

飞机高温高压空气导管的振动特性研究

施红¹, 蒋彦龙², 沈那伟¹

(1. 江苏科技大学能源与动力学院, 镇江 212003;

2. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 210016)

[摘要] 在分析某大型客机环境控制系统的配平子系统的基础上, 基于有限元软件 Patran 和 Nastran 建立了配平系统的空气导管有限元分析模型, 选用 Lanczos 算法, 对管系进行动力学模态分析, 获得了系统前五阶的频率和振型。同时, 考察了气体热力学参数和球形接头作动力学参数对空气导管动力学模态特性的影响。结果表明: 从频率上看, 配平系统 Part1 在 45Hz 以下谐振模态分布密集。从振型上看, 球形接头和滑动接头处的振型变化幅度较大; 从动力学特性的影响因素来看, 配平系统空气导管的固有频率随管内温度的增加而递减, 随管内压力的增加而增加; 球形接头起动力矩和刚度增大会增加各阶的固有频率。研究工作对于我国大型客机空气导管系统的可靠性设计具有参考价值。

关键词: 空气导管; 模态分析; 高温高压; 配平系统

Study of Vibration Characteristic of the High Temperature and Pneumatic Duct System of the Aircraft

SHI Hong¹, JIANG Yanlong², SHEN Nawei¹

(1. Energy & Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Based on the analysis of the loads, constraints and its mechanisms applying to the duct system, a finite element model of the trim system is established by the finite element software Patran & Nastran, the Lanczos algorithm is adopted to the modal analysis, the first five natural frequencies and vibration mode are obtained. Performance parameters of the gas and ball joint influencing on the modal analysis are considered. The results show that the resonance modes are intensively distributed bellow 45Hz from the point of frequency and the vibration modes present with large variation range in the ball joints and slip joints. From the viewpoint of influencing factors on the dynamic characteristic, natural frequencies of the trim system decrease with temperature of the gas and increase with pressure of the gas. Meanwhile, natural frequencies increase with the stiffness and starting torque of the ball joint. This work could be helpful for reliability design of China's large civil-aircraft ducting system.

Keywords: Air duct; Modal analysis; High temperature and pneumatic; Trim system

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.076

飞机环控系统的功能主要包括引气、温度控制、压力调节及为其他辅助动力装置提供气源等。根据功能类型, 可以分为防冰系统、空调系统、引气系统等, 各系统之间通过空气导管进行交联。空气导管像血管一样穿过机身、机翼、发动机、电子设备舱等多个关键区域。管道内部流动的高温高压气体、导管系统的故障和疲劳损坏都会产生重大的安全隐患, 因此飞机空气导管系统需进行安全性及可靠性分析^[1-3]。进行空气导管的动力学特性分析是导管系统可靠性设计的关键内容之一。

空气导管是一个弹性系统, 是飞机各系统连接的重要部件, 在工作时承受管内气流和飞行加速度等载荷产生的弯矩和剪切力, 同时还受到来自于导管的吊支架, 飞机发动机、传动系统等部件传递的振动。当系统外部的激励频率与系统的固有频率相近时, 系统将会产生共振。共振不仅使得空气导管运行性能产生变化, 同时带来噪声和加速部件的疲劳损坏, 还会破坏空气导管的绝热层和部件的密封性。模态分析避免了静态方法的局限性, 主要从整体出发, 统筹地考虑系统整体的振动问题^[4-6]。

在飞机空气导管动力学特性研究方面,国内尚为空白,而国外已经形成了较为成熟的设计理论和标准。本文以某型飞机空气导管中的配平系统为研究对象,利用 Nastran 求解器,采用 Lanczos 算法对系统进行模态求解,同时考察了管内气体热力学参数和球形接头力学参数对模态分析的影响。

1 模态分析理论

质量、能量耗散(阻尼)、弹性阻力(弹簧)及外载荷是动力系统的4个基本成分。由弹性力学可得到多自由度的运动微分方程,

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为空气导管系统的刚性矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵; X 、 \dot{X} 、 \ddot{X} 为位移矢量、速度矢量、加速度矢量; $F(t)$ 为外界的激振矢量。忽略影响不大的阻尼得到无阻尼自由振动的运动方程:

$$M\ddot{X} + KX = \{0\} \quad (2)$$

对应的特征值方程:

$$K + \omega^2 MX = \{0\} \quad (3)$$

式中, ω 为系统的固有频率(特征频率)。通过求解方程(3)可获得系统的固有频率和振型^[7-9]。

对于受载荷的系统来说,载荷特性对系统固有频率的影响主要体现在其对位移矢量初始值的影响。飞机空气导管中流动的是高温压力气体,其参数特性不仅对管系静力学设计产生重要的影响,同时对模态分析中的位移初值也将产生影响。

同时,球形接头作为飞机空气导管的重要补偿部件,其结构特性对管系动力学特性的影响也是管系设计者应关注的重点。

2 配平系统空气导管

配平系统承担着传递和中和引气的作用。从配平系统的结构特性可知,隔舱壁对导管的固定将配平系统分为上下两个部分,分别称为 Part2、Part1。如图1所示。

由图1可知,配平系统的管路结构主要由管道、连接件、补偿件、阀门和支撑等组成,管路整体较为复杂。空气导管各处的截面尺寸并不一致,考虑到工艺、应力特性等因素对一些弯管和T型管处进行壁面加厚处理,不同截面尺寸的管子用不同颜色标出。拉杆为空心圆管,外径16mm,壁厚1.2mm。

3 模型建立

3.1 简化和假设

空气导管系统由导管、补偿器、阀门、连接法兰、支

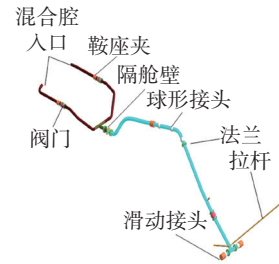


图1 配平系统管系示意图

Fig.1 Schematic diagram of the trim system

撑结构等组成。对空气导管系统进行振动模态分析的关键是建立合理的有限元模型。管道的建模可以概括为两大类:一类是以梁单元为主的有限元模型;一类是以壳单元为主的有限元模型。本文以配平系统的空气导管为研究对象,在考虑各单元质量分布的基础上,利用 Patran 软件建立了壳单元有限元模型。

3.2 建模

由于空气导管为薄壁管道,其长度远大于截面尺寸,因此可采用壳单元来模拟导管结构。空气导管管系结构复杂,零部件数目较多,难以在管系建模时建立全部零部件的实体或壳单元模型。在进行管系应力分析时,可通过对这些部件的功能模拟来反映它对管系的作用效果。

(1) 固定端。

如图2所示,采用 REB2 多点约束技术反应固定端与约束点的约束关系。

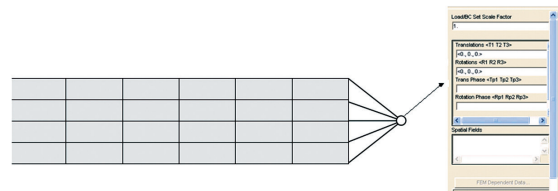


图2 固定约束的建模

Fig.2 Model of the fixed constraint

(2) 拉杆。

拉杆的建模示意图如图3所示。

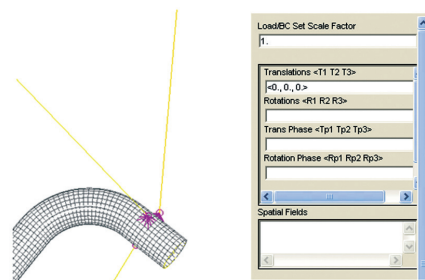


图3 拉杆有限元模型

Fig.3 Finite element model of the rod

由图 3 可知,通过 rod 单元进行拉杆工程的模拟,rod 单元有两个端点 A、B,两个端点的自由度均为 3, A 点与管道的作用采用 REB3 单元, B 点为平移固定点,释放其转动自由度。

(3) 滑动接头。

滑动接头(Sliding seal)是具有轴向补偿能力的补偿器,在各个自由度方向均可运动,即在模拟时可将其端点全部释放称为自由端,但运动的幅值有一定的要求。本文限定其轴向伸缩为 20mm,转动角度幅值为 7°,侧向偏移最大值为 9mm。

(4) 球形接头。

球形接头是空气导管系统中用于热补偿和增加管道柔性的金属元件。球形接头主要由波纹管、导流片和限位器组成。该部件在弯矩的作用下具有侧向转动自由度,最大偏转角度为 7.5°,不具有扭转和平动自由度。球形接头的平动与转动特性如图 4 和表 1 所示。

球形接头在 Patran 中主要是通过多点约束和弹簧单元进行模拟,如图 5 所示。

(5) 法兰和阀门。

法兰和阀门在空气导管系统中作为连接件使用,不具有应力补偿和位移约束的作用,在管系应力分析过程中,将法兰和阀门处视为集中质量处理。

如图 6 所示,对于集中质量的模拟主要采用质点加多点约束技术,首先在质量中心建立质心节点,然后通过 RBE2 技术将它与管道进行连接,最后将质量力施加在节点上。

(6) 鞍座夹。

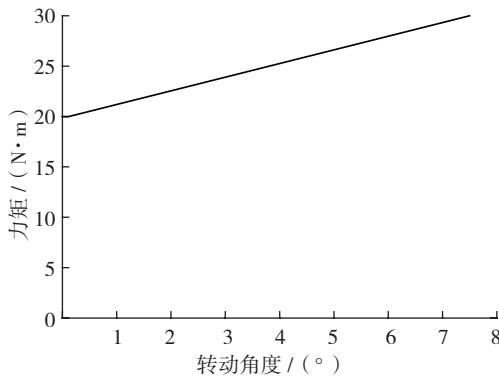


图4 球形接头转动特性曲线

Fig.4 Rotational performance of the ball joint

表1 球形接头平动与转动特性

直径 /mm	最大偏转角度 /°	T_x	T_y	T_z	R_x	R_y	R_z
50.8	±7.5	刚性	刚性	刚性	刚性	曲线性	曲线性

注: X轴方向为空气导管轴线方向; T_x 、 T_y 、 T_z 分别为 x、y、z 方向的移动自由度; R_x 、 R_y 、 R_z 分别为 x、y、z 方向的旋转自由度。

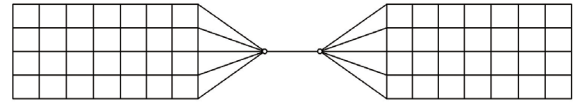


图5 球形接头的建模

Fig.5 Model of the ball joint

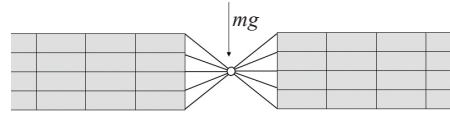


图6 集中质量的建模

Fig.6 Model of the concentrated mass

鞍座夹在空气导管系统中将导管固定在舱壁或其他固定件上,同时限制了导管的侧向位移,在管系应力分析过程中,约束鞍座夹所在管段的侧向位移,释放其轴向位移和 3 个自由度的角位移。

3.3 网格划分

本文利用 Patran 进行网格划分,划分网格为四边形。配平系统 Part1 和 Part2 的节点数分别为 26302、17133,单元数分别为 26102、17088。

3.4 材料属性

管道材料为不锈钢(A312),密度 $\rho=7900\text{kg/m}^3$,泊松比 $\nu=0.3$ 。A312 材料属性如表 2 所示。计算过程中,其它状态点通过线性拟合获得^[3]。

拉杆的材料为 2024 T42,密度 $\rho=2800\text{kg/m}^3$,泊松比 $\nu=0.33$,其材料属性如表 3 所示。

3.5 边界条件

由于混合腔入口处的接头具有轴向、径向移动 ±10mm 的补偿能力,因此两侧空气导管端面在设置时释放其 6 个自由度,配平系统隔舱壁处的空气导管端面约束 6 个自由度,左右两侧的鞍座夹释放其轴向平动自由度以及 3 个转动自由度。

4 计算结果

根据上述建立的模型,选用 Lanczos 算法,对管系进行模态分析,获得了系统前五阶的频率如表 4 所示,振型如图 7~11 所示。

计算结果表明,配平系统 Part1 在 45Hz 以下谐振模态分布密集。从振型上来看,球形接头和滑动接头处的振型变化幅度较大,因此在应力补偿的同时,应考虑添加球形接头和滑动接头后对系统动力学特性的影响。

5 影响因素分析

5.1 温度与压力

管内的高温高压气体对管道施加一定的热应力和压应力,不仅直接影响结构材料的力学特性^[7],也会对

结构的固有振动特性产生影响。表 5 为不同压力和不同温度下配平系统导管 Part1 的前五阶固有频率。

由表 5 可知,配平系统空气导管管系的各阶固有频率随管内空气温度的增加而减少,随着管内空气压力的增大而增加,主要是由于温度和压力作用在管壁面使得导管材料局部刚度发生变化,从而改变系统的固有频率。

5.2 球形接头参数

球形接头是飞机空气导管中重要的应力补偿件,其特性参数主要包括:转动刚度、起动力矩和最大转动角度^[10]。本文变化转动刚度和起动力矩来考察球形接头参数对系统固有频率的影响。球形接头刚度选取范围为: 10^5 N/m、 10^6 N/m、 10^7 N/m、 10^8 N/m;起动力矩选取范围为: 10 N·m、 15 N·m、 20 N·m、 25 N·m,图 12 为管系在不同球形接头刚度下的固有频率,图 13 为管系在不同球形接头起动力矩下的固有频率。

由图 12 可知,球形接头刚度值对管系前六阶固有频率的影响较小,并且固有频率随着球形接头刚度值的增加而增大。由图 13 可知,管系各阶的固有频率随着球形接头起动力矩的增大而增大。因此在管系设计时,

表2 A312材料属性

温度	弹性模量 E / MPa	线膨胀系数 α / K^{-1}
200℃	191000	18.00×10^{-6}
300℃	184000	18.50×10^{-6}

表3 拉杆材料属性

温度	弹性模量 E / MPa	抗拉强度 F_{T1} / MPa	屈服强度 F_{T2} / MPa
20℃	75200	393	234

表4 配平系统Part 1前5阶固有频率

阶数	一	二	三	四	五
频率	23.44	31.87	39.6	43.7	55.68

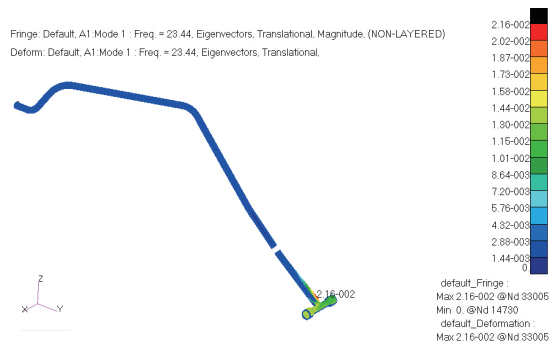


图7 一阶振型

Fig.7 The first order natural vibration type

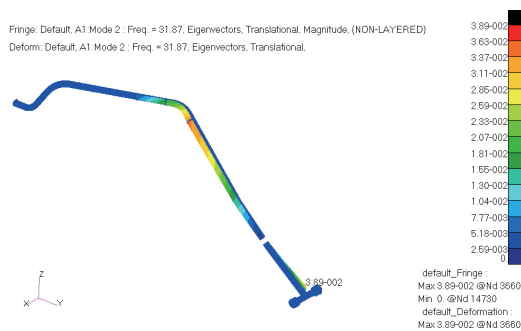


图8 二阶振型

Fig.8 The second order natural vibration type

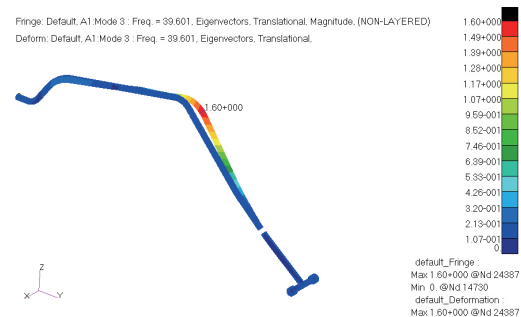


图9 三阶振型

Fig.9 The third order natural vibration type

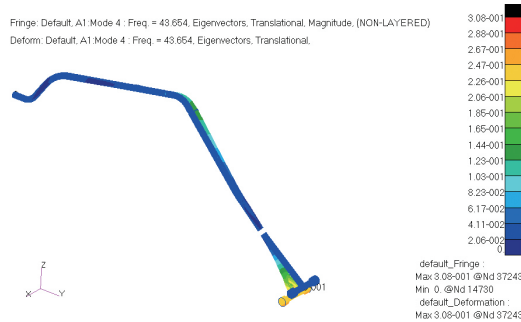


图10 四阶振型

Fig.10 The fourth order natural vibration type

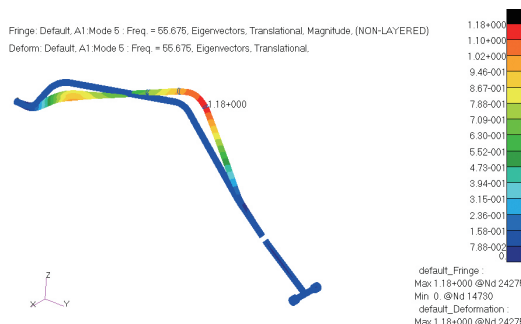


图11 五阶振型

Fig.11 The fifth order natural vibration type

表5 不同压力和温度下管系Part1的前五阶固有频率

阶数	频率				
	232℃, 280MPa	250℃, 280MPa	300℃, 280MPa	232℃ 400MPa	232℃ 500MPa
一	23.44	23.04	22.82	23.57	23.71
二	31.87	31.52	31.14	31.94	32.04
三	39.6	39.15	38.81	39.72	39.88
四	43.7	43.24	42.92	43.81	43.92
五	55.68	55.22	54.94	55.72	55.91

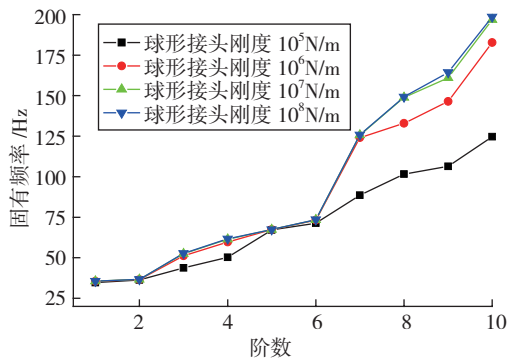


图12 固有频率随球形接头刚度变化图

Fig.12 Natural frequencies varied with the stiffness of the ball joint

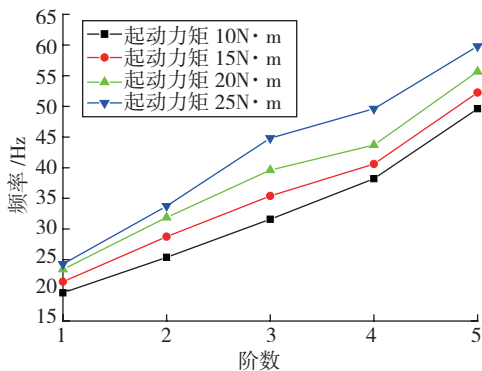


图13 固有频率随球形起动力矩变化图

Fig.13 Natural frequencies varied with the starting torque of the ball joint

6 结论

飞机空气导管的动力学问题是安全性及可靠性设计的关键问题。本文基于模态分析理论对飞机空气导管的配平系统进行了动力学分析。首先,论文通过关键部件的功能模拟在 Patran 中实现了部件及管道模型的建模;其次,分析了某运行工况下的动力学特性;最后,研究了温度、压力及球形接头参数对系统动力学特性的影响。主要研究结论如下:

(1) 配平系统空气导管管系的各阶固有频率随管内空气温度的增加而减少,而随着管内空气压力的增大而增加,主要是由于温度和压力作用在管壁面使得导管材料局部刚度发生变化,从而改变系统的固有频率。

(2) 球形接头刚度值对管系前六阶固有频率的影响较小,并且固有频率随着球形接头刚度值的增加而增大。管系各阶的固有频率随着球形接头起动力矩的增大而增大。因此在管系设计时,对管系进行应力补偿时,不仅要考虑球形接头对静力学特性的影响,还应考虑其对管系动力学特性的影响。

参考文献

[1] 施红. 飞机空气导管安全性设计与泄漏探测技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

SHI H. Study on safety design and leakage detection technology of the aircraft pneumatic duct system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[2] BAPTISTA C A R P, BARBOZA M J R, ADIB A M L, et al. High temperature cyclic pressurization of titanium ducts for use in aircraft pneumatic systems[J]. Materials & Design, 2000, 30(5):1503-1510.

[3] 刘娟, 蒋彦龙, 施红, 等. 大型客机空气导管应力分析与结构优化 [J]. 计算机仿真, 2013, 13(1):128-130.

LIU J, JIANG Y L, SHI H, et al. Stress analysis & structural optimization on pneumatic duct system of civil aircraft[J]. Computer Simulation, 2013, 13(1):128-130.

[4] 喻萌. 基于 ANSYS 的输流管道流固耦合特性分析 [J]. 中国舰船研究, 2007, 2(5):55-57.

YU M. Analysis on characteristics of fluid-structure interaction for fluid conveying pipes by ANSYS[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2007, 2(5):55-57.

[5] 张智勇, 沈荣瀛, 王强. 充液管道系统的模态分析 [J]. 固体力学学报, 2001, 22(2):143-149.

ZHANG Z Y, SHEN R Y, WANG Q. The modal analysis of the liquid filled pipe system[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2001, 22(2):143-149.

[6] 焦宗夏, 华清, 于凯. 传输管道流固耦合振动的模态分析 [J]. 航空学报, 1999, 20(4):317-320.

JIAO Z X, HUA Q, YU K. Frequency domain analysis of vibrations in liquid filled piping systems[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1999, 20(4):317-320.

[7] MECHEL F P. Modal-analysis in curved and ring-shaped ducts[J]. Acta Acustica United With Acustica, 2008, 94(2):173-206.

[8] 杜平, 胡夏夏. 管路系统的模态分析 [J]. 轻工机械, 2012, 30(3):29-33.

Du P, Hu X X. Modal analysis of pipeline systems[J]. Light Industry Machinery, 2012, 30(3):29-33.

[9] 于雅泽, 李晓恭. 基于 ANSYS 的供热管道系统振动分析及改造 [J]. 煤气与热力, 2011, 31(9):12-14.

YU Y Z, LI X G. Vibration analysis and reconstruction of heating pipeline system based on ANSYS[J]. Gas & Heat, 2011, 31(9):12-14.

[10] 施红, 蒋彦龙, 刘娟, 等. 基于有限元的飞机空气高温高压导管应力设计 [J]. 中国机械工程, 2014, 25(8):50-54.

SHI H, JIANG Y L, LIU J, et al. Stress design of the high temperature pneumatic duct system of the aircraft using the finite element method[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(8):50-54.

(责编 李丹)