

双线圈耦合多级电磁加速弹射系统

杨洪涛, 杨 鹏, 刘润泽

(安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232000)

摘要: 电磁弹射是一种极具发展前景的新型弹射技术, 现有的电磁弹射系统主要用于大型战机的弹射。为了实现中小型无人机利用电磁弹射起飞, 本文提出一种双线圈耦合多级电磁加速弹射方案, 并详细分析了双线圈耦合多级电磁加速的工作原理。针对无人机弹射的实际需要, 分析确定了弹射系统加速轴轴长的计算公式和弹射系统的关键参数计算公式。基于上述原理完成了实验样机参数的确定, 设计了相应的机械结构和控制系统, 并进行了多组验证实验。所研制的样机采用 8 组 400V680 μ F 电容加速, 2 组 400V680 μ F 电容制动, 弹射速度可达 57km/h, 发射效率达到 24%, 能够完成小型固定翼无人机的弹射起飞。

关键词: 电磁弹射; 固定翼无人机; 双线圈耦合; 多级电磁加速

DOI: 10.12067/AITEEE1906043

文章编号: 1003-3076(2020)02-0040-06

中图分类号: TM303.1; TM89

1 引言

目前, 固定翼无人机助推起飞采用机械弹射、蒸汽液压弹射、火箭助推弹射、电磁弹射 4 种方式^[1-3]。机械弹射如国产 H15 后推型弹射架结构简单、成本低, 但弹射负载和速度有限。蒸汽液压弹射技术弹射负载大, 如英国赫尔墨斯 450^[1] 和 不死鸟 无人机^[4] 的弹射器, 但设备体积庞大、管路复杂。火箭助推弹射如以色列的 哈比 反辐射无人机助推器弹射轨道短, 但由于使用化学燃料, 存在较大的安全隐患^[5]。电磁弹射技术采用全电能驱动, 加速平稳、速度可控, 且弹射效率高、弹射负载大, 是未来无人机弹射技术发展的新趋势^[6-10]。而现有的大型电磁轨道弹射, 需要在轨道两侧铺设电磁线圈驱动负载。这种轨道两侧铺设电磁线圈的电磁弹射系统成本高, 适合用于大型战机的弹射, 而不适用于中小型无人机的弹射。目前缺乏用于成熟、小型化的电磁弹射系统, 现有研究成果尚且处于理论研究阶段^[11-14], 如李振超等提出一种异步感应式电磁线圈弹射装置, 通过原理分析、系统设计和仿真分析三个方面验证了折翼式无人机电磁弹射起飞的可行性, 弹射效率达到 17.6%; 苏子舟等详细分析了电磁弹

射技术应用于无人机领域的可行性; 柴睿等提出一种基于车载电磁无人机弹射系统, 通过模拟分析和计算, 理论验证了该方案的可行性。上述电磁弹射方案与多级电磁线圈炮的原理相似^[13-15], 采用多个同轴线圈产生轴向电磁力驱动电枢向前运动, 由于弹射过程中单个线圈产生的电磁力有限, 弹射无人机等大负载时, 为了在有效行程内获得连续稳定的加速度, 需要在轴向连续布置密集的线圈, 从而使设备成本剧增。为了提高线圈利用率, 降低设备成本, 本文提出双线圈耦合多级电磁加速技术, 并研制了一种小型化的新型电磁弹射系统。

2 双线圈耦合多级电磁加速系统的原理

2.1 双线圈耦合多级电磁加速原理

双线圈耦合多级电磁加速原理如图 1 所示, 线圈在高压电源的激励下, 线圈周围形成强大的磁场, 位于线圈内部的铁心产生感应电流, 线圈磁场与定子(铁心)感应电流的磁场相互作用, 产生电磁力推动线圈运动。该电磁力与线圈、铁心之间的中心距呈非线性关系, 线圈位于铁心两端点时, 电磁力最大, 且方向相反^[10,11]; 当线圈位于铁心中心时, 相互作用力衰减为零^[11], 这就使得通电线圈将在铁心前

收稿日期: 2019-06-26

作者简介: 杨洪涛(1972-), 男, 福建籍, 教授, 博士, 研究方向为机电测控技术;

杨 鹏(1994-), 男, 安徽籍, 硕士研究生, 研究方向为电磁驱动技术。

半段加速前进而在后半段减速折返, 最终滞留在铁心中心。

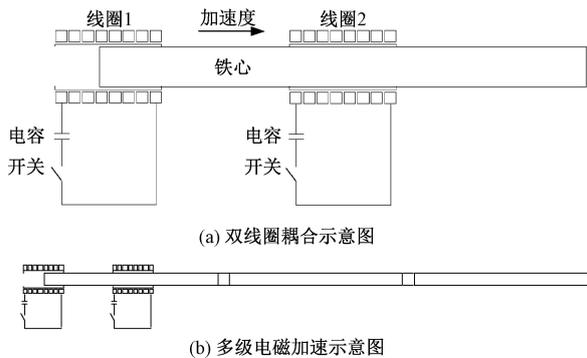


图1 双线圈耦合多级电磁加速原理

Fig.1 Double coil coupled multi-stage electromagnetic acceleration principle

本文通过合理设计线圈的通电时序(起点处通电, 中点处断电), 使线圈借助惯性沿铁心持续向前。由于单个线圈的推力有限, 且单周期内的作用时间较短, 为了保证加速装置能稳定加速, 必须采用多线圈耦合加速模式。本文设计的核心加速器采用两个同轴电枢线圈, 两个线圈的间距设计为铁心轴长的 $1/2$, 这样使得线圈通断电时序刚好相差一个周期, 构成耦合结构, 即当其中一个线圈在铁心中点断电时, 另一个线圈刚好在起点处通电, 双线圈耦合示意图如图1(a)所示。两个线圈交替加速, 相互配合, 使加速器能沿铁心轴向持续稳定推进, 线圈利用率显著提高。

由于单铁心结构加速器加速距离有限, 为了实现无人机在短距离内助推起飞, 必须采用多线圈耦合多级电磁加速模式。多级电磁加速示意图如图1(b)所示, 在单根铁心的基础上, 增加多根铁心, 相连两根铁心之间采用逆磁性材料连接, 电枢线圈每经过一根铁心加速一次, 如: 2个线圈通过10根铁心后可加速20次。通过合理布置铁心数目, 可以在短距离内通过密集连续的电磁加速实现无人机的电磁助推起飞。

2.2 多级电磁加速系统的设计原理

本文采用多级高压电容组作为电源驱动加速器, 采用大功率可控硅控制电容放电。由于可控硅本身不具备G极关断的特性, 使得电容整个放电过程无法通过可控硅关断, 线圈的通电过程必须在加速轴(铁心)的前半段完成, 才能保证电容内的电能被充分用于线圈加速, 因此加速轴长度与电容有效放电时间和无人机的起飞速度有关。加速轴的有效

加速区间为加速轴长度的前 $1/2$, 考虑到放电电路需要一定的响应时间(μs 级), 加速轴轴长需要保留一定的裕量, 所以加速轴轴长设计为:

$$l_{\text{轴}} = 2vt_{\text{效}} + l_{\text{裕}} \quad (1)$$

式中, $l_{\text{轴}}$ 为加速轴长度; $l_{\text{裕}}$ 为加速轴长度设计裕量; v 为无人机弹射起飞速度; $t_{\text{效}}$ 为电容有效放电时间。

将电容放电公式 $t = RC \ln(U_{\text{充电}}/U_{\text{截止}})$ 代入式(1)得到:

$$l_{\text{轴}} = 2RC \ln(U_{\text{充电}}/U_{\text{截止}}) + l_{\text{裕}} \quad (2)$$

式中, R 为线圈的电阻值; C 为电容容量; $U_{\text{充电}}$ 为电容充电电压; $U_{\text{截止}}$ 为电容有效放电截止电压。

为了满足不同起飞速度、不同重量无人机的弹射起飞要求, 需要利用能量守恒定律, 准确计算不同的多级电磁加速系统实际设计参数。无人机起飞所需的动能计算式如式(3)所示, 高压电容组能量计算式如式(4)所示, 电容器组能量与无人机的动能转化可利用式(5)表示, 因此多级电磁加速系统设计参数确定模型如式(6)所示。

$$E_p = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

$$E_{\text{电}} = n \frac{1}{2}CU_{\text{充电}}^2 \quad (4)$$

$$E_p = \eta E_{\text{电}} \quad (5)$$

$$nC U_{\text{充电}}^2 = \frac{mv^2}{\eta} \quad (6)$$

式中, n 为电磁加速级数; m 为负载质量; η 为电能转换率。在给定无人机的重量和起飞速度后, 可以根据式(6)推算出弹射系统的实际加速级数以及需要使用的电容型号。

3 弹射系统机械结构设计

不同于常规电磁轨道弹射的双边多线圈加速方案, 本文设计的新型电磁弹射系统采用双线圈耦合多级电磁加速方案, 利用布置在中间的双线圈分时复用替代双边多线圈加速模式, 可有效提高线圈利用率、降低设备成本。但这种加速方案使线圈的布置、加速轴轴长的选择对系统稳定性影响较大, 不合理的结构设计会直接导致加速中断, 所以核心加速器和多段加速轴是该弹射系统设计的关键。

3.1 整体结构设计

本文设计的无人机弹射系统主要包括: 上下平台、核心加速器、多段加速轴、无人机固定平台和滑轨等, 整体结构示意图如图2所示。其中加速器和

多段加速轴组成核心加速系统,位于上下两平台之间。为了防止加速器滚转,将加速器、多段加速轴、上平台滑轨、无人机固定平台设计成直线滑块结构,使加速器只能沿加速轴轴向滑动。此外,为了满足不同的起飞角度,在下平台安装有可升降的脚撑。

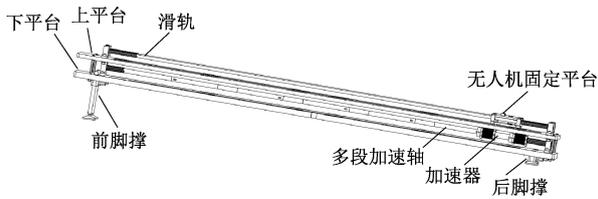


图2 整体结构示意图

Fig.2 Overall structure diagram

3.2 核心加速器的设计

核心加速器是整个弹射装置的动力部件,加速器上两同轴线圈间距设计为单根加速轴长的 $1/2$,配合适当的通电时序,保证两个同轴线圈构成稳定的耦合结构。核心加速器及防滚转结构示意图如图3所示,在线圈前安装一组对射式光电传感器,配合加速轴端的定位孔,可实现加速器的精准定位。考虑到为了减小加速器推进时由于多段加速轴变形引起的阻力,加速器上的两个推杆与无人机固定平台采用间隙配合。同时,加速器上的推杆受无人机固定平台的约束,使加速器只能沿加速轴直线滑动,构成防滚转结构。

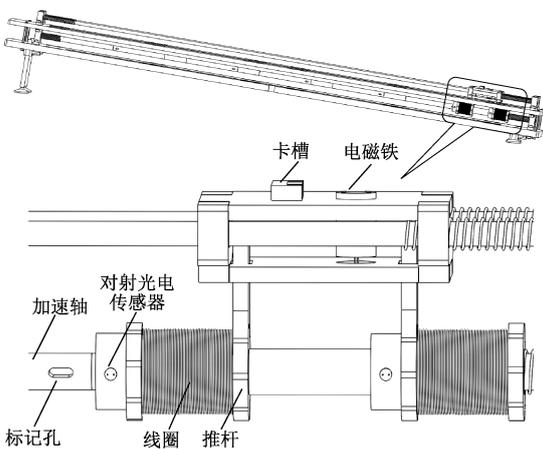


图3 核心加速器及防滚转结构示意图

Fig.3 Core accelerator and anti-roll structure

3.3 多段加速轴的设计

多段加速轴的结构如图4所示,采用多根加速轴拼接而成。加速轴在磁化时,为了阻隔相连两根加速轴的磁化干扰,采用3K碳纤维管作为连接杆。

同时在每根加速轴的起始端设计标记孔,并在安装时保证所有标记孔在同一水平面上,配合加速器上的对射光电传感器,实现线圈位置的实时预判。考虑到加速器完成加速后过大的冲击载荷会对设备造成破坏,在多段加速轴末端设计减速区,参见图4,将末端加速轴反向安装,迫使加速器在反向磁力的作用下瞬间减速,最后利用弹簧吸收加速器剩余动能并完成加速器的复位。

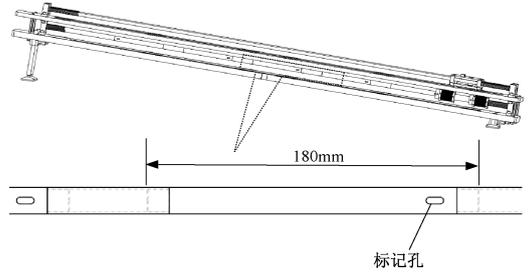


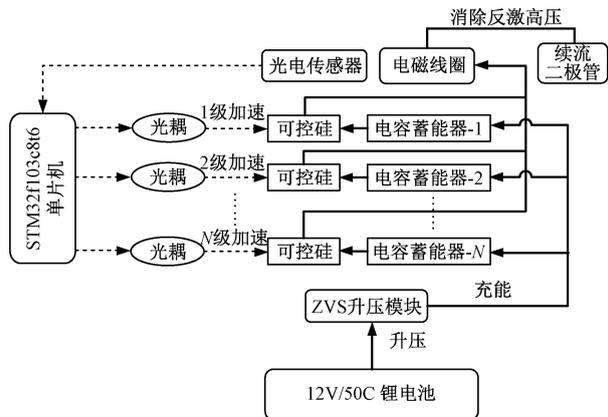
图4 多段加速轴的结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of multi-stage acceleration shaft

4 弹射系统控制电路设计

本文设计的多级电磁加速弹射系统采用高压大容量电容组驱动,瞬间放电电流高达几百安培。当加速器高速推进时,线圈通、断电切换必须在极短的时间内完成,才能保证线圈在有效加速区内通、断电,使加速器进一步提速。本系统设计了单片机-光耦-可控硅的组合控制系统,系统的控制原理如图5所示,利用ZVS升压器将12V电压升至400V储存于电容组中,STM32单片机接收到传感器信号后,通过光电耦合器控制可控硅打开相应电容,使电容组按照加速轴的先后顺序,进行高压大电流放电,驱动双线圈在多段加速轴上逐级加速。同时为了避免线圈断电时产生的反激高压对整个电气线路的破坏,在双线圈两端各并联一个高压续流二极管,可有效消除反激高压。

为了实现弹射系统有序的多级电磁加速,本系统编制了相应的控制程序,其系统控制流程图如图6所示。按下发射按钮时,无人机平台上的电磁铁通电将无人机固定,随后加速器上位于前面的1号线圈前的光电传感器,率先检测到第一根加速轴上的标记孔,程序将检测到的标记孔数置1,并开启1号电容,驱动1号线圈加速。当1号线圈到达首根加速轴中点时,第1个电容放电截止,此时2号线圈刚好到达首根加速轴的起点(标记孔处),程序将标记孔数置2,同时开启2号电容,驱动2号线圈加



注:粗实线表示大电流,细虚线表示信号

图5 系统的控制原理

Fig.5 System control principle

速。以此类推,当加速器完成多级电磁加速后,无人机平台上的电磁铁断电,释放无人机,完成弹射。最后加速器在减速区内,利用反向安装的加速轴来实现加速器的减速,并利用弹簧将加速器及平台复位。

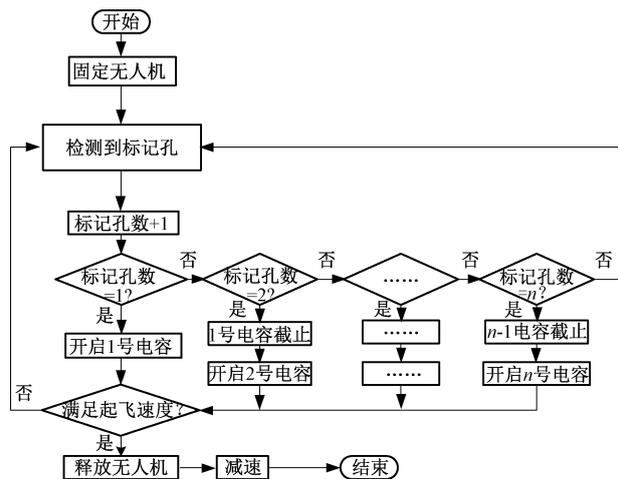


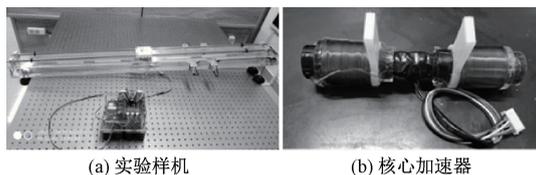
图6 系统控制流程

Fig.6 System control flow

5 实验与结果分析

为了验证双线圈耦合多级电磁弹射系统的可行性,本文利用重量为 830g 的小型无人机作为实验对象,制作了该电磁弹射系统的实验样机。本样机使用的线圈阻值 R 为 3.6Ω ,采用 0.6mm 无氧铜漆包线绕制,匝数 750。样机的多段加速轴由 5 根加速轴拼接(其中 1 根用于减速),加速器采用 8 组 $400\text{V}680\mu\text{F}$ 电容驱动,2 组 $400\text{V}680\mu\text{F}$ 电容制动,样机实物如图 7 所示。

电容有效放电测试实验数据见表 1,样机高压



(a) 实验样机

(b) 核心加速器

图7 无人机弹射系统实验样机

Fig.7 UAV ejection system experimental prototype

电容组的充电电压为 400V ,放电截止电压为 80V ,因此本样机采用的高压电容组的有效放电时间如式(7)所示。

$$t_{\text{效}} = RC \ln(400/80) = 1.6RC \quad (7)$$

将式(7)代入式(1)可得到加速轴长的实际计算公式如式(8)所示。

$$l_{\text{轴}} = 3.2vRC + l_{\text{裕}} \quad (8)$$

表1 实验数据

Tab.1 Experimental data

$U_{\text{充电}} / \text{V}$	$U_{\text{截止}} / \text{V}$	速度 / (km/h)	电能 / J	动能 / J	利用率 (%)
90	23	12.8	22.03	5.65	25.6
130	29	18.5	45.97	11.37	24.7
170	37	24.2	78.61	19.17	24.4
210	46	29.9	119.95	29.05	24.2
250	55	35.6	170.00	41.01	24.1
290	59	41.3	228.75	55.05	24.1
330	67	47.0	296.21	71.17	24.0
370	75	52.7	372.37	89.37	24.0
400	80	57.1	435.20	104.02	23.9

样机设计初的最大弹射速度为 72km/h (20m/s),线圈电阻 3.6Ω ,电容容量 $680\mu\text{F}$,加速轴的裕量取 23mm ,利用式(8)计算得到加速轴的长度为 180mm 。

实验样机搭建完成后,进行了多组弹射实验,实验数据见表 1。采用 8 级电磁加速的样机,最大时速可达 57km/h ,样机加速过程中速度-时间关系示意图如图 8 所示。

利用系统参数模型计算得到系统的电能转换率 η 为 24% 。最终建立多级电磁加速系统的关键参数计算式:

$$nC U^2 = \frac{mv^2}{0.24} = 4.17mv^2 \quad (9)$$

若样机采用 $400\text{V}680\mu\text{F}$ 电容驱动,则利用系统参数计算式(9)计算得到样机的实际加速级数应达到 12.7 级(14 级),需要布置 7 根加速轴,1 根减速轴,才能满足 72km/h 的弹射起飞速度要求。

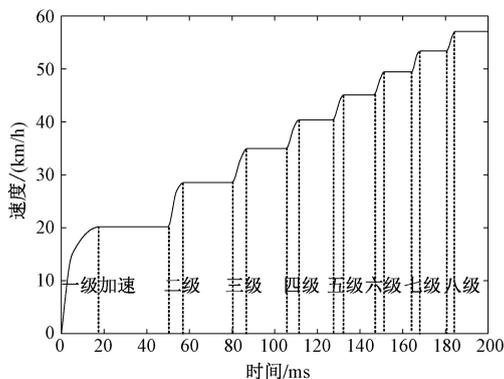


图8 样机加速过程中速度-时间关系示意图

Fig.8 Schematic diagram of speed-time relationship during acceleration of prototype

本文设计的弹射系统可以根据不同负载和起飞速度合理选择系统参数,以5kg的中型无人机为例,起飞速度60km/h,利用系统参数计算式(9)计算得到所需电能为2895J,则实际电磁弹射装置的级数 n 可设计为18级,电容电压400V,电容容量2010 μ F(选用400V2200 μ F电容),再利用轴长计算式(8)计算得到加速轴长度为422mm+ $l_{裕}$,实际轴长设计为450mm较为合适。加速级数为18,则需要布置9根加速轴,1根减速轴,整个弹射装置长度预计达到4.5m。

6 结论

(1)本文基于电枢线圈互感原理,提出一种新型无人机双线圈耦合多级电磁加速弹射方法,并设计合理的机械结构和电路驱动系统,利用密集的电磁加速,实现无人机高效可控的弹射起飞。

(2)搭建了实验样机进行弹射实验,验证了双线圈耦合多级电磁加速弹射系统的可行性,并确定了该系统加速轴的轴长计算式,以及系统的关键参数计算公式。在给定无人机负载的质量和起飞速度后,可以根据系统关键参数计算公式,推算出弹射系统的实际加速级数、需要使用的电容型号以及加速轴的长度及数目,用于指导无人机电磁弹射系统的结构设计和设备选型。

(3)当加速器通过有效加速区的时间小于传感器响应延时,系统将做无效功,因此,提升最大弹射速度的充要条件是缩减对射光电传感器的响应时间。

参考文献 (References):

[1] 李振超, 马偃毫, 路梅, 等 (Li Zhenchao, Ma Yan-

bo, Lu Mei, et al.). 一种无人机电磁弹射系统的设计与研究 (Design and study of electromagnetic launch system for unmanned aerial vehicle) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (8): 68-74.

[2] 夏天威, 徐蓉, 袁伟群, 等 (Xia Tianwei, Xu Rong, Yuan Weiqun, et al.). 电磁轨道发射装置绝缘支撑性能研究 (Study on deterioration of insulation support performance in repeated emission) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 49-54.

[3] 袁瑞敏, 袁伟群, 徐伟东, 等 (Yuan Ruimin, Yuan Weiqun, Xu Weidong, et al.). 电磁发射中枢轨接触电阻特性研究 (Research on contact resistance characteristics between armature and rails in electromagnetic launch) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 45-50.

[4] 苏子舟, 张博, 国伟, 等 (Su Zizhou, Zhang Bo, Guo Wei, et al.). 无人机电磁弹射应用综述 (A review of electromagnetic launch technology used in UAV) [J]. 火炮发射与控制学报 (Journal of Gun Launch & Control), 2011, (1): 93-96.

[5] 张旭东, 尹航, 王剑, 等 (Zhang Xudong, Yin Hang, Wang Jian, et al.). 中小型无人机高原起飞方式研究 (Research on take-off way in the plateau area of UAV) [A]. 2015 第二届中国航空科学技术大会论文集 (Proceedings of the 2nd China Aviation Science and Technology Conference) [C]. 北京, 中国, 2015. 77-79.

[6] 李小民, 李会来, 向红军, 等 (Li Xiaomin, Li Huilai, Xiang Hongjun, et al.). 飞机电磁弹射系统发展及其关键技术 (Development and key technology of electromagnetic aircraft launch system) [J]. 装甲兵工程学院学报 (Journal of Academy of Armored Force Engineering), 2014, 28 (4): 1-7.

[7] 聂宏, 房兴波, 魏小辉, 等 (Nie Hong, Fang Xingbo, Wei Xiaohui, et al.). 舰载飞机弹射起飞动力学研究进展 (Overview of carrier-based aircraft catapult launch dynamics) [J]. 南京航空航天大学学报 (Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics), 2013, 45 (6): 727-738.

[8] 张明元, 马伟明, 汪光森, 等 (Zhang Mingyuan, Ma Weiming, Wang Guangsen, et al.). 飞机电磁弹射系统发展综述 (Overview on a significant technology of modern aircraft carrier-electromagnetic aircraft launch system) [J]. 舰船科学技术 (Ship Science and Technology), 2013, 35 (10): 1-5.

- [9] Fair H D. Advances in electromagnetic launch science and technology and its applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (1): 225-230.
- [10] Skurdal B D, Gaigler R L. Multimission electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (1): 458-461.
- [11] 柴睿 (Chai Rui). 基于车载电磁无人机弹射系统的研究 (Research on vehicle electromagnetic UAV ejection system) [J]. 科技资讯 (Science & Technology Information), 2012, (31): 57.
- [12] James T E. Why solid armatures fail and how they can be improved [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (1): 56-61.
- [13] 向红军, 李治源, 袁建生 (Xiang Hongjun, Li Zhiyuan, Yuan Jiansheng). 考虑电枢速度的多级感应线圈炮最佳触发位置 (Optimal trigger position of multi-stage inductive coil gun with armature velocity) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2012, 16 (1): 7-11.
- [14] 吴峻, 杨宇, 赵宏涛, 等 (Wu Jun, Yang Yu, Zhao Hongtao, et al.). 无人机电磁弹射器的综合制动方法 (Hybrid brake method for electromagnetic launcher of unmanned aerial vehicle) [J]. 国防科技大学学报 (Journal of National University of Defense Technology), 2015, 37 (5): 61-66.
- [15] 向红军, 赵科义, 李治源, 等 (Xiang Hongjun, Zhao Keyi, Li Zhiyuan, et al.). 多级电磁感应线圈炮的级间耦合特性 (Characteristics of interstage coupling for multi-stage electromagnetic inductive coil gun) [J]. 高压技术 (High Voltage Engineering), 2012, 38 (5): 1084-1089.

Double coil coupled multi-stage electromagnetic acceleration ejection system

YANG Hong-tao, YANG Peng, LIU Run-ze

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China)

Abstract: Electromagnetic ejection is a new type of ejection technology with great development prospects. The existing electromagnetic ejection system is mainly used for ejection of large fighters. In order to realize the take-off of small and medium-sized unmanned aerial vehicles by electromagnetic ejection, this paper proposes a two-coil coupled multi-stage electromagnetic acceleration ejection scheme, and analyzes the working principle of dual-coil coupled multi-level electromagnetic acceleration. According to the actual needs of the UAV ejection, the calculation formula of the acceleration axis length of the ejection system and the calculation formula of the key parameters of the ejection system are analyzed and determined. Based on the above principle, the parameters of the experimental prototype were determined, the corresponding mechanical structure and control system were designed, and multiple sets of verification experiments were carried out. The prototype developed is accelerated by 8 sets of 400V680 μ F capacitors, and 2 sets of 400V680 μ F capacitors are braked. The ejection speed can reach 57km/h, and the emission efficiency reaches 24%. It can complete the ejection of small fixed-wing UAVs.

Key words: electromagnetic ejection; fixed-wing UAV; double coil coupling; multi-stage electromagnetic acceleration