

加油机伞抗撞击性能仿真

Anti-Collision Property Simulation of Tanker Aircraft Drogue

西北工业大学航空学院 胡 斌 黄其青
航宇救生装备有限公司 周 昊

[摘要] 以加油机伞为研究对象,建立碰撞动力学分析有限元模型,对加油机伞与加油机受油接头相互碰撞的过程进行了动力学仿真。分析了加油机伞与受油接头之间的撞击力、加油机伞的结构应力以及骨架之间限位钢丝绳的拉力,探讨加油机伞在撞击过程中的动响应规律,并指出了可能导致加油机伞失效的薄弱环节。

关键词: 加油机伞 有限元 仿真

[ABSTRACT] By taking the tanker aircraft drogue as a research object, the finite element model of collision dynamic analysis is set up, and the dynamic simulation is performed on the collided process of the tanker aircraft drogue and the oil joint of tanker aircraft. The collision force between the tanker aircraft drogue and the oil joint is analyzed, as well as the structural stress of the tanker aircraft drogue and the tension of the position limit wire ropes among frames. The dynamic response rule of the tanker aircraft drogue in the collision process is investigated. In addition, the research points out the weakness which could result in the nonserviceable of the tanker aircraft drogue.

Keywords: Tanker aircraft drogue Finite element Simulation

1 加油机伞简介

加油机伞是保证受油机能够实现与加油机顺利对接加油的非常重要的设备。该伞平时收在加油机吊舱内,加油时与加油软管一起从加油吊舱里释放出来,加油软管在加油机伞的作用下保持一定的稳定性,并长时间在高速拖曳状态下工作,为重复使用的产品。当受油机以一定的相对速度靠近加油机并与其进行对接时,加油接头在受到受油接头的撞击后能向加油吊舱内回缩和上下摆动,最终使受油接头能够沿伞架内锥的斜面滑入加油口,此过程很容易使受油机受油接头与加油机伞不断发生撞击而影响其性能。因此,对加油机伞的设计,首先必须保证有足够的强度。在与加油机受油接头相

互撞击的过程中,加油机伞的伞架不得断裂、限位钢丝绳不得拉断,伞架的断裂与限位钢丝绳的拉断将会造成加油机伞散架,从而导致对接失败而无法加油。同时,在撞击过程中,加油机伞的结构不得有明显的变形,因变形不仅严重影响加油机伞的使用寿命,并可能导致加油失败。

传统的方法都是在产品设计完成后,制造出样品进行试验,然后根据试验结果进行不断完善设计,这种设计方法费时费力,难以在设计阶段发现不足,并可能导致设计出现反复。近些年来,随着计算机技术迅速发展和非线性有限元仿真技术的成熟,特别是大量专用和通用的有限元仿真软件的不推出,为复杂结构的动力学仿真^[1]提供了更加有效的途径。数值仿真可以对产品的结构强度进行预评估及优化,减少试验验证次数,缩短产品开发周期,降低开发费用,提高设计质量。在动力学研究中,数值仿真正发挥着越来越重要的作用。

本文采用大型有限元软件 MSC/Dytran^[2]作为主要分析工具,对加油机伞与受油机受油接头相互撞击过程进行数值仿真,探讨加油机伞在撞击过程中的动响应规律。

2 瞬态冲击理论与碰撞接触算法

对动力学而言,位移 u 是时间 t 的函数,记 \dot{u} 和 \ddot{u} 分别为速度和加速度矢量,按有限元的组集方法,整体的动力平衡方程可以表示为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} = ku + F, \quad (1)$$

式中, \ddot{u} 、 \dot{u} 和 u 分别表示为结构节点加速度矢量、节点速度矢量和节点位移矢量, F 表示系统所受的外力,阻尼 c 称为结构的单元阻尼矩阵。影响阻尼的因素极为复杂^[3],研究表明,阻尼严格地说可以分为结构阻尼与材料阻尼。而有限元分析过程中,往往不将它们加以区别,而仅以阻尼 $c = \int N^T \mu N dV$ 表示,它们分别由结构形式和材料固有特性系数 μ 加以表征,即假定无阻尼自由振动的特征矢量也能关于 c 正交,即将阻尼矩阵 C 转化为质量矩阵 M 和刚度矩阵 K 的线性组合,可以表示为:

$$C = \alpha M + \beta K, \quad (2)$$

式中, α 和 β 为待定系数, 并假定他们满足下列关系式 $\alpha + \beta\omega_i^2 = 2\zeta_i\omega_i$, 其中 ζ_i 为阻尼比, ω_i 为结构固有频率; 一般用最低两阶的阻尼比 ζ_1 和 ζ_2 , 这样由 2 个方程便可近似地给出 α 、 β , 再将 α 、 β 代入上式, 即可得到其他的振型阻尼比:

$$\xi_i = \frac{\alpha + \beta\omega_i^2}{2\omega_i}. \quad (3)$$

碰撞接触问题在仿真算法是不易处理的, 实际上, 碰撞就是动态接触过程, 在此过程中, 碰撞结构间的接触边界不断发生变化, 接触边界事先无法预知, 因此对结构撞击进行仿真分析时, 每一时间步都要对碰撞结构间的接触状态进行判断。

为了模拟结构之间的碰撞过程, 应在可能发生接触的结构之间定义接触关系, 这种关系要有效地模拟结构之间的相互接触过程。本文计算主要涉及表面-表面接触类型, 采用主从面接触算法, 主从面定义在两个不同的结构上, 其中主面(Master Surface)上节点称为主节点; 从面(Slave Surface)上节点称为从节点。在初始的状态情况下, 主从面之间不允许有初始接触, 必须保证相切或相隔一段距离(见图 1), 确保没有任何重叠。

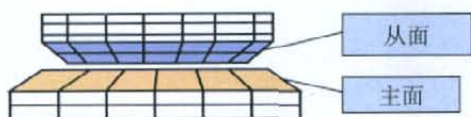


图 1 主从接触面

Fig.1 Master-slave surface

求解运算过程, 每一时间步, 首先检查各从节点是否穿透主面, 如果没有穿透则计算工作继续进行, 对该从节点不做任何处理; 若发生穿透, 则采用罚函数进行处理, 即在该从节点与被穿透主面之间引入一个界面接触力, 称为罚函数值, 其大小与穿透深度、主面刚度成正比, 如:

$$f_s = -lk_n, \quad (4)$$

式中, f_s 是从节点与接触节点之间的法向接触力矢量, l 是穿透深度, n_i 是接触点处主面 S_i 的外法线单位矢量, k_i 是主面 S_i 的刚度因子, 具体计算如下式:

$$k_i = \frac{fK_iA_i^2}{V_i}, \quad (5)$$

式中, f 为接触刚度比例因子, K_i 、 V_i 和 A_i 分别为主面 S_i 所在单元的体积膨胀模量、体积和主面面积。

对称罚函数法具有对称性、动量守恒准确、不需要

碰撞和释放条件等优点, 很少激起网格沙漏效应。

3 有限元模型建立

有限元模型是依据加油机伞的图纸, 而且是根据所分析的问题特点进行简化而建立的。加油机伞主要由伞衣和伞架等部分组成, 如图 2 所示。在建立有限元模型时, 主要对其结构部分进行简化, 伞衣以及与伞架相连的加油接头、加油软管以质量参与方式进行简化。针对撞击问题的特点增加受油接头模型, 有限元模型如图 3 所示。

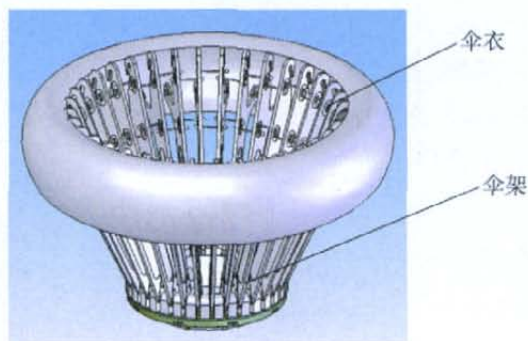


图 2 加油机伞示意图

Fig.2 Tanker aircraft drogue

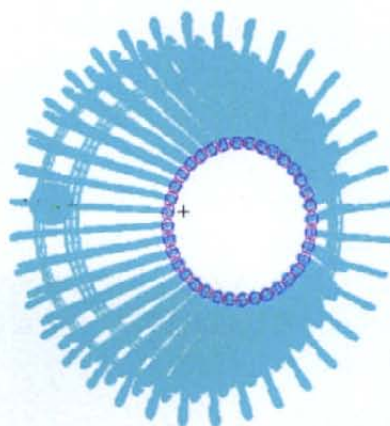


图 3 有限元模型图

Fig.3 Finite element

4 技术条件及要求

4.1 加油机伞位置技术指标

加油机伞与吊舱软管及加油接头配套, 在加油包线范围内和全拖曳位置如图 4 所示, 具有以下性能:

(1) 稳定性。具有良好稳定性;

(2) 下沉高度。在加油包线范围内, 稳定伞纵轴相对吊舱水平纵轴垂直距离不大于 5m。

4.2 相对速度

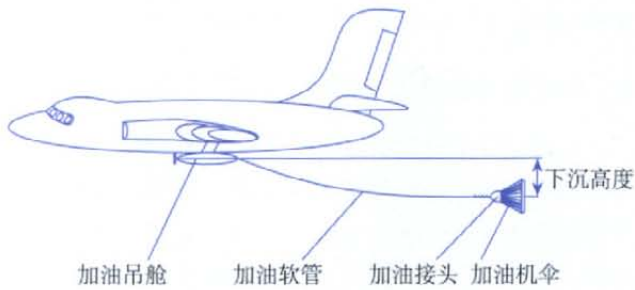


图4 加油机伞全拖状态

Fig.4 Fully dragged state of tanker aircraft drogue

加油机伞与受油插头对接相对速度为 0.5~1.8m/s。

4.3 对接撞击原理

加油时,首先要将加油接头与受油接头对接上,其对接撞击过程如图5所示。

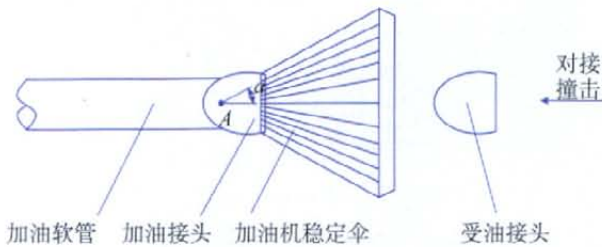


图5 对接加油状态示意图

Fig.5 Butt refueling state

图中, A 点为加油接头的球形轴心; α 为加油接头可以上下摆动的角度,且 $\alpha \leq 22.5^\circ$; 加油机稳定伞和加油接头总重 $\leq 48\text{kg}$; 加油软管全长 24.5m, 油管下沉高度为 2.5~5m, 充满燃油的油管总重 $\leq 85\text{kg}$ 。

受油机对接时,加油接头在受到受油接头的撞击后能向加油吊舱内回缩和上下摆动,最终使受油接头能够沿伞架内锥的斜面滑入加油口。

5 撞击过程分析

根据伞架结构与受油接头的结构尺寸,当受油接头与伞架相互撞击时,可能与一根骨架接触相撞或与两根骨架接触相撞。对加油机伞的结构影响而言,在其他条件都相同的情况下,显然受油接头与一根骨架接触相撞要比与 2 根骨架接触相撞严酷的多。对于受油接头与一根骨架接触相撞情况来说,可能撞在骨架正面任何位置或骨架侧棱的任何位置,这些都需要进一步研究分析。

6 计算状态及结果

根据对加油机伞与受油接头撞击过程的分析,选取

受油接头与一根骨架相撞,且撞击不同位置进行仿真计算分析,具体选取的状态如表 1 所示。

运用所建立的有限元模型,采用 MSC 的动力学分析模块 Dytran 对所选取的各个计算状态进行仿真计算,得出各个状态的计算结果。各个状态的加油机主要构件(骨架)最大应力和钢丝绳所受最大拉力以及撞击接触面最大撞击力如表 1 所示;文中给出了两个较为典型

表 1 计算状态及结果

状态	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4	状态 5	状态 6
撞击位置	骨架正面 上部	骨架侧棱 上部	骨架正面 中部	骨架侧棱 中部	骨架正面 下部	骨架侧棱 下部
骨架最大应力 /MPa	47.0	59.1	72.1	55.0	108.0	102.0
钢丝绳最大拉力 /N	793.8	1 474.2	1 348.2	2 557.8	1 323.0	1 852.2
最大撞击力 /N	3 025	3 583	7 035	5 850	3 560	4 370

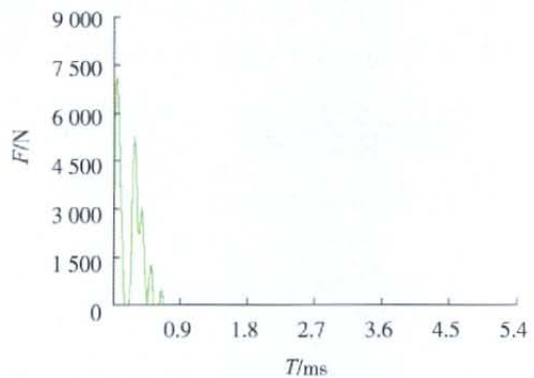


图6 状态3力-时间曲线

Fig.6 State 3 force-time curve

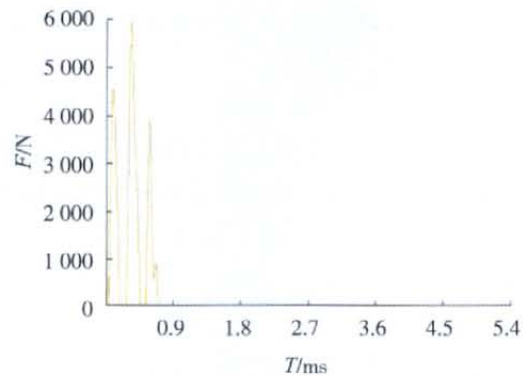


图7 状态4力-时间曲线

Fig.7 State 4 force-time curve

状态的撞击接触面撞击力随时间变化的曲线和该状态下各时刻的结构应力,如图6~9所示。

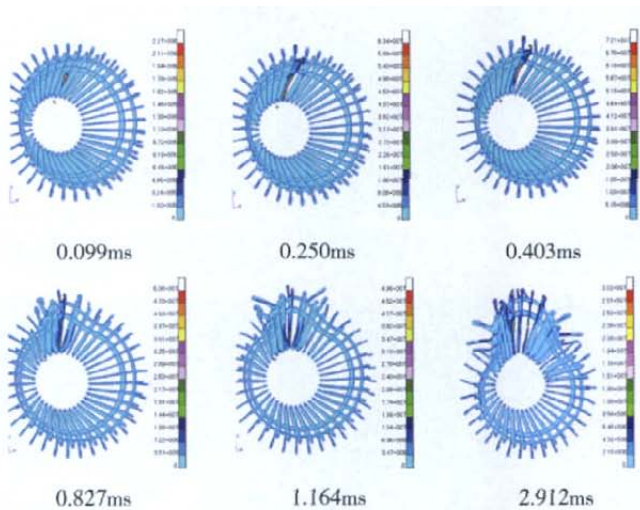


图8 状态3撞击过程结构应力变化
Fig.8 State 3 stress change of structure during collision

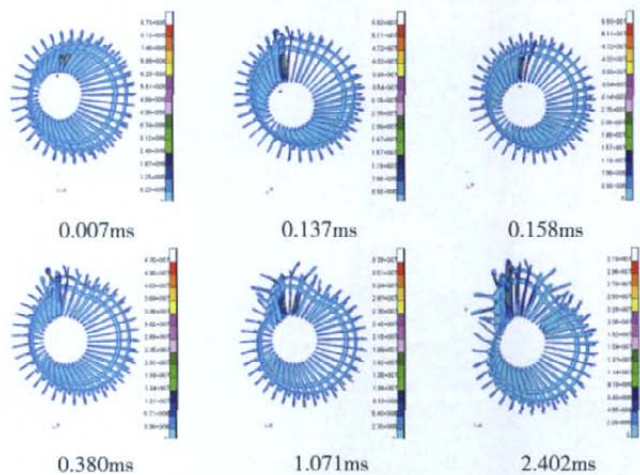


图9 状态4撞击过程结构应力变化
Fig.9 State 4 stress change of structure during collision

7 结果分析与结论

通过以上对加油机伞碰撞动力学数值仿真分析,可以得到如下结论:

① 撞击位置不同,结构响应也不相同。在撞击过程中,加油机伞骨架最大应力为108MPa,远小于材料的屈服极限,撞击力不会造成骨架明显变形或断裂破坏;限位钢丝绳所受的最大拉力为2 557.8N,小于其最小破坏力2.94kN,限位钢丝绳不会破坏,限位钢丝绳强度满足

要求,但其余量较小;

② 撞击力与相撞的部位密切相关,不同的撞击位置,其响应结果亦不相同,撞击接触面最大撞击力为7035N,且发生在受油接头撞击在骨架的正面中部位置;

③ 在受油接头与加油机伞撞击时,将会出现二次撞击现象,撞击位置越靠加油机伞上部,出现二次撞击次数越多;

④ 随着仿真技术的进步和研究的深入,仿真分析可以达到减少试验验证次数,缩短产品开发周期^[4],降低开发费用,优化设计,提高设计质量的目的。

参 考 文 献

- [1] 蒋耘生. 鸟撞冲击动力学的有限元数值仿真研究[D]. 西安:西北工业大学,2002.
- [2] 刘建成,顾永宁. 基于整船整桥模型的船舶碰撞数值仿真. 工程力学,2003,20(5):155-161.
- [3] 王自力,顾永宁. 船舶碰撞动力学过程的数值仿真研究. 爆炸与冲击,2001,21(1):29-34.
- [4] 周昊,黄孝武,韩冰. 弹射座椅冲击性能仿真研究. 中航救生,2007,2:17-20.

(责编 金仰)

(上接第93页)

③ 电子束焊接方法结合适当的变形控制措施能够实现整体叶盘的焊接。

参 考 文 献

- [1] 马建宁,张定华,王增强,等. 大型飞机用发动机的特点及关键制造技术. 航空制造技术,2008(13):56-60.
- [2] 陈光. 一种整体叶盘的加工方法——线性摩擦焊. 航空工程,1999(4):14-15.
- [3] 马铁军,张勇,杨思乾,等. TC4合金线性摩擦焊摩擦时间与变形量的关系. 热加工工艺,2007,36(7):10-11.
- [4] 马铁军,张学军,杨思乾,等. TC4钛合金线性摩擦焊接头的冲击韧性及断口特征. 航空材料学报,2007,27(6):40-44.
- [5] 马铁军,杨思乾,张勇,等. TC4线性摩擦焊接头的力学性能及组织变化特点. 焊接学报,2007,28(10):17-20.
- [6] 刘佳涛,刘金合,杨思乾,等. Ti-6Al-4V线性摩擦焊实验研究. 热加工工艺,2007,26(3):23-24.
- [7] 黄春峰. 整体压盘结构及发展趋势. 航空发动机,2005(4):96-101.
- [8] 范志强,马枚,王荣桥. 航空发动机整体叶盘优化设计. 燃气涡轮试验与研究,2000,13(4):27-30.
- [9] 许鸿吉,尹丽香,李晋炜,等. TC4钛合金电子束焊接接头组织和性能. 焊接学报,2005,26(11):43-46.
- [10] 温戈. 大型Ti-102榫类零件的机械加工及焊接变形控制. 飞机设计,2002(1):53-57.

(责编 小颖)