第 52 卷 第 4 期：1923-1938 高电压技术 Vol.52, No.4: 1923-1938
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251384

基于磁-热-流耦合的换流变压器屏蔽装置结构参数优化及绕组热点温度反演

袁发庭[1,2]，肖明月[2]，江宇晴[2]，鲍国苗[2]，费瑞昊[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）

摘　要：换流变压器实际运行中受谐波激励影响，其损耗与温升相较基波额定工况显著升高，对设备长期运行稳定性构成严峻挑战。首先，依据换流变压器实际结构参数，构建三维仿真模型，获取基波与谐波工况下变压器磁通密度分布及损耗特性；搭建热-流耦合仿真模型，揭示变压器温度场与流场的分布规律，结果表明计入谐波后变压器损耗及绕组热点温度均显著上升。其次，在油箱壁面增设电屏蔽和磁屏蔽装置开展损耗抑制效果研究，磁屏蔽效果更为突出；在此基础上，分析屏蔽装置长度、厚度和高度对油箱损耗的影响规律，采用响应面法结合满意度函数构建多目标优化模型，对参数进行全局优化，优化后油箱壁面总损耗和绕组热点温度均显著降低。最后，基于优化后的换流变压器油箱壁面进行分域取点，计算各区域测点与绕组热点温度的相关性，引入 GA-BP 神经网络模型对高相关性的点进行反演。结果显示，对不同组合的高相关性测点进行温度反演，最佳测点组合的反演精度达到 0.99 以上，该研究为变压器油箱壁面监测点位的选取提供了可靠理论支撑。

关键词：换流变压器；屏蔽装置；响应面；温度反演；GA-BP 预测模型

Structural Parameter Optimization of Converter Transformer Shielding Device Based on Magnetic-thermal-flow Coupling and Winding Hot Spot Temperature Inversion

YUAN Fating[1,2], XIAO Mingyue[2], JIANG Yuqing[2], BAO Guomiao[2], FEI Ruihao[2], TANG Bo[1,2]
(1. Hubei Provincial Engineering Technology 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)

Abstract：The converter transformer is affected by harmonic excitation in actual operation, and its loss and temperature rise are significantly higher than those of the fundamental rated condition, which poses a serious challenge to the long-term operation stability of the equipment. Firstly, based on the actual structural parameters of the converter transformer, a three-dimensional simulation model is constructed to obtain the magnetic flux density distribution and loss characteristics of the transformer under fundamental and harmonic conditions. The thermal-flow coupling simulation model is built to reveal the distribution law of temperature field and flow field. The results show that the transformer loss and winding hot-spot temperature increase significantly after considering harmonics. Secondly, the loss suppression effect is studied by adding electrical shielding and magnetic shielding devices on the wall of the fuel tank, and the magnetic shielding suppression effect is more prominent. On this basis, the influences of the length, thickness and height of the shielding device on the loss of the fuel tank are analyzed. The response surface method combined with the satisfaction function is used to construct a multi-objective optimization model, and the parameters are globally optimized. After optimization, the total loss of the fuel tank wall and the winding hot-spot temperature are significantly reduced. Finally, based on the optimized transformer tank wall, the correlation between the measuring points in each region and the hot-spot temperature of the winding is calculated, and the GA-BP neural network model is introduced to invert the points with high correlation. The results show that the temperature inversion of different combinations of high correlation measuring points are carried out, and the inversion accuracy of the best combination of measuring points is more than 0.99. This study provides a reliable theoretical support for the selection of monitoring points on the wall of transformer tank.

Key words：converter transformer; shielding device; response surface; temperature inversion; GA-BP prediction mode

基金资助项目：国家自然科学基金(52307179)；湖北省教育厅科研计划(D20231205)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China(52307179), Science and Technology Research Project of Education Department of Hubei Province(D20231205).

0 引言

换流变压器作为交直流变换的核心枢纽，是实现能量传输与转换的关键大型核心设备。在实际运行中，换流变压器承受交直流复合电压作用，电流中伴随大量谐波分量；谐波电流会在变压器内部产生附加谐波损耗，导致绕组、铁芯及油箱等部件发热显著增强，进而引发设备温升升高。温升超限将加速绝缘老化，大幅缩短换流变压器的使用寿命，更可能对其安全稳定运行构成严重威胁[1-3]。鉴于此，为有效抑制变压器损耗和温升、实现热点温度的精准监测，开展换流变压器屏蔽装置优化及绕组热点温度反演研究具有重要的工程实践价值。

近年来，国内外学者围绕屏蔽装置优化与绕组热点温度反演两大关键技术开展了研究。

在屏蔽装置优化方面，为抑制变压器损耗、控制温升，普遍在变压器箱体内壁铺设屏蔽装置。文献[4]提出通过改变屏蔽板结构形态，采用弧形硅钢片提升屏蔽效能；文献[5-6]分析了屏蔽装置不同材料及铺设位置对变压器损耗的抑制效果；文献[7-8]针对屏蔽装置各结构参数开展单变量分析，计算不同参数下油箱涡流损耗的变化规律；文献[9]引入肺叶式磁屏蔽与油箱屏蔽的复合构型，有效减少漏磁通与杂散损耗，降低局部过热风险。上述研究多采用单因素优化思路，未能充分考量多参数间的耦合作用。

在热点温度计算及反演领域，当前变压器热点温度获取方法主要有经验公式法、热路模型解析法、数值模拟分析法及人工智能算法。文献[10-12]采用有限元法进行磁场分析确定变压器损耗分布，结合有限体积法开展温度-流体场耦合分析；文献[13-14]提出基于 U-net 网络的油浸式变压器内部温度快速求解方法，实现设备全场域温度分布的精准预测；文献[15]利用反向传播神经网络(back propagation neural network，BPNN)建立变压器底层油温特征点与绕组热点温度的映射关系，达成绕组热点温度的间接预测；文献[16]选取环境温度、顶层油温和负载系数等关键参量作为输入变量，采用反向传播神经网络构建变压器热点温度反演模型；文献[17]则聚焦流线法，探究不同流线及特征温度点选取策略对反演结果的影响规律。然而，现有变压器温度计算及热点温度反演研究虽取得阶段性成果，但普遍未纳入谐波因素的影响，导致计算结果与实际运行温度存在偏差，影响变压器运行状态的精准评估。

本文基于换流变压器结构参数构建仿真模型，获取基波与谐波工况的磁通密度及损耗分布，并建立热-流耦合仿真模型，计算变压器温度与流场分布特性，对比得到谐波工况下的变压器损耗及绕组热点温度显著升高。在此基础上，分析屏蔽装置长度、厚度和高度对油箱损耗的影响，结合响应面法与满意度法优化结构参数，优化后的装置可有效降低损耗与热点温度。最后对油箱壁面实施区域划分，开展各区域测点与绕组热点温度的相关性量化分析，基于 GA-BP 神经网络对不同组合的高相关性测点进行热点温度反演，得到最佳测点组合，为变压器油箱壁面监测点的优化布设提供科学理论依据。

1 基波和谐波下换流变压器损耗和温度场计算

1.1 换流变压器基本结构及等效模型

本文换流变压器额定容量为 321.1 MVA，额定电压为 500 kV，整体结构为单相四柱式。根据变压器实际结构参数，利用 COMSOL 仿真软件对变压器进行三维等效建模。为了兼顾计算精度和时长，在建模过程中做了以下简化：1）变压器夹件、拉板等结构件忽略不计；2）绕组简化为圆筒形式；3）不考虑铁芯的叠片结构，将铁芯作为一个整体进行建模；4）各衔接处，如箱盖、箱底与侧壁之间均为直角连接。变压器模型和结构参数如图 1 所示。

1.2 变压器磁场及损耗仿真

1.2.1 磁场仿真计算

1）基波工况

基波工况下的铁芯、绕组及变压器油箱磁通密度分布如图 2 所示。

基波工况下，磁通密度最大值分布在 2 个铁芯主柱上，最小值在铁芯顶角处，最大值为 1.77 T；

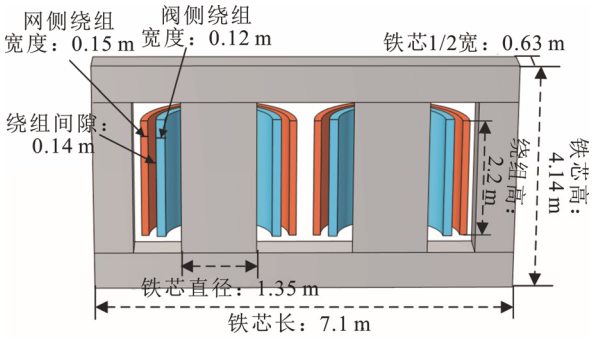


图 1 变压器模型

Fig.1 Transformer model

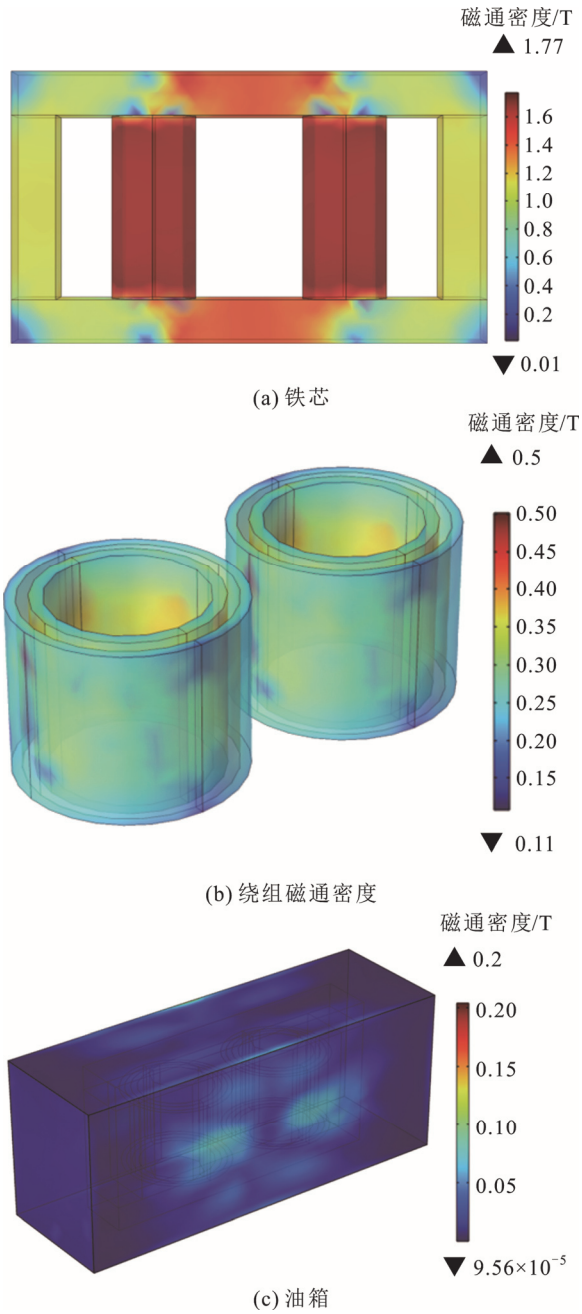


图 2　基波下变压器磁通密度分布

Fig.2　Magnetic flux density distribution of transformer under fundamental wave

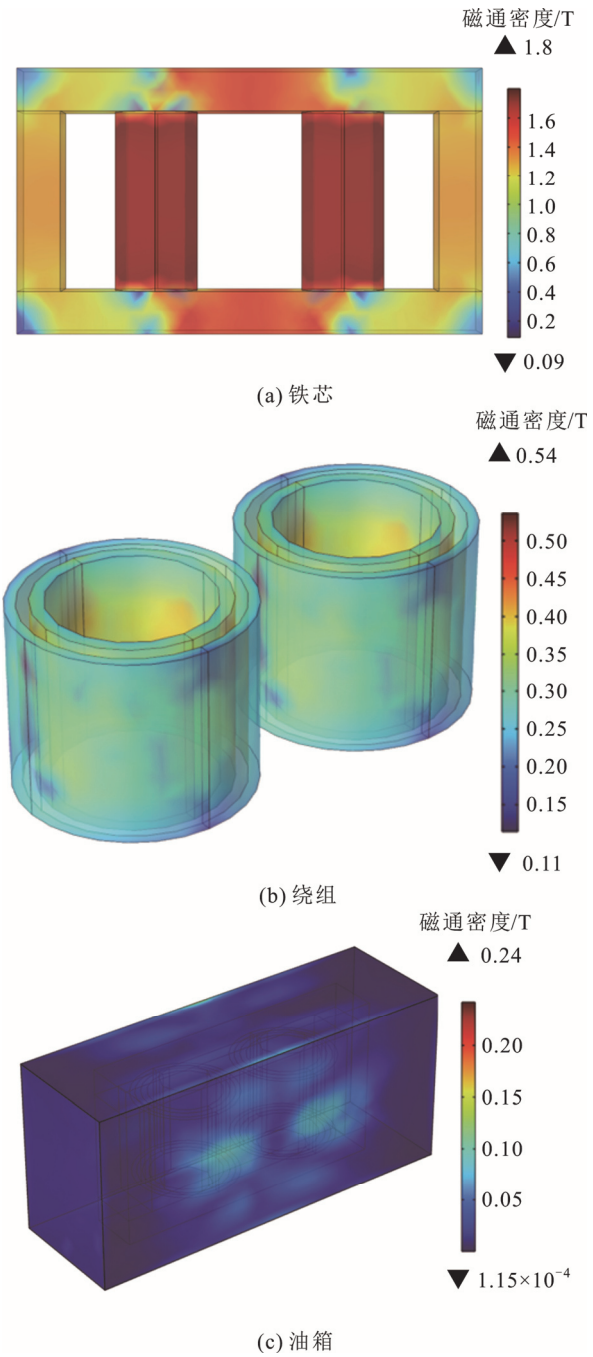


图 3　谐波下变压器磁通密度分布

Fig.3　Magnetic flux density distribution of transformer under harmonic

绕组的磁通密度分布主要在两绕组间的空道处，中间较大，两端较小，几乎呈对称分布，最大值为 0.50 T；油箱的磁通密度主要分布在前后壁面与绕组对应的位置，此时漏磁最大，最大值为 0.20 T。

2）谐波工况

本文通过模拟换流变压器在直流输电系统中的运行状况获得换流变压器的电流波形，从而得到各次谐波含量[18-19]，详见附录 A1。谐波工况下的铁芯、绕组及变压器油箱磁通密度分布见图 3。

谐波工况下的磁通密度分布情况与基波时一致，由于谐波电流的影响，各结构磁通密度有所增加。铁芯磁通密度最大值为 1.80 T；绕组磁通密度最大值为 0.54 T；油箱壁磁通密度最大值为 0.24 T。

1.2.2　损耗计算

各结构磁通密度的增加会导致其损耗增加。依据变压器磁通密度分布规律，计算基波及谐波工况下变压器各结构损耗值。铁芯及绕组损耗计算过程

详见附录 A2，所得损耗值见表 1。

对比 2 种工况下变压器的油箱损耗，其体积损耗密度分布如图 4 所示。

从图 4 中可以看出，油箱的损耗密度分布与油箱磁通密度分布相似，最大值均出现在与绕组对应的位置。从基波到谐波，油箱损耗密度最大值从 4.32×10^5 W/m^3 增加到了 4.61×10^5 W/m^3，油箱总损耗值由 52 770 W 增加到了 56 115 W。其中各壁面损耗值如表 2 所示。

1.3 变压器温度场-流场仿真

1.3.1 变压器材料属性、边界条件及网格设置

1）材料属性。铁芯和绕组分别采用的是硅钢片和铜，变压器油的物理参数与温度有关，密度会随温度的变化而变化，因此将变压器油的密度、动力黏度参数拟合成温度函数，材料属性见附录 B 表 B1。

2）边界条件。采用瞬态求解器进行动态过程模拟。求解器采用自适应时间步长方案，其步长大小根据计算过程中的局部误差自动调整，以平衡求解效率与精度。设置变压器整体初始温度设置与环境温度相等，为 298.15 K；油流速的初始速度为 0 m/s，壁面无滑移，流场计算中包含重力。

3）网格设置。为了兼顾仿真的速度和精度，对不同部分选择合适的网格单元尺寸，在变压器边界处和结构间的衔接处对网格进行进一步加密处理，整体采用四面体网格，划分后的完整网格包含 98 576 个域单元、21 230 个边界单元和 1 967 个边单元。

1.3.2 仿真结果

将基波与谐波工况所得的损耗作为热源分别带入仿真，计算 2 种工况下变压器铁芯和绕组的温度分布及整体流场分布，其控制方程详见附录 A3。

1）基波工况

基波工况下变压器温度和流场分布如图 5 和图 6 所示。

基波工况下，变压器温度整体呈不均匀分布状态，其中铁芯最高温度为 65.9 ℃，位于铁芯主柱中上部区域；热点温度最高值为 72.0 ℃，位于阀侧绕组 2/3 处。阀侧绕组处于变压器内侧，相较于外侧的网侧绕组，其散热条件更差，温度更高。运行时，铁芯与绕组产生的热量会传递至变压器油中；变压器油受热后密度变小，在热浮力作用下持续向上流动抵达油箱顶部，通过对流方式与油箱上表面完成热交换。这一循环过程使得绕组两端的温度较小。

表 1 铁芯及绕组损耗值

Table 1 Core and winding loss values

结构	基波损耗/W	谐波损耗/W
铁芯	82 753	88 379
阀侧绕组	290 230	305 240
网侧绕组	361 440	380 130

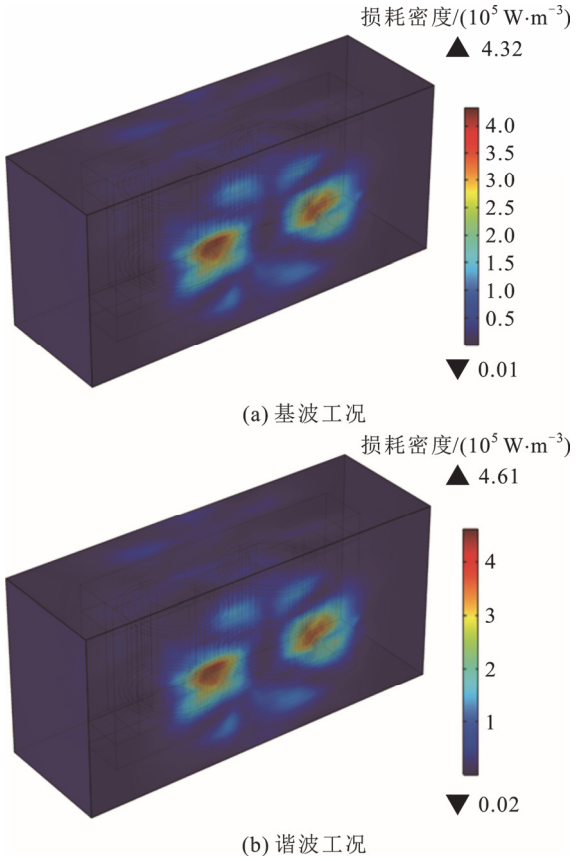


图 4 油箱损耗密度分布

Fig.4 Distribution of fuel tank loss density

表 2 油箱各壁面损耗值

Table 2 Fuel tank wall wear values

壁面	基波损耗/W	谐波损耗/W	壁面	基波损耗/W	谐波损耗/W
前壁	27 188	28 941	右壁	28.765	35.860
后壁	20 623	21 940	上壁	2 419.3	2 546.3
左壁	24.381	30.405	下壁	2 488.5	2 621.9

基波工况下变压器内部流场最大流速为 0.4 m/s，高流速流线集中于变压器中上层，伴随明显涡流现象。根据传热机理，变压器油沿流线向顶部流动中形成局部涡流；在与油箱完成散热换热后，油流沿流线向下流向变压器底部，这一循环流动实现变压器内部油流以流线运动的完整散热过程。

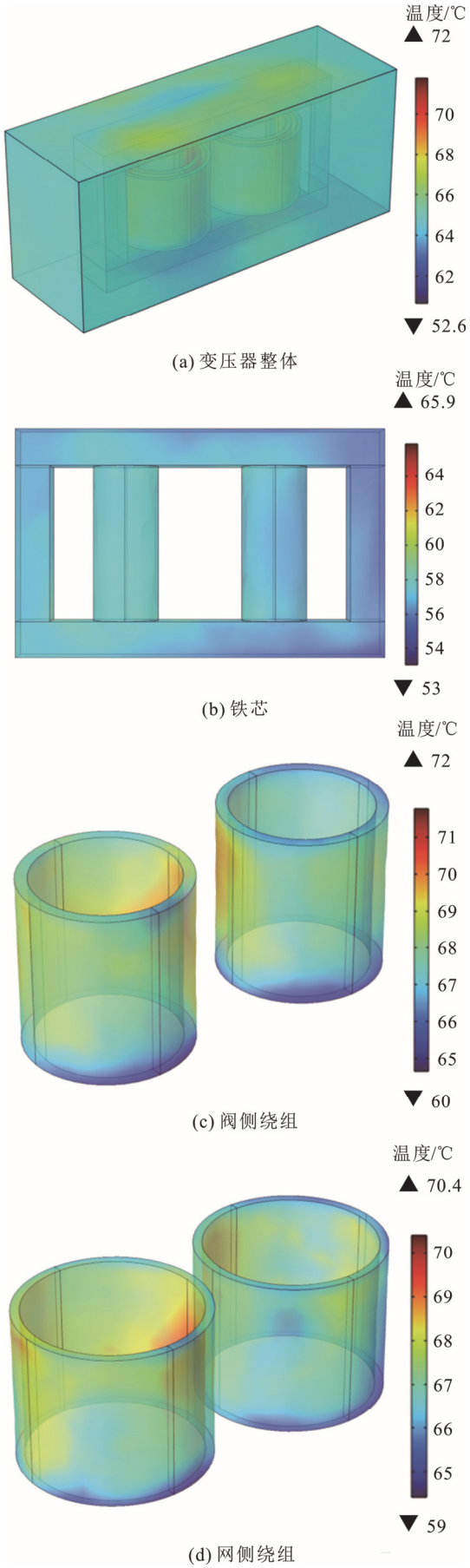


图 5　基波下变压器温度

Fig.5　Transformer temperature under fundamental wave

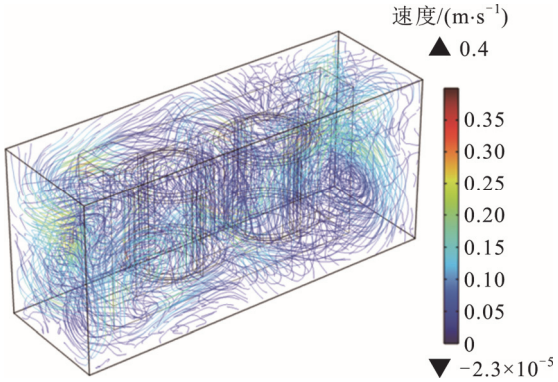


图 6　基波下变压器流场分布

Fig.6　Flow field distribution of transformer under fundamental wave

2）谐波工况

谐波工况下变压器温度和流场分布如图 7 和图 8 所示。

谐波作用时变压器磁通密度及损耗增大，导致变压器各结构发热增加，温升升高，其中铁芯最高温度为 81.8 ℃，增加了 15.9 ℃；绕组最高温度为 89.0 ℃，增加了 17.0 ℃。

谐波工况下由于发热增加，变压器油受热增加，流速也相应增加，流速最大值为 0.5 m/s，比基波工况增加了 0.1 m/s。

对比上述基波与谐波 2 种工况下磁通密度分布、损耗值及温度场-流场分布可知，谐波电流的注入会导致变压器各结构的磁通密度、损耗及温升均呈显著增大趋势。因此，换流变压器实际运行过程中，须重点考虑漏磁抑制措施，以避免因设备温升过高。

2　基于响应面法的换流变压器油箱壁面屏蔽装置结构优化方法

2.1　电磁屏蔽下换流变压器油箱壁面损耗计算

当前工程中普遍采用屏蔽技术实现漏磁抑制与损耗削减。屏蔽方式通常分为电屏蔽和磁屏蔽两类：电屏蔽多采用铜或铝；磁屏蔽多采用硅钢片。为抑制谐波工况下的漏磁，本文将屏蔽板设计为立放结构，放置于油箱内壁漏磁场较强的绕组对应区域；同时，屏蔽板高度要超出绕组高度，以避免漏磁通绕过屏蔽板进入油箱壁，降低屏蔽的效果。该结构等效模型如图 9 所示。

基于前述建立的多物理场仿真计算模型与方法，对电屏蔽和磁屏蔽 2 种方案分别开展计算，屏

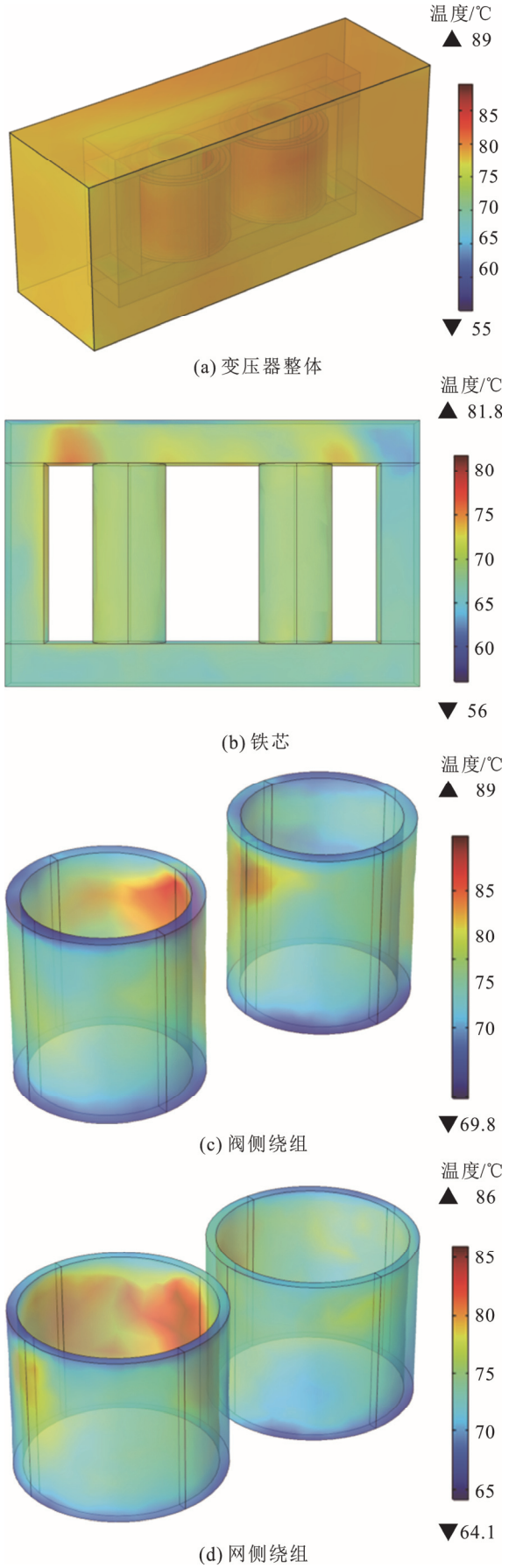


图 7 谐波下变压器温度

Fig.7 Transformer temperature under harmonics

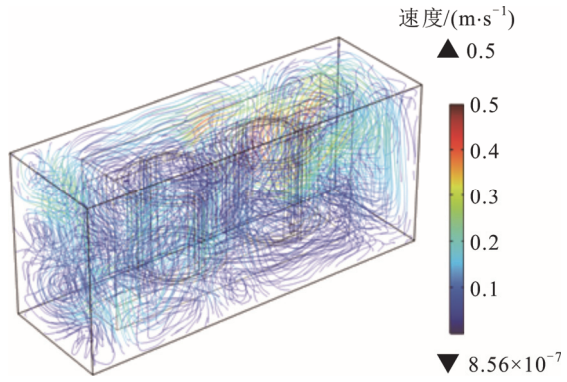


图 8 谐波下变压器流场分布

Fig.8 Flow field distribution of transformer under harmonic

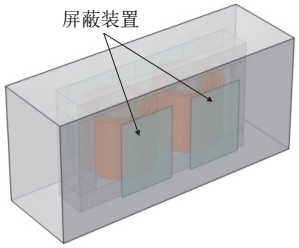


图 9 施加屏蔽板的变压器模型

Fig.9 Transformer model with shielding plates

蔽板与油箱之间的绝缘间隙设为 10 mm，得到不同屏蔽方式对应的油箱磁通密度分布结果见图 10。

由图 10 可知，与未施加屏蔽板的油箱磁通密度相比，2 种屏蔽方式都能有效降低变压器的漏磁通，电屏蔽方式下的油箱磁通密度为 0.22 T；磁屏蔽方式下的油箱磁通密度为 0.15 T，均有相应的减小。计算 2 种方式下的油箱损耗，其损耗见表 3。

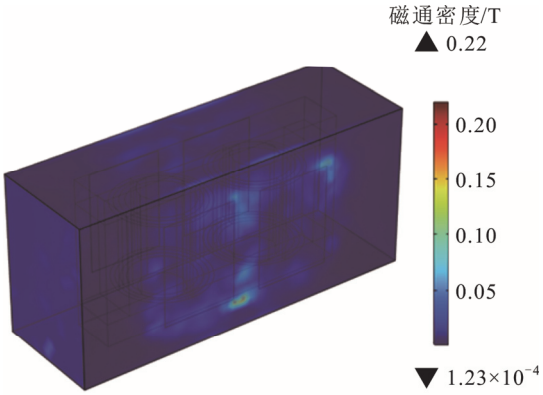
由表 3 可知，磁屏蔽的效果明显优于电屏蔽，磁屏蔽作用下的磁通密度减少了 0.09 T，油箱损耗降低了 79%，能够有效降低油箱的损耗，因此本文采用磁屏蔽作为屏蔽方式。

2.2 屏蔽装置结构参数对油箱损耗的影响

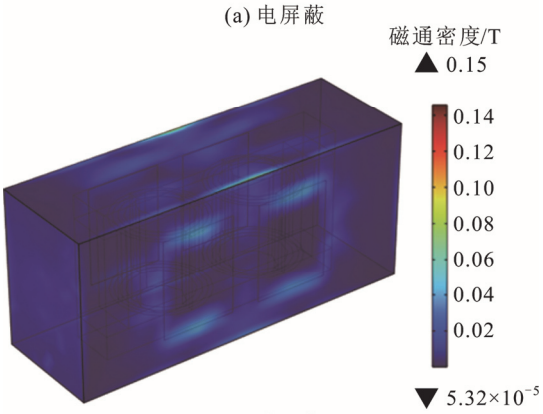
为了进一步降低损耗，本文对屏蔽板的结构参数进行优化设计。其主要参数为屏蔽板长度 d、厚度 w、高度 h，如图 11 所示。

利用有限元仿真软件分析每个参数对屏蔽效果的影响，如图 12 所示为油箱损耗值 P 和屏蔽板体积 V 随 d、w、h 的变化曲线。

随着屏蔽板长度、厚度及高度的增大，变压器油箱损耗呈下降趋势，屏蔽板体积逐渐增大。因此，在屏蔽板结构尺寸设计阶段，需兼顾屏蔽材料的经济性要求，屏蔽装置结构参数选取范围如表 4 所示。



(a) 电屏蔽



(b) 磁屏蔽

图 10　屏蔽后的油箱磁通密度分布图

Fig.10　Magnetic flux density distribution diagram of the shielded fuel tank

表 3　施加屏蔽后的油箱壁面损耗

Table 3　Losses on the tank wall after shielding

壁面	无屏蔽损耗/W	电屏蔽损耗/W	磁屏蔽损耗/W
前壁	28 941	10 694	4 996.4
后壁	21 940	7 783	4 753.8
总损耗	56 115	26 637	11 542

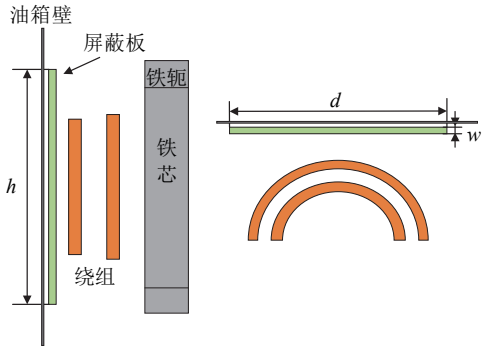


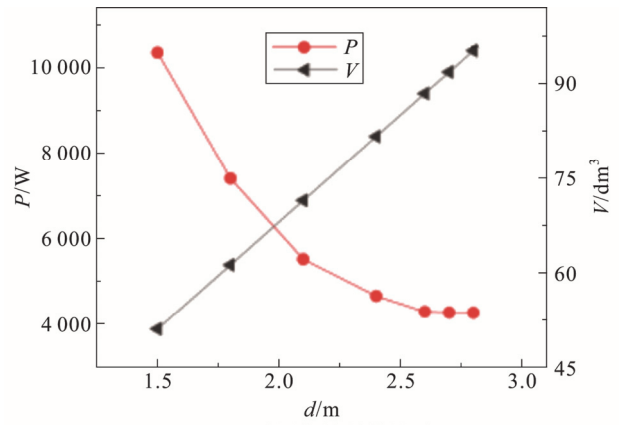
图 11　屏蔽板结构尺寸示意图

Fig.11　Schematic diagram of shielding plate structure dimensions

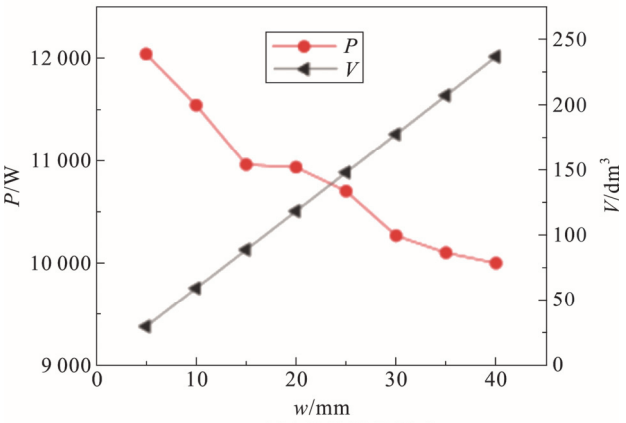
2.3　基于响应面法的油箱壁面屏蔽装置结构优化

2.3.1　试验设计

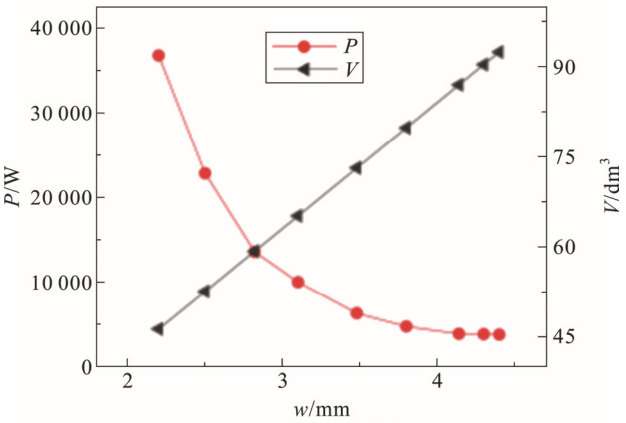
响应面法是一种统计方法，主要用于研究多个因素对响应变量的影响，通过构建响应面模型来预测和优化多因素系统，并确定这些因素的最佳组合以优化响应。最常用的响应面法试验设计为中心复合试验设计方法，该设计能更好地拟合响应面，并且更加适用于多因素多水平试验。根据上述屏蔽板结构尺寸设计范围，本文以屏蔽板长度、厚度及高度作为优化变量，以变压器油箱损耗值和屏蔽板体



(a) *d*对屏蔽效果的影响



(b) *w*对屏蔽效果的影响



(c) *h*对屏蔽效果的影响

图 12　屏蔽板结构参数对屏蔽效果的影响

Fig.12　Effect of shielding plate structural parameters on shielding effectiveness

表 4 屏蔽板结构尺寸设计范围

Table 4 Design range of structural dimension of shielding plate

参数类型	设计范围
d/m	2.1~2.6
w/mm	15~30
h/m	2.82~4.14

积最小作为响应目标，采用中心复合试验设计，设计三因素五水平的双目标试验设计，如表 5 所示。

2.3.2 优化模型的建立

根据设计表确定了 20 组试验方案，仿真计算得到不同屏蔽板结构参数下变压器的油箱损耗值及屏蔽板体积，详见附录 B 表 B2。对试验结果进行回归拟合，将所得的回归模型进行方差分析和误差统计分析，方差和误差结果如表 6 和表 7 所示。

各响应面模型的 P 值均小于 0.000 1，表明各响应面回归模型高度显著。模型的复相关系数 R^2 都达到了 0.99 以上，接近于 1，且校正决定系数 R_a^2 和预测决定系数 R_p^2 相差小于 0.2，表明试验数据与模型的预测值十分接近，拟合效果好。变异系数均小于 10%，各响应模型的信噪比均大于 4，表明该模型具有较高的预测精确性。屏蔽结构参数与油箱损耗和屏蔽板体积的响应面关系如图 13、图 14 所示。

2.3.3 基于响应面模型的多响应满意度优化法

为了获得全局最优解，根据所得响应面模型，本文采用多响应满意度函数法对屏蔽板结构参数进行寻优。满意度函数法是一类重要的多目标优化方法，通过构建满意度函数，将每个响应参数映射至[0，1]区间的个体满意度。本文以油箱损耗与屏蔽板体积最小化为目标，因此计算各响应个体满意度时，采用望小特性对应的满意度计算式[20]为：

$$d_i(y_i)=\begin{cases}1, & y_i<L_i\\ \left(\dfrac{U_i-y_i}{U_i-L_i}\right)^r, & L_i\le y_i\le U_i\\ 0, & y_i>U_i\end{cases} \tag{1}$$

式中：d_i 为第 i 个响应的个体满意度；y_i 为第 i 个响应的响应值；U_i 为第 i 个响应的上限；L_i 为第 i 个响应的下限；r 为优化目标的左右逼近系数。

在计算得到每个响应的满意度之后，将其转化为总体满意度，其计算式为：

$$D=\left(\prod_{i=1}^{N}d_i(y_i)^{\omega_i}\right)^{\frac{1}{\sum\omega_i}} \tag{2}$$

式中：D 为总体满意度；N 为响应变量的总数；变量 ω_i 表示响应的重要程度，满足 $0<\omega_i<1$ 且 $\sum\omega_i=1$。

表 5 中心复合设计表

Table 5 Central composite design table

因素水平	d/m	w/mm	h/m
1	2.1	15	2.82
2	2.2	18	3.1
3	2.35	22.5	3.48
4	2.5	27	3.9
5	2.6	30	4.14

表 6 方差分析表

Table 6 Analysis of variance table

方差源	平方和	均方	F 值	P 值
P 模型	6.46×10^7	7.181×10^6	138.82	<0.000 1
V 模型	26 581.03	4 430.17	7 622.72	<0.000 1

表 7 误差分析表

Table 7 Table of error analysis

回归模型	R^2	R_a^2	R_p^2	信噪比	变异系数/%
P 模型	0.992	0.985	0.94	42.84	4.54
V 模型	0.999	0.999	0.998	308.92	0.41

要获取总体满意度及最优解，须明确各响应的重要度权重。本次优化将油箱损耗值与屏蔽板体积的重要度权重均设定为 0.5，确保在实现油箱损耗最小化的同时控制屏蔽装置体积，达成双目标协同优化。根据满意度函数多目标优化的结果，屏蔽板结构最优参数为长 2.34 m、厚 15 mm、高 3.94 m，此时油箱损耗与屏蔽板体积同时达到最优值，整体的最优满意度为 0.906。

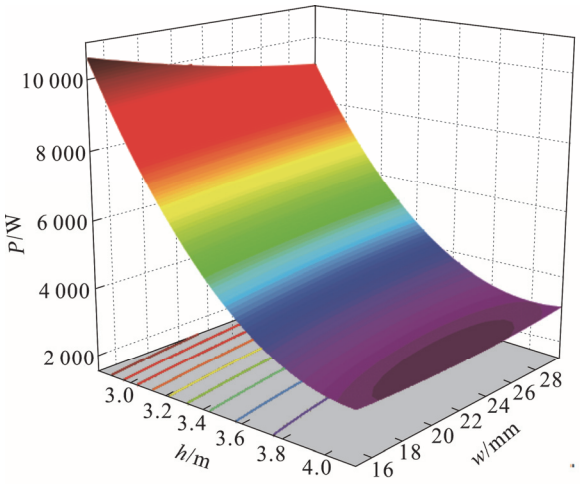
2.4 仿真验证

基于所得的优化结果，对其进行仿真验证，如表 8 所示。仿真得到油箱损耗值 P 为 3 420 W，屏蔽板体积 V 为 138 dm³，与预测结果的误差分别为 5.65%、1.12%，可知所得优化结果较为准确。

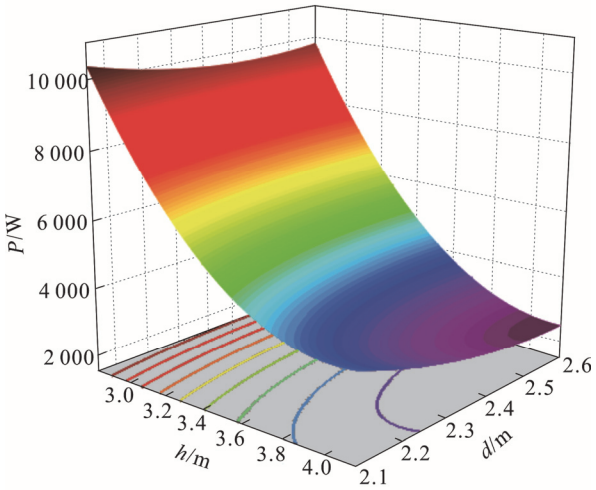
验证优化效果，等效模型及优化后变压器的温度场结果如图 15 所示。优化后变压器整体运行温度为 68.2 ℃，温度降低了 20.8 ℃，温度显著降低。

3 基于多物理场的换流变压器油箱壁面热点温度反演及测点优化布置

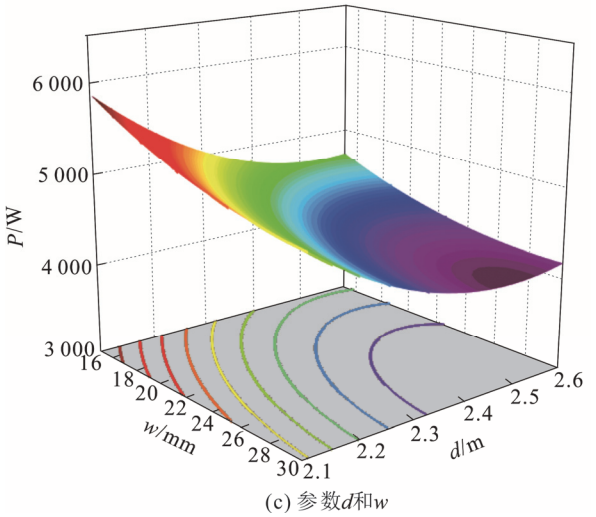
优化后变压器温度显著下降，降低了老化和运行风险，但仍须对内部温度进行监测。其中热点温



(a) 参数w和h



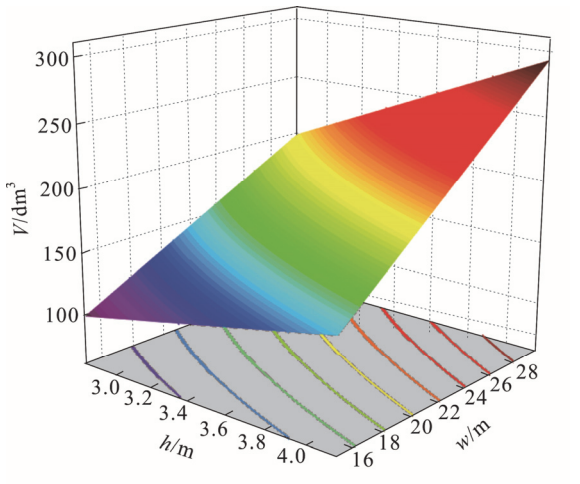
(b) 参数d和h



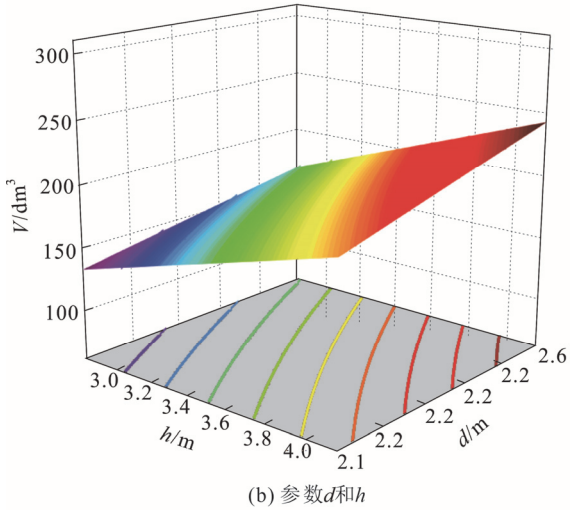
(c) 参数d和w

图 13　各参数与油箱损耗间的响应面模型

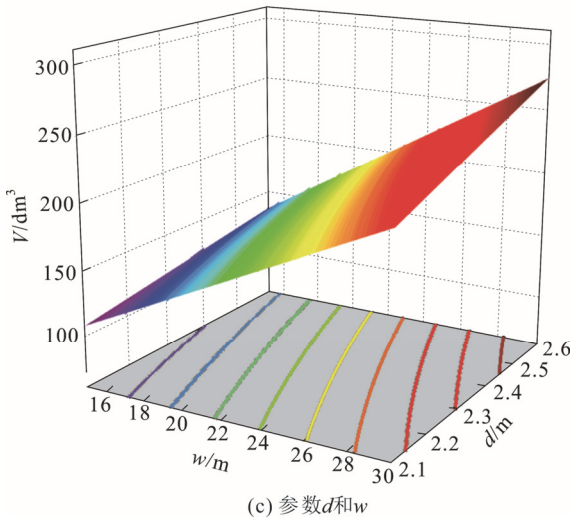
Fig.13　Response surface model between various parameters and fuel tank loss



(a) 参数w和h



(b) 参数d和h



(c) 参数d和w

图 14　各参数与屏蔽板体积间的响应面模型

Fig.14　Response surface model between each parameter and shielding plate volume

度反演技术可基于外部油箱壁面温度反向推导设备内部关键区域的温度。因此本文采用反演技术，对油箱壁面测点进行优化，筛选出最能反映内部热变化的外部监测点，保证高效准确获取内部温度情况。

表 8 仿真与预测结果对比

Table 8 Comparison of simulation and predicted results

参数	P/W	V/dm³
预测值	3 226.64	137.85
仿真值	3 420	138
误差/%	5.65	1.12

3.1 基于多物理场的换流变压器油箱壁面测点选取方法

考虑到油箱壁面绕组对应位置设有屏蔽装置，本文采用避开屏蔽板的油箱壁面分域取点方式，将油箱划分为上、中、下 3 段，仅在温度较高的中上部区域选取测点，测点选取如图 16 所示。

3.2 基于 BP 神经网的变压器热点温度反演

BP 神经网络属于基于误差反向传播机制训练的多层前馈型神经网络，由输入层、隐含层及输出层组成，各层级均包含若干神经元节点。其核心原理基于梯度下降法，借助梯度搜索技术，通过反向传播过程持续优化网络的权值与阈值参数，以实现网络误差平方和的最小化。本文采用中心复合设计，以变压器油箱对流换热系数 h、环境温度 T、铁芯损耗 Q_c、绕组损耗 Q_i、油箱损耗 Q_w 这 5 个比例系数为因素水平，变压器的热点温度为目标，建立了 1 个 5 因素 5 水平的试验设计表，如表 9 所示。

根据中心复合设计及仿真计算得到 50 组样本，随机选取样本以 70%和 30%比例划分为训练集、测试集，采用 BP 模型进行训练，并使用均方根误差 e_{RMSE}、平均绝对误差 e_{MAE} 以及相关系数误差 R^2 指标评估测试样本集的反演效果[15]。

$$e_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left(y_{p,i}-y_{a,i}\right)^2} \tag{3}$$

$$e_{\mathrm{MAE}}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left|y_{p,i}-y_{a,i}\right| \tag{4}$$

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^{k}\left(y_{p,i}-\bar{y}\right)^2}{\sum_{i=1}^{k}\left(y_{a,i}-\bar{y}\right)^2} \tag{5}$$

式中：$y_{p,i}$ 为第 i 个预测数据；$y_{a,i}$ 为第 i 个实际数据；$\bar{y}$ 为实际数据的均值；k 为数据数。

根据计算式可得预测误差指标如表 10 所示。

3.3 基于 GA-BP 神经网络的变压器热点温度反演

遗传算法(genetic algorithm，GA)作为一类全局优化算法，无须依赖梯度信息即可运行，具备卓越的全局搜索性能。为解决 BP 神经网络受其权值和阈值初始值的影响很大、容易陷入局部极小值的问题，本文提出的 GA-BP 神经网络模型有效融合遗传算法与 BP 神经网络的优势，利用遗传算法对 BP 神经网络的权值及阈值参数进行优化，算法流程如图 17 所示。将样本的训练集数据放入 GA-BP 神经网络预测模型进行训练，对测试集数据进行预测，神经网络预测结果与仿真值结果对比如图 18 所示。

从图 18 中可以看出，训练集与预测值和测试集与预测值的拟合程度均很高，预测误差结果如表

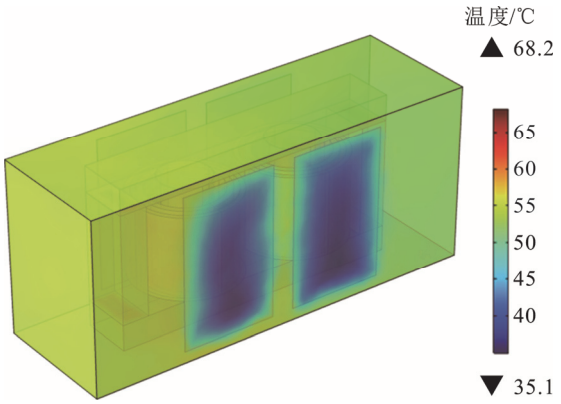


图 15 屏蔽优化后的油箱分布情况

Fig.15 Distribution of shielded and optimized fuel tanks

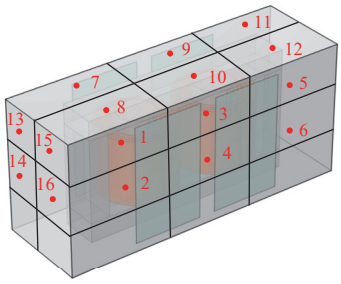


图 16 测点选取示意图

Fig.16 Schematic diagram of measurement point selection

表 9 中心复合设计表

Table 9 Central composite design table

因素水平	h	T	Q_c	Q_i	Q_w
1	10	10	0.8	0.8	0.8
2	13	15.8	0.9	0.9	0.9
3	15	20	1	1	1
4	17	24.2	1.1	1.1	1.1
5	20	30	1.2	1.2	1.2

表 10 BP 神经网络预测误差指标

Table 10 BP model prediction error metrics

算法	R^2	e_{RMSE}	e_{MAE}
BP	0.97	0.99	0.66

11 所示。

根据上述所得，对比 BP 和 GA-BP 神经网络模型下的预测误差，如图 19 所示。

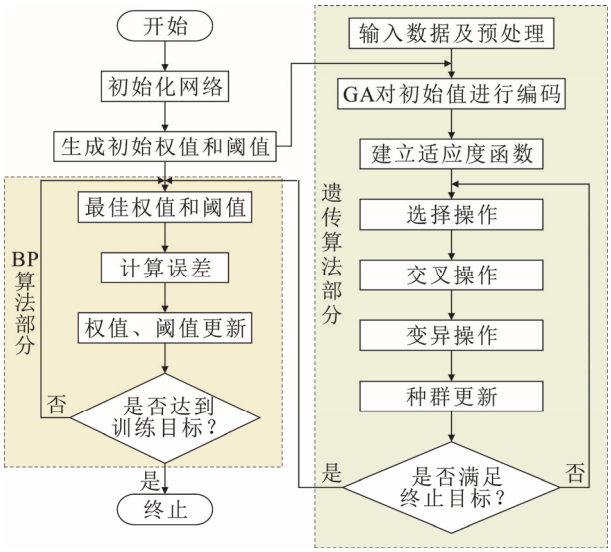


图 17　GA-BP 神经网络流程图

Fig.17　GA-BP neural network flowchart

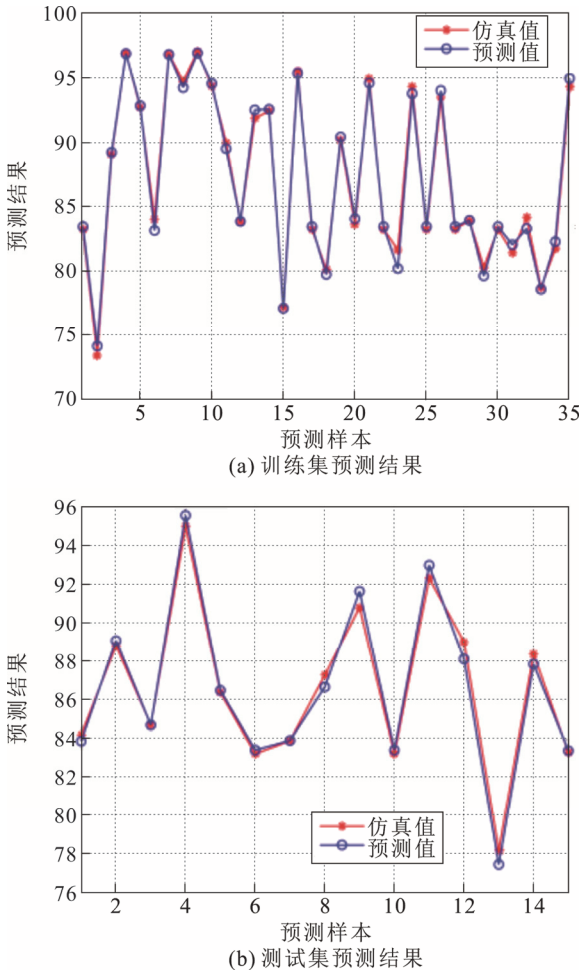


图 18　仿真结果与预测结果对比

Fig.18　Comparison of training set and predicted values

BP 神经网络的相关系数为 0.97，GA-BP 神经网络的相关系数达 0.98；同时，GA-BP 神经网络的均方根与平均绝对误差均低于 BP 神经网络。结果表明 GA-BP 神经网络预测精度更优。

3.4　换流变压器油箱壁面测点优化布置

为了减小变压器温度采集工作量及成本，优先选取相关性突出的特征点用于反演。利用相关性计算公式得到各特征点与热点温度的相关性见图 20。

相关性较强的特征点多分布在油箱顶部及靠近热点温度的位置，优先考虑在这类高相关性区域附近布设测点，达成对变压器内部热点温度更准确且高效的监测。根据测点相关系数可知，相关系数在 0.97 及以上的有 8 个测点，在 0.975 及以上的有 5 个测点，在 0.98 及以上的有 2 个测点，分布见图 21。

考虑测点布置的个数，本文对上述相关系数不同范围的组合测点进行反演，其预测结果见表 12。

在变压器温度监测中，测点个数较多时相关性较弱的测点可能降低监测精度，根据上述方法，选

表 11　GA-BP 模型预测误差指标

Table 11　Prediction error index of GA-BP model

算法	R^2	e_{RMSE}	e_{MAE}
GA-BP	0.98	0.64	0.54

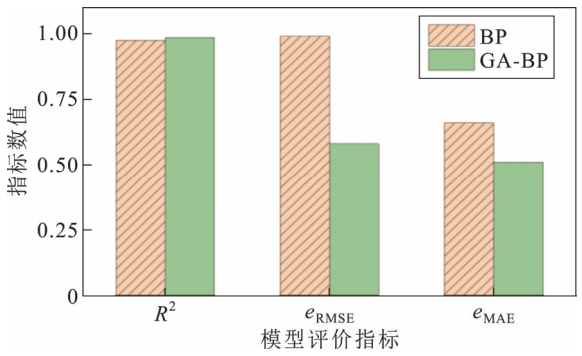


图 19　BP 与 GA-BP 误差对比图

Fig.19　Comparison chart of BP and GA-BP errors

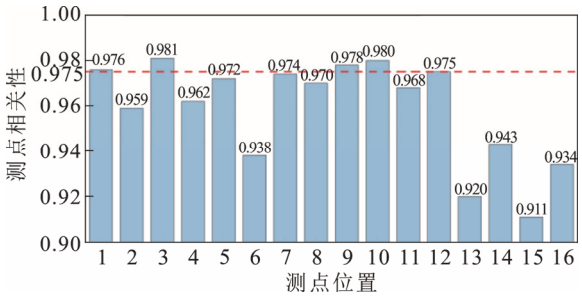
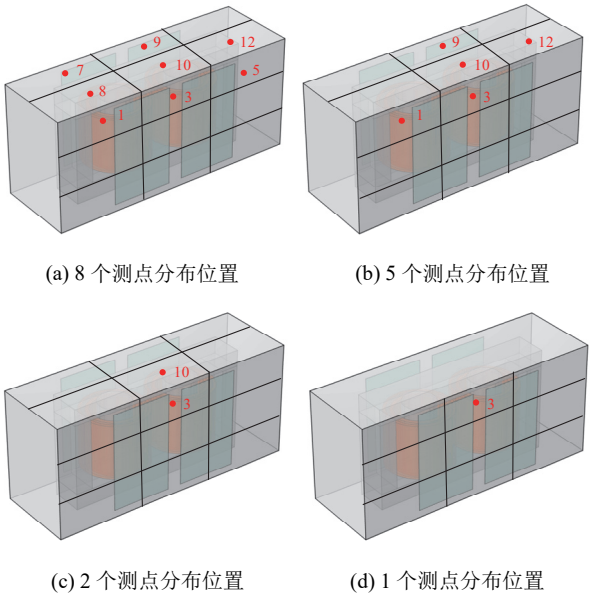


图 20　测点相关性分布图

Fig.20　Distribution of point correlation



(a) 8 个测点分布位置 (b) 5 个测点分布位置

(c) 2 个测点分布位置 (d) 1 个测点分布位置

图 21 不同范围组合的测点分布

Fig.21 Distribution of measurement points for different coefficient combinations

表 12 不同组合的反演结果

Table 12 Inversion results for different combinations

测点个数	R^2	e_{RMSE}	e_{MAE}
16	0.98	0.69	0.54
8	0.987	0.54	0.43
5	0.991	0.42	0.32
2	0.984	0.58	0.51
1	0.981	0.87	0.57

择 5 个点时其相关系数达到了 0.99 以上。因此，通过选取数量精简但相关性突出的测点，可以准确反演变压器内部热点温度。

4 结论

1）采用有限元法计算换流变压器基波与谐波下磁通密度及损耗，进而得到变压器温度及流场分布。考虑谐波因素后变压器油箱损耗从 52.77 kW 提升至 56.12 kW，热点温度从 71.8 ℃升至 88.4 ℃，表明谐波会导致变压器热点温度大幅升高。

2）在油箱壁面铺设屏蔽装置，电屏蔽与磁屏蔽分别减少 52%和 79%的损耗，磁屏蔽更为显著；在此基础上，采用响应面法结合满意度法优化屏蔽装置结构参数，优化后油箱壁面总损耗从 56.12 kW 降至 3.42 kW，绕组热点温度由 89 ℃降至 68.2 ℃，表明优化后的屏蔽装置可显著抑制损耗、降低热点温度。

3）基于优化后的换流变压器油箱壁面分域取点，计算各区域测点与绕组热点温度的相关性，运用 GA-BP 神经网络开展热点温度反演。结果表明选取高相关性的测点反演，最佳测点组合的反演精度能达到 0.99 以上，该研究为变压器油箱壁面测点位置的选取提供了坚实的理论支撑与借鉴价值。

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

参考文献 References

[1] 杨志栋，倪 晴，罗隆福. LCL 型高压直流输电系统中换流变压器损耗的仿真研究[J]. 湖南电力，2021，41(2)：32-35，40.
YANG Zhidong, NI Qing, LUO Longfu. Simulation study of converter transformer loss in LCL-HVDC system[J]. Hunan Electric Power, 2021, 41(2): 32-35, 40.

[2] 李清泉，朱 然，李姝奇，等. 换流变压器电热耦合数值计算方法综述[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4734-4748.
LI Qingquan, ZHU Ran, LI Shuqi, et al. Review of numerical calculation methods for electro-thermal coupling of converter transformers[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4734-4748.

[3] 王昊天，李军浩，宋颜峰，等. 换流变压器基波及谐波作用下损耗分布与特性的研究[J]. 电工电能新技术，2021，40(10)：10-17.
WANG Haotian, LI Junhao, SONG Yanfeng, et al. Study on loss distribution and characteristics under fundamental wave and harmonics of converter transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(10): 10-17.

[4] 张立佳. 弧形屏蔽结构对变压器漏磁改善作用分析[J]. 机械管理开发，2023，38(9)：25-26，29.
ZHANG Lijia. Analysis of the role of curved shielding structure on the improvement of transformer magnetic leakage[J]. Mechanical Management and Development, 2023, 38(9): 25-26, 29.

[5] 刘明远. 大型变压器漏磁场与油箱涡流损耗计算[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2012.
LIU Mingyuan. Calculation of leakage magnetic field and tank eddy current loss of large transformer[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2012.

[6] 佘炎松，王建民，赵 峰，等. 大容量变压器油箱屏蔽结构对杂散损耗影响的研究[J]. 电工电气，2025(4)：64-69.
SHE Yansong, WANG Jianmin, ZHAO Feng, et al. Research on the influence of shielding structure of large-capacity transformer tank on stray loss[J]. Electrotechnics Electric, 2025(4): 64-69.

[7] 陈模生，张良县，于 健，等. 特高压换流变压器涡流损耗及电磁屏蔽结构优化分析[J]. 变压器，2014，51(4)：20-24.
CHEN Mosheng, ZHANG Liangxian, YU Jian, et al. Analysis of eddy current loss and electromagnetic shielding structure optimization of UHV converter transformer[J]. Transformer, 2014, 51(4): 20-24.

[8] 张长庚，田亚坤，李永建，等. 谐波及直流偏磁下变压器叠片式磁屏蔽杂散损耗模拟与验证[J]. 电工技术学报，2022，37(15)：3733-3742.
ZHANG Changgeng, TIAN Yakun, LI Yongjian, et al. Modeling and validation of stray-field loss in laminated magnetic shield of transformer under harmonics and DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3733-3742.

[9] 王建民，单志英，韩 莹，等. 换流变压器两种屏蔽结构对漏磁及附加损耗影响的仿真研究[J]. 变压器，2018，55(4)：15-19.
WANG Jianmin, SHAN Zhiying, HAN Ying, et al. Numerical simulation on effects of two types of shield structure to leakage magnetic field and additional loss of converter transformer[J]. Transformer,

2018, 55(4): 15-19.

[10] 邓永清，阮江军，董旭柱，等. 基于自适应网格控制的 10 kV 油浸式变压器多物理场仿真计算[J]. 高电压技术，2022，48(8)：2924-2933.
DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, DONG Xuzhu, et al. Simulation of multi-physical field of 10 kV oil-immersed transformer based on adaptive grid control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2924-2933.

[11] 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]. 高电压技术，2024，50(1)：221-231.
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, 2024, 50(1): 221-231.

[12] 袁发庭，杨文韬，韩毅凛，等. 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[J]. 高电压技术，2024，50(3)：952-961.
YUAN Fating, YANG Wentao, HAN Yilin, et al. Temperature rise calculation and structure optimization research of transformer winding based on electromagnetic-fluid-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 952-961.

[13] 傅榕韵，刘云鹏，向文鑫，等. 面向边缘端部署的油浸式变压器二维温度场快速计算模型[J]. 高电压技术，2026，52(1)：338-346.
FU Rongyun, LIU Yunpeng, XIANG Wenxin, et al. Fast calculation model for the two-dimensional temperature field of oil-immersed transformer for edge-end applications[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(1): 338-346..

[14] 刘云鹏，高艺倩，刘　刚，等. 基于 U-net 神经网络的油浸式变压器绕组流-热耦合快速计算[J]. 中国电机工程学报，2024，44(7)：2897-2909.
LIU Yunpeng, GAO Yiqian, LIU Gang, et al. Fast calculation of flow-thermal coupling model of oil-immersed transformer windings based on U-net neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2897-2909.

[15] 袁发庭，张乃月，匡柏源，等. 基于多孔介质的油浸式变压器磁场-流场-温度场仿真计算及热点温度反演预测[J]. 高电压技术，2025，51(1)：62-74.
YUAN Fating, ZHANG Naiyue, KUANG Boyuan, et al. Simulation calculation of magnetic-fluid-thermal field of oil-immersed transformer based on porous media and prediction of hot spot temperature inversion[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 62-74.

[16] 倪子瞻，盛戈暻，张立静，等. 基于多物理场仿真和神经网络算法相结合的油浸式变压器热点温度动态反演方法[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2466-2477.
NI Zizhan, SHENG Gehao, ZHANG Lijing, et al. Dynamic inversion method of hot spot temperature of oil-immersed transformer based on combination of multiphysics simulation and neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2466-2477.

[17] 全　妤，阮江军，龚若涵，等. 基于流线和 SVR 的变压器热点温度反演方法[J]. 电工电能新技术，2018，37(11)：23-31.
QUAN Yu, RUAN Jiangjun, GONG Ruohan, et al. Transformer hot-spot temperature inversion method based on streamline and support vector regression[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(11): 23-31.

[18] 殷家祺，孙海峰. 非正弦激励下换流变压器绕组损耗和温度分布特性[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版)，2024：1-9[2025-11-18]. https://link.cnki.net/urlid/13.1212. TM. 20240618.1155.002.
YIN Jiaqi, SUN Haifeng. Characterization of winding loss and temperature distribution of converter transformer under non-sinusoidal excitation[J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2024: 1-9[2025-11-18]. https: //link. cnki. net/urlid/ 13.1212. TM. 20240618.1155.002.

[19] 谭又博，余小玲，臧　英，等. 谐波电流对换流变压器绕组损耗及温度分布特性的影响[J]. 电工技术学报，2023，38(2)：542-553.
TAN Youbo, YU Xiaoling, ZANG Ying, et al. The influence of harmonic current on the loss and temperature distribution characteristics of a converter transformer winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2): 542-553.

[20] 许晨杰. 油浸式变压器用热管散热器的设计及优化研究[D]. 杭州：浙江工业大学，2017.
XU Chenjie. The design and optimized research of heat pipe radiator for oil-immersed transformer[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University of Technology, 2017.



袁发庭(通信作者)
1988—，男，博士，副教授，博导
主要研究方向为电工装备多物理场仿真计算、优化设计及故障诊断
E-mail: yuanfatinghss@163.com

YUAN Fating
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



肖明月
2001—，女，硕士生
主要从事变压器多物理场仿真分析与温度反演方面的研究工作
E-mail: 1557596250@qq.com

XIAO Mingyue

收稿日期　2025-09-18　修回日期　2026-01-16　　编辑　曾文君

附录 A

A1　直流输电系统基本结构

直流输电系统主要由整流站、逆变站和直流输电线路三部分组成，主要的设备为换流变压器、换流器、平波电抗器、交直流滤波器以及无功补偿装置。其原理图如图 A1 所示。

根据图 A1 搭建±500 kV 的直流输电系统，仿真模拟换流变压器的实际运行状况，获得换流变压器网侧和阀侧的电流波形，对电流进行傅里叶分析获得各次谐波含量，如图 A2 所示。直流输电系统中换流器为 2 组 6 脉动换流阀串联组成的 12 脉动结构，特征谐波次数为 $6n\pm1$ 次。随着谐波次数的增大谐波电流幅值越来越小，后续研究中只考虑 5、7、11 和 13 次谐波电流。

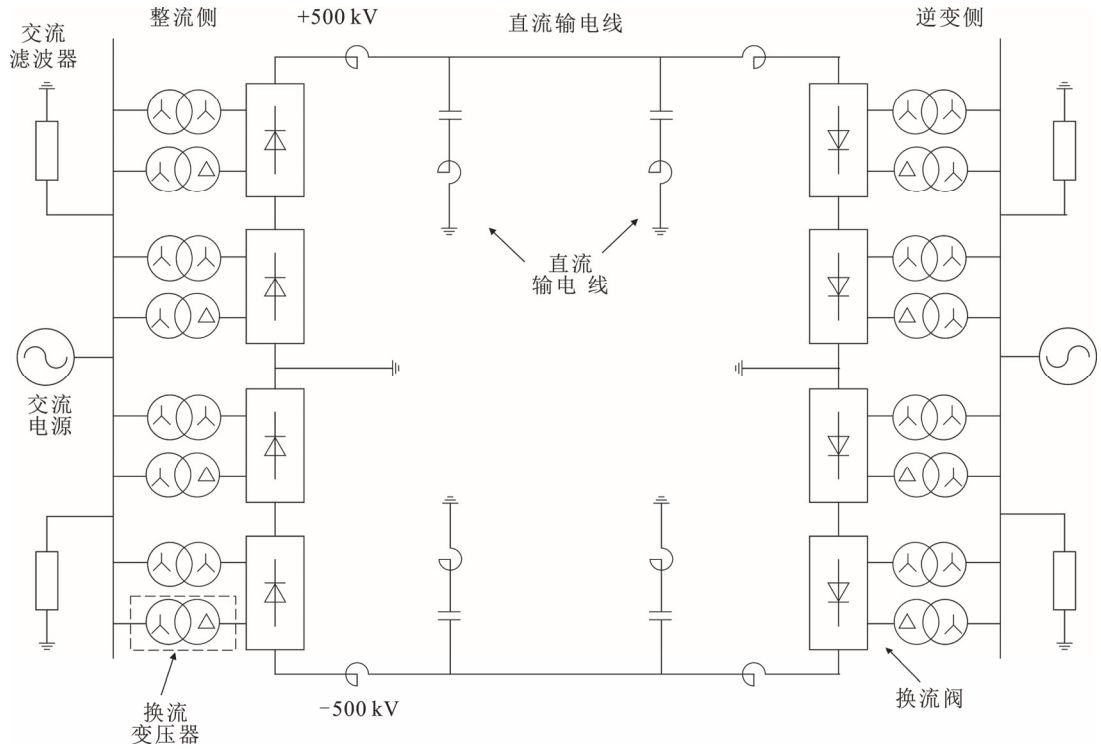


图 A1　直流输电系统原理图

Fig.A1　DC transmission system schematic diagram

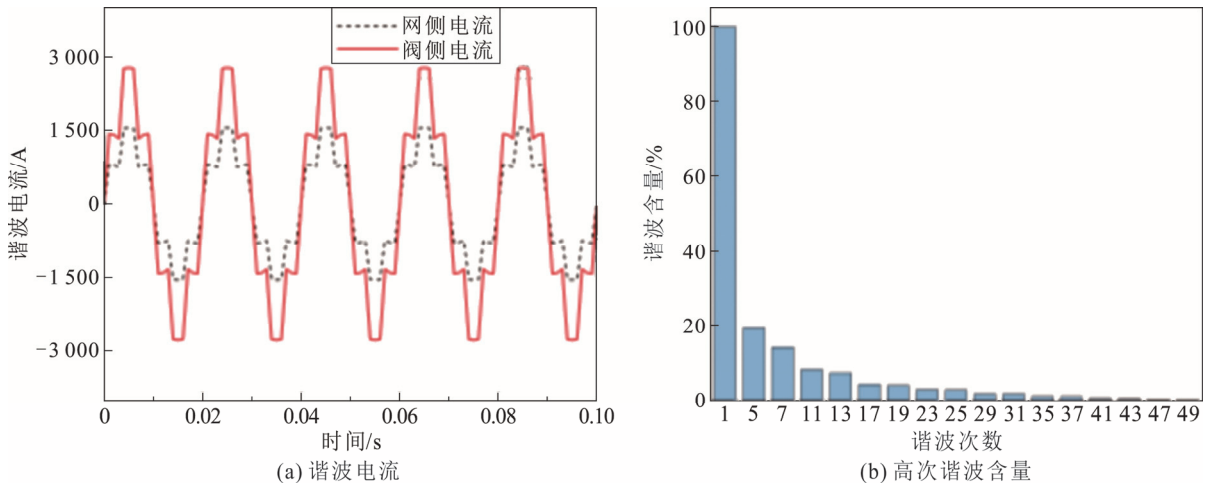


图 A2　谐波电流波形及谐波含量

Fig.A2　Harmonic current waveform and harmonic content

A2　磁场及损耗计算

工频正弦交变场下，忽略位移电流，磁场计算麦克斯韦方程及本构关系为：

$$\nabla \times H = J \tag{A1}$$

$$B = \mu H \tag{A2}$$

式中：B 为磁感应强度；H 为磁场强度；μ 为介质磁导率；J 为电流密度。

铁芯及绕组损耗计算式如式(A3)—(A7)所示。计算基波及各次谐波下的损耗值，将其进行叠加求和，则得到谐波激励下的损耗值[19]。

铁芯损耗包括磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗，其计算式为：

$$P_{\mathrm{Fe}} = \delta_{\mathrm{h}} f B_{\mathrm{m}}^2 + \delta_{\mathrm{c}} f B_{\mathrm{m}}^2 + \delta_{\mathrm{e}} f^{1.5} B_{\mathrm{m}}^2 \tag{A3}$$

式中：δ_{h}、δ_{c}、δ_{e} 分别为磁滞损耗、涡流损耗、附加损耗的损耗系数；f 为频率；B_{m} 为磁通密度最大值。

绕组损耗主要包括绕组电阻损耗和涡流损耗，计算式为：

$$P_{\mathrm{Cu}} = I^2 R + P_{\mathrm{Z}} + P_{\mathrm{W}} \tag{A4}$$

式中：I^2R 为绕组的电阻损耗；P_{Z} 为绕组中的杂散损耗，P_{W} 为涡流损耗。

其中涡流损耗受漏磁场分布的影响，沿绕组横向和纵向分布不同，计算式为：

$$P_{\mathrm{W}} = P_{\mathrm{Wz}} + P_{\mathrm{Wr}} \tag{A5}$$

$$P_{\mathrm{Wz}} = \frac{1}{24}\sigma\omega^2 d^2 B^2 V \tag{A6}$$

$$P_{\mathrm{Wr}} = \frac{1}{24}\sigma\omega^2 b^2 B^2 V \tag{A7}$$

式中：P_{Wz} 和 P_{Wr} 为纵向和横向涡流损耗；σ 为电导率；ω 为角频率；d 和 b 为纵向和横向线规尺寸；B 是磁感应强度；V 是绕组体积。

A3　流-热耦合计算

为明确流体运动及传热特性，借助数值计算求解相关方程组，从而实现有限元分析。其流-热耦合控制方程组表示为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0 \tag{A8}$$

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + \rho \boldsymbol{v} \cdot \nabla \boldsymbol{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + F + \rho g \tag{A9}$$

$$\tau : \nabla \boldsymbol{v} = \nabla \cdot (\tau \cdot \boldsymbol{v}) - v(\nabla \cdot \tau) \tag{A10}$$

$$\rho c_{\mathrm{p}} \frac{\partial T}{\partial t} + p c_{\mathrm{p}} \boldsymbol{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{\mathrm{t}} \nabla T) - p \nabla \cdot \boldsymbol{v} + \tau : \nabla \boldsymbol{v} + Q \tag{A11}$$

式中：ρ 为流体密度；$\boldsymbol{v}$ 为速度矢量；p 为流体压力；τ 为黏性应力张量；F 为外力；g 为重力加速度；c_{p} 为恒压热容；T 为温度；k_{t} 为导热系数；Q 为内热源；∇ 为哈密顿算子。

附录 B

表 B1　变压器各结构材料设置

Table B1　Transformer structural material settings

材料	参数	数值/表达式
铁芯 (硅钢片)	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	21
	恒压热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	485
	密度/(kg·m^{-1})	7 550
绕组 (铜)	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	386
	恒压热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	390
	密度/(kg·m^{-1})	8 960
变压器油	导热系数/((W·m^{-1}·K^{-1})	$0.13-8.05\times10^{-5}T$
	恒压热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	$^{-}13\ 408.15+123.04T-0.34T^2+3.13\times10^{-4}T^3$
	密度/(kg·m^{-1})	$1\ 055.05-0.58T-6.41\times10^{-5}T^2$
	动力黏度/(Pa·s)	$91.45-1.33\mathrm{T}+7.78\times10^{-3}T^2-2.27\times10^{-5}\mathrm{T}^3$

表 B2　试验样本

Table B2　Test sample

试验号	d/m	w/mm	h/m	P/W	V/dm^3
1	2.2	18	3.1	8 082	122.76
2	2.5	18	3.1	7 611.9	139.5
3	2.2	27	3.1	7 203.7	184.14
4	2.5	27	3.1	6 869.2	209.25
5	2.2	18	3.9	3 917.3	154.44

续表 B2

试验号	d/m	w/mm	h/m	P/W	V/dm^3
6	2.5	18	3.9	3 146.1	175.5
7	2.2	27	3.9	3 622	231.66
8	2.5	27	3.9	2 942.6	263.25
9	2.1	22.5	3.48	5 145.6	164.43
10	2.6	22.5	3.48	4 034	203.58
11	2.35	15	3.48	4 556.9	122.67
12	2.35	30	3.48	4 182.7	245.34
13	2.35	22.5	2.82	9 541.4	149.11
14	2.35	22.5	4.14	2 674.3	218.90
15	2.35	22.5	3.48	4 439.5	184.01
16	2.35	22.5	3.48	4 439.5	184.01
17	2.35	22.5	3.48	4 439.5	184.01
18	2.35	22.5	3.48	4 439.5	184.01
19	2.35	22.5	3.48	4 439.5	184.01
20	2.35	22.5	3.48	4 439.5	184.01