第 52 卷 第 2 期：884-897　　高电压技术　　Vol.52, No.2: 884-897
2026 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251096

基于热-流耦合的高频变压器液冷结构设计与优化

陈　彬[1,2]，褚　琰[2]，唐　波[1,2]，刘　洋[3]，靳艳娇[3]
（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.先进输电技术全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司)，北京 102209）

摘　要：随着电力电子技术的快速发展，高频变压器广泛应用于分布式电源、电动汽车、储能设备和数据中心等领域。高频化趋势使得变压器内部热负荷密度显著增加，散热问题成为限制其进一步发展的瓶颈。为此针对环氧树脂固封高频变压器，提出一种基于热-流耦合的强迫液冷散热结构优化设计方法。首先，考虑关键材料热物性随温度的变化规律，建立了强迫液冷下高频变压器热-流耦合多物理模型，用于高频励磁条件下绕组与铁芯的温升分布及热流耦合特征分析；然后，通过响应面法、中心复合设计以及有限元仿真，构建最高温度与外径、壁厚、匝数与间距等液冷结构关键尺寸的响应面模型；最后，以最高温度最小化与冷却材料用量最小化为优化目标，结合 NSGA-II 算法进行液冷结构优化，获得 Pareto 最优解集，并通过熵权-TOPSIS 法筛选不同设计偏好的设计方案。以一台 200 kVA/10 kHz 高频变压器为对象，自然风冷方案的最高温度为 105.61 ℃，经过优化的强迫液冷方案下最高温度降至 64.44 ℃，验证了所提液冷结构优化方法的有效性。

关键词：高频变压器；热-流耦合；强迫液冷；中心复合设计法；响应面法；NSGA-Ⅱ；熵权-TOPSIS 法

Design and Optimization of Liquid-cooling Structure for High-frequency Transformers Based on Thermal-fluid Coupling

CHEN Bin[1,2], CHU Yan[2], TANG Bo[1,2], LIU Yang[3], JIN Yanjiao[3]
(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; 3. State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology(China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209, China)

Abstract: With the rapid development of power electronics, high-frequency transformers are increasingly used in distributed power systems, electric vehicles, energy storage devices, and data centers. The trend toward high-frequency operation has significantly increased internal thermal load density, making heat dissipation to be a critical bottleneck in further advancement. To address this issue, we propose an optimized forced liquid cooling structure design method based on thermo-fluid coupling for epoxy-encapsulated high-frequency transformers. First, a multiphysics thermo-fluid coupling model is established, considering the temperature-dependent thermal properties of key materials, to analyze the temperature distribution and coupled heat transfer characteristics of windings and cores under high-frequency excitation. Then, using the response surface methodology (RSM), central composite design, and finite element simulations, we construct a response surface model to correlate the maximum temperature with critical cooling structure parameters, including outer diameter, wall thickness, number of turns, and spacing. Finally, a multi-objective optimization is carried out using the NSGA-II algorithm with the aim of minimizing both the maximum temperature and coolant material usage, yielding a set of Pareto-optimal solutions. Representative schemes are selected using the entropy-weighted TOPSIS method based on different design preferences. A 200 kVA/10 kHz high-frequency transformer is taken as an example,and the maximum temperature under natural convection cooling is 105.61 ℃, which is reduced to 64.44 ℃ with the optimized forced liquid cooling design, validating the effectiveness of the proposed method.

Key words: high-frequency transformer; thermal-fluid coupling; forced liquid cooling; central composite design; response surface methodology; NSGA-II; entropy weight-TOPSIS method

基金资助项目：国家自然科学基金(52107006)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52107006).

0　引言

随着电力电子技术的发展，传统工频变压器在体积、重量和功率密度方面的局限日益凸显，高频变压器凭借高工作频率实现磁性元件小型化和功率密度提升，广泛应用于分布式电源、新型储能、电动汽车和数据中心等领域。尽管高频变压器具有结构紧凑、能效高等优点，但其热负荷密度显著增加，热管理成为限制其性能的关键因素[1-2]。特别是在固体灌封干式变压器中，低导热有机绝缘材料使热量难以散发，易引发温升过高和绝缘老化。目前常用的自然风冷或强迫风冷方式在高热负荷下散热能力有限，且存在噪音大、对环境依赖强等问题，亟须研究更高效的散热技术以提升系统性能[3-6]。

目前，液冷散热技术因其卓越的换热效率和对高热负荷工况的良好适应性，已在高频变压器中得到越来越广泛的应用。然而，不同研究中所采用的液冷结构形式各不相同，且在通道布置、冷却装置形状、介质选择及与器件的集成方式方面呈现出较大差异。在结构设计方面，常见的液冷散热形式主要可分为液冷板结构与液冷管结构两大类，部分研究也提出了板管结合或嵌入式水路结构。Diqin Ma 等设计了一种结合翅片与液冷板结构的固体中频变压器插层式散热模型，该液冷板整体呈“日”字形通道布局，其冷却腔体与铁芯截面尺寸完全一致，以插层方式嵌入铁芯中央区域[7]。王开国等针对灌封式环形变压器设计了一种基于氮化铝陶瓷的液冷散热结构，该结构在磁芯下方布置集成内部水道的液冷板，冷却液通过内部弯折管道流动。同时在磁芯与液冷板之间引入由氮化铝构成的“工”字形导热通道，替代传统低导热性的环氧树脂，实现高热流密度区域与冷却面之间的快速热传递[8]。Palacz 等设计了一种用于三相线路电抗器的外置式冷却液冷面板结构，液冷面板直接贴附于电抗器磁芯两侧，通过内部嵌入的 U 型铜管构建冷却回路[9]。王晓远等针对车用永磁同步电机提出了一种壳体集成式螺旋型液冷结构。该结构通过在机壳内部开设螺旋形冷却水道，实现冷却液沿轴向螺旋流动，绕流电机外壳表面，从而降低内部绕组和磁体温度[10]。肖飞等人针对船用圆柱形变压器提出了一种新型双翼型翅片管液冷绕组结构，U 型液冷铜管沿绕组轴向连续布置，其外侧焊接双翼型翅片以扩大导热面积[11]。Mendizábal J K 等提出了一种应用于平面变压器的单相绝缘液体直接冷却结构，该结构通过聚合物增材制造技术制成，具备良好的形状适应性与集成灵活性。该设计采用内部液腔式冷却面板，与多层印刷电路板(printed circuit board，PCB)绕组和磁芯构成一体式封装，冷却液可直接与发热面接触，从而显著减少从热点到冷却介质之间的热阻[12]。Zeng 等基于密度法构建二维冷却拓扑优化模型，得到了可用于增材制造的微通道布局[13]。Navah 等则结合计算流体力学(computational fluid dynamics，CFD)与拓扑优化算法，提出了一种针对注塑模具与电力电子模块的自动化冷却通道生成框架，实现了热阻最小化与流动均匀性的多目标控制[14]。Lad 等针对多芯片功率模块提出了一种基于经典密度法拓扑优化的鳍片结构优化方法，用于实现基板直接液冷结构的高效热管理[15]。尽管当前优化方法在微通道与鳍片结构等规则通道设计方面取得了良好成果，但针对固封变压器内部冷却结构优化的研究仍相对较少，尤其是如何在绝缘层内集成液冷通道并兼顾结构安全性、传热效率与材料兼容性等因素，仍面临诸多挑战。

本文针对环氧树脂固封高频变压器在运行过程中易出现局部过热的问题，提出一种嵌入式螺旋液冷结构，该结构集成于铁芯与副边绕组之间的浇注区域内，在紧凑空间内实现高效的热-流耦合冷却。首先，开展基于多物理场的热-流耦合理论分析，明确耦合计算机理；随后，以一台 200 kVA/10 kHz 高频变压器为研究对象，通过空载试验确定热源边界条件，并构建嵌入式螺旋强迫液冷结构，确定冷却液的材料和设计流量，围绕冷却管的外径、壁厚、匝数和间距 4 项关键参数进行建模分析。基于中心复合设计(central composite design，CCD)构建仿真试验方案，开展多组结构参数下的有限元仿真，获取各工况下的温升与材料用量数据，并采用响应面方法(response surface methodology，RSM)拟合建立二次回归模型。在此基础上，以变压器最高温最小化与冷却材料用量最小化为双目标，运用 NSGA-II 多目标优化算法获取 Pareto 最优解集；最终引入熵权-TOPSIS 法对解集进行排序优选，确定了 3 组具有代表性的设计方案。

1　高频变压器热流耦合计算方法

1.1　传热机理分析及温度场计算模型

中压大容量高频变压器体积小、功率密度高，

高频、非正弦激励电压工况造成铁芯和绕组涡流效应明显，损耗密度大。为了提高大容量高频变压器的绝缘耐受能力，通常采用环氧树脂固体绝缘材料对绕组区域或整个变压器进行浇筑。但是，环氧树脂的导热系数低，导致高频变压器内部热量难以传递至外表面，造成其内部温度过高。如果长期处于高温、强电场运行工况下，高频变压器可能出现绝缘热老化和热击穿的风险。

高频变压器绕组和铁芯产生的焦耳热主要通过热传导方式，经过不同的传热路径传递到变压器表面，因此热传导的效率与不同材料的导热系数、尺寸密切相关。同时，高频变压器表面与空气接触，会存在热对流和热辐射。由于高频变压器铁芯中柱中间位置距离外表面较远，因此热量难以传递至表面造成热点温升明显。如果在低压绕组与铁芯之间埋设铜水管进行强迫液冷，液冷系统通过循环水流带走内部热量，可以极大提高热传递效率，降低局部温升。强迫液冷下的结构模型及散热示意图如图 1 所示。

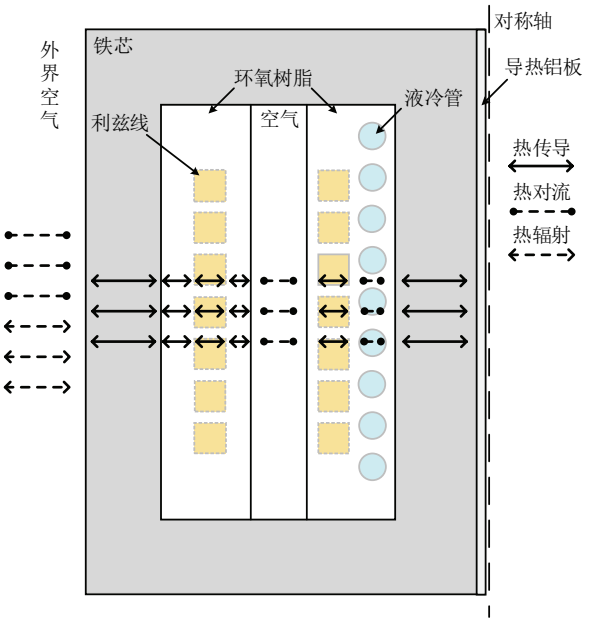


图 1 强迫液冷变压器散热示意图

Fig.1 Forced water cooling layout of transformer

热传导和热对流通过式(1)Fourier 定律描述[16]。式(1)中第 1 项为暂态储能项，描述单位体积内热容随着时间的累积变化；第 2 项为热传导项，负号代表热量由高温区向低温区传导扩散，第 3 项为热对流项，当介质流动时，热量随流体传输。

$$\rho C_{\mathrm{p}} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k_{\mathrm{t}} \nabla T) + \rho C_{\mathrm{p}} \boldsymbol{v} \cdot \nabla T = Q \tag{1}$$

式中：ρ 为密度；C_{p} 为热容；T 为温度；Q 为热流密度；k_{t} 为热传导系数；$\boldsymbol{v}$ 为流体流速。

热辐射通过 Stefan-Boltzmann 定律描述，如式(2)所示。

$$-\boldsymbol{n} \cdot (-k_{\mathrm{t}} \nabla T) = \varepsilon \sigma ({T_{\mathrm{amb}}}^4 - T^4) \tag{2}$$

式中：ε 为表面发射率；σ 为 Stefan-Boltzmann 常数；T_{amb} 为环境温度；$\boldsymbol{n}$ 为定义在边界上指向域外的单位法向量。

边界条件表示周围环境对整个研究对象的影响，即为导热系统与外界环境之间的换热关系。第 1 类边界条件直接指定边界温度，用于描述与恒温热源或已知温度场相接触的表面；第 2 类边界条件给定热通量，用于刻画边界上均匀或时变的外加热流；第 3 类边界条件通过对流换热模型将表面与外界环境连结。边界条件如式(3)所示。

$$\begin{cases} T\big|_{\Gamma_1} = T(\Gamma, t) \\ \boldsymbol{n} \cdot (k_{\mathrm{t}} \nabla T)_{\Gamma_2} = q_{\mathrm{s}}(\Gamma, t) \\ \boldsymbol{n} \cdot (k_{\mathrm{t}} \nabla T)_{\Gamma_3} = h(T_{\mathrm{ext}} - T) \end{cases} \tag{3}$$

式中：Γ 为计算域边界，Γ_1、Γ_2、Γ_3 分别代表第 1 类边界、第 2 类边界、第 3 类边界；$q_{\mathrm{s}}(\Gamma, t)$ 为热通量函数，随位置和温度变化；h 为对流换热系数；T_{ext} 为外界温度。

1.2 流体流场计算模型

变压器内冷却管中冷却液流动情况较复杂，先采用雷诺数 Re 对冷却液的流动状态进行判定[17]。在圆管流动中，雷诺数 Re 的计算式为：

$$Re = \frac{\rho v' l}{\mu} \tag{4}$$

式中：ρ 为流体密度；v' 为圆管断面平均流速；l 为流体的特征长度，即管道直径；μ 为流体的动态黏度。

从层流向湍流转换的临界雷诺数为 2 320，一般认为 Re<2 320 为层流状态，Re 取 2 320~4 000 为过渡状态，Re>4 000 为湍流状态。当雷诺数较小时，流动为层流，速度分布平稳且有序，如图 2(a)所示。随着雷诺数增大，流动逐渐变得不稳定，进入过渡状态；当雷诺数进一步升高，流动完全变为湍流，速度分布剧烈波动，伴随有大量涡旋，图 2(b)即为湍流的典型速度分布。图 2 中 v'为主流向速度分量。

若为层流，使用 Navier-Stokes 方程求解流体运动状态，如式(5)所示。

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + \rho (\boldsymbol{v} \cdot \nabla) \boldsymbol{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \boldsymbol{v} + \boldsymbol{F} \tag{5}$$

式中：p 为压力；$\boldsymbol{F}$ 代表外加体力。

若为湍流，考虑到本文研究液体在细管道中的流动，流动特征主要受壁面效应影响，采用标准 k-ω 湍流模型进行求解，以更准确地描述靠近壁面的湍流行为[17]。其中，湍流动能 k 表示单位质量流体因速度脉动所携带的动能，定义为：

$$k=\frac{1}{2}\overline{v_\alpha' v_\alpha'} \tag{6}$$

式中：v_α'为第α分量方向的速度脉动分量，表示瞬时速度与其平均值之间的偏差。湍流耗散率 ε 表示湍流动能向内能的转化速率，其定义为：

$$\varepsilon=\upsilon\overline{\frac{\partial v_\alpha'}{\partial x_\beta}\frac{\partial v_\alpha'}{\partial x_\beta}} \tag{7}$$

式中：x_β表示空间坐标分量；υ 为分子运动黏度。

为表征湍流能量耗散的速度，引入湍流频率 ω，其表示单位动能的耗散速率，定义为：

$$\omega=\frac{\varepsilon}{\beta^* k} \tag{8}$$

式中：β^* 为经验拟合的频率衰减系数。

k 和 ω 决定了涡流黏性系数 μ_t，即流体中因湍流引起的附加黏性剪切应力，其计算式为：

$$\mu_\mathrm{t}=\frac{\rho k}{\omega} \tag{9}$$

标准 k-ω 湍流模型通过以下 2 组输运方程求解 k 和 ω 的空间分布：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\partial}{\partial x_\beta}\left((\upsilon+\sigma_\mathrm{k}^*\upsilon_\mathrm{t})\dfrac{\partial k}{\partial x_\beta}\right)+P_\mathrm{k}-C_\mu k\omega \\ \dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\partial}{\partial x_\beta}\left((\upsilon+\sigma_\omega\upsilon_\mathrm{t})\dfrac{\partial \omega}{\partial x_\beta}\right)+C_{\omega 1}\dfrac{\omega}{k}P_\mathrm{k}-C_{\omega 2}\omega^2\end{cases} \tag{10}$$

式中：等号左侧分别为对 k 和 ω 的物质导数；右侧第 1 项为扩散项，由分子运动黏度 υ 与湍流黏度 υ_t 共同作用，系数 σ_k^*、σ_ω 决定各方程的湍流 Prandtl 数，从而调节梯度扩散强度；右侧第 2 项为产生项，P_k 表示平均流剪切导致的湍动能生成率；右侧第 3 项为耗散项，分别表征 k 与 ω 的耗散，将能量从大尺度湍流级联至小尺度并最终转化为内能；C_μ为 k 方程耗散项系数；$C_{\omega 1}$、$C_{\omega 2}$ 分别为ω方程的产生项系数与耗散项系数。

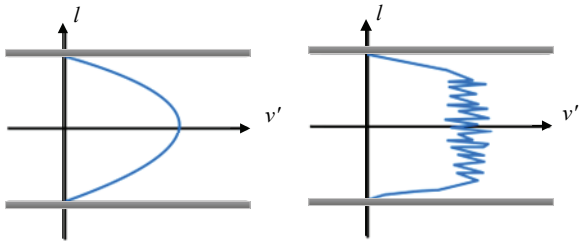
1.3　热流耦合计算模型

在高频变压器的液冷散热过程中，冷却液在管道内流动并与绕组及铁芯进行热交换，形成典型的热-流耦合过程。该过程属于非等温流动[18]，冷却液在吸收热量的同时，其温度沿空间分布发生变化，进而引起其物性参数(如密度与黏度)的改变，反作用于流动状态，体现出温度场与流场之间的双向耦合关系。具体而言，流场中的速度分布和剪切梯度决定了各部位的对流换热强度，主导温度场的空间演化；而温度场则通过调控流体物性进一步影响流动行为。例如，对于乙二醇-水混合液而言，温度升高通常会导致密度与黏度下降，从而减小流动阻力，可能增强局部扰动与湍动能生成，在一定程度上提升对流换热能力。综上，该耦合机制使得热量传递与流动行为高度相关，必须通过联合建模予以解析。耦合示意图如图 3 所示。

2　高频变压器三维模型建立与仿真方法

2.1　高频变压器几何结构及强迫液冷结构设计

针对一台额定参数为 10 kHz、200 kVA 的高频变压器进行仿真研究[19]。高频变压器示意图及部分结构参数如图 4 所示，主要由铁芯、原边绕组、副边绕组、铝板、环氧树脂等组成。原副边绕组的层数均为 1 层，每层绕组包含有 7 匝方形利兹线。利兹线的股数为 2 128 股，单股直径为 0.2 mm。利兹线尺寸为 11.35 mm×11.35 mm。线圈外浇筑环氧树脂，宽度为 33 mm，高度为 153.6 mm。相邻铁芯之间安装 10 mm 厚的导热铝板。



(a) 层流状态　　(b) 湍流状态

图 2　不同状态流体速度分布

Fig.2　Comparison of fluid velocity distribution in different states

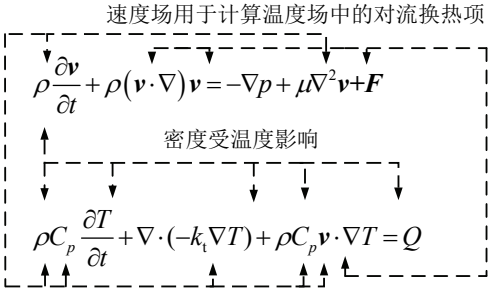
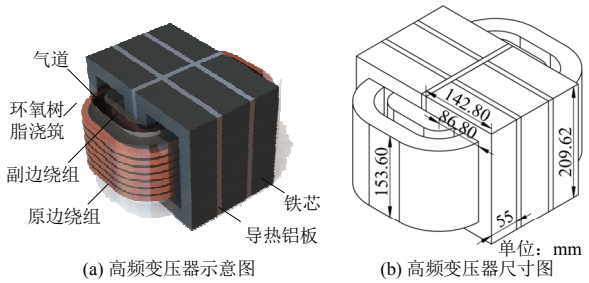


图 3　热-流耦合模型中参数传递示意图

Fig.3　Schematic diagram of parameter transfer in the thermal-fluid coupling model



(a) 高频变压器示意图 (b) 高频变压器尺寸图

图 4 高频变压器结构示意图

Fig.4 Schematic of high-frequency transformer structure

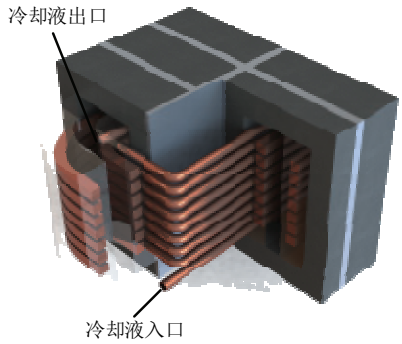


图 5 强迫液冷结构模型

Fig.5 Forced water-cooling structure model

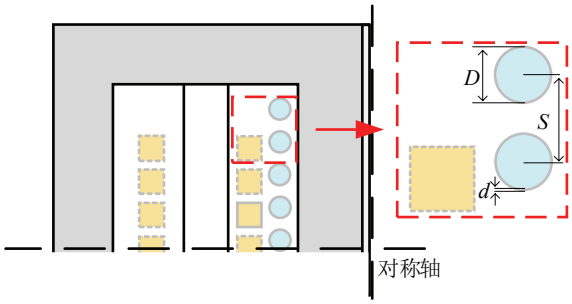


图 6 冷却管道尺寸图

Fig.6 Dimensional diagram of the water-cooling pipeline

在未安装冷却管、采用自然风冷散热方式下，该高频变压器的设计损耗与温升指标包括：在额定容量下，负载损耗不超过 1 kW，效率不低于 99.0%；绕组在额定电流下的平均温升不得超过 80 ℃；绝缘系统等级为 H 级，设计允许的最高温度为 120 ℃。强迫液冷下的结构模型如图 5 所示。冷却管道的轴线位于铁芯与初级绕组之间的中垂面，并按管间距均匀排列。该结构有利于冷却液均匀分布，提高热交换效率，避免局部温升过高。同时，由于冷却铜管道被埋设于环氧树脂绝缘材料中，且位于绝缘体中央，两侧均由绝缘层包覆，能够有效降低绝缘击穿风险，进一步提升系统的运行可靠性与安全性。待优化变量如图 6 所示，包括冷却管外径 D、冷却管壁厚 d、冷却管匝数 n，冷却管间距 s。

2.2 材料属性及冷却液选取

高频变压器中各类材料的热性能属性如表 1 所示[20-21]。其中，考虑工程温度范围(20~150 ℃)内部分材料参数变化较小，如各材料的定压比热容等，本文将其视为常数处理；对其余温度敏感性较强的参数，则采用温度依赖模型进行拟合。

在高频变压器的强迫液冷系统中，冷却液的选择是影响热管理效果的关键因素之一。合适的冷却液不仅要具备良好的导热性能和较高的比热容以增强换热能力，还应具备优良的电气绝缘性，确保系统运行安全。此外，考虑到变压器的应用环境可能存在低温工况，冷却液还应具备一定的防冻能力，并保持良好的化学稳定性和兼容性。对几类典型冷却液进行了对比分析，如表 2 所示[22]。

其中，矿物油易燃，冷却性能一般，且主要用于油浸式结构，不适用于干式变压器；硅油黏度高，流动性差，且系统密封要求高，须选用特殊材料，综合成本也较高；氟化液和合成酯类成本高，主要

表 1 高频变压器材料属性

Table 1 High-frequency transformer material properties

材料参数	密度/(kg·m^{-3})	定压比热容/(J·(kg·K)$^{-1}$)	导热系数/(W·(m·K)$^{-1}$)	热辐射率(100 ℃)
铜	8 960×(1−5.1×10^{-5}(T−283))	390	401−0.025(T−300)	0.78
铝	2 700×(1−2.31×10^{-5}(T−293))	903	237−0.04(T−300)	0.55
环氧树脂	1 200×(1−6.51×10^{-5}(T−298))	1 200	0.25	0.25
纳米晶合金	7 180	450	18−0.01(T−300)	0.8

应用于直接接触式冷却[23-24]。去离子水虽然导热系数高、比热容大，但冰点为 0 ℃，且绝缘性能随电导率变化明显，使用时须对杂质严格控制。综合考虑上述几种冷却液的性能对比与适用条件。本文选用体积分数为 30%的乙二醇-水混合液作为冷却介质，该比例下冷却液的冰点为−15 ℃，其余热性能参数和流体性能参数见表 3。该混合液兼顾了较好的换热性能、防冻能力和绝缘性，适合变压器可能面临的多种环境温度条件，且便于获取和实际工程部署。

表 2　不同冷却液比较

Table 2　Comparison of different coolants

冷却液类型	优点	缺点
矿物油	良好绝缘性能 防冻能力强	热导率低，比热容低 易燃
硅油	热稳定性极高 化学惰性 无腐蚀	热导率不高 需特殊密封材料适配 成本较高
氟化液	极高绝缘性 热稳定性好 不可燃	导热性能差 比热容低 成本极高
合成酯	绝缘性能优异 环保	热导率低 黏度大 成本较高
去离子水	导热系数高 比热容大 成本低，易获取	冰点高(0 ℃) 绝缘性能随电导率变化 需控制杂质
乙二醇-水混合液	冰点可调 良好导热性	热导率低于纯水 黏度高于纯水

表 3　30%的乙二醇-水混合液材料参数

Table 3　Material properties of 30% ethylene glycol-water mixture

材料参数	数值
密度$\rho(T)$/(kg·m^{-3})	1 072−0.96T
导热系数 $k(T)$/(W·(m·K)$^{-1}$)	0.41+0.001T
定压比热容 $c_p(T)$/(J·(kg·K)$^{-1}$)	3 750
动态黏度$\mu(T)$/(mPa·s)	10.5e$^{-0.035T}$

2.3　空载试验及热源确定

搭建图 7 所示的高频变压器损耗测量试验平台，以信号发生器配合 NF 功率放大器作为激励源[25]。由于电源最大输出电压有限，为了获得额定频率、额定工作磁密下的铁芯损耗测量值，需要在铁芯中柱缠绕 1 匝附加绕组，在附加绕组上施加频率为 10 kHz、幅值为 142.7 V 的方波电压，原副边绕组开路，通过功率分析仪读取铁芯损耗为 331.7 W，此时附加绕组电压和电流波形见图 8(a)。在绕组损耗测量试验中，在变压器副边绕组施加频率为 10 kHz、有效值为 30 A 的正弦电流，原边绕组短路，此时副边绕组的电压和电流波形见图 8(b)，绕组损耗测量值为 17.26 W，校正到额定电流为 193 A、参考温度 120 ℃时为 604.12 W，折算式[25]为：

$$P_{T_{\mathrm{con}}}=\frac{\left(I/I_{\mathrm{exp}}\right)^2 P_{\mathrm{exp}}+\left(K^2-1\right)\sum\left(I^2 R_{\mathrm{dc}T_0}\right)}{K} \tag{11}$$

$$K=\frac{235+T_{\mathrm{con}}}{235+T_0} \tag{12}$$

式中：I、I_{exp} 分别为实际运行电流和试验电流的有效值；P_{exp} 为试验短路损耗；K 为损耗的温度换算系数；$R_{\mathrm{dc}T_0}$ 为实测温度下的初、次级的直流电阻和；T_{con}、T_0 分别为参考温度、实测温度。

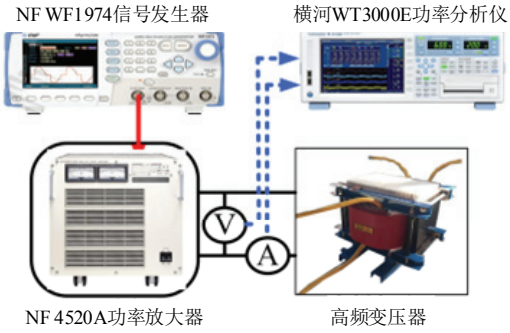


图 7　试验示意图

Fig.7　Schematic diagram of the experiment

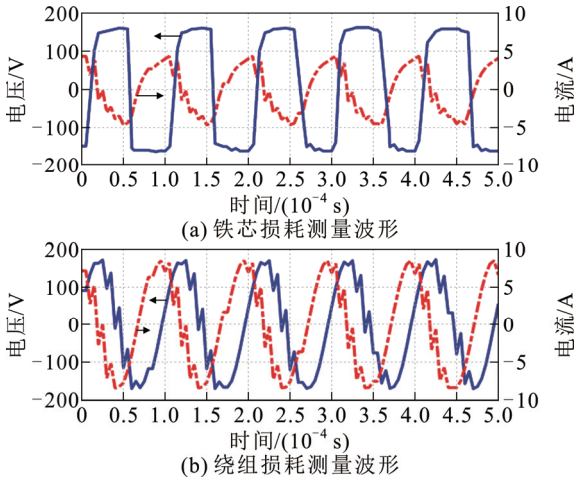


图 8　电压和电流激励波形

Fig.8　Voltage and current excitation waveforms

通过试验测量可得该变压器铁芯、原边绕组、副边绕组的热耗率分别为 319.11、338.49、222.20 W。上述热源数据将作为稳态热仿真中的热源输入，分析不同冷却结构下的温度分布特性。

2.4　不同冷却方式仿真设定

为对比不同冷却方式对高频变压器内部热分布的影响，本文分别建立自然风冷与强迫液冷两类仿真模型，统一采用热-流耦合求解框架。2 种冷却方式下均省略变压器外部支架与壳体结构，仅对铁芯、绕组、环氧树脂、导热铝板及冷却流体等关键区域进行建模分析。

自然风冷模型以空气为冷却介质，在变压器本体外侧拓展空气域，并设置开边界条件以模拟自然对流散热过程。网格剖分方面，空气域内采取自适应网格加密策略；近壁面采用更密集的四面体剖分以提升边界层解析精度；远离本体处则进行网格稀

疏化处理以减少计算负担；导热路径复杂的铁芯采用超细四面体网格；原副绕组沿匝向使用扫掠式六面体-棱柱网格并在径向加密；导热铝板与环氧层用中等四面体网格分层细化；同时，由于流速较低，流动状态稳定，采用层流模型进行求解。自然风冷下的温度场仿真结果如图 9 所示。由图 9 可知，变压器最高温为 105.6 ℃，虽然满足设计允许的最高温度限制，但温度水平依然较高，且热点区域集中，长时间运行可能导致绝缘性能下降和寿命缩短。为进一步降低热点温度并改善整体温度分布，有必要引入强迫液冷散热方案。

强迫液冷模型在变压器铁芯与副边绕组之间嵌入螺旋铜质冷却管，并设置流体入口与出口边界条件，冷却介质选用体积分数为 30%的乙二醇-水混合液。模型中施加不同流量的速度入口边界，出口设置为常压条件，以形成管道内强迫流动。由于冷却液的流动状态与其物性参数和结构尺寸密切相关，仿真中须依据式(4)计算雷诺数，判断是否进入湍流区，再据此选择层流或 k-ω 湍流模型对流场进行建模，从而确保流动特性模拟的准确性。网格剖分方面，铜水管选用规整六面体网格并附壁面层，管内冷却水域布置细四面体网格，其余网格设置与自然风冷相同。

2.5 冷却液流量对变压器温度的影响

冷却液流量的大小是液冷系统的关键参数，随流量增加，冷却能力提升，但泵功率亦同步上升[26]。本文对基准型(B 型)及 2 种极端尺寸(高阻/大面积 H 型、低阻/小面积 L 型)等 3 组代表性几何进行仿真，具体参数如表 4 所示。对冷却液体积流量进行参数扫描，按照 0.5 L/min 的步长从 1 L/mim 增加到 10 L/min。对于 3 组设计尺寸，由式(4)计算可得冷却液从层流转变为湍流时的临界流速分别为 0.85、0.61、1.36 m/s，临界体积流量分别为 2.56、3.52、1.60 L/min。故当通入体积流量小于此值时，流动状态为层流，大于此值时，流动状态为湍流。

通过仿真分析得到不同体积流量下各部分的最高温度如图 10 所示。显然，强迫液冷工况下的峰值温度明显低于自然风冷下的最高温度。由图 10 可知，当体积流量＞3.5 L/min 后，随着体积流量的增大绕组和铁芯温度降幅微弱，说明此时冷却液将热流全部吸收，继续增加体积流量的经济性较差。因此在后续分析过程中取冷却液体积流量为 3.5 L/min，且流场应为湍流场。

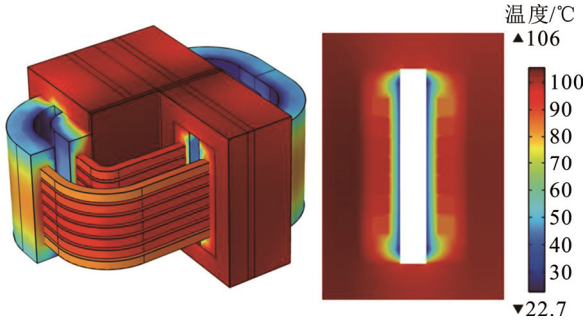


图 9 自然风冷仿真结果

Fig.9 Natural air-cooling simulation results

表 4 B/H/L 型液冷关键尺寸

Table 4 Key dimensions of B/H/L-type water-cooling structures

结构类型	D/mm	d/mm	n	s/mm
B 型	10	1.0	9	15.3
H 型	12	0.5	11	14.7
L 型	8	1.5	7	15.9

3 液冷结构参数优化设计方法

3.1 响应面模型及中心复合设计

响应面分析法(response surface methodology，RSM)是一种用于优化多因素系统的统计建模方法。该方法通过合理设计有限次数的试验，采用多项式回归模型拟合系统响应值与关键因子之间的关系，模型中包含显著影响因素的一次项、二次项以及两因素间交互项，从而系统分析各因素对响应变量的影响，并高效确定系统的最优运行条件[27]。

本研究以高频变压器最高温度为响应变量，采用中心复合设计(central composite design，CCD)构建结构参数组合，进行有限元仿真获取不同设计参数条件下的温升结果，以替代实测试验数据作为响应面建模的基础[28]。随后，基于仿真结果建立温升与液冷结构关键尺寸之间的响应面模型，并选用二次多项式形式以兼顾模型的简洁性与拟合精度，其表达式为：

$$\tilde{y}=\beta_0+\sum_{j=1}^{n'}(\beta_j x_j)+\sum_{j=1}^{n'}(\beta_{jj}x^2)_j+\sum_{i=1}^{n'}\sum_{j=1}^{n'}(\beta_{ij}x_i x_j) \quad (13)$$

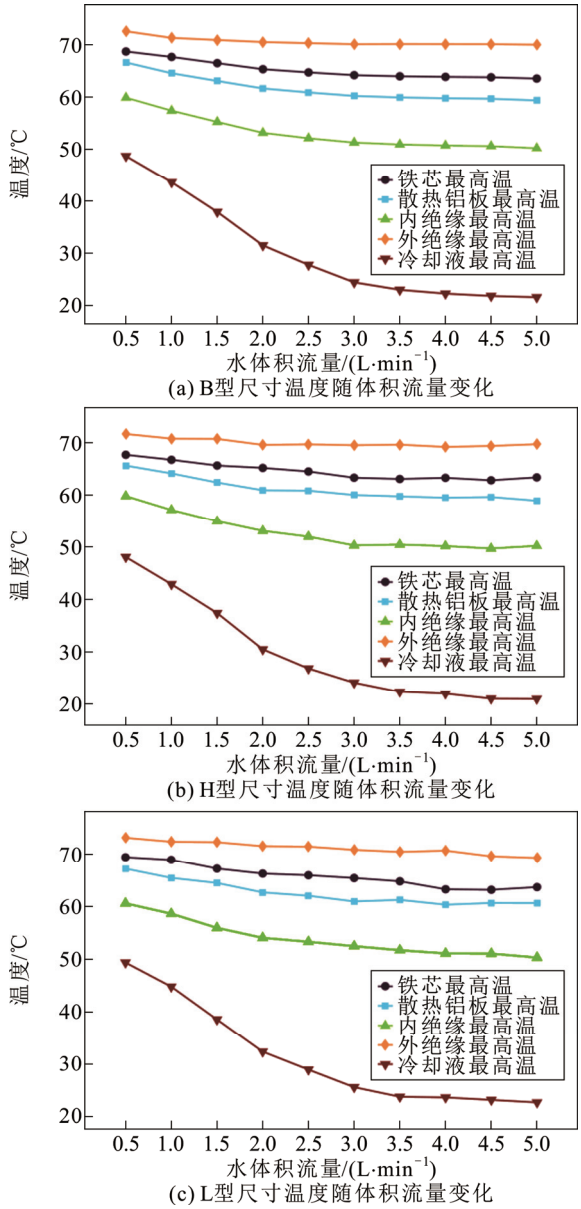
式中：$\tilde{y}$ 为目标函数；β_0、β_j、β_{jj}、β_{ij} 为多项式系数；x_i、x_j 为试验变量；n'为试验变量个数。

本文选取冷却管外径 D、冷却管壁厚 d、冷却管匝数 n、冷却管间距 s 这 4 项液冷结构参数作为优化变量，高频变压器本体几何参数保持不变。由

于优化因子数为 4，根据 CCD 试验设计标准，每个因子采用五水平编码，共生成 30 组仿真样本点。试验设计方案如表 5 所示，仿真结果见附录 A。

基于液冷结构参数与变压器最高温度之间的试验数据，可以拟合构建如式(14)所示的二次多项式模型，以用于模拟和预测不同结构参数下的最高温度 T。

$$\begin{aligned}T=&101.1+1.744D+30.46d+\\&7.156n-7.476s-2.517Dd-\\&0.459\,4Dn+0.197\,9Ds-2.962dn+\\&0.075ds-0.031\,25ns-0.028\,65D^2+\\&1.822d^2-0.096\,15n^2+0.195\,6s^2\end{aligned}\tag{14}$$



(a) B型尺寸温度随体积流量变化

(b) H型尺寸温度随体积流量变化

(c) L型尺寸温度随体积流量变化

图 10　不同流量下 B、H、L 型变压器温度响应

Fig.10　Temperature response of B, H, L-type transformers under different water flow rates

为进一步直观展示结构参数对最高温度的影响关系，绘制了相应的响应曲面图，如图 11 所示。响应曲面图可以表示 2 个变量之间的相互作用，也可以反映不同因素水平对响应值的影响程度。

图 11(a)为冷却管外径 D 与壁厚 d 的交互响应面，整体较平坦，表明该组合对最高温度 T 影响较小，交互作用不显著。图 11(b)为冷却管匝数 n 与间距 s 的交互响应面，随着间距 s 增加，最高温度 T 明显下降，且匝数 n 与间距 s 存在一定交互关系，对温度具有较强调控作用。

3.2　NSGA-II 多目标优化模型建立与求解

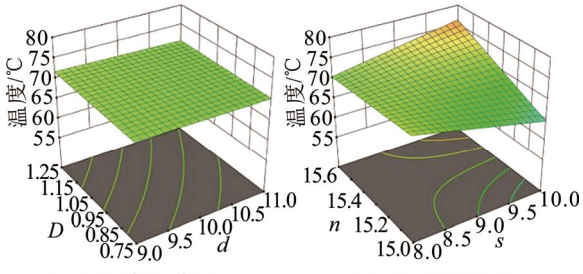
3.2.1　NSGA-II 多目标优化模型

本文优化目标包括高频变压器最高温度的最小化和铜质冷却管用量的最小化，构成了一个典型的多目标优化问题。增大冷却管内径及冷却管匝数能够增加换热面积，从而提高散热效果，但这会受到冷却管刚度及变压器冷却通道体积的限制。此外，冷却管体积的增大还会导致材料消耗增加，从而影响经济性。因此，同时最小化这 2 个优化目标并不现实，不存在一个可以同时满足所有目标的最优解。NSGA-II 算法是在 NSGA 算法的基础上，通过引入精英策略和小生境技术，保持了种群的多样性，并利用非支配排序提高了收敛速度，降低了计算复杂度[29-30]。该算法在低维度优化问题中表现优异，成为多目标优化的常用算法。因此，本文在高频变压器液冷结构优化中，选择 NSGA-II 算法处理多目标

表 5　四因子五水平试验表格

Table 5　Four-factor, five-level experimental matrix

试验因素	因素水平				
	$-\alpha$	−1	0	1	α
D	8	9	10	11	12
d	0.5	0.75	1	1.25	1.5
n	7	8	9	10	11
s	14.7	15	15.3	15.6	15.9



(a) D和d交互作用　(b) n和s交互作用

图 11　响应曲面结果

Fig.11　Results of response surface

优化问题，具体优化流程如图 12 所示。算法中各参数的设置分别为：种群总数 N 为 100，最大迭代次数 G_m 为 1 000，交叉概率 P_c 为 0.9，交叉分布指数为 10，变异分布指数为 20。

高频变压器最高温度通过式(14)进行计算。铜质冷却管的材料用量 V 通过式(15)表示。

$$V = 2\pi(dD - d^2)\left(n(L_0 + W_0) + (D + d)(n-1)^2\right) \quad (15)$$

式中：L_0 和 W_0 分别为冷却管环绕路径的长和宽，分别为 83.36 mm 和 207.36 mm。

对于高频变压器最高温度及铜质冷却管材料用量进行多目标优化，构建的多目标优化模型的目标函数和约束条件为：

$$\min\begin{cases} T = f_1(D,d,n,s) \\ V = f_2(D,d,n,s) \end{cases}$$
$$\text{s.t.}\begin{cases} D_{\min} \le D \le D_{\max} \\ d_{\min} \le d \le d_{\max} \\ n_{\min} \le n \le n_{\max}, n \in \mathbb{Z} \\ s_{\min} \le s \le s_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中：下标 max、min 分别表示最大、最小值。

冷却结构各结构参数的取值范围如表 6 所示，这些参数的设定受到变压器结构尺寸的约束。例如，冷却管的外径受限于铁芯与副边绕组之间的有效安装间距；而冷却管之间的间距及其匝数则受到环氧树脂浇注高度的限制，需兼顾热性能与结构强度之间的平衡。

3.2.2 优化结果及熵权-TOPSIS 法选优

通过 NSGA-II 算法得到的 Pareto 前沿集如图 13 所示。横轴为最高温度，纵轴为导体用量，颜色表示由 2 个目标函数归一化加权得到的综合目标值，目标值越大代表方案越优。前沿集上的每一个圆点表示 1 组可行的最优解，每组最优解都需要对 2 个目标函数进行权衡，不存在同时使 2 个目标同时达到最优的解。因此，需要依靠工程经验，从众多解中筛选出具有代表性的设计方案，较为繁琐。为此，本文引入熵权-TOPSIS 法，对 Pareto 前沿解进行进一步的综合评价与筛选。该方法允许结合实际工程需求，手动设定各目标函数的权重，并通过计算各方案与理想解的接近程度进行排序，从而选出兼顾多个目标的代表性最优方案，提高决策效率与合理性[31-32]。

首先，根据 Pareto 前沿解集构建决策矩阵 $\boldsymbol{R}=[r_{ab}]$，a 为前沿解上解的数量，b 为优化指标数，并进行归一化处理，如式(17)所示。

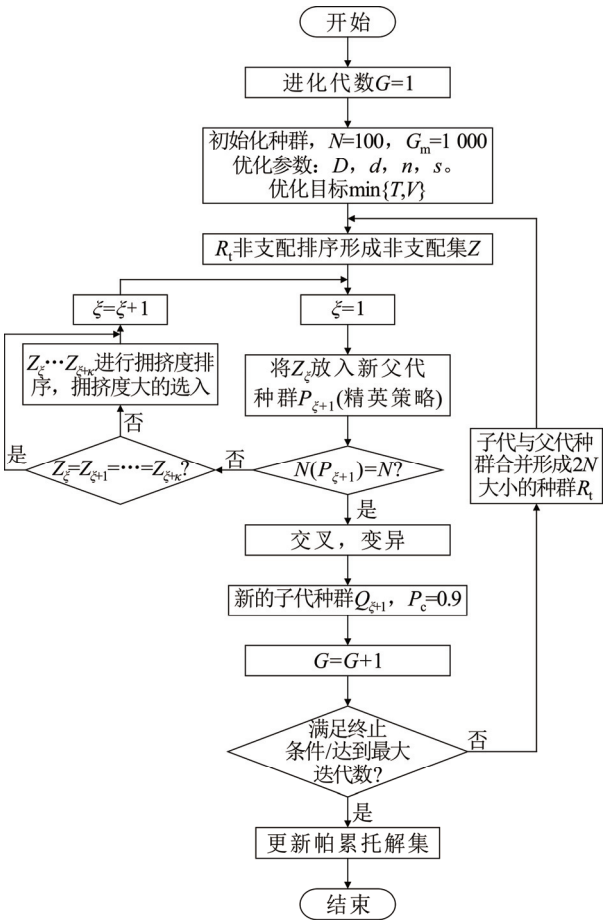


图 12 NSGA-Ⅱ多目标优化流程

Fig.12 NSGA-II multi-objective optimization process

表 6 结构优化约束范围

Table 6 Constraint ranges for structural optimization

数值范围	D/mm	d/mm	n/mm	s/mm
基准值	10	1	9	15.3
最小值	7	0.5	6	14.3
最大值	13	1.5	12	16.3

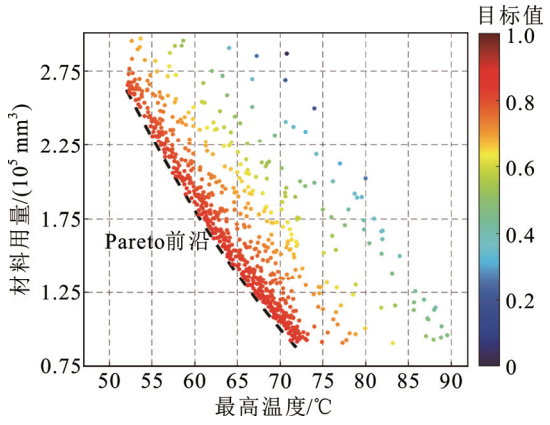


图 13 Pareto 前沿解集

Fig.13 The Pareto front solution set

$$z_{ab}=\frac{r_b^{\max}-r_{ab}}{r_b^{\max}-r_b^{\min}} \tag{17}$$

式中：$r_b^{\max}$、$r_b^{\min}$ 分别为第 b 个目标在所有方案中的最大值与最小值；z_{ab} 为归一化的标准值。

然后，根据各指标权重 ω_b，对标准化矩阵加权，得到加权决策矩阵 $\boldsymbol{V}=[v_{ab}]$如式(18)所示。

$$v_{ab}=\omega_b z_{ab} \tag{18}$$

根据加权决策矩阵，分别计算前沿解上各解与最优解和最劣解的欧式距离，表示为：

$$D_a^{+}=\sqrt{\sum_b (v_{ab}-v_b^{+})^2},v_b^{+}=\max_a(v_{ab}) \tag{19}$$

$$D_a^{-}=\sqrt{\sum_b (v_{ab}-v_b^{-})^2},v_b^{-}=\min_a(v_{ab}) \tag{20}$$

式中：D_a^{+} 为第 a 个方案到正理想解的欧氏距离；D_a^{-} 为第 a 个方案到负理想解的欧氏距离；v_b^{+} 为正理想解在第 b 指标上的分量；v_b^{-} 为负理想解在第 b 指标上的分量；$\max_a(v_{ab})$ 表示在第 b 个评价指标下，对所有候选方案的加权归一化值取最大值；$\min_a(v_{ab})$ 表示在第 b 个评价指标下，对所有候选方案的加权归一化值取最小值。

最后，计算相对接近度 C_a，如式(21)所示。

$$C_a=\frac{D_a^{-}}{D_a^{+}+D_a^{-}} \tag{21}$$

并根据相对接近度大小排序，值越大表示该解越接近理想方案，从而选出最优解。

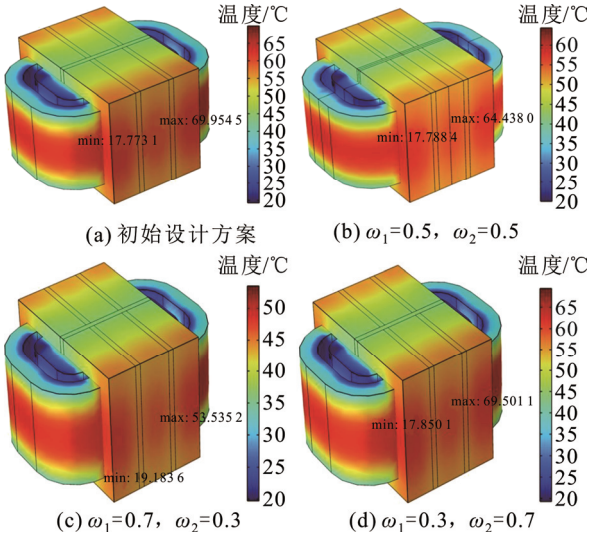
为体现不同工况下的设计偏好，选取 3 组具有代表性的权重组合：一是热点温度与材料用量同等重要，即最高温度指标权重 $\omega_1=0.5$，材料用量指标权重 $\omega_2=0.5$；二是更注重热性能时选择热点温度权重较大，即 $\omega_1=0.7$，$\omega_2=0.3$；三是材料节约优先的情况下导体用量权重较大，即 $\omega_1=0.3$，$\omega_2=0.7$。在 3 组权重下分别选出 3 组最优解。为验证各优化方案的实际效果，将 3 组优化结果与初始设计方案进行仿真对比，仿真结果如图 14 所示。初始设计方案和优化方案的结构参数、响应面计算结果以及冷却材料用量如表 7 所示。优化方案 1 最大温升和材料用量较初始设计分别降低了 11.57%、25.65%，兼顾了温升控制与材料节约；优化方案 2 在温升抑制方面效果更为显著，最大温升相比初始设计降低了 33.86%；而优化方案 3 在材料用量方面优化更好，冷却材料用量减少了 47.04%。

3.3　优化方案分析

3.3.1　温度场分析

为了评估液冷结构优化设计方法的有效性，本文在前文自然风冷温升仿真结果的基础上，对初始设计的强迫液冷方案与优化后的均衡权重强迫液冷方案进行了温升仿真对比分析，以此验证优化方案在冷却性能提升方面的实际效果，如图 15 所示。

由图 9 可知，自然风冷方案的最高温度为 105.61 ℃，尽管满足高频变压器的最高温度限值，但温度分布不均，且内部温度热点集中在变压器的铁芯和绕组区域，热流动较为缓慢，导致绕组表面温升较高，冷却效果有限。初始设计的强迫液冷系统如图 15(a)所示，通过强迫液冷显著改善了温度分布，内部温度通过流体传热得到了有效降低，最高温度降至 69.95 ℃。优化后的均衡权重强迫液冷方



(a) 初始设计方案　(b) ω_1=0.5，ω_2=0.5

(c) ω_1=0.7，ω_2=0.3　(d) ω_1=0.3，ω_2=0.7

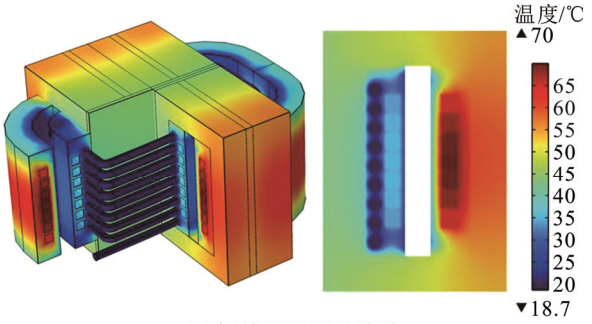
图 14　各方案仿真结果

Fig.14　Simulation results of each scheme

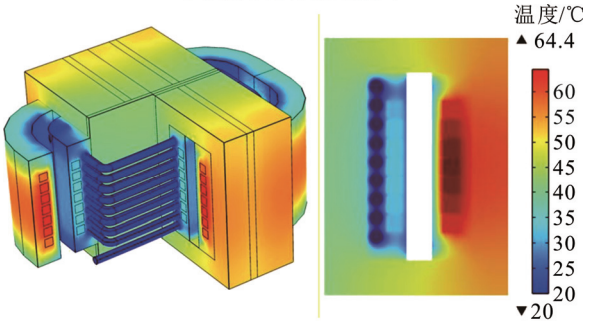
表 7　优化设计结果

Table 7　Constraint ranges for structural optimization

方案	设计变量				温度/℃		冷却材料用量/mm³	预测偏差/%
	D/mm	*d*/mm	*n*	*s*/mm	计算值	仿真值		
初始设计方案	10.00	1.00	9	15.30	69.92	69.95	174 336.00	0.04
优化方案一	11.23	1.20	10	15.84	64.17	64.44	129 613.90	0.42
优化方案二	12.12	1.33	10	16.08	53.03	53.53	231 000.50	0.93
优化方案三	10.93	1.29	9	15.59	69.21	69.50	92 335.44	0.42



(a) 初始设计强迫液冷



(b) 优化后的强迫液冷

图 15 不同冷却方式下变压器温度分布对比

Fig.15 Comparison of transformer temperature distribution under different cooling methods

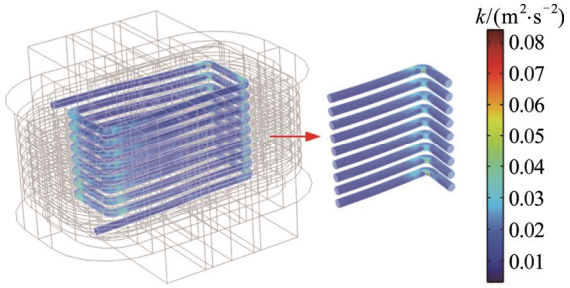


图 16 湍动能分布云图

Fig.16 Turbulent kinetic energy distribution contour plot

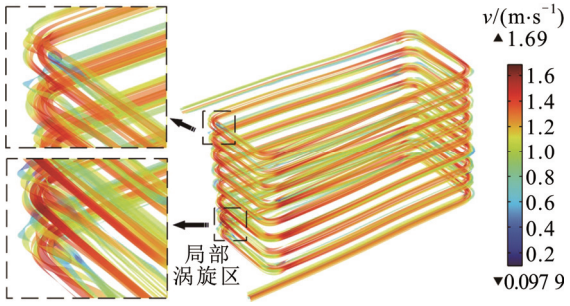


图 17 湍流速度流线图

Fig.17 Streamline plot of turbulent velocity field

案如图 15(b)所示，最高温度进一步降至 64.44 ℃，优化后的方案表现出较强的冷却效果。

3.3.2 流场分析

为了分析强迫液冷系统中流场特性，本文针对优化后的强剖液冷方案仿真结果，提取了螺旋冷却水管内部的湍动能 k 分布，并绘制如图所示的湍动能云图，如图 16 所示。湍动能的数值分布在 0.01~0.08 m^2/s^2 之间，显示出螺旋管道内存在明显的湍流发展特征。特别是在各拐角区域，湍动能显著增大，表明流体在转弯处发生强烈扰动，剪切和速度梯度增强，产生更高的速度波动能量，即湍流强度更大。

为了分析螺旋液冷结构内部的流动路径与速度变化特性，本文绘制了流体速度流线图，如图 16 所示。流线描述了流体质点的瞬时运动轨迹，色彩深浅对应流体速度大小，能够直观反映流动状态及紊乱程度。由图 17 可知，在螺旋管道的直线段区域，流线排列较为平行，流动状态相对稳定；在拐角段内，流体轨迹发生显著扰动，产生复杂的旋转与混合效应，表现出典型的湍流不稳定性特征。根据流速流线图可知，冷却液在通道内部的流动已明显表现出湍流特征，这也从侧面验证了本文仿真中选用 k-ω 湍流模型的合理性，能够有效捕捉流场中复杂的速度梯度与湍流结构，保障了温度场分布预测的准确性。

4 结论

1）考虑铜、铝、环氧树脂及纳米晶合金等材料热物性随温度的变化规律，建立了强迫液冷下高频变压器热-流耦合多物理模型，并给出了导热、对流、辐射与非等温流体流动的热流耦合方程组。该模型能够准确计算高频励磁条件下绕组与铁芯的温升分布及热流耦合特征，为后续冷却通道参数扫描与优化奠定了可靠基础。

2）针对热点处于铁芯与内侧绕组之间的特点，在该区域设计螺旋铜质液冷通道，提出“外径-壁厚-匝数-管间距”四参数结构设计方案；并结合冷却介质热-电性能、冰点要求，优选体积分数 30%乙二醇-水混合液作为冷却液。仿真结果表明，当体积流量提升至 3.5 L/min 后，热点温度不再明显下降，综合冷却效果与水泵功耗，确定 3.5 L/min 为设计体积流量基准点。

3）利用二次多项式构建高频变压器最高温度与液冷结构参数的响应面模型，以最高温度最小化、冷却管材料用量最小化为目标，采用 NSGA-II 获取 Pareto 前沿，通过熵权-TOPSIS 综合评价筛选不同

设计偏好下的最优结构。仿真结果表明，各优化方案均显著降低了变压器的最大温升和冷却管用量。其中，均衡权重方案的最高温为 64.44 ℃。最大温升较初始设计下降 11.0%、较自然风冷下降 48.1%，冷却管材料用量较初始设计减少 25.7%，验证了所提热-流耦合液冷结构优化方法的高效性与实用性。

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

参考文献　References

[1] 傅明利，王威望，赵小军，等. 大功率高频变压器关键技术与发展趋势[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4377-4387.
FU Mingli, WANG Weiwang, ZHAO Xiaojun, et al. Key issues and development prospects in high power high-frequency transformer[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4377-4387.

[2] 王威望，罗宇靖，关子凌，等. 高功率密度中高频变压器绝缘与散热研究进展与展望[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4388-4406.
WANG Weiwang, LUO Yujing, GUAN Ziling, et al. Research progress and technical prospect in insulation and heat dissipation of high power density medium-high frequency transformer[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4388-4406.

[3] 李卫国，陈镔浩，赵国亮，等. 环氧固封式大容量高频变压器温度-应力场分布与优化[J]. 高电压技术，2024，50(9)：3978-3987.
LI Weiguo, CHEN Binhao, ZHAO Guoliang, et al. Distribution and optimization of temperature-stress field of epoxy solid sealed high-capacity high-frequency transformer[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 3978-3987.

[4] 易哲嫄，孙　凯，刘增杨. 基于改进热分析和变换器协同设计的大功率高频变压器高速全局优化方法[J]. 中国电机工程学报，2024，45(1)：228-238.
YI Zheyuan, SUN Kai, LIU Zengyang. A high speed global optimization method for high-power high-frequency transformers based on improved thermal analysis and co-design with converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 45(1): 228-238.

[5] 尚星宇，庞　磊，卜钦浩，等. 大功率高频变压器绝缘问题研究综述[J]. 中国电机工程学报，2024，44(8)：3306-3326.
SHANG Xingyu, PANG Lei, BU Qinhao, et al. Research review on insulation issues of high-power high-frequency transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3306-3326.

[6] MUDAWAR I. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2001, 24(2): 122-141.

[7] MA D Q, WANG W W, HE J F, et al. Simulation of interpolated heat dissipation structures using fins and water-cooling for solid medium frequency transformer[C]//Proceedings of 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference(CIEEC). Nanjing, China: IEEE, 2022: 2418-2423.

[8] 王开国，宫金武，石子帅，等. 采用氮化铝材料的水冷变压器的热管理方法[J]. 电工技术学报，2024，39(21)：6614-6625，6758.
WANG Kaiguo, GONG Jinwu, SHI Zishuai, et al. Thermal management method for toroidal water-cooling transformer using aluminum nitride material[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(21): 6614-6625, 6758.

[9] PALACZ M, BODYS J, LASEK P, et al. Experimental analysis of the air-and water-based cooling solution for the three-phase line choke[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 47: 102316.

[10] 王晓远，杜静娟. CFD 分析车用电机螺旋水路的散热特性[J]. 电工技术学报，2018，33(4)：955-963.
WANG Xiaoyuan, DU Jingjuan. CFD analysis of heat transfer characterization in spiral channel cooling for permanent magnet electric machine in EVs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 955-963.

[11] 肖　飞，张新生，王瑞田，等. 双翼型翅片管水冷的浇注式变压器绕组精细化热路建模方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(22)：8321-8331.
XIAO Fei, ZHANG Xinsheng, WANG Ruitian, et al. A detailed thermal network modeling method of water-cooled epoxy-cast transformer windings with double-wing finned tubes[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8321-8331.

[12] MENDIZÁBAL J K, MONTAZERI M, HUITINK D, et al. Direct cooling of a planar magnetic converter using dielectric liquid forced convection enabled by additive manufacturing[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 191: 122809.

[13] ZENG S, LEE P S. Topology optimization of liquid-cooled microchannel heat sinks: an experimental and numerical study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 142: 118401.

[14] NAVAH F, LAMARCHE-GAGNON M É, ILINCA F. Thermofluid topology optimization for cooling channel design[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121317.

[15] LAD A A, ROMAN E, ZHAO Y, et al. Fin design topology optimization for direct liquid cooling of multichip power modules[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2024, 14(5): 795-809.

[16] 王玉彬，林　洋. 基于电磁热双向耦合的内置式永磁同步电机温度场等效模型及温度场分析[J]. 电工技术学报，2025，40(22)：7127-7139.
WANG Yubin, LIN Yang. Equivalent model of temperature field and temperature field analysis of interior permanent magnet synchronous motor based on electromagnetic-thermal bidirectional coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(22): 7127-7139.

[17] 李治勤. 高等流体力学[M]. 北京：中国水利水电出版社，2023：283.
LI Zhiqin. Advanced fluid mechanics[M]. Beijing, China: China Water Power Press, 2023: 283.

[18] LI M Y, WANG Z Z, ZHANG J S, et al. Temperature rise test and thermal-fluid coupling simulation of an oil-immersed autotransformer under DC bias[J]. IEEE Access, 2021, 9: 32835-32844.

[19] 陈　彬，梁　旭，万妮娜，等. 中频变压器瞬态电磁场温度场耦合求解分析[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4400-4409.
CHEN Bin, LIANG Xu, WAN Nina, et al. Coupled transient electromagnetic-thermal fields analysis of medium-frequency transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4400-4409.

[20] 刘　刚，杨朔侨，马睿智，等. 基于区域分解的油浸式变压器二维流-热场计算[J]. 高电压技术，2025，51(10)：5253-5261.
LIU Gang, YANG Shuoqiao, MA Ruizhi, et al. Calculation of two-dimensional flow-thermal field of oil-immersed transformer based on regional decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(10): 5253-5261.

[21] 谢裕清，李　琳，宋雅吾，等. 油浸式电力变压器绕组温升的多物理场耦合计算方法[J]. 中国电机工程学报，2016，36(21)：5957-5965.
XIE Yuqing, LI Lin, SONG Yawu, et al. Multi-physical field coupled method for temperature rise of winding in oil-immersed power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5957-5965.

[22] 张呈平，郭　勤，贾晓卿，等. 数据中心用浸没式冷却液的研究进展[J]. 精细化工，2022，39(11)：2184-2195.

ZHANG Chengping, GUO Qin, JIA Xiaoqing, et al. Research progress of immersion coolant for data centers[J]. Fine Chemicals, 2022, 39(11): 2184-2195.

[23] SORTE S, SALGADO A, MONTEIRO A F, et al. Advancing power transformer cooling: the role of fluids and nanofluids-a comprehensive review[J]. Materials, 2025, 18(5): 923.

[24] ZHOU Rui, CHEN Yumei, ZHANG Jiawen, et al. Research progress in liquid cooling technologies to enhance the thermal management of LIBs[J]. Materials Advances, 2023, 4(18): 4011-4040.

[25] 保定天威保变电气股份有限公司. 变压器试验技术[M]. 北京：机械工业出版社，2000.
Baoding Tianwei Baobian Electric Co., Ltd. Transformer test technology[M]. Beijing, China: Mechanical Industry Press, 2000.

[26] HERNANDEZ C, LARA J, ARJONA M A, et al. Multi-objective electromagnetic design optimization of a power transformer using 3D finite element analysis, response surface methodology, and the third generation non-sorting genetic algorithm[J]. Energies, 2023, 16(5): 2248.

[27] 陈 炜，吴晓文，袁发庭，等. 基于电磁-热-力多物理场仿真的铁心电抗器结构参数分层优化方法研究[J]. 智慧电力，2024，52(4)：116-124.
CHEN Wei, WU Xiaowen, YUAN Fating, et al. Structural parameters hierarchical optimization of iron core reactors based on electromagnetic-thermal-force multi-physics simulation[J]. Smart Power, 2024, 52(4): 116-124.

[28] 陈 彬，沈辰轩，刘 洋，等. 高频变压器电磁场-结构力场-声场求解及特性分析[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4459-4474.
CHEN Bin, SHEN Chenxuan, LIU Yang, et al. Solution and characteristic analysis of high-frequency transformer based on electromagnetic field-structural force field-acoustic field[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4459-4474.

[29] YADAV A K, RAHI O P, MALIK H, et al. Design optimization of high-frequency power transformer by genetic algorithm and simulated annealing[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2011, 1(2): 102-109.

[30] XIONG Q L, DONG L, CHEN H, et al. Enhanced NSGA-II algorithm based on novel hybrid crossover operator to optimise water supply and ecology of Fenhe reservoir operation[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 31621.

[31] 张毅刚，黄志刚，陈 浩. 现代决策分析方法与案例[M]. 北京：清华大学出版社，2016.
ZHANG Yigang, HUANG Zhigang, CHEN Hao. Modern decision analysis methods and case studies[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2016.

[32] ZHANG H B, HUANG S L, ZHANG J Q, et al. Evaluation index system of fire extinguishing agent suitable for transformer oil fire based on entropy weight TOPSIS[C]//Proceedings of 2022 Asian Conference on Frontiers of Power and Energy(ACFPE). Chengdu, China: IEEE, 2022: 13-17.



陈 彬(通信作者)
1989—，男，博士，副教授
主要从事电力装备电磁特性模拟与测量技术、电工新材料综合磁特性模拟与测量技术的研究工作
E-mail: chenbin@ctgu.edu.cn

CHEN Bin
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



褚 琰
2002—，男，硕士生
主要从事大容量高频变压器冷却装置设计及多物理场仿真分析方面的研究工作
E-mail: 1737587154@qq.com

CHU Yan

收稿日期 2025-07-22 在线出版日期 2025-10-15 编辑 曾文君

附录 A

表 A1　中心复合设计试验方案与响应值

Table A1　Central composite design scheme and response values

试验次数	*D*/mm	*d*/mm	*n*	*s*/mm	*θ*/℃	试验次数	*D*/mm	*d*/mm	*n*	*s*/mm	*θ*/℃
1	8	1	9	15.3	74.83	16	10	1	9	15.3	69.95
2	9	1.25	8	15	71.61	17	10	0.5	9	15.3	78.81
3	9	1.25	8	15.6	71.83	18	10	1	9	14.7	69.85
4	9	0.75	8	15.6	77.31	19	10	1	9	15.3	69.95
5	9	0.75	8	15	77.4	20	10	1	9	15.3	69.95
6	9	0.75	10	15	74.3	21	10	1	7	15.3	74.75
7	9	0.75	10	15.6	74.46	22	11	0.75	10	15.6	70.05
8	9	1.25	10	15	66.11	23	11	1.25	10	15	58.67
9	9	1.25	10	15.6	65.98	24	11	0.75	8	15	73.34
10	10	1	9	15.3	70.26	25	11	1.25	10	15.6	59.06
11	10	1.5	9	15.3	62.04	26	11	1.25	8	15	66.54
12	10	1	11	15.3	64.42	27	11	1.25	8	15.6	66.74
13	10	1	9	15.9	70.23	28	11	0.75	8	15.6	74.72
14	10	1	9	15.3	69.95	29	11	0.75	10	15	69.91
15	10	1	9	15.3	69.95	30	12	1	9	15.3	64.88