

粒子阻尼减振降噪技术在配电房的研究与应用

肖望强¹, 刘启斌¹, 李斌², 徐永生², 刘磊², 钟正², 田杰³, 梁兆杰³

(1. 厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361102; 2. 特高压电力技术与新型电工装备基础国家工程研究中心(南方电网科学研究院), 广州 510663; 3. 深圳供电局, 广东 深圳 518001)

摘要: 针对配电设备振动引起的结构噪声扰民问题, 提出了基于粒子阻尼技术的振动噪声控制方案。建立变压器粒子阻尼的能耗模型, 根据能耗模型的耗能值对粒子参数进行优化, 并根据仿真得到的参数方案加工样机进行试验验证。试验结果表明: 粒子阻尼器采用两种铁基合金粒子搭配使用、粒径为 3 mm、填充率为 80 % 的填充方案时, 配电房一楼和二楼测点的加速度总有效值分别降低 66.68 %、88.33 %, 噪声幅值分别降低 14.53 dB、7.02 dB。所提方案为配电房领域的降噪设计提供了新的手段。

关键词: 配电变压器; 粒子阻尼器; 结构噪声; 减振降噪

Research and Application of Particle Damping Vibration and Noise Reduction Technology in Power Distribution Room

XIAO Wangqiang¹, LIU Qibin¹, LI Bin², XU Yongsheng², LIU Lei², ZHONG Zheng², TIAN Jie³, LIANG Zhaojie³

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361102, China; 2. National Engineering Research Center of UHV Technology and New Electrical, Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518001, China)

Abstract: A vibration and noise control scheme based on particle damping technology is proposed to address the problem of structural noise disturbance caused by vibration of power distribution equipment. An energy consumption model for transformer particle damping is established, particle parameters based on the energy consumption value of the energy consumption model are optimized, and the prototype is processed based on the parameter scheme obtained from simulation for experimental verification. The experimental results show that when two types of iron-based alloy particles are used in combination with the particle damper, with a particle size of 3 mm and a filling rate of 80 %, the total effective acceleration values of the measurement points on the first and second floors of the power distribution room are reduced by 66.68 % and 88.33 % respectively, and the noise amplitudes are reduced by 14.53 dB and 7.02 dB respectively. The proposed scheme provides a new means for noise reduction design in the field of power distribution rooms.

Key words: distribution transformers; particle dampers; structural noise; vibration and noise reduction

0 引言

随着我国经济的发展及人民生活水平的提高, 电力系统用电负荷逐渐增加。在城市用地日益紧张的情况下, 大量配电房建在住宅区附近, 甚至在居

民楼的第一层或地下。配变设备引发的噪声多为结构振动噪声, 该类噪声主要以 500 Hz 以下的中低频噪声为主, 具有穿透力强、衰减慢、声波长特点, 影响人群较广, 已成为公众关心、社会关注的热点问题, 因此其投诉量逐年上升, 解决配电房噪声污染已成为当前电网绿色发展的当务之急^[1-6]。

目前针对配电房噪声控制问题, 主要解决方法有噪声源头的降噪处理和传播过程的降噪处理。前者包括本体减振和冷却系统降噪, 具体措施包括: 降低铁心磁通密度、选用优质冷轧硅钢片、箱壁布

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875490); 福建省科技计划基金项目(2022H6003)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51875490); the Science and Technology Plan Fund of Fujian Province(2022H6003)。

置加强筋增加刚性从而减弱噪声。后者包括隔振控制和吸隔声控制,常用的隔振器材有弹簧隔振器、橡胶隔振器等,利用缓冲装置以降低因主变压器本身的扰力作用引起支承结构的振动以达到降噪的目的。吸隔声控制方法主要包括 box-in 技术、墙壁安装玻璃棉、多孔板、吸声棉等吸隔声材料,而以上措施主要针对中高频噪声效果比较好,低频噪声降噪效果差,同时安装麻烦、技术和成本要求高^[7-10]。基于粒子阻尼降噪技术的开发应用给配电设备噪声控制提供了新方法,该技术广泛运用在航空航天^[11-12]、齿轮传动^[13]、磨削加工^[14]、浮筏^[15]等领域减振降噪,具有很强的可靠性与适用性,可满足配电设备全寿命使用。

本文选择从振动根源入手,以变压器为研究对象,基于粒子阻尼技术提出了粒子阻尼低频减振降噪方案,在不改变设备主体内部结构的基础上通过提高本体阻尼实现低频振动噪声控制。通过离散单元法优化了阻尼器各项参数,获得最佳效果的阻尼器方案,并在某实际居民区配电房进行了现场试验,为解决配电房噪声治理问题提供了新方法。

1 变压器的振动类型与噪声特性分析

1.1 变压器的振动类型

噪声由振动产生,变压器等配电设备结构较为复杂,引起噪声的振动源众多,主要包括了兩

部分:配电设备的本体振动及冷却系统的机械振动,变压器的本体振动主要来源于铁心以及绕组振动^[16-19]。首先是交变磁通作用,因硅钢片等铁磁材料的非线性特性而引起的磁致伸缩变化导致铁心随着磁通密度和励磁频率产生周期性的振动^[20-23]。其次,绕组内部的线圈由于电磁感应效应在交变电流通过时会产生磁场,在该漏磁场中的绕组因受到电磁感应力而产生振动称为绕组振动^[24-26]。同时冷却系统产生的振动在传递过程中会与设备的本体振动叠加^[27-28],当二者的固有频率接近时设备机身或者油箱则会产生谐振进而导致噪声增大^[29]。

1.2 变压器噪声特性分析

对某小区处于工作状态下的电力变压器的现场环境噪声数据进行采集,测试方法按《GB/T 1094.10—2022 电力变压器 第 10 部分:声级测定》^[30]中规定,在变压器正前方 2 m、高度 1.5 m 位置布置测点,每个测点采集 5 组数据取平均值,改造前后的测试方法、测点、设备相同,测试仪器为北京东方所 INV9200 型声压传感器和 INV3062A 24 位云智慧采集系统。通过对采集的数据进行后处理分析得到其噪声频谱,如图 1 所示。

通过对设备周围采集到的环境噪声进行分析可知,配电噪声为宽频噪声,但噪声幅值大的频段主要为中低频段,高频段噪声幅值未超标,其中频率 200 Hz 处的噪声幅值最大,且低频噪声波长较

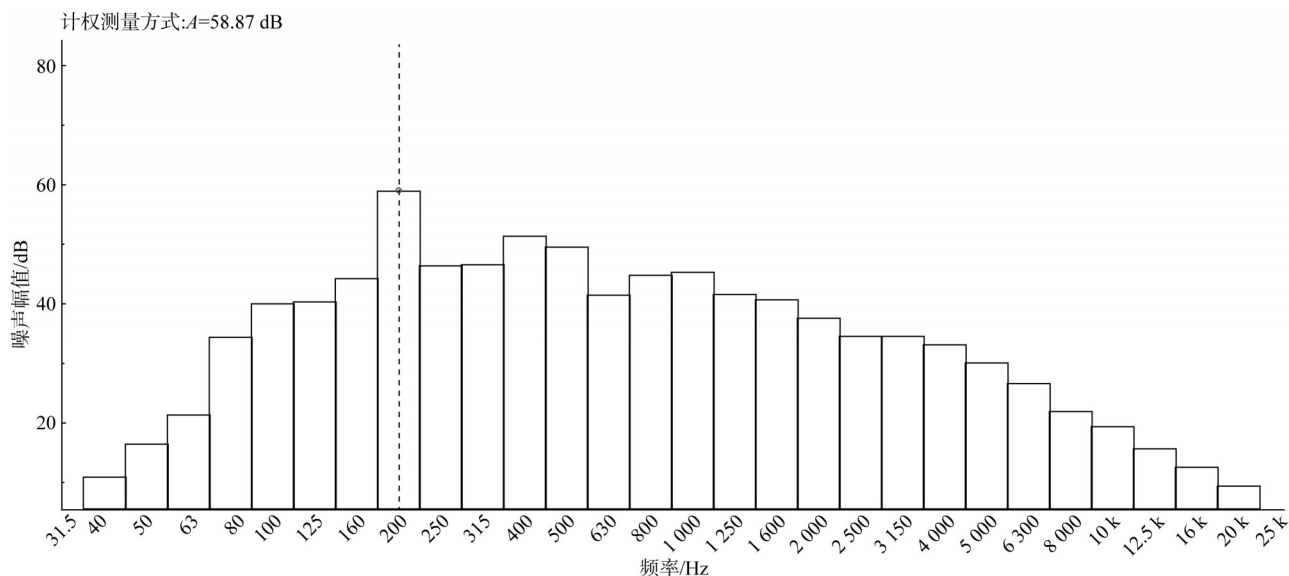


图 1 变压器环境噪声频谱图

Fig. 1 Spectrogram of transformer environmental noises

长、传播距离远、衰减慢、影响广,因此对配电噪声治理的重点应在中低频段上。

噪声的传播方式主要有两个:一是空气噪声,噪声通过空气直接向外传播并在传播过程中不断衰减;二是配电设备的振动传递到结构或墙体表面后,激发结构表面的空气振动,从而产生噪声,称为结构噪声。如图2所示,设备工作时产生的噪声主要有3种向外传播的途径:1)配电设备的本体振动和机械振动通过配电设备表面空气直接传播,为空气噪声(图2中红色曲线);2)配电设备的本体振动和附件的机械振动通过底座以及高低压母排以弹性波的形式向墙体、楼板等周围结构传递,激发结构微振并产生噪声,为一次结构噪声(图2中绿色曲线);3)当空气噪声传达结构表面时,引起结构再次微振动,由于该结构的微振动产生的噪声,称为二次结构噪声(图2中黄色曲线)。

小区配电房大多位于单独建筑或者地下室,并具有良好的封闭性,空气噪声的影响较低,影响居民的噪声主要为设备振动向墙体、屋架等结构传递而产生的结构噪声。

2 基于离散元法的阻尼器设计

2.1 粒子阻尼器外形设计

粒子阻尼器的尺寸越大、填充率越高,减振效果也会一定程度的提高,但也需要兼顾实际工况需求。本方案采用的粒子阻尼器由多个空腔结构组成,可填充不同材质、粒径的粒子,设计粒子阻尼器2套,如图3—4所示,安装示意图如图5所示。变压器粒子阻尼器用于降低配电设备振动向地面的

传递,母排粒子阻尼器用于降低配电设备振动通过高低压母排向墙体的传递。

2.2 粒子阻尼器的数学模型

本文基于软球模型的离散元方法。离散元法下的赫兹接触模型使用振动运动方程来模拟粒子与空腔内壁以及粒子之间的摩擦和碰撞。粒子接触过程中的振动可以分解为切向运动和法向运动,切向运动的振动形式主要有切向滑动和颗粒滚动^[31-34]。

2.2.1 力学方程

对于软球模型,粒子间以及粒子与边界的接触力均基于弹簧阻尼系统,同时引入弹性力与阻尼力。本文基于软球模型对粒子参数进行仿真分析,用P-P表示离散元模型中的粒子之间的作用状态,P-B表示粒子与阻尼器壳体之间的作用状态,粒子接触力学模型如图6所示。

法向作用力为:

$$F_{ij}^n = \begin{cases} k_{n1} \iint \ddot{s}_{n1} dt + 2\zeta_1 \sqrt{\frac{m_i m_j}{m_i + m_j}} k_{n1} \int \ddot{s}_{n1} dt, & \text{P-P} \\ k_{n2} \iint \ddot{s}_{n2} dt + 2\zeta_2 \sqrt{m k_{n2}} \int \ddot{s}_{n2} dt, & \text{P-B} \end{cases} \quad (1)$$

切向作用力为:

$$F_{ij}^t = \begin{cases} -\eta_1 \frac{F_{ij}^n}{\left| \int \ddot{s}_{t1} dt \right|} \int \ddot{s}_{t1} dt, & \text{P-P} \\ -\eta_2 \frac{F_{ij}^n}{\left| \int \ddot{s}_{t2} dt \right|} \int \ddot{s}_{t2} dt, & \text{P-B} \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_{ij}^n 为法向作用力; k_{n1} 、 k_{n2} 分别为粒子与粒子和阻尼器壳体之间的法向弹性指数;下标 $n1$ 和

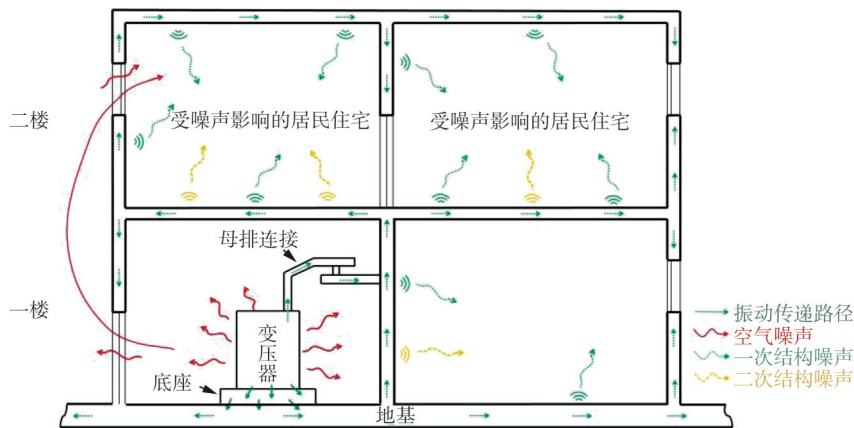


图2 变压器噪声传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of transformer noise propagation

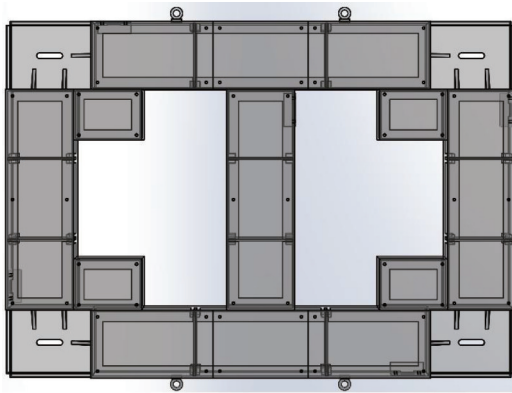


图3 变压器用阻尼器

Fig. 3 Transformer dampers

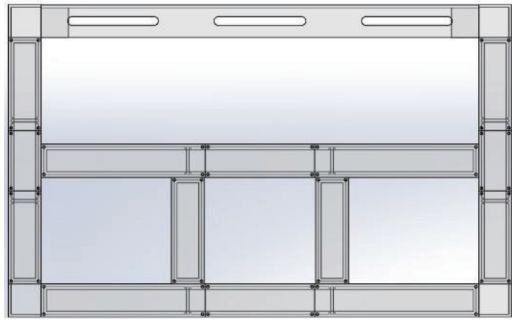


图4 母排用阻尼器

Fig. 4 Busbar damper

n_2 分别为粒子与粒子、粒子与阻尼器壳体之间的法向方向； $\ddot{s}_{n1}$ 为粒子 i 的法向加速度； η_1 、 η_2 分别为粒子与粒子和阻尼器壳体间的摩擦指数； $\ddot{s}_{n1}$ 粒子 i

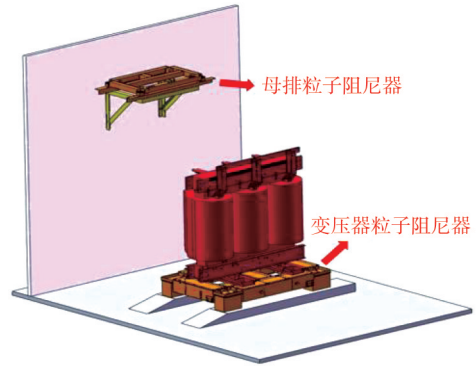


图5 粒子阻尼器安装示意图

Fig. 5 Schematic diagram of particle damper installation

的切向加速度； F_{ij}^t 为切向作用力； m_i 、 m_j 、 m 分别为粒子 i 、粒子 j 、阻尼器壳体的质量； ζ_1 、 ζ_2 分别为粒子 i 和粒子 j 间的阻尼比、粒子 i 和阻尼器壳体间的阻尼比。

法向弹性指数为：

$$\begin{cases} k_{n1} = \frac{2}{3} \left(\frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \right)^{-1} \left(\frac{4}{d_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{P-P} \\ k_{n2} = \frac{4}{3} \left(\frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \right)^{-1} \left(\frac{d_i}{2} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{P-B} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} s_{n1} = \frac{d_i + d_j}{2} - \left| \int \dot{P}_{ij} dt \right|, \text{P-P} \\ s_{n2} = \frac{d_i}{2} - \int \dot{P}_{iw} dt, \text{P-B} \end{cases} \quad (4)$$

式中： E_i 为粒子 i 的弹性模量； d_i 为粒子 i 的直径；

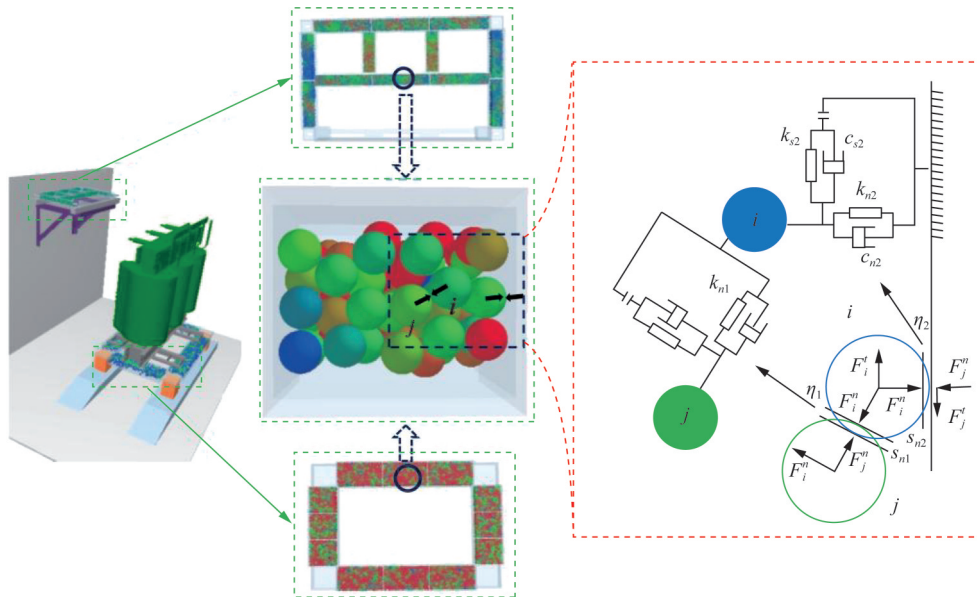


图6 粒子接触力学模型

Fig. 6 Particle contact mechanics model

d_j 为粒子 j 的直径; v_i 、 v_j 为粒子 i 和粒子 j 的泊松比; $\dot{\mathbf{P}}_{ij}$ 为粒子 i 、 j 之间的相对速度向量; $\dot{\mathbf{P}}_{iw}$ 为粒子 i 与阻尼器壳体之间的相对速度向量; s_{n1} 、 s_{n2} 分别为粒子 i 和粒子 j 间的法向重叠量、粒子 i 和阻尼器壳体间的法向重叠量。

2.2.2 运动方程

在振动传递过程中, 阻尼器中粒子在某一时刻运动方程为:

$$\begin{cases} m_i(\ddot{\mathbf{p}}_i - \mathbf{g}) = \sum_{j=1}^{z_i} (\mathbf{F}_{ij}^t + \mathbf{F}_{ij}^n) \\ \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_i = \frac{1}{I_i} \sum_{j=1}^{z_i} \mathbf{T}_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{T}_{ij}$ 为扭矩; $\ddot{\mathbf{p}}_i$ 、 $\ddot{\boldsymbol{\varphi}}_i$ 为粒子的加速度矢量、角加速度矢量; m_i 为粒子质量; I_i 为粒子的转动惯量; z_i 为某瞬间与粒子 i 同时接触的粒子数量。

对于 t 时刻的位移采用中心差分公式对式(5)进行求解, 积分两次得到位移的等式。

$$\begin{cases} p_i(t + \frac{\Delta t}{2}) = p_i(t) + \dot{p}_i(t + \frac{\Delta t}{2})\Delta t \\ \varphi_i(t + \frac{\Delta t}{2}) = \varphi_i(t) + \dot{\varphi}_i(t + \frac{\Delta t}{2})\Delta t \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta t = \frac{\pi r \sqrt{\frac{\rho}{G}}}{0.163v + 0.877} \times 20\% \quad (7)$$

式中: $p_i(\cdot)$ 、 $\varphi_i(\cdot)$ 分别为粒子 i 的平动位移和角位移; Δt 为计算时间步长; ρ 为粒子密度; G 为粒子切变模量; r 为粒子半径; $\dot{p}_i$ 、 $\dot{\varphi}_i$ 分别为粒子 i 的速度、角速度。

由式(6)可得到粒子新的位置, 并返回式(1)和式(2)计算, 产生新的接触力和力矩, 对上述过程反复迭代, 即可获得整个粒子群的实时运动状态。能量耗散计算流程如图7所示。

2.2.3 耗能机理

在设备振动激励作用下, 阻尼器填充的粒子获得动能, 但也通过非碰撞和摩擦耗散能量, 进而实现减振。其中摩擦力法向做功表示为:

$$\Delta E_n = \eta F_{ij}^n \Delta s_i \quad (8)$$

式中: η 为相互接触粒子的摩擦指数; Δs_i 为相互接触粒子的切向位移量。

两粒子相互碰撞时, 其碰撞做功表示为:

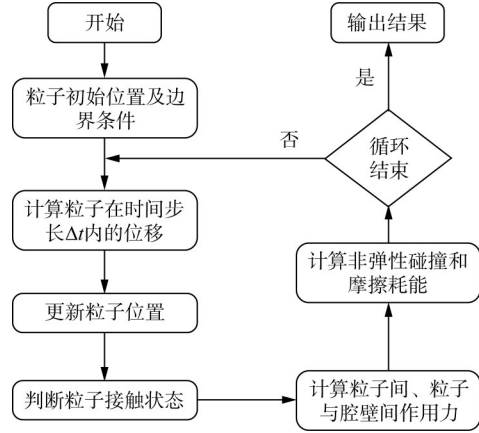


图7 能量耗散计算流程

Fig. 7 Energy dissipation calculation process

$$\Delta E_m = \frac{m_i m_j (1 - \mu^2)}{2(m_i + m_j)} |\Delta v|^2 \quad (9)$$

式中: μ 为粒子的恢复指数; Δv 为相互碰撞前的速度差。

因此, 基于配电设备的粒子阻尼系统离散元模型的总能耗 E 表示为:

$$E = \sum \Delta E_m + \sum \Delta E_n \quad (10)$$

3 粒子参数优化设计

粒子材质是影响阻尼器阻尼效果的主要因素, 其主要参数有: 弹性模量、密度、粒子恢复系数以及泊松比^[35], 不同的粒子参数所对应的阻尼效应不同。为了得到更高的减振效果, 可根据实际工况搭配不同材质粒子使用, 如铁基合金粒子与不锈钢粒子、陶瓷粒子与聚氨酯粒子等方案。本次采用两种铁基合金粒子搭配使用, 前者的弹性模量为210 000 MPa, 密度为7.9 e⁹T/mm³, 恢复系数为0.629, 泊松比为0.27, 后者的弹性模量为190 000 MPa, 密度为8.1 e⁹T/mm³, 恢复系数为0.847, 泊松比为0.31。

3.1 粒子粒径与耗能的关系

在阻尼器壳体有限的空间内, 不同的粒径影响着粒子的运动行程, 也影响到粒子系统的摩擦作用和碰撞次数。为研究配电设备运行工况下粒径对阻尼器的耗能效果, 本文以粒径2~5 mm 4种参数进行仿真分析, 填充率保持不变, 仿真过程如图8所示。

图8—9分别展示了两组粒子阻尼器不同粒径的模拟效果。表1为母排粒子阻尼器和变压器粒子

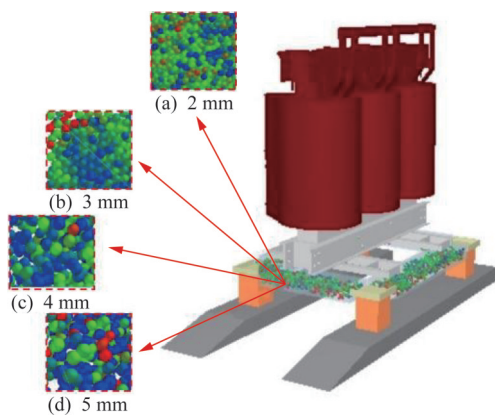


图8 变压器粒子阻尼器不同粒径

Fig. 8 Different particle sizes of transformer particle dampers

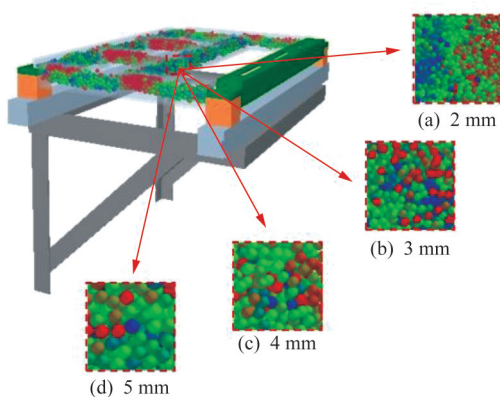


图9 母排粒子阻尼器不同粒径

Fig. 9 Different particle sizes of busbar particle dampers

阻尼器不同粒径方案的能量耗散情况。

表1 不同粒径阻尼器的能耗值

Tab. 1 Energy consumption values for different particle size dampers J

底座	粒径 2 mm	粒径 3 mm	粒径 4 mm	粒径 5 mm
变压器粒子阻尼底座	456	467	296	264
母线粒子阻尼底座	28	31	27	24

由表1分析可知,随着粒径增大,系统能量耗散出现先增大后减小的趋势,这是因为粒子的能量耗散主要由碰撞和摩擦能量耗散组成,在不同粒径条件下粒子的主要能量耗散方式不同。当粒子尺寸小时粒子之间的接触表面大大增加,则摩擦耗能增加,非弹性碰撞能量消耗减少。当粒子直径增加时单次碰撞的能量消耗增加,但较少的颗粒数据减少了摩擦和非弹性碰撞的次数,能量耗散减少,阻尼效果变差。在激励条件为变压器

工频 50 Hz 的工况下,当铁基合金粒子1以及铁基合金粒子2的粒径为 3 mm 时,粒子阻尼器系统能量总耗散最大,不同粒径的能耗变化情况如图 10 所示。

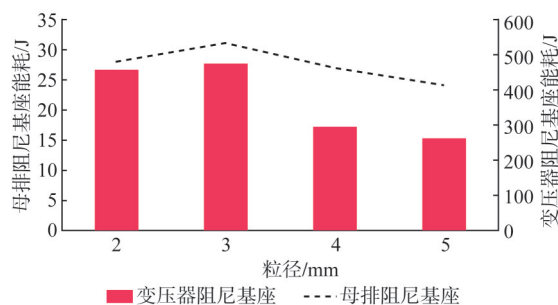


图10 不同粒径能耗情况

Fig. 10 Energy consumption of different particle sizes

3.2 粒子填充率与耗能的关系

在阻尼器壳体填充粒子过程中,由于粒子外观呈现球状,粒子的填充率并无法达到空腔体积的百分之百,故将空腔内能够填充的最大粒子体积看为百分之百的填充率。

在固定的容腔内,随着填充率的增加,粒子逐渐从非阻塞性粒子流演变为密实粒子排布弹性流,在前一种流态中,系统耗能主要以粒子的碰撞耗能为主,而在后一种流态,系统耗能则以粒子系统力链的压曲变形及组构粒子之间的相互剪切和摩擦耗能为主。为研究粒径 3 mm 的铁基合金粒子1和铁基合金粒子2不同填充率对粒子阻尼器的阻尼效应,分别设置 75 %、80 %、85 %、90 %、95 % 共 5 种填充率对两组阻尼器进行仿真探讨,表2则为不同填充率工况下粒子系统的能耗情况。

表2 不同填充率粒子阻尼器能量耗散情况

Tab. 2 Energy dissipation of particle dampers with different fill rates J

阻尼器	填充率/%				
	75	80	85	90	95
变压器粒子阻尼器	159.63	413.68	313.82	279.46	168.63
母排粒子阻尼器	24.66	39.16	30.5	28.09	26.57

由表2可得,粒径为 3 mm 的两种铁基合金粒子搭配使用,当粒子填充率取 80 % 时,整个粒子系统的总能量耗散最大。这是因为随着粒子填充率上升,整个粒子系统的非弹性碰撞和摩擦次数增加,则耗能增多;当粒子填充率过高时,大部分粒

子密集堆积,系统里粒子较小的运动行程限制了其碰撞和摩擦接触,粒子耗能减少,不同填充率的能耗变化情况如图 11 所示。

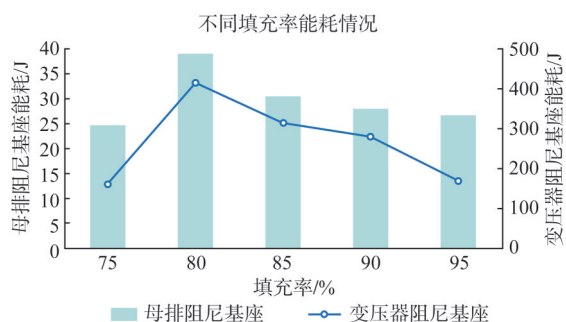


图 11 不同填充率能耗情况

Fig. 11 Energy consumption at different filling rates

4 减振效果实验验证

4.1 试验台改造搭建

选取某小区配电房改造进行试验测试。在粒子阻尼器安装前,对配电房内及二楼房间布置测点并采集振动和噪声数据,作记号以保证试验输入的一致性;安装变压器粒子阻尼器以及母排粒子阻尼器后对相同测点采集改造后的振动和噪声数据;对比两次采集到的数据得到粒子阻尼器安装前后结构的振动和噪声特性,总结粒子阻尼器的实际效果,粒子阻尼器实物如图 12—13 所示。



图 12 变压器粒子阻尼器样机

Fig. 12 Prototype of transformer particle dampers



图 13 母排粒子阻尼器样机

Fig. 13 Prototype of busbar particle dampers



图 14 改造前后对比

Fig. 14 Comparison before and after the transformation

4.2 减振降噪效果验证

为了确保所测数据及实际效果更为准确,测试方法依据《GB/T50355—2018 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》^[36]中规定,在振动敏感处布置测点,测试前后分别对加速度传感器进行校准,单组数据采集时长为 1 min,每个测点采集 5 组数据取平均值,评价量为 1/3 倍频程中心频率铅垂向振动加速度级,测试仪器为北京东方所 INV9821 型压电加速度传感器和 INV3062A 24 位云智慧采集系统。对设定好的测点进行测试采集,通过对比改造前后的 1~500 Hz 振动数据,验证此处改造的实际效果,具体数据如表 3 所示。振动数据采集测点如图 15 所示。

表 3 变压器改造前后振动数据(1~500 Hz)

Tab. 3 Vibration data before and after transformer transformation(1~500 Hz)

测点	安装前		安装后		减幅	
	总有效值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	总级值/ /dB	总有效值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	总级值/ dB	总有效 值/%	总级值/ dB
1	0.030 0	69.68	0.010 0	61.79	66.68	7.89
2	0.006 0	73.96	0.000 7	56.98	88.33	16.98

注:测点 1 为变压器正前方 1.5 米处地板,测点 2 为二楼房间变压器正上方地板处。



图 15 振动数据采集测点

Fig. 15 Vibration data acquisition measurement points

为了更直观体现粒子阻尼器安装前后的振动情况,对2个测点的振动数据进行频域和时域分析,如图16—19所示。

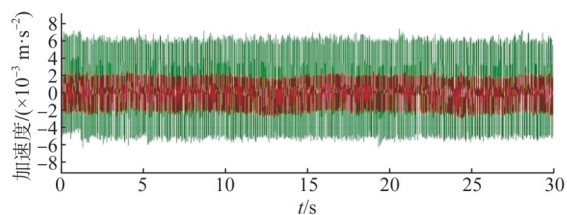


图 16 改造前后测点 1 振动时域曲线

Fig. 16 Vibration time-domain curves of measurement point 1 before and after transformation

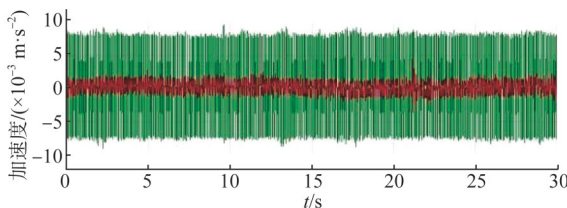


图 17 改造前后测点 2 振动时域曲线

Fig. 17 Vibration time-domain curves of measurement point 2 before and after transformation

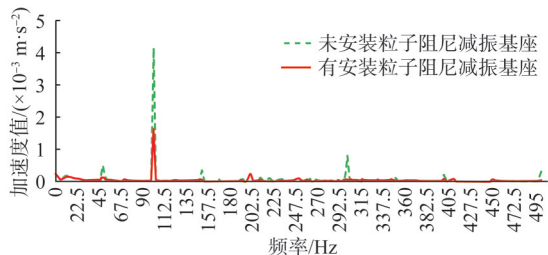


图 18 改造前后测点 1 振动频域曲线

Fig. 18 Frequency domain curves of measurement point 1 before and after transformation

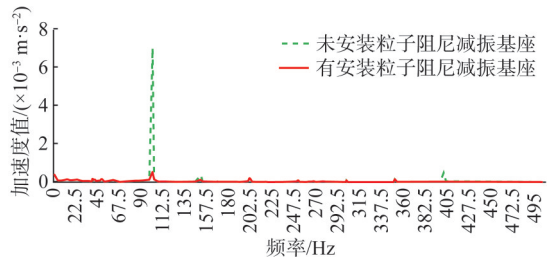


图 19 改造前后测点 2 振动频域曲线

Fig. 19 Frequency domain curves of measurement point 2 before and after transformation

图 19 中绿色曲线为未安装粒子阻尼器的响应曲线,红色曲线为安装粒子阻尼器的响应曲线。由图 19 可知,改造后 2 个测点的振动峰值均有明显的

削减。改造前,2 个测点在特征频率 100 Hz 处振动峰值均比较突出,经过改造后峰值分别下降了 60.58 %、91.96 %,改造前后对比减振效果优异,而 50 Hz、150 Hz、300 Hz 3 个频段的减振效果不明显,则是因为这 3 个频段改造前的振动幅值远远低于 100 Hz 的振动峰值,其对于振动超标的贡献率极小,因此可忽略不计。

由表 4 数据可知,安装两组粒子阻尼器后,测点 1 的噪声减幅为 14.53 dB,且改造前噪声幅值比较高的 200 Hz、315 Hz、400 Hz 和 500 Hz 等特征频率在改造后幅值均大幅度降低,说明安装粒子阻尼器能够有效降低因设备振动引起的结构噪声。噪声数据采集测点如图 20 所示。

表 4 变压器改造前后噪声数据

Tab. 4 Noise data before and after transformer transformation

频率/Hz	测点 1		测点 2	
	改造前	改造后	改造前	改造后
100	36.86	36.76	27.96	22.69
200	56.01	37.66	31.21	27.17
315	45.73	41.03	34.13	28.86
400	51.28	33.38	33.96	27.48
500	49.76	41.08	34.98	27.02
总级值	60.85	46.32	42.68	35.66
总级值减幅	14.53		7.02	

注:测点 1 为距离变压器 2 m 处,高度 1.5 m;测点 2 为二楼房间变压器正上方。



图 20 噪声数据采集测点

Fig. 20 Noise data acquisition measurement points

5 结论

针对配电设备振动引起的结构噪声扰民问题,本文提出了基于粒子阻尼技术的振动噪声控制方案,并对粒子参数进行了仿真优化和试验验证,得到以下结论。

1)基于某小区配电房变压器测试,获知配电噪声主要由变压器50 Hz工频及其倍频的特征频率振动引起的,配电噪声控制需着重考虑特征频率的低频振动。

2)为降低配电设备低频振动引起的配电噪声,提出了基于粒子阻尼的低频振动噪声控制方案,通过在设备底部以及母排安装粒子阻尼器,降低配电设备振动向地板、墙体等结构的传递。

3)基于离散单元法对粒子阻尼器的参数进行仿真研究,当两种铁基合金粒子搭配使用,粒径为3 mm,填充率为80%时,粒子阻尼器阻尼效果最好。

4)基于仿真分析得到的粒子参数方案加工样机开展试验验证,试验结果表明:安装粒子阻尼器后,变压器附近测点的加速度总有效值降低了66.68%,噪声幅值降低了14.53 dB,说明该方案能够有效降低变压器振动的传递,减少因振动引起的结构噪声。

参考文献

- [1] 许卫东,王林富,汪进,等.电力变压器噪声分析及控制技术综述[J].广东电力,2020,33(8):86-94.
XU Weidong, WANG Linfu, WANG Jin, et al. Research review on noise analysis and control technology of power transformers [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(8): 86-94.
- [2] 辛全金,李晓华,杨义,等.基于冗余卷积编解码器的变压器噪声抑制[J].中国电力,2023,56(4):112-118.
XIN Quanjin, LI Xiaohua, YANG Yi, et al. Research on transformer noise suppression based on redundant convolutional encoder decoder [J]. Electric Power, 2023, 56(4): 112-118.
- [3] 黄润鸿,李明,刘阳,等.换流站电力电容器塔噪声指向性的修正方法[J/OL].南方电网技术:1-7[2025-03-20].https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20240517004.
HUANG Runhong, LI Ming, LIU Yang, et al. Correction method of noise directivity of power capacitor stacks in converter station [J/OL]. Southern Power System Technology: 1-7 [2025-03-20]. https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/en/debutDetail.html?serialNum=20240517004.
- [4] 孟长虹,孔祥敏,王亚臣,等.超、特高压交直流输电线路可听噪声研究综述[J].南方电网技术,2023,17(5):145-152.
MENG Changhong, KONG Xiangmin, WANG Yachen, et al. Review on the research of audible noise from extra high voltage and ultra high voltage AC/DC Transmission Lines [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 145-152.
- [5] 张琛,石磊,赵宇彤,等.城市配电室噪声与振动控制分析[J].环境工程学报,2016,10(2):971-977.
ZHANG Chen, SHI Lei, ZHAO Yutong, et al. Analysis of noise and vibration control of urban power distribution room [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(2): 971-977.
- [6] 胡胜,李铁楠,周冠东,等.户内配电变压器低频噪声综合治理技术[J].湖南电力,2017,37(3):36-38.
HU Sheng, LI Tienan, ZHOU Guandong, et al. The comprehensive treatment technology for low-frequency noise of indoor distribution transformer [J]. Hunan Electric Power, 2017, 37(3): 36-38.
- [7] ELLINGSON E F. Transformer noise abatement using tuned sound enclosure panels [C]//1979 7th IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 1-6, 1979, Atlanta, Georgia, USA. New York: IEEE, 1979: 184-191.
- [8] 顾鸣伟,全旭,何守磊,等.变压器弹簧减振降噪装置的设计研究[J].机械工程与自动化,2018(5):116-118.
GU Mingwei, TONG Xu, HE Shoulei, et al. Study and design of vibration and noise reduction device for transformer [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2018(5): 116-118.
- [9] 李文鹏,刘海波,曹春诚,等.双非线性变压器基础隔振降噪研究[J].机械科学与技术,2020,39(12):1836-1843.
LI Wenpeng, LIU Haibo, CAO Chuncheng, et al. Investigation on the vibration isolation and noise reduction of dual-nonlinear isolation system for transformer [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(12): 1836-1843.
- [10] 曹浩,张万福,曾庆华,等.基于分布式动力吸振的变压器减振降噪研究[J].智慧电力,2021,49(11):105-111.
CAO Hao, ZHANG Wanfu, ZENG Qinghua, et al. Vibration and noise reduction of power transformer based on distributed tuned mass damper [J]. Smart Power, 2021, 49(11): 105-111.
- [11] 肖望强,黄自杰,刘汉武,等.基于柔性包袋阻尼器的蜂窝芯子暴露平台降冲击研究[J].振动与冲击,2024,43(4):96-104.
XIAO Wangqiang, HUANG Zijie, LIU Hanwu, et al. A study on impact reduction of a honeycomb core exposed platform based on a flexible bag damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(4): 96-104.
- [12] 游艳峰,吴治昌,张雷岳,等.大过载对固体火箭发动机粒子阻尼的影响[J].推进技术,2022,43(4):275-284.
YOU Yanfeng, WU Zhichang, ZHANG Leiye, et al. Large overload effects on particle damping in SRM [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(4): 275-284.
- [13] CHUNG Y C, WU Y R. Dynamic modeling of a gear transmission system containing damping particles using coupled multi-body dynamics and discrete element method [J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 98(1): 129-149.
- [14] 张兵,曹新城,孙浩,等.基于离散元素法的薄壁轴法兰磨削阻尼器设计[J].工具技术,2022,56(2):53-58.
ZHANG Bin, CAO Xincheng, SUN Hao, et al. Design of thin-walled shaft flange grinding damper based on discrete element method [J]. Tool Engineering, 2022, 56(2): 53-58.
- [15] LEI X, WU C, WU H. A novel composite vibration control method using double-decked floating raft isolation system and particle damper [J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(19): 4407-4418.
- [16] 黄国兴,阮学云,李志远,等.电力变压器缩尺模型振动试验及其声学模型[J].振动测试与诊断,2016,36(6):1116-1122,1237.

- HUANG Guoxing, RUAN Xueyun, LI Zhiyuan, et al. Vibration test and acoustic model of scaled model of power transformer [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis 2016, 36(6): 1116 – 1122, 1237.
- [17] 吴祺. 室内配变电设施双层隔振设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [18] 张锴, 罗家健. 住宅区典型配电房变压器标准化降噪方法[J]. 电工技术, 2021(20): 102 – 105, 109.
- ZHANG Kai, LUO Jiajian. Standard methods of transformer noise reduction for typical distribution room in residential area [J]. Electric Engineering, 2021(20): 102 – 105, 109.
- [19] 杨朝阳. 住宅小区公用配电站降噪措施研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [20] 陆昕, 钱帅伟, 韦承志, 等. 配电变压器噪声与振动控制分析[J]. 变压器, 2021, 58(1): 34 – 38.
- LU Xin, QIAN Shuaiwei, WEI Chengzhi, et al. Analysis of noise and vibration control of distribution transformer [J]. Transformer, 2021, 58(1): 34 – 38.
- [21] 李想, 肖军, 朱夕连. 变电站噪声问题分析与降噪措施研究[J]. 电子测试, 2021(8): 114 – 115, 88.
- LI Xiang, XIAO Jun, ZHU Xilian. Analysis of noise problems in substations and research on noisereduction measures [J]. Electronic Test, 2021(8): 114 – 115, 88.
- [22] 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.
- [23] 苏伟, 王昌田, 鲍怀谦. 志高小区变压器结构噪声分析与控制[J]. 声学技术, 2016, 35(4): 369 – 372.
- SU Wei, WANG Changtian, BAO Huaqian. Analysis and control of the transformer structure noise in Zhigao residential area [J]. Technical Acoustics, 2016, 35(4): 369 – 372.
- [24] 申丹. 配电变压器的噪声控制技术研究与应用[D]. 淄博: 山东理工大学, 2018.
- [25] 汪泽州, 沈春林, 顾卫华, 等. 小区配电变压器主动降噪装置的研制探析[J]. 现代工业经济和信息化, 2016, 6(12): 73 – 75.
- WANG Zezhou, SHEN Chunlin, GU Weihua, et al. Development and analysis of active noise reduction device for residential distribution transformers [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2016, 6(12): 73 – 75.
- [26] 李诚理. 配电房干式变压器噪声分析及减振降噪处理[J]. 机电信息, 2020(2): 70 – 71.
- LI Chengli. Noise analysis and vibration reduction and noise reduction treatment of dry-type transformers in distribution rooms [J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(2): 70 – 71.
- [27] 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.
- [28] 王攀. 小区干式变压器结构噪声污染分析与治理[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
- [29] 洪陈玉. 小区变压器环境振动传播与隔振研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [30] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器 第10部分: 声级测定: GB/T 1094.10—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [31] 肖望强, 余少炜, 林昌明, 等. 基于颗粒阻尼的PCB动力学与电路联合设计研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(10): 124 – 132.
- XIAO Wangqiang, YU Shaowei, LIN Changming, et al. Research on joint design of dynamics and circuit for pcb based on particle damping [J]. Journal of Vibration And Shock, 2019, 38(10): 124 – 132.
- [32] O' SULLIVAN C. Particle-based discrete element modeling: geomechanics perspective [J]. International Journal of Geomechanics, 2011, 11(6): 449 – 464.
- [33] 张镇. 颗粒阻尼系统减振特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [34] XIAO W, HUANG Y, JIANG H, et al. Effect of powder material on vibration reduction of gear system in centrifugal field [J]. Powder Technology, 2016(294): 146 – 158.
- [35] 苏凡, 张航, 尹忠俊. 颗粒物质流变学行为和材料参数对颗粒阻尼器能量耗散的影响[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 238 – 244.
- SU Fan, ZHANG Hang, YIN Zhongjun. Effects of rheology behaviour and material parameters of granular material on energy dissipation of a particle damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 238 – 244.
- [36] 中国建筑科学研究院有限公司. 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准: GB/T 50355—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

收稿日期: 2024-01-27; 网络首发日期: 2024-06-25

作者简介:

肖望强(1981), 男, 通信作者, 教授, 博导, 博士, 研究方向为高端装备减振降噪, wqxiao@xmu.edu.cn;

刘启斌(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为高端装备减振降噪, lqbxxmu@163.com;

李斌(1982), 男, 高级工程师, 硕士, 从事输电线路绝缘与电磁环境方面的研究工作, libin@csg.cn.