

# 具有类柔性结构的履带救援机器人越障分析

罗建国<sup>1</sup>, 卜泽昊<sup>2</sup>

(1. 华北科技学院 机电工程学院 北京 东燕郊 065201; 2. 华北科技学院 研究生院 北京 东燕郊 065201)

**摘 要:** 介绍了当前各类越障机器人的机构特点,传统履带式救援机器人均是刚体结构,无法有效适应实际救援地形,由此加入类合页机构对机器人进行分体连接,使其具有类柔性特征,对非结构地形具有更好的适应性,并在 SolidWorks 中建立模型。分析了柔性连接的履带机器人在爬梯、上下坡地形的运动机理,并借助 ADAMS 仿真软件进行了分析,验证所设计的机构具有较好的通过性,对于群组式救援机器人、可重构机器人的开发与研究有一定积极的作用。

**关键词:** 救援机器人; 柔性结构; ADAMS 仿真; 越障分析

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1672-7169(2018)01-0055-07

## Analysis of obstacle crossing for tracked rescue robot with flexible structure

LUO Jian-guo<sup>1</sup>, BU Ze-hao<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical & Electrical, North China Institute of Science and Technology, Beijing, 101601, China;  
2. Graduate School, North China Institute of Science and Technology, Beijing, 101601, China)

**Abstract:** The mechanism characteristics of all kinds of current obstacle crossing robot were introduced. All the traditional tracked rescue robots were rigid structure, they can not effectively adapt to the actual rescue terrain, thus installing analogous hinge mechanism to connect three parts, which has better adaptability to adapt to unstructured terrain with flexible features, and the model was established in SolidWorks. The kinematics mechanisms of the tracked robot with flexible connection when climbing stairs, crossing rugged terrain, taking steering, up and down slope were analyzed, and the analysis through ADAMS simulation software verified that the tracked robot has well passing ability. It plays a positive role in the research and development of the group rescue robot and reorganizable robot.

**Key words:** Rescue Robot; Flexible Structure; ADAMS Simulation; Crossing obstacle analysis

## 0 引言

随着安全生产事故与自然灾害多发,救援机器人的研究逐渐成为救援保障的一股新力量。面对受损的非结构地形,运动和越障性能成为救援机器人设计的一项重要指标。大量各具特色的越

障机构由此提出,中科院自动化研究所于涌川等建立了轮式机器人越障的动力学模型,并对电机扭矩与车身重心位置等关键因素进行分析<sup>[1]</sup>。天津大学田润等对三弧形腿轮式移动机构进行了参数设计,并以仿真和实验验证其运动性能<sup>[2]</sup>。西南石油大学黄俊铭等提出行星轮行走机构,通

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 河北省教育厅青年基金资助项目(QN2017410), 中央高校基本科研业务费资助项目(3142015023, 3142017051)

作者简介: 罗建国(1977-),男,湖南岳阳人,博士,华北科技学院机电工程学院院长,研究方向: 机电安全,机器人技术。E-mail: luojg\_1598@126.com

过动、静力学分析其越障能力<sup>[3]</sup>。哈尔滨工业大学孙久伟等提出了多节履带式搜救机器人,并以 Webots 软件仿真验证机器人的系统功能<sup>[4]</sup>。东南大学丁豪等提出一种内外摆臂模块化的履带行走机构,并对参数和传动机构进行优化设计<sup>[5]</sup>。中国矿业大学李允旺等对四履带两摆臂机器人的越障机理进行分析,并以自主研制的 CUMT-II 型煤矿探测机器人进行实验验证<sup>[6]</sup>。同时还提出一种采用对称 W 形履带悬架的摇杆式履带机器人,分析其运动特性并以样机实验验证其良好的越障性能<sup>[7]</sup>。中国矿业大学孙国栋等在具有 W 形履带行走机构的 CUMT-IV 基础上,设计了具有 W 扩展型履带行走机构的 CUMT-V 型煤矿救援机器人,并对越障机构的参数进行分析<sup>[8]</sup>。中科院沈阳自动化研究所朱岩等利用椭圆定理设计了履带可变形 SARTR 机器人,对构型原理、越障能力进行分析,并以样机实验验证越障性能<sup>[9]</sup>。河北工程大学李秋生等在 W 形摇杆式履带行走机构越障不足基础上提出了多节履带行走机构的设计,并对越障的稳定性进行了分析<sup>[10]</sup>。综合不同越障机构的优势可以看出履带式移动机器人由于履带的可变形而对地形有较好的适应性,在此基础上进行机构的创新设计对越障机器人研究具有很强的现实意义。

## 1 柔性连接机器人结构

履带式移动机构有多种类型,从模拟坦克车

的移动机构,到含有两个或四个摆臂结构的摆臂式履带机器人,再到轮履复合的移动机器人。尽管越障性能有一定提升,但复杂的机械、传动结构,冗余的刚性附件并未使对应的机构实现高效的全地形通过性。现改变以往在摆臂结构、移动机构构型角度的探索,在刚性移动机构中加入柔性特征,使得具有此类特征的移动机构具有更好的全地形适应性。

如图 1 所示为具有柔性关节的履带移动机构,三个刚体机构通过类合页的装置连接成一体,从右往左依次为导航移动机构、承重承接移动机构、控制移动机构。导航移动机构车身装有摄像头或激光雷达便于观察或构建环境三维地形,摄像头支架具有俯仰、偏转两个自由度,前车身具有 50°左右的攻角,在爬越楼梯或凸台等障碍时不需借助摆臂或大扭矩电机,车身上端还可加装超声波避障。承重承接移动机构位于中间,在连接导航和控制机构的同时,由于在移动越障的过程中前后机构均提供支撑保障,故此机构内部放置电池或上部加装各类有毒有害气体传感器、红外探测传感器、轻质少自由度机器臂等部件,完成实际救援的多项关键工作。控制移动机构位于最后,其上装有机器人整体的控制、数据传输、通信系统,其安全稳定性对整体的运动、相关功能的实现是至关重要的。每组移动机构内均装有 2 个空心杯直流无刷电机与两侧履带导轮连接,为机构整体提供充足动力以完成各种地形的适应与通过。

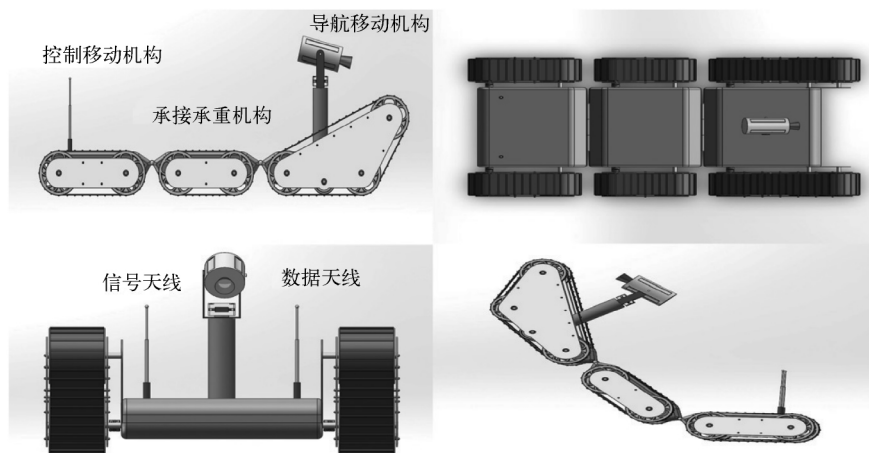


图 1 越障机器人模型

## 2 越障机理分析

### 2.1 爬梯分析

楼梯作为生产生活中最常见的建筑结构, 在实际探测场景中对机器人的运动形成一定挑战, 作为地形中较复杂的一种, 台阶以连续的水平竖直结构、固定的宽高比形成结构化地形。

#### 2.1.1 传统方式分析

轮式机构移动速度快, 可加装悬挂避震结构通过一般的起伏地形, 借助大扭矩电机可爬上较低的台阶, 但无法以这种方式连续爬越多级台阶, 故爬梯性能较差, 其越障如图 2(a) 所示。三弧形四腿爬梯机构借助弧形腿翻转部

件, 实现翻转爬上台阶, 如图 2(b) 所示; 单弧六腿爬梯机构前中后三对腿分步保持支撑、翻转爬梯的作用, 如图 2(c) 所示。此类机构均需要结合障碍物尺寸设计机器人参数, 并调整好固定步态, 但移动速度慢, 无法消除震动, 故多处于实验室阶段。行星轮越障机构依靠行星车轮翻转系, 系中两个车轮与地面接触, 第三个车轮翻转上台阶, 依次交替工作实现连续的爬梯, 其爬梯较流畅, 如图 2(d) 所示, 常见于深海采矿车、月球车等机构设计中。普通双履带、四履带两摆臂、六履带四摆臂、摆臂可变节这些履带式移动机器人均是依靠履带接地有效长度覆盖楼梯三条边缘线以形成稳定爬梯姿态, 其越障机构简图如图 2(e) (f) 所示。

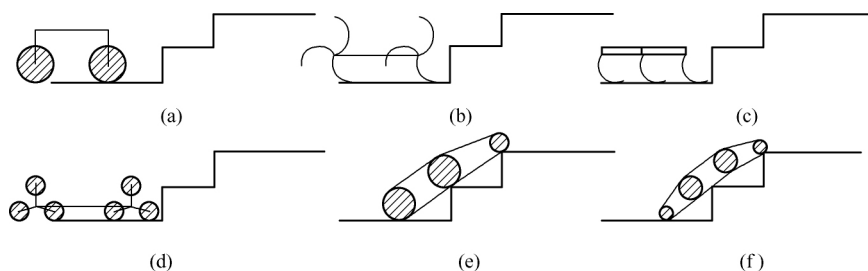


图 2 各类越障机构

#### 2.1.2 爬梯分析

加装类合页机构的柔性履带移动机器人各机构在爬梯过程中可实现与台阶的线-面-线-面交替接触, 线接触时处于爬升状态, 其自身提供一定动力, 此时处于面接触的机构可为其他机构提供更多的动力, 同时保障机器人不发生滑移。

其爬梯运动过程可分解为: 1) 遇到台阶边缘, 导航机构借助攻角爬上台阶, 此时承接机构和控制移动机构均有地面接触, 可为爬梯提供较大动力; 2) 导航移动机构与台阶面接触后, 承接机构随前机构提升一定角度准备爬台阶, 此时前后两结构与地面部分接触, 均可提供动力; 3) 当承接机构与台阶面接触后, 导航机构开始爬上二级台阶, 控制移动机构随承接机构开始提升一定角度爬越一级台阶, 此时承接机构与台阶部分面接触, 为前后两移动机构爬台阶提供动力; 4) 前机构爬上二级台阶, 后机构爬上一级台阶, 中间机构

随前机构提升一定角度准备爬上二级台阶, 此时前后机构与台阶部分面接触, 为中间机构爬上第二级台阶提供动力; 5) 前机构准备爬升三级台阶, 中间机构爬上二级台阶, 后机构随中间机构提升一定角度准备爬升二级台阶, 此时中间机构与地面部分接触, 为前后机构爬升提供动力; 6) 前机构爬上三级台阶, 若后面还有多级台阶, 则可以重复(2)(3)(4)(5)过程逐级爬升, 若为最后一级台阶, 可始终与地面接触, 为中后机构爬升三级台阶提供动力, 中后机构均提升一定角度准备爬升, 其爬梯机理如图 3 所示。

### 2.2 越障高度模型

救援机器人由三组履带移动结构组成, 且左右对称可视为刚体进行分析, 侧视有多连杆机构的特点, 故采用 D-H 坐标法给机器人建模, 获得齐次坐标变换方程, 各部分转角可转化为各坐标系 X 轴转动的角。如图 4 所示, 各移动机构尺寸

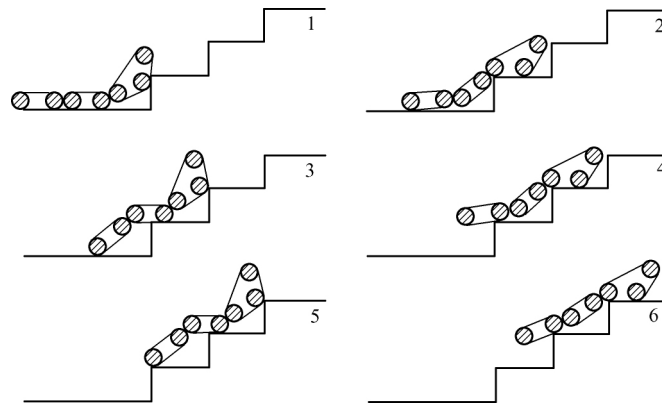


图 3 爬梯机理图

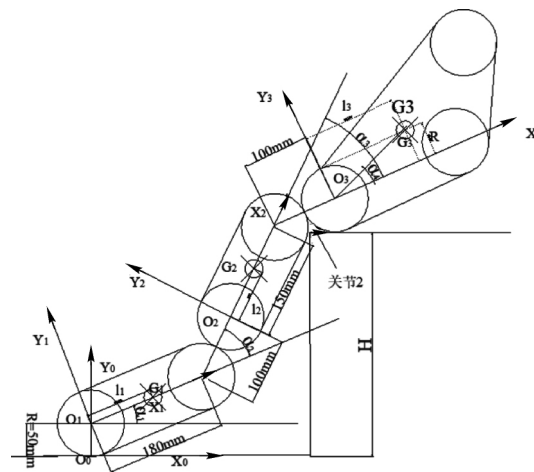


图 4 爬凸台机理图

参数与跨越凸台姿态已确定,从左到右依次为第一、二、三机构,以第一机构后驱动轮与地面的接触点为原点建立坐标系  $O_0-X_0Y_0Z_0$ ,以第一机构驱动轮轴心为原点建立坐标系  $O_1-X_1Y_1Z_1$ ,以第二机构后驱动轮轴心为原点建立坐标系  $O_2-X_2Y_2Z_2$ ,以第三机构后驱动轮轴心为原点建立坐标系  $O_3-X_3Y_3Z_3$ ,由于各坐标系在  $Z$  轴无偏移,仅

考虑  $XY$  平面的变换参数。第一机构相对水平位置的转角为  $\alpha_1$ ,第二机构相对第一机构转角为  $\alpha_2$ ,第三机构相对第二机构转角(以逆时针为正,图 4 中转角为负)为  $\alpha_3$ ,第三机构重心位置相对于第三机构自身坐标系转角为  $\alpha_4$ ,且给机构质心在各自坐标系位置为  $G_1(l_1, 0, 0)$ ,  $G_2(l_2, 0, 0)$ ,  $G_3(l_3, R, 0)$  可得变换矩阵:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & -\sin\alpha_1 & 0 & 0 \\ \sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 & 0 & R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos\alpha_2 & -\sin\alpha_2 & 0 & \sqrt{(100\sin\alpha_2)^2 + (100\cos\alpha_2 + 180)^2} \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \\ \sin\alpha_2 & \cos\alpha_2 & 0 & -\sqrt{(100\sin\alpha_2)^2 + (100\cos\alpha_2 + 180)^2} \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_2T = \begin{bmatrix} \cos\alpha_3 & -\sin\alpha_3 & 0 & 150+100\cos\alpha_3 \\ \sin\alpha_3 & \cos\alpha_3 & 0 & -100\sin\alpha_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

机器人爬越过程约束条件有:

$$\begin{cases} 0 < \alpha_1 < 15^\circ \\ 0 < \alpha_1 + \alpha_2 < 50^\circ \\ \alpha_4 = \arctan\left(\frac{R}{l_3}\right) \\ \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 < 90^\circ \\ l_1 \sin\alpha_1 > l_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \end{cases}$$

以上约束条件, 保证第一机构仰角有极大值, 接地投影较大保持稳定; 第三机构质心角一定, 其位置随前三仰角的积累小于直角保证不倾翻; 在保证以上条件尽可能增大  $\alpha_2$  让二三机构连接关节 2 可达到台阶边缘线, 第三机构随其重心转动爬上台阶有利于第二、三机构爬上台阶。将连接关节 2 的坐标表示到基础坐标系中, 并用以上约束条件在 MATLAB 中取得越障高度关系如图 5, 计算得到最大越障高度为 236.1 mm, 并且关节 2 高度随  $\alpha_1$  增大而增大, 随  $\alpha_2$  增大到一定角度, 倾翻的风险系数变大导致越障高度开始降低。

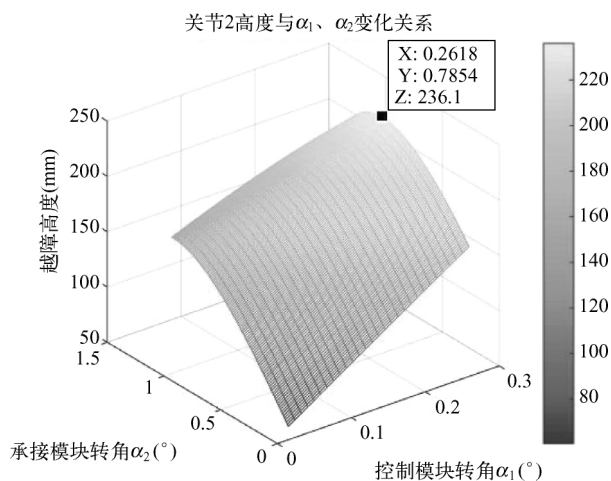


图 5 越障高度关系图

## 2.3 爬坡模型

当机器人爬斜坡运动时, 其在斜面上的受力情况如图 6 所示。坡角为  $\alpha$ , 地面摩擦系数为  $\mu$ , 机器人总重力沿两个方向分解, 分析其物理约束, 若机器人需要在斜面保持静止或匀速直线运动,

需满足  $G\sin\alpha = \mu G\cos\alpha$ ; 当  $G\sin\alpha > \mu G\cos\alpha$  时, 机器人将受重力作用向下滑动, 即理论上摩擦系数越大, 可爬上的坡角也越大, 可得:

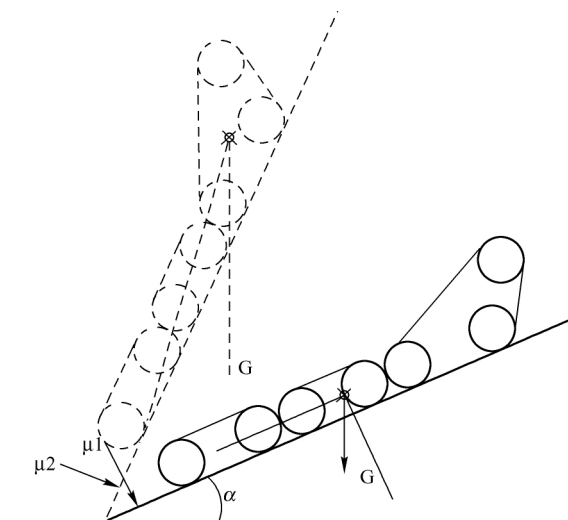


图 6 上斜坡分析图

$$\begin{cases} F = G\sin\alpha \\ f = \mu F_N = \mu G\cos\alpha \end{cases} \Rightarrow \alpha \leq \arctan(\mu)$$

然而当坡角大于物理约束条件下的极限角度, 此时通过增加驱动轮扭矩使救援机器人爬上更大的坡角, 当斜坡角度逐渐增大, 机器人整体随斜坡倾斜增大, 当第三机构重心和后驱动轮与地面接触点连线与重力作用线接近时, 由于  $\alpha$  太大导致机器人倾翻, 机器人重心位置与车身底部履带的夹角  $\beta$  一定。由此可以得出几何约束如下:

$$\beta = \arctan\left(\frac{R}{L_1 + L_2 + L_3 + 4R}\right)$$

$$\begin{cases} \alpha + \beta < 90^\circ & \text{stable} \\ \alpha + \beta = 90^\circ & \text{critical\_condition} \\ \alpha + \beta > 90^\circ & \text{unstable} \end{cases}$$

## 3 Adams 仿真分析

建立 235 mm 的凸台, 仿真测量总质心位置在 XYZ 方向上轨迹变化如图 7 所示, 可以看出, 质心最初位置与相对于环境坐标系的位置有关。质心在 X 轴方向开始快速增加, 位移呈二次曲线递增, 当在 1.76 s 时刻碰到凸台, 位移不变, 从 1.76 s 到 3.5 s 车身逐渐抬起, 当关节 2 接触凸台边缘线时, 位移有少量增加, 从 3.5 s 之后第三机构接触到

上凸台面, X 轴方向位移有少量减少, 在 4.7 s 之后, 车身依靠自重爬上凸台面, 位移在 X 和 Y 方向开始增加, 6 s 开始回到平稳状态, 爬上凸台的高度为

此时稳定值与初始值的差。整个爬升过程中质心在 Z 轴未发生明显偏移, 表面机器人运行较平稳, 在前进方向未发生左右偏移。

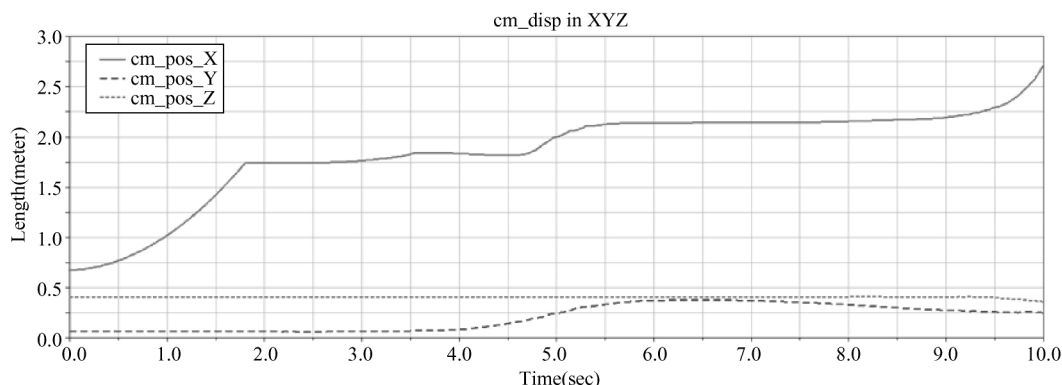


图 7 爬凸台质心位移变化

在 ADAMS 建立 600 mm 高的坡道, 设置仿真时间为 7 s, 仿真步数为 300, 当设定驱动函数为  $500d * time$ 、摩擦系数  $\mu$  为 0.3 时, 取坡角为  $45^\circ$ 、 $37^\circ$ 、 $30^\circ$ , 测量得到机器人爬坡情况如图 8。当角度为  $30^\circ$  时, 机器人可以在 3.8 s 左右时间爬上; 当

角度为  $37^\circ$  和  $45^\circ$  时, 机器人可以爬升到一定高度, 下滑力大于驱动力导致机器人下滑, 差值越大, 下滑越快, 之后随着动能减小仅能爬升更小的高度。

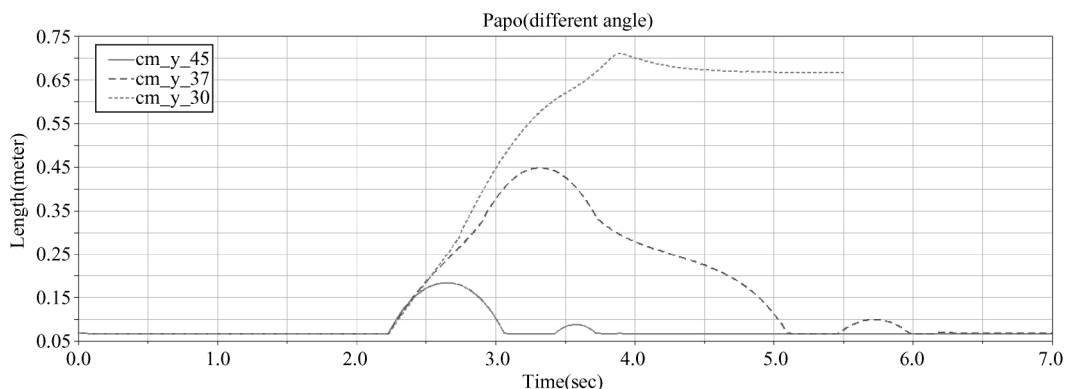


图 8 不同角度爬坡对比

当  $\mu$  分别为 0.5、0.7 时, 坡角为  $30^\circ$ , 测量得到机器人爬坡情况如图 9。当  $\mu$  为 0.7 时, 驱动函数取  $500d * time$  便能爬上斜坡; 当  $\mu$  为 0.5 时, 驱动函数依次取  $500d * time$ 、 $800d * time$ 、 $1000d * time$ 、 $1200d * time$ , 爬升高度逐渐提升, 当  $1200d * time$  以下都无法爬上斜坡, 都在反复爬升中消耗能量最终越障失败。由此数据对比可以了解: 摩擦系数  $\mu$  对机器人的爬坡性能影响较大, 在无法预知地形的情况下, 应尽量选择摩擦系

数较大的橡胶履带, 并对外履齿的齿形和尺寸进行优化设计。

当设定驱动函数为  $400d * time$ 、 $450d * time$ 、 $485d * time$ 、 $500d * time$ , 摩擦系数  $\mu$  为 0.3 时, 取坡角为  $30^\circ$ , 仿真时间 5.5 s, 测量得到机器人爬坡情况如图 10。可以看出, 驱动函数越大, 爬上斜坡的可能性越大; 驱动函数无法满足爬斜坡需求则会下滑, 且驱动函数越小下滑越快。当坡角和摩擦系数一定时有存在理论最小的驱动值。

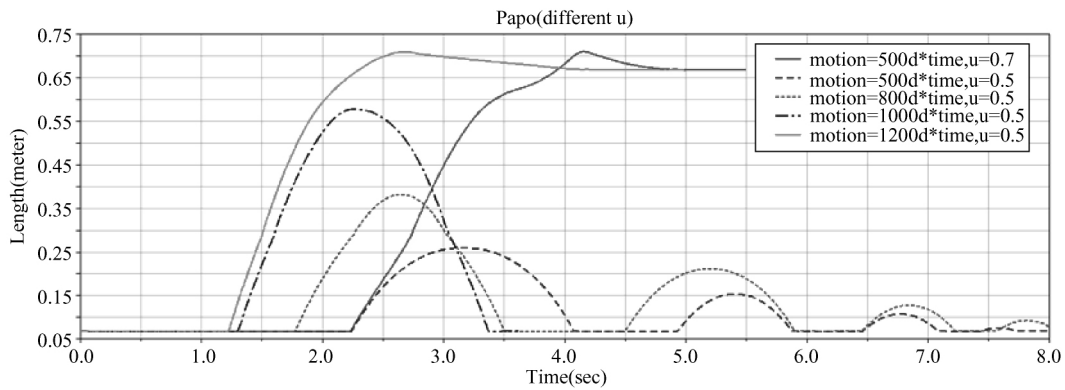


图 9 履带接触力变化图

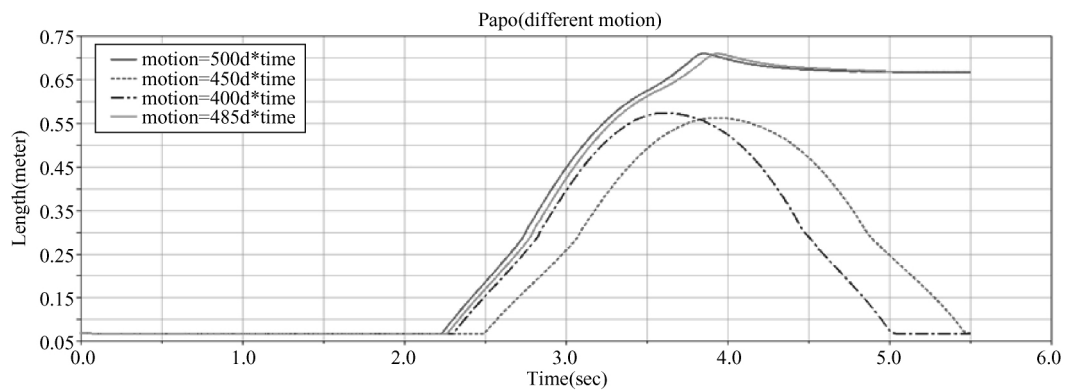


图 10 不同驱动函数对比

## 4 结论

针对目前各类越障机构无法满足复杂救援地形的自适应,结合传统履带式移动机构,设计一款由类合页结构连接的三段式履带救援机器人,借助履带材质自身的变形与类合页机构的转动,使得刚体机构具有柔性关节的特征,对各类地面、非结构障碍有较强的适应性。救援机器人集探测、数据采集、视频回传、安全路线规划等功能,三段式机构扩展了救援机器人的功能性。建立三维模型 ADAMS 软件中对不同地形进行仿真,验证其具有良好的运动越障能力,为履带式移动机器人的机构创新提供了一种新的思路,对群体式可重构的救援系统研究提供基础<sup>[11]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 于涌川,原魁,邹伟.全驱动轮式机器人越障过程模型及影响因素分析[J].机器人,2008(01):1-6.
- [2] 田润,宋铁民,孙涛,等.一种新型轮腿式移动机器人的参数设计与实验研究[J].机器人,2015,37(05):538-545.
- [3] 黄俊铭,陈浩.深海海底车行星轮式行走机构建模分析[J].机械设计与制造,2017(06):5-9.
- [4] 孙久伟,刘罡,韩震峰,等.多节履带式煤矿井下搜索机器人设计[J].煤矿机械,2009,30(09):20-23.
- [5] 丁豪,钱瑞明.一种新型四摆臂履带式救援机器人的行走机构设计[J].机械制造与自动化,2016,45(01):155-158.
- [6] 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(02):157-165.
- [7] 李允旺,葛世荣,朱华.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[J].机器人,2010,32(01):25-33.
- [8] 孙国栋,李雨潭,朱华.一种新型煤矿救援机器人履带行走机构设计[J].工矿自动化,2015,41(06):21-25.
- [9] 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(06):693-701.
- [10] 李秋生,闫小军.煤矿救援机器人行走机构设计与研究[J].煤炭技术,2017,36(11):217-219.
- [11] 孙辉辉,罗建国,丁军,等.缠绕式可重构柔索并联机器人驱动机构运动分析[J].华北科技学院学报,2016,13(06):59-62.