

不同环境因素对引压管腔动态特性影响

李 博, 张鹤宇, 杨 军
(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)

摘 要: 为了探索引压管腔在动态压力校准和使用中不同环境因素对动态特性的影响,推导出管腔传压模型和谐振频率关系式,确立了影响管腔动态特性的参数,包括静态压力、温度、气体介质等。采用引压管腔专用实验装置进行了不同环境参数状态的实验验证,结果表明:静态压力仅会影响管腔在谐振频率附近的输出,随着静态压力的增大而非线性增大,对动态特性并无明显改变;温度会改变管腔的谐振频率和动态特性,随着温度的升高,谐振频率增大但输出幅值随之减小;气体介质的不同会彻底改变管腔动态特性,主要取决于介质的声速。该研究为引压管腔在使用环境下数据的评价和数据修正上提供了一定参考依据。

关 键 词: 引压管腔; 动态特性; 传压模型; 谐振频率; 动态校准

中图分类号: V211.71 **文献标志码:** A

Effect of different environmental factors on dynamic characteristics of pressure transmission pipe

LI Bo, ZHANG Heyu, YANG Jun
(Changcheng Institute of Metrology and Measurement,
Aviation Industry Corporation of China Limited, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to explore the effect of different factors on the dynamic characteristics of the pressure transmission pipe in the dynamic calibration and operation, the pressure transmission model and the relationship between vibration frequency were deduced. The parameters affecting the dynamic characteristics of the transmission pipe, including static pressure, temperature, gas medium, were established. The experimental verification of different environmental factors was carried out by using special experimental device of the transmission pipe. Results showed that the static pressure only affected the output of the transmission pipe at the resonant frequency, but increased nonlinearly with the increase of the static pressure, and had no significant effect on the dynamic characteristics; with the increase of temperature, the resonant frequency increased but the output amplitude decreased; different gas media would change the dynamic characteristics of the transmission pipe mainly depending on the sound velocity of the medium. This study provides a reference for the data evaluation and correction of the transmission pipe in the use environment.

Key words: pressure transmission pipe; dynamic characteristics;
pressure transmission model; resonance frequency; dynamic calibration

收稿日期:2020-03-25

基金项目:装备技术基础项目(JZX7J201903JL002XX)

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,张鹤宇,杨军.不同环境因素对引压管腔动态特性影响[J].航空动力学报,2020,35(10):2159-2165. LI Bo, ZHANG Heyu, YANG Jun. Effect of different environmental factors on dynamic characteristics of pressure transmission pipe[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(10): 2159-2165.

在航空发动机的研制和实验中,一些重要的飞行参数,如总压、静压、飞行器相对于空气的速度等性能指标都是以压力测试为基础,通常采用压力受感部、压力探针等带引压管腔形式的测压系统对压力参数进行动态测量^[1-4]。由于高温、空间限制等因素,被测压力通过一段传压管腔后输出给敏感元件,为了不失真的测出动态信号中的各种低频到高频的谐波成分,就必须考虑引压管腔的动态特性^[5-9]。

在动态压力测量中,分析引压管腔的动态特性是一项十分重要的内容。由于引压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。对于静态压力测试,引压管腔的存在并不会影响压力信号的测量,但对于动态压力测试,引压管腔往往会导致被测压力信号的谐振或滞后。为了不失真的测量动态压力信号,对引压管腔动态特性的研究是修正压力信号畸变的有效方法。

从 20 世纪 60 年代开始,国外以法国国家计量测试实验室(LNE)、美国国家航天局(NASA)、美国国家标准与技术研究院(NIST)等为代表,开展了大量的引压管腔动态特性管腔模型建立和实验验证^[10-14],还逐步开展了针对引压管腔的测压系统内存在不同介质,不同温度,多场耦合等情况下的动态特性研究。国内以中国航空发动机集团有限公司四川燃气涡轮研究院、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、北京航空航天大学等为代表^[15-18],对引压管腔的动态特性也进行了大量理论与实验研究,大多针对于引压管腔结构设计和结构对于动态特性影响分析补偿上,对于引压管腔使用状态或多物理场耦合的影响因素研究较少。

综上所述,目前针对引压管腔实际使用环境下的动态特性研究较少,缺乏不同环境因素对引压管腔动态特性影响的评估研究。本文建立了引压管腔的传压模型和谐振频率表达式,通过引压管腔实验装置实现了不同环境下的引压管腔实验,研究了静态压力、温度、气体介质对引压管腔动态特性影响的机理。

1 引压管腔传压模型

在动态压力测量中,由于引压管腔有着低通滤波的作用,往往使得信号在被传感器接收时就已经失真^[19]。引压管腔的动态特性对测得信号的完整性起着决定性作用,管腔的特性往往跟流

体介质属性和管腔结构属性相关。

对引压管腔模型的分析可以从元件的角度出发的,类比于电路系统中的电子元件,借助电路理论完成引压管腔的建模^[20-21]。流体在管道内加速时惯性导致的流感,类似于电路中的电感;管道内流体柔性导致的流容,类似于电路中的电容;管道系统因热传递效应导致的流导,类似于电路中的电导;流体因受黏性摩擦力导致的流阻,类似于电路中的电阻。利用阻抗分析法得到管腔在频域内的动态特性。

对于常用的简单直管形式引压管腔测压系统,结构如图 1 所示,管腔一端为压力和流量输入端,另一端为压力和流量输出端,并安装传感器。



图 1 直管引压管腔形式

Fig.1 Straight pressure transmission pipe

采用频域法进行引压管腔动态特性分析,将流体方程进行拉普拉斯变换,在二维分布参数模型下,得到等径流体传输管道动态特性基本方程为

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

式中 $\begin{bmatrix} p_1(s) \\ Q_1(s) \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} p_2(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix}$ 分别表示输入与输出端的压力、流量的拉普拉斯变换, $Z_0(s)$ 为管腔自身的特征阻抗, $\Gamma(s)$ 为传播算子。

可通过式(1)将输入端与输出端的关系演化成不同的方程,如图 1 所示的引压管腔边界条件为:在输出端由于传感器封闭,体积流量为零,即 $Q_2(s)=0 \text{ m}^3/\text{s}$,可得压力传递函数为

$$\frac{p_2(s)}{p_1(s)} = \frac{1}{\text{ch} \Gamma(s)} \tag{2}$$

通常传播算子 $\Gamma(s)$ 的计算十分复杂,且 $\Gamma(s)=\gamma(s)l$,用 $j\omega$ 代替 s ,可以得到引压管腔的幅频特性为

$$G(j\omega) = \frac{p_2(j\omega)}{p_1(j\omega)} = \frac{1}{\text{ch} \gamma(j\omega)l} \tag{3}$$

而管腔发生谐振的条件为

$$\text{cth} \Gamma(j\omega) = -j \text{ctg} \frac{\omega l}{v} = 0 \tag{4}$$

即

$$\frac{\omega l}{v} = (2n-1) \frac{\pi}{2} \quad (n = 1, 2, \dots)$$

(5)

由此得到引压管腔谐振频率为

$$f_n = \frac{(2n-1)v}{4l} \quad (n = 1, 2, \dots)$$

(6)

式中 v 为气体介质中声音传播速度, f_1 为 $n=1$ 的时的频率,是引压管腔的固有频率,谐振频率必为固有频率的整数倍。

根据理想气体状态方程,可以推算声音在理想气体中的传播速度为

$$v = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R(t+273.5)}{M}}$$

(7)

式中 γ 为气体等熵指数, p 为气体介质压力, t 为温度, M 为气体分子质量。

将式(7)带入式(6),得到引压管腔谐振频率关系式为

$$f_n = \frac{(2n-1)}{4l} \sqrt{\frac{\gamma R(t+273.5)}{M}}$$

(8)

从式(8)中可以看出,引压管腔的谐振频率与气体介质压力、温度、气体类型、管腔结构等存在着一定的数学关系,关于引压管腔结构相关的研究已开展很多,但对于引压管腔所处不同压力、温度、介质等不同环境状态等研究较少,那么引压管腔的动态特性也必将受到上述环境参数的影响。

2 引压管腔实验设计

2.1 实验装置

通过理论推导建立了引压管腔传压模型,并分析了引压管腔特性,但在计算过程中忽略了一些工程因素对传压模型的影响,如非稳定压力环

境、温度波动、介质不同等,还需要开展进一步的实验验证,利用实验的方式得到引压管腔的动态特性曲线,从而分析对引压管腔动态特性的影响因素。

由于正弦信号可控可调,且任意复杂信号都可以通过频域变换分解为不同幅值和频率的正弦信号叠加,因此选择正弦信号为动态激励信号,对评价引压管腔的幅频特性具有代表性,并可以进一步分析引压管腔的线性特征。

因此设计的引压管腔正弦压力实验装置,其结构组成如图 2 所示,主要包括静态压力系统、动态压力系统和温度系统,基于测试平台(PXI)采集数据,并通过串口通信(USB)控制动态压力系统产生动态激励。

静态压力系统主要实现在密闭压力容腔内产生(0~1)MPa 的静态压力,可实现引压管腔在某一静态压力下产生动态压力;动态压力系统利用换能器实现在设定静态压力下产生频率范围覆盖 20~1000 Hz 的正弦压力波;温度系统可为引压管腔提供 20~400 ℃ 的环境实验条件。

上述实验装置基本满足工程应用中环境参数的模拟,实际装置如图 3 所示。

2.2 测量方案

利用两支校准过的 PCB-112A22 传感器进行实验,在频率为 20~1000 Hz 内,两支传感器对不同频点的同一次测量结果偏差在 0.8% 以内,经过间隔 1 Hz 的 6 次扫频测试,通过贝塞尔公式计算相对标准偏差来表征测量结果的重复性,结果表明重复性小于 0.1%,选用一支作为参考传感器,另一支与引压管腔组合作为被测对象,引压管腔上被加热丝缠绕可以在设定温度环境下对引压管腔进行温度实验。

将引压管腔与参考传感器安装于同一平面,

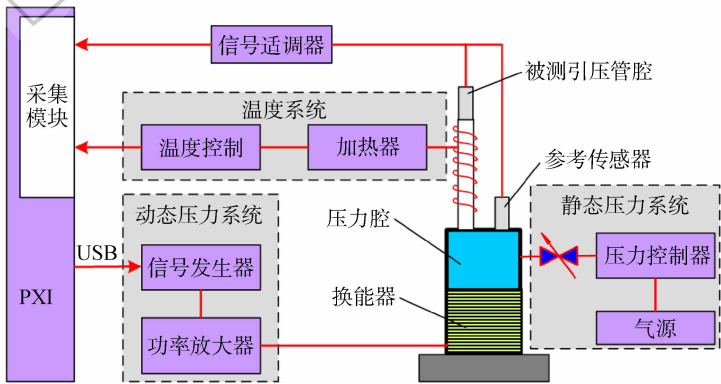


图 2 引压管腔实验装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of the experimental device of the pressure transmission pipe

并尽量靠近,理论上引压管腔和参考传感器安装位置极为接近,可认为两者测量的是同一点的压力值,正弦压力幅值 $p_p \approx p_1 \approx p_2$,引压管腔测量原理图如图 4 所示。

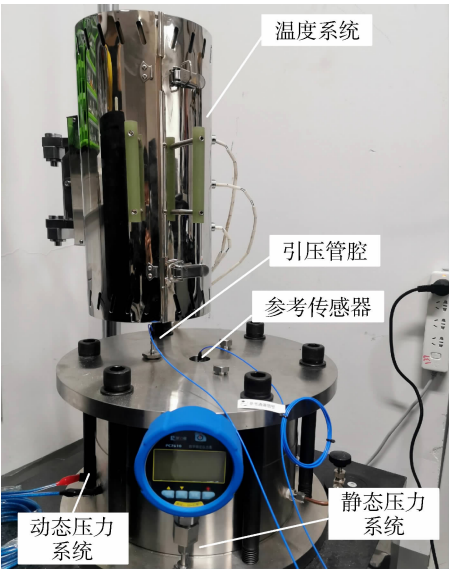


图 3 实验装置图

Fig. 3 Diagram of experiment device

在密闭压力容腔内产生的正弦压力幅值 p_p 可以依据下式计算:

$$p_p = \frac{U_1}{S_1}$$

(9)

式中 U_1 为参考传感器输出电压峰值, S_1 为参考传感器灵敏度。

而传感器与引压管腔组合后的幅值灵敏度未知,可按下式进行计算:

$$S = \frac{U_2}{U_p} = \frac{U_2}{U_1} S_1 = k S_1$$

(10)

式中 U_2 为引压管腔传感器输出电压峰值, U_1 为参考传感器输出电压峰值, k 为引压管腔放大系数, S_1 为参考传感器灵敏度。

通过式 (10) 可以看出,引压管腔的传递函可以通过引压管腔信号与参考信号的幅值比进行描述,即引压管腔放大系数 k 关于频率的函数,采用这个特征量来刻画引压管腔系统的幅频特性。

3 影响因素实验与分析

3.1 静态压力

引压管腔在实际工程动态测试中,通常处于某一静态压力或平均压力环境下测量脉动压力值。为了探究静态压力对引压管腔幅频特性的影响,保持动态压力系统输出不变,避免传感器感压面受压不均影响测量结果,选用与感压面近似的管腔内径,在 20 ℃ 环境中利用引压管腔 300-5(长为 300 mm,内径为 5 mm)在不同静态压力条件下进行 20~1000 Hz 扫频实验,分别得到在静态压力 p_s 为 0.2、0.5、0.8、1.0 MPa 下引压管腔的幅频特性曲线如图 5 所示,具体实验结果如表 1 所示。

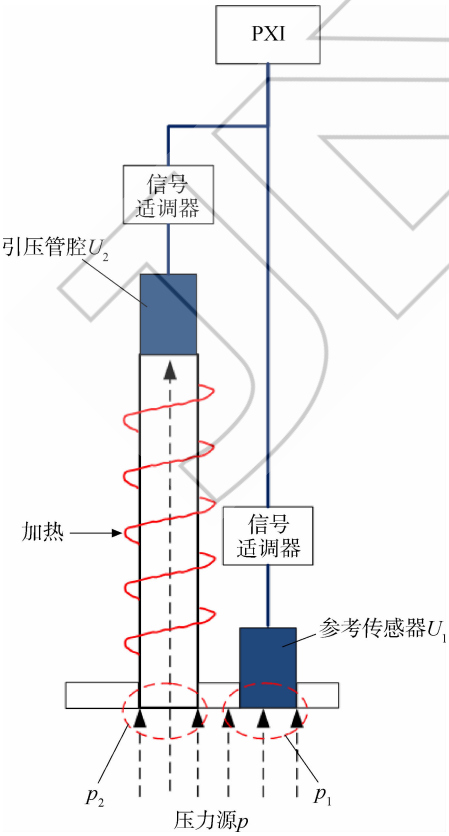


图 4 引压管腔实验原理图

Fig. 4 Experimental principle diagram of pressure transmission pipe

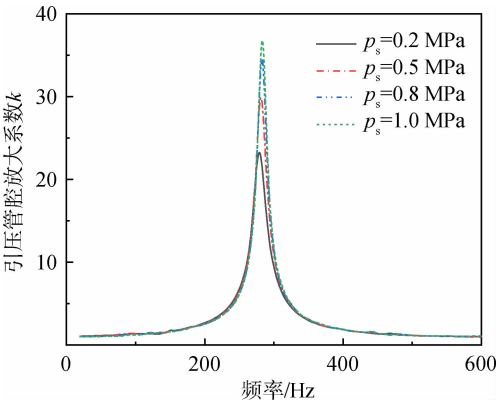


图 5 不同静态压力下引压管腔幅频特性

Fig. 5 Amplitude frequency characteristics of pressure transmission pipe under different static pressures

表 1 不同静态压力下实验结果

Table 1 Experimental results under different static pressures

静态压力/MPa	谐振频率/Hz	谐振点放大系数 k
0.2	279	23.3
0.5	281	29.9
0.8	283	34.5
1.0	283	36.8

根据图 5 可知,静态压力基本不会影响引压管腔的传输特性,谐振点大体在 280 Hz 附近,与理论计算值 285.8 Hz 近似。在谐振点附近静态压力有放大谐振效果的作用,并且这种放大效果随着压力的增大而非线性增大。

理论上,通过式(8)可以看出,静态压力参数与气体等熵指数 γ 相关,等熵指数是比定压热容 c_p 与比定容热容 c_v 之比,对于理想气体,等熵指数是常数,由气体性质决定,但对于实际气体,等熵指数与温度 t 和压力 p 有关。对于实际工况下气体的 c_p 的实测数据较少,工程上常进行估算,这就对等熵指数 γ 计算带来不确定性,等熵指数 γ 也就影响着引压管腔的谐振频率,但从实验数据来看,这种影响很小。

3.2 温 度

为了探究温度对引压管腔幅频特性的影响,选用引压管腔 600-5 (长为 600 mm,内径为 5 mm),保持动态压力系统输出不变,在 0.5 MPa 静态压力下,调节不同温度环境进行 20~1 000 Hz 扫频实验,分别得到环境温度 t_a 为 20、100、200、300、400 °C 下引压管腔的幅频特性曲线如图 6 所示。

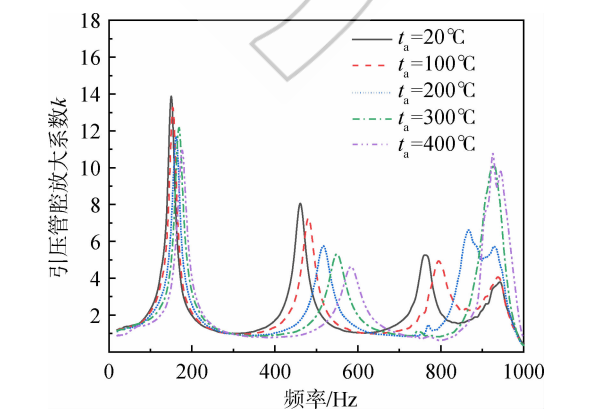


图 6 不同温度下引压管腔幅频特性

Fig. 6 Amplitude frequency characteristics of pressure transmission pipe at different temperatures

根据图 6 中的幅频特性曲线可知,温度对引压管腔幅频特性造成了偏移并伴随引压管腔放大系数的改变。随着温度的升高,幅频特性整体右移,各温度点在谐振频率附近偏移较小,在之后的谐振频率段内出现较大偏移;伴随温度的升高,引压管腔放大系数随之非线性减小,具体实验结果如表 2。

表 2 不同温度下实验结果

Table 2 Experimental results at different temperatures

环境温度/°C	谐振频率/Hz	谐振点放大系数 k
20	140	13.9
100	144	13.3
200	152	11.7
300	159	11.3
400	167	10.9

温度对于引压管腔动态特性的影响表现在两个方面,一方面是温度对于管长的影响,温度升高导致管长存在微小伸长,导致谐振频率的右移,另一方面是温度气体介质声速的影响,温度升高导致声速的增大,从而导致谐振频率的右移,并且随着频率的升高,气体的热传导系数也在降低,表现为引压管腔放大系数的降低。

3.3 气体介质

在实际工作环境中,引压管腔内的气体成分通常具有不确定性,不同的气体介质具有不同的物理属性,主要差异表现在声音传播速度上。同一种引压管腔在不同的介质下表现为不同的动态特性,因此对于评估引压管腔所使用的气体介质,对其工作频段选择和获取数据的准确性评价具有参考作用。

在 $t_a=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中 和 $p_s=0.5\text{ MPa}$ 静态压力下,利用引压管腔 300-5 进行不同气体介质在 20~1 000 Hz 的扫频实验,分别得到空气 Air、氦气 He、氮气 N_2 下的幅频特性如图 7 所示。

结果表明,空气和氮气下的引压管腔特性基本一致,谐振频率相差较小,原因可能是空气中氮气体积分数达 78% 与氮气的性质基本一致。氦气下谐振频率与空气下二次谐振频率接近,是空气下谐振频率的 3 倍左右,使用氦气介质引压管腔的工作带宽明显优于使用空气介质,可能由于在大气环境下氦气声速是空气声速的 3 倍左右,这与式(6)的计算结果接近,利用氦气作为压力介

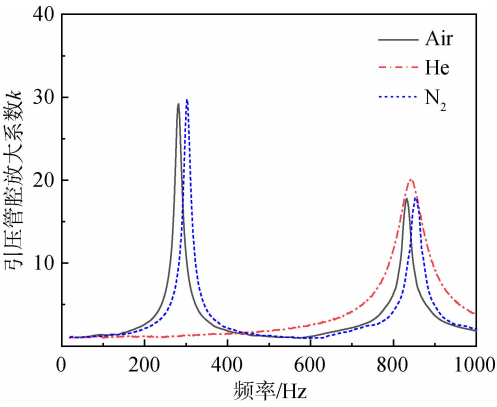


图 7 不同介质下引压管腔幅频特性
($t_a=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_s=0.5\text{ MPa}$)

Fig. 7 Amplitude frequency characteristics of pressure transmission pipe in different media
($t_a=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_s=0.5\text{ MPa}$)

质进行校准和测试有利于增加有效的频率带宽。

4 结 论

本文通过理论建立引压管腔传压模型和谐振频率关系式,确立影响引压管腔动态特性的主要因素,包括静态压力、温度、气体介质等,利用研制的引压管腔实验装置进行影响因素验证实验,主要结论如下:

1) 静态压力会引起引压管腔在谐振频率附近的输出增益效果,引压管腔放大系数随着静态压力的增大而非线性增大,且并不会引起引压管腔动态特性的整体改变,对谐振频率改变微小。

2) 温度对引压管腔的动态特性影响显著,主要表现为温度会直接影响声速在介质中的传播速度,随着温度升高声速增大,导致引压管腔幅频特性的右移,谐振频率增大。同时,温度与气体导热系数成反比,温度升高会引起气体传递压力波的衰减。

3) 气体介质对于引压管腔动态特性的改变取决于气体本身的热力学参数,通过气体微观运动可以理解为气体分子结构与声波的相互作用,不同气体如果性质较一致则会表现为相似的动态特性,在实际工作中可以利用气体介质的不同选择合适长度的引压管腔进行测试。

参考文献:

[1] 余柯锋. 中小型航空发动机叶型稳态压力传感器设计及试验研究[J]. 电子测试, 2017(13): 16-17.
YU Kefeng. Design and experimental study on the steady state pressure airfoil probe of medium and small aero-

engine[J]. Electronic Test, 2017(13): 16-17. (in Chinese)

[2] 陈峰, 宗有海, 刘东健, 等. 基于探针管路动态修正的压气机动态总压测试[J]. 实验流体力学, 2018, 32(5): 82-88.
CHEN Feng, ZONG Youhai, LIU Dongjian, et al. Measurements on compressor dynamic total pressure with dynamic correction of pneumatic probe[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2018, 32(5): 82-88. (in Chinese)

[3] 李继超, 王德臣, 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)

[4] 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.

[5] 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)

[6] 石玉松, 杨军, 李博. 引压管腔动态特性及其校准研究现状[J]. 计测技术, 2018, 38(6): 2-5.
SHI Yusong, YANG Jun, LI Bo. Review of dynamic characteristics and the calibrations of pressure pipelines[J]. Metrology and Measurement Technology, 2018, 38(6): 2-5. (in Chinese)

[7] 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)

[8] 任先贞, 殷帅, 裴东兴, 等. 腔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 Xianzhen, YIN Shuai, PEI Dongxing, et al. Dissipation type dynamic response method of chamber pipeline pressure test system[J]. Journal of Detection and Control, 2017, 39(2): 108-112. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 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 D C: the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1989.

[11] NYLAND T W, ENGLUND D R, Jr. System for testing pressure probes using a simple sinusoidal pressure genera-

tor[R]. NASA TM-X,1981.

[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] 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]. NASA TM-4728,1996.

[14] BROUCKAERT J. 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.

[15] 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. (in Chinese)

[16] 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.

[17] LIU Zhaorong,CHEN Jine,HUANG Dongqun. An analysis of frequency response of pressure transducer[J]. Acta Mechanica Sinica,1980,16(4):363-372.

[18] 叶挺,梁庭,张文栋. 压力测试中引压管的动态特性研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2011,32(2):222-226.
YE Ting,LIANG Ting,ZHANG Wendong. Dynamic characteristic of transmission tube in pressure measurement system[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition),2011,32(2):222-226. (in Chinese)

[19] 张训文,陈曦,朱琦,等. 压力传感器管腔效应问题研究[J]. 测试技术学报,2002,16(增刊 1):387-390.
ZHANG Xunwen,CHEN Xi,ZHU Qi,et al. Study on the pipe cavity effect of pressure sensor[J]. Journal of Test and Measurement Technology,2002,16(Suppl. 1):387-390. (in Chinese)

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

[21] 罗志昌. 流体网络理论[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

(编辑:王碧琚)