

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.008

干式配变壳体用阻尼隔声结构声学特性研究

吴文庚¹, 陈冰斌¹, 高 栩¹, 樊 超², 田 一², 肖伟民³

(1. 国网福州供电公司, 福州 350009; 2. 全球能源互联网研究院有限公司, 北京 102211; 3. 北京市劳动保护科学研究所, 北京 100055)

摘要: 干式配电变压器噪声大,与居民距离近,易引起反感。为了有效降低配电变压器的噪声,文中针对配电变压器的噪声特性,开展了隔声材料声学结构仿真,发现增加阻尼层,尤其是采用约束阻尼隔声结构,可提升刚性隔声材料的隔声性能。并在此基础上,开展了不同结构参数约束阻尼隔声结构声学测试分析,结果表明:刚性材料对约束阻尼隔声结构的影响极大,随着刚性材料厚度的增加,隔声性能明显增大,但增大值逐渐减小;阻尼材料也可提升约束阻尼隔声结构的隔声性能,且随阻尼材料损耗因子的增加,隔声性能随之增大,随阻尼材料厚度的增加,低频段和高频段隔声性能得到改善,还将共振频率和临界吻合频率调整至更高频段。

关键词: 干式配电变压器; 噪声; 约束阻尼隔声结构; 刚性材料; 阻尼材料

Research on Acoustic Characteristics of the Damping Sound Insulation Structure for Dry Distribution Transformer Shell

WU Wengeng¹, CHEN Bingbin¹, GAO Xu¹, FAN Chao², TIAN Yi², XIAO Weimin³

(1. State Grid Fujian Fuzhou Electric Supply Company, Fuzhou 350009, China; 2. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China; 3. Beijing Municipal Institute of Labor Protection State, Beijing 100055, China)

Abstract: Dry distribution transformer is noisy and close to residents as well as prone to their dislike. For reducing effectively the noise of distribution transformer, the acoustic structure simulation of sound insulation materials based on the noise characteristics of distribution transformers is performed in this paper. It is found that the sound insulation performance of rigid sound insulation materials can be improved by adding damping layer, with adoption of constrained damping sound insulation structure in particular. On this basis, the acoustic test analysis of the damping sound insulation structure with different structural parameters constraints is performed. It is shown by the result that the rigid material has great influence on constrained damping sound insulation structures. With the increase of the rigid material thickness, the sound insulation performance increases obviously, but the increase amplitude decreases gradually. And the damping material can also improve the sound insulation performance of constrained damping structures. With the increase of the damping material loss factor, the sound insulation performance increases. With the increase of the damping material thickness, the sound insulation performance of low and high frequency band is improved, and the resonant frequency and critical coincidence frequency are adjusted to a higher band.

Key words: dry distribution transformer; noise; constrained damping sound insulation structure; rigid materials; damping materials

0 引言

随着城市的发展和人口的增长,居民区的规模

不断扩大,小区配电室承担的供电负担也随之增加,配电变压器常处于高负荷运转状态^[1-3]。按照 GB 12348—2008《工业企业厂界环境噪声排放标

收稿日期:2025-12-02; 修回日期:2026-02-10

基金项目:国网福建省公司科技项目(基于声振耦合控制的干式配电变压器噪声治理研究)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd.(Research on Noise Mitigation of Dry-type Distribution Transformers Based on Vibroacoustic Coupling Control).

准》的规定,小区配电室属于1类声环境功能区,但配电变压器排放的噪声往往超出此类区域的限值要求^[4]。加之小区内人口集中,居民与噪声源的空间距离近,极易受到噪声困扰,引起居民的反感。

针对配电变压器的噪声控制,从原理上可分为辅助降噪技术和本体降噪技术^[5-9]。以往针对配电室的噪声治理,多集中在辅助降噪技术,通过安装隔声门、吸声壁面、通风消声器等切断噪声的传播途径,减少噪声的向外传播,然而该法材料用量大、投资成本高,挤占检修空间,与国家倡导的“绿色、低碳、环保”理念不符。为此,本体降噪技术通过降低配电变压器噪声的产生,直接降低配电变压器的噪声排放,是解决配电室噪声问题的根本途径。

目前,针对干式配电变压器本体降噪技术的研究主要集中在选用高导磁硅钢片^[10]、降低铁心工作磁密^[11]、优化铁心夹紧力^[12]、加装减振垫^[13]等方面,但针对配电变压器壳体的研究鲜有报道。干式配电变压器的壳体普遍采用不锈钢、铝合金、钢板等材料制作,由于该壳体主要起安全防护作用,材质轻薄,漏声严重,导致设备噪声可以轻易穿透壳体向外传播,对周边声环境造成较大影响。

为此,文中以小区内最为常见的10 kV干式配电变压器为研究对象,开展了不同结构参数壳体用隔声材料声学特性研究,为实现配电变压器噪声的有效控制,减小对周边居民的噪声影响提供技术支撑。

1 噪声特性分析

按照配电室结构类型进行划分,10 kV干式配电变压器主要可以分为箱式变和户内变两种,见图1。



(a) 箱式变 (b) 户内变

图1 10 kV干式配电变压器

Fig. 1 Dry type distribution transformer of 10 kV

由于额定容量、生产厂家的不同,10 kV配电变压器的近场噪声主要集中在50~60 dB(A)之间,噪声频谱主要位于500 Hz以下,并在100、200、400 Hz具有较为明显的波峰,在频率超过500 Hz后,声压级缓慢下降,直至20 000 Hz下降到很低水平,见图2。

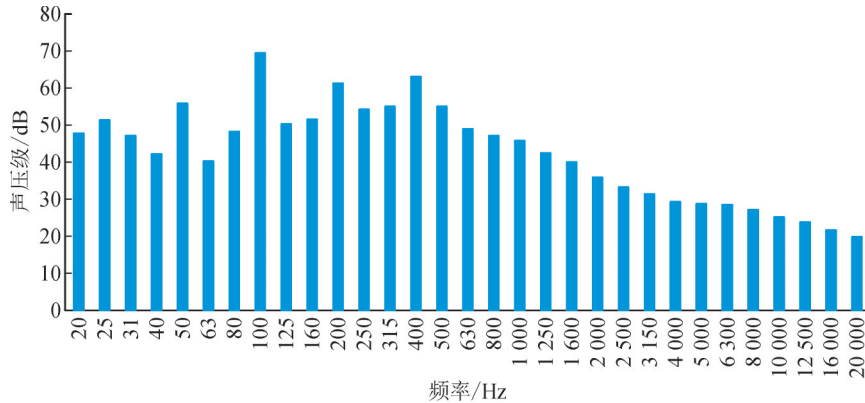


图2 干式配电变压器噪声频谱

Fig. 2 The noise spectrum of dry type distribution transformer

2 声学原理分析

依据材料隔声理论,隔声材料的隔声曲线可分为劲度控制区、模态控制区、质量控制区和吻合频率控制区^[14],见图3。

在劲度控制区内,隔声材料受自身劲度控制,隔声曲线随频率升高而降低,此时板材的质量和阻尼并不重要,隔声量主要受边界条件的影响;随着频率的升高,质量开始起作用,在劲度和质量的共同作用下,板材将产生一系列共振,其隔声量主要受板材整体模态振型控制,增加板材的阻尼或改变

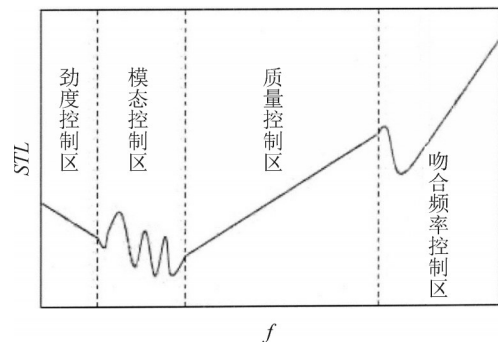


图3 隔声材料隔声曲线

Fig. 3 The sound insulation curve of sound insulation material

模态辐射效率会显著影响整体结构的传声损失;频率再上升,板材进入质量控制区域,板材的质量越大,频率越高,隔声量也越高,此时频率增加1倍或面密度增加1倍,隔声量增加6 dB左右;频率超过质量控制区上升到一定频率时,结构将出现吻合效应,并在吻合效应频率位置产生隔声低谷,此时板材的运动与空气中声波的运动达到高度耦合,声能大量透射过板材,在吻合频率控制区,通过改变板材质量对结构的影响都不大,而通过提高结构阻尼抑制板材的振动比较有效,另外还可增大吻合频率至较高频率,使其调整至不关注的频段。由此可见,隔声材料的隔声性能主要是由材料的质量、阻尼等参数决定。

3 声学结构仿真

阻尼具有减少振动传递,降低结构噪声的作用,将具有阻尼作用的粘弹性材料贴附在薄板件表面,当结构产生振动时,粘弹性材料会随着结构变形,产生交变的应力和应变,从而起到抑制振动和降低噪声的作用^[15-21]。按照隔声结构进行划分,阻尼隔声材料主要可以分为自由阻尼隔声结构和约束阻尼隔声结构,自由阻尼隔声结构是一种由基层(金属板)和阻尼层(橡胶板)组合成的双层隔声结构,见图4(a);约束阻尼隔声结构是一种由基层(金属板)、阻尼层(橡胶板)和约束层(金属板)组合成的多层隔声结构,见图4(b)。

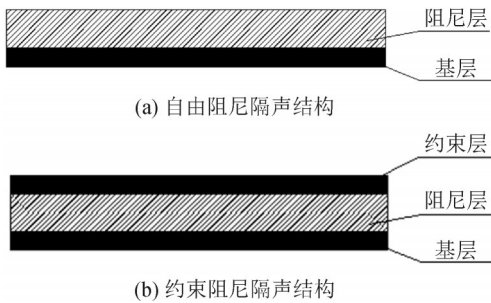


图4 阻尼隔声结构

Fig. 4 Damped sound insulation structure

为了研究不同隔声结构的降噪效果,本项目采用 Comsol Multiphysics 多物理场耦合软件建立声-固耦合三维有限元模型,该模型包括隔声材料、两侧的空气域以及最外层的完美匹配层,见图5。

利用该有限元仿真模型,对钢板、自由阻尼隔声结构(钢板+橡胶板)、约束阻尼隔声结构(钢板+橡胶板+钢板)分别进行隔声性能仿真分析,不同隔声结构上下空气域在 100、200、400 Hz 的声压级分布见图6-8,隔声性能曲线见图9。

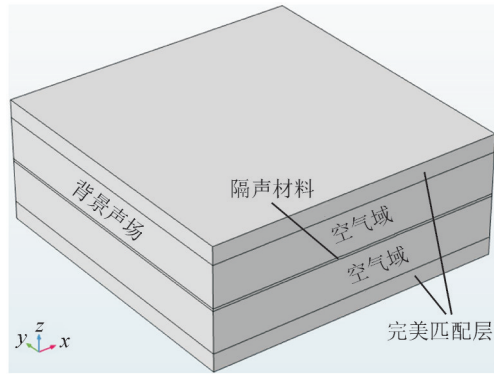


图5 有限元仿真模型

Fig. 5 Finite element simulation model

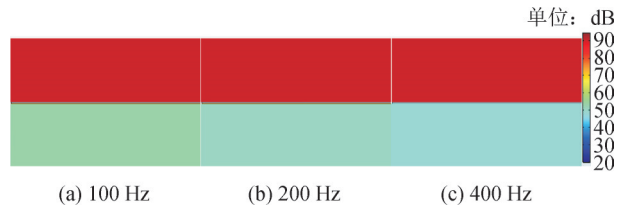


图6 钢板上下空气域声压级分布

Fig. 6 The distribution of sound pressure levels in air domain above and below steel plate

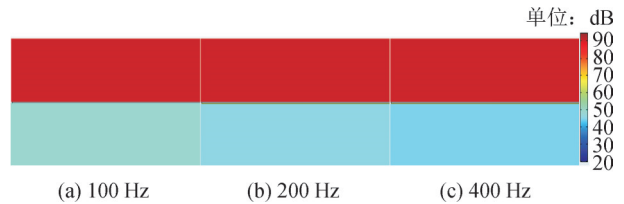


图7 自由阻尼隔声结构上下空气域声压级分布

Fig. 7 The distribution of sound pressure levels in the air domain above and below the free damping sound insulation structure

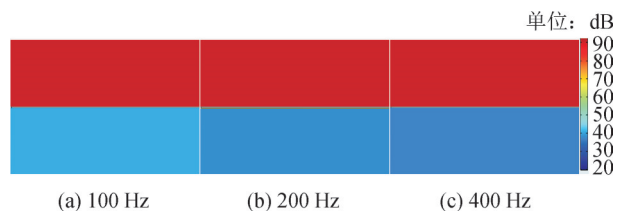


图8 约束阻尼隔声结构上下空气域声压级分布

Fig. 8 The distribution of sound pressure levels in the air domain above and below the constrained damping sound insulation structure

通过仿真发现,阻尼隔声结构各频段的隔声性能明显优于钢板,而约束阻尼隔声结构各频段的隔声性能又优于自由阻尼隔声结构,尤其是在模态控制区的低频段和吻合频率控制区的高频段,阻尼层不但起到提升隔声量的作用,还将共振频率和临界吻合频率调整至更高频段。这是由于基层和约束层的弹性模量远大于阻尼层,在受到弯曲振动时,其拉压变形远小于阻尼层的拉压变形,阻碍阻尼层

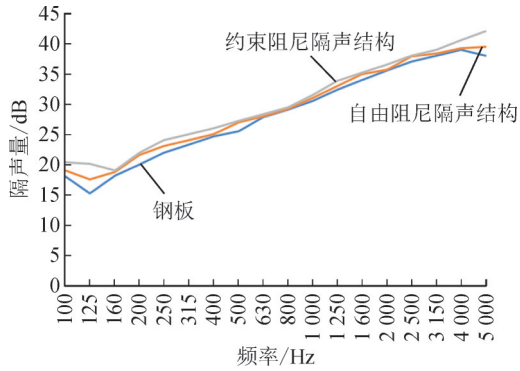


图9 不同隔声结构隔声性能曲线

Fig. 9 The sound insulation performance curves of different sound insulation structures

的拉伸和压缩,从而使阻尼材料内部产生剪切应变和剪切应力,利用粘弹性阻尼层的剪切效应来达到耗散振动能的作用。而约束阻尼结构与自由阻尼结构相比,由于在阻尼层的外侧增加了一层约束层的束缚,进一步限制了其剪切变形,从而可以提供更高的结构损耗因子,并可控多峰谐振,减振效果更优。由此可见,约束阻尼隔声结构的隔声特性与干式配电变压器的噪声特性相匹配,适宜于干式配电变压器使用。

4 试验测试分析

本项目为了研究适合干式配电变压器噪声特性的隔声壳体,利用约束阻尼隔声结构,依据 GB/T 19889.3—2005《声学建筑和建筑构件隔声测量第3部分:建筑构件空气声隔声的实验室测量》^[22],开展了不同材料种类、厚度等结构参数的影响分析。

4.1 刚性材料种类对声学性能的影响

选取钢板、铝板、玻镁板、水泥板,开展不同种类刚性材料的隔声性能测试,测试结果见图10。

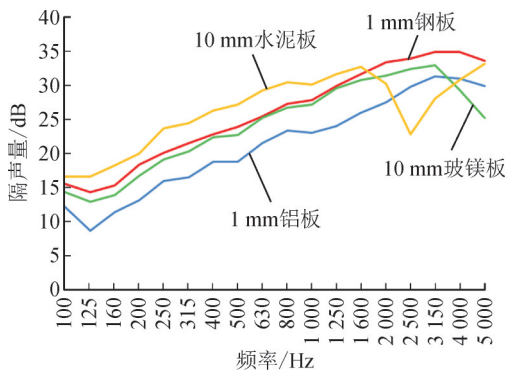


图10 不同材料种类刚性材料隔声曲线

Fig. 10 The sound insulation curves of different rigid materials

从图10中可以看出,隔声材料在频率比较低时,受板材刚度控制,隔声量随频率增加而降低;随

着频率的增加,质量效应增大,在125 Hz频率附近,刚度和质量效应共同作用而产生共振现象,此时板材的隔声出现极小值;当频率继续增高,质量起主要控制作用,这时,隔声量随频率增加而增大;当频率再继续增高时,水泥板和玻镁板会因吻合效应而使隔声效果大大下降,形成吻合谷,水泥板的临界吻合频率约为2500 Hz,玻镁板的临界吻合频率约为5000 Hz,而钢板和铝板由于临界吻合频率较高,超出频率测量范围,因而隔声量未出现明显下降。同时还可看出,钢板的隔声量明显高于铝板,且厚度明显低于水泥板和玻镁板。

4.2 阻尼材料种类对声学性能的影响

选取丁基橡胶、硅橡胶、天然橡胶与钢板进行复合,开展不同种类阻尼材料的隔声性能测试,测试结果见图11。

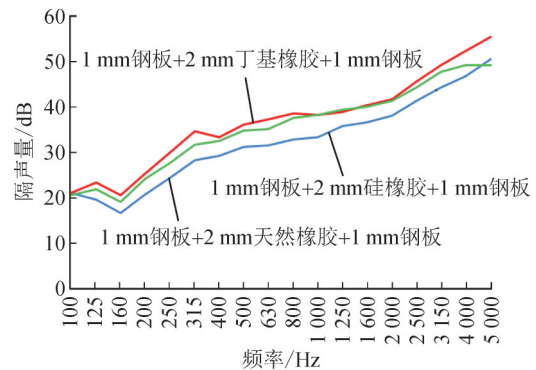


图11 不同阻尼材料种类隔声构件隔声曲线

Fig. 11 The sound insulation curves of sound insulation components with different damping material kinds

从图11中可以看出,添加阻尼材料后钢板的隔声性能显著提升,钢板的共振频率也提升至160 Hz附件,这是由于基层发生弯曲变形时,阻尼层会阻碍其变形,而约束层又会阻碍阻尼层变形,从而消耗能量,减弱噪声的向外传播;而不同种类阻尼材料对隔声性能提升效果不同,这是由于阻尼材料的损耗因子不同,常温下天然橡胶、硅橡胶、丁腈橡胶的损耗因子分别是0.2、0.3、0.4,损耗因子越大,橡胶材料的阻尼性能越强^[23-26],阻尼结构振动能量转化为热能越多,隔声性能越好,但隔声性能随损耗因子的增加不是线性的,而是当损耗因子增大到一定值时,隔声量增量放缓。

4.3 刚性材料厚度对声学性能的影响

选取厚度0.5、1.0、2.0 mm钢板与丁基橡胶进行复合,开展不同厚度刚性材料的隔声性能测试,测试结果见图12。

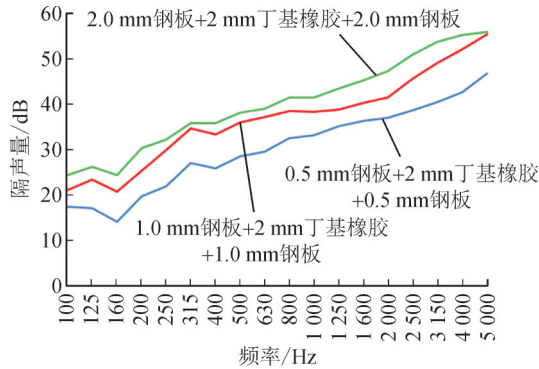


图12 不同刚性材料厚度隔声构件隔声曲线

Fig. 12 The sound insulation curves of sound insulation components with different rigid material thickness

从图12中可以看出,随着钢板厚度的增加,隔声构件各频率的隔声量均明显增加,但隔声量增大的幅值逐渐减小。这可依据隔声质量定律进行解释,当声波无规入射时,材料的隔声量可用式(1)进行计算

$$R = 20 \lg m + 20 \lg f - 48 \quad (1)$$

式(1)中: R 为隔声量, dB; m 为单位面积质量, kg/m^2 ; f 为入射声波的频率, Hz。

由此可见,隔声量是面密度的函数,两者之间属于对数关系,即面密度越大,隔声量越大,但增大的幅值逐渐减小。

4.4 阻尼材料厚度对声学性能的影响

选取厚度1.0、2.0、3.0 mm阻尼材料与钢板进行复合,开展不同厚度阻尼材料的隔声性能测试,测试结果见图13。

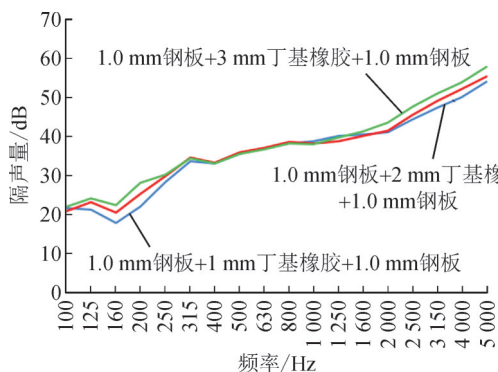


图13 不同阻尼材料厚度隔声构件隔声曲线

Fig. 13 The sound insulation curves of sound insulation components with different damping material thickness

从图13中可以看出,随着阻尼材料厚度的增加,隔声构件的整体隔声量有所提高,特别是在100~300 Hz的低频频段以及1 600~5 000 Hz的高频频段提升明显,这是由于阻尼材料对共振效应的抑制,以及将吻合频率提升至较高频率所致。由此可以看出,阻尼材料具有调节隔声构件特定频段隔声量的作用。

5 结论

文中针对干式配电变压器的噪声特性,采用仿真分析和试验测试相结合的方式,分析了不同结构类型、不同结构参数隔声材料对隔声性能的影响规律,得出结论如下:

1)干式配电变压器的噪声频谱主要位于500 Hz以下,并在100、200、400 Hz具有较为明显的波峰。

2)约束阻尼隔声结构具有比自由阻尼隔声结构和单层刚性材料更优越的隔声性能,尤其是在模式控制区的低频段和吻合频率控制区的高频段,阻尼层作用明显,适合干式配电变压器使用。

3)钢板对约束阻尼隔声结构隔声性能的影响极大,随材料厚度的增加,隔声性能随之增大,但增大幅值逐渐减小;添加阻尼材料可有效提升钢板的隔声性能,且随材料损耗因子的增加,隔声性能也随之增大,随材料厚度的增加,低频段和高频段隔声性能得到改善,还将共振频率和临界吻合频率调整至更高频段。

参考文献:

- [1] PIANA E A, ROOZEN N B. On the control of low-frequency audible noise from electrical substations: A case study[J]. Applied Sciences, 2020, 10(2): 10020637.
- [2] 孙文辉,潘明,徐梦潇,等. Dyn11型配电变压器负载损耗计算方法研究[J]. 变压器, 2024, 61(8): 6-11.
SUN Wenhui, PAN Ming, XU Mengxiao, et al. Research on load loss calculation method of Dyn11 distribution transformer[J]. Transformer, 2024, 61(8): 6-11.
- [3] 吴琼,李鸣,高方玉,等. 配电变压器数字孪生体构建技术研究[J]. 供用电, 2024, 41(1): 42-49.
WU Qiong, LI Ming, GAO Fangyu, et al. Research on digital twin construction technology of distribution transformer[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(1): 42-49.
- [4] 李世成,李思佳. 配电变压器性能数据统计分析[J]. 变压器, 2021, 58(6): 23-26.
LI Shicheng, LI Sijia. Statistical analysis of distribution transformer performance data[J]. Transformer, 2021, 58(6): 23-26.
- [5] 汲胜昌,师愉航,张凡,等. 电力变压器振动与噪声及其控制措施研究现状与展望[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 1-17.
JI Shengchang, SHI Yuhang, ZHANG Fan, et al. Review on vibration and noise of power transformer and its control measures[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 1-17.
- [6] 刘道生,李泽帅,李鹏,等. 变压器振动特性分析及其降噪技术研究综述[J]. 变压器, 2023, 60(7): 18-27.
LIU Daosheng, LI Zeshuai, LI Peng, et al. Review of characteristics analysis on vibration and technology research on reducing noise of transformers[J]. Transformer, 2023, 60(7): 18-27.
- [7] 韩玉莹,姚田彪,孙其凯,等. 直流偏磁对变压器运行噪声的影响

- 分析[J]. 变压器, 2022, 59(6): 65-69.
HAN Yuying, YAO Tianbiao, SUN Qikai, et al. Analysis on influence of DC bias on transformer operation noise[J]. Transformer, 2022, 59(6): 65-69.
- [8] 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.
- [9] 韩学, 宋文乐, 刘杨, 等. 不同铁磁材料变压器铁芯磁致伸缩及振动噪声特性分析[J]. 大电机技术, 2023(1): 68-73.
HAN Xue, SONG Wenle, LIU Yang, et al. Analysis of magnetostrictive vibration and noise performance in transformers with different iron core materials[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(1): 68-73.
- [10] 吴益明, 吴鹏, 刘红军, 等. 基于低磁致伸缩磁材的低噪声电抗器研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 268-272.
WU Yiming, WU Peng, LIU Hongjun, et al. Research on low-noise reactors based on magnetic materials with low magnetostriction[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 268-272.
- [11] 韩芳旭. 基于流固耦合方法的电力变压器电磁振动与噪声问题研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
HAN Fangxu. Investigation of power transformer electromagnetic vibration and noise problem based on fluid-structure coupling method[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [12] 黄俊. 10 kV 干式配电变压器工艺参数与振动噪声特性试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
HUANG Jun. Experimental study on process parameters and vibration noise characteristics of 10 kV dry-type distribution transformer[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [13] 胥建文, 徐莲环, 王新兵, 等. 基于有限元法的变压器振动噪声研究[J]. 山东电力技术, 2018, 45(5): 28-34.
XU Jianwen, XU Lianhuan, WANG Xinbing, et al. Study on vibration and noise of transformer based on the finite element method[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(5): 28-34.
- [14] 钟祥璋. 建筑吸声材料与隔声材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
ZHONG Xiangzhang. Sound absorption materials and sound insulation materials in building[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [15] 李伟. 多层声学结构振动与声学特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
LI Wei. Research on sound and vibration characteristics of multi-layer acoustic structures[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [16] 郑中原, 李俊, 李斌商, 等. 约束型复合阻尼隔声板的隔声性能及其应用研究[J]. 声学技术, 2020, 39(1): 76-80.
ZHENG Zhongyuan, LI Jun, LI Binshang, et al. Research on sound insulation performance and application of constrained composite damping sound insulation plate[J]. Technical Acoustics, 2020, 39(1): 76-80.
- [17] 杜善文. 粘弹性约束阻尼板的声振特性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
DU Shanwen. Vibro-acoustic properties of sandwich plates with constrained viscoelastic layer[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2019.
- [18] 王晓锋, 康鲁迪, 常道庆, 等. 球面波入射下约束阻尼板的隔声特性研究[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(6): 40-47.
WANG Xiaofeng, KANG Ludi, CHANG Daoqing, et al. Research on sound insulation characteristics of constrained damping plate under incident spherical wave[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2020, 41(6): 40-47.
- [19] 李康. 增强约束阻尼材料、结构设计及特性研究[D]. 南京: 南京大学, 2020.
LI Kang. Research on design and characteristics of enhanced constrained damping materials and structures[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [20] 张嵩阳, 王广克, 侯东, 等. 金属/橡胶阻尼层复合结构的隔声性能[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 273-276.
ZHANG Songyang, WANG Guangke, HOU Dong, et al. Sound insulation performance of metal/rubber damping layer composite structure[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 273-276.
- [21] 张鑫扬. 多层复合材料隔声特性研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2013.
ZHANG Xinyang. The acoustic characteristics research of multilayer composite material[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.
- [22] 声学建筑和建筑构件隔声测量 第3部分: 建筑构件空气声隔声的实验室测量: GB/T 19889.3—2005[S]. 2005.
Acoustics - measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements: GB/T 19889.3—2005 [S]. 2005.
- [23] 魏绪玲, 黄庆东, 龚光碧, 等. 丁基橡胶及卤化丁基橡胶阻尼材料的研究进展[J]. 合成橡胶工业, 2021, 44(2): 145-149.
WEI Xuling, HUANG Qingdong, GONG Guangbi, et al. Research progress of buty rubber and halobuty rubber damping materials[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2021, 44(2): 145-149.
- [24] 崔雄, 李鹏, 赵苗苗, 等. 减振阻尼材料设计方法研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(2): 642-646.
CUI Xiong, LI Peng, ZHAO Miaomiao, et al. Study on design method of vibration reduction damping materials[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(2): 642-646.
- [25] 薛晓锋, 胡兆同, 刘健新. 高阻尼橡胶耗能性能研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 70-73.
XUE Xiaofeng, HU Zhaotong, LIU Jianxin. Research on energy dissipation behavior of high damping rubber[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(3): 70-73.
- [26] 陶刚, 卢珣, 郭建华, 等. 宽温域宽频域高阻尼橡胶材料的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(11): 114-118.
TAO Gang, LU Xun, GUO Jianhua, et al. Preparation and properties of high-damping rubber with wide temperature range and frequency range [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(11): 114-118.
- 吴文庚(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网环境保护工作。
樊超(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事变电站噪声与振动控制工作(通信作者)(E-mail: fanchao006@126.com)。