

文章编号: 1671-0444(2018)04-0630-05

消防侦察机器人的设计与实现

王 勇^{1,2}, 刘菲菲³, 傅建桥⁴, 胡 斌⁴

(1. 临沂大学 机械与车辆工程学院, 山东 临沂 276000;

2. 国家林业局北京林业机械研究所, 北京 100029;

3. 山东省临沂市兰陵镇中心小学, 山东 临沂 276000; 4. 公安部上海消防研究所, 上海 200438)

摘要: 为了减少火灾侦察过程中消防人员伤亡及提高侦察效率, 设计研发了一款消防侦察机器人。该机器人采用带翻转臂的双履带车体作为移动载体, 机身上搭载了云台摄像机、防水喇叭、轮廓指示灯带、发光导向绳、应急救援储物箱等设备。消防侦察机器人利用搭载的云台摄像机将火灾火情、被困人员等现场情况实时传输至外场监控系统, 同时通过防水喇叭、轮廓指示灯、发光导向绳为火灾被困人员指引逃生路线。试验结果表明, 该款消防侦察机器人能够成功完成消防侦察和救援疏散工作, 有效降低消防人员的伤亡, 显著提高消防侦察救援效率。

关键词: 消防; 侦察; 应急救援; 机器人

中图分类号: TH 165; TG 659

文献标志码: A

Design and Realization of Fire Scout Robot

WANG Yong^{1,2}, LIU Feifei³, FU Jianqiao⁴, HU Bin⁴

(1. School of Mechanical & Vehicle Engineering, Linyi University, Linyi 276000, China;

2. Beijing Forestry Machinery Research Institute of SFA, Beijing 100029, China;

3. Lanling Town Central Primary School, Linyi 276000, China;

4. Shanghai Fire Research Institute of MPS, Shanghai 200438, China)

Abstract: In order to reduce fire fighters casualties and improve work efficiency in the process of fire detection, a fire scout robot was designed. The robot used a two-track vehicle with a flipped arm as its mobile carrier, and equipped with a cloud camera, a waterproof horn, an outline indicator light belt, a luminous guide line, emergency relief storage box and some other equipments. The fire scout robot used the mounted cloud camera to transmit real situation such as fire behavior and trapped people to the field monitoring system in real time. At the same time, the escape route was guided by the robot for the trapped people by its waterproof horn, contour indicator and luminous guide line. The results show that the fire scout robot can complete fire detection and rescue evacuation successfully, reduce the casualties of fire fighters and the efficiency of fire detection and rescue are improved significantly.

Key words: fire; scout; emergency rescue; robot

收稿日期: 2017-12-06

基金项目: 上海市科委资助项目(15DZ1204901); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0800607)

作者简介: 王 勇(1988—), 男, 山东临沂人, 讲师, 硕士研究生, 研究方向为消防机器人技术, E-mail: wangecust@163.com

傅建桥(联系人), 男, 研究员, E-mail: fjq_shxf@sina.com

大型火灾的救援是当前国内外消防部门重点关注的领域,特别是室内大型火灾的救援,更是消防应急救援工作的重点^[1-4]。大型火灾救援的难点在于火灾现场火情的侦察。能否准确获取火灾现场的火情,直接关系到消防救援工作的开展以及救援实施方案的选取^[5]。现阶段,国内消防对火灾火情的侦察主要依靠消防员战士通过配备空呼、定位系统等设备进入火灾现场实地侦察。该种侦察方式不仅侦察范围不全面、效率低,更为重要的是,火灾现场往往存在易燃易爆、有毒有害气体,无法保证消防员人身安全,危险性较高。

随着机器人技术的发展,国内外学者就消防侦察机器人进行了大量研究工作。2005年,由公安部上海消防研究所主持研发了国内第一款消防侦察机器人,该款侦察机器人采用了整体“正压”防爆处理,提高了机器人在火灾现场作业的安全性能^[6]。张树生等^[7]设计了一款消防灭火侦察机器人,该机器人在发生火灾、爆炸等事故时,能够进入火灾现场,对火灾情况实施侦察、灭火救援。秦讼亭^[8]将物联网技术的全面感知、可靠传输、智能处理等优势与消防侦察机器人相结合,为火灾侦察过程中存在的数据采集不足、信息实时反馈差等问题提供了有效的解决方法。美国 Howe and Howe 技术公司设计研发了一款名为“thermite RS1-T2”的小型火灾侦察机器人,该机器人兼具火灾侦察和灭火功能,可适用于石油化工、核反应堆等危险场所,在美国消防领域得到了广泛应用^[9]。

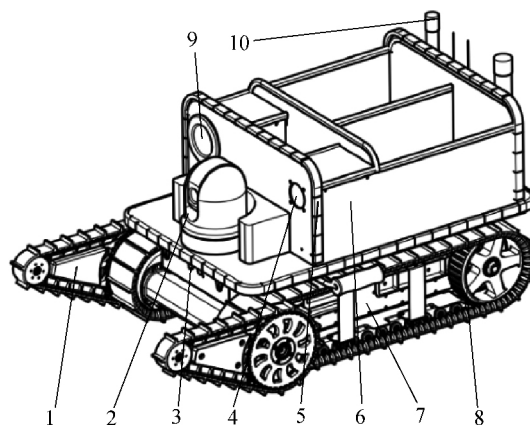
本文从火灾火情侦察的实际出发,设计了一款消防侦察机器人,该机器人兼具火灾火情侦察、必要救援物资运输以及救援指引功能。

1 机器人总体设计方案

消防侦察机器人由移动载体、云台摄像机、固定摄像机、LED 照明灯、喇叭、轮廓指示灯带、上装储物箱、分体式锂电池、无线数传系统等部件组成。机器人各部件相互配合,协同完成消防侦察工作。消防侦察机器人结构组成效果图如图 1 所示。

1.1 移动载体设计

为了提高消防侦察机器人的越障能力和爬坡能力,该机器人采用关节履带式车体作为移动载体,这种移动载体即为在传统履带式移动载体上安装翻转臂,其特点是在机器人受力均衡并保证机器人的工作参数(台阶的阶高、地面摩擦因数等)一致时,机器



1—翻转臂;2—云台摄像机;3—固定摄像机;4—喇叭;
5—轮廓指示灯带;6—上装储物箱;7—分体式锂电池;
8—移动载体底盘;9—LED 照明灯;10—无线数传系统

图 1 消防侦察机器人效果图

Fig. 1 Diagram of fire scout robot

人的摆臂可显著优化车轮的有效直径,减小机器人的体积,提高越障和爬坡能力。

1.1.1 倾翻稳定性分析

由于消防侦察机器人在执行侦察任务时,所处的地形环境较为复杂,为了防止机器人发生倾翻,需要对侦察机器人进行倾翻稳定性设计。倾翻稳定性评判的核心思想,即利用机器人的自身重力,以及在运行时由其他外力所派生出的力矩,通过判断支撑多边形倾翻边线的正负,来对机器人的倾翻稳定性进行分析。目前,常用的倾翻稳定性设计方法主要包括静态稳定判据方法和动态稳定判据方法^[10-11]。

本文利用稳定锥及倾翻性能指数的概念^[12-13],通过收集机器人的运动边线、角点倾翻的动/静态情况,采用稳定锥原理综合分析消防侦察机器人倾翻稳定性。在稳定锥原理图中,稳定锥的顶点为载体重心,稳定锥的底面是由载体和载体的支点所组成的凸多边形构成,其原理示意图如图 2 所示。图中:

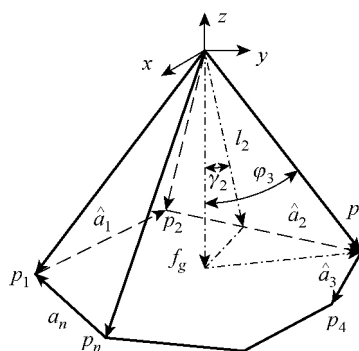


图 2 稳定锥原理示意图

Fig. 2 The schematic diagram of stability pyramid

以俯视情况下的顺时针方向对多边形角点顺次标注分别记为 $p_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$; a_i 为稳定锥底面的边线; l_i 为过稳定锥重心 l_g 与锥底面的边线 a_i 的垂直线; $\hat{a}_i = a_i / \|a_i\|$; γ_i 为垂直线 l_i 与稳定锥重心 l_g 的夹角; φ_i 为角翻转角。

此方法需对由重力线及稳定锥的各侧面所构成的夹角进行分析,若该夹角小于零,则机器人存在侧翻的可能性。因此,在机器人的方案设计时,需要对该夹角预留一定的裕度值。倾翻性能指数(ϕ)的综合计算表达式如式(1)所示,各边线和角点的倾翻性能指数均值($\bar{\phi}$)表达式如式(2)所示。

$$\phi = \max \left(\frac{\lambda_i}{\gamma_i} + \frac{\rho_i}{\varphi_i} + \xi_i \sqrt{\frac{\cos \theta_i}{1 - \cos \theta_i}} \right) \quad (1)$$

$$\bar{\phi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda_i}{\gamma_i} + \frac{\rho_i}{\varphi_i} + \xi_i \sqrt{\frac{\cos \theta_i}{1 - \cos \theta_i}} \right) \quad (2)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$; θ_i 为名义上的稳定计算角; λ_i 为边线侧翻时的权重计算系数; i 为边线个数; ρ_i 为角点侧翻权重系数; ξ_i 为侧翻能量权重系数。 ϕ 用于反映侦察机器人在执行作业任务时,移动载体倾翻的危险程度,其值越大则越容易倾翻,反之移动载体越稳定。 $\bar{\phi}$ 用于描述消防侦察机器人的整体危险情况。

机器人与楼梯的台阶发生接触的最前端及最后端的 4 个接触点构成稳定锥的底面,机器人的质心作为稳定锥的顶点,若机器人的质心垂直线处于稳定锥底面内部,则表征该机器人是稳定的。机器人在爬楼梯时极易后翻,此时将过稳定锥顶点和底面的连线最小值称为稳定裕度角 λ , λ 值越小,则机器人发生倾翻的可能性越大。在实际应用过程中,为了提高移动载体的稳定性能,需要限定稳定裕度角的最小值 λ_{\min} 则保证稳定的条件为 $\lambda > \lambda_{\min}$ 。

消防侦察机器人在爬楼梯过程中,倾翻现象主要发生在以下两种情况:一为机器人刚开始爬楼梯的过程中;二为机器人的履带刚要脱离楼梯接触点的过程中。机器人刚开始爬楼梯的过程稳定性分析图如图 3 所示。在该种运动过程中,机器人的倾斜角 θ 是变化的,要想测算该运动过程的稳定裕度角,则需要计算该过程中最大倾斜角 θ_{\max} 。其中, θ_{\max} 为初始设置 θ_0 和楼梯倾角 θ_s 的最大值。 $\Delta A'B'G$ 状态下的稳定锥的稳定裕度角为 λ_1 , 利用三角几何关系可知

$$\lambda_1 = \arctan \frac{x_G - x_B}{y_G - y_B} \quad (3)$$

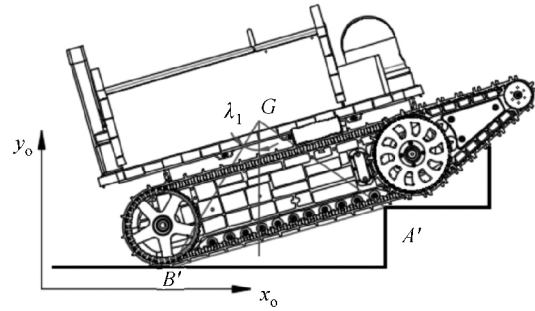


图 3 机器人刚开始爬楼梯稳定性分析图

Fig. 3 The stability analysis diagram when the robot begins to climb the stairs

机器人的履带刚要脱离楼梯接触点的过程稳定性分析图如图 4 所示。机器人履带上的 B 点和楼梯的棱边刚分离,此时,最后一个接触点为图中的 A 点,最前一个接触点为图中 C 点, ΔACG 为该种条件下的稳定锥,此时稳定裕度角为 λ_2 , 利用三角几何关系可知

$$\lambda_2 = \arctan \frac{x_G - x_A}{y_G - y_A} \quad (4)$$

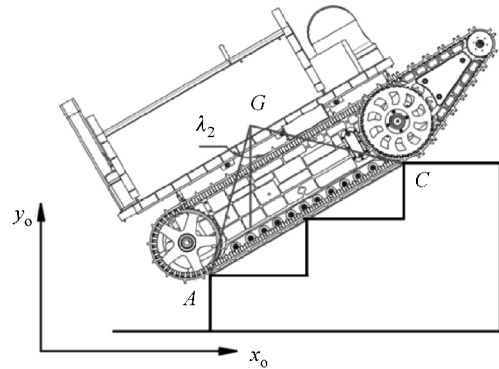


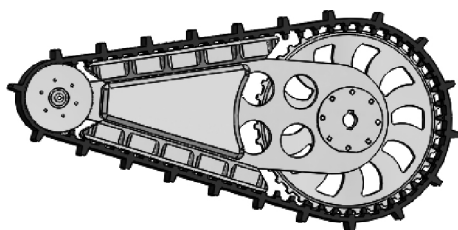
图 4 机器人刚要脱离楼梯接触点的过程稳定性状态分析图

Fig. 4 The stability analysis diagram when the robot is just about to break away from the landing point

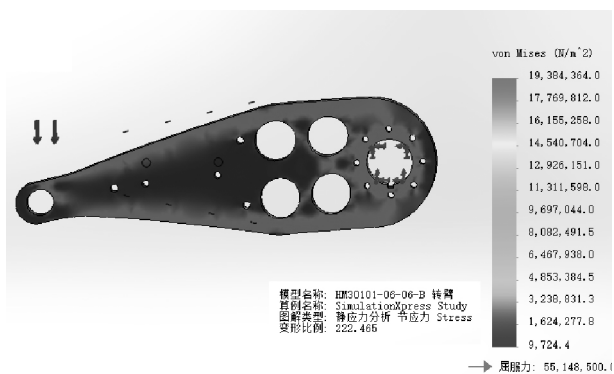
综上所述可知,机器人爬标准楼梯过程中,其稳定裕度角应为两个危险状态下稳定裕度角的最小值,即 $\lambda = \min(\lambda_1, \lambda_2)$ 。

1.1.2 翻转臂校核分析

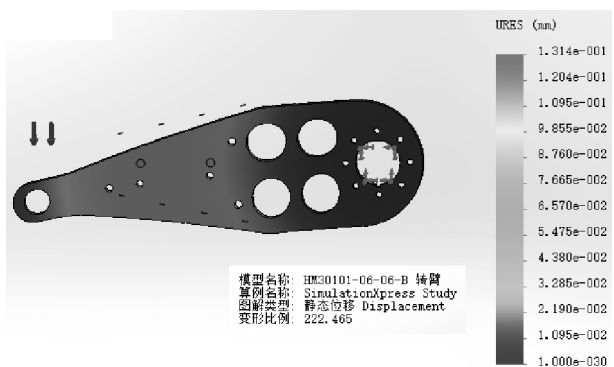
消防侦察机器人的翻转臂总装示意图及其应力仿真分析图如图 5 所示。对机器人的翻转臂进行应力分析时,固定圆孔处,单侧承受 350 N 的载荷,材料为 6061 合金,10 mm 板厚,四个铣为直径 $\phi 28$ mm 的圆孔。仿真应力和变形分析结果显示,翻转臂的最大变形量为 0.131 mm,满足设计要求。



(a) 装配总图



(b) 应力仿真图



(c) 变形仿真图

图 5 机器人翻转臂装配应力及其应变分析图

Fig. 5 The assembly stress and strain analysis diagram of robot overturning arm

1.2 机器人上装设计

依据消防侦察机器人侦察及救援作业需求,机器人上装的前部需布置低照度摄像机、喇叭、照明灯等设备,中部安放防毒面具和强光手电的应急救援储物箱,后部放置通信天线并拖挂中继小车。在机器人外围轮廓上安装灯带,用于指示机器人的轮廓。机器人上装设计方案示意图如图 6 所示。

由于消防侦察机器人可能在地下环境中使用,而地下环境情况更为复杂,无线信号可能无法全面覆盖。因此,为侦察机器人设计了通信中继小车,在

无线信号出现严重衰减时,通过通信中继,延长机器人与控制台的通信距离。中继小车与消防侦察机器人连接示意图如图 7 所示。

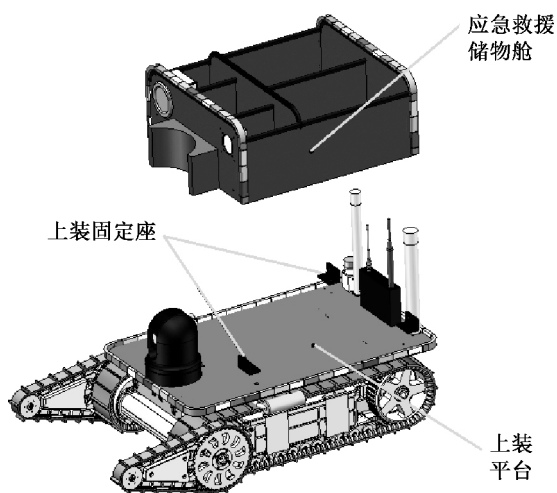


图 6 消防侦察机器人上装设计方案示意图

Fig. 6 The schematic diagram of equipment layout plan of fire scout robot

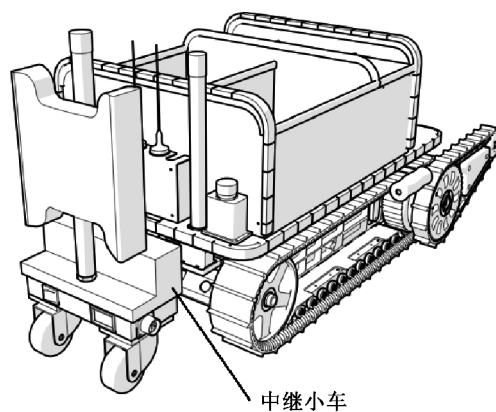


图 7 消防侦察机器人与中继小车连接示意图

Fig. 7 The connection schematic diagram of fire scout robot and the relay car

2 试验测试

对消防侦察机器人的试验测试主要包括对其机械性能(爬坡、越障能力)和侦察功能进行分析。消防侦察机器人实物图如图 8 所示。

消防侦察机器人操作流程如图 9 所示。具体功能测试结果如表 1 所示。测试结果显示:所设计的消防侦察机器人,通过搭载的云台能够侦察到火灾现场火情;能够攀爬倾斜角度为 35°的楼梯;可以越过 200 mm 高的障碍物,并携带必要的消防救援物资,为被困人员提供有力的救援支持。



图8 消防侦察机器人实物图

Fig. 8 The physical picture of fire scout robot

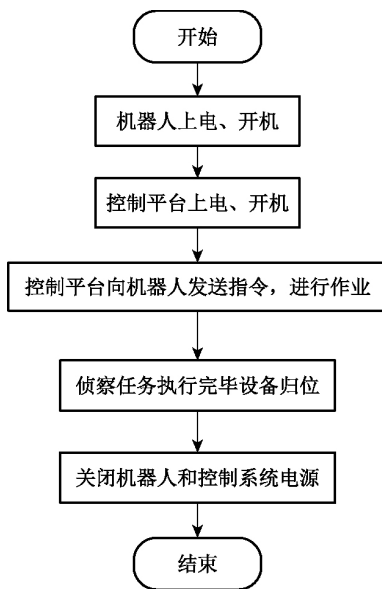


图9 消防侦察机器人操作流程

Fig. 9 Operation flow chart of fire scout robot

表1 消防侦察机器人功能试验测试结果分析

Table 1 Analysis of function test results of fire scout robot

设计功能	测试内容	测试结果
爬坡 角度/(°)	15~25	✓
	35	✓
	40	✗
越障高度 /mm	50~100	✓
	100~150	✓
	200	✓
侦察/应急 救援功能 测试	250	✗
	通过喇叭向被困人员喊话	✓
	通过云台摄像机, 实时观察火灾现场情况	✓
	机器人的轮廓指示灯带能够帮助被困人员及时发现机器人	✓
	被困人员能够方便地从储物箱中取出应急救援物资	✓
	机器人携带的发光导向绳能够为被困人员导向	✓
	机器人拖行的中继小车能够增强通信能力	✓

注: 符号“✓”为通过; 符号“✗”为不通过。

3 结 语

本文设计研发了一款消防侦察机器人,对机器人的系统组成分别进行论述。测试结果表明:所设计的消防侦察机器人,可以替代消防人员遥控进入充满浓烟的室内外危险灾害现场,探测现场视频、声音和温度,搜索火源,辅助受困人员逃生自救,可有效解决消防人员在上述场所面临的人身安全等问题,能够在复杂路况下正常行走,完成设定的消防侦察、应急救援作业任务,满足消防救援实际工作要求。

该款消防侦察机器人的研制将为我国后续开展相关智能消防装备研究提供理论和实践参考。

参 考 文 献

- [1] 贾南,金静,刘义祥,等. 层次分析法在大型商场火灾应急救援能力评估中的应用[J]. 内江科技,2017(4): 51-52.
- [2] 魏捍东. 大型市场火灾的扑救战术[J]. 消防科学与技术, 2015,34(6): 789-791.
- [3] 傅建桥,王勇,徐琰,等. 一种反恐驱暴机器人移动载体的设计[J]. 东华大学学报(自然科学版),2017,43(4): 520-524.
- [4] 王勇,韩虎,胡斌,等. 反恐驱暴机器人的设计与实现[J]. 东华大学学报(自然科学版),2017,43(4): 525-529.
- [5] 徐敏. 天津港8·12特别重大火灾爆炸事故现场特点[J]. 城市与减灾,2015(5): 9-12.
- [6] 刘红星. 消防侦察机器人的设计研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2006.
- [7] 张树生,裴文良,孙宁,等. 消防灭火侦察机器人的研制与应用[J]. 制造业自动化,2016,38(6): 55-58.
- [8] 秦讼亭. 基于物联网技术的消防侦察机器人系统设计[D]. 大连:大连海事大学信息科学技术学院,2017.
- [9] 桂佳清,王国庆,陈威振,等. 四足侦察机器人的设计与研究[J]. 机械传动,2017,41(5): 193-197.
- [10] 张皓然,戈振扬,于英杰,等. 除草用四足机器人稳定性的判定与分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2015,41(3): 340-344.
- [11] 刘娟秀,吴益飞,郭健,等. 一种轮足式爬楼梯机器人的倾翻稳定性研究[J]. 南京理工大学学报,2015,39(6): 643-649.
- [12] 李彬,刘金国,谈大龙. 可重构模块机器人倾翻稳定性研究[J]. 机器人,2005,27(3): 241-246.
- [13] WU W, ZHUANG X Y, ZHU H H, et al. Centroid sliding pyramid method for removability and stability analysis of fractured hard rock[J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(3): 627-644.

(责任编辑:郭小敏)