

空中拖曳锥杆式对接电磁锁紧装置设计

赵俊杰 蒋永 吴福章

(中国空气动力研究与发展中心 绵阳 621000)

摘要 空中拖曳系统是由拖曳飞行器平台、绳缆和拖曳体组成,可以执行物资运输、载荷回收等任务,显著拓展了空中作业空间范围。拖曳体和拖曳飞行器平台连接过程中,受拖曳飞行器平台尾流场以及柔性绳缆受气流因素干扰,致使拖曳体连接过程存在困难,需要对对接方式进行详细研究。以空中拖曳锥杆式对接方式为研究对象,设计了一种锥杆式对接电磁锁紧装置,给出了快速锁紧与紧急释放的电磁锁紧原理。通过建立对接过程有限元模型,以电磁力作为变元进行参数化研究,获得了电磁对接装置的响应数据。采用电容供电情形下,在电容 0.5 F 以上时,2 mm×15 mm 线规条件下电磁力最大可以达到 1000 N 以上。所设计的拖曳锥杆式对接电磁锁紧装置,为空中对接装置设计提供了新思路。

关键词 锥杆式对接,电磁锁紧,有限元

中图分类号 O441.3, TH122

Electromagnetic Locking Device Design for Aerial Towed System Probe Docking

ZHAO Junjie JIANG Yong WU Fuzhang

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000)

Abstract The aerial towing system consists of a towing aircraft platform, a cable, and a towed body. It can perform tasks such as material transportation and load recovery, significantly expanding the scope of aerial operation space. During the connection process between the towed body and the towing aircraft platform, the towed body faces difficulties in connection due to the interference from the wake flow field of the towing aircraft platform and the influence of airflow on the flexible cable. Therefore, a detailed study on the docking method is required. The research object is the aerial towed system probe docking. An electromagnetic locking device is designed. The electromagnetic locking principle of rapid locking and emergency release is given. By establishing the finite element model considering the docking process, the response data of the electromagnetic docking mechanism is obtained considering the electromagnetic force as a variable. When the capacitor is used for power supply, the maximum electromagnetic force can reach more than 1000 N under the condition of 2 mm×15 mm wire gauge when the capacitor is above 0.5 F. This docking electromagnetic locking device in this paper provides a new idea for the air docking design.

2024-12-25 收到原稿, 2025-06-23 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Key words Probe docking, Electromagnetic locking, Finite element

0 引言

空中拖曳系统通常由拖曳飞行器平台、绳缆和拖曳体组成, 拖曳飞行器平台可以是大型固定翼飞机、飞艇等, 绳缆为拖曳载荷用的钢丝绳或者其他柔性线缆, 拖曳体为执行特定任务的装置或设备. 空中拖曳系统可以执行物资运输以及载荷回收等任务, 显著拓展了空中作业空间范围, 但在实际的应用中, 空中拖曳系统面临着作业环境复杂干扰性强、绳缆拖曳刚性差、拖曳物体控制难等问题, 需要对拖曳平台—绳缆—拖曳系统进行综合性分析^[1,2].

在空中载荷回收任务中, 由于回收载荷飞行速度快、体积重量相对较大, 回收载荷要在与拖曳体对接后通过拉伸与拖曳体连接的绳缆才能实现回收. 拖曳体在空中飞行时, 受拖曳飞行器平台尾流和大气紊流等复杂气流扰动影响^[3], 其气动操纵的主动控制性差, 为实现回收载荷与拖曳体的对接, 需对接装置进行精心设计以实现空中自主对接. 美国国防高级研究计划局 (DARPA) 小精灵项目验证了空中回收载荷的可行性^[4], 中国多数研究集中在对拖曳系统姿态测量和稳定性方面的研究^[5-7], 对于拖曳对接装置的研究鲜有报道.

利用电磁对接技术可以实现航天飞行器间弱撞击对接, 电磁对接方式在航天飞行器对接中有着广泛

的应用^[8-11]. 本文提出了一种锥杆式电磁对接锁紧装置, 以实现空中对接锁紧. 分析了锥杆式电磁锁紧装置的结构和对接锁紧原理, 通过建立对接过程的有限元模型, 以电磁力作为变元进行参数化研究, 获得了电磁对接装置的响应结果, 为装置研制提供了理论依据.

1 锥杆式电磁锁紧装置结构

1.1 装置功能与结构

锥杆式电磁锁紧装置锁紧对接回收载荷的过程如下. 空中拖曳平台拖曳锁紧装置在空中飞行, 对接载荷靠近锁紧装置后, 与锁紧装置对接锁紧. 锁紧装置本体气动外形具有良好的姿态稳定性. 锁紧装置具有锁紧功能, 当对接载荷与锁紧装置对接成功后, 锁紧装置自动与对接杆锁紧.

锥杆式电磁锁紧装置结构主要由主动部分和被动部分组成, 如图 1 所示. 主动部分是一套电磁锁紧装置, 被动部分是一根 L 形锥杆. 电磁锁紧装置外形为圆柱体, 中段作为整个结构的承力部件, 采用承力骨架加蒙皮方式进行设计. 整个电磁锁紧装置结构包括: 线圈、电磁插销、外壳蒙皮、栅格翼、固定翼、吊点装置等组成. 锥杆是一根倒 L 形的对接连杆, 其要与回收的载荷相连, 连杆的末端设计为球头结构.

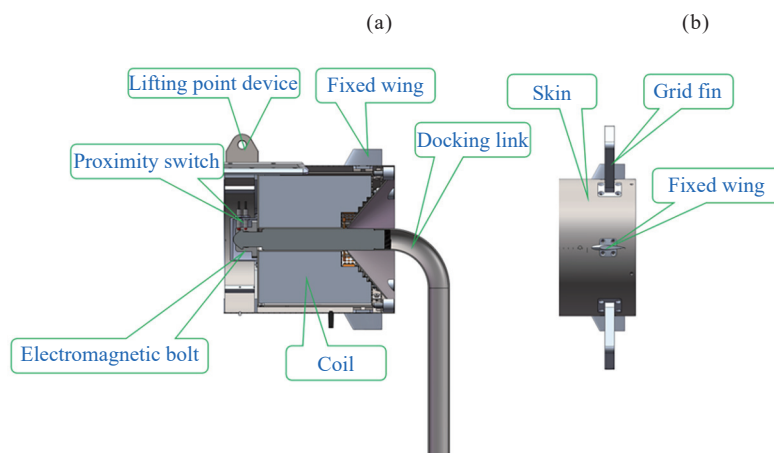


图 1 锥杆式对接电磁锁紧装置内部结构局部剖面 (a) 与去除 L 形锥杆后的局部整体 (b)

Fig. 1 Partial sectional view of the structure of electromagnetic locking device for probe docking (a) and a partial overall view after removing the L-shaped probe docking (b)

1.2 电磁锁紧装置工作原理

电磁锁紧装置中间为中孔, 当对接连杆进入锥面范围内时, 中控系统根据传感器信号判断对接连杆是否已经进入装置触发释放电磁力距离范围内, 若已进入, 中控系统发出指令, 瞬间产生强大的电磁力将对接连杆吸入装置中孔中. 在电磁力作用下, 对接连杆继续运动, 当对接连杆在中孔中运动到电磁插销位置时, 对接连杆球头将插销顶起, 对接连杆继续前进, 电磁插销在弹簧力作用下向下运动, 当插销运动到对接连杆颈部时, 将对接连杆锁紧. 当需要将对接连杆释放时, 电磁插销在电磁力的作用下向两侧运动, 对接连杆在回收载荷的运动牵引下离开锥套装置. 与对接锁紧过程中线圈产生的电磁力是瞬时电磁力不同, 对接连杆退出时线圈给电磁插销提供的电磁力是恒定的, 对接连杆锁紧过程如图 2 所示.

2 装置电磁力分析

电磁锁紧装置利用电磁力将对接连接杆吸入中间锁孔中, 电磁力的大小关乎对接连杆能否顺利进入装置. 为了尽可能获得较大的电磁力, 对影响电磁力大小的相关参数进行有限元建模优化. 考虑到电磁锁紧装置轴对称的特点, 为了减少计算量, 采用轴对称几何建模方式, 对锁紧装置进行几何简化, 仅考虑线圈、对接连杆、导磁材料, 不考虑装置其他部件, 使用 COMSOL 有限元软件进行电磁力优化分析, 几何模型如图 3 所示. 首先, 进行电磁场稳态分析, 获取不同线圈匝数、对接连杆直径等多元参数条件下对接连杆处于不同位置的稳态电磁力和电感、电阻等电学参

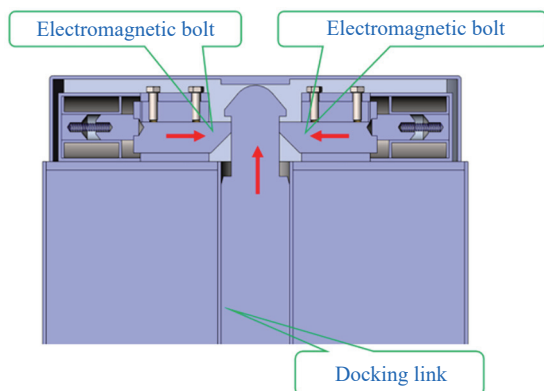


图 2 对接连杆锁紧过程

Fig. 2 Locking process of the probe docking

数. 其次, 以多元参数条件下的稳态解为输入, 利用运动方程和电路模型进行参数化建模瞬态仿真, 得出电磁对接机构的动态响应数据, 为最终装置的研制提供理论依据, 仿真分析流程如图 4 所示.

在电磁场稳态分析中, 电磁场分布控制方程可表示为

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= 0.\end{aligned}\quad (1)$$

考虑介质性质方程, 对于各向同性介质来说, 有

$$\begin{aligned}\mathbf{B} &= \mu\mu_0\mathbf{H}, \\ \mathbf{J} &= \sigma\mathbf{E}.\end{aligned}\quad (2)$$

其中, μ 和 μ_0 分别表示相对磁导率和真空中的磁导率, σ 表示电导率. 采用有限元法对控制方程求解时, 均质材料和周围空气介质材料的相对磁导率取为 1, 均匀材料和空气域的电导率取为常数.

根据物理场特点和对接机构几何特征, 对几何模型进行了细致的有限元网格剖分, 在边界处对网格进行加密处理.

图 5 给出了多元参数条件下的磁场分布截面, 其中 A_z 是线圈通入的安匝电流, z_{0p} 为对接连杆头部顶点坐标, 表征对接连杆的空间位置. 从图 5 中可以看出, 磁场分布与线圈安匝数密切相关, 线圈安匝数越大, 整体磁场越强.

图 6 给出了向线圈注入不同电流情形下, 电磁力

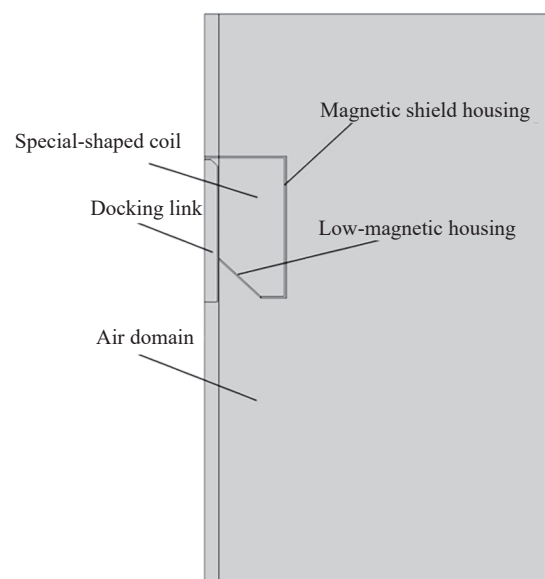


图 3 轴对称几何模型

Fig. 3 Axisymmetric geometric model

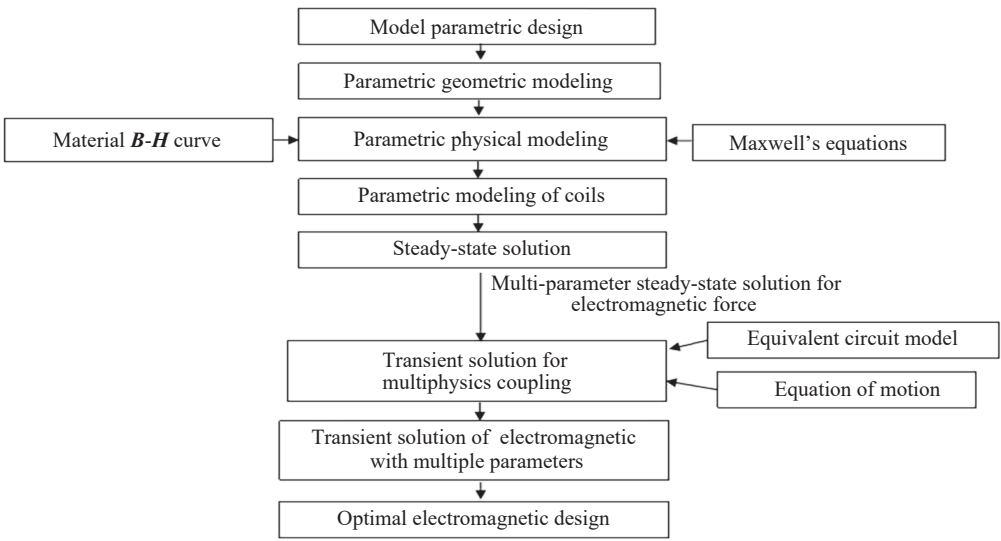


图 4 仿真分析流程

Fig. 4 Flowchart of the simulation

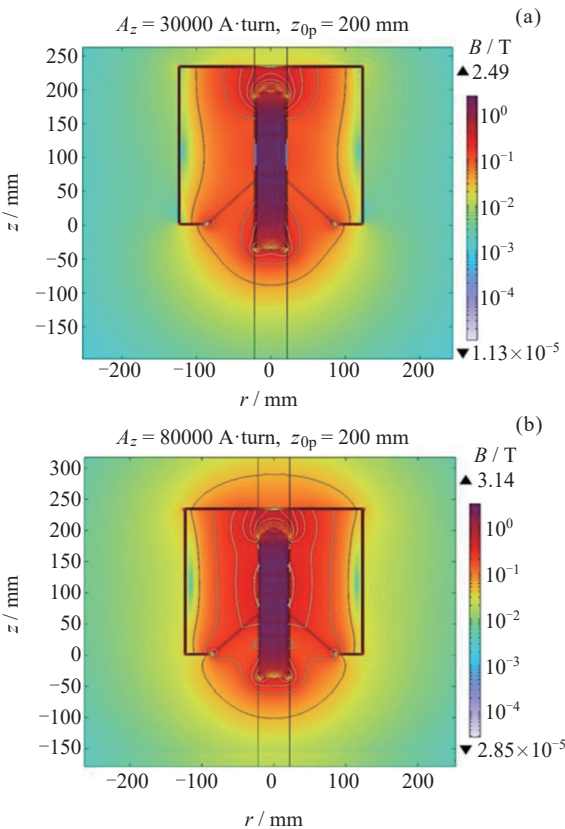


图 5 电磁锁紧装置截面磁场分布

Fig. 5 Cross-sectional magnetic field distribution of the electromagnetic locking device

随对接连杆处于线圈不同位置时的关系, 从图 6 可以看出, 在不同的线圈安匝数条件下, 电磁力与对接连

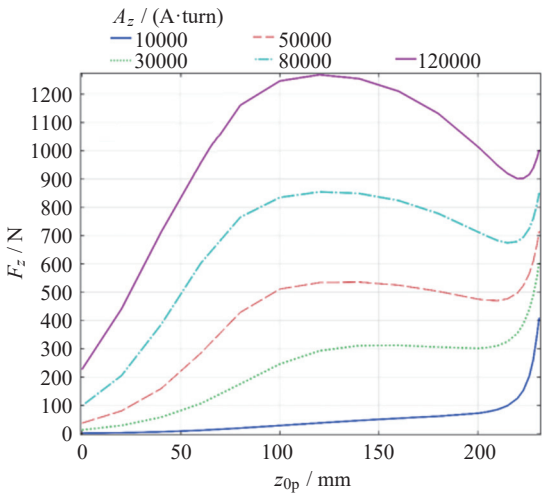


图 6 不同电流条件下电磁力随对接连杆位置变化

Fig. 6 Electromagnetic force variation with docking rod position under different current conditions

杆的位置关系特征不一样. 安匝数较小时, 对接连杆位于行程末端时电磁力最大. 安匝数较大时, 对接连杆处于线圈中间位置时电磁力最大. 图 7 给出了电磁力随对接连杆直径的变化, 从图 7 可以看出, 随着对接连杆直径增大, 其电磁力也逐渐增大, 因此在对接连杆的选择上, 在满足对接连杆强度要求和电磁锁紧装置中心孔径要求的前提下, 对接连杆直径越大, 电磁力越大.

线圈建模的主要约束是在限定外形尺寸的条件

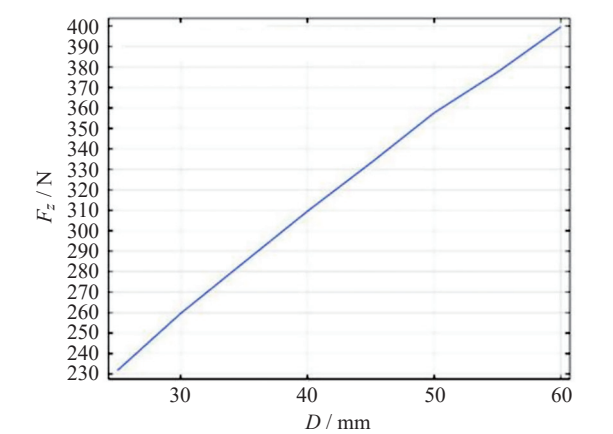


图 7 对接连杆所受电磁力与其直径的关系
Fig. 7 Relationship between electromagnetic force and the diameter of the docking rod

下, 根据不同的线规进行漆包线满布处理. 采用矩形截面的扁型漆包线进行线圈绕制, 因此线圈的根本参数是安匝数和漆包线的截面参数, 漆包线的长用 l_y 表示, 宽用 l_x 表示, 图 8 给出了不同线规情形下, 线圈电感与对接连杆所处位置的关系. 由图 9 可知, 漆包线截面积越大, 匝数越小, 电感越小.

受电磁锁紧装置几何尺寸、重量以及空中拖曳等条件限制, 电池选用 24 V 电源, 在电磁锁紧装置尺寸不变的情况下, 采用电池直接对线圈供电, 计算用不同线规漆包线绕制线圈的参数列于表 1. 在利用电源直接供电的情况下, 最大可实现安匝数为 17367.

为进一步提升线圈安匝数, 进而提升线圈产生的电磁力, 拟引入超级电容储能, 增加瞬时放电功率. 采用如图 9 所示等效电路, 图中二极管为线圈泄流通道, 用于保证线圈不产生电流突变引起的高压, 保障电路安全.

根据电磁力参数化建模稳态仿真得出的电磁力和线圈参数, 结合对接连杆的运动方程和电磁部件等效电路模型, 进行对接连杆瞬态仿真.

对接连杆运动至行程末端所需时间与储能电容大小的关系如图 10 所示, 可知连杆运动耗时随电容增加而减少, 随漆包线截面积增加总体减少. 连杆运动全程总耗时表征了电磁力产生的整体效果, 越短越好, 应作为设计电磁对接机构线圈和电容参数的主要依据.

图 10 给出了不同线规条件下对接连杆运动至末端时间与电容大小关系, 储能电容在 0.5 F 以上

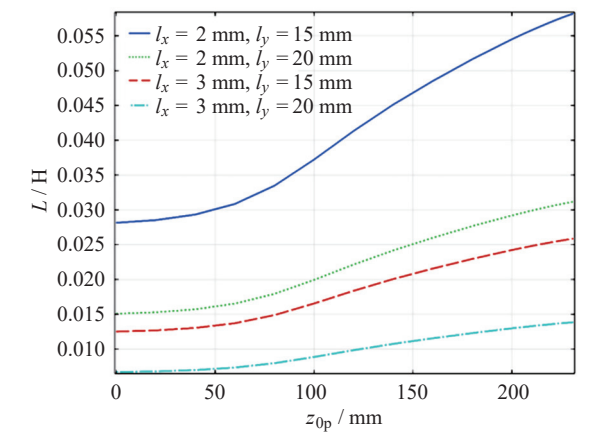


图 8 线圈电感与对接连杆所处位置的关系
Fig. 8 Relationship between coil inductance and the position of the docking rod

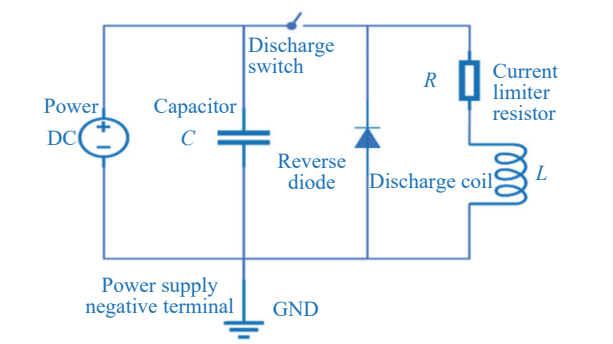


图 9 充放电等效电路
Fig. 9 Charge-discharge equivalent circuit diagram

表 1 电源直接对线圈供电情况下的相关技术参数
Table 1 Relevant technical parameters when the coil is directly powered by a power supply

l_x /mm	l_y /mm	R/Ω	I/A	U/V	匝数	安匝数
1	5	11.2	4.2	47.3	4111	17367
1	10	2.8	8.5	23.6	2040	17302
1	15	1.2	12.8	15.7	1348	17225
1	20	0.7	17.3	11.6	986	17011
2	15	0.3	25.8	7.7	660	17045
2	20	0.2	34.9	5.7	483	16837
3	20	0.1	52.3	3.8	322	16837

情况下, 对接连杆运动到末端用时在 3 种线规 (2 mm×15 mm, 2 mm×20 mm, 3 mm×20 mm) 情况下相差不大. 进一步分析运动到末端时的连杆电磁力, 图 11 给出了不同线规条件下对接连杆运动至末

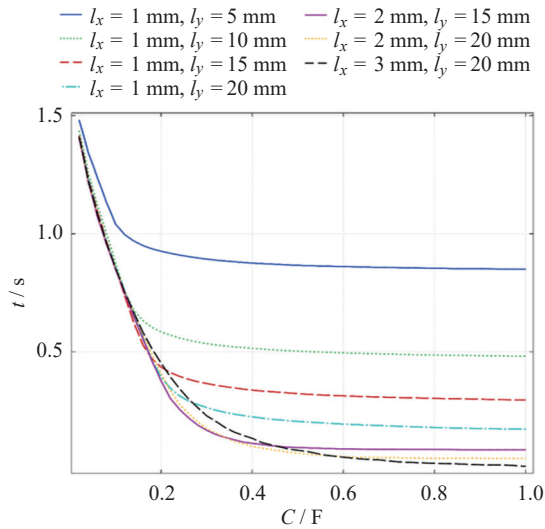


图 10 不同线规条件下对接连杆运动至末端时间与电容的关系

Fig. 10 Relationship between the cost time of the docking rod moving to the end and the capacitance size under the different wire gauge conditions

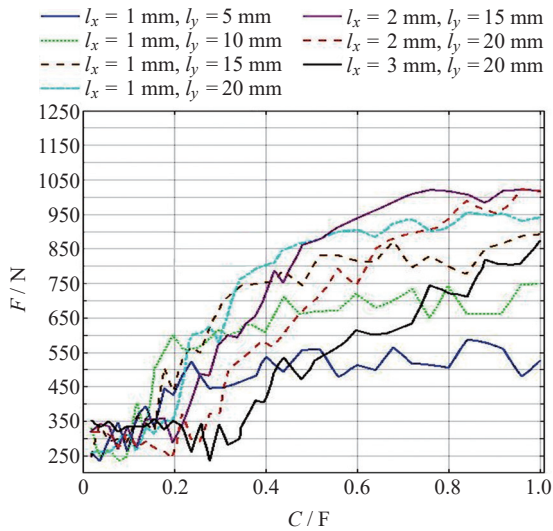


图 11 不同线规条件下对接连杆运动至末端时所受电磁力与电容关系

Fig. 11 Relationship between the electromagnetic force when the docking rod moves to the end and the capacitance size under the different wire gauge conditions

端时所受电磁力与电容关系, 在电容 0.5 F 以上时, 2 mm×15 mm 线规条件下电磁力最大, 因此最优线规为 2 mm×15 mm.

通过有限元分析得到以下结论, 可以指导对接装

置中线圈、电容、对接连杆的设计, 具体如下: 磁场分布与对接连杆所处位置和线圈安匝数密切相关, 连杆越深入, 磁场分布越集中, 线圈安匝数越大, 整体磁场越强, 匝数较大时, 对接连杆处于线圈中间位置时电磁力最大; 对接连杆所受电磁力随直径线性增加, 在设计时可根据系统约束选取允许的最大直径值; 为了提升线圈安匝数, 提升电磁力, 引入超级电容储能, 增加瞬时放电功率. 在特定漆包线尺寸的条件下, 连杆运行到末端用时最短, 同时装置内产生的电磁吸力最大.

3 结论

设计了一种空中锥杆式对接电磁锁紧装置, 通过以电磁力作为变元, 进行了电磁结构优化仿真分析. 电磁装置结构磁场分布与对接连杆所处位置和线圈安匝数密切相关, 同时为了提升线圈电磁力, 采用超级电容进行充放电. 在特定漆包线尺寸的条件下, 连杆运行到末端用时最短, 同时装置内产生的电磁吸力最大, 分析结果可作为实物设计的理论依据. 利用电磁力进行空中拖曳锥杆式对接装置设计, 为自主空中拖曳对接设计提供了新思路.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] SU Zikang, CHEN Haitong, XU Zhongnan. Research progress on modeling and control technology of aerial towing system[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(7): 31-40 (苏子康, 陈海通, 徐忠楠. 空中拖曳系统建模与控制技术研究进展[J]. *飞航导弹*, 2021(7): 31-40)
- [2] HUYNH H T, MONTALVO C J. Dynamics of a multi-purpose lightweight towed system[C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference. Denver, Colorado: AIAA, 2017
- [3] WANG Honglun, WANG Yanxiang, LIU Yiheng. Recovery trajectory optimization for UAV towed aerial recovery based on trajectory mapping[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(20): 1-17 (王宏伦, 王延祥, 刘一恒. 基于轨迹映射的无人机拖曳式空中回收轨迹优化[J]. *航空学报*, 2023, 44(20): 1-17)
- [4] HOCHSTETLER R D, BOSMA J, CHACHAD G, et al. Lighter-than-air (LTA) "Airstation"-unmanned aircraft system (UAS) carrier concept[C]//Proceedings of the 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Washington, DC: AIAA, 2016: 4223

- [5] YAN Lihao, YUAN Suozhong. Vision navigation technology for UAV aerial recovery[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2022, **41**(12): 56-60 (闫留浩, 袁锁中. 无人机空中回收视觉导航技术 [J]. 兵工自动化, 2022, **41**(12): 56-60)
- [6] ZHAO Hang, LIAO Peng, YAO Leijiang. Analysis of aerodynamic characteristics of drogues for air recycling based on computational fluid dynamics[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, **20**(4): 1684-1689 (赵航, 廖鹏, 姚磊江. 基于计算流体力学的空中回收锥套气动特性分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, **20**(4): 1684-1689)
- [7] CHEN Haitong, SU Zikang, LI Chuntao, *et al.* Trajectory design for straight-circulating flight transition of aerial recovery towing system[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, **50**(8): 2565-2574 (陈海通, 苏子康, 李春涛, 李雪兵, 孟冲, 张朋. 空基回收拖曳系统直线-盘旋转接段运动轨迹设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2024, **50**(8): 2565-2574)
- [8] LOU Yuhua, XIE Zhijian, YANG Zhen, *et al.* Research on space docking electromagnetic locking mechanism[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, **41**(12): 113-117,148 (楼雨涵, 解志坚, 杨臻, 等. 空间对接电磁锁紧机构研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, **41**(12): 113-117,148)
- [9] HUANG Yiyong, LI Qiang, CHEN Xiaoqian, *et al.* Modeling and simulating of independent on-orbit servicing spacecrafts' docking process[J]. *Computer Simulation*, 2011, **28**(10): 57-60,106 (黄奕勇, 李强, 陈小前, 等. 自主在轨服务航天器空间对接过程建模与仿真 [J]. 计算机仿真, 2011, **28**(10): 57-60,106)
- [10] WANG Haodong, YANG Zhen, WU Guoliang. Dynamic analysis of ball locking device of satellite docking mechanism based on ADAMS[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, **40**(10): 45-49 (王昊东, 杨臻, 武国梁. 基于 ADAMS 的卫星对接机构球锁装置动力学分析 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, **40**(10): 45-49)
- [11] YANG Zechuan, LUO Rubin, LIAO He, *et al.* Overview of Reusable Locking Technology in Space[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2019, **40**(4): 10-21 (杨泽川, 罗汝斌, 廖鹤, 等. 空间重复锁紧技术综述 [J]. 航天返回与遥感, 2019, **40**(4): 10-21)

作者简介



赵俊杰 男, 1990 年 8 月出生, 中国空气动力研究与发展中心低速所工程师, 主要从事流固耦合分析。
E-mail: zhaojj15@lzu.edu.cn



吴福章 (通信作者) 男, 1987 年 2 月出生, 中国空气动力研究与发展中心低速所高级工程师, 主要从事动力模拟研究。
E-mail: wufuzhang208@163.com