

电力变压器振动噪声的多物理场耦合分析

● 李德波 冯永新

广东电网有限责任公司电力科学研究院 广州 510060

摘要：

本文主要通过建模仿真的研究方法对电力变压器振动噪声的产生、传播和分布进行瞬态计算研究。通过对电力变压器振动噪声的产生机理的理论分析，确定电力变压器振动噪声的特点与各影响因素影响因素之间的关联性。本研究利用多物理场有限元分析软件，建立电力变压器三维实体模型，进行综合电磁场、结构力场、压力声场的多物理场耦合仿真计算，结果显示了三维电力变压器振动噪声信号在各个求解域内的空间分布情况及其频率特性。与同工况下实测噪声数据的对比结果表明，本文所采用的建模和分析计算具有较高的准确性，为电力变压器的振动与噪声研究补充了重要而有效的研究手段。

关键词：电力变压器，机械振动，噪声，有限元，耦合场

1. 引言

随着电网的发展和对环境保护要求的提高，变压器的振动噪声问题越来越受到关注，而开展变压器设备的噪声特性分析和辐射声场计算研究是解决此问题的关键所在。电力变压器是电力系统中的关键设备，承担着电压变换、电能分配的工作。变压器在运行时，由于电磁作用产生的振动噪声具有明显的频率特征和分布特点^[1-2]。

现阶段对于变压器振动噪声的研究主要集中在理论分析和实验研究方面，而对变压器振动声学的仿真研究还不够深入。有学者采用有限元算法对变压器的铁芯进行建模，计算由变压器铁芯所产生的振动结果^[3]，但是其模型相对简化未考虑绕组影响且没有计算变压器噪声数据，因而未能全面的反应变压器振动及噪声的相关特性。

目前大多研究人员采用ANSYS有限元软件对变压器铁芯绕组结构进行简化建模^[4-6]，但由于ANSYS本身在模型多物理场耦合计算方面的局限性，使得变压器模型的计算过程繁琐而复杂，导致计算结果准确度欠佳^[7]。本文采用专业的多物理场耦合分析软件COMSOL Multiphysic进三维实体建模，对变压器振动噪声的产生与传播过程进行瞬态计算，整个变压器仿真模型运用了电磁场、结构力场和压力声场多个物理场的耦合计算方法。本文最后通过将变压器噪声信号的计算结果与实测的同型号变压

器噪声信号进行对比，验证本文所述变压器振动声学仿真计算方法的可行性。

2. 振动与噪声的特性分析

变压器振动噪声产生所涉及的构件组成较多，产生原因各不相同，总体可以归纳为以下几个方面：

运行状态：变压器的运行状态决定了变压器的铁心磁通密度以及负载电流的大小，而变压器铁心的磁通密度直接影响了硅钢片磁致伸缩的大小。国内外大量的试验数据表明，磁通密度的增大将导致变压器噪声水平增大。

变压器结构：硅钢片的尺寸影响铁心振动噪声的强度，而铁心的磁路径作为导致变压器电磁场产生高次谐波的重要因素，将直接影响噪声的频率分布特性^[11]。

材料工艺：材料工艺主要包括铁芯所用硅钢片的型号、材质以及制作加工的质量控制。

3. 变压器声学计算模型

3.1 几何建模

仿真选用一台三相三柱式220kV变压器进行建模分析，并对变压器铁心、绕组、油箱和外空气腔进行适当简化建模。考虑到网格划分过密将导致计算时间过长以及迭代求解的收敛性问题，本文将铁

心简化为由一整块硅钢片构成,由电动力作用导致的硅钢片间振动噪声水平相对于磁致伸缩效应产生的振动噪声小的多,可忽略不计,因此本文对铁心结构的简化将对仿真计算结果的准确度影响很小。同时考虑实际情况中铁心的结构对涡流的抑制作用,以及求解的收敛性问题,在计算过程中适当减小了模型铁心材料的电导率。本文研究对象包含变压器振动及噪声,因此在变压器外部构建空气腔,模拟室外变压器的空气环境,几何模型如图1、2、3所示。空气、绕组、铁心的材料分别设置为Air、Copper、Soft Iron,磁导率、电导率、密度等参数基本采用材料自带的属性,变压器结构参数如表1所示。

表1 变压器基本结构参数

| 结构参数 | 尺寸/mm |
|------------|-------|
| 心柱中心距 | 1774 |
| 上、下轭长度 | 4328 |
| 下轭与油箱底部距离 | 55 |
| 油箱内宽 | 2340 |
| 油箱内长 | 6670 |
| 线圈上端至上铁轭距离 | 225 |
| 铁心窗高 | 2165 |
| 上、下轭宽度 | 780 |
| 上、下轭高度 | 746 |
| 油箱内高 | 3860 |
| 油箱壁厚 | 10 |
| 线圈下端至下铁轭距离 | 110 |

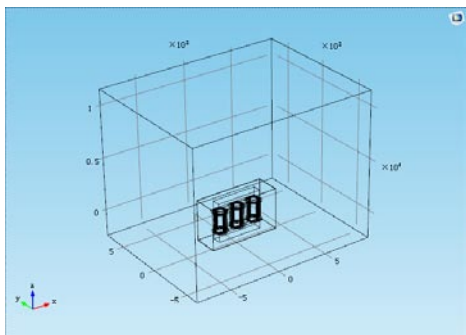


图1 变压器及外部空间几何模型

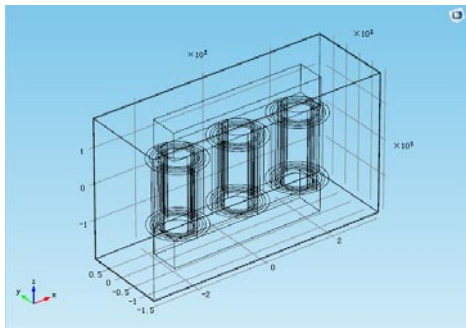


图2 变压器几何模型

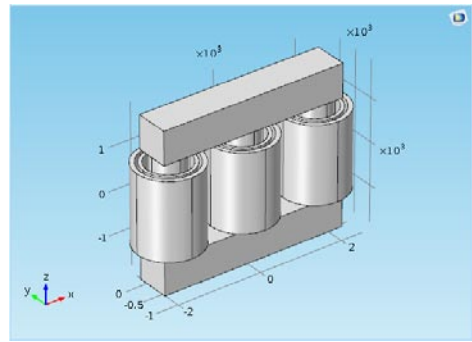


图3 变压器绕组及铁心模型

3.2 电磁场模型

运用COMSOL软件中的磁场模块,其求解的主要因变量为磁矢势A,该模块能计算出求解域中每一节点所受的电动力(洛伦兹力)等变量。

在空气域的外围设定磁绝缘边界条件:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \quad (1)$$

使磁场方向平行于外空气边界,将铁心域的磁场计算条件设置为软件内带的B-H磁化曲线,设定铁心在 $1000 \times 10^3 \text{ A/m}$ 的磁化强度时进入饱和状态^[12]。将绕组设定为多匝线圈域,指定线圈方向,根据实际情况设置线圈匝数、导线横截面积及额定电流等参数。

3.3 结构场模型

变压器振动噪声模型的结构力场仿真求解的主要因变量为位移u,能计算出每一节点处沿x、y、z方向的加速度大小以及应变值。

在该模型的铁心域和绕组域上加载洛伦兹力,在铁心域上加载表征磁致伸缩的应变,使得模型的结构力场与磁场相互耦合,模拟计算三维模型中铁心和绕组在电动力和磁致伸缩效应共同作用下的振动噪声产生即传播过程。

3.4 声压场模型

在声压场的模型中主要设置变压器油和变压器外部空气作为求解域。求解域中的方程为声压波动方程^[13]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p_t}{c^2 \partial t^2} + \nabla \times \left(-\frac{1}{\rho} \right) (\nabla p_t - q_d) = Q_m \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; c 为声速; p_t 为绝对声压; q_d 为偶极源; Q_m 为单极源。

将声压场与结构力场进行耦合设置,计算变压器噪声的传播过程及声场分布特征。

3.5 网格剖分与仿真计算

本次建模采用的是三维模型，对整个几何域进行四面体网格划分。但是综合考虑到各个求解域的物理场分析需求、几何尺寸、计算精确性、收敛性和计算数据量，对不同求解域进行不同程度的网格尺寸的控制，按照表2对模型进行网格划分控制。由于变压器油跟多个求解域相接触，因此其网格大小的划分直接决定了整个模型的网格划分能够成功，故对变压器油进行合理细化处理。

仿真采用瞬态求解器进行求解，噪声信号中所关注信号的最大频率为1000Hz，根据采样定理，要求采样的频率至少要达到2000Hz，最好为4000Hz以上，即对仿真的输出步长(采样率)提出了要求；由于所关注信号为50Hz的信号及其高次谐波(50Hz、100Hz、150Hz、200Hz等)的信号，因此至少要求FFT的分辨率至少为50Hz，即对仿真计算时间(采样点数)提出了要求。综合考虑计算的精确性和仿真的计算数据量，设定FFT分辨率为50Hz，设定采样率为关注的最高频率(1000Hz)的5倍，即5000Hz，因此采样点数=采样率/FFT分辨率=100。设置仿真计算的时间为一个周期，及0-0.02s，设置步长为0.0002s。

表2 几何域网格划分

| 几何域 | 几何尺寸 | 物理场需求 | 精细程度 |
|------|------|----------|------|
| 铁心 | 较大 | 电磁、结构、声压 | 标准 |
| 绕组 | 局部较小 | 电磁、结构、声压 | 局部细化 |
| 变压器油 | 较大 | 声压 | 较细化 |
| 油箱壁 | 小 | 电磁、结构 | 标准 |
| 空气 | 很大 | 声压 | 较粗化 |

求解器采用多物理场全耦合求解的计算方式，线性求解器采用直接法求解，采用的MUMPS求解器支持多线程计算。由于本仿真研究涉及多个物理场耦合，收敛条件苛刻，因此增大迭代次数的限制。

4. 仿真结果处理与分析

将实验结果及分布云图经后处理，得到了整个空间内的噪声声压分布，其纵向切面图如图4所示。通过对此空间内的噪声声压分布云图分析可知，变压器噪声的最大值在油箱上表面的位置呈现稳定而又规律的波纹分布，并从油箱外壁上表面的位置向空气中以波的形式传播开来。

图4、图5中结果对应的时间为 $t=0.0105s$ 时，此时变压器中的电流作用时间小于一个周期时间，因而由变压器绕组和铁心所产生的振动所引起的噪声信号暂时并未达到稳定状态，而是处于由近向远的向外传播过程。从整个模型的噪声分布可以看出，靠近变压器铁心的位置处噪声声压明显较高，且明显呈现出具有波峰波谷的波纹分布。在此次变压器振动噪声仿真过程中，将下铁轭的位移约束设置为

0，即设定下铁轭是固定不动的，因此在变压器下铁轭位置的噪声水平明显的比上铁轭位置处的低。根据 $t=0.0105s$ 时刻整体模型的声压分布图可以看出，变压器振动产生的噪声信号呈现较为明显的对称分布趋势，并在油箱上表面出现噪声声压最大值。在空气域中将变压器箱体正面中部离地1.5m高，距离变压器3m的位置设置为噪声信号测量点，导出该测量点的噪声信号计算结果。利用MATLAB软件对信号进行傅里叶变换频域分析，如图6所示。图7为实际工况下的变压器噪声实测数据。

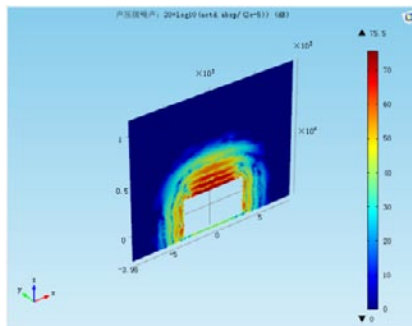


图4 $t=0.0105s$ 时变压器外部声压分布切片图

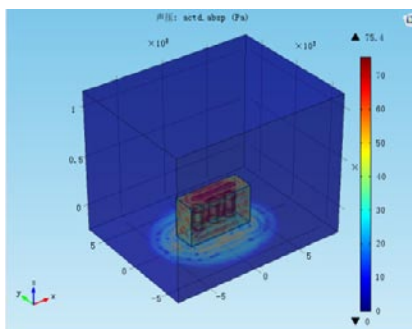


图5 $t=0.0105s$ 时变压器外部声压分布图

由于求解得到的噪声信号中各频率成分的声压幅值的数量级差别较大，为了便于数据分析以及绘制图谱，因而在本文中采用声压级进行频谱图的绘制。声压级是便于统计和描述声压的物理量，单位为分贝(dB)。标准声压级SPL与声压SP的换算公式为^[14-16]：

$$SPL = 20 \lg \frac{SP}{20 \times 10^{-6}} \quad (3)$$

式中 $20 \times 10^{-6}Pa$ 是参考声压，是正常人耳刚好能察觉到的1kHz声音的声压值。

结果分析：图7数据为美国LARSON DAVIS公司 Model 831 Sound Level Meter Manual所测得的噪声信号，并通过其专用的分析软件得到的噪声频谱。在对比分析过程中应考虑到实测数据中环境噪声对数据的影响，由以上变压器噪声实测数据频谱图可知，变压器振动噪声主要由100Hz、200Hz、300Hz、

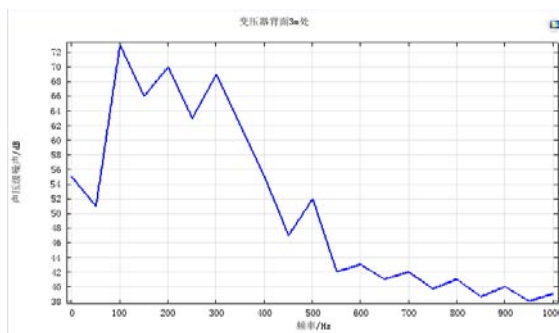


图6 变压器噪声仿真频谱图

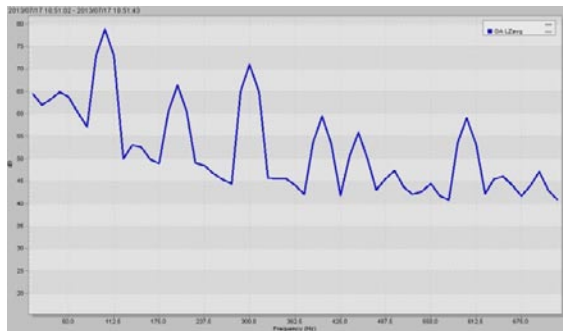


图7 变压器噪声实测数据频谱图

400Hz等频次的信号组成,其中100Hz为两倍于电源频率的基频信号,200Hz、300Hz、400Hz等频次信号为变压器振动噪声信号的高次谐波信号,振动噪声信号中最大声压级出现在基频处(100Hz)。值得注意的是,根据测量噪声的频谱分析可得存在较大的以电源频率为基频的信号及奇次谐波信号(150Hz、250Hz、350Hz等),这其中包含了部分环境噪声的因素以及本模型简化建模方法的影响。通过对变压器

声压场的建模仿真,分析结果与国内外研究成果及实测数据保持较高的一致性,验证了本模型的正确性。

5. 结论

本文主要通过理论分析变压器绕组与铁心的振动机理,以COMSOL有限元软件为工具进行建模仿真研究,对电力变压器的振动噪声的产生、传播和分布特点进行多物理场耦合计算,结合实测的实际工况中变压器噪声信号进行对比分析得到以下结果:

1) 电力变压器振动噪声主要由100Hz、200Hz、300Hz、400Hz等频次的信号组成,其中100Hz为两倍于电源频率的基频信号,200Hz、300Hz、400Hz等频次信号为变压器振动噪声信号的高次谐波信号,振动噪声信号中最大声压级出现在100Hz处。仿真结果还对噪声信号的传播过程和空间分布特点有直观的显示,变压器振动产生的噪声信号呈现较为明显的对称分布趋势,并在油箱上表面出现噪声声压最大值能够为后续的噪声研究提供可靠的研究方法。

2) 通过与变压器实际工况的实测噪声数据的对比分析,验证了本文所采用的电力变压器三维实体建模方法、网格划分控制方法、多物理场耦合设置和振动噪声瞬态计算方法是可行并具有较高计算精度的,本文所述的综合电磁场、结构力场、压力声场的多物理场的耦合仿真计算方法为电力变压器的振动与噪声研究补充了重要而有效的研究手段。

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): 70-76.
- [2] 顾晓安, 沈荣瀛, 徐基泰. 国外变压器噪声研究动向[J]. 变压器, 2002, 39(6): 33-38.
- [3] 许冰. 直流偏磁下变压器铁心振动与噪声的研究[D]. 沈阳工业大学, 2012.
- [4] B.Zhao,P.Y.Bian,F.Jiao,et al.Finite element analysis of the amplitude transformer in ultrasonic vibration system. Automation and computing. 2012
- [5] Zhao, Dengfu,Dong, Jimin,Zhang, Zhongyuan,Feng, Shuan,Wang, Dong.Rapid recognition and protection of short - circuit for the DC system. Dianli Xitong Zidonghuan/Automation of Electric Power Systems. 2002
- [6] LI Guangpu, ZHANG Jianxin. FEA on vibration and noise of SCB dry - type transformer[J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(6):487 - 489.
- [7] 何洪军, 饶柱石, 塔娜. 非晶合金变压器振动噪声诊断[J]. 振动与振动控制, 2009, 12(6): 22-25.
- [8] 苏俊收. 500 kV油浸式电力变压器的噪声预估与减振技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2013.
- [9] HONG Kaixing,PAN Zaiping.Vibration model of power transformer under short-circuit condition. Proceedings of 12th International Electrical Machines and Systems Conference. 2009
- [10] 莫娟, 刘吉轩, 苏俊收, 等. 大型电力变压器的噪声预估研究[J]. 高压电器, 2014(6):32-37+44.
- [11] 祝令瑜, 汲胜昌, 曹涛, 等. 电容器噪声传播规律的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(6):50-55.
- [12] 陈晨. 基于变压器噪声的硅钢片状态检测方法研究[D]. 华中科技大学, 2013.

- [13] 马宏彬, 何金良, 陈青恒, 等. 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, 34(8): 1599-1604.
- [14] 陈豫朝, 张广洲, 周翠娟, 等. 特高压交流试验基地变电构架区可听噪声源特征频率分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1824-1829.
- [15] 祝丽花, 杨庆新, 闫荣格, 等. 考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 1-6.
- [16] 张剑. 直流偏磁条件下变压器振动噪声的多物理场耦合研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.

要闻集锦

哈佛大学发布《人工智能与国家安全》报告

据www.belfercenter.org网站2017年7月31日消息报道, 近期, 应美国情报高级研究计划局(IARPA)的要求, 哈佛大学肯尼迪政治学院贝尔弗科学与国际事务中心发布了《人工智能与国家安全》报告, 分析人工智能(AI)对美国安全的巨大影响, 为美政府AI政策提供建议。

报告提出了制定人工智能和国家安全未来政策的三个目标: 一是保持美国技术领先优势, 为军事和情报能力优势提供砝码; 二是支持AI用于和平和商业用途, 帮助民事和商业部门享受新技术带来的好处; 三是减少灾难性风险, 防范或降低偶发/敌对事件带来的严重后果。

报告的主要内容有四个方面。

一是AI技术发展迅猛。AI领域在过去5年发展迅猛, 未来还会进一步提速。推动AI快速发展的4个因素是: 计算机性能在近几年呈指数级增长、训练机器学习的大型数据集数量增加、机器学习技术不断进步、商

业投资猛增。其中机器学习子领域的发展是主因。

二是AI技术是给国家安全带来深刻变化的颠覆性技术。现有的AI技术能力在国家安全方面拥有巨大潜力, 未来的AI技术有可能成为给国家安全带来深刻变化的颠覆性技术。

三是AI技术对国家安全影响巨大。在军事方面, AI的发展将产生新的能力, 并使现有能力成本被更广泛的行为体所接受; 在网络领域, 目前需要大量高技能劳动力的活动未来可能会实现高度自动化; 在信息优势方面, AI将大幅提升数据收集、分析以及建立数据的能力; 在情报行动中, 意味着有越来越多的信息源可供分辨真相, 相应的, 制造伪情报也变得更加便利; 在经济方面, AI的发展可能会带来一次新的产业革命, 将重新塑造世界经济中的劳资关系。

四是变革性技术带来的经验。该机构分析了核、航空航天、网络和生物技术4个变革性军事技术案例, 从中提取了可用的经验和教训。

(李 苏)