

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.06.019

软管-锥套式空中加油动态建模与性能分析

吴玲^{1,2} 孙永荣¹ 黄斌¹ 朱云峰¹ 刘建业¹

(1. 南京航空航天大学导航研究中心, 南京, 210016;

2. 南京航空航天大学金城学院自动化系, 南京, 211156)

摘要:提出了一种基于凯恩方程的自主空中加油软管-锥套动态模型及性能分析方法。该方法将软管视为由有限段以铰链形式连接的刚性杆组成, 锥套为软管末端的一个质点。本文定义了描述系统状态的广义坐标及广义速率, 导出了软管段位置多级递推公式和系统动态方程, 估算了软管在加油机尾流、定常流和大气扰动下的气动载荷。通过数值仿真分析了平稳大气中锥套在加油机不同飞行条件下的稳态阻力和软管拖拽轨迹, 验证了模型的正确性及系统稳定性。最后研究了大气扰动对锥套运动的影响及不同软管段的受扰运动。

关键词:自主空中加油; 软管-锥套式; 凯恩方程; 多刚体动力学

中图分类号: V212.11

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2016)06-0901-08

Dynamic Modeling and Performance Analysis of Hose-Drogue Aerial Refueling System

Wu Ling^{1,2}, Sun Yongrong¹, Huang Bin¹, Zhu Yunfeng¹, Liu Jianye¹

(1. Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Department of Automation, Nanhang Jincheng College, Nanjing, 211156, China)

Abstract: A dynamic model and the performance analysis method of hose-drogue aerial refueling system are proposed based on Kane equation. In the method, the hose is modeled by the finite segment of rigid bar connected with hinge, and the drogue is regarded as a mass point at the end of the hose. Then both system generalized coordinates and generalized rates are defined, and a set of multi-level recursive formulas of hose-bar position and dynamic equations are derived. Furthermore, external aerodynamic loads that account for the effects of tanker wake, steady wind and atmospheric turbulence of each hose-bar are estimated. Numerical simulations show good correctness and stability of the dynamic model by steady-state resistance and equilibrium position of hose-drogue under different flight conditions in steady wind. Finally, the displacements of the drogue and the motion of various hose-bar resulting from atmospheric turbulence are investigated.

Key words: autonomous aerial refueling; hose-drogue; Kane equation; rigid multi-body dynamics

基金项目:国家自然科学基金(61533008)资助项目;中央高校基本科研业务费专项(NZ2016104)资助项目;江苏省普通高校研究生科研创新计划(KYLX15_0276)资助项目。

收稿日期:2016-06-04; **修订日期:**2016-10-10

通信作者:孙永荣,男,教授,博士生导师, E-mail: sunyr@nuaa.edu.cn。

引用格式:吴玲,孙永荣,黄斌,等. 软管-锥套式空中加油动态建模与性能分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(6): 901-908. Wu Ling, Sun Yongrong, Huang Bin, et al. Dynamic modeling and performance analysis of hose-drogue aerial refueling system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(6): 901-908.

自主空中加油技术(Autonomous aerial refueling, AAR)兼具战略与战术双重价值,无论在军事还是民用方面都具有较大的应用潜力,受到了诸多国家的重视。软管-锥套式空中加油(软式加油)和伸缩管式空中加油(硬式加油)是两种常用的空中加油技术^[1],并且各具优缺点。软式加油技术可以同时为多架无人机加油,并且成本低,方式简单。但是,在大气紊流情况下,系统不稳定,且传输速率低。与软式加油技术相比,硬式加油技术具有较快的传输速率并且易于与受油机连接。但是它需要的加油设备复杂且一次只能给一架无人机加油。随着无人机技术的迅速发展,AAR也成为国内外学者的研究热点。我国主要实施了软式加油方式,加油软管为一根长达十几米的柔性体,并受到加油机尾流场、大气紊流等因素的影响,对软管-锥套系统进行动力学建模和性能分析有助于提高与受油机安全对接成功率,同时对我国软式自主空中加油技术的发展有着积极意义^[2]。

目前,国内外学者对软管-锥套动态建模做了大量研究工作,取得了显著的成果。Zhu等人^[3]从材料力学角度提出了弹性横梁有限元模型,该方法克服了经典缆绳理论中处理旋转及大变形问题的困难,但是理论推导复杂,计算量大,难以满足实时性要求。Kamman等人^[4-5]基于多刚体运动学理论,提出一种恒定长度的多级串联“球杆”三维运动模型,并通过计算流体力学和风洞实验测试了锥套的气动特性。Vassberg等人^[6]采用计算流体力学方法对KC-10加油机软管-锥套的气动特性进行了较全面的研究。胡孟权^[7-8]等将软管视为质点系,以静力平衡条件计算软管平衡拖拽位置,并研究了大气紊流对软管锥套运动的影响。王海涛等人^[9]在Kamman的基础上,提出了一种变长度的多级理想单摆系软管-锥套模型,并对软管“甩鞭”现象进行了分析。这些方法均采用传统的经典力学建模,而凯恩方程法对多刚体运动学给出了统一的分析公式,而不必进行动态导数及微分运算,从而减小计算量,提高了运算速度。

本文根据多刚体动力学理论,提出了一种基于凯恩方程法的软管-锥套动态模型。该方法能够较简明地建立多自由度力学系统动力学方程,而不必进行内部约束力的分析。本文定义了描述系统状态的广义坐标及广义速率,导出了软管段位置多级递推公式和系统运动方程,估算了软管在加油机尾

流、定常流和大气扰动下的气动载荷。数值仿真验证了所建模型的正确性,并进一步研究了系统的稳态性能和动态性能。

1 坐标系定义

1.1 建模假设

采用集中参数法思想,假设软管-锥套系统为多级串联“球杆”模型。其中软管由有限段等长的圆柱形光滑刚性杆组成,连接处由无摩擦的铰链相连,且各级刚性杆质量及所受外力均集中于连接处。锥套被视为固连于最后一级软管末端的质点,软管另一端与加油机吊舱相连,并随加油机运动。

1.2 坐标系及广义坐标定义

首先定义描述系统位姿所需的坐标系和状态量。

大地坐标系 S_g :采用传统的北、东、地方向作为惯性系。

加油机航迹坐标系 S_p :坐标系中 X_p 轴与加油机飞行速度方向重合一致, Z_p 轴位于包含飞行速度在内的铅垂面,与 X_p 轴垂直并指向下方, Y_p 轴垂直于 $O_p X_p Z_p$ 平面,按右手定则确定。

杆件坐标系 S_k :坐标原点位于各级杆件质心, X_k 轴沿着杆件的对称轴方向指向加油机, Y_k 轴垂直于对称面指向右侧, Z_k 轴在对称面内指向杆件下方。

由 S_p 和 S_k 的关系,可以定义如下状态量描述各级杆件与加油机的相对位置。

相对俯仰角 θ_{k1} : $O_k X_k$ 在 $O_p X_p Z_p$ 平面的投影与航迹系 $O_p X_p$ 轴的夹角,下倾为正。

相对偏航角 θ_{k2} : $O_k X_k$ 与航迹系 $O_p X_p Z_p$ 平面的夹角,左偏为正。

相对滚转角 θ_{k3} :由于软管材料特性和外形结构约束使其绕管身中轴线的扭转运动可以忽略,即 $\theta_{k3} \equiv 0$ 。

软管-锥套系统及坐标关系示意图如图1所示。

由上述定义,可得由 S_p 系到 S_k 系的坐标变换矩阵为

$$S_p^k = \begin{bmatrix} \cos\theta_{k1} \cos\theta_{k2} & \sin\theta_{k2} & -\sin\theta_{k1} \cos\theta_{k2} \\ -\cos\theta_{k1} \sin\theta_{k2} & \cos\theta_{k2} & \sin\theta_{k1} \sin\theta_{k2} \\ \sin\theta_{k1} & 0 & \cos\theta_{k1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据前面建模假设及坐标系定义,设软管-锥

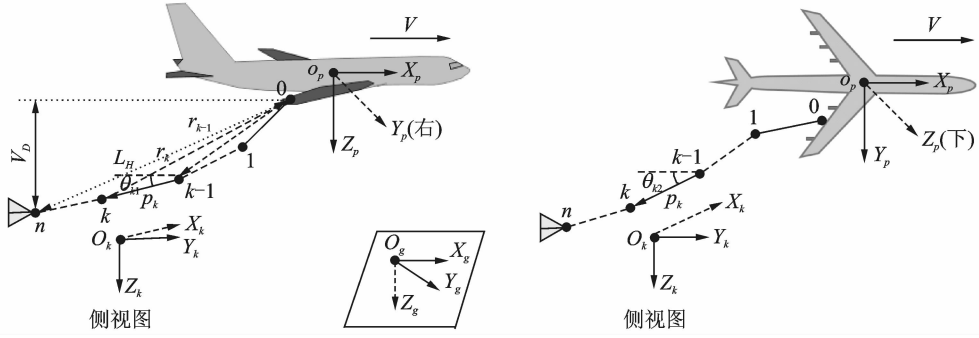


图1 软管-锥套系统坐标关系示意图

Fig. 1 Reference frames of hose-droge system

套系统由 n 级刚性杆串联而成,第 k 级刚性杆在空间的位置可以用角度 θ_{k1} 和 θ_{k2} 加以描述。则系统的位姿可用 $2n$ 个独立广义坐标来描述: $(\theta_{11}, \theta_{12}, \dots, \theta_{k1}, \theta_{k2}, \dots, \theta_{n1}, \theta_{n2})$ 。相应的广义速率定义为: $(\dot{\theta}_{11}, \dot{\theta}_{12}, \dots, \dot{\theta}_{k1}, \dot{\theta}_{k2}, \dots, \dot{\theta}_{n1}, \dot{\theta}_{n2}) \triangleq (u_1, u_2, \dots, u_r, \dots, u_{2n})$ 。

2 凯恩动力学方程推导

凯恩方程采用广义速率和偏速度描述系统^[10],表达式为

$$F_r + F_r^* = 0 \quad (2)$$

式中: F_r 和 F_r^* 分别为系统对第 r 个广义速率 u_r 的广义主动力和广义惯性力^[11]。

$$\begin{cases} F_r = \sum_{k=1}^n (F_k \cdot V_{k,r} + M_k \cdot \omega_{k,r}) \\ F_r^* = \sum_{k=1}^n (F_k^* \cdot V_{k,r} + M_k^* \cdot \omega_{k,r}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_{k,r}$ 与 $\omega_{k,r}$ 为第 k 个刚体对第 r 个广义速率 u_r 的偏速度和偏角速度; F_k 和 M_k 为作用于第 k 个刚体的合外力和合外力矩; F_k^* 和 M_k^* 为第 k 个刚体的惯性力和惯性力矩。

2.1 系统运动学分析

在软管-锥套坐标系关系如图1所示。假设各级刚性杆的长度均为 l_k ,由第 $k-1$ 级指向第 k 级的距离矢量为 p_k ,第 k 级刚性杆的空间位置向量在杆件坐标系 S_k 中可表示为 $(l_k, 0, 0)^T$,则 p_k 在 S_p 系下的坐标为

$$p_k = (S_p^k)^T \begin{bmatrix} -l_k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = l_k \begin{bmatrix} -C_{k1}C_{k2} \\ -S_{k2} \\ S_{k1}C_{k2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $C_{ki} = \cos\theta_{ki}$, $S_{ki} = \sin\theta_{ki}$ ($i=1,2$)。因此铰链 k 在空间的位置矢量 r_k 在 S_p 系下可表示为

$$r_k = r_{k-1} + p_k \quad (5)$$

第 k 级刚性杆在 S_p 系下的角速度和角加速度分别为

$$\omega_k = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{k2} S_{k1} \\ \dot{\theta}_{k1} \\ \dot{\theta}_{k2} C_{k1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\alpha_k = \frac{d\omega_k}{dt} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{k2} S_{k1} + \dot{\theta}_{k1} \dot{\theta}_{k2} C_{k1} \\ \ddot{\theta}_{k1} \\ \dot{\theta}_{k2} C_{k1} - \dot{\theta}_{k1} \dot{\theta}_{k2} S_{k1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

则铰链 k 在空间的运动速度 V_k 及加速度 a_k 在 S_p 系下为

$$V_k = V_{k-1} + \omega_k \times p_k \quad (8)$$

$$a_k = a_{k-1} + \alpha_k \times p_k + \omega_k \times (\omega_k \times p_k) \quad (9)$$

2.2 偏速度、偏角速度及惯性力、惯性力矩

将铰链 k 在空间的速度及角速度在 S_p 系下表示成广义速率的形式,即

$$V_k = V_{k-1} + l_k \begin{bmatrix} S_{k1} C_{k2} \dot{\theta}_{k1} + C_{k1} S_{k2} \dot{\theta}_{k2} \\ -C_{k2} \dot{\theta}_{k2} \\ C_{k1} C_{k2} \dot{\theta}_{k1} - S_{k1} S_{k2} \dot{\theta}_{k2} \end{bmatrix} = \sum_{i=1,2} V_{k,ki} \dot{\theta}_{ki} \quad (10)$$

$$\omega_k = \sum_{i=1,2} \omega_{k,ki} \dot{\theta}_{ki} \quad (11)$$

式中: $V_{k,ki}$ 和 $\omega_{k,ki}$ 为铰链 k 对广义速率 $\dot{\theta}_{ki}$ ($i=1,2$) 的偏速度和偏角速度向量。

$$V_{k,ki} = \frac{\partial V_k}{\partial \dot{\theta}_{ki}} = \begin{cases} l_k [S_{k1} C_{k2} \quad 0 \quad C_{k1} C_{k2}]^T & i=1 \\ l_k [C_{k1} S_{k2} \quad -C_{k2} \quad -S_{k1} S_{k2}]^T & i=2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\omega_{k,ki} = \frac{\partial \omega_k}{\partial \dot{\theta}_{ki}} = \begin{cases} [0 \quad 1 \quad 0]^T & i=1 \\ [S_{k1} \quad 0 \quad C_{k1}]^T & i=2 \end{cases} \quad (13)$$

那么,铰链 k 对广义速率 $\dot{\theta}_{j1}, \dot{\theta}_{j2}$ ($j=1,2, \dots, n$) 的偏速度及偏角速度的通用表达式可表示为

$$V_{k,j1} = \frac{\partial V_k}{\partial \dot{\theta}_{j1}} = \begin{cases} l_k [S_{j1} C_{j2} \quad 0 \quad C_{j1} C_{j2}]^T & k \geq j \\ [0 \quad 0 \quad 0]^T & k < j \end{cases} \quad (14)$$

$$V_{k,j2} = \frac{\partial V_k}{\partial \dot{\theta}_{j2}} = \begin{cases} l_k [C_{j1} S_{j2} \quad -C_{j2} \quad -S_{j1} S_{j2}]^T & k \geq j \\ [0 \quad 0 \quad 0]^T & k < j \end{cases} \quad (15)$$

$$\omega_{k,j1} = \frac{\partial \omega_k}{\partial \theta_{j1}} = \begin{cases} [0 \ 1 \ 0]^T & k=j \\ [0 \ 0 \ 0]^T & k \neq j \end{cases} \quad (16)$$

$$\omega_{k,j2} = \frac{\partial \omega_k}{\partial \theta_{j2}} = \begin{cases} [S_{j1} \ 0 \ C_{j1}]^T & k=j \\ [0 \ 0 \ 0]^T & k \neq j \end{cases} \quad (17)$$

下面计算在 S_p 系下铰链 k 的惯性力及惯性力矩。

$$F_k^* = -m_k a_k = -\sum_{j=1}^i m_k (V_{k,j1} \ddot{\theta}_{j1} + V_{k,j2} \ddot{\theta}_{j2}) - m_k \xi_k \quad (18)$$

式中

$$\xi_k = \sum_{j=1}^k l_k [-2S_{j1} S_{j2} \dot{\theta}_{j1} \dot{\theta}_{j2} + C_{j1} C_{j2} (\dot{\theta}_{j1}^2 + \dot{\theta}_{j2}^2) S_{j2} \dot{\theta}_{j2}^2 - 2C_{j1} S_{j2} \dot{\theta}_{j1} \dot{\theta}_{j2} - S_{j1} C_{j2} (\dot{\theta}_{j1}^2 + \dot{\theta}_{j2}^2)]^T \quad (19)$$

$$M_k^* = -J_k \alpha_k - \omega_k \times (J_k \omega_k) = -[(S_p^k)^T J_k^k S_p^k] (\omega_{k,k1} \dot{\theta}_{k1} + \omega_{k,k2} \dot{\theta}_{k2}) - \eta_k \quad (20)$$

$$\eta_k = J_{yk} [2C_{k1} S_{k2}^2 \dot{\theta}_{k1} \dot{\theta}_{k2} + S_{k1} S_{k2} C_{k2} \dot{\theta}_{k1}^2 - 2C_{k2} S_{k2} \dot{\theta}_{k1} \dot{\theta}_{k2} - 2S_{k1} S_{k2}^2 \dot{\theta}_{k1} \dot{\theta}_{k2} + C_{k1} C_{k2} S_{k2} \dot{\theta}_{k1}^2] \quad (21)$$

式中： J_k^k 为第 k 级刚体件在 S_k 系下的惯量矩阵，由于各级刚性杆的直径 d_k 远小于其长度 l_k 且结构对称，因此设 $J_k^k = \text{diag}(0, J_{yk}, J_{yk})$ 。

2.3 软管锥套主动力分析

由受力分析可知，作用在铰链 k 上的主动力 F_k 包括第 k 级软管的重力 $m_k g$ 和气动阻力 D_k 两部分。由于假设各级铰链所受外力均作用于质心位置，则主动力矩 $M_k = 0$ 。则有

$$F_k = m_k g + \frac{D_{k-1} + D_k}{2} \quad (22)$$

式中：气动阻力 D_k 由切向气动力 $D_{t,k}$ 和法向气动力 $D_{n,k}$ 组成^[12]。其中

$$D_{t,k} = \frac{1}{2} \rho V_{t,k}^2 \pi d_k l_k C_{t,k} \quad (23)$$

$$D_{n,k} = \frac{1}{2} \rho V_{n,k}^2 \pi d_k l_k C_{n,k} \quad (24)$$

式中： ρ 为空气密度； $V_{t,k} = V_k - u_k$ 为第 k 段软管的相对气流速度切向分量， u_k 为铰链 k 处的定常流、加油机尾流和大气紊流等矢量和； $V_{n,k} = V_k - u_k - V_{t,k}$ 为第 k 段软管的相对气流速度法向分量； $C_{t,k}$ 和 $C_{n,k}$ 分别为切向和法向摩擦力系数，其大小由当地气流雷诺数决定^[5]。

由于锥套安装在软管末端，同样受到重力和气动阻力的影响。则第 n 级铰链所受的主动力为

$$F_n = (m_n + m_{\text{dro}}) g + \frac{D_n}{2} + D_{\text{dro}} \quad (25)$$

式中： m_{dro} 为锥套质量， D_{dro} 为锥套所受气动阻力。

$$D_{\text{dro}} = \frac{1}{2} \rho (V_n - u_n)^2 \left(\frac{\pi d_{\text{dro}}^2}{4} \right) C_{\text{dro}} \quad (26)$$

式中： d_{dro} 为锥套直径， C_{dro} 为锥套阻力系数，与锥套的几何外形有关^[9]。

2.4 系统动力学方程及仿真流程

将式(14~17)，式(22~26)所得的偏速度、偏角速度及主动力表达式代入式(3)，得到对应于第 r 个广义速率 u_r 的广义主动力 F_r ；将式(18~21)所得惯性力及惯性力矩代入式(3)，得到对应于第 r 个广义速率 u_r 的广义惯性力 F_r^* ；且 F_r 和 F_r^* 均为标量表达式。最后根据凯恩动力学原理，得到 $2n$ 个二阶非线性系统动力学方程如下

$$\sum_{i=1}^n (m_i a_i \cdot V_{i,r}) + \sum_{i=1}^n (J_i \alpha_i + \omega_i \times (J_i \omega_i)) \cdot \omega_{i,r} + m_{\text{dro}} a_n \cdot V_{n,r} + (J_{\text{dro}} \alpha_n + \omega_n \times (J_{\text{dro}} \omega_n)) \cdot \omega_{n,r} = \sum_{i=1}^{n-1} F_i \cdot V_{i,r} + F_n \cdot V_{n,r} \quad r=1,2,\dots,2n \quad (27)$$

把方程写成矩阵形式如下

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1(2n)} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2(2n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{(2n-1)1} & H_{(2n-1)2} & \dots & H_{(2n-1)(2n)} \\ H_{(2n)1} & H_{(2n)2} & \dots & H_{(2n)(2n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{11} \\ \ddot{\theta}_{12} \\ \vdots \\ \ddot{\theta}_{n1} \\ \ddot{\theta}_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_{2n-1} \\ R_{2n} \end{bmatrix} \quad (28)$$

即

$$[H] [\ddot{\theta}] = [R] \Rightarrow [\ddot{\theta}] = [H]^{-1} [R] \quad (29)$$

给定加油机的飞行状态及软管的初始状态，采用如图2所示的系统仿真流程来跟踪软管-锥套的动态过程。



图2 数值计算流程图

Fig. 2 Flow chart of numerical simulation

3 数值仿真与算法性能评估

基于上述数学模型,对系统进行了 Matlab 仿真。将软管模型分为 20 段,软管拖拽点位于飞机右翼二分之一机翼处。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数值

Tab. 1 Values of simulation parameters

部件	参数	参数值
加油机	质量/kg	60 000
	翼展长/m	34
	翼参考面积/m ²	300
软管	长度/m	16
	直径/m	0.067
	单位长度质量/(kg·m ⁻¹)	5
	锥套	
锥套	质量/kg	29
	直径/m	0.61
	法向阻力系数	0.28
阻力系数	切向阻力系数	0.001
	锥套阻力系数	0.712

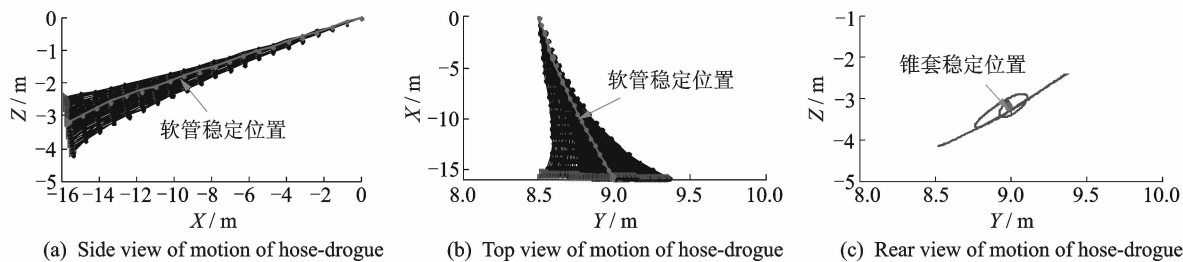
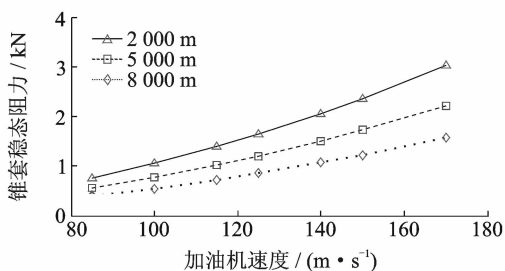
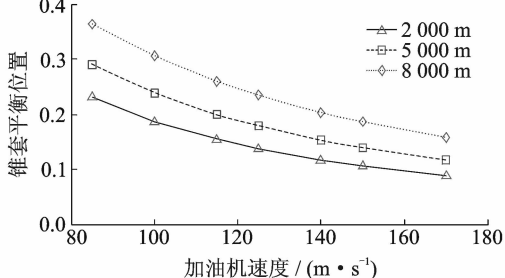


图 3 软管-锥套系统动态位置

Fig. 3 Dynamic motion of hose-drogue



(a) Steady-state drag of drogue in steady wind



(b) Balance position of drogue in steady wind

图 4 平稳大气中锥套稳态阻力和平衡位置

Fig. 4 Steady-state drag and balance position in steady wind

3.1 模型的正确性

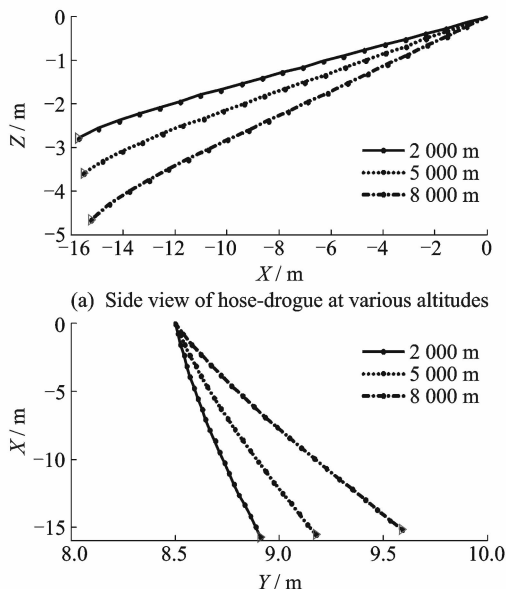
为了验证基于凯恩方程的软管-锥套动态模型的可行性,采用 Hallock-Burnham 尾涡模型^[12]来近似模拟加油机尾涡流。设加油机在高度 3 000 m,空速为 100 m/s 状态下平飞,观察软管-锥套系统的动态位置如图 3 所示。

由于加油机尾涡流包含大量的不稳定风干扰,软管-锥套会持续飘摆,而 Hallock-Burnham 模型是针对尾涡流主要成分的简化模型,本质上是稳定的有旋风场,因此仿真结果最终趋于稳定。改变加油机的飞行条件,仿真验证系统都能在 20 s 内趋于稳定。该结论与文献[4,9]结论一致。

3.2 稳态性能

如图 1 所示,定义锥套的平衡位置 $D = \frac{V_D}{L_H}$ 。

在平稳大气中,对加油机在不同空速和高度条件下,锥套稳态阻力和平衡位置如图 4 所示,软管-锥套平衡拖拽尾迹如图 5,6 所示。



(b) Top view of hose-drogue at various altitudes

图 5 不同飞行高度下软管稳态位置

Fig. 5 Steady-state position at various altitude for a tanker

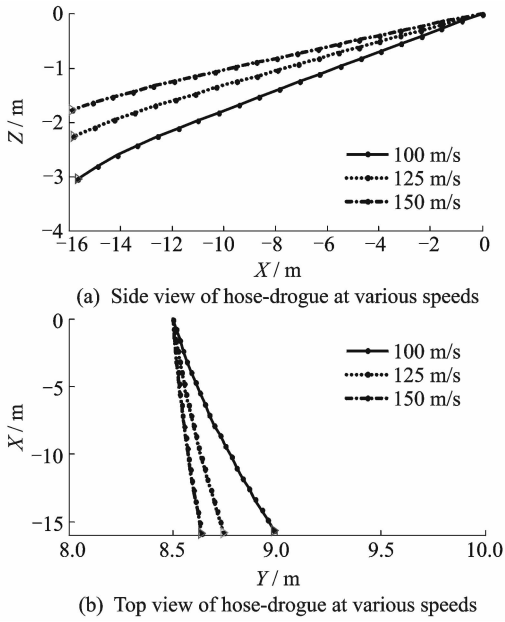


图6 不同飞行速度下软管稳态位置

Fig. 6 Steady-state position at various speeds for a tanker

仿真结果显示,当加油机以 100 m/s 的空速在 2 000~8 000 m 的高空飞行时,加油锥套相对加油机拖拽点的稳定位置大概在 2.78~4.66 m。即随着飞行高度的增加,由于空气密度减小,锥套气动阻力减小,所以锥套下沉量增加。当加油机在 3 000 m 高空以 100~150 m/s 的空速飞行时,加油锥套相对加油机拖拽点的稳定位置大概在 3.04~1.77 m。即随着加油机飞行速度的增加,锥套受到的气动阻力增加,所以锥套下沉量减小。

3.3 动态性能

根据飞行试验报道,大气紊流对软管-锥套系统的影响很大。在晴朗的天气,当系统遇到轻微的紊流时,锥套就会发生高频无规则的振荡而无法稳定下来,从而导致加油任务的失败。在软管锥套系统中加入 Dryden 大气扰动模型^[13],从 $t=10$ s 开始,产生一阵紊流强度为 1.5 m/s,紊流尺度为 530 m,时长为 20 s 的各项同性紊流。锥套在加油机不同飞行速度下(高度为 3 000 m)受大气紊流影响的侧向和垂向位移以及第 10 段、第 15 段和第 20 段软管段的受扰运动分别如图 7,8 所示。

由仿真图可见,锥套在大气扰动下发生不规则的振荡运动,并随着加油机飞行速度的增加,振荡幅度减小。这是因为在同一高度,所取紊流相同,而加油机速度增大时紊流相对自由来流的比值减

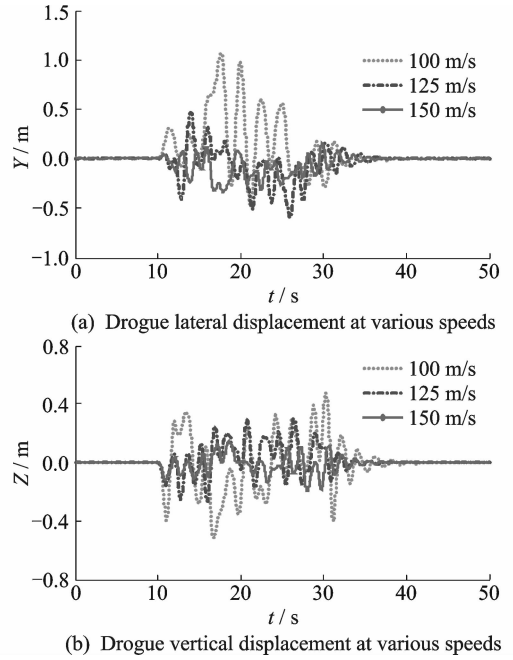


图7 不同飞行速度下锥套在大气扰动下的位移(加油机在 3 000 m 高度)

Fig. 7 Drogue displacement in atmospheric turbulence at various speeds for a tanker at 3 000 m height

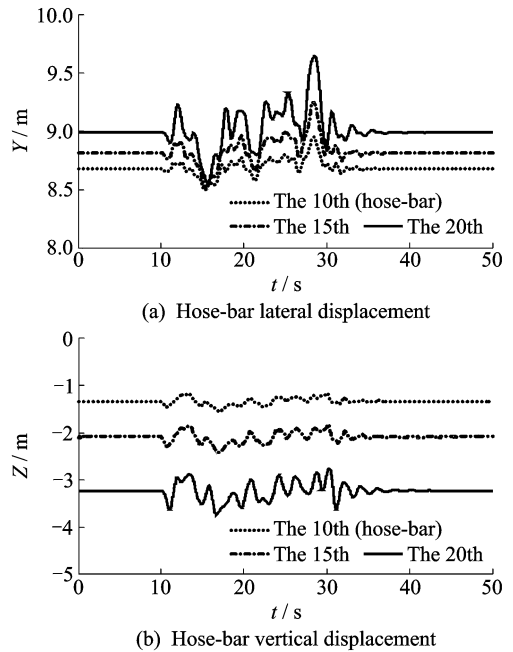


图8 不同软管段在大气扰动下的位移

Fig. 8 Hose-bar displacement in atmospheric turbulence

小,从而对锥套的运动影响减小。同时,离拖拽点越远的软管段摆动越剧烈。如图 9 所示,锥套在大气扰动下的运动轨迹杂乱无章而无法达到稳定位置,并且锥套阻力增加,该结论与报道的飞行试验结果一致^[6]。

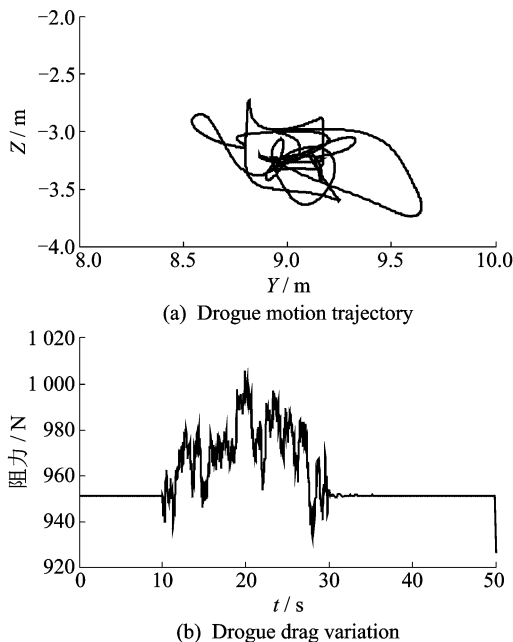


图9 锥套在大气扰动下锥套的轨迹和阻力变化

Fig.9 Drogue trajectory and drag variation in atmospheric turbulence

4 结 论

本文采用有限元法建立了基于凯恩方程的软管-锥套动态模型,该模型能够较为真实地反映软管-锥套的动力学特性,可以作为软管-锥套式空中加油研究的通用模型,并通过数值仿真验证了模型的正确性,分析了系统性能,得到如下结论:

(1)平稳大气中,在不同的加油机飞行条件下,软管锥套系统能够在短时间内达到稳定状态。

(2)加油机的飞行高度和飞行速度对软管锥套系统的稳定位置有一定的影响,且随着加油机速度增加,锥套阻力增加,下沉量减小;加油机高度增加,锥套阻力减小,下沉量增加。

(3)大气紊流对软管锥套系统具有明显的干扰作用,同一高度时,加油机飞行速度增大,锥套受影响减小。受扰时,锥套发生杂乱无章的运动且阻力增大,将直接影响受油机安全对接操作。

在本文研究结论的基础上,后续可展开针对不确定性环境因素引起的误差进行在线建模参数实时调整研究以及需要对锥套系统进行进一步的增稳控制器研究以抑制紊流干扰。

参考文献:

[1] 全权,魏子博,高俊,等. 软管式自主空中加油对接阶段中的建模与控制综述[J]. 航空学报, 2014, 35

(9): 2390-2410.

Quan Quan, Wei Zibo, Gao Jun, et al. A survey on modeling and control problems for probe and drogue autonomous aerial refueling at docking stage[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(9): 2390-2410.

[2] 陆宇平,杨朝星,刘洋洋. 空中加油系统的建模与控制技术综述[J]. 航空学报, 2014, 35(9): 2375-2389.

Lu Yuping, Yang Chaoxing, Liu Yangyang. A survey of modeling and control technologies for aerial refueling system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(9): 2375-2389.

[3] Zhu Z H, Meguid S A. Modeling and simulation of aerial refueling by finite element method[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(24): 8057-8073.

[4] Ro K, Kamman J W. Modeling and simulation of hose-paradrogue aerial refueling systems[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2010, 33(1): 53-63.

[5] Ro K, Kuk T, Kamman J W. Dynamics and control of hose-drogue refueling systems during coupling[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2011, 34(6): 1694-1708.

[6] Vassberg J C, Yeh D T, Blair A J, et al. Numerical simulations of KC-10 in-flight refueling hose-drogue dynamics with an approaching F/A-18D receiver aircraft[C] // 23rd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit. Toronto, Ontario, Canada: AIAA, 2005: 4605.

[7] 胡孟权,聂鑫,王丽明. “插头-锥管”式空中加油软管平衡拖拽位置计算[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2009; 10(5): 22-26.

Hu Mengquan, Nie Xin, Wang Liming. Determination of hose static catenary shape in "probe-drogue" in-flight refueling system[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2009; 10(5): 22-26.

[8] 胡孟权,柳平,聂鑫,等. 大气紊流对空中加油软管锥套运动的影响[J]. 飞行力学, 2010, 28(5): 20-23.

Hu Mengquan, Liu Ping, Nie Xin, et al. Influence of air turbulence on the movement of hose-drogue[J]. Flight Dynamics, 2010, 28(5): 20-23.

[9] 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.
- Wang Haitao, Dong Xinming, Dou Hefeng, et al. Dynamic modeling and characteristics analysis of hose-paradrogue aerial refueling system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(1): 92-98.
- [10] 杨朝星, 陆宇平. 基于凯恩方法的硬式空中加油多体动力学分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(5): 605-610.
- Yang Chaoxing, Lu Yuping. Kane method based modeling and analysis on multi-body dynamics of boom refueling system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 45(5): 605-610.
- [11] Schiehlen W O. Advanced multibody system dynamics: Simulation and software tools [M]. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2013.
- [12] 李大伟, 王宏伦. 自动空中加油阶段加油机尾涡流场建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2010(7): 776-780.
- Li Dawei, Wang Honglun. Wake vortex effect modeling and simulation in automated aerial refueling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010(7): 776-780.
- [13] 赵震炎, 肖业伦, 施毅坚. Dryden 大气紊流模型的数字仿真技术[J]. 航空学报, 1986, 7(5): 433-443.
- Zhao Zhenyan, Xiao Yelun, Shi Yijian. A digital simulation technique for Dryden atmospheric turbulence model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1986, 7(5): 433-443.

