

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.03.022

双通道有源降噪次级声源优化布放的研究

闫孝姮^{1,2}, 查鹏程^{1,2}, 刘国强^{2,3}, 张超^{2,3}

(2. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 101407)

摘要: 由于电力变压器的磁致伸缩现象向外辐射高分贝噪声,严重影响站内工作人员及附近居民工作与生活。文中以电力变压器有源降噪为目标,通过测量与分析变压器噪声成分,建立3个偶极声源条件下的有源降噪模型,给出模型中次级声源的最优角度;采用自适应滤波算法,对电力变压器噪声进行有源降噪可行性仿真分析;搭建基于LMS算法的DSP双通道有源降噪系统,并与单通道降噪系统进行实验对比,实验结果表明,当两次级声源 θ 位于模型中 180° 角时,降噪效果优于单通道有源降噪系统,可达到 $10\sim 14$ dB的降噪效果。

关键词: 有源降噪; 次级声源; 最优角度; 双通道;

Research on Optimal Placement of Dual Channel Active Noise Reduction Secondary Sound Sources

YAN Xiaoheng^{1,2}, ZHA Pengcheng^{1,2}, LIU Guoqiang^{2,3}, ZHANG Chao^{2,3}

(1. Department of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China; 2. Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. School of Electronic Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China)

Abstract: Due to the phenomenon of magnetostriction of power transformer radiating high-decibel noise, seriously affecting the work and life of staff in the station and nearby residents. In this paper, the active noise reduction of power transformer is the goal. By measuring and analyzing the noise components of the transformer, an active noise reduction model of three dipole sources is established, and the optimal angle of the secondary sound source in the model is given. The adaptive filtering algorithm is adopted to simulate the feasibility of active noise reduction for power transformer noise. The DSP dual channel active noise reduction system based on LMS algorithm is constructed and compared with the single-channel noise reduction system. The experimental results show that the noise reduction effect is better than the single-channel active noise reduction system when the secondary sound source θ is located at 180° in the model, and the noise reduction effect of $10\sim 14$ dB can be achieved.

Key words: active noise reduction; secondary sound source; optimum perspective; dual channel

0 引言

晋东南—南阳—荆门特高压输电工程的成功运行,标志着中国特高压交流输电工程从示范阶段进入大规模建设阶段。然而电力变压器向外辐射的高分贝噪声严重影响站内工作人员及附近居民工作与生活^[1-2]。传统的无源降噪技术大多是采用

改造变压器本体结构或增加隔声材料的方法,但是会增加变压器的制作成本,并且隔声材料对于低频噪声的效果并不显著^[3-4]。有源降噪技术即利用扩声设备产生声信号与噪声信号实时抵消,近年来得到广泛关注^[5]。

最早的有源降噪装置由美国RCA公司设计,但只在次级声源轴线两侧非常窄的范围内达到降噪^[6]。

随后 T.Berge 开始尝试在有源降噪中引入闭环控制, 将误差信号反馈给控制电路并进行实验, 但数据更新速度无法满足实时性要求^[7]。与此同时 K.H.Baek 和 S. J.Ellilott 等人应用遗传算法和模拟退火算法预测次级声源位置, 并进行了比较, 发现次级声源位置的布放对降噪效果也会有一定的影响^[8]。在国内, 山东大学的赵彤等分析了滤波阶数以及采样频率对降噪效果的影响, 通过单通道有源降噪实验, 在误差传感器处取得了一定的降噪效果^[9]。武汉大学的刘姜涛提出了通过粒子群算法来寻找误差传感器的最优位置的方法, 对变压器有源降噪的优化设计具有重要的意义^[10]。

文中在单通道有源降噪系统的研究基础上, 提出一种基于自适应滤波算法的双通道有源降噪方法, 并对次级声源进行优化布放的研究。通过对山西省 1 000 kV 特高压变电站进行噪声数据的测量与分析, 建立 3 个偶极声源条件下的有源降噪模型, 研究三偶极声源声场相消特性, 找出次级声源布放最优角度, 搭建了基于自适应滤波算法的 DSP 双通道有源降噪系统, 并对理论进行实验验证, 为特高压变压器降噪提供了一种新思路。

1 特高压变压器噪声的频谱分析

电力变压器噪声的来源主要是本体和冷却系统的振动。变压器本体噪声主要是交变磁场作用下硅钢片的磁致伸缩现象引起的铁心振动^[11-12], 同时硅钢片的连接处及叠片之间有漏磁现象, 其产生的电磁力会引起变压器铁心的振动发出噪声^[13]。但是与磁致伸缩所产生的噪声相比, 漏磁产生的噪声比较小^[14], 一般可以忽略, 因此磁致伸缩效应是导致变压器辐射噪声的主要原因。文中所研究变压器为油浸式变压器, 由铁心与绕组的机械振动产生的声波, 通过在油中传播引起变压器箱体的振动最终通过空气介质在空中传播^[15-16]。

分别采用声压法与振动法对山西省 1 000 kV 特高压变压器噪声进行测量, 通过对采集数据的时域与频域分析可知变压器噪声以频率 600 Hz 以下的中低频噪声为主, 且主要集中于 100 Hz 及其整数倍频处, 频率主要分布在 100、200、300、400 Hz, 归一化幅值最大点对应的频率大多为 100、200、300 Hz, 故降噪方式采用低频有源降噪方案。其对应时域图与频谱见图 1。

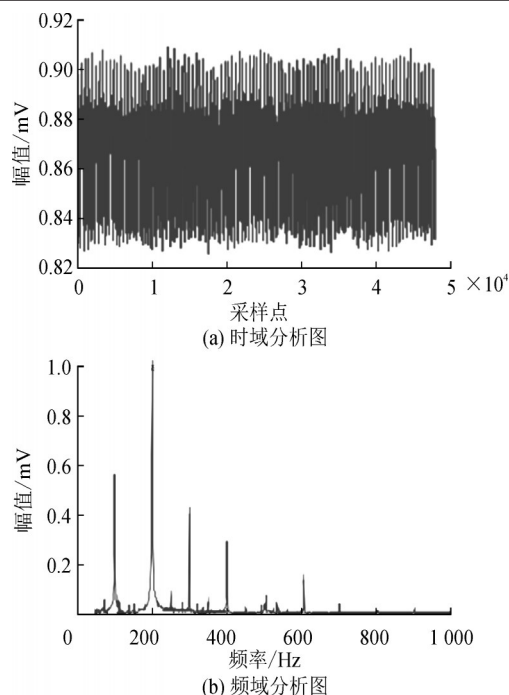


图1 变压器噪声时域频域分析图

Fig. 1 Transformer noise time-domain frequency domain analysis

2 偶极子声场模型与自适应滤波算法

2.1 三偶极声源声场模型

偶极声源是由两个相距很近, 并以相同振幅而相位相反的小脉动球源组成的声源^[17], 两个小脉动球源之间距离为 d , 且距离的中点为 O 。

单个小脉动球源在场点 p 处产生的声压为

$$p = \frac{A}{r} e^{-jkr} \quad (1)$$

式(1)中: r 为场点 p 到 midpoint O 的距离; k 为波数, 为角频率与声速的比值。由于声压为标量, 在场点 p 处可以叠加, 因此两个小脉动球源在场点 p 处的声压为

$$p = \frac{A}{r^+} e^{-jkr^+} - \frac{A}{r^-} e^{-jkr^-} \quad (2)$$

式(2)中: r^+ 为场点 p 到正极性小脉动球源的距离; r^- 为场点 p 到负极性小脉动球源的距离。当 $r \gg d$ 时, 场点 p 到两个小脉动球源的距离近似用 r 表示, 但要考虑相位的差异, 因此有如下关系:

$$r^+ \approx r + \frac{d}{2} \cos \theta \quad (3)$$

$$r^- \approx r - \frac{d}{2} \cos \theta \quad (4)$$

式(3)、(4)中, θ 为方位角, 定义为以正极指向负极所构成的边界与两个小脉动球源中点到场点 p 的夹角。将式(3)、(4)代入式(2), 可得

$$p \approx \frac{A}{r} e^{-jkr} (-2j \sin \frac{kd \cos \theta}{2}) \quad (5)$$

由于两个小球之间距离很小,当振动频率不高时,有 $kd < 1$, 式(5)等价于

$$p \approx -j \frac{kAd}{r} \cos \theta e^{-jkr} \quad (6)$$

扬声器依靠纸盆振动发声,纸盆面可看作由无数个点声源共同作用下的效果,因此实验室进行有源降噪方法的研究时,通常采用扬声器来模拟变压器噪声源,而扬声器在低频时可看作偶极声源模型。为达到局部区域降噪效果,文中构建三偶极声源模型,即一个模拟变压器本体噪声的初级声源和两个用于有源降噪的次级声源。其模型结构与位置见图2。

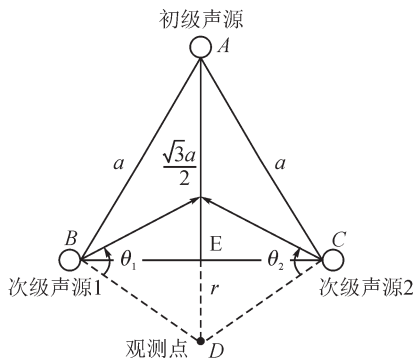


图2 三偶极声源位置结构图

Fig. 2 Three dipole sound source location structure chart

因为声压为标量可叠加,由式(6)可以得出在3个偶极声源作用下观测点D处的声压为

$$p = \frac{-jkAd}{\frac{\sqrt{3}}{2}a + r} e^{-jk(\frac{\sqrt{3}}{2}a + r)} - \frac{jkAd}{\sqrt{r^2 + (\frac{a}{2})^2}} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) e^{-jk(\sqrt{r^2 + (\frac{a}{2})^2})} \quad (7)$$

式(7)中: a 为各声源之间的距离; r 为 midpoint E 到观测点的距离; θ_1 表示以 B 为原点, BD 为起始边逆时针旋转的角度; θ_2 为以 C 为原点, CD 为起始边顺时针旋转的角度。通过仿真将两个次级声源旋转一周找到最佳匹配角度达到降噪量最大化,其不同角度声压分布图见图3。

从仿真结果可知,当两个次级声源旋转角度为 0° 或 360° 时,即仍在初始方向,观测点处声压最高,当各自旋转 180° 时,观测点处声压最低,故选取3组角度即次级声源3组方向来进行实验验证。

2.2 自适应滤波算法原理

自适应滤波算法包括自适应算法与滤波器,其中滤波器的权系数由自适应算法来调整。相比较其他滤波器,有限脉冲响应滤波器(FIR)稳定性要更好^[18-20],文中采用最小均方算法(least mean square,

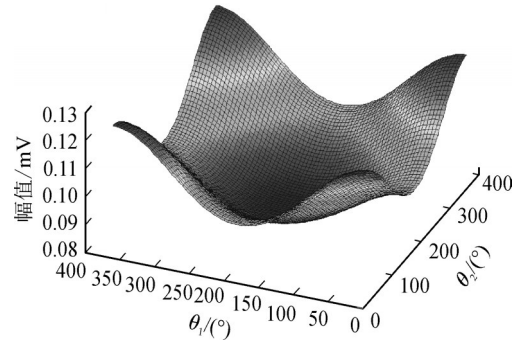


图3 三次级声源不同角度声压分布图

Fig. 3 Three dipole sound source location structure chart

LMS)。自适应滤波结构图见图4。其中 $x(k)$ 为参考信号即实验中的初级声源发出的信号, $d(k)$ 为期望信号, $e(k)$ 为误差信号即从次级声源处采集的信号, $y(k)$ 为输出信号代表次级声源最终的输出信号。假定滤波器阶数为 L ,权系数为 $w_l(k) (l=1,2,\dots,L)$,则输出信号 $y(k)$ 可以表示为

$$y(k) = \sum_{l=1}^L w_l(k) x(k-l+1) \quad (8)$$

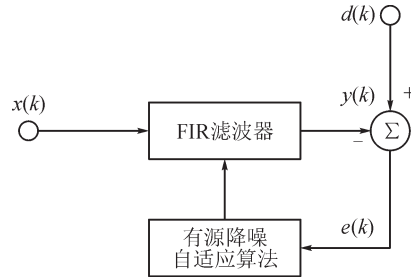


图4 自适应滤波结构图

Fig. 4 Adaptive filter structure

参考信号 $x(k)$ 与滤波器权系数 W 可以表示为

$$X(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-L+1)]^T \quad (9)$$

$$W(k) = [w(k), w(k-1), \dots, w(k-L+1)]^T \quad (10)$$

由式(8)-(10)可得输出信号 $y(k)$

$$y(k) = X^T(k)W(k) = W^T(k)X(k) \quad (11)$$

则 K 时刻的误差信号 $e(k)$ 为

$$e(k) = d(k) - y(k) = d(k) - W^T(k)X(k) \quad (12)$$

若 μ 为收敛系数即步长因子,则权系数的自适应迭代公式为

$$W(k+1) = W(k) + 2\mu e(k)X(k) \quad (13)$$

2.3 基于LMS算法的有源降噪仿真分析

通过上文对噪声的频谱分析可知,初级声源的噪声频率主要集中在100 Hz及其倍频上,频率成分见表1。

表1 初级声源成分组成

Table 1 Primary sound source composition

频率/Hz	100	200	300	400	500	600
幅值/V	0.58	1.00	0.40	0.28	0.10	0.18

噪声信号频率基本在 1 kHz 以下, 在满足采样定理的基础上, 设置采样频率与 DSP 实际采样频率相一致, 每通道采样数为 2 000, $m=10^{-3}$, $L=20$ 。仿真结果见图 5。图 5 中: 图 5(a) 表示初级声源信号即参考信号, 图 5(b) 表示误差信号, 图 5(c) 表示通过 LMS 自适应滤波算法达到的降噪量。

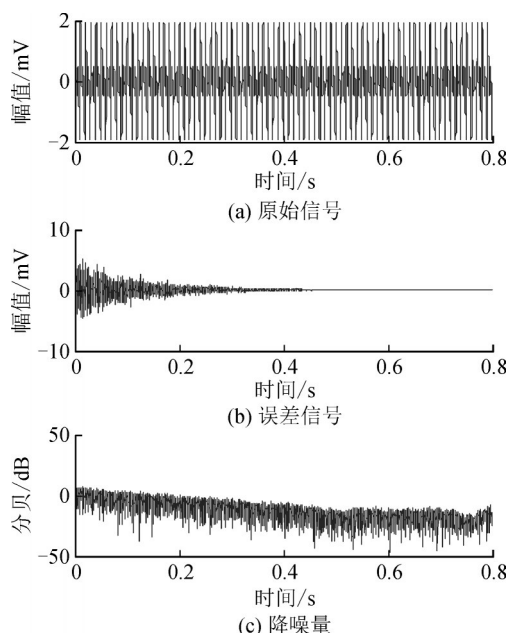


图 5 自适应滤波仿真效果图

Fig. 5 Adaptive filtering simulation renderings

由仿真结果可知通过自适应滤波算法后, 初始时刻降噪量较小, 最终误差信号逐渐趋向于 0, 系统逐渐稳定, 稳定后系统最大降噪量达到约 30 dB。

3 双通道自适应有源降噪系统

3.1 双通道自适应有源降噪系统硬件系统设计

双通道自适应有源降噪系统硬件部分主要包括声压采集模块、信号处理模块、次级声源模块 1、2 以及两个误差传感器, 硬件系统结构见图 6。

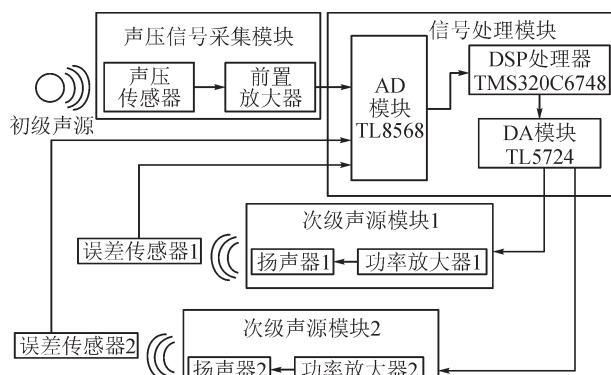


图 6 双通道有源降噪系统结构图

Fig. 6 Double-channel active noise reduction system structure

1) 声压信号采集模块。声压采集模块包括声压传感器与四通道前置放大模块, 传声器选用杭州爱华仪器有限公司的 AWA14423L 型声压探头, 探头灵敏度可达到 37.6 mV/Pa; 前置放大模块以 NE5532 运算放大器为核心。声压传感器负责采集初级声源发出的信号, 并将采集的信号送至前置放大模块进行信号放大处理, 提供给信号处理模块。

2) 信号处理模块。信号处理模块包括 AD 模块 TL8568、DSP 处理器 TMS320C6748、DA 模块 TL5724, 其中 TMS320C6748 主频可达到 456 MHz, 处理速度最高达到 3 648 MIPS, 相比同等 6000 系列处理器处理浮点数性能更高功耗更低, 非常适合降噪系统实时检测与控制的需求。由声压信号采集模块获取的信号通过 AD 模数转换进入 DSP 控制器进行算法处理, 并将处理后的信号通过 DA 数模转换送至次级声源发生模块。

3) 次级声源模块。两通道有源降噪系统包含两个次级声源模块, 每个次级声源模块包括功率放大器以及扬声器, 同时为了防止信号之间的干扰, 各部分结构的连接线使用专用音频信号线, 使得抗干扰能力更强。

硬件实验系统见图 7。



图 7 硬件系统实物图

Fig. 7 Hardware system diagram

3.2 实验验证

3.2.1 同一观测点不同摆放角度降噪效果验证

为证实双次级声源不同角度的降噪效果并找出声压最低点, 按图 3 仿真结果选取 3 组角度进行实验验证, 其中 3 组角度方案示意图见图 8。

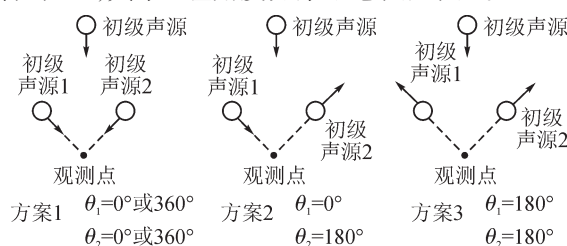


图 8 3 组角度方案示意图

Fig. 8 Three groups of perspective program diagram

实验流程是首先将次级声源位置固定,选取仿真图3中声压最高、最低以及中等水平时的角度来对同一观测点进行验证,然后再进行单通道与多通道的降噪效果比较,来验证双通道更具有优势。3组角度情况下,观测点处的实验数据(单位/dB)见表2。

表2 次级声源不同角度的声压值

Table 2 Secondary sound source at different angles of pressure value

参数	原噪声/dB	单通道/dB	双通道/dB
$\vartheta_1=0^\circ, \vartheta_2=0^\circ$	59.6	62.8	66.2
$\vartheta_1=0^\circ, \vartheta_2=180^\circ$	59.6	62.8	59.4
$\vartheta_1=180^\circ, \vartheta_2=180^\circ$	59.4	54.8	48.2

由表2可知,次级声源的旋转角度对观测点处的声压值有着重要的影响,声压分布基本与图3的仿真结果吻合,当次级声源的旋转角度 0° 时,观测点处声压值最大降噪量最小;当次级声源的旋转角度都为 180° 时,此时观测点处声压值最小降噪量最大。

3.2.2 不同观测点单双通道降噪效果验证

为检测三组角度下的部分区域的降噪效果,实验从观测点处,每隔10 cm选取一个观测点,每组实验共十个观测点。同时进行单通道与多通道的降噪效果的对比,并将所得的实验数据通过MATLAB绘制成曲线图见图9-11。

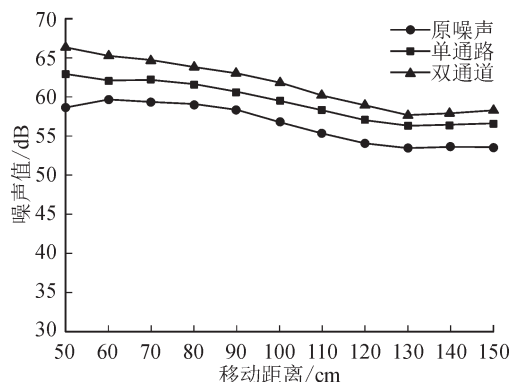


图9 方案1中的双通道与单通道降噪系统降噪结果

Fig. 9 The noise reduction results of the dual-channel and single-channel noise reduction system in scheme one

由图9可知,初始原噪声分贝值在58 dB左右,并随着观测点的后移而逐渐减小。当次级声源角度选择 0 或 360° 时,降噪区域随着通道数的增加,噪声值也在变大,符合仿真图3中4个边角的声压分布效果。

由图10可知,当以方案2来摆放次级声源时,只开启旋转角度为 0° 的次级声源1时,降噪区域内各观测处的声压值均增大,当开启双次级声源时,区域内观测点处声压值下降,证实次级声源朝向角

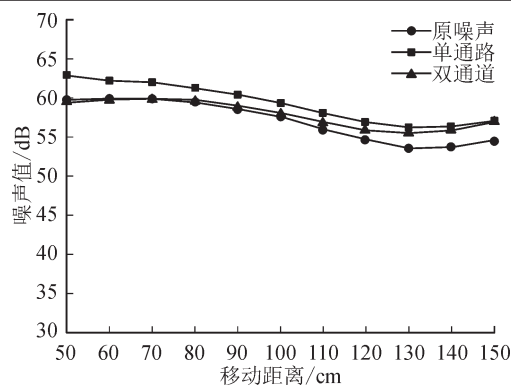


图10 方案2中的双通道与单通道降噪系统降噪结果

Fig. 10 The noise reduction results of the dual-channel and single-channel noise reduction system in scheme two

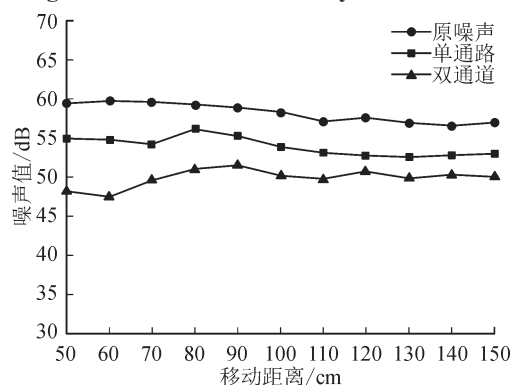


图11 方案3中的双通道与单通道降噪系统降噪比较结果

Fig. 11 The noise reduction results of the dual-channel and single-channel noise reduction system in scheme three

度对观测点处的声压分布有重要的影响。

由图11可知,当选择方案3的角度进行摆放时,降噪量较为明显,单通道系统降噪量在7 dB左右,双通道系统降噪量最大可达到13 dB左右,而且效果明显优于前两种方案,实验符合仿真结果,证实方案3的角度摆放最优,在选择最优角度的同时,也证实了双通道的降噪效果优于单通道降噪系统。

4 结论

文中以电力变压器为研究对象,对所采集的变压器噪声数据进行频谱分析,在实验中以扬声器模拟变压器噪声源,同时建立三偶极子声源模型,设计双通道有源降噪系统,并对次级声源进行优化摆放,找出最优摆放角度,最终可得出以下结论:

1)通过对特高压变压器噪声的频谱分析以频率600 Hz以下的中低频噪声为主,且主要集中于100 Hz及其整数倍频处,频率主要分布在100、200、300、400 Hz。

2)通过对三偶极子声源模型的建模与分析可知,当两个 θ 角旋转 0° 或 360° 时观测点处声压值最

大,当两个次级声源旋转 180° 时,观测点出声压值最小,降噪量最大。

3)文中为实现更好的降噪效果采用自适应滤波算法,并对该算法进行仿真分析,仿真结果可知,在选择合理的参数配置下,能使系统更快趋于稳定,实现最优降噪效果。

4)最终文中设计基于 LMS 算法的双通道有源降噪系统进行实验验证。通过次级声源不同角度位置降噪效果的对比,证实次级声源旋转 180° 时降噪效果最好;同时在选择最优角度条件下,双通道有源降噪系统降噪效果优于单通道有源降噪系统降噪,降噪量最大可达至 14 dB,也证实双通道有源降噪系统的可行性。

参考文献:

- [1] 谭 闻,张小武. 电力变压器噪声研究与控制[J]. 高压电器,2009,45(2):70-72.
TAN Wen, ZHANG Xiaowu. Power transformer noise research and control[J]. High Voltage Appliances, 2009, 45 (2):70-72.
- [2] 周 兵,裴春明,倪 园,等. 特高压交流变电站噪声测量分析[J]. 高电压技术,2013,39(6):1447-1453.
ZHOU Bing, PEI Chunming, NI Yuan, et al. UHV AC substation noise measurement analysis[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6):1447-1453.
- [3] 马宏彬,何金良,陈青恒. 500 kV 单相电力变压器的振动与噪声波形分析[J]. 高电压技术,2008,33(8):1599-1604.
MA Hongbin, HE Jinliang, CHEN Qingheng. Vibration and noise waveform analysis of 500 kV single phase power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 33(8):1599-1604.
- [4] 曲飞雨. 变电站噪声及隔声材料隔声性能研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
QU Feiyu. Substation noise and sound insulation performance of sound insulation materials[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [5] 刘姜涛. 电力变压器有源降噪的关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学,2012.
LIU Jiangtao. Research on key techniques of power transformer active noise reduction[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [6] OLSON H F, MAY E G. Electronics sound absorber[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1953, 25(6): 1130-1136.
- [7] LI Xun. Physical systems for the active control of transformer noise[D]. Australia: The University of Adelaide, 2000.
- [8] BAEK K H, ELLIOTT S J. Natural algorithms for choosing source locations in active journal of sound and vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 186(2): 245-267.
- [9] 赵 彤,梁家碧,夏天翔,等. 基于 LMS 自适应滤波算法的电力变压器有源降噪系统[J]. 高电压技术,2016,42(7):2299-2307.
ZHAO Tong, LIANG Jiabi, XIA Tianxiang, et al. Power transformer active noise canceling system based on lms adaptive filtering algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7):2299-2307.
- [10] 刘姜涛,应黎明. 基于粒子群算法的电力变压器噪声有源控制系统优化[J]. 武汉大学学报,2014,47(4):498-501.
LIU Jiangtao, YING Liming. Power transformer noise active control system optimization based on particle swarm optimization[J]. Journal of Wuhan University, 2014, 47(4): 498-505.
- [11] 祝丽花,杨庆新,闫荣格,等. 考虑磁致伸缩效应电力变压器动噪声的研究[J]. 电工技术学报,2013,28(4):1-6.
ZHU Lihua, YANG Qingxin, YAN Rongge, et al. Research on vibration and noise of magnetostrictive effect power transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4):1-6.
- [12] 周 彬. 电力变压器磁致伸缩效应引发的振动噪声分析[J]. 变压器,2013,50(12):39-43.
ZHOU Bin. Analysis of vibration and noise caused by magnetostrictive effect of power transformer[J]. Transformer, 2013, 50(12):39-43.
- [13] 姜益民,何洪军. 非晶合金铁心变压器振动噪声分析与研究[J]. 变压器,2010,47(10):31-36.
JIANG Yimin, HE Hongjun. Analysis and research on vibration and noise of amorphous alloy core transformer[J]. Transformer, 2010, 47(10):31-36.
- [14] 吴晓文,周年光,裴春明,等. 特高压交流 GIS 变电站噪声特性测量与分析[J]. 高压电器,2017,53(6):13-18.
WU Xiaowen, ZHOU Nianguang, PEI Chunming, et al. Measurement and analysis of noise characteristics of UHV AC GIS substation[J]. High Voltage Appliances, 2017, 53 (6):13-18.
- [15] 王小涛. 电力变压器噪声辐射特性研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
WANG Xiaotao. Study on noise emission characteristics of power transformer[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [16] 马裕超,莫 娟,樊宝珍. 220 kV 油浸式变压器振动与噪声试验研究[J]. 变压器,2017,54(7):49-55.
MA Yuchao, MO Juan, FAN Baozhen. Experimental study on vibration and noise of 220 kV oil-immersed transformer [J]. Transformer, 2017, 54(7):49-55.
- [17] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础[M]. 南京:南京大学出版社,2016.
DU Gonghuan, ZHU Zhemin, GONG Xiufen. Basics of

(下转第 163 页)

- SONG Delong, LUO Yuanping. Fault characteristics of birds' droppings flashover on transmission line and its countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 122-123.
- [15] 雷江转, 刘望来. 鸟的习性及其鸟害防护的研究[J]. 广东输电与变电技术, 2007(3): 46-48.
LEI Jiangzhuang, LIU Wanglai. Study on the bird habits and bird disaster prevention[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2007(3): 46-48.
- [16] RUBOLINI D, GUSTIN M, BOGLIANI G, et al. Birds and power lines in Italy: An assessment[J]. Bird Conservation International, 2005, 15(2): 131-145.
- [17] 王彪. 输电线路鸟害分析及对策[J]. 河北电力技术, 2008, 27(4): 14-15.
WANG Biao. Analysis and countermeasures on bird troubles of transmission line[J]. Hebei Electric Power, 2008, 27(4): 14-15.
- [18] 王自力, 庞锴, 李长看, 等. 河南省电网涉鸟故障的鸟类多样性研究[J]. 电瓷避雷器, 2015(2): 23-30.
WANG Zili, PANG Kai, LI Changkan, et al. The study of the high voltage transmission lines bird diversity in Henan province[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(2): 23-30.
- [19] 罗斯特, 常青, 张强, 等. 广东揭阳农田坡地鸟类及其对高压输电线路的影响[J]. 生态学杂志, 2001, 30(9): 2039-2044.
LUO Site, CHANG Qing, ZHANG Qiang, et al. Birds in farmland and slope land in Jieyang of Guangdong and their impacts on local electric transmission[J]. Chinese Journal of Ecology, 2001, 30(9): 2039-2044.
- [20] 王玲玲, 王昕, 郑益慧, 等. 计及多个风电机组出力相关性的配电网无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3463-3469.
WANG Lingling, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Reactive power optimization of distribution network considering output correlation of multiple wind turbines[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3463-3469.
- 黄绪勇(1974—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事输变电设备状态监测及评价。
- 沈志(1978—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 电气工程输电专业。
- 王昕(1972—), 男, 副教授, 博士, 从事变压器、高压断路器、电力设备在线检测和监测等方面的研究。

(上接第 155 页)

- acoustics[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2016.
- [18] 孙恩昌, 李于衡. 自适应变步长 LMS 滤波算法及分析[J]. 系统仿真学报, 2007(14): 3172-3175.
SUN Enchang, LI Yuheng. Adaptive variable step LMS filtering algorithm and analysis[J]. Journal of System Simulation, 2007(14): 3172-3175.
- [19] 李 宁. LMS 自适应滤波算法的收敛性能研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
LI Ning. Research and application of convergence performance of LMS adaptive filtering algorithm[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [20] 夏天翔. 大功率电力变压器智能化有源降噪系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
XIA Tianxiang. Research on intelligent active noise reduction system of high power power transformer[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- 闫孝姮(1984—), 女, 博士(后), 副教授, 硕导, 主要研究方向为多物理场能量转换、调控、探测与成像。
- 查鹏程(1993—), 男, 硕士, 主要研究方向变压器有源降噪技术。
- 刘国强(1971—), 男, 博士, 研究员, 博导, 主要研究方向为多物理场能量转换、调控、探测与成像(通讯作者)。
- 张超(1984—), 女, 博士, 主要研究方向为多物理场能量转换、调控、探测。