

某型艇近场噪声和自噪声数值计算

杨德庆 王德禹 刘洪林 郑靖明

(上海交通大学船舶与海洋工程学院 上海 200030)

2001 年 10 月 16 日收到

2002 年 2 月 23 日定稿

摘要 采用结构有限元软件 NASTRAN 和声学边界元软件 SYSNOISE, 对某型艇振动与声学特性数值计算问题进行了研究。通过基于全船三维有限元分析模型的频响分析计算, 获得该船结构振动响应特性参数。以振动频响分析计算结果作为声学边界条件, 考虑球面点噪声源的影响, 建立了全船三维边界元声学分析模型; 并采用间接边界元法, 对某型艇近场和自噪声声学特性进行了计算。所得计算结果与该船实测数据进行了对比, 证明本文计算方法是可行的。

PACS 数: 43.30, 43.40

Numerical analysis of acoustic characters in near field and self-noise of ship

YANG Deqing WANG Deyu LIU Honglin ZHENG Jingming

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University Shanghai 200030)

Received Oct. 16, 2001

Revised Feb. 23, 2002

Abstract Numerical analysis of acoustic characters in near field and self-noise of ship is studied by using structural FEM software NASTRAN and acoustic BEM software SYSNOISE. First, the vibration response characters are computed based on the 3-D FE model of ship, then taken the vibration characters of the ship as boundary conditions, a 3-D acoustic BE model is constructed and the influence of point sound source is also taken into account. At last the acoustic characters of the ship in near field are calculated by using indirect BEM. The computed results are compared with the experimental results, and it shows the effectiveness of the proposed method.

引言

声学隐身性是影响舰艇作战性能和生存能力的重要因素, 对舰艇振动声学特性进行精确分析, 是改进舰艇结构声学设计的基础工作^[1]。由于声学计算的复杂性和计算软件的匮乏, 目前国内船舶设计领域还无法对全船模型进行声学仿真计算分析。本文结合实际项目用开发引进的声学计算软件, 对三维全船模型声学数值分析问题进行了探索, 实现了三维全船近场及自噪声声学数值计算。

研究中首先采用有限元方法, 利用 MSC/NASTRAN 软件对某型艇进行振动计算分析, 获得结构振

动响应特性, 从而确定出导致振动噪声产生及传播的船体结构的特性。其次, 以该艇总振动响应特性参数作为全船三维边界元声学分析模型的边界条件(艇的振动作为声源), 采用间接边界元法, 利用 SYSNOISE 软件计算出该艇近场及自噪声声学特性参数并对所得结果和实验数据进行了比较。

1 X 型艇有限元法振动响应特性计算

三维有限元全船模型由于能真实模拟船体的空间结构, 准确反映各部件局部连接关系和载荷分布特点, 成为船舶力学分析中较为先进的模型化方法。本文采用了三维全船结构有限元模型, 对 X 型艇的

结构振动响应特性进行分析,以保证计算的全面性和准确性^[2]。

简谐激励作用下,船体结构动力响应有限元平衡方程为:

$$[K + i\omega C - \omega^2 M]x = f_e, \quad (1)$$

式中 K 、 C 和 M 分别为船体结构刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵, x 为船体结构有限元节点位移向量, f_e 为外激励载荷向量。对于 X 型艇,垂向弯曲振动是其主要振动形式。研究中主要分析该艇在各种综合激励下一定频率范围内的结构响应特性。

1.1 X 型艇结构无量纲主尺度

总长: 11.03, 设计水线长: 9.60, 型宽: 1.9,
型深: 0.84, 设计排水量: 104.80, 肋骨间距: 0.1,
设计吃水: 0.50, 结构吃水: 0.57,
采用浮筏系统减振。

1.2 X 型艇三维结构有限元分析模型

采用 MSC/PATRAN 软件构建有限元模型。建模时,有限元模型坐标系的原点选在船的纵舭剖面与后甲板交线上零肋位处。有限元模型图见图 1,模型中节点总数为 3835,单元总数为 7244,单元类型有板元、壳元、梁元和质量点单元等。船体的质量由船舶有效质量和附连水质量组成。实际计算中,附连水质量通过指定哪些单元与水接触,由 MSC/NASTRAN 软件自识别和计算。



图 1 X 型艇有限元模型图

1.3 X 型艇振动频响分析数值结果

计算中所用结构参数,船体部分:密度 $\rho_s = 7800 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E_s = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,泊松比 $\mu = 0.3$,流体密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。进行船体振动频响计算时,载荷工况为:同时考虑螺旋桨激振力、首辅推与尾辅推脉动激励、甲板上电站机组振动激励、主机振动激励以及尾部的泵站振动激励。具体数值与作用位置由测试单位提供。

频率计算区间设定为: $0 \sim 10000 \text{ Hz}$,频率增量步长为 50 Hz 。根据上述激励进行计算,图 2 给出尾端节点 4(尾封板底部与纵舭剖面交叉点)的速度响应曲线。由于频率取值区间很大,为能详细绘出低阶模态特性,速度响应曲线只绘出了 $0 \sim 1000 \text{ Hz}$ 范围内的结果,而实际计算是在 $0 \sim 10000 \text{ Hz}$ 范围内进行的。

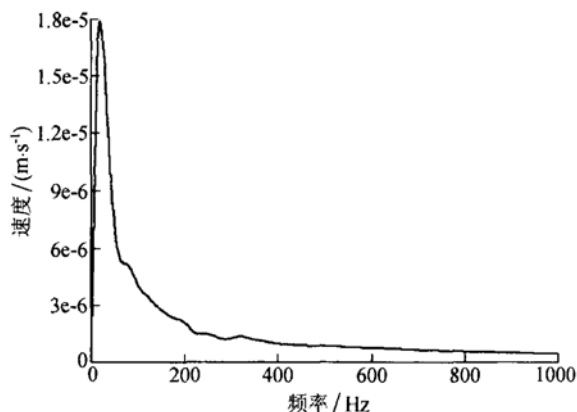


图 2 节点 4 速度频响曲线

2 间接边界元法 X 型艇近场与自噪声声学计算

复杂结构振动声辐射分析主要采用数值法,其中有限元法和边界元法是研究三维复杂结构稳态声辐射特性和声振耦合机理的有利工具^[3,4]。

目前国际上著名的有限元和边界元声学计算软件有 MSC/NASTRAN、ANSYS 以及 SYSNOISE 等。其中 SYSNOISE 软件利用边界元技术,可处理一般复杂弹性结构的耦合振动声学问题、声学计算和后处理计算等功能很强大。然而该软件 5.3A 版结构声学边界元单元库不支持三维梁单元、质量点单元和正交各向异性材料板单元。梁单元和正交各向异性材料板单元(可用于模拟加肋板)是船舶最主要的承力构件与刚度构件,质量点单元可用于模拟附连水质量,这些单元对合理建模以及结构动力特性精确计算影响较大,计算中必须考虑。因此,仅利用现有 SYSNOISE 软件是无法同时完成对船舶振动与声学的精确分析的。MSC/NASTRAN 软件以有限元技术为主,结构振动分析功能强大,非常成熟,在船舶动力学计算方面已成功应用。当然它亦可用于计算复杂结构水下振动声学问题,但其原理是利用有限区域截断来模拟声场的无限边界,声学计算模型中所需单元和节点的数量过多,计算量很大,声场的后置处理功能也较弱。基于上述分析,本文探索有限元与边界元接力分析的方法,利用 SYSNOISE 和 MSC/NASTRAN 软件各自优势,综合解决 X 型艇振动声学计算分析问题。

具体过程是:首先,使用 MSC/NASTRAN 软件计算 X 型艇的振动频响特性,得到各频率下 X 型艇有限元模型各节点的响应(如位移、速度和加速度)。这里利用了 MSC/NASTRAN 软件有限元结构振动分析的强大功能。然后,将得到的 X 型艇各节点的动力响应

参数提取出来, 作为SYSNOISE软件中X型艇声学边界元模型的输入边界激励条件加入, 利用SYSNOISE软件进行声场计算分析, 这里利用了SYSNOISE软件强大的声学后处理功能。

2.1 间接边界元法船舶振动声学分析原理

简谐激励作用下结构振动在外部流体介质 B 中产生的辐射声压 $p(r, \omega)$ 满足 Helmholtz 微分方程:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (2)$$

和流固界面条件:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -i\omega\rho v_n \quad (3)$$

以及 Sommerfeld 辐射条件:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \left[r \left(\frac{\partial p}{\partial r} - ikp \right) \right] = 0, \quad (4)$$

式中 $k = \omega/c$ 为波数, ω 为圆频率, c 为流体介质中的声速, ρ 为流体介质的密度, $\mathbf{n}$ 为结构表面 S 的外法向单位矢量, v_n 为结构表面 S 的外法向振速。 $r = |Q - P|$, Q 为结构表面 S 上任意点, P 为空间中任意点。

应用加权残值法并考虑适当的边界条件, 利用方程 (2) 的基本解:

$$G(Q, P) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \quad (5)$$

得到采用单层势 σ 与双层势 μ 表示的 Helmholtz 间接边界积分方程:

$$p(P) = \int_S \left(\frac{\partial G(Q, P)}{\partial n} \mu(Q) - G(Q, P) \sigma(Q) \right) dS(Q). \quad (6)$$

单层势 σ 代表结构表面 S 处的速度脉动:

$$\sigma = \frac{\partial p^+}{\partial n} - \frac{\partial p^-}{\partial n} = -i\rho\omega(v^+ - v^-). \quad (7)$$

双层势 μ 代表声学边界表面 S 处的声压脉动:

$$\mu = p^+ - p^-, \quad (8)$$

上标 + 和 - 分别代表实际结构表面与辅助虚边界域表面。

对边界积分方程(6)利用边界元法进行离散化, 即得间接法边界元求解方程。对处于半无限理想可压缩流体中的水面舰艇建立边界元方程时, 应将 $G(Q, P)$ 替换为半自由场格林函数 $G_H(Q, P)$ ^[5]。SYSNOISE 软件中的间接边界元法声学计算方程形式为^[6]:

$$\begin{bmatrix} B & C^t \\ C & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma \\ \mu \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ g \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

其中 B, C 和 D 为系数矩阵, σ 为速度脉动向量, μ 为压力脉动向量, f 和 g 是外界激励向量。

解得边界单元各节点处的 σ 和 μ , 则场点网格中任意点 X 处辐射声压 p_X 采用插值可得^[6]:

$$p_X = \mathbf{a}^T \mathbf{p} + \mathbf{b}^T \mathbf{v}_n. \quad (10)$$

采用间接边界元法求解声学问题的优点是, 它可以同时算出内、外声场的解, 适用于具有封闭和非封闭表面的结构。而直接边界元法只适用于具有封闭表面结构的声场计算。

2.2 X 型艇三维声学边界元模型

SYSNOISE 软件没有成边界元网格的功能, 只能向已有的网格模型中添加声学边界条件。本研究中, 仍利用 MSC/PATRAN 软件建立所需的边界元模型。将振动分析所用有限元模型中的梁单元和质量点单元全部删除, 但节点不进行任何处理, 即得到所需边界元模型。之所以要保持有限元模型与边界元模型节点的对应一致性, 是为保证振动响应数据向 SYSNOISE 模型中传递的正确性。

X 型艇三维声学边界元模型见图 3, 模型中仅含三角形与四边形单元 (Tria3 单元和 Quad4 单元), 节点总数为 3835, 单元总数为 4841。声学边界元模型外激励边界条件取艇节点振动速度作为输入, 同时还定义了模型的吃水面。



图 3 X 型艇声学边界元模型

2.3 X 型艇声学计算结果

利用 SYSNOISE 软件计算了艇的近场噪声和自噪声。声学频响分析中采用 1/3 倍频程频率, 计算频率 (Hz) 为 12.5~10 kHz。流体介质计算参数: 海水密度 $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$, 海水中声速 $c = 1480 \text{ m/s}$, 参考声压取为 10^{-6} Pa 。

声学计算工况: 为考虑主桨产生的噪声影响, 在声学边界元模型中定义了 3 个球面噪声源, 其数值由测试单位提供。具体作法是, 将各频率下主桨噪声曲线的分贝值换算为各频率下的声压值, 然后输入到 SYSNOISE 软件中球面噪声源幅值表中, 并指定作用点的位置坐标。

近场噪声计算所选场点网格平面位于艇右舷外侧 1 m, 垂向延伸至设计吃水线下 2 m。图 4 给出了选定点 A(62# 肋位吃水线下 1 m 处) 近场计算声压频响曲线, 62# 肋位在艇的中后部。

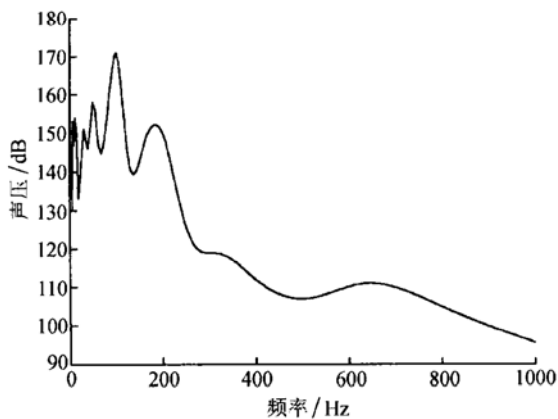


图 4 近场点 A 声学频响分析曲线

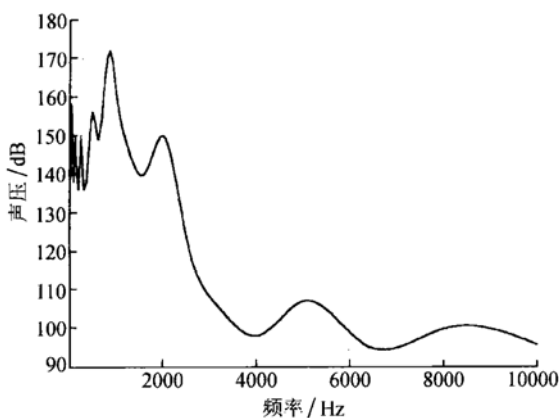


图 5 场点 B 声学频响分析曲线

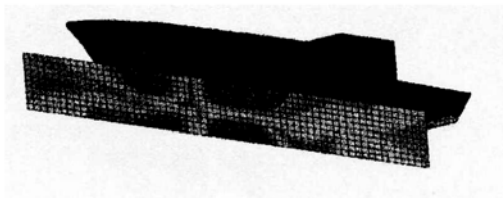


图 6 20 Hz 时近场声压等值图

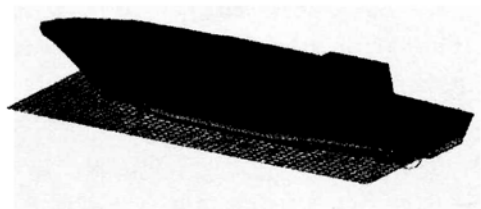


图 7 800 Hz 时自噪声声压等值图

计算艇的自噪声时, 计算场点网格平面位置选

在接近船底部区域。图5给出点B(25#肋位中央位置)处自噪声计算声压频响曲线, 25#肋位在艇的前端。

图6和图7给出了SYSNOISE软件声学频响分析某频率下的声压等值图示例。图4和图5所示声压分布情况是采用浮筏减振措施后得到的, 其中机理有待深入研究。

近场各指定场点处计算声压值综合评价结果、自噪声计算中各指定场点处计算声压值综合评价结果与实验结果的相对误差均在 7% 以内。

从计算结果看, 总体计算结果与实测值是很接近的, 当然也有一定误差。所产生的误差可能来源于以下几方面: 结构有限元建模及振动分析误差, 声学模型的简化产生的误差和计算误差等。总体上声场计算结果是可靠的, 声场计算结果可为工程设计接受。

3 结论

本研究项目对船舶全三维整体模型进行了近场/自噪声声学仿真计算。以前限于计算软件的匮乏, 难以对这类问题进行全船分析, 本研究利用引进的国外先进软件进行了这方面探索。采用有限元与边界元接力分析的方法, 将两套软件交替使用, 利用它们各自的优点, 成功解决了某型艇振动声学计算分析问题。与实验对比说明本文方法可行, 声学计算结果能满足工程设计需要。

参 考 文 献

- 1 尼基福罗夫著(谢信, 王轲译). 船舶结构声学设计. 北京: 国防工业出版社, 1998
- 2 金咸定, 赵德有编著. 船体振动学. 上海: 上海交通大学出版社, 2000
- 3 Ciskowski R D, Brebbia C A. Boundary element methods in acoustics. Boston: Computational Mechanics Publications, 1991
- 4 商德江, 何祚镛. 加肋双层圆柱壳振动声辐射数值计算分析. 声学学报, 2001; 26(3): 193—201
- 5 Seybert A F, Soenarko B. Radiation and scattering of acoustic waves from bodies of arbitrary shape in a three-dimensional half-space. ASME Transactions J. Vib. Acoust. Stress Rel. Dsgn., 1988; 110: 112—117
- 6 SYSNOISE Rev. 5.3A User's Manual. LMS Numerical Technologies, Belgium