DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.11.013

基于有限元的立体卷铁心变压器漏磁分析与出线优化

高 浩[1,2]，潘 明[1,2]，顾小虎[2]，杨庆福[2]，张晓同[1,2]，冯 娟[1,2]
（1. 南瑞集团有限公司/国网电力科学研究院有限公司，南京 211103；2. 上海置信电气有限公司，上海 200335）

摘要： 为降低非晶立体卷铁心变压器漏磁，减小结构件涡流损耗，文中基于变压器电磁有限元仿真技术，改进了绕组的等效三维模型，有限元仿真计算的漏感值和理论公式计算的漏感值误差为6%，验证了等效模型的准确性；针对绕组及引线结构进行优化，对比优化结构前后变压器的漏感、漏磁和损耗，结果表明：最外层绕组闭合可以有效降低变压器的漏感，引线出头位置靠近可以减小结构件上的最大磁密，减少漏磁分布，降低结构件上涡流损耗，文中中总体涡流损耗降低约62.04%。

关键词： 变压器；漏磁；涡流损耗；低压引线

Leakage Magnetic Field Analysis and Lead Optimization of a Three-dimensional Wound-core Transformer Based on Finite Element Method

GAO Hao[1,2], PAN Ming[1,2], GU Xiaohu[2], YANG Qingfu[2], ZHANG Xiaotong[1,2], FENG Juan[1,2]
(1. NARI Group Co., Ltd./State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211103, China;
2. Shanghai Zhixin Intelligent Electric Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: For reducting the magnetic leakage of amorphous three-dimensional wound core transformer and decreasing the eddy current loss of structures, in this paper the equivalent three-dimensional model of the winding is improved based on the electromagnetic finite element simulation technology of transformer. The error of leakage inductance calculated by the finite element simulation and by the theoretical formula is 6%, which confirms the accuracy of the equivalent model. The winding and lead structure are optimized, and the leakage inductance, magnetic leakage and loss of the transformer before and after the optimization of the structure are compared. The results show that the closure of the outermost winding can effectively reduce the leakage inductance of the transformer, and the proximity of the lead outlet position can reduce the maximum magnetic flux density on the structures, the leakage magnetic flux distribution and the eddy current loss on the structures.The overall eddy current loss in this paper is reduced by approximately 62.04%.

Key words: transformer; leakage magnetic; eddy current loss; low voltage lead

0 引言

配电变压器是电力系统中不可或缺的重要设备，其在电网中的正常运行是庞大电力网络安全运行的前提[1-5]。随着电工技术产业的发展，配电变压器的单机容量快速提升，随着而来的是变压器的损耗也大幅提高。小容量变压器中结构件的涡流损耗相对较小，但是大容量的变压器带来的结构件涡流损耗会造成大量电能浪费，同时会造成变压器内部局部过热，降低绝缘性能，影响变压器的安全运行[6-10]。因此，需要对大容量变压器的漏磁与结构件涡流损耗进行深入的分析研究。

目前，有限元方法是研究变压器漏磁与损耗的重要手段之一[11-16]。文[17]建立了电力变压器三维

收稿日期：2025-12-02； **修回日期：**2026-02-27
基金项目：国家电网有限公司科技项目(5500-202319101A-1-1-ZN)。
Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5500-202319101A-1-1-ZN).

模型，通过有限元法计算了瞬态漏磁场和铁心损耗；文[18]基于三维有限元分析，研究了箱盖折弯角度对漏磁与损耗的影响；文[19]对比有限元和理论计算的结构件损耗值，对磁屏蔽结构进行了优化设计。当前针对变压器的有限元分析，由于绕组结构复杂，通常将绕组模型简化为一个圆筒结构，且模型中删去引线结构，这样做一方面可以减少计算量，另一方面便于激励的添加，因此没有考虑到绕组和低压引线对变压器漏磁和损耗的影响。

为了方便低压绕组出头和引线连接，非晶立体卷铁心变压器通常将低压首末出线位置错开，每相实际匝数有所区别，该方法在小容量配电变压器中得到广泛应用，对大容量非晶立体卷铁心变压器实际工程应用较少，文中以一台2 500 kVA的油浸式非晶立体卷铁心变压器为研究对象，基于电磁场有限元分析，建立三维漏磁场有限元仿真模型，重点分析油箱、箱盖和夹件等结构件上的漏磁分布与涡流损耗。根据绕组和引线结构特点，改进了绕组、低压引线的等效三维模型，分析不同绕组和引线结构下的漏磁分布与结构件涡流损耗，为绕组和引线结构的优化提供依据。

1　电磁场计算模型

1.1　物理模型

文中以容量为2 500 kVA的10 kV油浸式立体卷铁心三相变压器为研究对象，建立三维仿真模型，主要结构参数和技术参数见表1。

表1　变压器主要结构参数

Table 1　Main structural parameters of transformer

参数	数值	参数	数值
连接组别	Dyn11	铁心直径/mm	360
铁心心柱中心距/mm	610	铁心窗高/mm	680
高压线圈直径/mm	595	低压线圈直径/mm	450
高压绕组额定电压/V	10 000	高压绕组额定电流/A	83.33
低压绕组额定电压/V	400	低压绕组额定电流/A	3 608.4

由于变压器内部结构复杂，需要对模型进行合理的简化：

1)变压器内部绝缘构件对于磁场分布影响不大，因此忽略绕组周边绝缘结构，将高低压绕组进行简化。

2)变压器的铁心截面近似为圆形，忽略铁心截面阶梯式结构，将变压器铁心柱简化为圆柱体。

3)与变压器油箱、箱盖和夹件的损耗相比，变压器内其他金属结构件上的损耗很小，因此仿真重点研究油箱、箱盖和夹件的涡流损耗，忽略其他金属结构件。

4)忽略油箱外部的散热器结构，认为油箱损耗主要在油箱内侧。

5)认为模型中所有材料均匀、各向同性。

采用有限元方法计算结构件涡流损耗，需要考虑导磁材料的趋肤深度[20-21]，趋肤深度用来表示趋肤效应的大小，是从导体表面到内部衰减的场矢量值，其衰减为表面值的1/e时需要通过的距离，进行有限元网格划分时，需要对趋肤深度内的网格充分细化，保证在结构件厚度方向的一个趋肤深度内至少有三层网格单元，因此要先对趋肤深度进行计算，趋肤深度计算公式为

$$d=\sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \tag{1}$$

式(1)中：d为趋肤深度，mm；ω为角频率，rad/min；σ为电导率，S/m；μ为磁导率，H/m。

简化后建立三维模型见图1，主要结构为铁心、绕组、夹件、油箱、箱盖和低压引线，其中箱盖包含一块隔磁板。

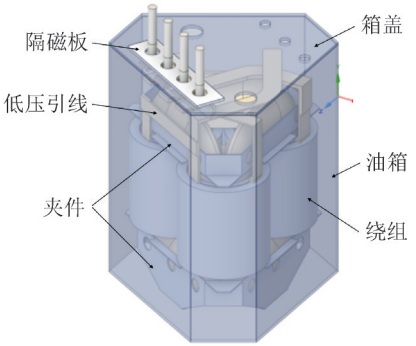
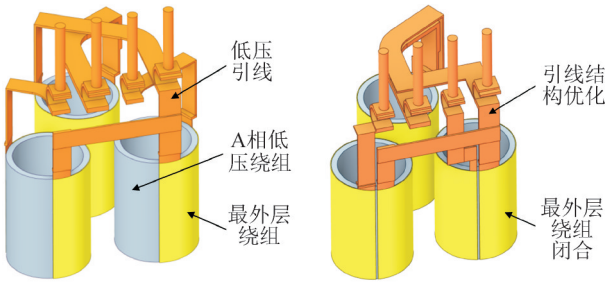


图1　变压器三维模型

Fig. 1　Transformer three-dimensional model

文中2 500 kVA变压器的低压绕组匝数设计值为9匝，首末出线位置错开，实际A相绕制匝数为$9\frac{1}{3}$匝，B相和C相绕制匝数为$8\frac{2}{3}$匝。为了在三维模型中体现匝数差异，文中提出一种新的等效模型，见图2(a)，将绕组的最后一匝模型与低压绕组剥离出来，等效为多出的$\frac{1}{3}$或$\frac{2}{3}$匝，并与低压引线相连形成回路，实现对引线电磁场的仿真分析，相比原来的模型仅增加少部分计算量。变压器绕组结构对变压器漏磁有重要的影响[22]，变压器漏磁主要分布在主空道处[23]，当绕组最外层少了$\frac{1}{3}$匝时，一方面主空道面积增大，另一方面未闭合的绕组也会导致更多的磁场外溢，会造成变压器的漏磁增加。因此需要对最外层的绕组进行优化，降低漏磁，从而降低漏磁造成的结构件涡流损耗。

基于上述等效模型，文中针对绕组和引线结构进行优化，优化后的结构见图2(b)，绕组最后一匝闭合，使得三相低压绕组都是整9匝，此时低压绕组首末出线位置在同一处，引线结构相应进行调整。绕组和引线结构优化后，会造成绝缘和三相不平衡的问题，因此一方面需要在邻近的引线铜排外侧包裹绝缘纸，防止出现短路事故，另一方面由于B相引线相对A、C相长度大很多，为避免三相电阻不平衡，B相引线使用规格较大的铜排，保证三相电阻大小基本一致。文中通过电磁场有限元计算，对比分析两种结构下油箱、箱盖和夹件的漏磁场分布与涡流损耗。



(a) 优化前结构　　(b) 优化后结构

图2　低压绕组与引线结构三维模型

Fig. 2　Three-dimensional model of low-voltage winding and lead structure

1.2　材料属性

变压器简化后的仿真模型包括油箱、箱盖、隔磁板、夹件、铁心、绕组和引线，其中油箱和箱盖的材料为Q235A结构钢，夹件和隔磁板材料为非导磁不锈钢，铁心材料为非晶合金，绕组和引线材料为铜，材料物性参数见表2。

表2　材料物性参数

Table 2　Physical property parameters of materials

参数	油箱、箱盖(Q235A)	夹件、隔磁板(不锈钢)	铁心(非晶合金)	绕组、引线(铜)
相对磁导率	*B-H*曲线[24]	1	*B-H*曲线	1
电导率/(S·m^{-1})	9.93×10^{6}	4.00×10^{6}	7.40×10^{5}	5.80×10^{7}
密度/(kg·m^{-3})	7 872	8 055	7 200	8 933

2　计算结果与分析

2.1　漏感计算结果

变压器漏感理论计算通过阻抗电压进行计算，公式为[25]

$$\begin{cases} U=\dfrac{49.6fIW^{2}\sum D\rho}{u_{t}H\times10^{8}} \\ X=\dfrac{U}{I} \\ X=2\pi fL \end{cases} \tag{2}$$

式(2)中：U为阻抗电压伏特值；f为频率；I为电流；W为匝数；$\sum D$为等值漏磁空道面积；ρ为洛氏系数；u_{t}为匝电压；H为绕组电抗高度。由式(2)可得变压器漏感为

$$L=\frac{24.8W^{2}\sum D\rho}{\pi H\times10^{2}} \tag{3}$$

基于有限元分析结果，通过能量法[26]计算变压器漏感值为

$$E=\frac{1}{2}LI^{2} \tag{4}$$

式(4)中：E为磁场能量；L为变压器漏感；I为电流有效值。磁场能量可直接在有限元软件中计算得到。对比有限元能量法计算(式(4))的漏感和理论计算(式(3))的漏感值，结果见表3。

表3　变压器漏感值

Table 3　Leakage inductance value of transformer

计算方法	漏感值/H	
	优化前	优化后
有限元	0.020 071	0.018 247
理论	—	0.017 212
误差/%	—	6.0

因为理论计算中关于等值漏磁空道面积是通过绕组的内外径来计算的，理论计算中默认绕组外径是均匀的，并不考虑外层绕组只有1/3匝的情况，因此理论计算的漏感值和优化后结构的漏感值应该是等效的。对比表中数据可知，有限元能量法计算的漏感值和理论计算的漏感值误差在6%左右，符合工程应用要求，因此可以认为该仿真模型是可靠的。对比优化前后两种结构的漏感值，在改变最外层绕组匝数后，漏感值从0.020 071 H减小至0.018 247 H，说明最外层绕组的闭合使得变压器的漏感降低了约10%。

2.2　漏磁分布及涡流损耗计算结果

箱盖处于低压引线上方，由于紧靠引线铜排，因此当铜排电流较大时，产生的磁场会在箱盖内侧产生较大的涡流损耗，见图3。优化前结构下，箱盖上磁密最大值为0.434 1 T，且漏磁分布范围较大，隔磁板由于低导磁率的特性，上面分布的磁密较小。优化后结构下，箱盖上磁密最大值为0.434 6 T，与优化前相比，最大值几乎没有变化，但是漏磁分布范围相对小了很多，集中在箱盖中间偏下的位置，这是因为优化后的引线减小了与箱盖平行的部分，该处的磁场主要是由b-o相的一段横向铜排造成的。

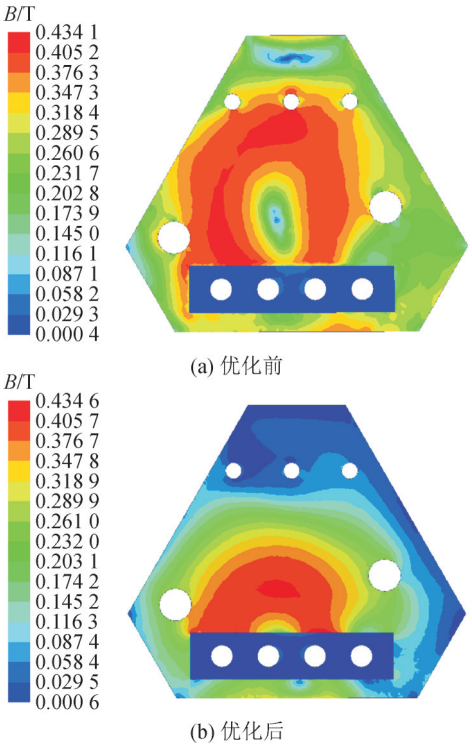


图3　箱盖表面磁密分布

Fig. 3　Magnetic induction intensity on tank cover surface

夹件处于绕组的两端，而变压器漏磁主要是主空道中磁场的外溢造成的，因此变压器的漏磁对夹件上的磁密分布有很大的影响。由于夹件的材料是不锈钢，为非导磁材料，因此夹件上的磁密较小，见图4。优化前的结构下，上夹件的最大磁密为0.061 8 T，下夹件为0.025 7 T，上、下夹件上的磁场主要分布在靠近绕组的位置，见图4(a)。结构优化后，上夹件的最大磁密为0.037 T，相比优化前降低约40%，且由于引线结构的变化，造成磁场分布也发生了变化，最大磁密分布在引线出头的位置，下夹件的最大磁密为0.015 2 T，降低约41%，磁密分布并无明显的改变。

油箱内壁上的磁场分布见图5，结构优化前最大磁密为0.451 7 T，分布范围较广，主要在靠近绕组的位置和引线铜排的位置。优化后的最大磁密为0.413 2 T，降低约9%，一方面是因为漏感的降低，导致磁密降低，另一方面优化后油箱顶部的磁密分布明显减小，说明引线的结构对磁密分布有明显的影响。

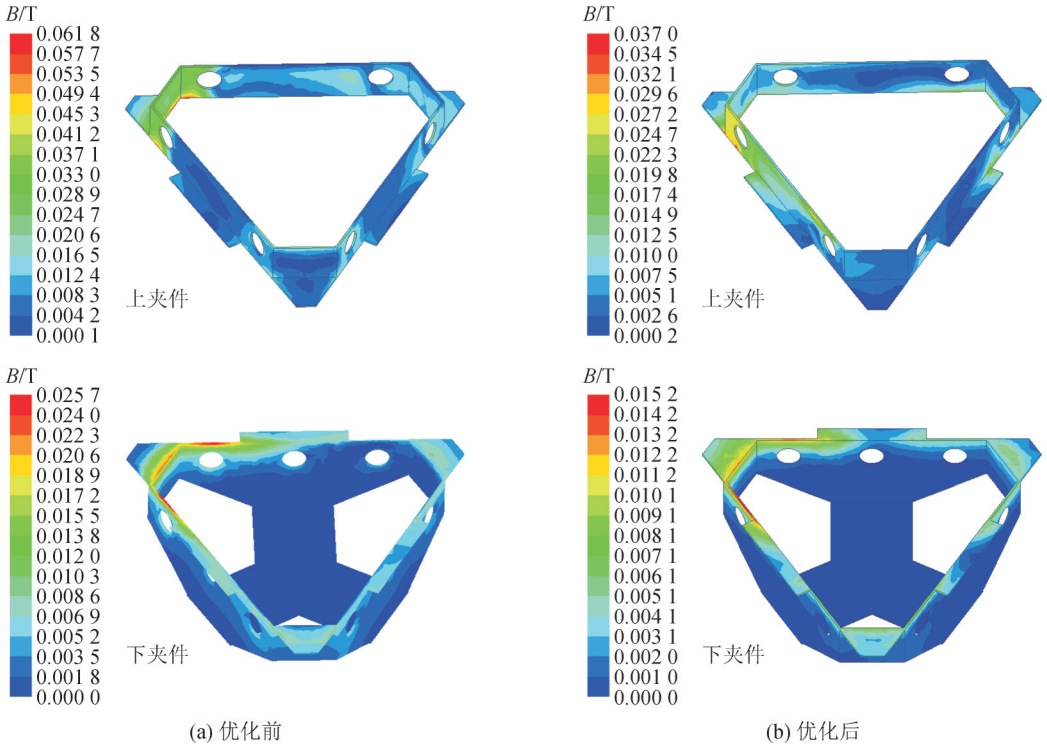
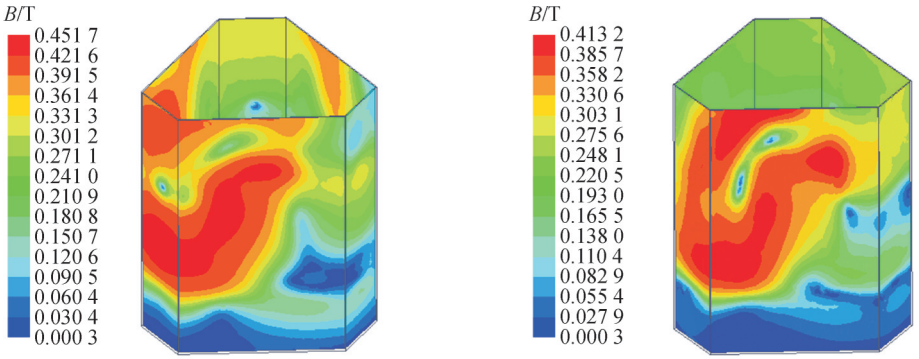


图4　夹件表面磁密分布

Fig. 4　Magnetic induction intensity on clamping pieces surface

通过上述结果可以发现，各结构件上的磁密都有明显的下降，一方面是因为整体的漏感降低，导磁漏磁在结构件上的磁场强度下降，另一方面是因为引线结构的改变。图6为B相引线附近的磁场分布，优化前的结构下，引线出头位置相差120°，当引线中经过电流时，会在周围形成磁场，最大磁密为0.04 T，优化后引线出头在同一位置，最大磁场强度为0.043 4 T。由右手螺旋法则可知，当两根导线相邻且电流方向相

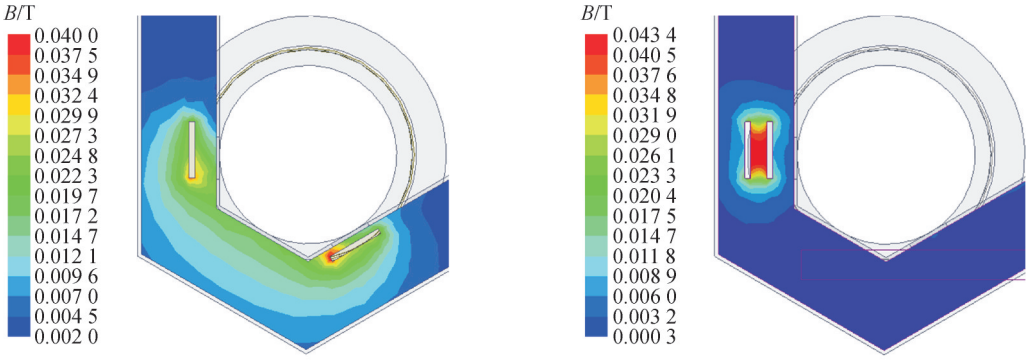


(a) 优化前　　(b) 优化后

图5　油箱表面磁密分布

Fig. 5　Magnetic induction intensity on tank surface

反时，其生成的磁场在导线中间的位置是同向的，因此导线中间位置磁场会叠加，磁感应强度增大，而其他区域磁场方向相反，磁感应强度减弱，所以优化后的结构虽然引线间的磁密较大，但是在夹件和油箱附近的磁密明显小于优化前的结构，从而减小了引线磁场在夹件和油箱上造成的涡流损耗。



(a) 优化前　　(b) 优化后

图6　引线附近的磁密分布

Fig. 6　Magnetic induction intensity near the lead

各部件涡流损耗见表4，对比优化前和优化后的损耗，各部件都有较大幅度的降低，夹件和油箱降低约63%，箱盖降低约37%，各部件总的涡流损耗降低约62%。说明通过结构的优化，可以实现减小结构件涡流损耗的目的。

表4　各部件涡流损耗

Table 4　Eddy current loss of each component

部件	损耗/W		降低比例/%
	优化前	优化后	
油箱	2 302.94	836.24	63.69
箱盖	349.36	220.46	36.90
夹件	758.11	238.03	68.60
总损耗	3 410.41	1 294.73	62.04

3　结论

文中通过有限元电磁仿真技术，对2 500 kVA大容量变压器进行了漏磁仿真分析，针对低压匝数为非整数的情况，改进了绕组和引线等效模型，并在此基础上优化绕组与引线结构。研究发现：

1)通过优化绕组和引线结构，使最外层绕组闭合，可以降低变压器漏感值，文中优化后漏感值降低约10%。

2)绕组和引线结构的优化，可以明显减小油箱、箱盖和夹件上的磁场分布，降低最大磁密，同一相绕组引线的两个出头位置靠近时，可以有效降低周围磁密。

3)优化后各部件的涡流损耗都有较大幅度的降低，总损耗降低约62.04%。

参考文献：

[1]　咸日常，张冰倩，张启哲，等. 基于有限元分析的配电变压器匝间绝缘劣化特征分析[J]. 高压电器，2023，59(2)：169-176.
Xian Richang，Zhang Bingqian，Zhang Qizhe，et al. Deterioration characteristics analysis of inter - turn insulation of distribution transformers based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus，2023，59(2)：169-176.

[2] 杨金鑫,廖才波,胡 雄,等.基于DGA与TPE-LightGBM的变压器故障诊断[J]. 电力科学与技术学报,2024,39(4):70-77.
Yang Jinxin, Liao Caibo, Hu Xiong, et al. Transformer fault diagnosis based on DGA and TPE-LightGBM[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(4):70-77.

[3] 邱晟璇,王 松,刘子瑞,等.基于FRA法和CNN的变压器绕组故障诊断研究[J]. 大电机技术,2025(3):108-116.
Qiu Shengxuan, Wang Song, Liu Zirui, et al.Research on fault diagnosis of transformer windings based on FRA method and CNN[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(3):108-116.

[4] 魏雪倩,黄新波,李文君子,等.基于AdaBoost多分类算法变压器故障诊断[J]. 西安工程大学学报,2016,30(2):207-211.
Wei Xueqian, Huang Xinbo, Li Wenjunzi, et al.Fault diagnosis of transformer based on multi-classification algorithm AdaBoost[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University,2016,30(2):207-211.

[5] 闵永智,令世文,王 果.基于混合特征选择和IOMA-CNN的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(23):1-9.
Min Yongzhi, Ling Shiwen, Wang Guo. Transformer fault diagnosis based on hybrid feature selection and IOMA-CNN[J]. Power System Protection and Control,2024,52(23):1-9.

[6] 何东升,贾志东,刘让雄,等.不同负载率下干式配电变压器绕组热点温升规律及推演模型研究[J]. 智慧电力,2025,53(5):63-72.
He Dongsheng, Jia Zhidong, Liu Rangxiong, et al.Hotspot temperature rise patterns and deductive model of dry-type distribution transformer windings under different load rates[J]. Smart Power,2025,53(5):63-72.

[7] 晋 涛,胡 帆,梁基重,等. 油浸式变压器热点温升计算中绕组结构简化的误差分析[J]. 高压电器,2021,57(11):156-163.
Jin Tao, Hu Fan, Liang Jizhong, et al. Error analysis of winding structure simplification in hot spot temperature rise calculation of oil immersed transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11):156-163.

[8] 王凤刚. 电力变压器结构件损耗研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2021.
Wang Fenggang. Research on the loss of power transformer structure[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2021.

[9] 蒋惠中,魏本刚,文 杰,等. 分体式油浸自冷变压器三维温度场和流场仿真与分析[J]. 高压电器,2021,57(2):63-69.
Jiang Huizhong, Wei Bengang, Wen Jie, et al. Numerical simulation of 3D temperature and flow fields in separated oil-immersed cooling transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2):63-69.

[10] 林晓明,陈则徐,陈 宇,等. 基于"磁—热—流"耦合的三绕组有载调压变压器涡流损耗与温度场仿真分析[J]. 变压器,2023,60(6):20-24.
Lin Xiaoming, Chen Zexu, Chen Yu, et al. Simulation analysis of eddy current loss and temperature field of three-winding transformer based on "magnetic-heat-flow" coupling[J]. Transformer,2023,60(6):20-24.

[11] 尹 浩,苏建徽,赖纪东,等. 一种基于解析法的高频铜箔变压器漏感精确计算方法[J]. 高压电器,2021,57(4):40-46.
Yin Hao, Su Jianhui, Lai Jidong, et al. Accurate calculation method for leakage inductance of high frequency copper foil transformer based on analytic method[J]. High Voltage Apparatus, 2021,57(4):40-46.

[12] 李传明,孙业荣,魏彩霞,等. 低频干式变压器漏磁场分析及杂散损耗计算[J]. 变压器,2023,60(1):1-7.
Li Chuanming, Sun Yerong, Wei Caixia, et al. Leakage magnetic field analysis and stray loss calculation of low frequency dry-type transformer[J]. Transformer,2023,60(1):1-7.

[13] 汶 涛,诸文智,张 超,等. 高频平面变压器涡流效应虚拟仿真实验设计[J]. 实验室研究与探索,2022,41(6):134-137.
Men Tao, Zhu Wenzhi, Zhang Chao, et al. Virtual simulation experimental design on eddy current loss of high-frequency planar transformer[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2022, 41(6):134-137.

[14] 周利军,刘桓成,江俊飞,等. 卷铁心变压器三维涡流场建模与计算[J]. 铁道学报,2021,43(3):70-76.
Zhou Lijun, Liu Huancheng, Jiang Junfei, et al. Modeling and calculation of 3D eddy current field of wound core transformer[J]. Journal of the China Railway Society,2021,43(3):70-76.

[15] 朱连双,董成海,李冬林. 基于磁场分析软件的变压器绕组涡流损耗分析[J]. 变压器,2019,56(9):1-8.
Zhu Lianshuang, Dong Chenghai, Li Donglin. Eddy current loss analysis of transformer winding based on magnetic field analysis software[J]. Transformer,2019,56(9):1-8.

[16] 尹忠东,魏文思. 基于有限元算法的变压器绕组涡流效应分析及损耗计算[J]. 智慧电力,2018,46(5):71-77.
Yin Zhongdong, Wei Wensi. Analysis of eddy current effect and loss calculation of transformer winding based on finite element algorithm[J]. Smart Power,2018,46(5):71-77.

[17] 朱占新,谢德馨,张艳丽,等. 大型电力变压器三维瞬态漏磁场及损耗计算的研究[J]. 变压器,2011,48(5):11-14.
Zhu Zhanxin, Xie Dexin, Zhang Yanli, et al. Research on 3D transient leakage magnetic field and loss calculation of large power transformer[J]. Transformer,2011,48(5):11-14.

[18] 李俊卿,田小静. 大型电力变压器漏磁场和杂散损耗的研究[J]. 电力科学与工程,2018,34(8):1-5.
Li Junqing, Tian Xiaojing. Study on leakage magnetic field and stray loss in large power transformers[J]. Electric Power Science and Engineering,2018,34(8):1-5.

[19] 马 烨,孙 刚. 牵引变压器漏磁场计算与油箱磁屏蔽优化方案研究[J]. 变压器,2021,58(3):26-31.
Ma Ye, Sun Gang. Calculation of leakage magnetic field in traction transformer and research on optimal scheme of magnetic shield in oil tank[J]. Transformer,2021,58(3):26-31.

[20] 傅晓锦,朱宏艳,何嘉希,等. 空冷发电机端部结构件涡流损耗分析研究[J]. 机械设计与制造,2023,387(5):90-93.
Fu Xiaojin, Zhu Hongyan, He Jiaxi, et al. Analysis and research on eddy current loss of end structure of air-cooled generator[J]. Machinery Design & Manufacture,2023,387(5):90-93.

[21] 赵志刚,温 涛. 变压器杂散损耗计算中的局部表面阻抗建模方法[J]. 电工技术学报,2020,35(22):4699-4708.
Zhao Zhigang, Wen Tao. Calculation method of stray loss based on

(下转第119页)

(8)：114-120.
Wang Xu，Sheng Xikui，Mu Kun，et al. Electrical performance testing method of transformer oil based on multi - frequency ultrasonic technology and grey wolf - optimized neural network[J]. High Voltage Apparatus，2020，56(8)：114-120.

[17] 施广宇，于晓翔，林志坚，等. 大型电力变压器油纸绝缘微水含量定量评估检测技术[J]. 高压电器，2017，53(9)：165-170.
Shi Guangyu，Yu Xiaoxiang，Lin Zhijian，et al. Moisture content detection method of oil - paper insulation for large power transformers[J]. High Voltage Apparatus，2017，53(9)：165-170.

[18] 杨　壮，周　渠，赵耀洪，等. 基于人工神经网络和多频超声波检测技术的变压器油界面张力预测[J]. 高电压技术，2019，45(10)：3343-3349.
Yang Zhuang，Zhou Qu，Zhao Yaohong，et al. Prediction of interfacial tension of transformer off based on artificial neural network and multi-frequency ultrasonic testing technology[J]. High Voltage Engineering，2019，45(10)：3343-3349.

[19] GB/T 7595—2017 运行中变压器油质量[S].
GB/T 7595—2017 Transformer oil quality in operation[S].

[20] 何　清，阮　羚，罗　维，等. 配电变压器中植物绝缘油直接替换矿物绝缘油温度场仿真计算及现场温升试验分析[J]. 高压电器，2019，55(9)：200-207.
He Qing，Ruan Ling，Luo Wei，et al. Simulation analysis and on-site temperature rise test for studying mineral insulating oil directly replaced by vegetable insulating oil in distribution transformer[J]. High Voltage Apparatus，2019，55(9)：200-207.

[21] Mehmood M A，Nazir M T，LI Jian，et al. Comprehensive investigation on service aged power transformer insulating oil after decades of effective performance in field[J]. Arabian Journal for Science and Engineering，2020，45(8)：6517-6528.

[22] NB/SH/T 0853—2010 在用润滑油状态监测法 傅里叶变换红外(FT-IR)光谱趋势分析法[S].
NB/SH/T 0853—2010 Fourier transform infrared(FT - IR) spectral trend analysis method[S].

[23] 朱明华，胡　坪. 仪器分析[M]. 第4版. 北京：高等教育出版社，2008：98-125.
Zhu Minghua，Hu Ping. Instrumental analysis[M]. 4th ed. Beijing：Higher Education Press，2008：98-125.

[24] DL/T 929—2018 矿物绝缘油、润滑油结构族组成的红外光谱测定法[S].
DL/T 929—2018 Infrared spectrometry method for the composition of mineral insulating oil and lubricating oil structure family[S].

[25] 彭　海. 皮尔逊相关系数应用于医学信号相关度测量[J]. 电子世界，2017(7)：163.
Peng Hai. Pearson correlation coefficient applied to medical signal correlation measurement[J]. Electronics World，2017(7)：163.

[26] 李海燕，何　梦，黄　林，等. 超高压变压器油中酸类物质的生成规律和变压器热老化状况分析[J]. 高电压技术，2015，41(6)：1959-1964.
Li Haiyan，He Meng，Huang Lin，et al. Correlation between the generation of acidic products and the thermal aging of oil - paper insulation of the UHV transformer[J]. High Voltage Engineering，2015，41(6)：1959-1964.

[27] 刘　江，薛守洪，胡学超，等. 基于响应曲面法的变压器油T501电化学测试条件优化[J]. 热力发电，2021，50(11)：170-176.
Liu Jiang，Xue Shouhong，Hu Xuechao，et al. Optimization of electrochemical test conditions for transformer oil T501 based on response surface method[J]. Thermal Power Generation，2021，50(11)：170-176.

汪红梅(1971—)，女，博士，副教授，主要研究方向为电力用油(气)和多功能材料(通信作者)(E-mail：wanghm123@126.com)。

(上接第110页)

local surface impedance boundary modeling method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2020，35(22)：4699-4708.

[22] 邹德旭，钱国超，井永腾，等. 变压器短路模型的绕组漏磁对比分析与试验研究[J]. 变压器，2021，58(11)：49-54.
Zou Dexu，Qian Guochao，Jing Yongteng，et al. Comparative analysis and experimental study of winding magnetic flux leakage of transformer short-circuit model[J]. Transformer，2021，58(11)：49-54.

[23] 肖瑞阳. 换流变压器温度场仿真建模及实时温度快速预测方法[D]. 重庆：重庆大学，2022.
Xiao Ruiyang. Temperature field simulation modeling and rapid prediction method of real-time temperature of converter transformer[D]. Chongqing：Chongqing University，2022.

[24] 李金忠，张丹丹，张书琦，等. 换流变压器负载损耗计算方法分析对比[J]. 高压电器，2015，51(12)：84-88.
Li Jinzhong，Zhang Dandan，Zhang Shuqi，et al. Analysis and comparison on the calculation methods of converter transformer[J]. High Voltage Apparatus，2015，51(12)：84-88.

[25] 路长柏. 干式电力变压器理论与计算[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2003.
Lu Changbai. Theory and calculation of dry type power transformer[M]. Shenyang：Liaoning Science and Technology Press，2003.

[26] 刘　梦，胡钢墩，张　健，等. 一种基于ANSYS Maxwell的变压器漏电感的计算方法研究[J]. 变压器，2020，57(7)：20-25.
Liu Meng，Hu Gangdun，Zhang Jian，et al. Research on calculation of transformer leakage inductance based on ANSYS Maxwell[J]. Transformer，2020，57(7)：20-25.

高　浩(1990—)，男，硕士，工程师，研究方向为变压器设计与仿真研究(E-mail：307704701@qq.com)。

潘　明(1981—)，男，本科，高级工程师，研究方向为配电一、二次技术研究(通信作者)(E-mail：panming1@sgepri.sgcc.com.cn)。