

互易原理在力矩导纳测量中的作用

苏建新 邱树业

(汕头大学物理系 广东汕头·515063)

本文将力导纳的互易原理应用到力矩导纳测量中去,对力矩导纳间接测量的结果可信性给出一个判定方法,并进行相应的实验。

关键词: 间接测量, 导纳, 互易原理

The role of reciprocity in measuring moment mobility

SU Jianxin QIU Shuye

(Department of Physics Shantou University, Guangdong, Shantou · 515063)

In this paper, we apply the principle of reciprocity to judge the reliability of result of indirect measurement of moment mobility. We have done related experiments and discussed.

Key word: indirect measurement, mobility, reciprocity

1 引言

振动源在待安装点处的振动速度和导纳是描述源振动属性的重要物理量^{[1][2]}, 振动源不但激发平动功率而且激发转动功率, 因此不但要考虑平动速度和力导纳而且要考虑转动速度和力矩导纳。对于源的平动自由速度和力导纳的测量并不十分困难且测量方法已有国际标准^{[3][4]}, 然而对于力矩导纳的测量依然还没有一个普遍接受的方法, 主要是由于缺乏有效的力矩激励器。现有的方法有直接测量和间接测量两种^[5~8], 直接测量用一对力激励器或一种力矩激励器作为激励源, 但激励源的力矩纯度问题一直得不到较好的解决, 特别是在交叉导纳大的地方纯度问题尤其突出。因此常采用间接测量方法, 该方法先测量多个力导纳再通过计算获得。力

矩导纳由于测量过程复杂, 精度不能达到要求, 对于简单模型而言, 往往把成熟的理论和实验的结果作比较, 从而决定测量的结果是否被接受, 然而实际的结构难用理论计算出导纳, 因此较难确定测量结果的可信性。本文采用间接测量结合互易原理对力矩导纳测量进行研究, 对测量的结果作出一个评判, 可按照不同的要求决定是否接受测量结果。

2 间接测量力矩导纳的方法

如图 1(a) 所示, 设点 1 处是力矩激励点, 点 2 处是响应点(这里的点不是数学上的几何点, 而是有一定的面积, 只是线度比波长小得多), 那么从点 1 到点 2 处的力矩传递导纳定为: $Y_{M_1}^{W_2} = \frac{W_2}{M_1}$ 式中 M_1 是点 1 处的力矩, W_2 是点 2 处的角速度, 对于 W_2 的测量并非

是困难的事, 但一个纯力矩的获得却十分困难, 至今没有一个普遍接受的方法。本文利用力导纳的测量方法, 得到如下几个量:

$$Y_{1l}^{2l} = \frac{V_{2l}}{F_{1l}} \quad Y_{1l}^{2r} = \frac{V_{2r}}{F_{1l}} \quad (1)$$

$$Y_{2r}^{2l} = \frac{V_{2l}}{F_{1r}} \quad Y_{2r}^{2r} = \frac{V_{2r}}{F_{1r}}$$

从而实现间接测量力矩导纳的目的, 见图 1 (b) F_{1l} 代表施加在点 1 左端的力, 方向垂直于表面。

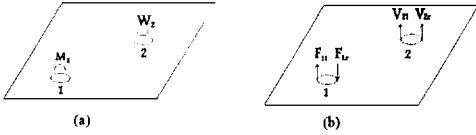


图 1 间接测量法原理图

V_{2l}, V_{2r} 分别代表在力 F_{1l} 的作用下, 在位置 2 的左右两边的速度响应。 F_{1r} 代表施加在点 1 右端的力, 方向垂直于表面。 V_{2l}, V_{2r} 分别代表在力 F_{1r} 的作用下, 在位置 2 的左右两边的速度响应, 如果在点 1 左右两端同时施加力 f 和 $(-f)$, 那么在点 1 处的力矩为 $M = fd_1$ 则对应位置 2 处角速度为:

$$W_{2z} = \frac{(Y_{1l}^{2l}f + Y_{1r}^{2l}(-f)) - (Y_{1l}^{2r}f + Y_{1r}^{2r}(-f))}{d_2} \quad (2)$$

从而得点 1 到点 2 的力矩传递导纳:

$$Y_{M_1}^{W_2} = \frac{Y_{1l}^{2l} - Y_{1r}^{2l} - Y_{1l}^{2r} + Y_{1r}^{2r}}{d_1 d_2} = \frac{(Y_{1l}^{2l} - Y_{1r}^{2l}) - (Y_{1l}^{2r} - Y_{1r}^{2r})}{d_1 d_2} \quad (3)$$

d_1 代表两个力激励点的间距, d_2 代表左右两个速度点的间距, 同理我们可以得出从点 2 到点 1 的力矩导纳, 只要把公式(3)中标号“1”“2”互换则:

$$Y_{M_2}^{W_1} = \frac{(Y_{2l}^{1l} - Y_{2r}^{1l}) - (Y_{2l}^{1r} - Y_{2r}^{1r})}{d_1 d_2} \quad (4)$$

当力矩激励点和对应的响应点是同一点时, 可得到的是点力矩导纳。

3 互易关系

对于上述间接测量方法, 误差可能会较

大, 一个很重要的原因来自力激励器的安装上^[9]。这在力导纳测量上也许影响不算大, 但这样测量力矩导纳, 精度会降低, 测量值会被误导。因此最好能对测量值的可信度有个评判。按照不同的要求决定对测量结果是否接受。按照互易原理, 对于一个线性无源系统, 力传递导纳有如下关系: $Y_n^m = Y_m^n$, Y_n^m 代表 n 到 m 处的力传递导纳, Y_m^n 代表 m 处到 n 处的力传递导纳。则有:

$$Y_{1l}^{2l} = Y_{2l}^{1l}; Y_{1l}^{2r} = Y_{2r}^{1l}; Y_{1r}^{2l} = Y_{2l}^{1r}; Y_{1r}^{2r} = Y_{2r}^{1r} \quad (5)$$

式(5)代入式(4), 得:

$$Y_{M_1}^{W_2} = Y_{M_2}^{W_1} \quad (6)$$

(6) 式称为力矩导纳的互易性, 是力导纳互易原理的推论。若(6)式两边的测量值和真值一致, 则两边的测量结果应相等; 反之, 若左右两边的测量值相等, 就相信测量结果。

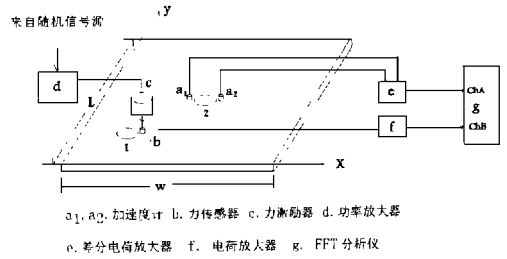


图 2 实验装置示意图

4 实验

本文的实验在尺寸为 $14mm \times 1440mm \times 1200mm$ 的有机玻璃板上进行, 测量装置见图 2, 点 1 的坐标 $(w/4, L/4)$, 点 2 的坐标 $(w/2, L/2)$, 选 $d_1 = d_2 = 30mm$, 频率 $0 \sim 1.6kHz$ 对应的亥姆赫兹数 $Kd_1 < 0.1$, 为提高效率和正确性, $Y_{1l}^{2l} - Y_{1r}^{2l}$ 及 $Y_{1l}^{2r} - Y_{1r}^{2r}$ 的值通过一对加速度计和一个差分电荷放大器一次完成测量, 实验结果示于图 3:

图 3(a) 反映 $Y_{M_1}^{W_2}$ 和 $Y_{M_2}^{W_1}$ 实验值的模的差别, 纵坐标: $\epsilon = 20 \lg \frac{Y_{M_1}^{W_2}}{Y_{M_2}^{W_1}}$ (dB);

图 3(b) 反映 $Y_{M_1}^{W_2}$ 和 $Y_{M_2}^{W_1}$ 实验值的实部差别, 纵坐标: $\epsilon = 20 \lg [\text{Re}(Y_{M_1}^{W_2}) / \text{Re}(Y_{M_2}^{W_1})]$ (dB);

图 3(c) 反映 $Y_{M_1}^{W_2}$ 和 $Y_{M_2}^{W_1}$ 实验值的虚部差别,

纵坐标: $\epsilon = 20 \lg [I_m(Y_{M_1}^{W_2}) / I_m(Y_{M_2}^{W_1})]$ (dB),

由图 3 可知, 低频范围较差, 这是因为信噪比低。除低频外, ϵ 基本上落在 ± 2 dB 以内, ϵ_1, ϵ_2 大多也落在 ± 2 dB 以内, 但也出现了许多频段不理想, 或说这些频段值不可信。总体上, 在本文的实验中, 用间接测量的方法测得的力矩导纳, 仍有相当的可信度。从理论上说, 频率越高转动信号越强, 测量应更准一些, 而实际上从图 3(b)(c) 看出, 并没有这样的结论, 反而更差。因为频率越高, 力激励器激发出力的纯度会越低, 力矩会参杂进去, 因此, 对于这种情况, 不但力矩传递导纳的测量结果不可信, 而且测得的力矩点导纳也是不可信的。这样, 就要求更换激励器与力传感器之间的连接杆, 要求更为柔软。力矩激励器的安装随着频率升高, 有更高的要求^[3]。

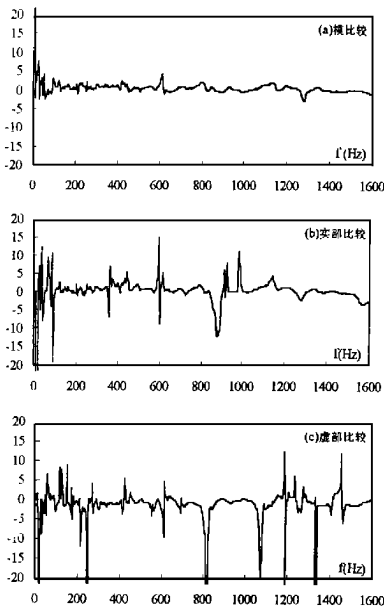


图 3 点 1 到点 2 力矩传递导纳测量值与点 2 到点 1 力矩传递导纳测量值的比较。

5 结 论

在力导纳测量中, 力的互易性往往是用于减少测量次数, 力矩导纳的互易性原则上也可减少测量的次数, 但实际过程中, 力矩测量的困难性, 往往是测量精度不够, 容易误导。因此, 用互易性作为检验测量结果更为有意义。

参考文献

- 1 Mondot, J. K. and Petersson, B. Characterization of structure-borne sound sources: The source descriptor and the coupling function. *Journal of Sound and Vibration*, 1987; 114(3): 507 ~ 518
- 2 SU Jianxin, and Moorhouse, A. T., and Gibbs, B. M., Towards a practical characterization for structure-borne sound sources based on mobility techniques. *J. of Sound and Vibration*, 1995; 185(4): 737 ~ 741
- 3 Draft International Standard ISO/DIS 9611
- 4 International Standard ISO 7626/1
- 5 Petersson, B., On the use of giant magnetostrictive devices for moment excitation, *J. of Sound and Vibration*, 1987; 116(1); 191 ~ 194
- 6 Sanderson, M. A. and Fredo, C. R. Direct measurement of moment mobility part I: a theoretical study. *J. of Sound and Vibration*, 1995, 170(4); 669 ~ 684
- 7 Sattinger, S. S., A method for experimentally determining rotational mobilities of structures. *The Shock and Vibration Bulletin*, 1980; 50(2); 17 ~ 28
- 8 Ewins, D. J. and Gleeson, P. T. Experimental determination of multidirectional mobility data for beam. *The Shock and Vibration Bulletin*. 1975; 45(5); 153 ~ 173
- 9 Petersson, B. On the experimental techniques for measuring moment mobility. *Repor TVBA-3035, Lund*, 1986(September)