

Aerodynamic Analysis of a Variable Damping Stabilized Parachute

Kuan Zhang, Xiaoning Fu

School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi
Email: 751727589@qq.com

Received: Jan. 26th, 2019; accepted: Feb. 10th, 2019; published: Feb. 18th, 2019

Abstract

The hose-paradrogue is prone to swing motion due to the interference of airflow during air refueling, which makes the docking process more difficult. The flexible hose-paradrogue system in flexible aerial refueling is simulated and analyzed by Computational Fluid Dynamics simulation technology, which provides reference for the design of flexible hose-cone sleeve controller and improves the controllability of flexible hose-cone sleeve system.

Keywords

Variable Damping Stabilization Umbrella, Computational Fluid Dynamics Simulation, Controllability

一种变阻尼稳定伞的气动分析

张 宽, 付小宁

西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安
Email: 751727589@qq.com

收稿日期: 2019年1月26日; 录用日期: 2019年2月10日; 发布日期: 2019年2月18日

摘 要

软管-锥套在空中加油过程中容易受到各位干扰气流的影响而产生飘摆运动, 进而使受油机对接过程的难度增加。针对软管式空中加油中软管-锥套系统采用CFD模拟技术对变阻尼稳定伞进行仿真分析, 对软管-锥套的控制器设计提供参考依据, 从而能提高软管-锥套系统的可控性。

关键词

变阻尼稳定伞, CFD模拟, 可控性

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

软管式空中加油具有成本低且方式简单的特点, 是目前空中加油领域应用最为广泛的加油方式。但是软管式空中加油系统的缺点也十分明显, 加油机吊舱拖拽着软管-锥套飞行时受到大气紊流的干扰会造成飘摆运动, 这对受油机的准确对接产生影响, 严重的情况可能会造成机毁人亡, 因此对软管-锥套的飘摆运动进行建模与控制对保证空中加油系统安全性有着十分重要的意义。

在软管-锥套系统中, 锥套提供的阻力通常占据总阻力的 75%以上[1], 改变锥套的伞面面积可以有效改变锥套提供的阻力大小, 进而控制锥套下沉或者上升达到锥套位置可控的目的。

目前, 国内外学者有关软管-锥套的建模和控制的研究已取得显著的成果, 北京航空航天大学的王海涛等人[2]提出了一种变长度多级串联理想单摆系软管运动模型, 针对对接过程的软管飘摆运动现象设计了积分滑膜反推控制器。南京航空航天大学的张进等人[3]建立了加油软管-锥套数学模型, 并设计了PID 控制器用于抑制系统受到大气紊流影响产生的飘摆运动, 从而降低软管摆动的幅度。

国外 williamson [4]研究了一种通过改变稳定伞阻尼系数对锥套产生主动控制的方法, 并通过风洞实验确定了模型参数, 设计了 LQR 控制器。

国内外现有关于软管-锥套系统的研究文献大多采用经验值进行系统建模, 而没有对锥套气动特性的影响因素如伞撑角、伞撑厚度等进行深入探讨, 并进行仿真分析。本文以研究软管-锥套系统动态特性为基础, 主要采用 CFD 模拟技术对一类变阻尼稳定伞进行气动分析, 然后通过建立稳定伞的模型并将模型在模拟风场的环境下进行仿真分析, 最后确定伞撑角与作用在稳定伞上的气动力大小的关系。

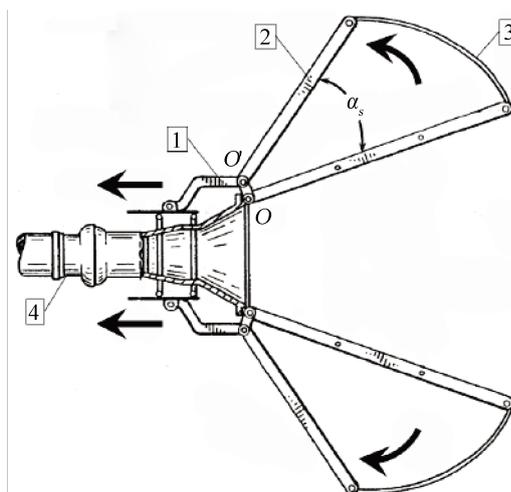


Figure 1. Structural sketch of a variable damping stabilization umbrella

图 1. 某型变阻尼稳定伞结构示意图

2. 变阻尼稳定伞设计及伞面形状的确

本文所参考变阻尼稳定伞设计为文献[5]中的设计, 如图 1 所示, 某型稳定伞变阻尼结构如图所示, 伞撑的开合程度用伞撑角 α_s 表示, 即为图中内外两个撑杆之间的夹角, 2 为稳定伞的可活动伞骨, 装置 1 向左活动时带动 OO' 绕定点 O 绕动, 2 的一端与 O' 相连带动伞骨 2 张开, 即伞撑角 α_s 变大, 伞面的阻尼增加, 稳定伞下沉量增加。同理, 装置 1 向右移动时, 伞骨 2 收缩, 伞撑角 α_s 变小, 伞面的阻尼减少, 稳定伞下沉量减少。这就是变阻尼稳定伞的设计思想, 通过改变伞撑角 α_s 的大小控制稳定伞的阻尼大小, 从而达到控制稳定伞位置的目的。

稳定伞面采用透气的尼龙织物材料, 在没有风场的情况下, 伞面没有确定的形状, 在处于风场的情况下, 伞面的形状由来流速度和伞撑角等因素有关, 然而伞面形状与这些影响因素没有确定的关系形式。但是, 可以确定的是不同的伞面形状有着不同的伞背面的尾流形态和流动分离点, 因此, 不同的伞面形状对稳定伞的气动模型有不同的影响。

3. CFD 数值模拟

3.1. 稳定伞模型

稳定伞的伞面材料一般采用柔软可透气的尼龙织物, 在无风的状态下, 伞面没有固定的形状, 在风场中的稳定伞伞面形状与来流速度和伞撑角有关。因此为了建立稳定伞模型, 假设伞面材料无弹性, 在风场的作用下, 伞面不可延伸。稳定伞模型采用 SolidWorks 软件搭建, 其模型尺寸与实际尺寸相当见图 2。伞撑采用 36 个等圆周分布, 伞撑厚度为 8 mm, 伞面厚度为 6 mm。

把 SolidWorks 搭建的模型导入 fluent 进行网格划分, 将稳定伞处于的外流场建立为圆柱体计算域: $D = 10 \text{ m}$, $L = 20 \text{ m}$ (见图 3)。将三种型号 of 模型 (见图 4) 分别放入流场中模拟, 模拟来流为定常、可压缩、3-D 粘性假设的理想气体, 湍流模型选取常用的 S-A 模型, 来流速度从 200 km/h 增加到 600 km/h, 步长为 100 km/h。数值迭代直至稳定, 监测阻力值也趋于稳定, 收敛精度达 10^{-4} 。

3.2. 仿真结果分析

理论上分析伞面厚度以及透气性会影响模拟的结果, 仿真的目的是为了模拟真实的情况伞阻力大小, 通过对比仿真结果和真实的实验数据即可验证仿真结果是否可信, 本文给出某型锥套的仿真模型及仿真数据, 与飞行试验数据进行对比, 该试验数据为 NASA 德莱顿飞行试验中心[6]。

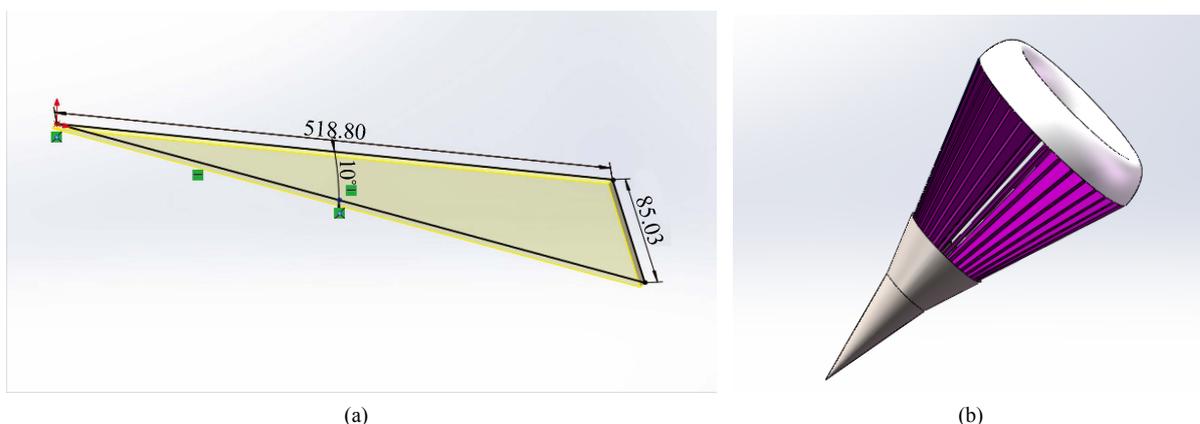


Figure 2. (a) 10-degree umbrella support size; (b) SolidWorks model of paratrogue
图 2. (a) 10 度伞撑尺寸; (b) 锥套 SolidWorks 模型

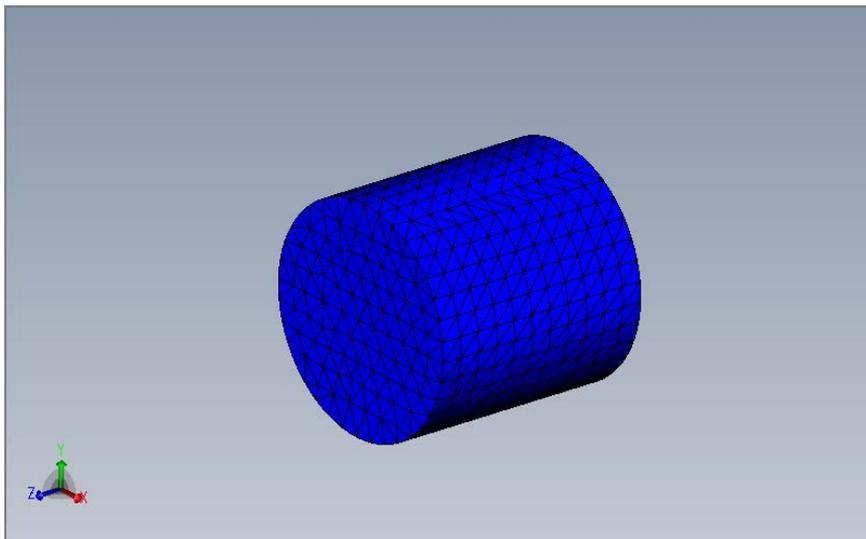


Figure 3. The computational domain of steady parachute flow field
图 3. 稳定伞流场计算域

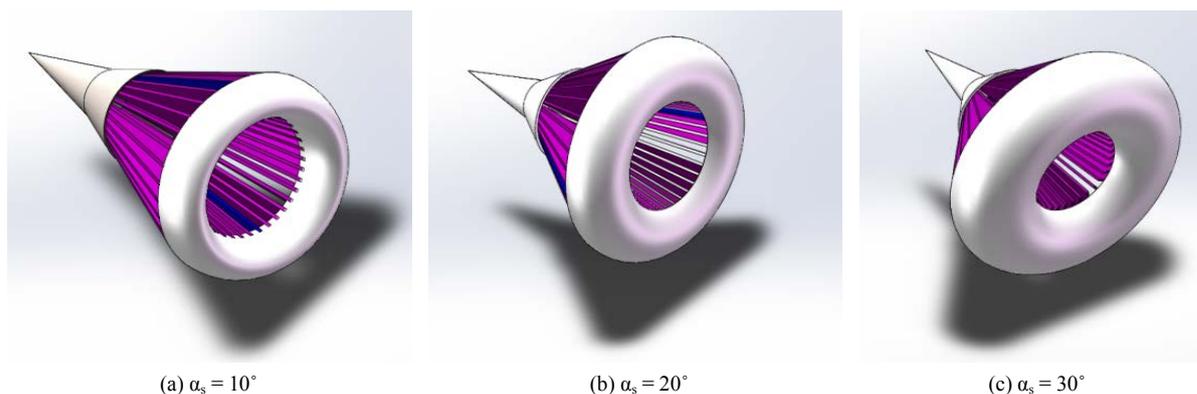


Figure 4. The shape of three conical sleeve stabilized parachutes
图 4. 三种锥套稳定伞外形

德莱顿飞行试验中心的飞行试验在在 7500 ft 和 2100 ft~2900 ft 的高空进行, 本文的 CFD 模拟仿真采用标准大气模型, 高度定为 1300 ft, 在大气对流层有公式可以描述标准大气模型的温度、压力和密度之间的关系:

$$T = T_a - 0.0065H \tag{1}$$

$$\frac{p}{P_a} = \left(\frac{T}{T_a} \right)^{5.25588} \tag{2}$$

$$\frac{\rho}{\rho_a} = \left(\frac{T}{T_a} \right)^{4.25588} \tag{3}$$

式中, T_a 、 P_a 、 ρ_a 取海面标准值, 温度为 15°C 对应 $T_a = 288.15$ K, $P_a = 101,325$ Pa, $\rho_a = 1.225$ kg/m³。

图 5 为飞行试验结果和仿真数据对比, 对比图中数据可以得出 CFD 仿真结果(红色数据点)和试验结果拟合直线相近, 证明仿真结果是可信的。

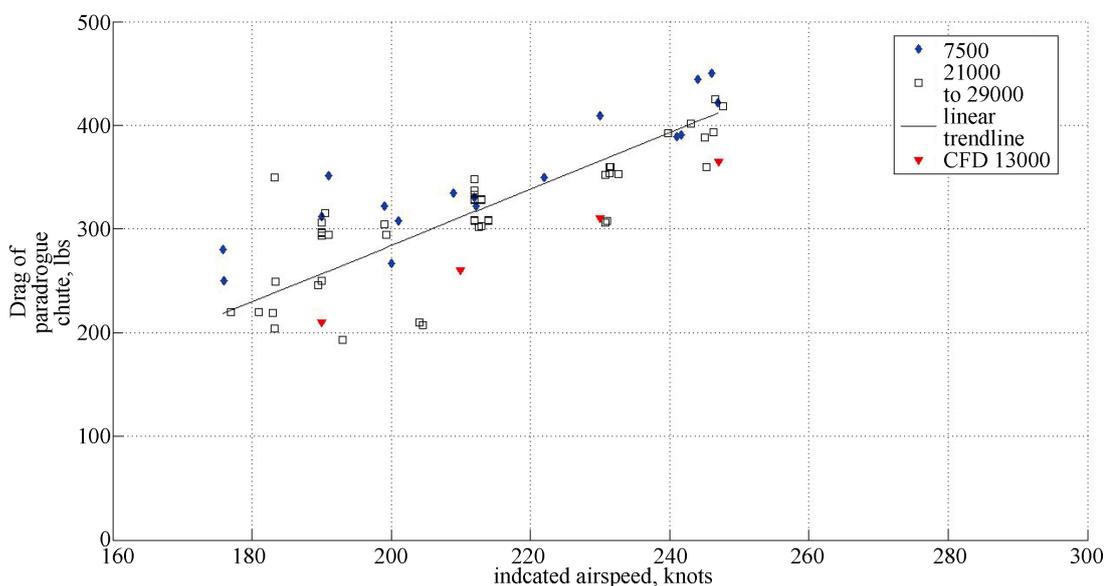


Figure 5. Comparison of CFD simulation results with flight test data

图 5. CFD 模拟结果与飞行试验数据对比

4. 模拟结果与分析

分析稳定伞背风截面流线图(见图 6)可知, 稳定伞的伞撑角为 10° 时几乎没有背风面分离气泡, 而随着伞撑角的增大, 背风面分离气泡增大, 这意味着稳定伞阻力也随之增加, 若 C_d 记为稳定伞的阻力系数, 则稳定阻力 D 可表示为[7] [8]:

$$D = \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 S_{\text{ref}} C_d \quad (4)$$

其中, ρ_∞ 、 V_∞ 、 S_{ref} 分别表示来流密度、速度及参考面积。 C_d 与 V_∞ 、 α_s 的关系可表示为:

$$C_d = f(V_\infty, \alpha_s) \quad (5)$$

图 7 为 C_d 与 V_∞ 的关系曲线, 分析可知, C_d 在一定来流速度范围内, C_d 受 V_∞ 影响较小, 因此上式近似变式为:

$$C_d \approx f(\alpha_s) \quad (6)$$

伞撑角 α_s 的改变, 实际是改变伞面阻力面积, 阻力面积与伞撑角 α_s 的平方有正比关系, 即有 C_d 与 α_s 的关系式如下所示:

$$C_d \approx A\alpha_s^2 + B\alpha_s + C \quad (7)$$

其中, 系数 A 、 B 、 C 为待定系数, α_s 取 10° 、 20° 、 30° , C_d 取 0.65、0.71、0.83 [9] 代入可得:

$$C_d \approx 0.0003\alpha_s^2 - 0.003\alpha_s + 0.65 \quad (8)$$

经过以上分析可以得出稳定伞的阻力系数随着伞撑角的增大而增大, 也即是稳定伞的阻力随伞撑角的增大而增加。根据软管-锥套系统模型[10]可知, 锥套的位置随着气动载荷的变化, 锥套随之上浮或下沉, 参考图 8 可以通过改变伞撑角的大小, 进而改变稳定伞的阻力大小, 从而有助于软管-锥套系统的控制部分优化, 应对其飘摆运动。

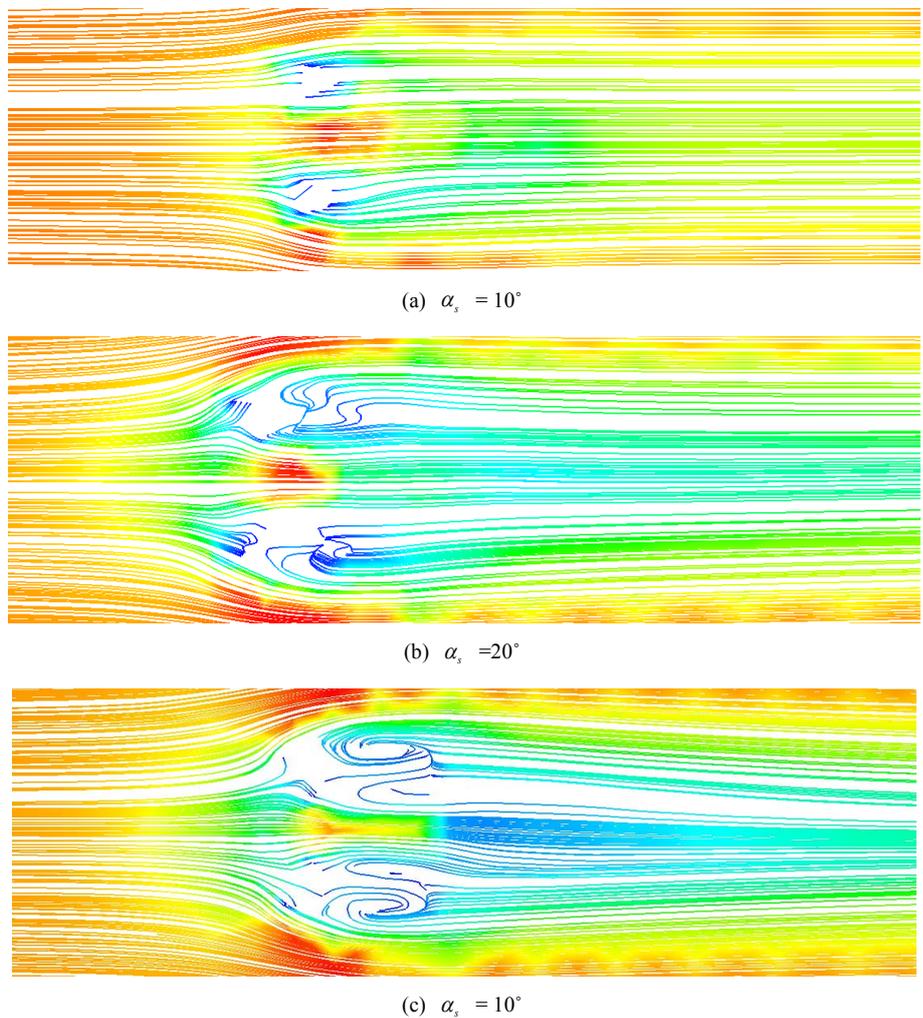


Figure 6. Ma = 0.5, streamline diagram of leeward section of stable umbrella
图 6. Ma = 0.5, 稳定伞背风截面流线图

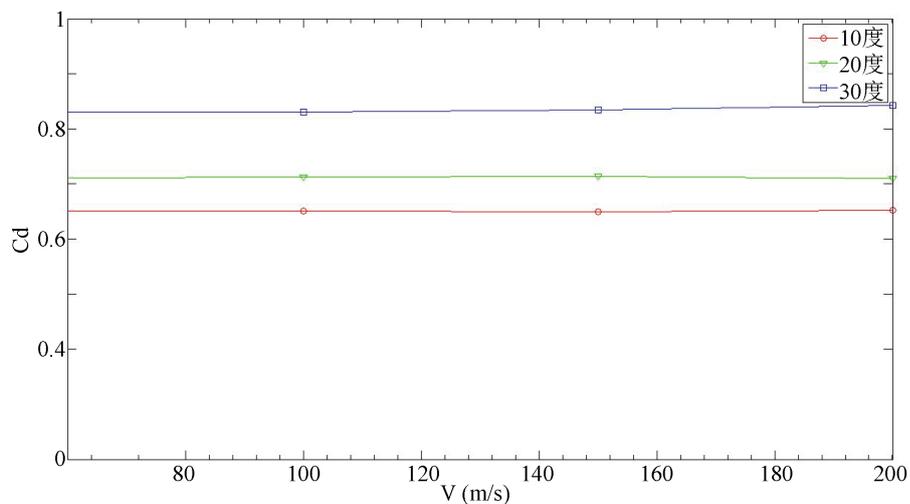


Figure 7. Resistance coefficient-velocity curve of stable parachute
图 7. 稳定伞阻力系数-速度关系曲线

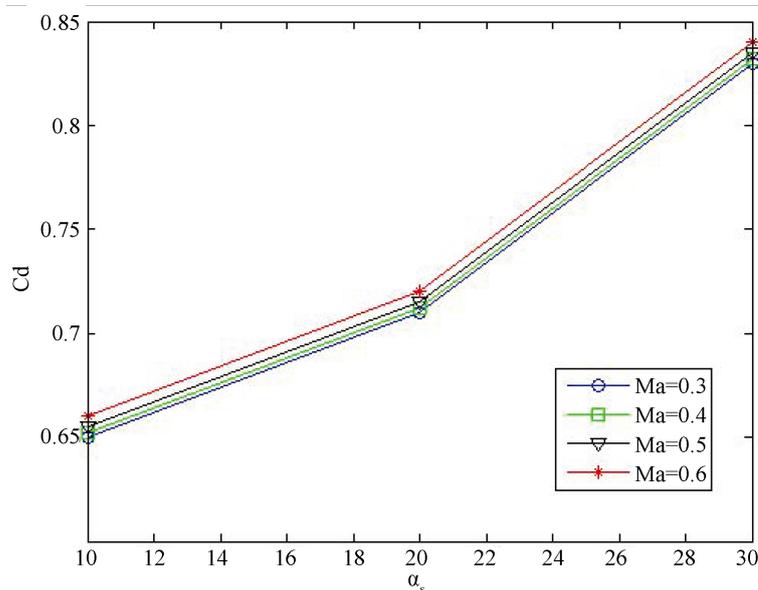


Figure 8. The relationship curve between drag coefficient and brace angle of stabilized parachute

图 8. 稳定伞阻力系数-伞撑角关系曲线

5. 总结

本文建立了三种不同伞撑角的稳定伞简化模型, 并且采用 CFD 模拟技术分别把三种模型加入定常、定压的稳定流场下进行气动模拟, 然后对模拟结果进行分析得出, 稳定伞背风面分离气泡的大小随着伞撑角的改变而改变, 进而改变稳定伞的阻力大小, 最后得出稳定伞阻力系数与伞撑角的近似解析关系式。在软管-锥套数学模型中, 锥套的下沉量由软管-锥套的气动载荷决定, 其中锥套所受阻力占主要影响。因此, 锥套的阻力大小的改变可以调整锥套的位置, 上述关系式适用于软管-锥套系统抑制飘摆运动。

参考文献

- [1] Ro, K. and Basaran, E. (2006) Aerodynamic Investigations of Paratrogue Assembly in Aerial Refueling System. *AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 68-70.
- [2] 王海涛, 董新民, 窦和锋, 等. 软管锥套式空中加油系统建模与特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(1): 92-98.
- [3] 张进, 袁锁中, 龚全铨. 空中加油软管-锥套动态建模及其飘摆运动抑制[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(8): 134-139.
- [4] Williamson, W.R., Reed, E., Glenn, G.J., et al. (2010) Controllable Drogue for Automated Aerial Refueling. *Journal of Aircraft*, 47, 515-527. <https://doi.org/10.2514/1.44758>
- [5] Kirkland, W.L. (2010) Variable Speed Drogue US2011/0108669.
- [6] Ro, K., Ahmad, H. and Kamman, J. (2009) Dynamic Modeling and Simulation of Hose-Paratrogue Assembly for Mid-Air Operations. *AIAA Journal*, Seattle, Washington, 6-9 April 2009, 1-14.
- [7] 吴成林. 空中加油软管-锥套系统动态特性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [8] 吴玲, 孙永荣, 黄斌, 等. 不确定环境下的软管-锥套建模及控制研究[J]. 计算机工程与应用, 2017(18): 250-256.
- [9] Ro, K. and Kamman, J.W. (2010) Modeling and Simulation of Hose-Paratrogue Aerial Refueling Systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 33, 53-63. <https://doi.org/10.2514/1.45482>
- [10] 张进, 袁锁中, 龚全铨, 等. 空中加油软管-锥套空中飘摆运动建模与控制[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(2): 388-395.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2324-8696，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：mos@hanspub.org