

文章编号:1006-1355(2009)05-0019-04

# 基座低频机械阻抗有限元计算方法研究

张 庆, 彭 旭, 陈 明

(武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430064)

**摘要:** 由于大型或重型结构在低频段难以激励起来, 低频时大型结构的机械阻抗数据相干系数小, 可信度较低。为了弥补这个缺点, 使用有限元软件对大型舱段结构进行建模, 计算了潜艇舱段基座低频段的机械阻抗, 并与实测值和理论估算值进行对比, 结果令人满意。本文评价了使用有限元方法在低频段对基座进行阻抗特性预报的可行性, 弥补了低频段舱筏基座实测机械阻抗数据可信度较低的不足, 具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 振动与波; 基座; 低频; 有限元; 机械阻抗

中图分类号: O241.82 文献标识码: A

## Computation of Mechanical Impedance of Submarine Cabin Base at Low Frequency with FEM

ZHANG Qing, PENG Xu, CHEN Ming

(Wuhan Second Ship Design Institute, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** Because of the difficulty to actuate the large structures in low frequency region, the mechanical impedance data of the large structures at low frequency has small coherence factor and low reliability. In this paper, a finite element code is used to establish an FE model for large cabin structure, and the mechanical impedance of a submarine cabin base in the low frequency region is calculated. The numerical results are compared with those of experimental measurement and theoretical assessment. The feasibility for forecasting the mechanical impedance characteristics of the base in the low frequency region by means of the finite element method is evaluated. The disadvantage of the low reliability of the measured mechanical impedance data of the cabin base at the low frequency is improved. This method is valuable for engineering application.

**Key words:** vibration and wave; base; low frequency; FEM; mechanical impedance

潜艇基座的阻抗特性在潜艇的结构噪声控制中有重要意义, 阻抗值越大, 设备传递给基座的振动能量越小, 潜艇壳体产生的结构振动声辐射亦越小, 故基座基本的声学设计原则就是增加其输入机械阻抗、减少基座面板及结构的振幅以提高隔振效果。

舱段基座在进行阻抗测试时, 低频时舱段结构没有被激励起来, 相干函数较小, 实测数据可信度较低。研究表明<sup>[1]</sup>, 若大型或重型结构无法激励起

来, 可以采用多点激励法, 但操作起来复杂程度较高, 实际测试中多采用单点激励法。文献<sup>[4]</sup>使用有限元法计算舱段浮筏基座结构的机械阻抗, 考虑频率范围为 0~400 Hz, 分辨率取 5 Hz, 同时取倍频谱而非线谱进行比较, 认为其计算结果符合规范估算结果, 但未比较在高分辨率下的计算值与实测值符合情况。文献<sup>[7]</sup>讨论了有限元法适用的频率范围和单元大小的关系, 指出应该根据研究问题的频率范围去合理的确定单元的大小, 以此来选取适当的计算规模。本文的计算频率范围为 0~100 Hz, 为达到更高的计算精度, 对有限元模型进行细化处理, 分辨率取 1 Hz。在得到计算线谱值后与实测线谱值进行比较, 并分析比较了计算值、经验估算值和实测值的总有效机械阻抗倍频谱, 计算结果令人满意。

收稿日期: 2009-01-08; 修改日期: 2009-02-16

作者简介: 张 庆(1984-), 男, 安徽桐城人, 硕士, 目前从事噪声与振动控制研究。

E-mail: 10624456@qq.com

## 1 基本理论

### 1.1 潜艇基座机械阻抗

稳定的、定常的、线性振动系统的机械阻抗,等于简谐激励与其所引起的稳态响应的复数比<sup>[1]</sup>。假设系统的激励力  $f = F e^{j(\omega t + \varphi_1)}$ , 其稳态响应  $x = X e^{j(\omega t + \varphi_2)}$ , 则该系统的机械阻抗  $Z$  可表示为

$$Z = \frac{f}{x} = \frac{F}{X} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (1)$$

(1) 式为机械阻抗的基本定义。

潜艇基座是弹性结构,其机械阻抗函数非常复杂,在高频段可看成相应的无限大系统的机械阻抗,低频段很大范围内阻抗幅值是由结构共振和反共振决定的<sup>[3]</sup>。目前对于潜艇基座机械阻抗的特性研究并不多见,文献<sup>[6]</sup>对长基座进行了分析,通过基座输入机械阻抗的机理分析和组合元件机械阻抗的计算,给出了设备基座输入机械阻抗在不同频段的数学物理模型,并给出了相应的简化估算公式。在低频段时基座阻抗可以将艇体结构看作梁的阻抗,阻抗近似值与排水量有关;随着频率的升高,阻抗值则由各种子结构的刚度和特性阻抗决定;在极高频段,基座阻抗由无限大面板的机械阻抗值来决定,其阻抗值与板厚有关。估算方法的精度并不高,若要在低频时得到复杂基座结构的机械阻抗准确值,除了试验测试之外,一般依靠有限元法。

### 1.2 有限元法

本文采用 ANSYS 有限元软件中的谐响应分析模块进行机械阻抗的计算。谐响应分析主要用于确定结构在承受随时间按正弦规律变化的荷载时的稳态响应,可计算出结构在几种频率下的响应值对频率的曲线。在施加激振力后,计算出对应的稳态响应值,即可根据相关公式得到机械阻抗值。

## 2 舱段典型基座有限元计算算例

### 2.1 舱段基座有限元模型的建立

建模主要参数为:舱段总长 15.2 m,耐压体半径 4.6 m,非耐压体半径 5.83 m,基座面板长 6.1 m,厚 40 mm。如图 1 所示,各种构件使用 ANSYS 的结构单元进行模拟,舱段耐压壳体、舷侧壳体、基座面板、基座肘板、基座纵向立板、龙骨底板、竖龙骨板等使用 SHELL63 壳单元,耐压体肋骨、舷侧肋骨、舱壁横梁、舱壁垂直梁等使用 BEAM188 单元。由于测试结果在未加载的情况下得到,为便于比较,不对设备进行建模。

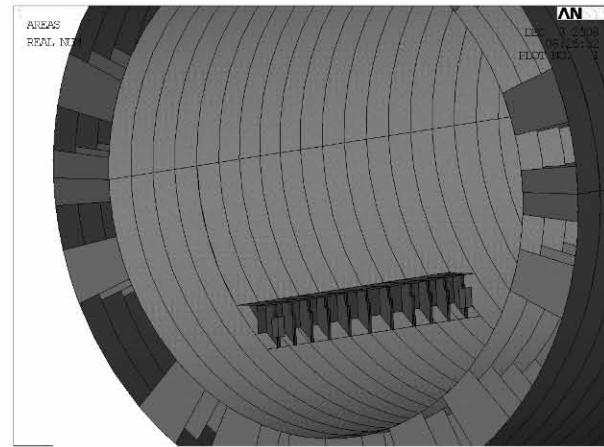


图 1 试验基座

Fig 1 Experimental foundations

划分网格时越细密则计算结果越精确,但对计算资源和时间的消耗大;网格太粗糙则会丢失许多细节,直接影响计算结果的可靠性,因此有一个合理的优化过程。研究<sup>[5]</sup>指出,当振动波的波长小于单元尺寸时,无法真实表达振动波,为使有限元的离散结构能准确表述结构中的振动波传播,一个波长内至少应有 5 个节点(4 个单元)。由此导出单元的细化标准,即单元长度  $\Delta \leq \lambda_{\min}$ ,其中  $\lambda_{\min}$  为最小应力波波长。取材料弹性模量  $E = 2.1 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比  $\mu = 0.33$ , 密度为  $7850 \text{ kg/m}^3$ , 阻尼比 0.01。以上限频率为 100 Hz 计算所得单元最大尺寸对模型进行网格划分。

### 2.2 计算结果

选取试验中基座面板相同激励位置处的节点作为计算节点,在节点处施加单位力,程序计算出来的结果为节点位移响应值(以幅值和相位角形式给出),按照  $v = \dot{x} = X\omega \sin(\omega t + \varphi_2)$ ,换算成速度阻抗  $Z = \frac{f}{v} = \frac{F}{X\omega} e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)}$ <sup>[4]</sup>。计算结果见图 2。

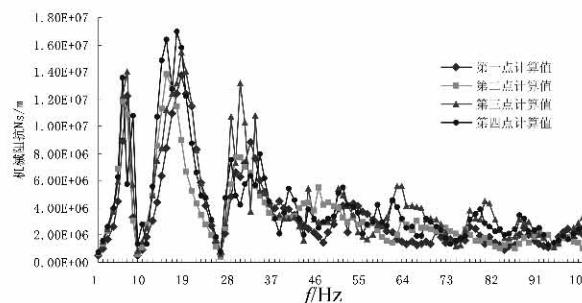


图 2 基座各点机械阻抗有限元计算值

Fig 2 Calculation of the mechanical impedance by FEM

图2是求解间隔为1Hz的情况下有限元法计算得的各点输入阻抗值。阻抗峰值和谷值分别对应反共振点和共振点。

### 3 舱段典型基座机械阻抗测试

#### 3.1 概述

在基座上减振器安装部位施加激励力,然后测量激励力信号和激励力部位、基座速度响应信号。输入的力是一个宽带的白噪声,它在测试的频率范围内应具有恒定的力输出,通过测量力的自功率谱 $S_{ff}(\omega)$ 和力与速度的互功率谱 $S_{fv}(\omega)$ 得到设备基座机械阻抗,即

$$Z = \frac{S_{ff}(\omega)}{S_{fv}(\omega)}$$

#### 3.2 测量分析系统和及布点原则

试验采用LMS公司的PIMENTO测试与分析系统,测量系统框图见图3,利用单点激励法测量原点阻抗及传递阻抗。

机械阻抗测量和分析的频率范围为10 Hz~2 KHz。响应点选择布置在安装减振器部位的基座面板上、基座腹板和基座附近耐压壳体上。激励点选择在安装减振器部位的基座面板上,并与原点响应点固定在相同的位置。原点阻抗测点图如图4所示。

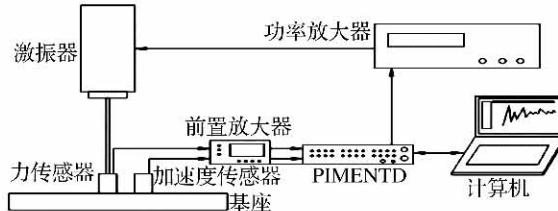


图3 机械阻抗测试系统框图

Fig 3 Schematic map of the impedance test

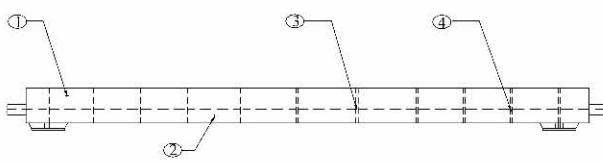


图4 基座原点阻抗测点图

Fig 4 Schematic map of the testing point

#### 3.3 测试结果

试验舱段基座4个原点机械阻抗测量数据见图5,实际测试和分析的频率范围为10 Hz~2 KHz,为方便与有限元计算值比较,只选取频率范围为10 Hz~100 Hz的实测数据。

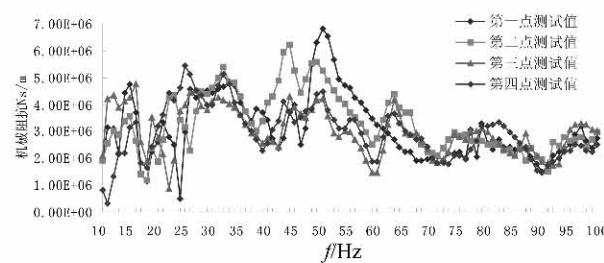


图5 舱段基座原点机械阻抗实测值

Fig 5 Experimental result of the mechanical impedance

### 4 测试值与计算值比较

为便于对比分析,将基座面板的4个原点机械阻抗测试值与计算值分别进行比较,结果如图6所示。

由图6可见,在31~100 Hz的频率范围内,各点测试值与计算值符合程度较好。但在1~31 Hz的频率范围内测试值与有限元计算值差别较大。图7

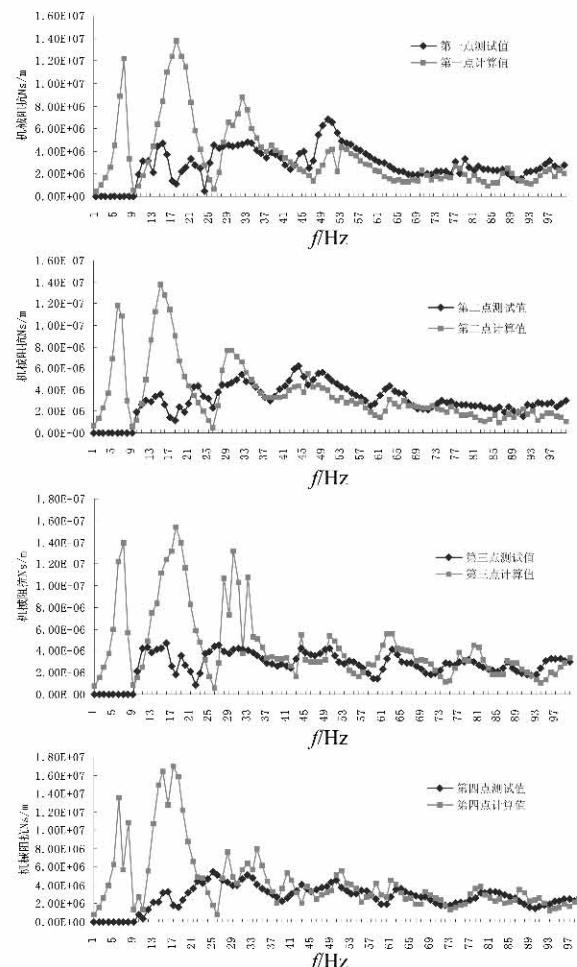


图6 各点输入机械阻抗测试值与计算值对比

Fig 6 Comparison between experiment and calculation result of the mechanical impedance

所示为第一点的响应信号与输入信号的相干系数(其余3点相干系数图与图7相似)图,可见31 Hz以下相干系数很小(低于0.8),说明在此特定频率下舱段结构没有激励起,实测值可信度低,导致31 Hz以下测试值与有限元计算值符合程度较差。

为便于比较,将测试和计算结果转换为1/3倍频谱。为使中心频率能更好的表达所在带宽的阻抗值,将中心频率点所在带宽的频域分辨率提高到0.1 Hz进行计算。将各点计算值、测试值的阻抗值转化为倍频谱,再进行平均化处理,就得到计算值和测试值的总有效机械阻抗1/3倍频谱。将有限元计算值与测试值、经验估算值进行比较,见图8所示。

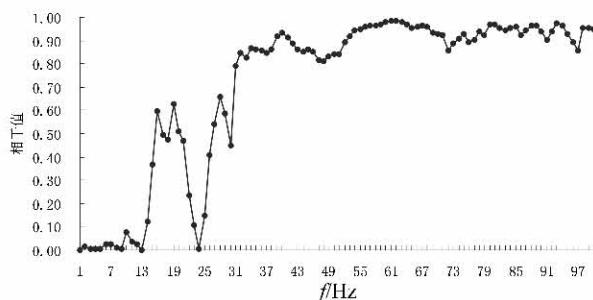


图7 第一测点相干函数

Fig 7 Coherence function of the first point

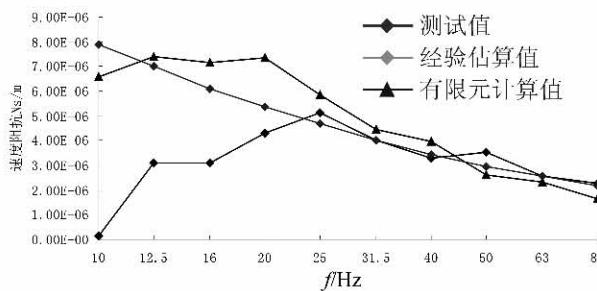


图8 基座总有效机械阻抗值比较

Fig 8 Comparison of the overall effective impedance of the foundation

由图8可见,在31.5 Hz中心频率以下有限元计算值、实测值、经验估算值差别较大,这是由于系统没有被激励起来,实测阻抗值可信度较低;另一方面经验估算值利用经验公式进行估算,在低频段与有限元计算值不完全符合也是正常的;31.5 Hz中心频率以上实测值、有限元计算、经验估算值三者吻合程度较好。因此在舱筏隔振效果计算中,31.5 Hz

以下的基座阻抗值可以使用有限元计算值来代替实测和经验估算值。

## 5 结语与研究展望

本文运用有限元法计算得到了基座低频输入机械阻抗值,结果表明,在准确建立大型舱段结构模型和合理使用有限元计算方法的前提下,低频范围内计算结果与实测结果、经验估算值吻合较好,可以利用计算结果完善舱段基座机械阻抗在低频段的倍频值。当然,由于有限元计算模型与实际的舱段基座模型存在一定的差异,试验时干扰噪声也会对实测结果造成一定影响,故有限元计算值与实测值之间的误差是难以避免的。

由于基座总有效机械阻抗与各个点阻抗之间的关系式尚未明确,本文根据经验对各个点阻抗进行了平均化处理。处理方式不同,得出的结果也会有一定的差异,因此对于实测点阻抗值如何转换为总有效机械阻抗值应进一步展开研究;此外经验估算值也应根据实测值和有限元计算值进行一定的修正。

总的来说,有限元计算结果满足工程应用的精度要求,弥补了低频段实测数据不准确的缺点,还可以作为低频潜艇长基座阻抗特性研究的参考数据,具有一定的工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 左鹤声. 机械阻抗方法与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [2] 张令弥. 机械阻抗技术在振动分析中的应用 [J]. 南京航空学院学报, 1980(6): 39-70.
- [3] B. Petersson, J. Plunt: On Effective Mobilities in the Prediction of Structure-borne Sound Transmissions Between a Source Structure and a Receiving Structure, part I : Theoretical Background and Basic experimental Studies [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1982, 82 (4): 517-529.
- [4] 黄惜春, 吴崇健, 胡刚义, 等. 用有限元法计算基座阻抗 [J]. 舰船工程研究, 2004(3): 1-11.
- [5] 韩增尧. 复杂航天器声振力学环境预示技术研究 [D]. 北京: 中国空间技术研究院, 2000.
- [6] 吴文伟, 沈荣瀛, 沈顺根. 设备基座输入机械阻抗工程估算方法 [J]. 振动工程学报, 2004(17): 694-697.
- [7] 朱 锡, 胡忠平, 石 勇. 预报基座结构噪声的有限元方法研究 [J]. 海军工程大学学报, 2003, 15 (6): 33-36.