

中文引用格式:张悦,刘涛,康钟绪,等. 基于声线法与 SEA 的海上平台噪声联合仿真方法[J]. 中国安全科学学报,2026,36(4): 262-270.

英文引用格式:Zhang Yue, Liu Tao, Kang Zhongxu, et al. Joint simulation method of offshore platform noise based on sound ray tracing method and SEA [J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 262-270.

基于声线法与 SEA 的海上平台噪声联合仿真方法^{*}

张悦¹高级工程师, 刘涛¹高级工程师, 康钟绪^{**2}研究员,

周伟¹高级工程师, 吴瑞²研究员, 陈坤亮¹工程师

(1 中海油研究总院有限责任公司 工程研究设计院, 北京 100028;

2 北京市科学技术研究院 城市安全与环境科学研究所, 北京 100054)

中图分类号:X966;TB535

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0187

【摘要】 为精准预测海上平台噪声分布以防治职业噪声危害,针对传统单一噪声预测方法难以兼顾结构声与空气声传播特性、无法细致描述大尺度空间声场分布的问题,提出融合声线法与统计能量分析(SEA)的联合仿真方法。该方法采用 SEA 模拟结构声传播特征,通过声线法精细化模拟甲板大空间空气声传播特征。以某海上中心平台为研究对象,基于实测振动与噪声源强数据构建联合仿真模型,仿真计算各层甲板声场分布,并通过空间网格化噪声测试验证方法有效性。结果表明:海上平台各层甲板噪声总能量中,空气声能量贡献占比超 50%,高于结构声;大尺寸设备、生产区用房及防火墙等障碍物对噪声遮挡作用显著,空气声传播对甲板空间声场分布影响更为突出;联合仿真结果与实测结果吻合良好,预测与测试数据整体平均差异在 2 dB 之内,可实现海上平台甲板空间声场分布的高精度预测。

【关键词】 声线法; 统计能量分析(SEA); 海上平台噪声; 联合仿真; 空气声; 结构声

Joint simulation method of offshore platform noise based on sound ray tracing method and SEA

Zhang Yue¹, Liu Tao¹, Kang Zhongxu², Zhou Wei¹, Wu Rui², Chen Kunliang¹

(1 Engineering Research and Design Institute, CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China;

2 Institute of Urban Safety and Environmental Science, Beijing Academy of Science and Technology,
Beijing 100054, China)

Abstract: In order to accurately predict the noise distribution of offshore platforms to prevent occupational noise hazards, a joint simulation method combining the sound ray method and SEA method was proposed to solve the problem that the traditional single noise prediction method was difficult to take into account the structural sound and air sound propagation characteristics and could not describe the large-scale spatial sound field distribution in detail. In this method, SEA was used to simulate the acoustic propagation characteristics of the structure, and the acoustic propagation law of the air in the large space of the deck was simulated by the sound ray method. Taking an offshore central platform as the research

^{*} 文章编号:1003-3033(2026)04-0262-09; 收稿日期:2025-10-14; 修稿日期:2026-01-10

^{**} 通信作者:康钟绪(1980—),男,河北深州人,博士,研究员,主要从事噪声与振动控制方面的研究。E-mail: zhongxukang@163.com。

object, a joint simulation model was constructed based on the measured vibration and noise source intensity data. The sound field distribution of each deck was simulated and calculated, and the effectiveness of the method was verified by a spatial grid noise test. The results show that the contribution of air acoustic energy to the total noise energy of each deck of the offshore platform is more than 50 %, which is higher than that of structural acoustic energy. Obstacles such as large-scale equipment, production area rooms and firewalls have a significant effect on noise shielding, and air sound propagation has a more prominent impact on the spatial sound field distribution of the deck, the joint simulation results are in good agreement with the measured results, and the overall average difference between the prediction and the test data is within 2 dB, which can realize the high-precision prediction of the spatial sound field distribution of the offshore platform deck.

Keywords: sound ray tracing method; statistical energy analysis(SEA); offshore platform noise; joint simulation; air sound; structural sound

0 引言

海上平台作为海洋油气勘探开发的核心基础设施,其上设备密集,透平发电机、注气压缩机、空压机、注水泵、原油外输泵等设备产生大量高噪声,作业人员面临显著职业性听力损伤风险^[1-2]。工业噪声对作业人员的生理健康具有明确的负面影响^[3],然而,当前海上平台研究多聚焦于安全生产等传统领域^[4],针对职业噪声暴露的系统性研究匮乏,导致作业人员职业健康防护面临挑战。因此,在海上平台设计阶段开展噪声预测以优化噪声环境、保障职业健康,具有重要的现实意义与应用价值^[5-8]。

目前,针对海上平台的噪声预测^[9],除了采用经验方法外,主要借鉴船舶行业技术,以有限元法、边界元法^[10]和统计能量法^[11]等数值仿真方法为主。目前,VA One 等专业声学软件已在海上平台的噪声优化设计中实现工程应用^[12-13]。早期研究中,有限元法被广泛应用于船体结构振动特性分析^[14],而后,学者们针对中低频噪声问题采用有限元法与边界元法,高频噪声则以统计能量分析(Statistical Energy Analysis,SEA)方法为主要手段^[15]。SEA 忽略研究对象的具体细节,将整个声振系统划分成若干个子系统,以每个子系统的能量为基本参数,用“统计”的观点,建立每个子系统之间的能量流动传递关系,以此来预测目标系统的声学环境。目前,SEA 主要应用于系统复杂,模态密集的中、高频段,如船舶、高铁、汽车以及海上平台等领域。相关学者结合研究和工程实际,编制了海上平台的噪声预测相关标准,包括《海洋平台辐射噪声预报方法》(GB/T 39479—2020)^[10]、《海上固定平台噪声分析指南》(Q/HS 3108—2020)^[11]等,标准要求低频段采用有限

元方法、高频段采用 SEA^[16]。但是,海上平台各层甲板为尺度较大空间,设备噪声兼具结构声与空气声传播特性,其声场分布受直达声、反射声、绕射声、混响声等多种性质空气声传播的影响,SEA 获得的声场难以细致描述声场分布细节,也无法考虑反射、绕射等声传播特有的物理现象,致使声场预测结果难以有效支撑海上平台低噪声设计需求。

几何声学计算方法是计算空气声传播较为简便的方法,计算简单,适用范围广,其中,声线法在大尺度空间应用广泛^[17]。声线法主要基于以下假设:在高频时,声波将像光束一样以直线传播,该假设只有当声波波长远小于模型几何尺寸时才是有效的^[18]。自 Krokstad 等^[18]提出使用声线追踪法来模拟室内声场以来,该方法已广泛应用于室内、室外的声传播场景,多种基于该理论的声学计算软件已成功应用于大量的室内声学、环境声学等领域的声传播仿真^[19-20]。

鉴于此,笔者拟提出将声线法引入海上平台甲板空间声场仿真,构建 SEA 与声线法的联合预测方法,以提升海上平台甲板空间的空气声传播预测精度,并结合实测数据验证方法有效性,为海上平台职业噪声危害防治提供技术支撑。

1 基于声线法的空气声传播模型

以几何声学为理论基础的声线法主要适用于大尺度的空气声传播计算。声线法认为,声源发出的声线在具有均匀阻抗的边界上反射遵循镜面反射,反射声线可看作是从虚声源(即实声源关于这一边界的镜像声源)所发出,该方法通过声束追踪技术模拟声传播、声波遇到壁面的反射吸收、绕射等声学现象。一般情况下,只有界面尺度和声波传播距离

远大于所考虑的声波波长时,几何声学才比较准确,因此,声线法更适合大尺度、中、高频的声场预测。

为方便应用,研究人员基于声线法形成了比较稳定完善的空气声传播模型^[21]。模型中,声波在空气中传播时,接收点处的声压级 L_p 按下式计算:

$$L_p = L_W + D_c - A \tag{1}$$

式中: L_W 为点声源产生的声功率级, dB; D_c 为指向性修正, dB; A 为声传播过程中的各项衰减的和, dB; 包括:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \tag{2}$$

式中: A_{div} 为几何发散引起的衰减; A_{atm} 为大气吸声引起的衰减; A_{bar} 为声传播路径上由于障碍物的存在引起的衰减量; A_{gr} 为地面效应引起的衰减; A_{misc} 为其他杂项引起的衰减。其中,

$$A_{div} = 20\lg(d/d_0) + 11 \tag{3}$$

$$A_{atm} = \alpha d/1\,000 \tag{4}$$

$$A_{bar} = 10\lg[3 + (C_2/\lambda)C_3zK_{met}] \tag{5}$$

$$C_3 = \begin{cases} [1 + (5\lambda/e)^2]/[1/3 + (5\lambda/e)^2] & e \neq 0 \\ 1 & e = 0 \end{cases} \tag{6}$$

$$z = [(d_{ss} + d_{sr} + e)^2 + a^2]^{1/2} - d \tag{7}$$

$$K_{met} = \begin{cases} \exp[-(1/2\,000) \sqrt{d_{ss}d_{sr}d/(2z)}] & z > 0 \\ 1 & z \leq 0 \end{cases} \tag{8}$$

式中: d 为声源与接收点之间的距离, m; d_0 为参考位置距离声源之间的距离, 一般为 1 m; α 为大气吸声系数, dB/km; λ 为声波波长, m; e 为屏障 2 边缘之间的距离, m; a 为声源与接收点之间的距离在平行于屏障上边界的投影长度。其中, 考虑地面反射效应时, C_2 为 20, 地面反射采用虚源方式单独考虑时, C_2 为 40。 A_{gr} 和 A_{misc} 的确定需要考虑多种因素^[22], 文中不再详细描述。声屏障声程差计算几何关系如图 1 所示。

$$A_{bar} = 10\lg[3 + (C_2/\lambda)C_3zK_{met}]C_3 = \begin{cases} [1 + (5\lambda/e)^2]/[1/3 + (5\lambda/e)^2] & e \neq 0 \\ 1 & e = 0 \end{cases} z = [(d_{ss} + d_{sr} + e)^2 + a^2]^{1/2} - dK_{met} = \begin{cases} \exp[-(1/2\,000) \sqrt{d_{ss}d_{sr}d/(2z)}] & z > 0 \\ 1 & z \leq 0 \end{cases}$$

2 海上平台噪声联合仿真

2.1 低频声贡献

SEA 有利于中高频的结构声计算, 声线法主要应

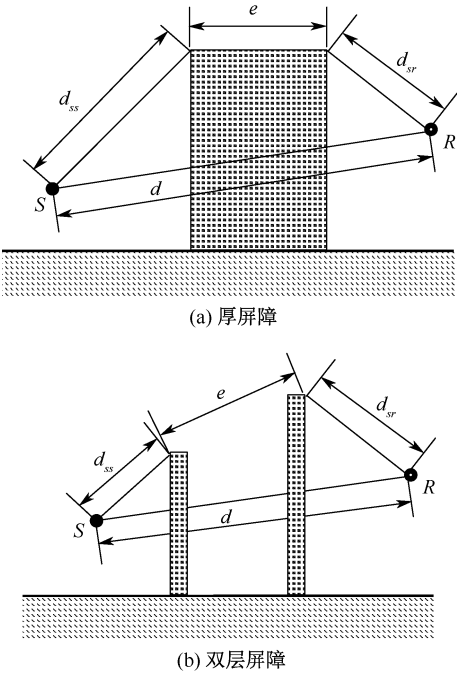


图 1 声屏障声程差计算几何关系
Fig. 1 Geometrical quantities for determining the path length difference for barrier

用于中高频的空气声传播计算。当开展较低频率计算时, 2 种方法的误差会有所增加。开展噪声危害分析时, 采用的声压级一般都需进行 A 计权, 计权时对低频部分有较大的衰减。海上平台典型声源和房间的噪声测试结果如图 2 和图 3 所示, 结果显示, A 计权后的低频范围赋值远低于中高频赋值, 其对总声压级的贡献极小, 可见: 低频段噪声计算的误差增大并不会对海上平台的噪声计算产生较大影响。

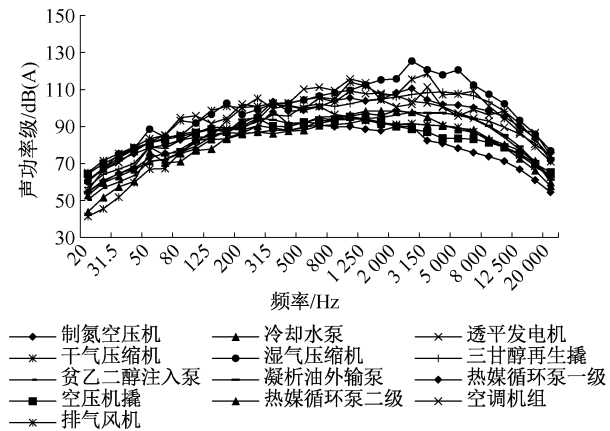


图 2 某海上平台设备实测噪声数据
Fig. 2 Noise measurement data of offshore platform devices

以往研究往往采用基于声学波动方程的有限元法开展低频噪声计算, 虽能提升计算精度, 但由于海

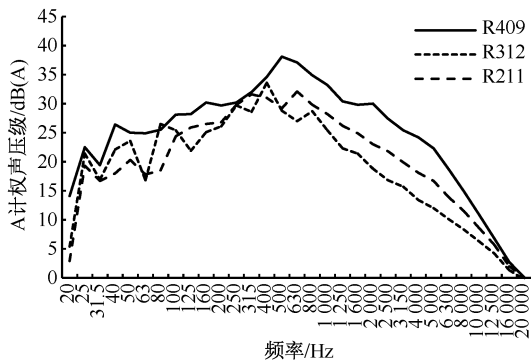


图 3 某海上平台生活楼房间实测噪声数据
Fig. 3 Noise measurement data of offshore platform living building rooms

上平台空间大、结构复杂、设备繁多,有限元数值仿真会大幅增加仿真复杂性和工作量。

2.2 海上平台噪声联合仿真方法

为同时考虑海上平台的结构声和空气声的仿真计算,提出结合 SEA 和声线法 2 种方法的海上平台噪声联合仿真方法,其中,使用 SEA 计算平台结构声,使用声线法计算平台的空气声。考虑到海上平台的低频噪声对总声压级贡献较小,同时为降低仿真方法复杂性,海上平台噪声联合仿真方法暂时将以往用于低频计算的有限元法舍弃。联合计算方案如图 4 所示。

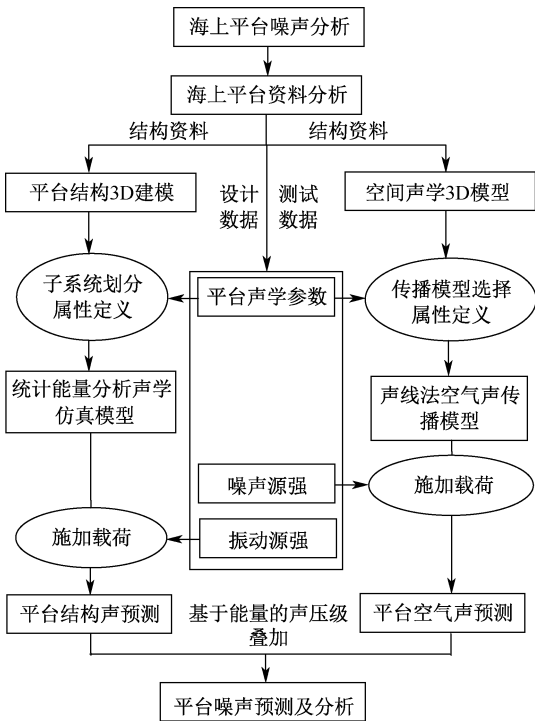


图 4 海上平台噪声联合计算方案
Fig. 4 Joint calculation scheme for noise of offshore platform

3 基于某海上平台的仿真模型建立

利用海上平台噪声联合仿真方法对某海上平台开展噪声仿真计算。该海上平台是一座 8 腿导管架中心平台,平台上层甲板东侧为燃气透平发电机及废热回收装置,西侧布置了 4 层的生活楼;平台中层甲板西侧是电气房间区,东侧布置制氮空压机、空气压缩机、低压压缩机、中压压缩机、高压压缩机等;平台下层甲板布置注水泵、原油外输泵、注水增压泵等。

3.1 结构声仿真模型

基于平台结构、舾装等图纸资料,结合现场实际情况,构建包含 3 层甲板和生活楼的 SEA 的结构声分析模型。

平台的梁柱结构在模型中采用梁子系统表示,包括各种尺寸的 H 型钢、圆形钢管;平台的甲板、墙体、地板等结构在模型采用板子系统表示,包括匀质板、夹层板、层压板以及加肋板。上述各种结构的属性参数均根据平台、生活楼图纸和舾装资料确定。

为计算结构声在甲板空间的分布,在平台结构模型的基础上增加声腔子系统建立平台结构声整体模型,如图 5 所示。整个模型包括 2 155 个梁结构、1 036 个板子系统、966 个声腔子系统,其中,梁、板均为钢结构,声腔为空气声腔。子系统损耗因子按参考文献[22]给出的数据设置。

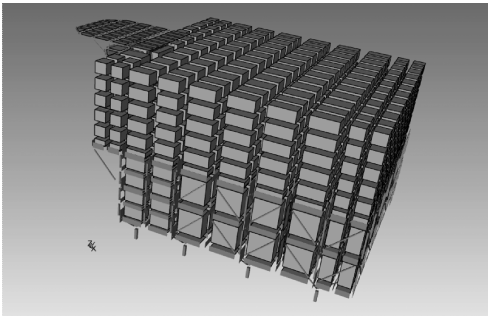


图 5 海上平台 SEA 整体模型
Fig. 5 SEA model of offshore platform

连接模型中的梁、板和声腔子系统,同时完成各种子系统连接的耦合损耗因子的计算^[23]。模型共形成 1 305 个点连接、1 879 个线连接、2 269 个面连接。

以实际测试主要振动设备的振动数据作为模型激励,赋值在设备所处甲板位置的板子系统上,振动设备及数据见表 1。

表 1 主要振动设备的振动数据

Table 1 Vibration data of main vibration equipment
dB

设备	透平发电机组 A	透平发电机组 C	高压压缩机	中压压缩机
加速度振级	119.4	116.1	135.8	134.9
设备	低压压缩机	制氮空压机	空压机	注水泵
加速度振级	146.4	115.7	123.2	129.7
设备	原油外输泵	注水增压泵	开排罐泵	热介质排放罐泵
加速度振级	126.3	137.1	136.8	122.3

3.2 空气声仿真模型

以平台的结构设计、设备布置图纸等资料为依据,结合现场调研所得数据和资料,建立声线法三维仿真模型。考虑到平台设备的实际结构较为复杂,在模型创建过程中做一定的简化处理,仅考虑对噪声传播影响明显的大体积设备、房间及障碍物,并将大体积系统性设备在模型中简化为立方体或圆柱体,如图 6 所示。模型中的噪声源强参数按照各层平台主要高噪声设备的声功率测试结果赋值,主要噪声设备的声功率数据见表 2。

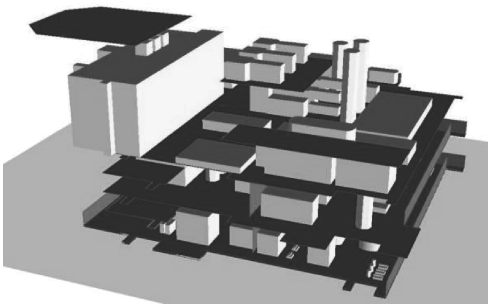


图 6 海上平台空气声整体模型

Fig. 6 Whole model of air sound for offshore platform

表 2 主要噪声设备的声功率数据

Table 2 Sound power data of main noise equipment
dB(A)

设备	注水泵	原油外输泵	高压压缩机	中压压缩机
声功率	110.3	110.1	118.5	118.6
设备	低压压缩机	制氮空压机	空压机	通风风机
声功率	119.1	110.2	111.3	110.8
设备	透平发电机组 A	透平发电机组 C	注水增压泵	—
声功率	125.7	127.0	106.6	—

4 海上平台噪声仿真结果分析

4.1 噪声联合仿真结果

通过 2 种噪声仿真模型分别计算海上平台上层、中层、下层甲板空间(高于甲板 1.5 m 处水平面)的结构声和空气声,结果如图 7、图 8 所示。

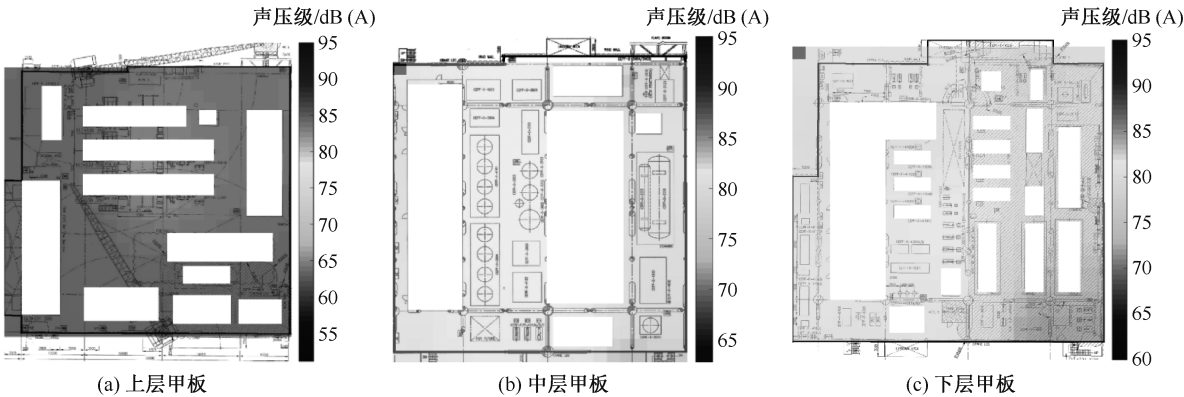


图 7 结构声仿真结果

Fig. 7 Simulation results of structural sound

由图 7、图 8 可知:结构声在各层甲板上的分布较为均匀,未出现局部小空间噪声变化剧烈的情况。这源于结构声主要由大面积甲板的振动辐射产生,

其在水平面上的分布和衰减较为缓慢。平台的结构声在不同层甲板之间差距明显,下层、中层结构声明显高于上层甲板,这是由于中下层甲板为半封闭空

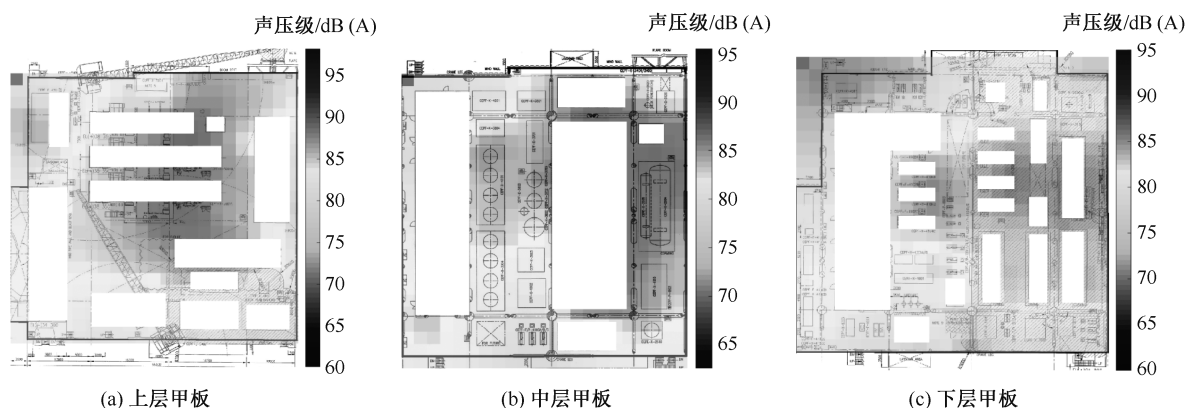


图 8 空气声仿真结果

Fig. 8 Simulation results of air sound

间,声能量不易扩散,能够辐射声的板结构面积远大于上层甲板。空气声的分布较为复杂,这是由于大尺寸设备、工作室、防火墙等障碍物的存在,空气声在甲板空间的传播受反射、绕射等物理现象影响明显,在高噪声设备附近幅值高,障碍物后幅值明显降低,体现了空气声传播的特征。

对比结构声和空气声结果可知:海上平台各层甲板大部分区域结构声相对较小,总体噪声结果中,整体上空气声声能量的贡献超过 50%,高于结构声贡献。基于声能量叠加原理,将结构声与空气声叠加后,得到海上平台各层甲板空间的最终声场分布结果,如图 9 所示。

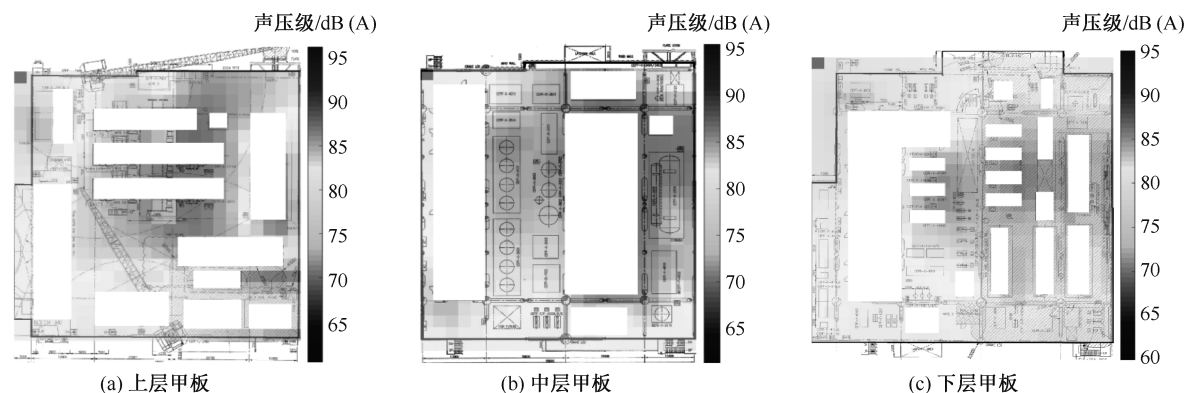


图 9 声场分布仿真结果

Fig. 9 Simulation results of sound field distribution

由图 9 可知:下层甲板高噪声区主要分布在注水泵、原油外输泵区域及其附近区域,而在平台边缘及生产区房间另一侧区域噪声值明显偏低;中层甲板由于高、中、低压压缩机等高噪声设备均处于防火墙一侧,该侧区域噪声值明显高于另一侧;上层甲板的透平发电机组附近区域噪声较高,由于生活楼自身的遮挡,生活楼朝向平台一侧窗外噪声明显高于背向平台一侧窗外噪声。

4.2 仿真结果验证

为验证联合仿真结果,采用空间网格化噪声测试方法测试海上平台各层甲板噪声。在距各层甲板 1.5 m 高度的水平面上,划分测试网格,网格尺寸约 2.5 m,在每个网格点采用手持式多功能声级计进行

声压级测试,并记录网格坐标及测试结果。基于网格坐标与声压级实测值,利用 Matlab 云图绘制程序绘制声场分布,如图 10 所示。

由图 9 与图 10 可知:平台各层甲板预测的噪声结果与测试结果基本相当,吻合性较好。进一步处理分析海上平台上、中、下层各点的预测和测试数据,计算得到各层甲板预测和测试结果的整体平均差异,见表 3,由表 3 可知:平均差异保持在 2 dB 之内,验证了仿真模型的精度可靠性。

对比上述仿真结果显示,单独的结构声仿真由于仅考虑振动激励产生的噪声,其结果与测试结果偏差较大,且难以体现声场分布细节;单独的空气声仿真仅考虑空气声传播,与测试结果较为接近,但由

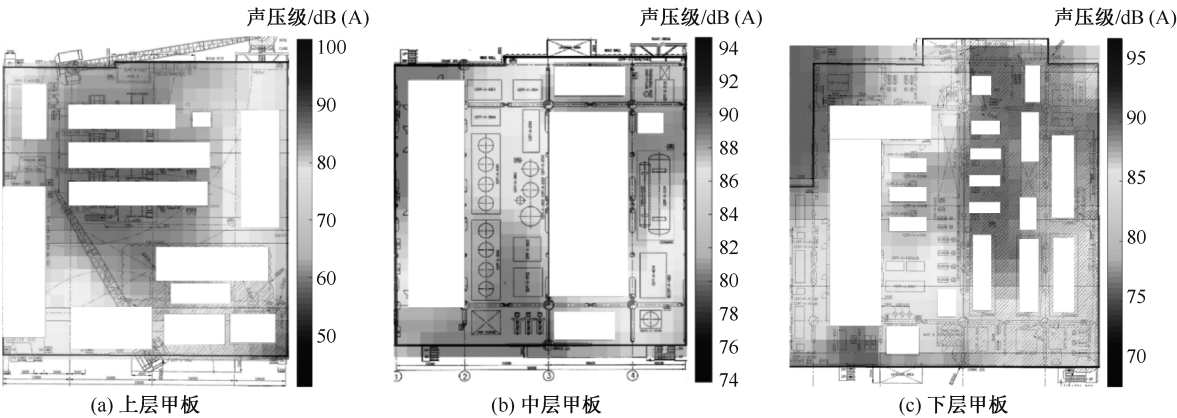


图 10 声场分布测试结果

Fig. 10 Measurement results of sound filed distribution

表 3 海上平台噪声预测与测试结果平均差异
Table 3 Average differences between noise results of prediction and measurement of offshore platform

海上平台	下层平台	中层平台	上层平台
差异/dB(A)	1.497	-1.903	-1.299
网格数据/对	120	131	107

于未考虑振动激励结构辐射的声能量,部分角落位置,如下层甲板左上角处等,由于遮挡严重噪声值过低;联合仿真结果将结构声与空气声叠加,既能详细描述声场分布情况,又不会造成声能量缺失,最为接近测试结果。

上述验证表明:基于统计能量法与声线法的联合仿真方法,能够实现海上平台甲板空间声场分布的高精度预测。该方法通过多物理场耦合机制解决了传统单一方法的局限性,为平台噪声源识别、巡检路径优化及低噪声设计等提供了可靠的技术支撑,推动了海洋工程领域噪声仿真技术的工程化应用进程。

4.3 基于空气声的海上平台声场分布分析

上述仿真验证结果表明:空气声是平台声场分布的主要贡献者,以空气声结果分析平台的声场分布。

1) 水平面云图。图 11 为平台上层甲板 1.5 m 高度水平面的空气声水平分布云图。

2) 立面云图。选取某一设备较多的切面进行声场分布分析,所取的切面位置如图 12 所示,其竖向切面空气声分布如图 13 所示。

由图 13 可知:高噪声区域主要分布在高噪声设备附近,且以噪声设备为中心顺着空间通道往外传播,但受到防火墙、大体积设备等障碍物的遮挡,防火墙、大体积设备等障碍物后面区域的声场幅值明显降

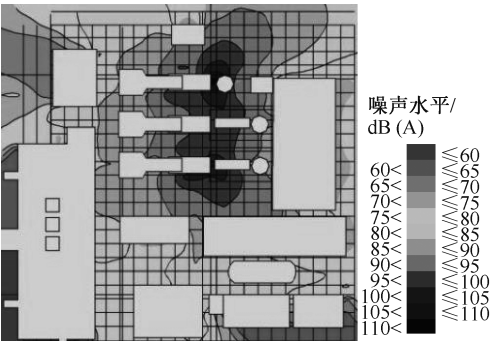


图 11 空气声分布云图

Fig. 11 Air sound cloud chart

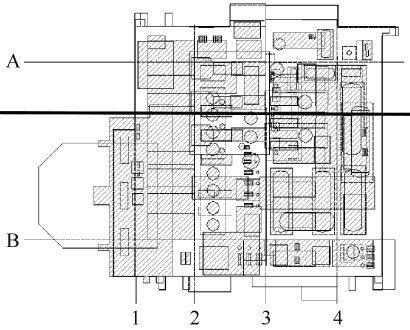


图 12 竖向切面位置

Fig. 12 Vertical section position

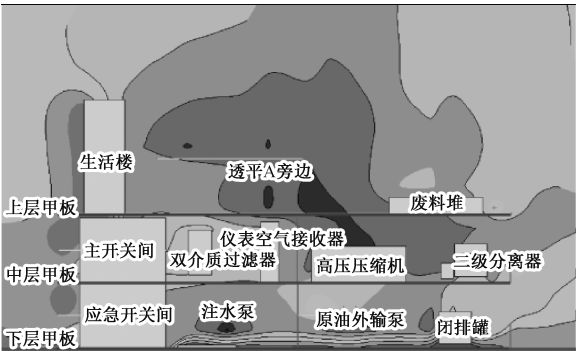


图 13 竖向切面空气声分布

Fig. 13 Air sound cloud chart of vertical section

低,如生活楼面向生产区一侧和背向生产区一侧的墙外噪声幅值差距达20 dB以上。此外,由于声波的绕射作用,障碍物不能完全遮挡噪声的传播,特别是上层甲板,噪声能够绕过生活楼等障碍物传播至背侧。

5 结 论

1) 针对海上平台噪声预测,提出海上平台噪声联合仿真方法。该方法通过引入声线法,构建空气声仿真模型,实现对甲板大空间噪声传播的精细化模拟;结合SEA完成了结构声仿真;并基于实测数据发现低频噪声对总声压级贡献较小,在工程误差允许范围内舍弃低频噪声仿真的有限元法,大幅简

化仿真流程。

2) 以某海上平台为研究对象构建联合仿真模型,以实测振动、噪声源为源强,仿真计算了海上平台各层甲板的声场分布,通过与平台噪声实测结果进行对比分析,结果显示两者吻合性较好,预测与测试点位数据的整体平均差异在2 dB之内,验证了该联合仿真方法的可靠性。

3) 仿真结果表明:整体上,海上平台各层甲板噪声总能量中,空气声的声能量贡献超过50%,高于结构声的声能量,空气声传播对甲板空间声场分布的影响更为显著;且大尺寸设备、生产区用房及防火墙等障碍物对噪声遮挡作用明显;该联合仿真方法更能精准体现甲板空间声场的实际分布特点。

参 考 文 献

- [1] 宁宇. 海上石油平台噪声危害现状调查[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2016, 34(8): 583-586.
Ning Yu. A survey of current status of noise hazard on offshore oil platforms[J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 2016, 34(8): 583-586.
- [2] 王磊, 张令硕, 王弛, 等. 海上平台作业工人职业健康监护的分析[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2019, 37(3): 236-240.
Wang Lei, Zhang Lingshuo, Wang Chi, et al. Analysis of occupational health surveillance for workers on offshore platforms[J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 2019, 37(3): 236-240.
- [3] 戚作秋, 王宏, 赵小兵, 等. 工业噪声对脑认知影响的功率谱估计分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(3): 178-183.
Qi Zuochu, Wang Hong, Zhao Xiaobing, et al. Evaluation and analysis on influence of industrial noise on brain cognition based on EEG power spectrum[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(3): 178-183.
- [4] 马晨波, 陆心怡, 宫景雯, 等. 海上平台含硫化氢气体泄漏事故后果分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 131-137.
Ma Chenbo, Lu Xinyi, Gong Jingwen, et al. Consequences analysis of H₂S-containing gas leakage on offshore platform[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 131-137.
- [5] Lee H H. Toochastic analysis for offshore platform with added mechanical dampers[J]. Ocean Engineering, 1997, 24(9): 817-834.
- [6] Fowler K, Gardner B, Burrill M, et al. Evaluation of noise in sensitive living quarters aboard floating offshore oil & gas facilities using the SEA method[C]. Euro Noise, 2015: 845-850.
- [7] Yi Tan, Yi Fang, Teng Zhou, et al. BIM-supported 4D acoustics simulation approach to mitigating noise impact on maintenance workers on offshore oil and gas platforms[J]. Automation in Construction, 2019, 100: 1-10.
- [8] 刁华东, 范玉宝, 何晓峰, 等. 某海上平台工作场所降噪工程案例分析[J]. 劳动保护, 2025(1): 84-86.
- [9] 张艳春, 惠宁, 沈志恒. 海洋平台上噪声分析方法[J]. 噪声与振动控制, 2012, 2(4): 171-174.
Zhang Yanchun, Hui Ning, Shen Zhiheng. Methods of noise analysis for offshore platforms[J]. Noise and Vibration Control, 2012, 2(4): 171-174.
- [10] GB/T 39479—2020 海洋平台辐射噪声预报方法[S].
GB/T 39479-2020 Prediction method for radiated noise offshore platform[S].
- [11] Q/HS 3108—2020 海上固定平台噪声分析指南[S].
Q/HS 3108-2020 Guidelines for noise analysis of offshore fixed platforms[S].
- [12] 吴彬, 谢晓忠, 陈林, 等. 基于SEA的海洋平台典型舱室噪声预报及设备优化布置研究[J]. 船舶, 2014(1):

44-48.

Wu Bin, Xie Xiaozhong, Chen Lin, et al. On noise prediction and equipment layout optimization of typical cabin for offshore platforms by SEA[J]. Ship & Boat, 2014(1): 44-48.

- [13] 尤小健, 刘依明, 董斌, 等. 基于统计能量法的海洋平台舱室噪声预报及控制[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(5): 26-30.
- You Xiaojian, Liu Yiming, Dong Bin, et al. Prediction and control of cabin's noise of offshore platform based on statistical energy analysis[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(5): 26-30.
- [14] 陈铁云. 中国船舶结构力学 50 年及其展望[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(11): 148-150.
- Chen Tieyun. Advances on ship structural mechanics in recent fifty years in China[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998, 32(11): 148-150.
- [15] 李峰, 徐芹亮, 滕瑶, 等. 统计能量法在船舶噪声与振动控制中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(6): 152-155.
- Li Feng, Xu Qinliang, Teng Yao, et al. Application of statistical energy analysis method in ship noise and vibration Control[J]. Noise and Vibration Control, 2011, 31(6): 152-155.
- [16] 孙耀刚, 曹海鹏, 夏侯命胜. GB/T39479—2020《海洋平台辐射噪声预报方法》国家标准解读[J]. 船舶标准化与质量, 2021(3): 33-37, 7.
- Sun Yaogang, Cao Haipeng, Xiahou Mingsheng. Interpretation of GB/T 39479-2020[J]. Shipbuilding Standardization & Quality, 2021, 294(3): 33-37, 7.
- [17] 魏浩征, 陈鑫, 张祖安, 等. 基于几何声线法的噪声预测软件[J]. 环境保护科学, 2020, 46(1): 119-122.
- Wei Haozheng, Chen Xin, Zhang Zu'an, et al. The software for noise prediction based on geometric acoustics[J]. Environmental Protection Science, 2020, 46(1): 119-122.
- [18] Krokstad A, Strom S, Sorsdal S. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique[J]. Journal of Sound and Vibration, 1968, 8(1): 118-125.
- [19] 王金柱, 甘进, 朱玥, 等. 基于声线法的邮轮开敞区域辐射噪声特性分析[J]. 船舶工程, 2023, 45(2): 54-60.
- Wang Jinzhu, Gan Jin, Zhu Yue, et al. Analysis on radiated noise characteristics in open area of cruise ship based on sound line method[J]. Ship Engineering, 2023, 45(2): 54-60.
- [20] Yoo J, Kim M J, Choi T M, et al. Development of web-based software for environmental impact assessment focusing on road traffic noise[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 360: DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.120926.
- [21] ISO 9613-2:1966 Acoustics-attenuation of sound during propagation outdoors: part 2: general method of calculation[S].
- [22] 中国船级社(CCS). 船舶及产品噪声控制与检测指南[Z], 2013-10-29.
- [23] Wang Haiying, Zhao Deyou. Coupling loss factor analysis of two L-shaped sandwich plates with thick viscoelastic core[J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(6): 978-989.



作者简介: 张悦 (1986—), 女, 河南新乡人, 博士, 高级工程师, 主要从事噪声与振动控制、职业病防护设施设计、定量风险评估等方面的工作。E-mail: zhangyue032@163.com。