

# 用双测点测量吸声面复反射系数的一种改进算法

赵松龄 殷 业

(同济大学声学研究所 上海·200092)

在管道中对两个测点处实时测量所得数据作相关分析,可以测定试件的吸声性能。本文发展了一种复反射系数的改进算法,引入了以功率谱为基础的G函数来代替流行的传递函数,可使随机误差明显降低,并可保证所得实验结果合理、可靠。

## An improved method to determine the complex reflection coefficient based on two microphone position measurement

ZHAO Songling YIN Ye

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai · 200092)

The acoustic properties in duct can be determined by means of twomicrophone position measurement. In this paper, an improved method to determine the complex reflection coefficient of the sample is developed, New functions  $G_m$  based upon power spectrum are introduced to replace the current transfer function. It is shown the test error is reduced remarkably and therefore a rational and reliable test result can be obtained.

### 1 概 述

近 10 余年,在管道声学中发展了一种新颖的测量技术来代替传统的驻波管测量<sup>[1,2]</sup>。它的基本原理是在管道中两个测点处作实时测量,对所得数据作相关分析,测出吸声试件表面的复反射系数,试件的法向声阻抗率和吸声系数等重要声学参量,可由复反射系数间接导出。

如图 1 所示,管道中声场由入射声  $P_i$  与

反射声  $P_r$  迭加而成。 $N_1$  和  $N_2$  两测点处所得声压信号在频域内进行分析。记频率为  $f$ ,波

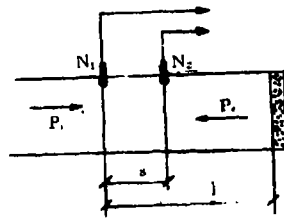


图 1 双测点测量原理

• 收稿日期:95-3-21

声学技术

数为  $k=2\pi f/c$ , 其中  $c$  为声速。可以导出, 试体表面的复反射系数为

$$R(f) = \frac{H_{12}(f) - e^{-jks}}{e^{jks} - H_{12}(f)} \cdot e^{2jkl} \quad (1)$$

式中  $s$  为两测点间距离,  $l$  为测点  $N_1$  至试件表面的距离,  $H_{12}(f)$  为声压传递函数, 它由下式定义

$$H_{12}(f) = P_2(f)/P_1(f) \quad (2)$$

式中  $P_1(f)$  和  $P_2(f)$  分别为测点  $N_1$  和  $N_2$  处的声压。

实际应用时, 这种技术不但适用于空气声测量, 而且也可以成功地适用于水声测量<sup>3,4</sup>。

试验时通常采用宽频带噪声声源, 在时域采样, 经 FFT 变换在频域内进行分析, 可得复反射系数的频谱。测量的关键问题是要使两测点处测量装置的声压响应特性保持一致, 为了消除测量装置的系统误差, 常用的方法是交换测点处的测量装置再复测一次, 把前后两次测量所得的传递函数作几何平均。近年来, 发展了另一种方法, 即采用伪随机噪声技术<sup>[5]</sup>, 使噪声实验可以重复。这样, 就可以用同一测量装置, 先后在两个测点进行测量来代替在两个测点上的实时测量, 从而可以消除测量装置的系统误差。

实践表明, 用传递函数法进行测量比传统的驻波管测量来得优越, 但也有一定的局限性。其主要缺点是实验结果带有较大的随机起伏, 特别是当试件反射系数较大时, 由式(1)计算所得结果的实验误差很大, 反射系数的绝对值往往会大于 1 的不合理结果, 其幅角也往往会出现大幅度阶跃不能满足实用要求。分析其原因, 主要有二: (1) 实验时, 时域采样的个数有所限制, 因此在频域的复声压相应有一定的随机起伏。当试件反射系数较大时, 管道内的驻波现象显著, 对于测点  $N_1$  处为极小值附近的频率, 传递函数  $H_{12}$  有很大幅度的阶跃, 随机误差相应放大, 从而使计算结果的精度明显降低。(2) 对于很低频率

或测点间距离  $s$  接近半波长时的频率, 式(1)的分母与分子分别接近于零, 其随机误差将占主要地位, 这将使相应计算结果产生严重偏差。

对此, 人们目前采取的对策通常是限制适用频率的范围, 并对复反射系数(或吸声系数)在一段较宽频带内取平均值。例如文献[3]中对适用频率范围取为

$$f = \alpha f_s \quad (3)$$

式中  $f_s$  为半波长等于  $s$  时的频率, 系数  $\alpha$  根据经验取为  $\alpha = 0.2 - 0.8$ 。

我们结合实际经验与理论分析, 发展了一种复反射系的改进算法, 引入了以功率谱为基础的  $G$  函数来代替流行的传递函数, 可使随机误差明显降低, 并可保证所得实验结果合理、可靠。

## 2 复反射系数的改进算法

为了避免传递函数起伏较大的缺点, 我们改用互功率谱和自功率谱为基本函数。在式(1)右方分母和分子各乘以  $P_1(f)$ , 然后再乘以分母的共轭值使分母化为正实数, 得

$$R(f) = \frac{-W_{11}(f)e^{-jks} - W_{22}(f)e^{jks} + 2\text{Re}\{W_{12}(f)\}}{W_{11}(f) + W_{22}(f) - 2\text{Re}\{W_{12}(f)e^{-jks}\}} \cdot e^{2jkl} \quad (4)$$

$$\text{式中} \begin{cases} W_{11}(f) = P_1^*(f)P_1(f) \\ W_{22}(f) = P_2^*(f)P_2(f) \end{cases} \quad (5)$$

$$W_{12}(f) = P_1^*(f)P_2(f) \quad (6)$$

分别为两测点处的自功率谱与互功率谱。

进行多次重复采样试验时, 对于给定频率, 我们先对功率谱进行代数平均, 然后由式(4)计算复反射系数, 不采用先求各次试验的复反射系数, 然后对它们作代数平均。

记复反射系数  $R$  为

$$R = |R|e^{j\theta} \quad (7)$$

由式(4)可以导出

$$|R|^2 = \frac{G_0(f) - G_1(f)}{G_0(f) + G_1(f)} \quad (8)$$

$$|R|\sin\phi = \frac{G_2(f)}{G_0(f) + G_1(f)} \quad (9)$$

式中  $G_0, G_1, G_2$  等函数分别由下列各式定义

$$G_0(f) = \overline{W_{11}(f)} + \overline{W_{22}(f)} - 2\text{Re}\{\overline{W_{12}(f)}\}\cos(ks) \quad (10)$$

$$G_1(f) = -2\text{Im}\{\overline{W_{12}(f)}\}\sin(ks) \quad (11)$$

$$G_2(f) = -\overline{W_{12}(f)}\sin[2k(l-s)] - \overline{W_{22}(f)}\sin(2kl) + 2\text{Re}\{\overline{W_{12}(f)}\}\sin(kl-ks) \quad (12)$$

记频域内的频率分辨率为  $f_0$ , 将  $G$  函数在频域作平滑化处理, 得

$$\begin{aligned} \widetilde{G}_m(f) &= 0.25G_m(f-f_0) + 0.5G_m(f) \\ &+ 0.25G_m(f+f_0) \quad (13) \end{aligned} \quad (m=0,1,2)$$

分析表明, 作平滑化处理后再采用式(8)和式(9), 随机误差有所降低, 但仍不能保证获得合理、可靠的结果。值得指出, 互功率谱的虚部  $\text{Im}\{\overline{W_{12}(f)}\}$  一般为小值, 但其随机起伏并不一定相应为小值, 因此相对地说,  $G_1(f)$  项是产生随机误差的最大来源。考虑到式(8)右方分母和分子中所含  $(G_1(f))$  的符号相反, 作相加或相乘运算后即可把它产生的随机误差加以抑制。为此, 我们引入如下变换

$$T = \frac{2|R|}{1+|R|^2} \quad (14)$$

经简单运算, 并用平滑化处理后的函数  $\widetilde{G}$  代替  $G$  函数, 把宗量  $f$  省略不记, 可得

$$T = [\widetilde{G}_0^2 - \widetilde{G}_1^2]^{1/2} / \widetilde{G}_0 \quad (15)$$

上式右方仅在分子中出现  $\widetilde{G}_1$  的平方项, 随机误差可以显著降低, 并且可以保证  $T$  值不会出现大于 1 的情况。

由式(14)可得

$$|R| = (1 - \sqrt{1-T^2})/T \quad (16)$$

先由式(15)求出  $T$ , 再由式(16)求出  $|R|$ , 可以保证  $|R|$  值得出合理、可靠的实验结果。

在式(9)中消去  $|R|$ , 化简后可得复反射系数相角  $\phi$  的计算公式为

声学技术

$$\sin\phi = \widetilde{G}_2 / [\widetilde{G}_0^2 - \widetilde{G}_1^2]^{1/2} \quad (17)$$

### 3 计算实例与讨论

为了检验本文所述改进算法的实际效果, 我们以试件为刚性活塞的极端情况为例进行计算机模拟试验。取测点间距离  $s = 140\text{mm}$ ,  $N_1$  至试件表面距离  $l = 970\text{mm}$ , 声速取为  $c = 340\text{ m/s}$ 。采样频率为  $7.88\text{ kHz}$ , 每次试验两测点各采 1024 个样本, 由此得频率分辨率为  $f_0 = 7.70\text{ Hz}$ ,  $f_s$  与  $f_0$  的比值为  $f_s/f_0 = 158$ 。

重复采样试验 8 次后, 由本文所述改进算法得出的复反射系数如图 2 所示。作为对比, 由传递函数法得出的相应结果如图 3 所示。

可以看出, 本文所得结果的随机误差明显较低, 复反射系数的绝对值都接近于 1 而没有出现大于 1 的不合理情况。相角  $\phi$  一般也都为小值, 符合实际情况。即使在  $f = f_s$  的条件下,  $\phi$  角阶跃的幅度也不太大。值得注意, 采用本文改进算法, 适用的频率范围大致可扩展到  $f = 0 - 2f_s$ 。

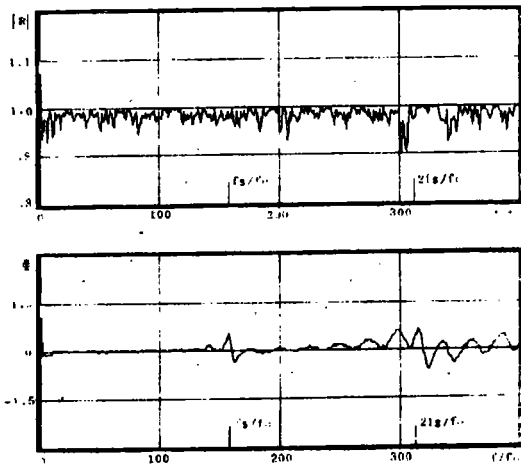


图 2 用本文算法所得的复反射系数

## 参考文献

1 A. F. Seybet and D. F. Ross. Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique. J. Acoust. Soc. Am. 1977. 61(5)

2 J. Y. Chung and D. A. Blaser, Transfer function method of in-duct acoustic properties, I. Theory. II. experiment, J. Acoust. Soc. Am. , 1980, 88(3)

3 B. Zhu and J. Xiao, Transfer function method for measuring low-frequency acoustic properties of materials in water-filled tube, proceeding of 14th ICA, Vol. 4, 1992.

4 雷彬,赵松龄,充水管道中用传递函数法测量吸声材料的声学性能. 声学技术 1993;12(2)

5 W. T. Chu, Transfer function technique for impedance and absorption measurements in an impedance tube using a single microphone, J. Acoust. Soc. Am. 1986;80(2)

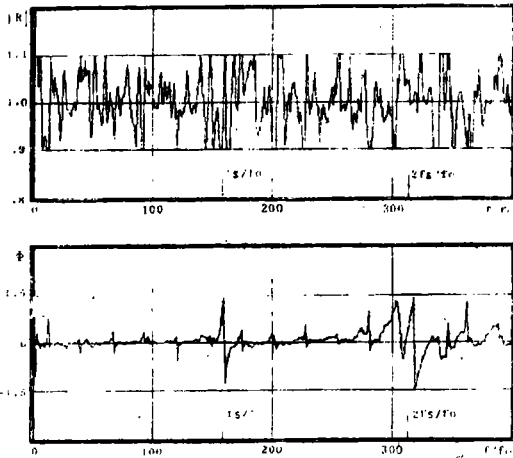


图3 用传递函数法所得的复反射系数

## 新产品和新技术报道

### 圆筒式电动可调吸声体通过专家鉴定

圆筒式电动可调吸声体已应用于国内规模最大、设计最新颖并获得吉尼斯之最的上海广电大厦多功能演播厅内,取得了十分满意的音质效果。圆筒式电动可调吸声体是华东建筑设计研究院经过三年研究、设计、试验、应用而开发出来的一种具有国内领先水平达到国际先进水平的新装置。于1995年8月23日通过了由上海市建委主持的专家鉴定。

国内外厅堂可调混响技术是厅堂音质设计领域发展较快的一项新技术。圆筒式电动可调吸声体是采用改变吸声量来达到调节混响时间的一种新结构,它将声学与建筑、装修、机械、电气等技术融于一

体,设计新颖独特、试验科学合理、技术措施先进、数据资料齐全、达到了设计于期效果,填补了大型多功能演播厅可调混响技术设计应用的空白。上海广电大厦多功能演播厅侧墙上水平安装了不同直径、不同长度共计六排35条圆筒式电动吸声体,展开面积约180平方米,可使1100余平米的演播大厅混响时间由1.06秒调节为1.4秒,能满足音乐、戏剧、电影、会议等多功能需要,属国内首创。(详见本刊1995;14(2):49~55)

(中国船舶工业总公司第九设计研究院 吕玉恒)