

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.04.012

飞机机身内供油管路柔性接头单侧 泄漏故障数值研究

Numerical Study on Unilateral Flexible Coupling Leakage of Refuel Tube within Fuselage Contour

江 华 龚 昊 葛 锐 张 斌 卞 刚 / JIANG Hua GONG Hao GE Rui ZHANG Bin BIAN Gang
(上海飞机设计研究院, 上海 201210)
(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘 要:

基于 Fluent 软件,采用数值仿真方法研究了飞机机身内主供油管路与 APU 供油管内管管路柔性接头发生极端泄漏时的特征,以及泄漏速率与工作压力的定量关系。当管路柔性接头单侧密封圈缺失时,管路燃油泄漏量均与工作压力呈线性正相关关系;除管内工作压力外,燃油泄漏速率还受管路几何尺寸和喉道尺寸的显著影响,但柔性接头卡套缺失不构成影响燃油泄漏速率的主要因素。

关键词: 供油管泄漏;数值仿真方法;柔性接头

中图分类号: V228

文献标识码: A

OSID:



[Abstract] For the APU/main engine refuel tube within fuselage contour, some critical leakage malfunctions were studied by numerical simulation method based on Fluent. After analyzing the flow feature of APU/main engine refuel tube leakage, which caused by the missing of one seal within the inner flexible coupling, the relationship between leakage flux and refuel pressure can be concluded that the leakage flux increases with refuel pressure increasing. Besides refuel pressure, the leakage flux is influenced obviously by the tube size and the tube manufacture precision, while the simulation result also shows that the simultaneous missing of a clamshell body affects the leakage flux little.

[Keywords] refuel tube leakage; numerical simulation method; flexible coupling

0 引言

民用客机的辅助动力装置(Auxiliary Power Unit,简称 APU)通常安装在机身尾部,而在飞机油箱与机翼一体化设计中,为给 APU 供油,需要在机身内部布置燃油供油管连接机翼油箱与 APU 本体,尤其对于尾吊型飞机,其主发动机的供油管路也需要穿过机身^[1-2]。为满足适航条款 CCAR25.863^[3],保证这些处在机身内的燃油管路充分安全,避免燃油泄漏到机身,燃油系统设计时,飞机燃油系统穿过机身的供油管路均采用不锈钢双层套管形式,管段与管段采用双层不锈钢柔性接头连接,接头可承受

一定程度的轴向与角度变形。机身内双层套管和柔性接头的设计,保证飞机在正常飞行时不会存在油气进入其它部位的危险,在可生存坠撞情况下,也能避免因机身内燃油导管的泄漏导致的起火危险。当内层的供油管发生故障出现燃油泄漏时,外层管路可收集并存储泄漏的燃油,避免燃油及油气进入机身增压舱内。

由于供油管失效导致的燃油泄漏故障是飞机运行中可预期的问题,因此飞机运营商会对这些供油管路工作状态采取定检措施,检查措施一般为打开与外层套管连接的排放杆端部排漏阀,从排放杆排漏阀可排出供油管路外层套管内积存的泄漏燃油,

通过观察燃油泄漏量与泄漏速率,可以判断供油管路的工作状态。

燃油泄漏量是直接反应供油管路工作状态的重要指标,为便于维修人员迅速判断故障类别,飞机主制造商在制定供油管路检查操作程序时,需要给出燃油泄漏定量的判断标准。由于不同飞机采用的供油管路型号存在差异,飞机主制造商需针对各个型号的飞机供油管路故障状态开展研究,摸清供油管路在不同故障状态下所对应的燃油泄漏特性。

开展上述研究的方式主要通过试验或者通过运营经验积累,这些方式获得的数据可靠但能够捕捉的故障类别有限,成本很高,效率较低,且难以对泄漏机理开展细致研究。一旦在飞机实际运营中出现供油管路极端泄漏的工况,轻则造成燃油系统供油不畅,重则导致飞机动力装置无法正常工作,损失不可估量。因此,若能在飞机供油子系统设计时,建立方法提前预测供油管路可预期的与极端泄漏故障相对应的燃油泄漏量,给出可接受的设计裕度,保证燃油系统在一些可预期的供油管路泄漏故障发生时仍能够正常工作,这对提高燃油系统可靠性具有重要意义。

随着计算机技术的提高,数值计算方法逐渐成为替代物理实验的常用分析方法,且模拟的准确度越来越高。尤其在航空工程领域的流体仿真方面,被应用的商业软件具有很高的成熟度,例如 ANSYS FLUENT, Flowmaster 等^[4-6]。对于其他工程领域的流动问题,数值仿真方法同样已被广泛应用,比如井下设备密封环泄漏预测^[7],工程装备液压系统泄漏仿真^[8]、罐式车辆运输毒性气体泄漏仿真^[9]、海堤越浪数值模拟^[10]等。依据流体力学基本原理判断^[11],供油管的燃油泄漏流动现象涉及的流动特征较为简单,不涉及高速流、旋转流等复杂流动现象,在湍流模型的选择上无特殊要求,因此应用数值计算方法开展供油管路的泄漏故障研究在技术上是可行的。

本文利用 FLUENT 流动仿真软件针对 APU 供油管路及主发动机供油管路的代表性极端泄漏故障开展研究,获得飞机供油管路在代表性极端故障情况下的燃油泄漏量数据及相关结论,本文研究结果可为飞机供油子系统设计提供参考。

1 问题与方法

本文研究的供油管内管柔性接头结构形式如图

1 所示,该柔性接头使用圈密封,具有无螺纹、柔性、自带电搭接等特性,符合航空标准,已在多型飞机的燃油系统和环控系统上使用。它由管套、套筒、卡套、密封圈等标准件组成。其中,卡套用于连接管路和提供电搭接,套筒和密封圈组合构成密封,管套用于形成柔性接头基础。外管结构形式与内管完全一致,在此不再赘述。

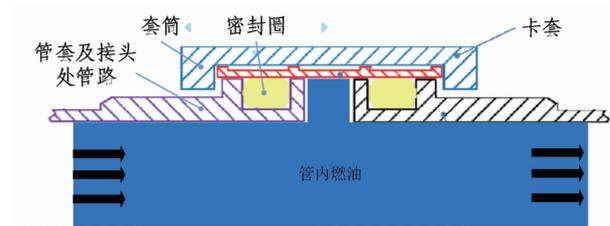


图1 供油管内管柔性接头结构示意图

APU 供油管或者主供油管的泄漏故障种类繁多,其中内管柔性接头单侧密封圈缺失故障是代表性的极端泄漏故障之一,通常由工人误操作或密封圈断裂引起,本文以该故障为研究对象,研究在该极端故障下的燃油泄漏特性,该故障出现时,由密封圈与套筒形成的密封结构失效,燃油将通过柔性接头零组件之间的间隙往外泄漏,图2给出了发生单侧密封圈缺失故障时燃油流出示意图。

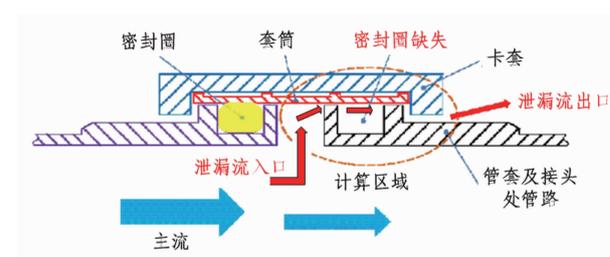


图2 供油管内管柔性接头单侧密封圈缺失故障示意图

对于泄漏量的仿真计算,建立燃油泄漏通道的几何模型是最重要的前置条件,为保证泄漏通道的几何模型能够反映实际情况,本文建模时采用的数据均是通过对供油管路及柔性接头的库存产品进行抽样测量获得,其中两种类型的柔性接头产品各随机选择了两套,每套两个接头,最终针对故障1-APU 供油管内管柔性接头单侧密封圈缺失故障、故障2-主供油管内管柔性接头单侧密封圈缺失故障建立几何模型如图3、图4所示。图中两种模型在几何结构特征上完全一致,只在几何尺寸上存在区别。

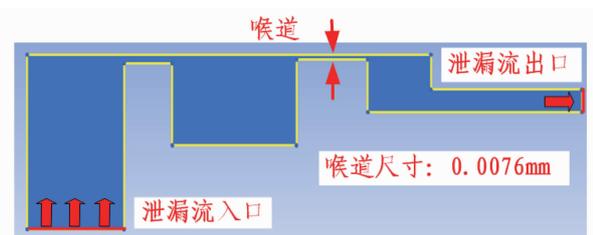


图 3 故障 1-APU 供油管内管柔性接头单侧密封圈缺失故障

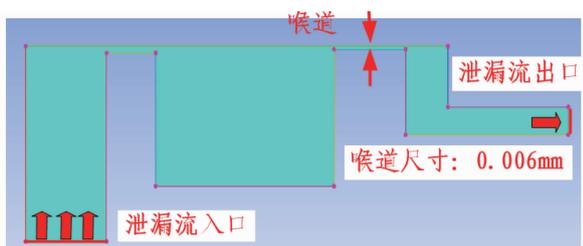


图 4 故障 2-主供油管内管柔性接头单侧密封圈缺失故障

由于通常密封圈缺失故障与卡套损伤缺失会同时发生,即故障 3,通过分析柔性接头的装配关系发现,卡套缺失故障将导致泄漏流的出口边界进一步扩大,但主要泄漏流道保持不变,因此本文通过仅改变模型出口边界条件来模拟故障 3 情况,图 5 给出了故障 3 的计算模型边界条件设置示意图。

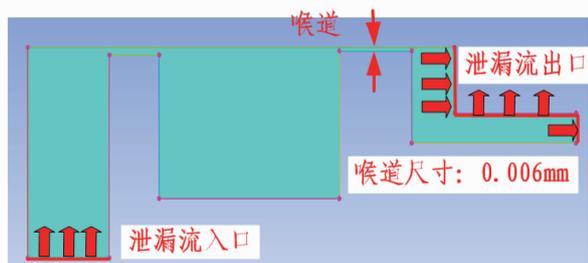


图 5 故障 3-主供油管内管柔性接头单侧密封圈缺失和卡套损伤缺失故障

2 软件介绍与计算工况

本文采用 ANSYS-ICEM 软件进行结构化网格划分,求解器采用 ANSYS-FLUENT 软件,选择二维轴对称计算模块模拟圆形管道流动,湍流模型选择 *k-e* 模型,选择标准壁面函数作为近壁面处理函数,加速近壁面区域的流动方程求解,计算后处理采用 ANSYS-CFX-post。

本文采用进口总压与出口静压进行边界条件设置,具体数值源自供油管内实际工作压力和供油管外工作压力(按照地面检修取值),最终本文仿真工

况及参数汇总见表 1。

表 1 仿真工况及参数汇总表

| 故障模式编号 | 故障描述 | 供油管内工作压力/psi | 供油管外压力/psi |
|--------|----------------------------|------------------------------|------------|
| 故障 1 | APU 供油管内管柔性接头单侧密封圈缺失故障 | 20,25,29.4,35,40,45,50,55,60 | 14.7 |
| 故障 2 | 主供油管内管柔性接头单侧密封圈缺失故障 | 20,25,29.4,35,40,45,50,55,60 | 14.7 |
| 故障 3 | 主供油管内管柔性接头单侧密封圈缺失和卡套损伤缺失故障 | 29.4 | 14.7 |

3 结果

3.1 工作压力 29.4 psi 下故障 1 仿真结果

图 6 显示工作压力 29.4 psi 下故障 1-APU 供油管内管柔性接头单侧密封圈缺失故障仿真结果,观察速度线容易看到,在故障 1 的泄漏流道中,最大速度出现在流道截面最小位置,本文将该位置称为喉道,喉道间隙尺寸为 0.007 6 mm,通过结果后处理得到喉道最大速度 6.55 m/s,平均速度 4.65 m/s,体积流量 1.189 L/min(0.306 9 gal/min)。故障 1 中喉道由密封圈槽远离管端的突起与套筒内壁形成。

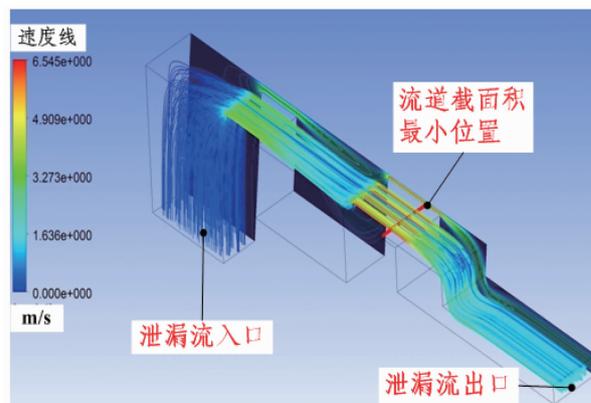


图 6 工作压力 29.4 psi 下故障 1 仿真结果

3.2 工作压力 29.4 psi 下故障 2 仿真结果

图 7 显示的工作压力 29.4 psi 下故障 2 主供油管内管柔性接头单侧密封圈缺失故障仿真结果。观察速度线容易看到故障 2 的泄漏流道中流动特征与故障 1 一致,最大速度同样出现在流道截面最小

位置(喉道),其中喉道同样由密封圈槽远离管端的突起与套筒内壁形成,喉道间隙尺寸为 0.006 mm ,同样通过结果后处理得到喉道位置流体最大速度 4.13 m/s ,平均速度 2.92 m/s ,体积流量 1.274 L/min 。相对故障1,燃油泄漏速率增加 7.15% 。

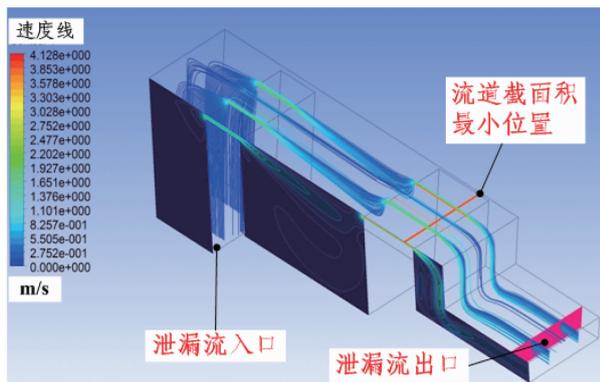


图7 工作压力 29.4 psi 下故障2仿真结果

3.3 泄漏量与工作压力关系

本节对比阐述APU供油管和主供油管内管发生柔性接头单侧密封圈缺失故障(故障1和故障2)时,工作压力对泄漏量的影响。图8显示的是不同工作压力下故障1与故障2泄漏量变化曲线对比显示的工作压力与泄漏量的关系曲线。

对比图8中曲线可以看到:工作压力越大,燃油泄漏量越大,主供油管与APU供油管在 60 psi 工作压力下,达到最大燃油泄漏量,分别为 3.26 L/min 、 2.65 L/min 。主供油管与APU供油管燃油泄漏量较为接近,在 60 psi 工作压力下,故障1和故障2的燃油泄漏量相差最大仅 18.8% 。分析发现这与供油管几何尺寸和喉道尺寸有关,具体分析如下:通过对库存产品的抽样测量发现主供油管柔性接头直径是APU供油管柔性接头直径的 2.2 倍,这有利于主供油管形成较大的泄漏流道截面积,但APU供油管柔性接头喉道尺寸低于主供油管柔性接头,其中,APU供油管柔性接头的泄漏流道的喉道尺寸为 0.0076 mm ,而主供油管柔性接头的喉道尺寸为 0.006 mm ,即APU泄漏流道更易于发生泄漏。此外,由于APU自身几何尺寸相对较小,即对应燃油泄漏流道短,在相同燃油流速下,燃油流动受到的沿程阻力会较小,因此在工作压力一定时,故障1中泄漏流的流速必定大于故障2中流速。以上因素的综合作用使得故障1、2燃油泄漏量接近。

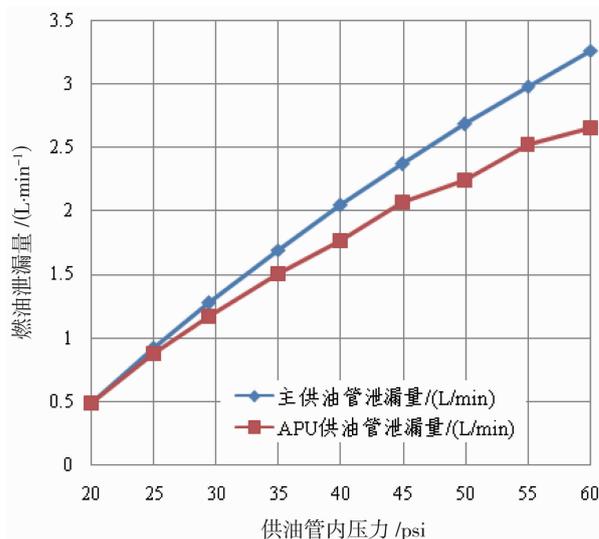


图8 不同工作压力下故障1与故障2泄漏量变化曲线对比

3.4 故障3仿真结果

为了保证研究的延续性,本文通过改变模型出口边界条件来模拟故障3密封圈与卡套同时缺失的故障,即共用故障2几何模型,在仿真模型中通过改变出口边界条件来完成对故障3的仿真计算,本文针对故障3的计算结果如图9所示。工作压力 29.4 psi 下,当出现主供油管内管柔性接头单侧密封圈和卡套损伤缺失故障时,燃油泄漏量为 1.2765 L/min ,相对于工作压力 29.4 psi 下故障2泄漏量 1.2744 L/min ,仅增加 0.16% ,因此可认为柔性接头卡套缺失故障不构成影响燃油泄漏量的主要因素。

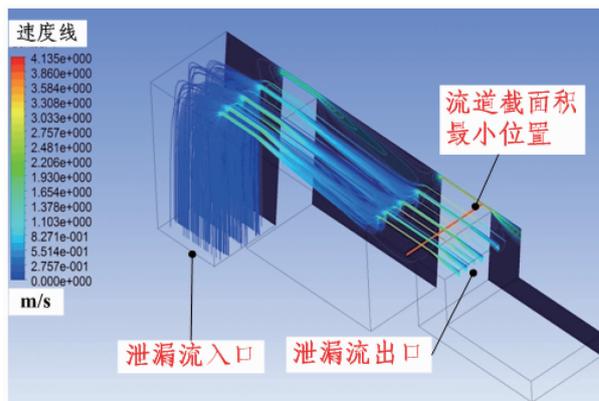


图9 工作压力 29.4 psi 下故障3仿真结果-三维视图

为清楚展示故障3中燃油泄漏流动过程,图10给出在工作压力 29.4 psi 下故障3仿真结果的侧面视图。观察图10中速度线图可以看到,由于缺少卡套的约束,燃油泄漏流直接从出口侧喷出。

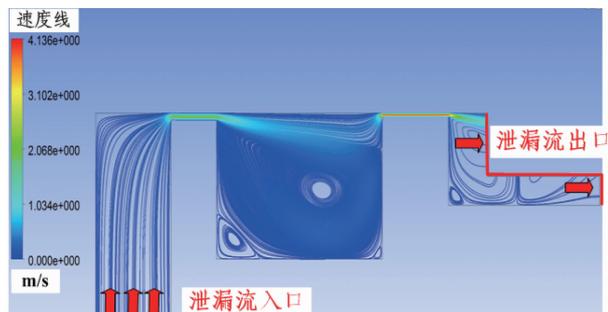


图 10 工作压力 29.4 psi 下故障 3 仿真结果-侧面视图

4 结论

本文研究结果表明,当飞机机身内供油管出现内管柔性接头单侧密封圈缺失故障时:

1) 燃油泄漏流的最大速度产生在密封圈槽远离管端的突起处,该位置流道尺寸最小;

2) 供油管内工作压力越大,燃油泄漏量越大,主供油管与 APU 供油管在 60 psi 工作压力下,达到最大燃油泄漏速率,分别为 3.26 L/min、2.65 L/min;

3) 在供油管几何尺寸和喉道尺寸的共同作用下,主供油管与 APU 供油管燃油泄漏速率接近,工作压力 29.4 psi 下,泄漏速率相差 7.15%,60 psi 工作压力下,达到最大值,相差 18.8%;

4) 卡套缺失不构成影响燃油泄漏量的主要因素。

参考文献:

[1] 陈裕,王勤超.民用飞机的分舱布置设计与分析[J].民用飞机设计与研究,2012(1):13-16.

[2] 杨体浩,白俊强,王丹,等.考虑发动机干扰的尾吊布局后体气动优化设计[J].航空学报,2014(7):1836-1844.

[3] 中国民用航空总局.中国民用航空规章第 25 部:运输类飞机适航标准[S].中国:中国民用航空总局,2011.

[4] 吕亚国.飞机燃油系统计算研究[D].西安:西北工业大学,2006.

[5] 闵兴明,杨小龙,罗铁苟.基于 Flowmaster 的压力加油冲击压力仿真研究[J].直升机技术,2011(3):25-28.

[6] 冯震宙,高行山,刘永寿,等.某型飞机燃油系统数值建模方法与仿真分析[J].飞机技术,2007(5):65-71.

[7] 李鑫.井下设备密封环泄漏预测计算方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

[8] 周小军.基于 AMESim 液压系统泄漏仿真与故障诊断研究[D].长沙:国防科学技术大学,2012.

[9] 崔月凯.基于 FLUENT 二次开发的罐式车辆运输毒性气体泄漏仿真系统研究[D].西安:长安大学,2013.

[10] 王鹏.基于 FLUENT 的海堤越浪数值模拟[D].大连:大连理工大学,2011.

[11] 邢宗文.流体力学基础[M].西安:西北工业大学出版社,1992.

作者简介

江华 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:传热传质。E-mail:jianghua@comac.cc

龚昊 男,博士,工程师。主要研究方向:航空发动机总体。E-mail:gonghao1@comac.cc

葛锐 男,硕士,工程师。主要研究方向:机载系统控制。E-mail:gerui@comac.cc

张斌 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:惰化系统设计。E-mail:zhangbin1@comac.cc

卞刚 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:燃油系统设计。E-mail:biangang@comac.cc