

基于电液类比原理的水导激光水压脉动 衰减器滤波特性

孟朝中¹ 杨帆^{1*} 余家欣¹ 王宇强²

1.西南科技大学制造科学与工程学院,绵阳,621010

2.中国民用航空总局第二研究所,成都,610041

摘要: 供液系统低频压力脉动(0~500 Hz)导致的水束不稳定是水导激光(WJGL)中急需解决的问题。设计了一种利用柔性衬里耦合振动及Herschel-Quincke管(HQ管)反相位相消原理实现双重滤波的水压脉动衰减器。采用一维解析法及电液类比原理建立传递矩阵模型,通过试验验证理论建模的可行性。通过仿真定量分析了HQ管结构参数、内插管长度、衬里弹性模量等关键参数对低频脉动抑制效果的影响机制。结果表明,聚氨酯衬里的减振能力随着其弹性模量的减小而增强,损耗角对传递损失具有负面影响;在一定条件下改变内插管长度对传递损失影响不大,而增大HQ管的长度和减小管径可以增强衰减效果。

关键词: 水导激光供液系统;低频压力脉动;电液类比法;传递矩阵声学模型

中图分类号: TH137

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Filtering Characteristics of WJGL Pulsation Attenuator Based on Electro-Hydraulic Analogy Principles

MENG Chaozhong¹ YANG Fan^{1*} YU Jiabin¹ WANG Yuqiang²

1.School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan, 621010

2.The Second Research Institute of CAAC, Chengdu, 610041

Abstract: In WJGL, the instability in water jet from low-frequency pressure pulsations (0~500 Hz) in fluid supply systems needed urgent resolution. A water pressure pulsation attenuator was designed using flexible liners for coupling vibrations and Herschel-Quincke tubes (HQ tubes) for phase cancellation, achieving dual filtering. A transfer matrix model was established based on one-dimensional analytical approach and electro-hydraulic analogy principle, and the feasibility was experimentally verified through prototype testing. The influence mechanism of key parameters, such as HQ tube structures, insert tube lengths, and liner elastic modulus on low-frequency pulsation attenuation were quantitative analyzed in simulations. The results show that the damping performance of polyurethane liners improves as their elastic modulus decreases, while the loss angle negatively affects transmission loss. Under certain conditions, changing the insert tube lengths has minimal impact on transmission loss (TL), but increasing the HQ tube lengths and reducing the diameter enhances attenuation.

Key words: water jet guided laser(WJGL) fluid supplying system; low frequency pressure pulsation; electro-hydraulic analogy method; transfer matrix acoustic model

0 引言

水导激光(water jet guided laser, WJGL)是一种采用微水射流引导激光到基材表面的精密加工技术,通过控制水射流的稳定直径可以使该技

术能够进行极小制造^[1]。随着我国在航空航天、通信、仪表和医疗等关键领域对超高精度表面和微米级功能结构需求的迅速增加,精密加工技术,尤其是WJGL精密加工技术,正日益成为创新驱动和产业升级的关键突破口和主攻方向^[2]。然而,WJGL精密加工的供液系统所泵出的水束具有高压和低流量的特点,这不仅容易引发水束光纤的不稳定,而且很难有效抑制^[3]。特别是在国产航空涡轮发动机叶片的气膜孔等微米级孔、槽

收稿日期:2024-06-18

基金项目:四川省科技计划(2023NSFSC0860);四川省科技厅自然科学基金创新研究群体项目(24NSFTD0019);教育部产学研合作协同育人项目(22107118134157);西南科技大学研究生创新基金(25ycx2046)

结构加工中,随着加工质量和精度的不断提高,水束光纤在低频(0~1000Hz)范围内的压力脉动问题变得更加突出,严重威胁到加工的精度和稳定性。因此,突破制约发展的瓶颈,着力攻克低频压力脉动抑制的关键核心技术,实现WJGL关键装备的自主研发,这不仅是我国激光制造领域在“十四五”期间的重点支持方向,也是推动重大技术装备攻关工程的重要一环^[4]。

杨帆等^[5]研究发现扩张室压力脉动衰减器传递损失(TL)曲线具有周期性的波谷,针对其频带内的滤波特性,将进口管和出口管分别内插于扩张室腔体中,当其长度分别为腔体长度的1/2和1/4时,所组成的双调谐内插管扩张室(DTETC)具有较低的频带衰减,且该结构在气体消声系统中有广泛的应用。同时,研究表明低模量的聚氨酯在衰减器中作柔性衬里结构能够大大提高衰减器的宽频降噪性能。

SIQUEIRA MAZZARO 等^[6]将HQ管(Herschel-Quincke tube)应用于内燃机的进气系统,并进行了试验和数值评估,发现HQ管可以降低进气阀端口处的压力幅度,增加了气流速度和进气质量流量。随后,AHMADIAN 等^[7]以HQ管的传递损失为目标,开发了一种遗传算法,并对HQ管的分析模型进行了局部和全局敏感性分析,发现旁支管的长度以及不同参数的面积比是影响传递损失的关键因素。PAPATHANASIOU 等^[8]提出了引入了具有变化速度剖面的平行分支的MHQ管(the modulated Herschel-Quincke tube),相比之下,传统的HQ管只能产生窄带传输损耗,MHQ管的设计参数更多,因此在实现增强反射时更加灵活,而不需要使用长度较长的分支。齐成婧等^[9]对HQ管的结构参数影响进行了研究。

KIM 等^[10]提出了一个虚拟HQ管系统,将等截面直管道分成两个具有不同的壁处理的平行管道,形成一种声学超材料壁,对声波在分散管道中的传播进行建模,并提出了虚拟总部管的衰减条件,研究发现虚拟HQ管能实现宽带和低频声音衰减。杨帆等^[11]首次将HQ管与扩张室用作复合型液压脉动衰减器,并对其声学性能进行了研究。姚静等^[12]将带柔性衬里的亥姆霍兹脉动衰减结构与HQ管进行结合,并对其滤波特性进行研究。

综上所述,扩张室型脉动衰减器普遍使用于液压系统中500~1000 Hz的压力脉动衰减。干涉型压力脉动衰减结构因其工作原理特性,工作

频段较窄,并不适合于0~500 Hz的脉动衰减。为此,本文提出一种集成HQ管的复合式水压脉动衰减器,利用数值仿真探究0~500 Hz衰减器的HQ管结构参数、内插管长度、衬里弹性模量等关键参数对其传递损失曲线造成的不同影响。

1 理论基础与频带确定

1.1 一维解析法与理论验证

在分析压力脉动衰减器的声学性能时,当噪声频率低于压力脉动衰减器的平面波截止频率时,内部主要传播平面波,因此可以运用平面波理论。应用平面波理论研究压力脉动衰减器的传递损失时,需依据以下假设,结合介质特性进行分析^[11]。

1)层流条件。管道内的液体假设为层流流动,并且没有切向速度分量。

2)小幅度扰动。在相对环境状态下,压力脉动被视为小幅度扰动,马赫数较低,因此忽略了平均分量的影响,同时相对于平均密度,密度变化较小。

3)管道长度。管道应足够长,以至于管道两端的影响可以忽略。

4)管道半径与波长。管道半径应小于流体流动的波长,这样管道横截面上的压力可以被认为是均匀的,径向速度也被假设为零。

对于等截面管道,根据以上四点假设,可将脉动压力 p 和质点振速 u 表示成

$$p(x) = p^+ e^{-jkr} + p^- e^{jkr} \quad (1)$$

$$\rho_0 c u(x) = p^+ e^{-jkr} - p^- e^{jkr} \quad (2)$$

式中: p 为脉动压力; j 为虚部单位; k 为波数; ρ_0 为液体密度; c 为声速;上标“+”与“-”代表波的传播方向。

对于长度为 L 的等截面管道,利用式(1)、式(2)计算出DTETC的数学模型,并利用数值分析软件求解0~2000 Hz的理论曲线,将其与试验值进行对比,如图1所示。

由图1可知,一维解析法理论计算结果和试

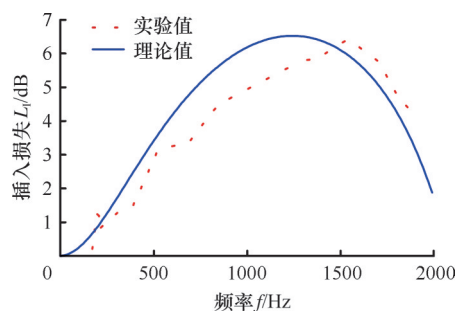


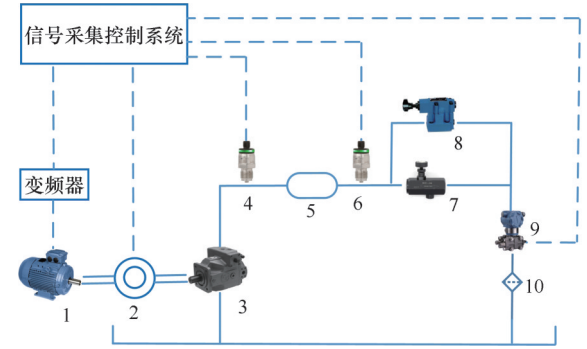
图1 DTETC理论插入损失与试验测量比较^[11]

Fig.1 Comparison of DTETC theoretical insertion loss with experimental measurements^[11]

验测量值在 0~2000 Hz 频段范围内吻合较好,从而证明了理论建模的可行性。

1.2 水导激光低频脉动研究频带确定

WJGL 供水系统测试平台如图 2 所示,采用西门子 3 kW 变频电机驱动 HAWK 高压泵 PX1150;传感器采用西安微正电子科技有限公司 CYY28 型脉动压力传感器,频响约 10 kHz;压力传感器用于采集监测点处的压力信号并传输至数据采集系统,之后经快速傅里叶变换得到各频率的压力脉动值。



1. 变频电机 2. 转速仪 3. 柱塞泵 4,6. 压力传感器
5. 脉动衰减器 7. 节流阀 8. 溢流阀 9. 流量计 10. 过滤器
图 2 水压脉动衰减器测试平台原理图

Fig.2 Schematic diagram of hydraulic pulsation attenuator test platform

进行测试的试验参数条件分别为水泵压力 30 MPa,测试电机转速 240 r/min,管道中水流量 25 mL/min。变频调速电机驱动柱塞泵以产生流量脉动,作为测试系统的脉动源。通过调整变频调速电机的转速,可以改变柱塞泵输出的脉动压力频率。利用图 3 所示的 WJGL 供水系统测试平台进行压力脉动测量试验,测出的数据经过傅里叶变换后得到图 4a 所示的频域图。

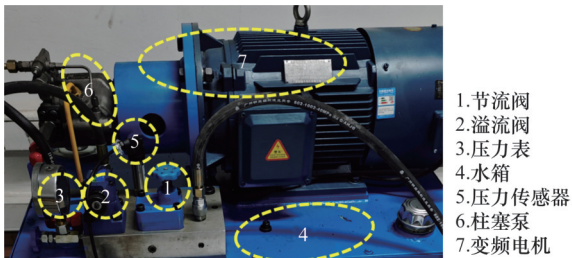
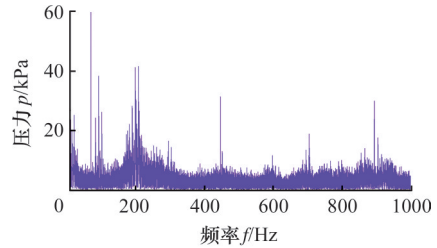


图 3 水压脉动测试部分试验平台

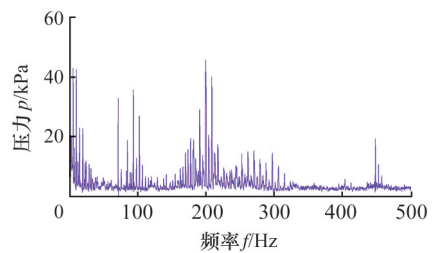
Fig.3 Hydraulic pulsation test section test rig

由图 4a 可知,在 0~1000 Hz 的频带范围内,WJGL 供水系统主要的压力脉动集中于 0~500 Hz,且该频域图噪声过多,因此采用 MATLAB 中 FIR 滤波器对该频域图进行滤波,得到图 4b 所示的 0~500 Hz 频带范围内的频率图。由图 4b 可知,水导激光供水系统泵出液体在 0~500 Hz 频

带范围内具有周期性脉动的问题,若将 DTETC 应用于水导激光低频工况,会存在着体积大、质量大、工作频率窄等缺陷。供水系统急需一款能针对 0~500 Hz 的复合式液压脉动衰减器进行宽频减振降噪。



(a) 未滤波的脉动频域图



(b) 滤波后的脉动频域图

图 4 水压脉动测试结果

Fig.4 Hydraulic pulsation test result

2 复合式脉动衰减器理论建模

本文针对水导激光供水系统的低频脉动,提出了一种基于柔性衬里结构和 HQ 管并联组成的复合型压力脉动衰减结构,如图 5 所示。利用柔性衬里及压力波的相位相错振幅相消进行双重滤波,在保证宽频衰减压力脉动的基础上有效控制压力脉动衰减结构的体积。

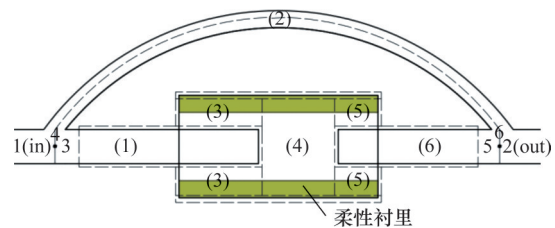


图 5 复合式脉动衰减器声学单元划分

Fig.5 Composite pulsation attenuator acoustic unit division

图 5 中,1(in)、2(out)代表压力脉动波的进出口,(1)~(6)代表划分的声学单元。该脉动衰减器的 3、4、5 声学单元是柔性衬里部分,利用电液类比原理将其等效为图 6 所示的等效电路模型。图 6 中, R_1 为管路动态流阻; C_1 、 C_2 、 C_3 为扩张室内部的 3、4、5 单元的等效流容, L_1 、 L_3 为扩张室内部的 3、5 单元的等效电感。

其中 3、4、5 单元的特征阻抗 Z_3 、 Z_4 、 Z_5 的计算

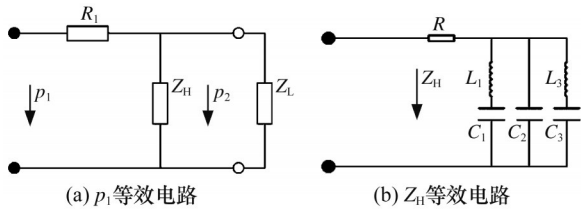


图6 柔性衬里部分等效电路模型

Fig.6 Equivalent circuit model of flexible liner

公式如下^[12-13]:

$$Z_3 = j(\omega_0 L_1 - 1/\omega_0 C_1) \quad (3)$$

$$Z_4 = -j(1/\omega_0 C_2) \quad (4)$$

$$Z_5 = j(\omega_0 L_3 - 1/\omega_0 C_3) \quad (5)$$

式中: ω_0 为角频率。

由图5可知,在两个分叉点处的脉动压力和质量速度连续性条件为

$$p_1 = p_3 = p_5 \quad (6)$$

$$\rho_0 S_1 u_1 = \rho_0 S_1 u_3 + \rho_0 S_2 u_5 \quad (7)$$

$$p_4 = p_6 = p_2 \quad (8)$$

$$\rho_0 S_6 u_4 + \rho_0 S_2 u_6 = \rho_0 S_6 u_2 \quad (9)$$

式中: $S_1 \sim S_6$ 为相应管道横截面积; $p_1 \sim p_6$ 为相应管道脉动压力; $u_1 \sim u_6$ 为相应管道处质点振速。

对于带柔性衬里的内插管扩张室管道,存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} p_3 \\ \rho_0 S_1 u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kl_1) & jY_1 \sin(kl_1) \\ \frac{j}{Y_1} \sin(kl_1) & \cos(kl_1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_5 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(kl_6) & jY_6 \sin(kl_6) \\ \frac{j}{Y_6} \sin(kl_6) & \cos(kl_6) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_4 \\ \rho_0 S_6 u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_4 \\ \rho_0 S_6 u_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

对于带旁支HQ管道,存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} p_5 \\ \rho_0 S_2 u_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kl_2) & jY_2 \sin(kl_2) \\ \frac{j}{Y_2} \sin(kl_2) & \cos(kl_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_6 \\ \rho_0 S_2 u_6 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} p_5 \\ \rho_0 S_2 u_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_6 \\ \rho_0 S_2 u_6 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: Y_1, Y_6 为相应声学单元的特征阻抗; $l_1 \sim l_6$ 为管道的实际长度。

将式(6)~式(9)分别代入式(10)、式(12)后求解得

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ \rho_0 S_1 u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ \rho_0 S_6 u_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$T_{11} = \frac{(A + \alpha)\beta}{B + \beta} \quad (14)$$

$$T_{12} = \frac{B\beta}{B + \beta} \quad (15)$$

$$T_{21} = C + \gamma - \frac{DA}{B} - \frac{\eta\alpha}{\beta} + \frac{(A + \alpha)(D\beta + \eta B)}{B^2 + B\beta} \quad (16)$$

$$T_{22} = \frac{D\beta + \eta B}{B + \beta} \quad (17)$$

将式(14)~式(17)代入下式得到传递损失:

$$L_{TL} = 20 \lg \left(\frac{1}{2} \left| T_{11} + \frac{T_{12}}{Z_0} + Z_0 T_{21} + T_{22} \right| \right) \quad (18)$$

式中: Z_0 为进出口管道的特征阻抗,此处假设进出口管参数相同。

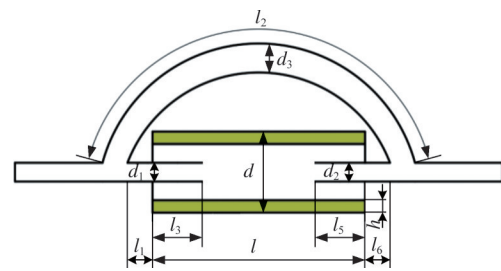
3 参数化分析与讨论

参数设置如表1所示。图7为复合式脉动衰减器结构示意图。

表1 参数设置

Tab.1 parameter setting

类别	参数	数值
水参数	运动黏度/($m^2 \cdot s^{-1}$)	1.01×10^{-6}
	密度 ρ /($kg \cdot m^{-3}$)	890
	体积弹性模量/GPa	2.18
	动力黏度/($Pa \cdot m$)	46
弹性模量参数	不锈钢的弹性模量/GPa	200
	聚氨酯储能弹性模量/MPa	15.97
管道参数	橡胶厚度/mm	30
	内插管直径/mm	38
	内插管1长度/mm	78
	内插管2长度/mm	39
	扩张室直径/mm	90
	扩张室长度/mm	175
	HQ管长度/mm	600
HQ管直径/mm	20	



($l=175 \text{ mm}, d_1=d_2=15 \text{ mm}, d=90 \text{ mm}, h=15 \text{ mm}, l_3=70 \text{ mm}, l_5=35 \text{ mm}$)

图7 复合式脉动衰减器结构示意图

Fig.7 Schematic structure of a composite pulsation attenuator

3.1 HQ管结构参数对传递损失的影响

在1.2节中,由图4观察到水导激光供液系统在100 Hz、200 Hz、450 Hz的频带上出现了明显的压力脉动。本节将探讨在固定HQ管的长度与直径的条件下,这3个特定频率下的HQ管结构参数如何影响压力脉动的衰减。

从图8中可以看出,HQ管的直径增大确实会

导致传递损失降低,特别是在 100 Hz、200 Hz 和 450 Hz 这 3 个频率点上。当 HQ 管的长度为 14 mm、直径为 800 mm 时,各频率的传递损失能达到较高的数值(32.39 dB、52.74 dB 和 53.76 dB),显示了直径对传递损失的显著影响。增大 HQ 管的直径,相对减小了流体在辅助管路中的阻力,从而减弱了由柔性衬里带来的衰减效果,导致整体压力脉动衰减降低。

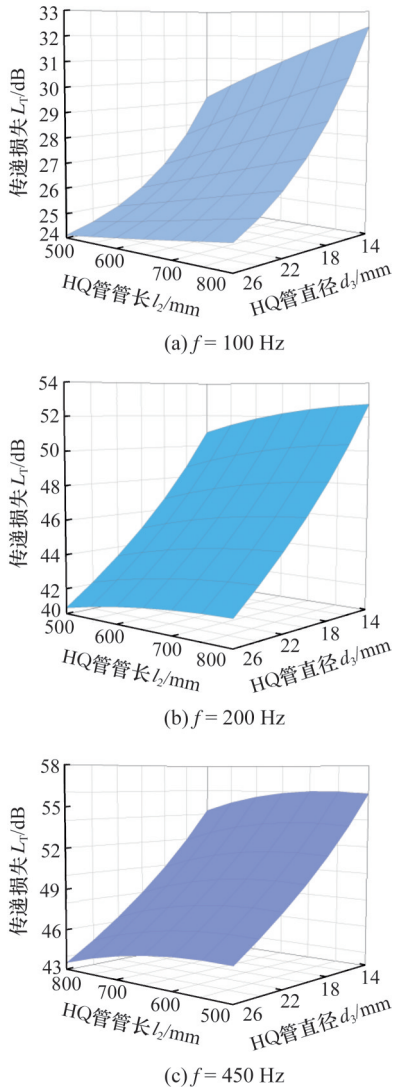


图 8 HQ 管结构参数对脉动衰减器传递损失的影响
Fig.8 Influence of HQ tube structural parameters on the transmission loss of pulsation attenuators

由图 9 可知,在 0~500 Hz 范围内,HQ 管管长的增大会增大衰减器的传递损失,且在 100~400 Hz 的频带内效果较为明显,因此在水导激光工程应用中,要尽可能地在尺寸限制下增大 HQ 管管长。

3.2 内插管长度对传递损失的影响

内插进口管长度 l_3 的边界条件为

$$70 \text{ mm} \leq l_3 \leq 100 \text{ mm} \quad (19)$$

储能体积模量 $\beta'_L = 15.97 \text{ MPa}$, 损耗角正切

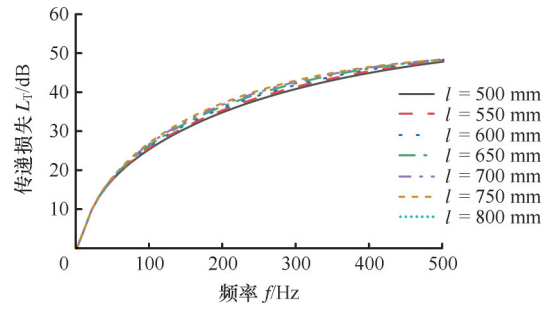


图 9 HQ 管管长对脉动衰减器传递损失的影响
Fig.9 The effect of HQ tube length on transmission loss of hydraulic pulsation attenuators

$\tan \delta = 0$ 。将式(19)代入式(18)后求得内插管长度对传递损失的影响,如图 10 所示。图 10 表明,在 0~500 Hz 的频带内,内插管长度对应的传递损失会随着频率的增大而增大;而在 0~500 Hz 的频带内, l_3 从 70 mm 增至 100 mm 所对应的传递损失值不会改变。这说明本文提出的脉动衰减器中,3、5 单元为一个关键组件,其功能类似于电感器,通过存储流体能量在柔性衬里结构中,并对压力脉动的变化产生抵抗,来减小系统的振动和噪声。改变内插管长度实际上是在调整流体在管道内单元中的体积,但这种体积变化对衬里的总体容性影响较小。因为衬里的容性主要由其物理和化学结构决定,而这些属性不会因为液体体积的简单改变而产生大的变动。

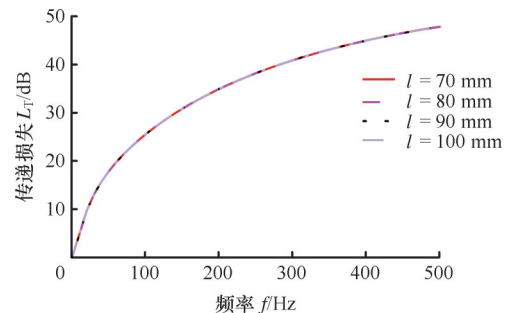


图 10 内插管长度对脉动衰减器传递损失的影响
Fig. 10 The effect of endtube length on transmission loss of pulsatile attenuators

3.3 弹性模量对传递损失的影响

通过在式(7)中分别代入 $\beta'_L = 1.597 \text{ MPa}$ 、 15.97 MPa 和 159.7 MPa ,可以发现柔性衬里的储能体积模量与脉动衰减器的传递损失之间存在明显的关联,如图 11 所示。由图可知,随着柔性衬里的储能体积模量从 1.597 MPa 增至 159.7 MPa ,传递损失从 61.27 dB 降至 22.16 dB 。可以看出,储能体积模量每降低一个数量级,传递损失平均增大 20 dB 。说明衰减器单元 3、4、5 的柔性衬里储能体积模量变化显著影响其等效电容,并对传

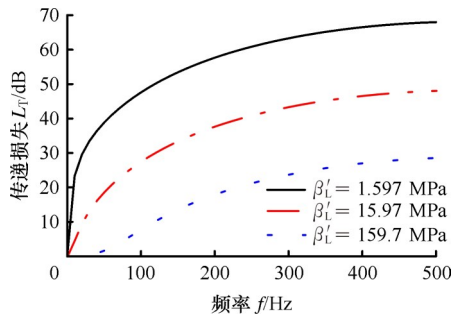


图11 储能体积模量对脉动衰减器传递损失的影响

Fig.11 The effect of storage bulk modulus on transmission loss of pulsation attenuators

递损失有重要影响。

3.4 正切损耗角对传递损失的影响

分别取 $\tan \delta = 0.2, 0.4, 0.6$ 代入式(9), 代入模型公式后求得储能体积模量为 15.97 MPa 下的损耗正切角的影响, 如图 12 所示。图 12 表明, 在 0~500 Hz 的频带内, $\tan \delta = 0.2, 0.4, 0.6$ 对应的传递损失会随着频率的增大而增大; 而在某一固定频率(以 200 Hz 为例)下, $\tan \delta$ 从 0.2 增至 0.6 所对应的传递损失值从 37.53 dB 减至 36.44 dB。这说明损耗角的增大加剧了介质内部的能量损耗, 降低了脉动波的传递效率。

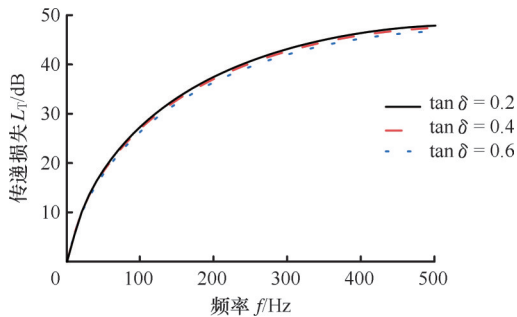


图12 正切损耗角对脉动衰减器传递损失的影响

Fig.12 The effect of tangent loss angle on transmission loss of pulsation attenuators

4 结论

本文探讨了一种集成 HQ 管的复合式水压脉动衰减器的关键参数对传递损失的影响, 主要结论如下:

1) 聚氨酯衬里的减振能力随着其弹性模量的降低而增强, 当储能体积模量从 159.7 MPa 降至 1.597 MPa 时, 传递损失显著增大, 每降低一个数量级, 传递损失增大 20 dB。

2) 损耗角正切值的增大使传递损失减小, 说明损耗角的增大加剧了介质内部的能量损耗, 降低了脉动波的传递效率, 进一步揭示了损耗角对传递损失的负面影响。

3) 内插管长度对传递损失影响不大, 因为衬里的容性主导了减振效果。衬里的容性由其弹性模量决定, 而非流体体积变化。

4) HQ 管的优化表明, 增加 HQ 管的长度和减小管径可以显著增强衰减效果。较小的管径提高了 HQ 管的阻力, 使流体更多地通过柔性衬里结构, 从而增强了衬里对低频脉动的衰减作用。

参考文献:

- [1] LI Honglu, FANG Xinming, ZHU Zijian, et al. The Approach of Nanoscale Vision-based Measurement via Diamond-machined Surface Topography [J]. Measurement, 2023, 214:112814.
- [2] HAN Junhong, CHEN Yanbing, WANG Jianpeng, et al. A Review of Molecular Dynamics Simulation in Studying Surface Generation Mechanism in Ultra-precision Cutting [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122 (3):1195-1231.
- [3] MARIMUTHU S, SMITH B. Water-jet Guided Laser Drilling of Thermal Barrier Coated Aerospace Alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113 (1): 177-191.
- [4] 王水旺, 丁焯, 程柏, 等. 水导激光微加工机理与研究进展 [J]. 中国激光, 2022, 49(10):1002404. WANG Shuiwang, DING Ye, CHENG Bai, et al. Mechanism and Research Advances of Water-jet Guided Laser Micromachining [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10):1002404.
- [5] 杨帆, 邓斌, 王宇强, 等. 具有柔性衬里的压力脉动衰减器滤波特性 [J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(1):154-159. YANG Fan, DENG Bin, WANG Yuqiang, et al. Filtering Characteristics of Hydraulic Suppressor with Compressible Liner [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(1):154-159.
- [6] SIQUEIRA MAZZARO R, de MORAIS HANRIOT S, JORGE AMORIM R, et al. Numerical Analysis of the Air Flow in Internal Combustion Engine Intake Ducts Using Herschel-Quincke Tubes [J]. Applied Acoustics, 2020, 165:107310.
- [7] AHMADIAN H, NAJAFI G, GHOBADIAN B, et al. Analytical and Numerical Modeling, Sensitivity Analysis, and Multi-objective Optimization of the Acoustic Performance of the Herschel-quincke Tube [J]. Applied Acoustics, 2021, 180:108096.
- [8] PAPATHANASIOU T K, TSOLAKIS E, SPITAS V, et al. The Herschel-Quincke Tube with

- Modulated Branches[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2022, 380(2237):20220074.
- [9] 齐成婧, 毛崎波. 多分支HQ管模型的传声损失分析[J]. 声学技术, 2020, 39(2):224-229.
- QI Chengjing, MAO Qibo. Analysis of the Acoustic Transmission Loss of Multi-branch HQ Tube Structure [J]. Technical Acoustics, 2020, 39(2): 224-229.
- [10] KIM D Y, IH J G, ÅBOM M. Virtual Herschel-Quincke Tube Using the Multiple Small Resonators and Acoustic Metamaterials[J]. Journal of Sound Vibration, 2020, 466:115045.
- [11] 杨帆, 邓斌. 一种集成Herschel-Quincke管的双调谐内插管扩张室液压脉动衰减器的设计与分析[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(8):34-40.
- YANG Fan, DENG Bin. Design and Analysis of a Double-tuned Extended-tube Expansion Chamber Hydraulic Noise Suppressor Integrated a Herschel-Quincke Tube[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2019, 39(8):34-40.
- [12] 姚静, 张昊, 宋英哲, 等. 面向数字阀组压力脉动的复合被动稳压结构设计[J]. 机械工程学报, 2025;61(8):344-351.
- YAO Jing, ZHANG Hao, SONG Yingzhe, et al. Composite Passive Stabilizer Structure Design for Pressure Pulsation of Digital Valve Package [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025; 61(8): 344-351.
- [13] MAREK K A, EARNHART N E, CUNEFARE K A. Model and Analysis of a Cylindrical In-line Hydraulic Suppressor with a Solid Compressible Liner [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(24):6312-6331.
- (编辑 王旻玥)
-
- 作者简介:**孟朝中,男,2001年生,硕士研究生。研究方向为脉动衰减声学理论与设计。E-mail:chaozhongmeng554@163.com。
- 杨帆(通信作者),男,1990年生,讲师。研究方向为流体动力装备振动噪声控制。E-mail:yyff90@foxmail.com。
- 本文引用格式:**
- 孟朝中,杨帆,余家欣,等. 基于电液类比原理的水导激光水压脉动衰减器滤波特性[J]. 中国机械工程,2025,36(9):1961-1967.
- MENG Chaozhong, YANG Fan, YU Jiaxin, et al. Filtering Characteristics of WJGL Pulsation Attenuator Based on Electro-Hydraulic Analogy Principles[J]. China Mechanical Engineering, 2025,36(9):1961-1967.
-
- (上接第1960页)
- [11] CHENG Shili, JI Ping. Geometric Algebra Approach to Analyzing the Singularity of Six-DOF Parallel Mechanism[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2019, 13(4):JAMDSM0076.
- [12] YANG Tingli, LIU Anxin, SHEN Huiping, et al. On the Correctness and Strictness of the Position and Orientation Characteristic Equation for Topological Structure Design of Robot Mechanisms[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2013, 5(2):021009.
- [13] 沈惠平, 朱小蓉, 尹洪波, 等. 并联机构的结构降耦原理及其设计方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(23):102-113.
- SHEN Huiping, ZHU Xiaorong, YIN Hongbo, et al. Principle and Design Method for Structure Coupling-reducing of Parallel Mechanisms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(23): 102-113.
- [14] MA O, ANGELES J. Architecture Singularities of Platform Manipulators [C] //Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Sacramento, 1991:1542-1547.
- [15] HUNT K H. Structural Kinematics of In-parallel-Actuated Robot-arms [J]. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 1983, 105(4):705-712.
- [16] FICHTER E F. A Stewart-platform Based Manipulator: General Theory and Practical Construction [J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(2):157-182.
- (编辑 王旻玥)
-
- 作者简介:**黄宁宁,男,1999年生,硕士研究生。研究方向为并联机器人机构学。E-mail:huangningning1819@163.com。
- 尤晶晶*(通信作者),男,1985年生,博士、副教授。研究方向为并联机器人机构学。E-mail:youjingjing251010@njfu.edu.cn。
- 本文引用格式:**
- 黄宁宁,尤晶晶,叶鹏达,等. 一种运动可解耦的Stewart型并联机构的正运动学及奇异性[J]. 中国机械工程,2025,36(9):1951-1960.
- HUANG Ningning, YOU Jingjing, YE Pengda, et al. Forward Kinematics and Singularity of Kinematically Decoupled Stewart-type Parallel Mechanisms[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(9):1951-1960.