

摆臂前置救援机器人运动特性分析

罗建国¹, 卜泽昊²

(1. 华北科技学院 机电工程学院 北京 101601 2. 华北科技学院 研究生院 北京 101601)

摘要: 介绍了国内外对履带式救援机器人方面的研究, 分析当前摆臂式履带机器人机械结构复杂、制造成本高、参与救援较少的国内现状, 同时介绍了前置摆臂式履带救援机器人的机械机构和相关的现实意义。分析了之前基于 D-H 质心模型研究仅考虑质心纵坐标与越障高度关系的局限, 在 MATLAB 中建立越障时质心横、纵坐标的数学模型, 分析了其他非结构地形的越障机理, 并借助 ADAMS 进行运动仿真, 观察机器人的运动特点, 取得相关数据指导当前正在制作的实验样机。阐述了前置摆臂履带救援机器人对当前柔性履带机器人、群体机器人、分布式救援系统、复杂操作平台的开发与实验具有积极作用。

关键词: 救援机器人; D-H; MATLAB; ADAMS; 运动特性

中图分类号: TH16; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3997(2018)07-0260-03

DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2018.07.072

Kinematic Analysis of Swing Arm Front Fixed Rescue Robot

LUO Jian-guo¹, BU Ze-hao²

(1. Department 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: Domestic and overseas research on crawler rescue robot introduced, current domestic situation of swing arm type crawler robot of complex structure analyzed then, high manufacturing cost, less involved in the rescue, as well as the mechanism and the practical significance of crawler rescue robot with front swing arm discussed. In addition, the limitation of the previous studies based on D-H centroid model which only consider the relation between centroid vertical axis and the obstacle height was analyzed. The mathematical model of centroid horizontal and vertical coordinates in crossing obstacle is established in MATLAB, it analyzes the mechanism when crossing other non-structure obstacles, kinematic simulation of the robot on different terrains based on the ADAMS carried out to observe the kinematic characteristics of the robot, then obtain relevant data obtained in order to provide reference for current manufacturing of the prototype. The front arm tracked rescue robot plays a positive role in the development and experiment of flexible tracked robots, swarm robots, distributed rescue systems and complex operating platforms.

Key Words: Rescue Robot; D-H; MATLAB; ADAMS; Kinematic Characteristics

1 引言

近些年, 自然灾害如地震、煤矿井下安全生产事故、危化品泄漏、爆炸事故、核事故、日常生活中的火灾、管道爆炸等事故均威胁着人民的生命财产安全。救援机器人的研究极大提高了救援人员对事故现场的勘察与救援工作的开展, 并且减少二次灾害对于救援人员的伤害。国内外对各类救援机器人已经进行大量深入的研究, 各种机器人均应用在高危和救援的场合, 其中美国 PackBot 和 Warrior 系列机器人、日本 Quince 系列、日本东芝公司的蝎型机器人均应用于 2011 年日本福岛核电站泄漏事故后的检查探测任务^[1]。中国矿业大学研制了 CUMT-1 到 4 系列煤矿救援机器人, 每代机器人均在履带结构、摆臂数量等方面作出优化^[2]。文献^[3]对四履带两摆臂机器人的越障机理进行运动学分析, 并以 CUMT-1 验证理论的运动能力。文献^[4]以动力学为基础对自主研制的四履带两摆臂机器人的爬楼梯机理进行分析, 并进行实验对机构优化设计提供基础。文献^[5]用 D-H 方法建立

救援机器人越障高度与车身转角、摆臂摆角的关系, 文献^[6]建立了六履带机器人的越障高度模型, 但均未对质心水平位移越障条件进行分析。文献^[7]对各校所研究的履带机器人进行 ADAMS 仿真验证其运动性能。尽管已开展大量的研究, 但目前救援机器人仍多处于试验样机研制, 究其原因与其机械结构复杂、研制成本较高有关, 由于参与实际救援的经验较少而无法提出真正有效的改进。提出一种改进的前置摆臂履带救援机器人, 结构紧凑简单, 其运动特性良好能够完成各类地形的攀越并且极大的降低了成本。

2 机器人结构

传统履带式救援机器人有固定双履带、四履带两摆臂、六履带四摆臂、履带可变节等形式, 摆臂的加入提高了越障能力, 并且数量越多, 越障能力越强。然而其摆臂轴与车体轮轴处于重合位置, 这使得传动结构复杂同时增加了车体的宽度, 需要高精度大扭矩的多个电机实现机器人的整体运动。摆臂同轴设计是为在机器人意外翻

来稿日期: 2018-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775035) 河北省教育厅青年基金项目(QN2017410) 中央高校基本科研业务项目(3142017051, 3142015023)

作者简介: 罗建国 (1979-) 男, 湖南岳阳人, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向: 机器人技术、机构综合;

卜泽昊 (1992-) 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器人仿真、数据分析

转后实现复位,一些借助摆臂全周运动的步态缺乏稳定性,通过理论验证的步态在实际样机运动时效果并不理想。现对摆臂位置进行调整,使其位于主履带的前方并保证摆臂履带与主履带宽度一致,相较之前同尺寸的设计,减小宽度的同时增加了长度,使得整体质心的位置前移,在跨越凸台、沟壑等典型障碍物时具有更好的运动能力,同时避免摆臂轮与履带轮同轴的复杂机械结构,使得救援机器人整体更加紧凑稳定。其 SolidWorks 模型如图 1 所示。

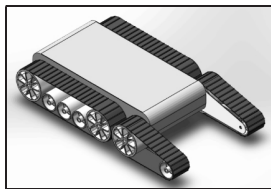


图1 救援机器人模型

Fig.1 The Model of Rescue Robot

摆臂前置式履带救援机器人主要由车体、两侧主驱动系统、前两侧摆臂系统构成。车体内包含控制系统、信息采集系统、锂电池、电机等部件。主驱动系统包含主驱动轮、从动轮、承重轮、主履带。摆臂系统包含摆臂驱动轮、摆臂小轮、摆臂杆、摆臂履带。主驱动系统和摆臂系统的部件通过侧板连接,主驱动系统通过侧板固定于车体两侧,电机经由涡轮蜗杆减速器与主驱动轮、摆臂驱动轮连接。

3 越障机理分析

3.1 跨越凸台

事故类型不同其现场环境、障碍物类型也不同。结合 Rescue Robot 大赛中常见的障碍物将事故现场的非结构地形归结为楼梯、凸台、上下坡、沟壑等结构地形来进行测试。救援机器人具有左右对称的特点,可视为刚体进行分析。从侧面看具有串连机器人多连杆机构的特点,故采用 D-H 方法为机器人建立坐标系。确定参数即可获得齐次变换方程。主车轮轴心距 $L_1=350\text{mm}$, $L_2=150\text{mm}$, 摆臂轮轴心距 $L_3=210\text{mm}$, 大轮 $R=60\text{mm}$, 小轮 $r=35\text{mm}$, 摆臂履带接地有效长度 $D=200\text{mm}$ 。以爬越凸台的位姿建立模型,如图 2 所示。以主驱动轮与地面的接触点为原点建立 $O_0-X_0Y_0Z_0$, 以主驱动轮轴心为原点建立 $O_1-X_1Y_1Z_1$, 以摆臂轮轴心为原点建立 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 。由于各坐标系在 Z 轴无偏移,故考虑 XY 平面的变换参数。主车体相对水平位置的转角为 α_1 , 摆臂相对于车身的转角为 α_2-90° (以 O_2 为原心,逆时针方向为正)。车体质心 W_1 距主驱动轮轴心为 d_1 , 摆臂质心 W_2 距摆臂驱动轮轴心为 d_2 , 车身质量 m_1 , 摆臂质量 m_2 。

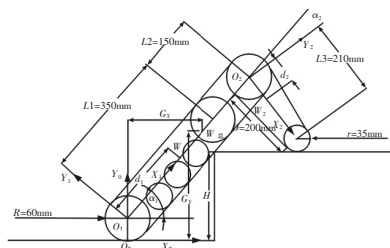


图2 D-H 坐标系模型

Fig.2 The Model of D-H Coordinate System

W_1 在坐标系 1 中是 ${}^1G_1=[d_1\ 0\ 0\ 1]^T$, W_2 在坐标系 2 中是 ${}^2G_2=[d_2\ 0\ 0\ 1]^T$, 由建立的坐标系和关节参数可得质心方程如下:

$${}^0G_{\text{总}} = {}^0T_1 \cdot {}^1G_{\text{总}}$$

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{c} \frac{m_1 \cdot d_1 \cdot \cos \alpha_1 + m_2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot [d_1 \cdot \cos \alpha_1 + (L_1 + L_2)]}{m_1 + m_2} \\ \frac{m_2 \cdot d_2 \cdot \sin \alpha_1 + \sin \alpha_2}{m_1 + m_2} \\ \frac{m_1 \cdot d_1 \cdot \sin \alpha_1 + m_2 \cdot \sin \alpha_1 \cdot [d_2 \cdot \cos \alpha_2 + (L_1 + L_2)]}{m_1 + m_2} \\ \frac{m_2 \cdot d_2 \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1}{m_1 + m_2} + R \end{array} \right] \\ & \left[\begin{array}{c} 0 \\ 1 \end{array} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

${}^0G_{\text{总}}(1,1)$, ${}^0G_{\text{总}}(2,1)$ 为整体质心在基坐标系 $\{0\}$ 下的 XY 坐标。救援机器人跨越凸台有 2 个关键条件: (1) 质心纵坐标大于凸台边缘的高度。(2) 质心横坐标同时须大于凸台边缘线在 $\{0\}$ 中的横坐标。上式中的 m , d , L , R 均测量已知, $m_1=16.7\text{kg}$, $m_2=3.2\text{kg}$, $d_1=293\text{mm}$, $d_2=69\text{mm}$, 在 SolidWorks 中对 α_2 进行干涉检查, 得摆臂与主履带干涉的极限角度为 $(-110^\circ, +115^\circ)$, 由此建立质心 G_x 、越障高度 H 与车体仰角 α_1 和摆臂角 α_2 间的关系式:

$$G_x = 326.286 \cos \alpha_1 + 11.095 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (2)$$

$$H = G_y - \frac{R}{\cos \alpha_1} = 326.286 \sin \alpha_1 + 11.095 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + 60 - \frac{60}{\cos \alpha_1} \quad (3)$$

经 MATLAB 仿真计算得 $H_{\text{max}}=234.58\text{mm}$, 此时 $\alpha_1=57^\circ$, $\alpha_2=33^\circ$, 如图 3(左)所示。对于 d_1 , 其值受锂电池安装位置、承重轮材质、车体材质影响会改变, 而 d_2 不受这些影响其值不变。不同 d_1 值对越障高度的影响, d_1 越大质心越靠前, 越障高度也越大。用 $X_d=(H-R)/\tan \alpha_1 + R$ 表示在 $\{0\}$ 下当 $G_y \geq H$ 时凸台边缘距原点 O_0 的水平距离, 当 $G_x \geq X_d$ 才满足第二个条件。 G_x 与 X_d 在 X 轴方向位图, 其值均随着车体仰角增大而减小。彩色亮图为 G_x , 黑色暗图为 X_d 。如图 3(右)所示俯视图, 当 $G_x \geq X_d$ 为图中偏亮区域时满足条件 2, 此域内找到的 H_{max} 比全域内的 H_{max} 小, 但可同时保障机器人质心在水平和竖直方向均越过台阶边缘线。

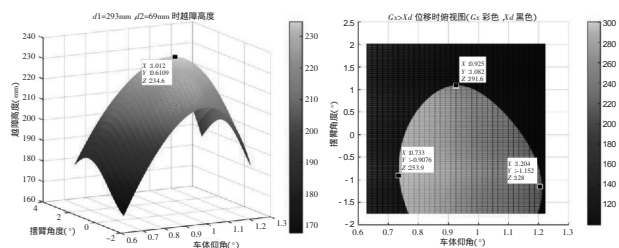


图3 MATLAB 越障分析图

Fig.3 MATLAB Diagram of Obstacle Crossing Analysis

$$G_x = 326.286 \cos \alpha_1 + 11.095 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \quad (2)$$

$$H = G_y - \frac{R}{\cos \alpha_1} = 326.286 \sin \alpha_1 + 11.095 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + 60 - \frac{60}{\cos \alpha_1} \quad (3)$$

3.2 其他地形越障分析

机器人转向是借助两侧主履带实现差速转向。当两侧速度完全相反, 以自身为圆心原地转向; 当两侧速度不同, 以较小侧为内侧, 一定曲率进行弧线的转向运动。对于沟壑地形, 需考虑其宽度和深度, 当跨度大于机器人可跨越的宽度时, 考虑其深度是否符合 2.1 中上下凸台的高度, 若符合, 则可通过上下凸台实现沟壑跨越。当跨度小于可跨越宽度时, 前摆臂履带水平接地使机器人整体长度最长时有利于跨越沟壑。假设机器人总质心 $G_{\text{总}}$ 距主驱动轮距离为 d , 有效接地总长为 L , 需保证质心在沟壑间移动时, 其前端与后端均与地面接触, 即可跨越沟壑宽度 $S=\min(d, L-d)$ 。 (4)

机器人爬坡和履带与地面的摩擦系数有关, 所示设重力为 G , 摩擦系数为 μ , 斜面倾角为 β 故:

$$G \cdot \sin\beta \leq G \cdot \cos\beta \cdot \mu \Rightarrow \tan\beta \leq \mu \Rightarrow \beta \leq \arctan\mu \quad (5)$$

机器人爬楼梯需以一固定姿态连续爬越, 摆臂履带前端与主履带后端间需与 3 个台阶边缘线接触才能稳定爬越。实测台阶高度为 $h=160\text{mm}$, 台阶面宽度为 $b=280\text{mm}$ 。结合人体工程力学一般楼梯不会将 h 设计太高, 一般不超过 200mm , 而 b 则根据不同场所其值会有所增大。机器人有效接地总长为 L , 以实测楼梯数据为准:

$$2\sqrt{h^2+b^2}=644.9\text{mm} \leq L=700\text{mm} \quad (6)$$

4 ADAMS 仿真

在 ADAMS 中建立救援机器人模型, 对车体进行简化但仍保留轮系、车体、摆臂杆等部件, 同时建立各类结构化地形, 通过 STEP 函数与虚拟 Sensor 实现机器人的各种步态。在 ADAMS 和 MATLAB 中同时建立救援机器人的实体模型和数学模型, 把 α_1 , α_2 在 MATLAB 中的模型精确到 1° , 通过仿真取得不同时刻角度的曲线与 MATLAB 中的 G_x, H, X_d 数据集对应, 可以取得越障前后的车体与摆臂转角的大小与变化范围, 其流程如图 4 所示。

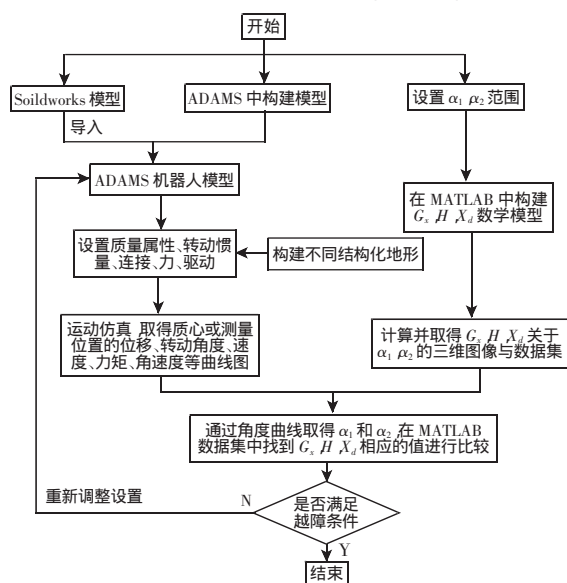


图 4 联合分析流程图

Fig.4 Combination Analysis Flow Chart

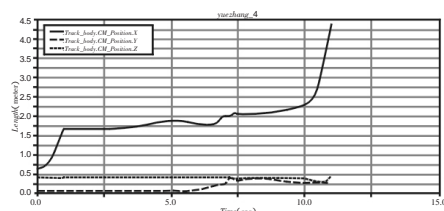


图 5 质心 XYZ 方向位移

Fig.5 The Centroid Displacement Along XYZ

建立 210mm 高的凸台, 为验证 2(1)中对于越障机理的讨论, 设置仿真时间为 10.5s , 仿真步数为 500, 通过 ADAMS 获得机器人质心在三维坐标轴的位移轨迹, 如图 5 所示。质心在 X 方向遇到障碍物后, 位移增量减少, 当 10s 过后爬上凸台位移开始快速增加, 质心在 Y 方向当越障时其值开始增大, 在越障过程中先增大后减小至稳定值, 增加的过程伴随 X 方向值得增加, 说明其 G_x 始终大于 X_d , 质心在 Z 方向始终稳定在固定值, 说明在机器人前进和越障过程中没有发生左右偏移, 机器人运动较稳定。对于

其他地形也可进行类似分析, 取得质心在 XYZ 方向的位移、速度、力矩曲线验证不同地形下的越障机理。

5 结论

(1) 典型的越障新机构如行星轮式爬梯机构、六轮多足式机构、四或六弧形轮腿式机构均含有一定越障局限性。履带式机器人与地面有较大接触面积, 移动稳定性较好, 由于其履带的可变形而具有较强的越障能力。前置摆臂结构简化传统摆臂式机器人复杂机械结构, 对楼梯、凸台、沟壑等地形时在相近尺寸下具有较强的通过性。同时也为柔性连接的履带式机器人研究提供有力基础。(2) 对于越障机理的研究经过了基于质心位置推导公式、D-H 坐标法建立越障高度模型, 相关文献仅考虑竖直方向的越障条件, 并未考虑质心水平方向的移动条件。在越障机理的研究中对质心 X, Y 方向的条件同时进行判断, 并基于客观条件对模型进行了修正, 借助 MATLAB 对数学模型进行分析, 借助 ADAMS 仿真对实体模型的运动性能进行测试。(3) 随着分布式群体机器人概念的提出^[9], 救援机器人只有不断简化结构、提高稳定性才能在群体协作救援方面取得进步。前置摆臂式履带机器人机构的提出极大降低群体机器人实验研究、救援操作平台系统设计、救援行动参与的成本, 具有较强的实际意义。

参考文献

- [1] 徐文福, 毛志刚. 核电站机器人研究现状与发展趋势[J]. 机器人, 2011, 33(6): 758-767.
(Xu Wen-fu, Mao Zhi-gang. Research status and development trend of nuclear power station robot[J]. Robot, 2011, 33(6): 758-767.)
- [2] 由韶泽, 朱华, 赵勇. 煤矿救灾机器人研究现状与发展方向[J]. 工矿自动化, 2017, 43(4): 14-18.
(You Shao-ze, Zhu Hua, Zhao Yong, Chen Chang. Research status and development direction of coal mine rescue robot [J]. Industrial Automation, 2017, 43(4): 14-18.)
- [3] 李允旺, 葛世荣, 朱华. 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 Yun-wang, Ge Shi-rong, Zhu Hua. Obstacle surmounting mechanism and obstacle surmounting ability of four track double swing arm robot [J]. Robot, 2010, 32(2): 157-165.)
- [4] 翟旭东, 刘荣, 洪青峰. 一种关节式履带移动机器人的爬梯机理分析[J]. 机械与电子, 2010(1): 62-65.
(Zhai Xu-dong, Liu Rong, Hong Qing-feng. The stair climbing mechanism of an articulated mobile robot[J]. Analysis of Machinery and Electronics, 2010(1): 62-65.)
- [5] 刘巍巍, 王成龙, 刘慧芳. 一种搜救机器人的设计与越障分析[J]. 重型机械, 2016(6): 8-12.
(Liu Wei-wei, Wang Cheng-long, Liu Hui-fang. Design and obstacle surmounting analysis of a search and rescue robot [J]. Heavy machinery, 2016(6): 8-12.)
- [6] 赵建伟, 张云龙, 商德勇. 巡检机器人越障运动学分析及仿真[J]. 机电产品开发与创新, 2015, 28(3): 7-9+19.
(Zhao Jian-wei, Zhang Yun-long, Shang De-yong. Kinematics analysis and Simulation of inspection robot obstacle surmounting[J]. Mechanical and electrical product development and innovation, 2015, 28(3): 7-9+19.)
- [7] 陈志华, 钱瑞明. 基于 ADAMS 的救援机器人越障过程分析及仿真[J]. 机械制造与自动化, 2010, 39(1): 157-158+164.
(Chen Zhi-hua, Qian Rui-ming. Obstacle analysis and Simulation of rescue robot based on ADAMS[J]. Mechanical manufacturing and automation, 2010, 39(1): 157-158+164.)
- [8] 魏娟, 贾广利, 马宏伟. 煤矿救援机器人虚拟样机仿真分析[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(11): 1369-1373.
(Wei Juan, Jia Guang-li, Ma Hong-wei. Simulation analysis on virtual prototype of coal mine rescue robot[J]. Mechanical science and technology, 2008, 27(11): 1369-1373.)
- [9] 田润, 宋铁民, 孙涛. 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(5): 538-545.
(Tian Run, Song Yi-min, Sun Tao. Parameter design and experimental study of a new wheeled mobile robot[J]. Robot, 2015, 37(5): 538-545.)
- [10] 谭莹. 群体机器人技术及其在军事上的应用[J]. 国防科技, 2016, 37(1): 37-42.
(Tan Ying. Group robotics and its military applications [J]. National Defense Science and Technology, 2016, 37(1): 37-42.)