

加力燃烧振荡高温宽频动态压力测试

李中玺, 邢志国, 于大洋, 宋伟锋, 张天昊
(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 针对发动机加力燃烧室振荡燃烧动态压力测试受到温度及频响限制问题, 描述了管腔效应机理, 比较了使用传感器齐平安装、共振管以及半无限长管 3 种动态测量系统的优缺点, 进行了压力脉动受感部的动态频响特性测试。分析了在管腔长度不变的条件下共振管管腔内径变化对管腔频率和幅值的影响; 对于半无限长管系统, 在半无限长管长度不变的条件下比较了 3 种管腔长度对加力脉动受感部管腔频率和幅值的影响; 在管腔长度不变的条件下比较了 2 种半无限长管长度对受感部频率和幅值的影响。结果表明: 管腔长度为 55.3 mm、管腔内径为 3.5 mm、半无限长管长度为 15 m 是高温宽频加力脉动测试的最优方案。为削弱管腔效应的影响, 利用经温度补偿的系统传递函数实现了在 2000 Hz 内对早期加力动态压力测试数据的修正。

关键词: 动态压力测试; 管腔效应; 加力燃烧振荡; 航空发动机

中图分类号: V263.3

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.04.022

High-Temperature and Wide-Frequency Dynamic Pressure Measurement Techniques for Afterburner Combustion Oscillation

LI Zhong-xi, XING Zhi-guo, YU Da-yang, SONG Wei-feng, ZHANG Tian-hao
(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Aiming at the problem of temperature and frequency response restrictions in dynamic pressure measurement of the afterburner combustion oscillation of an aeroengine, the mechanism of tube cavity effect is described, the advantages and disadvantages of dynamic measurement systems using the flush-mounted sensor, resonant tube, and semi-infinite tube are compared. The amplitude-frequency response characteristics of these dynamic pressure sensing systems were experimentally studied. For the resonant tube systems, the influence of the tube's inner diameter on the resonant frequency and amplitude was experimentally investigated while keeping tube lengths constant. For the semi-infinite tube systems, the effects of mounting length and termination length on the resonant frequency and amplitude were experimentally studied under the conditions of three different mounting lengths and two termination lengths. According to the experimental results, the optimal configuration for a high-temperature wide-frequency afterburner dynamic pressure measurement system is the semi-infinite tube system with a mounting length of 55.3 mm, an inner diameter of 3.5 mm, and a termination length of 15 m. To weaken the tube cavity effect, the temperature-compensated system transfer functions were used to correct previous afterburner pressure measurement data within 2000 Hz.

Key words: Dynamic pressure measurement; tube cavity effect; afterburner combustion oscillation; aeroengine

0 引言

振荡燃烧问题在航空发动机研制过程中备受关注, 加力燃烧室的燃烧不稳定频率往往与发动机的工作状态有关。Houshang 等^[1]研究发现低频轰鸣 (rumble, 频率低至 50~150 Hz) 往往发生于高油气比、低进口温度条件下, 压力振荡表现为轴向模式; 高频

的尖叫 (screech, 频率高达 5000 Hz) 往往发生在高能量密度下, 且受到燃油喷射位置、油气比、燃烧均匀性以及火焰稳定器几何等多种因素影响, 其压力振荡表现为径向模式或者周向模式。为防止加力振荡燃烧对加力燃烧室结构的损坏, 进行加力燃烧室压力脉动测试, 通过试验测试结果发现振荡燃烧特征频率主要有 3 个, 分别为加力燃烧室周向、径向和轴向的固有

收稿日期: 2023-03-21 基金项目: 航空动力基础科研项目资助

作者简介: 李中玺 (1994), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 李中玺, 邢志国, 于大洋, 等. 加力燃烧振荡高温宽频动态压力测试[J]. 航空发动机, 2024, 50(4): 156-161. LI Zhongxi, XING Zhiguo, YU Dayang, et al. High-temperature and wide-frequency dynamic pressure measurement techniques for afterburner combustion oscillation[J]. Aeroengine, 2024, 50(4): 156-161.

模态。在试验过程中通过监测振荡燃烧频率幅值大小,判断发动机工作状态来保证整机试车安全。

加力燃烧室动态压力测量需要考虑很多因素,其中传感器测量流道内的温度是首先要考虑的。压力传感器感应膜片受到许用温度的限制^[2],需要采用带有引气管^[3]的共振管方式进行测量。Bergh等^[4]进行共振管测量系统的理论计算推导与多组共振管模型试验,比较了不同管腔长度和管腔半径对假设理想管路模型和试验模型频响特性的影响;Lee^[5]发现管腔内径越小,共振管传递高频信号的能力越弱;高隆隆等^[6]对FADS系统测压管路频率响应特性进行了仿真分析,认为管路内径增大会加剧系统振荡,管路长度增加会减小系统频宽,容腔容积增大会减小系统频宽但影响很小;周昶毅等^[7]采用约束条件下的拟牛顿法优化设计了测压管管路系统,在0~80 Hz频率范围内未发生畸变。上述研究频率范围都很小,无法满足宽频要求。在早期整机试验中,采用共振管系统测量加力燃烧室动态压力数据,对其进行频谱分析发现频谱存在1100~1300 Hz共振管腔频带,对实际频率幅值判断造成干扰,为此需要选择更优的方法来完善测量系统。Sinha等^[8]研究的连接半无限长管的频率特性能够满足所需要的频响范围;杨林等^[9]的研究表明带有半无限长管可有效减小动态压力信号的能量衰减,并减弱管腔效应。

基于半无限长管的优点,对现用的整机加力燃烧室受感部进行设计改进,开展了共振管和半无限长管动态压力测量系统的频响特性研究。根据试验结果得到了频率特性传递函数^[10],修正前期加力燃烧室动态压力测试数据,获得测点真实压力。实现2000 Hz以内宽频信号的动态修正,优化并完善振荡燃烧动态压力测试系统和数据处理分析方法。

1 动态压力测量的安装方式

发动机内部流动非定常特性测量主要包括稳态测试和动态测试,其中动态压力测试是航空发动机试验测试中一个重要环节。目前动态压力测试的安装方式主要有以下3种。

(1)齐平安装。齐平安装的结构如图1所示,齐平安装是最理想的安装方式,但对压力传感器工作温度和装配条件的技术要求极高。

(2)共振管安装。共振管安装的结构如图2所示,

在当前技术条件下,动态压力通常采用共振管形式进行测量。由于压力传感器膜片和被测气流之间存在管腔 V ,在管腔中传播的压力波在压力传感器端面上反射而产生管腔效应^[11],导致测试频响受到干扰。

(3)半无限长管安装。带有半无限长管的安装结构如图3所示,在这种结构中,压力波在经过一段相当长的距离后,由于介质阻尼的作用而消失,管腔中就不会产生管腔效应,因而改善了管腔的频率特性。倪立斌^[12]研究发现10 m以上的半无限长管表现更好,因此在实际测量中条件允许的情况下,应使半无限长管尽可能长,但其缺点是幅值衰减较大。

2 管腔效应机理

由于压力传感器与被测气流之间存在管腔,压力传感器膜片感受的压力不是被测点的压力,而是膜片前空腔的压力^[13],对静态压力而言,这二者相等,因此不会产生误差。但是对动态压力情况,测点的压力变化要通过细管传播到空腔后才到达压力传感器的膜片。因此,可将管腔看作一个环节:输入量为被测压力 $P_0(t)$,输出量为膜片前空腔中的压力 $P_1(t)$ 。管腔后的压力变化 $P_2(t)$ 也可用一个线性微分方程来表示,那么也可以求出其传递函数 $H_2(s)$ 。由此可得压力传感器的传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s)=H_1(s) \cdot H_2(s) \quad (1)$$

式中: H_1 为压力传感器的传递系数。

管腔的频率特性相应为

$$H(j\omega)=H_1(j\omega) \cdot H_2(j\omega) \quad (2)$$

试验证明,管腔也可以近似看成2阶系统的环节,这时其频率特性 $|H_2(j\omega)|$ 和 φ_2 为

$$|H_2(j\omega)|=\frac{P_{1m}}{P_m}=\frac{1}{\sqrt{(1-\beta_2^2)^2+(2\xi_2\beta_2)^2}} \quad (3)$$

$$\varphi(\omega)=\arctan\frac{-2\xi_2\beta_2}{1-\beta_2^2} \quad (4)$$

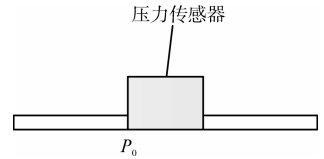


图1 齐平安装

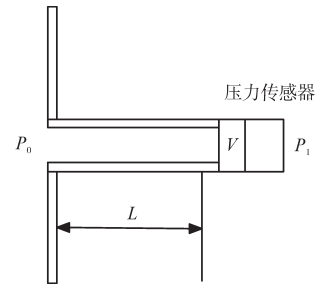


图2 共振管安装

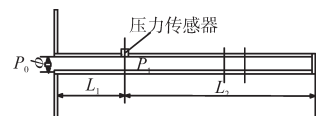


图3 半无限长管安装

式中: $\beta_2 = \frac{\omega}{\omega_{20}}$, ω_{20} 为管腔的固有频率; ξ_2 为管腔中压力传播的阻尼系数。

在共振管结构(图2)中,压力传感器安装在管道的一端,被测压力 $P_0(t)$ 沿管道传播到压力传感器的膜片上(称入射波),经膜片反射。在管道中各点上介质的位移是入射波和反射波之和。当 $P_0(t)$ 在某一频率 f 时,入射波和反射波同向叠加。

令管道中形成驻波的入射波和反射波是1对频率和振幅相同(假设是全反射)而传播方向相反的简谐波,则介质质点的位移为

$$\xi_1 = A \cos 2\pi(ft - \frac{x}{\lambda}) \quad (5)$$

$$\xi_2 = A \cos 2\pi(ft - \frac{x}{\lambda}) \quad (6)$$

式中: x 为各振动质点的轴向位置, $x=0$ 是测压点; ξ_1 、 ξ_2 分别为入射波和反射波在传播过程中各质点的振动位移; A 为振幅; f 为振动频率; λ 为波长。

合成后的驻波运动方程为

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos 2\pi ft \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (7)$$

根据气体方程,压力 $P_0(t)$ 又可表示为

$$P_0(t) = -\rho a^2 \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (8)$$

式中: ρ 为气体介质的密度; a 为声速。

将式(7)代入式(8),得

$$P_0(x,t) = \frac{2\pi 2A}{\lambda} \rho a^2 \cos 2\pi ft \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (9)$$

比较式(7)、(9)可见, $P_0(x,t)$ 和 ξ 都以频率 f 振动,但二者相差 $\lambda/4$ 。这样,管腔长度 l 和波长 λ 之间满足

$$l = K \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{4} = \frac{(2K+1)}{4} \lambda, K = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

对声波而言, $\lambda = \frac{a}{f}$, 代入式(10)后得

$$l = \frac{(2K+1)a}{4f_0}, \text{ 或 } f_0 = \frac{(2K+1)a}{4l} \quad (11)$$

式中: f_0 为管腔固有频率。

声速与温度有关,其关系式为

$$a = a_0 \sqrt{1 + \beta T} \quad (12)$$

式中: a_0 为 0°C 下的声速值, $a_0 = 331.4 \text{ m/s}$; β 为温度系数, $\beta = 0.00367$; T 为介质温度, $^\circ\text{C}$ 。

如果在管腔中包括有体积 V (图2),当体积 V 较小时,确定管腔固有频率 f_0 可以采用试验方法,根据试

验所得经验公式^[14]估计 f_0 和 ξ

$$f_0 = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{r^2}{4\pi l(V + \frac{4r^2 l}{\pi})}} \quad (13)$$

$$\xi = \frac{4\mu}{r^3} \sqrt{\frac{l}{\pi} \left(\frac{\rho}{\gamma p}\right) \left(V + \frac{4r^2 l}{\pi}\right)} \quad (14)$$

式中: p 、 ρ 为管腔中介质的平均压力和密度; γ 为比热比; μ 为介质的运动黏度。

对于流体介质, $\sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = a$, 则式(13)变为

$$f_0 = a \sqrt{\frac{r^2}{4\pi l(V + \frac{4r^2 l}{\pi})}} \quad (15)$$

当 $V=0$ 时,式(15)变为 $f_0 = \frac{a}{4l}$; 当管腔尺寸越大,

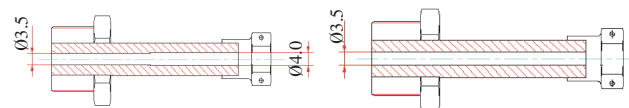
即 V 和 l 越大,管的固有频率 f_0 越小^[15]。管腔固有频率设计的期望值是越高越好,即齐平安装方式最好,但是受到温度、安装位置等各种因素影响,齐平安装很难实现。

3 受感部设计及试验方案

针对发动机加力燃烧室加力脉动受感部的结构尺寸进行设计,考虑到目前所使用受感部中间内径由 3.5 mm 增大到 4 mm,设计管腔内径为 3.5 mm 和内径 3.5 mm 管腔在中间部位扩为 4 mm 的2种共振管受感部,研究内径变大对管腔频响的影响;同时又设计了3种管腔长度外接半无限长管的受感部,研究在内径不变的条件下改变管腔长度和半无限长管长度对管腔效应的影响。

3.1 共振管试验设计

试验所使用的2种内径不同的共振管结构如图4所示。共振管左端连接正弦信号发生器,右端连接动态压力传感器。



(a) 内径3.5mm中部扩为4.0mm

(b) 内径3.5mm

图4 不同内径共振管结构

从图4(a)中可见,共振管试验件内径和管腔长度与发动机加力脉动受感部的一致,二者管腔长度相同,均为 77.3 mm;从图4(b)中可见,试验件改变了管腔内径,使受感部内径为 3.5 mm 口径,针对以上2种

结构来验证内径增大对管腔固有频率和频响的影响。

共振管试验的频率范围为0~2000 Hz,频率点分别为:5、50、100、200、300、400、450、480、600、700、800、912、1000、1100、1200、1300、1400、1500、1600、1800、2000 Hz。

3.2 带有半无限长管受感部试验设计

试验设计的3种带有半无限长管受感部如图5所示。受感部右端为1个三通,左面连接引压管;上端接动态压力传感器,与内径表面齐平,传感器到左端面距离为管腔长度 L_1 ;右端连接半无限长管,通过螺纹连接,传感器之后到半无限长管末端距离为 L_2 。

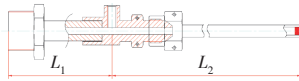


图5 带有半无限长管的受感部

试验使用的3种受感部内径均为3.5 mm,与第3.1节中共振管内径一致,3种受感部的结构尺寸见表1。

表1 3种受感部的结构尺寸

受感部	φ/mm	L_1/mm	L_2/m
1	3.5	40	15、18
2	3.5	55.3	15、18
3	3.5	100	15、18

带有半无限长管受感部试验的频率范围为0~3000 Hz,频率点分别为:5、50、100、200、300、400、450、600、700、800、912、1000、1100、1200、1300、1400、1500、1600、1800、2000、2500、3000 Hz。

3.3 动态压力校准系统

本文使用的测试系统为正弦压力发生器校准系统,如图6所示。该系统包括正弦信号发生器、NI数采系统,以及计算机、信号放大器和气罐。测试使用Kulite的动态压力传感器作为校准传感器。

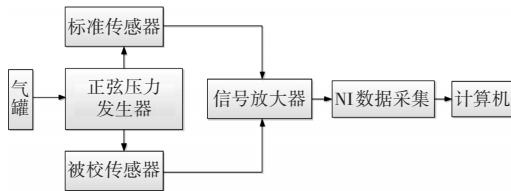


图6 正弦压力发生器校准系统

4 共振管频响特性

按照第3.1节中2种共振管结构尺寸进行频率点试验,根据管腔效应机理,管腔固有频率与腔内温度呈正相关^[6],考虑试验环境与传感器在整机试验中环境温度差异,管腔内温度按照发动机整机试验预估进

行温度修正,得到的2种尺寸受感部的频响特性如图7所示。图中纵坐标 y/y_0 为带有共振管的被测压力与标准压力比值。

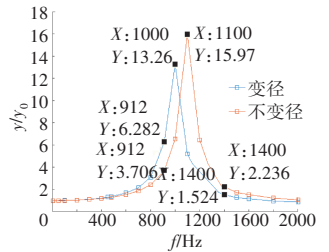


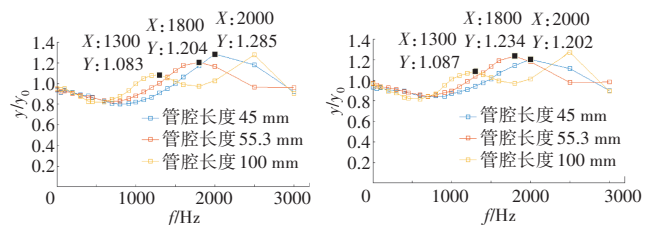
图7 管腔内径对加力受感部幅频特性影响曲线

从图中可见,管腔内径增大使管腔固有频率减小,同时幅值有衰减,这是由于内径增大外扩导致信号发生能量衰减而造成的。增大管腔内径使912 Hz频率幅值由3.706倍增大到6.282倍,1.4 kHz频率幅值由2.236倍减小到1.524倍。

按照式(15)进行理论计算,忽略传感器内的体积 V ,管腔内径为3.5 mm的受感部的管腔固有频率为1.11 kHz,实际试验结果为1.11 kHz,与理论计算结果相近。

5 带有半无限长管受感部的频响特性

由于半无限长管能够提高测试系统频响,因此试验旨在研究相较于共振管测量方式的更优方案。试验按照方案设计对3种压力受感部和2种长度半无限长管组合共进行了6组试验,得到3种压力受感部的频响特性曲线如图8所示。



(a) 半无限长管长度为15 m (b) 半无限长管长度为18 m

图8 不同管腔长度对幅频特性曲线影响

从图中可见,当半无限长管长度不变时,随着管腔长度的加长,管腔固有频率逐渐降低,并且幅值也逐渐减小,这与理论相吻合^[17];半无限长管长度为15 m或18 m对幅值的影响差异不大,不超过0.1倍。

6 发动机加力燃烧室脉动数据修正

根据第4章中共振管的校准曲线以及试验点数据,对中间频率点进行插值拟合,得到该结构在2 kHz附近的动态校准函数模型。选取发动机的加力脉动试验数据对加力测点脉动数据进行频谱分析,数据时长为0.5 s,修正前后脉动数据频谱如图9所示。

从图中可见,原始加力脉动数据在1.0~1.5 kHz存在管腔固有频率带,频率最大幅值为10 hPa;利用经过试验验证后的动态校准函数模型来修正原始数据,可以看到管腔频率带消失,幅值都在5 hPa以内,避免管腔效应对测量结果的影响,满足高温宽频动态压力测试的频响要求。

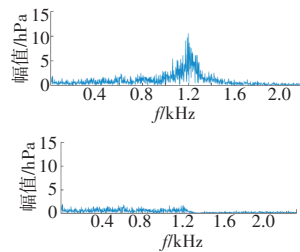


图9 发动机加力脉动数据频谱修正

7 结论

(1)在共振管的频响特性试验中发现,增大管腔内径会使管腔固有频率降低,并且频率幅值有衰减;根据测量结果分析可知,信号在管腔内扩张造成能量衰减,频率特性也受到影响。

(2)在共振管内径为3.5 mm时管腔受感部的理论计算结果与试验结果相吻合,二者差别受到管腔加工质量、装配误差以及实际测量环境等影响。

(3)在带有半无限长管的频率特性试验中,半无限长管长度不变时随着管腔长度的加长,管腔固有频率逐渐降低,并且幅值也逐渐减小;当半无限长管长度由15 m加长至18 m时,幅值变化不大,只增大约3%,因此实际中半无限长管长度为15 m即可满足试验需求。

(4)利用得到的共振管动态校准函数模型修正整机加力脉动数据,可消除管腔效应对测量结果的影响,实现了2 kHz以内信号的动态修正,满足高温宽频测试的频响要求。

(5)从试验结果来看,管腔长度为55.3 mm、管腔内径为3.5 mm、半无限长管长度为15 m是本次动态校准试验验证得到的最优方案,该方案既满足高温条件下动态压力测试传感器的工作温度要求,也满足宽频的频响要求。

参考文献:

[1] Houshang B E. Overview of gas turbine augmentor design, operation and combustion oscillation[R]. AIAA 2006-4916.
 [2] Kulite. Pressure transducer handbook[M]. New Jersey: Kulite Semiconductor Products, Inc., 2018:2-20.
 [3] 杨艳静,陈青松,蔡峰,等.管道测压系统频率响应研究[J].实验流体力学,2006,20(2):85-89.

YANG Yanjing, CHEN Qingsong, CAI Feng, et al. Research on frequency response of tube pressure measurement system[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(2):85-89. (in Chinese)
 [4] Bergh H, Tijdeman H. Theoretical and experimental results for the dynamics response of pressure measuring systems [R]. NLR-TR F.238.
 [5] Lee M F. Dynamic response of pressure measuring systems[R]. Australia: Defence Science and Technology Organisation Aeronautical Research Laboratory, 1993.
 [6] 高隆隆,杜经民,李宝仁. FADS测压管路动态响应特性分析[J]. 机床与液压, 2010, 38(13):48-51.
 GAO Longlong, DU Jingmin, LI Baoren. Dynamic response characteristic of fads pneumatic tube[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2010, 38(13):48-51. (in Chinese)
 [7] 周晖毅,顾明. 单通道测压管路系统的优化设计[J]. 同济大学学报, 2003, 31(7):798-802.
 ZHOU Xuanyi, GU Ming. Optimization of dynamic pressure measurement of single-channel tubing systems[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(7):798-802. (in Chinese)
 [8] Sinha S, Schuster B. Experimental study of the frequency response of semi-infinite line probes[R]. AIAA 2019-2412.
 [9] 杨林,王偲臣,林峰,等. 基于半无限引压管效应的动态压力测量方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(10):2457-2462.
 YANG Lin, WANG Sichen, LIN Feng, et al. Method of dynamic pressure measurement based on semi-infinite pressure tube effect[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(10):2457-2462. (in Chinese)
 [10] 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)
 [11] 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 Measurement Technology, 2002, 16(S1):387-390. (in Chinese)
 [12] 倪立斌. 基于正弦压力方法的半无限长管特性研究[J]. 电子世界, 2018(12), 100-101.
 NI Libin. Research on the characteristics of semi-infinite tubes based on sinusoidal pressure method[J]. Electronics World, 2018(12), 100-101. (in Chinese)
 [13] 程啟华,李永新. 瞬态压力测量中传压管道频率特性分析[J]. 电子测量技术, 2007, 30(2):21-24.
 CHENG Qihua, LI Yongxin. Research on frequency response of the transmission line during the measurement of transient pressure[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(2):21-24. (in Chinese)
 [14] 王维资. 动态压力测量原理及方法[M]. 北京:中国计量出版社,

- 1986:65-70.
- WANG Weiji. Principle and method of dynamic pressure measurement [M]. Beijing: China Metrology Press, 1986:65-70. (in Chinese)
- [15] 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]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1980, 16 (4) : 363-372. (in Chinese)
- [16] 王辰辰, 蔡菁, 王洪博. 温度对引压管路动态特性的影响[J]. 计量技术, 2018, 38(2):22-25.
- WANG Chenchen, CAI Jing, WANG Hongbo. The influence of the temperature to the pressure pipeline[J]. Metrology and Measurement Technology, 2018, 38(2):22-25. (in Chinese)
- [17] 胡尚瑜, 王栖, 聂功恒, 等. 脉动风压实测管路系统频率响应特性研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(1):110-114.
- HU Shangyu, WANG Xi, NIE Gongheng, et al. Study on the frequency response characteristics of the tube system for field measurement fluctuating pressure[J]. China Science Paper, 2016, 11(1):110-114. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)