

充液管路固有频率试验与计算分析^{*}

邱明星^{1,2}, 陈志英¹, 王建军¹, 刘中华¹, 赵伟志¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中航工业 沈阳发动机设计研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘 要: 为验证用有限元法计算充液管路固有频率特性的有效性, 实现充液管路振动特性仿真, 分别采用有限元分析和试验测试手段, 对充液管路固有频率进行了试验和计算分析。对自由状态的空管、填充滑油和填充燃油三种状况的管路应用锤击法进行了振动测量, 同时用 ANSYS 有限元分析系统对这三种状况管路固有频率进行了计算。通过计算与试验, 分析了不同管径、不同管材、流体压力和流速、温度等因素对固有频率的影响, 特别是得到了充液管路对比空管的固有频率下降规律, 构建了考虑充液等因素的航空发动机管路固有频率计算模型。

关键词: 管路; 流固耦合; 固有频率; 试验; 有限元计算

中图分类号: V231.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2013) 11-1537-06

Experiment and Numerical Analysis of Natural Frequency for Liquid-Filled Pipe

QIU Ming-xing^{1,2}, CHEN Zhi-ying¹, WANG Jian-jun¹, LIU Zhong-hua¹, ZHAO Wei-zhi¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. AVIC Shengyang Engine Design and Research Institute, Shengyang 110015, China)

Abstract: In order to confirm the validity of calculating natural frequencies for filling liquid pipe by the FEA, natural frequencies were measured and calculated for aero-engine pipes with liquid by the FEA and experiment. Using the hammering method vibration feature was obtained experimentally for pipes which are either empty, or filling with lubrication oil or filling with fuel, and the natural frequencies were calculated by the FEA with ANSYS software. The affecting factors were analyzed on natural frequencies for pipe diameter, pipe material, liquid pressure, liquid velocity and temperature. Especially, the numerical value of frequency decreasing trend was obtained with filling liquid pipe. The calculation model of natural frequencies was built up including several factors such as filling liquid. The technology foundation is established for analyzing pipe vibration features.

Key words: Pipes; Liquid-solid couple; Natural frequency; Experiment; FEA

1 引 言

航空发动机管路将发动机各部件、附件之间以及

与飞机间相互连接,并输送流体,完成发动机运行、操控、润滑、冷却等功能。由于管路受到来自发动机转子及传动组件的激振,导致管路系统振动,会造成管

^{*} 收稿日期: 2012-12-03; 修订日期: 2013-04-12。

基金项目: 国家自然科学基金 (51275024)。

作者简介: 邱明星 (1965—), 男, 研究员, 博士生, 研究领域为航空发动机总体结构设计。E-mail: 606@avic.com

通讯作者: 陈志英 (1960—), 男, 教授, 博士, 研究领域为航空发动机总体结构优化设计、适航与维修等。

E-mail: chenzhiying@buaa.edu.cn

路故障发生,影响到管路系统甚至发动机的安全可靠地运行。为使管路避免发生共振,除确定出转子系统及附件系统激振频率外,需摸清管路固有频率。任建亭等进行了输流管道线性振动的动力学建模与非线性振动分析方法研究^[1]。美军标发动机结构完整大纲指出管路必须满足其标准的结构和完整性要求。我国国军标要求应进行外部部件的共振试验,对发动机外部调节器和管路,应在飞行和地面包线范围内的所有转速和推力状态没有破坏性振动^[2]。

采用数字化平台敷设的管路通常计算管路固有频率时未考虑管路内流体的影响,而加入流体进行固有频率计算,如何考虑流固耦合的影响。为此有学者研究了考虑由于线性摩擦、泊松耦合和连接耦合作用下引起管内流固耦合现象的频率响应分析^[3]。张智勇等通过固液耦合振动有限元分析,得出了不用考虑流固耦合效应而进行固有频率计算的结论^[4]。而数字化敷管时每敷设完一根导管就加入充液进行管路固有频率计算,增加了计算模型的复杂性。

由此可见,对空管和充液管路进行试验与有限元计算分析,研究航空发动机不同液体对管路固有频率的影响规律就显得很有意义。本文作者所在项目组进行了多年的管路数字化敷管的研究,采用发动机和其附件布局的三维数字化模型^[5],开发了基于UG软件平台的敷管软件工具^[6],提出了若干条管路敷管准则方法^[7],实现了管路数字化敷管,为进一步进行管路振动特性分析奠定了基础。为进行快速敷管和振动特性分析从而在设计阶段为数字化敷管进行快速简便共振频率分析以及调频方式提供技术基础。

2 锤击法试验和数值计算

试验采用锤击法对自由状态空管、充液、不同材料、不同流速、不同压力状态下的管路进行固有频率测量。空管总共 12 根管,选用管长 1000mm,管壁厚度为 1mm,管路外径从 8mm 到 20mm 不等,以及 1Cr18Ni9Ti 和钛合金 TA18 两种材料的发动机管路。

试验仪器设备选用加速度计传感器、INV303 系列智能信号采集处理分析仪、计算机及 DASP 大容量数据采集与信号处理分析软件。锤击法对管路进行振动测试系统参见图 1 所示。

数值计算采用有限元计算方法,主要流程包括单元的选择、单元参数的设置、设定材料属性、建立管路模型、网格划分、求解及结果分析。在 ANSYS 系统中选择单元类型为 Pipe16,可以承受拉压、扭转和弯曲

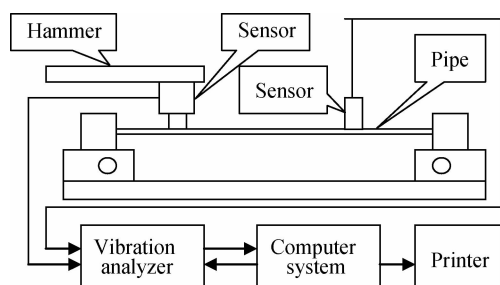


Fig. 1 Vibration frequencies test for pipe

载荷。它是在三维梁单元的基础上,根据对称性及标准管几何尺寸简化而得到的线性单元。Pipe16 既适用于厚壁情况,也适用于薄壁情形,其径向和剪切应力是根据薄壁理论计算得出的。设定管路直径和壁厚等参数,在计算管路内充液的状况时,设置管路材料和管内介质包括燃油和滑油等材料属性,计算时取其 20℃ 的密度,分别为 802.4kg/m^3 和 900kg/m^3 。计算频率选择模态分析 Model 模块,模态分析方法选择默认的 Block Lanczos 法。选择 Solve 进行求解,由于对自由状态的管路计算所以不需要添加约束^[8]。昆明理工大学的曹亮推导出输流直管的轴向及横向振动的传递矩阵,对管道进行模态频率,模态振型以及频域响应的计算^[9],验证了用有限元数值计算与传递矩阵法计算低阶固有频率结果基本一致。

在进行数值计算中,同时考虑内压力和流固耦合作用,周向波数为 m 的管路的单元运动方程表示为

$$([M]_m^{se} + [M]_m^{ca}) \cdot \{\ddot{\delta}\}_m^e + ([K]_m^e + [K]_m^{ca}) \cdot \{\delta\}_m^e = \{0\} \quad (1)$$

式中 $[M]_m^{ca}$ 表示周向波数 m 对应的附加流体质量矩阵。 $[K]_m^{ca}$ 表示周向波数 m 对应的附加内压力引起的附加刚度矩阵。

使用 ANSYS 软件对管路进行流固耦合模态分析的步骤如下:首先,把 UG 中建立的管路模型导出,主要包括管路的径线和截面信息,将其导入 ANSYS 软件生成管路实体;然后设置单元类型、实常数和材料属性等基本参数,使用适当的单元分别对管路结构和流体部分划分网格,根据管路的实际位移设置边界条件;计入流体影响时,需在管内流体和外部管路之间施加耦合面约束,在管路进出口端面的流体节点上设定压力值;先进行静态分析,将流体压力转化为预应力加载,进而计算管路的模态频率和振型。

3 空管试验和计算

试验采用锤击法对自由状态直管进行固有频率

测量。

采用有限元计算时由于需分析管路在内部流体影响下的复杂特性情况,因此选用壳单元作为网格划分的单元体^[10,11]。材料选用 TA18,其密度为 4470kg/m³,弹性模量为 99GPa,泊松比为 0.38^[12]。

在 ANSYS 系统中选择单元类型:空管的计算选用的是管单元 Pipe16,该单元是一个单轴单元,可以承受拉压、扭转和弯曲载荷,适合于分析直管结构。表 1 列出了 TA18 空管不同管径一阶固有频率试验与计算结果。

Table 1 1 st nature frequencies of TA18 pipes					
Diameter/mm	8	10	12	14	15
Test/Hz	42	53	66	78	84
Calculation/Hz	41.9	53.6	65.4	77.2	83.0
Error/%	0.24	1.13	0.91	1.03	1.19

从表 1 可以看出,管径 8mm 到管径 15mm 的五种空管第一阶固有频率的试验与计算结果十分吻合,相对误差在 0.25 ~ 1.19% 之间。参见图 2 所示。也说明不同管径对于空管第一阶固有频率试验与计算结果误差不大。

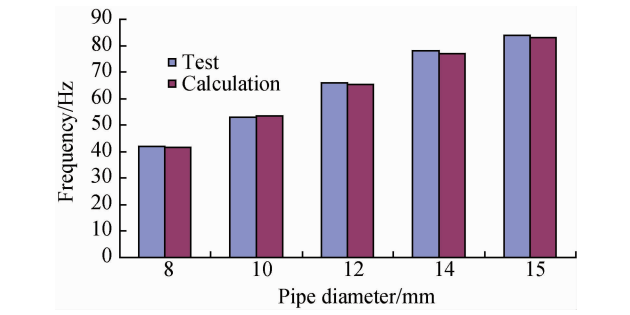


Fig. 2 Nature frequencies of test and calculation

4 充液管路固有频率分析

航空发动机管路系统包括燃油管、润滑油管、冷却气管、加温管、控制液压管等,因此管内的流体主要是燃油、润滑油和热空气三种介质。三者的物理性质相差较大,因此这三种输流管路的固有频率受介质影响程度会不同。本文未做热空气管试验。

航空燃气涡轮发动机使用的是航空煤油,选取 775 kg/m³ 作为燃油在 20℃ 时密度值^[13]。润滑油选取用于涡喷发动机和直升机的主滑油系统上的航空润滑油,使用常温密度为 959.7 kg/m³。

管内充油直管的计算单元选择了管单元,即 Pipe16,因为该单元可以通过设置实常数来设置管内

的介质,不需要建立流体单元,以方便分析^[14,15]。表 2 是填充燃油 TA18 管的 5 种管径管路自由状态一阶固有频率。

Table 2 Frequencies of filling fuel pipes(TA18)					
Diameter/mm	8	10	12	14	15
Test/Hz	37	45	52	61	62
Calculation/Hz	37.87	46.88	55.38	63.42	67.28
Error/%	2.35	4.18	6.50	3.97	8.52

从表 2 可以看出,计算结果相对于试验数据偏大,但不存在误差值随着管径增大的变化规律。平均相对误差为 5.10%,充液管路相对空管误差要略大,误差大的原因可能是理论计算时充液是填满了。另外在进行锤击法试验时,管路中液体被激振对固有频率的影响程度不可预知。填充滑油的试验结果见表 3 所示。

Table 3 Frequencies of filling oil pipes(TA18)					
Diameter/mm	8	10	12	14	15
Test/Hz	36	44	51	57	59
Calculation/Hz	37.07	45.62	53.60	61.10	64.69
Error/%	2.97	3.68	5.10	7.19	9.64

从表 2 和表 3 可以看出,管内充两种不同液体的计算结果相对于试验数据偏差在 10% 之内,且误差值有随着管径增大的变化规律。平均相对误差为 5.72%,由此可见,试验与计算得到了相互验证。

5 不同管径一阶频率的变化分析

从上述试验可以得到 TA18 管自由状态下不同管径两种充液管路与空管一阶固有频率试验结果,以及两种充液管路相对空管的频率变化率列于表 4。

Table 4 Frequencies of filling pipes(TA18)					
Diameter/mm	8	10	12	14	15
Empty/Hz	42	53	66	78	84
Fuel/Hz	37	45	52	61	62
Oil/Hz	36	44	51	57	59
Ratio for fuel/%	11.9	15.1	21.2	21.8	26.1
Ratio for oil/%	14.2	16.9	22.7	26.9	29.7

采用管径从 8mm 到 15mm 五种导管,对于空管、充燃油和滑油的第一阶固有频率变化情况,参见图 3 所示。

可以看出,填充流体质量的管路固有频率均下降,由于润滑油比燃油的密度大,因此相同管径的滑油管比燃油管频率下降的幅度要略大。并且随着管径的增大,频率下降幅度加大,特别对于粗管充液后固有频率变化较大。从表 4 中的数据可以得到这五

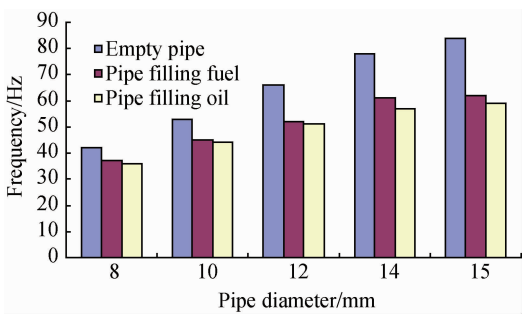


Fig. 3 Frequencies of filling liquid pipes

种不同管径两种液体的下降规律,可以用于数字化空管敷设时,考虑工作状态时充液管路固有频率的修正。

6 不同管材对固有频率的影响

为了摸清管路不同材料对固有频率的影响规律,选择了管径为 16mm 的 1Cr18Ni9Ti 和 TA18 两种不同材料管路,针对这两种管材的空管和填充燃油液体进行了前 5 阶固有频率试验测量,同时计算出各阶变化比率,结果见表 5 所示。

Table 5 Frequencies of two material pipes

Orders	1st	2nd	3rd	4th	5th
Empty (1Cr18Ni9Ti)/Hz	94	256	498	828	1217
Empty (TA18)/Hz	90	251	484	812	1178
Ratio/%	4.2	1.9	2.8	1.9	3.2
Fuel (1Cr18Ni9Ti)/Hz	81	222	436	724	1065
Ratio/%	13.8	13.2	12.4	12.5	12.4
Fuel (TA18)/Hz	66	188	362	605	896
Ratio/%	26.6	25.1	25.2	25.4	23.9

从表 5 可以看出,以传统 1Cr18Ni9Ti 管材为基准,对比分析 TA18 管路,以及充液后的固有频率变化情况见图 4 所示。

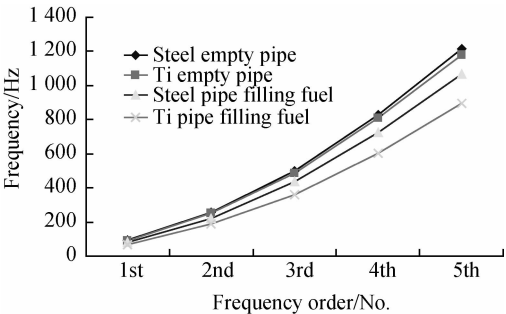


Fig. 4 Frequencies of two material pipes

采用 TA18 管材对比 1Cr18Ni9Ti 的前 5 阶固有

频率下降率为 1.9% ~ 4.2%,各阶下降率不大,且差别不大。说明用 TA18 替换 1Cr18Ni9Ti 管路作为调频效果不太明显。相同管材和管径的导管充液后不同阶次固有频率下降幅度基本相同,不同管材充液后的固有频率下降幅度是不同的。采用 TA18 充满燃油管时选用 1Cr18Ni9Ti 的频率下降明显。

7 流体压力和流速对固有频率的影响

文献[16]研究了流体的速度和压力对截流三维管道振动频率的影响,并且探讨管道失稳时流体的临界速度。而本文考虑的流体压力是航空发动机滑油和燃油流动的情况,未进入失稳状态。根据发动机工况设定管路中滑油压力为 0.005MPa, 0.01MPa, 0.5MPa 三个值,选用管材为 1Cr18Ni9Ti,管长 500mm,两端固支,计算得到其固有频率见表 6 所示。

Table 6 Frequencies of oil pressure pipes(Hz)

Press	0.005	0.01	0.5
Orders	MPa	MPa	MPa
1st	228.87	228.87	229.27
2nd	625.59	625.6	626.13
3rd	1213.3	1213.3	1213.9
4th	1979.6	1979.6	1980.2
5th	2912.5	2912.5	2913.1

燃油管路的压力集中在 0.4 ~ 0.6 MPa 和 6.1 ~ 7.1MPa 两个区域,计算得到其固有频率见表 7 所示。

Table 7 Frequencies of fuel pressure pipes(Hz)

Press	0.4	0.6	6	7
Orders	MPa	MPa	MPa	MPa
1st	234.85	235.02	239.4	240.21
2nd	641.45	641.67	647.61	648.7
3rd	1243.5	1243.8	1250.2	1251.4
4th	2028.3	2028.6	2035	2036.4
5th	1983.5	2983.7	2990.4	2991.7

由表 6 和 7 可以看出,随流体压力的增加管路固有频率变化量非常小。滑油管路三种压力下的频率值基本不变,相差幅度不超过 0.2%;燃油管路在 0.4 ~ 0.6 MPa 和 6.1 ~ 7.1MPa 两个压力范围内的频率变化在 3% 以内。由于采用的是金属导管,压力的变化不足以引起导管刚度的变化。另外,滑油和燃油在工作压力范围内属于不可压缩流体,也不足以引起导管刚度和导管内充液质量的变化。因此流体压力对导管固有频率的影响可以忽略。

为验证流速对管路固有频率的影响,进行了三种流速的试验研究,结果见表 8 所示。

Table 8 Frequencies of different flow pipes (Hz)				
Velocity/(m/s)				
Diameter/mm	0	1. 31	2. 62	
12	51	51	50	
16	106	106	105	

从表 8 可以看出,流速对管路固有频率几乎没有影响。这与文献[17]研究的系统在入口压力扰动下的频率响应特性以及系统的固有稳定性分析异曲同工。哈尔滨工业大学的王世忠等学者根据 Hamilton 原理推导固-液耦合振动方程,讨论了流速、压强、固液耦合刚度等对固有频率的影响,得到了各阶频率随流速的变化规律^[18],也表明了本文研究结论的一致性。

8 温度变化对固有频率的影响

讨论流体温度对管路固有特性影响时,不考虑流体和管路的换热过程,只研究管路 with 流体温度相同时的情况。温度的改变会使管路材料的弹性模量发生改变,从而影响固有频率。选取航空发动机管路的材料为 1Cr18Ni9Ti,查阅材料手册可以得到材料的弹性模量值与温度的关系。

针对航空发动机管路系统,空气管的温度较高,一般为 160℃ 和 350℃;燃油温度最低,大部分为 100℃;润滑油介于前二者之间,集中在 100 ~ 130℃ 和 180℃。主要讨论不计管内流体时,不同温度下管路本身的固有频率值,选取三种管路包含的全部温度范围,计算结果如表 9 所示。

Table 9 Frequencies of pipes with temperature						
Temperature/ ℃	Elastic modulus/ GPa	Frequencies/Hz				
		1st	2nd	3rd	4th	
20	184. 0	263. 88	720. 93	1397. 1	2277. 3	
50	180. 32	261. 23	713. 69	1383. 1	2254. 4	
100	176. 64	258. 55	706. 37	1368. 9	2231. 3	
110	175. 72	257. 88	704. 53	1365. 3	2225. 5	
120	174. 8	257. 2	702. 68	1361. 8	2219. 6	
130	172. 96	255. 85	698. 97	1354. 6	2207. 9	
150	172. 04	255. 16	697. 11	1351. 0	2202. 0	
160	171. 12	254. 48	695. 24	1347. 4	2196. 2	
180	169. 28	253. 11	291. 5	1340. 1	2184. 3	
350	157. 32	244. 0	666. 62	1291. 9	2105. 7	

由上表可以看出空管的固有频率随温度的升高而减小,各阶的变化趋势相同。图 5 表示前 4 阶频率随温度的变化曲线,可以看出曲线基本为较小斜率的直线。对于第一阶曲线其温度每上升 1℃,固有频率

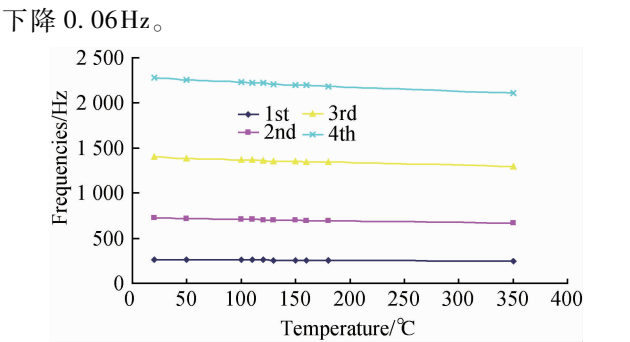


Fig. 5 Frequencies of pipes with temperature

9 仿真模型

为了减少计算机辅助敷管时考虑充液后固有频率计算的复杂性,通常可以先对敷设的空管进行固有频率计算,采用本文的试验结果修正,模拟真实工况下的频率情况,从而进行调频研究。

通过对直管固有频率进行试验与计算对比,总结出相对空管的不同管径、不同液体、不同材料等管路固有频率变化规律,即可以用计算数据对管路振动特性进行仿真分析。

充液管路固有频率可用如下公式进行仿真计算:

$$F_s = (1 - h_{ijkm}) F_e \tag{2}$$

式中 F_s 的下标 S 表示仿真计算固有频率; h_{ijkm} 为频率下降幅度系数,其中下标 i 为阶次; j 为液体类型; k 为管路材料; m 为管径;

F_e 的下标 e 表示空管时计算的固有频率。

由此可见,当确定了振动分析阶次、充液类型、管路材料和管径后,计算出空管管路的固有频率 F_e 时,即可通过公式(2)折算出充液管路的固有频率 F_s 。同时要考虑温度的影响,特别是管路温度超过常温较大时,也要进行频率修正。对于流体流速和管路内压力的影响可以不必考虑。可参考贾志刚等学者的研究,通过考虑影响管路固有频率的主要结构参数,以获得不同几何参数对管路固有频率的影响程度^[19]。根据以上原则从而可进行管路共振分析及调频工作。

10 结 论

通过对直管固有频率进行试验与计算,得出以下结论:

(1)对于不同管径、充液、不同材料等管路的固有频率试验与计算对比,计算误差在可接受的范围内。计算采用的管路是不考虑加工误差的理想参数

下的计算结果,而试验选用的管路是存在制造和加工误差,如管路长度不精确性,沿管路长度方向的壁厚存在不均匀情况等。通过修正即可用计算数据对管路振动特性进行仿真分析。

(2)计入燃油和润滑油流体质量的管路固有频率均下降,并且随着管径的增大,频率下降幅度加大。不同管材充液后的固有频率下降幅度是不同的,但相同管材充液后不同阶次固有频率下降幅度基本相同的。在计算填充燃油和滑油的管路固有频率时可以不考虑流体压力和流速的影响。计算与试验值的误差可能是由于试验时管路内充液不充实,同时会造成锤击试验时液体对管路的震荡冲击作用的影响程度不清楚。

(3)采用数字化设计平台对敷设的管路进行振动分析时,应考虑管路充液对固有频率的影响。通过对充液管路振动特性变化的规律性研究,可以由空管固有频率计算再折算出充液管路的固有频率,从而达到简化、快捷、正确地仿真出管路振动特性。本研究对管路系统设计、故障分析、调频等工作具有工程指导作用。

参考文献:

- [1] 任建亭,姜节胜. 输流管道系统振动研究进展[J]. 力学进展,2003,33(3):313-324.
- [2] GJB241-87. 军用涡轮喷气发动机通用规范[J]. 国防科工委军标出版发行部,1987.
- [3] Zhang L, Tiisseling A S, Vardy A E. FSI Analysis of Liquid Filled Pipes[J]. *J. Sound Vib.*, 1999, 224(1): 69-99.
- [4] 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.
- [5] 罗 强,陈志英. 发动机附件三维布局方法研究[J]. 航空动力学报,2003,18(4):481-484.
- [6] 陈志英,樊 江,魏文庆,等. 发动机外部管路系统的计算机辅助敷设研究[J]. 推进技术,1999,20(6):58-61. (CHEN Zhi-ying, FAN Jiang, WEI Wen-qing, et al. Computer Aided Routing System for 3-D Aircraft Engine Pipe[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(6):58-61.)
- [7] 陈志英,唐文哲. 管路系统计算机辅助设计方法研究[J]. 航空动力学报,2001,16(2):182-183.
- [8] 杨 莹,陈志英. 航空发动机管路流固耦合固有频率计算与分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,2010,23(1):42-46.
- [9] 曹 亮. 输流管道流固耦合振动特性分析[D]. 昆明:昆明理工大学,2004.
- [10] 许 萍,李著信,蒋 忠. 液体输送管道固液耦合振动的有限元分析[J]. 管道技术与设备,2004,12(6):3-6.
- [11] 陈贵清,郝婷玥,丁幼松. 输流管道流固耦合振动分析中的数学建模[J]. 唐山师范学院学报,2007,29(2):1-4.
- [12] 中国航空材料研究所. 航空发动机设计用材料数据手册[M]. 北京:中国航空发动机总公司,2005.
- [13] 曹长武. 燃料产品质量检测手册燃油[M]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [14] Paidoussis M P, LI G X. Pipes Conveying Fluid: A Model Dynamic Problem[J]. *Fluids and Structures*, 1993, 7: 137-204.
- [15] 张立翔,杨 柯. 流体结构互动理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [16] 王世忠,王 茹. 三维管道固液耦合振动分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,1992,24(4):43-49.
- [17] 刘 上,刘红军,徐浩海,等. 流量调节器-管路系统频率特性及稳定性[J]. 推进技术,2012,33(4):631-638. (LIU Shang, LIU Hong-jun, XU Hao-hai, et al. Frequency Characteristics and Stability of the Flow Regulator-Pipe System[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012,33(4):631-638.)
- [18] 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.
- [19] 贾志刚,陈志英. 基于参数化的航空发动机管路调频方法研究[J]. 航空发动机,2008,34(4):34-37.

(编辑:张荣莉)