

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.11.028

多工况变压器噪声特性测试系统设计

彭继文, 卢 铃, 胡 胜, 吴晓文

(国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 长沙 410007)

摘要: 为深入研究变压器的噪声特性,设计并搭建了一套10 kV多工况变压器噪声测试系统。文中在分析变压器振动和噪声特性基础上,进行了测试系统电气设计和半消声室设计。通过在低压侧设置水冷有功可调负载、可调电感负载、短路开关、以及谐波发生器实现变压器多工况运行,根据变压器的噪声特性设计了半消声室性能实现变压器噪声的准确测量。利用该系统测试了一台10 kV变压器在短路、空载、负载、三相不平衡、谐波几种典型工况下的噪声,验证了系统的可靠性。

关键词: 变压器; 噪声; 多工况; 半消声室

Design of Transformer Noise Test System for Multiple Working Conditions

PENG Jiwen, LU Ling, HU Sheng, WU Xiaowen

(State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: A 10 kV transformer noise test system for multiple working conditions was designed and built to study the transformer noise characteristics. Firstly, the vibration and noise characteristics of the transformer were analyzed, and then the electric circuit and semi-anechoic chamber were designed. Water-cooled adjustable load, adjustable inductance, short-circuit switch, and harmonic generator were arranged on the secondary winding side of the transformer to realize its operation in multiple working conditions. The parameter of the semi-anechoic chamber was designed according to the noise characteristics of the transformer. Finally, the noises of a 10 kV transformer in several typical working conditions of such as short-circuit, no-load, loading, three-phase power imbalance, and harmonic component were measured successfully, which proves the reliability of this test system.

Key words: transformer; noise; multi-condition; semi-anechoic chamber

0 引言

变压器是电力系统中最常见、应用最为广泛的设备之一。噪声特性是变压器的一种重要参数,直接关系到设备和变电站的噪声水平,同时可反映出设备的设计、制造、工艺水平等^[1-2]。

变压器的噪声测试主要在运行现场和生产厂房内进行^[3-6]。对于变压器噪声准确测量的要求来讲,上述环境并不理想。在运行现场噪声测试时,往往存在众多其他设备噪声干扰而难以保证测试准确性。在厂房内测试时,同样会受到测试环境的影响,包括背景噪声和反射声。同时,变压器厂房

内的噪声测试中,由于电源容量、负载容量等的限制,一般只包含空载和短路两种工况,而变压器实际运行时,往往为带负荷状态,工况较为复杂,因此厂房内测试也难以满足变压器噪声准确测试的要求。

为实现变压器运行状态噪声特性的准确测量,国网湖南省电力有限公司(国网电力设施噪声与振动实验室)设计并建设了10 kV多工况变压器噪声特性测试系统,通过引入水冷有功可调负载、可调电感负载、短路开关、以及谐波发生器几种类型负载设备实现变压器空载、短路、不同负载、不同功率因数、不同谐波负载等运行工况,搭建半消声室理想

收稿日期:2019-04-06; 修回日期:2019-06-17

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A5170018)。

Project Supported by the Program of the State Grid Hunan Electric Power Company Limited(5216A5170018).

环境实现噪声特性准确测试。

文中首先分析了变压器噪声特性,随后介绍了变压器多工况噪声特性测试平台的电气系统和半消声室设计,给出了半消声室性能检测结果,利用该系统测试了某10 kV配电变压器在几种典型工况下的噪声,验证了系统的可靠性。该系统不仅可以准确测量10 kV变压器多工况下的噪声特性,还可开展不同类型、各种型号、不同机械缺陷等的变压器噪声测量与分析研究,为变压器噪声影响因素分析和基于噪声的变压器机械故障诊断提供了理想实验条件,因而具有重要的科学应用价值。

1 变压器噪声特性

1.1 变压器噪声来源

变压器的噪声来源于变压器本体的振动和冷却装置的噪声^[1,6-7]。本体的振动包括:硅钢片磁致伸缩引起铁心产生周期性振动;硅钢片的接缝和叠片间由于漏磁产生的电磁吸引力引起的铁心振动;通流绕组在磁场中产生的电磁力所引起的轴向和径向振动;漏磁引起的油箱壁的振动。

铁心的振动主要来源于组成其结构的硅钢片的磁致伸缩和叠片之间的电磁力作用。磁致伸缩变化的周期为电源周期的一半,因此变压器铁心由磁致伸缩导致的振动基频为100 Hz。由于铁心的磁致伸缩并不总是线性等原因,振动除基频外还存在整数倍的谐波成份,如150、200 Hz等。叠片间的电磁力来自于铁心接缝处的漏磁产生的电磁力,以及由于主磁通分布不均匀在硅钢片中产生的侧推力。随着硅钢片叠加工艺的改进,由漏磁产生的电磁力引起的振动相对而言较小。因此,可以认为铁心的振动主要是磁致伸缩引起的。

变压器绕组的振动由绕组间、线饼间、线匝间由于交变电流流过产生的电磁吸引力引起。高、低压绕组间电流方向相反,绕组之间互相排斥;绕组内线匝电流方向相同,互相吸引。上述两种力导致绕组产生轴向和径向的振动,其中轴向的振动占主导地位。绕组的轴向受力与绕组电流的平方成正比,这使得绕组振动加速度与负载电流的平方成正比,因此振动信号的基频是负载电流频率的2倍(100 Hz)。绕组的垫块、绝缘材料具有一定的非线性特性,导致绕组振动在较大时表现出非线性特征,从而出现200、300 Hz等高次谐波成份。

油箱是油浸式变压器的重要组成部分,其振动与变压器本体的振动源特性密切相关。一方面,铁心和绕组的振动通过接触点激励油箱振动,另一方

面铁心和绕组的振动产生的噪声通过变压器油对油箱进行激励。油箱箱体主要由线性结构板、筋组成为不会改变激励力的频率。此外,油箱也会受到漏磁场产生的电磁力作用。

冷却装置的噪声主要来自于冷却风扇和油泵。一般认为,风扇的噪声以空气动力性噪声为主,分为冲击噪声和涡流噪声。冲击噪声是风机旋转时,空气受到周期性运动的叶片的力的作用产生的噪声,与风扇的叶片数量和转速有关,表现出离散特性。涡流噪声是叶片高速旋转时,因气体边界层分离产生的涡流引起的噪声,具有很宽的频谱特性。变压器油泵噪声主要由电动机轴承等部分的摩擦产生,频率以600~1 000 Hz为主。

1.2 变压器噪声传播过程

变压器的本体的振动和冷却装置噪声通过固体、液体和空气3种途径向外传播,叠加为变压器噪声,其传播过程见图1。

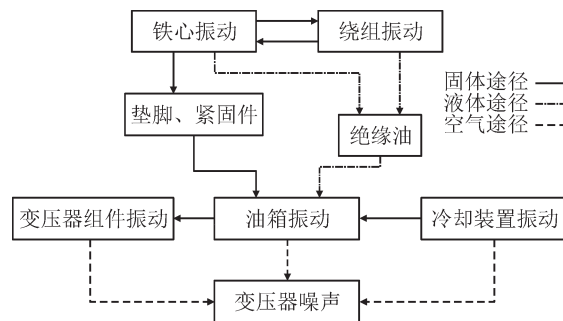


图1 变压器振动与噪声传播途径

Fig. 1 Propagation path of transformer vibration and noise

铁心与绕组的振动相互作用,并通过铁心垫脚、紧固件(固体途径),以及绝缘油(液体途径)传递至油箱,引起油箱和变压器组件振动。冷却装置如油泵、风扇的振动也会通过安装接头等固体途径传播至油箱。本体振动产生的噪声和冷却装置产生的噪声合成后,形成变压器噪声,以声压波动的方式通过空气向四周传播。因此,变压器噪声是变压器本体振动和冷却装置噪声通过固体、液体、空气等介质传递、衰减、叠加的综合结果,其特性与铁心、绕组、油箱等变压器部件的材质、物理结构,以及电气负载等多种因素密切相关。

2 系统设计

变压器的噪声特性测试平台主要包括三部分,分别是电气系统,理想声场环境和噪声测试系统,其中前两部分是设计的关键。

电气系统需实现变压器多工况运行,首要问题

是确定系统电压等级和额定容量。系统的电压等级必须与试验变压器的额定电压一致。常见变压器的电压等级有 10、35、110、220、500、750、1 000 kV 等。一般而言,电压等级越高的变压器电气系统越复杂,体积越大,设备价格和安全要求越高。整个系统所占空间、运维难度、建设费用都会大幅增长。相配套的半消声室的体积也必须越大,以保证足够大的自由场空间和安全距离,其造价也会大幅攀升。经估算,多工况变压器噪声特性测试系统的电压等级为 10 kV 时,系统造价约 1 000 万元,而当电压等级为 110 kV 时,系统造价飙升至近亿元。在综合考虑应用需求、场地条件、经费等因素,该系统采用的电压等级为 10 kV。10 kV 变压器常见额定容量有 100、200、315、400、500、630、800、1 000、1 250 kVA 等。为满足绝大多数测试需要,该系统设计最大有功负载 880 kVA。

自由声场是在声学测量中用来精确测量声源特性的一种测试环境^[8-10]。在自由声场中,声源发出的声波向各个方向不受阻碍和干扰地传播。具有自由声场特点的实验室被称为消声室,分为全消声

室和半消声室两种类型。消声室的房间边界可以有效地吸收入射声波,从而可以忽略反射声对声场的影响,因此房间内的声场可认为是自由声场。考虑到变压器比较笨重,难以安放在全消声室内,因此文中采用半消声室来构造自由声场理想环境。

噪声测试系统采用的是丹麦 B&K 公司 3053 型多通道数据采集模块和 4189-A-21 型 1/2 英寸自由场传声器。3053 模块具有 12 通道同时采集功能,并且可多个模块并联实现数十个通道的同步采集。4189-A-21 型传声器,由 4189 型麦克风和 2671 型前置放大器组合而成,具有高精度、高灵敏度的特性,适用于自由声场中的测量。试验时,被试变压器放置在半消声实验室中,声传感器布置在周围。声传感器采集的信号通过前端采集设备处理为数字信号,通过网线实时传输到上位机。

3 电气系统设计

文中设计的 10 kV 变压器多工况噪声特性测试系统见图 2。

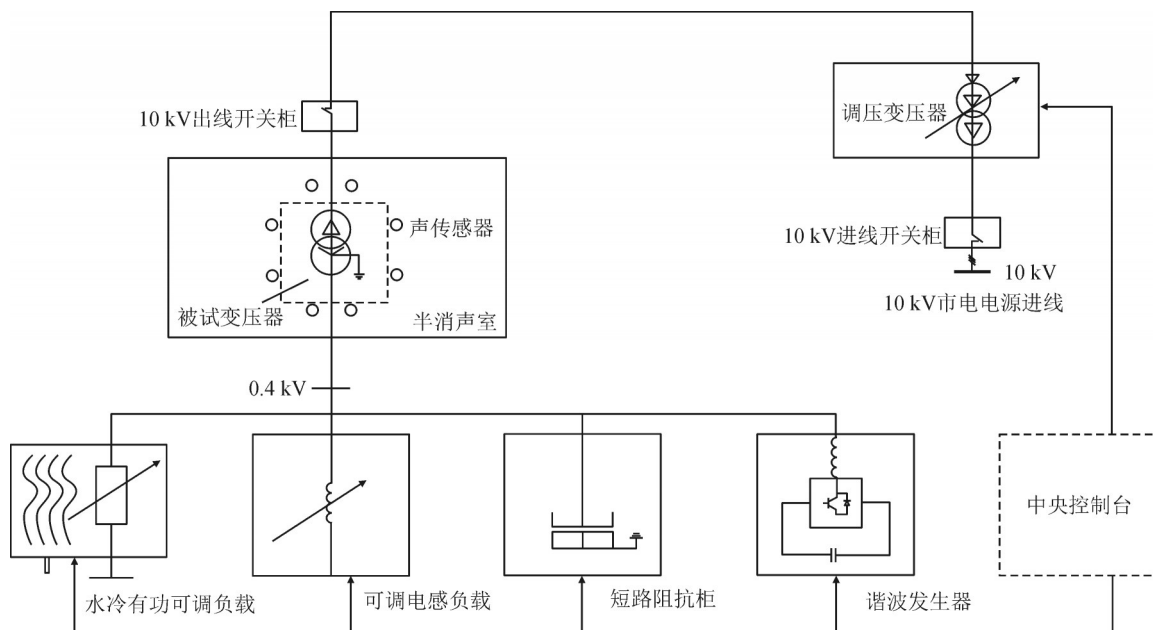


图2 10 kV 多工况变压器噪声特性测试系统图

Fig. 2 10 kV multi-conditions transformer noise characteristic test system diagram

在电气系统设计方面,系统电源取自 10 kV 市电供电系统,随后进线经过 10 kV 进线开关柜后连接到调压变压器进线端。调压器出线端线缆连接到 10 kV 被试变压器高压端。10 kV 被试变压器低压端 A、B、C 相出线线缆并联有水冷有功可调负载、可调电感负载、短路开关以及谐波发生器,从而实现三相可调。

调压变压器额定输入电压为 10 kV,输出电压

为 0~12 kV。水冷有功可调负载由总容量为 880 kW 的水冷电阻柜组成,最小可调容量为 2.5 kW。可调电感负载柜的额定功率为 85 kVA,最大可调功率 5 kVA。短路开关默认为断开模式,闭合时变压器低压侧短路。谐波发生器可输出 3 次、5 次和 7 次谐波,额定输出功率为 70 kVA。

中央控制台主要由调压器控制台、集中监控机、测试系统上位机和视频监控机构成,集电气控

制、工况设置、信号测试分析、现场监控于一体,见图3。在中央控制台处可控制调压变压器的电压,设置被试变压器低压侧各种负载的投运和容量,从而实现空载、短路、不同负载、不同无功功率、不同谐波频率和容量等各种运行工况。



图3 中央控制台

Fig. 3 Photograph of console board

此外,由于水冷有功可调负载、可调电感负载、以及谐波发生器并联,因此还可以通过中央控制台控制,实现上述3种负载设备的两两组合使用和3种同时使用,从而测量被试变压器在不同负载、不同无功、不同谐波容量的复合工况情况下的噪声特性。并且,由于被试变压器低压侧A、B、C三相均并联水冷有功可调电阻柜、可调电感柜、短路开关、谐波发生器,因此可以每一相单独设置不一样的工况,从而测量被试变压器三相工况不一样的复合工况下的噪声特性。

4 半消声室设计

4.1 半消声室设计

截止频率和本底噪声是半消声室的两项重要性能指标。截止频率表示在此频率以上,消声室墙面的吸声系数在99%以上。从变压器噪声特性可知,其本体噪声主要为100 Hz及其谐频,因此半消声室的下限频率(截止频率)应小于100 Hz,需以此为根据进行结构设计和材料选型。

半消声室采用的是房中房悬浮结构,地板底部及地板外圈侧面设置隔振材料。地板底部采用橡胶作为隔振层,厚度为60 mm,材料刚度与上部建筑质量相匹配,使建筑物整体的共振频率不超过10 Hz。

半消声室的四周墙壁和天花板均安装吸声尖劈,吸声尖劈内部填充吸声玻璃棉。吸声尖劈长度为700 mm,后部空腔厚度为150 mm,尖劈和空腔的长度为0.85 m,大约对应100 Hz声波波长的四分之一。吸声尖劈的吸声系数在100 Hz能达到0.99以上,从而满足半消声室的下限频率要求。安装尖劈后半消声室净空间尺寸为5 885 mm × 5 650 mm ×

6 100 mm,净空体积约为202 m³。半消声室配备内外各一部双开隔声门,隔声门的计权隔声量 $Rw \geq 40$ dB。隔声门安装有传感器,当传感器检测到隔声门打开时,电气系统立刻开路断电以保证安全。同时,吸声尖劈、隔声门等金属部件全部接地,避免感应电伤人。

在电缆连接方面,一次侧电缆和二次侧电缆通过地下涵洞引入到半消声室内。

4.2 半消声室声学性能检测

半消声室建成后,经中国建筑科学研究院依据相关标准对其声学性能进行了检验,主要检测分为三项,分别是基本检测、自由声场频率范围和空间范围和本底噪声^[10-12]。

文中设计的半消声室自由声场频率范围和空间范围检测结果见表1。从表1中可以看出,在地面中点到墙角方向上满足允差的最长距离在100 Hz为4.2 m,125 Hz~10 kHz频率范围内的三分之一倍频程中心频率为4.5 m;地面中点到垂直于墙面的方向上满足允差的最长距离在100 Hz~10 kHz三分之一倍频程中心频率为4 m。

表1 半消声室自由声场频率范围和空间范围检验结果

Table 1 The free field frequency range and spatial range inspection results of the semi-anechoic room

1/3 倍频带中心 频率/Hz	传声器路径上满足允差的最长距离/m	
	中心到垂直墙面方向	中心到墙角方向
100	4.0	4.2
125 ~ 10 000	4.0	4.5

半消声室的本底噪声也称背景噪声,指的是被测声源外所有其他声源的噪声。本底噪声的大小代表着系统所能测试声压大小的下限。文中设计的半消声室本底噪声检测结果见表2,从表2可以看出,半消声室本底噪声为5 dB(A),可以满足标准中要求的背景噪声比被测声源的声压级低6 dB以上的要求。

总体而言,从检测结果来看,该半消声室自由场半径约为2 m,最低频率可达100 Hz,本底噪声低至5 dB(A),满足设计和使用要求。

5 系统实际运行

为检验系统的实际运行效果,利用该系统对一台额定容量为200 kVA的10 kV油浸式变压器进行了多工况噪声特性测试。测试时,变压器放置在半消声室中间,在四周每侧0.3 m处布置1个声传感器,见图4。

表2 半消声室本底噪声检验结果

Table 2 The semi-anechoic chamber background noise inspection results

1/3 倍频程/Hz	声压级/dB	1/3 倍频程/Hz	声压级
100	2.9	1 250	-10.6 dB
125	-1.9	1 600	-9.7 dB
160	-6.9	2 000	-9.0 dB
200	-11.5	2 500	-8.3 dB
250	-12.1	3 150	-7.4 dB
315	-12.4	4 000	-6.7 dB
400	-12.7	5 000	-5.9 dB
500	-12.5	6 300	-5.1 dB
630	-12.3	8 000	-4.0 dB
800	-11.8	10 000	-5.2 dB
1 000	-11.1	A 声级	5 dB(A)

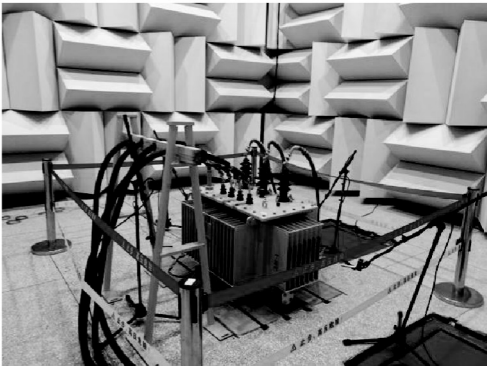


图4 变压器噪声测试现场

Fig. 4 Photograph of the transformer noise test

实验中设置了短路、空载、不同负载(额定容量的40%、70%、100%)、不平衡负载(三相负载各不相同)、包含无功负载、包含谐波负载等工况,系统均正常运行,证明了文中设计的变压器多工况噪声特性测试系统达到了预期的效果,可投入实际应用。

部分工况的噪声时域和频域测试结果见图5。从图5中可以发现,不同运行工况下变压器噪声在幅度和频谱分布上有明显差异,这说明变压器噪声与运行工况密切相关。限于篇幅,文中对此不进行更多分析。

6 结语

文中针对变压器噪声准确测量问题,搭建了10 kV变压器多工况噪声特性测试系统。该系统通过在变压器低压侧设置水冷有功可调负载、可调电感负载、短路开关以及谐波发生器实现变压器多工况运行状态,通过设计本底噪声为5 dB(A),自由场半径为2 m,自由空间频率范围不低于100 Hz的半消声室实现变压器噪声的精确测量。半消声室通过了

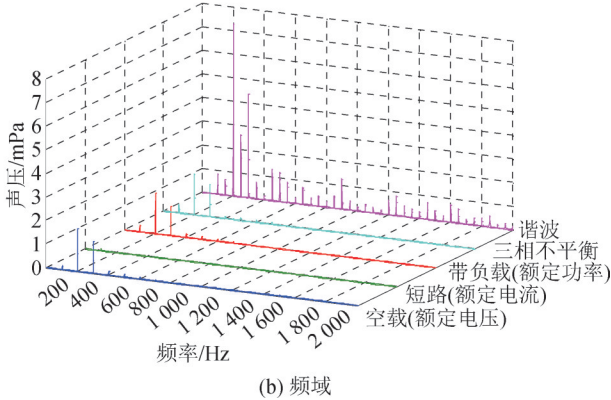
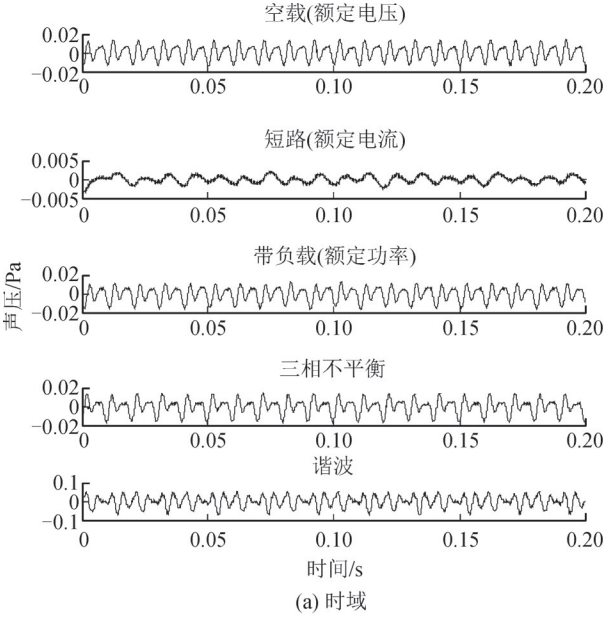


图5 多工况测试部分结果

Fig. 5 Some results of multi-condition tests

专业机构检测,符合设计目标。系统通过了试运行,达到了预期效果。

参考文献:

[1] JAMES H.Electric power transformer engineering[M]. 3rd ed. Boca Raton:CRC Press, 2012.

[2] 周贤土. 中小型变压器噪声(下)[J]. 变压器, 2006, 43(12): 1-6.

ZHOU Xiantu. Noise of small - medium transformer(II) [J]. Transformer, 2006, 43(12): 1-6.

[3] 电力变压器 第10部分:声级测定:GB/T 1094.10—2003 [S].2003.

Power transformers, Part 10: Determination of sound levels: GB/T 1094.10—2003 [S]. 2003.

[4] 汲胜昌,刘味果,李彦明,等. 振动法用于在线监测电力变压器绕组及铁心状况的可行性研究[J]. 高压电器, 2001, 37(5):4-7.

Ji Shengchang, LIU Weiguo, LI Yanming, et al.Feasibility of vibration analysis method in application toon-line moni-

- toring of the core and the winding of power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(5): 4-7.
- [5] 吴晓文, 周年光, 裴春明, 等. 特高压交流变电站可听噪声分离方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2625-2632.
- WU Xiaowen, ZHOU Nianguang, PEI Chunming, et al. Separation methodology of audible noise of UHV AC substations[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2625-2632.
- [6] 莫娟, 张霞, 袁建生. 变压器空载与短路噪声频谱特性分析[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(2): 76-80.
- MO Juan, ZHANG Xia, YUAN Jiansheng. Analysis of transformer noise frequency spectrum under short-circuit and no-load conditions[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(2): 76-80.
- [7] 余尤好, 陈宝志. 大型电力变压器的噪声分析与控制[J]. 变压器, 2007, 44(6): 23-26.
- YU Youhao, CHEN Baozhi. Noise analysis and control of large power transformer[J]. Transformer, 2007, 44(6): 23-26.
- [8] 陈克安, 曾向阳, 杨有粮. 声学测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- CHEN Ke'an, ZENG Xiangyang, YANG Youliang. Acoustic measurement[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [9] 杨志华. 消声室的声学设计[J]. 噪声与振动控制, 2009(5): 156-159.
- YANG Zhihua. Acoustic design for anechoic room[J]. Noise and Vibration Control, 2009(5): 156-159.
- [10] 声学 声压法测定噪声源声功率级消声室和半消声室精密法: GB/T 6882—2008/ISO 3745: 2003[S]. 2008.
- Acoustics - determination of sound power levels of noise sources using pressure-precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms: GB/T 6882—2008/ISO 3745: 2003 [S]. 2008.
- [11] 消声室和半消声室声学特性校准规范: JJF 1147—2006 [S]. 2006.
- Calibration specification for acoustic performance of anechoic rooms and hemi-anechoic rooms: JJF 1147—2006 [S]. 2006.
- [12] 消声室和半消声室技术规范: GB 50800—2012[S]. 2012.
- Technical code for anechoic and semi-anechoic rooms: GB 50800—2012[S]. 2012.
- 彭继文(1971—), 男, 教授级高工, 主要从事电网环保工作。
- 卢铃(1988—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力设施噪声与振动控制、基于噪声和振动的电力设备状态监测与分析。