

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.027

消防机器人履带底盘设计与仿真

姚一¹, 鞠全勇², 宋凯¹, 吕章锐¹

(1. 盐城工学院, 江苏 盐城 224002; 2. 金陵科技学院, 江苏 南京 211169)

摘 要:设计一款用于复杂环境的消防机器人履带式底盘结构, 确定履带及轮系结构尺寸及相关参数。车体采用独立悬挂和装甲车前脸设计, 提高了整体的悬挂性能和稳定性, 解决了消防机器人越障和涉水阻力的问题。在底盘上加装可升降云台, 方便对不同高度中有害气体监测, 提高消防官兵进入火场的安全性。在 Recurdyn/Track LM 模块下, 对设计的消防机器人进行平面、爬坡和越障仿真分析, 得到机器人的速度、质心和位移曲线, 验证了设计的合理性。

关键词:消防机器人; 履带底盘; 结构设计; Recurdyn; 仿真

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)01-0128-03

Design and Simulation of Tracked Chassis for Firefighting Robot

YAO Yi¹, JU Quanyong², SONG Kai¹, LYU Zhangkun¹

(1. Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224002, China; 2. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169 China)

Abstract:The tracked chassis structure for a firefighting robot suitable for complex environments is designed, and the size and related parameters of the track and wheel system is determined. The vehicle adopts independent suspension and armored front design, which improves the overall suspension performance and stability and solves the problem of obstacles and water resistance for firefighting robots. A lift-able turret is installed on the chassis to facilitate monitoring harmful gases at different heights and improve the safety of firefighters entering the fire scene. With the Recurdyn/Track LM module, the designed firefighting robot is analyzed through simulation for flat terrain climbing and obstacle crossing, obtaining the robot's speed, center of mass and displacement curve, which verifies the rationality of the design.

Keywords:fire-fighting robot; tracked chassis; structural design; Recurdyn; simulation

0 引言

近年来,随着我国工业水平的快速提升,生产和储存所需的易燃易爆品和剧毒化学制品迅速增加,由于设备管理等方面的问题,引起的放射性物质泄漏、燃烧以及爆炸事故频发,造成巨大人员伤亡和财产损失。面对高温、有毒、浓烟等危险环境的火灾,消防机器人的研发对于消防部队的工作至关重要。

姜涛等^[1]设计一款可在四驱轮式和步态行走自由切换的消防灭火机器人,采用 Matlab 进行振动仿真;张响亮等^[2]采用了阻尼弹簧减震器作为消防机器人的减振系统,并基于 Recurdyn 软件对消防机器人进行仿真分析。

本文围绕履带中所包含的四轮一带、驱动装置等组成部分进行了分析设计,针对消防机器人实际工作环境会遭遇到的恶劣情况设计履带车体,设计了独立悬挂和装甲车前脸,并且在底盘上

加装了可升降云台,方便对不同高度的有害气体进行监测。

1 履带底盘的设计及分析

1.1 设计指标

鉴于履带底盘的通过性能主要取决于履带底盘的结构参数、几何参数及路面物理特性,而消防机器人在实际的工作中会遇到跨越斜坡和翻越垂直障碍物的情况^[3]。为此,确定消防机器人履带底盘的主要技术指标为:底盘自身质量不大于 350 kg;正常行驶速度范围为 0~5 km/h;在松软路面具备较好的路面通过能力,满载接地比压小于 40 kPa;具备较好的爬坡越障能力,越障高度不小于 240 mm;最大爬坡角度不小于 30°;操纵方式简单且能灵活转向,具有较小的转向半径。

1.2 履带的设计

作为消防机器人的履带类型,由于工作环境

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52171261);2020 年江苏高校“青蓝工程”资助项目

第一作者简介:姚一(1997—),男,江苏常州人,硕士研究生,研究方向为智能消防机器人研究与设计,15195001730@163.com。

恶劣,容易产生磨损,所以履带应具有较好的耐磨性能和附着性能。目前市场上常使用的橡胶履带主要为轮孔式、轮齿式和摩擦传动式3种。轮齿式橡胶履带由橡胶履带和金属轮齿组成,能减少履带的质量和动载荷,降低机器人的能耗。此外,轮齿式橡胶履带还具有较好的自清洁能力,可以减少机器人在泥泞环境中的运行阻力,提高机器人的运行效率。因此文中选用轮齿式橡胶履带。

1) 履带节距 t_0 , mm。履带的节距与履带车辆的整机质量成正比,计算公式为

$$t_0 = (15 \sim 17.5) \sqrt[4]{G} \approx 70 \quad (1)$$

式中 G 为整机质量, kg。

2) 履带板宽度 b , mm。履带板的宽度取决于工作条件所要求的平均接地比压,宽度越大,接地比压越小,一般参照公式为

$$b = (0.9 \sim 1.1) \times 209 \times \sqrt[3]{G \times 10^{-3}} \approx 140 \quad (2)$$

1.3 轮系的设计

1) 驱动轮:驱动轮主要功能是将动力传给履带,而行走驱动力矩与驱动轮半径成正比。驱动轮半径越大,驱动力矩也随之增大。履带行走装置的驱动轮通常放置在后部,这样既可以缩短履带张紧段的长度,减小功率损失,又能够很好地提升履带的使用寿命^[4]。

驱动轮节圆直径主要由驱动轮齿数和履带节距决定,根据 JB/T 6682—2008《联合收割机橡胶履带系列参数》,选取驱动轮齿数 $Z = 15$,则驱动轮参数为

$$D_1 = \frac{t_0}{\sin\left(\frac{180}{Z}\right)} \approx 336 \text{ mm} \quad (3)$$

2) 支重轮:支重轮的作用是将整机质量传到履带上,使整机沿履带轨道滚动,在此过程中夹持履带,确保不使其横向滑脱而导致履带在地面滑移^[5]。根据经验公式,支重轮直径为

$$D_2 = 2.5 \times t_0 = 175 \text{ mm} \quad (4)$$

3) 拖链轮:拖链轮装在履带的上方区段托住履带,以减少上方履带的跳动和下垂量,并防止履带发生侧向滑脱。文中选取拖链轮直径 $D_3 = 150 \text{ mm}$,每边各2个。

4) 引导轮:履带引导轮的主要作用是缓解履带的磨损,减少摩擦阻力,提高车辆的行驶效率和稳定性。引导轮直径比驱动轮直径略小,由 $D_k/D_1 = 0.8 \sim 0.9$,可得 $D_k = 268 \text{ mm}$ 。

1.4 底盘整体建模

在设计履带式底盘的外壳时,需要考虑多种因素,包括材料的选择、结构的设计、密封性能、抗冲击能力等^[6]。在内部电器元件的安装过程中,还采用了防震材料,进一步保护电器元件不受振动影响。此外,外壳表面还采用了钢结构的防火涂层,具有防水、防污、耐磨损等特性,能够保护外壳不受外界环境的影响,同时也能够延长外壳的使用寿命。底盘悬挂系统采用独立悬挂,能够提供更好的悬挂性能和稳定性,进一步提高越障能力。底盘采用装甲车前脸设计,以减少越障和涉水阻力,提高越野性能,方便消防机器人在户外环境工作。在底盘上方加装了可升降云台,这种可升降云台的设计非常实用,可以让气体检测器更加灵活地监测不同高度空气中的有害气体,同时可以根据需要添加不同类型的气体检测模块。对于材料应用方面,由于消防机器人的工作环境特殊,机身材料需要具有耐高温、防火、防爆、抗震等特性,选用铝合金金属材料。总结上述参数进行三维建模设计,得到履带底盘的模型如图1所示。

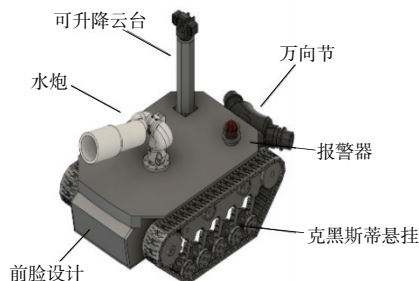


图1 消防机器人三维建模

2 仿真分析

2.1 建立仿真模型平台

首先在三维软件 Fushion360 中进行建模,完成整个消防机器人的设计,再将文件导入 Recurdyn 软件中。为了减少运算数据量,在不影响整体性能的前提下对模型进行简化,将加强部件、螺栓以及履带等部分进行删除,同时选用 Merge Body 命令,选中所有实体,选择底盘作为目标文件,完成机器人的合并。其次进入低速履带模块,在导入的机器人本体坐标上进行一侧履带部分建模,采取参数模数完成整个系统建模,建模结束后添加约束副,如表1所示。建模完成后退出子系统,复制履带到机器人另一侧,完成整体机

机器人的建模。最后进入大地编辑模式进行路面的建模,并设置履带与地面的摩擦因数,完成模型的建立,机器人模型如图 2 所示。

表 1 约束副对应关系

约束类型	基体	作用体
旋转副	支撑板	驱动轮
旋转副	支撑板	支重轮
旋转副	支撑板	拖链轮
旋转副	支撑板	引导轮
固定副	支撑板	链接条
固定副	母体	支撑板

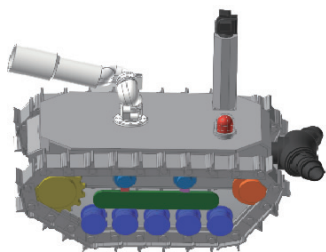


图 2 消防机器人 Recurdyn 模型

2.2 水平速度分析

消防机器人水平路面仿真模型如图 3 所示,实际最高行驶车速为

$$v = \frac{120\pi}{10^6} (1-\delta) n_q r_q = 5 \quad (5)$$

式中: v 为实际行驶速度, km/h; r_q 为驱动轮节圆半径, mm; n_q 为驱动轮转速, r/min; δ 为车辆的滑转率, $\delta=0.15$ 。

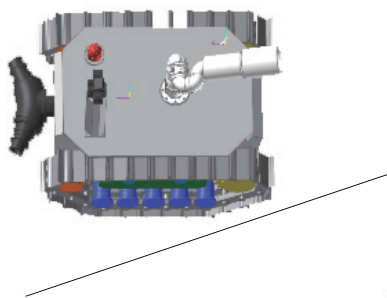


图 3 消防机器人平面仿真模型

根据水平路面曲线图(图 4)得出,消防机器人在 0~5 s 内从静止状态加速到最高 5 km/h,与设计要求一致。这说明车辆整体运行平稳,工作可靠,满足设计要求^[6]。

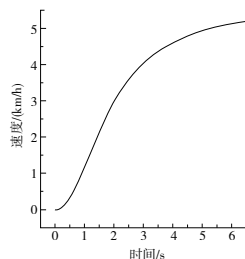


图 4 消防机器人水平路面行驶速度

2.3 爬坡路况分析

根据设计指标,消防机器人至少需要具备 30° 的爬坡能力,因此将斜坡设置为倾斜角度为 30°,如图 5 所示。

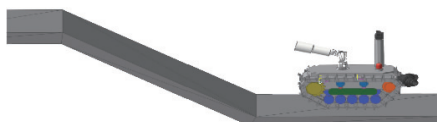


图 5 消防机器人爬坡仿真模型

通过图 6 仿真结果可知,履带机器人在平面起步,速度开始逐渐增加。在 3 s 时,履带机器人前履带开始与斜坡接触,速度开始下降,整体车辆质心开始倾斜;在 4 s 时,质心出现明显倾斜,履带机器人已经全部行驶到斜坡面,开始上坡行驶;在 6 s 时,机器人到达斜坡顶部,随后开始平面运动。

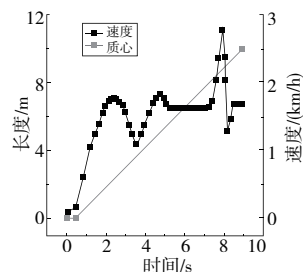


图 6 消防机器人爬坡速度-质心图

2.4 越障路况分析

消防机器人在执行任务时需要穿越各种地形和障碍物,例如狭窄的走廊、楼梯、地板上的障碍物等。因此,机器人底盘的越障性能是评估机器人实际工作能力的重要指标。消防机器人越障模型如图 7 所示。其底盘越障性能需要满足以下要求:能够稳定地越过 240 mm 高的单阶台阶,不会翻倒或倾斜;底盘结构应该具有足够的刚性和稳

(下转第 152 页)

- method for use with Curvic couplings[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering,2002,216(2):63-75.
- [7] RICHARDSON I J, HYDE T M, BECKER A A, et al. A three-dimensional finite element investigation of the bolt stresses in an aero-engine Curvic coupling under a blade release condition[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering,2000,214(4):231-245.
- [8] YU Y, LEE B, CHO Y. Analysis of contact and bending stiffness for Curvic couplings considering contact angle and surface roughness[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering,2019,233(6):1257-1267.
- [9] 黄发.圆弧端齿结构设计方法研究[D].南京:南京航

空航天大学,2013.

- [10] 李爱民,崔海涛,温卫东,等.航空圆弧端齿的齿根双圆弧结构设计及优化[J].推进技术,2016,37(1):146-155.
- [11] 李爱民.圆弧端齿结构设计方法与微动疲劳寿命预测模型研究[D].南京:南京航空航天大学,2015.
- [12] 罗凯琳.考虑微动损伤影响的圆弧端齿优化设计方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
- [13] 沈祥,曹鹏.涡轴发动机端齿连接结构接触状态分析[J].航空发动机,2017,43(4):35-40.
- [14] 徐鲁兵,廖明夫,吕延军.某动力涡轮转子连接圆弧端齿的优化设计[J].机械科学与技术,2023,42(6):969-977.

收稿日期:2022-05-26

(上接第130页)

定性,以确保机器人在越过障碍物时不会发生形变或失稳;底盘应该具有足够的灵活性和适应性,以适应不同高度和形状的障碍物。

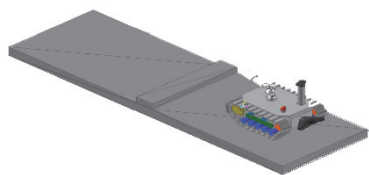


图7 消防机器人越障仿真模型

从图8可以分析出,2s以后履带底盘整体跃上台阶垂直面,此时力矩达到700Nm;在3s左右履带底盘整体翻越上障碍物,消防机器人成功翻越最高障碍物高度300mm;4s时履带底盘整体已经着陆。根据仿真结果来看,该消防机器人最大越障高度超过240mm,因此能够满足越障设计指标。

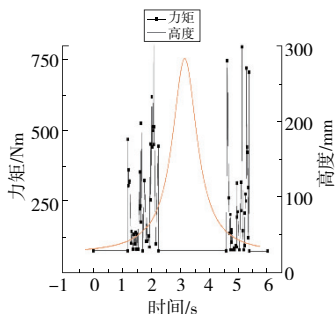


图8 消防机器人越障位移图

3 结语

本文围绕履带中所包含的四轮一带、驱动装

置等组成部分进行分析,确定履带各结构尺寸及相关参数,并对其所涉及的理论依据及计算公式进行了论述,从而为消防机器人三维建模及仿真条件奠定了理论基础。针对消防机器人实际工作环境中的恶劣情况,车体采用了独立悬挂和装甲车前脸设计,提高了整体的悬挂性能和稳定性,解决了消防机器人越障和涉水阻力的问题。在底盘上加装可升降云台,方便对不同高度中有害气体的监测,提高消防官兵进入火场的安全性。

本文通过确定消防机器人的主要技术指标,结合消防履带车辆常见路况,基于仿真软件Recurdyn在虚拟环境下设置路面、坡面和障碍物来对设计参数进行分析和验证,对消防机器人行走装置的地形通过能力进行了评价,证明了设计的合理性,对下一步工作具有重要意义。

参考文献:

- [1] 姜涛,郭安福,李进,等.轮足混合式消防机器人的结构设计与分析[J].制造业自动化,2021,43(9):151-156.
- [2] 张响亮,张华,熊根,等.基于RecurDyn的履带式消防机器人设计与爬梯运动学仿真[J].机械传动,2020,44(6):89-95.
- [3] 刘海燕.履带行走机构的计算与选型设计[J].采矿技术,2013,13(4):90-93.
- [4] 刘满禄,王亚翔,张俊俊,等.履带机器人越障能力优化[J].制造业自动化,2018,40(5):24-27,76.
- [5] 刘好,谢锐,张拓.小型山地履带底盘设计与仿真分析[J].机械设计,2020,37(6):115-122.
- [6] 陈安成,穆希辉,杜峰坡,等.基于RecurDyn的小型履带车的建模与仿真[J].机械设计,2013,30(10):36-39.

收稿日期:2023-05-19