

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.01.08

气液混合条件下的引压管路动态特性研究

史博^{1,2}, 陈晓松², 李峰²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 利用引压管路进行航空发动机高温脉动压力测量时, 高温凝水可能造成引压管路中存在“气夹液”的状态, 采用传统的气介质引压管路动态模型进行分析误差较大。针对此问题, 基于可压缩流体引压管路系统模型建立“气夹液”条件下的引压管路传递函数, 选取相同长度、不同内径的引压管路, 通过调节压力、气液比, 开展不同气液混合状态下的试验研究, 得到引压管路动态特性与气液比之间的关系, 并得到不同管径条件下气液混合后引压管路动态特性的差异化特点, 为后续其他复杂介质条件下的引压管路动态特性研究打下基础, 为提升航空发动机动态压力测试准确性提供技术借鉴。

关键词: 引压管路; 动态压力校准; 气液混合; 谐振频率; 带宽

中图分类号: TB935; V211

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 01-0105-06

Study on the dynamic characteristics of pressure pipeline under gas-liquid mixing conditions

SHI Bo^{1,2}, CHEN Xiaosong², LI Feng²

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: When using pressure pipeline for measuring high-temperature pulsating pressure in aircraft engines, high-temperature condensed water may cause a state of "gas mixed with liquid" in the pressure pipeline, and using traditional dynamic models of gas medium pressure pipeline for analysis may result in significant errors. In response to this issue, a transfer function of the pressure pipeline under the condition of "gas mixed with liquid" was established based on a compressible fluid pressure pipeline system model. Pressure pipelines of the same length but different inner diameters were selected, and experimental research was conducted under different gas-liquid mixing states by adjusting pressure and gas-liquid ratio. The relationship between the dynamic characteristics of the pressure pipeline and gas-liquid ratio was obtained, and the differentiated features of the dynamic characteristics of the pressure pipeline after gas-liquid mixing under different pipe diameters were obtained. This lays the foundation for the subsequent research on the dynamic characteristics of the pressure pipeline under other complex medium conditions, and provides technical reference for improving the accuracy of dynamic pressure testing of aviation engines.

Key words: pressure pipeline; dynamic pressure calibration; gas-liquid mixture; resonant frequency; bandwidth

收稿日期: 2024-12-13; 修回日期: 2025-01-11

基金项目: 国家“十四五”计量技术基础研究项目(XXXX2023205XXXX)

引用格式: 史博, 陈晓松, 李峰. 气液混合条件下的引压管路动态特性研究[J]. 计测技术, 2025, 45(1): 105-110.

Citation: SHI B, CHEN X S, LI F. Study on the dynamic characteristics of pressure pipeline under gas-liquid mixing conditions[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(1): 105-110.



0 引言

动态压力测量在现代工业系统中起着至关重要的作用^[1-2]。在航空发动机测试领域中,动态压力测量主要集中在进气畸变、级间脉动、喘振以及燃烧振荡等场景中^[3],受测试空间影响,很难将压力传感器齐平安装至被测件上,因此通常采用引压管路进行航空发动机动态压力测量^[4-5]。但引压管路会影响整个测试系统的动态特性^[6-7],不同引压管路结构对系统动态特性产生的影响不同,此外不同介质条件下引压管路对系统动态特性产生的影响也不尽相同^[8]。

引压管路几何特性对整个测量系统使用频带的影响较为直观,学者们对基于结构特性的引压管路传递函数进行了大量研究^[9-11],试图根据数学模型探索得出相关影响规律。引压管路内压力的动态变化现象非常复杂,相关的数学模型各有侧重,不同的研究采用不同的假设条件并进行数学求解。引压管路数学模型包括不可压缩流体引压管路模型和可压缩流体引压管路模型两大类。不可压缩流体引压管路模型包括单自由度二阶系统引压管路模型等;可压缩流体引压管路模型包括线性摩擦引压管路模型、耗散引压管路模型等。与不可压缩流体引压管路模型相比,可压缩流体引压管路模型考虑了摩擦和热传导,能够更准确地描述引压管路系统的动态响应。SVETE A等人^[12]基于线性波动理论和连续流体力学,在无滑移和等温边界条件下建立了可压缩流体引压管路数学模型,并优化了目标函数,该函数定义了引压管路中低波数和高波数压力波之间的转换,为单一介质条件下的引压管路动态特性分析提供了重要借鉴^[13-14]。

目前,针对空气介质条件下的可压缩流体引压管路模型研究较多,但针对“气夹液”等复杂介质条件下的可压缩流体引压管路模型研究较少。航空发动机实际测试中,引压管路一般安装在热端,传感器安装在冷端,沿引压管路气流走向存在较大的温度梯度,引压管路内会产生冷凝水,引压管路中的介质会变为“气夹液”的混合状态,这种状态下引压管路的动态特性将会变得更为复杂,若采用传统的可压缩流体引压管路模型进行

分析误差较大。针对上述问题,本文在现有的研究基础上,分析得到气液混合状态下的引压管路传递函数,根据影响引压管路动态特性的核心因素,开展不同气液比、不同内径条件下的引压管路试验研究,得到复杂介质引压管路的动态特性。

1 数学模型及分析

设 h 和 g 为贝塞尔函数的自变量,则可压缩流体引压管路的传递函数 $G(s)$ 为^[15]

$$G(s) = \frac{1}{\cosh h \cdot \varphi(s) \cdot l + \psi(s) \cdot \sinh h \cdot \varphi(s) \cdot l} \quad (1)$$

式中: s 为传递函数自变量; l 为引压管路长度; $\psi(s)$ 和 $\varphi(s)$ 为计算函数,具体公式为

$$\psi(s) = \frac{V}{al} \varphi(s)l \quad (2)$$

$$\varphi(s) = \frac{s}{c_0} \sqrt{\frac{1 + 2(\gamma - 1)J_1(g)/[gJ_0(g)]}{1 - 2J_1(h)/[hJ_0(h)]}} \quad (3)$$

式中: V 为管路空腔体积, a 为管路面积, γ 为比热比, c_0 为声速, J_0 为零阶贝塞尔函数, J_1 为一阶贝塞尔函数。

h 和 g 的计算公式为

$$h = jr_0 \sqrt{\frac{s}{v_0}} \quad (4)$$

$$g = h \sqrt{P_r} \quad (5)$$

式中: r_0 为引压管路内径, P_r 为普朗特常数, j 为虚数单位, v_0 为粘度。

引压管路压力测量系统的带宽主要由引压管路自身的谐振频率决定,而谐振频率主要受引压管路长度和声速影响。在纯气体介质条件下,引压管路越长,其谐振频率越低,可使用的频带越窄。但在气液混合介质条件下,相关物理特性参数会发生改变。

可压流体管道模型的动量方程为

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = \mu_0 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (6)$$

式中: ρ_0 为平均密度, u 为轴向速度, t 为时间, p 为压力, x 为管路轴向坐标, μ_0 为流体粘度, r 为管路径向坐标。

连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) = 0 \quad (7)$$

式中： ρ 为流体密度， ν 为流体动力粘度。

能量方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + T(\gamma - 1) \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\nu_0}{P_r} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (8)$$

式中： T 为温度。

液体状态方程为

$$\frac{d\rho}{\rho_0} = \frac{dp}{E_a} \quad (9)$$

式中： E_a 为流体体积模量。

气体状态方程为

$$\frac{d\rho}{\rho_0} = \frac{dT}{T_0} = \frac{dp}{p_0} \quad (10)$$

式中： p_0 为初始压力。

将“气夹液”条件下的引压管路简化为两个不同介质引压管路的串联，则其传递函数的数学模型为

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \quad (11)$$

式中： $G_1(s)$ 为气体介质引压管路传递函数， $G_2(s)$ 为液体介质引压管路传递函数。

引压管路结构如图1所示。被测脉动压力从左侧传导进入引压管路，引压管路的左侧充满气体介质，右侧充满了水介质，引压管路系统的出口在最右端，与传感器相连。

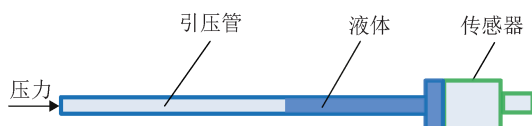


图1 引压管路结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of pipeline structure

引压管路内径为6.5 mm，长度为400 mm，分别针对纯气体、80%气体+20%液体、60%气体+40%液体、40%气体+60%液体4种工况条件下的引压管路特性进行计算，结果如图2所示。

从图2中可以看出，纯气体介质引压管路中充入液体介质后，其谐振点频率明显提高，且谐振点所对应的幅值增大，在一定频率范围内，引压管路中的二阶特性依旧明显。

通过上述分析可知，引压管路中添加液体后，其频谱特性会随着气体与液体比例的变化而发生改变。接下来，通过试验对传递函数的准确性进行研究。

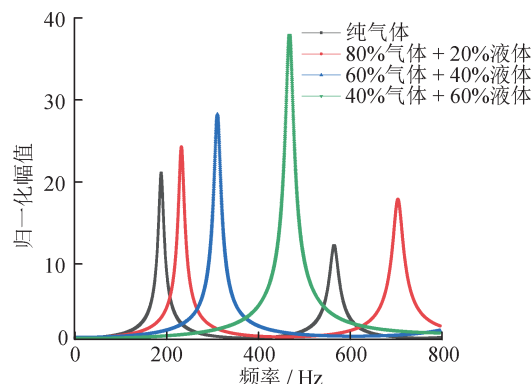


图2 不同气液比例的引压管路特性曲线

Fig.2 Characteristic curves of pipelines with media of different gas-liquid ratios

2 动态特性试验

2.1 试验总体设计及传感器动态性能测试

选取长度为400 mm的引压管路开展正弦动态压力试验，利用113B型压电式压力传感器进行测量。通过改变引压管路内径、介质状态、输入压力，分析不同频率(1~1 000 Hz)条件下传感器输出的变化。不同序号的引压管路对应的内径如表1所示，不同工况对应的介质状态如表2所示。

表1 引压管路内径数据

Tab.1 Internal diameter data of pressure pipelines

序号	引压管路内径/mm
1	4.0
2	5.5
3	6.5
4	8.0
5	11.0

表2 介质状态表

Tab.2 Medium conditions

工况	管路中介质
1	100% 气体
2	80% 气体 + 20% 液体
3	60% 气体 + 40% 液体
4	40% 气体 + 60% 液体
5	20% 气体 + 80% 液体

利用中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所的正弦压力校准装置进行试验,如图3所示。标准幅值和相位通过正弦逼近法获得。对传感器自身的动态性能开展测试,部分试验曲线如图4所示。测试结果表明:该传感器在试验频率段(1~1 000 Hz)内具有良好的动态特性,幅值灵敏度误差不超过2%,相移不超过2°,符合本试验的要求。



图3 正弦压力校准装置图

Fig.3 Diagram of Sine pressure calibration device

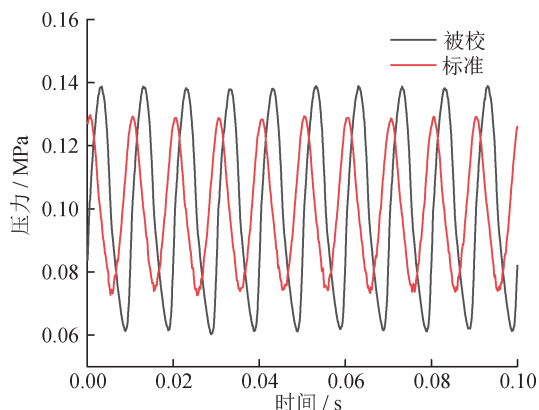


图4 部分试验曲线图

Fig.4 Partial test curve

2.2 气体介质试验

图5为相同引压管路在不同压力条件下的试验曲线图,试验结果表明:在空气介质条件下,引压管路长度与内径不变时,被测压力幅值对引压管路测量系统的谐振点影响并不大,但是对谐振点对应的幅值误差会产生一定影响。

在空气介质条件下,利用长度相同但管径不同的引压管路开展试验,结果如图6所示。随着管径的增大,引压管路的谐振点频率会逐渐增大,

并且谐振点对应的幅值误差也会增大,但是当内径增加到6.5 mm后,谐振点频率随着管径增大而增大的趋势不再明显。

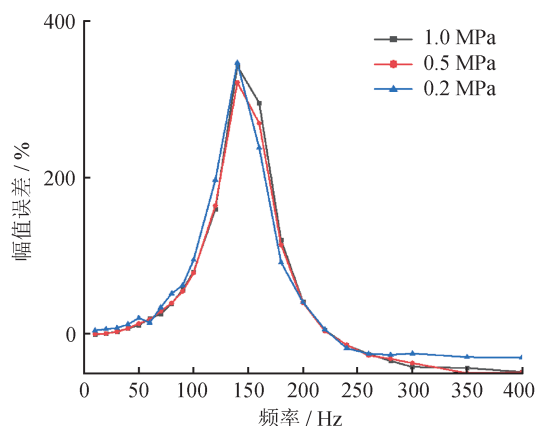


图5 相同引压管路在不同压力条件下的试验曲线图

Fig.5 Test curves of the same pressure pipeline under different pressure conditions

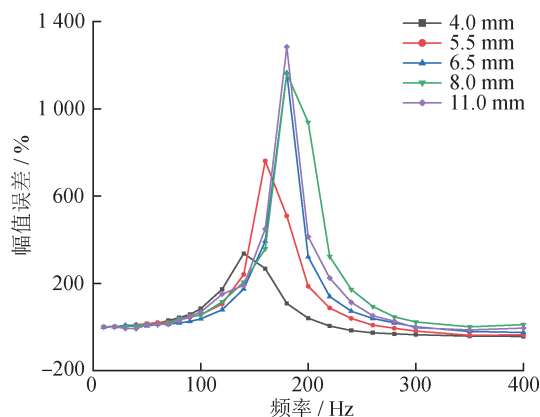


图6 不同内径的引压管路试验曲线图

Fig.6 Test curves of pressure pipelines with different inner diameters

2.3 气液混合介质试验

保持引压管路的长度与内径不变,利用不同比例的气液混合介质进行试验,取1.0、0.5、0.2 MPa三种条件下的试验数据平均值进行计算分析,结果如图7所示。随着引压管路中液体比例的提升,谐振点频率增大,并且谐振点对应的幅值误差也会增大,但是当液体比例达到60%及以上时,这种趋势不再明显。

利用长度相同但管径不同的引压管路进行不同介质条件下的试验,结果如图8所示。在管径增大且液体介质占比提高的情况下,谐振点频率提升的幅度不断增加。引压管路内径超过6.5 mm时,

液体占比大于50%条件下的谐振频率相较100%气体条件下的谐振频率提高了约1倍；引压管路中的液体占比达到80%时的谐振频率相较100%气体条件下的谐振频率提高了约2倍。

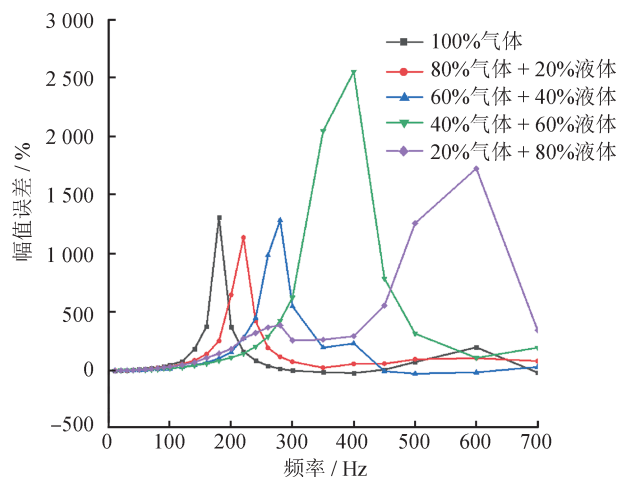


图7 不同介质条件下的引压管路特性图

Fig.7 Characteristic curves of pressure pipelines under different medium conditions

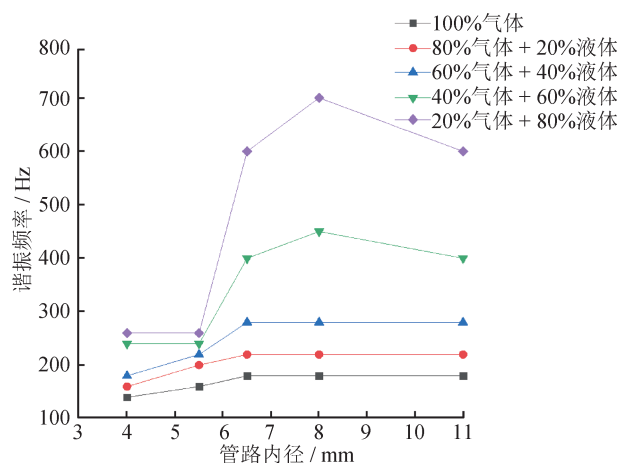


图8 不同介质条件下的谐振频率曲线图

Fig.8 Resonance frequency curves under different medium conditions

3 分析及讨论

当引压管路内径等于5.5 mm时，随着引压管路中液体介质占比的增加，谐振点频率提升较为缓慢；当引压管路内径大于6.5 mm时，引压管路中液体介质占比超过50%的条件下谐振点频率会明显升高，产生此现象的原因为：引压管路中气体介质与液体产生了气液两相流动，改变了介质

的相关属性，形成了一个高阶系统，导致压力波在引压管路中的传播特性发生变化。

通过比较数学模型与试验结果可以看出：当引压管路中充入液体之后，不同介质条件下的引压管路的动态特性变化趋势一致，谐振点频率均随着液体比例的增大而增大。不同工况下，同一引压管路的谐振点频率数据如表3所示。

表3 谐振点频率数据表

Tab.3 Resonant point frequency data

工况	理论分析结果 / Hz	试验结果 / Hz
1	187.8	180 ~ 200
2	231.9	220 ~ 240
3	310.4	280 ~ 300
4	467.4	400 ~ 450

注：表3中的工况与表2中的工况对应。

根据表3可以看出：在纯气体介质和液体比例较低的情况下，利用数学模型计算得到的谐振点频率与试验结果基本吻合；当液体比例超过40%后，试验结果略小于理论分析值。本数学模型适用于液体比例较低情况下的谐振点频率分析，当液体比例较高时，气液混合的状态会变得更加复杂，该模型只能作为近似参考使用。

4 结论

建立了气液混合条件下的引压管路传递函数模型，并利用长度为400 mm、内径不同的引压管路开展不同气液混合状态下的试验研究，得到不同工况下引压管路动态特性的变化特点。分析结果表明：在不降低引压管路长度的条件下，向引压管路中填充液体可以显著提高动态测量结果的准确性。研究成果对于扩大引压管路动态压力测量系统的频率带宽具有积极意义，为提升航空发动机压力测试准确性和可靠性提供了技术参考。未来需要探索其他引压管路结构、工况下引压管路动态特性的变化特点，进一步优化动态压力测量系统的性能，并提升其在不同场景中的适用性。

参考文献

- [1] LI B, YANG J, ZHANG Z J, et al. Static pressure and temperature adjustable sinusoidal pressure loading device

- [J]. Measurement: Sensors, 2021, 18. DOI: 10.1016/j.measen. 2021. 100065.
- [2] LI B, ZHANG Z J, YANG J. Effect of different environmental factors on dynamic characteristics of pressure transmission pipe[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(10): 2159–2165.
- [3] WANG C, WANG H, CAI J. Dynamic characteristics of semi - infinite pipelines in pressure measurement [C]// APISAT 2019: Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2019, 2326–2335.
- [4] CHEN F, ZONG Y H, LIU D J, 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.
- [5] 陈晓松, 李峰, 李天然. 噪声对阶跃信号上升时间测量不确定度的影响[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 107–114.
- CHEN X S, LI F, LI T R. The impact of noise on the measurement uncertainty of step signal rise time[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 107–114. (in Chinese)
- [6] YANG G R, PAN Z X, ZHANG Z H, et al. Mesoscopic transformation at initial corrosion stage of 20# steel in aqueous solution under gas-liquid two-phase stratified flow condition [J]. Anti - Corrosion Methods and Materials, 2021, 68(2): 53–63.
- [7] CHEN I Y, WONGWISES S, YANG B C, et al. Two-phase flow across small sudden expansions and contractions [J]. Heat Transfer Engineering, 2010, 31(4): 298–309.
- [8] ZHANG X, QIAO W, GAO Q, et al. Experimental study on the dynamic characteristics of gas-centered swirl coaxial injector under varying ambient pressure [J]. Aerospace, 2023, 10(3). DOI: 10.3390/aerospace10030257.
- [9] NDALILA P D, LI Y, LIU C, et al. Modeling dynamic pressure of gas pipeline with single and double leakage [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(9): 10804–10810.
- [10] QIANG H L, BI Z F, HE Z, et al. Simulation of dynamic pressure in fluctuating gathering and transporting pipelines for natural gas condensate[J]. Energy Chemical Industry, 2023, 44(4): 39–42.
- [11] 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. 中国航空学会, 2008: 173–178.
- YANG J, LI C, ZHANG B Y, et al. Analysis of the influence of medium on the frequency response of pressure measuring pipelines [C]// Academic Exchange Conference on Engine Testing and Testing Technology. Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2008: 173–178. (in Chinese)
- [12] SVETE A, KUTIN J. Experimental validation of an improved mathematical model for pneumatic pressure measurement systems with connecting tubes [J]. Measurement Science and Technology, 2019, 31(1). DOI: 10.1088/1361-6501/ab3d50.
- [13] KUTIN J, SVETE A. On the theory of the frequency response of gas and liquid pressure measurement systems with connecting tubes [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(12). DOI: 10.1088/1361-6501/aae884.
- [14] KUTIN J, SVETE A, BERMANEC L G. Towards an optimal frequency and time response of single-tube pressure measurement systems under continuum-flow conditions [J]. Sensors and Actuators A: Physica, 2024. DOI: 10.1016/j.sna. 2023. 114943.
- [15] 朱明武. 动压测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- ZHU M W. Dynamic pressure measurement[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 史博(1990—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为动态压力计量测试。