



# 柴油机推进船舶振动计算及评估研究

李庆松<sup>1</sup>, 姚 辉<sup>2</sup>

(1. 海军驻广州广船公司军事代表室, 广东广州 510382; 2. 七一一研究所, 上海 200090)

**摘 要:** 建立了柴油机推进船舶的全船有限元计算模型, 计算了船舶整体和局部模态频率, 对其避开柴油机主推进装置和柴电机组等动力设备的扰动频率进行了评估。根据船舶的运行工况, 对柴油机等振动源进行隔振设计, 探讨了柴油机和螺旋桨振动激励施加及船体阻尼处理方法, 并根据 CCS 规范要求, 对船舶的振动水平进行评估。

**关键词:** 船舶; 振动响应; 有限元; 模态

**中图分类号:** U661.44      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4357(2011)04-0054-04

## Calculation and Assessment on Vibration of the Ship with Diesel Propulsion

Li Qingsong<sup>1</sup>, Yao Hui<sup>2</sup>

(1. Naval Deputy Office of Guangzhou Shipyard, GuangdongGuangzhou 510382;  
2. Shanghai Marine Diesel Research Institute, Shanghai 200090)

**Abstract:** The hull structure of diesel-powered ships was modeled by the finite element method, and the natural frequency was obtained by the global and local modal analysis. Assessment was carried out on how to avoid the disturbing frequency from diesel engine main propulsion system and diesel gensets. According to ships' operation conditions, anti-vibration design in the light of vibration source was conducted. The applied form of vibration excitation caused by diesel engine and propeller, and the method to deal with hull damping are discussed. According to CCS requirements, the ship vibration level was assessed.

**Keywords:** vibration response; FEM; modal

### 0 引言

剧烈振动和高分贝的噪声不仅影响了船员的舒适度, 而且对某些特殊船舶产生致命危害, 因此近些年来发达国家都致力于减振降噪方面的研究, 并取得了较大的进展。目前, 国内针对局部的振动噪声评估方法较多, 但很少有对全船的振动进行评估, 这与船体以及设备的复杂性和多样性有关<sup>[1]</sup>。常见的振动评估方法有: 通过人的感觉, 这种方法随着不同人对振动的敏感程度, 结果相差较大, 且没有定量的结论; 通过试验测得, 不仅要移动测试设备, 花费很长时间, 也不能单独为了测试, 长时间的开启船舶设备, 最主要的是对那些处

于设计阶段的船舶不可能进行测试。国外一些船级社很早就有对全船的振动进行评估, 以 ABS 为例, 对于振动的评估, 主要采用有限元方法, 对其中的模型、载荷和相关的处理都作了明确规定<sup>[2]</sup>。本文根据国内外著名船级社如 CCS、DNV、ABS 等对全船的振动要求, 结合自身的技术特点, 利用有限元软件 MSC. Patran 进行振动计算分析, 并得到了船级社的认可。

### 1 有限元模型

根据提供的图纸及计算要求, 做合理规划, 比如建立的模型是用来作何种计算分析的。根据我们的经验, 现在的船体模型, 不仅仅用来计算船体的

收稿日期: 2010-12-23  
作者简介: 李庆松(1972-), 男, 工程师, 主要研究方向为船舶设计与减振降噪。

强度、振动响应，有的还要用来计算舱室噪声、水下声辐射等，后者对网格的尺寸有较高的要求，不能把网格的尺寸定义得较大，但是网格单元太密会大大提高计算成本，有的甚至不能计算。合理的网格尺寸对结果影响较大，也避免了以后网格的修改和重新生成，节省前处理时间，因为这部分工作往往占整个分析时间的 80%。

需要对计算模型进行必要的简化，振动分析不像应力分析等，对模型的要求不高，不必太关注结构中的局部细节。对于船体上一些小的肋骨和扶墙材等，没有必要全部按照图纸建模，可以通过一定折算原则，以厚度的形式附加到相应的钢板上；对于结构中的强横梁和支柱等要按照实际建立。图 1 是典型船舶外形有限元模型。船舶甲板、舱壁等板壳结构均采用壳单元建模；加强筋和支柱采用梁单元建模；柴油机、发电机组等设备在保证质量、重心和转动惯量与实际一致，建立三维实体单元模拟；其下部的隔振器采用弹簧单元模拟；对于一些设备质量等通过质点或者非结构质量的形式施加到相应的位置上。

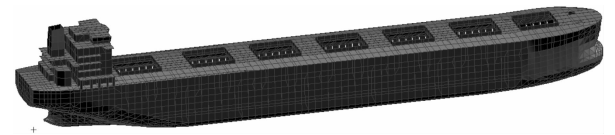


图 1 典型船舶外形有限元模型

2 模态分析

模态分析结果可以检查建模时的一些细节问题，还可以初步估算整个模型发生共振的频率，确定设备临界转速等。对于像整个船体这样的大结构，自由度很多，按照普通的模态计算方法会产生很多局部振动，掩盖了整体的共振频率，通常采用子空间缩减法计算，无论是从建模的角度还是计算分析的角度，该方法都较为简便，可以在保证计算精度的前提下，节省计算所需的时间。

对于全船的模态分析，边界条件一般处理为自由状态下，即不受任何的约束。附连水质量相当于舷外水与船体一起振动，需要考虑，它具有与船体质量同阶甚至更大的量值，可大大降低船体的自由频率。在 Nastran 中有专门的附连水质量处理模块，与船体的形状和水线等有关。

模态分析分为整体和局部的模态计算。图 2 是典型的低阶整船振型图。图 3 列举了某船上层建筑的局部结构振型图，主要考虑设备激励源频率附近的局部振型，因为此频段的局部振动容易被放大。

从模态计算结果中，可以得到整船或者关心的局部结构固有频率，提出船体结构改进方案，避开柴油机主推进装置和柴电机组等动力设备的扰动频率，避免发生共振。

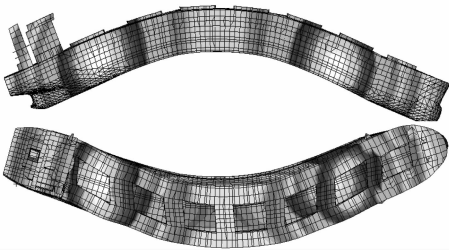


图 2 典型的低阶整船振型图

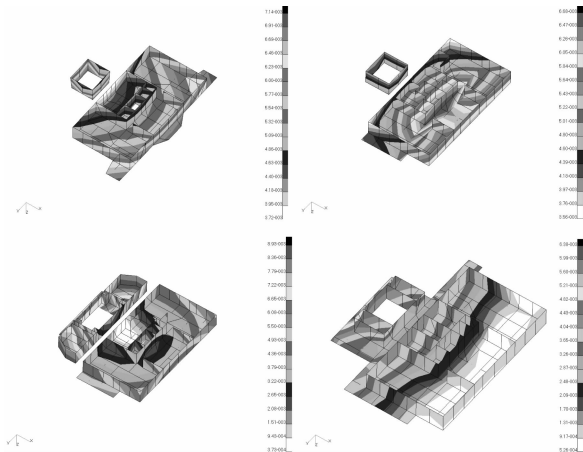


图 3 上层建筑局部结构振型图

3 振动响应计算

根据船级社要求，目前评价船体振动的主要指标是振动速度，在有限元软件中对应的是谐响应分析模块。振动分析的频带不用很宽，在 80 Hz 以上的振动相对于低频来说可以忽略，考虑到计算过程中存在模态截断，因此一般计算的频带为 0 ~ 100 Hz。

3.1 阻尼的影响

阻尼对于振动响应的计算结果有着重要的影响，包括结构阻尼、货物阻尼、水摩擦阻尼以及由表面压力波造成的阻尼等。对于船舶结构阻尼，目前普遍采用的是利用试验和经验的方法加以确定。对于货物阻尼，经验表明，散货船通常具有较大的阻尼值，根据规范要求，可在计算中采用常数阻尼系数的方法，取值 1.5% 临界阻尼系数作为强迫振动计算中的阻尼值；其它船型的阻尼较小。对于水摩擦阻尼以及由表面压力波造成的阻尼，有关的指导性文件建议忽略不计<sup>[4]</sup>。

3.2 激励载荷

在评估整船振动时，要考虑的激励源是：要求

评估的工况下设备运行时的载荷激励，一般为螺旋桨、主机、柴油发电机组、齿轮箱和一些辅机设备如空压机、泵组等。

螺旋桨是引起船体振动的主要原因，经过检验合格后的螺旋桨在运行时，一般不会出现较大的不平衡载荷。主要激励是由流场不均匀性产生的叶频激励，包括表面力和轴承力，主要与螺旋桨的转速、叶数、功率、船体艏部形状以及叶梢比有关。影响螺旋桨激励的因素很复杂，因此还没有确切的计算公式，一般根据经验公式推算和相似船舶类比得到<sup>[5]</sup>。空泡非常严重时，可以按照以下公式评估单幅的表面力：

$$F = 4.77K_p \frac{K \times SHP}{nD} K_A K_H$$

其中， $F$  是表面力，kN； $K$ 、 $K_p$ 、 $K_A$ 、 $K_H$  是修正系数，可以通过船体形状、叶数、叶梢比等查得； $SHP$  是功率，kW； $n$  是转速，r/min； $D$  是直径，m。

对于主机推进的船舶，该处的激励也是引起船体振动的主要原因之一。主机的激励一般可以由厂家提供各阶激励载荷，如表 1 是 MAN B&W 公司某型号主机的激励参数。对于不能提供的数据，一般通过试验测得、经验公式估算或者相似机型类比得到。如图 4 是广柴柴油机装船后，通过试验测得的机角加速度值，可以将该数据施加到主机的基座上。

表 1 某型柴油机的主要激励载荷

| 激励阶数          | 激励大小/(kN·m) |
|---------------|-------------|
| 1 阶水平         | 163         |
| 1 阶垂直         | 163         |
| 2 阶垂直         | 1 884       |
| 1 * 气缸数(H-转矩) | 1 312       |
| 2 * 气缸数(H-转矩) | 107         |
| 1 阶(X—转矩)     | 140         |
| 2 阶(X—转矩)     | 438         |
| 3 阶(X—转矩)     | 315         |
| 7 阶(X—转矩)     | 212         |
| 8 阶(X—转矩)     | 133         |

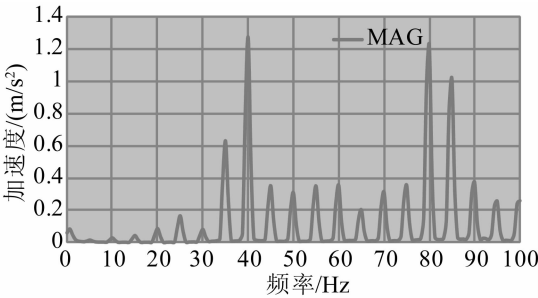


图 4 试验测得的主机机脚加速度值图

柴油发电机组对船体振动的影响也很明显。一般对转速较高的船舶，可以通过单层和双层隔振进行处理，船体振动会得到很大程度的降低。柴油发电机组的激励一般厂家都可以提供，相对于螺旋桨和主机，其对船体振动的贡献较小。图 5 为考虑了隔振处理的柴油发电机组模型。

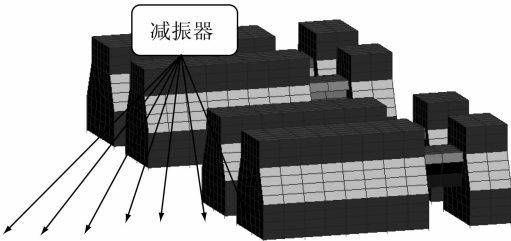


图 5 带隔振处理的柴油发电机组模型

对于其它的辅机设备，由于工作转速较高，本身的激励幅值较小，和船体的固有频率很难重合，因此对整体的振动影响不大，但是对于局部的结构振动可能产生较大影响。对于一些功率较大的辅机设备，在进行局部振动评估时要予以考虑，在相应位置建立振动源。

3.3 振动计算

根据图纸赋予船体有限元模型相关属性，施加载荷，设置对应的阻尼，建立场函数模拟不同设备激励源的载荷谱。

振动响应的评估一般选取具有代表性的几个点作为评估的标准，因为螺旋桨的激励对振动的影响最大，可在船艏位置选取几个点。对于上层建筑和人员活动区分布在艏部的船体，这几点大概反映了人员居住区的振动情况，对于人员居住区和活动区在船艏和中部的船体，需要重新评估各层甲板的振动情况。

振动响应评估的主要指标是振动速度，还需要给出各层甲板的振动速度云图分布，能反映出该层甲板的振动速度大小分布情况；同时找出该层甲板振动速度最大点的速度谱曲线，能反映出引起振动的主要频率和对应的幅值大小；部分规范中还要求给出振动速度云图分布的各个方向，本文按 CCS 规范要求。图 6 给出了在螺旋桨和主机激励下船体关键点的振动速度谱，图 7 给出了某层甲板的速度云图分布及最大速度点的振动速度谱曲线。振动速度云图分布表明了该层甲板速度分布情况，速度响应曲线提供了最大速度点各频段的分布情况，通过曲线可发现引起该处振动的主要频率是否与模态计算的频率吻合。云图的最大值代表了该层甲板的最

大振动速度，满足 CCS 规范要求。

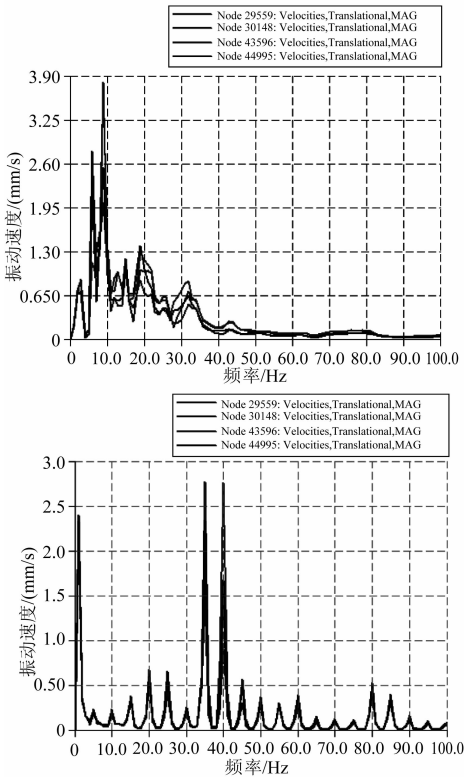


图 6 螺旋桨和主机激励下关键点的振动速度谱

4 结 论

全船的振动评估，对于整船设备的布置和船体的优化有着非常重要的意义，可以避免装船后的修改和拆装。有限元模型的建立和简化至关重要，将直接影响到计算结果的准确性；模态分析时尽量采用子空间法，节省时间，可以去除众多的局部振动，同时考虑附连水质量；振动响应计算是最终目标，工况和相应的载荷是计算的关键，合理的阻尼

系数对结果影响也较明显，在评估结果时，需要选取具有代表性的关键点。

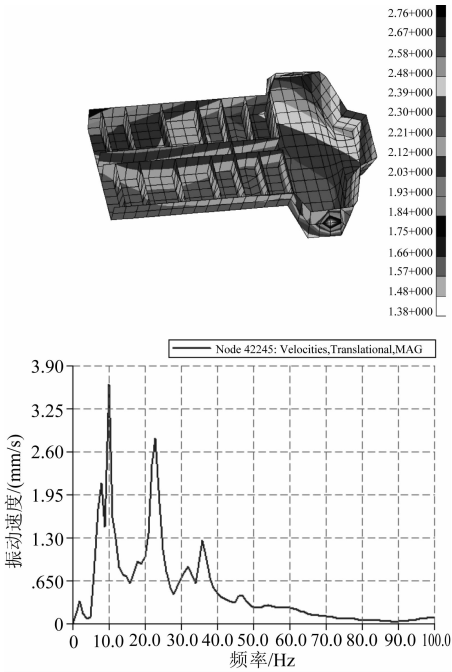


图 7 某层甲板的速度云图及振动速度谱

参考文献

[1] 吴嘉蒙. 集装箱船的振动与响应评估[J]. 上海造船, 2009(4):14-18.

[2] 周炎,李国刚,童宗鹏. 船舶低噪声设计技术研究[J]. 上海造船,2010(1).

[3] 中国船级社. 船上振动控制指南[M]. 北京:人民交通出版社,2000.

[4] 中国船舶工业总公司. 船舶设计实用手册[M]. 北京:国防工业出版社,2002.

[5] 姚熊亮. 船体振动[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社 2008.

(上接第 47 页)

3 故障分析结果

文章开始提到的转速波动故障，经过电气维修人员的检查发现：第一个故障是机旁控制系统中位移传感器损坏引起的转速波动。

维修人员通过高频示波器分析手柄输出信号、CAN 通讯信号、转换单元信号等，发现第二个故障是主机遥控系统程序调用参数因元器件老化而偶发变化所引起的转速短时波动。因该故障属于孤立偶发故障，生产厂家通过更换新器件解决故障。

4 结 论

通过对整船动力系统的分析可以看出，控制转速平稳运行的因素很多并且复杂，关联系统较多，供油限制异常、增压器切换异常、燃油系统进气等都会引起转速波动。因此，在转速发生波动时，首先需分清是故障引起的波动还是柴油机工作特性引起的短时波动。如该船试航期间，由于船员对该型主机的缸排断油功能不熟悉，会把主机正常功能当成主机出现转速波动故障。因此，对排除转速波动故障需详细分析故障情况，从系统整体出发，逐步排查，直至发现问题并解决。