

# 参量阵扬声器在管道噪声控制中的研究\*

武帅兵 吴 鸣 杨 军<sup>†</sup>

(中国科学院声学研究所噪声与振动重点实验室、通信声学实验室 北京 100190)

**摘要** 为了解决管道有源噪声控制中声反馈造成的系统复杂度和计算量的增加,文中引入参量阵扬声器作为次级声源,利用其强指向性减小控制系统的声反馈。为了验证该方法可行性,本文分别在直管和 L 管中,对 600 Hz 单频噪声和频率范围为 500 Hz~1000 Hz 的窄带噪声进行了管道有源噪声控制,同时测量了参量阵扬声器的管内声场和降噪范围。结果表明,参量阵扬声器声反馈小,在没有声反馈补偿的条件下对单频噪声的降噪效果基本达到了声反馈补偿条件下普通扬声器的降噪效果,对窄带噪声的降噪效果稍差。此外,通过测量管道声场和降噪量,确定了参量阵扬声器的降噪区域为误差传感器下游整个管道,降噪面积为管道整个截面。这说明参量阵扬声器作为次级声源降低了系统的复杂度和算法的计算量,并取得了较好的降噪效果。

**关键词** 管道有源噪声控制,参量阵扬声器,声反馈

**中图分类号:** O429

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-310X(2013)06-0439-07

## An investigation of parametric array loudspeakers in active noise control of a duct

WU Shuaibing WU Ming YANG Jun

(Key Laboratory of Noise and Vibration Research and Communication Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** To solve the problem that the acoustic feedback raise the complexity of the system and computation of algorithms in active noise control (ANC) of ducts, the parametric array loudspeakers were introduced as the secondary source in this paper. The high directivity sound beam reduced the acoustic feedback of parametric array loudspeakers. To verify the method, experiments of parametric array loudspeakers in ANC of straight and L-type ducts have been conducted for 600 Hz single-tone noise and 500 Hz-1000 Hz narrow-band noise. The experimental results show that the parametric array speakers have a smaller acoustic feedback. Without feedback compensation, the noise reduction of single-tone noise is comparable with loudspeakers, whereas the attenuation amount of the narrow-band noise is less. Furthermore, by measuring sound field of the duct and noise attenuation, the reduction regions were identified to be the entire downstream from error microphone, and the reduction areas were the entire transverse sections of the

2013-03-11 收稿; 2013-05-20 定稿

\*国家自然科学基金资助项目(11004217, 11074279, 11174317)

作者简介: 武帅兵 (1984-), 男, 河南许昌人, 博士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

吴鸣 (1982-), 男, 副研究员, 硕士生导师。

杨军 (1968-), 男, 研究员, 博士生导师。

<sup>†</sup>通讯作者: 杨军, E-mail: junyang.ioa@gmail.com

duct. The experiments demonstrate that the performance of noise cancellation is remarkable and the complexity of the system and computation of algorithms has been reduced, when the parametric array loudspeakers were used as the secondary source.

**Key words** Active noise control, Parametric array loudspeakers, Acoustic feedback

1 引言

管道有源噪声控制相对于被动噪声控制，具有体积小，成本低的优点，因此得到了广泛的应用。对于管道有源噪声控制的前馈系统，次级声源输出的声波不仅向管道下游传播抵消噪声，同时向管道上游辐射被参考传声器采集，干扰参考信号，这个现象被称为声反馈。次级声源到参考传声器的路径被称为声反馈路径。

声反馈轻则降低有源噪声控制的效果，严重时则导致控制系统发散，降低控制系统的稳定性，因此有效地解决声反馈对管道有源噪声控制意义重大。减小声反馈的研究主要有声反馈的抵消网络、传声器位置优化和次级声源指向性等。

声反馈抵消网络与电话系统的回声抵消技术<sup>[1]</sup>类似。通过电子网络来模拟次级声源的声反馈网络，从参考传声器信号中减掉声反馈网络的输出，得到初级声源参考。一般情况下，可以通过离线的方法<sup>[2]</sup>对反馈通道进行建模，这样可以减少算法的复杂度，不过其性能则会因为声反馈通道的变化受到影响。因此一些学者<sup>[3-4]</sup>开始研究在线的声反馈抵消网络的解决方案，这虽然能够解决反馈通道变化带来的影响，但是系统中存在至少两个自适应滤波器，因此系统也变得复杂。且两个自适应滤波器系数更新时存在相互干扰，特别是在反馈通道变化较大的时候，一定程度上会影响到系统稳定性。此外，在线声反馈不可避免的会引入新的噪声，这也是在线声反馈抵消网络的缺陷之一。

对于利用优化传声器位置减小声反馈方面，1988 年 Hamada<sup>[5]</sup>提出了一个简单的方法，将误差传声器布放到参考传声器关于次级声源对称的位置，这样反馈信号可以通过两个传声器信号的减法去除。但是对于与噪声源强相关性的反馈信号，此方法处理结果不理想。1993 年 Kuo<sup>[6]</sup>提出另外一种位置优化减小声反馈的方法，在他的文章中设计与主管道夹角 45°的旁支管放置次级声源，通过斜入射的方式减小了对参考传声器的影响，这种方法

对声反馈减小幅度有限。

对于利用次级源指向性减小声反馈，1972 年 Jessel<sup>[7]</sup>提出利用了偶极子的单指向性扬声器作为次级声源，通过对两个扬声器做一定的相位延时减小声反馈，但是整个系统需要完全两套硬件，增加系统体积且代价较高。1981 年沙家正等人<sup>[8]</sup>进行了改进，在第二个扬声器前加入延时网络，用于节省硬件，但是此延时网络只能用硬件来实现，对于单频噪声延时准确，但是对全频带噪声不够理想。此外，1973 年 Swinbanks<sup>[9]</sup>设计了多极系统，此系统次级声源一般需要两个以上的环形声源，每个环形声源有包含四只扬声器。这样安排来得到较好的指向性，从而消除声反馈，不过可以看出该系统过于复杂，不利于推广使用。

参量阵扬声器利用两个频率的原波在介质的非线性作用产生差频声，相比于普通扬声器，参量阵扬声器在低频和高频均具有更强的指向性<sup>[10]</sup>，且不存在旁瓣。根据这一特点，参量阵扬声器作为次级声源在自由场的噪声控制研究受到了国内外学者的关注。2005 年 Brooks 等人<sup>[11]</sup>通过理论分析和实验相结合的方法探讨了参量阵扬声器用于局部声场控制的可行性。虽然可以作为次级声源进行有源噪声控制，但由于参量阵原理上的局限，对低频噪声的控制较为困难。参量阵扬声器的谐波失真较高，这不利于声场的控制，需要在预处理算法上有所改进。2006 年该研究小组 Kidner 等人<sup>[12]</sup>又研究了参量阵扬声器和虚拟传声器技术相结合的有源噪声控制系统，但仅限于理论探讨。虽然参量阵扬声器存在一些缺陷，但是研究学者一直希望利用其优点在声场控制中得到应用。2010 年日本东京都大学的 Tanaka 等人<sup>[13]</sup>利用波束偏转技术使参量阵扬声器能够在不同的方向上进行单频声场的控制，并取得了较好的效果。但是由于参量阵扬声器的原波也具有较强的指向性，因此波束偏转后目标方向上的声压相比偏转前会有所降低，因此在 2011 年该研究小组<sup>[14]</sup>采用了弧形的参量阵扬声器，通过反射的方法，产生与初级噪声源相同的声场进行了全局

的声场控制，取得了较好的效果。

参量阵扬声器在自由场的有源噪声控制已经取得了一定进展，然而利用强指向性的参量阵扬声器进行管道有源噪声控制目前还无人研究。本文将参量阵扬声器作为次级声源进行管道有源噪声控制，以其声反馈小的优点降低控制算法计算量。

2 自适应控制算法

FxLMS (Filtered-x least mean square) 算法作为有源噪声控制的经典算法一直被广泛使用，同样本文也采用此算法作为噪声控制算法，其算法框见图 1。其中  $W(z)$  为自适应滤波器， $P(z)$  为初级通道， $S(z)$  和  $\hat{S}(z)$  为次级通道及其估计， $F(z)$  和  $\hat{F}(z)$  分别为反馈通道及其估计， $x(n)$ 、 $y(n)$ 、 $d(n)$  和  $e(n)$  分别为参考信号，控制信号，初级噪声和误差信号， $x'(n)$  和  $y'(n)$  分别为滤波参考信号和误差传声器控制信号。

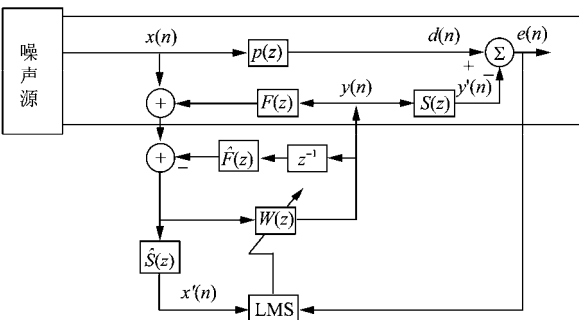


图 1 带反馈抵消网络的 FxLMS 算法框图

图 1 中， $z$  域中的误差信号为

$$E(z) = P(z)X(z) + S(z)\frac{W(z)X(z)}{1 - W(z)F(z)}, \tag{1}$$

那么假设自适应收敛，系统稳定，可以求出控制器的权系数的传递函数为

$$W^{\circ}(z) = -\frac{P(z)}{S(z) - P(z)F(z)}. \tag{2}$$

另外，从图 1 中可以推出反馈环节的开环传递函数为

$$H_{OL}(z) = W(z)F(z). \tag{3}$$

当自适应收敛后，其开环传递函数变为

$$H_{OL}(z) = -\frac{P(z)F(z)}{S(z) - P(z)F(z)}, \tag{4}$$

$H_{OL}(z)$  可以表征系统的稳定性，当开环增益大于 1，相位滞后  $180^{\circ}$  时，系统将失稳。

为了保证系统的稳定性，一般在控制器中加入反馈抵消滤波器  $\hat{F}(z)$  抵消声反馈  $F(z)$ ，或者减小反馈通道响应  $F(z)$ ，保证系统稳定。

3 噪声控制实验

3.1 相关参数及实验平台

为了达到实时控制的要求，噪声控制实验以 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320C6713 为主控单元，ADS8365 和 DAC8544 分别作为模数转换器和数模转换器。TMS320C6713 芯片的最大处理能力可以达到 2400 MIPS，数据转换芯片 ADS8365 和 DAC8544 可以实现 10 MHz 数据转换速度和 16 bits 的转换精度，能够满足噪声控制的速度和精度的要求。根据控制噪声的频率，兼顾处理器的运算量，系统采样率设计为 16 kHz。FxLMS 算法能够根据噪声源和声学环境参数的变化自动调整滤波器系数。自适应滤波器的长度选为 20 阶。本实验的目的是比较两种声源最终的降噪效果，所以自适应滤波器系数  $W(n)$  权值更新步长设置的足够小。

本文分别采用了直管和 L 管两种结构的管道进行有源噪声控制实验。直管比较通用，但参量阵扬声器位于管中会影响管道的正常使用。L 管应用有一定局限，但在实际应用中存在，例如通风管道，管道拐弯处就是 L 型。在 L 管中，将参量阵扬声器放置与侧壁上既可以发挥其优势，又不影响管道使用。

直管和 L 管的实验装置见图 2 和图 3，图 2 中管道采用的是内腔边长 10 cm，壁厚 1 cm，长度为 4 m 的方形波导管。设波导管轴向为  $x$  方向，噪声源位于波导管一端，此端设为  $x=0$ ，参考传声器位于  $x=0.45$  m 处。次级声源放置于  $x=1.55$  m 处，为了确保误差传声器与次级声源的距离大于参量正扬声器的积累长度<sup>[15]</sup>，误差传声器放置于  $x=3.55$  m 处（距管道噪声出口 0.45 m）。为了减小外部因素对实验的影响， $x=4$  m 的端口处放置了吸声材料。参量阵扬声器的发射单元为 7 cm × 7 cm 的方形 murata 换能器阵列，参量阵扬声器位于管道内，见图 2(b)。为了降低谐波失真，参量阵扬声器的调制

方式为单边带调制。普通扬声器采用的是与参量阵扬声器尺寸相当的动圈式惠威扬声器单元，安装在图 2(b)缺口的侧壁上。图 3 给出了 L 管参量阵扬声器噪声控制的实物图，参量阵的摆放于管子的拐角

处，见图 3 中的局部放大部分。参考传声器与噪声源距离和误差传声器与管道噪声出口距离均为 0.45 m，次级声源的上游管道长度为 1 m，下游管道长度为 2 m。其它配置与图 2 相同。

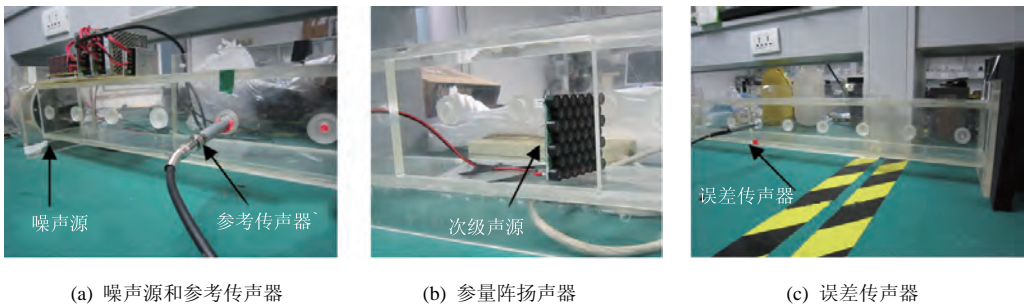


图 2 直管实验装置图

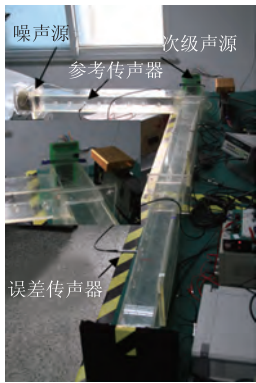


图 3 L 管实验装置图

3.2 普通扬声器与参量阵扬声器的管道声反馈比较

开始噪声控制实验之前，首先需要对普通扬声器和参量阵扬声器的声反馈幅度进行测量，通过系统辨识的方法得到次级通道和反馈通道的脉冲响应。

次级声源发射白噪声信号，参考传声器和误差传声器分别对反馈通道和次级通道进行录音，再利用归一化最小均方（NLMS）算法对反馈通道和次级通道进行辨识。NLMS 算法更新步长设为 0.01，辨识长度为 512。为了方便比较，测量时尽量使两种声源发射的声波声压级相当，并将结果以次级通道的幅度为参考做归一化处理，各通道的频响结果见图 4 所示。

从图 4 中可以看出，普通扬声器作为次级声源时，次级通道与反馈通道的幅度几乎一样；而参量阵扬声器作为次级声源时，反馈通道幅度明显小于

次级通道幅度，相差大约 15~20 dB。这说明参量阵扬声器作为次级声源可以减小声反馈。参量阵扬声器声反馈小降低了反馈通道的闭环增益，避免了控制系统的发散，这一结论在实验结果中得到了体现。

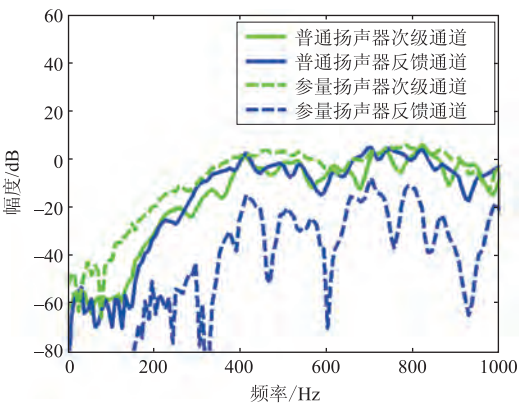


图 4 两种声源次级通道和反馈通道幅频响应

3.3 普通扬声器与参量阵扬声器的自适应噪声控制实验

本节将利用两种声源进行噪声控制，其中普通扬声器作为次级声源时，将分别用无反馈抵消网络 FxLMS 和带反馈抵消网络 FxLMS 算法进行噪声控制实验；参量阵扬声器采用无反馈抵消网络 FxLMS 算法进行噪声控制实验。

根据管道的尺寸，管道的截止频率为 1.715 kHz。由于参量阵扬声器的物理特性，其低频性能较差，噪声频率不能太低，因此本文对 600 Hz 单频噪声和带宽为 500 Hz~1000 Hz 的窄带噪声进行噪声控制

实验,并讨论了对 600 Hz 单频噪声降噪区域。噪声信号由安捷伦信号源 33220A 产生,经 D 类功放放大后,通过直径为 10 cm 的动圈式扬声器发出。控制器开始对噪声进行降噪处理,当控制器稳定后,通过声卡(型号为 FIREFACE 400)将误差传声器信号采集到 PC 机。为了方便比较,我们对实验结果控制前后的噪声做了归一化处理。

图 5 为两种声源对 600 Hz 单频噪声的控制结果。从图 5 中可以看出,不存在反馈抵消网络时,普通扬声器的降噪幅度为 12 dB,而在直管中,参量阵扬声器在没有反馈抵消网络时噪声控制的幅

度为 39 dB;L 管中,参量阵扬声器在没有反馈抵消网络时噪声控制的幅度为 37 dB。在增加了反馈抵消网络的情况下,普通扬声器的降噪幅度为 44 dB。这说明对单频噪声的控制,在没有反馈抵消网络的情况下,参量阵扬声器可以取得普通扬声器带反馈抵消网络的控制效果。但是从图中也可以看出普通扬声器的控制结果,噪声的二次谐波和三次谐波也得到了很好的控制,但是参量阵扬声器控制结果中的二次谐波和三次谐波反而有所提高。首先,这说明普通扬声器具有更好的线性度;其次,谐波失真的幅度过大会影响基频降噪的降低。

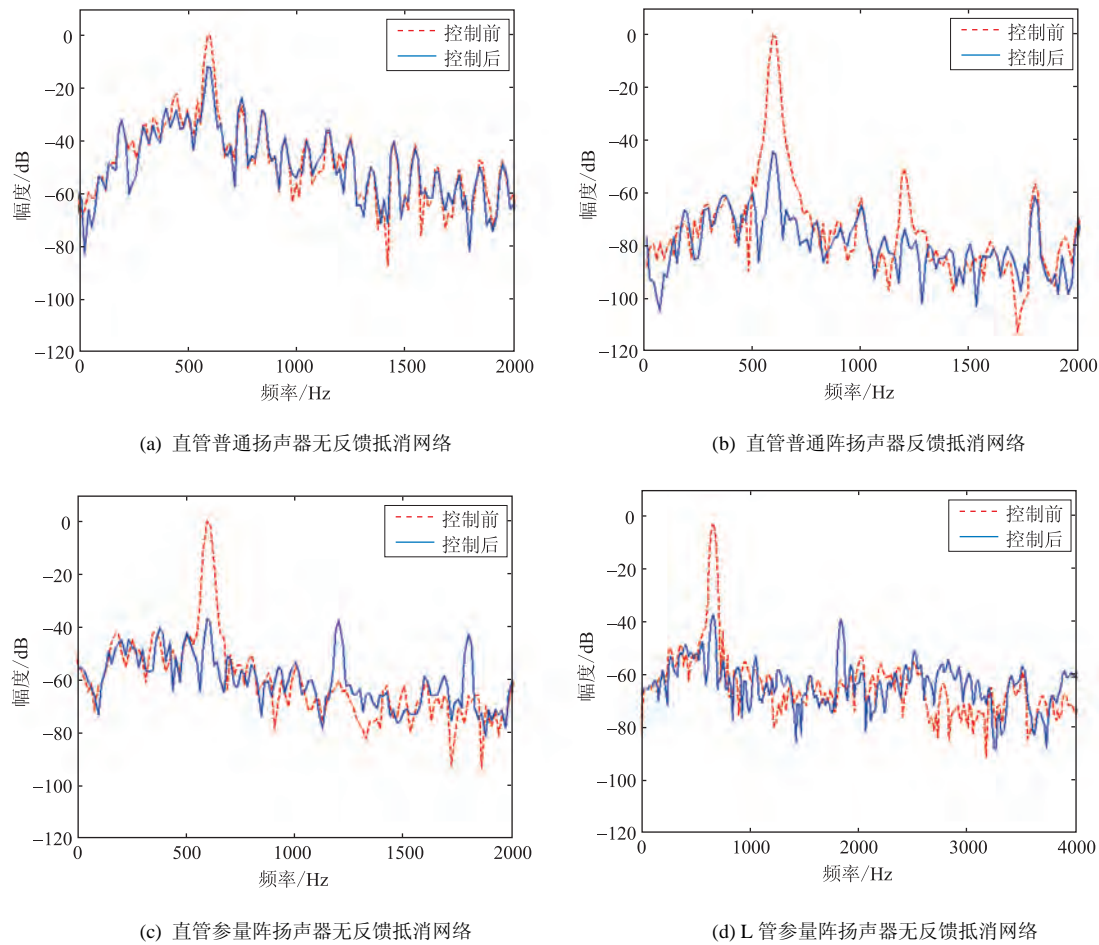


图 5 600 Hz 有源噪声控制实验结果

从实验结果可知,对单频噪声的降噪效果,在没有反馈抵消的条件下参量阵扬声器远强于普通扬声器;而在相同降噪效果的情况下,参量阵扬声器无须声反馈抵消网络,所需硬件资源较少。另外,在实验过程中,在没有反馈抵消条件下,普通扬声器控制并不稳定,常常因为管道外的声音使整个系

统发散,而参量阵扬声器则不存在这一情况。图 6 给出了参量阵扬声器对窄带噪声的自适应控制结果。从图中可以看出大部分频率处控制前后噪声基本没有变化,某些频率点噪声有所降低,相反也有些频率点噪声反而增强,这也说明参量阵扬声器对于窄带噪声控制效果不佳。



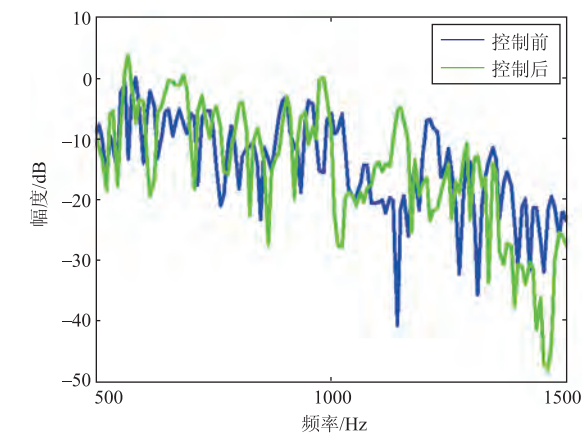


图 6 窄带噪声控制结果

图 6 结果显示参量阵扬声器对窄带噪声的控制并不能取得较好的降噪效果，这一结果主要由参量阵扬声器在次级通道的非线性<sup>[16]</sup>造成的。这些非线性会导致降噪性能下降，甚至使控制系统不稳定。参量阵扬声器在管道内不仅会解调出差频声，还会带来非线性谐波失真和非线性互调失真。单频噪声仅存在非线性谐波失真，因此可以采用单边带调制有效减小非线性谐波失真；而对于宽带或者窄带噪声，不仅存在非线性谐波失真，还存在非线性互调失真，即对于宽带输入，次级通道并不是线性模型。因此采用线性有源控制算法，效果并不明显。对于参量阵扬声器的宽带有源控制，一方面需要研究抑制参量阵的非线性，保证次级通道接近线性，另一方面需要研究适用于参量阵扬声器的非线性有源控制算法。

根据声波导管理论，普通扬声器的噪声控制区域为误差产生器以下的整个下游管道，控制面积为管道整个横截面。参量阵扬声器与普通扬声器发声机理不同，那么本文通过对比两种声源在管内声场和降噪量来确定参量阵扬声器的降噪区域和降噪面积。

首先进行降噪区域测量。按照图 2 中的设置，误差传感器位于  $x=3.55\text{ m}$  处，次级声源源均位于  $x=1.55\text{ m}$  处，其中参量阵扬声器位于管内，普通扬声器位于侧壁，轴向声场的测试结果见图 7。声源位置的下游区域，普通扬声器发射的声波以平面波的形式传播，忽略吸收衰减和声压波动，声压幅度基本保持不变；参量阵扬声器发射声波在  $1.5\text{ m}$  至  $2.5\text{ m}$  区域积累，在  $2.5\text{ m}$  至  $4\text{ m}$  区域基本保持稳定，

且与普通扬声器的声压一致，这说明参量阵扬声器声波积累完成后，轴向声场同普通扬声器声压一致。另外，通过测量误差传感器下游  $10\text{ cm}$ 、 $20\text{ cm}$ 、 $30\text{ cm}$  和  $40\text{ cm}$  的降噪量来确定参量阵扬声器的降噪范围。经测量，降噪量分别为  $28\text{ dB}$ 、 $26\text{ dB}$ 、 $29\text{ dB}$  和  $32\text{ dB}$ 。虽然与误差传声器位置降噪量相比略有减小，但降噪幅度比较稳定。由此可以认为参量阵扬声器控制区域与普通扬声器控制区域基本相同，均是误差传感器以下的整个下游部分。

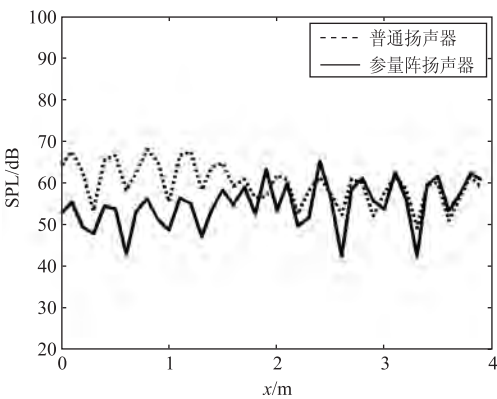


图 7 两种次级声源发射 600 kHz 声波的管内声场

其次进行降噪面积测量。截面测量示意图见图 8，截面为降噪区域测量中误差传声器所在截面。图中误差传声器与控制器连接，反馈控制点误差情况。测量传声器与 Pulse 仪器相连，用来测量截面不同位置降噪后的声压级。管道边长为  $10\text{ cm}$  的方管，因此利用对称关系只需测量管道中心一侧的结果。 $L$  表示传声器前端与中心位置距离， $L=0\text{ cm}$  表示传声器前端位于中心处， $L=5\text{ cm}$  表示传声器前端与管道内壁齐平。反馈传声器固定在管道内壁齐平位置，测量传声器通过移动位置测量不同距离上的声压级。截面降噪量和声场结果见表 1。

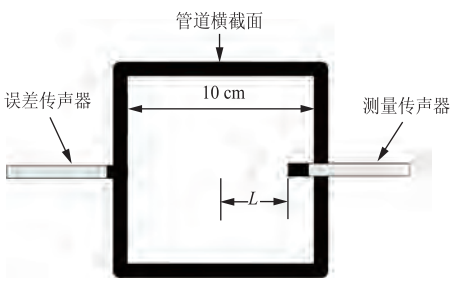


图 8 测量示意图

表 1 截面降噪量测量结果

L (cm)	降噪量 (dB)	声压级 (dB)
0	42	74.3
1	40	74.4
2	39.5	74.4
3	40.5	74.5
4	39.5	74.5
5	40	74.4

从结果可以看出，在管道截面的不同距离上降噪量基本相同，为 40.5 dB，波动小于±1 dB；而且截面不同距离声压级也基本相同，为 74.4 dB 波动在±0.1 dB 以内。由此可以说明参量阵扬声器的差频声的降噪面积与普通扬声器相同，可以实现整个截面的降噪。

4 结论

文章提出了利用参量阵扬声器作为次级声源进行管道有源噪声控制的方法，并对单频噪声和窄带噪声进行了自适应的有源噪声控制实验。对于单频噪声，参量阵扬声器比普通扬声器声反馈小，能够在没有声反馈抵消网络时得较好的噪声控制效果，降低了自适应有源噪声控制算法的复杂度，节省了硬件资源，并且其控制过程也非常稳定。文章中也讨论了参量阵扬声器的噪声控制区域和降噪面积，从测试结果看出与普通扬声器控制基本相同，降噪区域都是误差传感器以下的整个下游管道，降噪面积均为管道整个横截面。

对于窄带或宽带噪声，由于参量阵扬声器的谐波失真和互调失真，采用线性有源控制算法还不能取得较好的控制效果。下一步，我们将重点研究减小参量阵扬声器的非线性失真和采用非线性控制算法。

致谢 本文在实验及写作过程中，非常感谢安峰

岩、曹寅、匡正和叶超等提供的指导和帮助。

参 考 文 献

[1] SONDHI M M, BERKLEY D A. Silencing echoes on the telephone network[C]. Proceedings of the IEEE, 1980, 68(8): 948-963.

[2] POOLE L, WARNAKA G, CUTTER R. The implementation of digital filters using a modified Widrow-Hoff algorithm for the adaptive cancellation of acoustic noise [C]. ICASSP'84, 1984: 215-218.

[3] ERIKSSON L J. Active sound attenuation system with on-line adaptive feedback cancellation[P].United States: 4677677. 1987.

[4] KUO S M. Active noise control system and method for on-line feedback path modeling[P].United States: 5940519. 2002.

[5] HAMADA H, MIURA T, TAKAHASHI M, et al. An adaptive noise control system in air - conditioning ducts[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1988, 84(S1): S180-S180.

[6] KUO S M, TSAI J. Arrangements of the secondary source on the performance of active noise control systems [C]. ISCAS '93, 1993: 2431-2434.

[7] JESSEL M J M, MANGIANTE G A. Active sound absorbers in an air duct[J]. J. Sound Vib., 1972, 23(3): 383-390.

[8] 沙家正, 孙广荣, 曹水轩, 等. 管道有源消声器[J]. 声学学报（中文版）, 1981, 7(3): 137-147.

[9] SWINBANKS M A. The active control of sound propagation in long ducts[J]. J. Sound Vib., 1973, 27(3): 411-436.

[10] YANG J, GAN W-S, TAN K-S, et al. Acoustic beamforming of a parametric speaker comprising ultrasonic transducers[J]. Sensor Actuat A-Phys.. 2005, 125(1): 91-99.

[11] BROOKS L A, ZANDER A C, HANSEN C H. Investigation into the feasibility of using a parametric array control source in an active noise control system [C]. Proceedings of ACOUSTICS, 2005: 39-45.

[12] KIDNER M R F, PETERSEN C, ZANDER A C, et al. Feasibility study of localised active noise control using an audio spotlight and virtual sensors [C]. Proceedings of ACOUSTICS, 2006: 55-61.

[13] TANAKA N, TANAKA M. Active noise control using a steerable parametric array loudspeaker[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2010, 127: 3526-3537.

[14] ANAKA N, TANAKA M. Mathematically trivial control of sound using a parametric beam focusing source[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2011, 129(1): 165-172.

[15] MOFFETT M B, MELLEN R H. Effective lengths of parametric acoustic sources[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1981, 70(5): 1424-1426.

[16] WU M, YANG J. The upper bound of step size for FDPANC algorithm with nonlinear secondary path [C]. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 2012: 3102-3112.