

气固两相流介质中声衰减测量方法研究

安连锁, 杨文泽, 武国红, 卢 晓, 刘铭媛, 姜根山

(华北电力大学能源与动力工程学院, 河北保定, 071003)

摘要: 通过声波衰减谱反推气固两相流状态, 是气固两相流声学监测研究的一种重要方法。在假设声能量的相对衰减量与声波传播距离成正比的前提下, 推导出声压级随传播距离变化的表达式。设计搭建了测试两相流下声衰减的实验台, 根据声压级随传播距离变化的关系, 推导出实验计算气固两相流声衰减系数的表达式。实验条件下的噪声主要为风机的漩涡噪声和旋转噪声, 以及机械噪声和气流的气动噪声。分析不同噪声的特点, 提出了通过 A 加权网络和小波滤波相结合的滤除噪声的方法。

关键词: 气固两相流; 声衰减; 背景噪声

中图分类号: P733

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-01-0006-04

A study of acoustical attenuation measurement in gas-solid two-phase flow

AN Lian-suo, YANG Wen-ze, WU Guo-hong, LU Xiao, LIU Ming-yuan, JIANG Gen-shan

(School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China)

Abstract: Deducing the state of gas-solid two-phase flow from acoustic attenuation spectrum is an important approach to acoustic monitor and study of gas-solid two-phase flow. The expression of sound pressure level associated with propagation distance is deduced by assuming that the relative attenuation amount of sound energy is proportional to sound propagation distance. The experimental apparatus for measuring acoustic attenuation in gas-solid two-phase flow is established. According to the expression of sound pressure level, the expression for calculating acoustic attenuation index of gas-solid two-phase flow is also obtained. The background noise in experiments is mainly the noise caused by fans' vortex and rotation, as well as the mechanical noise and aerodynamic noise. The characteristics of different noise are analyzed, and the method of eliminating noise is proposed, by using A-weighting network and wavelet filtering together.

Key words: gas-solid two-phase flow; acoustic attenuation; background noise

1 引言

在实际的工业过程中, 气固两相流动的存在十分广泛, 实现对气固两相流状态的实时在线监测对工业生产的经济安全具有重要意义。声波监测技术具有非接触、便携、实时等特点, 被广泛应用于状态监测中。声波在气固两相流介质传递过程的衰减谱含有离散相颗粒粒径和浓度等信息, 所以可以通过测量衰减谱反推颗粒粒径和浓度, 从而建立气固两相流参数与声信号之间的联系, 通过声信号实现气固两相流的状态监测。

最早提出多相介质声吸收的是 20 世纪初的

Swell, 他研究了声波在烟雾中的吸收问题, Epstein、Carhart、Allegra 和 Hawley 等人从理论上推导了液固介质中的声传播模型^[1-3], 近几年上海理工大学的苏明旭和蔡小舒等对超声测量悬浊液中颗粒粒度和浓度进行了大量的理论和实验研究^[4]。2007 年, 张国军等人提出了利用水雾吸声来消声, 并通过实验验证了其可行性^[5]。2004 年, 凌嘉赟等人对浑水中超声波的衰减进行了实验研究^[6]。

可以看出, 这些主要是对气液介质吸声规律的研究, 而国内外对气固介质的研究则鲜见报道。究其原因主要是气固密度差别较大, 固体离散相只能通过一定的气体流动, 才能悬浮在气体连续相中, 而气体流动以及提供流动的动力设备会产生较大的噪声, 污染有效声信号。随着工程上对气固两相流监测的研究需要, 人们也越来越重视声波在气固两相流中传播特性的研究, 一些新方法和新技术也被应用到这项研究中去。本文介绍了气固两相流声衰减测量实验台, 推导管内声衰减系数的表达式, 并

收稿日期: 2008-07-09; 修回日期: 2008-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助基金项目(10774043)、教育部博士点基金资助项目(20050079004)、声场声信息国家重点实验室基金资助项目(200704)

作者简介: 安连锁(1955-), 男, 河北武邑人, 教授, 博士生导师, 研究方向为声波理论及声波技术在热力设备安全经济运行中的应用。

通讯作者: 杨文泽, E-mail: yangwz1103@126.com

提出了测量气固两相流声衰减的实验和消噪方法。

2 理论基础

2.1 衰减原理

声波在气固两相流传播过程中遇到固体颗粒时,就会对声波产生散射作用。实际颗粒总是形状各异的,所以处理声波的散射在数学上是比较困难的,为了数学分析的方便,假设固体颗粒为规则的相对气体静止的刚性圆球。设颗粒半径为 r_0 ,入射平面波的入射声压为:

$$p_p = p_a e^{j(\omega t - kx)} \quad (1)$$

式中 p_a 为声压的幅值, ω 为角频率, k 为波数。可以通过级数简化得到散射波的平均功率的近似式为^[7]:

$$\begin{cases} \bar{W}_s \approx \frac{7}{9}(\pi r_0^2)(kr_0)^4 I_p & kr_0 \ll 1 \\ \bar{W}_s \approx 2\pi r_0^2 I_p & kr_0 \gg 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中 I_p 为入射波的声强,且 $I_p = \frac{p_a^2}{2\rho_0 c_0}$, $\rho_0 c_0$ 为介质的特性阻抗。

由式(2)可知,当频率比较低或球体比较小时,平均散射功率仅占平均入射功率很小的一部分。当频率较高或者球体较大时,球体完全挡住了声波向前传播。即散射波的平均功率越大,散射引起的声衰减也越大。形状各异的其它颗粒也有类似的结论,并都可以通过式(2)估算散射的强弱。

2.2 衰减系数

从上面的分析不难看出,声波散射的大小只能通过式(2)估算,而由散射引起的衰减量需要通过实验的方法得到。为了从数量上把握声能量的衰减,假设声能沿声线方向,声强的相对衰减量 dI/I 与声波传播距离 dx 成正比,并假定比例系数为 2α ,可得如下关系:

$$\frac{dI}{I} = -2\alpha dx \quad (3)$$

式中的负号表示随声波的传播,声强是减少的。对式(3)进行积分得:

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (4)$$

其中 I_0 为参考位置 $x=0$ 处的声强, 2α 称为声强吸收系数。可见由于媒质的吸收,声强以指数规律衰减。由于声强与有效声压平方成正比,因而从式(4)可得有效声压的吸收公式为:

$$p_e = p_{e0} e^{-\alpha x} \quad (5)$$

其中 α 为有效声压吸收系数^[8],是衡量声衰减的物

理量。将式(5)化为声压级的形式为:

$$L_x = L_0 - 8.686\alpha x \quad (6)$$

其中 L_0 是参考位置的声压级, L_x 为声线上 x 处的声压级。不难看出声压级是沿声线方向线性衰减的。在一维长管段,声源发出声波的回波能量很小,可以忽略,所以在一维长管段内,声压级的分布满足式(6)。

3 测试方法

3.1 实验台

要通过实验手段研究声波在气固两相流中的衰减特性,就必须建立气固两相流的介质环境。由于气固密度差别较大,设计气体流速应大于使固体离散相悬浮的安全速度,才能保证不出现颗粒堆积堵管的现象。文献[9]给出了不同颗粒悬浮速度和输送速度的参考值,以及安全速度的计算公式。实验通过给料机转速调节给粉量,粉料通过进料口进入实验管道,两台离心式通风机布置在实验管道末端,提供空气动力源,通过风机前挡板调节空气流速,以满足不同浓度下的测试要求。通风机前安装有布袋除尘器,用来回收实验中的固体颗粒。实验管道直径为140mm。

在气固两相流实验台的一直管段上构建声学测试系统,如图1所示,在管壁上开孔,分别安装两个高精度传声器和一个扬声器。为了防止传声器探头被粉尘堵塞,在探头处安装了塑料薄膜和风帽。扬声器与进料口的间距为1.8m,进料口与传声器1处的间距为1.4m,传声器1、2之间的间距为3.555m。采集和记录传声器接收扬声器发射不同频率的声波,剔除噪声后,通过声学测试软件计算,得到信号声压级。再应用下面的测试方法,得到对应频率下的衰减量,拟合后便可得到衰减谱图。

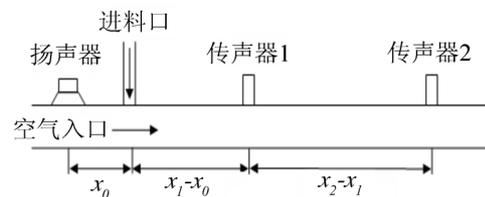


图1 测试气固两相流声衰减实验台

Fig.1 Experimental apparatus of acoustical attenuation measurement in gas-solid two-phase flow

3.2 衰减量的测试方法

扬声器释放的声能随着远离声源的方向衰减。在实验台运转后,进料口以前是空气流动介质,进

料口以后是气固两相流介质。假设由空气流动和管道粘阻引起的声压衰减系数为 α' ，由固体颗粒引起的声压衰减系数为 α'' ，那么声波在气固两相流介质中传播的衰减系数为 α ，且满足

$$\alpha = \alpha' + \alpha'' \quad (7)$$

从图 1 不难看出，气固两相流下，声波在 x_0 段的衰减系数为 α' ，在进料口以后的衰减系数为 α 。图 2 为实验管道内扬声器发射声波声压级随 x 变化示意图。

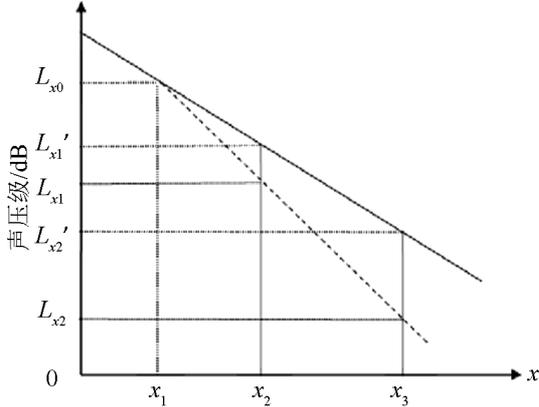


图 2 实验管道内声压级分布示意图

Fig.2 The distribution of sound pressure level in pipeline

图中实线表示声波在流动空气介质中声压级的下降情况；虚线表示在进料口后，随着固体颗粒的存在声压级的下降情况。由式(6)可知，声压级是沿着声线方向线性衰减的，所以不难写出声波在空气介质中声压级的衰减方程：

$$L_x' = L_0 - 8.686\alpha'x \quad (8)$$

和在气固两相流介质中传播的衰减方程：

$$L_x = L_{x0} - 8.686\alpha(x - x_0) \quad (9)$$

传声器可以测得纯空气流工况和气固两相流工况下传声器 1、2 处的声压级 L_{x1}' 、 L_{x2}' 、 L_{x1} 、 L_{x2} ，代入上方程可以得到衰减系数 α' 和 α 。解方程发现，求 α 是知 2 求 1 的一个超定问题，可以通过线性回归的方法得到 α ，其方程为：

$$\alpha = -\frac{1}{8.686} \cdot \frac{(x_1 - x_0)^{-1} (L_{x1} - L_{x0})}{(x_2 - x_0)^{-1} (L_{x2} - L_{x0})} \quad (10)$$

但由于传声器 2 离扬声器较远，接收到扬声器的有效信号较弱，并且气固两相流工况下，噪声较大，此时的信噪比最低，所以实验得到的 L_{x2} 准确度最差。而 L_{x1} 的准确度较高，为了能够得到较准确的衰减系数，将 L_{x1} 代入式(9)得气固两相流声衰减系数为：

$$\alpha = \frac{L_{x0} - L_{x1}}{8.686(x_1 - x_0)} \quad (11)$$

其中

$$L_{x0} = L_0 - 8.686\alpha'x_0 \quad (12)$$

$$L_0 = \frac{x_2 L_{x1}' - x_1 L_{x2}'}{x_2 - x_1} \quad (13)$$

L_{x0} 和 L_0 分别为进料口处和声源处的声压级。将式(12)、式(13)代入式(11)，便可得到该频率下的衰减系数。

对不同频率下的有效声压吸收系数进行拟合作图，便能得到对应工况下的衰减谱。

3.3 实验背景噪声

为了提供气固两相流环境，实验装置采用的离心风机，带来了较大的噪声。实验的背景噪声主要是离心风机的气动噪声和机械噪声以及气体在管内的气动噪声。风机的气动噪声主要为漩涡噪声和旋转噪声。漩涡噪声是叶轮在旋转过程中，叶轮叶片表面形成的边界层及其分离所引起的气流压强的脉动所造成的。由于边界层分离和紊流边界层的脉动弹性大，这种噪声具有很宽的频率范围。旋转噪声是蜗壳与叶片出口边缘间隙较小出现的周期性的压力和速度脉动引起的噪声。这种噪声的基本频率与叶片数和转速有关，图 3 为实验测得噪声的频谱图，在图 3 所示的频谱图上可以清楚地看到这种噪声产生的两个峰值^[10]。气体在管内的气动噪声和风机的漩涡噪声产生机理是一样的，只是强度不大。由图可见最大的两个峰值对应的中心频率为 69Hz 和 341Hz。扬声器与这些噪声的频率相近或重叠时，传声器接收的扬声器的信号容易被噪声所掩盖。为了提高测试精度，实验选择的扬声器发声频率应尽量避免与噪声频率重合。

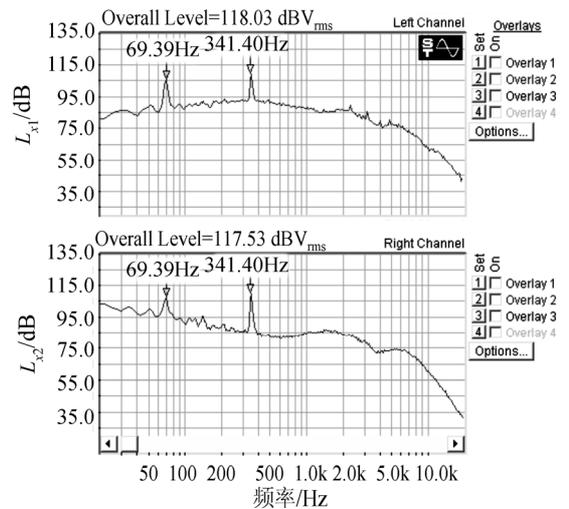


图 3 实验噪声频谱图

Fig.3 Frequency spectrum of background noise in experiment

3.4 消噪方法

只通过测试频率避开噪声峰值频率，可以提高

测试精度, 但其他噪声对测试结果也有影响。实验发现风机和给料机运转后会产生很强的低频噪声, 对实验结果影响很大。测试系统本身具有的 A 计权网络能够有效抑制低频噪声的影响, 使有用声信号占总信号中的能量百分比增加, 信噪比得到改善。再根据有效声压的叠加原理, 将原始信号有效声压减去背景噪声的有效声压, 便得到了扬声器单频信号的有效声压。

另外一种比较理想的消噪方式, 就是通过小波分析的方法。对声信号进行 N 层分解, 图 4 为信号的小波分解树, 将尺度 N 下的近似小波系数 A_N 与噪声信号的近似小波系数进行对比, 并据此建立阈值标准, 进行阈值量化处理, 再对信号进行重构, 达到消除低频噪声的目的^[11]。消噪后的声信号再导回到测试软件, 计算后得到有效声压级。其他一些小波去噪方法可参考文献[12]。结合两种方法既能够消除低频、窄频的旋转噪声, 又能够有效地消除频带较宽的漩涡噪声。

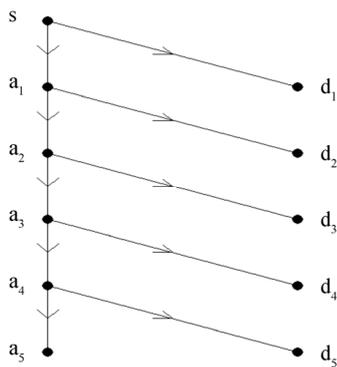


图 4 小波分解树
Fig.4 Wavelet decomposition tree

4 结论

本文通过理论模型入手, 研究出一种在强噪声条件下测试声波衰减的方法, 设计并搭建了研究声波在气固两相流内衰减特性的实验台, 推导出实验计算气固两相流声衰减系数的表达式。对实验噪声的研究表明, 实验噪声主要为风机的漩涡噪声和旋转噪声, 以及机械噪声和气流的气动噪声。根据实

验噪声的特点, 本文还提出了通过 A 计权网络和小波滤波相结合的滤除噪声的方法。下一步通过对这些频率的衰减量的测量, 便可得到对应于不同工况的气固两相流的声波衰减谱。

参 考 文 献

- [1] Epstein P S, Carhart R R. The absorption of sound in suspensions and emulsions: I. Water fog in air[J]. Acoust. Soc. Am, 1954, 25(3): 553-565.
- [2] Carstensen E I, Foldy L. Propagation of sound through a liquid containing bubbles[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1947, 19(3): 481-501.
- [3] Allegra J R, Hawley S A. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments[J]. Acoust. Soc. Am, 1972, 51(5): 1545-1546.
- [4] 苏明旭, 蔡小舒, 徐峰, 张金磊, 赵志军. 超声衰减法测量悬浊液中颗粒粒度和浓度[J]. 声学学报, 2004, 29(5): 440-444.
SU Mingxu, CAI Xiaosu, XU Feng, et al. The measurement of particle size and concentration in suspensions by ultrasonic attenuation[J]. Acta Acustica, 2004, 29(5): 440-444.
- [5] 张国军, 李晓东, 熊继军. 在管道消声系统中水雾吸声的实验研究[J]. 声学技术, 2007, 26(1): 101-104.
ZHANG Guojun, LI Xiaodong, XIONG Jijun. Experimental research of sound absorption by water fog in duct sound elimination system[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(1): 101-104.
- [6] 凌嘉赞. 浑水中兆赫频率的声衰减实验研究[J]. 声学技术, 2004, 23(3): 193-195.
LING Jiayun. Megahertz acoustic attenuation in fluidized mud[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(3): 193-195.
- [7] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 402.
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufeng. Acoustic basis[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2001: 402.
- [8] 沈国清. 基于声波理论的炉膛温度场在线监测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007: 20-21.
SHEN Guoqing. Study of real-time monitoring on furnace temperature field based on acoustic theory[D]. Beijing: North China Electric Power Univ, 2007: 20-21.
- [9] 机工程手册编辑委员会编. 电机械工程手册第 12 卷 机械产品(二)[M]. 北京: 机械工业出版社出版 1982. 8.
- [10] 安连锁. 泵和风机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 147.
AN Liansuo. Pumps and fans[M]. Beijing: China Electric Power PRESS, 2001: 147.
- [11] 刘涛, 曾祥利. 实用小波分析入门[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 116.
- [12] 杨亚菁, 钟丽萍. 去噪小波包能量法在水声信号识别中的应用[J]. 湛江海洋大学学报, 2005, 25(1): 69-72.
YANG Yajing, ZHONG Liping. Application of the denoising wavelet-packet energy method to recognition of underwater acoustic signal[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2005, 25(1): 69-72.