

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.12.019

双摆臂履带可变形机器人的稳定性研究*

王振华, 孟广耀*, 黄居鑫, 郭 彬, 孙宏洁
(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要:针对履带不可变形机器人越障性能差的问题,对双摆臂履带可变形机器人的最佳越障性能以及机器人在越障过程中的稳定状态进行了研究。选取了两种具有代表性的障碍物类型,建立了其数学模型,将机器人的质心分布与转动惯量分布作为考虑因素,研究了机器人爬越坡道的倾覆稳定性、滑移稳定性与攀爬台阶的静态稳定性、分步动态稳定性,通过数值分析验证了计算结果的有效性与准确性,得到了机器人处于稳定状态的充分必要条件,进而得到了机器人翻越障碍的临界条件与能够翻越的最大数值。研究表明:双摆臂履带可变形机器人具有良好的地形适应能力与越障能力,任务完成度和执行效率高,越障过程机器人状态稳定。

关键词:履带可变形机器人;动态稳定性;质心分布;越障性能

中图分类号:TP242

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)12-1331-06

Stability analysis of double pendulum arms transformable track robot

WANG Zhen-hua, MENG Guang-yao, HUANG Ju-xin, GUO Bin, SUN Hong-jie

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: Aiming at the problem that the track-non-deformable robot has poor obstacle performance, the optimal obstacle-surmounting performance of the double pendulum arms transformable track robot and the stable state of robot during the obstacle crossing process were studied. Two representative obstacle types were selected. The mathematical model was established, and the centroid distribution and moment of inertia distribution of the robot were taken as considerations. The overturning stability and slip stability of the climbing ramp, the static stability stepwise and dynamic stability of the climbing step were studied. Numerical analysis was carried out to verify the validity and accuracy of the results, and the necessary and sufficient conditions for the robot to be in a stable state were obtained. The critical conditions of the robot overcoming obstacles and the maximum values that can be climbed were obtained. The results indicate that the double pendulum arms transformable track robot has good terrain adaptability and obstacle-obstacle ability, high task completion and execution efficiency, and stable robot state in the process of obstacles.

Key words: track deformable robot; dynamic stability; centroid distribution; obstacle performance

0 引 言

履带机器人具有良好的地形适应性能^[1],因而得到了广泛关注,并已有多种针对不同环境状况的履带机器人面世^[2]。近年来,履带可变形机器人等复合结构机器人受到了众多学者的关注^[3]。其中,针对机器人的静态稳定性已有不少研究^[4],判断方法也较为成熟,但是对于同时考虑机器人质心分布与转动惯量分

布因素的研究很少。

本文将在考虑质心分布与转动惯量分布的基础上,对机器人爬越坡道过程中横向与纵向的倾覆稳定性和滑移稳定性,攀爬台阶过程中静态稳定性与动态稳定性和翻越沟壑动态稳定性进行分析与研究。

1 机器人构型与参数

利用椭圆规原理,并且使用弹簧作为辅助机构,本

收稿日期:2019-04-20

基金项目:临沂市重点研发计划项目(2017GGH023)

作者简介:王振华(1993-),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事先进制造装备技术、机器人技术等方面的研究。E-mail:JoshuaW93@163.com

通信联系人:孟广耀,男,博士,教授。E-mail:gymeng1963@163.com

文开发出具有双导轨机构的履带长度不变,并能持续张紧的 DPATTR (double pendulum arms transformable track robot) 机器人。

DPATTR 机器人主要由车体、驱动轮、行星轮、从动轮、伸缩摆臂Ⅰ、摆臂Ⅱ、履带和椭圆机构组成。驱动轮和从动轮安装在车体椭圆焦点位置的两侧,由两部平台驱动电机驱动谐波减速器完成机器人的前进、后退和差速转向动作。两部推杆电机驱动椭圆机构使伸缩摆臂Ⅰ轮按照特定的椭圆轨迹进行动作,并在弹簧的伸缩补偿下保持履带持续张紧,完成机器人构型的变化。

双摆臂履带可变形机器人主要参数如表 1 所示。

表 1 DPATTR 机器人主要参数			
参数	数值	参数	数值
主车体长度	740	主车体轮转动惯量	0.001 7
l_1/mm		$J_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	
伸缩摆臂Ⅰ最短长度	720	伸缩摆臂Ⅰ轮转动惯量	0.001 7
l_2/mm		$J_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	
伸缩摆臂Ⅰ最长长度	880	摆臂Ⅱ轮转动惯量	0.000 3
l_2/mm		$J_3/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	
摆臂Ⅱ长度	710	机器人转动惯量	0.82
l_3/mm		$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	
主车体质量	19.43	大履带轮半径	150
m_1/kg		R/mm	
伸缩摆臂Ⅰ质量	5.42	伸缩摆臂Ⅰ轮半径	125
m_2/kg		r/mm	
摆臂Ⅱ质量	6.21	机器人宽度	430
m_3/kg		d/mm	

2 爬越坡道稳定性分析

对机器人爬越坡道的过程,本文采用稳定锥判别方法对 DPATTR 机器人稳定性进行判定。机器人支撑点在坡道平面的竖直投影与机器人质心连接之后形成的稳定锥,稳定锥在坡道平面投影为多边形^[5]。若机器人质心投影落在形成的多边形区域内且多边形任意两条边的夹角大于 0°,则机器人处于静态稳定状态^[6];若机器人质心投影落在形成的多边形区域外,则机器人处于静态不稳定状态,易发生倾覆现象。

2.1 爬坡抗倾覆静态稳定性

机器人爬坡过程稳定锥模型如图 1 所示。

机器人纵向爬坡过程中, O 为机器人质心, O' 为机器人质心在斜坡的投影,因为双摆臂履带可变形机器人两侧为对称结构,机器人 $ABCD$ 四端点在斜坡投影出的四边形 $A'B'C'D'$ 为较规则的四边形。机器人的倾覆角为 $\angle EOO'$,若使机器人处于稳定不发生倾覆状态,需要机器人倾覆角大于坡道倾角,即:

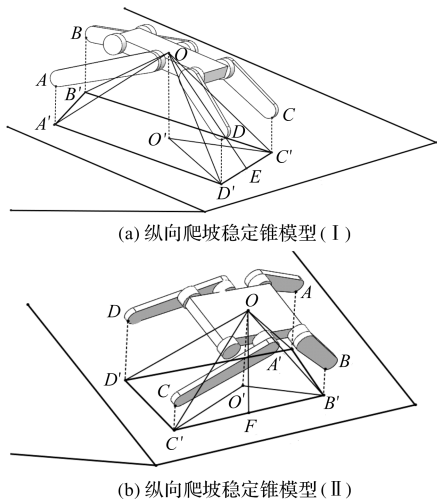


图 1 机器人爬坡稳定锥模型

$$\alpha < \angle EOO' = \cos^{-1} \frac{OO'}{OE} \tag{1}$$

同理,机器人横向爬坡过程中,倾覆角为 $\angle FOO'$,若使机器人处于稳定不发生倾覆状态,需要机器人倾覆角大于坡道倾角。

2.2 爬坡抗倾覆滑移稳定性

机器人在爬越坡道的过程中,在驱动力充足且不考虑履带变形的条件下,爬坡稳定性不仅取决于抗倾覆静态稳定性,同时受由履带对地面附着力决定的滑移稳定性影响,即机器人爬越坡道的最大爬坡角由静态稳定性和附着力决定。爬越坡道分为纵向爬坡与横向爬坡两种方式,基于质心分布,本文分别对机器人滑移稳定性进行分析。

2.2.1 纵向爬坡抗倾覆滑移稳定性

机器人纵向爬坡阶段受力情况如图 2 所示。

本研究将主体从动轮圆心作为原点,建立坐标系,主车体、伸缩摆臂Ⅰ和摆臂Ⅱ的质心分别为 G_1 、 G_2 和 G_3 。随着坡道角度 α 的增大,机器人质心从 G 位置到 G' 位置,实质为质心以 O_1 为圆心旋转,通过质心的竖直虚线逐渐靠近从动轮与坡道接触点 O_1 ,当机器人质心到 G' 位置时竖直虚线恰好通过点 O_1 ,此时虚线为机器人纵

向爬坡的倾覆线,机器人达到倾覆临界点,机器人发生倾覆。

设机器人 3 部分重心坐标分别为 $G_1(x_1,y_1)$, $G_2(x_2,y_2)$ 和 $G_3(x_3,y_3)$,则总重心位置 $G(x,y)$ 为:

$$\begin{cases} x = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3}{m_1 + m_2 + m_3} \\ y = \frac{m_1y_1 + m_2y_2 + m_3y_3}{m_1 + m_2 + m_3} \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_1,m_2,m_3 —主车体、伸缩摆臂 I 和摆臂 II 的质量。

当机器人到达倾覆临界点时,则机器人最大抗倾覆角 $\alpha_{1\max}$ 为:

$$\alpha_{1\max} = \tan^{-1} \frac{x}{y + R} \quad (3)$$

式中: R —机器人履带轮半径。

在保证机器人不发生倾覆的情况下,设机器人驱动力为 F ,履带与坡道之间的动摩擦因数为 μ ,要使机器人能顺利爬坡,且不发生滑移,须满足:

$$F - (\mu \cos \alpha + \sin \alpha) mg \geq 0 \quad (4)$$

式中: m —机器人总质量。

则机器人最大抗滑移角 $\alpha_{2\max}$ 为:

$$\alpha_{2\max} = \sin^{-1} \frac{F}{mg \sqrt{\mu^2 + 1}} - \tan^{-1} \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

综上所述,机器人不发生倾覆或滑移现象可爬越最大坡度角 $\alpha_{\max}$ 为:

$$\alpha_{\max} = \min(\alpha_{1\max}, \alpha_{2\max}) \quad (6)$$

2.2.2 横向爬坡抗倾覆滑移稳定性

机器人横向爬坡阶段受力情况如图 3 所示。

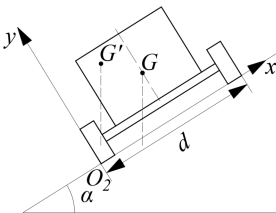


图 3 机器人纵向爬坡受力图

将履带轮左下点作为原点建立坐标系,由于机器人 x 方向对称,质心位置在 x 方向处于轴心位置,机器人宽度为 d 。随着坡道角度 α 的增大,机器人质心从 G 位置到 G' 位置,实质为质心以 O_2 为圆心旋转,通过质心的竖直虚线逐渐靠近履带轮左下点 O_2 ,当机器人质心到 G' 位置时竖直虚线恰好通过点 O_2 ,此时虚线为机器人横向爬坡的倾覆线,机器人达到倾覆临界点,机器人发生倾覆。

此时在 xO_2y 坐标系下机器人质心坐标 $G(x',y')$ 为:

$$\begin{cases} x' = \frac{d}{2} \\ y' = y + R \end{cases} \quad (7)$$

因此,当机器人到达倾覆临界点时,机器人最大抗倾覆角 $\alpha_{3\max}$ 为:

$$\alpha_{3\max} = \tan^{-1} \frac{x'}{y'} = \frac{d}{2(y + R)} \quad (8)$$

在保证机器人不发生倾覆的情况下,要使机器人能顺利爬坡,且不发生滑移,须满足:

$$\mu mg \cos \alpha \geq mg \sin \alpha \quad (9)$$

则机器人最大抗滑移角 $\alpha_{4\max}$ 为:

$$\alpha_{4\max} = \tan^{-1} \mu \quad (10)$$

综上所述,机器人不发生倾覆或滑移现象可爬越最大坡度角 $\alpha_{\max}$ 为:

$$\alpha_{\max} = \min(\alpha_{3\max}, \alpha_{4\max}) \quad (11)$$

2.2.3 爬坡抗倾覆滑移稳定性数值分析

机器人履带为橡胶履带,不考虑履带棱和花纹的影响,履带与地面的动摩擦因数为 $0.7 \sim 1.2^{[7]}$,取摩擦因数为 0.85 ,将其代入公式可求得机器人纵向与横向爬坡的最大抗倾覆角与最大抗滑移角度,如表 2 所示。

表 2 爬坡临界条件与最大数值

爬坡方式	最大抗倾覆角	最大抗滑移角	综合爬坡角
	/ (°)	/ (°)	/ (°)
纵向爬坡	40.10	37.85	37.85
横向爬坡	29.50	40.36	29.50

机器人在越障过程中,通常伸缩摆臂 I 与摆臂 II 处于伸展状态,对机器人稳定性分析时需要计算机器人稳定系数^[8]。 K 为机器人稳定力矩与倾覆力矩之比。当 K 大于 1,说明机器人处于稳定状态;当 K 小于 1,说明机器人处于失稳状态。实际情况中,为提高机器人稳定性,稳定系数定为 1.2 。

在坡度角最大为 37.85° 的纵向爬坡中,稳定系数为:

$$K = \frac{M_1}{M_2} = \frac{m_1 l_1'}{m_2 l_2' + m_3 l_3'} = 1.283 > 1.2 \quad (12)$$

式中: l_1',l_2',l_3' —机器人各部分质心到倾覆线的距离。

由此可得出:伸缩摆臂 I 与摆臂 II 处于任何姿态,机器人在纵向爬坡过程中均处于稳定状态,不会发生倾覆。

3 攀爬台阶稳定性分析

攀爬台阶过程中,机器人与地面接触面小,履带与

台阶面之间的动摩擦因数较低。因此,除了需要进行静态稳定性分析,还需要基于质心分布,进行单点接触、两点接触及多点接触的动态稳定性分析。

3.1 攀爬台阶静态稳定性

机器人攀爬台阶步态分布分为两个阶段:第一阶段为伸缩摆臂 I 贴近台阶,通过台阶支撑抬升主车体,使伸缩摆臂 I 与主车体贴合台阶;第二阶段为类似于爬越坡道姿态在多级台阶上爬行。在第二阶段中为保持攀爬姿态与攀爬稳定性,需要履带长度大于两个外角线的距离和,则机器人履带长度 l 须满足:

$$l \geq 2\sqrt{h^2 + w^2} \quad (13)$$

式中: h —单级台阶的高度; w —单级台阶的宽度。

3.2 攀爬台阶动态稳定性

假设不考虑履带变形,机器人在攀爬台阶的运动过程中,还需要考虑机器人质心分布、履带轮的转动惯量、速度与加速度及惯性力的影响^[9]。本研究对动态稳定性进行分析,求得不同速度与加速度下的等效牵引力与等效支撑力,进而得到不产生滑移的充分必要条件。

3.2.1 机器人与台阶一点接触动态稳定性

机器人与台阶一点接触受力阶段如图 4 所示。

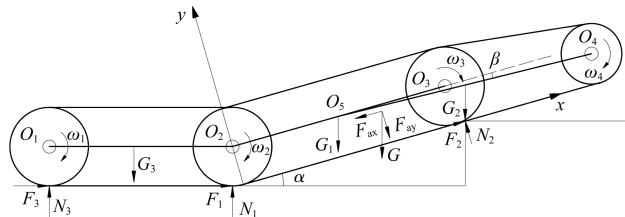


图 4 机器人与台阶一点接触受力图

建立 xO_2y 坐标系,伸缩摆臂 I 轮半径为 r ,其余所有履带轮半径为 R ,摆臂 II 轮、主车体前后轮和伸缩摆臂 I 轮分别以 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 和 ω_4 的角速度转动,履带与地面夹角为 α , O_2O_3 与 O_4O_5 夹角为 β ,主车体、伸缩摆臂 I 和摆臂 II 分别受 G_1, G_2 和 G_3 的重力, F_1, F_2 和 F_3 为牵引力, N_1, N_2 和 N_3 为所受支撑力。

由几何关系得:

$$\sin\beta = \frac{R-r}{l_2} \quad (14)$$

$$\sin\alpha = \frac{2h}{l_1 + l_2\cos\beta} \quad (15)$$

式中: l_1 —主车体长度; l_2 —伸缩摆臂 I 长度。

机器人在此状态下质心坐标 $G(x, y)$ 为:

$$\begin{cases} x = \frac{m_1 l_1 + m_2(l_1 + l_2\cos\beta) - m_3 l_3 \cos\alpha}{2(m_1 + m_2 + m_3)} \\ y = \frac{m_3 l_3 \sin\alpha - m_2 l_2 \sin\beta}{2(m_1 + m_2 + m_3)} \end{cases} \quad (16)$$

将 x 与 y 对 β 求导得:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{m_3 l_3 \dot{\alpha} \beta \sin\alpha - m_2 l_2 \beta \sin\beta}{2(m_1 + m_2 + m_3)} \\ \dot{y} = \frac{m_3 l_3 \dot{\alpha} \beta \cos\alpha - m_2 l_2 \beta \cos\beta}{2(m_1 + m_2 + m_3)} \end{cases} \quad (17)$$

将 x 与 y 对 β 求二阶导得:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{m_3 l_3 (\ddot{\alpha} \beta^2 \cos\alpha + \ddot{\alpha} \beta \sin\alpha + \dot{\alpha} \beta^2 \sin\alpha) - m_2 l_2 (\beta^2 \cos\beta + \beta \sin\beta)}{2(m_1 + m_2 + m_3)} \\ \ddot{y} = \frac{m_3 l_3 (\ddot{\alpha} \beta \cos\alpha + \ddot{\alpha} \beta^2 \cos\alpha - \dot{\alpha} \beta^2 \sin\alpha) - m_2 l_2 (\beta \cos\beta - \beta^2 \sin\beta)}{2(m_1 + m_2 + m_3)} \end{cases} \quad (18)$$

则 x 与 y 方向惯性力为:

$$\begin{cases} F_{ax} = m\ddot{x} \\ F_{ay} = m\ddot{y} \end{cases} \quad (19)$$

机器人在 xO_2y 坐标系沿 y 方向做直线运动,有 $y =$

$$l_2 \sin\beta(t) = \int_0^t v_0 + \alpha \tau d\tau, \text{ 则可得:}$$

$$\beta = \frac{v}{l_2 \cos\beta} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{\alpha + l_2 \sin\beta \beta^2}{l_2 \cos\beta} \quad (21)$$

机器人履带棱勾住台阶外角线时,假设不发生垂直于 xO_2y 平面方向的侧滑,主车体后轮与摆臂 II 轮处所受牵引力与支撑力有:

$$F_1 = \mu N_1 (1 - e^{-k}) \quad (22)$$

$$F_3 = \mu N_3 (1 - e^{-k}) \quad (23)$$

式中: K —拖动滑移试验值; μ —履带与台阶之间的动摩擦因数,取 0.75。

由此可得出机器人与台阶一点接触状态下的力与力矩方程为:

$$\begin{cases} (F_1 + F_3)\cos\alpha + (N_1 + N_3)\sin\alpha + F_2 - G\sin\alpha - F_{ax} = 0 \\ (N_1 + N_3)\cos\alpha - (F_1 + F_3)\sin\alpha + N_2 - G\cos\alpha - F_{ay} = 0 \\ N_2 \frac{h}{\sin\alpha} - N_3 l_3 \cos^2\alpha - (G\cos\alpha + F_{ay})x + (G\sin\alpha + F_{ax})y - \\ J\ddot{\alpha} - J_1\ddot{\omega}_1 - J_2\ddot{\omega}_2 - J_3\ddot{\omega}_3 - J_4\ddot{\omega}_4 = 0 \end{cases} \quad (24)$$

式中: J, J_1, J_2, J_3, J_4 —机器人、摆臂 II 轮、主车体后轮、主车体前轮和伸缩摆臂 I 轮的转动惯量。

机器人与台阶一点接触动态稳定性充分必要条件为:

$$\{N_1 > 0\} \cap \{N_2 > 0\} \cap \{N_3 > 0\} \cap \left\{0 < \frac{F_2}{N_2} \leq \mu\right\} \quad (25)$$

3.2.2 机器人与台阶两点接触动态稳定性

在与台阶两点接触阶段,机器人在 xO_2y 坐标系沿 x 方向做直线运动,机器人与台阶两点接触受力图如

图 5 所示。

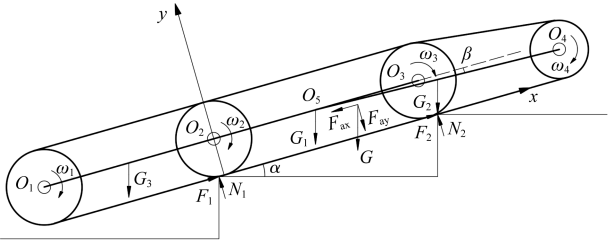


图 5 机器人与台阶两点接触受力图

根据 $x = l_2 \cos \beta = \int_0^t v d\tau$, 可得:

$$\beta = -\frac{v}{l_2 \sin \beta} \tag{26}$$

$$\dot{\beta} = -\frac{\alpha + l_2 \cos \beta \dot{\beta}^2}{l_2 \sin \beta} \tag{27}$$

由此可得出机器人与台阶两点接触状态下的力与力矩方程为:

$$\begin{cases} F_1 + F_2 - G \sin \alpha - F_{ax} = 0 \\ N_1 + N_2 - G \cos \alpha - F_{ay} = 0 \\ N_2 \sqrt{w^2 + h^2} - F_{ay} x + F_{ax} y - J \ddot{\alpha} - \\ J_1 \dot{\omega}_1 - J_2 \dot{\omega}_2 - J_3 \dot{\omega}_3 - J_4 \dot{\omega}_4 = 0 \end{cases} \tag{28}$$

由此可求得两点的支撑力。机器人与台阶两点接触时,履带棱与台阶外角线接触有两种可能性。若两点的履带棱均匀住外角线,则牵引力与支撑力的比值为:

$$\mu_1 = \frac{F_1 + F_2}{N_1 + N_2} \tag{29}$$

若只有一点的履带棱勾住外角线,则牵引力与支撑力的比值为:

$$\mu_2 = \frac{F_1 + F_2 - \mu F_1}{N_2} \tag{30}$$

$$\mu_3 = \frac{F_1 + F_2 - \mu F_2}{N_1} \tag{31}$$

机器人与台阶两点接触动态稳定性充分必要条件为:

$$\{N_1 > 0\} \cap \{N_2 > 0\} \cap \{0 < \mu_i \leq \mu\} \tag{32}$$

3.2.3 机器人与台阶三点接触动态稳定性

机器人与台阶三点接触状态下受力情况如图6所示。

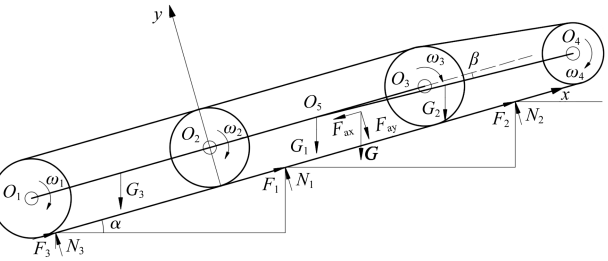


图 6 机器人与台阶三点接触受力图

则力与力矩方程为:

$$\begin{cases} F_1 + F_2 + F_3 - G \sin \alpha - F_{ax} = 0 \\ N_1 + N_2 + N_3 - G \cos \alpha - F_{ay} = 0 \\ (F_2 + F_3) \sqrt{w^2 + h^2} - (G \cos \alpha + F_{ay}) x + (G \sin \alpha + F_{ax}) y - \\ J \ddot{\alpha} - J_1 \dot{\omega}_1 - J_2 \dot{\omega}_2 - J_3 \dot{\omega}_3 - J_4 \dot{\omega}_4 = 0 \end{cases} \tag{33}$$

机器人与台阶三点接触时履带棱与台阶外角线接触有多种可能性。若三点的履带棱均匀住台阶外角线,有:

$$\mu_0 = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{N_1 + N_2 + N_3} \tag{34}$$

若有两点的履带棱勾住台阶外角线,则有:

$$\mu_i = \frac{F_1 + F_2 + F_3 - \mu F_i}{N_1 + N_2 + N_3 - N_i} \quad i = 1, 2, 3 \tag{35}$$

若只有一点的履带棱勾住台阶外角线,则有:

$$\mu_i = \frac{F_1 + F_2 + F_3 - \mu F_j - \mu F_k}{N_1 + N_2 + N_3 - N_j - N_k} \tag{36}$$

式中: $i = 4, 5, 6; j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3$ 。

机器人与台阶三点接触动态稳定性充分必要条件为:

$$\{N_1 > 0\} \cap \{N_2 > 0\} \cap \{N_3 > 0\} \cap \{0 < \mu_i \leq \mu\} \tag{37}$$

3.2.4 攀爬台阶稳定性数值仿真分析

当机器人行驶速度 $v = 0 \sim 1.5 \text{ m/s}$, 台阶高度 $h = 0.2 \text{ m}$ 时, 对其与台阶一点、两点和三点接触时牵引力与支撑力进行数值分析, 绘制牵引力、牵引力和支撑力/支撑力曲线, 如图 7 所示。

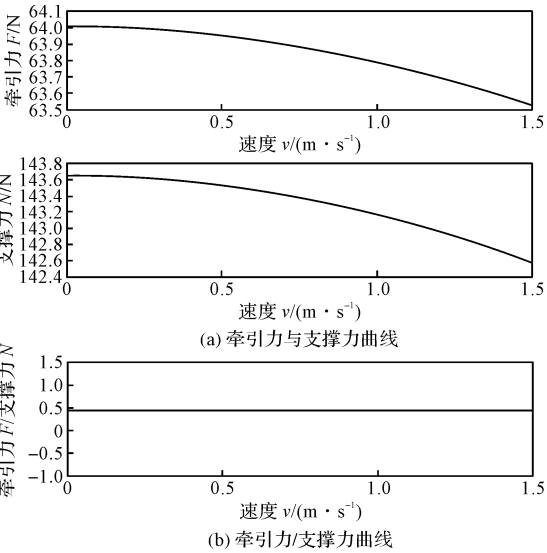


图 7 机器人与台阶一点接触力学曲线

图 7 结果表明:机器人在翻越台阶的过程中,当机器人与台阶一点接触且在规定速度范围内行驶时,牵引力与支撑力均呈单调减趋势,牵引力与支撑力比值随速度增大而略微减小呈单调减趋势。在此过程中,支撑力均大于 0 且牵引力与支撑力比值小于 0.75,满足机器人与台阶一点接触动态稳定性充分必要条件,

机器人处于稳定状态,不会发生滑移或倾覆现象。

机器人与台阶两点接触力学曲线图如图 8 所示。

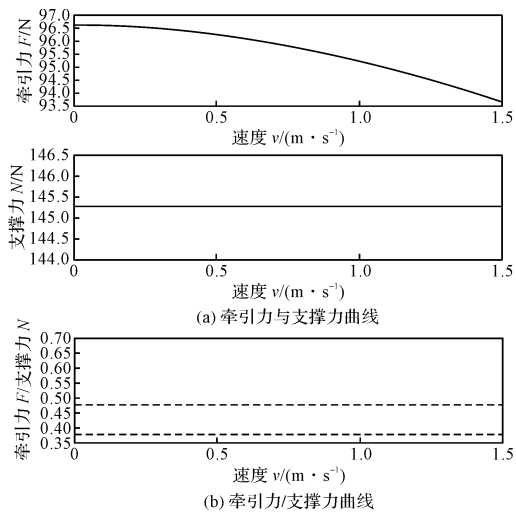


图 8 机器人与台阶两点接触力学曲线

图 8 中,当机器人与台阶两点接触且在规定速度范围内行驶时,牵引力单调减趋势较明显,支撑力减幅较小,3 种情况下牵引力与支撑力比值随速度增大均呈单调减趋势,两条履带棱同时勾住外角线的比值始终大于只有一条履带棱勾住外角线的比值。在该过程中,支撑力均大于 0 且牵引力与支撑力比值小于 0.75,满足机器人与台阶两点接触动态稳定性充分必要条件,机器人处于稳定状态,不会发生滑移或倾覆现象。

当机器人与台阶 3 点接触且在规定速度范围内行驶时,由于可能性种类较多,可分为 3 种类型,机器人与台阶三点接触力学曲线如图 9 所示。

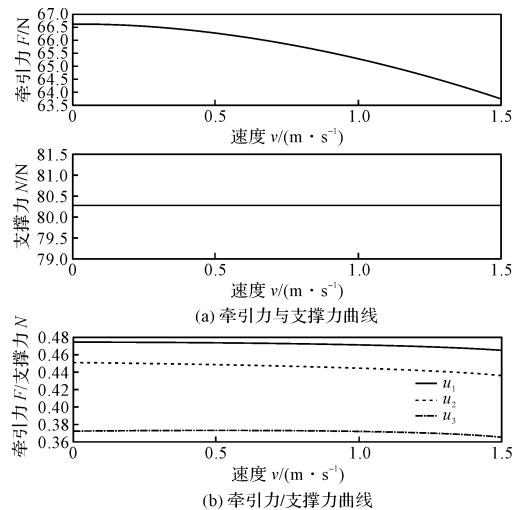


图 9 机器人与台阶三点接触力学曲线

图 9 中,牵引力单调减趋势较明显,支撑力减幅较

小,3 种情况下牵引力与支撑力比值随速度增大均呈单调减趋势,只有一点的履带棱勾住台阶外角线的情况下减幅最大,履带棱勾住外角线条数越多,牵引力与支撑力比值越大。在该过程中,支撑力均大于 0 且牵引力与支撑力比值小于 0.75,满足机器人与台阶 3 点接触动态稳定性充分必要条件,机器人处于稳定状态,不会发生滑移或倾覆现象。

4 结束语

针对双摆臂履带可变形机器人在翻越障碍过程中稳定性问题,本研究选取了两种具有代表性的障碍物类型,建立了坡道与台阶的数学模型,对翻越两种障碍过程中的静态与动态稳定性进行了分析,得到了机器人稳定且不发生滑移与倾覆的条件。

本研究根据机器人翻越障碍的步态规划,基于质心分布与转动惯量分布分阶段对机器人进行了稳定性研究,通过数值分析得到了不同情况下机器人翻越障碍的一般规律。

参考文献 (References):

- [1] 刘少刚,郭云龙,贾鹤鸣,等.履带自张紧式主臂可变构型机器人机构原理与越障分析[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(6):2289-2297.
- [2] 朱 岩,王明辉,李 斌,等.履带可变形机器人越障性能研究[J].机器人,2015,37(6):693-701.
- [3] 朱 岩,王明辉,李 斌,等.基于目标规划的履带可变形机器人结构参数设计及验证[J].农业工程学报,2016,32(14):39-46.
- [4] KITANO M, KUMA M. An analysis of horizontal plane motion of tracked vehicles[J]. *Journal of Terramechanics*, 1977,14(4):211-225.
- [5] 孙智勇.变形履带机器人机构设计与仿真分析[D].绵阳:西南科技大学制造科学与工程学院,2015.
- [6] 郭云龙.搜救侦测机器人关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学机电工程学院,2013.
- [7] 杨红旗.履带式工程机械履带与地面水平作用的有关系数[J].工程机械,1982(3):9-13.
- [8] 李 凯.危险环境遥操作机器人机构设计研究[D].绵阳:西南科技大学特殊环境机器人技术四川省重点实验室,2017.
- [9] 饶 伟,施家栋,王建中.关节式履带机器人爬楼梯动态稳定性分析[J].机械工程学报,2014,50(15):60-67.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

王振华,孟广耀,黄居鑫,等.双摆臂履带可变形机器人的稳定性研究[J].机电工程,2019,36(12):1331-1336.

WANG Zhen-hua, MENG Guang-yao, HUANG Ju-xin, et al. Stability analysis of double pendulum arms transformable track robot[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(12):1331-1336.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>