

文章编号: 1000-8055(2002)05-0518-06

切向流与偏流相互干扰对穿孔板声阻抗的影响

张厚武, 李运敏, 景晓东, 孙晓峰
(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 对切向流和偏流相互干扰如何影响穿孔板声阻抗进行了细致的实验研究, 结果表明: 切向流削弱了偏流对穿孔板声阻的调控, 但在较高偏流速度下, 偏流对穿孔板声阻的影响仍起主导作用; 此外, 不同的偏流方式(吹气或吸气)与切向流干扰对穿孔板声阻抗的影响有明显区别。最后, 尝试通过有效流量系数把不同实验条件下的数据关联起来。

关键词: 穿孔板; 声阻抗; 切向流; 偏流

中图分类号: O 422.5

文献标识码: A

Effect of Grazing-Bias Flow Interaction on Acoustic Impedance of Perforated Plates

ZHANG Hou-wu, LI Yun-min, JING Xiao-dong, SUN Xiao-feng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The effect of grazing-bias flow interaction on the orifice acoustic impedance has been experimentally investigated. It is shown that the acoustic resistance of an orifice increases slowly with the increase of bias flow speed because of grazing flow effect, but the acoustic resistance is dominated by the bias flow effect when bias flow speed is comparatively high. In addition, there is some difference between grazing-inflow and grazing-outflow interactions. Finally, an attempt is made to correlate the experimental data in terms of the effective discharge coefficient.

Key words: perforated plates; acoustic impedance; grazing flow; bias flow

1 引言

穿孔板声衬在噪声控制和抑制振荡燃烧等工程中已获得了广泛应用。众所周知, 穿孔板声衬的工作原理是共振吸声, 因而其性能对环境工况特别是频率有很强的选择性, 只能在一定条件达到良好的吸声效果。为克服这一局限, Dean 和 Tester^[1]提出了一种新颖的可控声衬, 即在穿孔板小孔中引入偏流, 通过改变偏流速度调节其声阻抗, 从而获得良好的吸声效果。这种可控声衬改变了穿孔板声衬被动吸声的传统观念, 不但在主

动降噪和主动抑制振荡燃烧上具有很好的应用前景, 而且将其用于机匣处理, 还很有希望实现叶栅颤振的主动控制^[2, 3]。

在工程应用中, 例如在各种工业消声器中、飞机发动机的消声短舱内、燃烧室里, 都不可避免地有流过穿孔板声衬表面的切向气流。另外, 在航空发动机或火箭发动机的燃烧室内, 为了防止安装于燃烧室壁面的穿孔板因过热而烧毁, 通常要在穿孔板小孔中引入冷却气流以降低穿孔板温度; 而且, 对于上面提到的可控声衬, 要人为地在穿孔板小孔中引入偏流以获得良好的吸声效果。因此,

收稿日期: 2001- 10- 30; 修订日期: 2002- 03- 07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59925616); 航空基础科学基金资助项目(99C51088)

作者简介: 张厚武(1972-), 男, 贵州人, 北京航空航天大学动力系硕士生, 主要从事叶轮机非定常流及主动控制研究

偏流对穿孔板声阻抗的影响也是不可回避的。单一流态(切向流或偏流)对穿孔板声阻抗的影响,前人已做了大量的理论和实验工作,然而对于切向流和偏流两种流态并存时如何影响穿孔板声阻抗的研究工作还十分缺乏。本文工作就是对切向流和偏流相互干扰时如何影响穿孔板声阻抗进行实验研究。

2 实验设备及其可靠性验证

2.1 实验设备

在本实验中,使用双传声器法测量穿孔板声阻抗,其实验设备如图 1 所示。驻波管是内径为

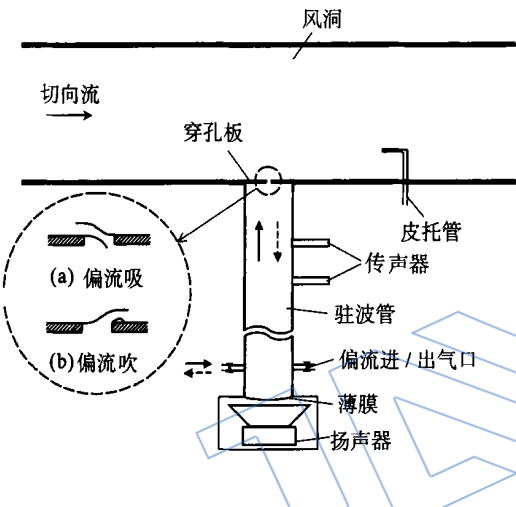


图 1 实验设备示意图

Fig 1 Schematic figure of the experimental setup

35.0 mm 的不锈钢管,一端与功率为 150 W 的扬声器相连,另一端通过转接管与安装在风洞内壁面上的穿孔板相连,保证穿孔板同风洞内壁面平齐。2 个 B&K4133 $\frac{1}{2}$ in 传声器安装在驻波管上,传声器采集到的信号经 B&K2069 放大器放大后,输入计算机算出穿孔板声阻抗。根据文献[4],知道穿孔板声阻抗后,即可按下式求出其吸声系数:

$$\alpha = \frac{4r}{(r + 1)^2 + x^2} \tag{1}$$

其中, x 为相对声抗率, r 为相对声阻率。下面主要讨论流动对穿孔板声阻抗的影响。

切向流是通过风洞引入的,风洞内截面为正方形,其边长为 120 mm。直径为 3 mm 的皮托管引入风洞内,用于测量切向流速度。偏流是由靠近声源端的两旁支管引入的,以两种不同的方式引入——吹气和吸气。旁支管在偏流吸方式下接真空泵,偏流吹方式下接空压机。在扬声器与驻波管连接处加一薄膜,以防止空气泄漏。偏流流量由浮子流量计测量,根据流量可以换算出小孔的偏流速度。

如图 2 所示,穿孔板小孔为圆形或矩形,小孔之间以阵列方式排列(单孔位于穿孔板中心),对矩形小孔,其长端与切向流方向垂直。表 1 列出了穿孔板小孔几何尺寸,其中板 1~3 为圆孔,板 4 为矩形孔, R 为孔径, L 和 W 分别为矩形孔长与宽, T 为板厚, D 为孔间距离, N 为孔数。

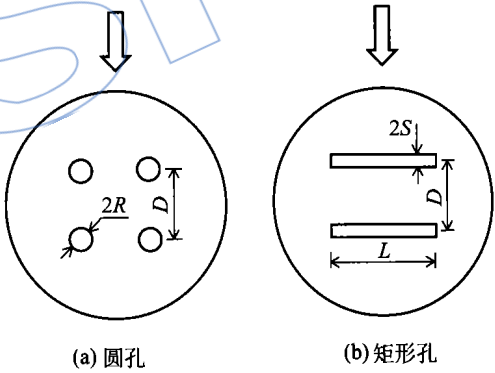


图 2 穿孔板试件几何尺寸: 板厚为 T , 箭头为切向流流动方向

Fig 2 Geometry of the test perforated plates of: The orifices are square-edged and the plate thickness is T ; arrows indicate the direction of grazing flow

表 1 穿孔板试件几何参数

Tab 1 Design parameters of perforated plate

板号	$R(L \times W)/\text{mm}$	T/mm	N 孔数	D/mm	$\sigma/\%$
1	3.5	0.5	1	—	4.00
2	3.5	2.0	1	—	4.00
3	1.5	2.0	4	14.0	2.94
4	12.0×1.0	3.0	2	12.0	2.50

2.2 实验设备的可靠性验证

众所周知, 在没有流动及低声压级下, 圆孔的穿孔板相对声抗率 x 的理论值 (波长远大于驻波管内径) 由下式给出^[5]:

$$x = - \frac{2\pi f}{\sigma c} (1.7R + T) = C_f f \quad (2)$$

其中, R 为小孔半径, T 为穿孔板厚, σ 为板穿孔率, c 为声速, f 为声源频率。从上式可看出, 在一定系数 $C_f = [-2\pi(1.7R + T)/\sigma c]$ 下, 相对声抗率与声源频率 f 成正比。

表 2 测量值 C_f 与计算值 C_f 的比较

Tab 2 Comparison between the experimental results and the calculated values

板号	拟合值	计算值	误差/%
1	- 0.00282	- 0.00294	4.1
2	- 0.00362	- 0.00363	0.26
3	- 0.00281	- 0.00283	0.71

首先用 1 至 3 号板在没有流动及低声压级下进行验证实验。表 2 列出了由实验数据拟合得到的 C_f 同由穿孔板几何尺寸计算的 C_f 的对比, 可以看出, 误差很小, 从而验证了实验设备的可靠性。

3 结果讨论

3.1 零切向流和零偏流情况

3.1.1 零切向流情况

当切向流为零时, 偏流对穿孔板声阻抗的影响已进行了大量的研究。Cummings 和 Eversman^[6] 使用线化 Bernoulli 方程来解释偏流的影响, 他们认为, 穿孔板声阻 r 与气体流过小孔的平均马赫数 M_{ab} 成比例, 其关系如下:

$$r = \frac{1 - \sigma^2 C_v^2}{\sigma^2 C_v^2} M_{ab} \quad (3)$$

其中 C_v 为 vena 收缩系数 (vena 收缩系数是表征喷管截面流动收敛程度的无量纲系数, 定义为 $C_v = A_{vc}/A_0$, 即收缩面积比)。由方程 (3) 算出的声阻正好是小孔定常流动下流阻 $\bar{r}$ 的两倍, $\bar{r}$ 由下式给出:

$$\bar{r} = \frac{1 - \sigma^2 C_v^2}{2\sigma^2 C_v^2} M_{ab} \quad (4)$$

我们知道, 在高声压级下小孔的非线性声阻, 由定常状态的流阻计算可得到很好的近似, 但这

种方法不适用于小孔处有平均流。方程 (3) 和 (4) 表明声阻是流阻的两倍, 其原因是两者都是由 Bernoulli 方程推导得到, 然而在有平均流动时, 小孔处产生的声吸收过程是线性的, 其控制方程为线性方程而不是 Bernoulli 方程。

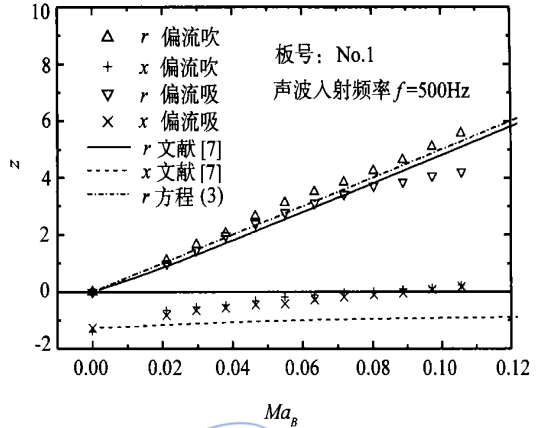


图 3 穿孔板 1 在切向流为零时, 相对声阻抗率 $z = r + ix$ 随偏流马赫数 M_{ab} 的变化关系 (声波入射频率: $f = 500.0 \text{ Hz}$)

Fig 3 Normalized specific acoustic impedance $z = r + ix$ as a function of bias flow Mach number M_{ab} for perforated plate 1 when grazing flow is zero; $f = 500.0 \text{ Hz}$

图 3 绘出板号 1 实验值、方程 (3) 的计算值以及 Howe^[7] 的理论值, vena 收缩系数为 0.7, 接近理想流动值 0.61, 两者间的差别可能是小孔锐缘处加工误差造成的。从图中可知, 声阻的实验值与理论值符合得很好, 而对于声抗, 实验结果的绝对值下降快于 Howe 的理论值。偏流吹和偏流吸的实验数据基本上一致, 但在高偏流流速下, 二者还是有一些差别。

3.1.2 零偏流情况

在偏流为零的情况下, 切向流对穿孔板声阻抗影响的实验结果同前人的是一致的, 其规律是: 声阻随切向流速的增加而线性增加, 而声抗绝对值略有下降。这里不再单独给出实验数据。

3.2 切向流与偏流吸的相互干扰

在本实验中, 偏流有两种不同的方式: 偏流吸和偏流吹。图 4 到图 6 给出了切向流与偏流吸相互干扰时的声阻抗, 从图中可知, 偏流吸和切向流都使穿孔板声阻增加, 但只有在很低的偏流吸下, 切向流才有显著影响, 而且在偏流吸流速较高时,

偏流的影响起主导作用。对图 4 到图 6 中满足 $Ma_G = 0.174$ 和 $Ma_B > 0.1$ 的数据进行简单分析, 计算 $|r - r_n|/r_n$, 其中 r_n 是无切向流时的声阻, 计算结果 1 号板为 10%, 3 号板 8%, 4 号板 10%。因此, 当 $Ma_B > 0.1$ 时, 虽然切向流流速远大于偏流流速, 但切向流对声阻的影响仍很小。同声阻相比, 声抗没有很强的规律, 一般为: 切向流或偏流

流速增加时, 声抗的绝对值减小, 在某些情况下, 高偏流时的声抗甚至为正。

无量纲板厚(T/R 或 T/S) 从 0.14 到 3.0 变化, 但从图 4~6 对比来看, 无量纲板厚对声阻抗没有明显的影响。

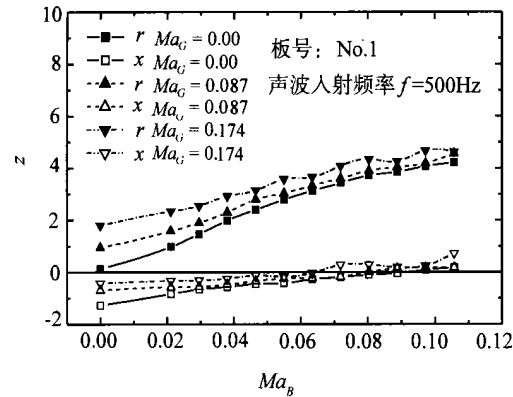


图 4 穿孔板 1 在不同切向流流速下, 相对声阻抗率 $z = r + ix$ 随偏流(吸)马赫数 Ma_B 的变化 (声波入射频率: $f = 500.0 \text{ Hz}$)

Fig 4 Normalized specific acoustic impedance $z = r + ix$ as a function of bias flow (inflow) Mach number Ma_B at different grazing flow speeds for perforated plate 1; $f = 500.0 \text{ Hz}$

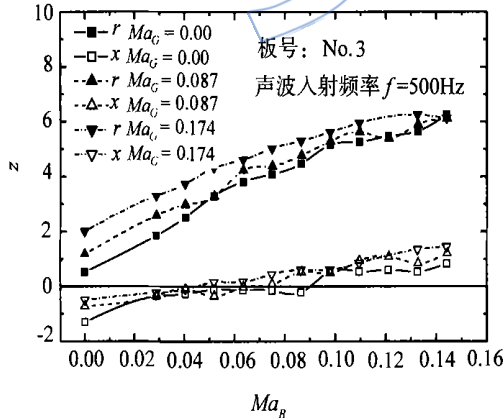


图 5 穿孔板 3 在不同切向流流速下, 相对声阻抗率 $z = r + ix$ 随偏流(吸)马赫数 Ma_B 的变化 (声波入射频率: $f = 500.0 \text{ Hz}$)

Fig 5 Normalized specific acoustic impedance $z = r + ix$ as a function of bias flow (inflow) Mach number Ma_B at different grazing flow speeds for perforated plate 3; $f = 500.0 \text{ Hz}$

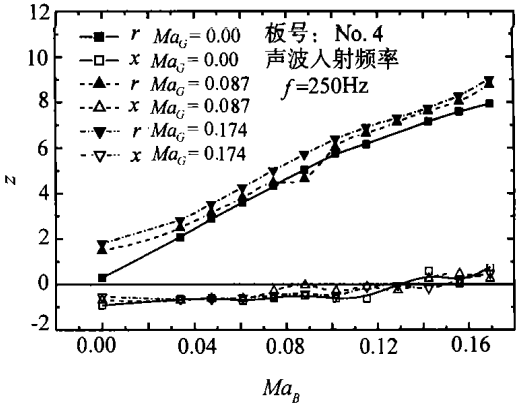


图 6 穿孔板 4 在不同切向流流速下, 相对声阻抗率 $z = r + ix$ 随偏流(吸)马赫数 Ma_B 的变化 (声波入射频率: $f = 250.0 \text{ Hz}$)

Fig 6 Normalized specific acoustic impedance $z = r + ix$ as a function of bias flow (inflow) Mach number Ma_B at different grazing flow speeds for perforated plate 4; $f = 250.0 \text{ Hz}$

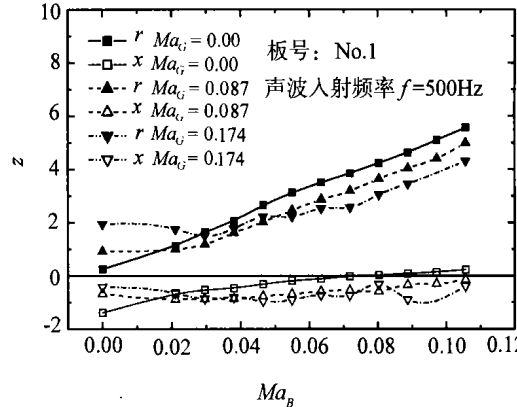


图 7 穿孔板 1 在不同切向流流速下, 相对声阻抗率 $z = r + ix$ 随偏流(吹)马赫数 Ma_B 的变化 (声波入射频率: $f = 500.0 \text{ Hz}$)

Fig 7 Normalized specific acoustic impedance $z = r + ix$ as a function of bias flow (outflow) Mach number Ma_B at different grazing flow speeds for perforated plate 1; $f = 500.0 \text{ Hz}$

3 3 切向流与偏流吹的相互干扰

图 7 到图 9 绘出了切向流与偏流吹相互干扰

时的声阻抗,其结果明显不同于偏流吸情况。在低偏流流速下,声阻随切向流流速的增加而增加,但在相对较高的偏流流速时,声阻随切向流流速的增加而减小。以图 7 为例,在零偏流下,切向流从零增加到 0.087 和 0.174 时,声阻从 0.25 (零切向流时值)增加到 0.98 和 1.94;而偏流为 0.105 马赫数时,声阻从 5.56 (零切向流时值)降到 4.99

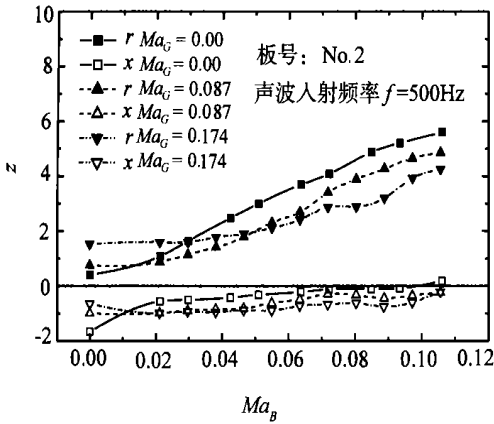


图 8 穿孔板 2 在不同切向流流速下, 相对声阻抗率 $z = r + ix$ 随偏流(吹)马赫数 Ma_g 的变化 (声波入射频率: $f = 500.0 \text{ Hz}$)

Fig 8 Normalized specific acoustic impedance $z = r + ix$ as a function of bias flow (outflow) Mach number Ma_g at different grazing flow speeds for perforated plate 2; $f = 500.0 \text{ Hz}$

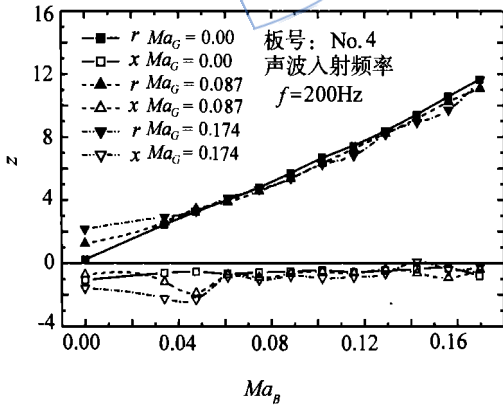


图 9 穿孔板 4 在不同切向流流速下, 相对声阻抗率 $z = r + ix$ 随偏流(吸)马赫数 Ma_g 的变化 (声波入射频率: $f = 200.0 \text{ Hz}$)

Fig 9 Normalized specific acoustic impedance $z = r + ix$ as a function of bias flow (inflow) Mach number Ma_g at different grazing flow speeds for perforated plate 4; $f = 200.0 \text{ Hz}$

和 4.32。我们把后者称为“切向流负效应”。同偏流吸类似,声抗也没有很好的规律,一般是:在低平均流流速下,声抗绝对值随切向流或偏流流速的增加而下降;在相对较高平均流速下,声抗受切向流和偏流影响不明显,而且逐渐趋于定值。

比较图 7~9 发现,在切向流和偏流吹干扰情况下,穿孔板无量纲厚度有一定影响,随无量纲板厚增加,所谓的“切向流负效应”逐渐减弱。在所进行的实验中,板 4 的无量纲厚度最大,图 9 表明其“切向流负效应”几乎可以忽略,但也应注意到板 4 小孔为矩形,因此也可能这种矩形孔就没有“切向流负效应”。

3.4 数据关联和有效流量系数

Rogers 和 Hersh^[8]对切向流和偏流相互影响在定常状态下小孔的流阻做了研究。把所测得的声阻与文献[8]中的流阻进行对比,发现二者有相似特征,如偏流吸与偏流吹同切向流相互干扰的差别,以及所谓的“切向流负效应”。然而,两者在定量上符合得较差。

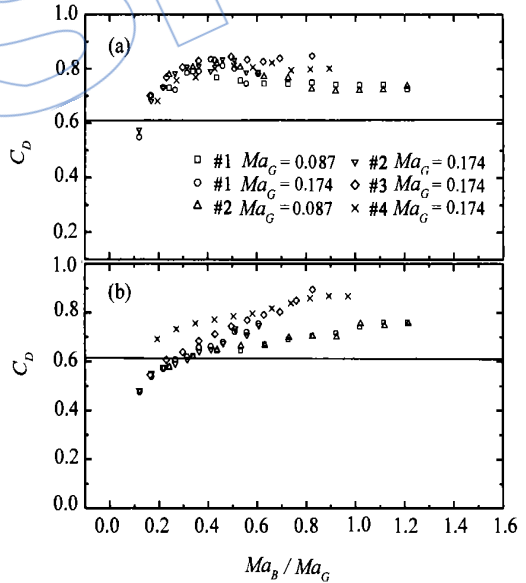


图 10 有效流量系数随偏流马赫数与切向流马赫数比值的变化关系: (a) 偏流吹; (b) 偏流吸

Fig 10 Effective discharge coefficient as a function of the ratio of bias flow Mach number to grazing flow Mach number: (a) outflow; (b) inflow

类似文献[8],我们也尝试使用有效流量系数把不同实验条件下的数据关联起来,在 3.1 提到,偏流流动下小孔的声阻是定常状态下流阻的两倍,因此,使用下列方程来计算小孔的声阻:

$$r = \frac{M_{aB}}{\alpha C_D^2} \quad (5)$$

其中 C_D 为有效流量系数。在图 10 中, 绘出了有效流量系数随偏流马赫数与切向流马赫数比值的变化关系, 对偏流吹和偏流吸分开处理。在偏流吹下, 得到很好的数据相关, 而且对于大的偏流马赫数, 有效流量系数达到了所期望的零切向流时的值。然而, 在偏流吸下, 数据有较大的发散, 而且对于大的偏流马赫数, 有效流量系数大大高于零切向流时的值。

4 结 论

本文对有关切向流与偏流(吹或吸)相互干扰下的穿孔板声阻抗进行了实验研究, 并得出如下结论:

(1) 切向流- 偏流吸和切向流- 偏流吹相互干扰对穿孔板声阻的影响规律是不同的。当偏流速度较高时, 在前一种情况下声阻随切向流流速的增加而增加, 而在后一种情况下声阻随切向流流速的增加反而下降。

(2) 同声阻相比, 声抗变化的规律性较差, 从总体上看, 在低平均流(偏流或切向流)流速下, 声抗绝对值随切向流和偏流流速的增加而降低。在较高平均流速度下, 声抗受平均流的影响不明显, 而且随流速增加而逐渐趋于定值。

(3) 由于切向流的存在, 削弱了偏流流速对穿孔板声阻的调控, 但当偏流速度相对较高时, 偏流对声阻的影响仍起主导作用。在偏流吸方式下, 当

偏流马赫数大于 0.1 时, 切向流的影响几乎可忽略。在所进行的实验中, 在偏流吹方式下大无量纲厚度的穿孔板声阻抗受切向流的影响最小。

(4) 通过有效流量系数, 把不同实验条件下的数据关联起来, 在偏流吹方式下得到很好的关联结果, 但偏流吸方式有很大的发散, 对于这种不期望的数据发散, 需要进一步研究加以解释。

参考文献

- [1] Dean P D, Tester B J. Duct Wall Impedance Control as an Advanced Concept for Acoustic Suppression[R]. NASA CR-134998, 1975
- [2] Zhao H, Sun X. Active Control of Plate Acoustic Impedance[J]. AIAA Journal, 1999, 37: 825- 831.
- [3] Sun X, Jing X, Zhao H. Control of Blade Flutter by Smart Casing Treatment[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17: 248- 255
- [4] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.
- [5] Beranek L L. Acoustics[M]. New York: McGraw-Hill, 1954
- [6] Cummings A, Eversman W. High Amplitude Acoustic Transmission Through Duct Terminations Theory[J]. Journal of Sound and Vibration, 1983, 91: 503- 518
- [7] Howe M S. On the Theory of Unsteady High Reynolds Number Flow Through a Circular Aperture[J]. Proceedings of Royal Society of London, 1979; A 366: 205- 223
- [8] Rogers T, Hersh A S. The Effect of Grazing Flow on the Steady State Resistance of Square-Edged Orifices[R]. AIAA Paper, 1975: 75- 493

(责任编辑 杨再荣)