

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.22

带引压管腔的压力测量系统动态校准技术研究

李博¹, 杨军¹, 张鹤宇¹, 谢兴娟¹, 龚铮²

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095; 2. 北京北方车辆集团有限公司, 北京 100072)

摘要: 在动态压力测量领域中, 带引压管腔的压力测量系统常被用于空间狭小、工况恶劣等情况下的压力测量, 压力信号经过引压管腔传递会发生畸变, 引压管腔是降低压力测量系统频响的首要因素。本文首先介绍了带引压管腔的压力测量系统物理结构模型, 阐述管腔动态特性影响动态测量机理。其次, 介绍了现有引压管腔主要校准方法和装置, 开展新型校准装置和方法研究, 研制了一种静态压力及温度可调的校准装置。最后, 利用该校准装置对带引压管腔的压力测量系统进行实验, 对带引压管腔的压力测量系统的动态计量与补偿技术发展具有借鉴作用。

关键词: 引压管腔; 压力测量; 动态校准; 校准装置

中图分类号: TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0149-06

Research on Dynamic Calibration of Pressure Measurement System with Pressure Pipe

LI Bo¹, YANG Jun¹, ZHANG Heyu¹, XIE Xingjuan¹, GONG Zheng²

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China;

2. Beijing North Vehicle Group Corporation, Beijing 100072, China)

Abstract: In the field of dynamic pressure measurement, the pressure measurement system with transmission pipe is often used for the pressure measurement in narrow space and bad working conditions. The pressure signal transmitted through the pipe was often distorted, which becomes an important factor to decrease the frequency response of pressure measurement system. In this paper, the physical structure model of pressure measurement system with transmission pipe is introduced, and the dynamic measurement mechanism is affected by the dynamic characteristics of transmission pipe is explained at first. Secondly, the existing main calibration methods and devices of the pressure pipe are introduced, a new calibration device and method is studied, and a static pressure and temperature adjustable calibration device is developed. Finally, the calibration device is used to test the pressure measurement system with transmission pipe, which can be used as a reference to the development of dynamic measurement and compensation technology of pressure measurement system with transmission pipe.

Key words: transmission pipe; pressure measurement; dynamic calibration; calibration device

0 引言

动态压力广泛存在于科研领域和工业生产中, 压力随时间历程进行动态变化和波动, 如内燃机、燃气轮机、火箭发动机中的压力, 飞行器飞行过程中壳体表面压力, 枪炮膛内的压力, 车辆系统油液管路中的压力, 建筑物表面承受的风载荷压力, 船舶受到的海浪冲击压力, 人体血液压力等均是动态压力。在动态压力测试中, 通常环境下可以采用压力传感器进行直接测量, 而特殊环境下, 如航空航天领域中的压力测量经常遇到压力传感器无法齐平安装的问题, 这与航空发动机、火箭发动机及其燃油管路复杂的结构设计以及特殊的工作环境(如空间狭小、平均压力波动、高温、复杂介质等)密切相关^[1]。当被测量点的压力无法

直接测量时, 常通过带引压管腔形式的压力测量系统进行压力传递和测量^[2-4]。

目前, 传感器敏感元件的加工工艺可以使传感器的频率响应达到较高水平, 但敏感元件前端的容腔或引压管腔等结构的存在限制了整个压力测量系统(或传感器)的频率响应^[5-7], 同时真实工况下的温度环境与静态压力变化也会对测量结果产生很大影响^[8-9]。

国外从上世纪就开展了对引压管腔动态特性的研究, 美国 NASA 的科研人员从引压管腔的机理分析入手, 对引压管腔进行建模, 并针对带引压管腔的压力测量系统在不同介质环境与变温环境下的动态特性开展校准研究^[10-12]。国内起步相对较晚, 以引压管腔的动态模型建立与实验研究为基础, 也开展了一系列的校准研究工作, 大多数研究依托于普通压力传感器校

准设备。由于敏感元件前端引压管腔的存在，不同实际工况下，测量结果差异较大，目前缺少带引压管腔压力测量系统的专用校准设备和多物理场耦合下的校准能力，因此还需要进一步研制实验装置并探索校准方法。

文章通过对引压管腔结构及其动态特性的理论研究进行了简单阐述，介绍了现有带引压管腔的压力测量系统的校准装置，分析了各种校准装置的优缺点的基础上，建立了一种引压管腔专用校准装置并开展相关实验研究，对未来带引压管腔的压力测量系统动态校准发展和数据补偿修正研究提供经验和借鉴。

1 带引压管腔的压力测量系统

1.1 引压管腔物理结构

典型的带引压管的压力测量系统结构，包含了引压管腔、敏感元件、调理器、采集器等几个主要部分，如图1所示。被测压力通过引压管腔传递到敏感元件上，敏感元件把压力信号转换为电信号，并输送给调理器进行调理放大，以便后期的数据采集和处理。

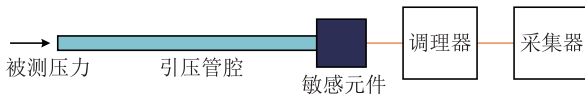


图1 带引压管腔的压力测量系统典型结构

工程上常用的引压管腔有三种结构形式，分别是直管引压管腔、带空腔引压管腔和半无限长引压管腔^[13]。直管引压管是最常见的结构形式，工程中大部分的引压管腔都可以简化成直管形式，如图2所示。

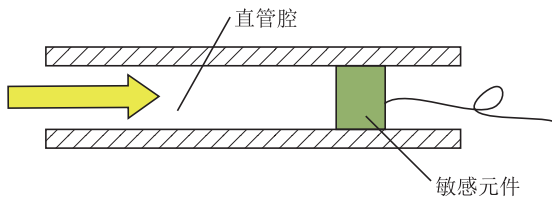


图2 直管引压管腔示意图

有空腔的测压管道是工程上常见的另一类测压管道，当敏感元件感压面的直径大于测压管道直径时，将形式感压面前部空腔，如图3所示。

半无限长引压管腔常用于高温环境下的动态压力测量，其结构如图4所示。半无限长引压管腔又称无谐振测压管路，由于阻尼作用，压力波通过足够长管道内传输，反射回的压力波基本已经衰减，从而管路不再产生谐振达到高带宽测压能力。

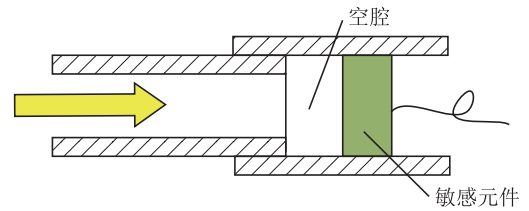


图3 带空腔引压管腔示意图

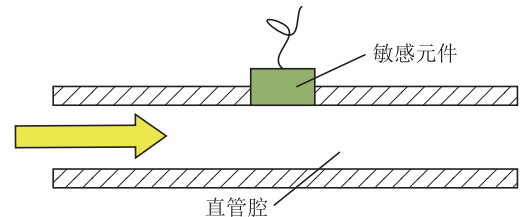


图4 半无限长引压管腔示意图

1.2 引压管腔动态特性

对于流体管腔系统基本的物理模型已经比较完善，并且通过了相应的试验和工程应用验证，具有较高的精确性。通常管腔理论模型分类如图5所示，常见的气体介质可参考可压缩流体管腔模型计算动态特性。

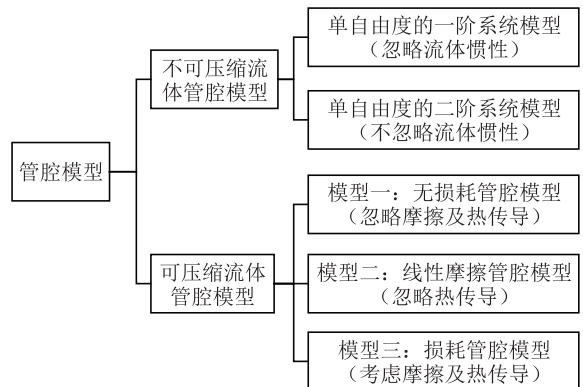


图5 管腔理论模型分类

引压管腔动态特性的基本方程为

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

式中： $\begin{bmatrix} p_1(s) \\ Q_1(s) \end{bmatrix}$ ， $\begin{bmatrix} p_2(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix}$ 分别为输入与输出端的压力和流量的拉普拉斯变换； $Z_0(s)$ 为特性阻抗； $\Gamma(s)$ 为传播算子。

图6所示为常见的直管形式引压管腔测压系统，管腔两端分别为输入端和输出端，输出端安装有传感器或敏感元件。



图6 直管引压管腔形式

在管腔基本方程中采用损耗管腔模型进行一系列推导，得到引压管腔谐振频率关系式为^[14]

$$f_n = \frac{(2n - 1) \sqrt{\gamma R(t + 273.15)}}{4lM} \quad (2)$$

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； n 为正整数。

当 $n = 1$ 时，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。

从式(2)中可以看出，引压管腔的谐振频率与气体物性和管腔结构存在必然关系，关于引压管腔结构对谐振频率的影响研究开展较多，但对于引压管腔多物理场(如高温、高压、混合气体等环境)耦合研究较少。

2 引压管腔动态特性校准

2.1 阶跃法校准

阶跃法校准一般采用激波管产生标准阶跃信号对被测对象进行校准^[15]，可用于引压管腔的时域校准，适合于评价压力上升时间、固有频率等指标。

带引压管腔的压力测量系统通常响应频率较低，而激波管适用于高频率校准，并且结构较为复杂，不易控制，产生的阶跃压力重复性较低。采用航空工业计量所研制的激波管进行带引压管腔的压力测量系统校准，如图7所示。

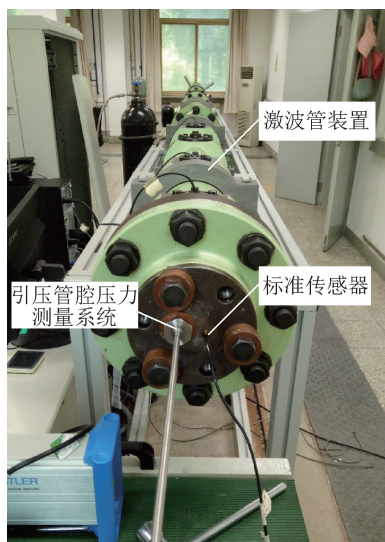


图7 激波管阶跃校准

在相同条件下对一支带引压管腔的压力测量系统进行三次校准，由于激波管产生阶跃压力不具有良好的重复性，选取某一次实验时域信号，如图8所示，带引压管腔的压力测量系统产生明显振荡。

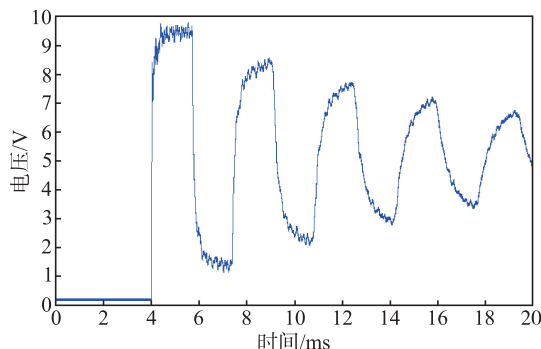


图8 阶跃校准时域曲线

通过对时域信号进行 FFT 处理，得到带引压管腔的压力测量系统的频域信号，如图9所示，在低频段有明显的波峰逐渐递减、排列密集的谐振峰，谐振峰满足式(2)中 $2n - 1$ 的关系，并且第一个谐振峰值对应频率点约为 270 Hz 与该引压管腔理论谐振频率 280 Hz 接近。

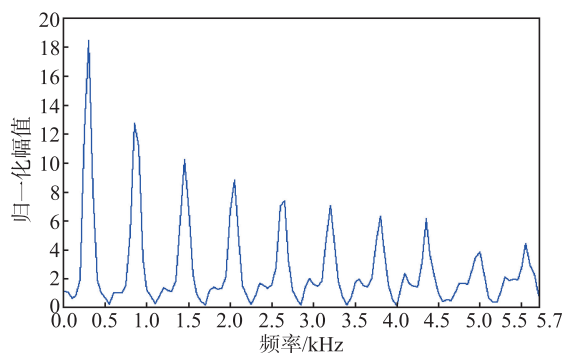


图9 阶跃校准频域信号

目前，带引压管腔的压力测量系统所用的敏感原件频响较高，常常能够达到几十万赫兹，而通常引压管腔的频响较低，是限制整个系统频响的重要因素。

通过阶跃法对带引压管腔的压力测量系统进行校准，可以定量评价上升时间，固有频率等动态指标，但对于灵敏度、幅频特性、相频特性等指标无法有效进行评估。

2.2 正弦法校准

正弦法校准一般利用周期型正弦压力信号对被测对象进行校准，适合于对压力测试系统的灵敏度、幅频特性、相频特性等动态指标进行定量评价，较为成熟的正弦压力发生方法有调制面积式和改变容积式两种^[16]。

调制面积式正弦压力发生器是基于气流出口调制方式产生正弦压力，利用旋转阀运动改变稳定压力气流源流通面积从而产生周期型正弦压力，如图 11 所示。

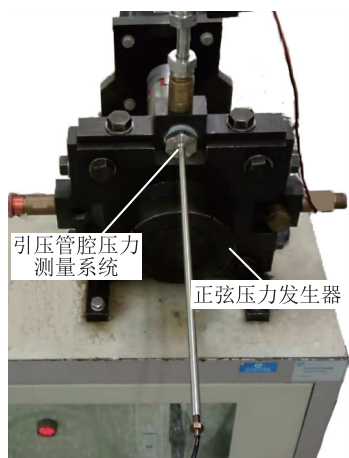


图 11 出口调制式正弦压力发生器

改变容积式正弦压力发生器是利用活塞在密闭容腔内进行简谐运动，密闭容腔内气体压缩或膨胀，在密封腔体内产生正弦压力，如图 12 所示。

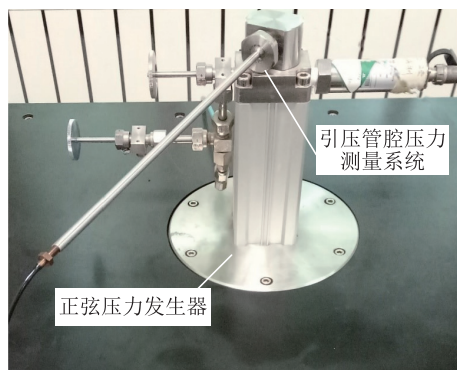


图 12 变容积式正弦压力发生器

对上述同一支带引压管腔的压力测量系统进行正弦法校准，利用出口调制式正弦压力发生器进行三次校准，选取某一次实验时域信号，如图 13 所示。

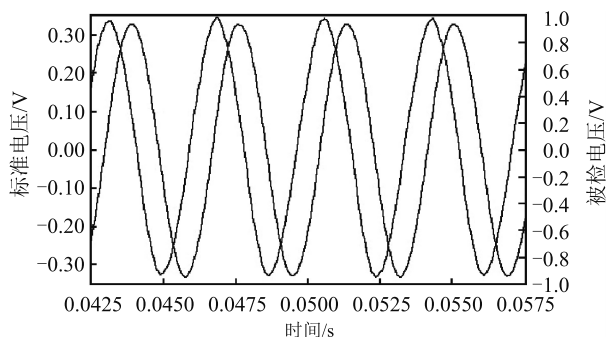


图 13 正弦校准法时域波形图

利用正弦法校准可以有效的得到带引压管腔的压力测量系统的灵敏度及其相位，并且正弦压力发生器的重复性一般优于 1%，可以对带引压管腔的压力测量系统进行扫频校准，建立幅频特性曲线，如图 14 所示。

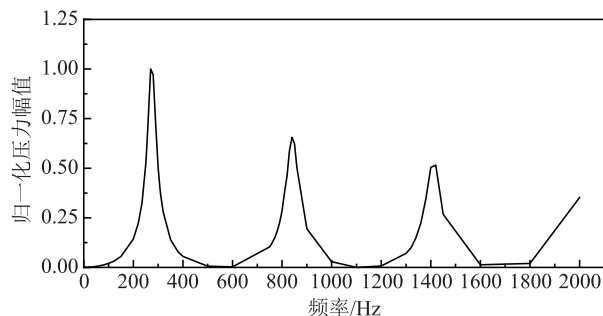


图 14 引压管腔频谱图

正弦法校准可以评价带引压管腔的压力测量系统的灵敏度、相位、幅频特性、相频特性等动态指标，但由于正弦压力发生器的限制，仅适合于中低频段校准。实际工程应用中很多信号理论上是由多个周期性信号(如正弦信号)叠加形成，因此研制高带宽的正弦压力发生器可有效模拟使用工况，产生标准激励信号，并可用于带引压管腔的压力测量系统的校准。

3 引压管腔校准技术研究

3.1 引压管腔校准装置

为了准确实现带引压管腔的测压系统的校准，尽可能的模拟实际测试环境，如高温环境、静压变化环境等。航空工业计量所设计了一种引压管腔校准装置，利用换能器在密闭容腔内振动产生压力波，可在设定静态环境压力下产生动态压力，同时可以产生 400 ℃ 高温环境，其结构组成如图 15 所示，主要包括静态压力系统、动态压力系统，温度系统，数控采集系统四部分。

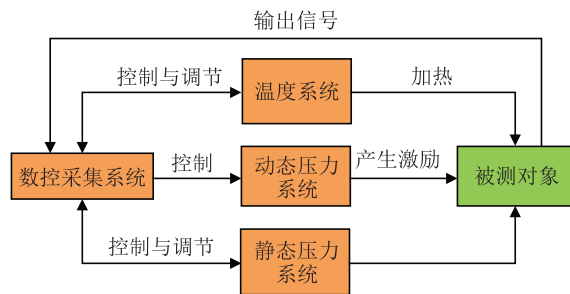


图 15 校准装置结构图

静态压力系统主要由气源、压力控制器、管路阀门等组成，实现在密闭压力容腔内产生 0 ~ 1 MPa 的静

态压力；动态压力系统主要由信号发生器、功率放大器、换能器等组成，利用信号发生器产生 20 ~ 1000 Hz 可调的正弦信号，经过功率放大器输出给研制的电声换能器，实现在密闭压力腔内产生正弦压力波，压力幅值可达 1 ~ 10 kPa；温度系统主要由温度控制器、加热装置组成，采用电热丝加热产生 20 ~ 400℃ 的环境温度。数控采集系统主要实现对静态压力、动态压力、温度、频率等关键参数的控制与输出信号的采集，完成测试和校准自动化的过程。灵敏度校准不确定度小于 2% ($k=2$)，校准装置实物如图 16 所示。

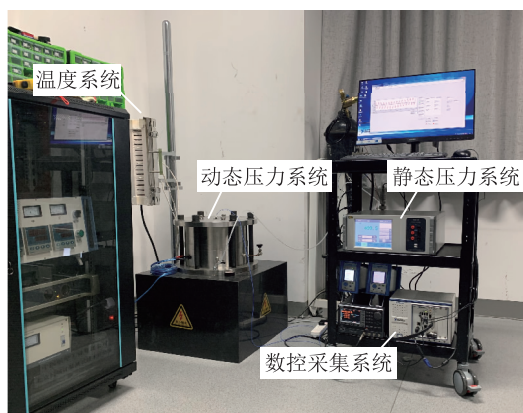


图 16 引压管腔校准装置图

3.2 校准方法及原理

引压管腔校准装置采用目前广泛应用的比较法，压力入口处安装标准传感器，同时被测对象也齐平安装在压力入口处。根据被测对象与标准传感器测得的动态压力便可分析出被测对象的动态特性，该方法原理图如图 17 所示。

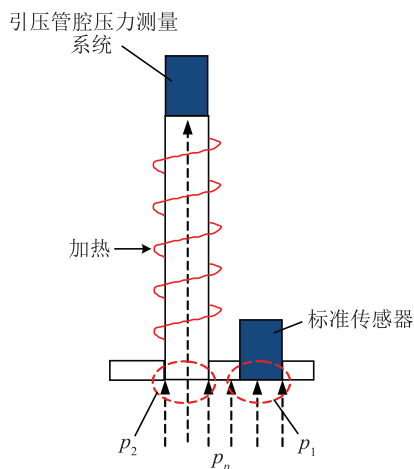


图 17 比较法原理图

标准传感器用来计算动态压力幅值，压力幅值 p_p 计算依据式(3)。

$$p_p = \frac{U_1}{S_1} \quad (3)$$

式中： U_1 为标准传感器输出电压峰值； S_1 为标准传感器灵敏度。

被测对象的幅值灵敏度 S 计算依据式(4)。

$$S = \frac{U_2}{p_p} = \frac{U_2}{U_1} S_1 = k S_1 \quad (4)$$

式中： U_2 为被测对象输出电压峰值； k 为引压管腔放大系数。

3.3 应用

通过引压管腔校准装置可以对带引压管腔的压力测量系统进行常规校准，还可以开展扫频分辨力为 0.1 Hz 的频响特性实验。目前，已开展不同静态压力、不同温度环境下的引压管腔动态特性研究，实验结果如图 18 和图 19 所示。

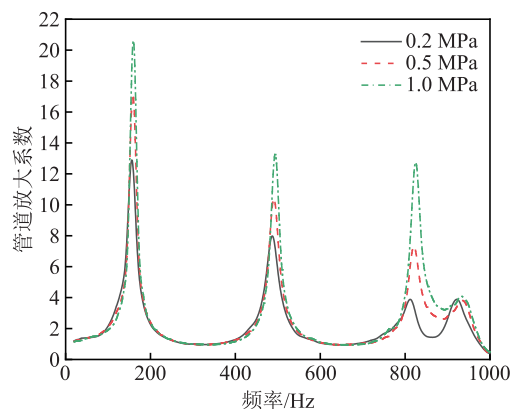


图 18 不同静压下实验结果

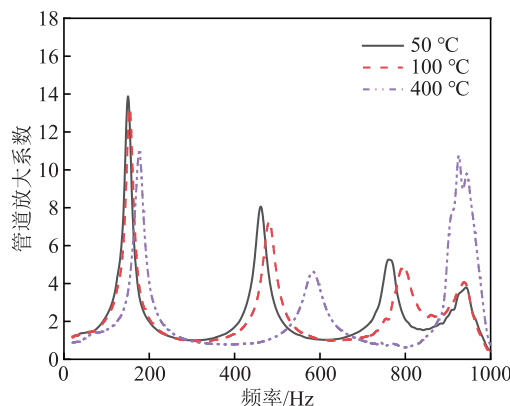


图 19 不同温度下实验结果

后期还将开展不同气体介质、温度、静压等多物理场耦合的影响因素实验，有助于推进工程实际应用中带引压管腔的压力测量系统的动态补偿和修正技术的发展。

4 总结

近年来,对于带引压管腔的压力测量系统的物理结构模型和动态特性研究取得了一定成果,而对于复杂环境下的动态校准和分析方法开展较少,特别是多物理场耦合下的校准技术研究,与国际上一些研究机构存在差距。采用传统动态压力校准装置进行带引压管腔的压力测量系统校准的方式已无法满足复杂情况下的校准需求,为此,提出一种可变静压和温度的新型引压管腔校准装置,并开展了一系列实验研究,将对带引压管腔的压力测量系统的动态校准技术发展起到促进作用。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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] 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.
- [5] 包家立. 带引压管腔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.
- [6] 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): 106-110.
- [7] 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.
- [8] 吕永志. 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.
- [9] 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.
- [10] Miller E L, Dudenhofer J E. On the dynamic response of pressure transmission lines in the research of helium-charged free piston Stirling engines[C]//Energy Conversion Engineering Conference, 1989. Iecec-89. Proceedings of the, Intersociety. IEEE, 2002, 5: 2243-2248.
- [11] Nyland, Ted W, Englund, et al. On the Dynamics of Short Pressure Probes-Some Design Factors Affecting Frequency Response [R]. NASA TN D-6 151, 1971.
- [12] Nyland, Ted W, Englund, et al. System for Testing Pressure Probes Using a Simple Sinusoidal Pressure Generator [R]. NASA TM X-1981.
- [13] Hjelmgren J. Dynamic Measurement of pressure-A Literature Survey [R]. BORAS: SP Swedish National Testing and Research Institute, 2002: 34, 10-13, 44-53.
- [14] 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.
- [15] ISA 37.16.01-2002 A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers [S]. 2002.
- [16] 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.

收稿日期: 2021-01-27

基金项目: 国家装备技术基础项目(JZX7J201802JL0022XX)

作者简介

李博(1990-),男,北京人,工程师,主要从事动态力、动态扭矩、动态压力等动态参数校准技术研究,先后参研和承担了多项国家技术基础项目和国防装备技术基础项目。

