

利用广义归一化函数带预测结构声功率

苏建新

(汕头大学物理系, 汕头 515063)

摘要: 预测结构声源进入到支撑结构功率的精确公式包含机器在安装点的导纳矩阵、自由速度、以及支撑结构在安装点的导纳矩阵, 缺乏实用性。利用广义归一化函数带获得机器透过安装点传入支撑结构功率的近似预测公式。近似预测公式涉及一对源物理参数和一个等效支撑结构导纳。文章以两个典型实际机器安装到无限大“水泥板”和有限大“水泥板”为例进行了结构声功率的预测。结果表明, 近似预测的误差程度与利用计算机构造虚拟结构的方法获得广义归一化函数带的宽度相吻合。研究的结果为利用计算机构造虚拟结构研究结构声的方法提供了强大的例证。

关键词: 结构声; 近似预测; 广义归一化函数带

中图分类号: O422.8 O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2006)-04-0371-05

Predicting structure-borne sound power using general normalized function band

SU Jian-xin

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

Abstract: The formula for predicting structure-borne sound power emission from source to supporting structure contain source free velocity, source mobility matrix and supporting structure mobility matrix, and is inconvenient. By using a general normalized function band, three approximate prediction expressions which containing a pair of physical parameters and equivalent mobility of supporting structure is obtained. With two typical fans attached to an infinite plate and a finite plate as examples, structure-borne sound power is predicted with the proposed approximate formula. Results show that errors of the approximate method are in agreement with the width of normalized function band obtained based on simulation. It gives a positive example for studying structure-borne sound by using the method of computer simulation in constructing the virtual structure.

Key words: structure-borne sound; approximate prediction; general normalized function band

1 引 言

机器透过安装点进入到支撑结构的总功率反映结构噪声强度的观点已被普遍接受。预测该值一直是人们所感兴趣的。导纳方法能精确预测进入到支

撑结构的功率, 但预测精确公式涉及到机器在安装点的导纳矩阵、自由速度以及支撑结构在安装点的导纳矩阵。由于涉及的元素过多, 缺乏实用性。因此给出一个更为简单的又能在工程上被接受的近似预测方法。

一种方法是不考虑点与点之间的耦合作用, 该方法等同于等效导纳方法的点导纳假设^[1], 这样可把大量的元素忽略掉, 但这种方法仍会保存过多的元素, 对源安装到支撑结构后透入的总功率--这种反映结构噪声整体行为的量——不够直观。另一方面在工程上也没有回答这种方法在精准性上所做的

收稿日期: 2006-01-25; 修回日期: 2006-04-10

基金项目: 广东省自然科学基金博士科研启动基金资助项目(05300906)。

作者简介: 苏建新(1960-), 男, 浙江金华人, 博士, 主要从事结构噪声领域的研究工作。

牺牲约在何种程度? Pinnington 等人利用 Hadamard 矩阵变换, 引入了极子方法^[2], 和前种方法一样, 上述的两个问题同样存在。本文利用文献[3]引入的广义归一化函数带给出一种简单的预测方法。

2 从广义归一化函数带获得预测公式

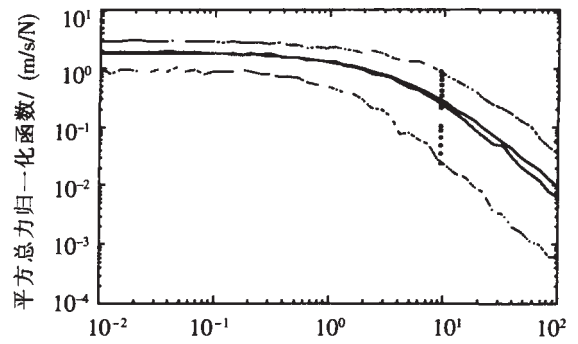
对广义归一化函数带先做一个简单的回顾。文献[3]把源辐射到支撑结构的总功率改写成下列形式

$$P = S_g C_{gf} \quad (1)$$

S_g 是一个只依赖源的量, 称为特征函数, C_{gf} 称为广义归一化函数, 它代表单位源特征函数馈给支撑结构的功率。特征函数和相应广义归一化函数可有多种选择形式。文献[3]选择了三种特征函数的形式, 分别是平方总力 S_{gCF} (定义为机器在各安装点的阻塞力均方值之和) 一类特征功率 S_{gCP1} (自由速度行向量的复共轭和阻塞力列向量乘积大小的一半) 和二类特征功率 S_{gCP2} (定义为各安装点的阻塞力均方值之和与自由速度均方值之和乘积的平方根)。与之对应的广义归一化函数分别称为平方总力归一化函数 C_{gCF} , 一类特征功率归一化函数 C_{gCP1} , 和二类特征功率归一化函数 C_{gCP2} 。

对于给定一个支撑结构的导纳矩阵, 用计算机构造许多组矩阵和列向量。每组包含数百个矩阵和列向量, 同一组矩阵对角元素大小的平均值是相同的。矩阵和列向量模拟成为机器在安装点的导纳矩阵和自由速度。每个矩阵和列向量对应一个模拟机器。每个模拟机器“连接”到上述给定的那个支撑结构, 按照特征函数的具体形式, 可算得对应广义归一化函数的值。以上述给定的那个支撑结构平均点导纳的大小与模拟机器平均点导纳比值为横坐标, 广义归一化函数 C_{gf} 为纵坐标, 建立 $C_{gf} \sim$ 坐标系。每个 C_{gf} 就可有一组 C_{gf} 与之对应(见图1与纵轴平行的那条线)。当 C_{gf} 从小到大会变化就会在 $C_{gf} \sim$ 坐标系扫成一条带, 称其为“广义归一化函数带”。

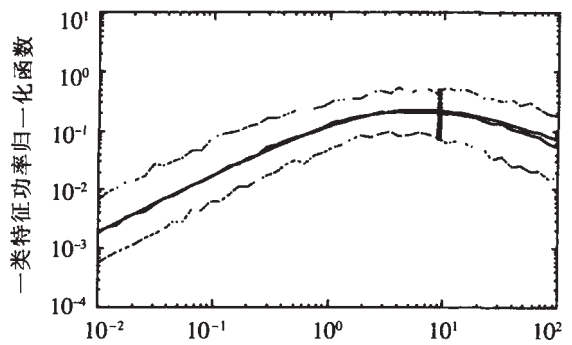
图1是文献[3]给出了某个支撑结构的导纳矩阵, 其状态值约 10dB, 特征函数分别选为平方总力、一类特征功率和二类特征功率对应的三条带。这三条带更合理的名称为“具有 95% 置信度广义归一化函数带”, 其含义是对于上述给定的那个支撑结构导纳矩阵, 虽然给出的源平均点导纳的大小的信息无法唯一正确地确定与广义特征函数相对应的广义归



支撑结构和源点导纳大小的平均值之比

(a) 平方总力作为源特征函数

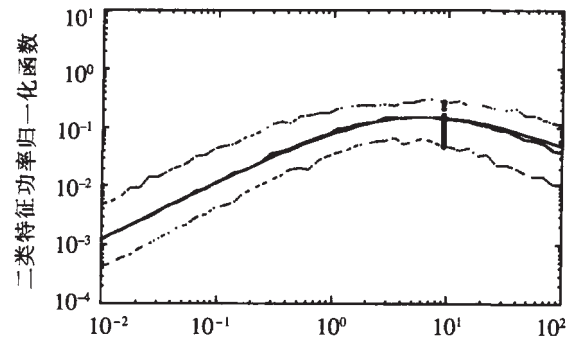
The total square force as characteristics function



支撑结构和源点导纳大小的平均值之比

(b) 一类特征功率作为源特征函数

First kind of characteristics power as characteristics function



支撑结构和源点导纳大小的平均值之比

(c) 二类特征功率作为源特征函数

Second kind of characteristics power as characteristics function

图1 广义归一化函数带。支撑结构状态量为 10.3dB

Fig1 General normalized function band. The condition number $\kappa=10.3\text{dB}$

一化函数值, 但有 95% 的可能性落在“广义归一化函数带”里边。如果改变支撑结构导纳矩阵, 相应的广义归一化函数带的形状几乎不变, 而宽度在较小区域有改变。关于这方面文献[3]作了陈述和讨论。这意味着如果认为广义归一化函数带并不很宽, 那末广义归一化函数 C_{gf} 可用下列形式来近似, 即:

$$C_{gf} f(R)L() \quad (2)$$

$L()$ 反映带的形状, 称其为带形函数, 而 $f(R)$ 是与支撑结构导纳矩阵相关的函数, 它反映带的“高、低”位置。本文以中线(图 1 带中的实线, 其定义见文献[3])作为广义归一化函数的近似值。平方总力归一化函数、一类特征功率归一化函数和二类特征功率归一化函数中线分别记为 C_{gfCFM} 、 C_{gfCPIM} 和 C_{gfCP2M} 。它们分别可用下列公式近似:

$$C_{gfCFM} \frac{\overline{\text{Re}(Y_{R,ii})}}{\left|1+(\cdot/0.5)^{0.95}\right|^{1.9}} \quad (3)$$

$$C_{gfCPIM} \frac{\overline{\text{Re}(Y_{R,ii})}}{\left|Y_{R,ii}\right|} \frac{(\cdot/0.6)^{0.95}}{\left|1+(\cdot/0.6)^{0.95}\right|^{1.8}} \quad (4)$$

$$C_{gfCP2M} \frac{\overline{\text{Re}(Y_{R,ii})}}{\left|Y_{R,ii}\right|} \frac{(\cdot/0.6)^{0.95}}{\left|1+(\cdot/0.6)^{0.95}\right|^{1.8}}/1.5 \quad (5)$$

式中 $\left|Y_{R,ii}\right|$, $\overline{\text{Re}(Y_{R,ii})}$, 分别代表支撑结构点导纳大小的均值和实部的均值。处在图 1(a)、(b)、(c) 三条带中间的三条细线分别是使用式(3)、(4)、(5)得到的结果。这样功率 P 可用下列三个近似式表示。

$$P \frac{\overline{\text{Re}(Y_{R,ii})}}{\left|1+(\cdot/0.5)^{0.95}\right|^{1.9}} S_{gCF} \quad (6)$$

$$P \frac{\overline{\text{Re}(Y_{R,ii})}}{\left|Y_{R,ii}\right|} \frac{(\cdot/0.6)^{0.95}}{\left|1+(\cdot/0.6)^{0.95}\right|^{1.8}} S_{gCP1} \quad (7)$$

$$P \frac{\overline{\text{Re}(Y_{R,ii})}}{\left|Y_{R,ii}\right|} \frac{(\cdot/0.6)^{0.95}}{\left|1+(\cdot/0.6)^{0.95}\right|^{1.8}} S_{gCP2}/1.5 \quad (8)$$

上述三个表达式里涉及到支撑结构的量可看作一个等效导纳, 该导纳的大小等于支撑结构点导纳大小的均值, 而其部为点导纳实部的均值。

3 几种近似预测方式的比较

本文选择两个典型风机(称为风机 1 和风机 2)安放到无限大“水泥板”和有限大“水泥板”为例, 比较各种近似预测功率的方式。这两个风机在待安装点的自由速度和导纳矩阵是测量得到。而“水泥板”导纳是由计算得到。图 2 是风机 1 放到一个无限大的水泥板上 在不同频率的值。

图 3(a)、(b)、(c) 分别用式(6)、(7)、(8) 近似式预测的结果与未经简化的精确公式的预测结果的比值。结果表明式(6) 预测的结果比用式(7) 和(8) 的

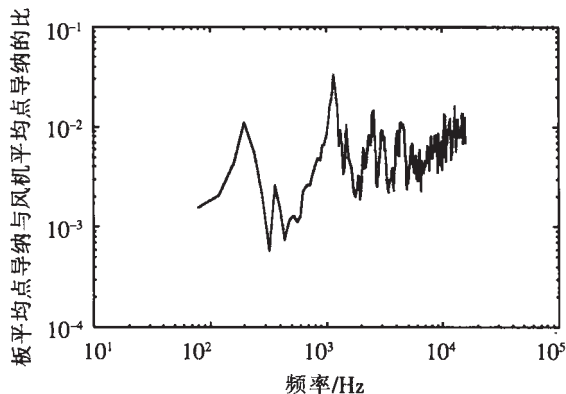
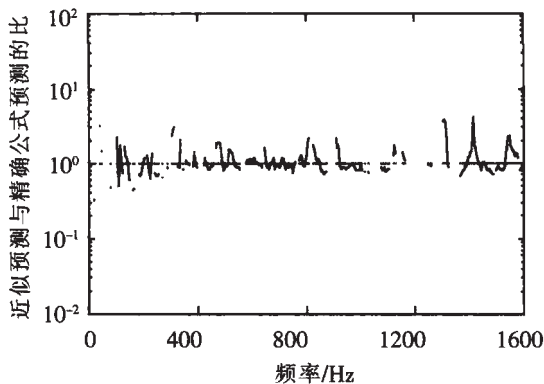


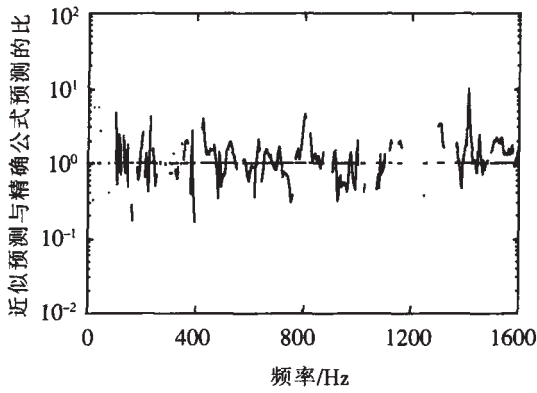
图 2 水泥板平均点导纳与风机 1 平均点导纳的比随频率的变化
Fig.2 The ratio of mean point mobility magnitude of concrete plate with fan1 against frequency

结果好的多。这是因为在这个例子里 都在 3×10^2 以下, 在该区域式(6) 对应的带宽比式(7)、(8) 对应的带宽要窄的多。把正误差较大的一些点和负误差较大的一些点排除在外。落在中间的 95% 的点分别落在 -2.5dB 和 +4dB(图 2(a)); -5dB 和 +5.5dB(图 2(b)); -5dB 和 +5dB(图 2)) 之间。(限于篇幅作者没有把统计分析单独画出)。因此, 尽管广义归一化函数带是基于计算机构造虚拟机得到, 但得到的结果无论在定性上和定量上能与实际很好的吻合。值得一提的是在 很小时, 公式(6) 中间项非常靠近 1, 这样近似预测功率的表达式就变的很简单, 和文献[4] 的表达式是一样的(支撑结构点导纳实部的平均值和导纳矩阵实部的平均特征值是相等的)。图 3(d)、3(e) 分别为无耦合法和极子方法得出的结果, 它们没有带来更好的预测结果。有的频段上风机最小特征值小于零, 这是由于实验误差过大带来的结果, 和文献[4] 一样在这些地方没有画出。

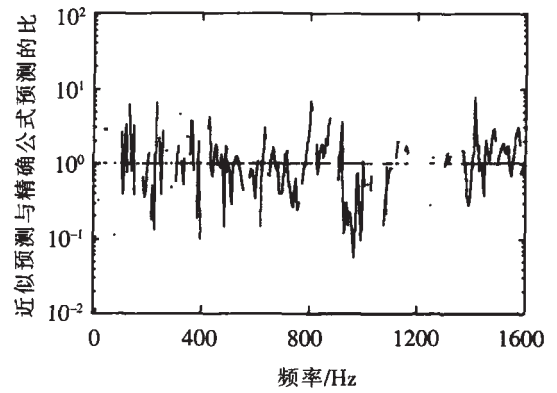
图 4 是同一个风机放到一个较先前更薄的水泥板上近似方法和精确公式预测的比较。这里 在 0.2 到 4 之间。这次用式(6) 的预测结果没有用公式(7) 和(8) 那样好。(用式(8) 预测结果没有画出, 但它



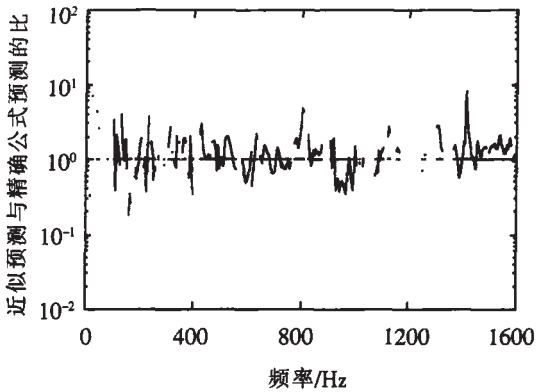
(a) 本文公式(6) 方法 Proposed method equation(6)



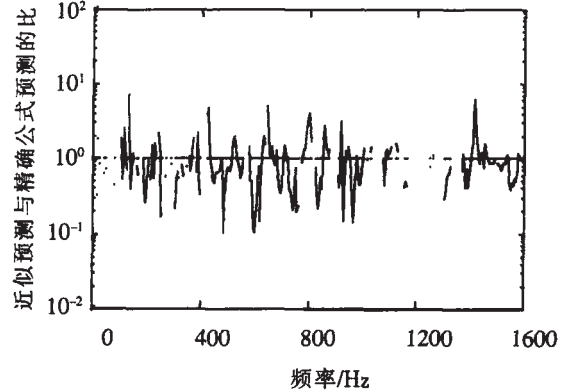
(b)本文公式(7)方法 Proposed method equation(7)



(d)无耦合法 No coupling method



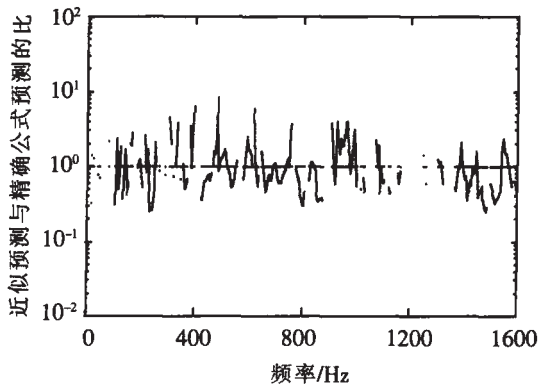
(c)本文公式(8)方法 Proposed method equation(8)



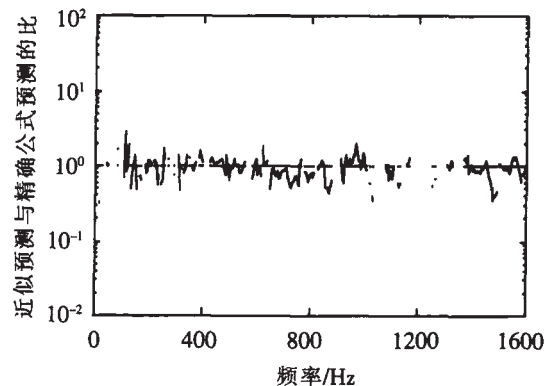
(e)极子方法 Polar method

图3 近似方法与精确公式预测风机1进到低导纳无限大水泥板的功率的比

Fig.3 The ratio of approximate method with exact method for predicting power from fan 1 into lower mobility infinite plate



(a)本文公式(6)方法 Propose method equation(6)



(b)本文公式(7)方法 Propose method equation(7)

图4 近似方法与精确公式预测风机1进到可比拟导纳无限大水泥板的功率的比

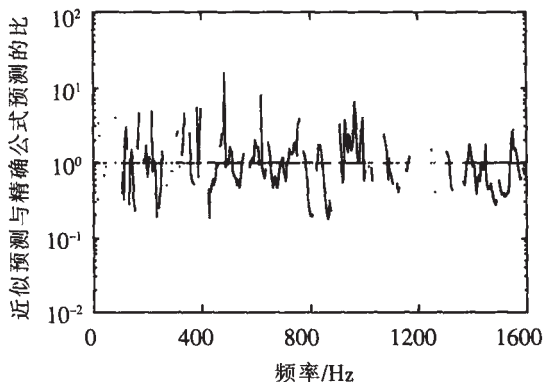
Fig.4 The ratio of approximate method with exact method for predicting power from fan 1 into matched mobility infinite plate

与用式(7)预测的效果仍然基本一致),这个结果同样通过广义归一化带在定性上得到很好的解释,且定量上也能很好的一致。无耦合法比先前的例子好一些,但并没有比利用式(7)和(8)的预测结果更好。(极子方法和式(7)、(8)的结果差不多,这里没有画出)。

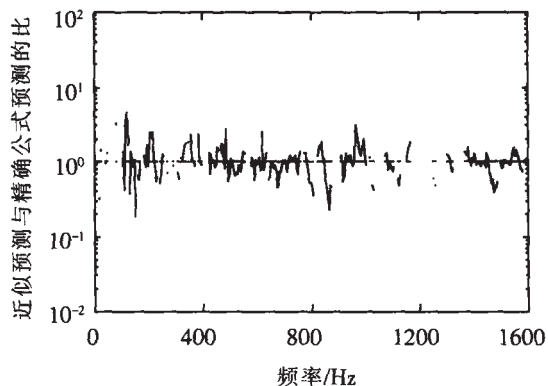
图5,图6是另外的两个例子。图5是风机1放置到四边简支的有限大板的例子,这个例子中在0.1到5之间。可再次看到利用式(7)比利用式(6)

的近似预测结果好的多。且同样是用广义归一化函数带在定性和定量上获得解释。

图6是另一个风机放置到四边简支的有限大板的例子,这个例子风机的导纳远大于支撑结构的导纳。在这个例子里公式(6)的预测结果没有最前面的那个例子好,这是因为在这个例子里,支撑结构导纳矩阵的状态值在大部分频率域上比第一个例子来的大,广义归一化函数带宽在很小时相应会宽一



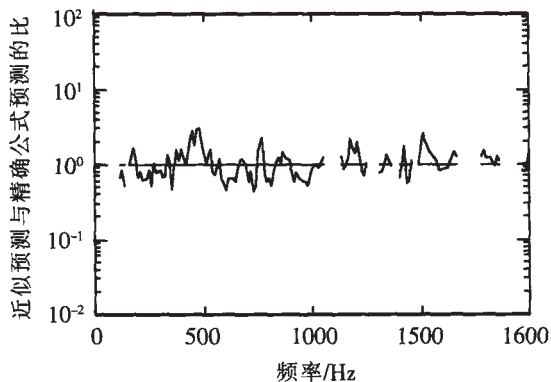
(a)本文公式(6)方法 Propose method equation(6)



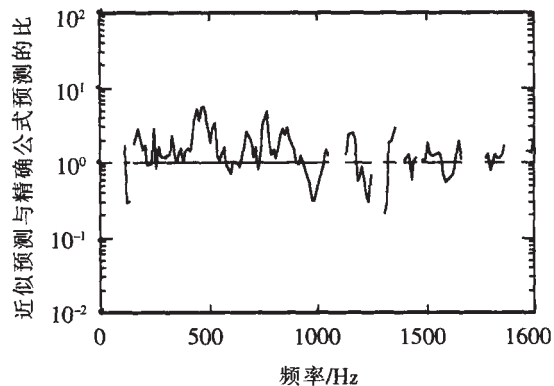
(b)本文公式(7)方法 Propose method equation(7)

图5 近似方法与精确公式预测风机1进到可比拟导纳
四边简支水泥板的功率的比

Fig.5 The ratio of approximate method with exact method for predicting power from fan 1 into matched mobility ssss-plate



(a)本文公式(6)方法 Proposed method equation(6)



(b)本文公式(7)方法 Propose method equation(7)

图6 近似方法与精确公式预测风机2进到低导纳
四边简支水泥板的功率的比

Fig.6 The ratio of approximate method with exact method for predicting power from fan 1 into matched mobility ssss-plate

些。但公式(6)的预测结果仍然是最好的。与图3相对应的(c)、(d)、(e)三个图没有给出。

4 结论

本文利用广义归一化函数带获得机器透过安装点传入支撑结构的功率的近似预测公式。利用这些公式预测实际机器安装到不同支撑结构的功率,对于很小的情况,利用式(6)的预测结果是最好的,且最简单。公式(7)、(8)的预测结果比无耦合及极子方法更好一些。对于机器导纳矩阵可和支撑结构导纳矩阵可比拟的情况,用式(6)预测效果较差。其他四种方法相差不多。但用式(7)、(8)只涉及到机器的两个量,透过它们可方便的洞察机器的整体行为。广义归一化函数带是基于计算机虚构机器及支撑结构的方法得到的,近似预测功率结果的表明,构造虚拟结构的方法得出的结论,有非常高的可信度,这为人们寻找新的简便有效的结构声源的描述、以及研究结构声等问题提供了一种简便的手段。

参 考 文 献

- [1] Fulford R A, Gibbs B M. Structure-borne sound power and source characterisation in multi-point connected systems. Part 1: Case studies for assumed force distributions[J]. Journal of Sound and Vibration 1997, 204(4): 659-677.
- [2] Pinnington R J, Fulford R A. Terry M. The use of polar mobilities for predicting the coupled response of machine mounting systems[C]. Inter-Noise96, 1996, 1587-1592.
- [3] 苏建新. 引入广义归一化函数带概念研究结构声源的描述[J]. 声学技术, 2006, 25(4): 365-370.
SU Jianxin. Study of characterization for structure-borne sound sources based on the concept of general normalized function band[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(4): 365-370.
- [4] 苏建新, 马顺良. 楼宇设备工程中结构声功率预测的平均特征值法[J]. 声学技术, 2006, 25(2): 126-130.
SU Jianxin, MA Shunliang. Mean eigenvalue method for prediction of structure-borne sound power emission in building servers engineering[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(2): 126-130.