

海洋环境下舰载系留气球缆绳与球体的 动态仿真分析

刘勇¹, 舒欣², 乐鑫喜¹, 赖贞华²

(1. 中国船舶重工集团公司第七二二研究所 低频电磁通信技术实验室, 武汉 430000;

2. 中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门 448035)

摘要: **目的** 研究舰载系留气球在海洋环境下对系留缆绳以及球体姿态的影响。**方法** 采用 ADAMS 二次开发宏命令来建立离散化系留缆绳模型, 并将离散化系留缆绳几何模型在相邻微段圆柱间添加 Bushing 轴套力, 设置相关刚性系数和阻尼系数获得完整特效的缆绳模型。同时根据船用起重机的相关设计规范, 考虑船体横摇 5°和纵摇 2°等运动影响, 分析船体运动情况可知, 纵摇时系留缆绳下端系固点位置较之横摇波动幅度更大, 对缆绳的影响更大, 因此主要研究船体纵摇 2°情况下对于系留缆绳的影响, 并分析对比船体静止以及船体纵摇 2°情况下对于舰载系留气球系留缆绳以及球体姿态的影响。**结果** 获得了在船体静止状态以及纵摇激励影响下舰载系留气球系留缆绳张力变化曲线以及球体姿态变化曲线。船体纵摇 2°情况时, 系留缆绳在仿真开始阶段承受冲击载荷较大, 峰值达到 150 kN, 随后缆绳载荷基本在 25 kN 上下浮动。张力变化曲线整体呈现周期变化, 周期与船体纵摇周期一致, 为 10 s。球体横滚角和航向角变化与船体静止状态下仿真结果基本一致, 球体俯仰角变化幅度较大。**结论** 船体纵摇时会对系留缆绳带来较大的冲击载荷, 同时对球体的俯仰姿态产生影响。该仿真结果对舰载系留气球的可行性分析和适装性研究以及系留缆绳的选用具有较大的指导意义。

关键词: 舰载系留气球; 系留缆绳; 动态仿真; 球体姿态

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.12.006

中图分类号: V273

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)12-0036-04

Dynamic Simulation Analysis of Ship-borne Tethered Balloon Cable and Sphere in Marine Environment

LIU Yong¹, SHU Xin², YUE Xin-xi¹, LAI Zhen-hua²

(1. Laboratory of Low-frequency Electro-magnetic Communication Technology, No. 722 Research Institute of CSIC, Wuhan 430000, China; 2. China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: Objective To study the influences of shipboard tethered balloon on the mooring rope and sphere in marine environment. **Methods** In this paper, the ADAMS secondary development macro command was used to establish the discretization mooring cable model; and the bushing force was added between the adjacent micro-segment cylinders of the discretization tethered cable geometry model. Relevant stiffness coefficient and damping coefficient were set to obtain the cable model of the complete special effect. Meanwhile, considering the movement effects of the hull roll 5° and the pitch 2°, the hull movement was analyzed according to the relevant design specifications of the marine crane. It can be seen that the position of the lower end

of the mooring cable at the lower end of the tether was more fluctuating than the roll. The larger the amplitude, the greater the impact on the cable, so impact of the hull 2° on the tethered cable was mainly analyzed and the influence of the hull static and the hull pitch 2° on the tethered cable and the attitude of the ball on the ship was analyzed and compared. **Results** The tension curve of the tethered balloon tethered cable and the attitude change curve of the ball under the influence of the hull static state and the pitching excitation were obtained. The results showed that the tethered cable born a large impact load at the beginning of the simulation when the hull was tilted by 2° . When the peak value reached 150,000N, and the cable load was basically floating at 25000N. The tension change curve showed a periodic change as a whole, and the period was consistent with the hull pitch period of 10s. The ball roll angle and heading angle change were basically consistent with the hull static simulation results, and the ball pitch angle changed greatly. **Conclusion** When the hull is tilted, it will bring a large impact load to the tethered cable and affect the pitch attitude of the ball. The simulation results have great guiding significance on feasibility analysis and suitability of the carrier-based captive balloon and the selection of the tethered cable.

KEY WORDS: ship-borne tethered balloon; mooring rope; dynamic simulation; sphere attitude

1 试验

舰载系留气球是一种可装载在船舶上的系留气球, 适合搭载各种通讯、干扰、侦察、探测等电子设备。其具有留空时间长、机动性好、部署使用方便、战场生存力强、研制和使用费用低廉、可长期连续不间断地执行作战任务等一系列独特的优点, 是一种经济、高效、方便、可靠的舰载信息化作战平台^[1], 在提升我国海军综合作战能力等方面具有重要应用价值。

舰载系留气球使用环境较之陆基系留气球更加严酷。由于海上波浪的影响, 船体不可避免存在横摇、纵摇, 必然会引起系留缆绳下端系固点锚泊设备的振动和倾斜, 导致系留缆绳动载荷波动, 并影响系留气球的空中稳定性和使用性能^[2]。

由于国内还未开展舰载系留气球研制与关键技术攻关, 没有投入使用或正进行试验验证的产品, 因此, 文中将针对于舰载系留气球系留缆绳的动态特性进行研究, 分析研究船体纵摇对系留缆绳产生的影响, 以确保舰载系留气球能安全工作。由于系统结构复杂, 在产品的开发试制过程中, 借助于计算机辅助设计和相关动态仿真软件对系统的动力学性能进行分析, 文中将基于 Adams 仿真软件对系留气球系留缆绳的动态特性进行研究。

2 舰载系留气球虚拟样机模型的建立

2.1 系留缆绳模型的建立

系留缆绳是一种基于凯夫拉纤维的光电复合缆绳, 具有强度高、线密度低、良好的弯曲特性、使用可靠和耐冲击等特性。为了提高仿真的真实性和计算效率, 综合分析了有关钢丝绳的建模方法^[3], 采用 ADAMS 二次开发宏命令来建立系留缆绳模型。由于系留缆绳通常长达 2~3 km, 为了减小计算工作量, 在保证模型的可靠性基础上, 取 300 段离散化缆绳进

行模拟, 每段缆绳长度为 100 mm。

利用 ADAMS 宏命令将生成的 300 段离散化系留缆绳几何模型在相邻微段圆柱间添加 Bushing 轴套力才可得到具有完整特性的缆绳模型^[4]。轴套力中的主要参数(刚性系数和阻尼系数)按照某型号系留缆绳实际情况进行设置, 刚度 K 轴套取值为 5.9346×10^5 N/m, 轴套力阻尼系数目前尚无计算公式, 按经验值选取阻尼系数为 1 N·s/mm。生成好的系留缆绳局部模型如图 1 所示。

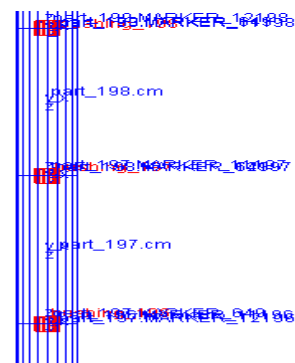


图 1 系留缆绳局部模型

2.2 舰载系留气球模型的建立

通过 Catia 软件建立舰载系留气球的三维模型, 然后通过软件间接口导入至 Adams 软件中。为了提高模型的精确性, 按照各组成部件的实际运动关系和受力关系, 通过软件中的约束副和力单元库进行相关约束副和作用力的添加, 使得虚拟样机模型与实物运动特性保持一致^[5]。建模过程中模型简化及相关约束设置如下所述。

- 1) 球体、锚泊平台、船体结构简化为刚体。
- 2) 系留缆绳下端与锚泊平台间添加球铰约束。
- 3) 锚泊平台与船体间添加旋转约束。
- 4) 不考虑风载荷影响。
- 5) 系留索具设置为只承受拉力载荷的弹簧单元,

索具弹性模量 $E=5500\text{ MPa}$ ，索具直径为 14 mm 。计算过程采用各自的整体等效刚度数据，同时系留索具与系留缆绳以及球体间添加固定副。

6) 按照实物的相关特性参数对模型进行重心、浮心、质量、转动惯量等参数的设置，并在相应的载荷作用点施加作用力。

定义好的舰载系留气球的虚拟样机模型如图 2 所示。

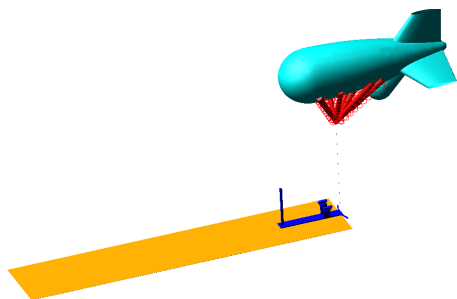


图 2 舰载系留气球虚拟样机模型

3 舰载系留气球缆绳动态仿真分析

3.1 船体静止状态下系统仿真

将船体与海平面进行固定副连接即可模拟船体静止状态，船体静止状态系留缆绳张力变化曲线与球体姿态变化曲线分别如图 3 和图 4 所示。在仿真开始阶段，系留缆绳下端载荷处于波动状态，整体在 23 kN 附近上下波动。结合中国特种飞行器研究所某型系留气球实际测量数据，分析结果与实际测量值误差为 2% 左右，验证了模型建立的正确性。球体的横滚角、航向角变化幅度很小，基本处于 0° 上下浮动，俯仰角处于 1.2° 上下浮动，球体姿态稳定，仿真数据与实际运动状态相符。

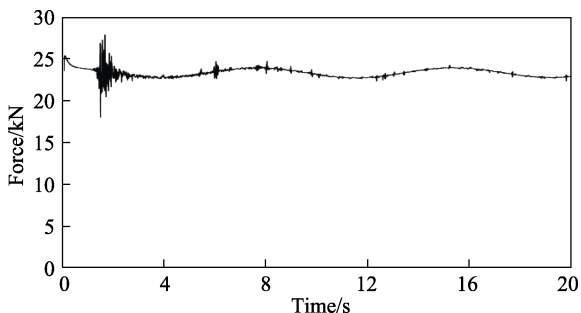


图 3 系留缆绳上端张力变化曲线

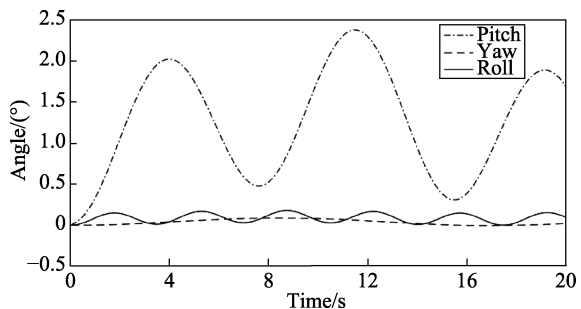


图 4 球体姿态变化曲线

3.2 船体纵摇下系统仿真结果

船舶由于受到海浪作用以及自身运动的影响，船舶自身会产生横摇、纵摇、艏摇、升沉、横荡、纵荡六个自由度的运动^[6]，使得舰载系留气球在使用过程中会受到船体运动的影响。参考 GB/T 12932《船用臂架起重机》的设计规范，主要考虑船体横摇 5° 和纵摇 2° 等运动的影响。

分析系留气球、系留缆绳、锚泊平台及船体的连接形式可知，船体横摇是指以船宽方向的轴为中心，周期性地左右摇摆运动，可认为系留缆绳下端系固点竖直方向位置不变。船体纵摇是以船长方向为中心线周期性的上下摇摆运动，使得系留缆绳下端系固点位置上下周期性变化。纵摇时系留缆绳下端系固点位置较之横摇波动幅度更大，对缆绳的冲击更大，因此文中仅分析船体纵摇 2° 下系统的影响，船体纵摇状态如图 5 所示，

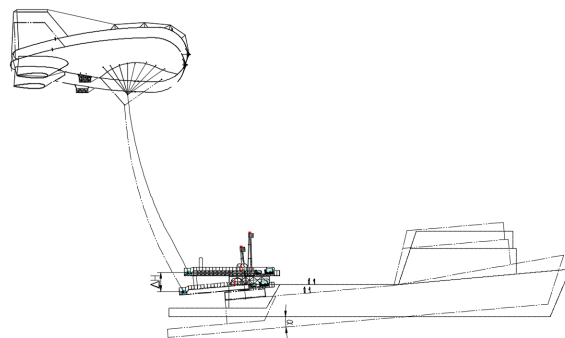


图 5 船体纵摇状态

船舶自由纵摇周期估算公式为：

$$T_p = C_p \sqrt{L} \tag{1}$$

式中： T_p 为船舶纵摇周期，s； L 为船长，m； C_p 为纵摇周期系数，货船取 $0.54\sim 0.72$ ，这里取 0.7 。

按极端情况考虑，锚泊平台布置在船体尾部。以某船体（长 100 m 、宽 30 m ）为例，计算得出船舶纵摇周期为 10 s 。将船体设置以一定的函数驱动，即可模拟船体纵摇 2° 的情况，船舶运动模拟平台的纵摇仿真曲线如图 6 所示。船体纵摇 2° 情况下，系留缆绳张力变化曲线以及系留气球姿态变化曲线如图 7 和图 8 所示。

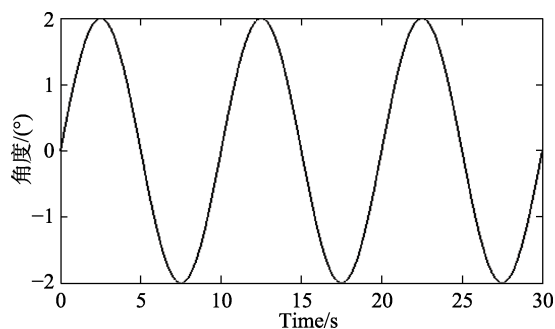


图 6 纵摇 2° 动平台运动曲线

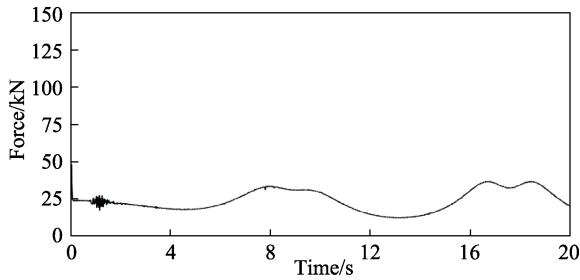


图 7 船体纵摇下系留缆绳上端张力变化曲线

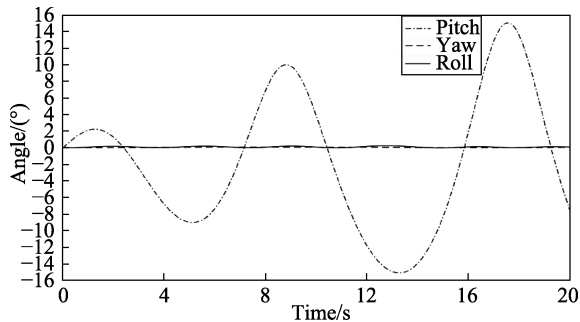


图 8 船体纵摇下球体姿态变化曲线

由图 7 可知,在纵摇 2° 的情况下,系留缆绳在仿真开始阶段承受冲击载荷较大,峰值达到 150 kN,随后缆绳载荷基本在 25 kN 上下浮动。张力变化曲线整体呈现周期变化,周期与船体纵摇周期一致,为 10 s。

由图 8 可知,在纵摇 2° 的情况下,球体横滚角和航向角变化与船体静止状态下的仿真结果基本一致,整体变化幅度较小。球体俯仰角变化曲线与船体静止时的结果相比,变化幅度较大。仿真前期,俯仰角变化较小,随着时间的推移,变化幅度增大。说明船体纵摇对于系留气球状态存在一定的影响,在设计时需采取相关措施,以提高系统的可靠性和耐受能力。该结果对于缆绳承载能力的选用以及舰载系留气球的球体稳定性设计具有一定的指导意义。

4 结语

文中采用 ADAMS 二次开发宏命令来建立了系留缆绳模型以及舰载系留气球虚拟样机模型,并进行动态仿真分析。综合考虑了船体横摇、纵摇带来的影响,获得了在船体纵摇激励影响下舰载系留气球系留缆绳张力变化曲线以及球体姿态变化曲线。其分析结果表明,船体纵摇时会对系留缆绳带来较大的冲击载荷,同时对球体的俯仰姿态产生影响。该仿真结果对舰载系留气球的可行性分析和适装性研究具有较大的指导意义和促进作用。

参考文献:

- [1] GJB 1060.1—1991, 舰船环境条件要求 机械环境[S].
- [2] 程士军,周光明,雷良超. 某浮空器收放牵引绞盘的设计与研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(11): 17-20.
- [3] 黄祥声,曾钦达. 基于 ADAMS 的门座起重机钢丝绳动力学仿真[J]. 起重运输机械, 2012(7): 109-112.
- [4] 贾尚雨,谢小鹏,梁广焱. 起重机钢丝绳的动力学建模与仿真[J]. 煤矿机械, 2010, 31(04): 58-61.
- [5] 郭卫东. 虚拟样机技术与 Adams 应用实例教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [6] 凌财进. 船舶在海浪下的运动模型分析与舰船运动模拟平台的设计[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(18): 31-33.
- [7] 赵攀峰,王永林,薛松海. 系留气球系统三拉索收放状态建模与仿真[J]. 航空工程进展, 2011, 2(3): 255-259.
- [8] 何强. 系留气球系留系统的设计[J]. 电子世界, 2015(19): 34-35.
- [9] 符文贞,江博水,张金奎. 基于 LMS Virtual. Lab 的系留气球仿真与优化[J]. 航空计算技术, 2016, 46(4): 60-66.
- [10] 刘秋军. 矿井提升钢丝绳动力学仿真分析[J]. 煤矿机械, 2014, 35(10): 73-76.