

共鸣发声测微方法的研究

王世民 朱新建

(精密机械与仪器系)

摘要 本文论述了共鸣发声测微法的基本原理,提出了一套用于测量发声频率与位移之间关系的实验方法。研究表明本方法具有测量范围大,抗干扰力强,测量精度高的特点。

关键词 微位移测量, 声波, 共鸣管

分类号 TN641

随着现代科学技术的发展,对精密测量提出了越来越高的要求。如在有些场合,要求非接触式,精度高、测量范围大。现有的测量手段,如电容式、气动式、电涡流式等均不能满足要求,迫切需要开发新型的测量手段。

1 共鸣管发声的机制

共鸣管的模型可以简化为一根中空的圆柱黄铜管。喷流从管的一端以一定角度吹入,管的另一端面对被测表面,见图1,气流方向如箭头所示。

从喷嘴A中喷出的气流冲击共鸣管中的空气柱,在短时间的混和过程中,空气柱从喷流中获得能量而产生振动。振动空气柱驱动周围的弹性介质,向四周空间辐射声波产生声场,该波动反作用位于声场中的喷流,对其产生扰动,扰动沿喷流方向向前传播时,从喷流中获得能量而增长,增长因子为 $\cosh(\mu x)^{[7]}$,且

$$\mu = 3.15\omega^{2/3}W^{-1/3}v^{-2/3} \quad (1)$$

式中, ω 为角声频, W 为喷流作用口径, v 为喷速, x 为沿喷流的轴向坐标。

经放大的扰动到达共鸣管口B后,如果与该处声微元的振动同相,则使该处声波的振动得到加强,并使声场从富含振动的喷流中获得能量,使声场得以建立并维持。

正反馈机制的建立条件可以通过一定的推理而获得,推理过程详见[5]。

通过分析易知,相位条件由喷气压力 P , 喷距 l , 喷流有效口径 W 获得。

在文献[6]中, J. W. Coltman 通过对声阻抗的测量,证明与本文的理论分析是一致的。该文指出,在其它条件一定时,喷压 P 的连续变化,决定了共鸣管可发声区的周期性变化。

2 位移影响共鸣管发声频率的理论分析

* 1991年12月5日收稿

喷流以一定的压力、一定的距离和一定流量口径冲击空气柱时，便可以发射出声波。但是空气柱在给定的边界条件下，产生的谐振固有频率是一定的，在本文中由于其它条件是一定的，因此位移的变化唯一地改变了边界条件，从而与变化的声频相对应。

宏观地分析，共鸣管中空气柱的振动是一种弹性纵振动，这是由于管中声音的传播是一种纵波。空气柱可以定义一个长为 L ，截面积为 A 的圆柱形体，不计空气的粘滞效应，当空气柱振动时，任何截面的空气密度随时间变化。

如图 2 所示，设 u 是空气柱任一截段 dx 的瞬时位移，当空气柱振动时，初始截段 dx 和瞬时 (dt) 截段 $dx+du$ 包含相同质量的气体，因此有：

$$A\rho dx = A(\rho + d\rho)(dx + du) \quad (2)$$

其中 ρ 为空气密度、 u 为微元速度、 A 为截面积、展开 (2) 式并略去高阶项 $d\rho du$ 。

$$d\rho = -\rho \frac{du}{dx} \quad (3)$$

又有
$$dP = B \frac{d\rho}{\rho} \quad (4)$$

式中， P 为压力， B 为体积弹性模量。根据 dx 段上惯性力与压力平衡得方程

$$A\rho dx \frac{d^2u}{dx^2} = A\left(P - B \frac{du}{dx}\right) - A\left(P - B \frac{du}{dx} - B \frac{d^2u}{dx^2} dx\right) \quad (5)$$

化简后得方程

$$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{B}{\rho} \frac{d^2u}{dx^2} \quad (6)$$

由于 u 是 x 和 t 的函数，于是 (6) 式改写成

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (7)$$

式中， $C = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$ ，波动方程 (7) 的通解可以写成如下形式：

$$u(x, t) = \sum_{i=1, 2, \dots}^{\infty} (A_i \cos P_i t + B_i \sin P_i t) \left(C_i \cos \frac{P_i}{C} x + D_i \sin \frac{P_i}{C} x \right) \quad (8)$$

式中， A_i, B_i 是由初始条件确定的常数， C_i, D_i 是由边界条件确定的常数。对于每种任一的边界条件，计算其波动方程比较困难，在这里我们可以用简单的方法计算出两种极限状态的振动模态。

(1) 当位移为零时，共鸣管一端开口一端闭口边界条件为：

$$\begin{cases} u(0, t) = 0 \\ \frac{du(L, t)}{dx} = -\frac{dP}{B} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

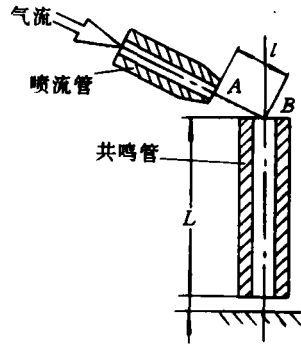


图 1 喷流驱动机理

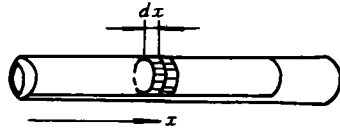


图 2 共鸣管中空气柱

因此有

$$\begin{cases} C_i(A_i \cos P_i t + B_i \sin P_i t) = 0 \\ \cos\left(\frac{P_i L}{C}\right) D_i\left(\frac{P_i}{C}\right) (A_i \cos P_i t + B_i \sin P_i t) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)得

$$\cos\left(\frac{P_i L}{C}\right) = 0 \quad (11)$$

$$P_i = \frac{C}{2L} \pi i \quad i = 1, 3, 5, \dots \quad (12)$$

$$f_{1i} = i \frac{C}{4L} \quad i = 1, 3, 5, \dots \quad (13)$$

(2) 位移为无穷大, 边界条件为两端开口:

$$\begin{cases} \frac{du(0,t)}{dx} = -\frac{d\rho}{B} = 0 \\ \frac{du(L,t)}{dx} = -\frac{d\rho}{B} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

可得振动角频率模态为:

$$f_{2i} = n \frac{C}{2L} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

虽然现代工程上对上述振动模态的求解方法已有许多, 详见[4,5]。但是在本课题中, 由于边界条件在两种极限状态中变化, 因此振动模式必定在两种状态间连续变化, 不需要进行精确的理论计算, 而需要用先进的手段进行精确的模态频率测量。

3 发声频率与位移之间关系的实验分析

3.1 测量系统的构成

测量系统的构成原理框图如图 3 所示, 各部分细则从略。

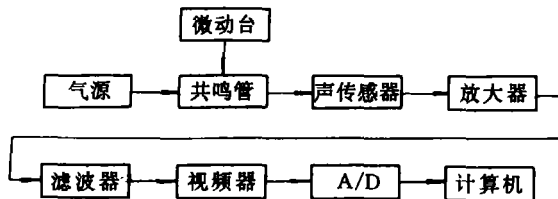


图 3 实验测量系统

3.2 实验用参数选定

在发声机理的分析中, 已知决定声音产生的因素为喷距、气压、喷嘴口径等, 在一定条件下产生的声音是由一系列谐波组成的。在空气柱振动过程中, 由于空气具有粘滞性, 因此振动是有阻尼的, 所以构成声音的谐波个数是有限的, 实验初步确定起主导作用的谐波在五阶以下。由式(13)可知, 声波基频是由管长 L 决定的, L 越长基频越低, 但

L 太短则发声功率不足, 在本文中选用 $L=24\text{mm}$, 零位移时基频在 3.6kHz 处, 这样可使测量时系统的第三阶谐波在 $17\text{--}22\text{kHz}$ 之间, 对测量有利。

将气压 P , 喷嘴口径, 共鸣管径, 喷气角度 (决定喷距 l) 四因素组合, 进行正交试验, 如表 1 所示, 发现在条件 [5] 时, 能产生较好的第三阶谐波 [5], 选取其作为工作条件。

表 1 正交参数表

序号	因 子			喷 角
	气压(大气压)	喷嘴口径(mm)	管径(mm)	
1	0.4	$\Phi 1.5$	$\Phi 2.5$	45°
2	0.3	$\Phi 1.5$	$\Phi 1.5$	30°
3	0.2	$\Phi 1.5$	$\Phi 2.0$	60°
4	0.4	$\Phi 2.0$	$\Phi 2.0$	30°
5	0.3	$\Phi 2.0$	$\Phi 2.5$	60°
6	0.2	$\Phi 2.0$	$\Phi 1.5$	45°
7	0.4	$\Phi 2.5$	$\Phi 1.5$	60°
8	0.3	$\Phi 2.5$	$\Phi 2.0$	45°
9	0.2	$\Phi 2.5$	$\Phi 2.5$	30°

3.3 位移对频率的影响

声频经放大, 带通滤波 (中心频率 20kHz) 录相转换, 再由计算机分析出其频率值。对应的位移由微动台读出, 得出位移 (s)—频率 (f) 曲线如图 4。

4 结束语

位移的变化确实通过改变边界条件而改变了声频, 从图 4 可以看出, 位移变化从 0 到无穷大, 频率并不成线性, 总的变化范围是有限的, 在 $40\text{--}80\mu\text{m}$ 的范围内有较好线性, 较高的灵敏度, 是较有应用前景的区域。

在实验中, 频率信号较为稳定, 作为初步的研究是成功的。由于没有进行实时采样, 存在一定的误差。需改进实验手段, 改变共鸣管形状, 改进信号处理方法作进一步研究, 向实时测量努力, 以便达到实用化。

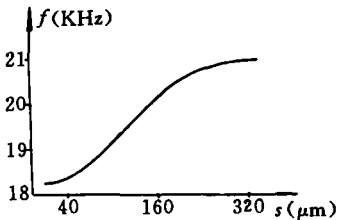


图 4 位移—频率曲线

参 考 文 献

- 1 Rayleigh L. The Theory of Sound. New York, 1945
- 2 Helmholtz H V. On the Sensation of Tone. New York, 1954
- 3 Powell A. J. A. Soc. Am, 1961, 33:395,
- 4 Cremer L and Iaing H. Acustica 19. 1963:143~153
- 5 朱新建. 应用共鸣发声测位移的机理研究, 国防科技大学硕士论文
- 6 Coltman J W. J. A. Soc. Am, 1968, 44:983~992
- 7 Fletcher N H. J. A. Soc. Am 1976, 60:926~936
- 8 Fletcher N H. J. A. Soc. Am 1974, 56:645~652

A Study on the Method of Resonant Sound Wave for Measuring Micro—Displacement

Wang Shiming Zhu Xinjian

(Department of Precision Machinery and Instrument)

Abstract

There are many methods for measuring microdisplacement accurately, but they can not be satisfied in engineering. In this paper, the principle of the resonant method for measuring displacement has been discussed. An experimental method has been put forward. It is shown that this method is wide in measurement range, high in accuracy and strong in anti-disturbance capability.

Key words microdisplacement measuring, sound wave, resonant pipe

~~.....~~

(上接第 16 页)

Symbolic Representation and Sural Pattern Parsing for Fuel Pressure Waveform of Diesel

Wu Bo Yang Shuzi Li Baicheng

(Huazhong University of Science and Technology)

Abstract

An approach to feature extraction and symbolic representation of the fuel injection pressure waveform of diesel is proposed based on peak dominance relation between peak and trough in this paper. A waveform parsing system with application to structural pattern recognition of the pressure waveform based on the representation is described. The experiments have shown it is effective to the waveform recognition.

Key words feature extraction, structural pattern recognition, parsing, waveform analysis, waveform interpretation, symbolic representation, pressure waveform, diesel