

电磁弹射式森林消防炮的研究

刘少刚¹ 邱 波² 庞永刚¹

(¹哈尔滨工程大学机电工程学院 ²中国林业科学研究院研究生院)

摘要:研究了电磁弹射式森林消防炮的基本结构和控制方式,对其建立数学模型,并利用 Maxwell2D 电磁场有限元分析软件对该模型进行了仿真分析。结果表明:在设定的结构参数和控制方式下,电磁弹射式消防炮模型具有良好的动态性能。另外,探讨了电磁弹射式森林消防炮中直线电机动子的侧向力对消防炮结构产生的影响,以及动子永磁体的退磁问题。

关键词:电磁弹射;森林消防;有限元;直线电机;动态性能

中图分类号: S762.3; TM359 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2010)01-0108-06

LIU Shao-gang¹; QIU Bo²; PANG Yong-gang¹. Electromagnetic launcher for forest fire control
Journal of Beijing Forestry University (2010) 32(1) 108-113 [Ch 13 ref]

¹ College of Mechanical and Electrical Engineering Harbin Engineering University 150001, P. R. China

² Graduate School of Chinese Academy of Forestry Beijing 100091, P. R. China

The basic structure and control system of electromagnetic launcher for forest fire control were figured out and then its mathematical model was built up. Finally, the launcher's model was simulated and analyzed by a software Maxwell2D, which was used for the finite element analysis (FEA). The results showed that the model had a good dynamic performance in the conditions of given structural parameters and control system. In the process of analysis, the effects of the lateral force caused by moving part on the whole structure and the demagnetization of permanent magnet were also explored in this study.

Key words: electromagnetic launch; forest fire control; FEA; linear motor; dynamic property

我国的森林消防形势不容乐观,仅 2006 年,全国就发生森林火灾 8 170 起,森林火灾火场总面积达 56.23 万 hm^2 ,受害森林面积达 40.83 万 hm^2 ,造成了巨大的损失^[1]。类似大兴安岭“5.6”大火、石油化工等火灾往往是瞬时发生、迅速扩散的,其特点是波及范围大,且火灾发生后往往因地形和各种危险因素的制约,使得消防人员和现存常规灭火设备器材根本无法靠近。尤其是对于危害最大的树冠火,现在还没有一种可以有效扑灭的手段。因此,迫切需要一种机动性能好、灭火剂投射质量大、投射距离远、灭火弹可控高度智能引爆、远离火场就可以实现灭火的综合装备。

电磁弹射是近年迅速发展起来的新兴技术,目前在军事领域应用较多。电磁弹射是指被发射的物

体不启用自身的动力装置,而是以发射器施加的电磁力作为加速手段,将物体弹射出去的一种方法^[2]。其特点是发射速度快、射程远,依靠其先进的电力电子系统,可以控制整个发射过程。从 20 世纪 80 年代开始,国外学者对其进行了大量研究。从最初将几克重的小质量物体弹射到超高速^[3-4],逐渐拓展到弹射大质量物体,甚至弹射航母舰载机^[5-7]。虽然国内对于电磁弹射的研究起步比较晚,但也取得了一些成绩^[8-10]。目前,国内外还没有进行将电磁弹射技术应用于消防领域的研究。

基于目前电磁弹射技术的研究现状和我国森林消防的需求,本文研究了一种新型的森林灭火装备——电磁弹射式森林消防炮。利用 ANSOFT 公司推出的 Maxwell2D 电磁场有限元分析软件,对所建

收稿日期: 2008-12-30

基金项目: 国家科技部社会公益研究专项 (2005DB3J138)、国家林业局重点项目 (2006-48)。

第一作者: 刘少刚,教授,博士生导师。主要研究方向: 机械电子工程。电话: 0451-82519701 Email: liushaogang@hbeu.edu.cn 地址: 150001 哈尔滨工程大学机电工程学院。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

立的电磁弹射式森林消防炮模型进行了全面的动力学、运动学仿真分析,其结果为后续的电磁弹射式森林消防炮的工程设计提供了重要参考数据。

1 电磁弹射式森林消防炮设计

1.1 消防炮的工作原理、基本结构和主要参数

电磁弹射式森林消防炮(图 1),主要由储能系统、控制系统以及弹射器等部分组成。其中的弹射器实际上为一台大功率的直线电机。电磁弹射式森林消防炮选用永磁无刷直线直流电机(图 2),它具有结构简单、气隙磁密高、散热性能好等优点。直线电机采用双边长定子结构,这样可以平衡双边定子对动子的吸引力。三相线圈安装在定子槽中,作为定子上的励磁装置,线圈之间用薄绝缘材料隔离。动子励磁装置是永磁材料 NdFeB,其以 N-S-N-S 的形式沿动子行进方向交替排列。在永磁体之间采用绝磁材料进行隔离。将永磁体和绝磁材料安装、固定在 1 个不锈钢套中,使其成为一个整体。不锈钢套的侧面和底部装有滑轮(图 3),消防炮发射时,滑轮载着不锈钢套沿着外部框架上开出的滑道行进。托体安装在不锈钢套的顶部,用于在发射过程中固定灭火弹。定子铁心由冷轧硅钢片自下而上叠加而成,这样可以在很大程度上减少涡流的产生。冷却管安装在定子中,通过冷却剂来带走磁场交变在设备中产生的热量。将定子铁心固定在外边框架上,然后用多块肋板对外边框架和消防炮底板进行加强联结,以防止因动子永磁体和定子铁心之间存在的吸引力而使消防炮产生变形。消防炮工作时,定子线圈中通过的三相六脉波电流会在气隙中产生强大的行波磁场,其与动子永磁体的相互作用导致了电磁推进力产生。在其强推进力的作用下,动子载着灭火弹向前高加速运动。当达到设定速度后,改变电流相序而使动子减速直至停止,而灭火弹继续飞行。当灭火弹飞达着火区域(如树冠火)上方设定高度后智能引爆,弥散出灭火剂,以此达到高效灭火的目的。表 1 给出了电磁弹射式森林消防炮的各项参数。

1.2 控制方式

电磁弹射式消防炮控制系统(图 4),由高性能控制器、逆变器以及传感器等部分组成。位置传感器和电流传感器的导出信号传回控制器,然后控制器通过控制逆变器中 IGBT 的通断来精确实现电流的换相。逆变器采用 $2\pi/3$ 角导通方式,任意时刻有 2 个电力电子开关导通,每隔 $\pi/3$ 电角度,电流从一相转换到另一相。PWM 用于控制动子加速时电流的平均值,并消除部分电流谐波。

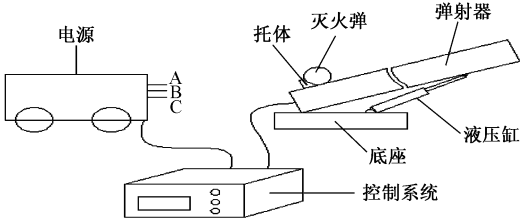


图 1 电磁弹射式森林消防炮的系统简图

Fig 1 System diagram of electromagnetic launcher for forest fire control

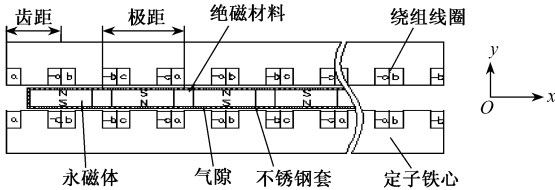


图 2 永磁无刷直线直流电机结构

Fig 2 Structure of linear permanent magnet brushless DC motor

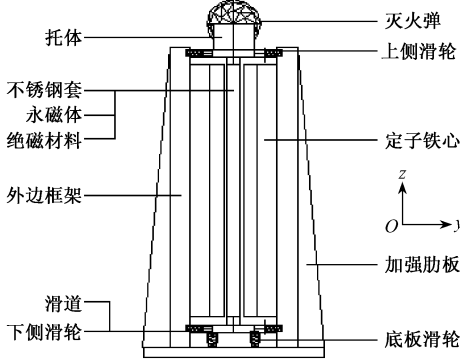


图 3 电磁弹射式森林消防炮弹射器的结构图

Fig 3 Structure diagram of electromagnetic launcher for forest fire control

表 1 电磁弹射式森林消防炮的各项参数

Tab 1 Parameters of electromagnetic launcher for forest fire control

区域	参数名	参数值
定子	额定电流 I/kA	6
	每齿匝数 N	1
	齿距 τ_s/mm	46
	齿宽 w_s/mm	23
	齿高 d_s/mm	20
	定子材料	DW465-50
	定子加速长度 $/\text{m}$	4
	定子制动长度 $/\text{m}$	3.5
	极距 τ/mm	69
	永磁体宽度 w/mm	25
动子	永磁体长度 L/mm	52.5
	永磁体深度 h/mm	400
	绝磁材料	胶木
	永磁体材料	NdFeB
	永磁体剩磁 B_r/T	1.2
	永磁体矫顽 $H_c/(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	890
	气隙	气隙长度 g/mm
	气隙长度 g/mm	5
	灭火弹	灭火弹质量 m_0/kg
	灭火弹	出口速度 $v_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$

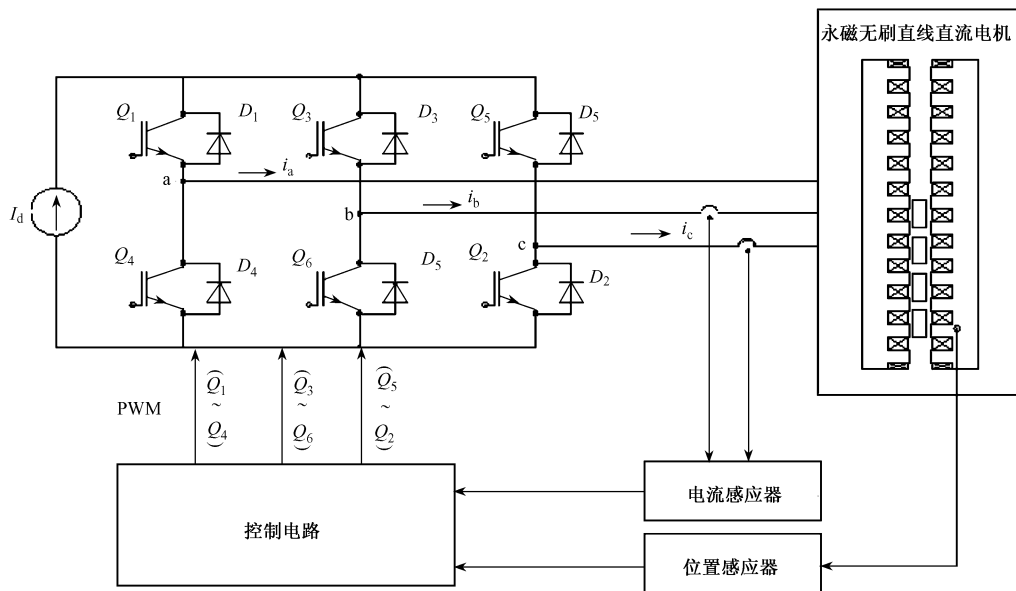


图 4 消防炮的控制系统

Fig 4 Control system of electromagnetic launcher for forest fire control

1.3 模型分析

电机以 $2\pi/3$ 导通方式运行, 在导通期间电流大小和方向不变, 可以当成一个恒定场。假设电机内矢量磁位 A 沿 z 轴方向均匀分布, 且定子冲片各向同性。由于电机结构对称, 因而可以将电机的电磁场分析简化为 1 个二维稳定场问题。二维稳定电磁场的 Maxwell 方程用矢量磁位 A 表示为^[11]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = - (J_0 + J_m) \quad (1)$$

式中: μ 为磁导率, A_z 为 z 向矢量磁位, J_0 为初级绕组线圈中的电流密度, J_m 为永磁体等效磁化电流密度。由于永磁材料 NdFeB 具有线性的去磁特性, 所以:

$$J_m = \frac{1}{\mu_0} \nabla \cdot M \quad (2)$$

式中: M 为磁化强度。

根据变分原理, 可将式 (1) 边值问题的求解, 转化为给定条件区域 Ω 和边界条件上的求解, 求出使能量泛函 $\Pi(A_z)$ 达到最小时的函数 $A_z(x, y)$ 。

$$\Pi(A_z) = \iint_{\Omega} \frac{1}{2\mu} \left[\left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right)^2 \right] d\Omega - \iint_{\Omega} (J_0 + J_m) d\Omega \quad (3)$$

将求解区域离散为一系列单元, 并选用线性单元插值, 就可以把边界条件能量泛函 $\Pi(A_z)$ 的极值问题转化为下列方程组的求解:

$$[k][A_z] = [P] \quad (4)$$

式中: $[k]$ 为系数矩阵, $[P]$ 为代表电流密度值 p 的常数项列向量。通过式 (4) 可解得指定区域各离散单元的矢量磁位 A_m 。然后在 x - y 二维平面中解出磁

感应强度 B :

$$B = B_x i + B_y j = \frac{\partial A_z}{\partial y} i - \frac{\partial A_z}{\partial x} j \quad (5)$$

式中: i 和 j 表示复变量。由此可解出 B_x 和 B_y , 进一步解出磁场强度 H_x 和 H_y 。

研究中采用虚功法来求解作用在动子上的电磁力。设动子在 x 轴向上的位移为 s , W 为磁共能, 在导通期间电流的大小和方向不变, 则动子受到的 x 轴方向的电磁力 F_x 为:

$$F_x = \frac{\partial W(s, i)}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\int_0^H B dH \right] dV \quad (6)$$

式中: H 为磁场强度, V 为永磁体以及与之对应的气隙体积之和。在以上推导的基础上可列出动子的运动方程

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = F_x - F_z \quad (7)$$

式中: m 为运动部分的质量, 包括动子和灭火弹; s 为位移; F_z 为阻力, 包括摩擦力及风阻等; t 为时间。

2 仿真分析

有限元软件 Maxwell2D 在分析电磁场问题时通常分为 5 步, 即建立几何模型、赋予材料属性、网格剖分、有限元计算和后处理^[12]。几何模型中运动区域包含了动子和气隙的一部分, 为提高计算精度, 运动区域划分的网格最小、密度最大, 其划分等级为 4 模型其余区域网格划分等级为 5。运算时运动区域网格每隔 1 ms 重新划分 1 次, 以提高计算精度。另外, 在计算过程中将动子遇到的阻力设定为 1 kN, 且忽略涡流的影响。运算结束后, 将会生成结果曲线。

图 5 是某时刻直线电机内部磁通线分布图。从图 5 可以看出:磁通线在每一对动子永磁体和定子

铁心间形成了闭合回路。

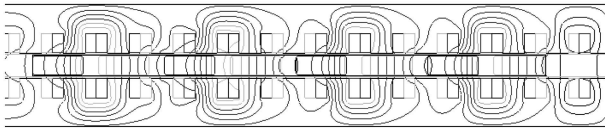


图 5 某时刻直线电机内部的磁通线分布

Fig 5 Distribution of magnetic flux lines in linear motor

图 6 是动子极对数 (P) 为 4、绕组线圈中通入的电流 (I) 从 1 kA 递增到 6 kA 时, 动子的电磁推力曲线。此时运动部分的总质量为 35.2 kg。从图 6 可以看出: 随着电流的增加, 动子受到的电磁推力逐渐增大, 但推力波动也相应地随之增大。推力波动主要是由于电流换相引起, 而且电流越大波动越大, 这是永磁无刷直线直流电机的一个特点^[13]。

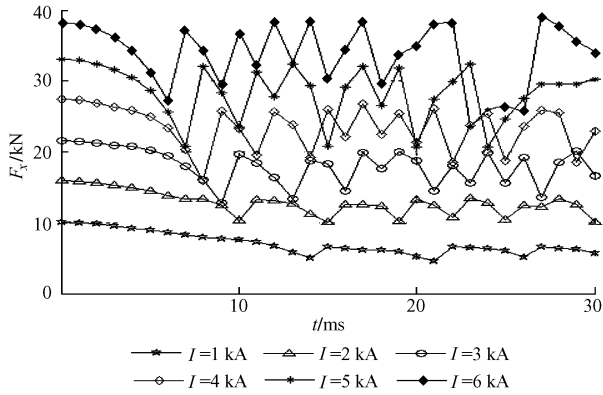


图 6 电磁推力与电流的关系

缘故。对此现象, 可以通过选择性能更好的铁心材料来缓解磁饱和的影响。

图 8 是动子极对数为 4、绕组线圈中通入的电流从 1 kA 递增到 6 kA 时, 动子的速度 (v) 曲线。从图 8 可以看出: 电流增加时速度也会随之增大, 但同样波动也会有所增加。即使如此, 速度依然与时间呈近似的线性关系。另外, 消防炮在工作时其动子具有非常大的加速度, 譬如当电流为 3 kA 时, 动子在 30 ms 内速度达到了 14 m/s。在此过程中其平均加速度为 539 m/s²。

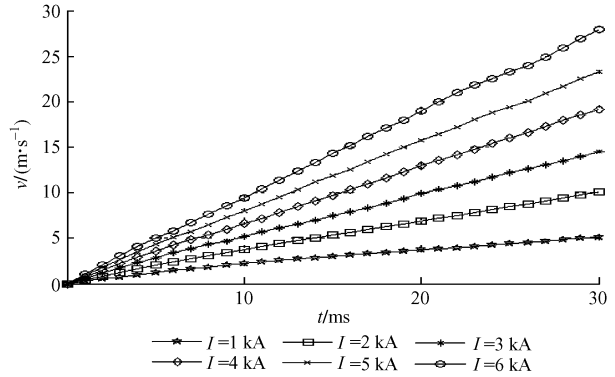


图 8 不同电流情况下的速度曲线

Fig 8 Speed curves in different current

图 7 是动子极对数为 4、绕组线圈中通入不同电流时, 动子受到电磁推力的平均值。其值与图 6 中的各条曲线相对应。从图 7 可以看出: 当电流在 1~5 kA 范围内变化时, 电流和受力为近似的线性关系; 当电流大于 5 kA 时, 这种受力关系变得复杂, 这主要是因为动子永磁体退磁和定子铁心磁饱和的

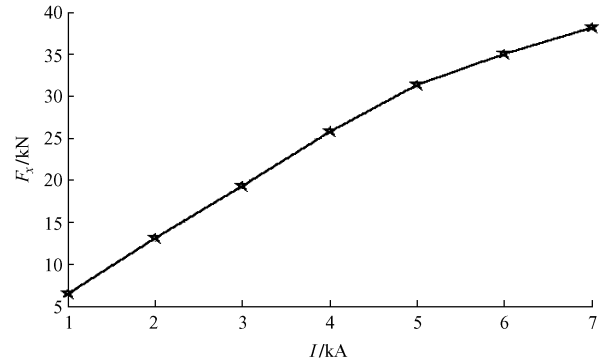


图 7 电磁推力平均值与电流的关系

Fig 7 Relationship between the average of electromagnetic thrust and current

图 9 是电流为 1 kA 时, 动子极对数与电磁推力的关系。从图 9 可以看出: 电磁推力与动子极对数呈近似线性关系, 而且推力波动也随动子极对数增加而增加。

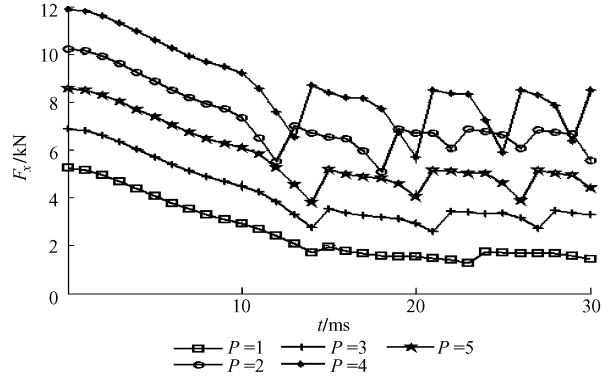


图 9 不同极对数情况下的电磁推力曲线

Fig 9 Electromagnetic thrust curves in different number of pole pairs

图 10是电流为 1 kA、动子极对数为 4 时,动子永磁体深度与电磁推力的关系。从图 10可以看出:动子永磁体深度与电磁推力之间呈近似的线性关系。

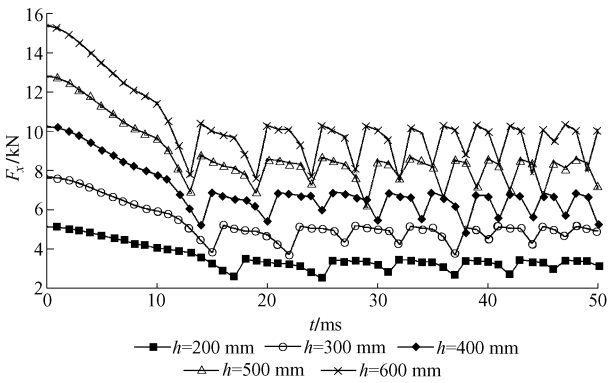


图 10 不同永磁体深度情况下的电磁推力曲线
Fig 10 Electromagnetic thrust curves of moving part in different PM's height

从以上分析得知,要增大电磁推力可以通过增大电流、增加极对数或增加动子的深度来实现,但要注意随之产生的推力波动。

图 11是电流为 1 kA、动子极对数为 4 时,动子受到的侧向力,此时这个侧向力是由动子永磁体和定子铁心相互吸引而产生的。由于这个力很大,在 27.5 kN 上下波动,所以在设计时采用了肋板来加强弹射器的结构,使之不至于产生变形。

图 12是电流为 1 kA、动子极对数为 4 时,动子两边侧向力的合力。从图 12上可以看出:虽然动子单侧受到很大的侧向力,但由于消防炮的双边定子关于动子的中线对称,所以动子所受到的侧向力能够得到很好的平衡。

表 2 是当动子在消防炮中的加速距离为 4 m、动子极对数为 5、灭火弹质量为 15 kg 时,灭火弹在不同条件下的出口速度及最大理论射程。按照给定参数,本文所研究的电磁弹射式森林消防炮可以将质量为 15 kg 的灭火弹,以 86.3 m/s 的初始速度投射到半径为 720 m 的 1 个区域范围。根据不同任务

要求,消防炮还可以改变设定参数,发射质量更大的灭火弹。

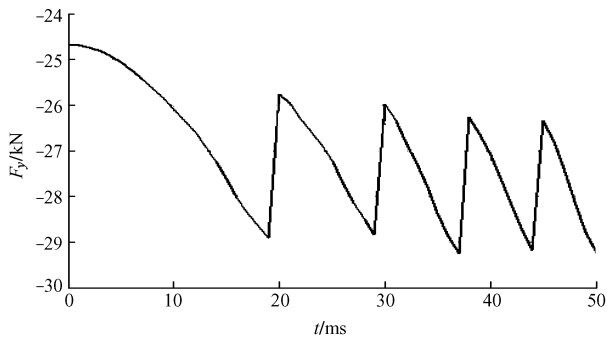


图 11 动子受到的侧向力
Fig 11 Lateral force of moving part

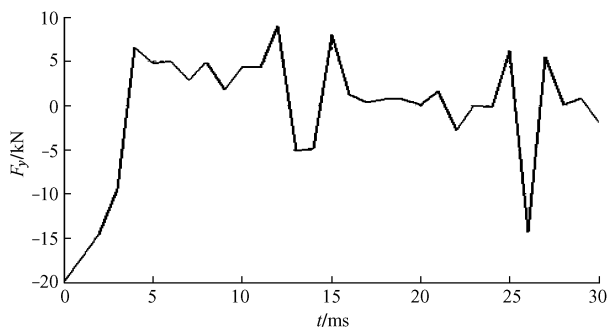


图 12 动子侧向力的合力
Fig 12 Lateral resultant force of moving part

在消防炮发射时,动子永磁体退磁是一个需要注意的问题。由于磁路中磁阻的存在,以及发射时电枢反应的作用,动子永磁体会产生一定程度的退磁。另外消防炮在运行时内部的温度会上升,但动子的 NdFeB 永磁材料具有一定的温度不稳定性,所以一般要求 NdFeB 永磁材料的退磁程度不能大于 80%^[6]。用有限元法对不同磁极厚度的电机模型进行分析、计算可知:磁极边缘部分的退磁最为严重,磁极厚度越大其抗退磁能力越强。

表 2 不同电流和永磁体深度条件下灭火弹的出口速度及最大射程													
Tab 2 Final speed and maximum range of extinguishing bomb in different current and PM's height													
h/mm	I=1 kA		I=2 kA		I=3 kA		I=4 kA		I=5 kA		质量		
	v ₀ /(m·s ⁻¹)	L ₀ /m	v ₀ /(m·s ⁻¹)	L ₀ /m	v ₀ /(m·s ⁻¹)	L ₀ /m	v ₀ /(m·s ⁻¹)	L ₀ /m	v ₀ /(m·s ⁻¹)	L ₀ /m	m ₀ /kg	m ₁ /kg	
300	30.5	94	45.5	207	56.0	311	65.2	418	72.2	508	15	28.6	
400	33.2	111	48.9	239	60.0	356	69.6	473	77.0	574	15	36.5	
500	35.1	124	51.3	262	62.7	387	72.7	515	80.4	623	15	44.4	
600	36.4	134	53.0	280	64.7	412	75.0	505	82.9	660	15	52.3	
700	37.5	142	54.3	293	66.3	435	76.8	571	84.8	689	15	60.1	
800	38.3	148	55.3	304	67.5	447	78.2	591	86.3	720	15	68.0	

注:m₁ 为动子质量。

3 结论与讨论

本文给出了电磁弹射式森林消防炮这一新型消防炮的设计方案,分析了消防炮的工作原理,设计了消防炮的基本结构,提出了消防炮的控制方式,并建立其数学模型,最后用电磁场有限元分析软件 Maxwell2D对模型的动态性能进行了分析。结果表明:

1) 对于给定的电磁弹射式森林消防炮模型,当电流不大于 5 kA 时,电磁推力与定子线圈中通入电流大小、动子极对数以及动子永磁体深度呈近似线性关系;但电流大于 5 kA 时,其关系将变得复杂。这是由于永磁体退磁和定子铁心磁饱和的缘故,可以通过增加永磁体厚度和采用性能更好的定子铁心材料来缓解。

2) 消防炮的双边定子结构能够很好地平衡动子的侧向力,但在工程结构设计时要防止由于动子单侧与定子的吸引力过大而使得消防炮结构发生变形。

3) 虽然当电流增加时动子速度会有一定的波动,但依然与时间呈近似的线性关系,因而运动部分会随之获得非常大的加速度,足以满足消防炮的发射工作要求。

参 考 文 献

[1] 周生贤. 2006年中国环境状况公报:森林 [R]. 北京:国家环境保护总局, 2007.

[2] 李勇, 董化新. 无刷电磁弹射器中电磁力的仿真计算 [J]. 微特电机, 2002, 30(5): 22-24.

[3] HAYDEN T E, ELDER D J. Hypervelocity projectile

development for electromagnetic guns[J]. IEEE Transactions on Magnetics 1990, 27(1): 452-457.

[4] GARNER J, ZIELINSKI A, JAMISON K A. Design and testing of a mass-stabilized projectile for a small caliber electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics 1989, 25(1): 197-202.

[5] BEMHARD R. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range [J]. IEEE Transactions on Magnetics 2003, 39(1): 310-313.

[6] PATTERSON D, MONTI A, BRICE C D, et al Design and simulation of an electromagnetic aircraft launch system [C]. 37th Annual Industry Applications Conference(3). Washington, DC: IEEE, 2002: 1950-1957.

[7] VLONTIA, PATEL K, PATTERSON D, et al Modular control for electromagnetic aircraft launching system [C]. 34th Annual Power Electronics Specialists Conference(4). Washington, DC: IEEE, 2003: 1877-1882.

[8] 罗宏浩, 吴峻, 常文森. 新型电磁弹器的动态性能仿真 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 2285-2288.

[9] ZHAO C, ZOU J Y, LI X P, et al Study of a Three-stage reconnection electromagnetic launcher using triggered vacuum switches [J]. IEEE Transactions on Magnetics 2007, 43(1): 219-222.

[10] ZHANG J G, GU G, XIANG Y, et al Research on a big multistage rail electromagnetic launching system [J]. IEEE Transactions on Magnetics 2007, 43(5): 2054-2058.

[11] 金建铭. 电磁场有限元方法 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1998.

[12] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft工程电磁场有限元分析 [M]. 北京:电子工业出版社, 2005.

[13] 郭庆鼎, 孙宜标, 王丽梅. 现代永磁电动机交流伺服电机 [M]. 北京:中国电力出版社, 2006.

(责任编辑 李文军)