

电磁弹射灭火弹消防系统研究*

张亚东, 熊敏, 董明洋, 林雄

(武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要: 首先介绍了我国严峻的火灾形势, 阐明现有气动和火箭发射灭火弹装置的研究现状, 针对射程不足、火工品使用限制等问题, 提出采用电磁线圈发射器发射灭火弹进行灭火, 基于电流丝模型法设计了一种 10 级线圈发射器模型, 以脉冲电容器作为初始能源, 采用续流电路对线圈进行时序放电, 可将 7.2 kg 抛体加速至最高速度 171 m/s, 出口速度 154 m/s, 发射效率达 15%, 分析表明现有电磁线圈发射器能够满足灭火弹的发射需要。提出一种智能化无人电磁弹射灭火弹消防系统, 智能指挥控制系统利用无人机采集火场信息, 制定灭火策略, 指挥无人电磁发射灭火车发射灭火弹实现精准高效灭火, 根据灭火效能评估结果调整灭火方案, 直至完成灭火任务。

关键词: 消防; 灭火弹; 电磁发射器; 智能系统

中图分类号: TM9

文献标志码: A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.190304

Research of electromagnetic launched fire-extinguishing bomb fire-fighting system

Zhang Yadong, Xiong Min, Dong Mingyang, Lin xiong

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This article introduces the severe fire situation in China, and clarifies the limitations of the existing fire-fighting solutions. In view of the limited range and the limitation of the use of pyrotechnics, it is proposed to use the electromagnetic coil launcher to launch the fire-extinguishing bomb to extinguish fire. Based on the current filament circuit model, a 10-stage electromagnetic coil launcher is designed. Pulse capacitor is used as the initial energy source and the coil is discharged sequentially by a crowbar circuit. The 7.2 kg projectile could be accelerated to the maximum speed of 171 m/s and the muzzle speed of 154 m/s. The efficiency will be over 15%. It shows that the electromagnetic coil launcher can meet the launching needs of fire-fighting project's needs. An intelligent unmanned electromagnetic launch fire-fighting system is proposed. The intelligent command and control system dispatches drones to collect fire information, then formulates fire-fighting strategies. The unmanned electromagnetic fire-extinguishing vehicle will be controlled to launch fire-extinguishing bombs to achieve accurate and efficient fire extinguishing. The system will adjust the fire extinguishing plan according to the evaluation results of fire extinguishing efficiency until the task is completed.

Key words: fire protection; fire-extinguishing bomb; electromagnetic launcher; intelligent system

随着社会经济的发展, 火灾造成的危险和损失日益增加, 灭火工作面临许多新问题有待解决, 例如城市高层建筑越来越多, 从十几层到近百层, 高度超过 300 m, 传统的水枪等不能达到该灭火高度; 石油化工等易燃易爆品发生的火灾, 破坏力大, 非常危险; 港湾、码头、锚地停泊的船舶火灾由于地形复杂, 存放物品种类复杂; 森林火灾、草原火灾覆盖面积大, 火情发展迅速。传统灭火设备和灭火方案能力不足, 人工灭火仍为主要方式, 人工灭火方式危险性极高, 近年的天津港爆炸案, 江苏响水化工厂火灾, 四川凉山森林大火等都造成了巨大的消防官兵伤亡和财产损失。传统的云梯、水枪等灭火范围和高度十分有限, 只能处理 100 m 高程内的火情; 大型飞机高空灭火仅适用于森林灭火, 且灭火效率较低, 花费高; 无人机灭火载荷有限, 难以扑灭大型火灾。灭火弹可以进行近、远程灭火, 火力强大, 能够保障消防人员安全, 因此近年来, 采用灭火弹灭火成为研究热点。

* 收稿日期: 2019-08-16; 修订日期: 2019-10-31

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2019CFB430)

作者简介: 张亚东(1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事电磁发射技术、脉冲功率技术、电磁兼容技术等方面的研究; yd0439@qq.com。

1 灭火弹发射研究现状

1.1 灭火弹发射国内外研究现状

目前灭火弹发射方式包括气动发射、火箭发射、飞机投掷等多种方式。匈牙利工程师发明了一种灭火炮,口径大、射程远、容量大,可连续发射灭火弹^[1]。2001年,俄罗斯将BTR-80车改装为灭火车,型号为GAZ-5903,可连续发射22枚灭火弹,射程50~300 m,能够扑灭爆炸性危险品的A、B、C三类火灾,灭火车采用军事化火控系统,自动化水平高^[2]。2005年,意大利开发了一种空气消防炮,机动性强,最大射程可达200 m,但不能连发,灭火效率低^[1]。德国研制出了一种灭火导弹,可以携带500 kg泡沫灭火剂,持续喷射20~30 s,灭火导弹可进行高速低空飞行,定向直飞出事地点,喷射完毕后可以自动飞回预定回收地点,导弹回收后,可重新装灭火剂重复使用^[3]。

2006年,王政等提出了一种PJ120型支架式气动灭火炮,重量32.4 kg,射程达180 m,垂直高度可达100 m,最远射程弹着点散布半径 ≤ 6.5 m。灭火弹直径120 mm,灭火弹重4.6 kg,灭火剂质量3 kg,最大灭火面积9 m²^[4]。2010年,中国船舶重工集团公司第七一〇研究所研制了“CMH-1型远距智能森林灭火系统”,最大射程600 m,单弹布撒面积不低于100 m²,齐射灭火范围不低于1 000 m²,灭火弹净重17 kg,采用多普勒定高、定时及碰炸三联合引信,弹内装填的自主研发的高效液态水胶灭火剂,适用于森林、草原等大面积火场的灭火^[5]。2011年,南京理工大学提出了105 mm车载多管灭火炮装置,利用迫击炮发射方式将灭火弹高速射出,膛压20 MPa,弹丸初速125 m/s,弹重7 495 g,射程2 km,车宽1 825 mm,载重质量1 820 kg^[6]。2014年,哈尔滨工程大学研制了气动灭火炮,利用无火药的气动力发射灭火弹^[7],单个气瓶50 L,4发/min⁻¹,出口速度93.1 m/s。2015年,航天科工集团二〇六所研制了“投弹式高层建筑干粉消防车”,发射高度范围在100~300 m,最大仰角70°,抛射距离1 km,发射模块上有24发联装灭火弹,每颗弹内装有3.6 kg的超细高效灭火剂,一枚灭火弹可覆盖60 m³空间^[8]。2016年,中北大学对空气炮发射灭火弹进行了运动学及动力学仿真分析,灭火弹质量5 kg,弹体直径为120 mm,全长1 150 mm^[9]。

1.2 目前灭火弹发射存在的问题

总体而言,近年来气炮发射和火箭发射灭火弹研究取得了较大进展,灭火弹射程、射高、重量都不断增大。但实际应用仍存在一些问

(1)射程有待提高。对于高层楼宇、邮电、港口、深林大火等,随着城市集中化,火灾物品多元化等问题,消防官兵的安全要想得到保障,需进一步增加灭火弹射程,火箭发射只需增加药量即可增程,但对于近程火点则可能存在剩余药量,导致灭火弹火药成为二次火源的问题;而气动发射需要增加气压,会极大增加整个发射器的重量和成本,降低灭火发射车的机动性和灵活性。

(2)灭火剂量有待提高。现有灭火弹受到发射动力的限制,外壳重量较大,所带灭火剂的质量有限,灭火能力有限,难以扑灭大型火灾。

(3)火工品隐患大。火箭发射灭火弹需靠火药起爆,火工品管控严格,购买及使用火药也需经过有关部门批准,储存维护要求高,阻碍了灭火弹的市场化。尤其不适用在石油化工品等危险易爆、离火灾现场较近的区域,其本身可能成为危险源,使用范围受限。

2 电磁线圈发射灭火弹技术研究方案

2.1 电磁线圈发射技术

针对上述灭火弹发射存在的问题,本文提出采用电磁发射技术发射灭火弹,电磁线圈发射器是指用序列脉冲产生变化的磁场,利用驱动线圈和被加速物体之间的磁耦合机制工作,本质上是一台直线电动机^[10]。电磁线圈发射器可实现超高速,射速可进行连续调节,可根据火场距离灵活调整射速,实现近、远程灭火范围全覆盖,用于摩天大楼、森林灭火、化学危险品等各种。通用性好,可采用多功能电枢,发射不同口径、质量的弹丸。以电能作为初始能源安全简便,成本低,简化了运输维护过程,使用安全。

美国圣地亚国家实验室(SNL)的电磁发射技术的研究世界领先。开发了专用电路仿真软件^[11],进行了大、中、小质量的一系列电磁发射试验,验证了仿真软件的准确性。2007年,SNL开展电磁迫击炮预研项目^[12],用45个完全相同的驱动线圈形成一个1.6 m长的炮管,弹丸的口径为120 mm,重18 kg,可发射至400 m/s左右,射程超过现有迫击炮40%,速度误差小于0.1%。2008年,SNL设计并制作了电磁线圈发射器解决了连续充放电及系统发热、封装等一系列问题,效率为15.6%,实现了12发/分的发射速率^[13],这标志着美国的电磁线圈发射器已步入工程化阶段。2013年,西北机电工程研究所建立了15级电磁线圈发射系统,可将5 kg的物体发射至220 m/s,发射效率达15%^[14]。2014年,中科院电工研究所研制的4段线圈发射器可将5 kg质量物体发射至500 m/s^[15]。上述研究表明,

电磁线圈发射技术已经较为成熟, 适用于灭火弹发射。

2.2 电流丝模型分析法

目前研究线圈炮的方法主要有电路模型分析法和有限元法两种方法。以电流丝模型法为代表的电路模型具有原理简单、物理意义明确等优点, 被广泛用于电磁线圈发射器的物理性能分析之中。基于电流丝法的同步感应线圈发射器集总参数电路等效模型如图 1 所示^[16~18]。由于集肤效应的影响, 电枢轴向剖面上感应电流的分布是不均匀的。若将电枢划分为 m 个同心圆环, 则当圆环的轴向截面积足够小时, 可以认为感应电流在该截面上是均匀分布的, 即用 m 个“电流丝”环路来等效原电枢。假设励磁线圈共有 k 级。在线圈炮发射过程中励磁电流是瞬变的, 以电阻、自感、互感、电感梯度等为参数, 可建立各级线圈的集总参数模型, 最后归结为非线性变系数常微分方程的初值问题。

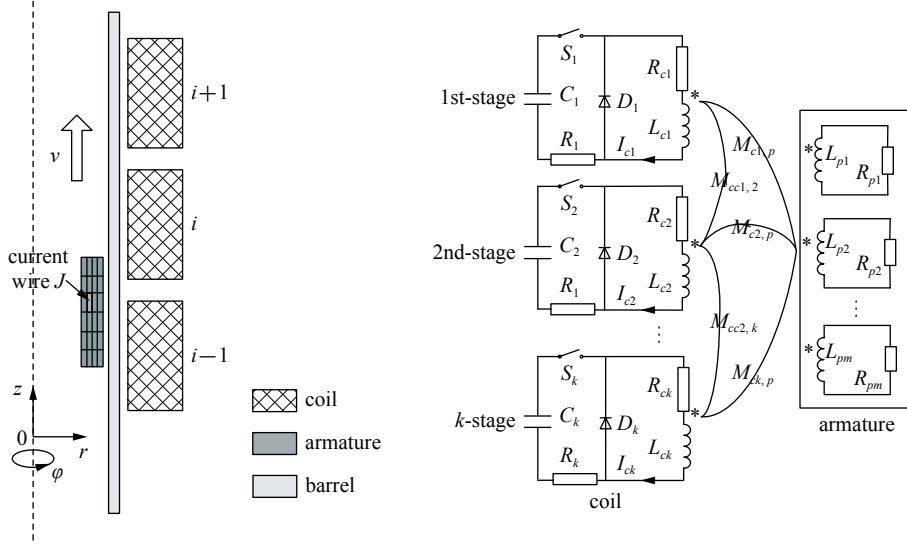


Fig. 1 Lumped parameter model of class k synchronous induction coil transmitter

图 1 k 级同步感应线圈发射器的集总参数模型

根据 Kirchhoff 电压定理, 将系统方程用矩阵形式表示为

$$(\mathbf{L} + \mathbf{M}) \frac{d\mathbf{I}}{dt} = \mathbf{V}_c - \mathbf{R}\mathbf{I} - v \frac{d\mathbf{M}}{dx} \mathbf{I} \quad (1)$$

电容器电压和励磁电流之间的关系为

$$\mathbf{C} \frac{d\mathbf{V}_c}{dt} = -\mathbf{I}_d \quad (2)$$

线圈发射器系统的运动控制方程为

$$m_p \frac{dv}{dt} = \sum_{p=1}^m \sum_{d=1}^n I_p I_d \frac{dM_{pd}}{dx} \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (4)$$

式中: \mathbf{I} 为线圈和电枢电流丝电流构成的列向量; \mathbf{R} 为线圈电阻和电枢电流丝电阻构成的对角矩阵; \mathbf{L} 为电流丝电感和线圈电感构成的对角矩阵; \mathbf{M} 为线圈间、电流丝间以及线圈与电流丝之间的互感; \mathbf{C} 和 \mathbf{V}_c 分别是电容器的电容值及其端电压向量; x 和 v 分别是电枢的运动速度和位置; m_p 是电枢质量。

3 电磁弹射灭火弹发射器设计

基于电流丝模型法自主开发电路模型分析软件 Coilgun 进行电磁发射灭火器的仿真设计, 该软件的准确性已经过仿真和试验的多次验证^[18]。根据文献 [8] 中发射器和灭火弹参数, 设计了一种 10 级电磁线圈发射器, 以 2 mF/7500 V 脉冲电容器作为初始电源, 采用续流回路对发射器各级线圈进行时序放电, 单级放电模块及其产生的脉冲电流如图 2 所示, 发射器口径为 110 mm, 总长度为 1 m, 线圈匝数结构如图 3 所示, 圆筒铝电枢质量为 1.2 kg, 灭火弹重 6 kg, 载荷总重为 7.2 kg。各级线圈的电流波形、加速度、速度、温升的仿真计算结果分别如图 4~8 所示。

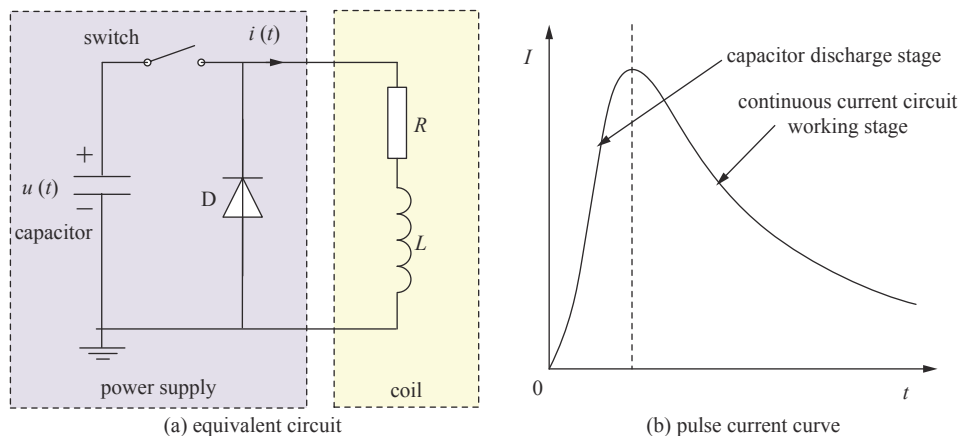


Fig. 2 Drive circuit with a crowbar circuit

图 2 带续流回路的驱动电路

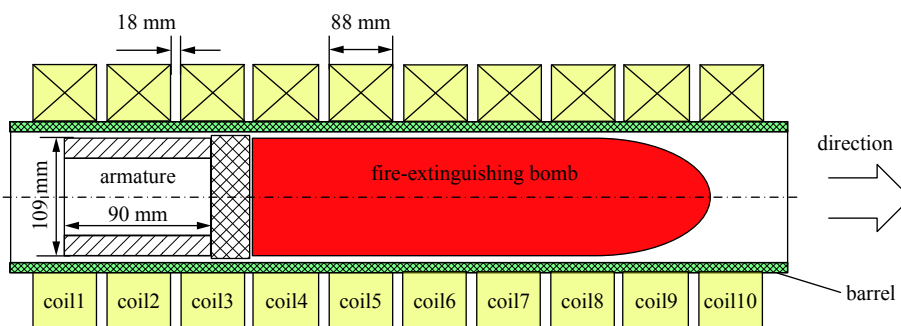


Fig. 3 Geometry of the 10-stage electromagnetic coil launcher

图 3 10级电磁线圈发射器

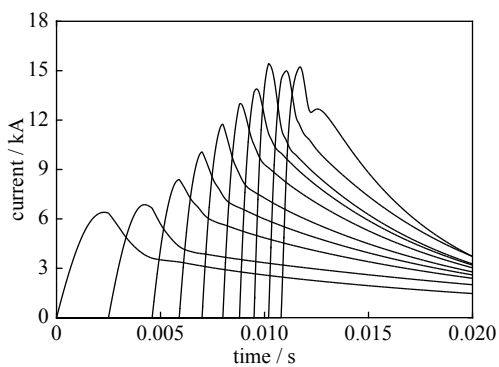


Fig. 4 Discharge current waveform

图 4 放电电流波形

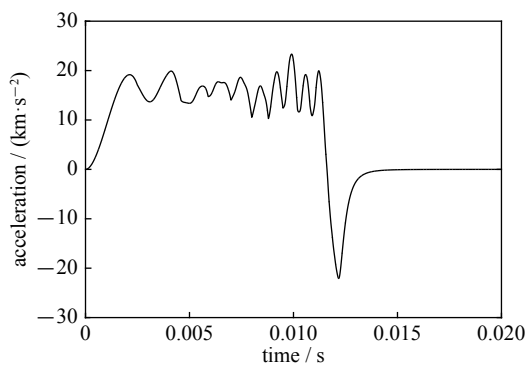


Fig. 5 Acceleration waveform

图 5 加速度波形

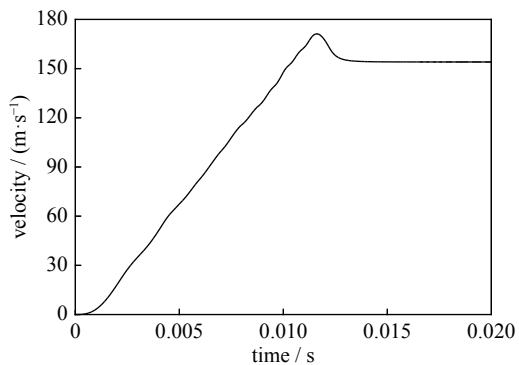


Fig. 6 Velocity waveform

图 6 速度波形

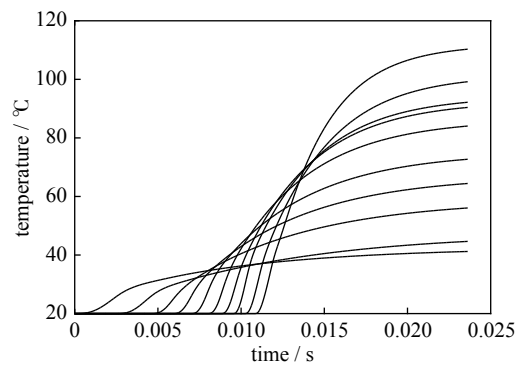


Fig. 7 Temperature waveforms of the coils

图 7 线圈温度波形

计算结果表明：

(1)图4结果表明, 10个线圈的放电电流峰值最小只有6.5 kA, 最大峰值为15 kA, 开关器件选型容易。单级脉冲电容为2 mF/7 500 V, 10级模块电源总储能为562.5 kJ, 根据目前脉冲电源制作水平, 电源模块体积可实现1 MJ/m³, 因此, 本设计的电源系统体积和重量都较小, 车载操作容易。

(2)图5结果表明, 弹丸的过载加速度约为2 000 g, 小于传统发射器的过载, 由此可减小传统灭火弹壁厚, 增加灭火剂量, 提高灭火效率。

(3)图6结果表明, 载荷最高速度可达171 m/s, 出口速度达154 m/s, 发射效率达15.2%, 射高可达1 000多米, 能够满足当前城市高层楼宇灭火的需要。

(4)图7结果表明, 各级线圈由于匝数不同, 驱动电流不同, 因此温升也不同, 第1级线圈温升为22 K, 而第10级线圈温升达到了94 K。因此, 为了实现连续发射灭火, 需要对发射器采用水冷结构设计, 或者用多管发射器, 给线圈充分的散热时间。

(5)图8结果表明, 采用电流丝路模型仿真得到电枢各电流丝同心圆环的温升最小仅有8 K, 最高可达128 K, 由于铝电枢传导散热较快, 最终恒定温升可达15 K左右。

(6)对于森林火灾等远距离灭火要求, 可通过增加线圈级数进一步提高灭火弹的出口速度, 增大灭火范围。

综上可知, 电磁线圈发射器能够满足灭火弹的发射需求。

4 智能化无人电磁弹射灭火弹消防系统

本文提出了一种智能化无人电磁弹射灭火弹消防系统, 技术构想如图9所示。

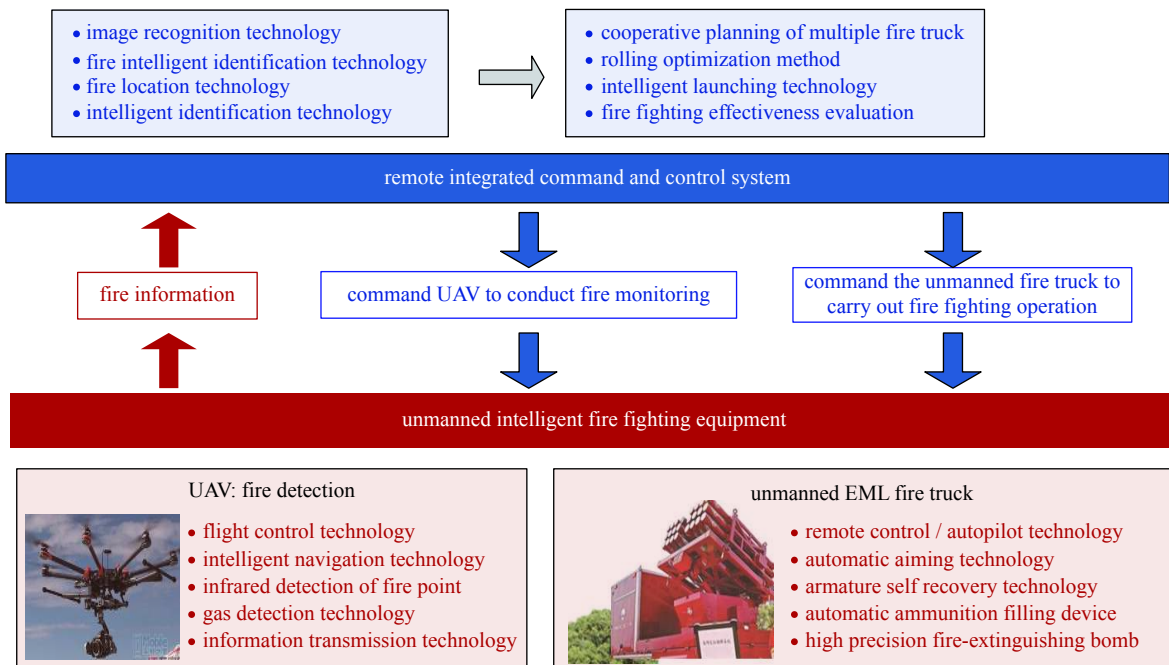


Fig. 9 Intelligent unmanned electromagnetic launch fire extinguishing system

图9 智能化无人电磁弹射灭火弹消防系统

该系统由火场无人智能灭火装备和远程综合指挥控制系统两部分组成。无人灭火装备包括无人电磁发射火车和无人机。综合指挥控制系统指挥无人机进入火场进行协同侦查, 无人机携带红外、可见光、气体等监测设备探测火情, 将数据实时传给综合指挥控制系统进行信息处理, 智能判别火势、火点和火场人员, 然后根据现有灭火火车数量和灭火火车性能制定协同灭火任务规划, 利用导航定位系统指挥无人灭火火车到达指定地点, 将灭火方案传输给无人灭火火车, 无人电磁发射灭火火车可自动调整发射角度、充电、点火、弹丸填装等一系列灭火操作, 实现精准

高效灭火,根据灭火效能评估结果调整灭火方案,直至完成灭火任务。

该系统具有以下特点:

- (1)能够充分发挥智能系统的优势,系统各部分互相配合、协调工作,使灭火工作高效、有序进行。
- (2)重视火情动态信息的采集和分析、采用协同工作和滚动任务规划的方式,时刻对火情进行精准判断,规划最优灭火方案,使得灭火方案能适应火情变化,更有针对性。
- (3)进入火场的只有无人灭火装备,实现了无人化灭火作业,保障一线消防人员的生命安全。
- (4)将电磁线圈发射技术应用到灭火弹的发射中,能够满足范围大、火力强、精度高等灭火要求。

5 结 论

针对目前我国火情的严峻形势,本文分析了传统气动和火箭发射灭火弹装置存在的问题,提出采用电磁线圈发射器发射灭火弹的方案,该10级线圈发射器可将7.2 kg的电枢和载荷加速至峰值速度171 m/s,出口速度154 m/s,效率15%以上,电源系统大小适中,器件选型容易,能够满足灭火弹的发射需求。最后针对消防人员伤亡较大的问题,提出了一种智能化无人电磁弹射灭火弹消防系统。该系统适用于城市楼宇、森林、机场、仓库、石油化工企业、储罐区、港口码头等场所的高危险、高楼层、远距离灭火工作,实现消防零伤亡。

参考文献:

- [1] 王立波. 远程气动灭火炮的结构设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008. (Wang Libo. Structural design and research of long-range pneumatic fire monitor. Harbin: Harbin Engineering University, 2008)
- [2] 银河. BTR-80装甲运输车与GAZ-5903灭火车[J]. 兵器知识, 2001(9): 39-39. (Yin He. BTR-80 armored transport vehicle and GAZ-5903 firefighting train[J]. Weapon Knowledge, 2001(9): 39-39)
- [3] 尚科. 灭火巡航导弹[J]. 北方消防, 2003(17): 42-42. (Shang Ke. Firefighting cruise missile[J]. Northern fire control, 2003(17): 42-42)
- [4] 王政, 郭林. 支架式气动灭火炮: CN1765432A[P]. 2005-11-09. (Wang Zheng, Guo Lin. Bracket type pneumatic fire monitor: CN1765432A. 2005-11-09)
- [5] Remote intelligent forest fire extinguishing system. Mine Warfare and Ship Protection, 2010, (3) : 74-74
- [6] 何庆国. 某多管车载灭火炮射控系统分析及研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011. (He Qingguo. Analysis and research on the fire control system of a multi barrel vehicle mounted fire monitor. Nanjing : Nanjing University of Science and Technology, 2011)
- [7] 刘刚. 气动发射式高层建筑灭火炮研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012. (Liu Gang. Study on pneumatic launching fire extinguishing gun for high buildings. Harbin: Harbin Engineering University, 2012)
- [8] 韩永, 孟宪尉. 灭火弹可“打”300米高楼火灾高层楼宇灭火系统22项专利亮相北京[J]. 消防与生活, 2014(4): 36-36. (Han Yong, Meng Xianwei. The fire-extinguishing system of high-rise buildings with 300 meters high fire can be “hit” by fire bombs with 22 patents appeared in Beijing[J]. Fire and Life, 2014(4): 36-36)
- [9] 赵浩合. 一种新型智能迫击炮灭火弹的设计与研究[D]. 太原: 中北大学, 2017. (Zhao Haohe. Design and research of a new type of intelligent mortar fire-extinguishing projectile. Taiyuan : Zhongbei University, 2017)
- [10] 张亚东, 刘开培. 电磁动能武器概论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2015. (Zhang Yadong, Liu kaipei. Introduction to electromagnetic kinetic energy weapons. Beijing : Weapons Industry Press, 2015)
- [11] Widner M M. WARP-10: A numerical simulation model for the cylindrical reconnection launcher[J]. IEEE Trans Magnetics, 1991, 27(1): 634-638.
- [12] Kaye R, Turman B, Aubuchon M. Induction coilgun for EM mortar[J]. IEEE Trans Magnetics, 2007, 43(1): 1810-1813.
- [13] Skurdal B D, Gaigler R L. Multimission electromagnetic launcher[J]. IEEE Trans Magnetics, 2009, 45(1): 458-461.
- [14] Zhang Tao, Guo Wei, Lin Fuchang. Design and testing of 15-stage synchronous induction coilgun[J]. IEEE Trans Plasma Science, 2013, 41(5): 1089-1093.
- [15] Li Xian, Wang Qiuliang, Wang Housheng. Performance of a four-section linear induction coil launcher prototype[J]. IEEE Trans Plasma Science, 2014, 24(5): 1-5.
- [16] 牛小波, 刘开培, 张亚东. 基于电流丝法的多级同步感应线圈炮电枢温升计算[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 095001. (Niu Xiaobo, Liu Kaipei, Zhang Yadong. Calculation of armature temperature rise of multistage synchronous induction coil gun based on current wire method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 095001)
- [17] 刘守豹, 阮江军, 彭迎. 改进电流丝法及其在感应线圈炮场路结合分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 128-134. (Liu Shoubao, Ruan Jiangjun, Peng Ying. Improved current wire method and its application in the combination analysis of induction coil battery[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2010, 30(30): 128-134)
- [18] Zhang Yadong, Xiao Gang, Gong Yujia. Armature structure research of a synchronous induction coil launcher[J]. IEEE Trans Plasma Science, 2017, 45(7): 1574-1578.