

文章编号:1006-1355(2021)02-0179-05+205

## 11.4万吨油船全频段舱室噪声预报分析

吴晨飞, 瞿小凌, 付佳

(上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

**摘要:**以11.4万吨阿芙拉油船为研究对象,运用VA One噪声分析软件在63 Hz~8 000 Hz频段开展油船舱室噪声预报分析研究。根据模型平板和声腔子系统的模态数,将求解频段划分为高频段和中频段,采用统计能量分析方法(SEA)和混合法(Hybrid FE-SEA)预报计算各频段舱室噪声。结果表明,大部分舱室的噪声预报值都符合MSC.337(91)的限值要求。针对不符合规范要求的舱室,分析噪声超标原因并提出相应降噪措施,使油船所有舱室噪声预报值均满足规范要求。

**关键词:**声学;船舶;舱室噪声预报;统计能量法;混合法;降噪

**中图分类号:** TB533<sup>+</sup>.2

**文献标志码:** A

**DOI编码:** 10.3969/j.issn.1006-1355.2021.02.030

## Prediction and Analysis of Cabin Noise of an 114 000 t Crude Oil Tanker

WU Chenfei, QU Xiaoling, FU Jia

(Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

**Abstract:** Prediction of cabin noise of an 114 000 t crude oil tanker is discussed. The noise analysis software VA One is used to carry out the prediction and analysis of the cabin noise in the frequency domain of 63 Hz - 8 000 Hz. According to the modal number of the model plate and acoustic cavity subsystem, the frequency band is divided into high frequency band and medium frequency band. Statistic Energy Analysis (SEA) method and hybrid FE-SEA method are used to predict the cabin noise in each frequency band. The results show that most prediction values of the cabin noise level meet the requirements of the limit values in MSC. 337(91) standard. For the cabins whose noise levels do not meet the requirement of the standard, the causes of overlarge noise are analyzed and the corresponding noise reduction measures are put forward.

**Key words:** acoustics; ship; cabin noise prediction; statistic energy analysis (SEA); hybrid; noise reduction

船舶一直以来都是最主要的水上交通运输工具,随着科学技术的发展,造船水平不断提高,人们越来越重视船上的低噪声舒适性。国际海事组织(IMO)第91届海安会(MSC91)通过了第338号关于SOLAS修正案的决议,要求船舶构造应符合MSC.337(91)决议所要求的《船上噪声等级规则》,以保护人员免受噪声的伤害<sup>[1]</sup>。新的噪声等级规则的生效对船厂提出了更高的要求,为了使船舶能够满足MSC.337(91)规范的要求,设计人员需要在初期即对船舶开展舱室噪声预报分析工作,对于不能满足规范的舱室,协同其他人员在建造前提出相应的解决方案。

经典的有限元模态分析法局限于低频段噪声的分析,随着频率增高,误差迅速增大<sup>[2]</sup>。在运用统计能量法分析时,需要保证声学模型的子系统模态密度足够高( $\geq 5$ ),才能保证其计算分析的精确度,因此,统计能量法适用于高频段的噪声分析<sup>[3]</sup>。VA One是法国ESI集团推出的全频域噪声分析软件,它能够用有限元分析法(FEM)、统计能量法(SEA)和混合有限元-统计能量法(Hybrid FE-SEA)进行全频段的噪声预报分析<sup>[4]</sup>。

本文基于SEA方法和Hybrid FE-SEA方法,以我公司11.4万吨阿芙拉油船为研究对象,进行舱室噪声的预报分析研究。主要考虑的噪声源有:主机噪声、发电机噪声、主要风机(包括排气机、送气机、空调)噪声等。对于超标的舱室,选择隔音效果更好的甲板敷料和绝缘材料。最后将计算结果与MSC.337(91)规范限值进行比对和讨论。

收稿日期:2020-06-03

**作者简介:** 吴晨飞(1994-),男,江苏省苏州市人,硕士,主要研究方向船舶振动噪声分析控制。

E-mail: 010318wcf@163.com

# 1 声学分析模型建立

## 1.1 模型概况

船舶舱室噪声分析频率范围为 63 Hz 至 8 000 Hz,主要包含了船舶噪声的中频域和高频域,本文采用混合法(Hybrid FE-SEA)和统计能量法(SEA)分别对中频域和高频域进行舱室噪声的预报分析。具体区分的频率范围将通过判断“单位带宽模态数”的具体数值来决定,参考的标准为<sup>[5]</sup>:

(1)  $N > 5$ ,该频段属于高频段,运用 SEA 法进行分析计算;

(2)  $1 \leq N \leq 5$ ,该频段属于中频段,运用 Hybrid FE-SEA 法进行分析计算;

(3)  $N < 1$ ,该频段属于低频段,运用 FEM 法进行分析计算。

最后,对不同频段模型的计算结果进行数据整合处理,得出全频段的计算结果。

在已有 11.4 万吨阿芙拉油船有限元模型的基础上,对模型进行修改。油船艏部和货舱区域没有噪声源,不作为主要的研究对象,因此对于艏部和货舱只保留最基本的框架;机舱、艉部、上建和烟囱存在大量的噪声源,结构和舱室布置较为复杂,仅删除其一些无用的板架结构,基本保留了所有主要舱室的框架。利用中国船级社有限元模型快速转换系统 PreSEA,对修改后的有限元模型进行快速子系统划分,针对曲率较大的机舱及艉部的外板区域子系统进行手动分割和合并。

将生成的子系统直接导入到声学软件 VA One 中,生成结构平板子系统,考虑到海水对船舶噪声的影响,设置半无限流体模拟噪声在海水中的传播(全船平板子系统和设置的半无限流体如图 1 所示,局部平板子系统见图 2)。根据舱室的布置情况建立声腔子系统,为了模拟烟囱与上层建筑之间的噪声传递,在烟囱和上建中间建立了声腔,如图 3 所示。上层建筑各层主要舱室分布如表 1 所示。

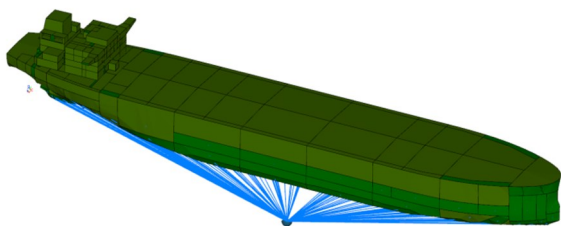


图 1 全船平板子系统

模型的大部分平板与舱室声腔子系统的模态数在全频段均大于 5,图 4 和图 5 分别给出了低频段内模态数不足 5 的平板子系统和声腔子系统在不同频率下的模态数。

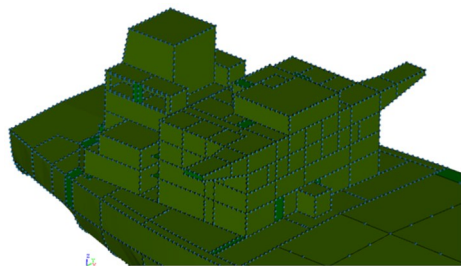


图 2 局部结构平板子系统

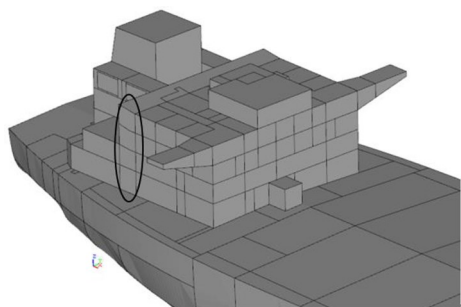


图 3 声腔子系统

表 1 上层建筑各层主要舱室分布

甲板层	主要舱室
上甲板	苏伊士船员、健身房、更衣室、空调机室
A 甲板	餐厅、厨房、娱乐室、会议室、医务室、货控室
B 甲板	船员卧室、船员办公室
C 甲板	高级船员卧室
驾驶甲板	驾驶室

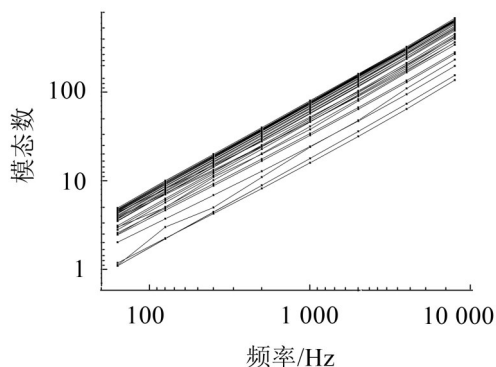


图 4 部分平板子系统模态数

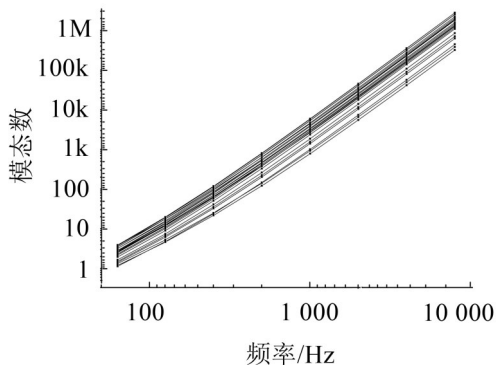


图 5 部分声腔子系统模态数

由此可知:

(1)主要的平板子系统和声腔子系统模态数均大于1,仅对中频段和频段进行舱室噪声预报分析,满足分析精度要求;

(2)在63 Hz至250 Hz,部分平板和声腔子系统模态数在1至5之间,部分模态数大于5,满足混合法分析要求;

(3)在500 Hz至8 000 Hz,平板和声腔子系统模态数均大于5,符合统计能量法分析要求。

在确定了混合法和统计能量法的计算分析频段后,针对混合法模型,在原有SEA模型的基础上进行修改,将63 Hz至250 Hz内模态数不足5的舱室模型修改成有限元模型,即将围成这些舱室的平板子系统和舱室本身的声腔子系统划分成有限元单元,模型如图6和图7所示。

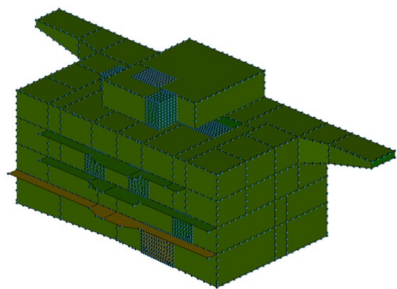


图6 混合模型平板子系统

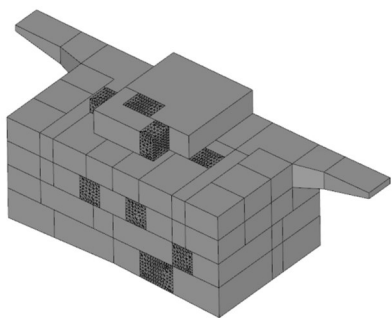


图7 混合模型声腔子系统

## 1.2 声学参数

声音在钢板和舱室中传播都会有一定的内损耗。平板子系统的内损耗因子采用船级社推荐的经验值,钢板内损耗因子如表2所示<sup>[6]</sup>。

声腔子系统的内损耗因子可以通过计算平均吸声系数得到,其计算公式为<sup>[6]</sup>

$$\eta = \frac{Ac_0}{4V\omega} \alpha \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为内损耗因子, $A$ 为舱室总面积, $c_0$ 为声音在舱室中的传播速度, $V$ 为舱室体积, $\omega$ 为倍频程的中心频率, $\alpha$ 为吸声系数。若舱室无内饰板,则平均吸声系数为舱室内流体介质的吸声系数,比如空气的吸声系数为1%。

表2 钢板内损耗因子

频率/Hz	内损耗因子/(%)
63	0.3
125	0.26
250	0.24
500	0.21
1 000	0.19
2 000	0.18
4 000	0.17
8 000	0.16

根据我公司以往船型的建造经验以及试航测试的结果,为了满足MSC.337(91)对于舱室噪声规范限值的要求,在进行船舶建造的时候,主要的生活工作舱室都会在甲板上铺设敷料,在舱壁和天花板布置木作和相应的绝缘材料。在VA One分析软件中,需要根据甲板敷料和舱室绝缘布置图,逐层进行材料参数设置并施加到对应舱室的平板子系统中。对于布置了甲板敷料、木作和绝缘的舱室,声腔子系统采用船级社推荐的折合吸声系数,如表3所示<sup>[6]</sup>;对于没有布置任何声学材料的舱室,声腔子系统的吸声系数设置为舱室内流体介质的吸声系数,比如空气的吸声系数为1%。

表3 舱室折合吸声系数

频率/Hz	主机舱 艙	舵机舱冷藏 室舱	船员舱 客舱	公用舱 办公室
63	0.04	0.04	0.12	0.12
125	0.08	0.06	0.21	0.17
250	0.11	0.08	0.25	0.19
500	0.14	0.10	0.27	0.20
1 000	0.17	0.13	0.28	0.21
2 000	0.20	0.15	0.29	0.21
4 000	0.24	0.18	0.29	0.22
8 000	0.27	0.20	0.29	0.22

## 1.3 噪声源

船上噪声激励主要分为结构噪声和空气噪声。分析中主要考虑的噪声源包括:主机噪声、发电机噪声、风机(包括排气机、送风机、空调)噪声等,设备的噪声谱均采用厂商提供的数据资料,主机、发电机、主要风机噪声谱见表4至表6,参考声压级 $L_p=2 \times 10^{-5}$  Pa,参考声功率级为 $L_w=1 \times 10^{-12}$  W,参考速度级为 $L_v=5 \times 10^{-8}$  m/s。不同的噪声源类型在软件中需要使用不同的模块进行加载,表4和表5中的排气管和空气噪声及表6中的风机噪声均需要转换成声功率级,选取辐射噪声模块进行加载;表4中结构噪声需要在软件中以对结构施加约束的形式加载。

表 4 主机噪声谱

频率/ Hz	排气管 噪声 $L_p$	空气 噪声 $L_p$	结构 噪声 $L_v$
31.5	120.1	95.5	73.9
63	114.3	95.2	71.6
125	106.8	95.5	68.7
250	103.1	94.9	67.4
500	101.0	95.0	64.0
1 000	95.7	95.4	58.4
2 000	84.9	93.6	51.7
4 000	75.0	87.9	43.7
8 000	67.1	82.3	37.5

表 5 发电机噪声谱

频率/Hz	排气管噪声 $L_p$	空气噪声 $L_p$
31.5	109	89
63	114	87
125	121	94
250	115	91
500	106	94
1 000	111	100
2 000	111	98
4 000	104	95
8 000	85	85

表 6 主要风机噪声谱(A 计权)

频率/ Hz	厨房 排风机 $L_p$	厨房 送风机 $L_p$	机舱 送风机 $L_p$
63	56	54	72
125	67	65	87
250	81	79	90
500	80	78	91
1 000	81	80	93
2 000	80	77	92
4 000	77	72	85
8 000	72	63	80

2 舱室噪声预报分析结果

根据混合分析方法,在 63 Hz 至 250 Hz 对混合模型进行舱室噪声预报分析,首先需对有限元平板子系统和有限元声腔子系统进行振型模态和质量的计算,然后再进行舱室的噪声预报分析;根据统计能量分析方法,在 500 Hz 至 8 000 Hz 对统计能量模型直接进行舱室预报分析。由于规范 MSC. 337(91)评价舱室噪声等级采用 A 计权声级,因此,在软件中直接提取 A 计权下各个频率对应的声级。采用混合法和统计能量法分析,分别得到两个频段的噪声预报结果,需要自行计算 63 Hz 至 8 000 Hz 整个频段的总声级,具体公式如下<sup>[7]</sup>:

$$L_A = 10 \lg \left( \sum 10^{0.1L_{Ai}} \right) \quad (2)$$

式中: $L_{Ai}$ 为每个频带的 A 声级。  
统计能量法和混合法对应的声腔子系统的能量云图分别如图 8、图 9 所示。

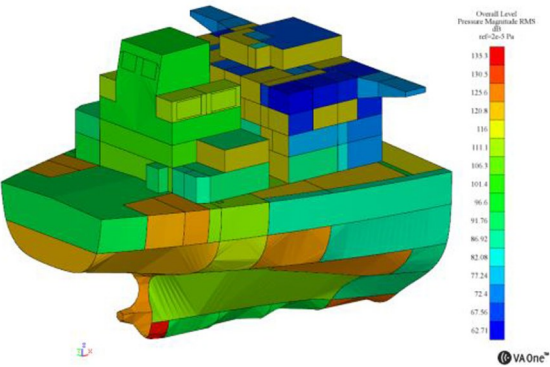


图 8 统计能量模型声腔子系统能量云图

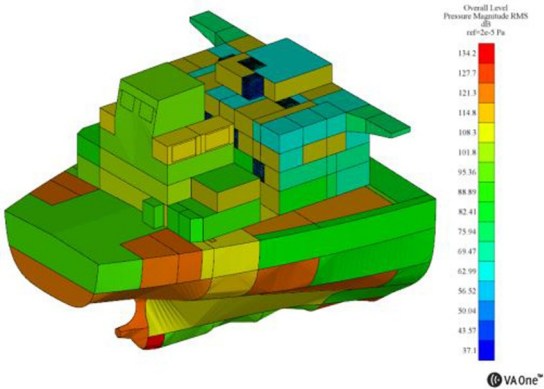


图 9 混合模型声腔子系统能量云图

计算结果显示,大部分上层建筑舱室,包括驾驶室、各级船员卧室、办公室、餐厅、厨房等均满足规范 MSC. 337(91)规定的限值要求,机舱的各类舱室全部满足规范要求。仅有医务室、健身房、苏伊士船员 3 个房间的噪声预报值超过了规范的标准。典型舱室的噪声预报结果见表 7,图 10 为典型舱室在倍频程各频率下的 A 计权声压值,参考声压为  $2 \times 10^{-5}$  Pa。

表 7 典型舱室噪声预报结果

舱室	预报值/ dB(A)	规范值/ dB(A)	是否满足 规范
驾驶室	55.15	65	YES
引水员间	48.96	55	YES
医务室	57.98	55	NO
厨房	74.74	75	YES
餐厅	57.04	60	YES
健身房	60.48	60	NO
苏伊士船员间	56.63	55	NO
集控室	73.62	75	YES

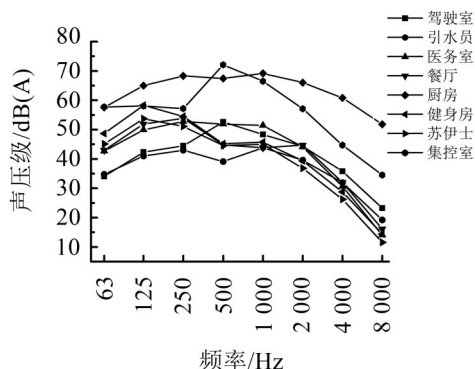


图10 典型舱室A计权声压值

### 3 舱室降噪措施

#### 3.1 舱室噪声超标原因

为了能够提出有效的舱室降噪方案,需要对噪声值超标舱室进行噪声输入途径分析,从而提出相应的针对性的降噪措施。以医务室为例,其噪声主要输入途径见图11。

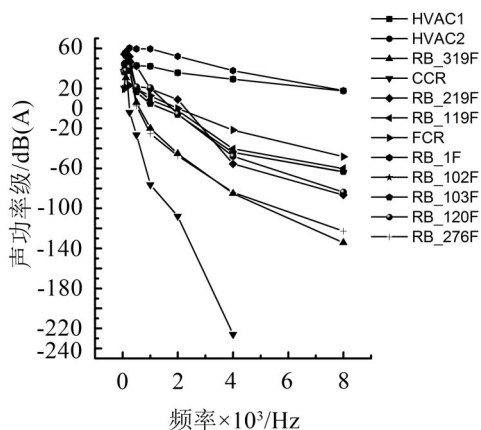


图11 医务室能量输入

图11中,HVAC代表空调通风,FCR代表防火控制室,CCR代表货控室,RB\_1F代表板架(数字代表编号)。从图中可以看出,主要的噪声由板架1(RB\_1F)引起,为结构噪声,板架1是医务室下方甲板,医务室正下方为防火控制室,防火控制室下方即为机舱,因此可以认为医务室的主要噪声来源于机舱的主机、发电机等引起的结构噪声。

同样,针对噪声值超标的健身房和苏伊士船员间,结合舱室位置可以判定:

(1) 健身房超标主要原因:位于主甲板,即处于机舱上方;

(2) 苏伊士船员间超标主要原因:处于机舱上方,并且与通往机舱的梯道直接相邻。

#### 3.2 舱室降噪措施

控制噪声一般有3种途径:控制噪声源,控制传播途径,进行个人防护。在船舶上控制传播途径是

最为有效、可靠和经济的措施。

根据分析所得的噪声超标原因,参考我公司以往针对噪声超标采用的措施,对噪声预报值超标的舱室设计提出如下修改:

(1) 医务室主要噪声都来源于下方的防火控制室,在甲板上铺设浮动地板,提高甲板隔声效果;

(2) 健身房位于机舱上方,主要噪声来源于机舱,同样在甲板铺设浮动地板;

(3) 苏伊士船员间主要噪声一部分来自下方机舱,一部分来自相邻的机舱梯道,在房间内铺设浮动地板,并且在与机舱梯道相邻的舱壁上将25 mm的岩棉木作加厚到50 mm。

浮动地板的作用是通过隔开振动来减少传递至甲板面的噪声,主要通过将陶瓷棉等材料均布在甲板敷料与甲板结构之间,形成缓冲或中空层,以隔离或降低振动能量的传递,从而达到降噪的效果(浮动地板组成如图12所示)。浮动地板相较于原先布置的地板,具有更好的降噪作用。岩棉木作中,岩棉具有良好的绝缘、隔声和吸声性能,增大木作中岩棉的厚度,可以提高岩棉的降噪效果<sup>[8]</sup>。

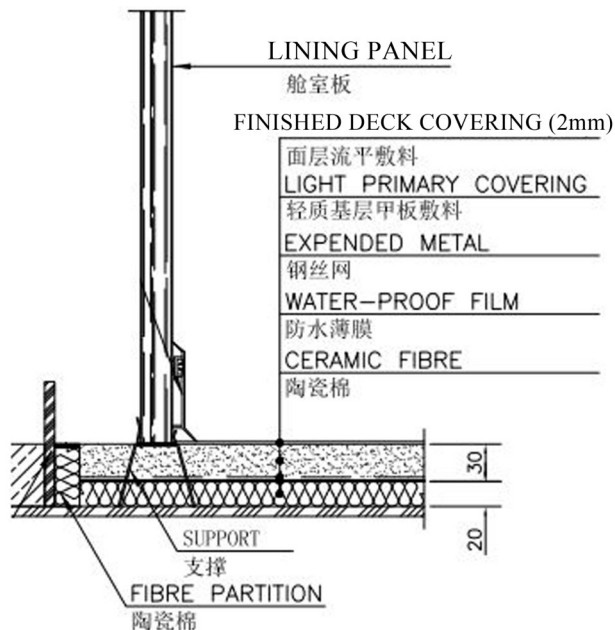


图12 浮动地板组成示意图

表8是噪声超标舱室设计修改前后舱室噪声预报的对比。由表可知,提出的降噪措施降噪效果明显,舱室的总声压级显著降低,达到了预期的隔音降噪效果,并且总A计权声压级噪声也都满足MSC.337(91)的规范限值。

### 4 结语

本文以11.4万吨阿芙拉油船为研究对象,开展

(下转第205页)