

变电站吸隔声屏体的研制及工程实践

梁丽萍¹, 张林^{2,*}

1. 绍兴文理学院生命科学学院, 绍兴 312000

2. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 南京 210000

摘要 低频噪声污染是输变电工程建设重点关注的环境问题。基于对南通地区变电站噪声样本的频谱特性分析, 研发了对低频噪声具有良好吸隔声性能的复合声屏障屏体, 并应用于 110 kV 变电站噪声治理工程实践。声学仿真和验收监测结果表明, 声屏障降噪效果明显, 周围敏感建筑的声环境质量可满足相关环保标准要求。

关键词 变电站; 低频噪声; 声屏障; 声学仿真

中图分类号 X84 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2017)09-5326-07 DOI 10.12030/j.cjee.201610021

Research and application of sound absorption-insulation barriers in transformer substation

LIANG Liping¹, ZHANG Lin^{2,*}

1. College of Life Science, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China

2. Jiangsu Provincial Communication Planning and Design Institute Co. Ltd., Nanjing 210000, China

Abstract Low-frequency noise pollution is a focus environmental issue of power transmission and transformation project. Based on analysing the spectrum characteristics of transformer substation noise in Nantong area, composite sound barriers which have good performance in sound absorption and insulation were produced and also found application in noise control engineering of 110 kV substation. The result of acoustic simulation and acceptance check monitoring suggested that sound barriers had obvious effect on noise reduction. Acoustic environmental quality of surrounding sensitive buildings could meet the requirements of relevant environmental standards.

Key words transformer substation; low-frequency noise; sound barriers; acoustic simulation

变电站低频噪声传播衰减缓慢, 且能轻易穿越障碍物, 会对人体生理及心理健康产生不易察觉的潜在危害^[1-3]。随着国家城镇化进程加快和现代工业发展, 城市电网负荷持续攀升, 新建、扩建变电站数量不断增加, 噪声扰民投诉事件时有发生。变电站噪声污染已成为社会公众关注的热点环保问题, 同时也是国家电力行业建设亟待解决的环境矛盾^[4-7]。笔者根据对江苏省南通地区变电站噪声污染现状的调查监测, 研发生产了低频吸隔声复合屏体, 并将其应用于文峰 110 kV 变电站噪声治理工程; 通过第三方检测、计算机仿真、验收监测等手段, 测实验证了复合屏体的声学性能, 以期为解决变电站噪声污染控制难题提供技术支持。

1 变电站噪声采样监测及特性分析

1.1 调研监测范围

结合对南通地区电网建设布局的分析, 选取金沙、平桥、秦灶和文峰等 4 处 110 kV 变电站为调研监测对象。此 4 处变电站均已完成竣工验收, 且坐落于人口集中、楼房林立的城市区域; 工程规模、站区布置方案、装机容量具有一定代表性, 可以较好地反映南通地区变电站的噪声污染水平。

基金项目: 绍兴文理学院科研启动项目(20145033); 浙江省自然科学基金青年基金资助项目(LQ15E080003)

收稿日期: 2016-10-08; **录用日期:** 2016-12-08

第一作者: 梁丽萍(1984—), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 交通环保设计及水污染控制。E-mail: liangliping0702@163.com

* 通信作者, E-mail: 342156131@qq.com

1.2 监测内容及方法

变电站站区主要噪声源包括主变压器、电抗器、控制室、输电线路等,实际空间声场分布为多声源共同叠加作用的结果^[8]。由于电抗器等次要声源源强远低于主变压器,可近似认为主变压器为变电站内的唯一噪声源。

根据变电站噪声监测技术规范,分别在主变压器冷却风机开启和关闭时,测定其A计权表面声压级和倍频程频谱;同时结合变电站布局布置噪声衰减监测断面。所有监测数据根据背景噪声进行修正。

1.3 监测结果及数据分析

1.3.1 噪声源强及频谱特性

监测结果表明,冷却风机工作状态对主变压器源强和频谱分布有一定影响。当风机开启和关闭时,A计权表面声压级分别在72.3~73.7 dB和70.7~72.1 dB范围内,对应声功率级分别在94.6~96.7 dB和93.0~94.9 dB范围内。在声环境影响预测和降噪工程设计中,均需考虑最大强度的噪声污染负荷,即认为冷却风机处于24 h工作状态。

根据倍频带声压级监测数据绘制噪声频谱曲线。由图1可知风机关闭时,变压器噪声仅在600 Hz内有明显分布,波峰一般出现在100 Hz;风机开启后,机械噪声对低频声的贡献值较小,中高倍频带声压级明显上升,频谱波峰未发生明显偏移。

工程中通常用等效频率评估噪声能量集中范围,并据此作为声学设计的重要参数。根据各倍频带声压级数据计算相应噪声频谱的等效频率,可知当风机开启后,主变压器噪声等效频率由210~250 Hz上升至350~420 Hz。

1.3.2 衰减规律

主变压器可视作为具有固定形状和几何尺寸的面声源。根据衰减断面监测结果和面声源几何发散衰减规律,分别绘制其噪声实际衰减曲线和理论衰减曲线。由图2可知,尽管主变压器噪声源强较低,但声波沿传播距离方向的衰减梯度远低于理论曲线,这是低频噪声传播距离远、影响范围广的重要原因^[9]。

2 低频吸隔声屏体的研发设计

2.1 研发设计目标

声波传播过程中接触到不同质地、外型及内部构造的声屏障屏体,会产生相应的反射、透射和衍射效应,从而引起周围声场发生变化。结合变电站噪声特性分析和电力辅助设施的安全设计需要,本次研发新型声屏障需满足以下性能指标:

- 1) 声屏障可阻断声波在声源、敏感建筑物之间的传播路径,同时减弱声波在刚性界面间多次反射产生的混响效应,故考虑同时设置隔声屏体和吸声屏体;
- 2) 声屏障对500 Hz以下的中低频噪声具有良好吸隔声性能;
- 3) 声屏障力学、抗老化、防火等性能满足相关技术规范的要求。

2.2 吸声屏体的研发设计

2.2.1 设计原理和总体布置

根据亥姆霍兹共振器原理和尖劈吸声原理^[10],对屏体外型和内部构造进行专业声学设计,形成穿孔板共振吸声结构和尖劈吸声结构(如图3所示),可实现以下声学效应:

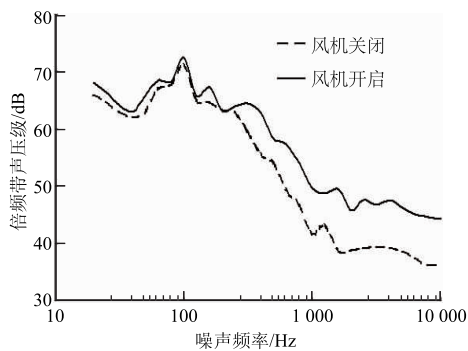


图1 主变压器噪声频谱曲线

Fig. 1 Noise frequency spectrum of main transformer

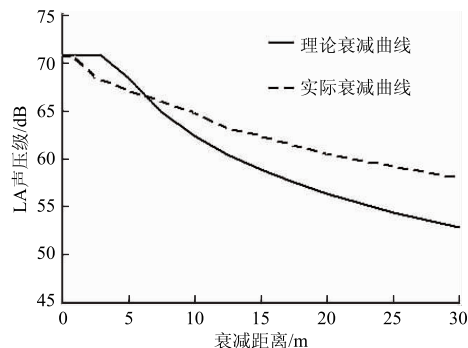


图2 主变压器噪声距离衰减曲线

Fig. 2 Noise attenuation curve of main transformer

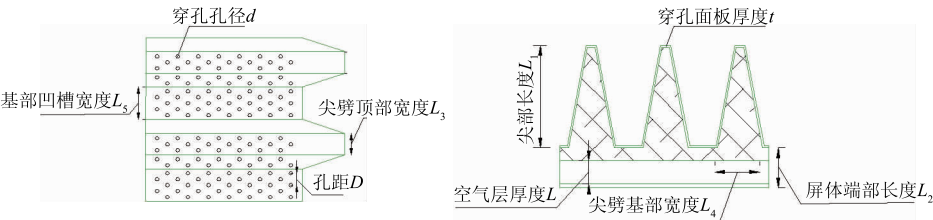


图 3 吸声屏体的工艺设计

Fig. 3 Technology design of sound absorption barrier

1) 当入射声波频率接近屏体的共振频率时,穿孔板颈内空气激烈振动摩擦形成吸收峰,可使声能显著衰减;

2) 当声波从尖劈端部入射,接触介质逐渐由空气变为多孔介质材料,通过阻抗匹配使入射声能被高效吸收。

2.2.2 屏体材料选择

吸声屏体外壳一般为镀锌钢板、铝合金板和玻璃钢材质。考虑到铝合金板抗锈蚀能力较强,故采用穿孔铝合金板作为面板材料;镀锌钢板强度高,且不易变形,采用为背板材料。

离心玻璃棉具有体积密度小、热导率低、不易燃等优点,填装后可保持原物理性能,且对中低频噪声具有良好吸声性能,故采用体积密度为 $32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的离心玻璃棉为内置吸声材料。

2.2.3 工艺参数计算

对于穿孔板共振吸声结构,吸声系数同入射声波频率有关,最高吸声系数出现在共振频率处。穿孔板共振频率 f_0 可由式(1)计算:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(t + 0.8d)L}} \tag{1}$$

式中: c 为声波在空气中的传播速度。

对于尖劈吸声结构,其吸声性能通常以垂直入射吸声系数 0.99 以上的频率下限,即截止频率 $f_1^{[1]}$ 来表示,可由式(2)计算:

$$f_1 = 0.2c/L_1 \tag{2}$$

由于变电站噪声在 500 Hz 频率以下具有明显分布,且等效频率出现在 350 ~ 420 Hz 范围内。对屏体各构件尺寸进行优化组合,使其共振频率和截止频率均处在变电站低频噪声的特征频段,设定目标函数如下:

$$350 \leq f_0 \leq 420 \tag{3}$$

$$f_1 \leq 300 \tag{4}$$

同时为满足式(1)、(2)的适用范围,面板穿孔率 P 、孔间距 D 、尖劈尖部与基部长度的比例 (L_1/L_2)、板后空气层厚度 L 等构件参数需满足以下约束条件:

$$P < 15\% \tag{5}$$

$$D \geq 2d \tag{6}$$

$$L_1 : L_2 \approx 11 : 4 \tag{7}$$

$$L \leq 0.2 \text{ m} \tag{8}$$

对式(1) ~ 式(8)联列求解,确定吸声屏体设计方案,具体如表 1 所示。

2.3 隔声屏体的研发设计

2.3.1 设计原理和总体布置

对于单层均质薄板,仅通过增大板材厚度难以取得良好隔声效果。若在 2 块刚性板间填充弹性发泡材料,形成“质量—弹簧—质量”的双层夹芯结构,可使声波在弹性材料和刚性板界面发生多次反射增大声能损耗,隔声性能可大幅提升。隔声屏体总体布置如图 4 所示。其中: L 为 2 板间的弹性材料厚度, t_1 、 t_2 分别为单层刚性板厚度。

2.3.2 屏体材料选择

对于一定面密度的均匀隔声板,隔声量随入射声波频率增加而提升。故若要对低频噪声实现良好隔声效果,需尽可能选用质量密度大的刚性板材。采用 Q235 彩钢板为隔声屏体面板和背板材料。

隔声板间的弹性填充材料可吸收声波能量,选材范围较广泛。挤塑聚苯乙烯泡沫板具有高抗压、轻质、抗潮耐磨等优良特性,且无有害物质挥发,采用为隔声屏体夹芯材料。

2.3.3 工艺参数计算

对于双层刚性板和弹性材料组成的共振系统,当外界声波频率与其共振频率接近时,声波极易穿透屏体,隔声性能大幅下降,其共振频率可依据式(9)计算:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}\right) \frac{\rho c^2}{d}} \tag{9}$$

式中: M_1 、 M_2 分别为隔声板面密度; d 为弹性填充材料厚度。

为避免隔声屏体在低频波段出现隔声低谷,共振频率出现在中高频段:

$$f_0 \geq 1\,000\text{ Hz} \tag{10}$$

同时,隔声屏体对低频噪声的隔声量需满足设计规范要求:

$$R = 16\lg[(M_1 + M_2)f] - 30 + \Delta R \geq 20\text{ dB} \tag{11}$$

式中: f 为 31.5 ~ 500 Hz 各倍频程的中心频率; ΔR 为填充材料附加隔声量。

对式(9) ~ 式(11)联立求解,确定双层 Q235 彩钢板的设计厚度为 1.5 mm,挤塑聚苯乙烯泡沫板的设计厚度为 100 mm。

2.4 屏体声学性能测试

项目组委托中国科学院声学计量测试站,对上述屏体样品的吸隔声性能进行声学测试。测试结果表明,吸声屏体对 125 ~ 4 000 Hz 范围内 6 个倍频带中心频率的平均吸声系数为 0.98,对 100 ~ 500 Hz 范围内 8 个 1/3 倍频程中心频率的平均吸声系数可达 0.88;隔声屏体计权隔声量为 52.01 dB(100 ~ 4 000 Hz),对中低频段噪声的平均隔声量为 39.27 dB(100 ~ 500 Hz)。研发屏体对变电站低频噪声具有良好的降噪效果,具有一定推广应用前景。

3 声屏障工程设计及施工

以文峰 110 kV 变电站噪声治理工程为研究案例,根据声学设计原理对吸隔声屏体高度、组合方式、设计规模等进行考察优化,将研发屏体应用于工程实践,具体阐明变电站噪声治理的工作思路。

3.1 项目背景

文峰 110 kV 变电站位于南通市崇川区平安路东侧,占地面积约 3 000 m²。变电站周围建有 2.5 m 高围墙,站区主要建筑物及设施包括:主控制楼、办公楼、110 kV 配电装置、主变压器、高压线支架及进出线路等。

变电站周边环境敏感目标主要为和兴花苑和宏丰苑 2 处居民小区,站区布置及敏感点分布情况如图 5 所示。据现场测量,和兴花苑及宏丰苑首排房屋距变电站围墙垂直距离均不足 10 m。

3.2 声环境质量现状分析

3.2.1 声环境质量要求

根据《南通市“十二五”环境保护规划》的相关规定,文峰变电站所在区域为 2 类声环境功能区,执行

表 1 吸声屏体工艺设计参数
Table 1 Design parameters of sound absorption barrier

参数	数值	参数	数值
面板穿孔率 $P/\%$	3	面板孔径 d/mm	8
面板厚度 t/mm	3	空气腔厚度 L/mm	40
尖劈尖部长度 L_1/mm	250	尖劈端部长度 L_2/mm	60
尖劈顶部宽度 L_3/mm	40	尖劈基部宽度 L_4/mm	60
基部凹槽宽度 L_5/mm	30		

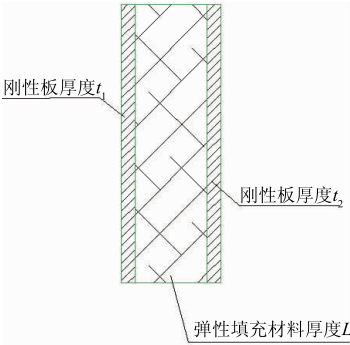


图 4 隔声屏体的工艺设计

Fig. 4 Technology design of sound insulation barrier

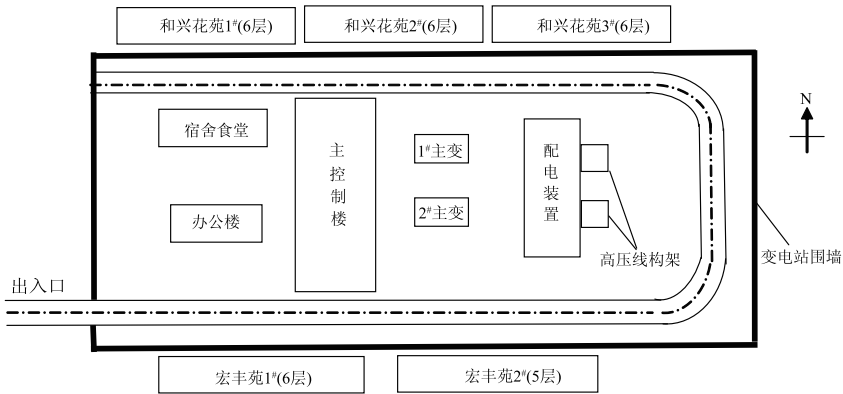


图 5 站区布置及周围敏感建筑分布图

Fig. 5 Station layout and distribution of surrounding sensitive buildings

《声环境质量标准》二类标准的噪声限值标准,即昼间 60 dB,夜间 50 dB。

3.2.2 噪声影响预测分析

站区主要噪声源为 1#、2# 主变压器,根据图 5 中敏感建筑物分布情况,认为和兴花苑 2# 楼受噪声影响程度最大,确定其为噪声预测、声屏障插入损失分析的代表计算点。结果如图 6 所示。

根据文峰变电站噪声源强监测结果和距离衰减曲线,分别计算 1#、2# 主变压器对兴花苑 2# 楼各楼层的噪声贡献值,并在受声点处叠加,结果如表 2 所示。

根据预测结果,和兴花苑 2# 楼昼间声环境质量基本达标;夜间噪声超标较为严重,确定本次声屏障设计降噪目标为 10.0 dB。

3.3 声屏障声学设计

3.3.1 总体设计方案

文峰变电站站区主变压器、配电装置、高压输送线等噪声源分布相对集中,均位于主控制楼东侧。在站区南、北沿道路内侧布置声屏障,与主控制楼墙体围成相对独立的封闭空间,可有效控制噪声对敏感目标的辐射影响。

3.3.2 声屏障外型选择

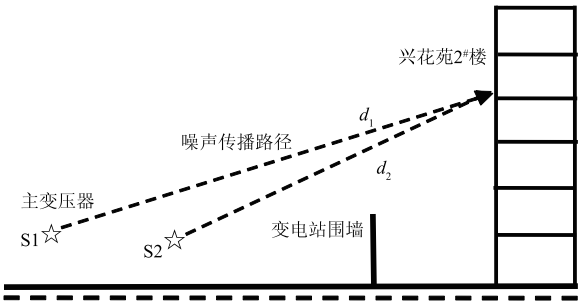
考虑到变电站周边敏感建筑为多层居民住宅,为切断直达声传播路径,需尽可能提高屏体垂直高度。采用顶部弧形的外型方案,相当于增加声屏障当量高度,可在一定程度上提高屏体绕射声衰减量。

3.3.3 屏体组合方式

文峰变电站站区地面已完全硬化,且布局较为紧凑,声波可在建筑物、地面、声屏障之间多次反射形成混响声场。为控制反射声造成的混响效应,在声屏障顶端、底端设置吸声屏体,可吸收入射声能并减弱反射声波强度;同时中部设置隔声屏体,可降低声源对敏感目标的直达声影响。

3.3.4 声学计算

声屏障插入损失计算示意图如图 7 所示,声屏障插入损失 ΔL 主要取决于绕射声衰减 ΔL_d 、透射声修



注:声源距地面高度取 1.5 m。

图 6 噪声预测计算示意图

Fig. 6 Sketch for noise prediction calculation

表 2 噪声预测计算结果

Table 2 Results of noise prediction calculation dB

预测楼层	计算数据			
	S1 贡献值	S2 贡献值	叠加值	超标值
2 层	55.0	57.4	59.4	9.4
3 层	54.9	57.2	59.2	9.2
4 层	54.9	56.9	59.0	9.0
5 层	54.9	56.5	58.8	8.8
6 层	54.8	56.1	58.2	8.5

注:考虑到围墙可阻断直达声的传播路径,故未定量计算主变压器对一层住宅的噪声贡献值。

正量 ΔL_i , 反射声修正量 ΔL_r 和地面吸收声衰减 ΔL_G (HJ/T 90-2004), 即:

$$\Delta L = \Delta L_d - \Delta L_i - \Delta L_r - \Delta L_G \quad (12)$$

式中: ΔL_d 取决于噪声源、声屏障和受声点的相对位置, 可通过改变声程差进行调整; ΔL_i 取决于屏体的吸隔声性能, 当传声损失与绕射声衰减的差值 > 10 dB 时, 可忽略不计。根据声学性能测试结果, 不考虑透射声修正量对插入损失的影响。

声屏障顶端、底端均已设置吸声屏体, 且南、北两侧屏体与对侧居民楼的距离均达 50 m 以上, 故亦不考虑反射声修正量对插入损失的影响。

由于站区厂界内无疏松土质地面, 故忽略地面吸收声衰减的影响。

基于上述分析, 本项目声屏障插入损失主要取决于 ΔL_d , 可由式 (13) 求得:

$$\Delta L_d = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^k 10^{0.1(L_i + A_i)} \right] - 10 \lg \left[\sum_{i=1}^k 10^{0.1(L_i + A_i - \Delta L_i)} \right] \quad (13)$$

式中: L_i 为各倍频带中心频率声压级; A_i 为各频带 A 计权声级修正值; ΔL_i 为相应频带的声压级插入损失。

根据上述计算方法, 确定声屏障设计方案如下: 南北两侧屏体长度均为 40.3 m, 采用直弧型屏体型式, 当量高度为 4.4 m。其中顶部、端部为吸声屏体, 高度分别为 1.4 m 和 2.0 m; 中部为隔声屏体, 高度为 1.0 m。

4 声屏障降噪仿真分析及验收监测

项目组关于变电站声屏障插入损失的影响分析, 是在一定条件下简化某些次要因素进行的。为检验声学计算结果, 通过空间声场仿真和验收监测对声屏障实际降噪效果进行验证。

4.1 基于 Cadna/A 的变电站声场分布的仿真分析

利用 Cadna/A 声学仿真软件, 构建三维声场仿真模型, 模拟变电站及周围空间声压级的连续分布情况, 可直观形象地展示声屏障对空间声场变化的作用程度^[12-13]。

4.1.1 声源模型设定

建立三维空间坐标系, 根据各声源设备的外型设定模型几何尺寸和三维坐标; 输入 1[#]、2[#] 主变压器倍频程声压级监测数据, 次要噪声源强参照同类设备监测数据。

4.1.2 站区建筑物设定

根据站区围墙、主控制楼等建筑物的相对位置设定其三维坐标, 各刚性界面反射声损失取值 1.0 dB。

4.1.3 敏感目标设定

参照上述步骤, 在模拟声场中添加合兴花苑及宏丰苑等敏感目标建筑。

4.1.4 声屏障设定

参照声屏障外观样式、屏体组合方式及工程实施规模, 在模拟声场的对应位置增加声屏障模型^[14-15]。根据屏体声学性能测试数据, 对应设置吸隔声屏体在各倍频带中心频率的吸声系数和隔声量。

4.1.5 3D 视图检查

利用 3D 视图对构建模型检查, 并确认各建筑物、声源、声屏障设置参数准确无误, 仿真模型视图检查如图 8 所示。

4.1.6 声场仿真分析

计算声屏障设置前后, 变电站站区及周边环境的声场分布情况, 如图 9 所示。根据仿真结果对比, 声

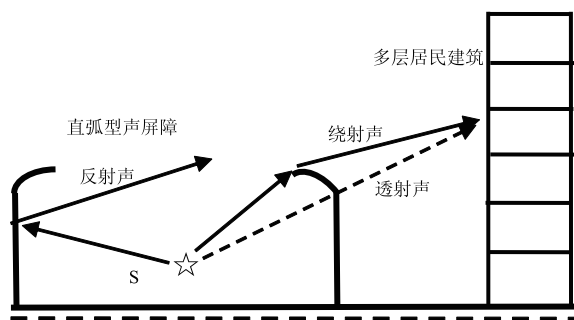


图7 声屏障插入损失计算示意图

Fig. 7 Sketch for insertion loss calculation of noise barrier

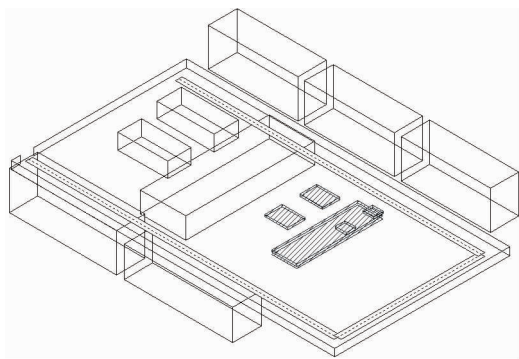
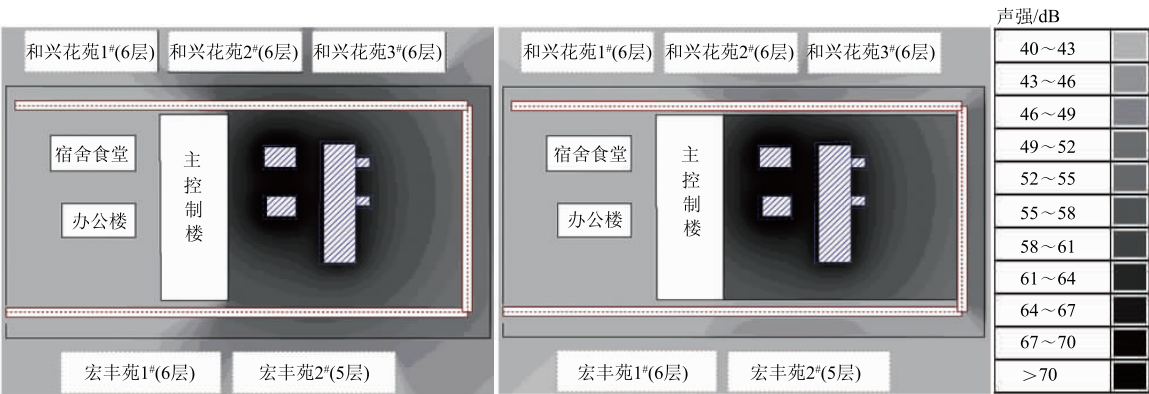


图8 仿真模型视图检查

Fig. 8 Review of simulation model

屏障对近地面噪声的污染控制非常有效,辐射声能可基本限制在声屏障与主控制楼围成的半封闭空间内,南、北厂界噪声均小于 52.0 dB,合兴花苑、宏丰苑 2 处敏感点声压级均可满足《声环境质量标准》二类标准的限值要求。



注:计算平面高度取 4.2 m。

图 9 声屏障建设前后的声场分布对比

Fig.9 Comparison of acoustic field distribution before and after the construction of sound barrier

4.2 声屏障降噪效果验收监测

声屏障工程于 2012 年 9 月建成并投入使用,项目组在声屏障建设前后,分别对和兴花苑 2#居民楼的声环境质量进行监测,结果如表 3 所示。验收监测结果进一步验证了实施工程对变电站低频噪声的防治效果。

表 3 声屏障工程监测验收

Table 3 Acceptance check monitoring of sound barrier

监测点位	声屏障实施前		声屏障实施后	
	dB		dB	
	监测值	超标值	监测值	超标值
1 层住宅	58.5	8.5	48.7	0
4 层住宅	57.3	7.3	49.2	0

5 结论

变电站噪声组成复杂,更兼声场环境中影响声波传播发散的因素众多,故噪声治理工作切不可生搬硬套。工作前期需对项目现场及周边敏感目标进行详细现场踏勘,合理确定降噪方案。本项目按照污染特性分析、产品研发、工程方案设计、防治效果检验的工作流程,将声学设计原理同工程实践有机结合,有效解决了文峰 110 kV 变电站的噪声控制问题,可为今后输变电工程的电磁噪声污染治理提供参考借鉴思路。

参考文献

[1] 周建飞,周年光,阳金纯,等. 城区变电站噪声控制典型技术[J]. 噪声与振动控制, 2011,31(5):173-177

[2] 李兴,城区变电站噪声治理实践[J]. 天津电力技术, 2010(1):12-13

[3] 郑玥. 变电站噪声人体主观感受及其声调控方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012

[4] 谭闻,张小武. 电力变压器噪声研究与控制[J]. 高压电器, 2009, 15(2): 70-72

[5] 陈秋,李振海. 变电站噪声防治方案研究[J]. 电力环境保护, 2006, 22(3): 49-51

[6] 秦建新. 建设环保型变电站是城市电网发展的必然趋势[J]. 华北电力技术,2005, 1(7): 36-39

[7] 徐禄文,刘小玲. 变电站环境噪声三维空间衰减模型及算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 175-180

[8] 冯森,郭力强,宋跃平. 变电站站界噪声衰减分析[J]. 山西电力, 2012(2): 26-27

[9] 吴高强,程胜高,黄磊,等. 户外 220 kV 变电站噪声环境影响预测研究[J]. 噪声与振动控制, 2007, 27(3):135-137

[10] 马大猷. 噪声与振动控制手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2002

[11] 徐磊,陈兵奎,吴长鸿,等. 齿轮传动振动噪声试验系统研制[J]. 机械传动, 2011, 35(4):57-60

[12] 李雪亮,徐振,周英,等. 1 000 kV 特高压变电站声环境影响仿真研究[J]. 环境工程技术学报, 2012,2(3):264-270

[13] 吕瑞芳,任冬梅,陈汶滨. 变电站噪声仿真漫游系统的设计与实现[J]. 软件导刊, 2012,11(2): 142-144

[14] 李宁,田冬梅,单大鹏,等. 城市变电站噪声分析及降噪措施探讨[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 139-144

[15] 汪远东,徐禄文,沈加曙. 变电站环境噪声预测研究[J]. 环境工程, 2012, 30(S1):179-181