

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.06.01

引压管腔动态特性及其校准研究现状

石玉松, 杨军, 李博

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 受安装空间、高温环境和复杂介质等限制, 压力测量系统中往往需要引压管腔来传递压力, 管腔成为限制系统频响的重要因素。本文首先回顾了管腔动态特性的理论研究进展, 简述了国内外围绕管腔动态特性影响因素的研究成果。其次, 介绍了现有的引压管腔主要校准方法, 并分析了不同校准方法自身的特点和使用条件。最后, 指出了现有校准方法在实际使用中的不足, 并对进一步的研究做出展望。

关键词: 动态压力; 测量; 引压管腔; 动态特性; 校准

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)06-0002-04

Review of Dynamic Characteristics and the Calibrations of Pressure Pipelines

SHI Yusong, YANG Jun, LI Bo

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A pipeline or cavity always exists before the pressure transducer when measuring pressure because of the limitation of installation space, high temperature or complex media. The dynamic characteristics of pressure measurement systems are often determined by the pipelines. The progress of the theoretical research in the pipeline dynamic characteristic is first reviewed, and the research results of the factors that are affecting the dynamic characteristic are presented. Then the main calibration methods of pipeline are introduced, and their characteristics and using conditions are analyzed. Finally, the shortcomings of the existing calibration methods in practical use are pointed out, and the further studies needed in the future are discussed.

Key words: dynamic pressure; measurement; pressure pipeline; frequency response; calibration

0 引言

在火箭发动机、航空发动机、航天环境控制设备、航空救生设备、航空航天器燃油管路、结构表面载荷等的压力测量中, 受到结构、空间、高温、复杂介质等的影响, 压力传感器无法齐平安装直接测量待测点的压力, 往往需要引压管腔来传递压力。随着传感器技术与工艺的发展, 传感器元件的频响可以达到很高的水平, 而管腔的较低的动态频响成为制约整个压力测试系统动态性能的主要短板, 因此, 研究管腔的动态特性, 对于控制动态测量误差有重要意义。

从上世纪 60 年代开始, 针对引压管腔的动态特性研究, 科研人员做了大量的理论分析和试验验证^[1-3], 取得了瞩目的成果。常用的引压管包括等径直管、带空腔的管道和半无限长管道^[4]。在不同的使用条件及不同的需求下, 引压管腔的结构、尺寸、填充介质、温度、静态压力等会有所不同, 而这些是影响引压管腔动态特性的因素。目前国内研究的主要对象多为结构, 尺寸对动态特性的影响, 而对静态压力、复杂介

质、温度等影响因素的研究则较少, 且机理分析与试验验证之间的配合与一致性研究也不足。此外, 国内现有的试验手段和方法不能满足特殊条件下引压管腔的校准需求, 尤其是温度梯度模拟、复杂介质以及无耦合动态压力发生器等校准方法还需要补充。校准结果的可靠性缺少评估, 数据的有效性被乐观估计, 缺少系统的引压管腔校准建议或指南。本文对引压管腔动态特性的理论研究和校准方法研究进行了总结, 分析了各种校准方法的优缺点, 并对引压管腔动态校准的研究方向进行了展望。

1 引压管腔动态特性理论研究

管路系统基本的物理模型已经比较完善, 在层流假设情况下, 且管路中介质为单相流时, 管路系统的模型可分为无损模型、线性摩擦模型和耗散模型^[5]三种, 这些模型得到了广泛验证及应用。但在非层流假设或气液、气固、液固、气液固等两相流或多相流的情况下便不再适用。

当把流体视为不可压缩流体时, 不忽略流体的惯

性,常采用单自由度二阶系统模型估算管道的固有频率。最常用的理论依据是“四分之一波长公式”^[6-8],它可以大致估计简单直管道的谐振频率,但不能进行幅频与相频的定量分析,对复杂结构或介质的管腔的动态特性也无能为力。Bergh 和 Tijdeman 于 1965 年提出的测压系统的频率响应理论^[9],则比较适合于单一介质的复杂结构管道的测压动态特性分析。阻抗概念的频率分析法^[10]则可用于研究不同物理介质或静态压力对引压管腔动态特性的影响。

研究不同结构对管腔动态特性的影响,有助于在实际使用中选取合适管腔。美国国家航空和航天局刘易斯研究中心的 Walter E. Wilhelm^[15]研究了半无限长引压管腔在不同内径、不同安装长度、不同开口方式、不同频率激励下的动态特性。中国燃气涡轮研究院王维等^[16]针对谐振管腔和半无限长非谐振管腔这两种常用的动态压力探针管腔形式进行了大量的试验研究,分析了管腔长度、非谐振管腔安装长度、管腔内径和管腔结构对管腔效应的影响和复制衰减情况,同时验证了管腔对稳态信号的延迟时间。北京大学力学工程系杨艳静等^[19]利用 Bergh-Tijdeman 推导的循环方程研究了限流器与管道组成的串联系统的动态特性。日本研究人员 A. Yoshida 等人研究了在风压测量中,弯曲对于引压管腔动态特性的影响^[11],对管道的弯曲位置、弯曲数量、弯曲导致的截面积改变等对管腔动态特性的改变进行了分析,并对实际使用的优化提出了建议。

针对引压管腔中不同介质对管道动态特性的影响,北京长城计量测试技术研究所杨军^[12]等研究了管道气介质、液介质、液夹气介质不同情况下管腔的动态特性,从理论和试验进行了验证。

在航空发动机动态压力测量中,引压管腔感压端温度较高,而传感器安装端温度较低,管腔存在温度梯度。美国德莱顿飞行研究中心的 Stephen A. Whitmore 等人^[13]通过理论和试验结合的方式,研究了不同管径的引压管腔在不同温度梯度下的动态特性。研究人员采用多变量能量分析的方法,得到了温度梯度的递推公式。

管腔测量动态压力中,不同的静态压力会对管腔的动态特性产生影响。北京长城计量测试技术研究所杨军等^[12]利用基于二维流动分布参数模型的频率法对管道动态模型进行了分析,研究了不同静态压力情况下管道的不同动态特性,并通过试验进行了验证。

随着工程实践中越来越高的动态压力测试要求,对引压管腔的动态建模和动态补偿显得越来越重要。中国科学院李继超等^[17]通过 ARMAX(自动回归滑动平均)模型辨识获得了高频响动态探针的容腔传递函数,这种方法简单可行,对于考虑容腔效应的动态标定提

供了一定参考。北京航空航天大学郭勇等^[18]选用特殊白化滤波器的广义最小二乘法(GLS(SF))建立高频压力探针的动态数学模型,并根据零极点相消的原理进行了动态补偿滤波器设计。

引压管腔的理论研究已经取得了一定的成就,尤其是针对直管道,简单介质管道的理论已经比较成熟。但是仍然存在一些不足:①复杂条件下的机理分析不够深入,如复杂介质(液夹气)、温度梯度、腔体耦合等对管腔动态特性影响的机理分析需要更深入;②理论分析结果与试验验证存在一定的偏差,需要足够的试验对响应的理论进行验证;③引压管腔的动态压力补偿模型欠缺,不能满足实际需求。

2 引压管腔校准方法研究

目前对引压管腔的校准主要使用阶跃压力、周期压力等,通过不同的校准设备产生特定的压力信号。

2.1 阶跃压力校准方法

阶跃信号是动态压力校准中最常用的信号,激波管能够产生正阶跃压力,是常用的阶跃压力校准设备;快开阀装置能够产生平台接近无限长的负阶跃压力;利用气球等爆膜亦可以产生负阶跃压力。

清华大学工程力学系张近等^[20]利用自制的激波管(装置高压段长 1.5 m,低压段长 5.6 m)对不同规格的带空腔的管道进行了校准试验,通过试验与单自由度二阶系统理论模型的结果比较分析,发现单自由度二阶系统模型计算的阻尼比不可用,但计算的自振频率与试验结果基本一致。同时,对于某特定的尺寸的管道,会出现自振频率的“低谷效应”。北京长城计量测试技术研究所张力等^[4]利用激波管及快开阀装置研究了直管、带空腔管道及半无限长管道的动态特性。徐有恒等^[19]利用气球设计了一种负阶跃自由场压力发生装置,并研究了气球前加圆通道造成压力信号高频“毛刺”现象。空军工程学院江勇等^[21]研制了一种爆膜式动态压力发生器,此发生器产生阶跃压力平台时间无限长,通过改变发生器腔体的长度,可产生不同的峰值频率,可用于频响不高于 1 kHz 的引压管腔动态校准。这种校准设备较轻便,可用于现场校准使用。然而,产生的阶跃信号存在震荡,尤其当发生器腔体较长时,震荡更明显。中国科学院李继超等^[16]利用简单的气膜爆炸来产生一个近似的阶跃响应信号。但由于气膜表面受力不均匀,在爆裂瞬间会使得内部气体震荡,影响阶跃响应曲线进而产生波动。

激波管对引压管腔校准是目前比较完善的校准方法,但是由于激波管的阶跃平台时间有限,对于低频

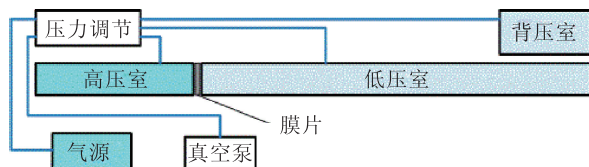


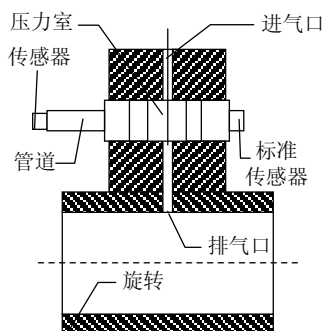
图1 激波管

引压管腔的校准存在局限性，主要对短管、较高频响的引压管腔动态特性进行定性分析。激波管校准获得管腔的瞬态响应，无法获得管腔在某一频率压力波作用下的受迫振动响应。且由于尺寸较大，激波管不适用现场校准。

2.2 正弦压力校准方法

正弦压力作为动态校准激励信号，与工程测试中的周期性脉动压力较为接近，而且能对压力测试系统的频率响应进行定量评价，因此在动态压力校准中越来越受到重视^[22]。北京长城计量测试技术研究所杨军等^[12]利用出口调制型中频正弦压力标准装置，使用气体介质产生不同的静态压力的正弦信号，验证了不同静态压力及不同介质对引压管腔动态特性的影响。对于液夹气管道动态特性的研究，则使用基于电液伺服压力控制的液压正弦压力发生器，其频率最高 100 Hz，平均压力亦可控制。同样的，文献^[15-23]利用出口调制型正弦压力发生器对引压管腔动态特性进行了校准研究。

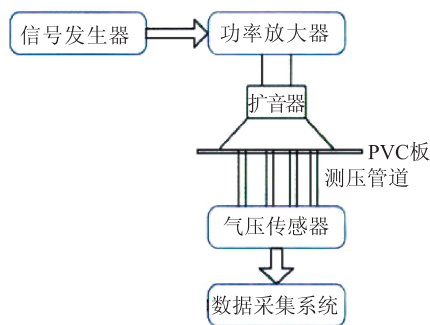
对于气介质引压管腔，国内常用的出入口调整正弦压力发生器较能满足频率与压力的需求。然而对于静态压力控制，小耦合压力腔，复杂介质等方面则存在局限性，不能完全满足引压管腔更深入的试验需求。变体积型正弦压力发生器由于其特殊的工作方式，腔体与被较管腔存在耦合，校准效果较差。

图2 正弦压力发生器^[12]

2.3 扬声器校准方法

扬声器作为一种声压发生器，可产生复杂的声压信号进而对引压管腔进行校准。Yoshida A 等人^[11]利用扬声器产生白噪声压力信号研究了引压管腔的弯曲对动态

特性的影响。中北大学吕永志等^[24]利用扬声器，用扫频方式研究了四种倒 L 型结构取样管道在不同气压幅度机理条件下的传输特性。西安文理学院王维新等^[25]利用扬声器研究了风压测量中传压管道的动态特性。文献^[18]利用扬声器研究了风压测量中引压管不同的结构以及不同限流器尺寸等对引压管腔动态特性的影响。文献^[13]利用扬声器与玻璃纤维加热带设计了带有温度梯度的引压管腔校准设备，利用真空泵，该设备亦可以校准连续介质与高克努森数条件下的管腔特性。

图3 扬声器压力校准设备^[25]

扬声器作为一种压力发生器，其能够产生比较复杂的压力波形，适用于自由场压力波形的产生且使用较便利。然而，其亦存在不足之处，如产生的压力幅值不大等。

3 总结与展望

通过大量的理论研究和试验验证，引压管腔的理论及校准方法取得了一定的成果，对于简单条件下的引压管腔的分析提供了支持。但是仍然存在一些不足之处：

1) 目前很多引压管腔的校准设备都来自于传感器校准设备，很少有专门针对引压管腔的校准设备。而理论和试验表明，传感器与引压管腔的动态特性存在很大差异。传感器校准设备用于对引压管腔的校准，并不能完全满足需求，尤其是接近管腔实际使用环境的校准设备欠缺，还需要完善部分试验手段。

2) 对现有的试验手段和方法缺少评估，没有完整的、系统的引压管腔的使用和校准方法的指南。

未来对引压管腔校准的研究，会存在几个重点的研究方向：

1) 模拟实际使用环境的校准方法，如带温度梯度的校准方法，可以模拟航空发动机等高温环境下的引压管腔校准；

2) 考虑压力发生器与引压管腔腔体耦合的研究。

压力发生器在对管腔校准过程中,产生的压力信号可能发生畸变。同样的,引压管腔也可能会受到压力发生器的影响,研究两者之间的耦合影响,能够指导选取合适的校准方法;

3)系统的引压管腔校准方法指南的建立。指南能够规范对引压管腔校准的方法,对于引压管腔校准的发展有重要意义。

参考文献

- [1] Miller E L, Dudenhoefer 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. Iecce - 89. Proceedings of the, Intersociety. IEEE, 2002; 2243-2248 vol. 5.
- [2] Nyland, Ted W, Englund, et al. On the Dynamics of Short Pressure Probes: Some Design Factors Affecting Frequency Response[R]. NASA TN D - 6151, 1971.
- [3] Nyland, Ted W, Englund, et al. System for Testing Pressure Probes Using a Simple Sinusoidal Pressure Generator [R]. NASA TM X - 1981.
- [4] 张力, 彭军, 李程. 测压管道对测压系统动态特性影响的实验研究[C]//全国压力计量测试新技术学术研讨会论文集, 北京: 1998: 78-83.
- [5] 朱明武. 动压测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [6] Jan Hjelmgren. Dynamic Measurement of pressure - A Literature Survey [R]. BORAS: SP Swedish National Testing and Research Institute, 2002; 34, 10 - 13, 44 - 53.
- [7] ISA 37.16.01 - 2002 A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers[S]. 2002.
- [8] JJG 624 - 2005 动态压力传感器检定规程[S]. 2005.
- [9] Bergh H, Tjeldeman H. Theoretical and Experimental Results for the Dynamic Response of Pressure Measuring Systems[R]. Report NLR - TR F. 238, National Aero - and Astronautical Research Institute, Amsterdam, the Netherlands, 1965.
- [10] 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.
- [11] Yoshida A, Tamura Y, Kurita T. Effects of bends in a tubing system for pressure measurement[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2001, 89(14): 1701-1716.
- [12] 杨军, 李程, 张炳毅, 等. 介质对测压管道频率响应影响分析[C]//发动机试验与测试技术学术交流会, 2008.
- [13] Whitmore S, Petersen B, Scott D. A Dynamic Response Model for Pressure Sensors in Continuum and High Knudsen Number Flows with Large Temperature Gradients[J]. Aiaa Journal, 1996.
- [14] Wilhelm W E. Investigation of Tubing Effects on Amplitude Frequency Response of Pressure Sensing Systems Using Nonresonant Terminations[R]. NASA TM X - 1988, 1970.
- [15] 王维, 唐磊, 王棋. 压力测试管道管腔效应研究[C]//全国压力计量测试技术交流年会. 2012, 32(S1): 81-86.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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]. 上海力学季刊, 1981(4): 50-58.
- [20] 张近, 李守彦, 席葆树. 压力测量系统的激波管动态校准[J]. 传感器与微系统, 1989, (1): 44-47.
- [21] 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, 335-336.
- [22] 杨军, 张力, 樊尚春. 可溯源动态压力校准方法[C]//第十四届全国压力计量与测试技术学术交流会论文集, 2014.
- [23] 蔡菁, 袁俊先, 宋寒. 引压管腔对动态压力校准的影响分析[J]. 计测技术, 2013, 33(3): 61-63.
- [24] 吕永志, 张丕状. 坦克测压取样管路系统动态特性分析及信号的修正[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(21): 50-54.
- [25] 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.
- [26] Yang J, Wang Y, Cheng L. Dynamic Modeling of Pressure Pipelines and Signal Reconstruction[C]//International Conference on Instrumentation. IEEE, 2012: 78-81.

收稿日期: 2018 - 08 - 01

基金项目: 国家“十三五”技术基础项目(JSJL2015205B015)

作者简介



石玉松(1989 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为动态压力测试与校准技术。2014年毕业于北京航空航天大学数学与应用数学专业, 获得学士学位, 2016年至今就读于北京长城计量测试技术研究所检测技术与自动化装置专业, 攻读硕士学位。



杨军(1979 -), 男, 高级工程师, 博士, 全国气象专用计量器具计量技术委员会压力分委会委员, 中国仪器仪表学会传感器分会理事, 北京振动工程学会理事。从事力学量动态测试与校准技术以及动态测量理论方法研究, 涉及激光干涉法动态压力与动态力校准技术、基于吸收光谱的压力测量技术、次声监测与校准技术、基于模型的动态校准方法等。