

# 初始安装应力对管道固有频率的影响分析及试验验证

程小勇<sup>1</sup> 陈果<sup>1</sup> 刘明华<sup>2</sup> 郑其辉<sup>2</sup> 罗云<sup>2</sup> 侯民利<sup>2</sup> 蒲柳<sup>2</sup>

1. 南京航空航天大学, 南京, 210016 2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都, 610092

**摘要:**研究了初始安装应力对管道固有频率的影响。利用 ANSYS 对导管无安装应力、较小安装应力、较大安装应力的情况进行仿真分析,研究了安装应力对管道固有频率的影响;构建液压管道试验台,模拟了初始安装应力,利用锤击法对导管进行模态试验,验证了安装应力对管道固有频率的影响规律;利用锤击法对某型飞机液压管道进行了固有频率测试,试验结果进一步表明,管道安装应力的存在对管道模态频率有一定影响。研究结果为进一步开发管道安装应力监测系统提供了方法和思路。

**关键词:**管道;安装应力;有限元分析;固有频率;模态试验

**中图分类号:** TH113

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2015.04.016

## Analysis and Experimental Verification to Effects of Pipe Initial Installation Stress on Pipe's Natural Frequencies

Cheng Xiaoyong<sup>1</sup> Chen Guo<sup>1</sup> Liu Minghua<sup>2</sup> Zheng Qihui<sup>2</sup> Luo Yun<sup>2</sup> Hou Minli<sup>2</sup> Pu Liu<sup>2</sup>

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu, 610092

**Abstract:** This paper investigated the effects of the pipe initial installation stress on pipe's natural frequencies. Simulation analyses on catheter-free assembling stress, smaller installation stress, larger installation stress were carried out by using ANSYS in order to find the effects of the pipe initial installation stress on pipe's natural frequencies. Then a pipeline test-bed was constructed, which was simulated the initial installation stress. The experimental modal test analysis was conducted on the pipe through the hammer method, and the results were compared with those calculated by ANSYS. Finally, modal test on the aircraft pipe was completed, and the results show that initial installation stress have certain influence on pipe's natural frequencies, which provides important methods and ideas for the future study of monitoring system for pipe installation stress.

**Key words:** pipe; installation stress; finite element analysis; natural frequency; modal test

## 0 引言

导管安装中产生的应力是影响导管安装质量

的重要因素之一,适当的装配应力有利于管道与管接头之间实现过盈配合,保证管路的密封性能,但是,装配应力过大却是造成液压导管渗漏的一个主要原因,导管带应力装配造成渗漏主要是由于系统附件、支架等不能准确定位装配造成的<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2013-06-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61179057);成都飞机工业(集团)有限责任公司资助项目

缩传感执行器磁滞模型[J]. 中国机械工程, 2011, 22(5):571-575.

Liu Huifang, Jia Zhenyuan, Wang Fuji. Study on Hysteresis Model of Giant Magnetostrictive Sensing Actuator Based on Neural Network[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(5):571-575.

[8] 刘向东,修春波,李黎,等. 迟滞非线性系统的神经网络建模[J]. 压电与声光, 2007, 29(1):106-108.

Liu Xiangdong, Xiu Chunbo, Li Li, et al. Hysteresis Modeling Using Neural Networks[J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2007, 29(1):106-108.

[9] Reynolds J J. An Investigation of Model Reference Adaptive Control of Unknown Dynamic Hysteretic Systems Using Slow Adaptation[D]. East Lansing, Michigan: Michigan State University, 2007:1-5.

[10] 王小平,曹立明. 遗传算法理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2004:1-50.

[11] 郑军红,叶修梓,陈志扬. 基于神经网络和遗传算法的智能夹具规划[J]. 中国机械工程, 2008, 19(19):2376-2381.

Zheng Junhong, Ye Xiuzi, Chen Zhiyang. Intelligent Fixture Planning Based on Artificial Neural Network and Genetic Algorithms[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(19):2376-2381.

(编辑 苏卫国)

**作者简介:**纪华伟,男,1976年生。杭州电子科技大学机械工程学院副教授、博士。主要研究方向为精密定位与微纳驱动。发表论文10余篇。刘毛娜,女,1987年生。杭州电子科技大学机械工程学院硕士研究生。胡小平,女,1970年生。杭州电子科技大学机械工程学院教授、博士。

导管安装过程中容易产生的应力主要有 3 种：强应力对口应力、焊接变形应力和集中应力<sup>[2]</sup>。导管安装中产生的应力，在导管设计时一般不予考虑，它的存在等于额外增加了导管的负荷，并对相连接的设备产生不良影响<sup>[3]</sup>。其主要危害有：缩短导管使用寿命、影响设备安全运行、容易引起工艺性差的高合金钢管焊口产生裂纹。例如，某型号飞机的液压导管出现渗漏故障，严重影响飞机的正常使用，经过对外场故障导管失效情况进行分析发现，飞机液压系统工作环境振动对导管密封性影响较大，安装应力会加大振动对导管密封性的影响，从而加速导管失效<sup>[4]</sup>。因此有必要进行飞机导管安装应力的监测与控制技术的研究，探索安装应力引起故障的原因和机理。

装配引起的装配应力在某些情况下甚至大于工作应力，是当前理论界和工程界共同关注的热点问题。目前，初始安装应力仿真主要运用强迫位移法<sup>[5]</sup>、轴对称基础单元法<sup>[6]</sup>以及三位接触单元法<sup>[7]</sup>等，仿真技术的发展中，一些学者提出了更有针对性的仿真方法。但是在安装应力测试方面，检测安装应力非常困难，传统的应力测试法需要利用应变测试仪测试管道装配前后的应力，以获取管道装配过程中产生的初始应力<sup>[8]</sup>，检测效率很低。本文针对飞机导管这一特殊模型，一方面对导管装配应力偏小或装配应力偏大情况下的装配应力进行仿真分析，计算出装配应力所引起的导管模态频率的变化；另一方面从试验的角度对导管的装配应力进行模拟，并进行模态测试，验证装配应力对导管模态频率的影响规律；最后在某型飞机上对具有不同装配应力的飞机管道进行实测，通过模态分析，得出导管在不同安装应力情况下导管固有频率变化情况，进而验证本文研究成果。

### 1 导管有安装应力下的模态分析

根据结构动力学理论，装配应力的存在，结构将产生形变，结构组合必然发生变化，同时会对结构的动力响应特性产生影响，使得各种结构参数（模态参数）发生变化，可通过与正常情况下的动力响应进行对比来判别结构的安装状态<sup>[9]</sup>。对于多自由度线性结构系统，设  $M$ 、 $C$  和  $K$  分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵，则系统第  $i$  阶固有频率  $\omega_i$  的表达式为

$$\omega_i^2 = \frac{\phi_i^T K \phi_i}{\phi_i^T M \phi_i} \quad (1)$$

式中， $\phi_i$  为第  $i$  阶固有振型， $i = 1, 2, \dots, N$ 。

式(1)即为无安装应力时第  $i$  阶固有频率  $\omega_i$  的表达式。

对于管道，结构在装配应力下产生的变形常常影响结构的刚度矩阵，设对  $K$  产生的变化量为  $\Delta K$ ，此时第  $i$  阶固有频率  $\omega_{i1}$  的表达式为

$$\omega_{i1}^2 = \frac{\phi_i^T (K + \Delta K) \phi_i}{\phi_i^T M \phi_i} = \omega_i^2 + \frac{\phi_i^T \Delta K \phi_i}{\phi_i^T M \phi_i} = \omega_i^2 + \Delta \omega_i^2 \quad (2)$$

其中， $\Delta \omega_i$  即为安装应力下的模态频率变化。

## 2 导管装配应力仿真分析

为了说明边界条件的改变对刚度矩阵产生的影响，进而改变结构的固有频率的过程，本文首先对一段 S 型普通结构钢管道进行了三维建模，根据导管安装的受力和变形情况，可以将导管的安装应力分为三种情况进行模拟。第一种情况是没有安装应力，导管处于正常状态；第二种情况是导管的安装应力偏小，此时管道的弹性模量及刚度矩阵几乎没有改变；第三种情况是导管安装应力偏大，导管变形处于弹性范围内，管道的弹性模量基本不变，但是管道会产生微小的变形，结构的刚度矩阵发生了变化。

### 2.1 导管装配应力仿真分析预处理

利用 CATIA 软件对 S 型导管进行三维建模，然后将该模型导入 ANSYS 软件中，仿真导管的安装情况。导管的材料为 Q235，密度为  $7850 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量为  $206 \text{ GPa}$ ，泊松比为  $0.3$ ；导管的外径为  $20 \text{ mm}$ ，内径为  $14 \text{ mm}$ 。

在有限元软件中，首先对导管使用自动网格划分的方法进行网格划分，其中平均单元边大小设置为  $0.01 \text{ m}$ 。导管划分为具有  $25\ 903$  个节点、 $12\ 907$  个六面体单元的有限元模型，如图 1 所示。

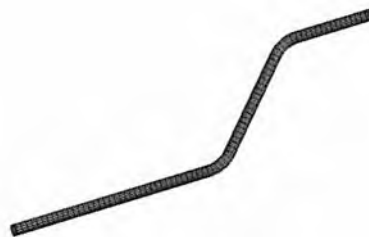


图 1 导管的有限元模型

### 2.2 导管无装配应力的情况

设置导管两端为弹性支承，根据与试验台上的 S 型管道对比校正，设置支承刚度为  $1.15 \times 10^7 \text{ N/m}$ ，如图 2 所示。边界条件设置完成后，接着对导管进行模态分析，得到导管的各阶固有频率，如表 1 所示。

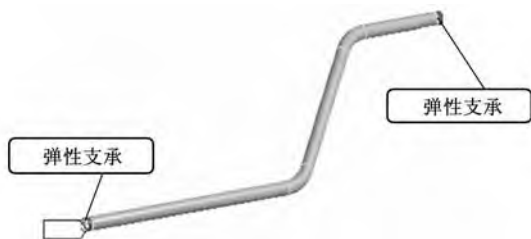


图 2 导管的边界条件

表 1 仿真得到的导管各阶固有频率及应力

		一阶频率 (Hz)	二阶频率 (Hz)	三阶频率 (Hz)	应力 (MPa)
正常安装		93.99	196.38	493.98	0
安装力(N)	100	93.99	196.38	493.98	7
	200	93.90	196.38	493.98	14
	300	93.81	196.38	493.98	21
	400	93.72	196.38	493.98	28
	500	93.62	196.38	493.98	36
位移(mm)	0.1	96.76	200.24	494.13	
	0.5	97.50	199.61	494.92	
	1.0	97.93	198.48	495.68	
	1.5	98.33	197.22	496.28	
	2.0	103.20	196.08	492.77	
	2.5	99.77	193.79	486.47	
	3.0	100.36	193.17	484.32	

2.3 导管装配应力偏小的情况

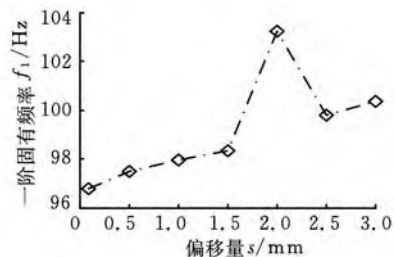
通过在导管两端施加载荷来模拟导管的初始安装应力,分别在导管右端三个方向上施加 100 N、200 N、300 N、400 N 和 500 N 的力,通过静态结构分析计算导管加力处的安装应力并进行模态分析,结果列于表 1 中。

从表 1 中可以看出,接头处的应力随着载荷的增大而增大,导管的各阶固有频率在不同的载荷下的变化非常微小。

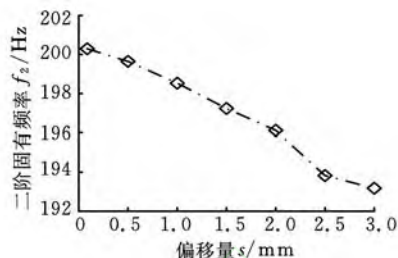
2.4 导管装配应力偏大的情况

当导管的装配应力不断加大,但导管材料处于弹性变形内时,它的弹性模量基本不变,这时,导管会产生很微小的变形,本文在其他边界条件不变的情况下,通过改变导管第二个坐标点的坐标(0,170,0)来模拟导管的微小变形。分别设置导管的第二个点的坐标在三个方向上的偏移量  $s$  都为 0.1 mm、0.5 mm、1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm 和 3 mm,通过模态分析计算导管固有频率的变化,结果列于表 1 中。

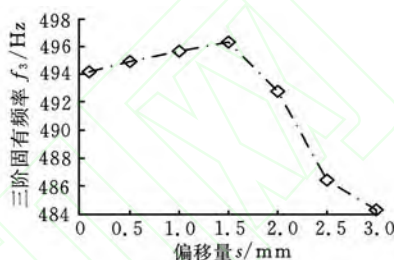
前三阶固有频率的变化趋势如图 3 所示,可以看出,导管的第二个坐标点的偏移量为 0.1 mm 和 2 mm 时,导管的各阶固有频率变化较大,其中,一阶固有频率  $f_1$  变化了 7 Hz,2 阶固有频率  $f_2$  变化了 12 Hz,3 阶固有频率  $f_3$  变化了 21 Hz;当第二个坐标点的偏移量为 1 mm 到 3 mm 时,导管的一阶固有频率变化较小,导管的二阶、三阶固有



(a)第一阶固有频率



(b)第二阶固有频率



(c)第三阶固有频率

图 3 导管前三阶固有频率随偏移量的变化

频率变化较大。

3 液压导管试验台安装应力测试

为了模拟导管的安装情况,设计制造了液压管道试验台,如图 4 所示。试验台主要由液压力源、管道试验台、电气控制柜、仪表操作台等组成。其中管道试验台部分能模拟管道安装过程中出现的装配问题,在进行导管安装时,可人为地使被试导管憋劲安装,即带预应力安装,然后进行各种振动测试。试验台如图 5 所示,该试验台主要由台架、安装座、导管组成,试验台可更换不同的安装座,台架上有 4 条滑道,可以使安装座沿 4 个方向滑动,适合不同管型的安装试验,同时也便于模拟产生安装应力。



图 4 液压管道试验台

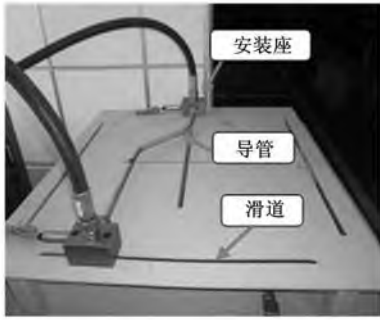


图 5 导管安装试验台

### 3.1 实验模态分析方法

采用锤击法进行实验模态分析。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。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。

### 3.2 基于锤击法的导管模态试验

使用的设备主要包括美国 ENDEVCO 公司 30927 型力锤、B&K 4508 型 ICP 加速度传感器、NI USB9234 数据采集器。在自由安装状态和预加安装应力下进行试验,为了实现各种安装应力情况,制定了三个方案进行模态试验,并进行了结果比较,方案如下:①在导管正常安装情况下对它进行锤击法模态测试,测得导管的频率响应函数;②导管有安装应力的第一种情况是在垂直方向( $y$  向)上在安装座下加垫片垫高,如图 6 所示;③导管有安装应力的第二种情况是管道安装后在  $z$  方向上强制移动安装座,图 7 是示意图。

如图 8 所示,进行模态试验时,利用力锤敲击弯管中间的点 1,在点 2 安装加速度传感器,通过数据采集器,利用自行编制的模态分析软件 MAS2.0 采集得到冲击响应信号和锤击力信号,试验现场见图 9。

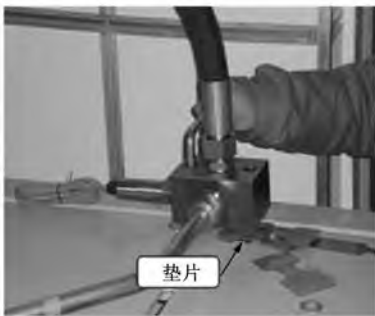


图 6 加垫片产生安装应力

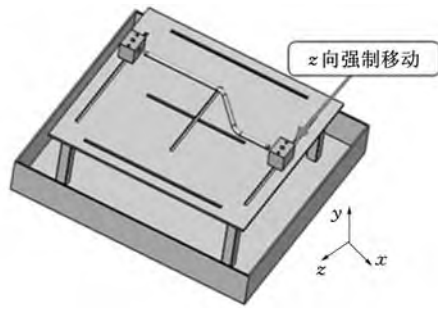


图 7 强制移动安装座

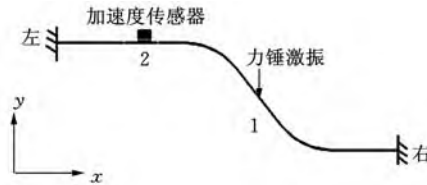


图 8 导管模态试验示意图

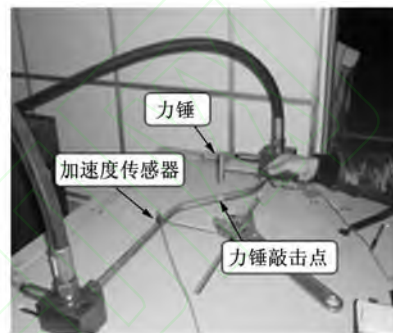


图 9 导管安装试验

### 3.3 试验结果与分析

#### 3.3.1 不同测试方案之间的对比

图 10 所示为导管在没有安装应力情况下两次敲击同一点得出的导管频率响应函数,可以看出导管频响函数曲线基本一致,可见本试验的可靠性。图 11、图 12 所示分别表示加垫片、沿  $z$  向强制移动情况下的导管频响函数曲线。

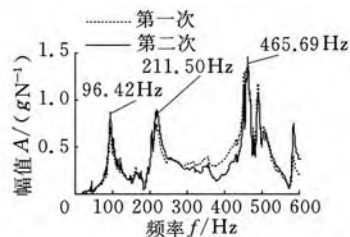


图 10 正常情况导管频响函数

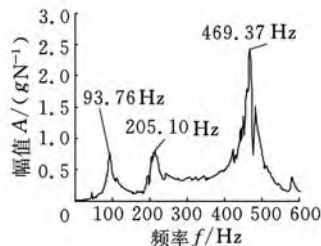


图 11 加垫片时导管频响函数

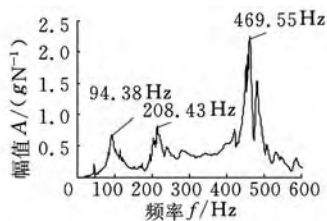


图 12 z 向强制移动时导管频响函数

将正常安装和有安装应力情况进行对比,与加垫片情况对比的频响函数如图 13 所示,与 z 向强制移动情况对比的频响函数如图 14 所示。可以看出,导管在正常安装和带预应力安装情况下,导

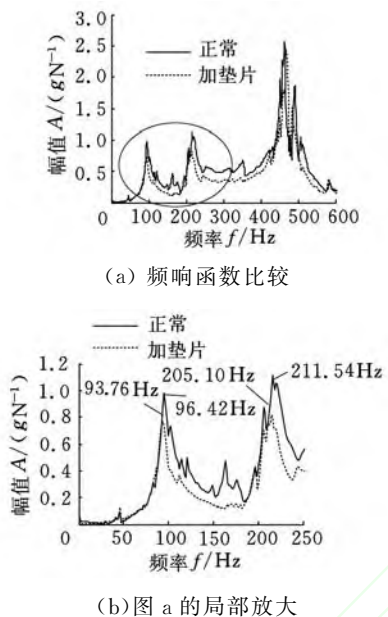


图 13 正常和加垫片时频响函数比较

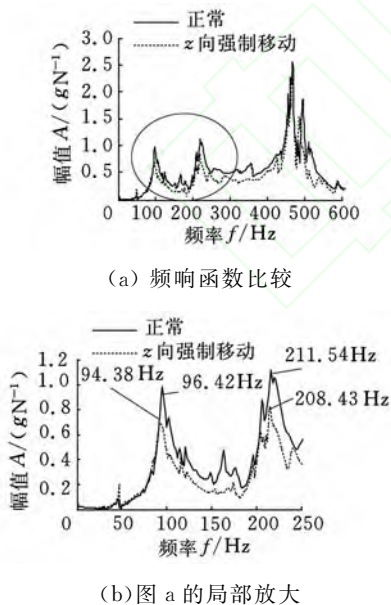


图 14 正常和 z 向有应力时频响函数比较

管的各阶固有频率有偏差。加垫片时,一阶固有频率相差 2.6 Hz,二阶固有频率相差 6.4 Hz,三阶固有频率相差 3.7 Hz; z 向加力时,一阶固有频

率相差 2.1 Hz,二阶固有频率相差 3.1 Hz,三阶固有频率相差 3.9 Hz,具体数值如表 2 所示。

表 2 导管正常和有安装应力情况下的固有频率比较

	第一阶	第二阶	第三阶
正常安装	96.4	211.5	465.7
加垫片	93.8	205.1	469.4
加 z 向安装应力	94.3	208.4	469.6

### 3.3.2 试验值与计算值之间的对比

由表 1 与表 2 对比可知,有限元方法得到的计算固有频率与测试试验得到的固有频率值略有偏差,这是由于理论计算无法全面而精确地确定导管的约束,而且各种参数的取值也不完全与实际一致,但是两种方法得到的固有频率变化的趋势还是基本一致的。

## 4 某型飞机导管安装应力测试

为了验证模态测试检验安装应力方法对实际情况的适用性,对某型飞机在不充油状态下进行了模态测试。对两架飞机牌号为 170 的导管进行锤击法模态测试,并进行了结果比较。图 15 所示为第一架飞机的导管在装配情况下敲击同一点得出的管道频率响应函数。图 16 所示为不同架次飞机敲击导管得到的管道频率响应函数,从图 16 中可以很明显地看出第二架飞机与第一架飞机固有频率存在偏差,反映了两架飞机装配应力的区别。

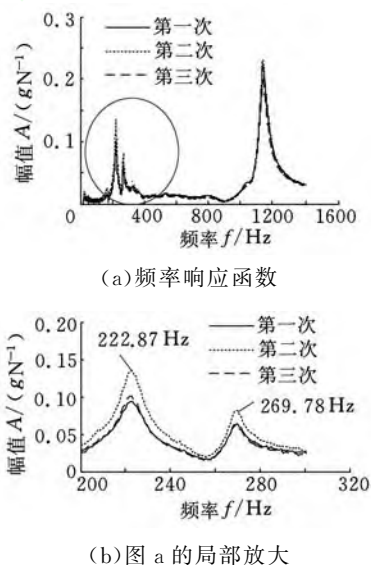
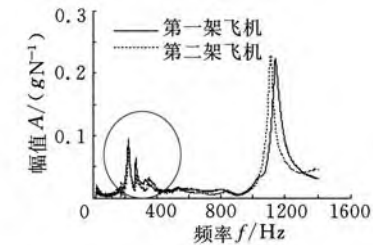


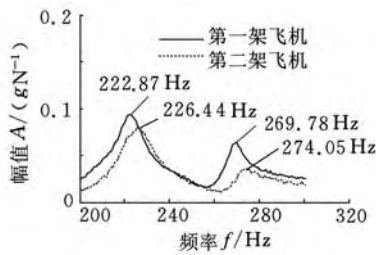
图 15 第一架飞机 170 导管频率响应函数

## 5 结论

(1)对试验导管建立了对应的有限元模型,根据导管不同的安装情况,分别对无安装应力、较小安装应力、较大安装应力进行了仿真分析,结果表



(a) 频率响应函数



(b) 图 a 的局部放大

图 16 不同架次的飞机 170 导管频率响应函数对比

明安装应力对管道的模态频率有较大的影响。

(2) 针对实际导管,利用锤击法进行了模态测试试验,分别得到正常安装和强制安装应力情况下的各阶固有频率,进行了分析对比,结果表明,基于 ANSYS\_Workbench 的计算模态和试验测试值达到了很好的一致性,仿真模型基本上能够比较准确地得到导管在各种安装情况下的模态。

(3) 对某型飞机不同架次同一导管进行了试验,结果表明,试验的模态频率变化反映了导管的装配应力的区别。

本文研究工作为进一步研究导管安装应力及开发导管安装应力监测系统提供了重要方法和思路。

参考文献:

[1] 张洪武,廖爱华,吴昌华. 压气机过盈配合的弹塑性有摩擦接触的研究[J]. 工程力学,2007,24(1):186-192.  
Zhang Hongwu, Liao Aihua, Wu Changhua. Study on Elastoplastic Frictional Contact Problem in Interference Fits of Compressors[J]. Engineering Mechanics,2007,24(1):186-192.

[2] 傅国如,陈荣,吕凤军,等. 发动机燃油供油导管断裂失效分析[J]. 失效分析与预防,2007,2(1):29-33.  
Fu Guoru, Chen Rong, Lü Fengjun, et al. Fracture Failure Analysis of a Fuel Pipe in an Aero-engines [J]. Failure Analysis and Prevention,2007,2(1):29-33.

[3] 王晶,陈果,郑其辉,等. 飞机液压管道初始装配应力仿真[J]. 航空计算技术,2012,42(6):54-57.  
Wang Jin, Chen Guo, Zheng Qihui, et al. Simulation of Initial Assembly Stress for Aircraft Hydraulic Pipeline [J]. Aeronautical Computing Technique, 2012,42(6):54-57.

[4] 李青,佟文伟,韩振宇. 某型航空发动机引接管断裂故障分析[J]. 航空发动机,2012,38(1):60-62.  
Li Qing, Tong Wenwei, Han Zhenyu. Fracture Failure Analysis of Anti-surge Pipe for an Aeroengine [J]. Aeroengine,2012,38(1):60-62.

[5] Zhao H, Lz H, Kuallgz B. The Virtual Contact Loading Method for Elastic Ccontact Problems[J]. Communication in Numerical Methods in Engineering, 1993, 9: 455-461.

[6] Frederic L, Aurelian V, Bernard S. Finite Element Analysis and Contact Modeling Considerations of Interference Fits for Fretting Fatigue Strength Calculations [J]. Simulation Modeling Practice & Theory, 2009, 17 (10):1587-1602.

[7] 戚刚,吴昌华,张南林. 增压器涡轮叶片和轮盘组装结构的三维接触精细有限元分析[J]. 中国造船, 2000,41(3):69-73.  
Qi Gang, Wu Changhua, Zhang Nanlin. Precise Analysis of 3-Dimensional Elastic Contact of Tenon and Mortise Joint in Turbine [J]. Shipbuilding of China,2000,41(3):69-73.

[8] 刘晗. 应变电测技术在状态测试与评估中的应用研究[J]. 宝钢技术,2004,15(3):27-34.  
Liu Han. Application of Strain Electrical Measurement Technology in Conditional Test and Evaluation [J]. Baosteel Technology,2004,15(3):27-34.

[9] 邹晓军. 梁桥结构损伤识别的曲率模态技术[D]. 武汉:武汉理工大学,2003.

(编辑 苏卫国)

作者简介:程小勇,男,1987年生。南京航空航天大学民航学院硕士研究生。主要研究方向为管道结构动力分析与减振技术、转子动力学与航空发动机整机振动。陈 果(通信作者),男,1972年生。南京航空航天大学民航学院教授、博士研究生导师。刘明华,男,1964年生。成都飞机工业(集团)有限责任公司副总工程师、研究员级高级工程师。郑其辉,男,1966年生。成都飞机工业(集团)有限责任公司副总工程师。罗 云,男,1970年生。成都飞机工业(集团)有限责任公司副总工艺师、研究员级高级工程师。侯民利,男,1968年生。成都飞机工业(集团)有限责任公司高级工程师。蒲 柳,男,1959年生。成都飞机工业(集团)有限责任公司高级工程师。