

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.02.06

温度对引压管路动态特性的影响

王辰辰, 蔡菁, 王洪博

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 简述了引压管路在压力测试中的应用, 并对引压管路动态特性进行了理论分析, 研究了温度对引压管路幅频特性的影响。在不同温度下用正弦动态压力校准装置对带引压管路的压力测量系统进行扫频试验, 验证了温度变化对带引压管路压力测量系统动态特性的影响。

关键词: 温度; 引压管路; 测压系统; 动态特性

中图分类号: TB935

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)02-0022-04

The Influence of the Temperature to the Pressure Pipeline

WANG Chenchen, CAI Jing, WANG Hongbo

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

Abstract: The paper presents the application of the pressure pipeline in dynamic tests, analyses the dynamic characteristics in theory and researches the influence of the temperature to the amplitude response. Using the sinusoidal dynamic calibration device, we carried on the tests of the pressure measurement system with pressure pipeline in different temperature, verified the temperature influences on the dynamic characteristics of the pressure measurement system with pressure pipeline.

Key words: temperature; pressure pipeline; pressure measurement system; dynamic characteristics

0 引言

随着科学技术的发展, 动态参数的测量越来越重要。动态压力作为工程实践和科学应用领域中一个非常重要的物理量^[1-2]很常见, 如流体在管路中流动产生的脉动压力、血液通过心脏跳动在血管中形成的脉动压力、炮弹爆炸时产生的冲击波、枪炮膛压、压气机内部脉动压力等。

动态压力一般用压力传感器测量, 实际应用中, 动态压力测试环境比较复杂, 经常处于高温、高湿、高腐蚀性等恶劣测试条件, 这些环境因素都会对传感器的测量结果造成影响。一些特殊场合, 受测试环境条件、压力传感器结构形式、设备空间尺寸、被测压力工作介质等因素限制, 需要利用引压管路来实现压力的测量, 此时, 压力传感器和引压管路组成一个测压系统^[3]。静态压力测量中, 压力不随时间变化或随时间缓慢变化, 引压管路不会影响压力传感器特性, 而在动态压力测量中, 由于压力随时间不断变化, 压力信号中包含各种频率的谐波, 为了如实得到被测信号, 必须考虑整个压力测试系统的动态响应特性。当引压管路较长时, 管路的固有频率较低, 测压系统的可用带宽一般取决于引压管路的固有频率。在航空航

天、军工装备等领域, 压力传感器通常通过引压管路测量高温介质的压力, 例如航空燃油管路压力脉动的测量温度通常是 60 ~ 120 °C, 压气机内部温度高达 650 °C, 涡轮后温度可超过 800 °C 等, 其压力测量一般通过带特定形状引压管路的测压系统实现。

目前, 引压管路对测压系统的动态性能的影响研究已经取得了一些进展, 利用正弦动态压力校准装置对谐振管腔和半无限长非谐振管腔结构的动态性能进行了研究^[3], 分析了管腔长度、安装长度、管腔内径及结构对测压系统幅频特性的影响; 分析了管路固有频率的计算方法, 并通过试验研究提出了提高管路固有频率的方法^[4]; 利用激波管动态压力校准装置对不同长度和直径的引压管路进行试验研究, 得到引压管路直径增加或长度较小, 工作频带变宽的结论^[5]; 通过对有限和半无限长引压管路幅频特性的研究, 得到半无限长引压管路可有效减小动态压力信号的能量衰减, 并减弱管腔效应的结论^[6]。现有方法虽然对引压管路动态特性进行了一些研究, 但是并未考虑引压管路的温度对压力测量结果的影响。

本文首先通过分析引压管路中流体流动规律得到表征其动态特性的数学模型, 并以某实际使用中的引压管路为研究对象, 利用正弦扫频的方法, 研究测压

系统工作频段的分散性随温度变化的规律,得到引压管路的温度对压力测量结果的影响。

1 引压管路动态特性理论分析

在高温条件下测量动态压力信号,压力测试系统往往带有引压管路。这不仅可以解决安装问题,还可以提高压力传感器的抗高温性能。引压管路具有低通滤波器的作用,低频的信号可以顺利通过。带引压管路的压力测试系统动态数学模型理论上是分布参数模型,需用管道流体力学来建立^[8],建立带引压管路测压系统数学模型如图1所示。

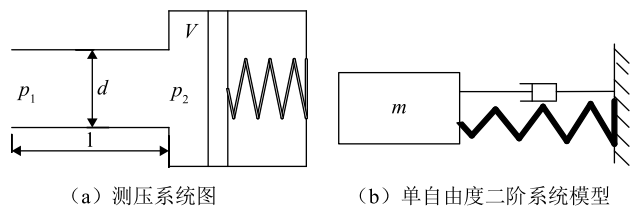


图1 带引压管路测压系统数学模型图

图1(a)由引压管路(直径 d ,长度 l)和空腔(容积 V)构成,被测压力 P_1 作用于管路端部,而空腔内的压力 P_2 即为作用在传感器的压力。假设管路内流体不可压缩,内部流体看作一个整体^[8];空腔内流体可压缩,但忽略流体流速及惯性质量^[8];管路及空腔外壁不会产生变形^[8];管路内流体为层流^[8]。此时,可以将管路内部的流体简化成为质量为 m 的刚性质量块,将空腔简化为没有质量的弹簧。考虑到运动中不可避免的摩擦阻尼,构成典型的单自由度二阶系统的模型,如图1(b)所示。

根据流体体积弹性模量 E_a 的定义

$$E_a = \frac{dP}{dV}V \quad (1)$$

得到空腔压力变化率和空腔流体体积变化率之间的关系为

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V}{E_a} \cdot \frac{dP_2}{dt} \quad (2)$$

考虑流体的连续性,空腔流体体积的变化应由管路流体及时给予补充,即

$$\frac{dV}{dt} = \bar{S}v \quad (3)$$

式中: S 为引压管路的横截面积, v 为管路内流体的平均流速。

由式(1)~(3)可得

$$\bar{v} = \frac{V}{E_a S} \cdot \frac{dP_2}{dt} \quad (4)$$

根据 Poiseuille 定律可知层流情况下管路摩擦阻力 R 为

$$R_\mu = 8\pi\mu lv \quad (5)$$

式中: μ 为流体运动粘度。

管路中流体运动方程可通过牛顿第二定律得到

$$pSl \frac{d\bar{v}}{dt} = P_1 S - P_2 S - R_\mu \quad (6)$$

将式(4)式(5)带入式(6)得

$$\frac{4plV}{\pi E_a d^2} \cdot \frac{d^2 P_2}{dt^2} + \frac{128\mu lV}{\pi E_a d^4} \cdot \frac{dP_2}{dt} + P_2 = P_1 \quad (7)$$

得到管路系统的无阻尼固有角频率为

$$\omega_n = \frac{d}{2\sqrt{\frac{\pi E_a}{plV}}} = \frac{c}{l} \sqrt{\frac{V_1}{V}} \quad (8)$$

式中: d 为引压管路的直径; l 为引压管路的长度; V_1 为管路容积; c 为流体中的声速; p 为流体密度; E_a 为流体体积弹性模量; V 为传感器前端的空腔体积。

由式(8)可知 ω_n 与 c , l , $\sqrt{\frac{V_1}{V}}$ 有关,其中 c , l ,

$\sqrt{\frac{V_1}{V}}$ 均为温度的函数。

声速 c 与温度的关系式为

$$c = 331.45 \sqrt{\frac{T}{273.15}} \quad (9)$$

式中: T 为管路内部温度。

管路长度 l 及直径 d 在不同温度下的变化率 β 表示为

$$\beta = (T - 273.15) \times \alpha \quad (10)$$

式中: α 为管路材料的热膨胀系数。

忽略管路内温度变化对空腔容积 V 的影响,则

$$\omega_n = \frac{331.45}{2} \sqrt{\frac{\pi d_0^2 T (1 + (T - 273.15) \alpha)}{273.15 l_0}} \quad (11)$$

式中: d_0 和 l_0 分别为引压管路初始直径和长度。

根据式(11)可知,管路固有频率随着温度升高而增加。

2 试验设计

正弦压力校准装置是常用的动态压力校准装置,能够产生幅值和频率可调的正弦脉动压力。一般采用比较法原理,即标准压力传感器测量激励信号,与被校压力传感器的响应进行比较的方法进行校准^[7],主要用于获得压力传感器的频率响应,即幅频特性和相频特性。正弦压力校准装置工作原理如图2所示。压力源用于提供稳定压力的气体,标准压力传感器与被校压力传感器对称安装在正弦压力发生器压力室两侧,使其感受到的压力相同。改变压力发生器频率,得到不同频率下标准压力传感器与被校压力传感器输出值,

从而获得被校压力传感器的频率响应。为确定温度对带引压管路测压系统工作频段的影响,选择正弦压力校准装置作为信号源提供不同幅值和频率的压力信号。

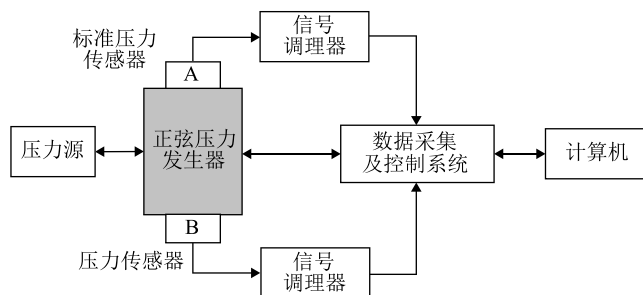


图2 正弦动态压力校准装置工作原理图

压力传感器选择 ENDEVCO 8510C-50, 编号分别为 11511 和 24771, 11511 作为标准压力传感器, 24771 作为被校压力传感器。信号调理器选用 ENDEVCO 136, 数据采集系统选择某公司数据采集卡及配套设备。本文选用某实际应用中的引压管路作为研究对象, 该引压管路由三部分不同直径和不同长度的管路串联组成, 具体尺寸为 $(20 \times \Phi 0.8 + 600 \times \Phi 2 + 200 \times \Phi 3)$ mm。加温控温系统用在引压管路外径中部缠绕电阻丝, 利用隔热层包裹管路的方式实现, 如图 3 所示。

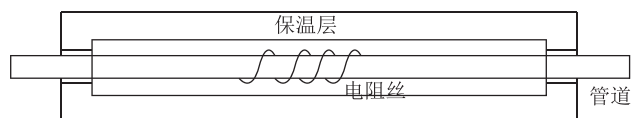


图3 加热控温系统示意图

试验在供气压力 30 kPa, 频率 1 ~ 1000 Hz 范围内进行扫频, 试验表单见表 1。常温条件下分别将被校压力传感器齐平安装和通过引压管路与压力室相连进行扫频试验。高温条件下, 将管路温度升高至 200, 500, 800 °C 并保持 30min 后进行扫频试验。

表1 试验表单

序号	温度条件/℃		试验状态	其他条件
1	常温	24	标准压力传感器与被校压力传感器背对背齐平安装在压力室两侧	气源供气 30 kPa; 频率范围: 1 ~ 1000 Hz
2			被校压力传感器通过引压管路与压力室相连	
3	高温	200	被校压力传感器通过引压管路与压力室相连	
4		500		
5		800		

3 试验结果分析

压力传感器的幅值灵敏度 $K(f)$ 为压力传感器的灵敏度与压力信号频率的关系, 即在某一个频率下压力传感器信号输出值与压力的比值。幅值灵敏度相对误差为

$$\delta_K(f_i) = \frac{(K(f) - K_s)}{K_s} \times 100\% \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

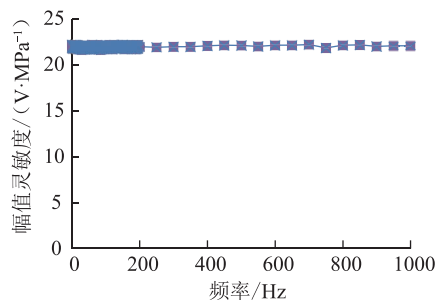
式中: K_s 为静态灵敏度。

幅值衰减为

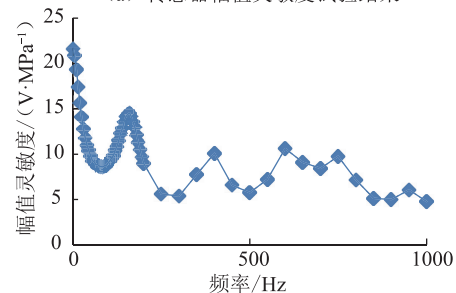
$$K_{dB}(f_i) = 20 \log(1 + \delta_K(f_i)) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

利用正弦压力校准装置进行扫频试验, 供气压力不变时, 在不同频率下, 产生的脉动压力幅值会发生变化。仅利用被校压力传感器电压输出值表示其频率响应并不准确, 通常需利用传感器的幅值灵敏度或幅值衰减表征压力传感器的幅频特性。

试验 1 中标准压力传感器与被校压力传感器背对背齐平安装在压力室两侧, 其试验结果如图 4(a) 所示, 在 0 ~ 1000 Hz 频率范围内, 被校压力传感器幅值灵敏度基本不变, 由式(1)计算得到幅值灵敏度相对误差最大值仅为 0.9%。试验 2 为常温条件下, 被校压力传感器通过引压管路连接在压力室上, 试验结果如图 4(b) 所示, 由于引压管路的存在, 导致压力传感器幅值灵敏度衰减, 在接近管路固有频率点时, 幅值灵敏度随着频率升高而增大, 出现图 4(b) 中幅值灵敏度随频率变化出现波动的现象。图 4(b) 中 80 ~ 160 Hz 是幅值灵敏度第一次增大的频率段, 在此频率范围内引压管路发生了第一次谐振, 此频率段包含了引压管路的一



(a) 传感器幅值灵敏度试验结果



(b) 带引压管路测压系统幅值灵敏度试验结果

图4 常温试验结果

阶固有频率点; 250 ~ 400 Hz, 500 ~ 600 Hz, 700 ~ 750 Hz, 850 ~ 950 Hz 幅值灵敏度增大是由于此时的频率达到了管路的高阶固有频率点, 每一个频率段基本上都是第一阶固有频率段的倍数。

在进行动态压力测量时, 一般认为压力测量系统带宽小于一阶频率的十分之一, 故在研究带引压管路压力测量系统的动态特性时只关注一阶固有频率以下的频率点。在 0 ~ 160 Hz 之间, 被校压力传感器幅值灵敏度最小值在 80 Hz 处, 此时的幅值灵敏度相对误差达到 -60.2%, 计算得到幅值衰减最大值为 -8.0 dB。

试验 3 ~ 5 分别利用加热控温装置将引压管路加热至 200, 500, 800 °C 并保持 30 分钟后进行扫频试验, 试验结果如图 5 所示。

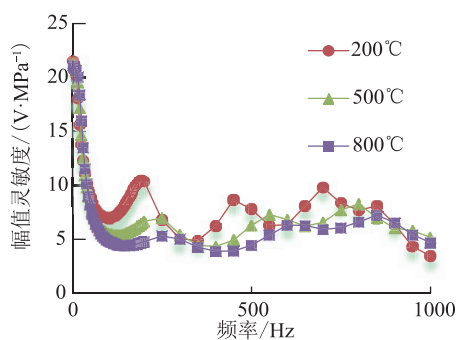


图 5 高温试验中测压系统幅值灵敏度变化曲线

根据图 5 中曲线可知, 随着温度升高, 管路的一阶固有频率点在后移。在 200, 500, 800 °C, 一阶固有频率点分别在 105 ~ 190 Hz, 130 ~ 250 Hz, 160 ~ 300 Hz 之间, 一阶固有频率点以内的幅值灵敏度误差最大值分别出现在 105, 130, 160 Hz 处, 计算得到幅值灵敏度相对误差分别为 -67.7%, -74.7% 和 -78.8%, 幅值衰减最大值分别为 -9.8, -11.9, -13.5 dB。

根据试验数据, 温度变化时, 在频率不变的条件下测压系统幅值灵敏度发生了变化, 如图 6 所示, 表明温度变化改变了通过引压管路的脉动压力幅值, 并且不同频率下, 温度变化对通过引压管路的脉动压力幅值的影响也会不同, 通过图 6 可知, 在低频段温度

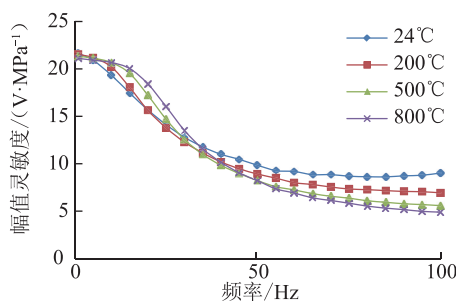


图 6 1 ~ 100 Hz 频率范围内测压系统幅值灵敏度变化曲线

升高通过引压管路的压力幅值增加, 在高频段温度升高通过引压管路的压力幅值减小。

4 结论

利用正弦动态压力校准装置研究了温度变化对带引压管路的压力测量系统动态特性的影响, 对压力测量系统在 24, 200, 500, 800 °C 下进行了 1 ~ 1000 Hz 内的扫频试验。得到以下结论:

1) 引压管路的存在会影响动态压力信号的测量结果, 管路固有频率与介质的音速、管路长度及管路结构等因素有关。

2) 在温度变化场合使用带引压管路测压系统进行动态压力测量时, 需要考虑温度变化对引压管路固有频率的影响; 本文中所使用引压管路温度升高, 其固有频率升高, 增加了测压系统的使用带宽。

3) 温度变化会对通过引压管路的脉动压力幅值产生影响, 温度及引压管路对测压系统的耦合影响比较复杂, 在实际使用中, 需利用理论分析与试验验证相结合的方法对测压系统的动态特性进行评估。

参考文献

- [1] Hjelmgren J. Dynamic Measurement of Pressure - A Literature Survey [Z]. SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, 2002.
- [2] Hashemian H M. Sensor Performance Reliability [Z]. I. S. A. - The Instrumentation, System, and Automation Society, Durham, 2005.
- [3] 王维, 唐磊, 王棋. 压力测试管道管腔效应研究[J]. 计测技术, 2012(Z1): 81 - 86.
- [4] 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(s1): 387 - 390.
- [5] 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 - 225.
- [6] 杨林, 王德臣, 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 - 2463.
- [7] JJG 624 - 2005 动态压力传感器检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.
- [8] 朱明武, 王宗支, 梁人杰, 等. 动压测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.

收稿日期: 2018 - 01 - 11



王辰辰(1990 -), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为动态压力计量与测试技术。