

# 一种调频式共振消声器的设计\*

吕海峰, 潘宏侠, 黄晋英

(中北大学机械工程与自动化学院 太原, 030051)

**摘要** 采用微机电系统(micro electrical mechanism system,简称MEMS)工艺制作了一种气泡致动器,该致动器结构可整体弯曲变形,适于安装在消声器内部。通过调节致动器驱动压力的大小,控制气泡的变形高度,导致消声器的共振腔体积发生变化,实现对多个频率噪声的抑制。试验表明,当致动器的驱动压力分别为0.04和0.07 MPa时,消声器的共振频率由745 Hz变化为736和731 Hz,所设计的消声器实现了对多个频率噪声的抑制作用。

**关键词** 消声器; 致动器; 噪声; 共振频率

**中图分类号** TK413.4<sup>+</sup>7; TH12

## 引言

噪声主动控制技术已逐渐成为噪声控制的发展趋势。然而主动控制技术的缺点主要是高采样频率和高速处理芯片昂贵,控制算法复杂,如果控制不当,由于能量的输入还会引入更多的噪声。将主动控制与被动控制相结合的噪声控制技术引起了广泛关注,出现了自适应-被动噪声控制的技术与装置。亥姆霍兹共振腔消声器通过机械装置改变共振腔的容积、开孔数量和孔径大小等,可以对某一频带的噪声具有良好的抑制作用<sup>[1]</sup>。Lamancusa提出了一种共振腔容积可变的消声器,在共振腔内放置一活塞,通过检测发动机的转速调整活塞在共振腔内的位置,从而改变共振腔的容积,将插入损失减小30 dB<sup>[2]</sup>。J. M. De Bedout<sup>[3]</sup>在共振腔内通过控制绕中心轴旋转的叶片,实现共振腔体积的改变,其体积改变范围为1 491~14 093 cm<sup>3</sup>。邓兆祥等<sup>[4]</sup>设计了一种半主动排气消声器,其工作原理是通过自动调节不同条件下气流通道面积以达到发动机低速时减少低频噪声、高速时降低背压和气流再生噪声。上述可调频式消声器的控制精度不高,机械装置复杂,不便进行装配,同时大量配件的存在也减少了消声器内部的有效空间。

随着MEMS技术的不断发展,各种微小型传感器、致动器已经广泛应用于工程技术的各个领域。MEMS技术制造的器件具有体积小、功能多、重量

轻、谐振频率高、响应时间短并且稳定可靠的优点。笔者将MEMS器件用于噪声控制中,通过驱动致动器发生动作改变共振腔的体积,来达到对多个频率的噪声进行抑制的目的,通过理论分析与试验验证了所设计消声器对噪声的抑制效果。

## 1 共振消声器原理

共振腔消声器是由一段开有若干消声孔的管道和管外一个密闭的空腔所组成<sup>[4]</sup>。消声孔和空腔组成一个弹性振动系统,当气流的声波频率和共振腔振动系统的固有频率相同时,这个振动系统就发生共振。孔颈中具有质量的空气柱,使其运动速度加快,摩擦阻力增大,大量声能转化为热能,从而在噪声传播途径上进行控制<sup>[5]</sup>,达到消声的目的。

共振腔消声器的共振频率表达式如下

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{G}{V}} \quad (1)$$

其中: $c$ 为声速; $V$ 为共振腔体积; $G$ 为传导率,是一个以长度为单位的物理量。

由式(1)可以看出,体积的改变对共振频率的改变是有影响的,体积越大,共振频率越低;体积变小,共振频率则升高。

传导率为

$$G = \frac{n\pi d^2}{4(t + 0.8d)} \quad (2)$$

\* 中北大学自然科学基金资助项目

收稿日期:2011-03-11;修改稿收到日期:2011-05-29

其中: $d$ 为孔径; $t$ 为板厚; $n$ 为消声孔个数。

消声器元件的消声效果通常用4个评价指标来评定,即传递损失、插入损失、声压级差和声压级。消声器的传递损失只与结构本身有关,而不受源特性和尾管辐射特性的影响,是消声器声学性能研究中最常用的指标。

$$TL = 10 \lg \left\{ 1 + \left[ \frac{\sqrt{GV}}{2S} / \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right]^2 \right\} \quad (3)$$

其中: $S$ 为消声器主通道的横截面积; $f$ 为噪声频率;TL为传递损失。

通过式(3)可以看出,传递损失还取决于消声器的频率,其峰值在共振频率处。因此,当消声器的结构一定时,它只对某一频率的噪声具有较好的消声效果,而车辆的排气噪声频率是随转速而发生变化的,因此对其他频率噪声的抑制效果不明显。可调频的共振消声器能适应此种频率改变的噪声,当噪声变化时,系统先采集信号,识别噪声的频率特性,进而自动调节某些参数,使其固有频率紧密地随噪声源频率而变化,并根据反馈信号不断进行必要的调整,使消声器始终处于共振状态,从而实现噪声的衰减。

笔者在消声器内部放置微小型致动器,通过致动器发生变形改变共振腔的体积,从而使消声器实现对多个频率噪声的抑制。

## 2 气泡致动器

气泡致动器是一种采用MEMS技术制作的小型致动器件,具有变形大、线性度好、质量轻、响应频率高等特点。现有的气泡致动器主要用于飞行器的流动控制中,通过气泡致动器改变飞行器的气动表面轮廓,从而对飞行器的俯仰、偏航及滚转等机动性能进行辅助控制<sup>[6-8]</sup>。笔者主要研究气泡致动器对消声器声学性能的影响。

### 2.1 工作原理

气泡致动器的工作原理如图1所示。致动单元中的弹性薄膜两侧存在压力差时,弹性薄膜发生膨胀变形,形成气泡。将气泡致动器安装在消声器共振腔的侧壁上,通过密封罩将气泡致动器薄膜密封,从而形成一个密闭腔体。向腔体内通入高压气体或泵出气体形成低压腔时,弹性薄膜两侧由于压力差的存在发生变形,从而使共振腔的尺寸增大或减小,导致消声器的共振频率改变。

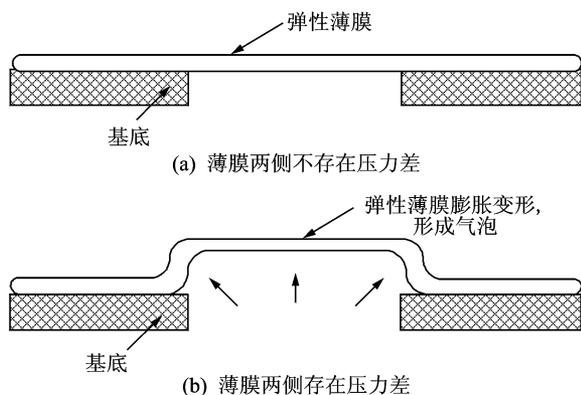


图1 气泡致动器的形成机理

### 2.2 弹性薄膜的尺寸

弹性薄膜在压力作用下形成气泡的大小与弹性薄膜的尺寸以及压力的大小相关。在相同压力作用下,弹性薄膜尺寸越大,其中心位移也越大,即气泡的高度越大,同时也要考虑弹性薄膜与基底的黏结强度。硅橡胶与金属的黏接强度为0.8~1.0 MPa<sup>[9]</sup>,当弹性薄膜发生变形产生的应力大于与基底的黏结强度时,弹性薄膜会从基底脱落,导致器件失效。因此,采用有限元法对压力作用下薄膜的变形情况进行分析。

分别选取边长为3,6,9,12 mm、厚度为239 μm的正方形弹性薄膜进行分析,硅橡胶的弹性梁模量选取为7 MPa<sup>[10]</sup>,采用Mooney-Rivlin超弹性材料模型,压力范围从10 kPa递增到110 kPa。弹性薄膜的变形情况如图2所示。

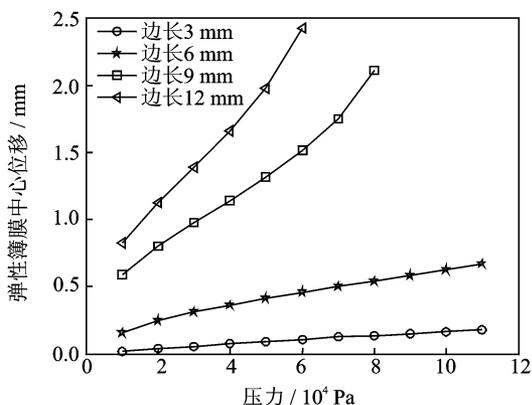


图2 压力作用下弹性薄膜的中心位移

由图2可以看出,弹性薄膜越小,相同压力作用下中心位移越小。边长为3和6 mm的弹性薄膜在压力作用下位移的线性明显优于边长为9和12 mm的弹性薄膜。边长为3和6 mm的弹性薄膜在所述压力

(10~110 kPa)作用下所产生的最大应力均小于硅橡胶与金属基底的黏结强度,因此不会发生脱落现象。而边长为9 mm的薄膜在受到80 kPa的压力作用时,最大应力为1.2 MPa。边长为12 mm的薄膜在50 kPa的压力作用时,最大应力为1.34 MPa,均超过了黏结强度,使弹性薄膜从基底脱落,导致失效。图3所示为边长为9 mm的薄膜受到80 kPa压力作用时的应力分布情况。由图3可以看出,其最大应力发生在各边长的中点,应力值为1.2 MPa,超出了弹性薄膜与金属基底的黏结强度,会发生弹性薄膜脱落现象。

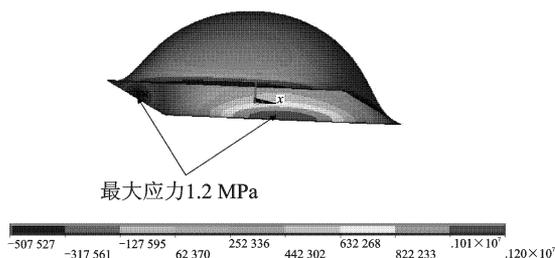


图3 边长为9 mm的薄膜在80 kPa压力下的应力分布

综上所述,当弹性薄膜边长小于6 mm时,虽然压力作用下薄膜变形的线性较好,但薄膜中心形变量小于0.6 mm,在后续试验中不宜进行控制和观测。当边长位于9~12 mm之间时,薄膜中心形变量较大,同时考虑到黏结强度的制约,应选择合适的压力范围。最终选取弹性薄膜的边长尺寸为10 mm,压力范围为10~70 kPa。

### 2.3 致动器的制作工艺

弹性薄膜是气泡致动器的关键结构。当两侧存在压力差时,弹性薄膜应迅速膨胀变形,形成气泡,并能承受一定的载荷。当压差去除后,弹性薄膜随即恢复初始状态。处于高弹态(也叫橡胶态)的硅橡胶,可恢复的变形量达100%~1 000%,因此弹性薄膜由耐腐蚀、气密性良好的硅橡胶制成。

液态硅橡胶通过匀胶机旋涂在基底表面,固化后形成弹性薄膜。为提高弹性薄膜厚度的一致性,在制作过程中采取了以下措施<sup>[11]</sup>。

1) 提高基片的表面质量。如果基片表面粗糙,表面张力将增加溶液滞留原处的能力,从而影响硅橡胶溶液在基片表面上的流动,最终影响弹性薄膜厚度的一致性。溶液层越薄,影响越大,因此在旋转涂胶前,对铜箔进行打磨、净化处理,使基片光滑。

2) 提高硅橡胶溶液覆盖在基片表面的均匀性。在旋涂前,硅橡胶溶液尽量均匀地散布在铜箔表面,

避免溶液在铜箔中心聚集,以减小中心处薄膜的厚度。

3) 控制旋转台上方气流。将覆盖有硅橡胶溶液的基片密封在匀胶机的玻璃罩内,使基片上方空气流动处于层流状态,密封罩内充满高浓度的饱和溶剂蒸汽,这样可明显提高胶膜层厚度的均匀性。

采用激光显微镜测量,硅橡胶弹性薄膜厚度为239  $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度小于1%。

致动器的制作工艺如下:

1) 将硅橡胶旋涂在铜箔表面,固化后形成弹性薄膜;

2) 使用涂胶机将铜箔的另一侧旋涂感光材料,经过加热,感光材料固化形成感光薄膜;

3) 印制菲林板,将绘制好的气泡形状印制在菲林板上;

4) 将菲林板放在感光薄膜上用曝光机曝光;

5) 将上述薄板放入显影剂中直至轮廓清晰;

6) 使用三氯化铁刻蚀,直至完全刻蚀掉气泡轮廓内的铜箔,露出硅橡胶薄膜;

7) 蚀刻好后的覆铜板放入脱模剂液中,直至感光薄膜完全脱落。

经过上述步骤加工的致动单元如图4所示。致动单元为10 mm×10 mm的正方形,为了减小薄膜变形过程中可能出现的应力集中,正方形的4个顶角均采用0.5 mm的倒角。可以看出,所制作的致动单元可整体弯曲,适于方形、圆形等异型消声器结构。

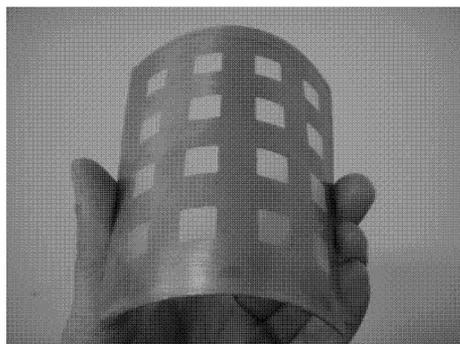


图4 柔性气泡致动器

## 3 试验

### 3.1 消声器结构设计

为了便于进行加工,消声器的共振腔设计为方形,材料为有机玻璃,结构参数如表1所示。

表1 消声器结构参数

名称	数值/mm
共振腔尺寸	79×79×254
壁厚	3
穿孔管	∅35×334
穿孔管壁厚	3
消声孔	∅3×204

消声器的结构参数确定后,根据式(3)计算得到该共振消声器的共振频率为759 Hz。计算传递损失曲线如图5所示。由图5可以看出,在759 Hz时,消声器的传递损失最大,说明消声器对这一频率的噪声衰减效果最为明显。

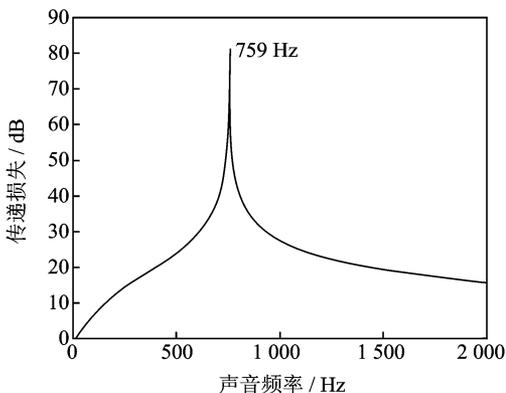


图5 消声器传递损失

为了将致动器安装在消声器上,在消声器的侧壁上加工出2个8 cm×3 cm的矩形槽,将致动薄膜黏附其上,最后安装方形密封罩,使用环氧胶进行密封。致动薄膜与方形密封罩之间形成密闭腔体,当腔体内的空气被泵出后,弹性薄膜两侧形成压力差,导致薄膜变形,使消声器的共振腔体积发生改变。方形顶罩留有2个气孔,一个用于连接抽气泵,另一个连接调节阀,可对驱动压力进行调节。

### 3.2 消声器结构设计声学试验系统

试验装置如图6所示,主要由以下部分组成。

- 1) 信号发生器:输出不同频率的正弦信号;
- 2) 功率放大器:对信号发生器输出的信号进行放大,输入到扬声器;
- 3) 扬声器:是系统的声源;
- 4) 消声器:侧壁安装有致动器,致动器发生动作时,共振腔的体积发生改变,从而对不同频率的噪声进行衰减;
- 5) 采集系统:由麦克风(声压传感器)、采集设备组成,完成对消声器出口处声压信号的采集,采样频率设为5 k,每次采样5 s,计算平均输出值。

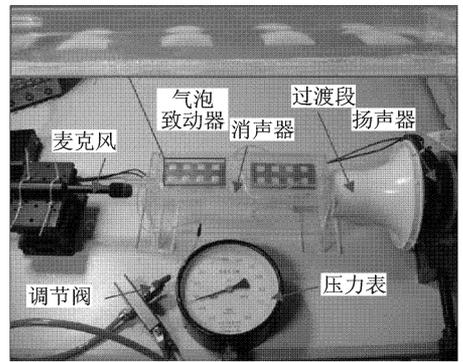


图6 调频式共振消声器试验系统

### 3.3 试验结果

试验过程中,致动器的弹性薄膜在不同的驱动压力作用下鼓起的高度不相同,因此分别测试了无致动、驱动压力为0.04和0.07 MPa时麦克风的输出,测试结果如图7所示。

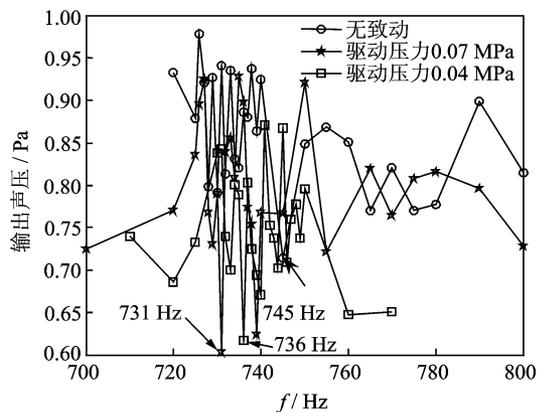


图7 试验结果

声音的频率选取在700~800 Hz,信号发生器的驱动电压为3 V。由试验结果可以看出,致动器不发生动作时,声压传感器的输出曲线在745 Hz处发生明显的跳变,声压由0.92 Pa降至0.71 Pa,变化了22.8%,说明消声器对这一频率的声音抑制作用最为明显。消声器的固有频率经过计算为759 Hz,由于加工过程中存在误差,因此造成消声器的实际固有频率为745 Hz。通过调节控制阀,将驱动压力调至0.04 MPa时,气泡的弹性薄膜凸起变形,使得消声器的共振腔体积变大,此时声压曲线在736 Hz处,由0.79 Pa变化到0.62 Pa,改变了21.9%。当驱动压力调节至0.07 MPa时,消声器对频率为731 Hz的声音衰减作用最为明显,这一频率的声音通过消声器后,声压减小了23.7%。由上述分析可知,致动器发生动作时,消声器的共振腔体积变大,从而导致共振频率减小,能够对多个频率的声音进行抑制,这与

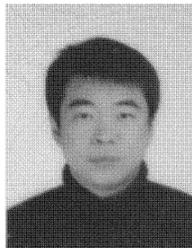
理论分析得到的结果相一致。

## 4 结束语

笔者采用MEMS工艺加工了一种气泡型致动器,致动单元采用柔性材料制作,因此可以整体弯曲变形,适用于各种异型消声器结构。将所制作的致动器安装在消声器上,气泡致动器发生动作时,会使消声器共振腔的体积发生改变,导致共振频率随之变化,实现对不同频率噪声的抑制。试验结果表明,当致动器不发生动作时,消声器的共振频率为745 Hz。当驱动压力为0.04和0.07 MPa时,消声器共振频率分别变化成736和731 Hz。通过调节气泡致动器驱动压力的大小,消声器对不同频率噪声产生了显著的抑制作用。

### 参 考 文 献

- [1] 靳国永,张洪田,李玩幽,等. 基于可调亥姆霍兹共振器的封闭空间噪声自适应半主动控制[J]. 声学学报, 2010,35(3):309-320.  
Jin Guoyong, Zhang Hongtian, Li Wanyou, et al. Adaptive semi-active noise control in enclosure using self-tuning Helmholtz resonators [J]. Acta Acust, 2010,35(3):309-320. (in Chinese)
- [2] Lamancusa S J. An actively tuned, passive muffler system for engine silencing[C]//Proceedings of Noise Con 87. [S.l.]: State College, 1987:313-318.
- [3] Bedout J M d. Adaptive-passive noise control with self-tuning Helmholtz resonators [D]. West Lafayette: Purdue University, 1996.
- [4] 阮登芳,邓兆祥,诚杨. 共振式消声器声学性能分析[J]. 内燃机工程,2006,27:66-70.  
Ruan Dengfang, Deng Zhaoxiang, Cheng Yang. Analysis of acoustic performance of the resonant silencer[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2006,27:66-70. (in Chinese)
- [5] 雷焯,盛美萍,肖和业. 直升机舱内噪声预估与分析[J]. 振动、测试与诊断,2010,30(6):617-620.  
Lei Ye, Sheng Meiping, Xiao Heye. Prediction and analysis of helicopter cockpit noise[J]. 2010,30(6):617-620. (in Chinese)
- [6] Huang A, Folk C, Silva C. et al. Application of MEMS devices to delta wing aircraft: from concept development to transonic flight test[C]//39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV: [s. n.], 2001.
- [7] Ho C M, Huang P H, Lew J, et al. MEMS: an intelligent system capable of sensing-computing-actuating [C]//Proceed of 4th International Conference on Intelligent Materials, 1998. Tokyo, Japan: Society of Non-Traditional Technology, 1998:1-4.
- [8] Grosjean C, Lee G B, Tai Y C. Micro balloon actuators for aerodynamic control[C]//Proceeding of the IEEE MEMS'98 Workshop. Heidelberg: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998:166-171.
- [9] 贾宝新. 提高硅橡胶撕裂强度和粘接强度的研究[J]. 火箭推进,2005,31(5):43-46.  
Jia Baoxi. Study on improvement of tearing and felling strength of the silicon rubber[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005,31(5):43-46. (in Chinese)
- [10] Vieider C, Ohman O, Elderstig H. A pneumatically actuated micro valve with a silicone rubber membrane for integration with fluid-handling systems[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX. Stockholm, Sweden: [s. n.], 1995.
- [11] 邱克强,徐向东,洪义麟,等. 衍射光学元件制作中的基片涂胶方法[J]. 微细加工技术,2007(1):19-23.  
Qiu Keqiang, Xu Xiangdong, Hong Yilin, et al. Techniques of coating wafers used for fabrication of diffraction optical elements [J]. Microfabrication Technology,2007(1):19-23. (in Chinese)



**第一作者简介:**吕海峰,男,1981年4月生,讲师。主要研究方向为MEMS传感器与致动器以及测试技术。曾发表《用于壁面切应力测量的微传感器设计》(《机械工程学报》2010年第46卷第24期)等论文。

E-mail:lhfzjf@163.com