

文章编号: 1006-1355(2014)03-0195-03

# 双级膨胀腔消声器声学与阻力特性的CFD仿真分析

苏胜利, 汪利, 卢兆刚, 鲁民月

(武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430064)

**摘要:** 使用二维轴对称时域CFD法计算双级膨胀腔消声器在无流和有流条件下的声衰减性能, 并与实测结果进行比较。由于时域方法在计算中可以考虑复杂气流流动和介质粘性的影响, 因而可以比较准确地预测双级膨胀腔消声器的传递损失。基于定常流动模型, 使用Fluent软件预测双级膨胀腔消声器的压力损失, CFD计算结果与实验测量结果吻合良好。

**关键词:** 声学; 抗性消声器; 传递损失; 压力损失; CFD; 数值模拟

中图分类号: TB535<sup>\*</sup>.2

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2014.03.041

## Simulative Analysis of Acoustic Attenuation and Flow Resistance Characteristics of a Double Expansion Chamber Silencer Using CFD Approach

*SU Sheng-li, WANG Li, LU Zhao-gan, LU Min-yue*

(Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** The axisymmetric time-domain CFD method is employed to calculate the acoustic attenuation performance of a double expansion chamber silencer without and with air flow. The prediction results are compared with the experimental measurement data. Since the influences of complex gas flow and viscosity on the sound propagation and attenuation inside the silencer are included in the time-domain CFD simulation, the time-domain CFD method can accurately predict the transmission loss of the double expansion chamber silencer. Finally, the pressure drops of the double expansion chamber silencer are calculated by means of Fluent code based on the steady flow model. The CFD predictions are found to agree well with the experimental results.

**Key words:** acoustics; reactive silencer; transmission loss; pressure loss; CFD; numerical simulation

双级膨胀腔消声器在平面波范围内具有较少的通带数量和更高的声衰减, 因而广泛用于降低大功率内燃机的排气噪声。Selamet<sup>[1]</sup>等使用基于模态匹配技术的二维轴对称解析方法计算了双级膨胀腔消声器的传递损失, 解析方法计算结果与有限元法计算结果、实验测量结果吻合较好。此外, 还研究了消声器内部结构对声衰减性能的影响。文献[2]、[3]使用三维数值方法分别预测了单腔、多腔抗性消声器的声衰减性能, 并且讨论了消声器结构对其声学性能的影响。然而, 以上研究都是在静态介质条件下进行的, 没有考虑气体流动的影响。为此, 本文使用时域CFD方法研究双级膨胀腔消声器在无流和有

流条件下的消声特性。

Middelberg等<sup>[4]</sup>应用二维轴对称时域方法计算了无流时单、双级膨胀腔消声器的传递损失, 其预测结果与文献中发表的实验数据基本吻合。Broatch等<sup>[5]</sup>提出了一种基于CFD模拟脉冲测试技术的三维时域方法, 计算了简单膨胀腔和回流消声器的传递损失。无流情况下, 两种结构消声器传递损失的时域法计算结果与实验结果、有限元法计算结果吻合较好。然而有流时( $M=0.07$ )回流消声器传递损失的时域法计算结果没有得到验证。通过对文献[5]中的时域方法进行改进, 徐航手等<sup>[6,7]</sup>发展了一种新的三维时域CFD方法, 只需要进行一次数值计算即可求出消声器的传递损失。并且应用该时域方法预测了外插进出口管膨胀腔、全穿孔和部分穿孔的直通穿孔管消声器和共振器的传递损失。静态介质中, 时域法的计算结果与实验结果、有限元法计算结果

收稿日期: 2013-07-26

作者简介: 苏胜利(1983-), 男, 浙江温州人, 工程师。主要研究方向为舰船动力装置振动噪声控制。

E-mail: sushenli@163.com

吻合较好。有气流流动时,三维时域法的计算精度不够理想。文献[8]使用三维CFD时域方法计算了某复杂腔体的四极子矩阵,并结合管道末端声学边界计算了静态介质中该腔体的消声量,时域法结果与实验测量结果吻合较好。此外,使用该方法讨论了均匀流对该腔体声学性能的影响。

本文的主要目的是应用时域CFD方法研究双级膨胀腔消声器在静态和流动介质中的声衰减性能,并与实验测量结果进行比较以验证该方法的计算精度。同时基于CFD理论,使用Fluent软件预测双级膨胀腔消声器的阻力损失,并与实验结果进行比较。

## 1 时域法计算原理

时域CFD法的计算模型如图1所示,消声器内介质为静态时传递损失计算的总体过程为:首先在消声器两端接很长的直管,并在上下游管道适当位置布置两个压力监视点;接着在上游管道的进口处施加持续时间很短的脉冲信号,通过非定常计算获得两个监视点处压力的时域变化历程;然后去除上下游压力监视点中由于反射带来的干扰信号,得到单独的入射和透射声压信号;最后通过快速傅里叶变换得到入射和透射声压频谱,进而计算出消声器的传递损失。经过多次尝试计算后发现为了得到合理的结果,进出口管道长度应大于消声器长度的15倍。上下游压力监视点位置的选择是根据Singh和Katra<sup>[9]</sup>提出的方法确定的。

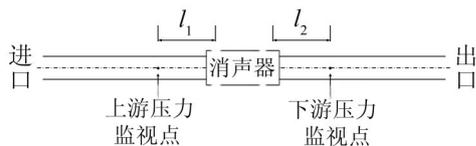


图1 消声器传递损失计算模型

采用时域CFD法计算介质为流动状态下消声器的传递损失时,施加脉冲信号后上下游监测点记录的数值是包含声信号的流场压力值。为此,需要在不施加脉冲信号的条件对该模型重新计算,并在相同的位置设置压力监视点,记录压力随时间的变化历程。同一监测点两次非定常计算的时域压力值相减之后,就可以得到该监测点处的脉冲信号及其反射信号。接着采用相同的信号处理方法,就可以得到流动介质中消声器的传递损失。

使用Fluent软件作为计算工具,工作介质为空气,密度满足理想气体定律。进口边界条件为质量流量进口,将脉冲信号叠加在恒定的质量流量基础上。出口边界设定为压力出口,出口压力为一个标准大气压。壁面处设置为绝热无滑移边界条件。

为了减少计算时间,考虑到双级膨胀腔消声器结构的对称特性,本文将采用二维轴对称结构计算消声器的声学性能。使用边长 $\Delta x=10\text{ mm}$ 的四边形网格离散模型,根据CFL条件得到时间步长为 $\Delta t=25\text{ }\mu\text{s}$ ,对应的采样频率为 $f_s=40\text{ 000 Hz}$ ,远大于脉冲信号中最高频率的2倍,为此满足采样定律。

## 2 结果与分析

### 2.1 声学性能

双级膨胀腔消声器的结构和尺寸如图2所示。图3比较了介质为静态时消声器传递损失的时域法计算结果和实验测量结果<sup>[10]</sup>。由图可知,频率在100~600 Hz范围内,时域法计算结果与实验结果吻合较好。频率在100 Hz以下,由于声波波长远大于消声器上游或下游两个传感器之间的间距,使得两个传感器之间测得的声压信号比较相似,造成传递损失有较大误差。

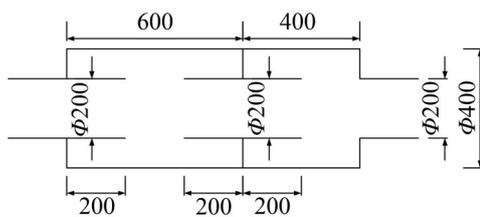


图2 双级膨胀腔消声器结构及尺寸 (单位:mm)

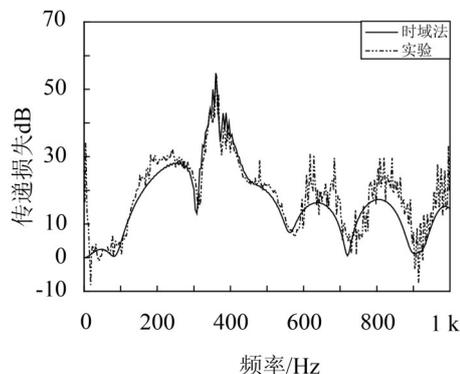


图3 传递损失结果比较( $v=0\text{ m/s}$ ,  $T=313\text{ K}$ )

图4为流速 $v=18.3\text{ m/s}$ ,温度 $T=323\text{ K}$ 时,消声器传递损失的时域法和实验<sup>[9]</sup>结果比较。由图4可知,在所考虑的频率范围内时域法计算结果和实验结果整体吻合较好。频率在80 Hz左右,时域法得到的传递损失出现负值,这是因为在计算中气流流动产生的流噪声所致。在有流状态下测量消声器的传递损失时,对采集的声压信号进行指数平均1 000次,用于消除信号中的噪声成分。而本文出于对计算时间的考虑,在模拟计算时没有对压力监测点处记录的信号进行平均处理。实验中气流流过消声器时可能会产生气流再生噪声,提高背景噪声的声压

级,降低信噪比以及气流流动引起管壁振动产生的伪声信号都会影响测量结果的准确性。对比图3和4中的传递损失曲线可以看出,有流时通带频率处的声衰减有所增加,这是由于空气流动的压缩和摩擦作用使得介质的粘性增加所致。

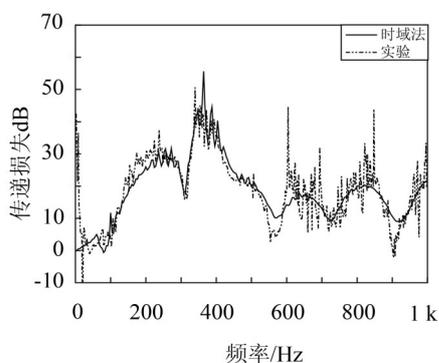


图4 传递损失结果比较 ( $v=18.3$  m/s,  $T=323$  K)

图5比较了  $v=37.4$  m/s,  $T=323$  K时消声器传递损失的时域法计算结果和实验测量结果<sup>[9]</sup>。可以看出,时域法计算结果与实验结果吻合较好,两者之间差异的原因与图4中的分析相同。比较图4和5可知,随着气流速度的增加,消声器的传递损失曲线稍稍向低频方向移动,这归结于介质的运流效应。

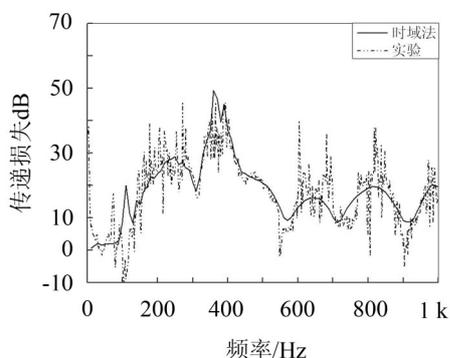


图5 传递损失结果比较 ( $v=37.4$  m/s,  $T=323$  K)

## 2.2 空气动力性能

计算消声器的压力损失时,建立消声器的三维完整模型,采用边长 $\Delta x=10$  mm的结构化网格进行划分。考虑到消声器内气流流速不超过0.3 Ma,空气介质视为不可压缩流体。消声器进口设为速度入口边界条件;出口边界条件为压力出口,出口压力为1个标准大气压;壁面设为固壁无滑移边界条件。

表1比较了双级膨胀腔消声器压力损失的Fluent计算结果和实验测量结果。由对比可知,仿真计算结果和实验测量结果吻合良好。压力损失测量实验中,气体流速越高,风机流量越难以精确控制, $U$ 型管内的水柱较难稳定,进而影响测量结果的精度。

表1 阻力损失结果比较

进气温度 $T/K$	进气速度 $V/(m/s)$	实验 $\Delta P/Pa$	CFD $\Delta P/Pa$	相对误差
312	13	580	611	5.3%
314	20	1 495	1 556	4.1%
316	33	4 012	4 193	4.5%

## 3 结语

将二维轴对称时域CFD法应用于计算介质为静止和流动状态下双级膨胀腔消声器的传递损失,在所关心的频率范围内时域CFD法的计算结果与实验测量结果吻合较好。由于时域方法可以考虑复杂气体流动和介质粘性的影响,因而计算结果较为准确。基于定常流动理论,使用Fluent软件计算了双级膨胀腔消声器的压力损失,预测结果与实验测量结果吻合良好。研究表明,CFD方法不仅可以用于精确计算抗性消声器的压力损失和流场分析,还可以较为精确地预测有流条件下消声器的消声特性,成为消声器设计和性能分析的有效方法。

参考文献:

- [1] Selamet A, Denia F D, Besa A J. Acoustic behavior of circular dual-chamber mufflers[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 265(5): 967-985.
- [2] 黄继嗣, 季振林. 同轴抗性消声器声学及阻力特性的数值计算与分析[J]. *噪声与振动控制*, 2006, 26(5): 91-95.
- [3] Ji Z L. Acoustic attenuation performance analysis of multi-chamber reactive silencers[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 283(1-2): 459-466.
- [4] Middelberg J M, Barber T J, Leong S S, et al. Computational fluid dynamics analysis of the acoustic performance of various simple expansion chamber mufflers[A]. *Proceedings of Acoustics 2004, Australia*, 2004.
- [5] Broatch A, Margot X, Gil A, et al. A CFD approach to the computation of the acoustic response of exhaust mufflers [J]. *Journal of Computational Acoustics*, 2005, 13(2): 301-316.
- [6] 徐航手, 季振林, 康钟绪. 抗性消声器传递损失预测的三维时域计算方法[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(4): 107-110.
- [7] Ji Z L, XU H S, KANG Z X. Influence of mean flow on acoustic attenuation performance of straight-through perforated tube reactive silencers and resonators[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2010, 58(1): 12-17.
- [8] 刘联璧, 郝志勇, 郑旭. 复杂腔体四极子矩阵的三维CFD计算方法[J]. *振动工程学报*, 2013, 26(2): 298-302.
- [9] Singh R, Katra T. Development of an impulse technique for measurement of muffler characteristics[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1978, 56(2): 279-298.
- [10] 王雪仁. 船用柴油机排气消声器声学性能预测的边界元法及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.