

# 弹性安装条件下机器结构声功率流的预测\*

邱桂明, 邱树业

(汕头大学物理系, 广东汕头 515063)

摘要: 本文利用机器的自由源速度, 水泥地板导纳和隔振支架的劲度系数预测了垂直方向平动自由度和两个水平方向转动自由度的结构声功率流。不同自由度间和大小不同地板间的结构声功率流进行了比较。

关键词: 自由源速度; 地板导纳; 结构声功率流

中图分类号: T B524 文献标识码: A

## Prediction of structure-borne emission for resiliently mounted machine

QIU Gui-ming, QIU Shu-ye

(Physics Department, Shantou University, Guangdong Shantou 515063, China)

**Abstract:** A prediction of vibrational power flow of structure-borne sound which involves vertical translational component and two horizontal rotational components is conducted by using the knowledge of the free source velocities of the machine, the admittance of the floors and the stiffness of the anti-vibration mounts. The comparisons are made between the different components and the floors with different size.

**Key words:** free source velocity; point mobility of floor; vibrational power flow

### 1 引言

在建筑物中, 振动机器的结构噪声控制, 最有效的方法是在其支撑点和其它与建筑结构相接触的点, 采用隔振支架和弹性连接。通常机器有四个安装点, 每个安装点由隔振支架支撑于基础(地板)之上。

传统的结构噪声控制, 用力的传递率和位移传递率来描述隔振系统的特性<sup>[1]</sup>。显然, 力和位移都不是用来描述机器通过支架向基础传递结构噪声的最合适的物理量, 因为它们都会受到基础特性的影响。表征结构噪声最恰当的物理量应该是振动从机器向基础传递的功率流。对于结构噪声, 除了平动的成分之外, 还应该考虑转动成分, 因此这种功率流的传递应该是多自由度的。

本文以一台 650W 的风机为例, 选择大、小两块水泥地板, 分别测量出机器的自由源速度和地板的导纳, 并以传统的机器安装模式估算出支架的劲度系数, 从而预测出在不同安装条件下机器向基础传递的平动和转动结构声功率流。

### 2 机器的结构声功率流

如果略去机器的四个安装点之间的相互作用, 我们可以建立如图 1 所示的简单模型: 一台机器由单一弹性支架支撑。若地板安装点导纳, 作为一个复数量, 表为  $Y_f$ , 机器振动通过弹性支架向地板传递的平动功率流可以表示为:

$$P_f = (1/2) \operatorname{Re}[Y_f] F_s^2$$

当弹性支架的导纳远大于地板导纳时, 上式又可近似表为:

$$P_f = (1/2) \operatorname{Re}[Y_f] K_f^2 \left( \frac{U_0^2}{\omega^2} \right) \quad (1)$$

式中  $\operatorname{Re}[Y_f]$  为  $Y_f$  的实数部分。  $F_s, K_f$  和  $\omega$

\* 收稿日期: 99-10-19; 修订日期: 99-12-02

广东自然科学基金资助项目

作者简介: 邱桂明(1962-), 男, 讲师。

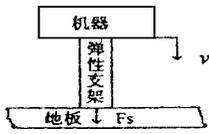


图 1 机器的弹性支撑模型

分别表示作用于地板的力，弹性支架的劲度系数和机器的自由源速度。

同理若地板安装点的力矩导纳，作为一个复数量，表为  $Y_m$ ，可得到机器振动通过弹性支架向地板传递的转动功率流表示式

$$P_m = (1/2) \operatorname{Re}[Y_m] K_m^2 \left( \frac{\dot{Q}_0}{\omega} \right)^2 \quad (2)$$

式中  $\operatorname{Re}[Y_m]$  为  $Y_m$  的实数部分， $K_m$  和  $\dot{Q}$  分别表示弹性支架转动劲度系数和机器自由源角速度。

由上可知，对于弹性安装的机器，要预测其结构发射，必须知道以下三个参量：(1) 机器的自由源速度；(2) 减震弹性支架的劲度系数；(3) 地板的导纳。

### 3 机器的自由源速度的测量

当机器处于完全自由状态下开动，安装点的速度称之为“自由源速度”<sup>[2]</sup>。通常，当支架的导纳远大于机器的源导纳时，安装点的速度即为自由源速度的很好近似<sup>[3]</sup>。

本文以一台 650W 的小型排气风机作测量，该风机的基板内有四个对称的安装点。被测的机器用弹性绳悬挂<sup>[4]</sup>。当机器开动时，使用一对加速度计分别固结于安装点两边，拾取加速度信号，该信号通过一个具有加及减功能的电荷放大器放大后，输入到一台 FFT 分析仪进行测量和储存，最后再由计算机进行有关运算获得最后结果。测量在机器基板上的 4 个安装点进行。作为例子，图 2 和图 3 分别表示了其中的一个安装点的垂直方向平动自由源速度和水平两个方向的转动自由源速度(角速度)，其它 3 个安装点的结果与此相似。

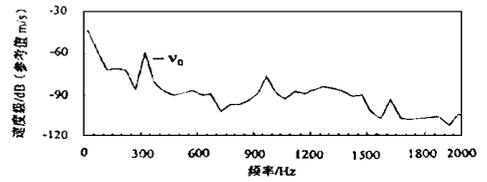


图 2 机器的自由源速度

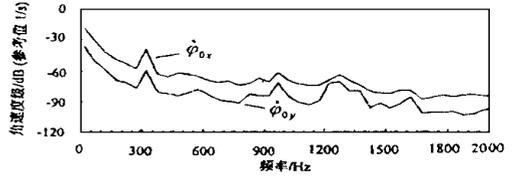


图 3 机器的自由源角速度

## 4 力导纳和力矩导纳测量

力导纳  $Y_f$  和力矩导纳  $Y_m$  分别定义为：

$$Y_f = v/F, \quad Y_m = \dot{Q}/M \quad (3)$$

式中  $F$  和  $M$  分别表示对结构所施加的力和力矩， $v$  和  $\dot{Q}$  分别表示结构的响应，即速度和角速度。

力导纳的测量分别在两块大、小不等的水泥板上进行。大水泥板的面积  $2.00 \times 1.50\text{m}^2$ ，混凝土浇注、下垫厚 0.05m 木桩；小水泥板面积为  $1.50 \times 1.00\text{m}^2$ ，厚度为 0.03m，下面用约 0.12m 厚的弹性材料支撑。力导纳的测量使用脉冲响应法<sup>[5]</sup>。使用一只 B&K 公司生产的力榔头敲击测量点，由冲击头后面的力传感器拾取冲击力信号，其响应由固结于测量点附近的加速度计拾取。力和加速度信号分别输入一个双通道 FFT 分析仪进行分析。测量工作主要是要获得一个传递函数，再将其对时间进行一次积分，即可得到力导纳。为了减少误差，采用现场求平均的方法，即连续敲击不同位置的 8 个点，每点敲击 16 次，共计 128 次输入 FFT 分析仪求得整个“地板”的导纳平均值。

力矩导纳的测量，使用了一个自行研制的力矩激励器<sup>[6]</sup>。由激励器内的一对小型力传感器拾取激励器施加于地板力偶，由固结

于激励器压板两旁的一对加速度计拾取其响应,即加速度。同时使用两台具有加及减功能的双通道电荷放大器。一对力和一对加速度信号在进入FFT分析仪之前,分别进行了相减运算。双通道FFT分析仪的分析工作同样也是获得一个传递函数,再进行一次积分,最后得到力矩导纳。由于力矩激励器的激励功率有限,力矩导纳的测量只在小水泥板上进行。

大、小水泥板的力导纳和小水泥板的力矩导纳测量结果分别表示于图4和图5。

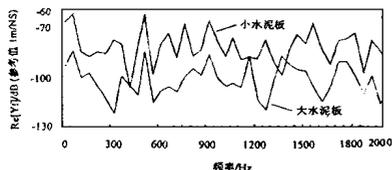


图4 大、小水泥板的力导纳

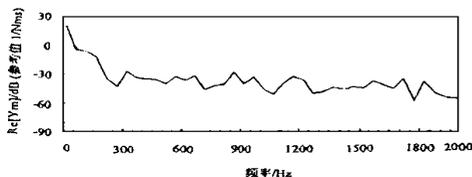


图5 小水泥板的力矩导纳

## 5 安装支架的劲度系数

一般在隔振设计时,知道了机器的扰动力频率或外界干扰频率 $f$ ,则可设计隔振系统的固有频率 $f_0$ ,使之满足 $f > (2-5)f_0$ ,才能有较好的减弱振动传递的效果。因此机器和弹性支架系统的固有频率应设计在尽可能低的数值。

机器平动时,4个弹性支架可以抽象为一个弹性支撑,其等效劲度系数 $K_f$ 应为四个弹性支架并接,若每个支架的劲度系数为 $K$ ,则 $K_f = 4K$ ,如图6(a)所示。如果机器质量为 $M$ ,系统的固有频率为 $f_0$ ,则

$$K_f = M\omega^2 = M \times (2\pi f_0)^2$$

本文供测量的小型排气风机的质量约为

25kg,若选取固有频率 $f_0 = 5\text{Hz}$ ,由此估算出 $K_f = 25.0 \times (2\pi \times 5)^2 = 2.50 \times 10^3 \text{N m}^{-1}$ 机器的转动劲度系数,应定义为: $K_m = M/\theta$ 。即机器偏转角 $\theta$ 与弹性支架作用力矩的比值。显然机器在不同方向的偏转, $K_m$ 值是不同的。设机器在 $x$ 方向偏过 $\theta$ 角,所对应的弧长为 $S$ ,因此有

$$M = FLx, \quad \theta = S/(Lx/2)$$

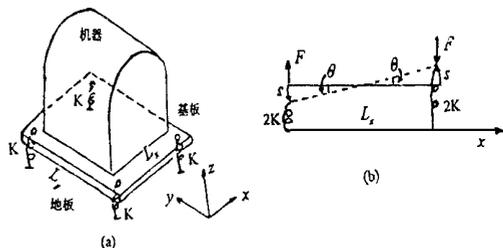


图6(a) 机器弹性安装模型 (b) 机器在 $x$ 方向偏转时劲度系数的确定

由图6可知: $(F/S)$ 近似等于 $K_f/2$ ,所以有 $K_m = (L_x^2/4)K_f$

根据排气风机的具体尺寸,分别获得:

$$K_{mx} = 96.4 \text{ N m}, \quad K_{my} = 574 \text{ N m}$$

## 6 结果和讨论

图7所示的是由测量的机器4个安装点自由源速度的平均值和小水泥地板导纳的实数部分以及估算的弹性支架劲度系数,根据式(1)和式(2)所计算获得的结果。图中三条曲线实际上显示了机器在相同的安装条件下,垂直方向( $Z$ 轴方向)平动的结构声功率流 $P_f$ 和两个水平方向( $X$ 轴和 $Y$ 轴方向)转动的结构声功率流 $P_{mx}$ 和 $P_{my}$ 。在整个研究的频率范围内,从200Hz开始,转动自由度的功率流均小于平动自由度的功率流。随着频率的增加,它们的差值似有增大的趋势,最大差值可达35dB。但是,在500Hz以下的频率区域,转动自由度的结构声功率流不容忽视。另外,从图中可以看出,由于机器基板的长、短边尺寸不同造成 $K_{mx}$ 和 $K_{my}$ 的不同,从而出现 $P_{my}$ 在某些频段大于 $P_{mx}$ 的结果。

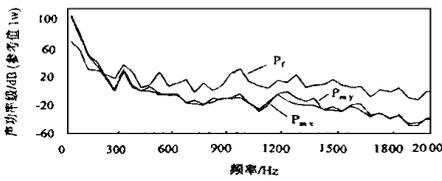


图 7 机器的平动和转动结构声功率流的比较

图 8 所示的是使用大、小水泥地板力导纳数据所预测出的两条平动结构声功率流曲线。其中  $P_{f1}$  和  $P_{f2}$  实际上分别代表安装地板为大水泥板和小水泥板时机器的结构声功率流。此结果生动的说明了安装条件对结构声功率流的影响。机器安装在大水泥地板之上,其结构声功率流会大大低于安装在小水泥地板之上的情况,两者可以相差 30dB ~ 40dB 之多。这个结果是可以理解的,但相差如此之大,却是出乎意料的。

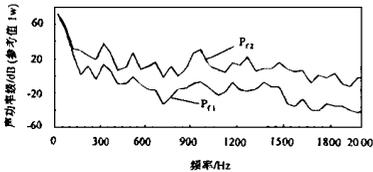


图 8 不同地板对结构声功率流的影响

本文是在机器弹性安装条件下,对结构声功率流进行了预测。但是,工程师也可以根据机器的结构声功率流的限值标准,对特定

厂房的地板和所选用的机器反过来估算出所要求的  $K_f$  和  $K_m$  值,从而保证机器在安装后在结构声功率流方面获得满意的结果。因此,本文的预测方法具有广泛的应用前景。

本文仅考虑弹性支架的静态劲度系数。有关研究表明,劲度系数随着频率增大而有所增加<sup>[3]</sup>。因此,考虑这个因素,高频的结构声功率流将比图 7 和图 8 所示的大些。在实际预测中,应考虑采用动态劲度系数数据或对预测结果作适当的修正。

参考文献:

- [1] 孙广荣,吴启学. 环境声学[M]. 南京大学出版社, 1995: 153-157.
- [2] Wolde T ten and Gadeflet G R. Development of standard measurement methods for structure-borne sound emission [J]. Noise Control Engineering Journal, 1987, 28(1): 5-14.
- [3] Moorhouse A T. Structure-borne emission of installed machinery in building[J]. University of Liverpool, U. K. 1989.
- [4] 罗标, 邱树业. 机器的自由源速度的测量[J]. 环境工程, 1999, 17(1): 46-48.
- [5] 邱树业. 混凝土地板力导纳的研究[J]. 汕头大学学报, 1991, 6(1): 32-36.
- [6] 邱树业, 邱桂明等. 利用力-电类比方法研究力矩激励器[J]. 声学学报, 1996, 21(6): 941-945.

(上接第 70 页)

- [2] Y. Gong. Stochastic trajectory modeling and sentence searching for continuous speech recognition [J]. IEEE Trans. SAP, 1997, 5(1): 33-44.
- [3] S. Furui. Speaker-independent isolated word recognition using dynamic features of speech spectrum [J]. IEEE Trans. ASSP, 1986, 34(1): 52-59.
- [4] K. K. Paliwal. Use of temporal correlation between successive frames in a hidden Markov model based speech recognizer [J]. In: Proc. ICASSP, 1993, 2: 215-218.
- [5] K. F. Lee. Large-vocabulary speaker-

- independent continuous speech recognition: the SPHINX system [J]. [Ph. D. dissertation]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1988.
- [6] 马小辉, 龚一凡, 富煜清等. 基于随机轨迹模型的汉语连续语音识别方法的研究[J]. 声学学报, 1997, 22(2): 176-181.
- [7] M. Ostendorf, S. Roucos. A stochastic segment model for phoneme-based continuous speech recognition. IEEE Trans. ASSP, 1989, 37(12): 1857-1869.
- [8] A. Ljolje, S. E. Levinson. Development of an acoustic-phonetic hidden Markov model for continuous speech recognition [J]. IEEE Trans. SP, 1991, 39(1): 29-39.