

飞机液压系统管道模态分析与实验验证

杨飞益, 陈 果, 赵文涛

(南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)



摘 要: 针对飞机液压系统试验台的空间管道, 提出了一种分析空间管路系统三维振动特性的方法, 利用锤击法沿三个方向对其进行实验模态分析, 得到各个方向的固有频率, 使用 Pro-E 软件建模, 导入 Ansys Workbench 有限元软件中; 对模型进行模态分析, 得到模型的各阶固有频率及其对应的各阶振型; 通过与实验模态分析结果比较, 验证了模拟计算的各阶振型的正确性, 同时分清管路系统在各方向上的振动固有频率和振型, 为进一步分析管路系统在外激励下所引起的振动提供了思路。

关键词: 飞机液压系统; 管道; 模态分析; 固有频率; 固有振型

中图分类号: V215.5

文献标识码: A

文章编号: 1671-654X(2011)04-0017-04

Modal Analysis of Aircraft Hydraulic Pipe System and its Experimental Verification

YANG Fei-yi, CHEN Guo, ZHAO Wen-tao

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, a method is raised to analyse the 3D vibration characteristics of spatial pipe system. The hammering method is used along three directions to carry out the experimental modal analysis to attain the nature frequencies. Then, the Pro-E software is used to establish the model which can be sent to the finite element software Ansys Workbench to do modal analysis, and the nature frequencies and corresponding mode shapes are achieved. With the comparison with the result from the above experiment, it verifies the validity of the mode shapes from the calculation result. Furthermore, it can distinguish the nature frequencies and mode shapes in the three directions of the pipe system which can lead to the access of further research of the system under external excite.

Key words: aircraft hydraulic system; pipe; modal analysis; nature frequency; mode shape

引言

飞机管路由振动引起的故障大致有两类,一类是振动疲劳,一类是振动磨损。管路的振动疲劳是管路在一定的振动应力作用下,先局部形成永久性累积损伤,然后经一定循环次数的裂纹扩展直至断裂的过程。管路的振动磨损,则是因管路振动引起管路连接、固定处配合面产生相对位移而形成的摩擦表面损伤;或是因管路振动位移过大,而与相邻物体(如机匣、相邻管路等)产生反复碰撞摩擦而形成的表面损伤。根据美国空军统计,飞机元件故障总数中,燃油、气压和液压方面的故障占 50~60%,从原苏联几个机种的统计情况来看,燃油、滑油、液压及气压的故障也占 50%以上。在国内,在新机研制过程中,曾出现过由于液压力

导管自振频率与泵的压力脉动频率合拍,发生共振断裂的事故。另据有关部门介绍,在我国正在使用的现役飞机(含发动机),导管失效的故障率也占总故障率的 52%。由此可见,航空导管的结构完整性是整个飞机、发动机结构完整性和可靠性的重要组成部分。

有鉴于此,本文对飞机液压系统管路试验台的空间管路系统先进行了实验模态分析,然后建立有限元管道模型,并进行计算模态分析,通过与实验模态进行对比,验证模型的正确性,分析了空间管路三个振动方向的固有频率和所对应的振型,为进一步分析由于外部激励所导致的管路系统振动以及预计管路疲劳寿命提供了重要思路和方法。

收稿日期: 2011-03-03

修订日期: 2011-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(50705042); 航空科学基金项目资助(2007ZB52022)

作者简介: 杨飞益(1988-),男,湖北麻城人,硕士研究生,主要研究方向为管道振动及动力学、智能诊断与专家系统。

1 管道模态分析理论

模态分析是研究结构动力特性的一种近代方法，是系统辨别方法在工程振动领域中的应用。模态是机械结构的固有振动特性，每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。这些模态参数可以由计算或实验分析取得，这样一个计算或实验分析过程称为模态分析。这个分析过程如果是由有限元计算的方法取得的，则称为计算模态分析；如果通过实验将采集的系统输入与输出信号经过参数识别获得模态参数，称为实验模态分析。

1) 计算模态分析

基于有限元的计算模态，实为结构动力学中的特征值问题，特征值和特征向量即为模态分析中所说的固有频率和模态振型。

动力学问题的通用微分方程如下：

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \tag{1}$$

式(1)中 $M, C, K, x, F(t)$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、节点位移矢量、激振力矩阵。

在对管道进行模态分析时，不计结构阻尼和外载荷，系统动力学方程变为：

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \tag{2}$$

式(2)是二阶常系数齐次微分方程组，其解的形式为：

$$x = X \sin(\omega t + \varphi) \tag{3}$$

式(3)中 $X = [X_1 X_2 \dots X_n]^T$ 为振幅向量， ω 为振动角频率， φ 为振动初相位。由式(2)、(3)可得：

$$(K - \omega^2 M) X = 0 \tag{4}$$

其中 $(K - \omega^2 M)$ 称为特征矩阵。齐次线性代数方程组(4)有非零解的充要条件是特征矩阵的行列式为零，即是：

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \tag{5}$$

方程(5)为特征方程，它是 ω 的 n 次方程，有 n 个根 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ， ω_i 为结构的第 i 阶固有频率，对应于第 i 阶固有频率 ω_i ，代入式(4)中，可得到 n 个非零向量解 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ ，称为结构的各阶振型向量^[1-3]。

2) 实验模态分析

实验模态分析采用实验与理论分析相结合的方法来识别系统的模态参数(模态频率、模态阻尼、振型)，它对系统的动态分析及优化设计有实用价值^[4]。

本文采用锤击法^[5]来进行实验模态分析，锤击激振是由带力传感器的敲击锤敲击结构来实现，锤头把宽频脉冲加给被测结构，同时激出所有各阶模态。通过力锤的激励力和加速度传感器获得的加速度响应来得出被测结构的频响函数^[6]。

如果仅求结构的固有频率，只需测量任一点的频响函数即可。但若确定振型矢量，则需测量多点^[7]。

图1以悬臂梁为例，测量四个点的频响函数，即可得到该结构的前三阶固有频率和其对应的振型^[8]。

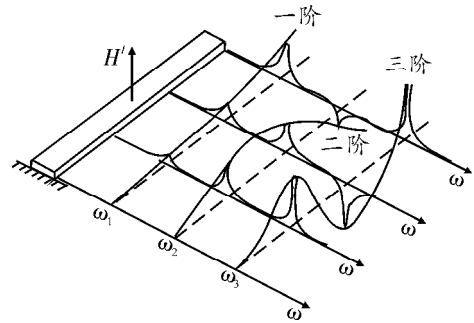


图1 悬臂梁的前三阶固有频率及其对应振型

2 实验模态分析

针对飞机液压系统试验台(如图2)，选取了一段空间管道，为获取此液压系统管道固有频率，选取了X、Y、Z三个方向分别进行敲击，同时加速度传感器也沿三个方向采集加速度信号，每个方向在同一点进行三次敲击。



图2 飞机液压系统试验台

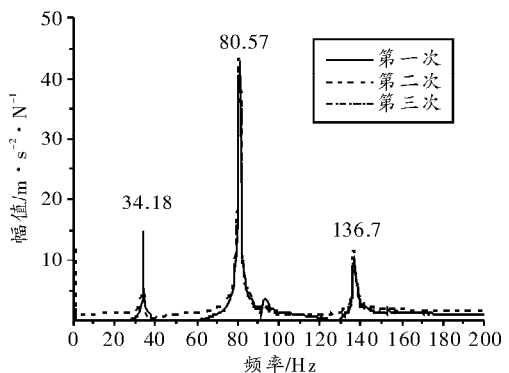


图3 X方向加速度频响函数

通过数据分析，得出XYZ三个方向上的三次实验加速度频响函数，其中X方向的实验数据如图3所示。可以观察到，X方向敲击结果有三个峰值，类似的观察

YZ两个方向的频响函数图可知:Y方向敲击结果有两个峰值,Z方向敲击结果有两个峰值。在同一个方向上,每次实验对应峰值所对应的频率值也相差极小,另外也可以发现,在X方向和Y方向上,有相同的两个频率。

3 计算模态分析

针对上述实验管道,采用有限元方法,通过Ansys Workbench软件进行仿真计算,Ansys Workbench有限元分析软件是Ansys公司推出的新一代平台产品,代表了Ansys软件发展的趋势。它将Ansys系列产品融合在一个仿真平台,实现数据的无缝传递及共享,核心模块使用Ansys系列产品的求解模块,保证了仿真模拟的通用性和精确性,提高了仿真效率。

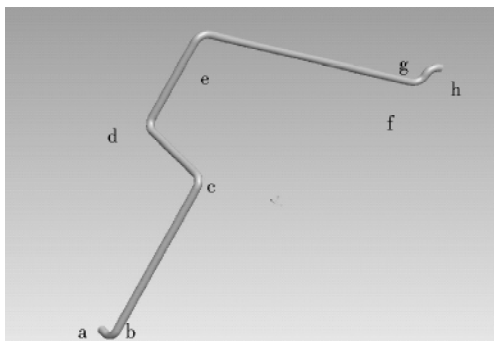


图4 液压管道三维实体模型

首先使用Pro-E软件建立上述液压管道的三维实体模型,如图4所示,该段管道除两端固定外,没有其他约束影响。

管道外径 $D = 14\text{ mm}$,内径 $d = 10\text{ mm}$,密度 $\rho = 4\ 000\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $E = 70\text{ GPa}$,泊松比为 $\lambda = 0.3$ 。其具体尺寸如表1所示。

表1 待分析管道的三维尺寸(单位:mm)

弯管半径	a-b	b-c	c-d	d-e	e-f	f-g	g-h
20	40	340	210	200	440	40	20

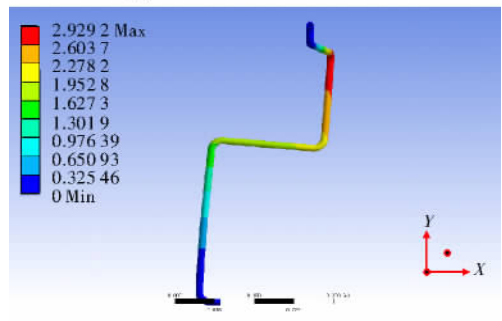
将模型导入Ansys Workbench,在管道的两端施加固定约束,利用Modal模块进行计算模态分析,计算得到前五阶固有频率及其对应的前五阶振型,并观察各阶振型在各个方向的变化情况,图5为一阶振型图的变化情况,为便于观察,选取XOY坐标平面视角,图5(a)为原管道视图,图5(b)为振型图。

由图5观察到,第一阶振型主要为管道上端沿X方向的变化,类似地比较其他阶数振型图,可以得出以下规律:二阶振型在X,Y两个方向上变化明显,三阶振型在Z方向变化明显,四阶振型在X,Y方向变化明

显,而五阶振型主要在Z方向上变化。



(a) 横坐标X纵坐标Y视图



(b) 一阶振型图(横坐标X纵坐标Y)

图5 一阶振型图的变化情况

拾取实验模态分析中频响函数的峰值,得到各阶固有频率,并与模拟计算结果对比如表2所示。

表2 实验模态的各阶固有频率及与模拟结果对比

固有频率	X方向	Y方向	Z方向	模拟各阶频率	模拟结果误差/%
f_1	34.18			36.11	5.6
f_2	80.57	80.57		79.61	-1.2
f_3			92.16	89.86	-2.5
f_4	136.7	136.7		142.7	4.4
f_5			152.6	151.6	-0.7

对比模拟结果与实验结果,可以看到模拟结果的误差在6%以内,表明了模拟计算结果的正确性,验证了模型的可靠性。

从实验模态分析的结果可以看到,管道的第一阶固有频率是沿X方向的振动频率,第二阶固有频率是沿X,Y方向振动频率,第三阶固有频率是沿Z方向振动频率,第四阶固有频率是沿X方向振动频率,第五阶固有频率是沿Z方向振动频率。模拟分析中,我们得到一阶振型主要为管道上端沿X方向的变化,二阶振型在X,Y两个方向上变化明显,三阶振型在Z方向变化明显,四阶振型在X方向变化明显,而五阶振型主要在Z方向上变化。结果表明,模拟计算得到的振型结果与实验结果具有一致性。该结果对于进一步分析管路

系统在外部激励下的振动大小和方向具有重要意义。

4 结论

本文提出了一种分析空间管路系统模态分析的方法,首先对实际管路系统进行实验模态分析,同时利用 Pro-E 软件建立空间模型,然后导入 Ansys Workbench 软件,建立空间管路的三维有限元模型,对管道进行有限元计算,得到计算模态结果,结合实验模态分析结果和计算模态分析结果,不仅可以验证模型的正确性,也可分清空间管路系统在各方向上的固有频率和振型。本文研究结果对于进一步分析管路系统在外部激励下所产生的振动方向和振动强度具有指导意义。

参考文献:

- [1] 曹树谦,张文德,萧龙翔. 振动结构模态分析理论与应用[M]. 天津:天津大学出版社,2001.
- [2] 党锡淇,陈守五. 活塞式压缩机气流脉动与管道振动[M]. 西安:西安交通大学出版社,1984:33-56.
- [3] 扈英超. 线性振动[M]. 北京:高等教育出版社,1981:65-97.
- [4] Heylen W, Lammens S, Sas P. Modal analysis theory and testing[M]. Katholieke Universiteit Leuven Department Werktvi Gkunde,1997.
- [5] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册(第19分册)转子动力学及整机振动[M]. 北京:航空工业出版社,2000:208-226.
- [6] Vanlanduit S, Daerden F, Guillaume P. Experimental modal testing using pressurized air excitation[J]. Journal of Sound and Vibration, 299(2007):83-98.
- [7] 罗贵火,吴洪亮,宁向荣,等. 某型航空发动机环形燃烧室振动特性分析[J]. 航空动力学报,2010,25(11):2625-2631.
- [8] 卢喜丰. 实验模态分析与激光测振技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.
- [7] 王国利,梁国华,吕涑琦. 基于改进定权法的多目标模糊优选模型及其应用[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(1):11-14.
- [8] Chen S Y, Fu G T, Wang J M, et al. Fuzzy optimum model of semi-structural decision for lectotype optimization of offshore platforms[J]. China Ocean Engineering, 2001,15(4):453-466.
- [9] 张哲,王会利,石磊,等. 桥梁方案多层多目标模糊优选模型及其应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2006,38(9):1567-1571.
- [10] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.
- [11] Rius J M, Ferrando M, Jofre L. GRECO: Graphical electromagnetic computing for RCS prediction in real time[J]. IEEE Antennas And Propagation Magazine,1993,35(2):7-17.
- [15] 肖冰松,方洋旺,胡诗国,等. 一种新的超视距空战威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(9):2163-2166.
- [16] 蓝伟华,林南粤. 单机对单机交战几何态势分析[J]. 电光与控制,2004,11(4):14-16.
- [17] 张洪波,李国英,丁全心,等. 超视距空战下的态势评估技术研究[J]. 电光与控制,2010,17(4):9-13.
- [18] 雷蕾,尚丽娜,张列航. 空战目标威胁排序与目标分配算法[J]. 电光与控制,2010,17(4):38-40.
- [19] 朱宝鏊. 作战飞机效能评估[M]. 第2版. 北京:航空工业出版社,2006.
- [20] 王佩,李言俊,张科. 多机空战多目标威胁评估和分配算法[J]. 火力与指挥控制,2008,33(5):14-17.
- [21] 刘华翔,黄俊,朱荣昌. 综合航空武器平台作战效能评估综述[J]. 系统工程学报,2003,18(1):55-61.
- [22] Pete Bonanni. Art of the Kill[EB/OL]. (2009-12-19)[2010-04-15]. <http://www.insky.net>.

(上接第 12 页)

(上接第 16 页)