

履带式林地消防机器人模型建立与仿真分析

李连鹏¹, 廖登华², 黄田³

1. 中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100176
2. 湖北航天技术研究院计量测试技术研究所, 湖北 孝感 432003
3. 东北林业大学, 黑龙江 哈尔滨 150006

摘要 : 考虑林地复杂环境地型, 在不同路况下对机器人进行运动学理论分析, 以平地、转向、斜坡和沟壑等为研究目标, 为机器人的设计提供主要依据。采用 Solidworks 软件对履带式消防机器人进行三维建模, 并使用有限元分析软件对关键零部件进行校核分析。最后应用 RecurDyn 软件建立消防机器人的仿真模型, 对消防机器人在直线、转向、斜坡、越障的运动状态进行仿真分析, 在直线运动分析部分考虑不同速度对输出转矩的影响, 最后对机器人在复合路况的运动情况进行仿真验证, 通过仿真结果分析机器人结构设计的合理性。该机器人在推广应用之后, 将会提升我国的森林消防水平, 更好地保护我国森林资源, 减少人员和财产的损失。因此, 研制可以在林地复杂环境下高效地完成消防作业的机器人, 具有十分重要的现实意义。

关键词 : 机器人; 三维建模; 有限元分析; 仿真分析; 结构设计

Model Establishment And Simulation Analysis Of Crawler Woodland Fire-Fighting Robot

Li Lianpeng¹, Liao Denghua², Huang Tian^{*}

1.MCC Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd.Beijing 100176
2.Measurement and Testing Technology Research Institute of Hubei Aerospace Technology Research Institute,Xiaogan, Hubei 432003
3.Northeast Forestry University, Heilongjiang, Harbin 150006

Abstract : Considering the complex terrain of the woodland environment, a kinematic theoretical analysis is conducted on the robot under different road conditions, including flat ground, turning, slopes, and gullies, to provide the main basis for the design of the robot. A three-dimensional model of the tracked firefighting robot is created using Solidworks software, and key components are verified using finite element analysis software. Finally, a simulation model of the firefighting robot is established using RecurDyn software to analyze the robot's motion in straight lines, turns, slopes, and obstacles. The analysis of straight line motion considers the impact of different speeds on the output torque. The robot's motion under complex road conditions is verified through simulation analysis, and the rationality of the robot's structure design is evaluated based on simulation results. After the promotion and application of this robot, Will enhance China's forest fire ,protection level, Better protection of China's forest resources and reduction of personnel and property losses. So developing robots that can efficiently complete firefighting operations in complex forest environments for significant practical significance.

Key words : robot; three-dimensional model; finite element analysis; simulation analysis; structure design

一、概述

本章采用 Solidworks 软件对履带式消防机器人进行了三维建模, 通过有限元分析软件对关键零部件进行验证与校核。最后应用 RecurDyn 软件建立消防机器人的仿真模型, 对消防机器人在

不同林区地形的运动状态进行仿真分析^[1]。本文研究的履带式机器人能够在林区发生严重火灾时, 能够对火灾现场的数据进行采集与反馈, 利用喷水系统对火点进行扑灭, 能够代替消防人员进入火灾现场, 具有适应性强、安全可靠等特点

* 作者简介: 李连鹏(出生1979年7月), 性别: 男, 民族汉, 籍贯(黑龙江省安达市), 学历: 硕士研究生, 职称: 高级工程师, 研究方向: 项目管理, 身份证号230103197907126816邮箱 liliianpeng2030@163.com

二、林地消防机器人样机模型建立设计

机器人的建模采用 SolidWorks 进行，其主要目标是对机械零件进行合理的检验，并根据零件的结构进行优化，提高零件的加工性能。调整各部件并进行组装，提高产品的整体性能，检查各零部件干涉情况，有针对性地进行结构改进；对总体质量进行预测，控制其结构以达到设计要求^[2]；对整机进行模拟仿真分析，以检验其整体功能。

针对样机模型的建立，在底盘结构中，将利用 ANSYS 有限元分析软件对关键的部件进行分析。在整机仿真验证中，将利用 RecurDyn 多体动力学仿真分析软件对不同运行工况下的运行情况进行分析。

三、林地消防机器人关键部件有限元分析

通过机器人动力学分析可知，履带底盘受力情况复杂，驱动轮主要功能是与履带啮合^[3]，因此在齿与履带啮合处易发生磨损。承重轮在进行斜坡转向时会有相对复杂的受力。减震装置的主要作用是调整履带的松紧程度，以达到行驶的稳定性。因此对以上三个关键部件进行有限元分析。

采用 ANSYS-Workbench 软件对部件的形变进行了分析，在 Solidworks 中将为模型保存为 x_t 格式，打开 Workbench，找到静力学分析模块，右击 geometry 后导入模型，首先定义好材料的属性，双击 model 来到模型分析界面，进行模拟分析。

（一）驱动轮形变分析

在 SolidWorks 平台上构建了驱动轮联动杆模型，并将该模型导入到 ANSYS 软件中，选用静态分析模块。基于此情况，驱动轮材料选用碳素铸钢 ZG310-570，该材料具有生产成本低、强度高、韧性好和塑性强等特点，可以用来制造复杂形状的大型齿轮；支架选用 40Cr 合金钢，对驱动轮进行有限元分析。

在 Workbench 中，根据驱动轮的实际接触状态，对其进行静力学分析，将选用的材料参数输入 Workbench 材料库中，打开模型后施加到轮和支架上，划分网格单元，大小为 8mm。驱动轮单边受力为 400N，因此在支架两侧施加 400N 的力，方向为轴的法线方向。最后进行约束设置，驱动轮绕旋转中心转动，给定转速为 3.5rad/s，同时在轮轴末端施加固定约束^[4]，最后进行求解分析；

通过分析可知，驱动轮形变量分布较为均匀，形变量最大发生在轮轴末端位置，最大形变量为 0.061mm。驱动轮及支架应力分布比较均匀根据驱动轮的分析结果，最大应力为 334.08Mpa。

（二）承重轮形变分析

考虑到承重轮在倾斜方向上的受力比较复杂，因此，采用有限元方法对其与履带的接触进行了分析。材料设置与驱动轮材料一致，划分网格单元，大小为 5mm。在承重轮上添加转动副，同时为了保证计算结果的稳定性，在轴孔中心轴向和圆周方向上，对轴心施加轴向和圆周方向的力，力的大小为 150N。承重轮有限元分析结果详见图 3-1。



(a) 总变形分析图 (b) 应力分析

>图 3-1 承重轮分析图

分析图 3-1 可知，承重轮最大应力为 175.84MPa，应力分布相对均匀，承重轮最大形变在轮边为 0.036mm 处。根据仿真结果，驱动轮形变较小，满足结构的刚性要求。

（三）减震装置形变分析

从越障情况下的模拟可以看出，在越障情况下，机器人的导向轮轴与沟槽接触时，会产生较大的推力，机器人的减震系统也会受到更大的阻力，因此为验证减震装置是否满足形变要求，对减震弹簧进行有限元分析^[5]。首先设置材料属性，弹簧材料设为 70 钢，其他部分的材料设置为 40Cr。在模型界面设置网格大小为 3mm，将弹簧上下两块隔片与弹簧进行接触设置，摩擦系数设为 0.15。添加约束，在减震装置两边设置位移量为 1mm，方向沿减震装置中心轴线方向。

通过分析可知，减震装置的最大应力值为 17.579MPa，最大形变量 0.046mm，位于减震装置中间部位，因此减震装置的设计符合实际要求。

四、林地消防机器人运动学仿真分析

消防机器人的机械系统复杂，结构设计需要利用多体动力学分析软件进行验证分析。现有的多体动力学软件包括 ADAMS、SAMCEF、RecurDyn 及 SIMPACK，在履带式运动机器人研究领域，RecurDyn 包含多种专业模块，其中履带分析模块较其他动力学分析软件优势明显，本节运用 RecurDyn 对履带式林地消防机器人进行仿真建模，分析机器人不同林区地形条件下的运动性能。

（一）仿真模型的建立

RecurDyn 是一款以多体动力学仿真为核心的软件，在解决大型多体动力学问题时具有独特的优势。RecurDyn 不仅是一个多体动态模拟软件，而且还是一个虚拟样机的开发工具。RecurDyn 的专业模块包括皮带分析模块，高速运动履带分析模块，低速运动履带分析模块，轮胎模块，发动机开发设计模块，主要模块见表 4-1，本节仿真分析选择 RecurDyn/Track(LM) 模块。

表 4-1 RecurDyn 主要工作模块

序号	模块名称	模块功能
1	RecurDyn/Track(HM)	高机动性履带，专为坦克装甲等设计的高机动履带系统工具包。
2	RecurDyn/Track(LM)	低机动性履带，专为履带式车辆设计的低机动履带系统工具包。
3	RecurDyn/Gear	齿轮工具箱，可自动生成齿轮的几何体及自动定义接触关系。

序号	模块名称	模块功能
4	RecurDyn/ Chain	链条工具包, 可轻松实现链条的装配。
5	RecurDyn/ Belt-pulley	皮带滑轮工具包, 可轻松设计和分析整个皮带滑轮系统。

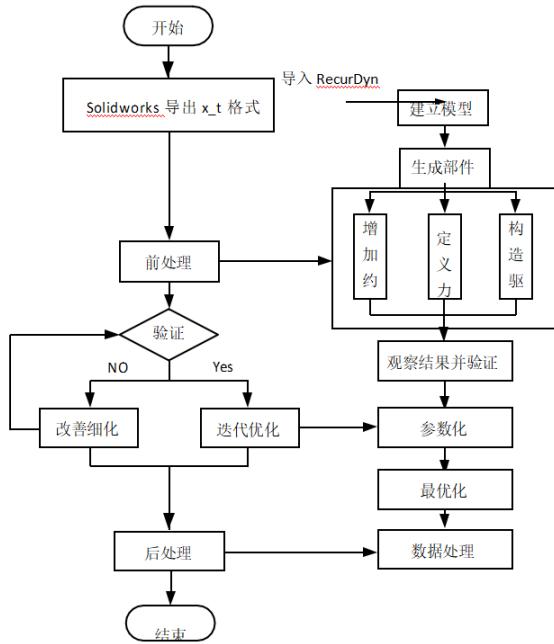


图 4-1 仿真建模流程

通过图 4-1 可知，流程分为如下几个部分，首先在软件中建立模型，创建系统各部分零件，添加约束，给部件定义相应的力，对模型进行仿真，观察他的动画和结果，接着对模型进行验证。验证通过后对模型进行参数化设置，在原有基础上进行迭代优化，最后对仿真数据进行分析处理。本论文结合实际机构设计的需求，首先在 Solidworks 三维软件中建立各部件模型，装配好后将模型另存为 x_t 格式，随后导入到 RecurDyn 中，通过对各部件添加材料属性，设置约束及载荷，调整步长，在 Ground 中绘出路面，完成模型的仿真分析。在此过程中，需进行一系列的参数设置。包括接触设置、各部件材料设置及约束与力的设置。

(1) 接触设置

RecurDyn 接触计算是一个复杂的计算过程。在接触已经发生时，通过已知接触刚度分析并计算出摩擦力。基于 Hertz 理论计算接触力，法向的接触力 f_a 的公式如 (4-1) 所示：

$$f_a = k\delta^{m_1} \pm c \frac{\dot{\delta}}{\dot{\delta}} |\delta|^{m_2} \delta^{m_3} \quad (4-1)$$

式中：k —— 接触刚度系数，N/mm；

—— 接触穿透程度，mm；c —— 阻尼系数，N s/m；

m_1 —— 刚度指数；

m_2 —— 阻尼指数；

m_3 —— 渗透指数 [62, 63]，一般取 0。

RecurDyn 摩擦力 f_f 如式 (4-2) 和 (4-3) 所示：

$$f_f = \mu(v) |f_n| \quad (4-2)$$

$$f_f = sign(f_n) \times \min(|f_n|, f_{max}) \quad (4-3)$$

式中： f_n

—— 法向接触力，N；

$\mu(v)$ —— 摩擦系数，由接触点的相对速度确定；

f_{max} —— 最大摩擦力，N。

由上式可以得出，摩擦力的大小主要取决于摩擦系数。考虑到本机器人设计用于林地，履带行走的速度较慢，结合以上分析，在模型自动装配后选择 TrackAssembly，出现接触参数窗口，根据本文研究对象应用场所选择黏性土，完成接触设置。

(2) 材料设置

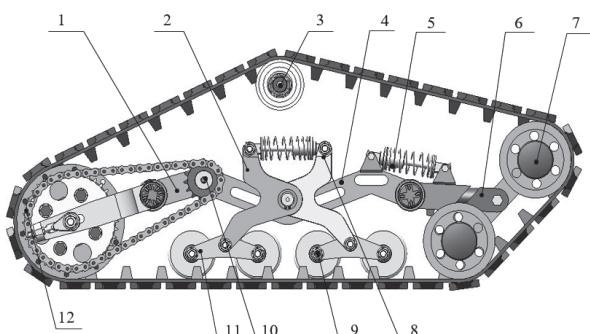
仿真过程时，材料参数的设定对仿真的结果有很大的影响。在 RecurDyn 里，只有把材料的特性给到了模型上，才能对其进行模拟仿真分析。在软件界面右键需要设定材料的零件，在特性窗口进行材料类型的选择。如表 4-2 所示：

表 4-2 主要部件材料设置

部件名称	材料
履带	Rubber
驱动轮	Steel
承重轮	Steel
拖链轮	Steel
机械臂	Steel
水炮	Steel
车体	Aluminum
路面	Clayey soil

(3) 约束力的设置

在 RecurDyn 软件中，提供 21 种标准的约束形式，包括移动副、转动副、固定副等。两个部件之间的相对运动关系通过添加约束来定义。一个部件由于相对关系不同，因此产生的运动副并不单一，在不同的约束中通过设置不同的驱动函数、初始条件、阻尼系数等可以限定两个部件之间的相对运动形式。在 RecurDyn 中的机器人底盘模型如图 4-2 所示



1. 导向轮支架 (支架 1) 2. 左侧减震装置支架 (支架 2) 3. 拖链轮 4. 底盘支架 (支架 3) 5. 减震弹簧 6. 导向轮支架 (支架 4) 7. 导向轮 8. 右侧减震装置支架 (支架 5) 9. 承重轮 10. 链轮 11. 承重轮支架 (支架 6) 12. 驱动轮

图 4-2 RecurDyn 中的机器人底盘模型

结合本文中的仿真模型，添加了 13 个转动副、2 个运动副和 3 个固定副，在弹簧处添加弹簧力，设置弹簧尺寸、劲度系数及阻尼系数，施加完约束及力的情况下如表 4-3：

表4-3 连接运动副

运动副	转动副	转动副	移动副	转动副	转动副	转动副	固定副	转动副
部件1	支架3	支架3	支架2	支架4	支架6	支架4	大地	大地
部件2	拖链轮	减震装置	支架5	导向轮	承重轮	支架3	支架3	驱动轮

(二) 行走运动分析

在履带式消防机器人中，最基本的一种运动方式就是水平运动，通过对直线运动的仿真分析，可以对其速度、力矩进行检验。根据以上建立的虚拟模型，利用 RecurDyn 软件中的 ground 命令创建直线路面，在黏性路面，改变驱动设置，得到不同速度下的力矩图。对比两个不同速度下的曲线走向，当履带式机器人速度变大时，输出的力矩也随之变大。两种速度下输出的力矩相对平稳，并且保持在一定的范围内波动。高速行驶较低速行驶的质心变化及输出力矩都更加平缓些，同时注意到高速行驶的图中质心在 y 轴的方向快速趋于平稳，随后在较小的范围内上下波动，低速行驶的履带式机器人稳定地相对慢些，在1.8s 后质心的位置也趋于稳定。

(三) 转向运动分析

从转向运动学的角度可以看出：当平面上的一个点与机器人自身的转动相同时，机器人实现原地转动。本文对该假定进行了验证，并对原地转动时的传动轮扭矩进行了模拟。在履带式灭火机器人的左右驱动轮上加入反向函数，模拟时间为5秒。

通过转向位移 - 力矩关系仿真曲线分析得到：左右两轮输出力矩上下呈对称趋势，且变化频率较为一致^[9]。由于转向过程设置为向右转弯，因此外侧驱动轮输出的力矩高于内侧，驱动轮输出的最大力矩不超过300N · m。由本次实验可以得出，履带式林地消防机器人的转向运动依靠两侧履带速度的改变来实现，当在不同速度的履带下执行任务时，履带与地面的接触会产生转向扭矩和转向阻力，从而导致机体发生偏转。

(四) 爬坡运动分析

首先分析纵向 30° 斜坡，履带式林地消防机器人在工作中会遇到较为复杂的路况，爬坡能力是衡量其通过性能的一个关键因素。根据履带式消防机器人的技术要求，机器人必须能够在与地面呈 30° 的斜坡上行走，设置驱动函数及路面情况，仿真时间为 10s。纵向爬坡仿真曲线如图 4-7 所示，曲线表示车轮输出的力矩随质心的变化情况，履带式机器人在平地行驶 1s 后时，车轮上坡，车体的质心位置随坡度逐渐向上延伸，随即在一段时间内平稳输出力矩，且左右轮输出的力矩大致重合。因此，在黏性路面上，履带式林地消防机器人能够驶上 30° 的纵向斜坡。斜坡的出现不仅仅是纵向的，还应当考虑横向斜坡的出现。由于履带式机器人从第四秒进入横坡路面，因此选取 4—8s 为分析范围。相较纵向爬坡分析结果而言，横向爬坡输出的力矩随质心的变化频率更加频繁，同时质心位置也在随之升高。由图可知，左右两轮输出的力矩近似相同，但是在图中有几处的力矩值突然增加，考虑是此处机器人发生瞬态打滑导致，在 150ms 内又迅速原本的输出情况^[7]。

(五) 越障运动分析

本文设计要求履带式林地消防机器人能够平稳地跨越 350mm

的沟槽，沟槽深度为 250mm，机器人仿真过程如图 4-3 所示，履带式机器人前端接触沟槽边缘到后端逐渐下降，最终完成越过沟槽的过程。

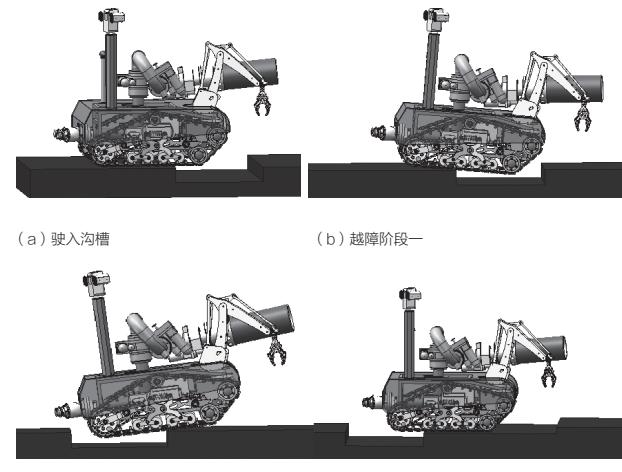


图4-3 机器人越障运动分析

图 4-4 所示为越障位移 - 力矩关系图仿真曲线，分析图 4-4 得到，车体的质心位置随路面的情况进行变化，运行到 1s 时，机器人的质心下降，开始进入沟槽，驱动轮输出力矩在较小范围内变化，2.5s 后驶离沟槽，左右轮驱动力矩有明显增加。在 4.5s 时，车体越过一块凸台，因此质心位置再次升高，驱动力矩也在此位置随之升高^[8]。驱动轮输出力矩平均在 100N · m 周围浮动，进一步为选择电机提供依据。

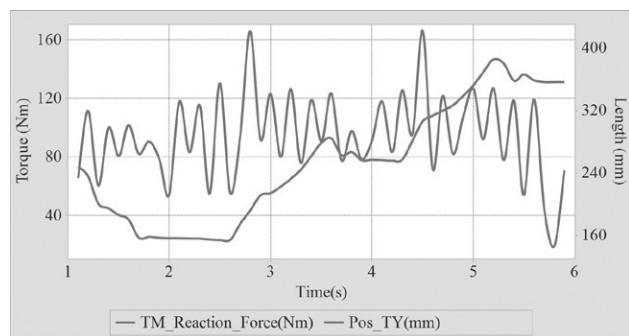
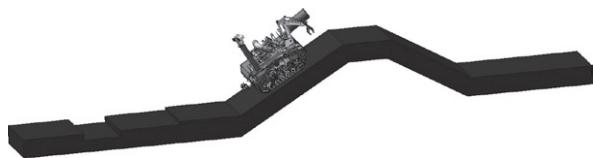


图4-4 越障位移 - 力矩关系图

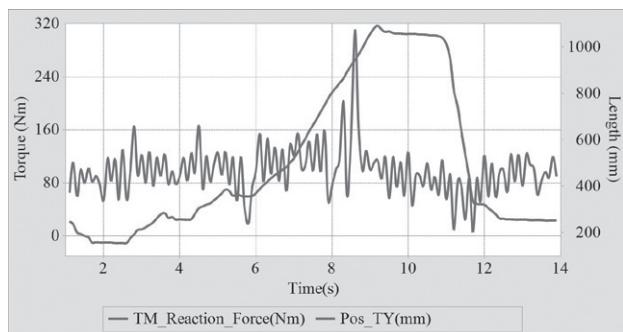
(六) 复合运动分析

在实际工作中，由于履带式林地消防机器人所处的工作环境十分复杂，经常会遇到各种地形交叉的情况。所以，有必要对复杂地形下的消防机器人的动作进行分析。如图 4-5 为通过复合坡道的机器人模型。坡道主要包括：水平、斜坡、沟槽、过渡等^[9]。由于复合坡道中的参数比较多，情况比较复杂，本文仅对其进行定性的分析。

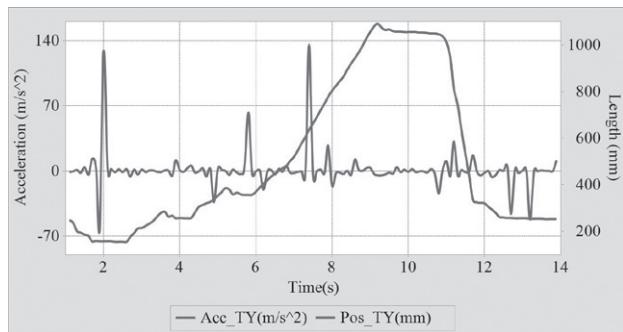


>图4-5 复合路面运动分析模型

由图4-6 (a) 可知,履带式机器人的质心受路况的影响而产生变化,当消防机器人即将进入第一个沟槽及在上坡过程中,y方向的加速度上下浮动范围变大,结束后恢复平稳,输出的加速度在一定范围内上下浮动。由图4-6 (b) 可知,机器人上坡后,驱动轮输出的力矩相比起其他路段较大,爬坡结束到平地时,驱动力矩总体减小。下坡过程中受重力影响,此时输出的力矩相较其他阶段的力矩值要小。



(a) 位移-加速度关系图



(b) 位移-力矩关系图

>图4-6 复合路况分析图

五、结论

1) 本章主要利用 Solidworks 软件建立了消防机器人样机模型;

2) 采用 ANSYS 软件对主要零件进行了有限元分析,验证了模型的形变满足设计要求;

3) 在仿真部分,利用多体动力学软件 RecurDyn 对模型进行分析,得到了林地消防机器人在不同速度下直线及转向行驶输出力矩的力矩情况,分析了纵向和横向爬坡运动状态,机器人纵向爬坡相对横向爬坡在输出力矩上更加平稳;

4) 对越障以及复合路面状态进行仿真,驱动力矩随质心位置的变化而改变,验证了理论分析的合理性。

参考文献

- [1] 王南丁.消防机器人履带行走装置设计及运动学仿真研究 [D].哈尔滨:东北林业大学, 2015.
- [2] 苏杰, 李春明, 范知友, 等.履带车辆高速行驶承载能力优化设计仿真 [J].计算机仿真, 2017, 34(05): 187-191.
- [3] 刘维维.全地形铰接式履带车辆履带疲劳及预张紧力优化研究 [D].长春:吉林大学, 2021.
- [4] Sweeney D W, Kirkham M B, Sisson J B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil [J]. Agronomy Journal, 2006, 98(3): 637-643.
- [5] 李灏, 刘新全, 师宪福.履带车辆松软路面行驶阻力系数与附着系数关系研究 [J].农业装备与车辆工程, 2012, 50(11): 34-36.
- [6] 张政, 冯广斌, 孙华刚.基于虚拟样机技术的齿轮传动系统动态仿真研究 [J].机械传动, 2018, 42(11): 142-146.
- [7] T.Rakib, M.A.Rashid Sarkar.Design and Fabrication of an Autonomous Fire Fighting Robot with Multisensor Fire Detection Using PID Controller [C].International Conference on Informatics, Electronics and Vision, 2016: 909-914.
- [8] Roldan-gomez J J, Gonzalez-girona E.A Survey on Robotic Technologies for Forest Firefighting: Applying Drone Swarms to Improve Firefighters' Efficiency and Safety [J]. Applied Sciences-Basel, 2021, 11(1).
- [9] Niculescu, A., Dijk, et al.The influence of voice pitch on the evaluation of a social robot receptionist [C].In 2011 International conference on user science and engineering, 2012: 18-23.