Open Journal of Acoustics and Vibration 声学与振动, 2018, 8(1), 1-7
Published Online March 2018 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ojav
https://doi.org/10.12677/ojav.2018.61001

Hans汉斯

Research on Acoustic Noise Reduction Methods for Substation

Zheng Dai[1], Hugen Wang[2], Fei Qiao[2], Feng Li[1], Yanyuan Qian[1], Junsheng Wang[2]

[1]State Grid Shanghai Economic Research Institute, SMEPC, Shanghai
[2]Power China Equipment Research Institute, Shanghai
Email: tonydaicn@163.com

Received: Dec. 25th, 2017; accepted: Jan. 8th, 2018; published: Jan. 15th, 2018

Abstract

This paper discusses the use of perforated plate resonant sound absorption structure for substation noise control. Based on the noise distribution characteristics of the substation, the resonant sound absorption structure parameters are designed, and the sound absorption coefficient of the resonant structure is numerically simulated. It is shown that the structure has a relatively large sound absorption coefficient at low frequency. Experiments are conducted to verify the perforated plate resonant sound absorption structure and a software is designed to obtain the substation audible noise frequency A weighted sound pressure level. The results show that the resonant sound absorption structure of the perforated plate has better frequency selection sound absorption characteristics, which greatly reduces the low frequency noise in the substation and makes the noise of the substation get effective control.

Keywords

Resonance Absorbing, Perforated Panel Structure, Noise Frequency Distribution, Substation Noise Control, Sound Pressure Level

变电站降噪方法研究

戴　峥[1]，汪胡根[2]，乔　飞[2]，李　峰[1]，钱艳园[1]，王俊生[2]

[1]国网上海市电力公司经济技术研究院，上海
[2]中国电建集团装备研究院有限公司，上海
Email: tonydaicn@163.com

收稿日期：2017年12月25日；录用日期：2018年1月8日；发布日期：2018年1月15日

摘　要

采用穿孔板共振吸声结构用于变电站噪声治理，根据变电站噪声频率分布特性设计了共振吸声结构参数，

文章引用: 戴峥, 汪胡根, 乔飞, 李峰, 钱艳园, 王俊生. 变电站降噪方法研究[J]. 声学与振动, 2018, 8(1): 1-7.
DOI: 10.12677/ojav.2018.61001

并对共振结构吸声系数进行了数值仿真，得到其吸声谱在低频具有相对较大的吸声系数。对设计的穿孔板共振吸声结构进行了工程实验，利用设计的软件得到变电站的可听噪声倍频A计权声压级。分析了噪声治理前后的不同频带噪声的变化特性，测试结果表明所采用穿孔板共振吸声结构具有较好频率选择吸声特性，该结构大幅度地降低了变电站中的低频噪声，使变电站的噪声得到有效的控制。

关键词

共振吸声，穿孔板结构，噪声频率分布，变电站降噪，声压级

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

变电站是电力传输系统中非常重要的电压升降单元。随着城市的扩建与发展，目前有部分原来处于人口稀少区域的变电站已经或即将处于人口密集区域。变电站中的各种电气设备在运行中会产生不同强度的可听噪声，这些噪声会对周边环境及居民产生一定程度的影响。大多数变压器噪声并不属于高分贝的强噪声，但其低频噪声会对人体产生更为严重的慢性损伤，长期处于变电站噪声环境下会产生如下影响：一是影响听力。二是降低睡眠质量，从而影响其正常生产生活。三是对心血管功能和内分泌系统产生影响，其主要症状有心跳过快、心律不齐、血压升高等。四是危害中枢神经系统，出现头痛、胸闷、耳痛、全身乏力等症状。变电站产生的可听噪声已成为居民与变电站和谐发展的重要问题，在满足国家相关标准规范的前提下，对变电站设备噪声的声场特性和衰减规律进行研究、提出合理有效的降噪设计以及噪声控制方案具有重大的现实意义[1] [2] [3]。

变电站的噪声主要以变压器的本体噪声为主。优化变压器的材料和结构进行降噪，只能在变压器的设计和生产制造阶段进行，而对于已建或正在建设中的变电站，该降噪方法不但会增加额外成本还会严重延误工期。此外，通过采用改变变压器的材料或优化变压器的结构，其降噪效果是有限的。还有一种控制噪声源的方法是通过降低磁密来降低变压器噪声，但变压器的能耗就明显增加，不符合降噪实施原则。因此在变压器的噪声治理中，不宜采用改变变压器的材料或优化变压器的结构等来降低变电站的噪声。对已建于居民区的变电站，目前最有效最快捷的方法是通过控制噪声的传播途径实现降噪目的。控制噪声传播途径的方法主要有隔、消、吸、阻尼和减振等综合降噪措施，使噪声在传播到周边区域的过程中快速衰减，从而降低周边区域受声点的噪声强度。

在众多的降噪方法中，吸声是控制噪声的重要措施之一。根据吸声机理，吸声材料可分为多孔吸声材料和共振吸声结构两大类。采用多孔吸声材料做成的吸声体，具有吸声系数高、吸声频带宽等特点，但该吸声材质的纤维直径太细，容易断落，而且吸声系数极易受湿度影响，从而影响吸声效果。共振吸声结构是利用共振吸声原理设计的吸声体，与多孔材料的不同点在于共振结构是利用共振器的特点，能有效地把声能变成热能消耗。且共振吸声材料具有频率选择性，可以根据设计的参数吸声不同频带的噪声，这对于主要以低频为主的变电站噪声控制是非常有利的。此外，共振吸声结构多采用铝板、钢板、塑料板等材料制成，因此能防潮、防火、耐高温、耐腐蚀，能承受高速气流冲击[4]。鉴于以上优点，本文主要采用穿孔板共振吸声结构对变电站进行降噪处理，分析了吸声结构参数对吸声性能的影响，为变电站噪声治理提供理论依据和实际经验。

2. 穿孔板共振吸声原理

变电站噪声主要包括变压器主体噪声和附属冷却设备油箱振动噪声和冷却风扇噪声。其混合噪声为低频突出、频带宽的噪声。而穿孔板吸声结构可通过调节结构参数实现不同频率噪声的有选择吸收。穿孔板共振吸声结构如图 1 所示，其吸声机理是，穿孔板上的穿孔与其相对应的空气层组成的系统类似于亥姆霍兹共振器，穿孔板共振吸声结构可理解为许多亥姆霍兹共振器的并联。当噪声进入小孔后便激发空腔内空气的振动，如果噪声的频率穿孔板结构的共振频率相同，则其腔内空气便发生共振，使空气柱的摩擦与阻尼达到最大，此时，便极大程度地把噪声能转变为热能，即消耗噪声能，从而发挥出特定频率噪声高效吸收的作用。

穿孔板吸声结构是共振吸声结构，当噪声垂直入射时，其吸声系数可表示为[4] [5]：

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + \left[\omega m - \cot\left(\frac{\omega D}{c_0}\right)\right]^2} \tag{1}$$

其中 r 为声阻抗，m 为声质量，c_0 为声速，D 为空腔深度，ω 为角频率。声阻抗和声质量可由下式求得：

$$r = \frac{32\eta t}{q c_0 \rho_0 d^2}\left[\left(1+\frac{|Ka|^2}{32}\right)^{1/2} + \frac{\sqrt{2}}{32}\frac{|Ka|d}{t}\right] \tag{2}$$

$$m = \frac{(t+0.85d)}{q c_0}\left[1+\left(9+\frac{|Ka|^2}{2}\right)^{-1/2}\right] \tag{3}$$

$$|Ka| = \frac{d}{2}\sqrt{\frac{\omega\rho_0}{\eta}} \tag{4}$$

式中，t 为穿孔板厚度、d 为穿孔孔径、q 为穿孔率、 ρ_0 为空气密度、η 为空气的切变粘滞系数，在常温 20℃时，声速 $c_0 = 344\ \mathrm{m/s}$，空气的切变粘滞系数 $\eta = 1.89\times10^{-5}\ \mathrm{kg/(s\cdot m)}$，空气密度 $\rho_0 = 1.21\ \mathrm{kg/m^3}$。从式(1)~(4)中可以发现，穿孔板吸声系数受多种结构参数影响，当设计不同的结构参数时有不同的吸声特性。通常变电站的噪声主要分布在 100 Hz 到 300 Hz 范围内，这要求所设计的穿孔板共振吸声结构的吸声系数在该频段范围内具有较好的吸声特性。为此，本文采用 matlab 数值计算软件对穿孔板的结构参

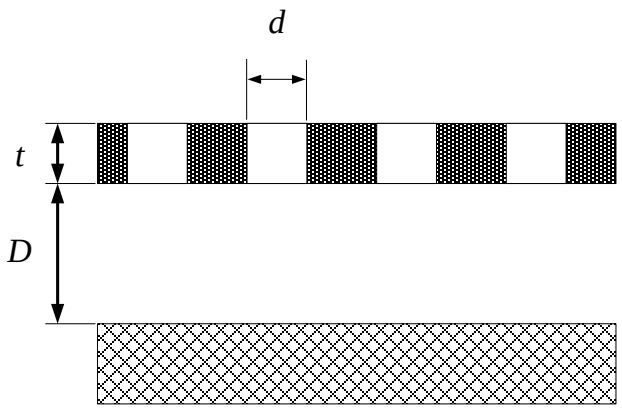

Figure 1. The structure of the perforated panel
图 1. 穿孔板结构原理图

数进行了设计，当穿孔板厚度 t = 1 mm、穿孔孔径 d = 2.5 mm、穿孔率 q = 2%、空腔深度 D = 100 mm 时，得到穿孔板吸声系数随频率变化关系如图 2 所示。从图中可以发现，当频率为 205 Hz 时，穿孔板具有最大吸声系数，且穿孔板在 120 Hz 到 300 Hz 之间具有相对较大的吸声系数，该吸声系数刚好与变电站的噪声频率分布特性相符合。

为了对穿孔板降噪效果进行评价，需要分析噪声的声压级变化情况。根据噪声声压级定义[6]：

$$L_p = 10\lg\frac{P^2}{P_0^2} = 20\lg\frac{P}{P_0} \tag{5}$$

P_0 为参考声压值，为 2×10^{-5} (Pa)。根据上式可得到噪声的声压级，但人耳对不同频率的噪声具有不同的感觉，因此需要对声压级信号进行计权。常用的计权网络有 A、B、C、D 计权。

A 计权网络是模仿 40 方等响曲线设计的。当声波通过 A 计权网络时，低频声(特别是 500 Hz 以下)衰减较大，而对 1000~5000 Hz 的声音不衰减，甚至稍有放大，B 计权是仿效 70 方等响曲线，低频有衰减，C 计权是仿效 100 方等响曲线，有近似平直的响应，D 计权网络是为测量飞机噪声而设计的。实践证明，A 计权网络比较接近人耳对声音的感觉特性，所以在噪声测量仪器〈例如声级计〉中普遍采用 A 计权。然后把得到的声压级信号进行 A 计权网络修正得到可听噪声 A 计权声压级。所测得的声级就称作 A 声级、记作 dB (A)。

若已知噪声的各倍频带声压级，可以将其转换为计权声压级。如 L_{p_i} 为测得的各倍频带的声压级(dB)，按声压级的定义，L_{p_i} 可记为，

$$L_{p_i} = 10\lg\left(\frac{P_i^2}{P_0^2}\right) \tag{6}$$

则 $\left(\frac{P_i^2}{P_0^2}\right) = 10^{\frac{L_{p_i}}{10}}$，所有 n 个倍频带声压级叠加后总声压级 L_p 为：

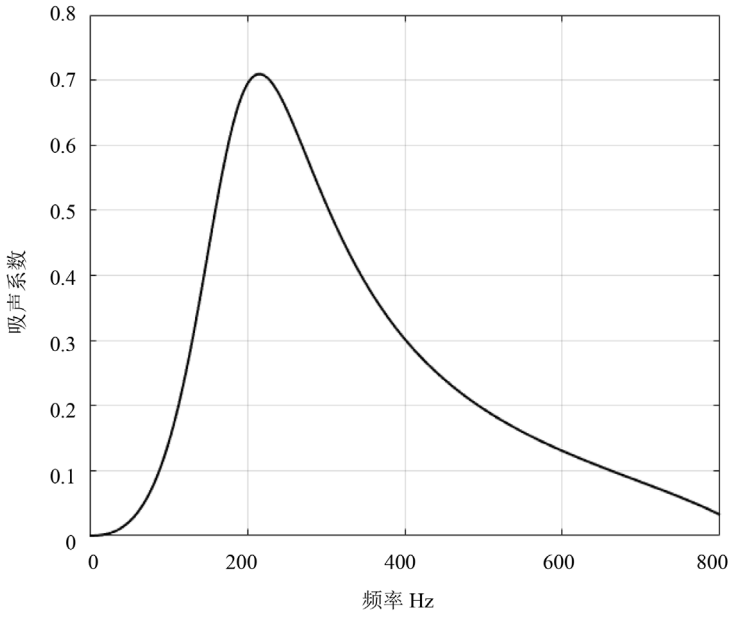

Figure 2. The relationship between the acoustic absorbing coefficients of the perforated panel and the frequency
图 2. 穿孔板吸声系数与频率关系

$$L_p = 10\lg\left[\sum_{i=1}^{10} 10^{\frac{L_{pi}}{10}}\right] \tag{7}$$

由总倍频带声压级 L_p 转换为总 A 声级 L_{p_A} 时，有

$$L_{p_A} = 10\lg\left[\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_{pi}-K_i}{10}}\right] \tag{8}$$

式中 K_i 为第 i 个倍频带的 A 计权修正值。通过上述公式计算可以得到在有、无穿孔板时的声压级，进而可以对穿孔板降噪效果进行评价。

3. 工程实例

在完成了穿孔板吸声共振结构设计后，接下去需要对设计的吸声结构降噪效果进行检测。图 3 所示为现场实测照片，含变压器及声压计。

通过声压计对图 3 中所示的测点进行测量，得到的声压信号如图 4 所示。

一般测量倍频带取 63~8000 Hz 的八个倍频程。经 A 计权网络后得到的变压器噪声倍频带如图 5 所示：

从图 5 可以发现，变电站的主要噪声分布在 125 Hz 到 500 Hz 的频带上。为了控制变电站的噪声传播，通过把本文设计的穿孔板共振吸声结构体安装在变压器与测试点之间以形成一个吸声屏障。然后在测量点再次进行声压测量，得到的声压信号及相应的声压级分别如图 6 和图 7 所示。从图 6 中可以发现，当加装吸声结构后，测点声压信号有所减弱。从图 7 中可以发现，原来 125 Hz 到 500 Hz 的频带上的噪声显著地降低了，而且其他频带上的噪声也有相应的降低。该测试结果表明，本文设计的穿孔板共振吸声结构体对噪声吸收具有频率选择性，在设计的吸声频率带宽上的噪声能显著减少，实验测试结果表明该吸声结构体能有效地降低变压器的噪声，可用于变电站的噪声治理。

4. 结论

本文采用了穿孔板共振吸声结构用于变电站噪声治理，根据变电站噪声频率分布特性设计了穿孔板

Figure 3. Sound pressure level test
图 3. 噪声测试现场

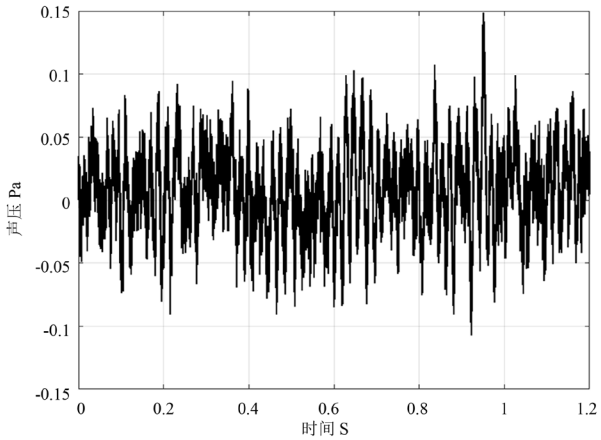

Figure 4. The acoustic pressure of acquired signals
图 4. 声压信号

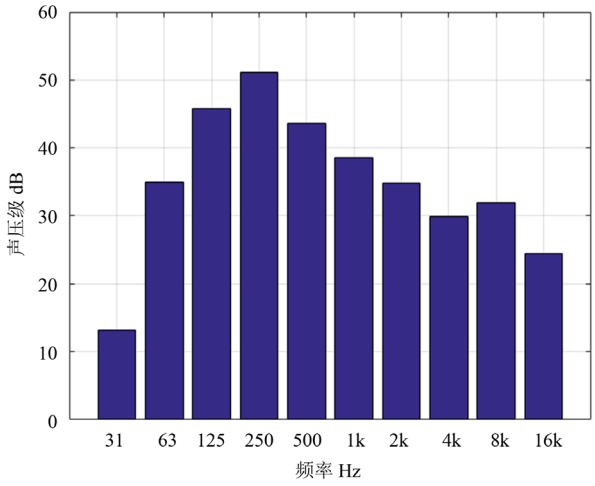

Figure 5. A-weighted acoustic pressure level
图 5. 倍频带 A 计权声压级

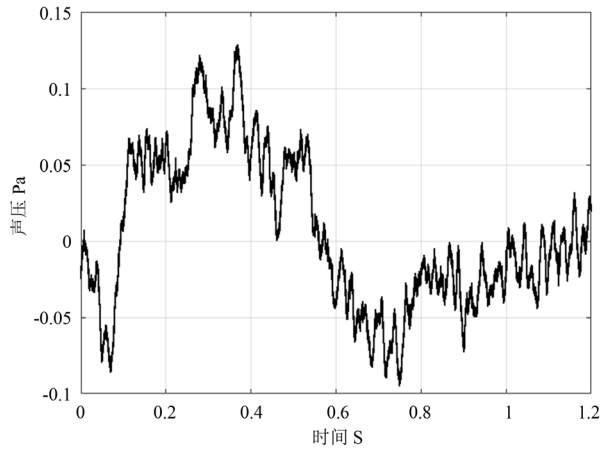

Figure 6. The acquired acoustic signals after installed an acoustic absorbing structure
图 6. 加装吸声结构体后测得的声压信号

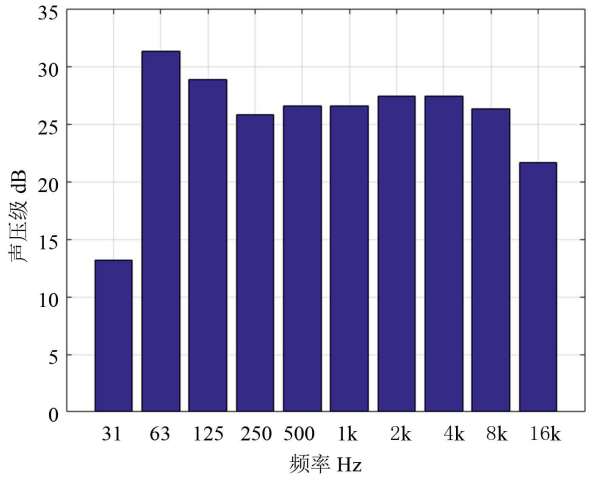

Figure 7. The A-weight acoustic pressure level of the signal after installed an acoustic absorbing structure
图 7. 加装吸声结构体后噪声的倍频带 A 计权声压级

结构参数并对穿孔板结构体吸声系数进行了数值仿真。采用设计的吸声结构对三林变电站的噪声进行测试与分析，实验结果表明所设计的降噪方案具有较好的降噪效果，吸声结构体对噪声的吸声具有频率选择性，可以很好地减少变压器噪声中较大的频带的噪声，这为变电站噪声治理提供了一种可供选择的降噪方案。

基金项目

上海市电力公司科技项目资助(合同号：SGSHJY00GHWT1600686)。

参考文献 (References)

[1] 欧炎, 高聚元. 大型变电站噪声综合治理设计[J]. 噪声与振动控制, 2005(S1): 20-23.
[2] 袁聪波, 黄家彬. 变电站噪声分析及治理[J]. 上海电力, 2002(4): 59-61.
[3] 黄青青, 冯苗锋, 王庭佛. 220 kV 变压器噪声及其传播特性浅析[J]. 环境工程, 2011, 29(s1): 330-333.
[4] 周新祥. 噪声控制及应用实例[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.
[5] 马大猷. 现代声学理论基础[M[. 北京: 科学出版社, 2004.
[6] 牛磊. 电力变压器噪声实验室测量方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.

Hans汉斯

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD
   下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2328-0530，即可查询
2. 打开知网首页 http://cnki.net/
   左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：http://www.hanspub.org/Submission.aspx
期刊邮箱：ojav@hanspub.org