

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.07.023

厂界地形对变电站内声屏障降噪效果影响研究

李慧奇, 王佳辉

(华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071000)

摘要: 探究不同厂界地形对变电站内声屏障降噪效果的影响,可以为变电站内声屏障的布置提供依据,也可作为新建变电站的选址提供参考。以江苏某500 kV变电站为例,使用AWA6228声级计对站内两台变压器以及高抗的噪声声功率进行测量,构建变压器多点等效源模型对变电站噪声分布进行预测,通过对比预测与实测数据验证了所构建模型的准确性。使用该模型探究不同地形条件下声屏障位置和高度对其隔声量的影响,通过研究惠更斯—菲涅尔的波动理论发现上坡地形时声屏障降噪效果最差,且坡度越陡声屏障对噪声的阻隔作用越弱;下坡地形时声屏障降噪效果最好,坡度越陡声屏障对噪声的阻隔作用越强。文中结论可为厂界地形优化和新建变电站选址提供参考。

关键词: 变电站; 厂界地形; 声屏障; 降噪

Study on the Influence of Plant Boundary Topography on the Noise Reduction Effect of Sound Barrier in Substations

LI Huiqi, WANG Jiahui

(Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission and Transformation Equipment Safety Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071000, China)

Abstract: Exploring the influence of different plant boundary topographies on the noise reduction effect of sound barriers in substations can provide a basis for the layout of sound barriers within substations, as well as a reference for site selection of newly built substations. A 500 kV substation in Jiangsu Province is taken as an example, type AWA6228 sound level meter is used to measure the sound power levels of two transformers and a high reactor inside the substation. A multi-point equivalent source model of the transformers is constructed to predict the noise distribution in the substation. The accuracy of the developed model is verified by comparing the predicted results with the measured data. This model is used to explore the influence of sound barrier position and height on its sound insulation performance under different terrain conditions. It is found through the Huygens Fresnel wave theory that the noise reduction effect of sound barrier is the worst on uphill terrain, and the steeper the slope, the weaker the noise barrier's ability to block noise. In downhill terrain, the noise reduction effect is the best, and the steeper the slope, the stronger the sound barrier's ability to block noise. The conclusions in this paper can provide a reference for plant boundary topography optimization site selection for new substations.

Key words: substation; plant boundary topography; sound barrier; noise reduction

0 引言

随着社会经济的不断发展,用电负荷日益增加,扩建和新建变电站数量持续增加^[1-3]。变电站选

址越来越接近居民区,变电站运行时所产生的环境噪声日益显现。近年来国家环境治理力度不断加大,人们环境保护意识不断增强,变电站环境噪声污染这一问题备受关注^[4-6]。因此探究影响变电站

收稿日期:2025-12-12; 修回日期:2026-02-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577066)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51577066).

噪声传播的各种因素并制定合理有效的降噪措施具有重要的现实意义。

目前变电站噪声污染的治理方式一般是先测量其噪声分布情况,建立仿真预测模型,然后通过仿真预测分析变电站噪声变化规律,提出相应的噪声控制方案^[7-12]。文[13]提出在源强处降低 100 Hz 频率成分是解决站界噪声污染的关键。文[14]基于变压器多点等效源建模思想,建立了变压器表面多点等效模型。文[15]提出利用地形条件进行降噪。文[16]采用有源降噪分析方法,证明了有源降噪的可行性。文[17]提出了一种基于有限元仿真和深度强化学习的户外变电站进风口设计参数优化方法。

安装声屏障是目前常用的一项降噪措施^[18-22]。文[23]通过采用在主变高压侧和低压侧设置声屏障以及在防火墙内侧敷设吸声体的方案成功解决了某变电站噪声污染问题。文[24]研究了声屏障结构尺寸及安装位置对隔声效果的影响。但当变电站厂界周围有复杂地理环境时,为了获取最佳的隔声降噪效果,必须考虑地形因素对声屏障的影响。文中分析了厂界地形因素对声屏障降噪效果及声屏障安装位置的影响,为变电站内声屏障设置以及变电站选址及厂界地形结构优化提供了理论依据。

1 声屏障隔声原理

户外声传播衰减包括几何发散、大气吸收、屏障屏蔽、地面效应以及其他方面引起的衰减(一般忽略不计),在变电站噪声衰减中,受环境影响最大的是屏障屏蔽所引起的衰减^[25]。

惠更斯-菲涅尔的波动理论是声屏障降噪的理论基础^[26],如果在声源与接收点的传播路径中存在声屏障,当声波在其传播过程中遇到声屏障时,会发生反射、透射、绕射现象。声波绕射引起的差值损失是屏障隔声损失的主要因素,随着传播路径变长,噪声也会随之降低。声屏障的差值损失由式(1)计算可得

$$A_{\text{bar}} = -10 \lg[1/(3 + 20N)] \quad (1)$$

式(1)中, N 为3个传播方向上的菲涅尔数,且 $N = 2\delta/\lambda$,其中 λ 为声波波长, δ 为声程差。

声程差的计算时声屏障差值损失计算的关键,可分为单个声屏障和两个声屏障两种情况见图1、2。计算单屏障绕射差值损失时,声程差计算公式为 $\delta = d_1 + d_2 - L$;双屏障时,声程差计算公式为 $\delta = d_1 + d_2 + d_3 - R$ 。当点声源与预测点之间的连线与声屏障之间有一定的夹角 α 时,则菲涅尔数 N 为

$$N(\alpha) = N \cos \alpha \quad (2)$$

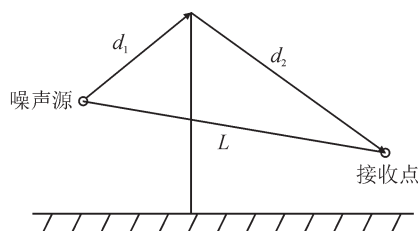


图1 单屏障绕射

Fig. 1 Single barrier diffraction

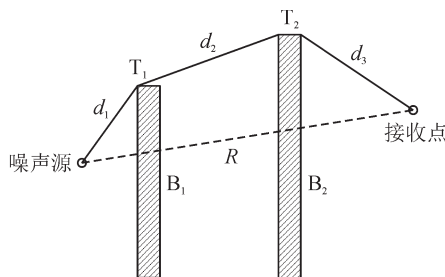


图2 双屏障绕射

Fig. 2 Double barrier diffraction

2 变电站噪声实测

文中选取江苏某 500 kV 变电站进行现场噪声测量。变电站规模为:2 台主变压器,容量均为 1 000 MVA,采用三相一体户外布置,每台主变低压侧配置 3 组 60 Mvar 低压并联电抗器。变电站平面图见图 3,主变压器及配电装置见图 4。采用 AWA6228 声级计在主变设备正常运行进行声功率级测量。变压器类设备的声级测定采用《GB/T 1094.10—2003 电力变压器第 10 部分:声级测定》规定的方法,主要分为以下几个步骤:规定基准发射面和轮廓线;合理布置测点进行 A 计权声压级测量;测量设备相关尺寸;测量并计算侧壁的表面积 S 、表面的 A 计权声压级 L_{pAs} 、总 A 计权声功率级 L_{WA} 分别见式(3)-(5):

$$S = (2 + h)l_m \quad (3)$$

式(3)中: h 为变压器油箱高度,m; l_m 为规定轮廓线的周长,m。

$$L_{pAs} = 10 \lg\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L_{pAi}}\right) - K \quad (4)$$

式(4)中: N 为测量点总数; L_{pAi} 为测量点 i 处的 A 计权声压级,dB(A); K 为环境修正值,dB(A)。

$$L_{WA} = L_{pAs} + 10 \lg \frac{S}{S_0} \quad (5)$$

式(5)中: L_{pAs} 为表面 A 计权声压级,dB(A); S 为测量表面积, m^2 ; S_0 为基准面积, $1 m^2$ 。

根据以上测得的变压器总 A 计权声功率级

L_{WA} , 东西南北各侧的声压级 $L_{W侧}$ 由式(6)计算可得

$$L_{W侧} = L_{WA} + 10 \lg \frac{S_{侧}}{S_{总}} \tag{6}$$

式(6)中: $S_{侧}$ 为各侧壁的面积; $S_{总}$ 为变压器各侧壁表面积之和。

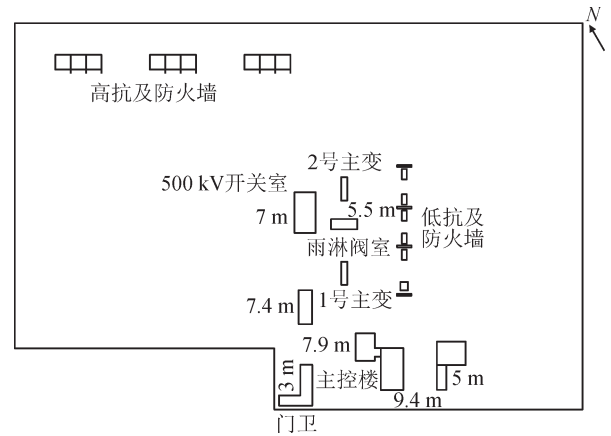


图3 变电站平面图

Fig. 3 Substation plane deployment

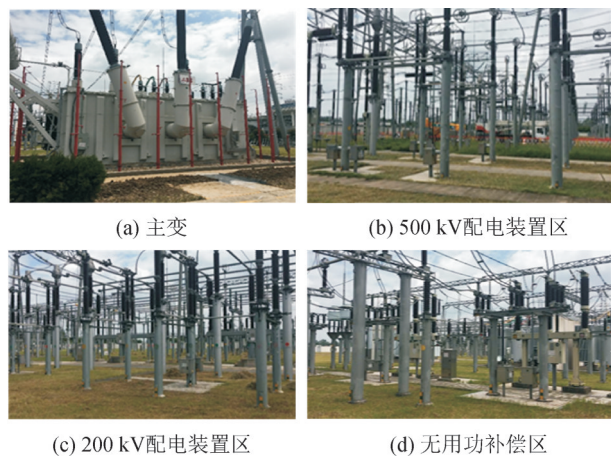


图4 变电站部分区域图

Fig. 4 Partial area map of substation

文中设置了高为1.5 m的典型衰减测量线进行测量。一条测量线位于主变西侧中心轴线上,分别在距主变西侧壁1~10、12、15、17、20 m处进行采样,另一条位于变电站南侧围墙外,在据围墙外1~30 m范围内每隔5 m布置一个采样点。两条测量线具体位置见图5。

根据上述规定的测量方法对变电站进行现场测量,最终得到的变压器声功率测量数据见表1,变压器西侧中心轴线噪声测量数据见表2,变压器倍频带中心频率处频谱图见图6。厂界南侧采样线噪声测量结果见表3,高抗声功率测量数据见表4。

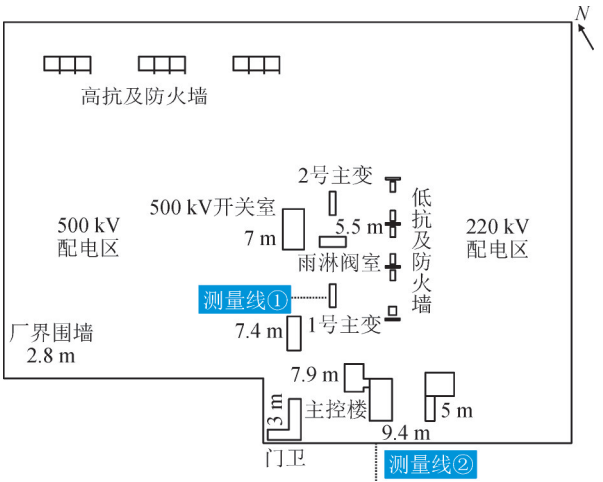


图5 测点布置图

Fig. 5 Layout of measuring points

表1 变压器声功率测量结果

Table 1 Measurement results of transformer sound power

中心频率/Hz	1号主变A声功率级/dB(A)			
	西侧壁	北侧壁	东侧壁	南侧壁
63	48.8	42.0	48.9	41.9
125	78.2	71.7	78.1	71.8
250	82.8	76.8	82.9	76.7
500	92.4	87.5	92.4	87.5
1 000	83.3	77.8	83.4	77.7
2 000	80.8	74.6	80.7	74.6
4 000	71.5	66.1	71.6	66.0
8 000	63.6	58.1	63.5	58.2
总A声功率级/dB(A)	93.7	88.6	93.7	88.6
	95.7			

表2 变压器西侧中心轴线噪声测量结果

Table 2 Noise measurement results of the central axis on the west side of the transformer

距离/m	声压级/dB(A)
1	71.0
5	67.7
8	67.0
9	65.7
10	64.3
15	62.5
20	59.8

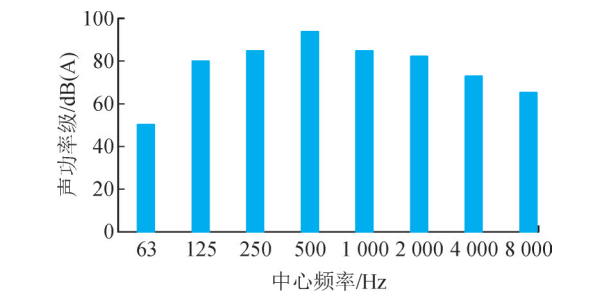


图6 主变1号频谱图

Fig. 6 Spectrum diagram of main transformer No.1

表3 厂界南侧采样线噪声测量结果

Table 3 Noise measurement results of the sampling line on the south side of the plant boundary

距离/m	声压级/dB(A)
1	37.1
5	40.2
10	43.7
15	43.4
20	42.7
25	42.3
30	42.0

表4 高抗A计权声功率级

Table 4 A-weighted sound power level for high reactor

高抗	总A声功率级/dB(A)		
	A相	B相	C相
1	87.9	88.3	88.0
2	88.2	88.6	89.7
3	91.5	92.4	93.6

从表4中可以看出高抗1和高抗2的声功率级基本相同,而高抗3的声功率级却与另外两组高抗相差较大。原因是虽然3组高抗均为同一型号且测量时正常运行,但高抗3的声功率测量时受其附近主变噪声辐射影响较大。因此在后续仿真预测中,高抗的声功率取高抗1和高抗2所测声功率的平均值88.3 dB(A)。从上文中变电站平面图中可以看出该变电站低抗组与主变距离很近,其近场噪声受主变噪声辐射影响较大,无法对低抗的声功率级进行准确测量。因此,文中在后续对低抗组的仿真预测模拟中,低抗的声功率级直接引用《特高压输电工程变电(换流)站可听噪声预测计算及影响评价技术规范(中国电力科学院2014.4修订)》当中推荐的数据,即低抗A计权声功率级取79 dB(A)。

3 变电站仿真预测模型的建立

在进行变电站仿真预测时,为了提高模型预测的精度,变压器声源采用多点等效源模型进行建模^[21,27]。多点等效源的核心思想是利用多个简单点声源的空间排布来替代实际声源,其基本思路是将变压器声源通过分布在箱体表面的多个点声源的声场加权叠加来近似等效^[28]。

变压器箱壁长14 m的侧面分布8个点声源,呈2×4阵列排布,等效点声源的水平间距设置为2.8 m,垂直间距设置为2.17 m。变压器箱壁宽4 m侧面分布4个点声源,呈2×2阵列排布,等效点声源的水平间距设置为1.33 m,垂直间距设置为2.17 m。变压器多点等效源模型见图7(注:图7模型中只展现出了变压器正面和侧面多声源排列情况)。

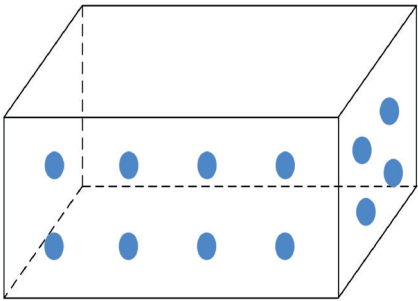


图7 变压器多点等效源模型

Fig. 7 Transformer multipoint equivalent source model

通过式(7),求得等效点声源的声功率级

$$L_{w点} = L_{w侧} - 10 \lg N \tag{7}$$

式(7)中: $L_{w点}$ 为该侧面等效点声源的声压级; N 为该侧面等效点声源的个数。

根据上文中变电站平面图以及所测主变、高抗、低抗的声功率数据建立变电站仿真预测三维模型。变电站采用上文中计算的多点等效源模型,计算标准选择ISO9613标准,地面吸收计算方法选择导则算法(HJ 2.40—2009),气压为101 325 Pa,温度为30 ℃,空气相对湿度为50%,最大反射次数为2。所建立的预测模型见图8,全站噪声预测云图见图9。

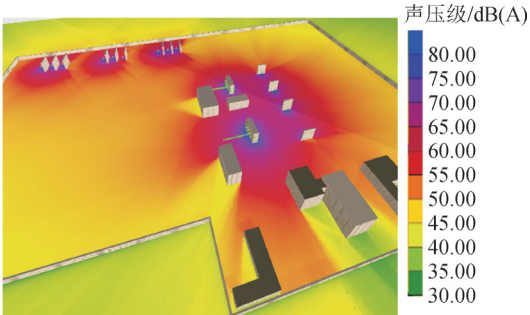


图8 变电站建模示意图

Fig. 8 Substation modeling diagram

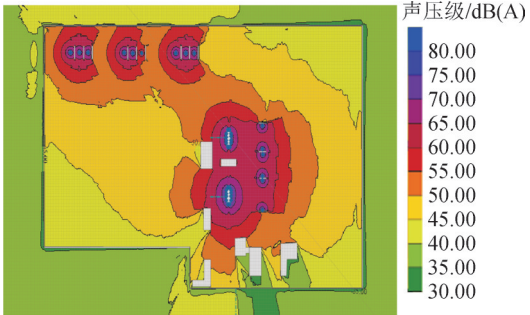


图9 变电站噪声预测云图

Fig. 9 Cloud chart of substation noise prediction

将表2中主变西侧实测的噪声衰减数据与软件仿真预测的噪声数据进行对比分析,可以发现在主变西侧各个预测点中最大误差为2.08 dB,平均误差为1.07 dB,主变西侧各个预测点噪声预测值与实测值对比见图10。

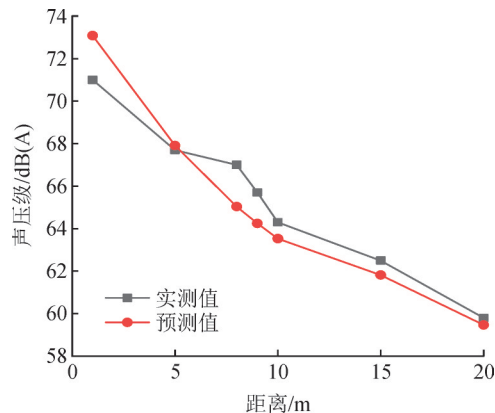


图 10 主变西侧噪声实测值与预测值对比图

Fig. 10 Comparison between measured and predicted noise values at the west side of main transformer

厂界南侧各个预测点噪声实测值与软件仿真预测值见图 11。从图 11 中可以看出各个预测点误差均在 1.2 dB 以内,平均误差为 0.56 dB。从图 11 中可以看出在厂界南侧围墙外预测点上,随着距离的增加噪声声压级呈现出先增加然后逐渐减小的趋势。这是因为厂界围墙相当于一个声屏障,其在围墙后部形成一个声影区,位于声影区内的接收点保护效果最好。因此在变电站外靠近围墙处,预测点噪声值较小。随着距离的不断增加,如距离 10 m 时,预测点不再处于围墙的声影区内,因此噪声呈现出随着距离的增加而不断衰减的趋势。

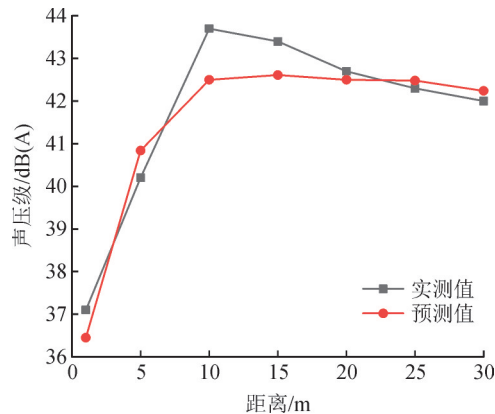


图 11 厂界南侧噪声实测值与预测值对比图

Fig. 11 Comparison between measured and predicted noise values at the south side of the plant boundary

通过对比两条测量线上噪声实测值与软件仿真预测值,可以证明该多点等效源模型预测误差满足工程需要,也充分证明了使用该模型探究厂界不同地形环境对声屏障降噪效果影响的可行性。

4 不同厂界环境条件下声屏障隔声效果分析

4.1 声屏障位置及高度对其隔声效果的影响

为探究声屏障安装位置及声屏障高度对其隔

声效果的影响,文中选取变电站西侧围墙外 15 m 处远,高 1.5 m 的位置做为预测点。声屏障长 9 m 布置在主变 1 西侧和预测点连线的不同位置上,屏障距变压器距离的变化范围为 3.5~205 m,步长为 20 m,屏障高度变化范围为 2~12 m,步长为 1 m。声屏障位置变化范围见图 12。使用仿真软件进行噪声预测,噪声预测结果见图 13。

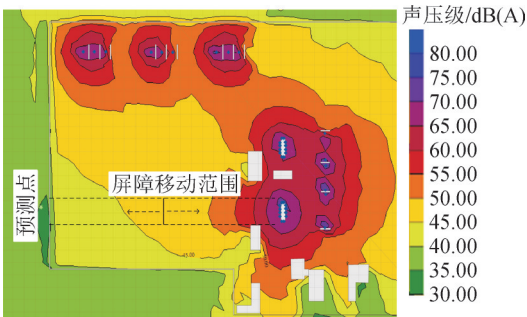


图 12 声屏障位置变化范围

Fig. 12 Change range of sound barrier position

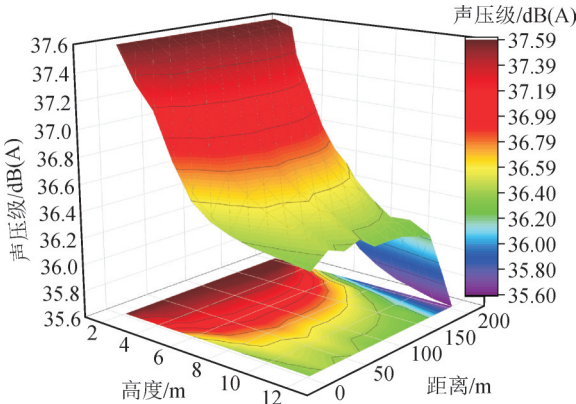


图 13 考虑屏障高度及位置影响的噪声预测结果

Fig. 13 Noise prediction results considering the influence of barrier height and position

分别计算出当预测点与变压器之间的距离为 20、40、60、80、100 m 时声屏障声程差的大小,得到声屏障距变压器的距离与绕射声程差的关系,见图 14。

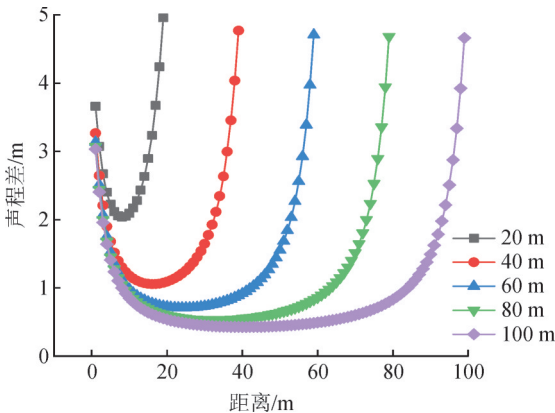


图 14 声程差与屏障距变压器距离的关系

Fig. 14 Relationship between sound path difference and distance of barrier away from transformer

根据式(1),声程差 δ 越大,噪声越过声屏障传播时绕射所产生的衰减越大。由图14可知,当声屏障靠近变压器或者预测点时,声程差都比较大,当声屏障位于两者中间时,声程差最小。从图13中也可以看出在声屏障位置由变压器附近向预测点附近变化时,预测点噪声数值也是先增大后减小,但当声屏障靠近预测点时噪声远小于声屏障靠近主变1时的噪声。这是因为在靠近变压器时,该屏障仅对主变1的噪声进行了有效的阻隔,而主变2产生的噪声受该屏障影响较小,仍会传播到预测点。因此为获得更好的隔声效果,需将声屏障安装在预测点附近或者在两台变压器附近都安装声屏障。

从图13中可以看出声屏障距变压器150 m、高10 m的降噪效果与距变压器175 m、高8 m以及距变压器200 m高5 m时的降噪效果相同。因此当声屏障位置选取恰当时,便可用更低的高度达到同样的降噪效果。考虑到声屏障的成本问题,在布置时应首先选取最恰当的布置位置,然后再根据降噪要求选取合适的高度。

分别计算出屏障距变压器5、105、205 m时预测点噪声值的大小,得到声屏障高度对变压器噪声衰减的影响,见图15。

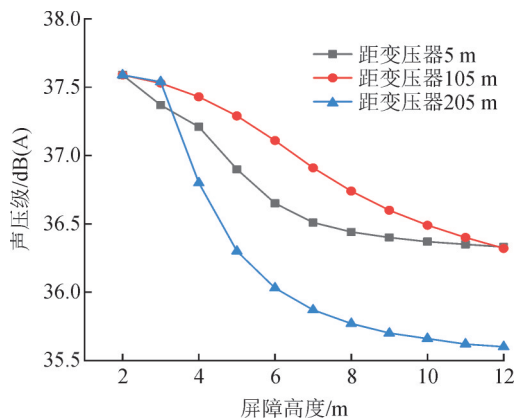


图15 屏障高度对噪声衰减的影响

Fig. 15 Influence of barrier height on noise attenuation

声屏障的隔声损失取决于声程差 δ ,当屏障高度发生变化时,声程差 δ 也会随之变化。从图15中可以看出,随着声屏障高度的不断增加,预测点处噪声的声压值也在随之减小。当声屏障高度 <7 m时,随着屏障高度的增加,噪声衰减量增加较快;当声屏障高度 >7 m时,噪声衰减量增加较慢。因此当屏障高度不断增加时,噪声衰减量并不会随其线性增加。因为单屏障绕射每个频段噪声衰减量最多不超过 $20\text{ dB}^{[10]}$,根据式(1)菲涅尔数 N 与声程差 δ 和声波频率的 f 的乘积成正比,当声程差 δ 增加时,高频段噪声衰减将迅速饱和,总的噪声衰减速

度将变缓。

4.2 不同地形条件下声屏障位置对其隔声量的影响

为探究厂界地形对屏障位置不同时隔声量的影响,选取围墙外15 m处一点为预测点,变压器距围墙205 m。分别计算变电站外地形为平地、上坡、下坡时声屏障声程差的大小,并使用仿真软件计算预测点的噪声大小。得到不同地形条件下声屏障绕射声程差与声屏障距变压器距离的关系,见图16。仿真预测的噪声衰减情况见图17。

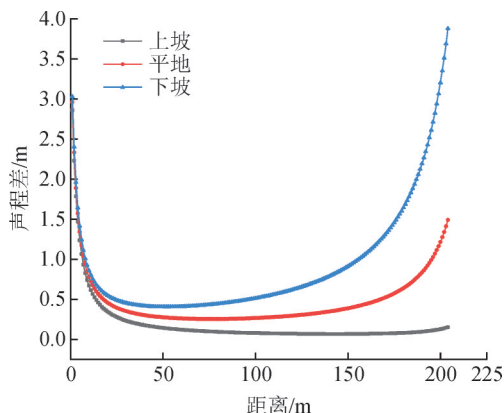


图16 不同地形时声程差与屏障距变压器距离的关系

Fig. 16 Relationship between sound path difference and distance of barrier away from transformer in different topography

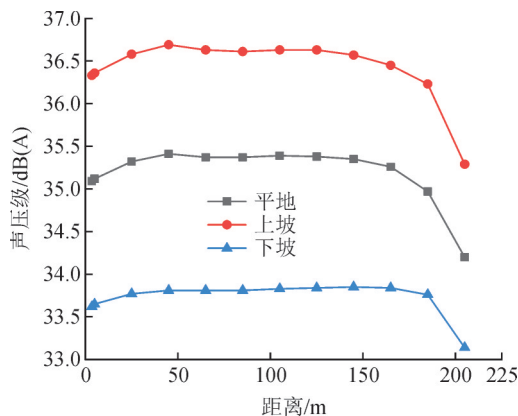


图17 不同地形时屏障位置对噪声衰减的影响

Fig. 17 Influence of barrier position on noise attenuation in different terrain

从图16、17中可以看出3种地形条件下,屏障位置对噪声衰减规律产生的影响效果相同,都是当声屏障位于靠近变压器或预测点时噪声衰减较大,而当声屏障位于两者中间时,噪声衰减最小。因主变2的影响,声屏障靠近变压器时的降噪效果没有靠近预测点时明显。

当屏障处于相同位置时,3种地形条件下的隔声效果却截然不同。上坡地形时屏障隔声效果最差,测点声压级比平地高1.3 dB左右,下坡地形时屏

障隔声效果最好,测点声压级比平地低 1.9 dB 左右。从图 16 中可以看出上坡地形时声程差最小,下坡地形时声程差最大。这是因为上坡地势减少了声屏障绕射中 d_2 的大小,导致声程差 δ 减小,因此其差值损失变小。相反,下坡地势增加了声屏障绕射中 d_2 的大小,导致声程差 δ 增大,其差值损失也随之增大;此外当厂界外为下坡地形时,增加了厂界围墙外声影区的范围,使得预测点处于其声影区内。因此下坡地形时,声屏障的隔声效果最好。

4.3 不同地形条件下声屏障高度对其隔声量的影响

为探究不同地形条件下屏障高度对变压器噪声衰减的影响,分别在距离变压器 105 m 和 205 m 处设立声屏障,在厂界外 15 m 处布置预测点。布置预测点的围墙西侧分别设置平地、上坡、下坡 3 种地理环境,仅考虑厂界各地形条件的影响,不考虑大气衰减、地面吸收等因素^[10]。用仿真软件进行预测得到的噪声衰减情况见图 18。

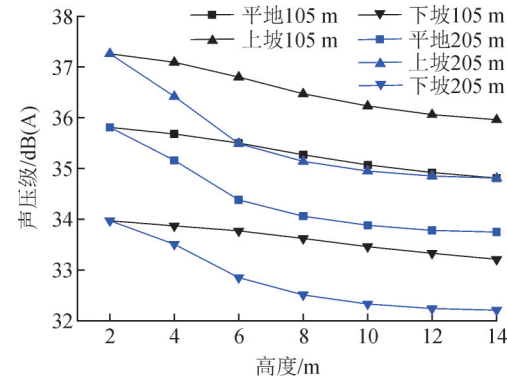


图 18 不同地形时屏障高度对噪声衰减的影响

Fig. 18 Influence of barrier height on noise attenuation in different topography

从图 18 中可以看出,在屏障高度及距变压器距离相同的情况下,上坡地形的噪声预测值最高,平地地形次之,下坡地形最低。因为上坡地形相当于削减了厂界围墙这个声屏障的高度,减小了 d_2 的大小,甚至当声屏障高度较高或预测点坡度高于围墙高度时,围墙并没有起到声屏障的作用,所以其噪声值最高。而下坡地形相当于提升了厂界围墙这个声屏障的高度,增加了 d_2 的大小,所以其噪声值最低。

另外,3 种不同地形条件下,随着声屏障高度的不断增加,预测点的噪声值均不断减小。当声屏障高度 < 7 m 时,随着屏障高度的增加,噪声衰减量增加较快。当声屏障高度 > 7 m 时,随着声屏障高度的增加,噪声衰减量增加较慢。其原因与上文中分析的随着屏障高度增加,高频噪声衰减量迅速饱和有关。

3 种地形条件下,屏障高度变化前后造成的噪

声衰减量也不同。在屏障高度从 2 m 增加到 14 m 后,上坡地形的噪声衰减量最多分别为 1.3 dB(屏障距变压器 105 m)、2.45 dB(屏障距变压器 205 m),平地地形的噪声衰减量次之分别为 1、2.06 dB,下坡地形的噪声衰减量最小分别为 0.76、1.76 dB。因为最初声屏障高为 2 m 时,变压器高 6.5 m 远大于声屏障高度,声屏障对变压器噪声的阻隔效应较弱。在上坡地势中,坡度高于围墙高度,围墙此时并没有起到屏障作用;平时 2.7 m 的围墙与 2 m 的声屏障共同构成双屏障,其对噪声的阻隔效应较强;下坡地势中由于围墙与声屏障共同构成了双屏障,且下坡地势增加了 d_2 的大小,其阻隔效应最强。因此屏障高度变化前后造成的噪声衰减量也不同。

4.4 地形坡度对声屏障隔声量的影响

分别计算上坡地形坡高 4、5、6 m 以及下坡地形坡深 4、5、6 m 时屏障声程差的大小,得到不同坡度时声程差与屏障距变压器距离的关系见图 19。

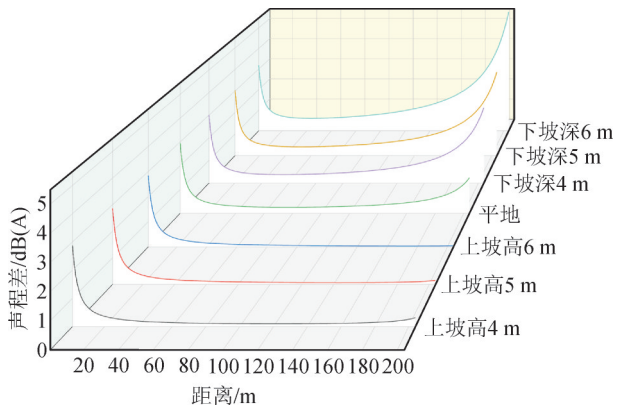


图 19 不同坡度时声程差与屏障距变压器距离的关系

Fig. 19 The relationship between the sound path difference and the distance of the barrier away from the transformer at different slopes

从图 19 中可以看出在该变电站中随着坡度的增加,上坡地势中声屏障的声程差不断减小,坡越陡其声程差越小,声屏障对噪声的阻隔作用越弱;相反,下坡地势中的声程差不断增加,坡越陡其声程差越大,声屏障对噪声的阻隔作用越强。

5 结论

1)不同地形条件下,屏障位置对噪声衰减规律产生的影响效果相同,都是当声屏障位于靠近变压器或预测点时噪声衰减较大,而当声屏障位于两者中间时噪声衰减最小。在使用声屏障方法治理变电站噪声污染时,应将声屏障设置在变电站或者敏感点附近。

2)3 种地形条件下,声屏障的隔声效果都不会

随其高度的增加而线性增加。当屏障到达一定高度后,若继续增加其高度,其隔声效果提升并不明显。考虑成本因素,应先选取恰当的声屏障布置位置,再选择合适的高度。

3)对于相同的声屏障布置方式,当厂界环境为上坡地形时其降噪效果最差,坡度越陡声屏障对噪声的阻隔作用越弱,越不利于噪声治理,可通过加低频吸声系数大的吸声材料来治理上坡地势的噪声污染。下坡地形降噪效果最好,坡度越陡声屏障对噪声的阻隔作用越强,越有利于噪声治理,可利用下坡地形来控制变电站厂界噪声污染。

参考文献:

- [1] 胡静竹,周兵,倪园,等.箱式变电站噪声特性及影响分析[J].变压器,2025,62(9):31-36.
Hu Jingzhu, Zhou Bing, Ni Yuan, et al. Analysis of noise characteristics and impact of box-type substation[J]. Transformer, 2025, 62(9): 31-36.
- [2] 郭耀扬,张利,郝颖,等.基于分行业用电特性与多因素影响的区域级短期用电负荷曲线预测[J].电力系统保护与控制,2025,53(13):82-92.
Guo Yaoyang, Zhang Li, Hao Ying, et al. Regional short-term electricity load curve forecasting based on industry electricity consumption characteristics and multi-factor effects[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(13): 82-92.
- [3] 裴春明,吴晓文,胡胜,等.750 kV变电站可听噪声特性及分布规律[J].高压电器,2016,52(1):101-105.
Pei Chunming, Wu Xiaowen, Hu Sheng, et al. Audible noise distribution and characteristics of a 750 kV substation[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 101-105.
- [4] 王莹,孙海涛,薛彦登,等.750 kV变电站噪声测量与特性分析[J].西安工程大学学报,2019,33(5):524-530.
Wang Ying, Sun Haitao, Xue Yandeng, et al. Measurement and characteristic analysis of noise in a 750 kV substation[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2019, 33(5): 524-530.
- [5] 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.
Li Ning, Tian Dongmei, Shan Dapeng, et al. Analysis and discussion on the noise arised from substation in city[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 139-144.
- [6] 樊小鹏,李丽,黄成吉,等.110 kV变电站噪声污染分析及控制[J].噪声与振动控制,2014,34(5):120-124.
Fan Xiaopeng, Li Li, Huang Chengji, et al. Analysis and control of noise pollution of an 110 kV substation[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(5): 120-124.
- [7] 汤锦慧,伍发元,支妍力,等.基于深度强化学习的户内变电站通风降噪优化设计[J].中国电力,2023,56(1):96-105.
Tang Jinhui, Wu Fayuan, Zhi Yanli, et al. Optimization design of indoor substation ventilation and noise reduction based on deep reinforcement learning[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 96-105.
- [8] 倪园,王延召,周兵,等.特高压变电站厂界环境对噪声衰减影响研究[J].高压电器,2022,58(2):119-125.
Ni Yuan, Wang Yanzhao, Zhou Bing, et al. Study on the influence of boundary environment of UHV substation on noise attenuation[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2022, 58(2): 119-125.
- [9] 王开库,林旗力,胡文华,等.一起位于1类区的500 kV变电站噪声治理案例分析[J].变压器,2022,59(1):76-80.
Wang Kaiku, Lin Qili, Hu Wenhua, et al. Case study on noise control of a 500 kV substation located in class 1 area[J]. Transformer, 2022, 59(1): 76-80.
- [10] 王朝亮,张良涛,宋立忠,等.市域铁路近轨声屏障降噪效果预测分析[J].噪声与振动控制,2022,42(6):187-191.
Wang Chaoliang, Zhang Liangtao, Song Lizhong, et al. Predication and analysis of noise reduction of near-rail sound barriers on suburban railways[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(6): 187-191.
- [11] 张超,刘国强,芦竹茂,等.特高压交流变压器噪声干涉及衰减特性[J].高压电器,2022,58(10):1-7.
Zhang Chao, Liu Guoqiang, Lu Zhumao, et al. Noise interference and attenuation characteristic of UHV AC transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 1-7.
- [12] 吴健,赵亚林,耿明昕,等.750 kV变电站电晕噪声的影响与防治[J].应用声学,2022,41(1):52-59.
Wu Jian, Zhao Yalin, Geng Mingxin, et al. Influence and control of corona noise in 750 kV substation[J]. Applied Acoustics, 2022, 41(1): 52-59.
- [13] 车凯,陈秋,韩忠阁,等.1 000 kV特高压交流变电站噪声特性及变化规律[J].高压电器,2021,57(12):67-73.
Che Kai, Chen Qiu, Han Zhongge, et al. Characteristic and variation of noise at 1 000 kV UHV substation[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 67-73.
- [14] 倪园,张建功,周兵,等.并联电抗器隔声罩隔声性能测试及分析[J].高压电器,2021,57(2):77-83.
Ni Yuan, Zhang Jiangong, Zhou Bing, et al. Test and analysis of sound insulation performance of sound insulation cover for UHV shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 77-83.
- [15] 林旗力,马梦达,陈为佳,等.500 kV变电站主变声源模型研究[J].变压器,2020,57(3):68-72.
Lin Qili, Ma Mengda, Chen Weijia, et al. Study of sound source model for main transformer in 500 kV substation[J]. Transformer, 2020, 57(3): 68-72.
- [16] 钟思翀,祝丽花,王前超,等.电力变压器振动噪声分析及其有源降噪[J].电工技术学报,2022,37(s1):11-21.
Zhong Sichong, Zhu Lihua, Wang Qianchao, et al. Electromagnetic vibration of power transformer and active noise reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(s1): 11-21.
- [17] 蔡炜,余恺,彭晓凤,等.110 kV变电站噪声控制技术与应用[J].智慧电力,2019,47(9):120-126.
Cai Wei, She Kai, Peng Xiaofeng, et al. Noise control technology and its application in 110 kV substation[J]. Smart Power, 2019, 47(9): 120-126.
- [18] 彭飞,陈凌琦,石雪梅,等.隔声屏障在变电站降噪中的应用

[J]. 电力与能源, 2022, 43(3): 223-227.

Peng Fei, Chen Lingqi, Shi Xuemei, et al. Application of sound barrier in substation noise reduction[J]. Power & Energy, 2022, 43(3): 223-227.

[19] 易梅生, 吴华林, 蔡 炜, 等. 居民区内 110 kV 变电站噪声检测与治理技术[J]. 智慧电力, 2018, 46(11): 83-87.

Yi Meisheng, Wu Hualin, Cai Wei, et al. Audible noise measurement and control technology of a 110 kV substation in residential area[J]. Smart Power, 2018, 46(11): 83-87.

[20] 梁丽萍, 张 林. 变电站吸隔声屏体的研制及工程实践[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5326-5332.

Liang Liping, Zhang Lin. Research and application of sound absorption-insulation barriers in transformer substation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(9): 5326-5332.

[21] 田 一, 陈建胜, 刘主光, 等. 微孔纤维复合吸声板在城市变电站降噪中的应用[J]. 智能电网, 2016, 4(10): 988-992.

Tian Yi, Chen Jiansheng, Liu Zhuguang, et al. Application of microporous fiber composite acoustic board in the noise control engineering of urban substations[J]. Smart Grid, 2016, 4(10): 988-992.

[22] 王素文, 张松光, 王淑萍, 等. 虚拟声屏障在变压器低频降噪中的实验研究[J]. 应用声学, 2015, 34(6): 487-494.

Wang Suwen, Zhang Songguang, Wang Shuping, et al. Experimental study of applying a virtual sound barrier to reduce low-frequency noise of transformers[J]. Applied Acoustics, 2015, 34(6): 487-494.

[23] 吕 露, 汤 胜, 周 波, 等. 基于多点等效模型的变压器声辐射研究[J]. 仪表技术, 2017(5): 4-7.

Lyu Lu, Tang Sheng, Zhou Bo, et al. Research on transformer acoustic radiation based on multi-point equivalent model[J]. Instrument Technology, 2017(5): 4-7.

[24] 胡静竹, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 变电站声屏障降噪效果及影响因素分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(1): 75-80.

Hu Jingzhu, Liu Dichen, Liao Qingfen, et al. Substation noise reduction effect of barrier and analysis of influencing factors[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(1): 75-80.

[25] HJ-2.4—2009 环境影响评价技术导则——声环境[S].

HJ - 2.4—2009 Technical guidelines for environmental impact assessment-acoustic environment[S].

[26] 潘仲麟. 声屏障衍射声场的近似计算[J]. 杭州大学学报(自然科学版), 1987(4): 426-430.

Pan Zhonglin. Approximate calculation of diffraction sound field of sound barrier[J]. Journal of Hangzhou University(Natural Science Edition), 1987(4): 426-430.

[27] 杨 鹏, 应黎明, 王晋伟, 等. 基于近场声全息电力变压器声场重建[J]. 陕西电力, 2017, 45(6): 7-10.

Yang Peng, Ying Liming, Wang Jinwei, et al. Reconstruction of power transformer sound field based on near-field acoustical holography[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(6): 7-10.

[28] 李加庆, 陈 进, 杨 超, 等. 波叠加声场重构精度的影响因素分析[J]. 物理学报, 2008, 57(7): 4258-4264.

Li Jiaqing, Chen Jin, Yang Chao, et al. Analysis of the impact factors on the accuracy of sound field reconstruction based on wave superposition[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(7): 4258-4264.

李慧奇(1970—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统电磁兼容、铁磁材料磁致伸缩及电气装备振动噪声等(通信作者)(E-mail: huiqili@263.net)。