

## 摇杆式履带悬架的构型推衍及其在煤矿救灾机器人上的应用

李允旺, 葛世荣, 朱 华

(中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为使机器人行走机构既能被动地适应崎岖的非结构地形, 又能克服台阶、沟道等规则障碍, 将履带行走机构引入摇杆式移动系统中. 通过增加摆臂履带和固定关节角, 推衍了多种型式的摇杆式履带悬架构型, 分析了各悬架构型的特点. 结合煤矿井下非结构的地形环境与爆炸性气体环境, 提出了一种采用对称的 W 形履带悬架的摇杆式履带机器人移动系统, 并制作了样机. 分析了该移动系统的抗倾覆、攀爬台阶、下台阶、跨越沟道等越障特性并进行了性能试验. 性能分析与样机试验表明, 摇杆式履带机器人移动平台可适应复杂的非结构地形, 具有良好的越障性能, 可攀爬 100 mm 高的台阶, 下 450 mm 高的台阶, 跨越 260 mm 宽的沟道.

**关键词:** 摇杆式履带机器人; W 形履带; 悬架构型; 越障

**中图分类号:** TP24

**文献标识码:** A

### Deduction of the Rocker-type Track Suspension Configurations and Their Applications to Coal Mine Rescue Robots

LI Yunwang, GE Shirong, ZHU Hua

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** To obtain robot's locomotion mechanisms which have good passive adaptability to rugged unstructured terrain and strong obstacle-surmounting capabilities to regular obstacles such as steps and ditches, the track is introduced into the rocker-type robot mobile system. Various configurations of the rocker-type track suspensions are obtained through adding arm-tracks and fixing joint angles, and their characteristics are analyzed. According to the unstructured terrain environments and the explosive gas atmosphere environment of underground coal mine, a rocker-type tracked mobile system using a symmetrical W-shaped track suspension is presented, and the mobile platform prototype is developed. Obstacles-surmounting capabilities of this mobile system, such as anti-overturning, channel-crossing, stair-climbing, down-stair, are analyzed. The capability analysis and test results indicate that the platform is of good adaptability to complex unstructured terrains and of strong obstacles-surmounting capabilities, and it can climb up a 100 mm-high step, climb down a 450 mm-high step, and cross a 260 mm-wide ditch.

**Keywords:** rocker-type tracked robot; W-shaped track; suspension configuration; obstacle-surmounting

### 1 引言 (Introduction)

美国 JPL 实验室研制的 Rocky 系列火星车以及已成功登陆火星的“索杰纳”、“勇气号”、“机遇号”火星车均采用了 6 轮独立驱动的摇杆—转向架悬架系统<sup>[1-2]</sup>; 美国 JPL 实验室研制的 4 轮独立驱动和转向的 SRR 行星机器人以及美国俄克拉荷马州大学研制的用于月球与火星探测的 4 轮驱动的 SR2 机器人均采用了摇杆悬架移动系统<sup>[3]</sup>. 采用摇杆—转向架的悬架或摇杆悬架的轮式移动系统具有被动地适应不平整地形的特点, 有良好的自适应能力和越障性能, 适合天然形成的、杂乱地分布着岩石的起伏

地形, 而很难克服人工建造的台阶、连续阶梯、沟道等规则地形.

履带式移动系统在移动机器人领域已得到广泛的应用. 美国 Remotec 公司制造的 V2 煤矿救援机器人<sup>[4]</sup>、中国矿业大学研制的 CUMT-I 煤矿搜救机器人均采用了固定履带式移动系统. 美国 iRobot 公司生产的 Packbot 系列机器人采用了两条主履带和两条摆臂履带的关节履带形式<sup>[5]</sup>. 日本千叶工业大学研制的搜救机器人“木槿”采用了 2 条主履带和前后 2 对独立摆动的摆臂履带的关节履带形式, 且两主履带较宽, 将机器人主体部分包裹, 形成全身履

带机器人,可以在复杂的环境中行进<sup>[6]</sup>.文[7]提出了一种三角履带与方形履带铰接的机器人,两履带可在一定角度范围内相对转动,可被动地适应连续台阶等地形.履带式机器人具有良好的攀越台阶、爬越沟道的性能,但其车体的净空高度一般较小,在杂乱复杂的环境中易被卡阻,且效率较低;全身履带机器人虽可减少被卡阻的可能性,但运行阻力增大,效率更低;关节履带机器人可主动地使用摆臂履带辅助越障,但在未知的、复杂的非结构环境中很难进行精确操作.

发生瓦斯、煤尘爆炸事故后,煤矿井下的地形环境为非结构化的地形环境,既有人工建造的行人台阶、斜坡、排水沟道以及钢轨等较为规则的地形,又有顶板冒落、片帮的煤块、岩石堆积成的复杂凌乱地形.因此,进入矿井灾区进行环境探测与搜救作业的煤矿救灾机器人,不但应具有克服台阶、连续阶梯、沟道等规则地形的越障能力,还应具有克服乱石(煤块)堆积而成的高低起伏地形的自适应能力.本文将摇杆式机器人与履带式机器人相结合,把履带行走机构引入摇杆式悬架中,推导出摇杆式履带悬架的基本构型,并根据煤矿井下非结构化的地形环境与爆炸性的气体环境,选择一种摇杆式对称W形的固定履带移动系统作为研究对象,进行性能分析与样机试验.

## 2 摇杆式履带悬架的构型推衍 (Configuration deduction of the rocker-type track suspensions)

### 2.1 研究基础——摇杆式 4 轮机器人移动平台<sup>[8]</sup>

图 1 为中国矿业大学研制的摇杆式 4 轮机器人移动平台的主体部分照片.该机器人移动平台由主车体、差动装置、左右两摇杆悬架以及车轮构成,在机器人主车体的内部,差动装置连接了主车体与左右两摇杆悬架;安装在支腿末端的 4 个车轮均由安装在支腿内部的直流减速电机独立驱动.该机器人平台移动机构较为简单,样机试验也表明该机器人能够被动地适应不平整地形,具有较强的障碍穿越能力.但也存在以下缺陷:(1)当障碍卡在摇杆两支腿之间时,机器人将无法移动;(2)跨越沟道的宽度受轮径的制约;(3)攀爬台阶的性能不佳.

### 2.2 摇杆式履带悬架的构型推衍

以固定方形履带为基础,利用增加摆臂履带和固定关节角的方法,可推导出履带式行走机构的基本构型,如图 2 所示.固定履带式行走机构 A 增加摆臂后可形成关节履带式行走机构,根据增加的摆

臂的数量可分为单侧摆臂履带式行走机构  $B_1$  和双侧摆臂履带式行走机构  $B_2$ ;  $B_1$  机构中的关节角固定时可形成三角履带式行走机构  $C_1$ ;  $B_2$  机构一侧关节角固定时形成三角履带为主履带的摆臂履带式行走机构  $C_2$ , 当其两侧关节角均固定时则形成倒梯形履带式行走机构  $C_3$ .

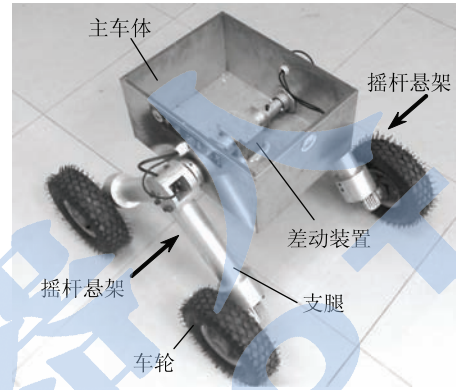


图 1 摇杆式 4 轮机器人移动平台

Fig.1 Mobile platform of rocker-type four-wheeled robot

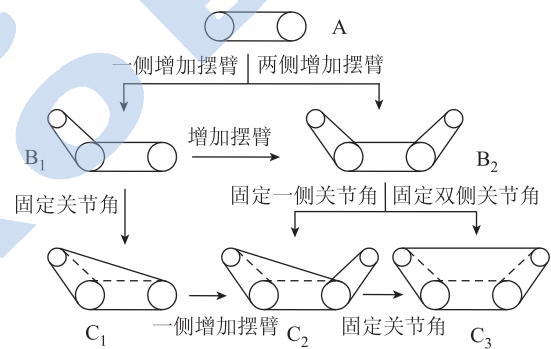


图 2 履带式行走机构的构型

Fig.2 Configurations of the track type driving mechanism

根据摇杆悬架的机构特点,将履带机构引入到摇杆式 4 轮机器人的摇杆式悬架中,利用相同的方法,可推导出摇杆式履带悬架的基本构型,如图 3 所示.图中, a 为摇杆式悬架的示意图,  $\varphi$  为摇杆悬架两支腿的夹角.根据机构 a 的特点,若在一侧悬架的两车轮间设置固定履带机构,可构成  $b_1$  悬架机构;若在摇杆悬架支腿处设置固定履带机构,构成  $b_2$ 、 $b_3$  机构;在 b 系列机构的基础上,在其两侧增加摆臂履带,可形成关节履带机构  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ ;将  $c_1$  机构的一侧关节角固定,形成了三角履带关节履带机构  $d_1$ ,将  $c_1$  机构双侧的关节角固定,形成倒梯形履带机构  $d_2$ ;  $c_2$  与  $c_3$  机构相似,以  $c_3$  机构为例,将其一侧关节履带的关节角固定,形成摇杆一侧为三角履带,一侧为关节履带的悬架机构  $d_3$ ,将其两侧关节角均固定,则形成摇杆两侧均为三角履带的悬

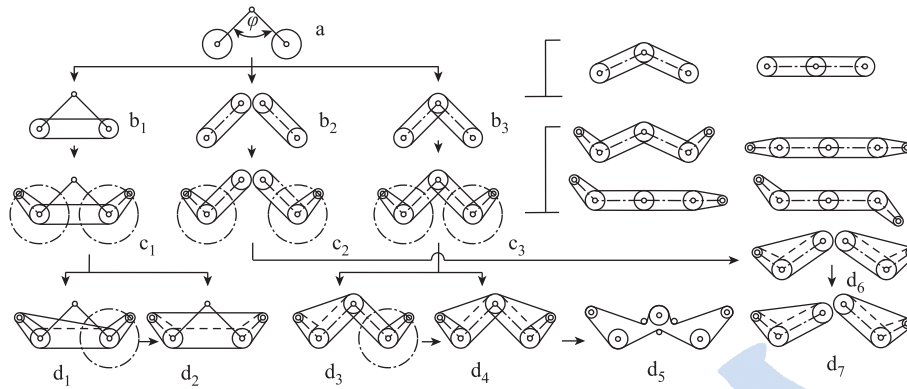


图 3 摇杆式履带悬架的构型

Fig.3 Configurations of the rocker-type track suspension

表 1 摇杆式履带悬架的特点分析

Tab.1 Characteristic analysis on the rocker-type track suspensions

机构代号	悬架构成		机构特点
b <sub>1</sub>	采用一条方形履带代替两车轮		优点：提高了爬越沟道与翻越台阶的性能，但受到重心位置的制约，只需 1 处动力；缺点：影响了悬架对起伏地面的适应性，地形变化对机器人主车体位姿的影响较大。
c <sub>1</sub>	采用一条主履带代替两车轮，并在主履带两端设置摆臂履带		优点：摆臂的参与，比 b <sub>1</sub> 机构具有更强的爬越沟道与翻越台阶的性能；扩大了仰俯角的范围，提高了抗倾覆的能力。缺点：仍有 b <sub>1</sub> 机构的缺点，且需要 3 处动力。
d <sub>1</sub>	两车轮间设置三角主履带，主履带一端设置摆臂履带		优点：结合了三角履带与关节履带的优点，爬越沟道与翻越台阶的性能比 b <sub>1</sub> 机构强，较 c <sub>1</sub> 机构弱；缺点：仍有 b <sub>1</sub> 机构的缺点，且需要 3 处动力。
d <sub>2</sub>	在原两车轮间设置了倒梯形履带		结构简单，因履带存在初始斜角，其爬越沟道与翻越台阶的性能较 b <sub>1</sub> 机构有一定程度的增强，且只需 1 处动力；但仍有 b <sub>1</sub> 机构的缺点。
b <sub>2</sub> 、b <sub>3</sub>	在摇杆的支腿处设置两条固定履带	夹角 $\varphi$ 为定值	不但保留了 a 机构对地形的良好的适应性，而且避免了障碍在支腿间卡住的情况，提高了翻越凸台、台阶等障碍物的性能，但其爬越沟道的性能较 a 机构没有明显提高。
		夹角 $\varphi$ 可控	当 $\varphi$ 角增大时是 ( $\varphi \leq \pi$ )，悬架的触地长度变大，机器人重心下移，扩大了仰俯角的范围，提高了机器人抗倾覆性能，提高了机器人克服沟道、台阶与连续台阶的性能；需要 2 处动力。
c <sub>2</sub> 、c <sub>3</sub>	在摇杆的支腿处设置两固定履带，并在车轮端设置摆臂履带	夹角 $\varphi$ 为定值	除保留了 b <sub>2</sub> 、b <sub>3</sub> 机构的优点外，因摆臂的参与，其爬越沟道与翻越台阶的性能较 b <sub>2</sub> 、b <sub>3</sub> 机构明显增强；但需要 3 处动力。
		夹角 $\varphi$ 可控	保留了夹角 $\varphi$ 可控时的 b <sub>2</sub> 、b <sub>3</sub> 机构的优点，尤其是当 $\varphi = \pi$ 时，悬架具有双摆臂关节履带机构的优点，可大大提高克服沟道、台阶、连续台阶等典型障碍的性能；但需要 4 处动力。
d <sub>3</sub>	一支腿处为三角固定履带机构，一支腿处为关节履带机构		为 c <sub>3</sub> 机构的简化机构，虽其越障性能受到一定影响，但仍具有较好的越障性能。当 $\varphi$ 角可控时，其越障性能较 $\varphi$ 角固定时亦会大大增加。
d <sub>4</sub>	两支腿处均为三角固定履带机构，两条三角履带共用一条带轮		d <sub>4</sub> 机构为 d <sub>3</sub> 机构的简化，但因其具有特殊的构型，仍保持了 a 机构对地形的良好的适应性和良好的克服沟道、台阶、连续台阶等典型障碍的性能；夹角 $\varphi$ 固定时，只需要 1 处动力。
d <sub>5</sub>	两车轮间布置一条 W 形的履带机构		d <sub>5</sub> 为 d <sub>4</sub> 机构的一种简单的实现形式，采用一条履带，在改向轮的作用下构成 W 形，其特殊的构型使其具有良好的适应性和良好的克服沟道、台阶、连续台阶等典型障碍的性能，且只需要 1 处动力。
d <sub>6</sub> 、d <sub>7</sub>	两支腿处为两条独立三角固定履带机构		d <sub>6</sub> 机构为 c <sub>2</sub> 机构的简化，两条固定三角履带呈一个固定夹角布置，机构特点与 d <sub>4</sub> 、d <sub>5</sub> 机构相似。d <sub>7</sub> 机构为 d <sub>6</sub> 机构的非对称布置形式，其主履带长度不同，以长履带为后履带更有利于攀越台阶。



### 4 摇杆式履带机器人移动系统的运动特性分析与样机试验 (Kinetic characteristics analysis on the rocker-type tracked robot mobile system and its prototype test)

#### 4.1 抗倾覆性能

建立如图 6(a) 所示的以  $O_1$  为原点的坐标系  $xO_1y$ 。设履带悬架的质心为  $G_1(0,s)$ , 其质量为  $m_1$ ; 主车体的质心为  $G_2(m,n)$ , 质量为  $m_2$ ;  $O_1O_3$  长度为  $l_1$ ,  $O_2O_3$  长度为  $l_2$ ;  $O_1O_3$  与  $O_1O_4$  夹角为  $\varphi_1$ ,  $O_1O_3$  与  $O_2O_3$  夹角为  $\varphi_2$ , W 形履带的下部履带与  $O_3O_4$  夹角为  $\varphi_3$ 。左右两悬架与车体间没有相对摆动时, 车体的质心  $G_0$  的坐标为

$$\begin{cases} x_{G_0} = \frac{2m_1x_{G_1} + m_2x_{G_2}}{2m_1 + m_2} = \frac{m_2m}{2m_1 + m_2} \\ y_{G_0} = \frac{2m_1y_{G_1} + m_2y_{G_2}}{2m_1 + m_2} = \frac{m_2n - 2m_1s}{2m_1 + m_2} \end{cases}$$

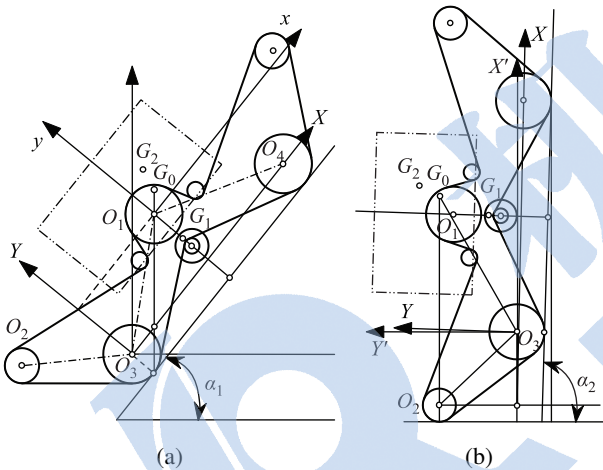


图 6 机器人移动平台的俯仰角

Fig.6 The pitch angle of the robot mobile platform

将坐标原点平移到以  $O_3$  为原点的坐标系  $XO_3Y$  中, 则车体的质心  $G_0$  的坐标为

$$\begin{cases} X_{G_0} = x_{G_0} + l_1 \cos \frac{\pi - \varphi_1}{2} \\ Y_{G_0} = y_{G_0} + l_1 \sin \frac{\pi - \varphi_1}{2} \end{cases}$$

当机器人整体仰角  $\alpha_1 \leq \arctan \frac{X_{G_0}}{Y_{G_0} + r_3}$  时, 机器人不会倾覆。

当机器人的前上履带轮着地时, 如图 6(b) 所示, 设机器人主车体的倾角为  $\alpha_2$ , 则坐标系  $X'O_2Y'$  下,  $G_0$  的纵坐标为

$$Y'_{G_0} = \sqrt{X_{G_0}^2 + Y_{G_0}^2} \sin(\arctan \frac{Y_{G_0}}{X_{G_0}} + \frac{\pi}{2} - \alpha_2)$$

当  $Y'_{G_0} \leq l_2 \sin[(\pi + \frac{\varphi_1}{2} - \varphi_2) + (\frac{\pi}{2} - \alpha_2)]$  时, 机器人

不倾覆, 即机器人仰角应满足以下条件:

$$\alpha_2 \leq \arctan \frac{l_2 \sin(\frac{\varphi_1}{2} - \varphi_2) + X_{G_0}}{l_2 \cos(\frac{\varphi_1}{2} - \varphi_2) - Y_{G_0}}$$

设机器人左右宽度为  $b$ , 单侧履带宽度为  $b_0$ , 则机器人最大横滚角  $\alpha_3$  为

$$\alpha_3 = \arctan \frac{b}{2Y_{G_0}}$$

因此机器人可以一侧履带处于水平面, 一侧履带处于台阶上行进, 如图 7 所示, 允许的台阶最大高度  $H_1$  为

$$H_1 = b \cos \alpha_3 = \frac{b^2}{\sqrt{b^2 + 4Y_{G_0}^2}}$$

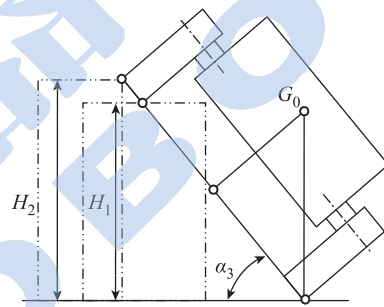


图 7 平台的横滚角

Fig.7 The roll angle of the robot

上方履带的内边缘处于台阶的上平面时, 机器人不易滑落, 此时台阶高度  $H_2$  为

$$H_2 = (b - b_0) \cos \alpha_3 = \frac{b(b - b_0)}{\sqrt{b^2 + 4Y_{G_0}^2}}$$

机器人的抗倾覆性能主要体现在下陡峭的斜坡和高度较大的台阶时, 尤其是下高度较大的台阶时。

实验室测得机器人样机触地轮着地时的最大俯仰角  $\alpha_1 = 58^\circ$ ; 上履带轮触地时的最大俯仰角  $\alpha_2 = 90^\circ$ , 最大横滚角  $\alpha_3 = 74^\circ$ , 如图 8 所示。

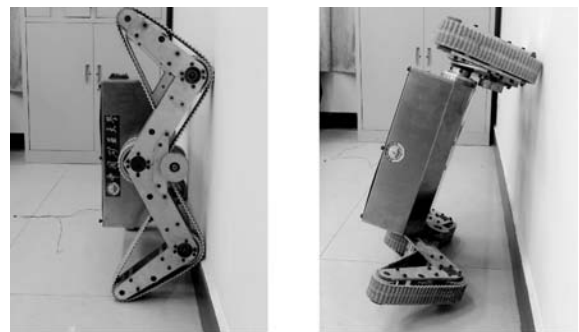


图 8 仰角与横滚角的测试

Fig.8 The pitch and roll angle tests

## 4.2 上下台阶

### (1) 攀爬台阶

机器人攀爬台阶有两个过程, 其一为 W 形履带的前外侧履带抬升越过台阶外角线(台阶突缘), 如图 9(a)、(b); 其二为 W 形履带的后内侧履带越过台阶外角线, 如图 9(c)、(d) 所示. W 形履带前端抬起较高, 可较容易地越过台阶外角线.

从几何约束的角度, 机器人爬台阶的性能会受到护轮的影响. 当台阶较高时, 台阶的外角线与护轮接触, 将影响台阶的攀爬. 图 9(c) 所示状态为机器人的一个临界状态. 此时, 台阶的上平面为履带的前触地轮与护轮的公切面, 设此时台阶的高度为  $H_1$ , 因此, 机器人可爬越的台阶的高度应小于  $H_1$ .

从运动学的角度, 机器人能否攀上台阶, 与机器人的质心位置有关. 只有机器人的质心越过了台阶的外角线, 才可完成攀越台阶的第二个阶段.

若在图 9(c) 所示状态时, 机器人的质心已经越过台阶的外角线, 则只要机器人具有足够的驱动力, 便可爬上台阶. 若在图 9(c) 所示状态时, 机器人的质心未越过台阶的外角线, 则随着机器人攀爬, 机器人的仰角增大, 前触地轮离开台阶上平面, 其质心逐渐上升, 会出现两种结果: (1) 机器人质心上升且跨过台阶外角线. 这种情况下, 机器人在自身重力的作用下, 以台阶外角线为支线, 向台阶上部平台旋转, 最终落至台阶上部平台, 则攀越台阶成功. (2) 机器人的仰角增大, 其质心逐渐上升, 但无法跨过台阶的外角线, 机器人则无法爬上台阶.

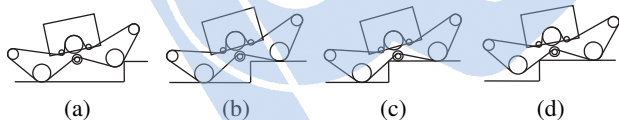


图 9 机器人攀爬台阶的过程

Fig.9 Step-climbing process of the robot

建立以  $O_3$  为原点, 以平行于 W 形履带的下部履带的直线为  $X''$  轴的坐标系  $X''O_3Y''$ , 如图 10 所示. 该坐标系可由图 6(a) 中  $XO_3Y$  坐标系旋转  $\varphi_3$  角获得, 其中  $\varphi_3$  为机器人水平放置时履带下部履带与水平面的夹角, 由履带悬架的几何关系获得, 此处不作推导.  $X''O_3Y''$  坐标系中机器人质心的坐标为

$$\begin{cases} X''_{G_0} = X_{G_0} \cos \varphi_3 - Y_{G_0} \sin \varphi_3 \\ Y''_{G_0} = X_{G_0} \sin \varphi_3 + Y_{G_0} \cos \varphi_3 \end{cases}$$

机器人的重力线(过质心的竖直线)恰好能通过台阶的外角线时, 机器人达到攀越台阶的临界状态, 如图 10 所示. 设机器人 W 形履带的下部履带与

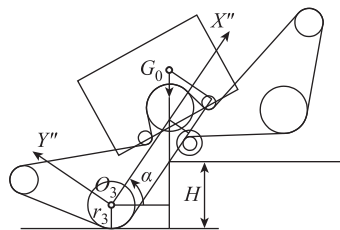


图 10 机器人攀爬台阶外角线

Fig.10 Nosing-climbing of the robot

水平面的夹角为  $\alpha$ , 台阶的高度为  $H$ , 可建立如下函数:

$$\begin{aligned} H(\alpha) &= r_3 + (X''_{G_0} - Y''_{G_0} \tan \alpha) \sin \alpha - \frac{r_3}{\cos \alpha} \\ &= r_3 + X''_{G_0} \sin \alpha + Y''_{G_0} \cos \alpha - \frac{Y''_{G_0} + r_3}{\cos \alpha} \end{aligned}$$

式中,  $r_3$  为触地轮半径, 含履带厚度.

上式表示: 保证机器人的重心线始终通过台阶的外角线, 台阶高度  $H$  随  $\alpha$  增大而变化; 当  $H$  取最大值时, 即为机器人能够攀爬的台阶的最大高度.

$H(\alpha)$  对  $\alpha$  求 1 次、2 次偏导得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial \alpha} &= X''_{G_0} \cos \alpha - Y''_{G_0} \sin \alpha - \frac{(Y''_{G_0} + r_3) \sin \alpha}{\cos^2 \alpha} \\ \frac{\partial^2 H}{\partial \alpha^2} &= -X''_{G_0} \sin \alpha - Y''_{G_0} \cos \alpha - (Y''_{G_0} + r_3) \cdot \\ &\quad \frac{\sin^2 \alpha + \cos \alpha}{\cos^3 \alpha} \end{aligned}$$

当  $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$  时,  $\frac{\partial^2 H}{\partial \alpha^2} < 0$ , 则  $H(\alpha)$  存在最大值. 当  $\frac{\partial H}{\partial \alpha} = 0$  时,  $H$  有最大值  $H_2$ , 即为机器人可以攀越台阶高度的最大值, 对应的  $\alpha$  值为  $\alpha_{\max}$ .

综上所述, 机器人可攀越的台阶的最大高度为  $H_{\max} = \min(H_1, H_2)$ .

机器人攀爬连续台阶的过程与攀爬台阶的过程相似, 但攀爬不同跨度与高度的阶梯时, 机器人的动作也不尽相同, 此处不作详细分析. 机器人攀爬连续阶梯的一般过程如图 11 所示.



图 11 机器人攀爬连续阶梯过程的视频截图

Fig.11 Screen-capture of successive stair-climbing process

### (2) 下台阶

当台阶高度不大于图 8 中的  $H_{\max}$  时, 机器人下台阶过程如图 9(d) ~ (a) 的过程. 当台阶高度大于  $H_{\max}$  时, 机器人平台以护轮为支点向台阶下方翻转, 当台阶高度较小, 护轮未脱离台阶边线时, 机器人

的前触地履带轮或前部履带上部履带轮着地，机器人继续前移完成下台阶动作；当台阶高度较大时，护轮脱离台阶边缘线时，机器人向下滑落，其前上履带轮着地，即为图 6(b) 所示的情况，若机器人的倾角小于  $\alpha_2$  时，机器人不易发生倾覆。机器人爬下高度较大台阶的过程较为复杂，较理想的过程如图 12 所示。虽然机器人平台可以爬下较高的台阶，但高度过大，机器人会受到较大的冲击。在实验室内，进行了下 450 mm 高台阶的试验，视频截图见图 13。

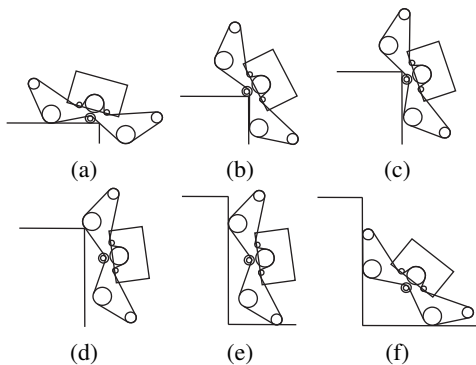


图 12 机器人下台阶的过程

Fig.12 Step-climbing down process of the robot



图 13 机器人下 450 mm 高台阶过程的视频截图

Fig.13 Screen-capture of climbing down a 450 mm-high step

当台阶高度较大且小于图 7 所示的  $H_1$  时，机器人不会发生侧翻的情况下，可采用其中一侧履带先下台阶，其上履带轮触地后另一侧履带再下的方法，这样可避免机器人受到较大冲击。此过程见图 14。

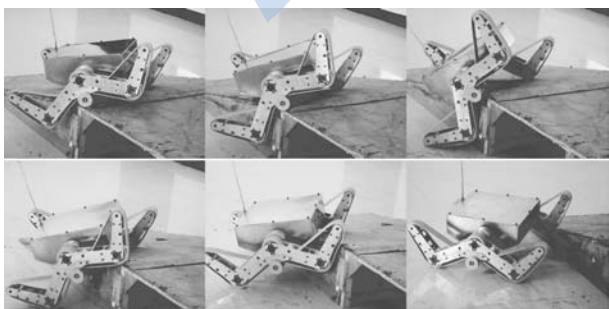


图 14 机器人两侧履带悬架依次下台阶的视频截图

Fig.14 Screen-capture of the robot's track suspensions climbing down the step successively

### 4.3 爬越沟道

图 15(a) ~ (f) 展示了机器人移动平台的两侧履带同时跨越沟道的过程。图 15(e) 为机器人越沟道时的一个过渡状态，此时机器人 W 形履带的后内外两侧履带均与沟道边缘接触，机器人继续前进时，W 形履带的后外侧履带将脱离沟道边缘。机器人能够爬越沟道的必要条件是机器人的质心在图 15(e) 位置时需越过沟道的边缘，还应考虑沟道与机器人间的几何约束关系。图 15(e) ~ (f) 所示的机器人爬越沟道的过程类似爬越台阶的过程。

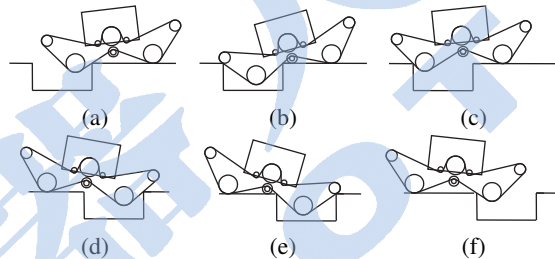


图 15 机器人跨越沟道的过程

Fig.15 Ditch-crossing process of the robot

若在图 15(e) 的状态时机器人质心已越过沟道边缘，则机器人前移可越过沟道。若沟道足够深，机器人跨越沟道时行走机构与沟底不接触，则机器人爬越沟道的宽度还受几何约束的限制，有以下 2 种情况：

(1) 当底部触地轮与中间护轮的公切线  $AB$  的延长线在前端上部带轮轴心  $O_2$  的下方时，机器人可跨越的沟道的最大宽度为底部触地轮与中间护轮的公切线  $AB$  的延长线与两段履带的两交点间的长度  $l_{CD}$ ，如图 16(a) 所示。

(2) 当底部触地轮与中间护轮的公切线  $AB$  的延长线在前端上部带轮轴心的上方时，机器人可跨越的沟道的最大宽度为过前端轮轴心  $O_2$  的触地轮的切线  $O_2A$  与两段履带的两交点间的长度  $l_{CD}$ ，如图 16(b) 所示。

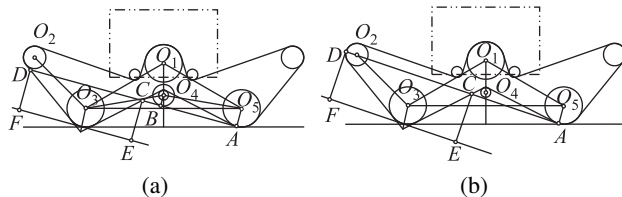


图 16 机器人跨越沟道的宽度

Fig.16 The width of the ditch that robot can cross

图 16(a)、(b) 中的  $l_{CD}$  均可由机器人悬架的几何尺寸求得，文中不作推导。

当机器人在图 15(e) 所示的过渡位置时, 护轮与沟道不发生干涉, 且重心线正好通过沟道的边缘线, 如图 17 所示. 此状态即为机器人攀爬台阶的临界状态,  $W$  形履带的后内侧履带与水平面夹角为  $\alpha_{\max}$ , 触地轮中心  $O_3$  距离沟道上平面的间距为  $H_2 - r_3$ , 设触地轮两侧的履带夹角为  $\theta$ , 由几何关系可得沟道的宽度为  $L$ :

$$L = (H_2 - r_3) \cdot (\cot \alpha_{\max} + \cot(\pi - \theta - \alpha_{\max})) + \frac{r_3}{\sin \alpha_{\max}} + \frac{r_3}{\sin(\pi - \theta - \alpha_{\max})}$$

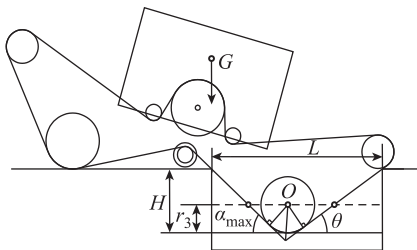


图 17 沟道上边缘的爬越

Fig.17 Crossing the top edge of ditch

沟道较浅, 深度小于  $H_{\max}$  时, 机器人跨越沟道时机器人行走机构与沟底接触, 机器人爬越沟道的过程可分解为下、上台阶的过程.

在实验室内进行了 260 mm 宽沟道的爬越试验, 试验的视频截图如图 18 所示.



图 18 跨越 260 mm 宽沟道过程的视频截图

Fig.18 Screen-capture of crossing a 260 mm-wide ditch

#### 4.4 适应不平整地面的性能

机器人左右履带悬架可被动地随地形的变化而摆动, 差动装置将机器人左右摇杆式悬架的摆角进行线性平均, 并转化为机器人主车体的摆角输出. 这样, 降低了机器人主车体的摆幅, 有效地减小了地形变化对主车体位姿的影响, 因此机器人具有较好的移动稳定性和被动适应地形的性能. 图 14 为机器人履带悬架依次下台阶的过程, 该过程充分地体现了机器人被动适应地形的性能.

为了检验机器人适应不平整地面的性能, 在室外的零乱的建筑垃圾上进行了试验, 为防止机器人

被卡阻, 安装了附加车轮. 试验情况如图 19 所示. 机器人表现了优良的地形适应性.



图 19 机器人克服非结构的不平整地形的视频截图

Fig.19 Screen-capture of the robot surmounting unstructured uneven terrain

## 5 结论 (Conclusion)

(1) 将摇杆式机器人与履带式机器人相结合, 把履带行走机构引入摇杆式悬架中, 推衍出了摇杆式履带悬架的基本构型.

(2) 在分析了摇杆式履带悬架特点的基础上, 结合煤矿井下非结构化的地形环境与爆炸性的气体环境, 选择一种摇杆式对称  $W$  形的固定履带悬架作为研究对象, 并制作了机器人样机.

(3) 分析了摇杆式  $W$  形履带机器人的抗倾覆、攀爬台阶、下台阶、跨越沟道等越障特性, 并进行了试验测试; 性能分析与样机试验表明, 该机器人移动平台不但具有摇杆式机器人被动地适应复杂的非结构环境的良好的自适应能力, 又具有履带式机器人良好的越障性能, 机器人样机可跨越 260 mm 宽沟道, 攀爬 100 mm 高台阶, 下 450 mm 高的台阶.



图 20 采用  $d_7$  悬架机构的机器人样机

Fig.20 Robot prototype using  $d_7$  suspension mechanism

(4)  $d_5$  悬架履带下方的改向轮与护轮结构影响了机器人的越障性能; 可采用不需改向轮的  $d_4$ 、 $d_6$  或  $d_7$  悬架机构, 图 20 所示的机器人样机采用了  $d_7$  悬架机构, 在很大程度上提高了机器人的越障性能.

## 参考文献 (References)

- [1] Hayati S, Volpe R, Backes P, et al. The Rocky 7 rover: A Mars sciencecraft prototype[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1997: 2458-2464.
- [2] Lindemann R A, Voorhees C J. Mars exploration rover mobility assembly design, test and performance[C]//IEEE International



- Conference on Systems, Man and Cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 450-455.
- [3] Miller D P, Tan L, Swindell S. Simplified navigation and traverse planning for a long-range planetary rover[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 2436-2441.
- [4] Mine Safety and Health Administration (MSHA). Mine rescue robot[EB/OL]. [2009-03-04]. <http://www.msha.gov/sagomine/robot.asp>.
- [5] iRobot Corporation. Small unmanned ground vehicle (SUGV)[EB/OL]. [2009-03-04]. <http://www.irobot.com/sp.cfm?pageid=219,2008-05-12>.
- [6] Chiba Institute of Technology. Hibiscus, The New Rescue Robot[EB/OL]. (2006-06-05) [2009-03-04]. <http://www.techfresh.net/hibiscus-the-new-rescue-robot>.
- [7] Cho C, Lee W, Kang S, et al. Uneven terrain negotiable mobile platform with passively adaptive double tracks and its application to rescue missions[J]. *Advanced Robotics*, 2005, 19(4): 459-475.
- [8] 李允旺, 葛世荣, 朱华. 摇杆式四轮机器人: 中国, 201217390[P]. 2009-04-08.
- Li Yunwang, Ge Shirong, Zhu Hua. The rocker-type four-wheel robot: China, 201217390[P]. 2009-04-08.
- [9] 李允旺, 葛世荣, 朱华. 摇杆式轮履结合机器人: 中国, 201186680[P]. 2009-01-28.
- Li Yunwang, Ge Shirong, Zhu Hua. The rocker-type wheel-track robot: China, 201186680[P]. 2009-01-28.
- [10] 李允旺, 葛世荣, 朱华. 摇杆式移动机器人的齿轮式差动机构研究[J]. *机器人*, 2009, 31(3): 235-241.
- Li Yunwang, Ge Shirong, Zhu Hua. Gear-type differential mechanisms for rocker-type mobile robots[J]. *Robot*, 2009, 31(3): 235-241.

#### 作者简介:

- 李允旺 (1980-), 男, 博士生. 研究领域: 救灾机器人, 救援技术与装备, 矿山机械.
- 葛世荣 (1963-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 救灾机器人, 复合材料, 生物摩擦学.
- 朱华 (1961-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 救灾机器人, 救援技术与装备, 摩擦学.

(上接第 24 页)

- [11] Qian K, Ma X D, Dai X Z. Simultaneous robot localization and person tracking using Rao-Blackwellised particle filters with multi-modal sensors[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 3452-3457.
- [12] Szczerba R J, Chen D Z, Uhran J J. A grid-based approach for finding conditional shortest paths in an unknown environment[EB/OL]. [2009-01-20]. <http://www.cse.nd.edu/Reports/1994/tr294234.ps>, 2007.
- [13] Minguez J, Montano L. Sensor-based robot motion generation in unknown, dynamic and troublesome scenarios[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, 52(4): 290-311.
- [14] Spaan M T J, Vlassis N. Perseus: Randomized point-based value iteration for POMDPs[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2005, 24: 195-220.

#### 作者简介:

- 钱堃 (1982-), 男, 博士生. 研究领域: 服务机器人导航, 人机交互.
- 马旭东 (1962-), 男, 教授. 研究领域: 网络化机器人, 分布式控制系统, 实时系统软件.
- 戴先中 (1954-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 复杂控制理论, 机器人控制, 电力系统控制, 测量与信号处理.