

四履带双摆臂机器人越障机理及越障能力

李允旺, 葛世荣, 朱 华, 刘 建

(中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 为发挥四履带双摆臂机器人的最佳越障性能, 本文从运动学的角度, 在固定双履带机器人越障机理的基础上, 分析了四履带双摆臂机器人克服台阶、斜坡、沟道等典型障碍的运动机理及其最大越障能力, 重点研究了四履带双摆臂机器人正向和反向两种攀越台阶方式的运动机理及其最大越障能力. 以 CUMT-II 型煤矿探测机器人样机为例, 绘制了机器人仰角、摆臂摆角与跨越台阶高度的 3 维关系图, 以及斜坡坡度与摆臂摆角关系曲线, 并求出了相应的最大越障能力的理论值, 与实验室实测数据进行了对比分析. 本文推导出机器人的最佳越障性能及对应的质心和摆臂的位置, 可为机器人越障时质心位置的控制提供理论依据.

关键词: 履带式机器人; 摆臂; 质心; 越障; 攀越台阶

中图分类号: TP24

文献标识码: A

Obstacle-surmounting Mechanism and Capability of Four-track Robot with Two Swing Arms

LI Yunwang, GE Shirong, ZHU Hua, LIU Jian

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

Abstract: For performing the best obstacle-surmounting capability of four-track robot with two swing arms, obstacle-surmounting mechanism of the four-track robot with two swing arms and its capabilities of surmounting obstacles, including step and slope-climbing, and channel-crossing, are analyzed from the viewpoint of kinematics based on the obstacle-surmounting mechanism of the fixed two-track robot. Its motion mechanism and maximal obstacle-surmounting capability of step-climbing forward and backward are mainly analyzed. Taking CUMT-II coal mine exploring robot prototype as an example, three dimensional relationship diagrams of the step height, the elevation angle and arms' swing angle are drawn and the relation curves of slope gradients and the swing arms' swing angles are drawn. The theoretical value of maximal obstacle-surmounting capabilities of the prototype are obtained and compared with the test results. And the best obstacle-surmounting performance and the corresponding centroid and swing arm positions are deduced. This paper would provide theoretical basis for centroid position control in obstacle-surmounting process.

Keywords: tracked robot; swing arm; centroid; obstacle-surmounting; step-climbing

1 引言 (Introduction)

履带式机器人具有良好的越障能力和地面适应性, 已得到广泛的应用. 典型的履带式机器人可分为固定履带式机器人和摆臂履带式机器人. 摆臂履带式机器人根据摆臂的数量可分为四履带双摆臂机器人和六履带四摆臂机器人. 美国 iRobot 公司生产的 Packbot 系列机器人, 采用了 2 条主履带和 2 条摆臂履带的摆臂履带形式^[1]. 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摆臂履带形式, 且 2 主履带较宽, 将机器人主体部分包裹, 形成全身履带器

人, 可以在复杂的环境中行进, 不易翻倒与卡阻^[2]. 机器人摆臂的导向、支撑及对质心位置的调节作用, 使其具有灵活的越障方式与良好的越障性能. 已有不少文献对摆臂机器人的运动特性及其稳定性进行研究, 文 [3] 分析一种履带腿式机器人在各种地形下的越障特性, 文 [4] 介绍了一种六履带机器人的越障运动控制.

研究摆臂履带机器人的越障机理与越障能力, 有利于对机器人的越障运动进行操作与控制, 可保证其运行稳定性和最佳越障性能. 本文从运动学的角度, 在固定双履带机器人越障机理的基础上, 分

析四履带双摆臂机器人对台阶、斜坡、沟道等典型障碍的越障运动机理, 求出机器人最佳越障性能及对应的质心和摆臂的位置, 为机器人越障时质心位置的控制提供理论依据. 在实验室内对四履带双摆臂机器人样机的最佳越障性能进行测试, 与理论值进行了比较.

2 固定双履带机器人越障机理 (Obstacle-surmounting mechanism of the fixed two-track robot)

2.1 典型的障碍地形^[5]

履带式移动机器人面临的环境多为非结构地形环境, 非结构地形环境是多样的、复杂的三维地形, 包括天然形成的起伏、崎岖地形, 以及人工修建的坡路、阶梯、沟道等人工地形. 影响或阻止机器人平台正常移动的地形、地物称为障碍地形. 而很多地形具有相近的几何构形特征, 为了便于分析与表述, 通常将障碍地形简化为斜坡、台阶、连续台阶、凸台、沟道等具有典型特征的地形.

表征斜坡的几何构形特征是坡度和坡向, 坡度是高度的最大变化率, 坡向是最大变化率的区域方向, 其关键边界线为斜坡底部与顶部转折线. 表征台阶的几何构形特征是高度, 其关键边界线为台阶外角线. 表征连续台阶的几何构形特征是高度和台阶跨度, 其关键边界线为台阶内、外角线. 表征凸台的几何构形特征是高度和宽度, 其关键边界线为凸台两对内、外角线. 表征沟道的几何构形特征是跨度和深度, 其关键边界线为沟道两侧边缘线.

2.2 固定双履带机器人的越障机理

机器人克服障碍, 是指机器人利用其行走机构驱使机器人移动, 使其质心越过障碍的关键边界线, 在此过程中机器人不发生倾覆, 不受障碍卡阻, 能继续保持机器人的稳定姿态与移动能力. 对于履带机器人, 可将其攀越凸台的过程分解为上台阶和下台阶的过程, 将其攀爬连续台阶的过程根据其几何构形特征的尺寸简化为攀爬斜坡或依次攀爬台阶的情况. 因此, 只需着重分析机器人攀爬台阶、斜坡以及跨越沟道的越障运动机理. 为了便于研究履带机器人的越障机理, 首先对固定双履带机器人的越障机理进行研究.

建立图 1 所示的以后履带轮轴心 O_1 为原点、以 O_1O_2 为 x 轴正向的坐标系, 设机器人履带轮半径为 R (含履带厚度), 机器人宽度为 b , 机器人质心的坐标为 $G(l, h)$, 且 $0 < l < l_0$ (l_0 为 O_1O_2 的长度), $h > -R$.

(1) 攀爬台阶^[6]

机器人移动平台攀越台阶, 首先使履带机构前端搭靠在台阶的外角线上 (本文不对固定双履带机器人的这一过程进行研究), 当履带机构前端跨越台阶的外角线后, 随着机器人攀爬, 机器人的仰角增大, 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, 以台阶外角线为支链, 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. 机器人则无法跨上台阶, 甚至可能反向翻转, 则攀越台阶失败.

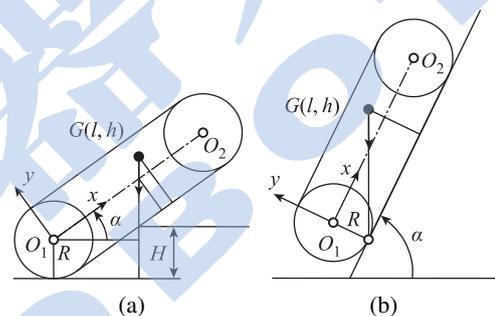


图 1 履带式行走机构攀爬台阶、斜坡运动

Fig.1 Step and slope-climbing of the tracked locomotion mechanism

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 1(a) 所示. 设机器人的仰角为 α , 台阶的高度为 H , 可建立如下函数:

$$\begin{aligned} H(l, h, \alpha) &= R + (l - h \tan \alpha) \sin \alpha - \frac{R}{\cos \alpha} \\ &= R + l \sin \alpha + h \cos \alpha - \frac{h + R}{\cos \alpha} \end{aligned} \quad (1)$$

函数 (1) 的物理意义为: 若 R 、 l 、 h 确定, 保证机器人的重心线始终通过台阶的外角线, 台阶高度 H 随机器人平台仰角 α 增大而变化; H 的最大值即为机器人能够攀爬的台阶的最大高度.

因为要保证机器人履带与台阶外角线接触, α 应在 $(0, 0.5\pi)$ 上取值, 当机器人质心坐标为参变量时, $H(l, h, \alpha)$ 分别对 l 、 h 求偏导可得:

$$\frac{\partial H}{\partial l} = \sin \alpha > 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial h} = -\sin \alpha \tan \alpha < 0 \quad (3)$$

可见, $H(l, h, \alpha)$ 为关于 h 的减函数, 关于 l 的增函数. 因此机器人移动平台的质心偏前、偏下时更有利于机器人跨越台阶等障碍.

对 $H(l, h, \alpha)$ 求关于 α 的 1 次、2 次偏导得：

$$\frac{\partial H}{\partial \alpha} = l \cos \alpha - h \sin \alpha - \frac{(h+R) \sin \alpha}{\cos^2 \alpha} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial \alpha^2} = -l \sin \alpha - h \cos \alpha - (h+R) \cdot \frac{\sin^2 \alpha + \cos \alpha}{\cos^3 \alpha} \quad (5)$$

当 $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$ 时, $\frac{\partial^2 H}{\partial \alpha^2} < 0$, 所以 $H(l, h, \alpha)$ 存在最大值. 当 $\frac{\partial H}{\partial \alpha} = 0$ 时, H 有最大值 H_{\max} , H_{\max} 即为 R 、 l 、 h 确定时机器人可以攀越台阶高度的最大值. 设 α_{\max} 为机器人爬台阶时保证机器人不翻转的最大仰角, 则

$$\alpha_{\max} = \arcsin \frac{h}{\sqrt{l^2 + h^2}} \quad (6)$$

当台阶高度大于 H_{\max} 时, 机器人将无法攀越台阶, 若 $0 < \alpha_{\max} \leq 0.5\pi$, $\alpha > \alpha_{\max}$, 则机器人平台履带

会脱离台阶外角线, 反向翻转、倾覆; 若 $\alpha_{\max} > 0.5\pi$, 则机器人攀爬台阶时履带会贴住台阶竖直面, 但不发生反向倾覆.

为了了解 l 、 h 、 α 对攀越台阶高度最大值的影响, 将 l 、 h 按表 1 中初始参数分别取值, 在 $(0, 70^\circ)$ 内对 α 取值, 可以得出图 2 所示的不同曲线, 曲线中标出了台阶的最大高度 H_{\max} 及对应仰角 α . 从曲线组与表 1 数据可见, 机器人攀越台阶的最大高度随机器人质心向前、向下变化而增大.

(2) 攀爬斜坡

在斜坡上缓慢移动时, 主要考虑机器人的静力学稳定性. 机器人不发生倾覆允许的最大俯仰角为 α_{\max} , 最大横滚角为 ψ_{\max} , 因此要求斜坡的坡度 α 和坡向 ψ 满足:

$$\alpha \leq \alpha_{\max} = \arctan \frac{l}{h+R} \quad (7)$$

$$\psi \leq \psi_{\max} = \arctan \frac{b}{2h} \quad (8)$$

表 1 质心位置对应的台阶的最大高度与仰角

Tab.1 The maximum step heights and the elevation angles corresponding to various centroid positions

初始参数/mm			台阶最大高度 H_{\max} /mm	对应仰角 $\alpha/^\circ$	对应图 2 中的曲线
R	l	h			
60	240	80	93.1	38.1	C1
60	260	60	117.1	42.7	C2
60	280	40	145.4	47.4	C3
60	300	20	178.8	52.2	C4
60	320	0	218.2	57.3	C5

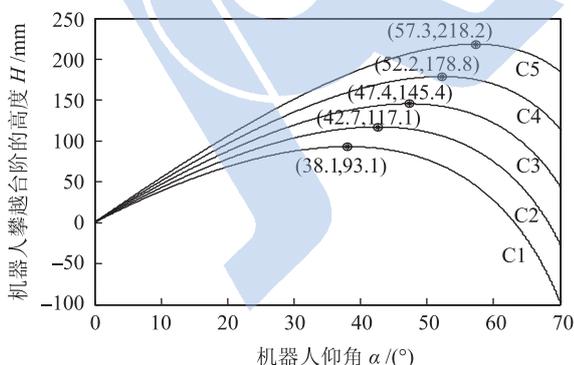


图 2 台阶高度与机器人仰角的关系曲线

Fig.2 Relation curves of the step heights and robot elevation angles

(3) 跨越沟道

机器人跨越沟道时, 要求其质心在越过近侧沟道边缘线时, 机器人履带前端搭接在沟道的远侧边缘线上, 即 $D \leq l_0 - l$; 当机器人的质心越过远侧边缘线时, 要求机器人履带后端不得脱离近侧边缘线,

即 $D \leq l$. 则机器人可以跨越的沟道的宽度 D 应满足以下条件:

$$D \leq \min(l, l_0 - l) \quad (9)$$

3 四履带双摆臂履带机器人的越障机理 (Obstacle-surmounting mechanism of four-track robot with two swing arms)

3.1 摆臂履带式机器人的质心分布

建立图 3 所示的以机器人后履带轮轴心为坐标原点的坐标系 xO_1y , 设机器人主履带部分前后两履带轮 O_1O_2 的间距为 l_0 , 主体部分质量为 m_1 , 质心 G_1 的坐标为 (l_1, h_1) , 在攀越典型障碍时, 需两摆臂同步摆动, 因此设两摆臂的质量为 m_2 , 质心为 G_2 , 处于摆臂中心线 O_2O_3 上, 距离前履带轮轴心 O_2 的长度为 l_2 , 设摆臂两履带轮轴心 O_2 、 O_3 的间距为 l_3 , 摆臂的摆角为 θ , 且 $\theta \in [0, 2\pi]$, 设主体履带轮半径为 R , 摆臂前履带轮半径为 r , 均含履带厚度, 机器

人宽度为 b , 则机器人的质心 $G(x_G, y_G)$ 的坐标为:

$$\begin{cases} x_G = \frac{m_1 l_1 + m_2 l_0}{m_1 + m_2} + \frac{m_2 l_2}{m_1 + m_2} \cos \theta \\ y_G = \frac{m_1 h_1}{m_1 + m_2} + \frac{m_2 l_2}{m_1 + m_2} \sin \theta \end{cases} \quad (10)$$

摆臂履带机器人的质心满足以下关系:

$$\left(x_G - \frac{m_1 l_1 + m_2 l_0}{m_1 + m_2}\right)^2 + \left(y_G - \frac{m_1 h_1}{m_1 + m_2}\right)^2 = \left(\frac{m_2 l_2}{m_1 + m_2}\right)^2 \quad (11)$$

机器人的质心随着摆臂摆角 θ 的变化的轨迹是以 $(\frac{m_1 l_1 + m_2 l_0}{m_1 + m_2}, \frac{m_1 h_1}{m_1 + m_2})$ 为圆心 O 、以 $r_O = \frac{m_2 l_2}{m_1 + m_2}$ 为半径的圆.

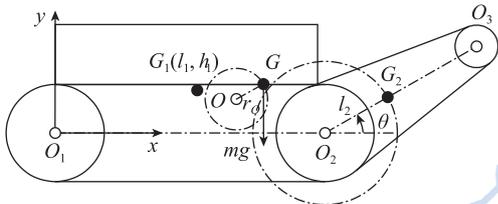


图3 机器人的质心轨迹
Fig.3 The centroid trajectory of the robot

3.2 攀爬台阶

(1) 机器人正向攀越台阶

四履带双摆臂机器人正向攀越台阶的过程如图4(a)~(f)所示, 机器人借助摆臂的初始摆角, 在履带机构的驱动下, 使其主履带前端搭靠在台阶的外角线上, 机器人继续移动, 驱动摆臂顺时针摆动, 当机器人重心线越过台阶外角线时, 机器人以该外角线为支线向台阶上平面翻转, 机器人成功地攀越台阶.

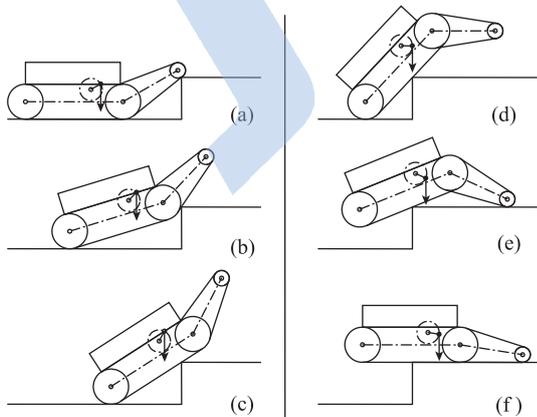


图4 机器人正向攀爬台阶的过程
Fig.4 Forward step-climbing process of the robot

图5为机器人质心跨过台阶外角线时的状态图. 当机器人的质心位置为过台阶外角线的垂线与

机器人的质心轨迹相切时的切点时, 机器人攀爬台阶最便利. 因此, 机器人摆臂中心线 $O_2 O_3$ 保持水平时, 机器人攀爬台阶的高度存在最大值, 此时, 摆臂的摆角 θ 与机器人仰角 α 存在以下关系:

$$\alpha + \theta = 2\pi \quad (12)$$

将 $l = x_G, h = y_G$ 代入式 (1) 得式 (13), 可以求出机器人攀爬台阶的最大高度 $H_{\max}(\theta, \alpha)$.

$$H(\theta, \alpha) = R + x_G \sin \alpha + y_G \cos \alpha - \frac{y_G + R}{\cos \alpha} \quad (13)$$

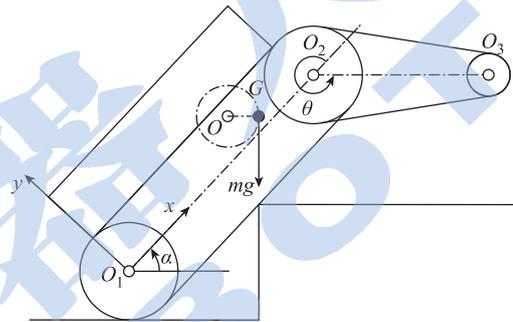


图5 正向攀越台阶时机器人质心跨过台阶外角线
Fig.5 The robot centroid's nosing-crossing in forward step-climbing process

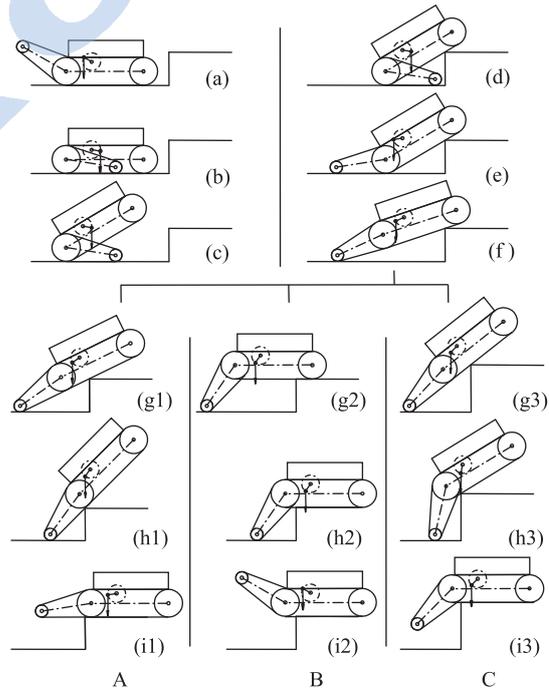


图6 机器人反向攀爬台阶的过程
Fig.6 Backward step-climbing process of the robot

(2) 机器人反向攀越台阶

当机器人质心位置偏后且摆臂较长但不超过主履带长度时, 可以采用反向攀越台阶的方法. 采取某种操作使机器人的主履带的后端搭靠在台阶的外

角线上, 摆臂旋转支撑机器人主车体, 并在履带行走机构的驱动下, 使机器人的质心抬升, 当机器人重心线越过台阶的外角线时, 可成功地攀越台阶。

当机器人的摆臂短于机器人主履带时, 可采用图 6(a) ~ (f) 所示的方式, 首先让机器人的主履带靠搭在台阶的外角线上, 再根据具体情况, 从 A、B、C 中选择一种合适的攀爬方式。

采用反向攀越台阶的方法首先要保证机器人主体部分可以以摆臂前履带轮 O_3 为支点, 以 O_2 为旋转中心旋转, 使得机器人后履带轮 O_1 抬起。如图 7 所示, 建立以机器人后履带轮抬起前的轮心位置为原点的坐标系 XO_1Y 。设机器人后履带轮抬起时, 机器人 O_1O_2 与水平面的夹角为 φ ($0 \leq \varphi \leq \pi$), 即机器人主车体的俯角, 设摆臂履带与中心线 O_2O_3 的夹角

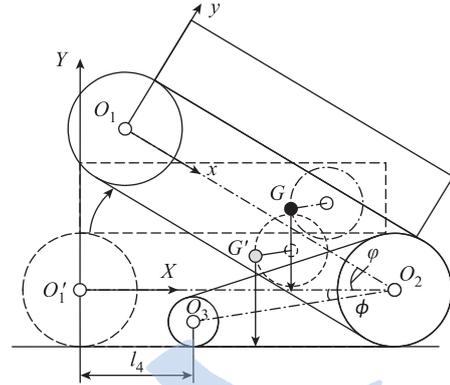


图 7 机器人主体部分摆起的状态

Fig.7 Swing-up of the main part of the robot

为 ϕ , 其中 $\phi = \arcsin \frac{R-r}{l_3}$, 可以求出坐标系 XO_1Y 下机器人质心 G 的坐标:

$$\begin{cases} X_G = \frac{m_1 l_0 + m_2 (l_0 - l_2 \cos \phi)}{m_1 + m_2} + \frac{m_1 [h_1 \sin \phi - (l_0 - l_1) \cos \phi]}{m_1 + m_2} \\ Y_G = \frac{m_2 l_2 \sin \phi}{m_1 + m_2} + \frac{m_1 [h_1 \cos \phi + (l_0 - l_1) \sin \phi]}{m_1 + m_2} \end{cases} \quad (14)$$

$$\left(X_G - \frac{m_1 l_0 + m_2 (l_0 - l_2 \cos \phi)}{m_1 + m_2} \right)^2 + \left(Y_G - \frac{m_2 l_2 \sin \phi}{m_1 + m_2} \right)^2 = \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} \sqrt{(l_0 - l_1)^2 + h_1^2} \right)^2 \quad (15)$$

可见, 在新坐标系 XO_1Y 下, 机器人摆臂转动时, 机器人的质心轨迹是以 $\left(\frac{m_1 l_0 + m_2 (l_0 - l_2 \cos \phi)}{m_1 + m_2}, \frac{m_2 l_2 \sin \phi}{m_1 + m_2} \right)$ 为圆心、以 $\frac{m_1}{m_1 + m_2} \sqrt{(l_0 - l_1)^2 + h_1^2}$ 为半径的圆。

因 $\frac{dX_G}{d\varphi} = \frac{m_1 [h_1 \cos \varphi + (l_0 - l_1) \sin \varphi]}{m_1 + m_2} > 0$, 所以 $X_G(\varphi)$ 随 φ 的增大而增大, 因此只要满足 $X_G(\varphi = 0) = \frac{m_1 l_1 + m_2 l_0}{m_1 + m_2} - \frac{m_2 l_2}{m_1 + m_2} \cos \phi > l_4$, 其中 $l_4 = l_0 - l_3 \cos \phi$, 则机器人主体部分便能以摆臂前轮 O_3 为支点, 将机器人后履带轮 O_1 抬起。若 $X_G(\varphi = 0) < l_4$, 则机器人主体部分以后履带轮 O_1 为支点, 将机器人前履带轮 O_2 抬起。机器人后履带轮 O_1 抬起后, 随着 φ 增大, 质心向前偏移, 只要 $X_G \leq l_0$, 机器人平台就不会绕 O_2 翻转倾覆, $X_G = l_0$ 时可求出 φ 的临界值 φ_1 。

$$\frac{m_1 l_0 + m_2 (l_0 - l_2 \cos \phi)}{m_1 + m_2} + \frac{m_1 [h_1 \sin \phi - (l_0 - l_1) \cos \phi]}{m_1 + m_2} = l_0 \quad (16)$$

$$m_1 h_1 \sin \phi_1 - m_1 (l_0 - l_1) \cos \phi_1 = m_2 l_2 \cos \phi$$

设 $k_1 = m_1 h_1$, $k_2 = -m_1 (l_0 - l_1)$, $k_0 = m_2 l_2 \cos \phi$, 因 $0 \leq \varphi_1 < \pi$, 则

$$\varphi_1 = \arcsin \frac{k_1 k_0 + k_2 \sqrt{k_2^2 + k_1^2 - k_0^2}}{k_1^2 + k_2^2} \quad (17)$$

机器人主体摆起后, 只有其主履带在水平面上的投影不小于摆臂在水平面上的投影时, 机器人主履带才能搭靠在台阶上。当两者相等时, 可求出倾角允许的最大值 φ_2 , 则有

$$\begin{aligned} l_0 \cos \varphi_2 + R &= l_3 \cos \phi + r \\ \varphi_2 &= \arccos \frac{l_3 \cos \phi + r - R}{l_0} \end{aligned} \quad (18)$$

机器人倾角 φ 取 $\varphi_{\min} = \min(\varphi_1, \varphi_2)$ 时, 机器人主履带能搭靠在其外角线上的台阶的最大高度为 $H_S = R + l_0 \sin \varphi_{\min}$ 。若台阶存在台阶立板, 当台阶高度大于 H_S 时, 机器人的主履带会靠在台阶立板上, 在履带机构的驱动下, 机器人主履带仍可攀爬至台阶的外角线上, 实现攀越台阶的动作。若台阶为无立板台阶, 则采用反向攀越的方法只能攀越高度小于 H_S 的台阶。一旦机器人主履带搭靠在台阶外角线上, 根据台阶高度, 将有 3 种攀爬方法:

(1) 主履带与摆臂履带成一条线, 采用类似固定履带的攀爬方式, 靠机器人的重心线越过外角线, 翻转至台阶上部平台, 此过程如图 6A 所示。此时机器人履带总长度为 $L = l_0 + l_3 \cos \phi$, 将 $l = l_0 + l_3 \cos \phi - x_G$, $h = y_G + l_3 \sin \phi$, $R = r$ 代入式 (1) 可求出机器人克服的台阶的最大高度 H_{\max} 。

(2) 当台阶的高度小于或等于摆臂的长度 ($H \leq l_3 + r - R$) 时, 转动摆臂, 可在保证机器人摆臂不离地的情况下使机器人主车体平稳地放平在台阶的上

部平台。当机器人主车体平放在台阶的上部平台后，机器人运动保证机器人质心移动过台阶外角线，机器人攀越台阶成功，如图 6B 所示。这种攀越方式，机器人越障平稳，不会受到跌落冲击。

(3) 当台阶的高度大于摆臂的长度 ($H > l_3 + r - R$) 时，可借助摆臂转动，使机器人质心向台阶外角线靠近并越过台阶外角线，完成攀越台阶的动作，如图 6C 所示。图 8 为质心越过台阶外角线时的示意图，设其与摆臂的摆角为 θ 时，机器人主体履带的倾角为 β ，摆臂中心线 O_2O_3 与水平面的正角为 α ，则 $\alpha = 2\pi - \theta + \beta$ 。与履带轮 O_2 相切的水平面可视为支撑主履带的虚拟地面，与台阶上平台的高度为 H_1 ，可借鉴式 (1) 求得式 (19)。此时，机器人跨越台阶的高度 H 与 θ 、 β 具有以下关系：

$$H_1 = R + (l_0 - x_G - y_G \tan \beta) \sin \beta - \frac{R}{\cos \beta}$$

$$= R + (l_0 - x_G) \sin \beta + y_G \cos \beta - \frac{y_G + R}{\cos \beta} \quad (19)$$

$$H_2 = l_3 \sin \alpha - R + r$$

$$= l_3 \sin(2\pi - \theta + \beta) - R + r \quad (20)$$

$$H = H_1 + H_2$$

$$= (l_0 - x_G) \sin \beta + y_G \cos \beta - \frac{y_G + R}{\cos \beta} + l_3 \sin(2\pi - \theta + \beta) + r \quad (21)$$

H 的最大值 H_{\max} 即为机器人反向攀爬台阶时台阶高度的最大值。

H 对 θ 求偏导，求 $\frac{\partial H}{\partial \theta} = 0$

$$\theta = \arctan \frac{[m_2(l_2 - l_3) - m_1 l_3] \cos^2 \beta - m_2 l_2}{[m_2(l_2 - l_3) - m_1 l_3] \sin \beta \cos \beta} \quad (22)$$

在攀爬台阶的时候，当摆臂的摆角 θ 与机器人主体的倾角 β 满足式 (22) 时， H 存在最大值。当机器人摆臂的质量较小，对机器人的质心位置影响较小，可忽略，且摆臂位于竖直位置，即 $\theta = \frac{3\pi}{2} - \beta$ 时， H 有最大值。

当机器人摆臂的长度大于机器人主履带的长度时，无法采用图 6(a) ~ (f) 所示的姿态调整方法。可以采用图 9 所示的动作序列完成机器人主履带搭靠在台阶外角线上的操作。当机器人完成主履带搭靠台阶的操作后，可根据具体情况选用图 6A、B、C 所示的攀越方式攀越台阶。但这种操作方式，在完成图 9(c) ~ (e) 的动作时，对机器人的冲击较大，有必要在机器人主车体上部设置缓冲装置^[3]。若机器人履带上下两侧均具有移动功能，则可通过图 9(d) 动作搭靠台阶，攀越台阶后，再调整至正常状态。

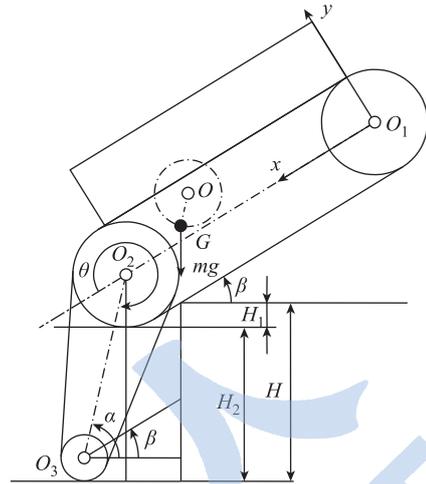


图 8 反向攀越台阶时机器人质心跨过台阶外角线
Fig.8 The centroid's nosing-crossing in backward step-climbing process

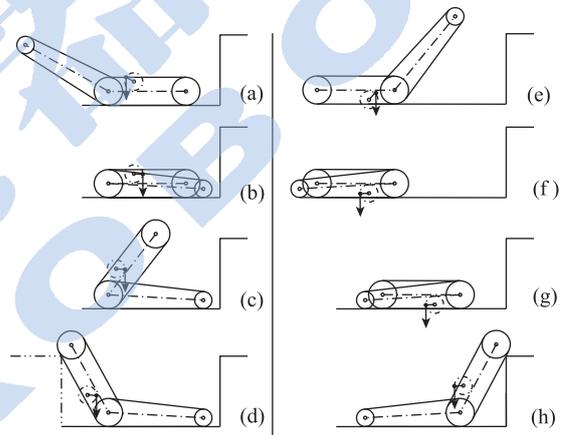


图 9 姿态调整过程

Fig.9 The pose adjusting process

3.3 攀爬斜坡

履带机器人正向攀爬斜坡时，机器人不会发生倾覆，允许的斜坡最大坡度为：

$$\alpha = \arctan \frac{x_G}{y_G + R} \quad (23)$$

当 $\theta = 2\pi - \phi$ 时，坡度最大；当 $\theta = \pi - \alpha$ 时，即摆臂水平状态时，坡度最小。

当机器人沿着斜坡横向移动时，机器人不会发生侧翻，所允许的斜坡最大坡度为：

$$\alpha = \arctan \frac{b}{2(y_G + R)} \quad (24)$$

将式 (11) 式代入式 (23)、(24)，当 α 取最小值时，可得机器人不发生正向倾覆与侧翻时摆臂摆角 θ 与斜坡允许最大坡度 α 的关系。

3.4 跨越沟道

通过对双履带机器人的分析可知，机器人摆臂放平时最有利于机器人跨越沟道。此时机器人摆臂

的摆角为 $\theta = 2\pi - \phi$ ，设机器人质心 G 与机器人摆臂前履带轮轴心 O_3 的水平距离为 l_{GO_3} ，质心 G 与机器人后主履带轮轴心 O_1 的水平距离为 l_{GO_1} ：

$$l_{GO_3} = l_3 \cos \phi + (l_0 - x_G(\theta = 0)) \quad (25)$$

$$l_{GO_1} = x_G(\theta = 0) \quad (26)$$

则机器人可以跨越的沟道的最大宽度为 D_{\max} ：

$$D_{\max} = \min(l_{GO_3}, l_{GO_1}) \quad (27)$$

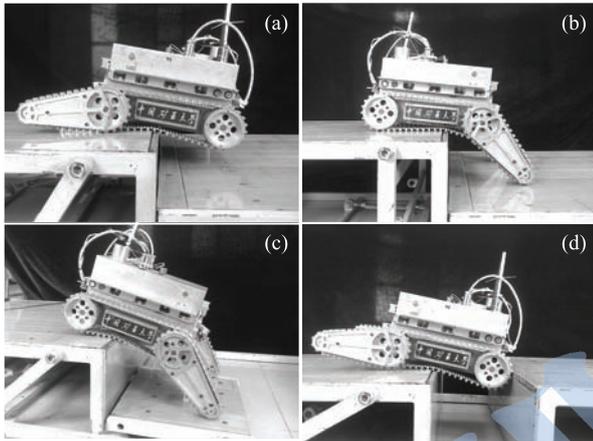


图 10 样机越障性能测试

Fig.10 The obstacle-surmounting ability tests of the robot prototype

4 机器人样机越障能力的理论与实测值 (The theoretical and test values of obstacle-surmounting capability of the robot prototype)

4.1 CUMT-II 型煤矿探测机器人样机测试

CUMT-II 型煤矿探测机器人采用了四履带双摆臂形式的行走机构，主要用于煤矿灾后的环境探测与受灾人员的搜索。机器人的主要参数为： $R =$

65 mm ， $r = 35 \text{ mm}$ ， $l_0 = 350 \text{ mm}$ ， $l_2 = 105 \text{ mm}$ ， $l_3 = 225 \text{ mm}$ ， $m_1 = 30 \text{ kg}$ ， $m_2 = 5 \text{ kg}$ ；测得主体质心参数为： $l_1 = 220 \text{ mm}$ ， $h_1 = 50 \text{ mm}$ 。利用实验室的台阶、沟道模拟试验架，对 CUMT-II 型煤矿探测机器人样机进行了越障性能测试，图 10(a) ~ (d) 分别为正向攀越台阶，B 方式、C 方式反向攀越台阶，跨越沟道的性能测试情形，测试结果见表 2。

4.2 越障性能理论值

(1) 正向攀爬台阶

将机器人的基本参数代入式 (11)、(13)，当摆臂摆角 θ 在 $(0^\circ, 360^\circ)$ 上、仰角 α 在 $(0^\circ, 70^\circ)$ 上取值时，机器人攀越的台阶的高度 H 与 θ 、 α 的 3 维关系图如图 11(a) 所示。由计算结果可知，当 $\theta = 313.5^\circ$ ， $\alpha = 46.5^\circ$ 时， H 有最大值 $H_{\max} = 126.7 \text{ mm}$ ，即机器人正向爬越台阶的最大高度为 126.7 mm ，也验证了 θ 与 α 具有式 (12) 的关系。

(2) 反向攀越台阶

机器人采用图 6A 方式攀越台阶时，台阶高度的最大值为 $H_{\max} = 119.1 \text{ mm}$ 。采用 B 方式攀越台阶时，台阶高度的最大值为 $H_{\max} = l_3 + r - R = 195.0 \text{ mm}$ 。

采用 C 方式攀越台阶时，将机器人的基本参数代入式 (10)、(21)，当摆臂摆角 θ 在 $(260^\circ, 360^\circ)$ 上、仰角 α 在 $(0^\circ, 60^\circ)$ 上取值时，机器人攀越台阶的高度 H 与 θ 、 α 的 3 维关系图如图 11(b) 所示。由计算结果可知，当 $\theta = 298.5^\circ$ 、 $\alpha = 30.8^\circ$ 时， H 有最大值 $H_{\max} = 228.5 \text{ mm}$ ，即机器人正向爬越台阶的最大高度为 228.5 mm 。

反向攀越台阶时，机器人摆臂的长度对攀越台阶高度有很大影响，当 l_3 分别取 225 mm 、 325 mm 、 425 mm ， l_2 分别取 105 mm 、 145 mm 、 185 mm 时，在同一坐标系下，绘制的台阶高度 H 与 θ 、 α 的 3 维关系图如图 11(c) 所示。

表 2 机器人样机最大越障能力的理论与实测值

Tab.2 The theoretical and test values of maximum obstacle-surmounting capability of the robot prototype

越障项目	理论值	实测值
正向攀越台阶最大高度 H_{\max} / mm	126.7	130
反向攀越台阶最大高度 H_{\max} / mm	A 方式	119.1
	B 方式	195.0
	C 方式	228.5
爬越斜坡最大坡度 $\alpha / (^\circ)$	$\theta = 180^\circ$	70.0
	$\theta = 117.6^\circ$	62.4
横向爬坡最大坡度 $\alpha / (^\circ)$	$\theta = 0, 180^\circ$	64.4
	$\theta = 90^\circ$	61.4
跨越沟道最大宽度 D / mm	253.6	258

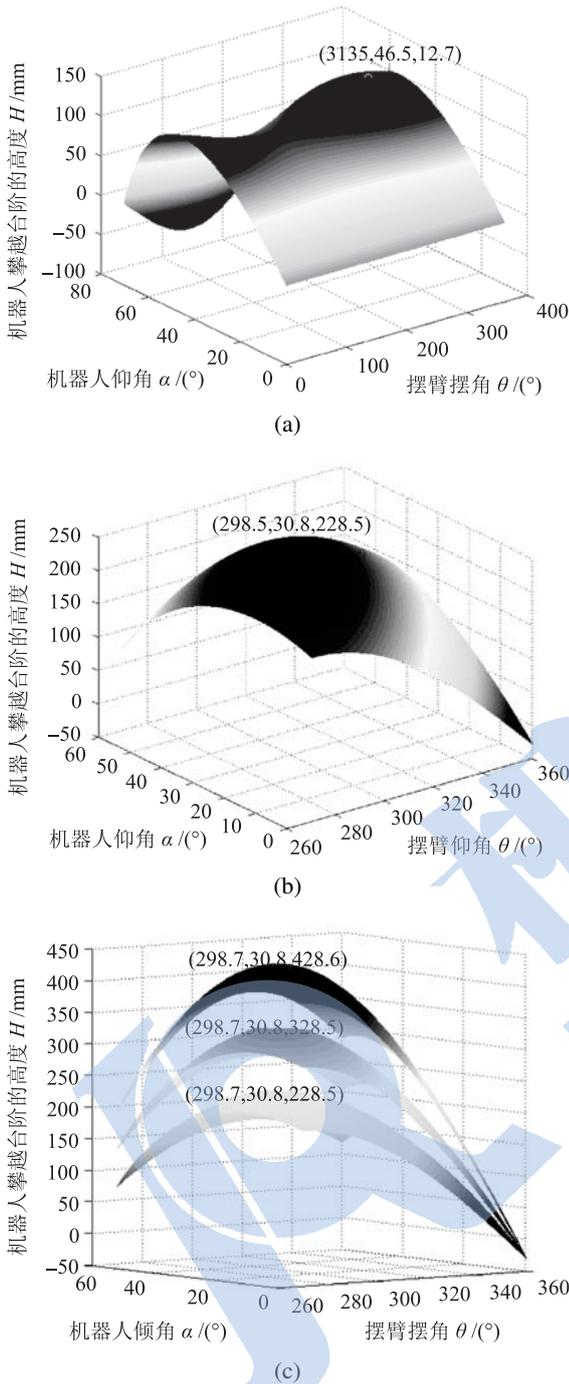


图 11 跨越台阶高度与机器人仰角、摆臂摆角的关系 3 维图形

Fig.11 Three dimensional relationship diagrams of the step height, the elevation angle and the arms' swing angle

(3) 攀爬斜坡与跨越沟道

将机器人参数代入式 (10)、(23)、(24)，可以绘制出机器人摆臂摆角与允许最大坡度的关系曲线，如图 12 所示，图中虚线与实线分别为机器人正向爬坡和在斜坡上横向移动时斜坡坡度 α 与摆臂摆角 θ 的关系曲线，坡度 α 的最大值见表 2。

跨越沟道时，可以计算出 $\theta = 2\pi - \phi$ 时沟道宽

度的最大值为 253.6 mm。

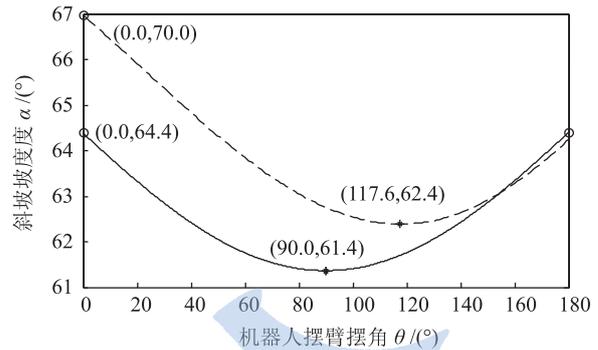


图 12 斜坡坡度与摆臂摆角关系曲线

Fig.12 The theoretical and test values of maximum obstacle-surmounting capability of the robot prototype

4.3 越障性能理论值与实测值的比较分析

机器人履带具有一定弹性，在越障过程中发生变形会使得机器人的重心位置比理论值偏低，有助于机器人翻越障碍。机器人正向攀越台阶与 B 方式反向翻越台阶时，实测值均比理论值大。A、C 方式反向翻越台阶时，因摆臂摆角控制有误差，实测值与理论值有一定偏差。跨越沟道时，后履带轮轴心越过沟道边缘线后，后履带圆弧部分仍可支撑车体，因此机器人可跨越宽度大于理论值的沟道。机器人爬越斜坡的能力还与机器人的驱动力及斜坡履带间的摩擦系数有关，未进行最大坡度斜坡攀爬测试。

5 结论 (Conclusions)

(1) 从运动学的角度，在固定双履带机器人越障机理的基础上，分析四履带双摆臂机器人的越障机理：随着机器人移动，并借助摆臂履带摆动，使质心越过障碍的关键边界线。

(2) 分析了四履带双摆臂机器人克服台阶、斜坡、沟道的越障机理，重点分析了机器人正向和反向攀越台阶的越障机理，并以 CUMT-II 型煤矿探测机器人样机为例绘制了机器人仰角、摆臂摆角与跨越台阶高度三者的关系 3 维图形；并求出其最大越障能力，与实验室的实测值进行对比分析。

(3) 推导出机器人的最佳越障性能及对应的质心和摆臂的位置，为机器人越障时质心位置的控制提供了理论依据。

参考文献 (References)

[1] iRobot Corporation. Small Unmanned Ground Vehicle (SUGV) [EB/OL]. (2008-05-12) [2009-03-18]. <http://www.irobot.com/sp.cfm?pageid=219>.
 [2] Chiba Institute of Technology. Hibiscus, The New Rescue Robot[EB/OL]. (2006-06-05) [2009-03-18]. <http://www.techfresh.net/hibiscus-the-new-rescue-robot>.

- [3] 信建国, 李小凡, 王忠, 等. 履带腿式非结构环境移动机器人特性分析 [J], 机器人, 2004, 26(1): 35-39.
Xin Jianguo, Li Xiaofan, Wang Zhong, et al. Performance analysis of track-leg mobile robot in unstructured environment[J]. Robot, 2004, 26(1): 35-39.
- [4] Chen C X, Trivedi M M. Reactive locomotion control of articulated-tracked mobile robots for obstacle negotiation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993: 1349-1356.
- [5] Choi B S, Song S M. Fully automated obstacle-crossing gaits for walking machines[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1998, 18(6): 952-964.
- [6] Liu J G, Wang Y C, Ma S G, et al. Analysis of stairs-climbing ability for a tracked reconfigurable modular robot[C]//IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 36-41.

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 156 页)

- [6] Tetsuya M, Haruhisa K, Keisuke Y, et al. Anthropomorphic robot hand: Gifu Hand III[C]//International Conference on Control, Automation and Systems. 2002: 1288-1293.
- [7] Liu H, Wu K, Meusel P, et al. Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT Hand II[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 3692-3697.
- [8] Ren L, Mills J K, Sun D. Convex synchronized control for a 3-DOF planar parallel manipulator[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1129-1134.
- [9] Sun D. Position synchronization of multiple motion axes with adaptive coupling control[J]. Automatica, 2003, 39(6): 997-1005.
- [10] Song G, Cai L, Wang Y. Robust friction compensation for precise and smooth position regulation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 1999, 213(2): 157-161.
- [11] Jiang L, Liu H. Autonomous control of multi-fingered hand[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(5): 531-537.
- [12] Jiang L, Sun D, Liu H, et al. Study on inverse kinematics and trajectory tracking control of humanoid robot finger with nonlinearly coupled joints[C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 3214-3219.

作者简介:

兰 天 (1980-), 男, 博士生. 研究领域: 仿人型多指灵巧手.

刘伊威 (1977-), 男, 博士, 讲师. 研究领域: 仿人型多指灵巧手.

陈养彬 (1975-), 男, 博士, 研究领域: 智能机器人.