

不同校准装置对引压管腔动态特性校准

李 博^{1,2}, 杨 军¹, 石玉松¹, 秦海峰¹, 尹 肖¹, 黄 楠³

(1. 中国航空工业集团有限公司 北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;

2. 陆军装甲兵学院 兵器与控制系, 北京 100072;

3. 中国兵器工业集团有限公司 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘 要: 为了探索引压管腔在动态压力校准中各校准方法的一致性与数据准确性, 确立了以简单直管形式引压管腔开展动态特性校准的研究。采用理论和仿真的手段分析并建立了引压管腔模型, 理论模型和仿真结果一致性极高。利用3种正弦压力校准装置对同一引压管腔进行了动态校准组合试验, 结果表明: 3种校准方法所得的动态特性与理论分析趋势一致, 对于引压管腔基频的校准各试验之间偏差小于0.55%, 但与基频理论值最大偏差为-3.17%。该研究将会为未来引压管腔结构设计和动态特性的补偿修正提供了一定参考依据。

关 键 词: 引压管腔; 动态压力测量; 正弦压力; 动态特性; 动态校准

中图分类号: V211.71

文献标志码: A

Calibration of dynamic characteristics of pressure tube cavity by different calibration devices

LI Bo^{1,2}, YANG Jun¹, SHI Yusong¹, QIN Haifeng¹,
YIN Xiao¹, HUANG Nan³

(1. Changcheng Institute of Metrology and Measurement,
Aviation Industry Corporation of China Limited, Beijing 100095, China;

2. Department of Weaponry and Control,
Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China;

3. China North Vehicle Research Institute,
China North Industries Group Corporation Limited, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to explore the consistency and data accuracy of each calibration method in the dynamic pressure calibration of the pressure tube cavity, a simple straight-tube type of pressure tube cavity was established to carry out the dynamic characteristic calibration research. The theoretical and simulation methods were used to analyze and establish the model of the pressure tube cavity. The consistency between the theoretical model and the simulation results was very high. Three kinds of sinusoidal pressure calibration devices were used to carry out dynamic calibration for the same pressure tube cavity. Results showed that the dynamic characteristics obtained by the three calibration methods were consistent with the trend of theoretical analysis. For the calibration of the fundamental frequency of the pressure

收稿日期: 2019-05-31

基金项目: 装备技术基础项目(JZX7J201802JL0022XX); 国家“十三五”技术基础项目(JSJL2015205B015)

作者简介: 李博(1990—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事力学量的动态计量与校准研究。E-mail: libo@cimm.com.cn

引用格式: 李博, 杨军, 石玉松, 等. 不同校准装置对引压管腔动态特性校准[J]. 航空动力学报, 2019, 34(12): 2559-2568. LI Bo, YANG Jun, SHI Yusong, et al. Calibration of dynamic characteristics of pressure tube cavity by different calibration devices[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(12): 2559-2568.

tube cavity, the deviation between the tests was less than 0.55%. However, the maximum deviation from the theoretical value of the fundamental frequency was -3.17% , and there was a large deviation from the other resonance frequencies. This study provides a reference for structural design of pressure tube cavity and compensation correction of dynamic characteristics in the future.

Key words: pressure tube cavity; dynamic pressure measurement; sinusoidal pressure; dynamic characteristics; dynamic calibration

在航空航天发动机的动态压力测试研究中,发动机内部流场复杂、流道狭小,工作环境恶劣,受温度、结构、空间等的影响和限制,压力无法直接测量,需要连接各种引压管腔或探针型传感器^[1-4]来满足现场要求以及传感器前端恶劣环境的动态压力测量。为了不失真的测出动态信号中的各种低频到高频谐波,就必须考虑引压管腔的动态特性^[5-9]。一般而言,测试系统频率响应越高,产生的动态误差就越小,但由于管腔自身结构的频响特性通常较低,引压管腔的动态特性常常成为制约整个测压系统动态特性的主要因素^[10]。

以美国 NASA 为代表,通过自 20 世纪 70 年代开始对引压管腔机理分析与模型建立,目前进展到针对引压管腔的测压系统内存在不同介质^[11],不同温度^[12],多场耦合等情况下的校准研究。国内对引压管腔的动态特性也进行了大量理论与试验研究,但对于机理分析与试验研究之间的配合以及一致性研究较少。

本文建立了简单直管形式引压管腔的动态特性数学模型,通过现有的 3 种正弦压力校准装置对引压管腔的动态特性进行校准,发现各校准方法之间得到的动态特性一致性较高,并且试验结果与理论模型也较为一致,可为引压管腔的设计和引压管腔动态特性补偿修正提供依据。

1 引压管腔结构形式

1.1 管腔模型

工程中大部分引压管腔结构可以简化为图 1 所示的直管形式, p 为入口压力, d 为管腔内径, l 为管腔长度。一般来说直管引压管腔形式的动态校准中,管腔的第一个共振峰与 $1/4$ 波长公式吻合度较高,但管道其他共振峰吻合度并不明显,其估算直管的动态特性具有一定价值。

实际工程中常见的另一种引压管腔的结构形式如图 2 所示, d_1 为空腔内径, l_1 为空腔长度。引压管腔与压力传感器感压面形成一个容腔,存

在的空腔与引压管自身存在耦合,不可按简单直管形式估算其固有频率^[13]。

工程上常采用的典型的引压管腔大致有 3 种形式,直管形式、带空腔形式以及半无限长形式。

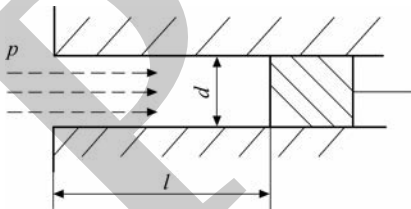


图 1 直管引压管腔形式

Fig. 1 Straight-tube type pressure tube cavity

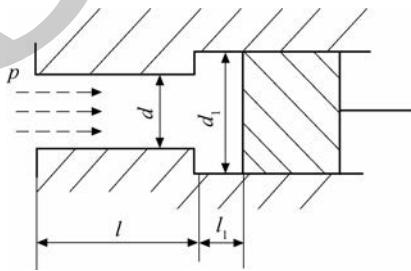


图 2 带有空腔引压管腔形式

Fig. 2 Pressure tube cavity with cavity

在某些高温测压场合,会采用半无限长引压管腔来进行动态压力测量,如图 3 所示, l_2 为半无限长管长度。从理论上来说,如果引压管无限长,那么压力波进入管道后一直向前传播且没有反射,就不会产生共振,从而改善整个测压系统的频响特性,而在工程中采用相当长的管道以提高测

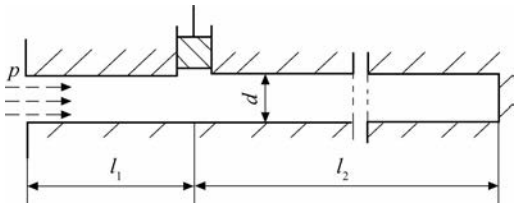


图 3 半无限长引压管腔形式

Fig. 3 Semi-infinite pressure tube cavity

压系统的动态响应^[14]。

动态压力试验对传感器的要求是:量程宽、精度高、动态响应好、小型化、非接触、抗恶劣环境能力强等。对于静态压力的校准,这种引压管腔的存在并不影响测试精度,但对于动态压力校准,引压管腔的传输特性是必须考虑的,本文基于典型的直管形式引压管腔开展研究。

1.2 结构仿真

建立直管引压管腔仿真模型,模型参数主要指标如表 1,首要考虑管腔模型长度对管腔结构固有频率的影响,外在激励频率应尽量避免管腔结构固有频率,避免对测量结果的影响或对管腔产生结构性破坏。

表 1 建模参数指标
Table 1 Modeling parameter index

参数	数值及详情
材料	06Cr19Ni10
管腔内径 d/mm	4.60
壁厚 d_w/mm	0.875
管腔管长 l/mm	300

在后续实际使用和试验中,管腔模型下端固定安装在压力发生器上,上端安装压力传感器。为了与后续试验条件一致,挑选管腔长度为 300 mm 结构对其进行固有频率和模态分析,结构形式和频率分析如图 4 所示。

通过仿真分析,可知 300 mm 长度的管腔固有频率在 57.285 Hz,外在激励形式为正弦激励,

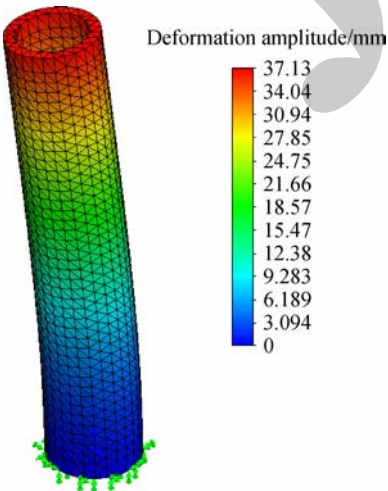


图 4 管腔三维建模与模态分析图
Fig. 4 Three-dimensional model and modal analysis of tube cavity

而第 5 阶的模态振型类似正弦,在第 5 阶模态(固有频率为 998.74 Hz)处容易出现共振,从而使管腔产生抖动,模态振型如图 5 所示。这些特殊频率点应在后续试验中避免出现,减少结构共振对试验结果动态特性的影响。



图 5 管长 300 mm 的 5 阶模态振型
Fig. 5 Modal shape of the fifth orders in 300 mm tube length

建立分析管腔长度与固有频率之间关系,在 30~600 mm 管腔长度内进行仿真分析,如图 6 所示。随着管腔长度在 30~200 mm 段的增加,管腔长度与固有频率之间存在非线性递减关系,随着管腔长度在 200 mm 段以上的增加,管腔固有频率迅速下降,在 200~600 mm 段固有频率近似线性下降,在 600 mm 处固有频率只有 11.918 Hz。因此随着管腔长度的降低,可提升整体管腔

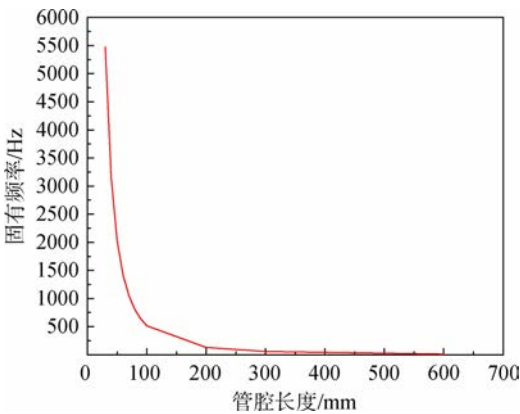


图 6 管腔长度与固有频率关系
Fig. 6 Relationship between tube cavity length and natural frequency

固有频率,根据外在激励频率可选用合适长度引压管腔进行测试,避免管腔共振现象。

2 引压管腔动态特性

2.1 理论分析

以正弦压力发生器为例,当压力发生器的振动时,便会产生声波,并通过空气传播。这种振动与波在一根绳子上的传播形式十分相似,但不同的是,绳子上介质的振动与绳子上波的传播方向垂直,而空气的振动与波的传播方向一致,是纵波。

当波从管腔尾端反射,反射波与原来的行进波发生干涉时就会产生驻波,但是,声波却可以在管的尾端来回反射好几次,所有这些反射波将一起发生干涉。一般来说,这些反射波的位相不一定相同,因此合成的振幅会比较小,然而在某些特定的频率,它们的位相一致,则会产生一个振幅非常大的驻波,这些频率称为谐振频率。要形成谐振,管的长度和声波的波长 λ 之间必须满足特定的关系,即声波在管内来回一次积累的相位必须是 2π 的整数倍。显然,谐振的条件与管腔口的开闭情况也有关。

对于直管引压管腔属于闭管结构,谐振时,开管端口是进压入口为声压的波节,封闭段是传感器段为声压的波腹,满足 $1/4$ 波长公式,谐振频率也可以利用式(1)进行简单估算。

$$f = \frac{(2n-1)v}{4l} = 2nf_1 - f_1 \tag{1}$$

式中 n 为振动模式数,正整数; v 为声音在介质中的传播速度; f_1 为 $n=1$ 时的频率,称为基频,谐振频率必须为基频的整数倍。

当管道较短,压力脉动频率较低,压力主要波长 λ 与管腔长度相比较为 $l < 0.04\lambda$ 时,管道系统可以按集中参数处理。然而,当管道较长,压力脉动频率较高时,把管道系统按照一维流动的集中参数处理就会带来较大的计算误差,此时,应将管道按二维分布参数处理^[15-18]。本文采用的管腔长度为 300 mm ,由于波长范围大,无法满足集中参数处理的近似条件,因此选用二维分布参数模型进行计算。

首先选用直管形式管道结构为研究对象,直管为等径直管,如图7所示。

在二维分布参数模型下,等径流体传输管道动态特性基本方程

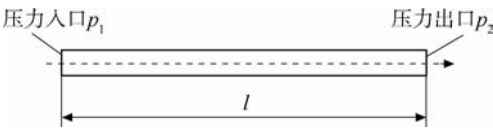


图 7 等径直管腔结构示意图

Fig. 7 Structural schematic diagram of straight tube cavity with equal diameter

$$\begin{bmatrix} p_1(s) \\ Q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}\Gamma(s) & Z_0(s)\text{sh}\Gamma(s) \\ \frac{1}{Z_0(s)}\text{sh}\Gamma(s) & \text{ch}\Gamma(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix} \tag{2}$$

对于简单直管道,其边界条件为封闭端即 $x=l$ 处,体积流量为零,即 $Q_l(s)=0$,可得

$$\frac{p_2(s)}{p_1(s)} = \frac{1}{\text{ch}[\Gamma(s)l]} \tag{3}$$

式中令 $i\omega$ 替换 s 估算管道传递系数^[19]。 $\frac{p_2(\omega)}{p_1(\omega)}$ 为复数,可表示为

$$\frac{p_2(\omega)}{p_1(\omega)} = \text{Re}(\omega) + i\text{Im}(\omega) \tag{4}$$

则管道的幅频特性为

$$A(\omega) = \left| \frac{p_2(\omega)}{p_1(\omega)} \right| = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)} \tag{5}$$

引压管腔的动态特应该考虑上述所有谐波的频率成分,动态特性具体可能取决与引压管腔的形状(长度和直径)、管壁弹性属性和厚度、传压介质属性等。

2.2 仿真分析

利用多物理场耦合软件 COMSOL^[20,21]进行仿真分析,建立的引压管腔的几何结构根据其长度 l 、管腔内径 d 、壁厚 d_w 来定义。将管腔结构绘制成直线段时,仅使用上述几个量值来控制方程参数,通过添加末端阻抗属性来模拟管腔的端口,根据表1的参数建立仿真模型。

管腔的频率响应通过绘制管腔末端的声压级 L_p 来获得。

$$L_p = 20 \times \lg\left(\frac{p_e}{p_{\text{ref}}}\right) \tag{6}$$

式中 p_{ref} 为 $20\mu\text{ Pa}$ 时的参考压力, p_e 为管腔声压。

通过 COMSOL Multiphysics 软件仿真 300 mm 直管腔的幅频特性与理论计算结果进行对比,如图8所示。

理论计算和仿真分析的幅频特性趋势基本一致,1阶谐振频率在 280.15 Hz 处,而通过理论计

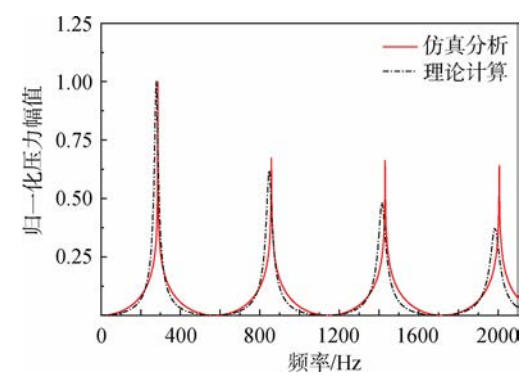


图 8 仿真幅频特性对比

Fig. 8 Amplitude-frequency characteristic comparison

算得到同样长度的管腔基频为 278.83 Hz,仿真结果的偏差为0.47%,在其他谐振频率点下存在一

表 2 校准装置列表

Table 2 List of calibration devices

序号	装置设备名称	频率量程范围/Hz	压力量程范围/kPa
1	换能器正弦压力发生器	10~4 000	1~20
2	变容积正弦压力标准装置	1~1 000	20~300(绝对压力)
3	中频气体正弦压力标准装置	1~6 000	200~8 000

根据上文仿真分析的结果,针对引压管腔动态特性试验采用的结构形式为简单直管腔,引压管腔材料为 06Cr19Ni10,内壁光滑,试验方法示意如图 9 所示。

压力装置上同时安装传感器和引压管腔,使一端联接压力装置为压力入口,一端联接传感器为压力采集,传感器 1 与引压管腔压力入口齐平。试验采用比较法对引压管腔进行动态特性研究,使用两支同型动态压力传感器监测引压管腔压力入口处与底端的压力,根据两支传感器的输出计算引压管腔的动态特性。

制作的管腔结构与仿真结构一致,参数如表 1。引压管腔长度加工公差为±0.1 mm,环境温度 为 20℃时,取空气中声速为 343.3 m/s,根据式 (5)计算可知该管腔理论谐振频率约为 278.83 Hz,因加工误差导致的谐振频率偏差约为 0.1 Hz,可暂时不考虑加工误差对管腔谐振频率的影响。

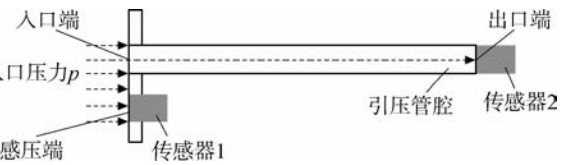


图 9 试验方法示意图

Fig. 9 Schematic diagram of test method

定程度的偏移,但不影响整体幅频特性。因此通过 COMSOL 对引压管腔进行的仿真结果可信度较高,后期可根据实际情况增加边界条件和调整变量,使仿真结果可以更趋于实际结果,节省试验成本。

3 试验方法

3.1 试验设计

通过同一引压管腔与 3 种正弦压力发生器的组合试验,获取引压管腔采用不同校准装置情况下的动态特性,根据 3 种校准装置的能力,选定在 20~1 000 Hz 频率范围内分析比较不同校准方法和装置的特点,采用国防科技工业第一计量测试研究中心的 3 种动态压力校准装置,如表 2。

3.2 一致性评价

试验中采用的两支传感器需要较好的一致性,并且量程在 3 种动态校准装置能力范围之内,减少因传感器差别引入的误差,因此需要对选用的传感器进行一致性评价,选用的传感器指标如表 3。

表 3 压力传感器指标

Table 3 Indexs of pressure sensor

编号	型号	出厂号	灵敏度/ (mV/kPa)	量程/ kPa	固有 频率/kHz
1	CYG504	840064	1.82	20	150
2	CYG504	840061	1.80	20	150

在试验过程中,传感器 1 用于测量入口处压力,传感器 2 安装于引压管腔尾端测量引压管腔压力,传感器所连接放大器均采用 KYOWA CDV-900A 放大器。

利用激波管测量两支传感器的频响特性^[21-22],以确保在 20~1 000 Hz 选定频率范围内排除传感器自身频响的限制,避免传感器自身频响带宽不足影响试验结果,激波管得到的两支传感器的频响特性曲线如图 10 和图 11。

两支传感器固有频率都在 140.6 kHz 左右,

远高于试验频率范围,可忽略传感器自身谐振频率对管腔谐振频率的影响。再利用中频气体正弦压力校准装置在 1~2 000 Hz 范围内对两支传感器的灵敏度和相移进行一致性评价,结果如图 12 和图 13。

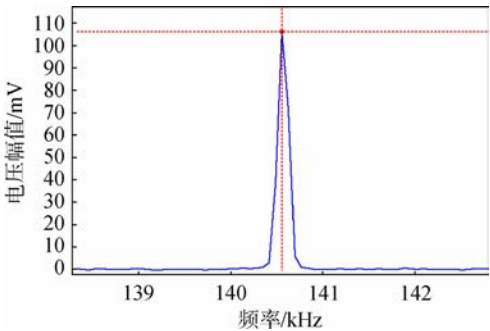


图 10 传感器 1 固有频率
Fig. 10 Natural frequency of sensor 1

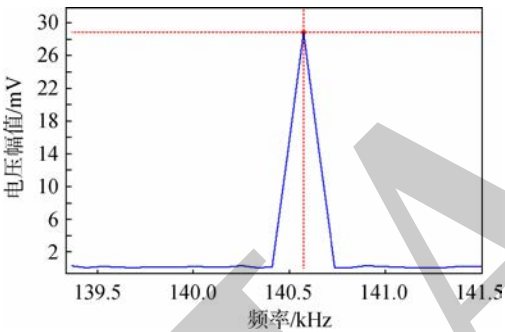


图 11 传感器 2 固有频率
Fig. 11 Natural frequency of sensor 2

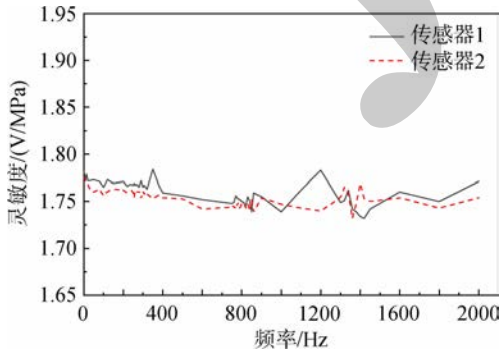


图 12 传感器灵敏度校准曲线
Fig. 12 Sensitivity calibration curve of sensors

通过上述评价过程,两支传感器幅值灵敏度最大偏差为 1.7%,相移最大偏差为 0.8°,固有频率均在 140.6 kHz 附近,两支传感器一致性较高,满足试验要求。

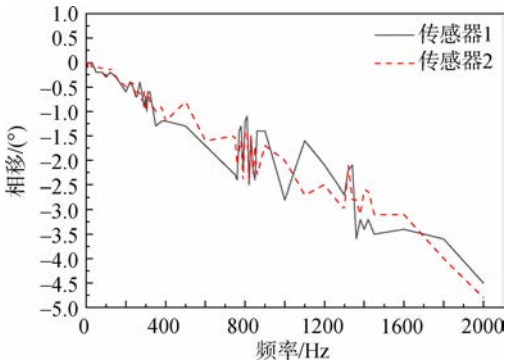


图 13 传感器相移校准曲线
Fig. 13 Phase shift calibration curve of sensors

4 引压管腔动态特性组合试验

4.1 换能器正弦压力试验

换能器正弦压力试验,在空旷试验环境下通过电声换能器的正弦振动产生声压对引压管腔进行动态校准。试验过程中,电声换能器收到功率放大器正弦激励信号产生振动,通过改变电声换能器的激励信号频率,进而产生不同频率下的声压。

试验所用传感器为上述测试并满足一致性的压力传感器 1 和 2。试验过程中,电声换能器距离传感器 1 压力入口距离为 10 cm,且尽量保证参考传感器感压端与引压管腔压力入口端接近,并与电声换能器振膜中心垂直,整个装置至于室内空旷场地,避免气流扰动的影响,试验现场如图 14 所示。

通过扫频的方式进行试验,扫频间隔为 0.5 Hz,频率范围为 10~2 000 Hz,相同试验条件进行



图 14 电声换能器正弦压力试验过程
Fig. 14 Electroacoustic transducer sinusoidal pressure test process

3 次试验,重复性为 0.1%。通过离散傅里叶变换进行数据处理,可以得出在电声换能器自由场正弦压力校准条件下引压管腔的动态特性,如图 15 所示为引压管腔幅频特性。

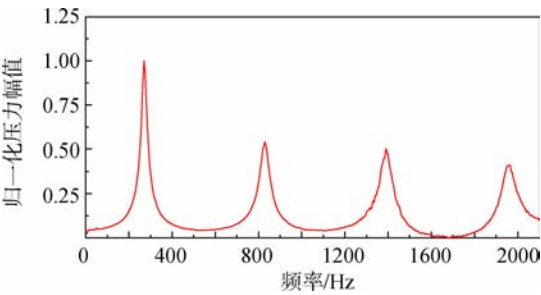


图 15 电声换能器正弦压力试验得到的引压管腔幅频特性曲线

Fig. 15 Amplitude-frequency characteristic curve of pressure tube cavity with electroacoustic transducer sinusoidal pressure test

试验得到引压管腔谐振频率点为 271.5 Hz,试验所得幅频特性曲线与理论分析结果趋势一致,与理论谐振点偏差为-2.63%。由于采用电声换能器产生声压信号,在自由场情况下产生的声压较低,易受环境因素影响。

4.2 变容积式正弦压力试验

变容积正弦压力试验,通过简谐运动的活塞推动空气,在密封腔体内产生正弦压力。传感器 1 与引压管腔压力入口端齐平安装于压力发生器底端,传感器 2 安装于引压管腔底端。试验时,通过振动控制系统控制活塞的振动频率,进而产生不同频率下的压力,试验现场如图 16 所示。

由于机电结构限制了装置的频率范围,因此变容积式正弦压力试验频率范围为 1~1 000 Hz,

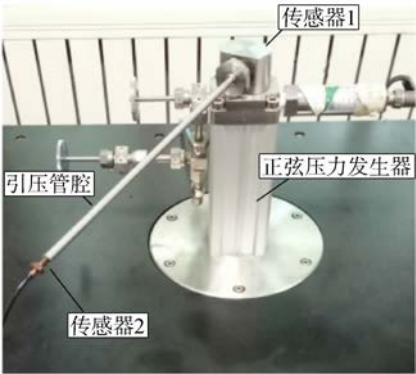


图 16 变容积式正弦压力试验过程

Fig. 16 Variable volume sinusoidal pressure test process

扫频间隔为 1 Hz,相同试验条件进行 3 次试验,重复性为 0.8%。通过离散傅里叶变换法对所得数据进行处理,可以得出变容积式正弦压力试验所得引压管腔幅频特性如图 17 所示。

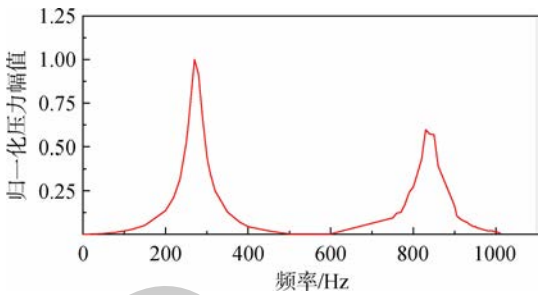


图 17 变容积正弦压力试验所得引压管腔幅频特性曲线

Fig. 17 Amplitude-frequency characteristic curve of pressure tube cavity with variable volume sinusoidal pressure test

试验得到引压管腔谐振频率点为 270 Hz,幅频特性曲线与理论分析结果趋势一致,与理论谐振点偏差为-3.17%。由于依靠活塞运动产生正弦压力,激励能力取决于活塞与振动台性能,由图 17 可以看到 500 Hz 之后幅频特性曲线明显分辨力不足,并且考虑由于摩擦可能导致幅频特性的整体偏移。

4.3 出口调制型正弦压力试验

中频气体正弦压力发生器基于气流出入口调制方式产生正弦压力,利用电动机精密控制旋转阀切割稳定气流源,旋转阀可以改变压力容腔入气口或出气口面积从而产生动态压力。通过改变旋转阀的运动频率,进而产生不同频率下的压力,试验现场如图 18 所示。

通过扫频的方式进行试验,扫频间隔为 2 Hz,频率范围为 1~2 000 Hz,相同试验条件进行 3 次试验,重复性为 0.9%。通过离散傅里叶变换法对所得数据进行处理,可以得到出口调制型正弦压力试验所得引压管腔幅频特性如图 19 所示。

试验得到引压管腔的谐振频率为 271 Hz,幅频特性曲线与理论分析结果趋势一致,与理论谐振点偏差为-2.80%。由于中频气体正弦压力标准装置通过机械方式控制出气口周期变换,进而产生正弦压力,其产生的正弦压力会出现一定程度的失真。并且,机械的原理限制了扫频的分辨率无法做到很低,对于精确得出引压管腔谐振点有一定的局限性。

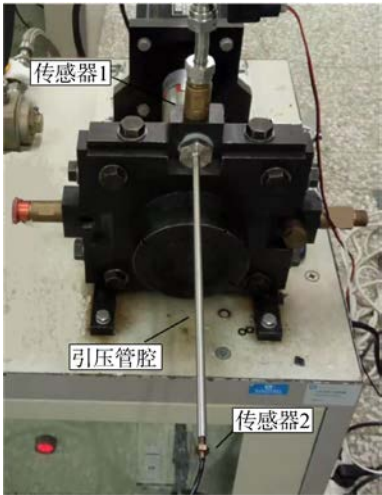


图 18 出口调制型正弦压力试验过程
Fig. 18 Export-modulated sinusoidal pressure test process

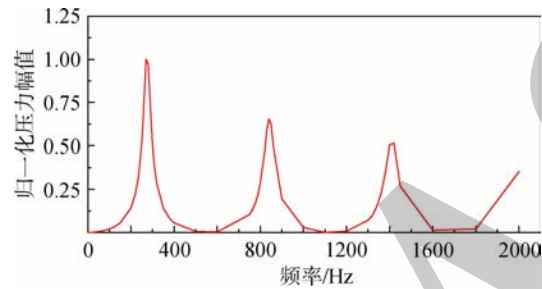


图 19 出口调制型正弦压力试验所得的引压管腔幅频特性曲线
Fig. 19 Amplitude-frequency characteristic curve of pressure tube cavity with export-modulated sinusoidal pressure test

4.4 小 结

利用同一引压管腔进行了 3 组试验,发现 3 组试验测得引压管腔的动态特性与理论仿真结果趋势一致,但整体偏小。通过试验测得的基频频率基本一致,其余谐振频率有发生偏移的现象,3 组试验所得幅频特性对比情况如图 20 所示。

组合试验结果如表 4 所示,所有试验结果均偏小,可能由于装配公差、介质动力黏度等引起的,但 3 种试验间最大偏差仅为 0.55%,说明 3 种校准装置之间的差异很小。其中,变容积正弦压力标准装置受自身结构以及振动台工作频带的限制,试验频率上限较低,且同样存在扫频分辨率不高的情况,限制了引压管腔动态特性的校准;中频气体正弦压力标准装置受机械结构的限制,其产生的正弦压力在某些频率下存在失真的情况,并且扫频分辨率无法做到很低,限制了引压管腔

频响的计算精度;换能器正弦压力发生器产生正弦压力方法简单直接,采用电声原理,控制性高、重复性高,且扫频分辨率较高,相对得到的引压管腔频响特性也最接近理论值,但其在自由场下无法产生更高的幅值,易受环境干扰导致信号信噪比较低。

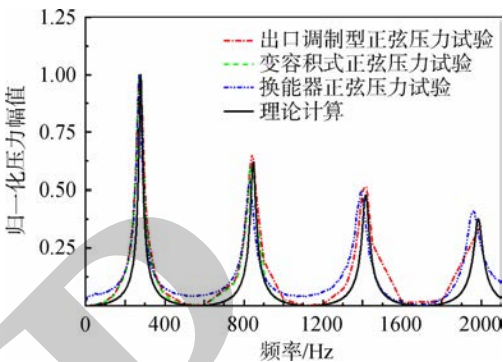


图 20 3 种试验与理论频响曲线对比
Fig. 20 Frequency-response curves comparison between three tests and theory

表 4 组合试验结果
Table 4 Combination test result

装置名称	谐振 频率/Hz	与理论 偏差/ %	重复性/ %
变容积正弦压力 标准装置	270	−3.17	0.8
中频气体正弦压力 标准装置	271	−2.80	0.9
换能器正弦压力 发生器	271.5	−2.63	0.1

5 结 论

本文通过理论计算简单直管形式引压管腔动态特性,仿真分析并验证了理论方法的可行性,通过换能器正弦压力发生器,变容积正弦压力试验装置,中频气体正弦压力标准装置开展了 3 种不同的校准设备和校准方法对同一引压管腔的正弦压力校准试验。主要结论如下:

1) 简单直管形式引压管腔的动态特性与仿真分析结果一致性较高,可通过建立更完善的仿真模型来简化计算过程。

2) 3 种正弦压力发生装置对于校准引压管腔动态特性都存在不同程度的局限性,其中变容积式正弦压力发生器和出口调制型正弦压力发生器均采用机械结构原理产生正弦压力,造成频段

带宽不足,结果重复性较低,换能器式正弦压力发生器采用电声转换原理产生正弦压力,频率范围宽并且可控程度好,结果重复性较高,但压力幅值较低。

3) 试验比较发现,不同校准方法所得引压管腔谐振频率和理论计算的动态特性趋势保持一致,但谐振频率存在一定差异,所有试验结果得到的谐振频率均偏小,但各试验之间基本一致,说明 3 种校准装置得到的动态特性差异很小。

未来将针对引压管腔动态特性开展影响因素分析、建立补偿修正模型,并研制相关的专用校准装置,全面评估含有引压管腔的压力系统的动态性能。

参考文献:

[1] 李继超,王偲臣,林峰,等.一种容腔效应标定技术及其在高频响动态探针中的应用[J].航空动力学报,2011,26(12):2749-2756.
LI Jichao,WANG Sichen,LIN Feng,et al. A technique to calibrate cavity effect in unsteady pressure probes with high frequency response[J]. Journal of Aerospace Power, 2011,26(12):2749-2756. (in Chinese)

[2] PERSICO G,GAETANI P,GUARDONE A. Design and analysis of new concept fast-response pressure probes[J]. Measurement Science and Technology,2005,16(9):1741-1750.

[3] KANG J S,YANG S S. Fast-response total pressure probe for turbomachinery application[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2010,24(2):569-574.

[4] 郭勇,王效葵,王洪伟.高频压力探针动态性能的补偿方法[J].航空动力学报,2005,20(2):273-277.
GUO Yong,WANG Xiaokui,WANG Hongwei. Improvement on dynamic characteristics of high response pressure probe[J]. Journal of Aerospace Power,2005,20(2):273-277. (in Chinese)

[5] 江勇.一种爆膜式动压测量校准系统[J].航空动力学报,1996,11(3):320-322.
JIANG Yong. A broken film calibration system of dynamic pressure measurement[J]. Journal of Aerospace Power, 1996,11(3):320-322. (in Chinese)

[6] 包家立.带引压管和容腔的压力传感器现场动态标定的探讨[J].仪器仪表学报,1990,11(1):65-71.
BAO Jiali. A discussion of the dynamic calibration on the spot for pressure transducer with impulse tube and chamber[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,1990,11(1):65-71. (in Chinese)

[7] 任先贞,殷帅,裴东兴,等.膛压测试系统耗散型传压管道动态响应方法[J].探测与控制学报,2017,39(2):108-112.
REN Xianzheng,YIN Shuai,PEI Dongxing,et al. Dissipa-

tion type dynamic response method of chamber pipeline pressure test system[J]. Journal of Detection and Control, 2017,39(2):108-112. (in Chinese)

[8] 吕林志.压力测试取样管路系统动态特性分析及畸变信号的修正[D].太原:中北大学,2017.
LÜ Yongzhi. Analysis of dynamic characteristics of pressure sampling pipeline system and correction of distortion signal[D]. Taituan:North University of China,2017. (in Chinese)

[9] BROUCKAERT J F. Fast response aerodynamic probes for measurements in turbomachines[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part A Journal of Power and Energy,2007,221(6):811-813.

[10] 柳兆荣,陈金娥,黄东群.压力传感器频率响应的分析[J].力学学报,1980,16(4):363-372.
LIU Zhaorong,CHEN Jine,HUANG Dongqun. An analysis of frequency response of pressure transducer[J]. Acta Mechanica Sinica,1980,16(4):363-372. (in Chinese)

[11] MILLER E L,DUDENHOEFER J E. On the dynamic response of pressure transmission lines in the research of helium-charged free piston Stirling engines[R]. Washington, DC,USA; the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference 1989.

[12] WHITMORE S A,PETERSEN B J,SCOTT D D. A dynamic response model for pressure sensors in continuum and high knudsen number flows with large temperature [R]. AIAA 96-0563,1996.

[13] 徐有恒,黄东群.一种测试压力传感器容腔动态特性的简易方法[J].上海力学,1981(4):50-58.
XU Youheng,HUANG Dongqun. A simple method for determining the dynamic characteristics of pressure transducer terminated at a chamber[J]. Shanghai Mechanics,1981(4):50-58. (in Chinese)

[14] 王维,唐磊,王棋.压力测试管道管腔效应研究[R].北京:第13届全国压力计量与测试技术学术交流会,2012.

[15] 朱明武.动压测量[M].北京:国防工业出版社,1983.

[16] 苏尔皇.管道动态分析及液流数值计算方法[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1985.

[17] 周毅,顾明.并联管道耗散模型的理论研究[J].振动与冲击,2004,23(3):79-82.
ZHOU Yi,GU Ming. Research on theoretical representation of dissipative model of parallel tube-manifold systems [J]. Journal of Vibration and Shock,2004,23(3):79-82. (in Chinese)

[18] 蔡亦钢.流体传输管道动力学[M].杭州:浙江大学出版社,1990.

[19] 张东青,王焯.压力传感器动态测量方法的研究[J].传感器与微系统,2007,26(6):23-25.
ZHANG Dongqing,WANG Ye. Research on dynamic measurement method for pressure transducer[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2007,26(6):23-25. (in Chinese)

[20] PRYOR R W. Multiphysics modeling using COMSOL: a

first principles approach[M]. Burlington, MA, USA: Jones and Bartlett Publishers Incorporation, 2011.

[21] 王维新, 谢壮宁. 测压传压管路系统动态特性的试验分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2005, 35(4): 392-396.

WANG Weixin XIE Zhuangning. Experimental investigation on the dynamic characteristics of tubing systems for fluctuating wind pressure measurements[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2005, 35(4): 392-396. (in Chinese)

[22] YANG Jun, WANG Yufang, LI Cheng. Dynamic modeling of pressure pipelines and signal reconstruction[R]. Beijing: the 1st International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, 2011.

(编辑: 王碧琚)