

航空发动机外部管路的结构与动力学特征参数分析

彭 刚, 于乃江, 贾文强

(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 201108)

摘要: 针对航空发动机外部管路系统的动力学设计需求, 采用理论计算与试验测试相结合的方法研究管路系统的关键设计参数及影响规律。研究表明: 外径、跨度和弯曲角度是影响导管振动特性的主要结构与装配参数, 随外径增大, 导管基频提高; 随跨度增大, 基频降低; 随弯曲角度增大, 基频提高。而弯曲半径、壁厚和安装横向偏移对固有特性的影响很小, 可不予考虑。导管充液后, 各阶模态频率会略有降低, 液体密度越大, 影响越大; 而流体压力和速度对模态特性影响很小, 可不予考虑。

关键词: 外部管路; 模态频率; 特征参数; 敏感度; 航空发动机

中图分类号: V233

文献标识码: A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2017.05.001

Analysis of Structural and Dynamical Characteristic Parameters of External Pipes for Aeroengine

PENG Gang, YU Nai-jiang, JIA Wen-qiang

(AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: Aiming at the requirement of dynamical design for external pipes of aeroengine, the key design parameters and the influence law were investigated through theoretical calculation and experimental tests. The results show that the external diameter, spacing length and bending angle are the key structure and assembling parameters, which affect the natural vibration characteristics significantly. The first mode frequency increases when the external diameter and bending angle increase, nevertheless, the first mode frequency decrease when the spacing length increases. The bending radius, wall thickness and assembling lateral shift have a little effect on the natural characteristics, which could be ignored during design. The natural frequency is slightly reduced when the pipes are filled with liquid, and the greater the liquid density, the smaller the mode frequency. However, the pressure and velocity of the liquid affect the natural characteristics barely, which could be ignored.

Key words: external pipe, mode frequency, characteristic parameter, sensitivity, aeroengine

0 引言

航空发动机外部管路主要用于液压油、燃油、滑油和空气等介质的输送, 是航空发动机附件装置的重要组成部分, 是发动机上使用最多的零部件之一, 被称为航空发动机的“心血管”, 其结构完整性决定着发动机的工作可靠性^[1-2]。美国 GE 公司对航空发动机的空中停车事件进行统计, 发现有 50% 是由于外部管路、导线、传感器损坏、失效引起的。中国民航总局的统计数据显示, 1989~1990 年仅由液压导管造成的飞行事故就达 7 次^[3-4]。

管路失效的原因有加工、装配、温度和振动等因素, 其中振动是其主要诱导因素, 引起管路振动的主要来源有^[5]: 机匣振动, 流体脉动及气动激励等。国内外学者针对管路振动问题开展了大量研究工作^[4-6], 康力等^[7]针对外部管路的动力学设计需求, 采用基于试车实测数据的振动响应求解方法, 计算分析了典型管路的振动响应特性; Wiggert^[8]等利用特征线法求解管路的振动微分方程, 与试验结果相一致; 王国鹏等^[9]针对某型发动机燃油导管断裂问题, 计算分析确定了引起振动故障的原因; 杜冬梅等^[10]研究了液压管路在内流作用下的振动特性, 探讨了避免共振的有效方法;

收稿日期: 2017-02-07 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 彭刚(1974)男, 硕士, 从事大型客机发动机总体结构设计工作; E-mail: 419800076@qq.com。

引用格式: 彭刚, 于乃江, 贾文强. 航空发动机外部管路的结构与动力学特征参数分析[J]. 航空发动机, 2017, 43(5): 1-6. PENG Gang, YU Naijiang, JIA Wenqiang. Analysis of structural and dynamical characteristic parameters of external pipes for aeroengine[J]. Aeroengine, 2017, 43(5): 1-6.

焦宗夏等^[11]采用传递矩阵法导出了流体的流量、压力与管路的应力及位移之间的网络模型,建立了其传递矩阵;李艳华等^[12]把时域描述的流体管路横向振动方程变换到频域,推导出多管段的传递矩阵法;刘伟等^[13]利用罚函数法对复杂管路系统的卡箍位置进行了优化设计。

上述研究工作对航空发动机外部管路的振动特性分析提供了丰富的理论基础,但并未针对外部管路的结构与动力学设计需求给出关键设计参数及影响规律。本文借鉴于上述工作,对管路系统的结构与动力学特征参数进行系统分析,为相关工程设计提供数据参考。

1 导管模态特性的确定方法

航空发动机外部管路的铺设和连接非常复杂,如图 1 所示,管路之间存在很强的振动耦合^[14]。而在解决实际工程问题时,由于管路系统整体模型过于庞大,不可能对所有管路逐一分析,常用的解决办法是单独取出部分典型管路作为研究对象。发动机管路的振动特性不仅与管路本身形状尺寸有关,还很大程度上取决于导管卡箍的刚性、阻尼及其沿管线的分布情况(如数量、位置、刚度等)。进行管路结构与动力学设计时,可采用有限元计算或模态试验获得导管的模态特性。

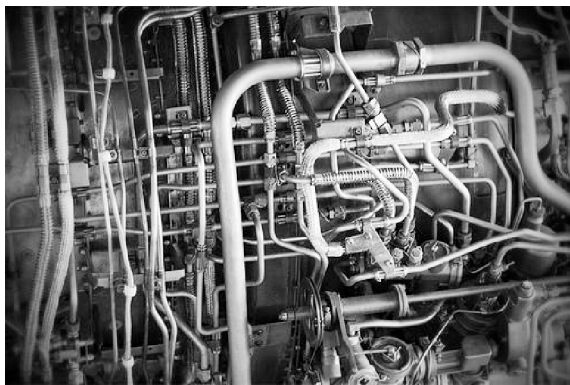


图 1 某发动机外部管路系统

1.1 有限元方法

1.1.1 导管模化

(1)以 ANSYS 为例,可采用 SOLID185 实体单元、SHELL181 壳单元以及 PIPE289 管单元对管路进行固有模态分析,3 种单元获得的各阶振型一致,各阶频率相差很小,最大误差不超过 0.1%。

(2)在有管路实体模型时,采用 SOLID185 建模

最为方便,可直接通过 IGES 接口将模型导入 ANSYS,完成模型建立;在没有实体模型时,采用 PIPE289 管单元建模最为方便,通过管线及管截面的基本参数定义即可完成模型建立。

(3)从计算时间来看,在计算精度接近时,PIPE 单元建模的单元数最少,计算时间最短,可优先使用。

(4)在管路接头处往往采用管套结构,其带来刚度和质量的局部增大,对整体的振动固有特性带来较大影响,在建模中不能忽略,应根据实际尺寸对局部进行模化。

1.1.2 支承件模化

对于导管常采用的刚性支承卡箍、弹性支承卡箍、活动支承固定、以及辅助支承固定,可采用位移约束、调整弹性模量的实体单元、弹簧单元以及多点约束单元进行建模。

1.2 解析方法

基于振动力学基本理论^[15],得到两端固支的等截面梁横向振动频率方程与主振型

$$\cos \beta_1 l \cosh \beta_1 l = 1$$

$$Y_1(x) = C_1 [\cos \beta_1 x - \cosh \beta_1 x + r_1 (\sin \beta_1 x - \sinh \beta_1 x)] \quad (1)$$

$$r_1 = -\frac{\cos \beta_1 l - \cosh \beta_1 l}{\sin \beta_1 l - \sinh \beta_1 l} = \frac{\sin \beta_1 l + \sinh \beta_1 l}{\cos \beta_1 l - \cosh \beta_1 l} \quad (2)$$

由式(1)可得

$$\beta_1 l \approx \left(i + \frac{1}{2}\right) \pi, i \geq 2$$

即 $\beta_1 l = 4.730, \beta_2 l = 7.853, \beta_3 l = 10.996, \beta_4 l = 14.137$, 而固有频率为

$$\omega_i = (\beta_i l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; I 为惯性矩; ρ 为梁材料密度; A 为梁截面面积; l 为梁的跨度。计算可得两端固支导管的固有频率。

1.3 试验方法

可采用锤击模态试验或台架应变片实测的方法获得导管的模态特性,2 种测试方法结果的相对误差一般不大于 10%,而在实际应用中各有优劣。(1)模态试验的成本低,测试方便,结果的频响范围大,可以获得多阶模态频率,但是模态试验的测试条件有时与实际工况略有差别,如燃油管内燃油及压力对模态特性的影响难以准确获得;(2)台架应变片实测可以反映导管的实际工作状态,可获得实际工况下的振动应

力值;但测试成本较高,并且只能获得低阶固有频率值,不能获得模态振型。在工程实际中,采用模态试验结合振动响应测试的方法可以获得最为可靠的模态特性。

2 管路系统结构与动力学特征参数分析

影响管路振动特性的因素可以分为4类,即等直段尺寸参数、弯曲段尺寸参数、装配参数和流体介质。其中等直段尺寸参数包括壁厚、直径和跨度,弯曲段尺寸参数包括弯曲半径和弯曲角度,装配参数包括固支点偏移和螺栓安装预紧力,流体介质包括管内充液、流体密度、压力、温度和速度。

2.1 等直段尺寸参数

以直导管为例,采用有限元计算与理论公式相对比的方法,分别给出壁厚、直径和跨度对横向振动的第1阶固有频率(基频)相对值的影响规律,如图2~4所示。

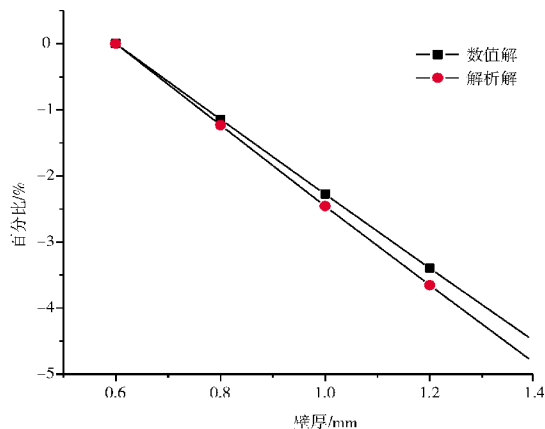


图2 壁厚对基频影响曲线

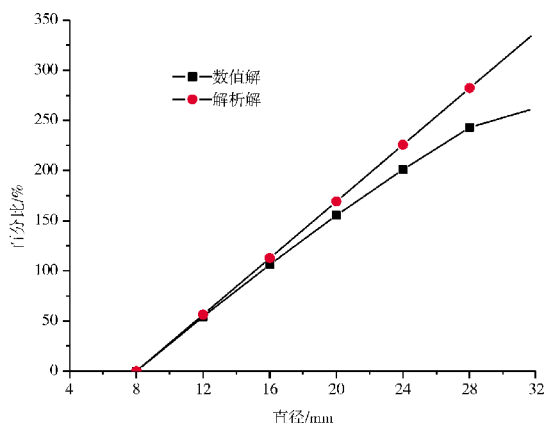


图3 导管直径对基频影响曲线

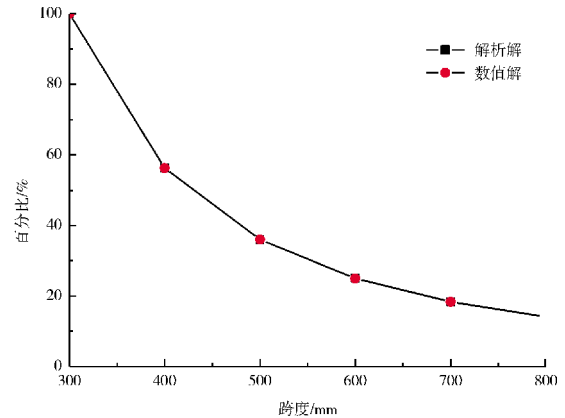


图4 导管跨度对基频影响曲线

从图中可见:

(1)随壁厚增大,导管基频降低,这是由于壁厚增大同时提高了导管的刚性和质量,而对质量的影响更大;壁厚在0.6~1.4 mm的变化范围内导管基频变化值小于5%,因此在设计中不能通过调整壁厚达到避开共振的目的。

(2)随导管直径增大,导管基频明显降低,直径在8~32 mm的变化范围内,基频变化值大于250%,这是由于导管直径会显著影响截面惯性矩造成的;随直径增大,解析解和数值解之间的相差比例越来越大,这是因为数值解基于铁木辛柯梁理论,可以考虑管路的剪切变形,在进行大直径导管的力学计算时,可以获得更精确的结果。

(3)随导管跨度增大,基频呈指数型降低,在300~800 mm的跨度变化范围内,基频变化值大于80%,是导管振动特性设计的1个关键影响参数。

2.2 弯曲段尺寸参数

以弯导管为例,采用有限元计算分别给出弯曲半径和弯曲角度对前3阶固有频率绝对值的影响规律,如图5、6所示。

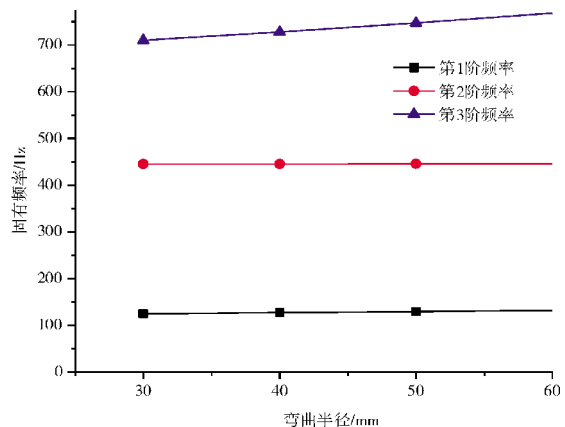


图5 导管弯曲半径对固有频率的影响曲线

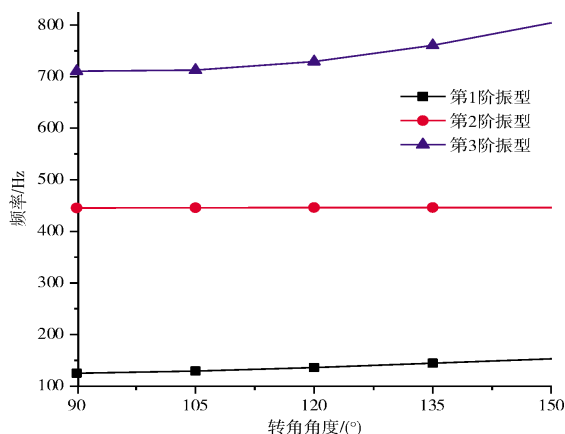


图 6 弯曲角度对导管固有频率的影响曲线

从图中可见：

(1) 随弯曲半径增大, 导管各阶固有频率略有提高, 弯曲半径在 30~60 mm 变化范围时, 前 3 阶固有频率变化值不大于 8%。

(2) 随弯曲角度增大, 导管各阶固有频率略有增大, 弯曲角度在 90°~150° 变化范围时, 固有频率变化值不大于 14%。

2.3 装配参数

在工程中安装导管时, 常会出现导管支架之间不同心以及卡箍螺栓的安装紧度不够等问题。本文通过带预应力的模态计算和试验测试, 研究固定点偏移量和螺栓安装预紧力对导管模态特性的影响。

求得导管前 5 阶固有频率随横向偏移量的变化规律见表 1。从表中可见, 当偏移量的变化较小(10 mm 以内)时, 其固有频率基本不发生变化, 因此可以忽略安装偏移对模态特性的影响。但值得说明的是, 初始安装偏移可能带来导管较大的内部初始应力, 进而直接导致强度破坏或间接引起疲劳破坏。

表 1 不同横向偏移量下的固有频率				Hz
模态阶数	横向(Y 方向)偏移量/mm			
	0	0.1	10	
1	71.623	71.623	71.623	71.578
2	197.11	197.11	197.11	196.75
3	385.59	385.59	385.59	385.30
4	635.67	635.67	635.67	635.36
5	946.48	946.48	946.48	946.48

安装预紧力指固定卡箍的螺栓拧紧力矩。基于胡克定理, 通过对卡箍进行加载试验, 得到其试验力 - 变形曲线, 可进一步得出卡箍刚度随安装预紧力变化的规律, 如图 7 所示。从图中可见, 卡箍在不同螺栓预

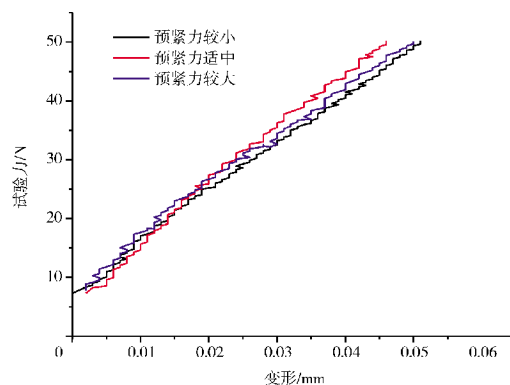


图 7 不同预紧力作用下卡箍的力 - 变形曲线

紧力作用下刚度是近似不变的, 在 $1.1\text{e}3 \sim 1.3\text{e}3 \text{ N/mm}$ 之间。

将卡箍等效为弹簧单元, 进一步进行考虑卡箍影响的导管模态计算, 求得管路在不同弹簧刚度下的固有频率, 如图 8 所示。从图中可见, 螺栓预紧力对各阶固有频率的影响很小。

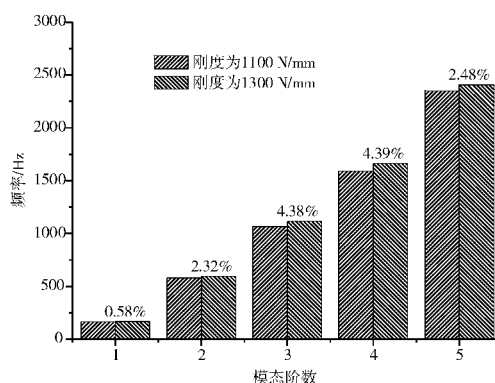


图 8 不同刚度下的固有频率

2.4 流体介质

在压力、速度等作用下, 航空发动机导管内燃油、滑油、气体等流体介质会对导管的横向振动有一定影响。本文采用 ANSYS 中的流固耦合模块对导管的湿模态特性进行分析。

求得充液对不同外径管路基频的影响, 如图 9 所示。从图中可见, 管内充液会使管路的固有频率降低; 管内液体不同, 其下降的幅度也不同。

求得充气、燃油、滑油和充水 4 种状态下, 不同液体密度对基频的影响, 如图 10 所示。从图中可见, 随管内液体密度增大, 导管基频降低, 如滑油对管路固有特性的影响比燃油的大。

发动机外部管路内燃油压力一般为 10 MPa, 最大可达 20 MPa; 滑油压力一般为 0.2 MPa, 瞬时最大

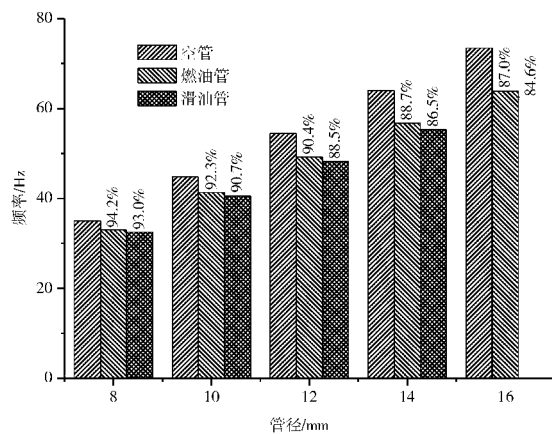


图 9 空管和充液管基频的对比

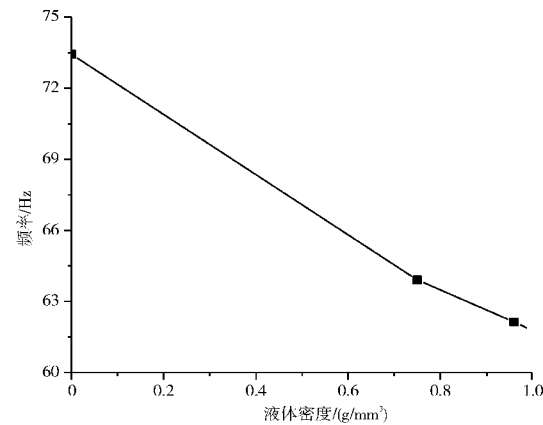


图 10 导管随管内流体密度的变化曲线

0.55 MPa。求得管内压力分别为 5、10、15、20 MPa 时导管的模态频率,如图 11 所示。从图中可见,导管前 3 阶固有频率在 0~20 MPa 的变化范围内变化值不超过 2%。因此,在发动机工作过程中管内流体的压力对管路固有特性的影响较小。

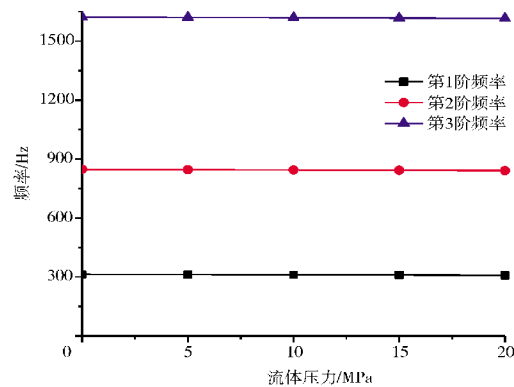


图 11 导管随管内流体压力的变化曲线

分别针对管内流体流速为 100、200、300、1000 m/s 4 种状态下,导管的固有特性进行计算,求得流速的影响规律,如图 12 所示。从图中可见,流体流速对

管路固有频率几乎没有影响,这与文献 [16] 中根据 Hamilton 原理推导出的固有频率随流速的变化规律具有较好的一致性。

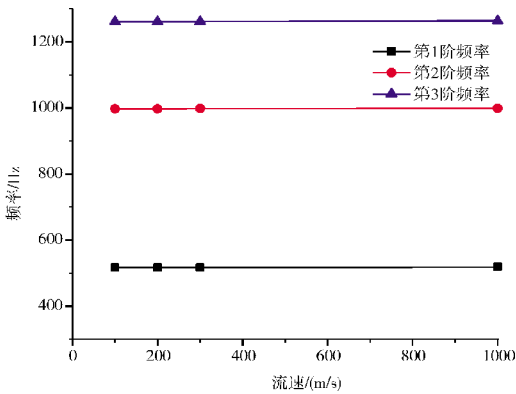


图 12 导管固有频率随流速变化曲线

3 特征参数敏感度对比

采用敏感度分析方法,针对某导管求解得到基频值对各设计参数的敏感度,见表 2,并如图 13 所示。从表和图中可见,各参数对管路振动特性的影响程度由大到小依次是:外径、跨度、弯曲角度、弯曲半径、壁厚、径向偏移。

表 2 导管设计参数及其敏感度			
变量	初始值	变异系数	敏感度 /%
跨度	500 mm	0.3	34.94
壁厚	1 mm	0.3	2.42
外径	16 mm	0.3	47.76
弯曲半径	48 mm	0.3	2.60
弯曲角度	90°	0.3	11.98
横向偏移	0 mm	0.3	0.30

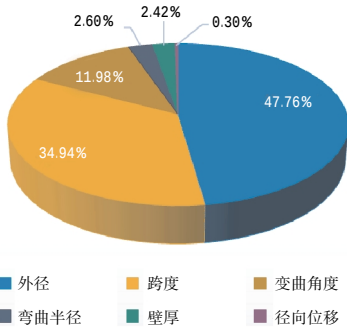


图 13 各参数敏感度对比

4 结论

外径、跨度和弯曲角度是影响导管振动特性的主要结构与装配参数,随外径增大,导管基频提高;随跨

度增大,基频降低;随弯曲角度增大,基频提高。而弯曲半径、壁厚和安装横向偏移对固有特性的影响很小,可不予考虑。

导管充液后,各阶模态频率会略有降低,液体密度越大,影响越大;而流体压力和速度对模态特性影响很小,可不予考虑。

参考文献:

- [1] 胡安辉,周立江,高伟,等. 发动机燃油管断裂故障分析[J]. 失效分析与预防,2012,7(3):192-196.
HU Anhui, ZHOU Lijiang, GAO Wei, et al. Failure analysis of fuel oil pipe in an aeroengine[J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(3): 192-196. (in Chinese)
- [2] Park J H, Richard L S. Piperouting algorithm development: case study of a ship engine room design [J]. Expert Systems with Applications, 2002, 23(3): 299-309.
- [3] 许锴俊. 航空发动机导管结构完整性要求的初步研究 [C]// 中国航空学会第七届发动机结构强度振动学术会议论文集, 洛阳:北京航空航天大学,1994:287-297.
XU Ejun. The elementary study for the integrality requirement of aero engine pipes [C]// The 7th Strength and Vibration Academic Conference of China Astronautics Academy. Luoyang:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1994:287-297. (in Chinese)
- [4] Shao C, Qiu M X, Li Y X. Study on vibration fatigue limits test method for metallic joint pipe [J].Applied Mechanics and Materials, 2013, 248: 74-78.
- [5] 刘涛,张荫鳌,田金光,等. 某发动机外部管路振动应力测试研究 [J]. 中国新技术新产品, 2014 (10): 30.
LIU Tao, ZHANG Yin'ao, TIAN Jinguang, et al. The test research of vibration stress in external pipelines of a aeroengine [J]. China New Technologies and Products, 2014(10):30. (in Chinese)
- [6] 李益萱,邵闯,张治君,等. 振动环境中钛合金导管的连接特性试验研究[J]. 结构强度研究, 2013 (2): 23-27.
LI Yixuan, SHAO Chuang, ZHANG Zhijun, et al. The test research of connection characteristics of titanium alloy pipe in vibration environment[J]. Structure Strength Research, 2013(2):23-27. (in Chinese)
- [7] 康力,洪杰,徐雷,等. 航空发动机外部管路的振动响应分析 [J]. 航空发动机, 2015, 41(2): 50-54.
KANG Li, HONG Jie, XU Lei, et al. Vibration response analysis of aeroengine external pipelines [J].Aeroengine, 2015, 41 (2):50-54. (in Chinese)
- [8] Wiggert D C, Otwell R S, Hatfield F J. The effect elbow restraint on pressure transients [J]. Trans ASME, Journal of Fluids Engineering, 1985, 107(3): 402-406.
- [9] 王国鹏,万利,周杨娜. 航空发动机管路振动故障研究[J].振动工程学报,2008(S1): 191-194.
WANG Guopeng, WAN Li, ZHOU Yangna. Vibration failure of the aeroengine tube [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008 (S1): 191-194. (in Chinese)
- [10] 杜冬菊,黄佳典. 液压管路振动特性研究 [J]. 中国造船, 2003,44 (S1):394-399.
DU Dongju, HUANG Jiadian. The study on vibration property of the hydraulic pipes [J]. Shipbuilding of China, 2003, 44 (S1):394-399. (in Chinese)
- [11] 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): 29-33.
JIAO Zongxia, HUA Qing, YU Kai. Frequency domain analysis of vibrations in liquidfilled piping systems[J]. Chinese journal of aeronautics, 1999, 20(4):29-33. (in Chinese)
- [12] 李艳华,柳贡民,张寅豹.流体管道横向振动的频域传递矩阵法[J].振动工程学报,2009,22(6):597-601.
LI Yanhua, LIU Gongmin, ZHANG Yanbao. A transfer matrix method in frequency domain for lateral vibration of liquidfilled pipes[J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(6):597-601. (in Chinese)
- [13] 刘伟,曹刚,翟红波,等. 发动机管路卡箍位置动力灵敏度分析与优化设计[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12):2756-2762.
LIU Wei, CAO Gang, ZHAI Hongbo, et al. Sensitivity analysis and dynamic optimization design of supports' positions for engine pipelines [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12):2756-2762. (in Chinese)
- [14] 金长明. 充液管道振动特性分析及其减振控制[D]. 上海:上海交通大学,2010.
JIN Changming. Analysis of fluidfilled pipe vibration characteristic and control [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [15] 倪振华. 振动力学[M].西安:西安交通大学出版社,1989:221-250.
NI Zhenhua. Vibration mechanics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989:221-250. (in Chinese)
- [16] 王世忠,刘玉兰,黄文虎. 输送流体管道的固 - 液耦合动力学研究[J]. 应用数学和力学,1998,19(11):987-993.
WANG Shizhong, LIU Yulan, HUANG Wenhui. Research on solidliquid coupling dynamics of pipe conveying fluid[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1998, 19(11):987-993. (in Chinese)

(编辑:李华文)