载荷, $j = x, y, z$; K, C 分别为刚度系数和阻尼系数; d_j, φ_j 分别为构件间的相对位移和相对角位移; v_j, ω_j 分别为构件间的相对速度和相对角速度。

为准确研究履带的运动情况, 设置了履带与地面和履带与驱动轮之间的接触力, 相关参数如表 5 所示。具体选择基于 Hertz 理论碰撞函数的接触算法计算接触力, 其碰撞函数的数学模型为:

$$F = \begin{cases} \max\{K_C(e_1 - e)^n - \text{step}(e, e_1 - m, C_{\max}, e_1, 0) \frac{de}{dt}, 0\}, & e < e_1; \\ 0, & e > e_1. \end{cases} \quad (10)$$

式中： K_C 为接触刚度系数； e_1 、 e 分别为位移开关量和位移变量； n 为非线性弹簧力指数； m 为最大穿透深度； C_{\max} 为最大接触阻尼； de/dt 为穿透速度。

表 4 关键部件约束

Table 4 Constraints of key components

序号	约束对象	约束类型	数量	描述
1	主驱动轮与履带电机	旋转副	2	只保留沿履带电机输出轴的转动自由度
2	摆臂电机与机架	固定副	2	摆臂电机与机架之间的所有相对运动自由度都受到限制
3	辅助摆轮与摆轮电机	旋转副	2	只保留沿摆轮电机输出轴的转动自由度
4	摆轮电机与摆臂	固定副	2	摆轮电机与摆臂之间的所有相对运动自由度都受到限制
5	摆轮电机与传动轴	固定副	2	摆轮电机与传动轴之间的所有相对运动自由度都受到限制

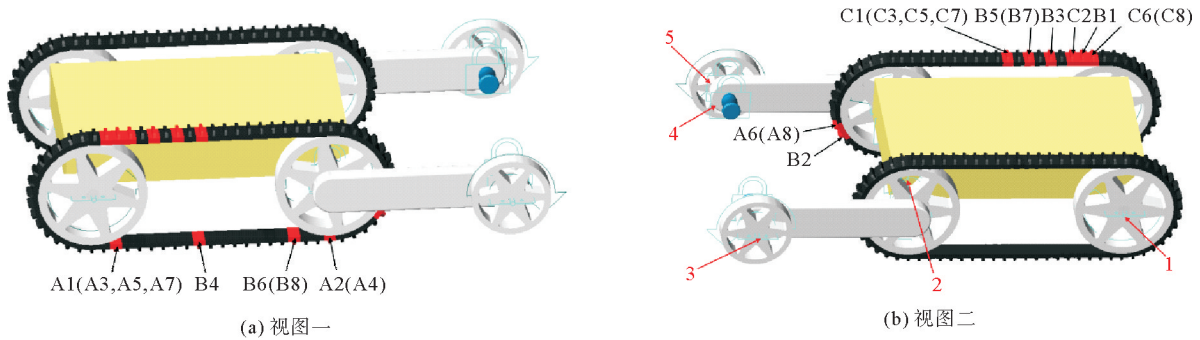


图 4 机器人虚拟样机

Fig. 4 Virtual prototype of the robot

机器人的旋转副分别由履带电机、摆臂电机以及摆轮电机驱动,根据不同工况下各自的轨迹规划路径编写相关驱动函数来实现。

1.4 实验设计

本研究对机器人在不同地形下的越障能力进行探究,翻越台阶、爬坡和跨越沟壑三种工况分别用 A、B 和 C 表示,理论速度分别为 0.36、0.62、0.56 m/s,每种工况设置 4 组不同参数。为了更准确地探究机器人的运动状态,每个仿真工况下分别选取单侧处于特殊位置的主履带单元进行分析,并对履带单元进行编号,如图 4 所示。编号的规则为:第一位字母表示对应的仿真工况,第二位数字表示履带在该工况下所经过特殊位置的顺序(1~6),每两个数字为一组对应相同参数,如 A2 表示机器人在翻越台阶时,其履带在第一组工况下通过的第二个特殊位置。表 6 列出了仿真实验方案,其中 h 、 α 和 b 分别代表台阶高度、坡度以及沟壑宽度, v_0 代表机器人的理论速度。

为了探究机器人穿越各种地形时

的运动情况,引入滑转率^[24]作为分析依据。滑转率 γ 反映了机器人实际运动速度与履带轮理论圆周速度之间的偏移程度。滑转率 γ 为正值,表示履带滑转;滑转率 γ 为负值,表示履带滑移。其计算式为:

表 5 接触力参数

Table 5 Parameters of contact force

参数	驱动轮与履带之间	履带与地面之间
刚度 $k/(N/m)$	7.84×10^6	2.50×10^6
阻尼 $d/(N \cdot s/m)$	7.84×10^4	2.50×10^4
穿透深度/mm	0.50	0.01
压力指数 e	2.20	2.05

表 6 仿真实验设计

Table 6 Design of simulation experiment

工况	设计变量	第一组	第二组	第三组	第四组
翻越台阶(A)	h/mm	155	165	175	180
爬坡(B)	$\alpha/^\circ$	15	18	21	22
穿越沟壑(C)	b/mm	410	420	430	435

$$\gamma = \begin{cases} (\omega r - v) / \omega r, & \omega r \geq v; \\ (\omega r - v) / v, & \omega r < v. \end{cases} \quad (11)$$

2 结果与讨论

2.1 越阶性能分析

机器人越阶具体过程为:机器人到达台阶前方时,摆臂先向上摆动至与地面垂直位置,然后继续靠近台阶;到合适位置后摆臂向下摆动,与台阶接触支撑起机器人,摆臂电机驱动摆臂轮开始转动,接着继续向前运动越过台阶;待机器人完全越过台阶后,摆臂向上摆动到初始位置,并与地面平行,整个越阶过程结束。

越阶工况下机器人运动特征参数变化情况如图 5 所示。由图 5(a)可以看出,机器人可以顺利越过 175 mm 的台阶,仿真如图 6(a)所示。但翻越 180 mm 的台阶时,第 7 s 时其重心高度急剧下降至 119 mm,甚至低于其初始重心高度,说明此时机器人发生倾倒,翻越失败,表明机器人越阶的最大高度为 175 mm,仿真如图 6(b)所示。

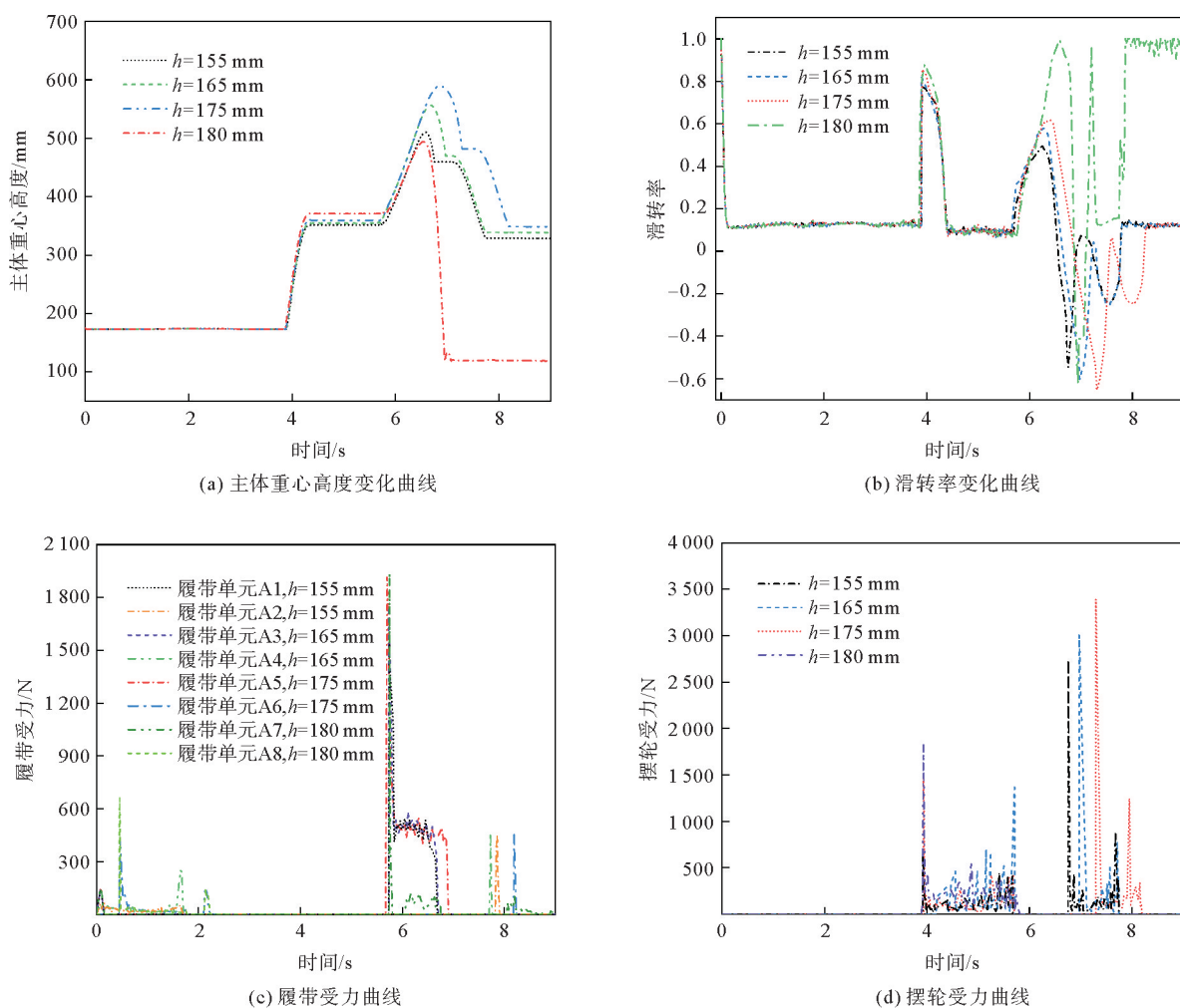


图 5 越阶工况下机器人运动特征参数变化图

Fig. 5 Characteristic parameters variation of robot motion in step-climbing

从图 5(b)看出,当机器人通过 3 种不同高度的台阶时,履带最初的滑转率均为 1,此时机器人的实际速度为 0,而理论速度为 0.36 m/s;随着机器人进入加速阶段,滑转率迅速减小并逐渐稳定在 0.1 附近。机器人翻越 175 mm 台阶的过程中,第 3.9 s 时摆臂向下摆动抬起机器人,摆轮受力峰值为 1 466 N,履带滑转

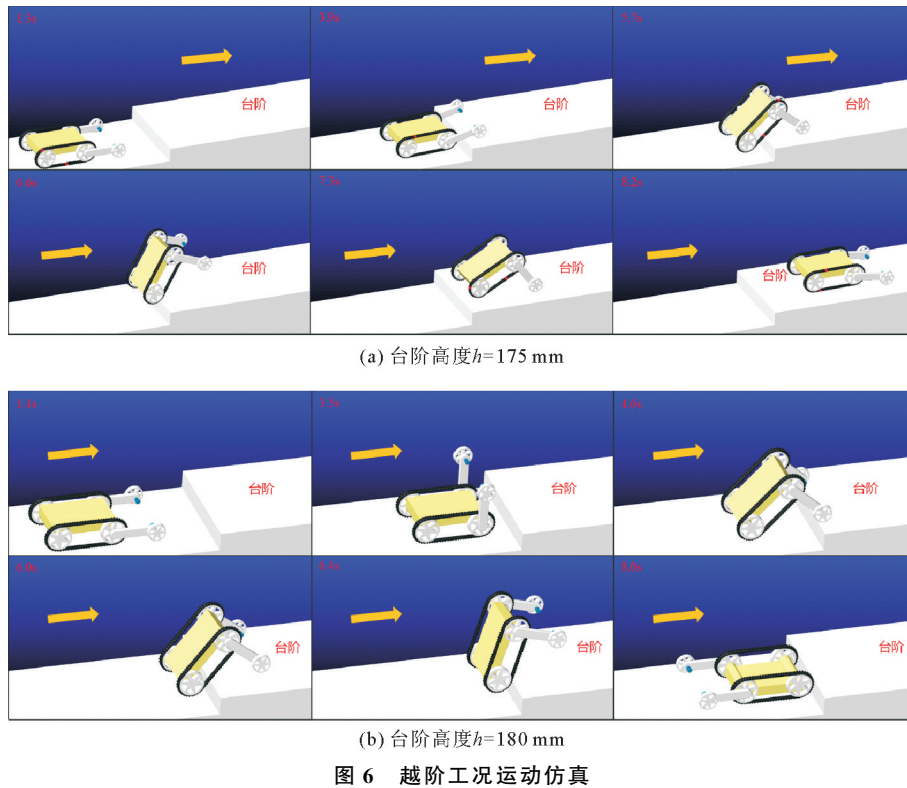


Fig. 6 Motion simulation under step-climbing condition

率发生突变,增至 0.85,履带打滑现象较为严重,后逐渐减小并恢复;4.4~5.7 s 时段,履带滑转率小于其在水平路面运动时的水平,其值在 0.07 附近波动,且波动的幅度更大,原因是此时段机器人与地面成一定角度,由主动轮和摆臂轮使其继续向前运动;5.7 s 时履带与台阶接触,机器人后端开始越过台阶,滑转率增至 0.62,履带单元 A5 受力最大为 1 914 N;6.6 s 时机器人后端登上台阶,在重力作用下主体开始下落;7.3 s 时摆轮下落到台阶上,并伴随一定冲击,受力为 3 394 N,滑转率降至 -0.65,小于 0,故机器人实际速度高于其理论速度,履带发生滑移;7.6 s 时机器人摆臂开始上摆恢复至原位,滑转率先减小至 -0.25,后逐渐恢复到水平路面运动时水平;8.2 s 时由于摆臂上摆,履带单元 A6 落到台阶上,受力峰值为 452 N。

对比机器人在不同台阶高度的运动特征参数变化情况可知,台阶高度越大,履带滑转率波动幅度越大,机器人运动稳定性越差,受到的力和冲击越大,尤其是在机器人后端翻越台阶和机器人登上台阶下落时更明显。当机器人后端翻越台阶时,随着台阶高度的增加,履带受力增加,且滑转率峰值增大,表明履带的打滑现象严重。机器人登上台阶时下落的高度与台阶高度呈正相关,下落高度越大,摆轮受力越大,滑转率降低的峰值也越大,履带的滑移现象越严重。

2.2 爬坡性能分析

机器人爬坡具体过程为:当摆臂与坡面接触时,摆臂轮开始转动,机器人继续沿斜坡运动,待摆轮离开坡面时,摆轮停止转动,继续向上运动;待机器人即将登上斜坡时,摆臂向下摆动到规划位置支撑其重量,转动摆轮继续前进一段距离;当机器人完全通过斜坡时,摆臂向上摆动回归原位置,爬坡完成。

爬坡工况下机器人运动特征参数变化如图 7 所示,运动仿真过程如图 8 所示。由图 7(a)可知,机器人能成功爬上 21°的斜坡,如图 8(a)所示。但当坡度角为 22°时,重心高度在 174~628 mm 呈周期性变化,机器人沿斜坡运动一段距离后,开始反向运动并返回水平路面,后又继续重复此过程。如图 7(b)所示,此时履带滑转率出现大幅波动,履带单元 B8 与爬坡完成的其他履带单元相比,未出现受力变化,摆轮受力曲线在 6.8 s 时出现大幅波动,这与主体重心高度曲线反映出的爬坡失败结果相一致,表明最大爬坡角为 21°,运动仿真过程如图 8(b)所示。

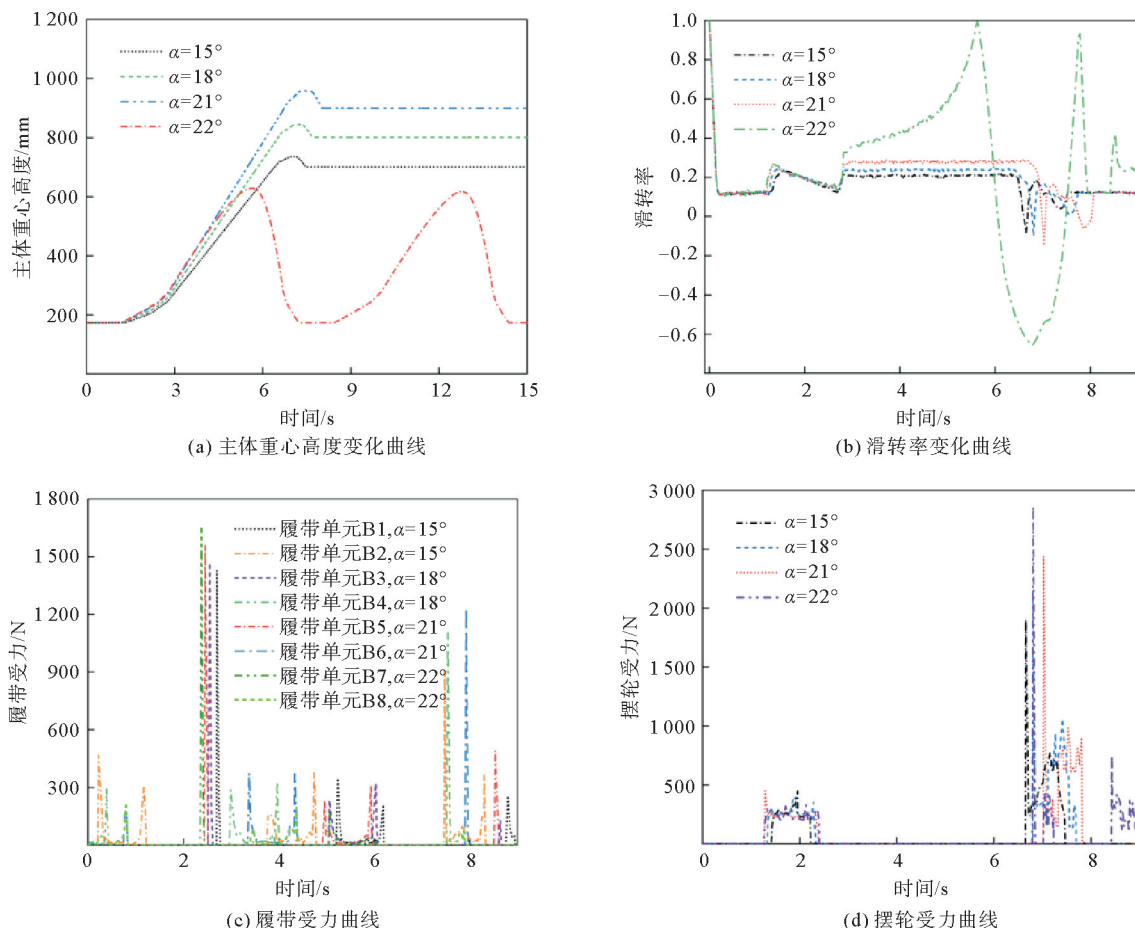


图 7 爬坡工况下机器人运动特征参数变化图

Fig. 7 Characteristic parameters variation of robot motion in hill-climbing

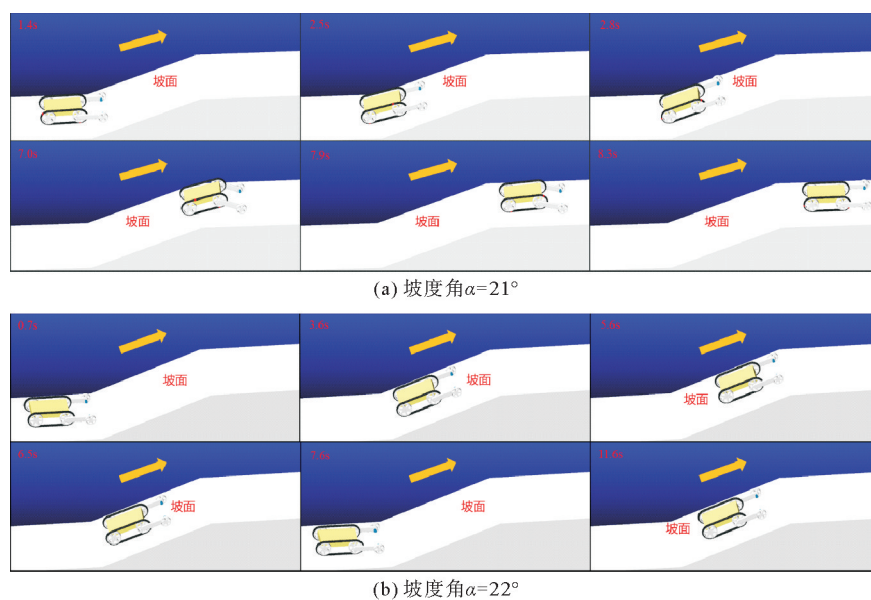


图 8 爬坡工况运动仿真

Fig. 8 Motion simulation under hill-climbing condition

由图 7 可知,机器人的理论速度为 0.62 m/s,在爬上 21°斜坡的过程中,1.4 s 时摆轮与坡面接触,履带滑转率升至 0.26,当摆轮开始在坡面上运动时,滑转率逐渐减小;2.5 s 时履带末端与水平路面接触支撑机

器人,履带单元 B5 受力为 1 562 N;2.8~6.6 s 时段机器人与坡面完全接触,并沿斜坡向上运动,滑转率稳定在 0.28 左右;7 s 时重力作用使得摆臂前端下落到地面,此时产生一定的冲击,滑转率骤减至-0.14,履带出现短暂的滑移现象,摆轮受力为 2 439 N;7.6 s 时摆臂开始上摆以回到初始位置,滑转率先减小到-0.06 后逐渐恢复正常;7.9 s 时摆臂摆动履带下落到地面上,履带单元 B6 受力为 1 231 N。

分析图 7 可得,随斜坡坡度增加,履带滑转率的波动幅度也相应增加,机器人打滑和滑移现象加剧,说明机器人的运动状态变得不稳定。坡度越大,履带末端与水平路面接触支撑机器人时倾斜的角度越大,受力增加。爬上斜坡时摆臂下摆的角度与坡度呈正相关,故摆臂前端下落的高度和摆臂回归原位时机器人前端下落的高度越大,摆臂轮和对应履带单元受力也越大。

2.3 越沟壑性能分析

机器人越沟壑时,摆臂先下摆至摆轮与地面接触且摆轮开始转动,直到机器人末端离开地面;继续向前运动,机器人逐渐倾斜,摆臂继续下摆至设定位置;待机器人完全通过沟壑时,摆臂逐渐回到初始位置。

越沟壑工况下机器人运动特征参数变化如图 9 所示。由图 9(a)可知,机器人越沟壑时,重心高度先略微下降后上升到某一峰值,最后逐渐下降回到初始值,表明机器人可以成功越过 430 mm 宽的沟壑。但当沟壑宽度为 435 mm 时,主体重心高度在 6.8 s 时大幅度波动后稳定在 110 mm,表明机器人主体在越沟壑过程中发生倾翻,可越过的最大沟壑宽度为 430 mm,整个运动过程如图 10 所示。

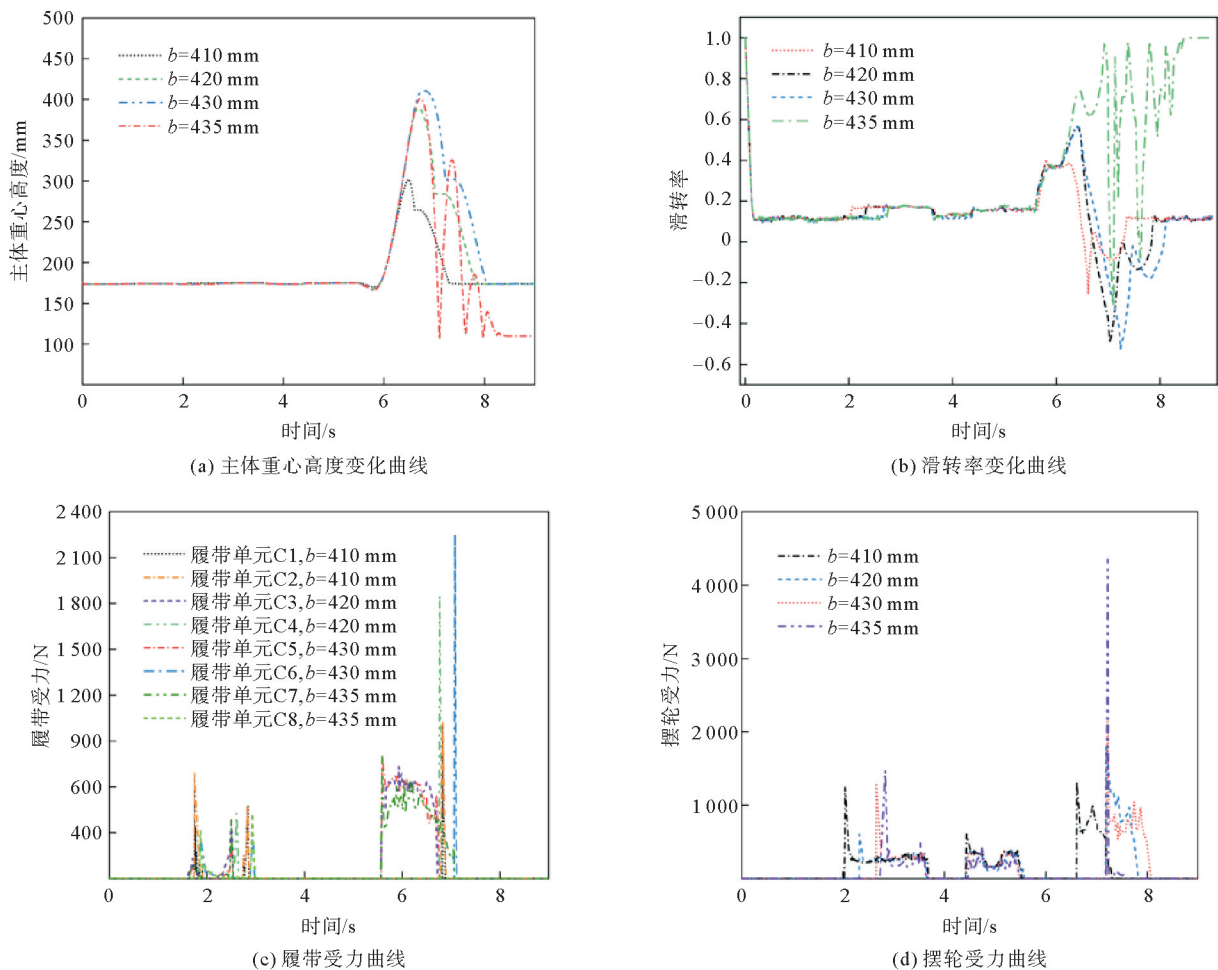


图 9 越沟壑工况下机器人运动特征参数变化图

Fig. 9 Characteristic parameters variation of robot motion in gap-crossing

由图 9 可知,机器人的理论速度为 0.56 m/s,在 2.7~3.6 s、4.4~5.6 s 时段,机器人滑转率在 0.18 附近波动,高于在水平路面运动时水平,这是因为摆轮与地面接触,共同参与机器人运动;滑转率在 3.6~4.4 s

时段恢复正常,原因是摆臂悬空越过沟壑,未与地面接触;6.4 s 时机器人末端脱离地面使得主体发生倾斜,履带打滑严重,其滑转率上升到峰值 0.57,倾斜过程中由履带单元 C5 支撑其重量,峰值为 796 N;7.0 s 时机器人已完全越过沟壑,但仍处于倾斜状态,履带末端支撑机器人,最大受力为 2 251 N;7.2 s 时在重力作用下机器人前端下落到地面,此时摆轮受力为 2 144 N,滑转率骤降至-0.53,履带发生滑移;在 7.5~8.1 s 时段,滑转率先减小至-0.18 后恢复正常,这是由于摆臂上摆,履带前端下落到地面,履带发生滑移。

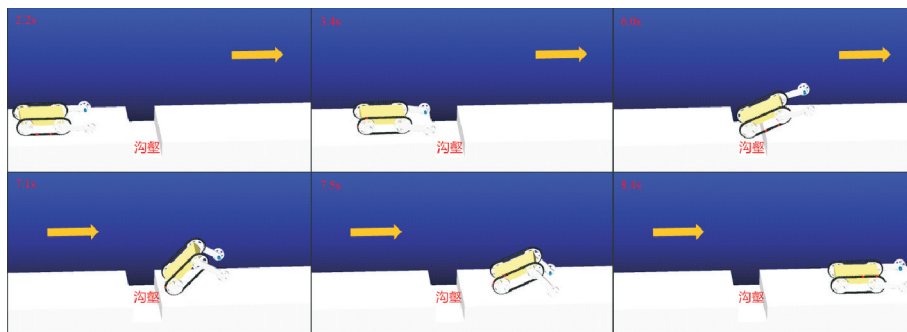


图 10 越沟壑工况运动仿真($b=430\text{ mm}$)

Fig. 10 Motion simulation under gap-crossing condition

对比图 9 中不同沟壑宽度下机器人的各项运动特征参数发现,沟壑宽度越大,机器人滑转率波动的幅度越大,其履带运动状态越不稳定,越沟壑时各部件受到的冲击也相应增加,原因是机器人的倾斜角度和前端下落高度与沟壑宽度呈正相关。

3 结论

本研究提出一种带辅助轮摆臂的履带式移动机器人,与现有构型相比,该机器人构型结构更简单、体积更小、重量更轻。通过建立运动学模型并进行多体动力学仿真,系统分析了该机器人在越阶、爬坡和越沟壑三种典型工况下的越障能力。结果表明:在三种工况下,该机器人具有较好的越障能力,最大越阶高度为 175 mm,最大爬坡角为 21° ,越沟壑最大宽度为 430 mm。

本研究未来考虑机器人在复杂越障工况下的主体重心高度、履带滑转率、履带以及摆臂受力的变化规律,优化前后轮轴距和摆臂长度等关键参数,进一步提升该构型的越障性能。

参考文献:

- [1] PANIGRAHI P K, BISOY S K. Localization strategies for autonomous mobile robots: A review[J]. Journal of King Saud University: Computer and Information Sciences, 2022, 34(8): 6019-6039.
- [2] 高扬, 夏洪焱, 许豪, 等. 基于 GPS 与地图匹配的移动机器人定位方法[J]. 机床与液压, 2021, 49(3): 1-5.
GAO Yang, XIA Hongyao, XU Hao, et al. Mobile robot localization method based on GPS and map matching[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(3): 1-5.
- [3] 李世光, 王文文, 申梦茜, 等. 两轮自平衡机器人平衡控制仿真与研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(6): 76-81.
LI Shiguang, WANG Wenwen, SHEN Mengxi, et al. Balance control simulation and research of two-wheeled self-balance robot[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2016, 35(6): 76-81.
- [4] CHEN Z Y, CHEN G Z, QI L Z, et al. Steering dynamic performance analysis of the tracked mobile robot[J/OL]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 392. DOI:10.1088/1757-899X/392/6/062038.
- [5] 李福东, 李金良, 于岩, 等. 一种基于 CPG 的两足机器人步态生成方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 95-100.
LI Fudong, LI Jinliang, YU Yan, et al. A new method for gait synthesis of biped robot based on CPG[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2011, 30(3): 95-100.

- [6] BENTZVI P, GOLDENBERG A A, ZU J W. Design and analysis of a hybrid mobile robot mechanism with compounded locomotion and manipulation capability [J/OL]. *Journal of Mechanical Design*, 2008, 130(7). DOI:10.1115/1.2918920.
- [7] RIGATOS G. A nonlinear optimal control approach for tracked mobile robots[J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2021, 34(4):1279-1300.
- [8] WANG H, ZHANG Y, WANG X, et al. Cascaded continuous sliding mode control for tracked mobile robot via nonlinear disturbance observer[J/OL]. *Computers & Electrical Engineering*, 2022, 97. DOI:10.1016/j.compeleceng.2021.107579.
- [9] SUN B, JING X. A tracked robot with novel bio-inspired passive “legs”[J/OL]. *Robotics Biomim*, 2017, 4. DOI 10.1186/s40638-017-0070-6.
- [10] FIEDEN M, BALCHANOWSKI J. A mobile robot with omnidirectional tracks-design and experimental research[J/OL]. *Applied Sciences*, 2021, 11(24). DOI:10.3390/app112411778.
- [11] BAI Y, SUN L, ZHANG M. Terramechanics modeling and grouser optimization for multistage adaptive lateral deformation tracked robot[J]. *IEEE Access*, 2020, 8:171387-171396.
- [12] BAI Y, SUN L, ZHANG M. Design and analysis of multistage adaptive lateral deformation tracked robot[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(1):371-383.
- [13] 帅立国, 苏慧哲, 郑丽媛, 等. 轮-履式移动机器人履带转向运动[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(10):1630-1634. SHUAI Liguang, SU Huizhe, ZHENG Liyuan, et al. Steering movement of caterpillar track of a track-wheel mobile robot [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(10):1630-1634.
- [14] LUO Z, SHANG J, WEI G, et al. A reconfigurable hybrid wheel-track mobile robot based on Watt II six-bar linkage[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2018, 128:16-32.
- [15] SASAKI T, FUJITA T. Gap traversing motion via a hexapod tracked mobile robot based on gap width detection[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2021, 33(3):665-675.
- [16] ZHANG H, WANG W, DENG Z, et al. A novel reconfigurable robot for urban search and rescue[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2006, 3(4):359-366.
- [17] GONG Z, XIE F, LIU X J, et al. Obstacle-crossing strategy and formation parameters optimization of a multi-tracked-mobile-robot system with a parallel manipulator [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 152:1-20.
- [18] ZONG C, JI Z, YU J, et al. An angle-changeable tracked robot with human-robot interaction in unstructured environments [J]. *Assembly Automation*, 2020, 40(4):565-575.
- [19] 李允旺, 葛世荣, 朱华, 等. 四履带双摆臂机器人越障机理及越障能力[J]. *机器人*, 2010, 32(2):157-165. LI Yunwang, GE Shirong, ZHU Hua, et al. Obstacle-surmounting mechanism and capability of four-track robot with two swing arms[J]. *Robot*, 2010, 32(2):157-165.
- [20] 王川伟, 马琨, 杨林, 等. 四摆臂-六履带机器人单侧台阶障碍越障仿真与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10):46-53. WANG Chuanwei, MA Kun, YANG Lin, et al. Simulation and experiment on obstacle-surmounting performance of four swing arms and six tracked robot under unilateral step environment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(10):46-53.
- [21] 方海峰, 葛世荣, 李允旺. 具有被动摆臂的四履带机器人越障性能分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(5):682-686. FANG Haifeng, GE Shirong, LI Yunwang. Obstacle performance analysis of four-track robot with compliant swing arms [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2010, 39(5):682-686.
- [22] 商德勇, 崔栓伟, 周丹, 等. 薄煤层巡检机器人行走机构跨沟性能分析及试验研究[J]. *煤炭工程*, 2017, 49(4):136-138. SHANG Deyong, CUI Shuanwei, ZHOU Dan, et al. Ditch-crossing performance analysis and experimental study on inspection robot walking mechanism in thin coal seam[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(4):136-138.
- [23] 王川伟, 马宏伟, 薛旭升, 等. 煤矿履带巡检机器人多体动力学建模及越障仿真[J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(5):790-796. WANG Chuanwei, MA Hongwei, XUE Xusheng, et al. Multi-body dynamics modeling and obstacle surmounting simulation of tracked inspection robot in coal mine[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(5):790-796.
- [24] 迟媛, 石丹丹, 王洪涛, 等. 松软地面履带车辆差速转向实际载荷比的研究[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21):32-39. CHI Yuan, SHI Dandan, WANG Hongtao, et al. Research on actual steering power ratio of differential steering mechanism of tracked vehicle on soft ground[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(21):32-39.

(责任编辑:齐敏华)