

带空腔尖劈吸声器吸声性能的研究^{*}

王仁乾¹, 马黎黎¹, 缪旭弘²

(1. 北京大学电子学系, 北京 100871; 2. 海军论证中心, 北京 100073)

摘要: 本文研究带有空腔的锥形尖劈吸声器的吸声性能。文中给出了一种计算该吸声器的吸声系数的方法, 并对吸声系数与频率的关系进行计算机仿真。仿真结果表明: 带有空腔的尖劈吸声器相对普通尖劈吸声器, 除保持高频段较好吸收性能外, 在低频段吸声系数有显著提高; 通过改变空腔结构可以改善吸声器的低频吸声性能。

关键词: 尖劈吸声器; 共振; 空腔; 变截面管

中图分类号: T B535. + 2; **文献标识码** A

A study on the absorbing performance of a wedge absorber with cavity

WANG Ren-qian¹, MA Li-li¹, MIAO Xu-hong²

(1. Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871; 2. Research Center of Navy, Beijing 100073)

Abstract: The absorbing performance of a wedge absorber with recavitytor is studied. The theoretical method for calculating the absorption coefficient of the absorber is provided and the relationship between the absorption coefficient and frequencies is given by computer simulation. The results showed that the absorption performance of this kind of absorber is better than normal wedge absorbers in low frequency and it keeps good absorbing performance in high frequency. The performance in low frequency can be improved by changing the size and structure of the resonator.

Keywords: wedge absorbor; resonator; cavity; a tube with varying cross section

1 引言

吸声器的材料和结构对吸声性能起主要作用。就管道消声结构而言, 已由均匀管发展到变截面管、由一般的傍通管发展到多重、多级傍通管^[1,3]。尖劈吸声器和共振吸声器是两种常用的吸声结构形式, 前者低频吸声性能较差但吸声频带宽, 后者可通过改变腔的结构改善低频吸声性能, 但吸声频带较窄。尖劈共振型吸声器是内含空腔的尖劈吸声器, 这种结构可使上述两种结构形式的吸声性能优势互补, 因而是一种具有很好的吸声性能的

结构形式。

尽管研究尖劈吸声器的声场理论已有相当长的历史^[4,7], 然而至今还没有建立严格的声场理论, 由于其界面的不规则性, 用严格的波动理论很难给出精确解, 只能作近似计算, 对于尖劈型共振吸声器的声场理论就更加复杂了。关于尖劈吸声器声场的近似计算, 通常方法是在横截面上把尖劈材料与周围媒质的特性阻抗等声学参量, 按面积计权作某种平均后, 得出等效吸收层的相应量, 然后根据渐变层理论来处理^[6,7]。由于吸声材料(如 ρ_c 橡胶)与周围媒质(如水)相比较, 其特性阻抗等

* 收稿日期: 99-03-02; 修订日期: 99-08-30

作者简介: 王仁乾(1938-), 女, 教授

声学参量是很接近的,在吸声材料中它们是幅角为小值的复量,因此等效吸收层中相应量的实部近似保持不变,而虚部则与尖劈截面积成正比。如果只考虑尖劈的声吸收特性,它与变截面管道中的声传播问题是相类似的。本文类比变截面管道的声场理论,提出另一种计算带空腔尖劈吸声器的吸声系数的方法,并对吸收系数和频率的关系进行了计算机仿真。仿真结果表明带空腔尖劈吸声器相对尖劈吸声器,除保持高频段较好吸收性能外,在低频段吸声系数有显著提高,因而可通过改变空腔结构改善吸声器的低频性能。

2 带空腔尖劈吸声器的吸声系数

2.1. 理论模型

设圆锥尖劈为弹性媒质,内含空腔,空腔充空气这里不考虑切变应力;平面声波平行于尖劈由入射到尖劈顶面和侧面将尖劈等分 n 个环形台面, $S_0, F_1, S_2, \dots, S_{n+1}$, 分别为尖劈的底、环面和顶端的面积(见图1)。声波入射能量:

$$E_i = \sum_{j=1}^{n+1} I_{ij} S_j = I_i S_0 \quad (1)$$

设 $I_{ij} S_j$ 为第 j 个环形面上的反射能量,则总的反射能量和吸收能量分别为:

$$E_r = \sum_{j=1}^{n+1} I_{rj} S_j \quad (2)$$

$$\begin{aligned} E_t &= E_i - E_r = E_i - \sum_{j=1}^{n+1} I_{rj} S_j \\ &= I_i S_0 - \sum_{j=1}^{n+1} I_{rj} S_j \quad (3) \end{aligned}$$

定义:第 S_j 面的声强反射系数: $r_j = I_{rj} / I_i$, 则尖劈的能量吸收系数:

$$\alpha = 1 - \frac{E_r}{E_i} = 1 - \sum_{j=1}^{n+1} r_j \frac{S_j}{S_0} \quad (4)$$

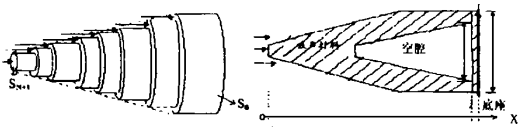


图1 尖劈分层处理示意图

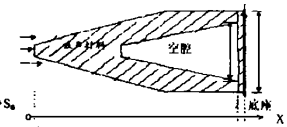


图2 带空腔尖劈吸声器纵向截面结构示意图

2.2. 声强反射系数

设圆锥形尖劈共振吸声器纵向截面结构如图2所示,圆锥内截面(空腔)和管壁截面(吸声材料)沿对称轴 x 变化,则空腔和吸声材料的特性阻抗率 $\rho c / S(x)$ 是 x 的函数。假定其中传播的声波波阵面按截面的规律变化,则对应的声场应满足变截面形式的波动方程式(5)。这样带空腔尖劈吸声器顶端和各环形面的声强反射系数 r_j 可用变截面波导的声场理论计算^[8]。

2.3. 变截面圆管输入声阻抗 Z_{Ai}

根据理论模型,声波传播规律所遵循的特殊形式的波动方程为:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \left[\frac{\partial \ln S(x)}{\partial x} \right] \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (5)$$

如果上述波动方程的形式解 $P = P(x) e^{j\omega t}$, 则其可写为:

$$\frac{d^2 P(x)}{dx^2} + \frac{S}{S} \frac{dP(x)}{dx} + k^2 P(x) = 0 \quad (6)$$

式中: $k = \omega c$, $S = \frac{dS(x)}{dx}$ 。(6)式的形式解为变系数的指数函数的组合,即

$$P(x) = A(x) [B_1 e^{-j\alpha x} + B_2 e^{j\alpha x}] \quad (7)$$

B_1, B_2 由边界条件确定;(7)式代入(6)式,可得关系式:

$$[A(x) - (S/S)A(x) + (k^2 - \sigma^2)A(x)] + j\sigma [2A(x) + (S/S)A(x)] = 0 \quad (8)$$

式中: $A(x) = \frac{dA(x)}{dx}$, $A(x) = \frac{d^2 A(x)}{dx^2}$ 。

使(8)式实部和虚部分别等于零,得到两个方程,从而解得待定量 $A(x)$ 和 σ 。

$$2A(x) + [S(x)/S(x)]A(x) = 0 \quad (9)$$

$$A(x) + [S(x)/S(x)]A(x) + [k^2 - \sigma^2]A(x) = 0 \quad (10)$$

对于截面 $S(x) = \pi r^2(x)$ (实心圆锥) 或 $S(x) = \pi [r_1^2(x) - r_2^2(x)] = \pi r^2(x)$ (或带空腔的圆锥), $r(x)$ 是圆面半径或环形面的等效半径,则 $S/S = 2r/r$, 由(9)和(10)式可得:

$$A(x) = 1/r(x) \quad (11)$$

$$r(x)/r(x) = k^2 - \sigma^2 \quad (12)$$

所以只要知道截面的半径变化函数 $r(x)$, 由

(11), (12) 式就可确定 $A(x)$ 与 σ 。由质点振速和声压关系, 可得振速: $u(x) =$

$$\frac{B_1 A(x)}{k \rho c} \left[\sigma f_1(x) + \frac{j A(x)}{A(x)} f_2(x) \right] \quad (13)$$

式中: $f_1(x) = e^{-j\alpha x} - (B_2/B_1) e^{j\alpha x}$, $f_2(x) = e^{-j\alpha x} + (B_2/B_1) e^{j\alpha x}$ 。

则在 x 点截面处的输入声阻抗: $Z_{Ai}(x) =$

$$\frac{k \rho c}{S(x)} \left[j \frac{A(x)}{A(x)} + \sigma \frac{e^{-j\alpha x} - \frac{B_2}{B_1} e^{j\alpha x}}{e^{-j\alpha x} + \frac{B_2}{B_1} e^{j\alpha x}} \right]^{-1} \quad (14)$$

令: $q(x) = [e^{-j\alpha x} - (B_2/B_1) e^{j\alpha x}] / [e^{-j\alpha x} + (B_2/B_1) e^{j\alpha x}]$ (15)

若已知管的终端声负载 $Z_{Ai}(l)$ 和截面积 $S(l)$, 则有

$$q(l) = \frac{k \rho c}{S(l) Z_{Ai}(l) \sigma} - j \frac{1}{\sigma A(l)} \quad (16)$$

(16) 代入(15)式, 可得待定常数:

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{1 - q(l)}{1 + q(l)} \text{Exp}[-j2\sigma l] \quad (17)$$

则管口 $X = l_0$ 处输入阻抗由(14)式得到:

$$Z_{Ai}(l_0) = \frac{k \rho c}{S(l_0)} \left[j \frac{A(x)}{A(x)} + \sigma \frac{e^{-j\alpha x} - \frac{B_2}{B_1} e^{j\alpha x}}{e^{-j\alpha x} + \frac{B_2}{B_1} e^{j\alpha x}} \right]^{-1}_{x=l_0} \quad (18)$$

其中: $A(x) = 1/r(x)$, $\sigma = \sqrt{k^2 - r(x)/r(x)}$, (18) 式表明, 只要知道截面 $S(x)$ 沿尖劈轴变化关系和其他参数即可计算 $x = l_0$ 处的输入阻抗。公式(18)使用的条件是 $r(x)/r(x) =$ 常数, 对于截面积是按指数或线性变化的实心圆锥尖劈, 该条件可以满足, 对于带空腔的圆锥, 只有某些特定条件下才能近似满足。

2. 4. 吸声系数公式

利用单层变截面管的输入阻抗公式和声传输线阻抗转移公式, 可导出截面 S_j 总的输入阻抗 Z_{Ai} , 再由反射系数与输入阻抗关系式, 声强反射系数 r_j 为。

$$r_j = |r_j|^2 = \left| \frac{Z_{Ai} - Z_{Am}}{Z_{Ai} + Z_{Am}} \right|^2 \quad (19)$$

r_j, S_j 和 S_0 代入(4)式即得尖劈吸声器的吸声系数 α 。

3 计算机仿真与测试结果

用计算机仿真平顶锥形共振丁基橡胶吸声器在不同频率时的吸声系数值, 并在刚性脉冲管内进行了测量, 吸声系数与频率关系曲线如图3所示。曲线1为锥形橡胶吸声器(仿真), 曲线2与3为锥形共振橡胶吸声器(空腔不同长度尺寸的仿真), 曲线4为锥形共振橡胶吸声器(实验)。

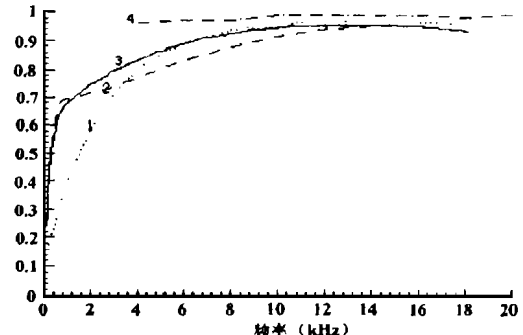


图3 吸声器吸声系数与频率关系曲线

4 结论:

(1) 图2表明吸声器内的空腔能改善低频段的吸声性能; 曲线2与3相比较也说明空腔尺寸应该优选, 否则影响低频段吸声性能改善程度。

(2) 曲线4表明, 测试结果优于仿真结果, 原因: (a) 这里只计及橡胶中的纵波衰减而未考虑横波对吸声系数的影响, 实际上对于丁基橡胶其横波衰减常数是纵波的18倍; (b) 仿真使用参数和实测参数可能不符等。

(3) 由于建立理论模型时只考虑声波沿吸声器轴向传播, 未考虑沿截面的径向传播, 所以吸收性能对内腔长度变化敏感, 对内腔半径变化不太敏感, 实际上内腔半径变化对吸收性能是有影响的, 所以有待于进一步完善理论模型。

(4) 如何通过改进吸声器的结构、合理选择材料来提高其吸声性能(特别是低频段性能), 解决实际应用中的老化、耐压问题是涉及到声场理论、信号处理技术、材料科学和结构力学等多学科问题。

下转 157 页

证测试过程很快,这一因素引起的测试误差是可以保证降低到最小程度。关于商用超声清洗设备的实际测量问题以及上面提到的振动速度的测量及选择问题,将在以后的工作中加以更加详细的研究。

总结上述内容,可得出以下结论:

(1) 本方法不需测量换能器的介电和机械损耗功率,因而也不需要两个性能相同的超声换能器,因此,可提高测量精度。

(2) 换能器的振动速度以比值的形式出现,因此,实验中只需测量其相对值,不需要振动速度的绝对测量,因而不需对测振用的拾振器进行校准。

(3) 换能器输入电功率的测试值以差值的形式出现,因此可以消除匹配电路等仪器带来的系统误差。

(4) 本方法可用于大功率超声换能器实用状态下辐射声功率及电声效率的测量。

本文对大功率超声换能器的性能测试进行了一些初步的探讨,可用于一些大功率超声技术中换能器辐射声功率的快速测量,如超声清洗,超声处理以及超声加工等,以便对超声技术的实际效果进行定量的评价。至于该方法的测试精度以及影响声功率测量精度的因素,在以后的工作中将加以详细的探讨。

参考文献:

[1] Mori, E. and Ito, K, Measurement of the acoustical output power of ultrasonic high power transducer using electrical high frequency wattmeter [C]. Proc. Ultrasonics Intern. 81, Brighton, 1981: 307 ~ 312.

[2] Kikuchi, Y, Ultrasonic transducers [M]. Corona Publishing Company, Ltd, Tokyo, 1969: 369 ~ 381.

[4] N. B. Miller, Reflections from gradual transition sound absorbers [J]. J. A. S. A., 1958; 30 (10).

[5] E. G. 里查孙. 声学技术概要 [M]. 科学出版社, 1965: 220 ~ 298.

[6] 尚尔昌. 渐变吸收层反射率的近似式 [J]. 声学学报, 1965: 3(4).

[7] 赵松龄. 劈形吸声结构的研究 [J]. 同济大学学报, 1979: 1.

[8] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础 (下册) [M]. 上海科学技术出版社, 1982: 24 ~ 30.

上接 148 页

参考文献:

[1] A. Selamet and V. Easwaran. Wave propagation and attenuation in Herschel-Venturi tubes [J]. J. A. S. A. 1997; 101(2): 936 ~ 942.

[2] 戴根华等. 带旁通的管道中的声能流及传声损失 (理论分析). 声学学报, 1995; 20(4): 244 ~ 249.

[3] A. Selamet and V. Easwaran. Modified Herschel-Quincke tube; Attenuation and resonance for n - duct Configuration [J]. J. A. S. A., 1997; 102(1): 164 ~ 169.

简讯

1999 年全国功率超声学术会议在无锡市召开

由中国声学学会功率超声分会主办的(陕西师范大学声学所筹办)全国功率超声学术交流会于 99 年 10 月 19 日至 21 日在无锡市召开,全国近 40 个单位、团体约 60 多名代表出席了会议。代表们来自从事功率超声研究和生产的大专院校、科研院所、生产企业。许多民营企业也派代表参加这次会议。会议开得较活跃。除了论文报告交流外,会议还组织专题讨论会。会议期间还召开了功率超声分会全体委员会会议。中国声学学会名誉理事长,中科院资深院士应崇福先生参加了本次会议。

会议共收到论文 32 篇并出了论文集,内容涉及功率超声的应用研究、作用机理研究和相关设备与元器件研究等方面,会议还报导了国内外功率超声的成就和当前发展的评述;对已经成为国内外研究热点的超声空化研究的评述;对新兴的超声应用——超声治疗肿瘤技术;超声马达技术的评述;对已经产业化的超声清洗等行业的发展,市场分析以及向这些技术的深度和广度开拓,会议报告还介绍许多新技术,例如铝塑复合管的超声焊接技术、超声马达、超声悬浮、超声清洗新技术和新用途等技术;本次会议有许多较为深入的超声作用机理报告,如:超声加工流变性,超声减摩、超声空化、声致发光,声化学等方面。在声场参数测量的新仪器、新器件、换能器、变幅杆、激励电路的设计和研究等方面亦有很好的报告和交流。与会代表进行很好交流和热烈探讨,会议学术气氛浓厚、安排得紧凑使与会者得益匪浅。

沈建中