

# 空中加油对接过程的动力学建模与仿真

张雷雨<sup>1</sup>, 张洪<sup>2</sup>, 杨洋<sup>1,\*</sup>, 黄龙<sup>1</sup>

1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191

2. 中航工业成都飞机设计研究所 机电部, 四川 成都 610041

**摘要:** 空中加油的成功与否主要依赖于加油锥套与受油插头的顺利对接, 对接过程中产生的动力学行为的研究是实现顺利对接的前提。利用多刚体系统动力学建立对接过程的动力学模型, 求解出加油锥套与受油装置间的广义速度; 并依据建立的接触动力学模型, 得到局部接触点间的相对速度。基于非线性连续碰撞理论, 提出对接过程中碰撞力的计算方法, 并在机械系统动力学仿真软件 ADAMS 的环境下, 构建加油锥套和受油装置的对接虚拟样机。通过对虚拟样机的动力学仿真, 得到了对接过程中的碰撞力及速度响应曲线, 同时, 得出能够实现成功对接时各参数的具体范围。结果表明, 制约对接成功的主要参数是初始相对速度、加油锥套的俯仰角和相对偏距。该研究对空中加油的对接和受油机的导航控制具有重要的意义。

**关键词:** 空中加油; 对接; 接触动力学; 非线性连续碰撞理论; 碰撞力

**中图分类号:** V249.4 **文献标识码:** A

空中加油可以增大战机航程, 延长续航时间, 增加有效载重, 提高远程作战能力。空中加油过程包括 4 个阶段: 编队、对接、加油及脱开, 其中对接阶段是实现空中加油的关键。如图 1 所示, 受油插头以一定的初始相对速度  $v_r$  撞向加油锥套, 在受到撞击后, 加油锥套及软管能向加油吊舱内

回缩, 并在一定范围内摆动, 最终实现受油插头与加油锥套的完全对接。

近年来, 空中加油技术的研究引起越来越多学者的关注。文献[1]~文献[3]主要对加油软管运动规律及平衡拖曳位置进行研究, 得出了加油软管的运动规律及加油锥套的姿态变化规律; 文献[4]采用瞬态冲击理论和碰撞接触算法建立碰撞力模型, 分析了加油锥套的结构是否满足强度要求; 文献[5]建立了受油机在受油时的动力学模型, 并对加油过程中受油机的姿态进行了分析与仿真; 文献[6]针对空中加油时受油机的姿态变化及飞行控制进行了详细分析。国外学者的研究集中于对接前和加油过程中加油机的姿态控制和受油机的稳定性分析, 较少考虑对接过程中碰撞力的影响; 国内在空中加油领域的研究还局限于对

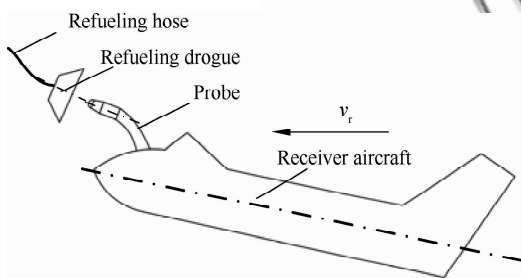


图 1 空中加油对接示意图

Fig. 1 Schematic drawing of docking in aerial refueling

收稿日期: 2011-09-26; 退修日期: 2011-11-17; 录用日期: 2011-11-28; 网络出版时间: 2011-12-09 17:26

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20111209.1726.007.html

\* 通讯作者. Tel.: 010-82338386 E-mail: yang\_mech@buaa.edu.cn

引用格式: Zhang L Y, Zhang H, Yang Y, et al. Dynamics modeling and simulation of docking process in aerial refueling. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(7): 1347-1354. 张雷雨, 张洪, 杨洋, 等. 空中加油对接过程的动力学建模与仿真. 航空学报, 2012, 33(7): 1347-1354.

固定式受油装置、加油锥套及软管的研究,没有涉及收放式受油装置和对接过程中出现的碰撞问题。

受油机与加油锥套在对接过程中产生的力学行为会对受油装置造成剧烈的冲击,降低对接的安全性和成功率。对接过程中会出现较大的碰撞力,碰撞力决定了加油锥套在空气场中的姿态和位置,求解碰撞力和加油锥套的动力学响应成为研究对接过程的重点。通过仿真分析,得到了对接过程中的碰撞力和速度响应曲线<sup>[7]</sup>,由响应曲线得出制约对接成功的主要因素,其分析结果对空中加油的对接和受油机的导航和控制具有重要的意义。

## 1 对接过程的动力学模型

对接过程是受油插头与加油锥套撞击的过程,对接中产生的碰撞力对加油锥套的位置和姿态影响较大,因此,需将碰撞力考虑在内,进而建立对接过程的动力学模型。

如图 2 所示,分别建立惯性坐标系  $I$  ( $O_1X_1Y_1Z_1$ )、与加油机固连的坐标系  $B_T$ 、与受油机固连的坐标系  $B_R$ ,坐标系  $B_T$  和  $B_R$  的原点分别设在两机的几何形心位置。 $M$ 、 $W_i$  和  $C_j$  ( $i=1,2,\dots,m$ ;  $j=1,2,\dots,n$ ) 分别为加油锥套的质心、表面质点和碰撞接触点; $m$  为加油锥套表面质点的数量; $n$  为加油锥套上接触点的数量。

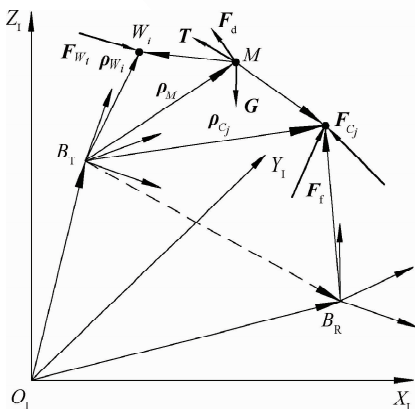


图 2 加油机与受油机空间坐标系

Fig. 2 Spatial coordinate system between the refueling and receiver aircraft

受油机的质量远大于加油锥套,在对接过程中受油机的速度近似不变,因此,建立以加油锥套为研究对象的动力学模型。将约束系统进行分

割,然后建立加油锥套的作用力平衡方程和动量矩守恒方程。由于理想约束力的虚功为零,借助于达朗伯原理可将理想约束力消除,导出广义坐标描述的动力学方程<sup>[8]</sup>。

对加油锥套在对接过程中的受力进行归纳,建立如下加油锥套的作用力平衡方程<sup>[9]</sup>:

$$m_1 \mathbf{a}_1 = \mathbf{T} + \mathbf{G} + \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_f + \sum_{i=1}^m \mathbf{F}_{W_i} + \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_{C_j} + \mathbf{F}_r \quad (1)$$

式中: $m_1$  为加油锥套的质量; $\mathbf{a}_1$  为加油锥套的加速度; $\mathbf{T}$  为输油管对加油锥套的拉力; $\mathbf{G}$  为加油锥套受到的重力; $\mathbf{F}_d$  为对接过程中施加的非线性阻尼力; $\mathbf{F}_f$  为对接过程中产生的库仑摩擦力; $\mathbf{F}_{W_i}$  为空气流场对加油锥套表面质点  $W_i$  的作用力; $\mathbf{F}_{C_j}$  为加油锥套与受油插头在接触点  $C_j$  处的接触力; $\mathbf{F}_r$  为理想约束合力。

相对于加油锥套质心的动量矩方程为

$$\mathbf{I}_1 \boldsymbol{\alpha}_1 + \boldsymbol{\omega}_1^T \mathbf{I}_1 \boldsymbol{\omega}_1 = \sum_{i=1}^m (\boldsymbol{\rho}_{W_i} - \boldsymbol{\rho}_M) \times \mathbf{F}_{W_i} + \sum_{j=1}^n (\boldsymbol{\rho}_{C_j} - \boldsymbol{\rho}_M) \times \mathbf{F}_{C_j} + \mathbf{l}_r \quad (2)$$

式中: $\mathbf{I}_1$  为加油锥套的惯性张量; $\boldsymbol{\alpha}_1$  为加油锥套的角加速度列向量; $\boldsymbol{\omega}_1$  为加油锥套的角速度列向量; $\boldsymbol{\rho}_{W_i}$  为质点  $W_i$  在坐标系  $B_T$  中的坐标向量; $\boldsymbol{\rho}_M$  为加油锥套质心在坐标系  $B_T$  中的坐标向量; $\boldsymbol{\rho}_{C_j}$  为接触点在坐标系  $B_T$  中的坐标向量; $\mathbf{l}_r$  为理想约束力矩。

对接前,加油锥套处于近似受力平衡状态,即

$$\mathbf{T} + \mathbf{G} + \sum_{i=1}^m \mathbf{F}_{W_i} \approx \mathbf{0} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m (\boldsymbol{\rho}_{W_i} - \boldsymbol{\rho}_M) \times \mathbf{F}_{W_i} = \mathbf{0} \quad (4)$$

根据虚功原理,可得理想约束力和力矩的虚功  $\delta W_r$  为零,即

$$\delta W_r = \mathbf{F}_r \cdot \delta \mathbf{r} + \mathbf{l}_r \cdot \delta \mathbf{s} = 0 \quad (5)$$

式中: $\delta \mathbf{r}$  为虚位移; $\delta \mathbf{s}$  为虚转角。将式(3)和式(4)代入式(2),求解  $\mathbf{F}_r$  和  $\mathbf{l}_r$ ,将  $\mathbf{F}_r$  和  $\mathbf{l}_r$  代入式(5)中得:

$$\delta \mathbf{r} \cdot (m_1 \mathbf{a}_1 - \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_{C_j} - \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_f) + \delta \mathbf{s} \cdot [\mathbf{I}_1 \boldsymbol{\alpha}_1 + \boldsymbol{\omega}_1^T \mathbf{I}_1 \boldsymbol{\omega}_1 - \sum_{j=1}^n (\boldsymbol{\rho}_{C_j} - \boldsymbol{\rho}_M) \times \mathbf{F}_{C_j} - \mathbf{l}_r]$$

$$\sum_{j=1}^n (\rho_{C_j} - \rho_M) \times \mathbf{F}_{C_j} = 0 \quad (6)$$

虚位移  $\delta \mathbf{r}$  和虚转角  $\delta \mathbf{s}$  通过雅可比矩阵与广义坐标的变分  $\delta \mathbf{y}$  紧密相连,即

$$\delta \mathbf{r} = \mathbf{J}_T \delta \mathbf{y}, \quad \delta \mathbf{s} = \mathbf{J}_R \delta \mathbf{y} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{y}$  为广义位置坐标向量;  $\mathbf{J}_T$ 、 $\mathbf{J}_R$  分别为加油锥套的平动、转动雅可比矩阵。

将式(7)代入式(6)并在广义坐标上转化为

$$\delta \mathbf{y} (\mathbf{M}(t, \mathbf{y}) \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{k}(t, \mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}) - \mathbf{q}(t, \mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}})) = \mathbf{0} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{n \times n}$  为质量矩阵;  $\mathbf{k} \in \mathbf{R}^n$  为广义离心力及科氏力;  $\mathbf{q} \in \mathbf{R}^n$  为主动力,且  $\mathbf{q} = \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_{C_j} - \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_t$ 。

由  $\delta \mathbf{y}$  的任意性可得到完整约束的运动微分方程为

$$\mathbf{M}(t, \mathbf{y}) \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{k}(t, \mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}) = \mathbf{q}(t, \mathbf{y}, \dot{\mathbf{y}}) \quad (9)$$

## 2 对接过程的碰撞力建模

目前,在静态接触领域的研究已趋于成熟,动态接触(即碰撞问题)逐渐成为新的研究重点。在动态接触问题中,将物体视为变形体,采用弹性接触模型计算动态接触中产生的碰撞力。受油插头与加油锥套进行对接时,接触局部产生的接触力与接触点之间的相对速度  $\dot{\mathbf{S}}_j$  密切相关。基于前文得到的广义速度  $\dot{\mathbf{y}}$ ,推导出  $\dot{\mathbf{S}}_j$  的数学模型;然后,采用非线性连续碰撞理论,建立对接过程中的接触力模型,在理论上分析并解决空中加油中的接触问题。

### 2.1 接触的动力学模型

两个发生接触的物体为加油锥套和受油插头,加油锥套上的点  $P_j$  和受油插头上的点  $P_{j+1}$  为相互接触点,在点  $P_j$  上建立局部坐标系  $\{P_j, \mathbf{n}_j, \mathbf{t}_j\}$ ,其中  $\mathbf{n}_j$  和  $\mathbf{t}_j$  分别为单位法向量和单位切向量,规定法向矢量向外为正<sup>[10]</sup>,如图3所示。

由最邻近点  $P_j$  和  $P_{j+1}$  的相对位移  $\mathbf{S}_j$  可确定两者间最短的法向相对距离  $S_{N_j}$  为

$$S_{N_j} = \mathbf{S}_j \cdot \mathbf{n}_j = (\mathbf{r}_{O_1 P_{j+1}} - \mathbf{r}_{O_1 P_j}) \cdot \mathbf{n}_j \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{r}_{O_1 P_j}$ 、 $\mathbf{r}_{O_1 P_{j+1}}$  为邻近点  $P_j$ 、 $P_{j+1}$  在惯性坐标系  $I$  中的位置矢量。如果  $S_{N_j} > 0$ ,则对接中没有接触;如果  $S_{N_j} = 0$ ,则相互接触;如果  $S_{N_j} < 0$ ,则意味着加油锥套与受油插头相互嵌入。

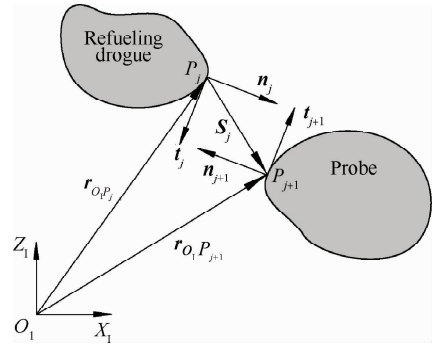


图3 刚体接触的局部坐标系

Fig. 3 Local coordinate system of the rigid contact

由于单位法矢量  $\mathbf{n}_j$  的长度保持不变,因而  $\mathbf{n}_j$  与  $\dot{\mathbf{n}}_j$  正交,考虑到最邻近点相对位移  $\mathbf{S}_j$  沿  $\mathbf{n}_j$  方向,因而  $\mathbf{S}_j \cdot \mathbf{n}_j = 0$ 。因此,在法线上最邻近点间的相对速度为

$$\begin{aligned} \dot{S}_{N_j} &= \dot{\mathbf{S}}_j \cdot \mathbf{n}_j + \mathbf{S}_j \cdot \dot{\mathbf{n}}_j = \dot{\mathbf{S}}_j \cdot \mathbf{n}_j = \\ &= (\mathbf{v}_{O_1 P_j} - \mathbf{v}_{O_1 P_{j+1}}) \cdot \mathbf{n}_j \end{aligned} \quad (11)$$

或者用广义坐标表示为

$$\begin{aligned} \dot{S}_{N_j} &= (\mathbf{J}_{TP_{j+1}} \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{v}_{P_{j+1}} - \mathbf{J}_{TP_j} \dot{\mathbf{y}} - \mathbf{v}_{P_j}) \cdot \mathbf{n}_j = \\ &= [(\mathbf{J}_{TP_{j+1}} - \mathbf{J}_{TP_j}) \mathbf{n}_j] \cdot \dot{\mathbf{y}} + (\mathbf{v}_{P_{j+1}} - \mathbf{v}_{P_j}) \cdot \mathbf{v}_{P_j} = \\ &= \mathbf{w}_{N_j} \cdot \dot{\mathbf{y}} + \omega_{N_j} \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{v}_{O_1 P_j}$ 、 $\mathbf{v}_{O_1 P_{j+1}}$  为邻近点  $P_j$ 、 $P_{j+1}$  在惯性坐标系  $I$  中的速度;  $\mathbf{w}_{N_j} = (\mathbf{J}_{TP_{j+1}} - \mathbf{J}_{TP_j}) \mathbf{n}_j$ ,表示广义速度在法向上的投影;  $\omega_{N_j} = (\mathbf{v}_{P_{j+1}} - \mathbf{v}_{P_j}) \cdot \mathbf{n}_j$ ,表示在非正常系统中相对速度在法向上的投影;  $\mathbf{J}_{TP_j}$ 、 $\mathbf{J}_{TP_{j+1}}$  和  $\mathbf{v}_{P_j}$ 、 $\mathbf{v}_{P_{j+1}}$  为对应于接触点  $P_j$  和  $P_{j+1}$  的雅可比矩阵和相对速度。

### 2.2 非线性连续碰撞理论

采用非线性连续碰撞理论来解决对接过程中的碰撞问题,该理论是一种以弹簧阻尼力代替接触区域复杂变形的近似方法,其力学模型如图4所示。碰撞力是由局部接触变形而引起的,因此,将物体间嵌入量和嵌入速度作为碰撞力计算参数得到碰撞力  $\mathbf{F}_{C_j}$  的接触模型<sup>[11]</sup>,即

$$\mathbf{F}_{C_j} = K \delta_j^e + C \frac{d\delta_j}{dt} \quad (13)$$

式中:  $F_{C_j}$  为  $\mathbf{F}_{C_j}$  的大小;  $K$  为撞击位置处的局部接触刚度;  $C$  为撞击位置处的局部阻尼系数;  $\delta_j = \delta(t) = \int \dot{S}_{N_j} dt$ ,表示接触嵌入深度;  $d\delta_j/dt =$

$\dot{S}_{N_j}$ , 表示 2 个不同接触点间的相对速度;  $e$  为力指数, 根据不同形状  $e$  取不同的值, 在 Hertz 接触问题中  $e = 1.5$ 。

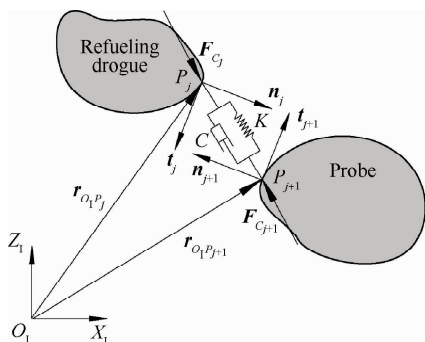


图 4 非线性连续碰撞力模型

Fig. 4 Model of the nonlinear continuum collision force

### 3 对接虚拟样机的建立及参数设置

#### 3.1 对接虚拟样机的建立

采用机械系统动力学软件 ADAMS 作为虚拟样机仿真平台, 将加油锥套及受油装置实体模型导入该软件, 依据实际的质量特性设置相应参数并添加运动副, 进而建立虚拟样机, 为动力学仿真奠定基础<sup>[12]</sup>。

为尽可能接近机构的运动状况, 在添加约束时, 将各运动副中摩擦力的影响考虑在内, 并设置合适的摩擦系数。由于在对接前加油锥套处于近似失重(合力为零)的状态, 故在仿真环境下消除重力影响, 且不对其进行运动约束<sup>[13]</sup>。由于加油软管具有一定的缓冲功能, 因此在加油锥套上添加带有结构阻尼的弹簧系统, 并依据文献[3]确定刚度系数及阻尼比的大小分别为  $0.5 \text{ N/mm}$  和  $0.10 \text{ N} \cdot \text{s/mm}$ 。

#### 3.2 添加接触关系及设置接触参数

进行动力学仿真前, 添加受油插头与加油锥套之间的接触关系<sup>[14]</sup>, 接触参数与上文使用参数的概念完全相同。定义接触关系时, 将接触类型设置为 Solid to Solid, 参数设置主要包括接触力和库伦摩擦力参数设置, 接触力参数设置为: 接触刚度  $K = 3.24 \times 10^4 \text{ N/mm}$ 、力指数  $e = 1.5$ 、阻尼系数  $C = 10 \text{ N} \cdot \text{s/mm}$ , 库伦摩擦力参数设置为: 静摩擦系数  $\mu_s = 0.3$ 、动摩擦系数  $\mu = 0.1$ 。

在仿真中, 仿真系统实时检测即将发生碰撞点之间的距离  $S_{N_j}$ 、相对速度  $\dot{S}_{N_j}$  及嵌入深度  $\delta_j$ , 根据式(13)计算局部因接触产生的碰撞力。

### 3.3 仿真过程控制

在仿真环境下, 加油锥套与受油装置均处于相对静止状态, 在受油装置上施加推力使其撞向加油锥套。当受油装置与加油锥套初始相对速度  $v_r$  达到一定数值时撤销推力, 受油装置撞向加油锥套, 实施对接。完成对接后, 加油锥套锁紧在受油插头上并与受油机同速运动, 受油机在制动力的作用下减速直至相对速度为零, 加油机开始进行注油<sup>[15]</sup>。

## 4 仿真结果及分析

在空中加油中, 加油软管将加油锥套拖曳在空中, 加油锥套在以  $O_1O'_1$  为轴线、 $O_1O_2$  为母线、 $\alpha$  为顶角的圆锥面内摆动, 并在以  $d$  为半径的圆柱面内跳动, 如图 5 所示。通过仿真可知, 制约对接成功的关键因素为: 初始相对速度  $v_r$ 、加油锥套俯仰角  $\alpha$  和相对偏距  $d$ 。在仿真中将对接过程碰撞力的大小  $F_C$  和加油锥套速度响应作为对接成功的检测参数, 并对  $F_C$  的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三方向碰撞分力  $F_{Cx}$ 、 $F_{Cy}$ 、 $F_{Cz}$  进行分析和对比, 其中  $F_C$  为对接过程中的最大接触力。加油锥套为回转体结构, 仅分析平面  $XOY$  平面内几种典型状态下  $v_r$ 、 $\alpha$  和  $d$  在对接过程中的影响。

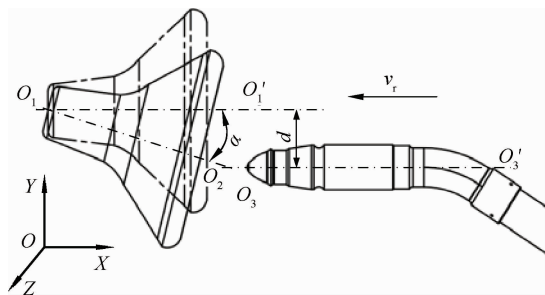


图 5 加油锥套与受油插头对接示意图

Fig. 5 Schematic drawing of docking between the refueling drogue and probe

#### 4.1 初始相对速度 $v_r$ 的影响

在仿真中对不同  $v_r$  进行了研究, 获得了随  $v_r$  变化的碰撞力曲线。图 6 给出了  $\alpha = 0^\circ$ ,  $d = 0 \text{ mm}$

时  $F_C$  及各方向分力随  $v_r$  的变化曲线,可知随着  $v_r$  的增大, $F_C$  逐渐增大,并且  $F_{Cx}$  起主要作用,其余两方向分力影响较小。一般加油锥套与受油插头对接时  $v_r=0.6\sim 3.0$  m/s,在  $v_r=3.0$  m/s 时出现  $F_C$  的最大值  $F_{Cmax}=9\ 118.5$  N。

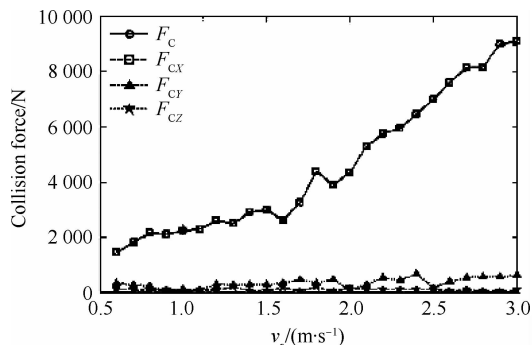


图 6  $F_C$  及各分力随  $v_r$  的变化曲线 ( $\alpha=0^\circ$ ,  $d=0$  mm)

Fig. 6  $F_C$  and its component forces vs  $v_r$  ( $\alpha=0^\circ$ ,  $d=0$  mm)

## 4.2 加油锥套俯仰角 $\alpha$ 的影响

在对接过程中,加油锥套受到空气场的影响, $\alpha$  在一定范围内波动,当  $\alpha$  超过一定角度时无法完成对接。图 7 给出  $v_r=1.0$  m/s,  $d=0$  mm 时  $F_C$  随  $\alpha$  的变化曲线,可知随着  $\alpha$  的增大, $F_C$  有增大的趋势,并且出现较大的波动; $F_{Cy}$  起主导作用,并且变化剧烈。图 8 所示为  $\alpha=15^\circ$  时  $F_C$ 、 $F_{Cx}$  和  $F_{Cy}$  的响应曲线,由图 8(a) 可得对接过程中存在多次的二次碰撞和峰值,这是由于加油锥套与受油插头间的相对速度  $\dot{S}_N$  波动较大,由式 (13) 可

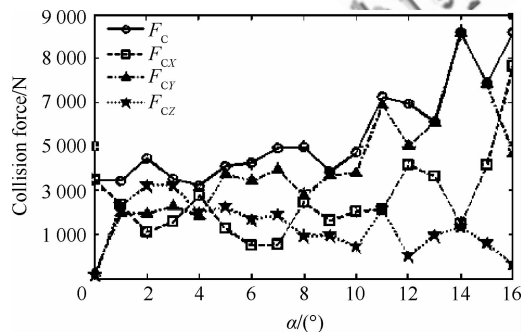
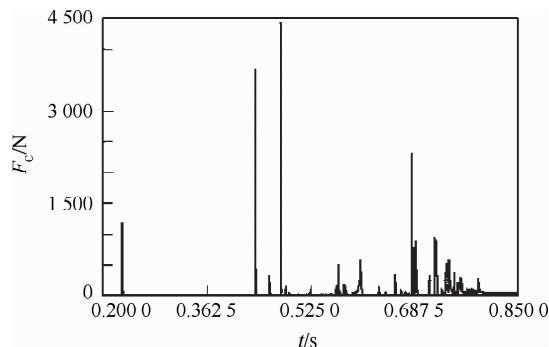
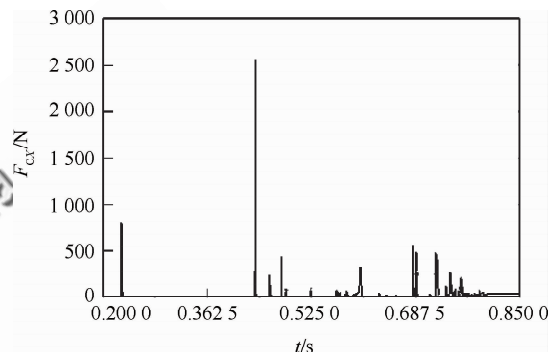


图 7  $F_C$  及各分力随  $\alpha$  的变化曲线 ( $v_r=1.0$  m/s,  $d=0$  mm)

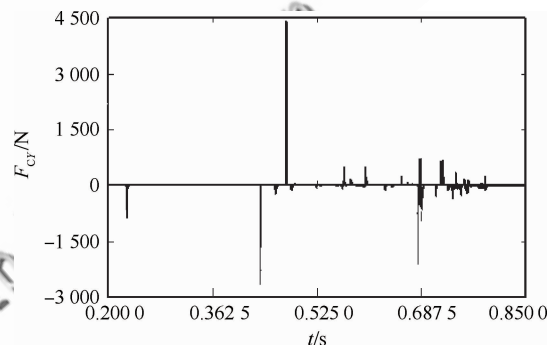
Fig. 7  $F_C$  and its component forces vs  $\alpha$  ( $v_r=1.0$  m/s,  $d=0$  mm)



(a) Response curve of  $F_C$



(b) Response curve of  $F_{Cx}$



(c) Response curve of  $F_{Cy}$

图 8 各碰撞力响应曲线 ( $v_r=1.0$  m/s,  $\alpha=15^\circ$ ,  $d=0$  mm)

Fig. 8 Response curves of each collision ( $v_r=1.0$  m/s,  $\alpha=15^\circ$ ,  $d=0$  mm)

知  $F_C$  随之变化,因此得到的  $F_C$  曲线具有多次峰值,与理论推导相符。由图 8(b) 和 8(c) 可知,  $F_{Cx}$  始终为正,并且逐渐减小至零;  $F_{Cy}$  数值较大并沿零轴跳动。由此可得:加油锥套会因多次二次碰撞上下摆动,  $\alpha$  越大摆动越剧烈,对  $F_{Cy}$  的影响越大。

图 9 给出了对接成功时的受油机与加油锥套的速度变化曲线:在一定的摆角下,受油插头首先与加油锥套内锥面接触,沿着内锥面滑入注油口,两者间的运动满足式 (9),相对速度逐渐减小,变化趋势与图 8(a) 中  $F_C$  的变化相符。随后,两者的速度曲线开始重合,加油锥套内部的自锁装置

启动,加油锥套锁紧受油插头与受油机同速前进,直至相对速度为零;对接成功后,受油机进行减速与加油机同速飞行。

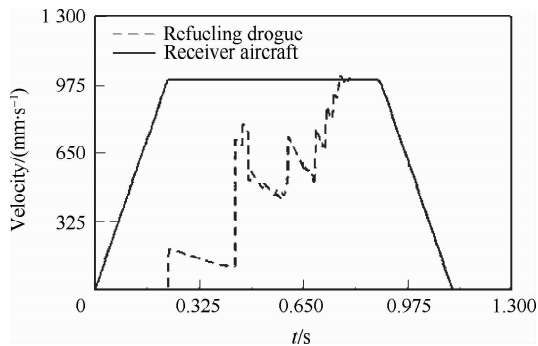


图9 受油机与加油锥套速度响应曲线 ( $v_r = 1.0 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $d = 0 \text{ mm}$ )

Fig. 9 Response curves of the velocity of refueling drogue and receiver aircraft ( $v_r = 1.0 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $d = 0 \text{ mm}$ )

通过仿真得到,随着 $\alpha$ 的增大,对接的时间逐渐增加,加油锥套速度变化越来越剧烈;当 $\alpha > 15^\circ$ 时,加油锥套与受油装置对接失败,因此可得在 $v_r = 1.0 \text{ m/s}$ ,  $d = 0 \text{ mm}$ 时成功对接的最大俯仰角 $\alpha_{\max} = 15^\circ$ ,仿真结果与真实试验结果相符合。

#### 4.3 中心偏距 $d$ 的影响

图10给出了 $v_r = 1.0 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ 时 $F_C$ 及其分力随 $d$ 的变化关系曲线。在仿真分析中, $d$ 沿 $Y$ 方向逐渐增大,由曲线可知, $F_{CY}$ 随之增大,且在对接过程中起主导作用。由此可得,在 $d \leq 85 \text{ mm}$ 时, $F_C$ 随着 $d$ 增加逐渐增大;由仿真可知,在 $d > 85 \text{ mm}$ 时,对接失败, $d$ 对 $Y$ 方向分力影响最大,大小变化与 $F_C$ 变化一致。

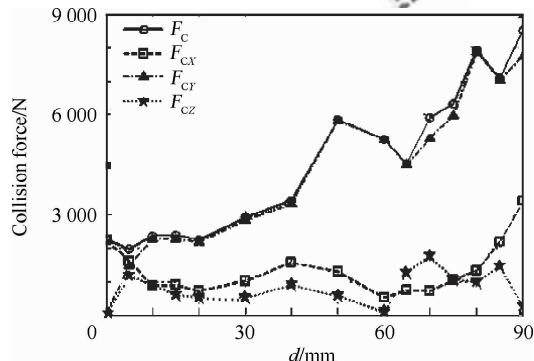


图10  $F_C$ 及各分力随 $d$ 的变化曲线 ( $v_r = 1.0 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ )

Fig. 10  $F_C$  and its component forces vs  $d$  ( $v_r = 1.0 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ )

## 5 结论

1) 在受油接头与加油机伞撞击时,将会出现二次撞击现象,撞击位置越靠近加油锥套根部,出现二次撞击次数越多。

2) 初始相对速度 $v_r$ 、加油锥套俯仰角 $\alpha$ 和相对偏距 $d$ 对碰撞力和速度响应均有着关键的影响。初始相对速度决定了理想对接下的碰撞力,随着初始相对速度的增加碰撞力逐渐增大;而加油锥套俯仰角和中心偏距决定了 $X$ 与 $Y$ 方向碰撞分力和速度响应时间。

3) 为了实现成功对接,加油锥套的空间位置和姿态可在一定范围内变化,但超出一定范围后将造成对接失败。结果表明:在 $\alpha = 0^\circ$ ,  $d = 0 \text{ mm}$ ,  $v_r = 0.6 \sim 3.0 \text{ m/s}$ 范围内,产生的最大碰撞力 $F_{C_{\max}} = 9\ 118.5 \text{ N}$ ;在 $v_r = 1.0 \text{ m/s}$ ,  $d = 0 \text{ mm}$ 时,  $\alpha_{\max} = 15^\circ$ ,  $F_{C_{\max}} = 5\ 608.6 \text{ N}$ ;在 $v_r = 1.0 \text{ m/s}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ 时,  $d_{\max} = 85 \text{ mm}$ ,  $F_{C_{\max}} = 7\ 867.0 \text{ N}$ 。

未来将研究空气流场给对接带来的气体动力学方面的影响,如紊流、湍流及加油机尾涡对加油锥套和受油机飞行姿态的影响等,进一步探讨受油装置由于对接引起的动力学行为。

## 参考文献

- [1] Ribbens W B, Saggio F, Wierenga R, et al. Dynamics modeling of an aerial refueling hose & drogue system. AIAA-2007-3802, 2007.
- [2] Zhu Z H, Meguid S A. Elastodynamic analysis of aerial refueling hose using curved beam element. AIAA Journal, 2006, 44(6): 1317-1324.
- [3] Hu M Q, Nie X, Wang L M. Determination of hose static catenary shape in "probe-drogue" in-flight refueling system. Journal of Air Force Engineering University: National Science Edition, 2009, 10(5): 22-26. (in Chinese) 胡孟权, 聂鑫, 王丽明. "插头-锥管"式空中加油软管平衡拖曳位置计算. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(5): 22-26.
- [4] Hu B, Huang Q Q, Zhou H. Anti-collision property simulation of tanker aircraft drogue. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(23): 94-97. (in Chinese) 胡斌, 黄其青, 周昊. 加油机伞抗撞击性能仿真. 航空制造技术, 2009(23): 94-97.
- [5] Waishek J, Dogan A, Blake W. Derivation of the dynamics equations of receiver aircraft in aerial refueling. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2009, 32(2): 585-

- 598.
- [6] Dogan A, Sato S, Blake B. Flight control and simulation for aerial refueling. AIAA-2005-6264, 2005.
- [7] Sui C C, You Y, Yang Y T, et al. Modeling and simulation of in-flight fueling for a new type of fighter. Journal of System Simulation, 2005, 17(6): 1336-1338. (in Chinese)  
隋成城, 由勇, 杨永田, 等. 新型歼击机空中加油飞行仿真建模研究. 系统仿真学报, 2005, 17(6): 1336-1338.
- [8] Dong F X, Hong J Z. Review of impact problem for dynamics of multi-body system. Advances in Mechanics, 2009, 39(3): 352-359. (in Chinese)  
董富祥, 洪嘉振. 多体系统动力学碰撞问题研究综述. 力学进展, 2009, 39(3): 352-359.
- [9] Zhao Y, Cao X B, Shao C X. Power dissipation allocating of buffer component in space docking mechanism. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(3): 438-442. (in Chinese)  
赵阳, 曹喜滨, 邵成勋. 空间对接机构缓冲元件吸能分配. 振动工程学报, 2000, 13(3): 438-442.
- [10] Eberhard P, Hu B. Advanced contact dynamics. Nanjing: Southeast University Press, 2003: 77-84. (in Chinese)  
彼得·艾伯哈特, 胡斌. 现代接触动力学. 南京: 东南大学出版社, 2003: 77-84.
- [11] Hunt K H, Crossley F R E. Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact. Journal of Applied Mechanics, 1975, 42(2): 440-445.
- [12] Bilimoria K D, Mueller E R, Frost C R. Handling qualities evaluation of pilot tools for spacecraft docking in Earth orbit. AIAA-2009-5665, 2009.
- [13] Saban D, Whidborne J F. Modeling of wake vortex effects for unmanned air vehicle simulations. AIAA-2009-5686, 2009.
- [14] Shi M Q. Study on multi-contacts with ADAMS. Computer Engineering and Applications, 2004, 39(3): 220-222. (in Chinese)  
石明全. 基于 ADAMS 的多接触问题研究. 计算机工程与应用, 2004, 39(3): 220-222.
- [15] Fravolini M L, Ficola A, Napolitano M R, et al. Development of modeling and control tools for aerial refueling for UAVs. AIAA-2003-5798, 2003.

#### 作者简介:

**张雷雨** 男, 博士研究生。主要研究方向: 机械动力学、机构学等。

Tel: 010-82339698

E-mail: zhangleiyu1988@126.com

**张洪** 男, 高级工程师。主要研究方向: 燃油动力系统。

Tel: 028-66329515

E-mail: zhangh\_2008@hotmail.com

**杨洋** 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 机械动力学、精密机械控制、医疗机器人。

Tel: 010-82338386

E-mail: yang\_mech@buaa.edu.cn

**黄龙** 男, 硕士研究生。主要研究方向: 机械动力学, 机构学。

Tel: 010-82339698

E-mail: huanglongin@126.com

# Dynamics Modeling and Simulation of Docking Process in Aerial Refueling

ZHANG Leiyu<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>2</sup>, YANG Yang<sup>1,\*</sup>, HUANG Long<sup>1</sup>

1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China

2. Electromechanical Department, AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610041, China

**Abstract:** The success of an aerial refueling task depends on the successful docking between the refueling drogue and the probe of the receiver aircraft. The study of contact dynamic behaviors during the process is the prerequisite to realize successful docking. A dynamics model of the docking process is established according to the multi-body dynamics theory to obtain the generalized velocity between the refueling drogue and the receiver aircraft. The relative velocities among local contact points are obtained through the contact dynamics model that has been established. Based on the nonlinear continuum collision theory, this paper proposes a calculation method of the collision force during the docking process. Meanwhile, a virtual prototype for docking is created by means of software ADAMS. The response curves of the collision force and velocity are obtained through dynamic simulations of the virtual prototype. Meanwhile, the specific ranges of each parameter in a successful docking are obtained. The results indicate that there are three main parameters that affect the docking process: the initial relative velocity, the pitch angle of the refueling drogue and the centerline offset between the refueling drogue and the probe. The study is significant to the docking process and receiver aircraft navigation in an aerial refueling.

**Key words:** aerial refueling; docking; contact dynamics; nonlinear continuum collision theory; collision force