

引用格式: 陈志响, 季振林, 马庆镇, 等. 非均匀流条件下穿孔管消声器传递损失计算方法与特性分析[J]. 声学技术, 2022, 41(5): 705-710. [CHEN Zhixiang, JI Zhenlin, MA Qingzhen, et al. Transmission loss calculation and performance analysis of perforated-tube mufflers with non-uniform flow[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(5): 705-710.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.05.011

非均匀流条件下穿孔管消声器传递损失 计算方法与特性分析

陈志响¹, 季振林², 马庆镇¹, 陈国强¹, 孟祥旗¹, 张超¹

(1. 潍柴动力股份有限公司内燃机可靠性国家重点实验室, 山东潍坊 261061;

2. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 实际应用中的消声器通常具有比较复杂的内部结构, 其内部流体速度分布不均匀, 而且消声器内部的回流管路和穿孔元件使得消声器内部的流体流动更加复杂, 其消声性能不可避免地受到流体流动的影响。为了计算非均匀流条件下穿孔管消声器的传递损失, 应用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)软件 FLUENT 计算消声器内部的流场, 然后将流体属性通过网格映射的方式转移到 LMS Virtual Lab 声学有限元模型中, 并且选用不同的穿孔阻抗模型计算消声器的传递损失, 计算结果与实验测量结果进行了比较。文章对消声器内部流场的流动特征也做了仔细地分析, 并研究了气体流速对消声器传递损失的影响, 随着气体流速的增加, 消声器的传递损失会增大, 共振峰的峰值会减小。

关键词: 声学; 穿孔管消声器; 流动效应; 有限元法; 传递损失

中图分类号: TB535

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-05-0705-06

Transmission loss calculation and performance analysis of perforated-tube mufflers with non-uniform flow

CHEN Zhixiang¹, JI Zhenlin², MA Qingzhen¹, CHEN Guoqiang¹, MENG Xiangqi¹, ZHANG Chao¹

(1. State key Laboratory of Engine Reliability, Weichai Power Co., Ltd, Weifang 261061, Shandong, China;

2. School of Power and Energy, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: Mufflers in practical engineering applications often contain complex internal components and the internal flow field is distributed unevenly. In addition, the flow-reversing pipes and perforated elements in the muffler further complicate the flow patterns. Therefore, the effect of non-uniform flow on acoustic attenuation performance of mufflers should be carefully studied. In order to calculate the transmission loss (TL) of muffler, the computational fluid dynamics (CFD) software FLUENT is used to capture the inner flow field, and then the fluid property data are imported to the acoustic finite element model of LMS Virtual Lab. The different perforated impedance models are adopted to calculate TL, and the numerical results are compared with the results of previously published experimental measurements. The characteristics of the flow inside muffler are studied in detail. Furthermore, the effect of flow velocity on the acoustic attenuation performance of muffler is investigated. It is concluded that for the studied muffler, increasing flow velocity raises the TL and lowers the resonance peaks.

Key words: acoustics; perforated tube muffler; flow effect; finite element model (FEM); transmission loss

0 引言

消声器被广泛应用于内燃机排气噪声控制, 声学性能是其主要的评价指标。频域方法是消声器声学性能计算和分析中普遍使用的方法, 主要包括有限元法和边界元法^[1]。这些方法均在频率域求解线性波动方程, 进而计算消声器的声学性能。Young

等^[2]首次使用有限元法计算了无流条件下消声器的传递损失。徐贝贝等^[3]利用三维有限元法分析了消声器的声学性能。由于当时计算资源的限制, 有限元法只能在二维模型下进行计算, 但实际的消声器通常具有三维的几何特征, 因此当时的有限元法预测精度较低。随着计算机性能的提高和存储容量的增大, 有限元法逐步应用于计算和分析三维声学问题。Mehdizadeh 等^[4]利用三维声学有限元法计算了穿孔管消声器的声学性能, 传递损失预测结果与实验测量结果吻合良好。Chaitanya 等^[5]利用三维有限元法研究进出口管道的厚度对末端修正系数的影

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-05-28

作者简介: 陈志响(1990—), 男, 山东济宁人, 博士, 研究方向为振动与噪声方向。

通信作者: 陈志响, E-mail: czx_heu@163.com

响,并将预测结果与实验结果进行了对比。但是上面的计算过程中并没有考虑流速对消声器声学性能的影响,消声器作为排气管路的组件,其消声性能将不可避免地受到流体流动的影响。1988年,Chang等^[6]基于有限差分格式离散了线性化的一维波动方程,在时间域内求解了声学时域信号,利用时频信号分析和声学计算得到了消声器的传递损失。徐航手等^[7]利用三维时域CFD方法计算了无流条件下单、双级膨胀腔、直通穿孔管消声器的传递损失。刘晨等^[8]详细研究了三维时域CFD方法用于计算有流状态下穿孔管消声器传递损失的改进策略,其计算结果与实验测量值吻合较好。虽然时域方法考虑的因素较多,计算精度较高,但是其计算效率较低,并且对网格大小和时间步长的要求较为严格,目前该方法还很难用于实际的工程计算与分析^[9]。

在消声器的管路中,流体的流动会加速声波向下游的传播,同时减慢声波向上游的传播。一般来说,消声器不同的腔室中也会存在不同的流动特征。由于流动造成的声速传播的差异会影响消声器的消声性能。而且消声器中经常使用穿孔结构,利用小孔的声阻抗效应来达到消声的目的,小孔与腔室的组合又形成了共振结构,流体的流动会影响共振结构的共振频率。

因此,为了考虑流体的运流效应对消声器消声性能的影响,本文利用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值方法计算消声器内部流场中的速度分布^[10],再将速度分布通过网格映射转移到声学有限元模型中^[11];而流体流动对穿孔声阻抗的影响通过有流声阻抗经验公式直接定义,然后进行声学响应的计算。本文使用CFD软件FLUENT计算消声器中不同节点处速度的分布;使用两种声阻抗经验公式直接定义小孔的声阻抗,进而计算有流条件下穿孔管消声器的传递损失。

1 传递损失

消声器的传递损失只与本体结构有关,不受声源阻抗与尾管辐射特性的影响,是消声器声学性能中最常使用的评价指标。当消声器的进出口满足平面波条件时,其传递损失可以表示为^[12]

$$L_T = 10 \lg \left(\frac{p_{in}^2 A_{in}}{p_{out}^2 A_{out}} \right) \quad (1)$$

其中: p_{in} 为消声器进口处的入射声压, p_{out} 为消声器出口在无反射边界条件下的透射声压, A_{in} 、 A_{out} 为消声器进、出口处的面积。

2 计算方法

2.1 消声器模型

本文中所计算的消声器模型为文献[13]中的横流式穿孔管消声器和文献[14]中的双穿孔管消声器。横流式穿孔管消声器和双穿孔管消声器的几何模型分别如图1、2所示,具体尺寸如表1所示。横流式消声器中空气温度 $T=347\text{ K}$,该消声器为轴对称结构,计算模型的大小取其完整模型的1/16。双穿孔管消声器几何模型中1为消声器进口管,2为膨胀腔,3为消声器出口管,空气温度 $T=288\text{ K}$ 。

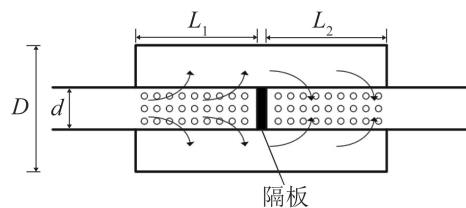


图1 横流式穿孔管消声器的几何模型

Fig.1 Geometric model of cross flow perforated tube muffler

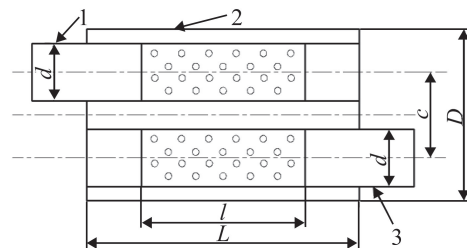


图2 双穿孔管消声器的几何模型

Fig.2 Geometric model of double perforated tube muffler

2.2 消声器内部流场的计算

为获得消声器内各物理量的分布,首先对几何模型进行流场网格离散,本文中膨胀腔和进出口管网格的大小为 2 mm ,穿孔处网格的大小为 0.5 mm ;然后使用FLUENT^[10]软件对消声器内部流场进行计算。采用压力基隐式求解器用于求解质量、动量和能量守恒方程以及状态方程组成的耦合方程组,压力速度-耦

表1 两种消声器的具体尺寸
Table 1 Specific dimensions of the two mufflers

消声器类型	膨胀腔直径 D/mm	膨胀腔长度 L/mm	穿孔管直径 d/mm	穿孔管壁厚 t_w/mm	穿孔管间距 c/mm	穿孔直径 d_h/mm	穿孔率 $\varphi/\%$
横流式穿孔管消声器	101.6	$L_1=L_2=128.6$	49.3	0.81	—	2.49	0.039
双穿孔管消声器	300	500	100	1	150	10	0.2

合格式选用压力关联方程(Semi-Implicit Method for pressure Linked Equation, SIMPLE)算法,空间离散格式为二阶精度,可实现 $k-\varepsilon$ 两方程模型用于模拟湍流流动^[7-9,15]。消声器的介质为空气,密度满足理想气体定律,其他物性参数由气体温度决定,边界条件如下:

- (1) 消声器的进口施加速度进口边界条件;
- (2) 消声器的出口施加压力出口边界条件;
- (3) 壁面处设置为静止、绝热和无滑移边界条件;

(4) 消声器若为轴对称结构,对其内部面采用旋转周期边界条件。

边界条件的设置如表2中所示。 V_{inlet} 为消声器进口空气的速度, P_{outlet} 为消声器出口空气压力。

表2 边界条件的设置
Table 2 Setting of the boundary conditions

边界条件	横流式穿孔管 消声器参数	双穿孔管 消声器参数
速度进口边界	$V_{\text{inlet}}=17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{\text{inlet}}=10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
压力出口边界	$P_{\text{outlet}}=0$	$P_{\text{outlet}}=0$
静止、绝热和无滑移边界	$T=347 \text{ K}$	$T=288 \text{ K}$

2.3 消声器传递损失的计算

对于声学传递损失的计算,首先需要对几何模型进行网格划分,一般要求声学网格的大小不超过最大计算频率所对应波长的1/6,本文中最大计算频率为3 500 Hz,故离散网格的最大尺寸不能超过16 mm。当消声器的内部流场计算完成后,在LMS Virtual Lab声学有限元模型中通过网格映射的方式将流体速度分布映射到声学有限元模型中。在LMS Virtual Lab中映射算法主要包括节点编号法、最大距离算法、最大单元距离算法和连续最大单元距离算法。本文使用的是连续最大单元距离算法,因为该算法适合于流场精细CFD网格向声学粗糙网格映射,可以保证大范围的流场尺度的连续性^[11]。消声器进口设置为质点振速边界条件,出口为无反射端边界条件。声学有限元模型中,不划分穿孔处的网格,因为在穿孔处由于流体的黏性作用对声能的耗散尤为严重,声波与流体流动的相互作用在小孔处会产生脱落涡,脱落涡将声能转化成热能,加剧了声能的耗散^[9,15-16]。文献[17]中对直通穿孔管消声器建出了穿孔处的网格,但是发现计算值与实验值相比偏低,这是因为声学有限元计算过程中不包括流体的黏性作用,无法考虑穿孔处脱落涡对声能的耗散。因此在消声器的穿孔处不建立网格,而是通过定义传递导纳关系来建立消声器的穿孔阻抗模型,这样定义穿孔阻抗就考虑到了脱落涡

对声能的耗散。为了选取最佳的穿孔阻抗模型,消声器的穿孔阻抗模型分别采用Sullivan模型^[13]和康钟绪模型^[18],Sullivan穿孔阻抗模型为

$$\begin{cases} z_{S1} = \rho c [0.006 + jk(t_w + 0.75d_h)] / \phi \\ z_{S2} = \rho c [2.57U_0/c_c + jk(t_w + 0.75d_h)] / \phi \end{cases} \quad (2)$$

式中: z_{S1} 为无流条件下的穿孔阻抗, z_{S2} 为有流条件下的穿孔阻抗, k 为声波数, t_w 为穿孔管的厚度, d_h 为小孔的直径, U_0 为小孔中的流速, ρ 为流体的密度, c_c 为流体中的声速, ϕ 为穿孔管的穿孔率。康钟绪无流条件下穿孔阻抗模型^[18]为

$$\begin{cases} z_{K1} = \rho c [0.006 + jk(t_w + \alpha d_h)] / \phi \\ \alpha = 0.8216(1 - 1.5443\phi^{0.5} + 0.3508\phi + 0.1935\phi^{1.5}) \end{cases} \quad (3)$$

康钟绪有流条件下的穿孔阻抗模型为

$$\begin{cases} z_{K2} = \frac{\rho c}{\phi} \left\{ 0.006 + 2.48(1 - \phi)M_B^{C_0} + \right. \\ \left. jk \left[t_w + \left(1 - C_1(1 - \phi)^{1.44} M_B^{0.72} \right) \alpha d_h \right] \right\} \\ C_0 = 1.04 + 40d_h \\ C_1 = 1 + 398.34d_h \\ \alpha = 0.8216(1 - 1.5443\phi^{0.5} + 0.3508\phi + 0.1935\phi^{1.5}) \end{cases} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中, ρ 为流体的密度, c_c 为流体中的声速, k 为声波数, t_w 为穿孔管的厚度, α 为端部修正系数, d_h 为小孔的直径, ϕ 为穿孔管的穿孔率, M_B 为孔内气流马赫数。其余壁面设置为刚性壁面边界条件,然后进行声学响应的计算,从而计算得到消声器的传递损失。

3 计算结果及分析

3.1 横流式穿孔管消声器结果及分析

图3~5分别为横流式穿孔管消声器的压力、速度、流线分布云图。可以看出,进口管、膨胀腔、出口管中的压力依次降低,而消声器内的速度分布并不均匀,小孔附近的速度较高,进口管和出口管中的速度相对较低,膨胀腔中的速度最小;由于小孔的作用,在膨胀腔以及出口管中形成了射流,每个小孔附近的射流速度并不完全相同。由图5可以看出,进口管处的膨胀腔中流线分布比较复杂,相互交错,并且与壁面产生了碰撞,形成了很多的漩涡,消耗的能量较多,而出口管处膨胀腔中的流线分布比较光滑,漩涡较少,能量的消耗较少。

在得到横流式穿孔管消声器流场的计算结果以后,将流体速度、压力、密度、温度等物理量通过网格映射的方法传递到声学有限元模型中,即可计

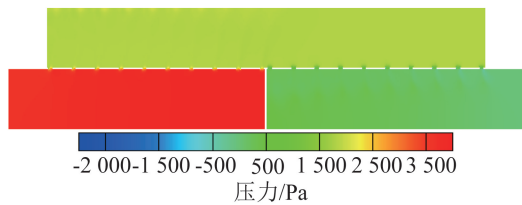


图3 横流式穿孔管消声器静压分布云图
Fig.3 Nephogram of static pressure of cross-flow perforated-tube muffler

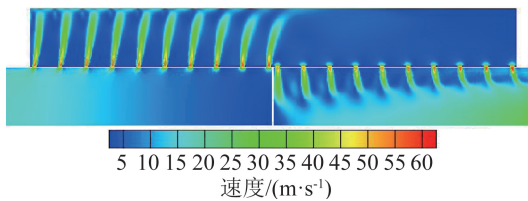


图4 横流式穿孔管消声器速度分布云图
Fig.4 Nephogram of velocity magnitude of cross-flow perforated-tube muffler

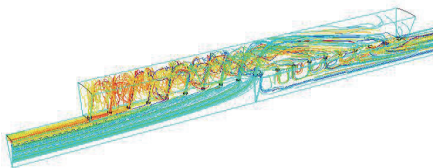


图5 横流式穿孔管消声器流线分布云图
Fig.5 Nephogram of streamline of cross-flow perforated-tube muffler

算有流情况下消声器的传递损失。图6为使用Sullivan穿孔阻抗模型和康钟绪穿孔阻抗模型计算得到的横流式穿孔管传递损失与实验测量结果的比较。可以看出,与实验值相比较,频率1000 Hz以下采用Sullivan穿孔阻抗模型得到的传递损失较好,频率1000~2800 Hz采用康钟绪穿孔阻抗模型得到的传递损失较好,但在频率2800~3500 Hz范围内两者与实验值都有较大差异,可见利用不同的穿孔阻抗模型计算的传递损失并不相同。有限元计算值与实验测量值产生差异的原因可以归结如下:(1)实验测量中可能存在流体与壁面之间的热传导,而在有限元计算过程中并没有考虑;(2)试验中流速的测量可能存在误差^[8,15]。

3.2 双穿孔管消声器结果及分析

图7~9分别为双穿孔管消声器的压力、速度、流线分布云图。从图7~9中的云图可以看出,进口管、膨胀腔、出口管中的压力依次降低,而且在进口管中距离进口越远,进口管中的压力越大,在出口管中距离出口越远,压力越大;双穿孔管消声器中速度分布差异较大,膨胀腔中的流体流速较小,出口管中的速度分布不如进口管中速度分布均匀。由图9可以看出,由进口管中流出的流体需要经过多次碰撞、转折才能进入出口管中,由此造成的能

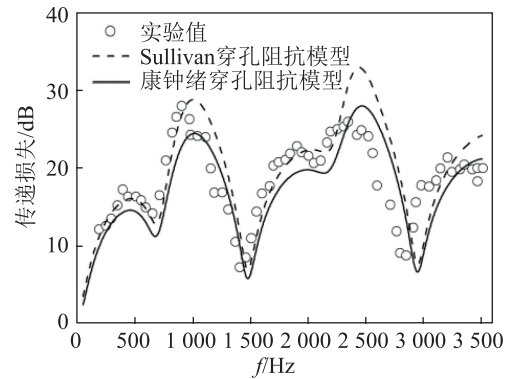


图6 横流式穿孔管消声器的传递损失
Fig.6 Transmission loss of cross flow perforated tube muffler
量损失较大。

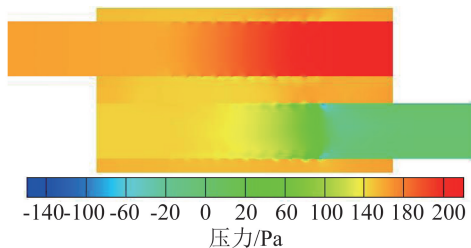


图7 双穿孔管消声器压力分布云图
Fig.7 Nephogram of static pressure of double perforated-tube muffler

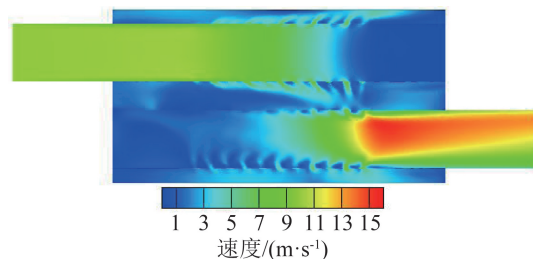


图8 双穿孔管消声器速度分布云图
Fig.8 Nephogram of velocity magnitude of double perforated-tube muffler

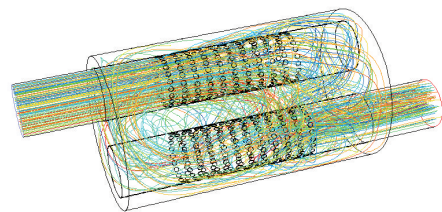


图9 双穿孔管消声器流线分布云图
Fig.9 Nephogram of streamline of double perforated-tube muffler

图10比较了双穿孔管消声器传递损失选取两种不同穿孔阻抗模型的有限元计算结果和实验测量结果。由图10可以看出,与实验值相比,采用Sullivan穿孔阻抗模型得到的传递损失与实验测量结果整体吻合良好,而康钟绪穿孔阻抗模型在500~820 Hz频段与实验值产生的差异较大,这是因为康钟绪穿孔阻抗模型只能应用于穿孔孔径为2~5 mm

的情况，而文中的双穿孔管消声器的穿孔孔径为 10 mm。在共振峰 680 Hz 处两种阻抗模型的计算结果与实验值都略有差异，这可能是由于实验测量误差引起的。

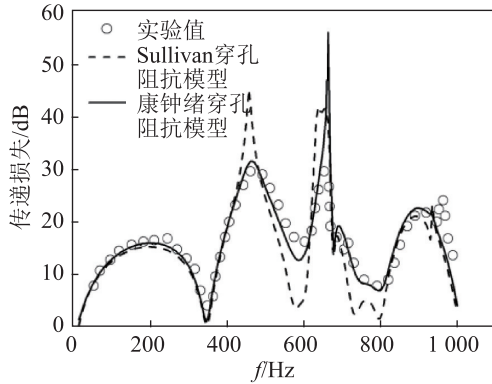


图 10 双穿孔管消声器的传递损失
Fig.10 Transmission loss of double perforated-tube muffler

3.3 流速对消声器传递损失的影响

由前两节的分析可知，Sullivan 穿孔阻抗模型对于有流情况下消声器传递损失的计算结果比较准确^[19]。因此，采用 Sullivan 穿孔阻抗模型比较流速对消声器传递损失的影响。

图 11、12 比较了在不同流速下横流式穿孔管消声器传递损失和双穿孔管消声器传递损失的计算结果。由于进口的气流速度最大为 34 m·s⁻¹，消声器中的气体流速基本都在 0.3 马赫数以下，由于湍流引起的空气动力性噪声可以忽略。由图 11、12 可以看出，随着流速的增加，多数频率下消声器的传递损失增大，这是由于流速的增加，穿孔的声阻增大和声抗减小所致，但在图 12 中可以看出共振峰处随着流速的增加，共振峰值有所下降。通过以上的分析可知，有流情况下，消声器的传递损失不仅没有减小，而且有所增加。两种消声器在不同流速下的压力损失如表 3 所示。但是由表 3 可以看出，在较高的流速条件下，消声器进、出口的压力损失也较大。

4 结论

为考虑介质流动对消声器消声性能的影响，本文使用软件 FLUENT 和 LMS Virtual Lab 联合仿真计算有流条件下穿孔管消声器的传递损失。仿真计算的结果与实验测量结果吻合良好，说明了此种方法能够充分考虑流体流动对消声器传递损失的影响。

文中选取了不同的穿孔阻抗模型来计算消声器的传递损失，检验了穿孔阻抗模型的有效性。分析

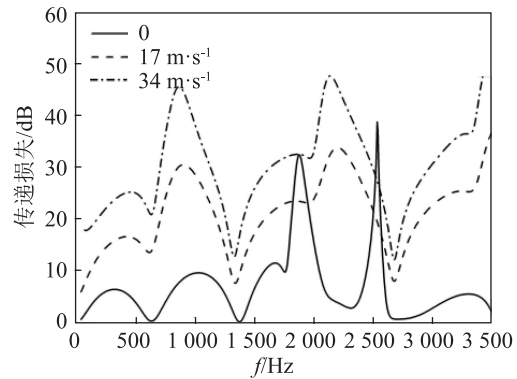


图 11 流速对横流式消声器传递损失的影响
Fig.11 Effect of flow velocity on TL of cross flow perforated tube muffler

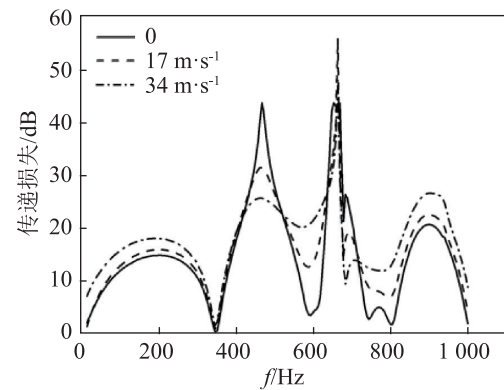


图 12 流速对双穿孔管消声器传递损失的影响
Fig.12 Effect of flow velocity on TL of double perforated pipe muffler

表 3 两种消声器在不同流速下的压力损失
Table 3 Pressure loss of two mufflers with different inlet velocities

消声器类型	位置	流速/(m·s ⁻¹)	压力损失/Pa
横流式消声器	进口	17	4 402
	出口	34	23 168
双穿孔管消声器	进口	10	164
	出口	28	1 302

结果表明，Sullivan 声阻抗经验公式相对康钟绪声阻抗模型更为准确，适用穿孔孔径范围更广。文中还比较了不同流速下消声器传递损失的计算结果，随着流速的增加，在绝大多数频率下消声器的传递损失增大，但是在共振峰处，共振峰的峰值会减小。此种方法过程简单，计算速度快，具有较高的工程应用价值。

参 考 文 献

[1] TSUJI T, TSUCHIYA T, KAGAWA Y. Finite element and boundary element modelling for the acoustic wave transmission in mean flow medium[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 255(5): 849-866.
[2] YOUNG C I J, CROCKER M J. Prediction of transmission loss in mufflers by the finite - element method[J]. The Journal

- of the Acoustical Society of America, 1975, **57**(1): 144-148.
- [3] 徐贝贝, 季振林. 穿孔管消声器声学特性的有限元分析[J]. 振动与冲击, 2009, **28**(9): 112-115, 217.
XU Beibei, JI Zhenlin. Finite element analysis of acoustic attenuation performance of perforated tube silencers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, **28**(9): 112-115, 217.
- [4] MEHDIZADEH O Z, PARASCHIVOIU M. A three-dimensional finite element approach for predicting the transmission loss in mufflers and silencers with no mean flow[J]. Applied Acoustics, 2005, **66**(8): 902-918.
- [5] CHAITANYA P, MUNJAL M L. Effect of wall thickness on the end corrections of the extended inlet and outlet of a double-tuned expansion chamber[J]. Applied Acoustics, 2011, **72**(1): 65-70.
- [6] CHANG I J, CUMMINGS A. A time domain solution for the attenuation, at high amplitudes, of perforated tube silencers and comparison with experiment[J]. Journal of Sound and Vibration, 1988, **122**(2): 243-259.
- [7] 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, 234.
XU Hangshou, JI Zhenlin, KANG Zhongxu. Three-dimensional time-domain computational approach for predicting transmission loss of reactive silencers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, **29**(4): 107-110, 234.
- [8] 刘晨. 管道及消声器声学计算的时域脉冲法应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
LIU Chen. Study on applications of time domain impulse method to acoustic computations of ducts and silencers[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [9] 陈志响. 基于三维时域CFD方法的穿孔声学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
CHEN Zhixiang. Study on the acoustic characteristics of perforates by using the three-dimensional time-domain CFD approach[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [10] ANSYS Inc, ANSYS FLUENT 15.0 in Workbench User's Guide, New York, USA, 2012.
- [11] LMS International NV, LMS Virtual.Lab Online Help13.3, LMS International N. V., Leuven, Belgium, 2013.
- [12] MUNJAL M L, Acoustic of Ducts and Mufflers[M]. New York: Wiley, 2014.
- [13] SULLIVAN J W. A method for modeling perforated tube muffler components. II. Applications[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1979, **66**(3): 779-788.
- [14] GARDNER B K, MEJDI A, COPLEY D. Using CFD flow fields to inform acoustic finite element models of complex mufflers with thermal and flow effects[C]// INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2015, **250**(1): 6154-6161.
- [15] 陈志响, 季振林. 通过流作用下穿孔板的声阻抗[J]. 声学学报, 2020, **45**(2): 235-246.
CHEN Zhixiang, JI Zhenlin. Acoustic impedance of perforated plates with bias flow[J]. Acta Acustica, 2020, **45**(2): 235-246.
- [16] SU J, RUPP J, GARMORY A, et al. Measurements and computational fluid dynamics predictions of the acoustic impedance of orifices[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, **352**: 174-191.
- [17] FAN W, GUO L X. An investigation of acoustic attenuation performance of silencers with mean flow based on three-dimensional numerical simulation[J]. Shock and Vibration, 2016, **2016**: 6797593.
- [18] 康钟绪. 消声器及穿孔元件声学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
KANG Zhongxu. Study on the acoustic characteristics of silencers and perforated elements[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [19] 黄虹溥, 季振林, 陈志响, 等. 穿孔管消声器声学特性预测的单向耦合计算方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, **51**(4): 367-372.
HUANG Hongpu, JI Zhenlin, CHEN Zhixiang, et al. One-way coupling method for acoustic performance predictions of perforated tube silencers[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, **51**(4): 367-372.