

文章编号:1006-1355(2018)06-0172-06

柔性基础双层隔振系统隔振效果评价的研究

李豫川, 翁泽宇, 唐杰, 游红武

(浙江工业大学 机械工程学院, 杭州 310014)

摘要: 在考虑基础柔性的情况下,用由机械阻抗给出的评价参数来评价双层隔振系统的隔振效果无法直观地反映基础的刚度对隔振效果的影响。建立柔性基础双层隔振系统力学模型,根据力传递率、插入损失、振级落差、传递功率流率和插入功率流率5种隔振效果评价参数的定义推导并给出它们的物理参数表达式,这些表达式可以直观反映基础刚度对隔振效果的影响。并基于一个双层隔振系统的实例,分别分析基础刚度取值对力传递率、插入损失、振级落差、传递功率流率和插入功率流率随激振频率变化的规律的影响,得出如下结论:对于柔性基础双层隔振系统,5种隔振效果评价参数对隔振效果的评价结果受基础刚度的影响各不相同,用力传递率评价得到的评价结果差异较小,用插入损失和插入功率流率评价得到的评价结果有一些差异,用振级落差和传递功率流率评价得到的评价结果差异较大。

关键词: 振动与波; 双层隔振系统; 柔性基础; 力传递率; 插入损失; 振级落差; 功率流

中图分类号: O328

文献标志码: A

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2018.06.033

Evaluation of Vibration Isolation Effect of Double-layer Isolation Systems with Flexible Foundations

LI Yuchuan, WENG Zeyu, TANG jie, YOU Hongwu

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract : In the case of considering the flexibility of foundation, the evaluation parameters given by mechanical impedance cannot directly reflect the influence of the foundation's stiffness on the isolation effect for the evaluation of the isolation effect of the double-layer isolation system. In this paper, the mechanical model of the double-layer isolation system with a flexible foundation is established. Five parameters for isolation efficiency evaluation associated with force transmissibility, insertion loss, vibration level difference, transfer power flow rate and insert power flow rate are defined respectively and their physical expressions are derived. These expressions can intuitively reflect the influence of the foundation's stiffness on the isolation effect. Based on the example of a double-layer isolation system, the influence of foundation's stiffness on the variation rules of the 5 evaluation parameters vs. the excitation frequency are analyzed respectively. It is concluded that for the double-layer isolation system with flexible foundation, the results of isolation effect evaluation based on the five evaluation parameters are different due to the influence of the foundation's stiffness. The results based on the force transmissibility have small differences, while the results based on the insertion loss and insertion power flow rate have some differences, and the results based on the vibration level difference and transfer power flow rate have large differences.

Keywords : vibration and wave; double-layer isolation system; flexible foundation; force transmissibility; insertion loss; vibration level difference; power flow

双层隔振系统有较好的隔振效果并得到广泛的工程应用,浮筏隔振系统就是一种研究最为深入、应用最为广泛的双层隔振系统,是潜艇动力机组隔振的重要手段,可以有效地提高潜艇的隐身性。在上个世纪,浮筏隔振技术已经在潜艇技术强国得到十

分有效的应用,60年代,美国将浮筏隔振装置运用到潜艇推进系统,使潜艇噪声降低了15 dB~20 dB,其中“海浪”级攻击型核潜艇的噪声等级已低于三级海况的海洋背景噪声^[1];70年代,前苏联将浮筏隔振装置运用到舰艇上,使其噪声水平下降了约30 dB;80年代,法国、荷兰和比利时在三国联合研制的猎雷艇上安装了浮筏隔振装置,也取得了较好的隔振效果^[2]。

科学合理的评价双层隔振系统的隔振效果对于隔振设计和工程验收都是极其重要的。目前对隔振系统隔振效果的评价参数主要有:力传递率、插入损

收稿日期:2017-12-06

作者简介:李豫川(1990-),男,河南省平顶山市人,硕士研究生,主要研究方向为机械振动控制。

E-mail: yuchuanlee@163.com

通信作者:翁泽宇,男,博士生导师。

E-mail: wengzy8888@163.com

失、振级落差^[3-4]和功率流传递率。针对单层隔振系统,文献[5]根据力传递率、插入损失和振级落差的定义给出了柔性基础单层隔振系统隔振效果评价参数的阻抗表达式;文献[6-7]给出了针对柔性基础单层隔振系统的力传递率、插入损失和振级落差的表达式;文献[8]研究了柔性基础下振级落差与插入损失表达式之间的对应关系。针对双层隔振系统,文献[9]给出了双层隔振系统的插入损失和振级落差的阻抗表达式,文献[10]给出了浮筏隔振系统的功率流的阻抗表达式。对于柔性基础双层隔振系统,目前主要是用由机械阻抗给出的评价参数来评价系统的隔振效果,尽管这样的方法可以反映出基础的机械阻抗对系统隔振效果的影响,但无法直观地反映基础的刚度对隔振效果的影响。本文通过建立柔性基础隔振系统力学模型,从力传递率、插入损失、振级落差和功率流传递率的定义,推导出它们的物理参数表达式,并以一个实际双层隔振系统为例,分别就基础刚度取值对力传递率、插入损失、振级落差和功率流传递率随激振频率变化规律的影响进行讨论。

1 双层隔振系统模型

隔振系统基础的柔性可以用基础的刚度来表示,刚度无限大的基础可以看作是刚性基础。在隔振系统分析中,一些学者忽略隔振系统基础的柔性,将基础的刚度假设为无限大,建立如图1所示的刚性基础力学模型。

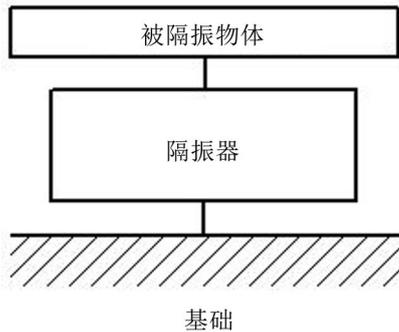


图1 刚性基础隔振系统简化模型

但是在实际工程中,特别是在潜艇和船舶上,将隔振系统基础假设为刚性,采用由刚性基础模型给出的评价参数表达式评价隔振系统的隔振效果是不合适的,会使评价结果与实测结果产生较大的差异,有研究介绍,这个误差可以达到20 dB以上^[11]。另外,由于在刚性基础的模型中无法反映出隔振系统基础的振动响应,也就无法采用插入损失和振级落差对隔振系统的隔振效果进行评价。因此,本文建立柔性基础双层隔振系统模型,见图2。图中: m_1 、 m_2

和 m_3 分别为被隔振物体、中间质量块和基础的等效质量; c_1 和 k_1 分别为被隔振物体和中间质量块之间的等效阻尼和等效刚度; c_2 和 k_2 分别为中间质量块和基础之间的等效阻尼和等效刚度; c_3 和 k_3 分别为基础的等效阻尼和等效刚度; F_1 为作用在被隔振物体上的激励力; F_0 为隔振器作用在基础上的力; x_1 、 x_2 和 x_3 分别为被隔振物体、中间质量块和基础的位移。

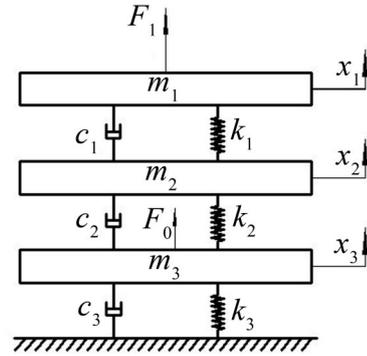


图2 柔性基础双层隔振系统模型

该模型对应的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} m_1 & & \\ & m_2 & \\ & & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

令 $F_1=Ae^{i\omega t}$,解方程式(1)可得

$$\begin{cases} x_1 = \frac{z_{22}z_{33} - z_{23}^2}{z_{11}z_{22}z_{33} - z_{11}z_{23}^2 - z_{12}^2z_{33}} Ae^{i\omega t} \\ x_2 = \frac{-z_{12}z_{33}}{z_{11}z_{22}z_{33} - z_{11}z_{23}^2 - z_{12}^2z_{33}} Ae^{i\omega t} \\ x_3 = \frac{z_{12}z_{23}}{z_{11}z_{22}z_{33} - z_{11}z_{23}^2 - z_{12}^2z_{33}} Ae^{i\omega t} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $z_{11}=-\omega^2m_1+i\omega c_1+k_1$;

$$z_{12}=-i\omega c_1-k_1$$

$$z_{22}=-\omega^2m_2+i\omega(c_1+c_2)+(k_1+k_2)$$

$$z_{23}=-i\omega c_2-k_2$$

$$z_{33}=-\omega^2m_3+i\omega(c_2+c_3)+(k_2+k_3)$$

2 评价参数

2.1 力传递率

力传递率的定义为传递至基础的力与激励力之比。

力传递率 T_f 可以表示为

$$T_A = \left| \frac{F_o}{F_1} \right| \quad (3)$$

改写成极差(dB)形式为

$$L_T = 20 \lg \left(\frac{1}{T_A} \right) \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

由式(2)至式(4)可得到柔性基础双层隔振系统的力传递率表达式,由于带有阻尼的表达式结果过于复杂,这里忽略阻尼,得到

$$L_T = 20 \lg \left| \frac{z_{11} z_{22} z_{33} - z_{11} z_{23}^2 - z_{12}^2 z_{33}}{k_2 z_{12} (z_{23} + z_{33})} \right| \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

2.2 插入损失

插入损失定义为采取隔振措施前后基础响应的有效值之比的常用对数的20倍。所选取的基础响应不同,相应地有位移插入损失、速度插入损失和加速度插入损失。与插入损失相对应的概念是插入响应比 R ,定义为有隔振系统时基础响应与没有隔振系统时基础响应的比值。

图3是未采取隔振措施的系统模型,图中 m_1 是被隔振物体的质量, m_3 、 c_3 、 k_3 分别是基础的质量、阻尼和刚度, x'' 是被隔振物体和基础的位移。

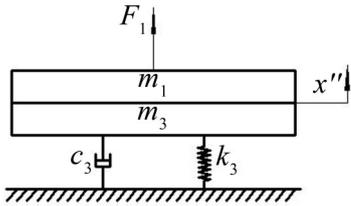


图3 柔性基础无隔振器系统模型

其对应的动力学方程为

$$(m_1 + m_3) a'' + c_3 v'' + k_3 x'' = F_1 \quad (6)$$

令 $F_1 = A e^{i\omega t}$,解方程式(6)可得

$$x'' = \frac{1}{z_{33} - \omega^2 m_1} A e^{i\omega t} \quad (7)$$

其中: $z_{33} = -\omega^2 m_3 + i\omega(c_2 + c_3) + (k_2 + k_3)$;

位移插入响应比可表示为

$$R_x = \left| \frac{x_3}{x} \right| \quad (8)$$

若用插入响应比的倒数 $E=1/R$ 来评价隔振效果,则 E 称为隔振的有效性。相应地,系统的位移插入损失的表达式为

$$L_{R_x} = 20 \lg \left(\frac{1}{R_x} \right) \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

通过式(2)、式(7)至式(9)可得到柔性基础双层隔振系统的位移插入损失表达式

$$L_{R_x} = 20 \lg \left(\frac{z_{11} z_{22} z_{33} - z_{11} z_{23}^2 - z_{12}^2 z_{33}}{(-\omega^2 m_1 + z_{33}) z_{12} z_{23}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (10)$$

同理可得,柔性基础双层隔振系统的速度插入损失表达式

$$L_{R_v} = 20 \lg \left(\frac{z_{11} z_{22} z_{33} - z_{11} z_{23}^2 - z_{12}^2 z_{33}}{(-\omega^2 m_1 + z_{33}) z_{12} z_{23}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

同理可得,柔性基础双层隔振系统的加速度插入损失表达式

$$L_{R_a} = 20 \lg \left(\frac{z_{11} z_{22} z_{33} - z_{11} z_{23}^2 - z_{12}^2 z_{33}}{(-\omega^2 m_1 + z_{33}) z_{12} z_{23}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (12)$$

由式(10)至式(12)可知,柔性基础双层隔振系统的位移插入损失、速度插入损失和加速度插入损失的表达式是相同的。

2.3 振级落差

振级落差定义为被隔振设备振动响应的有效值与对应基础响应的有效值之比的常用对数的20倍。和插入损失一样,振动响应可以是位移、速度或加速度,相应地称为位移振级落差、速度振级落差和加速度振级落差。

与振级落差相对应的概念是振级落差比 D 。位移振级落差比 D_x 可表示为

$$D_x = \left| \frac{x_1}{x_3} \right| \quad (13)$$

振级落差 L_D 与振级落差比 D 的关系为

$$L_{D_x} = 20 \lg (D) \quad (\text{dB}) \quad (14)$$

通过式(2)、式(15)和式(16)可得到柔性基础双层隔振系统的位移振级落差表达式

$$L_{D_x} = 20 \lg \left(\frac{z_{22} z_{33} - z_{23}^2}{z_{12} z_{23}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (15)$$

同理可得,柔性基础双层隔振系统的速度振级落差表达式

$$L_{D_v} = 20 \lg \left(\frac{z_{22} z_{33} - z_{23}^2}{z_{12} z_{23}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (16)$$

同理可得,柔性基础双层隔振系统的加速度振级落差表达式

$$L_{D_a} = 20 \lg \left(\frac{z_{22} z_{33} - z_{23}^2}{z_{12} z_{23}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (17)$$

由式(15)至式(17)可知,柔性基础双层隔振系统的位移振级落差、速度振级落差和加速度振级落差的表达式也是相同的。

2.4 功率流传递率

与力传递率和插入损失的定义观点相似,可以定义两种功率流传递率,一是传递功率流率 T_{SP} ,另一种是插入功率流率 T_{AP} 。计算公式分别如下

$$T_{SP} = \frac{P_{tr}}{P_{in}} \quad (18)$$

$$T_{AP} = \frac{P_{tr}}{P_u} \quad (19)$$

式中: P_{tr} 表示通过隔振装置进入到基础结构的时间

平均功率流; P_{in} 表示振源输入到整个隔振系统的功率流; P_0 表示振源设备直接安装于弹性基础上时, 基础结构的功率流输入。

如果力和速度是简谐变化的, 按时间平均的功率流可以表示为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T |F| \cdot |V| \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\omega t + \phi) = \frac{1}{2} |F| \cdot |V| \cdot \cos \phi \quad (20)$$

式中: $T=2\pi/\omega$ 。

通过式(2)、式(7)、式(18)至式(20)可得柔性基础双层隔振的功率流传递率的表达式

$$T_{SP} = \frac{k_2 z_{12}^2 z_{23} (z_{23} + z_{33})}{(z_{11} z_{22} z_{33} - z_{11} z_{23}^2 - z_{12}^2 z_{33})(z_{22} z_{33} - z_{23}^2)} \quad (21)$$

$$T_{AP} = \frac{k_2 z_{12}^2 z_{23} (z_{23} + z_{33}) (z_{33} - m_1 \omega^2)}{(z_{11} z_{22} z_{33} - z_{11} z_{23}^2 - z_{12}^2 z_{33})^2} \quad (22)$$

3 基础刚性对评价参数的影响

图4为某用于半主动控制的双层隔振试验系统, 该系统的主要动力学参数见表1。

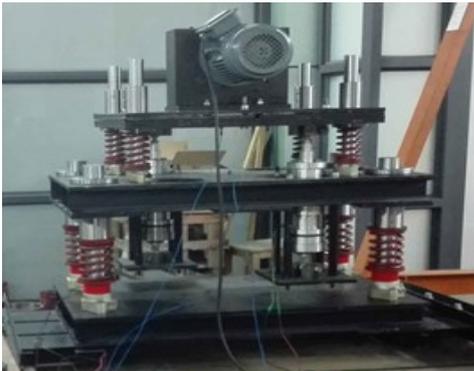


图4 双层隔振试验系统

表1 双层隔振系统的动力学参数

结构	参数
m_1	243.8 kg
m_2	175.1 kg
m_3	216.0 kg
c_1	70 N·m ⁻¹ ·s
c_2	50 N·m ⁻¹ ·s
c_3	5×10 ³ N·m ⁻¹ ·s
k_1	7.090×10 ⁴ N·m ⁻¹
k_2	1.156×10 ⁵ N·m ⁻¹
k_3	2.809×10 ⁷ N·m ⁻¹

取基础刚度为 0.01 k、0.1 k、k 和 10 k ($k=k_3$) 4 种情况, 设激励力的幅值为 500 N, 频率变化范围为 0~30 Hz。

由式(5), 可以分别得到不同基础刚度双层隔振系统在谐波激励下的力传递率曲线, 见图5。

由式(2)和式(7)分别得出在谐波激励下柔性基

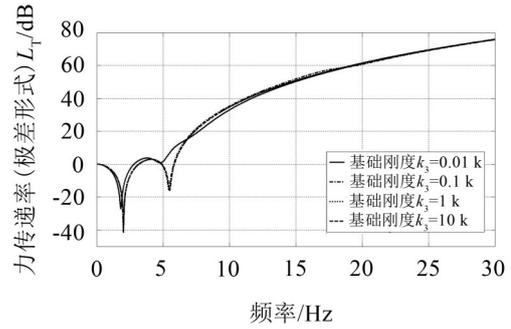


图5 双层隔振系统力传递率(极差形式)曲线

础双层隔振系统和柔性基础无隔振器系统的位移响应。由表达式(10)进一步可以分别得到不同基础刚度双层隔振系统的在谐波激励下的位移插入损失曲线, 见图6。

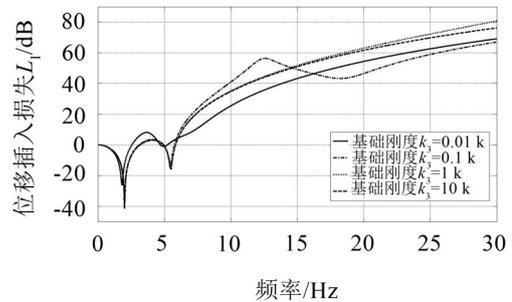


图6 双层隔振系统位移插入损失曲线

由表达式(15), 可以分别得到不同基础刚度双层隔振系统在谐波激励下的位移振级落差曲线, 见图7。

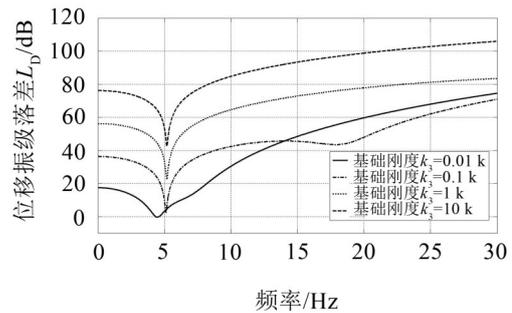


图7 双层隔振系统位移振级落差曲线

由表达式(21), 可以分别得到不同基础刚度双层隔振系统在谐波激励下的传递功率流率曲线, 见图8。

由表达式(22), 可以分别得到不同基础刚度双层隔振系统在谐波激励下的插入功率流率曲线, 见图9。

由于柔性基础双层隔振系统的位移插入损失、速度插入损失和加速度插入损失的表达式相同, 位移振级落差、速度振级落差和加速度振级落差的表达式也相同, 这里只选取柔性基础双层隔振系统的

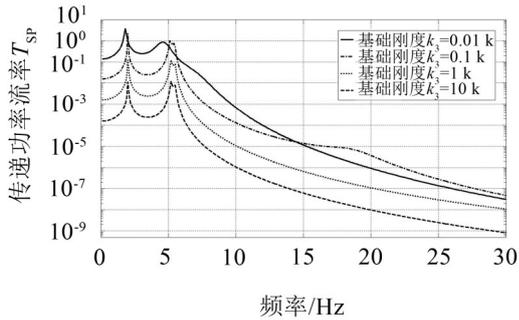


图8 双层隔振系统传递功率流率曲线

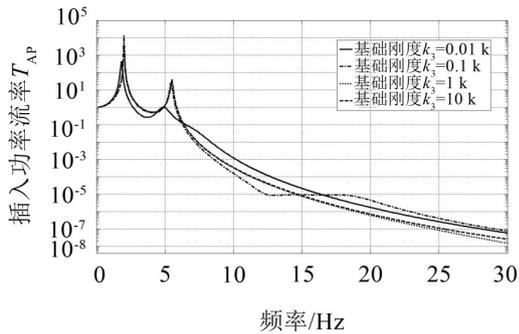


图9 双层隔振系统插入功率流率曲线

位移插入损失和位移振级落差进行研究。

由图5知,双层隔振系统的力传递率(极差形式)总体上是随激振频率的增大而增大;在系统的共振频率附近,力传递率十分明显地进入低谷。在0~10 Hz频域内,特别是在共振频率附近,力传递率随着基础刚度的增加而减小,说明基础刚度小的双层隔振系统在共振频率附近的隔振效果要比基础刚度大的好;在高于10 Hz时,4种基础刚度下双层隔振系统的力传递率基本相同,也即基础刚度的大小对双层隔振系统的力传递率基本不产生影响。

由图6知,双层隔振系统的插入损失总体上是随激振频率的增大而增大;在系统的共振频率附近,插入损失十分明显地进入低谷。在0~10 Hz的频段内,特别是在共振频率附近,随着基础刚度的增加,双层隔振系统的插入损失越来越小,说明在共振频率附近双层隔振系统基础刚度越小,隔振效果越好;在10 Hz以上,随着基础刚度的增加,插入损失也相应变大,说明基础刚度越大,双层隔振系统的隔振效果越好,并且,4种基础刚度下双层隔振系统的插入损失有一定的差异,也即基础刚度的大小对双层隔振系统的插入损失产生一定的影响。

从图7可知,双层隔振系统的振级落差总体上是随激振频率的增大而增大;在系统的共振频率附近,振级落差十分明显地进入低谷。随着基础刚度的增大,振级落差也增大,说明基础刚性越大,用振级落差来评价浮筏隔振系统隔振性能就会越好。另

外,4种基础刚度下双层隔振系统的振级落差有较大的差异,也即基础刚度的大小对双层隔振系统的振级落差产生较大的影响。

从图8可知,双层隔振系统的传递功率流率总体上是随激振频率的增大而减小;在系统的共振频率附近,传递功率流率十分明显地达到波峰。随着基础刚度的增大,传递功率流率减小,说明基础刚性越大,用传递功率流率来评价双层隔振系统隔振性能就会越好。另外,4种基础刚度下双层隔振系统的传递功率流率有较大的差异,也即基础刚度的大小对双层隔振系统的传递功率流率产生较大的影响。

由图9知,双层隔振系统的插入功率流率总体上是随激振频率的增大而减小;在系统的共振频率附近,插入功率流率十分明显地达到波峰。在共振频率附近,随着基础刚度的增加,双层隔振系统的插入功率流率越来越大,说明在共振频率附近双层隔振系统基础刚度越小,隔振效果越好;在6.5 Hz以上,随着基础刚度的增加,插入功率流率减小,说明基础刚度越大,双层隔振系统的隔振效果越好,并且,4种基础刚度下双层隔振系统的插入功率流率有一定的差异,也即基础刚度的大小对双层隔振系统的插入功率流率产生一定的影响。

比较不同基础刚度双层隔振系统用力传递率(极差形式)、插入损失、振级落差、传递功率流率和插入功率流率5种评价参数的评价结果,可以看出:

(1) 5种评价参数给出评价结果的一致性在于:隔振效果总体上是随激振频率的增大而越来越好;在系统的共振频率附近,隔振效果明显变差。

(2) 5种评价参数给出评价结果最明显的不一致性在于:在系统的共振频率附近,用力传递率(极差形式)、插入损失和插入功率流率给出的评价结果是,基础刚度小的双层隔振系统在共振频率附近的隔振效果要比基础刚度大的好;而用振级落差和传递功率流率给出的评价结果是,基础刚度大的双层隔振系统在共振频率附近的隔振效果要比基础刚度小的好。另外,只要不是在双层隔振系统的共振频率附近,基础刚度的大小对双层隔振系统的力传递率(极差形式)基本不产生影响,对双层隔振系统的插入损失和插入功率流率产生一些影响,对双层隔振系统的振级落差和传递功率流率产生较大的影响。

4 结语

(1) 由柔性基础双层隔振系统力学模型可以推导出力传递率、插入损失、振级落差和功率流传递率的物理参数表达式,从而直观地反映基础的刚度对

隔振效果的影响。

(2) 用力传递率评价双层隔振系统的隔振效果,除在系统的共振频率附近以外,评价结果几乎不受基础刚度大小的影响。而用插入损失、振级落差和功率流传递率来评价,评价结果受基础刚度大小的影响,尤其是用振级落差和传递功率流率来评价时,评价结果受基础刚度大小的影响较大。

(3) 可以发现,用力传递率(极差形式)、插入损失和插入功率流率评价双层隔振系统的隔振效果,在系统的共振频率附近,基础刚度越小则隔振效果越好;用振级落差和传递功率流率给出的评价结果是,基础刚度越大则隔振效果越好。

参考文献:

- [1] 彭亮. 浮筏隔振系统的结构优化研究[D]. 北京:中国舰船研究院,2015.
- [2] 沈密群,严济宽. 舰船浮筏装置工程实例(续二)[J]. **噪声与振动控制**,1994,14(5):45-48.
- [3] 邵汉林,姚心国,朱显明. 浮筏隔振装置隔振效果评定

[J]. **噪声与振动控制**,2002,22(4):1-23.

- [4] THOMAS F D. Evaluation of isolation mounts in reducing structure borne noise[J]. **The Shock and Vibration Bulletin**,1976,46(4):89-94.
- [5] 严济宽,柴敏,陈小琳. 振动隔离效果的评定[J]. **噪声与振动控制**,1997,17(6):22-30.
- [6] 顾德俊,严济宽. 隔振效果的评价及其测量[J]. **噪声与振动控制**,1982,2(3):3-10.
- [7] 段小帅,梁青,陈绍青,等. 双层隔振系统隔振效果评价与试验[J]. **振动、测试与诊断**,2010,30(6):694-697.
- [8] 王家林,朱石坚. 振级落差和插入损失对应关系的研究[J]. **海军工程大学学报**,1999(2):37-40.
- [9] 朱石坚,何琳. 双层隔振系统隔振效果研究[J]. **海军工程大学学报**,2002,14(6):6-9.
- [10] 许树浩,桂洪斌. 浮筏系统隔振性能的功率流评价指标[J]. **船舶力学**,2012,16(5):567-572.
- [11] 王国治,李良碧. 船舶浮筏系统动力学特性的影响因素研究[J]. **中国造船**,2002,43(1):43-51.

(上接第149页)

5 结语

(1) 不同类型的发动机异响信号特征不同,利用信号特征来识别异响类型具有较好的理论基础。

(2) 将信号进行小波包变换得到各频段上的小波包能量谱,表征了信号的能量分布;双谱估计可以检测信号中二次相位耦合频率,以此为依据来提取信号耦合频率的双谱比值。两种方法原理不同,反映信号不同方面的特性,它们相互补充,提高信号特征提取的准确性。

(3) 利用小波包变换和双谱估计相结合的方法提取信号特征向量,作为支持向量机的输入,选择合适的核函数及参数建立分类模型,训练及测试精度均较高,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 杨诚,魏国军,王中方. 机油泵齿轮异响检测方法[J]. **声学技术**,2011(6):513-517.
- [2] 杨诚,李爽,冯焘,等. 基于LMS和SDP的发动机异响诊断方法研究[J]. **汽车工程**,2014(11):1410-1414.
- [3] 孙健,王成华,杜庆波. 基于小波包能量谱和NPE的模拟电路故障诊断[J]. **仪器仪表学报**,2013,34(9):2021-2027.
- [4] 贾继德,刘志刚,张平等. 基于阶比双谱分析的发动机故障特征提取[J]. **内燃机学报**,2004,22(5):462-469.
- [5] 贾东旭. 基于支持向量机的说话人识别[D]. 大庆:大庆石油学院,2010.
- [6] 刘斌. 支持向量机及其在信号处理中的应用[D]. 大庆:大庆石油学院,2006.
- [7] 李爽. 基于小波滤波和极坐标镜像法的发动机异响在线检测研究与应用[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [8] 张贤达. 时间序列分析-高阶统计方法[M]. 北京:清华大学出版社,1996.