

飞机空气配平系统应力补偿及校核分析

Stress Compensation and Verification on Trim Air System of Aircraft

南京航空航天大学航空宇航学院 于磊 施红 王瑜 蔡玉飞 朱春玲 蒋彦龙
中国商用飞机有限公司上海飞机设计研究院 刘超 杜延平

[摘要] 以某型飞机空气配平系统为研究对象,在分析空气导管结构布置、工作条件、材料物性等基础上,基于梁单元应力计算软件 CAEPIPE 对导管系统应力和位移分布进行仿真,并据此进行补偿设计与优化。同时,对于支撑部件等应力集中区采用 MD NASTRAN 有限元分析软件进行三维应力校核,获得关键部位的三维应力分布云图。该研究工作对于我国飞机空气导管系统的设计优化具有参考价值。

关键词: 空气导管 应力补偿 有限元 应力校核

[ABSTRACT] Based on the analysis of structure dimensions, operating conditions, material properties of the trim air duct system, the distribution of stress tensor and the variation of displacements of trim system are obtained by CAEPIPE software with beam element. Meanwhile the design and optimization of compensation of the ducting system are estimated according to the obtained results. On this basis, the three-dimensional stress on the stress concentration zone such as support components of the ducting system are verified by MD NASTRAN software. This work could be helpful for optimization design of China aircraft air duct system.

Keywords: Air duct Stress compensation Finite element Stress verification

配平系统是飞机环控系统的重要组成部分,通过导管将引气系统的热气输入空气混合腔与其他导管导入的冷气混合,使混合腔内空气温度最终满足飞机空调系统的要求,混合后的空气将分别送往驾驶舱及客舱。导管内流动的是高温高压气体,会施加机械应力和热应力于管道;同时导管与机身之间的连接部件还会将飞机载荷分布变化引起的位移和振动传递给管道,影响约束边界,形成附加应力。由于导管穿过机翼、发动机吊挂、机身等多个区域,应力集中引起的管道形变和疲劳破裂,不仅影响环控系统功能的实现,而且会给其他系统的安全带来隐患,故此空气导管系统需具有较高的可靠性。本课题基于 CAEPIPE 和 MD NASTRAN 对配平系统的空气导管进行应力分析和校核,据此获得满足设计要求的

的补偿方案,为空气导管系统设计和优化提供参考。

1 应力分析与补偿

空气配平系统的导管主要由导管、补偿装置、阀门、连接法兰、支撑结构等组成,结构复杂,这决定了研究工作必然是一个由粗到细的过程。目前压力管道应力分析和动力分析方面有 CAEPIPE、CAESAR、MD NASTRAN 等计算软件,其中 CAEPIPE 以其通用管道设计规范、强大的分析功能、友好的界面、丰富的数据库等优异性能为飞机导管应力分析提供了有利的技术保障,其应力计算是基于梁单元模型的;而 MD NASTRAN 软件允许多学科在求解器内核上的集成仿真,可求解线性、非线性、运动、CFD 以及显式非线性动力学等问题,并能够给出实体模型的三维仿真结果。但其计算模型复杂、计算速度慢,任何部件都需数值建模,效率较低。本课题在管道初步设计阶段采用 CAEPIPE 软件进行原始约束和支撑条件下的管道应力分析,获得位移和应力分布结果,在此基础上添加补偿器和约束机构,并反馈给 CAEPIPE 软件重新计算,直至管道能够在许用应力和形变条件下正常工作。为了精确、全面地了解管道及其附件的应力分布,有效预测导管在不同工况和补偿条件下的三维应力分布,采用 MD NASTRAN 对管道关键部位及其附件进行详细仿真计算,并以米塞斯(Von Mises)屈服准则进行强度判定。

2 边界条件和材料特性

空气导管材料为不锈钢,型号为 CRES321 (A312 TP321),密度 $\rho=7\ 900\text{kg/m}^3$,泊松比 $\nu=0.3$, A312 TP321 典型温度下的材料属性、截面属性如表 1~2 所示。计算

表1 A312 TP321 材料属性

温度/°C	弹性模量 E/MPa	线膨胀系数 $\alpha / (\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	许用应力/MPa
20	195000	1.60×10^{-5}	200
200	186000	1.65×10^{-5}	152
300	179000	1.70×10^{-5}	145
500	165000	1.80×10^{-5}	119

表2 空气导管截面属性

截面		绝热层	
直径/mm	厚度/mm	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	厚度/mm
77	0.6	48	25

工况为管内气体温度为 200°C , 管内外压差 $3 \times 10^5 \text{Pa}$, 计算过程中其他温度点的材料属性可通过线性拟合获得。

3 有限元模拟分析

3.1 CAEPIPE 建模并补偿

(1) 光管模型的建立。

利用 CAEPIPE 软件建立的配平系统空气导管光

管模型如图 1 所示; 图 2 和 3 分别为光管情况下的应力分布及变形图, 最大应力值为 82.2MPa , 最大位移为 40.533mm 。首先根据实际情况和工艺要求添加阀门和法兰, 并根据此时导管的应力和位移趋势分别添加球形接头、拉杆等补偿器进行应力和位移补偿优化。

(2) 添加补偿器后的模型。

将配平系统添加球型接头、拉杆等补偿器后(图 4), 得到空气导管应力位移分布云图, 如图 5 和 6 所示。结果显示管道处最大应力为 29.49MPa , 最大位移为 10.467mm , 相对补偿前均有显著改善并且满足设计要求。但由于 CAEPIPE 的补偿器均为零长度单元, 无法显示拉杆等补偿器的三维受力特性, 因此采用 MD NASTRAN 对导管关键部位进行校核。本课题三维计算



图1 光管模型

Fig.1 Model of smooth tube



图2 光管应力云图

Fig.2 Stress nephogram of smooth tube

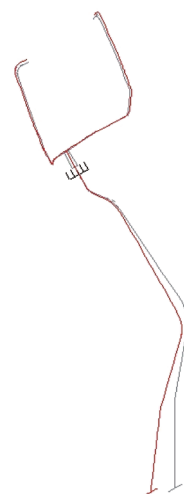


图3 光管变形图

Fig.3 Displacements of smooth tube



图4 添加补偿器后的模型

Fig.4 Tube model with compensator



图5 添加补偿器后应力云图

Fig.5 Stress nephogram of tube model with compensator

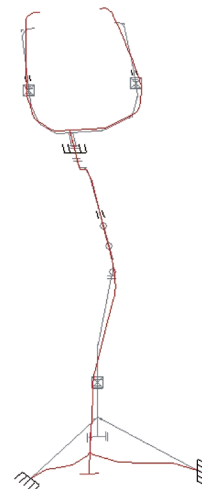


图6 添加补偿器后变形图

Fig.6 Displacements of tube model with compensator

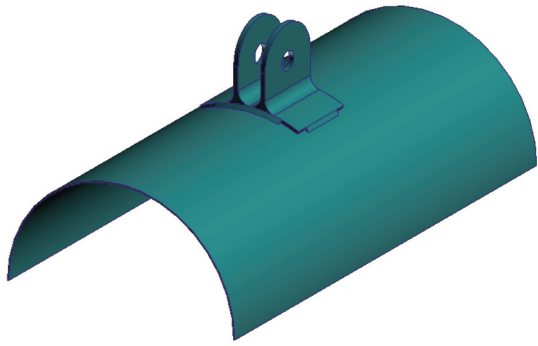


图7 结构模型
Fig.7 Structural model

以对系统具有重要支撑作用的拉杆为研究对象,如图7所示。

3.2 对导管以及附件的三维应力计算

(1) 有限元模型的建立。

有限元模型是在几何模型基础上建立的,建模时既要如实地反映实际结构的重要力学特性,又要尽量采用较少的单元和简单的单元形态,以保证较高的计算精度,同时缩小计算规模^[1]。根据上述思路,直接采用MSC. PATRAN 建立模型,利用其中的扫掠、拉伸等功能建立空气导管及补偿器三维结构模型。

拉杆结构模型包括空气导管主体、拉杆吊耳、焊接单元3部分,补偿器与空气导管的焊接位置截面形状如图8所示。在建立有限元模型时,将焊接处的圆角简化成直角,既有利于简化建模,也有利于有限元模型建立过程中的网格划分^[2]。空气导管直径76.2mm、壁厚0.56mm。

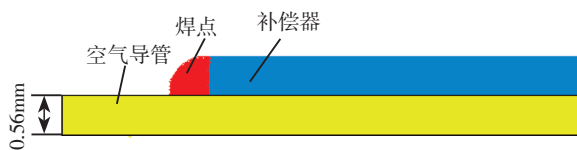


图8 焊点示意图
Fig.8 Diagram of welding point

(2) 网格划分。

对于有限元分析来说,网格划分的好坏直接影响到解算精度和速度。因此本文空气导管与补偿器拉杆采用六面体网格,焊接部位采用五面体网格,最终建立有限元模型如图9所示,节点数 Node=148 027,单元数 Element=98 975。

(3) 工况分析。

补偿器在工作过程中工况很复杂,假设传递给补偿器的力恒定、不随时间变化,则补偿器模型所受的力简化为恒定的均布载荷,在MSC.PATRAN 中利用MPC(多点约束)中的RBE3 直接加载,补偿器拉杆受到2种工

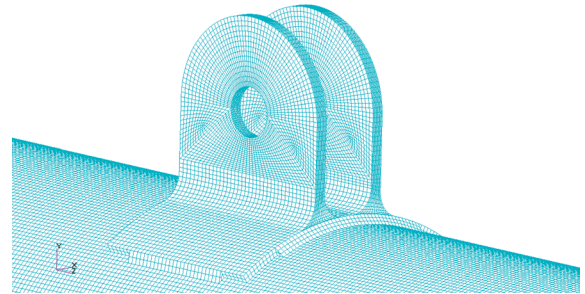
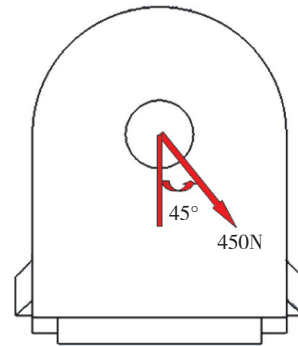
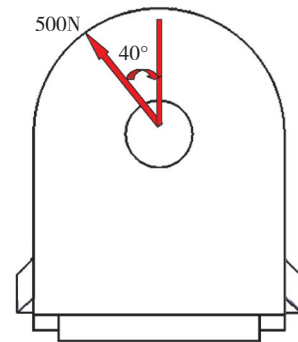


图9 空气导管、补偿器三维有限元模型
Fig.9 Three-dimensional finite element model of air duct and compensator

况的作用力,一种是450N的压力,与铅垂方向夹角为45°,一种是500N的拉力,与铅垂方向夹角为40°,如图10所示。在空气导管两端分别施加固定约束,并将补偿器底面与空气导管外表面分别设置为接触边界。



(a) 450N



(b) 500N

图10 补偿器载荷情况

Fig.10 Load conditions on compensator

(4) 计算结果分析。

计算模型采用MD NASTRAN 提供的隐式非线性模块SOL600 求解^[3],得到分析结果,如图11~14所示。由于空气导管与补偿器拉杆仅依靠焊接部位连接,因此当空气导管受到450N压力作用时,应力最大值为 $1.45 \times 10^8 \text{Pa}$,其中焊接部位应力最大值为 $1.21 \times 10^8 \text{Pa}$,

如图 11 所示;最大位移发生在空气导管中下方,位移为 $1.50 \times 10^{-4} \text{m}$,如图 12 所示。当空气导管受到 500N 拉力作用时,应力最大值为 $1.48 \times 10^8 \text{Pa}$,其中焊接部位应力最大值为 $1.39 \times 10^8 \text{Pa}$,如图 13 所示;最大位移为 $1.84 \times 10^{-4} \text{m}$,如图 14 所示。在 260°C 的温度条件下,所选焊接材料的屈服极限为 $1.52 \times 10^8 \text{Pa}$,由此可见焊接部位满足应力要求。

通过控制网格疏密,改变节点和单元数,得到 450N 压力作用下该有限元模型的应力分析结果对比,如表 3

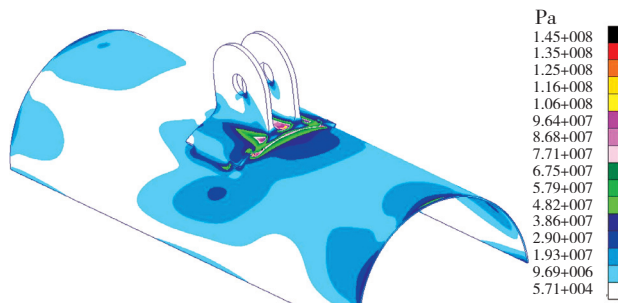


图11 空气导管受到压力时的应力云图
Fig.11 Stress nephogram of air duct when compressed

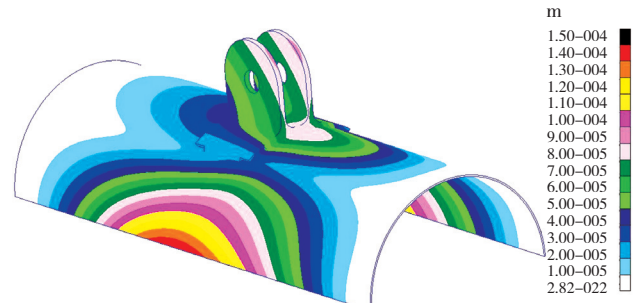


图12 空气导管受到压力时的位移云图
Fig.12 Displacement nephogram of air duct when compressed

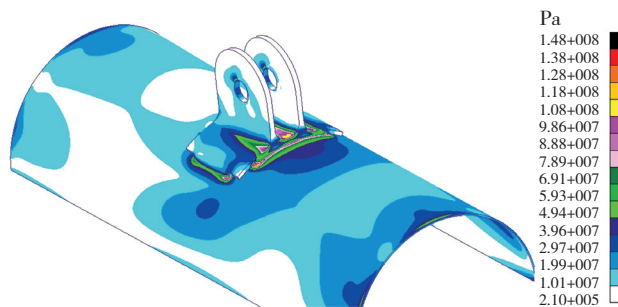


图13 空气导管受到拉力时的应力云图
Fig.13 Stress nephogram of air duct when dragged

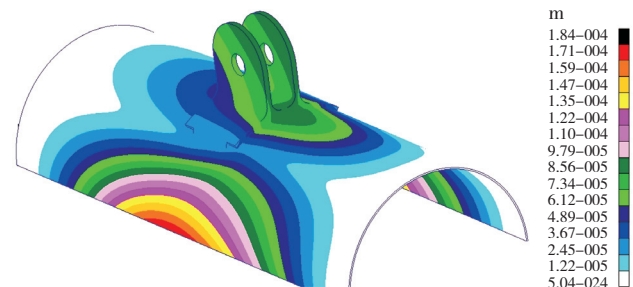


图14 空气导管受到拉力时的位移云图
Fig.14 Displacement nephogram of air duct when dragged

表3 3种网格数量下的应力分析结果对比

参数	节点数	单元数	节点数	单元数	节点数	单元数
	148 027	98 975	270 699	187 950	355 703	255 228
最大变形/m	1.50×10^{-4}		1.50×10^{-4}		1.50×10^{-4}	
最大应力/Pa	1.45×10^8		1.48×10^8		1.49×10^8	

4 结论

本课题利用 CAEPIPE 与 MD NASTRAN 软件对飞机空气导管进行分析,通过应力计算和优化,可获得能满足设计要求的空气导管应力、位移分布。结果表明,CAEPIPE 建模与分析计算方便快捷,可以从系统的角

度对空气导管系统进行快速的应力分析和补偿。但是,由于 CAEPIPE 采用的是一维梁单元模型,补偿器采用 CAEPIPE 建模方式得到的应力分布会产生一定的误差,为精确并全面地了解导管及其附件在三维情况下的应力分布,可以采用 MD NASTRAN 进行详细计算和进一步校核,并据此对导管的安全评估和制造工艺提供参考。

由 MD NASTRAN 软件得到的应力计算结果可知,焊接部位及空气导管的应力均满足要求。但整个模型中焊接部位及其附近区域的应力值相对较大,对结构安全和性能有一定影响,必须引起足够的重视,且在设计时要考虑敏感区域的结构加强与材料选用。若此时的应力值超过了材料的设计要求,则需进一步补偿,直至最后的应力和位移分布满足设计要求。

参考文献

- [1] 刘会影,吕慧娟,郭津津,朱世和. 螺杆结构的 PATRAN/NASTRAN 有限元分析. 天津理工大学学报,2008,24(2):39-41.
- [2] 杜平安. 有限元网格划分的基本原则. 机械设计与制造,2000(1):34-36.
- [3] 杨剑,张璞,陈火红. 新编 MD Nastran 有限元实例教程. 北京:机械工业出版社,2008.

(责编 良辰)