第 50 卷 第 3 期：952-962 高电压技术 Vol.50, No.3: 952-962
2024 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221530

基于电磁-流热双向耦合的变压器绕组温升计算及结构参数优化

袁发庭[1,2]，杨文韬[2]，韩毅凛[2]，陈　炜[3]，姜　岚[2]，唐　波[1,2]
（1. 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学)，宜昌 443002;
2. 三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002;
3. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院，长沙 410007）

摘　要：变压器温升是影响其运行状态和使用寿命的关键因素。为了更准确地得到油浸式变压器绕组区域的温度场分布，采用有限元法对绕组的电磁-流热耦合过程进行了数值研究。根据电磁场及流体-温度场分布的特点，建立了变压器及绕组区域的计算模型。基于异构网格节点数据映射方法，将电磁场分析得到的绕组非平均损耗作为热源边界条件加载到流体-温度场计算网格中，并根据每次迭代时的温度对该热源进行修正，实现电磁-流热的双向耦合。在此基础上，建立热点温度与绕组结构参数之间的响应面，开展了对绕组热点温度及导体材料用量最小化的多目标优化研究。采用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm，NSGA-Ⅱ)获得了 Pareto 最优解，并对 Pareto 前沿面上的 4 种优化方案进行了分析。结果表明，优化后的绕组热点温度及导体用量明显降低。该文研究为变压器结构的优化设计提供了一种可行方法。

关键词：油浸式变压器；电磁-流热耦合；绕组结构参数；响应面法；多目标优化

Temperature Rise Calculation and Structure Optimization Research of Transformer Winding Based on Electromagnetic-fluid-thermal Coupling

YUAN Fating[1,2], YANG Wentao[2], HAN Yilin[2], CHEN Wei[3], JIANG Lan[2], TANG Bo[1,2]
(1. Hubei Provincial Engineering Techonology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
3. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract：The temperature rise of transformer is the key factor affecting its operating state and service life. In order to obtain the temperature distribution of an oil-immersed transformer in the winding area accurately, the electromagnetic-fluid-thermal coupling process of the winding is numerically studied by the finite element method (FEM). According to the distribution characteristics of electromagnetic and fluid-temperature field, the calculation models of transformer and winding are established, respectively. Based on heterogeneous grid node data mapping method, the non-average winding loss obtained from the electromagnetic field analysis is loaded into the fluid-temperature field grid as the heat source, and the heat source is modified according to the temperature at each iteration. The bidirectional coupling between electromagnetic field and fluid-temperature field is realized. On this basis, the response surface of the hot pot temperature and winding structure parameters is established, and the multi-objective optimization research with the purpose of minimizing the winding hot spot temperature and conductor material consumption is carried out. The Pareto optimal solution is obtained by the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-Ⅱ), and the four optimization schemes on the Pareto front are analyzed. The results show that the optimized winding hot spot temperature and the amount of conductor are significantly reduced. The research of this paper provides a feasible method for the optimal design of transformer structure.

Key words：oil-immersed transformer; electromagnetic-fluid-thermal coupling; winding structure parameters; response surface methodology; multi-objective optimization

————————————

基金资助项目：湖北省教育厅科学技术研究项目 (Q20211212)；宜昌市科技计划 (A21-3-010)。
Project supported by Science and Technology Research Program of Hubei Provincial Department of Education (Q20211212), Yichang Natural Science Research Project (A21-3-010).

0 引言

电力变压器是输配电网络的基础设施之一，其运行可靠性关系着整个电网的安全与稳定。在影响变压器运行性能的各项参数中，绕组最热区域达到的温度(即热点温度)被认为是造成变压器绝缘老化和故障的主要原因[1-2]，其与绝缘寿命之间满足典型的 6 ℃法则，即在 80~140 ℃区间内，变压器绕组温度每上升 6 ℃，其老化率增倍且寿命减半[3-4]。由于变压器中铜导线的损耗通常与电流大小相关，故低压绕组通常是冷却的主要焦点[5]。

在变压器的电磁-流热耦合分析中，电磁场分析得到的绕组损耗作为流体-温度场计算的热源，其具体分布对温度场的计算结果有重要影响[6]。在很多研究中，通常将绕组热源平均处理[7-10]，尽管此种简化方式对流体-温度场的计算带来方便，但该处理方式可能使计算结果有一定误差。因此，为得到准确的热源分布结果，需要将绕组损耗数据作为热源传递到流体-温度场中。但由于电磁场和流体-温度场计算需要根据网格稀疏性、不同物理场的数值计算特点等要求建立不同网格，故绕组损耗结果无法直接作为流体-温度场计算的热源。基于此，刘刚等学者提出可将电磁场中的损耗分布映射到温度场网格中进行计算的方法，即异构网格映射法[6,11]。通过将电磁分析得到的绕组损耗作为恒热源，并以此为热源作为边界条件加载到流体-温度场模型中进行数值计算，实现了电磁-流热间的弱耦合。但是，绕组的电阻会随温度的变化而发生改变，在测量或计算绕组损耗时，也应考虑温度场对绕组损耗的影响作用。

为改善电气设备的结构参数以提高工作性能，不少优化研究由此展开。例如，Karaoglan 通过将数值方法与响应面法相结合，对交流发电机定子槽结构进行优化设计，提高了发电机的效率[12]；Smolka 将计算流体动力学(computational fluid dynamics，CFD)和遗传算法相结合的方法优化线圈和冷却通道的相互配置[13]，显著降低了干式变压器的热点温度；文献[14]基于干式电抗器的设计参数，通过有限元法得到电抗器温度场及声场分布，并采用试验设计与多岛遗传算法相结合的方式对电抗器最高温度及声压级水平进行优化，仿真结果验证了该方法的正确性。另外，正交试验法与数值计算相结合的方法也被应用于铁芯电抗器的结构优化设计中[15]。

结合以上分析，本文提出了基于有限元法的变压器绕组电磁-流热耦合计算方法，并对低压绕组的热点温度及导体用量进行优化研究。首先对变压器进行电磁分析，得到绕组的涡流损耗及欧姆损耗，并将两种损耗作为热源加载到温度场计算中，再根据温度分布对其进行修正，得到了绕组温度场分布结果。最后，通过响应面法建立热点温度与绕组结构参数的非线性关系，并采用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm，NSGA-Ⅱ)算法对热点温度及导体用量进行多目标优化求解。

1 变压器电磁-流热耦合数值计算

在油浸式电力变压器运行过程中，绕组产生的焦耳热主要由内部流过电流而产生的欧姆损耗以及因漏磁而产生的涡流损耗而引起。同时，该焦耳热又通过变压器油对流传输至变压器油箱，在通过变压器油箱传输至外界空气中，是一个典型的涉及电磁-流热耦合的问题。在本章研究中，将对一油浸式变压器的低压绕组区域进行电磁-流热耦合分析。

1.1 物理模型

本文研究对象为一容量为 10 MVA，变比 35/10 kV，阻抗电压为 6.97%的三相油浸式变压器，其铁芯及绕组基本模型如图 1 所示。

图 1 为变压器铁芯及绕组区域结构示意图，由绝缘导线绕制而成的绕组线饼层叠排列在铁芯外围。在低压绕组区域中，2 个竖直(轴向)油道以及数个水平(径向)油道将线饼分开，构成了供冷却油流流通的油道。同时，每隔一定数量的线饼交错设置一块挡油板，迫使油流从一个竖直油道进入并从另一侧的竖直油道流出。每 2 块挡油板间的油道组成变压器绕组油流的 1 个冷却通道。在油流流动过程中，线饼中每个导体产生的热量将以对流传热的方式被冷却油吸收，受热的油流将通过交错油道不断将导体产热带到变压器散热器进行冷却散热。

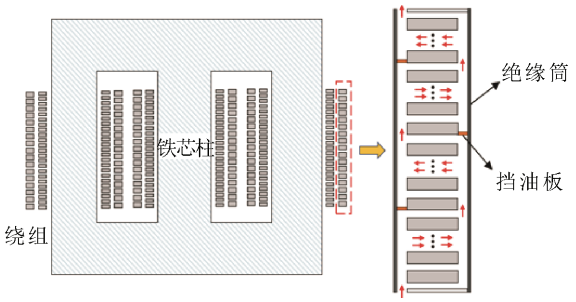


图 1 变压器绕组基本结构

Fig.1 Basic structure of transforemr winding

1.2 控制方程与计算方法

1）磁场控制方程

变压器运行过程中，热源主要来自于铁芯及绕组损耗，其中绕组损耗大小与其内部的磁通密度分布密切相关，因此须先对其内部磁场分布进行求解计算。通过求解磁矢势方程(1)和本构关系式(2)得到绕组电磁场物理量，并由方程(3)得到绕组损耗[16]。

$$-\omega^2\gamma\boldsymbol{A}+\mathrm{j}\omega\sigma\boldsymbol{A}+\nabla\times(\mu^{-1}\nabla\times\boldsymbol{A})=0 \tag{1}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{A}=\boldsymbol{B};\quad \boldsymbol{E}=-\mathrm{j}\omega\boldsymbol{A};\quad \boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H};\quad \boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E} \tag{2}$$

$$Q_\mathrm{e}=Q_\mathrm{rh}+Q_\mathrm{ml}=\frac{1}{2}\mathrm{Re}(\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{E}^*)+\frac{1}{2}\mathrm{Re}(\mathrm{j}\omega\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{H}^*) \tag{3}$$

式中：ω 为角频率，rad/s；γ 为介电常数，F/m；μ 为磁导率，H/m；σ 为电导率，S/m；$\boldsymbol{A}$ 为磁矢量势，$\mathrm{W_b/m}$；$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度，T；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度，V/m；$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度，A/m；$\boldsymbol{J}$ 为电流密度大小，$\mathrm{A/m^2}$；Q_e 为电磁损耗密度；Q_rh 和 Q_ml 分别为电损耗密度和磁损耗密度，$\mathrm{W/m^3}$；Re(*)为复数的实部；$\boldsymbol{E}^*$和 $\boldsymbol{H}^*$ 为 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 的共轭复数。

2）流体-温度场控制方程

变压器绕组区域的传热过程主要为热传导和热对流，热传导方式如式(4)所示。

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial r^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}+\frac{q}{k_\mathrm{m}}=0 \tag{4}$$

式中：z、r 分别为模型的轴向和径向坐标，m；θ 为热源温度，℃；k_m 为传热导体热导率，W/(m·℃)；q 为热源功率，$\mathrm{W/m^3}$。

绕组和油道之间的热对流满足质量、动量和能量守恒，如式(5)[8]所示：

$$\begin{cases}\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial(ur)}{\partial r}+\dfrac{1}{z}\dfrac{\partial(vr)}{\partial z}=0\\ \rho_\mathrm{oil}\left(u\dfrac{\partial u}{\partial r}+v\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)=F_r-\dfrac{\partial p}{\partial r}+\mu\left(\dfrac{\partial^2u}{\partial r^2}+\dfrac{\partial^2u}{\partial z^2}\right)\\ \rho_\mathrm{oil}\left(u\dfrac{\partial v}{\partial r}+v\dfrac{\partial v}{\partial z}\right)=F_z-\dfrac{\partial p}{\partial z}+\mu\left(\dfrac{\partial^2v}{\partial r^2}+\dfrac{\partial^2v}{\partial z^2}\right)\\ u\dfrac{\partial\theta}{\partial r}+v\dfrac{\partial\theta}{\partial z}=\dfrac{k_\mathrm{oil}}{\rho_\mathrm{oil}c_\mathrm{p}}\left(\dfrac{\partial^2v}{\partial r^2}+\dfrac{\partial^2v}{\partial z^2}\right)\end{cases} \tag{5}$$

式中：u、v 分别为流体径向和轴向流速，m/s；F_r、F_z 为流体径向和轴向的体积力大小，N；p 为流体压力；c_p 为油流定压比热容，W/(kg·℃)；ρ_oil 为油流密度 $\mathrm{kg/m^3}$；k_oil 为油流热导率，W/(m·℃)。

1.3 绕组区域电磁-流热双向耦合计算方法

在绕组电磁-流热耦合分析中，通过电磁场分析式(3)计算得到的绕组损耗加载到式(4)中，将其作为绕组区域流体-温度场计算中的热源。由于本文电磁场与流体-温度场数值计算模型不同，后者只对低压绕组区域进行建模分析，故需要一种能准确将 2 个模型的数据进行传递的方法。本文基于异构网格节点数据映射思想[11]，采用最近邻插值法，将绕组上的非平均热源实现绕组区域电磁场到流体-温度场数值计算的顺序耦合计算，如图 2 所示。

通过异构网格映射可将电磁场计算得到的绕组损耗加载到温度场计算中，但该过程仅是一个单向的数据传递，并没有体现“电磁”与“热”间的双向耦合过程。绕组损耗包括欧姆损耗、涡流损耗及杂散损耗等，其中欧姆损耗占主要部分，而涡流损耗次之，本文主要考虑欧姆损耗和涡流损耗。考虑到各线饼上损耗的不均匀分布，以及由于温升导致的材料电导率变化，故在每次迭代计算时对绕组各节点的欧姆损耗和涡流损耗分别进行温度修正[17]，如式(6)、式(7)所示：

$$\frac{P_\mathrm{ohmic}}{P_\mathrm{0.ohmic}}=\frac{\theta+\theta_\mathrm{k}}{\theta_0+\theta_\mathrm{k}} \tag{6}$$

$$\frac{P_\mathrm{eddy}}{P_\mathrm{0.eddy}}=\frac{\theta_0+\theta_\mathrm{k}}{\theta+\theta_\mathrm{k}} \tag{7}$$

式中：P_ohmic、P_eddy 分别表示在 θ 温度下的欧姆损耗与涡流损耗，$\mathrm{W/m^3}$；$P_\mathrm{0.ohmic}$、$P_\mathrm{0.eddy}$ 分别表示在 θ_0 基准温度下的欧姆损耗与涡流损耗，$\mathrm{W/m^3}$；θ_k 为电阻校正温度因子，对于铜为 234.5 ℃。

求解得到欧姆损耗及涡流损耗后，将其映射到流体-温度场计算中，并在每一次迭代计算中对两种损耗及材料属性进行温度修正，直至满足计算误差，从而实现电磁-流热的双向耦合。其计算流程图如图 3 所示。

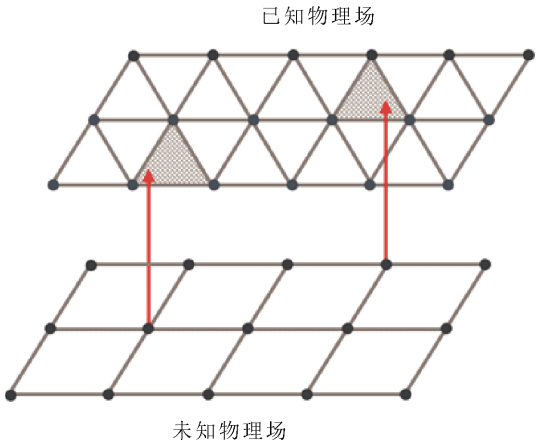


图 2 异构网格节点数据映射示意图

Fig.2 Diagram of the node data mapping among heterogeneous mesh

2 仿真模型及计算结果

2.1 基本假设

考虑到网格的划分对异构节点网格映射的计算精度有较大相关性，对绕组部分的电磁场计算与流体-温度场计算中均需要分配较大的网格数量。故为提高计算准确性，在对变压器绕组进行电磁-流热耦合计算时，做出如下简化假设[18-20]：

1）进行电磁场与温度场计算时，仅取一相的轴截面作为求解区域。同时，考虑到变压器绕组外型上的旋转对称性与内部物理特性的各向同性基础上，将 3 维模型简化为 2 维轴对称模型来进行求解，并选取铁芯的中心为轴对称面。

2）在进行电磁场计算时，只考虑铁芯、低压绕组和高压绕组 3 部分，忽略其他部件；在对绕组进行温度场计算时，热源只考虑绕组导线部分。

3）变压器的外环境及运行状态处于稳定状态，电磁场及温度场的求解结果均为稳态值。

2.2 变压器电磁场数值计算

2.2.1 仿真模型

进行绕组温度计算前的第 1 步是确定绕组损耗的数值大小和分布。由于本文的主要对象为低压绕组区域，每个导体均以单个矩形截面的形式进行建模，这样可以最大程度地反映漏磁的分布情况以计算涡流损耗。铜导线截面尺寸为 10.0 mm×3.0 mm，每股导线的外层包裹着 0.2 mm 的绝缘纸。由于绝缘纸磁导率较低，对磁场影响忽略不计，故在电磁分析中不予考虑。而对于高压绕组区域，将所有导线集成为一个矩形，导线截面积设置为 7.2 mm^2，2 维轴对称模型如图 4 所示，结构参数如表 1 所示。

2.2.2 材料及边界条件设置

变压器的磁场计算中，主要考虑高、低压绕组及铁芯的材料物性参数，如表 2 所示。

边界条件设置如下：

1）对于高、低压绕组，分别在导体上通入 164.96/577.35 A 的额定电流，且均为工频正弦电流。

2）将变压器油箱设置为磁绝缘边界。

3）在电磁场模型中，基准温度 θ_0 为 75 ℃，所有材料属性均按照在该温度下进行设置。

2.2.3 电磁场数值计算结果

通过电磁场数值计算，计算得到变压器低压绕组区域的各节点损耗分布如图 5 所示。同时计算出 52 个线饼的欧姆及涡流损耗如图 6 所示。

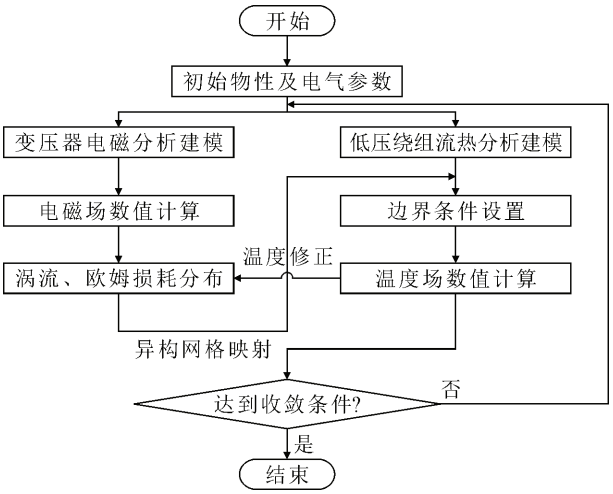


图 3 电磁-流热耦合计算流程

Fig.3 Electromagnetic-fluid-thermal coupling calculation process

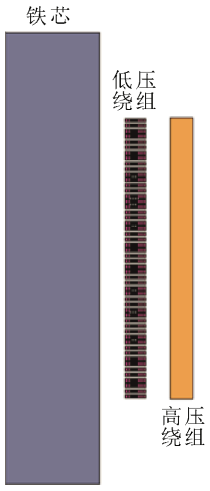


图 4 变压器 2 维简化模型

Fig.4 2-D simplified model of transformer

表 1 变压器结构参数

Table 1 Structural parameters of transformer

变压器结构参数		数值/mm
油箱	外径	675.0
	高度	1825.0
铁芯	外径	240.0
	高度	1160.0
低压绕组	外径	359.0
	内径	305.0
	高度	718.9
高压绕组	外径	420.0
	内径	480.0
	高度	552.5

表 2 材料物性参数

Table 2 Material physical parameters

变压器部件	电导率/(S·m^{-1})	相对磁导率
铁芯		*B-H* 曲线
低压绕组导体	5.31×10^{7}	1
高压绕组导体	5.31×10^{7}	1
变压器油		1

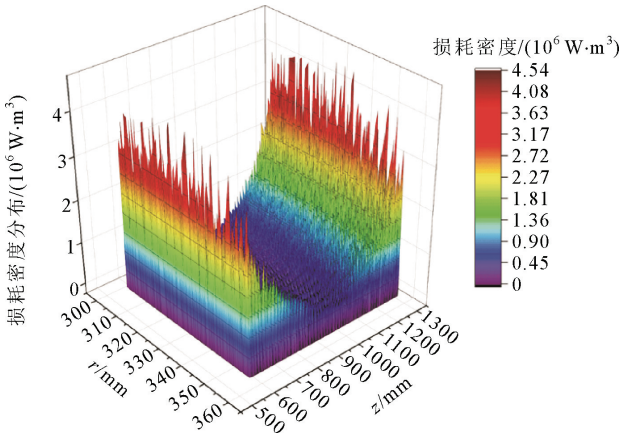


图 5 低压绕组区域损耗分布

Fig.5 Loss distribution in LV winding region

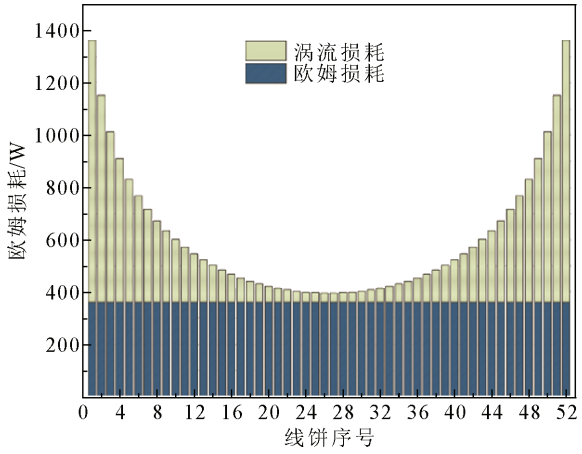


图 6 低压绕组区域线饼损耗分布

Fig.6 Distribution of disc loss in low voltage winding region

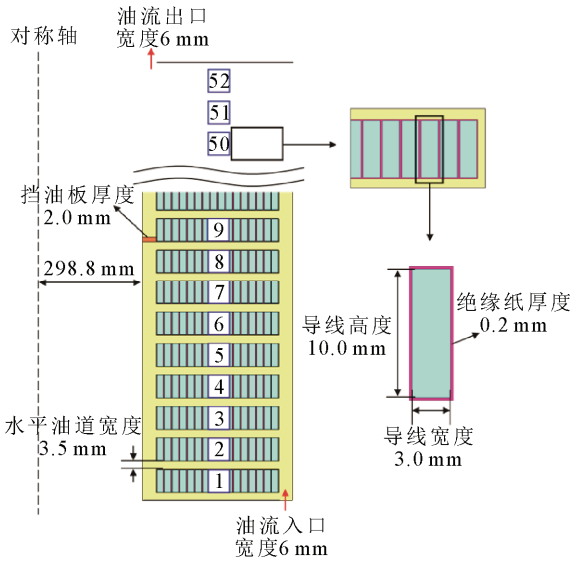


图 7 低压绕组局部结构 2 维示意图

Fig.7 Two dimensional structure of partial low voltage winding

由图 5、图 6 可直观看出低压绕组线饼欧姆损耗和涡流损耗的分布情况。绕组的欧姆损耗取决于流经绕组的电流值，额定工况下运行时，其值保持不变且分布均匀。而由于绕组中漏磁的存在，顶部和端部的线饼上产生了较大的涡流损耗，其值远大于欧姆损耗，而在绕组中部的线饼上涡流损耗较小。

通过计算可以得到，绕组总损耗为 31 877.21 W，总涡流损耗和欧姆损耗分别为 18 804.35 W 和 13 073.86 W，各线饼的平均损耗为 613.02 W。由此可以看出，涡流损耗导致绕组上的损耗分布极其不均，平均热源或仅考虑欧姆损耗的处理会使计算结果与实际情况存在较大误差。

2.3 绕组温度场数值计算

2.3.1 仿真模型

如图 7 所示，在低压绕组区域中，共存在 52 个线饼，一个线饼由 4 匝线圈组成，而每匝线圈由 4 股导线并绕，即一个线饼由 16 股导线绕制而成。

铜导线截面尺寸为 10.0 mm×3.0 mm，每股导线的外层包裹着 0.2 mm 的绝缘纸。在绝缘筒中，变压器油流的入口宽度和出口宽度均为 6.0 mm。6 块挡油板将低压绕组分割为 7 个通道，每个通道由 1—7 从下往上依次编号。其中 1—4 通道中含 7 个线饼，而 5—7 通道含 8 个线饼。绝缘筒两侧的挡油板位于竖直油道两侧并完全阻断了油流的流动，其厚度均为 1.0 mm。每个通道中包含内侧、外侧 2 个竖直油道及数个水平油道。其中，绕组内、外侧竖直油道的宽度均为 6.0 mm，水平油道分布均匀，高度均为 4.2 mm。线饼宽度与高度分别为 54.4 mm 和 10.4 mm。详细的几何参数已在图中进行标注。

2.3.2 材料及边界条件设置

表 3 为本文研究中变压器绕组导体、绝缘材料及冷却油的物性参数设置。

基于上述变压器绕组区域内的几何及物性参数，采用 COMSOL 默认网格对其进行划分以生成 2 维绕组模型。针对模型设定的边界条件如下：

1）入口边界条件：在通道 1 入口处，规定入

表 3　变压器绕组材料物性参数

Table 3　Physical parameters of transformer winding materials

材料	参数	数值或表达式
导体(铜)	密度/(kg·m^{-3})	8933
	比热容/(W·kg^{-1}·℃$^{-1}$)	385
	热导率/(W·m^{-1}·℃$^{-1}$)	401
绝缘纸	密度/(kg·m^{-3})	930
	比热容/(W·kg^{-1}·℃$^{-1}$)	1340
	热导率/(W·m^{-1}·℃$^{-1}$)	0.19
变压器油	密度/(kg·m^{-3})	$904.24-0.712\theta$
	比热容/(W·kg^{-1}·℃$^{-1}$)	$1785.04+3.58\theta$
	热导率/(W·m^{-1}·℃$^{-1}$)	$0.1315-7.1\times10^{-5}\theta$
	粘度/(kg·m^{-1}·s^{-1})	$0.0127-6.273\times10^{-4}\theta+5\times10^{-7}\theta^2$

口油流分布均匀且仅有轴向速度，其值为 0.05 m/s，入口温度为 40 ℃。

2）出口边界条件：在通道 7 的出口处设定压力为 0 Pa。

3）整个绕组的初始温度为 20 ℃，油流重力加速度值为常数。

4）油道内外侧绝缘筒及挡板热导率较小，故不考虑这些部件与外部、油流间的热交换，即此部分温度边界条件设置为绝热边界条件。

5）油流运动时，油流在线饼、绝缘边界处设置为无滑移的壁面边界条件。

6）将 2.1 节电磁场计算得到的绕组涡流、欧姆损耗作为热源分别进行温度修正并加载，其分布如图 8 所示。

本文应用有限元软件 COMSOL 对绕组模型进行 CFD 建模并对温度场及流场的耦合模型进行数值计算。考虑到密度由于通道入口处的雷诺数(*Re*)较小，因此采用层流模型进行求解。

2.3.3　温度场数值计算结果

结合图 8 中变压器低压绕组的 2 维轴对称模型、表 3 物性参数及边界条件的设置，计算得到温度场的稳态分布结果如图 9 所示。

同时，本研究也比较了绕组平均热源与非平均热源对绕组温度分布的影响。平均热源下线饼的损耗为 31 877.21/52 W=613.02 W，将其作为边界条件载入到流体-温度场的计算中，计算得到温度分布如图 10 所示。

比较图 9 和图 10，从整体温度分布趋势看，非平均热源和平均热源下温升分布有相似的特点。在相同的方面，绕组的最大温升均处于通道 7 即绕组顶端。同时，在轴向方向上，变压器低压绕组区域

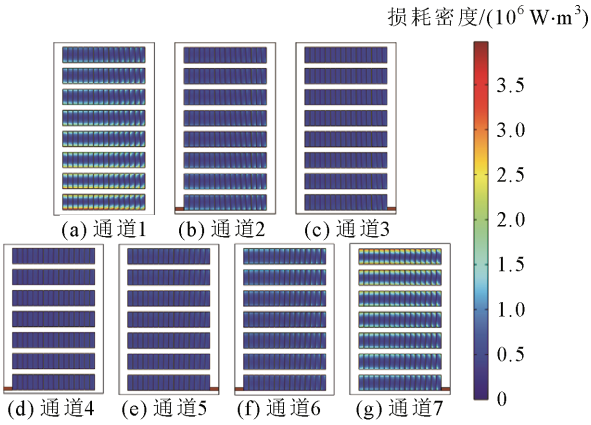


图 8　绕组热源分布云图

Fig.8　Distribution of winding heat source

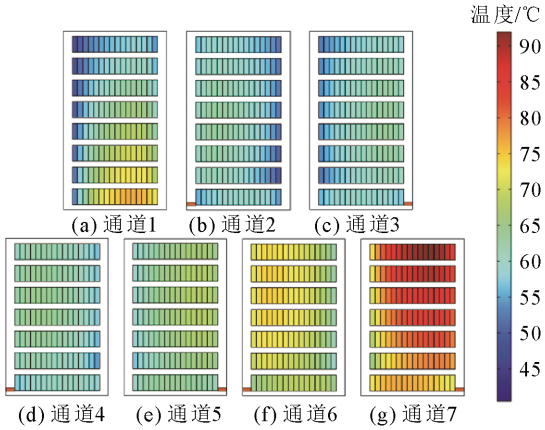


图 9　非平均热源下绕组温度分布云图

Fig.9　Winding temperature distribution with non-average heat source

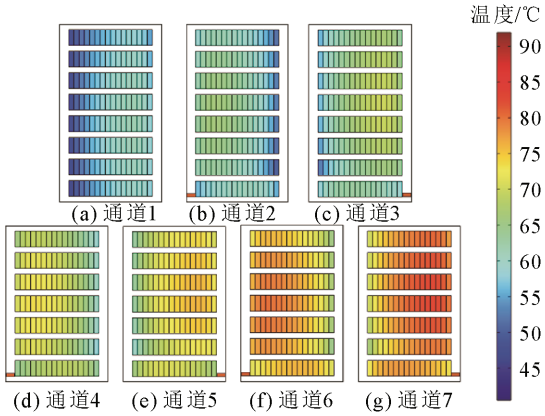


图 10　平均热源下绕组温度分布云图

Fig.10　Winding temperature distribution with average heat source

中每个通道的线饼表面温度随着高度的增加总体呈现出上升的趋势。为直观比较两种情况下线饼的温

升情况，提取出 52 个线饼的平均温度如图 11 所示，并使它们的最大温升刻度值为同一温度。

从图 11 可以看出，尽管两种情况下的热源总和相同，但温度分布仍有一定的区别。由于非平均热源下考虑到绕组和顶部和底部的涡流损耗，使得最底部和最顶部的线饼有着远大于平均热源下的温升。而除了顶部和底部通道外，在通道 2—6 内，在平均热源处理下，顶部和底部线饼中较高的损耗值被中间部分的线饼“平均”了，中间部分线饼的损耗大于非平均处理下的损耗，但损耗差值相对较小，使得通道 2—6 内平均热源处理下的线饼温度会略高于非平均处理下的温度。从有限元计算可得，平均热源下和非平均热源下的热点温度分别为 82.86 ℃和 92.49 ℃。同时，可以得到两种情况下绕组的热点分别位于 50 和 52 号线饼上。尽管平均热源也预测到了绕组热点的大致位置，但对于热点温度的具体数值预测差距较大。

最后，在有限元仿真软件中计算得到，变压器低压绕组最高温度即热点温度为 92.49 ℃，该温度将作为后文优化研究的基准。

3 绕组结构参数优化

3.1 响应面法

响应面法(response surface methodology, RSM)是一种经典的优化方法。在工程优化设计中，应用响应面法不仅可以得到相应目标与设计变量之间的关系，极大地减少进行实验或数值计算的时间，而且可以得到优化方案，即设计变量的最优组合，使目标函数达到最优[21]。

其优化步骤为：在第 1 阶段使用一系列试验设计，得到在设计变量不同水平下的输出变量(即响应)结果；在第 2 阶段中，在一阶段足够多的试验结果的基础上进行回归建模，将设计变量与输出变量之间的非线性关系通过确定的数学关系式(响应面)近似替代。在本研究中，将以热点温度(θ_{hs})为输出变量建立响应面。

3.2 试验设计

在响应面法优化研究中，为得到目标函数与设计变量之间的关系，通常采用中心组合设计及 BOX-Benhnken 试验设计来进行响应面的拟合。其中，相较于适用于多因素多水平试验，中心组合设计能更好地拟合响应面。

为了能通过改变变压器绕组区域结构参数来降低绕组热点温度，本文选取以下 5 个对其有一定影响地参数作为输入变量：低压绕组距铁芯距离(W_i)、导体横截面宽度(W_d)、导体横截面长度(H_d)、内侧油道宽度(W_l)、外侧油道宽度(W_r)。各参数选取如图 12 所示。

在进行试验设计时，由于在设计阶段无法获得实际实验的响应值，故采用有限元仿真结果作为系统响应。每次对各样本进行数值计算时，需重新对绕组进行电磁场分析以计算损耗，并载入到流体–温度场计算中。除所选的 5 个参数根据试验表格进行调整，其余结构参数及边界条件均与原绕组样本计算模型保持一致。按照 CCD 试验标准，可得到

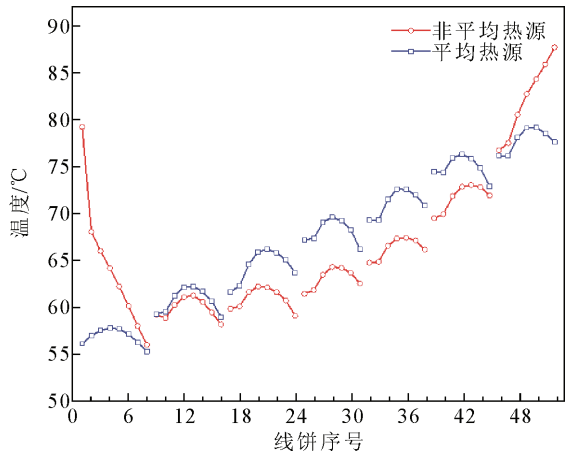


图 11 线饼平均温度比较

Fig.11 Comparison of average temperature of discs

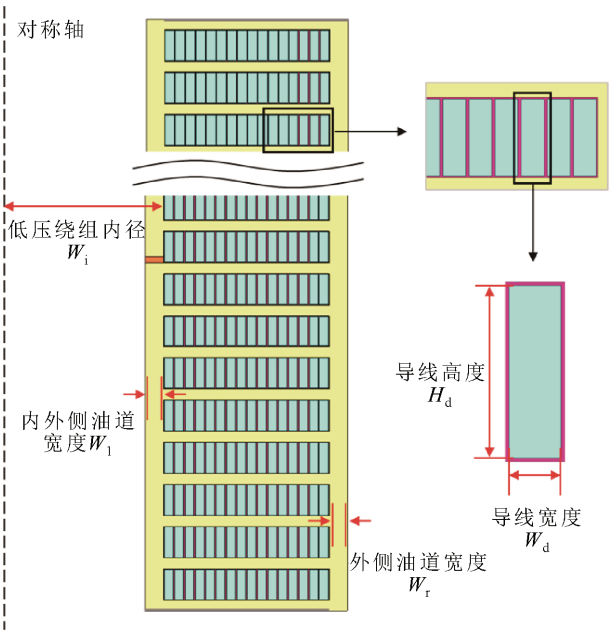


图 12 绕组结构优化设计变量

Fig.12 Optimal design variables of winding structure

表 4 所示的五因子五水平实验表格，所有试验样本表格如附录 A 表 A1 所示，样本总数为 50。

3.3 热点温度响应面模型建立

RSM 中采用的响应面模型通常是一个通过最小二乘法得到的多项式方程，如式(8)[22]所示：

$$Y=\beta_0+\sum_{i=1}^{k}\beta_i x_i+\sum_{i=1}^{k}\beta_{ii}x_i^2+\sum_{\substack{i=1\\i<j}}^{k}\beta_{ij}x_i x_j \tag{8}$$

式中：β 为未知系数；x_i、x_j 为设计变量；k 为设计变量的数量；Y 表示预测的响应值；β_0、β_i、β_{ii} 分别为偏移项、线性偏移和二阶偏移系数；β_{ij} 为交互作用系数。

根据表 4 中结构参数与绕组热点温度的关系，拟合出如式(9)所示的二阶多项式模型来模拟近似在不同绕组结构参数下的绕组热点温度。

$$\begin{aligned}\theta_{\mathrm{hs}}=&433.257-0.749W_{\mathrm{i}}-48.961W_{\mathrm{d}}-1.146H_{\mathrm{d}}-\\&34.021W_{\mathrm{l}}+6.294W_{\mathrm{r}}-0.023W_{\mathrm{i}}W_{\mathrm{d}}-0.039W_{\mathrm{i}}H_{\mathrm{d}}+\\&0.026W_{\mathrm{i}}W_{\mathrm{l}}-0.012W_{\mathrm{i}}W_{\mathrm{r}}+1.652W_{\mathrm{d}}H_{\mathrm{d}}+1.518W_{\mathrm{d}}W_{\mathrm{l}}-\\&0.524W_{\mathrm{d}}W_{\mathrm{r}}-0.212H_{\mathrm{d}}W_{\mathrm{l}}+0.346H_{\mathrm{d}}W_{\mathrm{r}}-0.975W_{\mathrm{l}}W_{\mathrm{r}}+\\&0.001W_{\mathrm{i}}^2+3.922W_{\mathrm{d}}^2+0.415H_{\mathrm{d}}^2+1.818W_{\mathrm{l}}^2+0.268W_{\mathrm{r}}^2\end{aligned} \tag{9}$$

3.4 绕组结构参数优化

3.4.1 NSGA-Ⅱ优化算法

NSGA 算法于 1994 年由 Srinivas 和 Deb[23]提出。2002 年，Deb 将其改进为带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)[24]。通过小生境技术，引入精英保持策略，在个体数据之间通过非支配关系和用季度排序对个体进行选取产生子代集合，并于父代集合合并生成新的种群，通过快速支配的排序法对子代个体的优劣进行划分，快速非支配排序原理在保证种群数目多样性的同时极大地提高了迭代时收敛的速度，降低了计算的复杂程度，尤其在低维优化方面具有较好的优化性能，使之成为经典的多目标优化算法之一。

3.4.2 多目标优化模型

多目标优化问题需要对数个目标函数同时进行优化。在本文中，优化的目标为热点温度及导体用量的最小化，为一多目标优化问题。由于绕组导体横截面积减小，必将导致绕组损耗的提升；同时，低压绕组半径的改变同样会对绕组的热点温度产生影响，故使两个目标的同时最小化并不现实，对于所有目标的最优解并不存在，对于单一目标的最优解可能是对另一目标的最劣解[25]。通常，多目标优化问题有一组解集，这些解无法简单地比较优劣，并且在改进任何单一目标都会影响并使得另外一个目标劣化，这样的解集即 Pareto 解[26-27]。

热点温度的计算通过 3.3 节的式(9)表示。导体用量 V 的计算式如式(10)所示。

$$V=52\sum_{t=1}^{16}\int_0^{W_{\mathrm{d}}}\mathrm{d}h\int_{W_{\mathrm{i}}+(W_{\mathrm{d}}+2W_{\mathrm{p}})\cdot(t-1)}^{W_{\mathrm{i}}+(W_{\mathrm{d}}+2W_{\mathrm{p}})\cdot t-2W_{\mathrm{p}}}\pi r\mathrm{d}r \tag{10}$$

式中：W_{p} 为绝缘纸宽度，其值为 0.2 mm。由式(10)可得，导体用量计算结果仅与 W_{i}、H_{d} 及 W_{d} 有关。

对于热点温度及导体用量的多目标优化，构建的数学模型如下：

$$\begin{aligned}&\min\ V=f_1(W_{\mathrm{i}},W_{\mathrm{d}},H_{\mathrm{d}})\\&\quad\theta_{\mathrm{hs}}=f_2(W_{\mathrm{i}},W_{\mathrm{d}},H_{\mathrm{d}},W_{\mathrm{l}},W_{\mathrm{r}})\\&\text{s.t.}\begin{cases}W_{\mathrm{i.min}}\le W_{\mathrm{i}}\le W_{\mathrm{i.max}}\\H_{\mathrm{d.min}}\le H_{\mathrm{d}}\le H_{\mathrm{d.max}}\\W_{\mathrm{d.min}}\le W_{\mathrm{d}}\le W_{\mathrm{d.max}}\\W_{\mathrm{l.min}}\le W_{\mathrm{l}}\le W_{\mathrm{l.max}}\\W_{\mathrm{r.min}}\le W_{\mathrm{r}}\le W_{\mathrm{r.max}}\end{cases}\end{aligned} \tag{11}$$

通过采用 NSGA-Ⅱ优化算法对拟合的热点温度响应面及计算得到的导体用量进行优化，算法中各参数的设置分别为：种群总数为 100，最大迭代次数为 1000，交叉概率为 0.9，交叉分布指数为 10，变异分布指数为 20。

各绕组结构参数的优化约束范围如表 5 所示。

3.5 优化结果及验证

针对式(11)建立的数学模型对热点温度及导体用量进行多目标优化，通过 NSGA-Ⅱ算法得到的 Pareto 前沿集如图 13 所示。

表 4 CCD 试验设计因子水平表

Table 4 CCD design factor level table

水平	因子				
	W_{i}/mm	W_{d}/mm	H_{d}/mm	W_{l}/mm	W_{r}/mm
–2.00	290.00	2.25	8.00	4.00	4.00
–0.84	298.69	2.68	9.16	5.16	5.16
0	305.00	3.00	10.00	6.00	6.00
0.84	311.31	3.32	10.84	6.84	6.84
2.00	320.00	3.75	12.00	8.00	8.00

表 5 绕组结构参数优化范围

Table 5 Optimization range of winding structure parameters

结构参数	基准值/mm	最小值/mm	最大值/mm
W_{i}	305.0	295.0	315.0
H_{d}	10.0	9.0	11.0
W_{d}	3.0	2.5	3.5
W_{l}	6.0	5.0	7.0
W_{r}	6.0	5.0	7.0

前沿集上的每一个圆点都对应一个最优解，解集中的所有解都是可行的。从图 13 中可以发现，前沿集上没有一个点能同时在两个目标函数上取得极值。通过这些解集，可以根据实际需求选择适合的最优解。考虑到在不过分降低绕组散热能力的情况下减少导体用量，在 Pareto 前沿集上选择了 4 个优化方案，每个方案的结构参数、响应面计算得到的热点温度及导体用量如表 6 所示。同时为验证响应面法的精度，通过数值计算对热点温度进行了预测。根据各个方案下的优化结果来看，响应面法预测的热点温度与数值计算的热点温度相差较小，最大误差仅为 1.3 ℃。同时，与原模型相比，Pareto 前沿集上的导体用量及热点温度均得到显著降低，均满足温升限值要求。

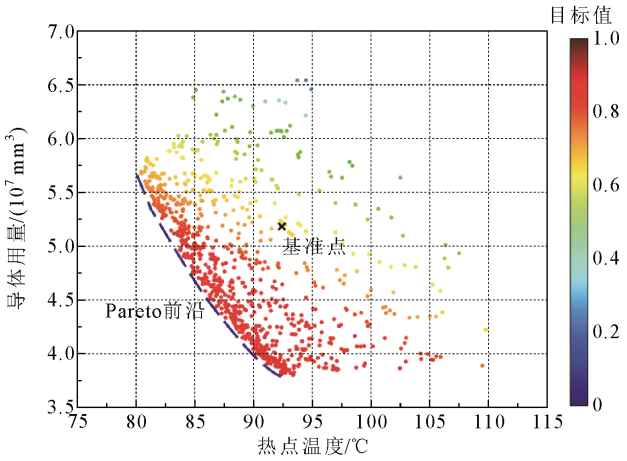


图 13 Pareto 前沿集图

Fig.13 Pareto plots

4 结论

本文基于有限元仿真软件 COMSOL 对一变压器的低压绕组部分进行电磁-流热耦合分析计算，然后对绕组结构参数进行优化以降低绕组热点温度与导体用量。优化方法结合有限元仿真技术、异构网格映射技术、响应面法及多目标优化算法。根据优化结果得到以下结论：

1）根据油浸式变压器绕组结构及物性参数，通过有限元仿真软件对变压器进行了电磁场分析。结果表明绕组端部涡流损耗远大于中部涡流损耗，故在进行流体-温度场计算时，不能简单将损耗进行平均加载处理。

2）对低压绕组区域建立了流体-温度场耦合计算模型，通过异构网格映射方法将绕组损耗作为热源加载到流体-温度场中进行计算，并根据温度对热源进行修正，实现了绕组电磁–流热的双向耦合计算。比较了绕组热源平均与非平均处理后的温度分布结果。结果表明，两种处理下的热点温度分别为 82.82 ℃和 92.49 ℃，平均热源会带来较大的误差。

3）基于响应面法构建关于热点温度与绕组结构参数的非线性关系，建立了对热点温度、导体用量最小化的多目标优化数学模型。通过 NSGA-Ⅱ算法，得到了使热点温度与导体用量同时降低的 pareto 前沿集，并进行了数值计算验证。计算结果表明，优化后的绕组热点温度及导体用量明显降低,本文的方法能很好地应用于变压器绕组结构的优化设计中。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

表 6 Pareto 优化设计结果

Table 6 Results of Pareto optimal designs

方案	设计变量					θ_{hs}/℃		导体用量/(10^7 mm^3)	θ_{hs}/℃ (预测误差)
	W_1/mm	W_d/mm	H_d/mm	W_l/mm	W_t/mm	响应面	数值计算		
基准						92.41	92.49	5.21	−0.08
方案 1	313.82	3.05	6.01	6.97	5.68	84.07	83.28	4.90	0.79
方案 2	312.86	2.87	9.00	6.98	5.04	85.92	85.95	4.58	−0.03
方案 3	314.89	2.58	9.07	6.97	5.00	89.08	89.96	4.14	−0.88
方案 4	308.15	2.50	9.00	6.96	5.02	91.18	92.48	3.90	−1.30

参考文献 References

[1] SCHNEIDER J, GAUL A G, NEUMANN C, et al. Asset management techniques[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2006, 28(9): 643-654.

[2] 袁发庭，施文菀，王 玥，等. 基于多物理场仿真的油浸式变压器温度特性分析及散热器优化[J/OL]. 高电压技术，2023：1-12 [2023-04-03]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20221664.
YUAN Fating, SHI Wenyu, WANG Yue, et al. Temperature characteristic analysis and radiator optimization of oil-immersed transformer based on multi-physical field simulation[J]. High Voltage Engineering, 2023: 1-12[2023-04-03]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20221664.

[3] IEC. Power transformers-part 7: loading guide for mineral-oil-immersed power transformers: IEC 60076-7: 2018[S]. Switzerland: IEC, 2018.

[4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 电力变压器 第 7 部分：油浸式电力变压器负载导则：GB/T 1094.7—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power transformers -part 7: loading guide for oil-immersed power transformers: GB/T 1094.7—2008[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2009.

[5] MEYER O H H, LERVÅG K Y, ERVIK Å. A multiscale porous-resolved methodology for efficient simulation of heat and fluid transport in complex geometries, with application to electric power transformers[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183: 116133.

[6] 刘 刚，张瀚方，池 骋，等. 二维电磁场–流体–温度场耦合仿真节点数据映射算法研究[J]. 电工技术学报，2018，33(1)：148-157.
LIU Gang, ZHANG Hanfang, CHI Cheng, et al. Research on node data mapping algorithm for the 2D coupling electromagnetic-fluid-thermal fields[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 148-157.

[7] TORRIANO F, CHAABAN M, PICHER P. Numerical study of parameters affecting the temperature distribution in a disc-type transformer winding[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(14/15): 2034-2044.

[8] ZHANG X, WANG Z D, LIU Q, et al. Numerical investigation of oil flow and temperature distributions for ON transformer windings[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 1-9.

[9] 李 琳，谢裕清，刘 刚，等. 油浸式电力变压器饼式绕组温升的影响因素分析[J]. 电力自动化设备，2016，36(12)：83-88.
LI Lin, XIE Yuqing, LIU Gang, et al. Influencing factor analysis for disc-type winding temperature rise of off-immersed power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 83-88.

[10] 周利军，王 健，王路伽，等. 强油导向结构变压器绕组区域温度建模及热点定位[J]. 高电压技术，2020，46(11)：3896-3904.
ZHOU Lijun, WANG Jian, WANG Lujia, et al. Thermal modeling and hot spot locating for transformer winding in oil forced and directed cooling mode[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3896-3904.

[11] 刘 刚，靳艳娇，马永强，等. 基于非平均热源的油浸式变压器 2 维温度场分析[J]. 高电压技术，2017，43(10)：3361-3370.
LIU Gang, JIN Yanjiao, MA Yongqiang, et al. Two-dimensional temperature field analysis of oil-immersed transformer based on non-uniformly heat source[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3361-3370.

[12] KARAOGLAN A D, OCAKTAN D G, ORAL A, et al. Design optimization of magnetic flux distribution for PMG by using response surface methodology[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(6): 8200309.

[13] SMOLKA J. CFD-based 3-D optimization of the mutual coil configuration for the effective cooling of an electrical transformer[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 124-133.

[14] 袁发庭，姜 发，刘健犇，等. 基于神经网络模型与多岛遗传算法的空心电抗器隔音装置优化设计[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1213-1223.
YUAN Fating, JIANG Fa, LIU Jianben, et al. Optimization design of sound-insulation device of air-core reactor based on neural network model and multi-island genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1213-1223.

[15] 袁发庭，吕 凯，刘健犇，等. 基于电磁-热-结构多物理场耦合的铁心电抗器线圈结构优化方法[J]. 电工技术学报，2022，37(24)：6431-6441.
YUAN Fating, LÜ Kai, LIU Jianben, et al. Coil structures optimization method of iron core reactor based on electromagnetic-thermal-structure multi-physical field coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6431-6441.

[16] JIA X Y, LIN M, SU S W, et al. Numerical study on temperature rise and mechanical properties of winding in oil-immersed transformer[J]. Energy, 2022, 239: 121788.

[17] ESLAMIAN M, VAHIDI B, ESLAMIAN A, et al. Thermal analysis of cast-resin dry-type transformers[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(7): 2479-2488.

[18] PICHER P, TORRIANO F, CHAABAN M, et al. Optimization of transformer overload using advanced thermal modelling[R]. Paris, France: CIGRE, 2010.

[19] 刘弘景，张丹丹，李 伟，等. 大型油浸式变压器绕组温度场的有限元分析[J]. 高压电器，2019，55(12)：83-89.
LIU Hongjing, ZHANG Dandan, LI Wei, et al. Finite element analysis for temperature field of winding in large oil-immersed transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 83-89.

[20] 廖才波，阮江军，逯怀东，等. 油浸式变压器二维电磁–流体–温度场耦合分析方法研究[J]. 科学技术与工程，2014，36(14)：67-71.
LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LU Huaidong, et al. 2-D coupled electromagnetic-fluid-thermal analysis of oil-immersed transformer[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 36(14): 67-71.

[21] BAŞ D, BOYACI İ H. Modeling and optimization I: usability of response surface methodology[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(3): 836-845.

[22] 刘 刚，刘西娅，刘 尧，等. 基于响应面法的变压器静电环绝缘优化设计[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4163-4171.
LIU Gang, LIU Xiya, LIU Yao, et al. Optimal design of transformer electrostatic ring insulation based on response surface method[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4163-4171.

[23] SRINIVAS N, DEB K. Muiltiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.

[24] MARTINS F G. Tuning PID controllers using the ITAE criterion[J]. International Journal of Engineering Education, 2005, 21(5): 867-873.

[25] YUAN F T, LV K, TANG B, et al. Optimization design of oil-immersed iron core reactor based on the particle swarm algorithm and thermal network model[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021: 6642620.

[26] MANSOURI A, SMAIRI N, TRABELSI H. Multi-objective optimization of an in-wheel electric vehicle motor[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 50(3): 449-465.

[27] 岳国华，杜志叶，孟圣淳，等. 基于电热耦合的干式直流电容器温升分布不均匀特性分析及优化[J]. 高电压技术，2022，48(12)：4915-4924.
YUE Guohua, DU Zhiye, MENG Shengchun, et al. Analysis and optimization of non-uniform temperature rise distribution of dry-type DC capacitor based on electro-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4915-4924.



袁发庭(通信作者)
1988—，男，博士，副教授，硕导
主要研究方向为高压电抗器设计与电工装备多物理场分析
E-mail：yuanfatinghss@163.com

YUAN Fating
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



陈 炜
1992—，男，博士，工程师
主要研究方向为输变电工程噪声检测与降噪技术
E-mail: chenhust166@163.com

CHEN Wei
Ph.D.

收稿日期 2022-09-14 修回日期 2023-05-16 编辑 卫李静

附录 A

表 A1　CCD 试验设计

Table A1　CCD experimental design

样本序号	W_t/mm	W_d/mm	H_d/mm	W_l/mm	W_r/mm	θ_{hs}/℃
1	298.69	3.32	9.16	6.84	5.16	84.56
2	298.69	3.32	10.84	5.16	5.16	97.93
3	298.69	2.68	10.84	5.16	5.16	103.37
4	311.31	3.32	9.16	5.16	6.84	96.33
5	311.31	2.68	9.16	5.16	6.84	105.26
6	311.31	3.32	9.16	5.16	5.16	91.97
7	305.00	3.00	10.00	6.00	6.00	92.49
8	305.00	3.00	10.00	4.00	6.00	118.4
9	305.00	3.00	10.00	6.00	6.00	92.49
10	305.00	3.00	8.00	6.00	6.00	92.06
11	311.31	2.68	9.16	5.16	5.16	99.45
12	311.31	2.68	10.84	6.84	5.16	88.18
13	305.00	3.00	12.00	6.00	6.00	97.01
14	298.69	3.32	10.84	6.84	5.16	86.46
15	305.00	3.00	10.00	6.00	6.00	92.49
16	298.69	2.68	9.16	5.16	5.16	102.12
17	298.69	2.68	10.84	5.16	6.84	109.67
18	305.00	3.00	10.00	6.00	6.00	92.49
19	298.69	3.32	9.16	5.16	6.84	99.24
20	298.69	3.32	10.84	5.16	6.84	102.75
21	305.00	3.00	10.00	6.00	8.00	95.51
22	305.00	3.00	10.00	6.00	6.00	92.49
23	305.00	2.25	10.00	6.00	6.00	101.97
24	298.69	2.68	10.84	6.84	5.16	91.13
25	311.31	2.68	10.84	6.84	6.84	91.51
26	298.69	2.68	9.16	6.84	5.16	91.5
27	298.69	2.68	10.84	6.84	6.84	94.71
28	311.31	2.68	10.84	5.16	5.16	100.3
29	311.31	3.32	9.16	6.84	5.16	82.3
30	311.31	3.32	10.84	6.84	5.16	83.25
31	298.69	3.32	10.84	6.84	6.84	89.8
32	305.00	3.00	10.00	6.00	4.00	92.38
33	305.00	3.00	10.00	6.00	6.00	92.49
34	311.31	3.32	10.84	5.16	5.16	94.1
35	311.31	3.32	10.84	6.84	6.84	86.68
36	298.69	2.68	9.16	6.84	6.84	92.78
37	305.00	3.00	10.00	6.00	6.00	92.49
38	311.31	2.68	9.16	6.84	5.16	89.21
39	311.31	3.32	10.84	5.16	6.84	98.55
40	305.00	3.00	10.00	8.00	6.00	81.89
41	320.00	3.00	10.00	6.00	6.00	89.51
42	305.00	3.00	10.00	6.00	6.00	92.49
43	305.00	3.75	10.00	6.00	6.00	88.19
44	290.00	3.00	10.00	6.00	6.00	96.89
45	298.69	3.32	9.16	6.84	6.84	86.53
46	311.31	2.68	9.16	6.84	6.84	90.41
47	298.69	3.32	9.16	5.16	5.16	94.75
48	311.31	2.68	10.84	5.16	6.84	105.88
49	298.69	2.68	9.16	5.16	6.84	108.25
50	311.31	3.32	9.16	6.84	6.84	84.05