

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.04.022

油浸式变压器用片式散热器参数研究与优化

苗阿乐¹, 白晓春², 朱超², 王绿², 刘迎文¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100)

摘要:片式散热器对油浸式变压器的散热具有重要作用。为探究片式散热器结构参数对其散热性能的影响,以片高、焊道数量和焊道高度差为自变量,散热量和流动阻力为响应值,采用 Box-Behnken 设计(Box-Behnken design, BBD)方法设计多变量矩阵,利用 STAR-CCM+对模型进行数值模拟并得到对应的响应结果;基于模型的散热量和流动阻力方差分析,获得二次回归模型,分析片高和焊道数量对散热量和流动阻力的交互影响;最终使用期望值法对片式散热器进行参数优化,确定最佳结构参数。结果表明:响应面预测值和模拟结果集中分布在回归线附近,误差在 10% 以内,满足工程设计要求;片高和焊道数量的增大均会导致散热量和流动阻力增大,但散热量和流动阻力对片高变化更敏感;片高为 2 483 mm、焊道数量为 6、焊道高度差为 60 mm 时,片式散热器的散热性能最佳。

关键词:片式散热器;油浸式变压器;响应面方法;期望值法;散热性能;流动阻力

中图分类号:TM403

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)04-0206-09

0 引言

油浸式变压器是户内变电站的常用设备,其在高温大负荷条件下的安全稳定运行对保障城市居民正常生产生活用电至关重要^[1-3]。片式散热器作为油浸式变压器的重要散热附件,其结构简单,散热效果好,便于维护,在户内变电站中的主变压器散热部件中一直占据主流地位。

国内外学者在优化片式散热器结构、设计低流阻高效散热的片式散热器方面做了大量的实验和数值仿真研究。文献[4-9]通过 FLUENT 数值计算分析了片式散热器片数、削肩角度、油道分布和上集油管倾斜角等因素对整组片式散热器散热性能的影响,研究发现当片式散热器片数为 24~26,削肩角度为 9°,通道油流分布为中间窄两边宽,上集油管倾斜角度为 20°时,整组片式散热器散热性能最佳。Anishek 等通过对片式散热器进行数值模拟确定了散热器冷却能力以及散热器截面之间的最佳间距和截面的最佳长度^[10]。Mahdi 等设计了 4 种不同形状的散热片进行数值计算,得出上窄下宽的梯形散热片能够最大限度提升散热器散热性能的结论^[11]。除了对片式散热器自身进行优化设计来提高其散热潜力外,文献[12-13]还采用实验和数值模拟的方法研究了在片式散热器外采用喷淋的方

式和集油管中采用泵驱的方式来强化片式散热器的散热效果。文献[14]对片式散热器进行数值仿真,发现假设平均机油温度等于散热器壁温,则散热量的计算结果会偏高约 15%,并且片式散热器金属壁面贡献了总散热的 10%。因此在对变压器散热器建模时,考虑墙壁的热传导非常重要。除了片式散热器本身结构优化外,还有学者在绝缘油侧和空气侧对片式散热器的散热性能进行优化研究。文献[15-17]通过数值仿真和实验的方法证明了在片式散热器油道表面冲压扰流结构可提升绝缘油在油道中的扰动,进而提升片式散热器的散热性能。文献[18-21]研究了表面涂层对片式散热器效率的影响,并将石墨烯片式散热器与常用片式散热器进行对比,分析其效率差异的原因。文献[22]采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法分析了辐射对变压器片式散热器散热性能的影响,研究发现,考虑辐射时的片式散热器端部片单元散热性能提高了 24.1%,但内部片单元散热量提升并不明显,因此一般在片式散热器的数值仿真研究中可以忽略片式散热器的辐射散热。

目前研究主要集中在片式散热器片数、削肩角度、集油管倾斜角度、表面涂层和油侧以及空气侧扰流装置等因素对片式散热器散热性能的影响,对于片式散热器自身的油道数量、焊道高度差和片高等几何结构因素对散热性能的影响研究较少。

针对上述问题,文中以绝缘油为工作流体,利用 STAR-CCM+建立片式散热器的三维流固耦合数值计算模型,基于方差分析,获得修正的二次回归

收稿日期:2023-01-04;修回日期:2023-03-11

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“基于多场协同理论的高温大负荷户内变电站降噪技术研究”(5226SX210-01C)

模型,针对片高和焊道数量对片式散热器散热量和流动阻力的交互影响进行分析,使用期望值法进行参数优化,找出片式散热器最佳结构参数。

1 仿真模型介绍

1.1 片式散热器模型介绍

图1为整组片式散热器结构示意图,其由上下集油管和竖直平行等间距排列在上下集油管之间的片单元组成。其中, H 为片高,即上下集油管中心距离; L 为片宽,固定为460 mm; s 为相邻片式散热器之间的间距,为45 mm。一般上下集油管外径为89 mm,内径为81 mm。

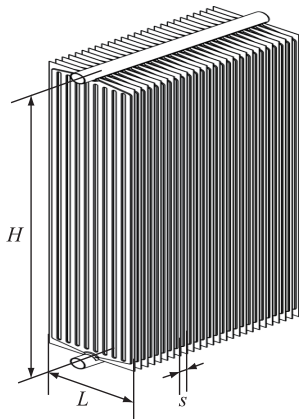


图1 整组片式散热器结构

Fig.1 Structure of whole set of panel-type radiator

图2为单个片单元结构示意图,片单元关于上下集油管中心连线轴对称分布。每个片单元由2片相同的碳钢板组成,碳钢板厚度为1 mm。碳钢板表面冲压有周期性排列的凹凸平台,两碳钢板的凸型平台之间形成绝缘油流动的油道,凹型平台将相邻的油道分隔开形成焊道。对于片宽为460 mm的片式散热器,焊道总宽度固定为112 mm,且相邻两焊道之间的高度差定义为焊道高差 Δd 。

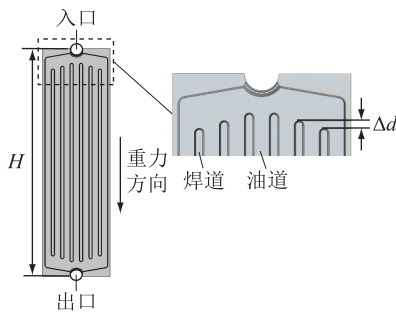


图2 单片片式散热器结构

Fig.2 Structure of single piece of panel-type radiator

高温绝缘油自上集油管入口进入,经上集油管各个分油口流动至各个片式散热器中,绝缘油在重力作用下在各个片式散热器中自上而下流动并与

外界环境进行对流和辐射换热,冷却后的绝缘油汇集到下集油管中自下集油管出口流出片式散热器。

根据片式散热器结构可知,片式散热器的高度 H ,焊道数量 N 以及焊道的高度差 Δd 会对片式散热器内部的绝缘油分布造成影响,进而影响绝缘油在片式散热器内部的流动阻力 ΔP 和片式散热器的散热量 Q 。围绕上述结构参数对片式散热器散热性能的影响展开研究。

模型假设如下:(1) 流体为三维不可压缩、稳态并且充分流动;(2) 绝缘油的物性参数随温度呈线性变化;(3) 热平衡状态下,绝缘油的温度分布不随时间变化;(4) 外界空气环境恒定。

1.2 控制方程

控制方程包括质量方程、动量方程和能量守恒方程,具体如下。

(1) 质量方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; \mathbf{V} 为速度矢量。

(2) 动量方程。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) = \nabla \cdot (\eta \nabla u) = S_u - \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) = \nabla \cdot (\eta \nabla v) = S_v - \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{V}) = \nabla \cdot (\eta \nabla w) = S_w - \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (4)$$

式中: u, v, w 分别为 \mathbf{V} 在 x, y, z 坐标轴上的分量; η 为流体的动力粘度; S_u, S_v, S_w 为3个动量方程的广义源项。

(3) 能量守恒方程。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} T) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{C_p} \nabla T \right) + S_T \quad (5)$$

式中: T 为温度; λ 为流体导热系数; C_p 为流体的比定压热容; S_T 为流体的内热源与因粘性作用流体机械能转换为热能的部分之和。

片式散热器在工作中的散热方式为对流换热和辐射换热。对于竖直平行等间距布置的片式散热器,其相邻片单元间距为45 mm,远小于片宽 L 和片高 H ,根据前文可知,片式散热器向外辐射的热量可以忽略不计。对于一组片式散热器,除位于端部的2个片单元,绝大多数片单元位于片式散热器内部,片高 H 一般远远大于片间距 s ,可以假设空气在片单元之间完全发展与每个边界层合并。在式

(6)一式(9)中使用经验公式来确定对流传热系数,该公式考虑了竖直平行且对称布置的平板和较窄的空气通道以及较长的平板高度($s/H \approx 0$)^[23-24]。

$$Nu = \frac{1}{24} Ra \left(\frac{s}{H} \right) \left(1 - \exp \left(- \frac{35}{Ra(s/H)} \right) \right)^{3/4} \quad (6)$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_{air})s^3}{v_{air}\alpha} Pr \quad (7)$$

$$Nu = \frac{1}{24} Ra \left(\frac{s}{H} \right) \quad s/H \approx 0 \quad (8)$$

$$h_{air} = \frac{Nu\lambda_{air}}{s} \quad (9)$$

式中: Nu 为努塞尔数; Ra 为瑞利数; Pr 为普朗特数; g 为重力加速度; α 为空气热扩散率; β 为空气热膨胀系数; T_s 为片式散热器表面温度; T_{air} 为空气温度; v_{air} 为空气运动粘度; h_{air} 为片式散热器表面传热系数; λ_{air} 为空气导热系数。

综上所述,可以计算得到:当 $H=1\ 600\text{ mm}$ 时, h_{air} 为 $4.54\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;当 $H=2\ 200\text{ mm}$ 时, h_{air} 为 $4.04\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;当 $H=2\ 600\text{ mm}$ 时, h_{air} 为 $3.79\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;当 $H=3\ 200\text{ mm}$ 时, h_{air} 为 $3.50\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

1.3 数值算法和边界条件

数值模拟中,绝缘油作为工作介质,片式散热器壳体部分的材料为碳钢。碳钢物性参数随温度变化较小,基本可以忽略。绝缘油物性参数随温度变化较大,根据绝缘油在不同温度下的物性参数进行数值拟合,表1列出了碳钢钢板的物性参数以及绝缘油物性参数与温度的函数关系式,表中温度 T 的单位为 K 。

表1 绝缘油和碳钢的物性参数
Table 1 Properties of insulating oil and carbon steel

材料	参数	数值
碳钢	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850
	比热容/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	455
	导热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}]$	54
绝缘油	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$1\ 052.8 - 0.580\ 9T$
	导热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}]$	$0.154 - 87 \times 10^{-5}T$
	比热容/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	$594.2 + 4.27T$
	动力粘度/ $[\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}]$	$0.854 - 4.867 \times 10^{-3}T + 6.957^2 \times 10^{-6}T^2$

片式散热器入口采用质量流量入口,大小恒定为 $0.054\ 6\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ (入口速度值为 $0.05\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),温度恒定为 348.15 K ;出口设置为压力出口,参考压力设置为 0 Pa ,环境温度恒定为 298.15 K 。

1.4 网格无关性验证

采用 STAR-CCM+12 进行数值模拟,网格类型选择多面体网格,划分了6种不同尺寸的网格。图3为片式散热器散热量随网格数量变化的曲线。

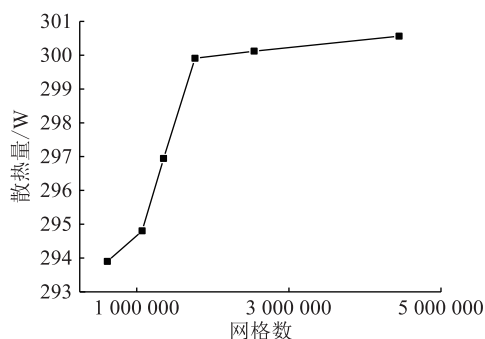


图3 网格无关性验证

Fig.3 Grid independence verification

根据图3可以看出,随着网格数量不断增加,片式散热器的散热量逐渐增大并趋于稳定,当网格数由 $1\ 765\ 234$ 增加为 $2\ 543\ 210$ 时,片式散热器的散热量基本不变。因此,为了在确保计算结果精度的同时降低计算成本,选择模型的网格划分数量为 $1\ 765\ 234$,此时对应的网格基础尺寸为 3 mm 。图4为网格数量为 $1\ 765\ 234$,网格基础尺寸为 3 mm 时片式散热器的网格划分结果。

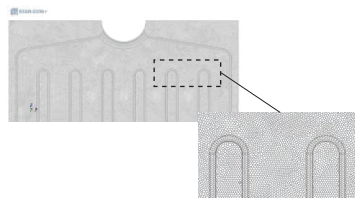


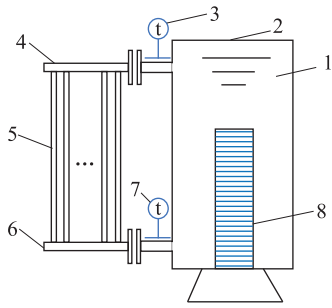
图4 网格划分结果

Fig.4 Meshing result

1.5 模型验证

为了验证 CFD 模拟结果的准确性,对5组不同规格的片式散热器进行型式试验,图5为试验系统示意。该试验系统主要包括加热器、油箱、绝缘油、温度传感器和一组片式散热器。根据相关标准,试验中,环境温度维持在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,开启系统中的加热器,加热绝缘油吸收热量后温度升高,密度降低,高温绝缘油上浮至上集油管中,然后分散流入各个片式散热器,绝缘油在片式散热器中自上而下流动并与环境空气对流换热,最后汇入下集油管中流回油箱。实验过程中,通过测量并记录环境温度、上下集油管进出口油温以及加热器功率来计算各组片式散热器散热功率。

图6为5组不同规格的片式散热器型式试验测试结果和数值模拟结果对比。



1—绝缘油; 2—油箱; 3—温度传感器, 测量上集油管进口温度;
4—上集油管; 5—片式散热器; 6—下集油管;
7—温度传感器, 测量下集油管出口温度; 8—加热器

图5 试验系统示意

Fig.5 Schematic diagram of experimental system

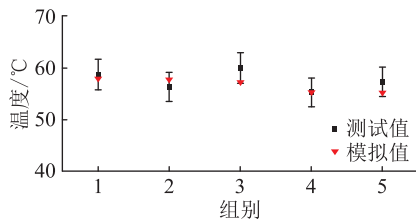


图6 试验结果与模拟结果对比

Fig.6 Comparison of experimental results and simulation results

由图6可知,对于5种不同规格的片式散热器,出口温度的数值仿真结果误差均控制在5%以内,可以证明用于片式散热器仿真的物理模型的准确性。

2 片式散热器响应面预测模型构建

2.1 响应面方法和期望值法介绍

响应面方法(response surface methodology, RSM)最初由Box和Wilson于1951年提出^[25],主要应用于化工领域,经过不断扩充和发展,如今已可以用于优化设计^[26-29],即通过合理的实验设计方法解决如何建立目标、约束和设计变量之间的近似函数的问题。响应面函数主要有3种不同的阶形式,其中,一阶形式计算精度低,具有较大的计算误差;二阶形式简单,适用性较广;三阶形式计算精度高,但是计算复杂,优化难度较高。因此,文中采用二阶形式来近似描述3个因素对散热量和流动阻力的交互作用,具体如下:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i < j}^{n-1} \sum_j^n \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 \quad (10)$$

式中: y 为响应值; x_i, x_j 为独立的影响因素; n 为影响因素的数量; $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij} (i < j), \beta_{ii}$ 分别为参考截距、线性、相互作用和二次项系数。

Box-Behnken设计(Box-Behnken design, BBD)

方法是RSM中最流行和最有用的实验设计方法之一,用于生成多变量的复杂换热器的设计矩阵。BBD对每个因素采用3个级别,并用-1、0、+1对其进行编码,其中0代表中心点,+1和-1分别代表立方体顶点的高值和低值。

在完成所有模拟实验并建立响应回归模型后,可以实现多目标优化。在期望目标函数中,每个响应的期望值 b_i 可以分配一个重要性 r_i 。重要性从最不重要值1到最重要值5不等。如果不同响应的期望值分配了不同程度的重要性,则目标函数为:

$$B = (b_1^{r_1} \times b_2^{r_2} \times \dots \times b_m^{r_m})^{\frac{1}{\sum r_i}} = \left(\prod_{i=1}^m b_i^{r_i} \right)^{\frac{1}{\sum r_i}} \quad (11)$$

式中: m 为响应期望值的数量。对于同时优化,每个响应都有一个分配给每个目标的低值和高值。在文中研究中,散热量 Q 和流动阻力 ΔP 的目标分别为最大和最小。对于最大目标优化,期望值定义如下:

$$b_i = \begin{cases} 0 & Y_i \leq L_i \\ \left(\frac{Y_i - L_i}{H_i - L_i} \right)^{w_i} & L_i < Y_i < H_i \\ 1 & H_i \leq Y_i \end{cases} \quad (12)$$

对于最小目标优化,期望值定义如下:

$$b_i = \begin{cases} 1 & Y_i \leq L_i \\ \left(\frac{H_i - Y_i}{H_i - L_i} \right)^{w_i} & L_i < Y_i < H_i \\ 0 & H_i \leq Y_i \end{cases} \quad (13)$$

式中: Y_i 为第 i 个参数的设计值; L_i, H_i 分别为第 i 个参数在研究区间内的最小值和最大值; w_i 为目标值的权重,取值范围为0.1~10。

2.2 响应面实验设计

文中选用片式散热器的焊道数量 N ,焊道高度差 Δd 以及片式散热器的高度 H 作为片式散热器响应面预测模型的变量。采用BBD方法,确定了计算矩阵,利用STAR-CCM+软件对17组不同结构参数下的片式散热器模型进行仿真计算,计算矩阵及散热量和压降计算结果如表2所示。

3 结果与讨论

3.1 方差分析

利用软件对上述响应面模型进行方差分析,通常在调整后的相关系数和预测的相关系数之间的差值小于0.2时,认为回归模型是有效的。在方差分析中,平方和用于估计偏离总平均值的平方,平方

表2 片式散热器计算矩阵及结果

Table 2 Calculation matrix and results of panel-type radiator

序号	结构参数			响应结果	
	H/mm	N	Δd/mm	Q/W	ΔP/Pa
1	2 200	7	20	406.21	54.22
2	2 600	7	20	450.52	62.92
3	2 600	7	60	449.88	61.10
4	2 200	7	60	404.75	52.22
5	1 600	7	60	328.48	38.72
6	2 200	7	40	405.38	53.14
7	2 600	8	0	455.52	66.74
8	2 200	8	60	407.81	54.45
9	3 200	6	40	509.26	74.87
10	3 200	7	60	512.05	75.05
11	2 200	6	60	402.57	52.37
12	1 600	6	20	327.95	40.45
13	1 600	8	40	331.51	41.22
14	1 600	7	0	330.79	42.64
15	2 600	6	0	448.47	62.69
16	3 200	8	40	516.61	79.14
17	3 200	7	0	513.68	78.87

和除以自由度用于估计均方。F 值为残差的均方与均方值之比,用来检查模型的准确性。P 值为模型中每个项的显著程度,当 P 值小于 0.05 时,表示该项对模型有显著影响,否则表示该项对模型没有显著影响,可以从模型中删去。当信噪比大于 4 时,表示该模型可以用来对结果参数进行拟合。散热量和流动阻力的方差分析结果见表 3 和表 4。

表3 散热量的方差分析

Table 3 Analysis of variance for heat dissipation

项	平方和	均方	F	P	显著程度
模型	71 948.54	7 994.28	27 097.34	<0.000 1	显著
H	69 375.99	69 375.99	2.352×10 ⁵	<0.000 1	显著
N	69.75	69.75	236.44	<0.000 1	显著
Δd	6.00	6.00	20.33	0.002 8	显著
HN	2.81	2.81	9.51	0.017 7	显著
HΔd	0.118 0	0.118 0	0.399 9	0.547 2	不显著
NΔd	0.344 1	0.344 1	1.17	0.316 0	不显著
H ²	195.81	195.81	663.73	<0.000 1	显著
N ²	0.506 3	0.506 3	1.72	0.231 5	不显著
Δd ²	0.007 7	0.007 7	0.026 0	0.876 5	不显著
残差	2.07	0.295 0			

表 3 为散热量的方差分析,信噪比为 452.592,信号充足,表明该模型可以用于拟合散热量。删除表 3 中无显著影响的项,修正模型后,调整后的相关系数和预测的相关系数分别为 0.999 9 和 0.999 9,

表4 流动阻力的方差分析

Table 4 Analysis of variance for flow resistance

项	平方和	均方	F	P	显著程度
模型	2 899.45	322.16	1 434.65	<0.000 1	显著
H	2 723.36	2 723.36	12 127.66	<0.000 1	显著
N	18.77	18.77	83.58	<0.000 1	显著
Δd	23.89	23.89	106.38	<0.000 1	显著
HN	1.80	1.80	8.02	0.025 3	显著
HΔd	0.002 9	0.002 9	0.012 8	0.913 1	不显著
NΔd	0.521 4	0.521 4	2.32	0.171 4	不显著
H ²	0.884 6	0.884 6	3.94	0.0876	不显著
N ²	2.13	2.13	9.46	0.017 9	显著
Δd ²	0.238 7	0.238 7	1.06	0.336 9	不显著
残差	1.57	0.224 6			

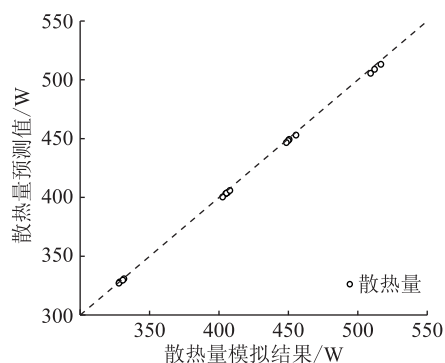
二者近似相等,表明该回归模型是有效的。表 4 为流动阻力的方差分析,信噪比为 109.793,信号充足,表明该模型可以用于拟合流动阻力。删除表 4 中无显著影响的项,修正模型后,调整后的相关系数和预测的相关系数分别为 0.993 2 和 0.998 8,二者近似相等,表明该回归模型是有效的。

对片式散热器模型的散热量和流动阻力进行方差分析后,忽略对响应影响较小的项,得到回归模型的拟合参数,表达式如下:

$$Q = -1.2 \times 10^{-5} H^2 + 1.098 \times 10^{-3} HN - 0.025 723 \Delta d + 0.329 681 N + 0.162 862 H + 85.289 25 \quad (14)$$

$$\Delta P = 0.676 6 N^2 + 0.697 2 HN - 1.54 \Delta d + 1.53 N + 18.17 H + 58.44 \quad (15)$$

图 7 为片式散热器的散热量和流动阻力的响应面预测模型得到的预测值和 STAR-CCM+三维模型得到的模拟结果值的对比分析。图中虚线代表模拟结果与预测值相等。可以看出,预测值和模拟结果集中分布在图中虚线附近,误差在 10% 以内,满足工程设计要求。以上结果可以证明该响应面预测模型在片式散热器的散热量和流动阻力预测方面的准确性。



(a) 散热量预测值和模拟结果对比

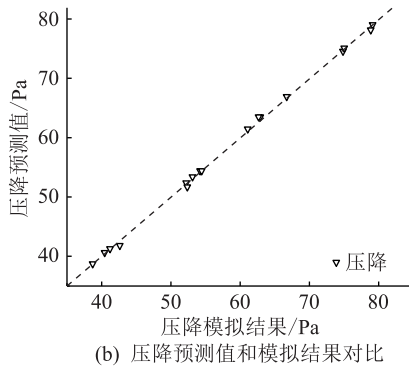


图7 片式散热器预测值与模拟结果对比

Fig.7 Comparison of predicted values and simulated results of panel-type radiators

3.2 结构参数交互影响分析

根据上述拟合参数表达式,可以看到,只有参数 N 和参数 H 对片式散热器的散热量和流动阻力存在交互影响。

图8为参数 N 和参数 H 对片式散热器的流动阻力 ΔP 和散热量 Q 的交互影响关系图。可以看出,流动阻力 ΔP 和散热量 Q 均随 N 和 H 的增加而增大,但是流动阻力 ΔP 和散热量 Q 对于参数 H 的敏感度要高于参数 N 。

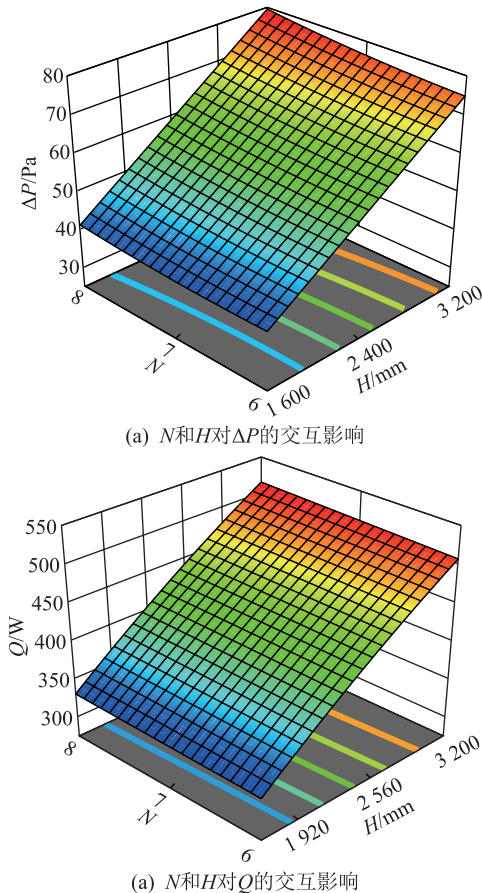


图8 N 和 H 对 ΔP 和 Q 的交互影响

Fig.8 Interaction of N and H on ΔP and Q

图9为不同高度的片式散热器温度分布云图,随着 H 的增加,片式散热器与空气的换热面积增加,进而导致片式散热器的散热量增大。但是 H 的增加,导致油道长度增加,绝缘油流动的沿程阻力增加,最终导致片式散热器中绝缘油的进出口压差增大。随着 N 的增大,片式散热器的散热量基本保持不变。图10为不同焊道数量的片式散热器压力分布云图,随着焊道数量 N 的增加,绝缘油由片式散热器入口分散至各个油道时的局部流动阻力增加,进而导致片式散热器进出口压差增大。

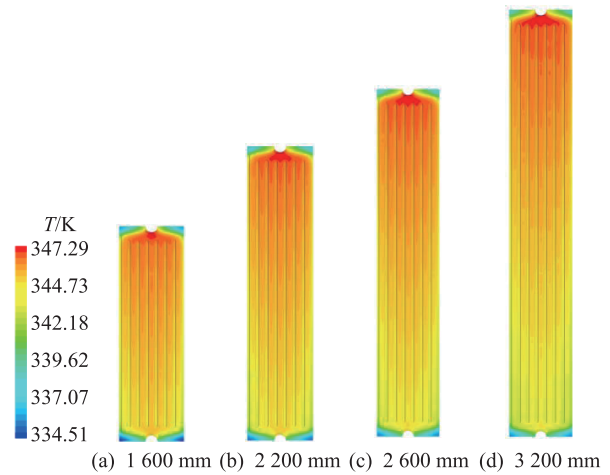


图9 不同高度的片式散热器温度云图

Fig.9 Temperature of panel-type radiators at different heights

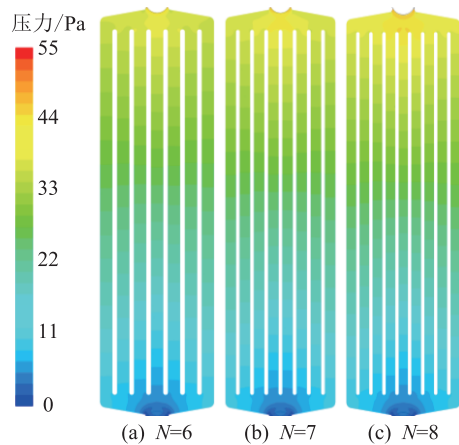


图10 不同焊道数量的片式散热器压力分布云图

Fig.10 Pressure distribution of panel-type radiator with different number of weld passes

对于片式散热器而言,绝缘油的流动动力来自油本身因密度差异而形成的浮升力,且绝缘油自身粘度较高,形成了绝缘油流动速度较低,绝缘油侧对流换热系数较低的特点。片式散热器的空气侧为自然对流状态,对流换热系数也较低。因此强化从绝缘油侧到空气侧的散热最直接的方式就是增

加片式散热器面积,片高的增加相比焊道数量的增加可以更加明显地增大片式散热器的散热面积,因此散热量对片高变化更加敏感。同样,由于片式散热器油道的宽度之和不变,焊道数量的增加对于绝缘油流动阻力的影响主要是增加绝缘油从片式散热器入口分散至各个油道的局部阻力,由于绝缘油的流动速度较低,因此,油道顶部的局部阻力增加也较小。片高的增加可以显著增加油道的长度,进而增加绝缘油在油道中流动的沿程阻力,而片高增加明显,最终造成绝缘油流动的沿程阻力显著增加,因此绝缘油进出口压差对片高变化更加敏感。

3.3 参数优化

根据上文中的结构因素对片式散热器性能分析可知,随着焊道高度差的增大,片式散热器的散热量逐渐增加,流动阻力逐渐降低;随着片高的逐渐增加,片式散热器的散热量逐渐增加,流动阻力也逐渐增大;随着焊道数量的逐渐增加,片式散热器的散热量逐渐增加,流动阻力也逐渐增大。在优化片式散热器的结构时,希望得到最大散热量的同时降低绝缘油的流动阻力,考虑到这一点,在优化过程中,目标散热量被设置成最大值,而目标压降被设置成最小值。参数的目标和权重设置如表 5 所示。

表 5 参数设置
Table 5 Parameter settings

名称	目标	下限	上限	低权重	高权重	重要性等级
H/mm	范围内	1 600	3 200	1	1	3
N	范围内	6	8	1	1	3
$\Delta d/mm$	范围内	0	60	1	1	3
Q/W	最大			1	1	5
$\Delta P/Pa$	最小			1	1	5

表 6 给出了最佳参数下预测值、数值模拟结果以及相互之间的误差,可以看出预测结果和数值模拟结果吻合良好。其中最佳参数为 $H=2\ 483\ mm$, $N=6$, $\Delta d=60\ mm$ 。

表 6 优化结果和误差
Table 6 Optimization results and errors

参数	预测值	模拟值	误差/%
Q/W	435.23	439.0	0.87
$\Delta P/Pa$	57.98	58.23	0.43

4 结论

利用 CFD、RSM 与期望值法对片式散热器的结构参数进行研究及优化。主要结论如下:

(1) 响应面预测模型和数值模拟结果均分布在回归线附近,误差在 10% 以内,验证了模型的准确性,进而确定响应面模型可以为片式散热器的工业设计提供指导。

(2) 分析根据 RSM 获得的回归模型可得,片高 H 和焊道数量 N 增大均会导致散热量 Q 和流动阻力 ΔP 增大,但是散热量 Q 和流动阻力 ΔP 对于片高 H 的敏感度高于焊道数量 N 。

(3) 以最大的散热量和最小的流动阻力为目标,利用期望值法确定片式散热器的最佳结构参数为片高 2 483 mm、焊道数量 6、焊道高度差 60 mm,此时片式散热器的散热性能最优。

参考文献:

[1] 吴鹏,陶风波,蔚超,等. 统一潮流控制器用 500 kV 油浸式串联变压器技术解析[J]. 电力工程技术,2018,37(1):14-18.
WU Peng,TAO Fengbo,WEI Chao, et al. Technical analysis of 500 kV oil-immersed series transformer for unified power flow controller[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(1):14-18.

[2] 陈钜栋,江军,杨小平,等. 油浸式高压套管局部放电非接触式特高频检测[J]. 电力工程技术,2021,40(1):147-154.
CHEN Judong,JIANG Jun,YANG Xiaoping, et al. Non-contact partial discharge detection of high voltage oil-impregnated-paper bushing based on UHF technology[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(1):147-154.

[3] 徐鹏. 一起油浸式套管事故分析[J]. 电瓷避雷器,2021(3):200-204.
XU Peng. Analysis of an oil-immersed bushing accident[J]. Insulators and Surge Arresters,2021(3):200-204.

[4] 戚美,路成,陈庆光,等. 变压器用片式散热器传热结构改进的数值分析[J]. 科学技术与工程,2022,22(8):3066-3072.
QI Mei,LU Cheng,CHEN Qingguang, et al. Numerical analysis of improvement of heat transfer structure of panel-type radiator for transformer[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(8):3066-3072.

[5] 张勇,马玉龙,王永庆,等. 变压器用散热器数值模拟和结构优化[J]. 陕西科技大学学报,2019,37(6):142-146,164.
ZHANG Yong,MA Yulong,WANG Yongqing, et al. Numerical simulation and structural optimization of radiator for transformer [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2019,37(6):142-146,164.

[6] 王后生,张华润,王志刚,等. 直流变压器用散热器数值模拟与优化[J]. 机电信息,2019(27):14-15,18.
WANG Housheng,ZHANG Huarun,WANG Zhigang, et al. Numerical simulation and optimization of radiator for DC transformer[J]. Mechanical and Electrical Information,2019(27):14-15,18.

[7] 梁义明,敖明,朱大铭,等. 变压器片式散热器传热特性优化分析[J]. 变压器,2015,52(4):32-34.
LIANG Yiming,AO Ming,ZHU Daming, et al. Optimal analysis

- of heat transfer characteristics of panel-type radiator of transformer[J]. *Transformer*, 2015, 52(4):32-34.
- [8] 金嘉琦, 翟茜. 变压器片式散热器强化换热研究进展[J]. *节能*, 2018, 37(10):100-103.
- JIN Jiaqi, ZHAI Qian. Research progress of enhanced heat transfer on panel type radiator of transformer[J]. *Energy Conservation*, 2018, 37(10):100-103.
- [9] 侯强, 朱杰, 朱丽华. 片式散热器选型和结构布置对变压器散热效率的影响[J]. *电工技术*, 2017(10):126-127.
- HOU Qiang, ZHU Jie, ZHU Lihua. Influence of type selection and structural arrangement of chip radiator on heat dissipation efficiency of transformer[J]. *Electric Engineering*, 2017(10):126-127.
- [10] ANISHEK S, SONY R, JAYADEEP KUMAR J, et al. Performance analysis and optimisation of an oil natural air natural power transformer radiator [J]. *Procedia Technology*, 2016, 24:428-435.
- [11] MAHDI M S, KHADOM A A, MAHOOD H B, et al. Effect of fin geometry on natural convection heat transfer in electrical distribution transformer; numerical study and experimental validation[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2019, 14:100414.
- [12] 李春, 刘纪堂, 章浩, 等. 变压器散热器改进喷淋装置降温效应研究[J]. *广东电力*, 2021, 34(5):114-121.
- LI Chun, LIU Jitang, ZHANG Hao, et al. Study on cooling effect of improved spray device for transformer radiator [J]. *Guangdong Electric Power*, 2021, 34(5):114-121.
- [13] 徐天光, 王永庆, 朱超, 等. 变压器用片式散热器散热性能数值模拟及试验研究[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(5):178-184.
- XU Tianguang, WANG Yongqing, ZHU Chao, et al. Numerical simulation and experimental study on heat transfer performance of panel-type radiators for transformers[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(5):178-184.
- [14] ZHAO S C, ZHANG X, LIU Q, et al. Effect of thermal conduction on transformer radiator CFD modelling[C]//2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Phuket, Thailand. IEEE, 2020:242-245.
- [15] 韩旭, 张明辉, 王亮, 等. 冲压涡发生器对片式散热器散热的数值分析[J]. *河北工业大学学报*, 2018, 47(2):49-53, 72.
- HAN Xu, ZHANG Minghui, WANG Liang, et al. Numerical analysis of heat dissipation for panel type radiator with stamping type vortex generator[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2018, 47(2):49-53, 72.
- [16] 韩旭. 片式散热器自然对流强化换热及工程应用研究[D]. 天津:河北工业大学, 2017.
- HAN Xu. Study on natural convection heat transfer enhancement and engineering application of plate radiator [D]. Tianjin:Hebei University of Technology, 2017.
- [17] 翟茜. 大型变压器片式散热器散热效率分析与研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2019.
- ZHAI Qian. Analysis and research on heat dissipation efficiency of large transformer plate radiator[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2019.
- [18] 王亚钦, 马旭, 邸林涛, 等. 石墨烯涂层片式散热器散热效率的研究[J]. *电工技术*, 2020(14):32-34.
- WANG Yaqin, MA Xu, DI Lintao, et al. Research on heat dissipation efficiency of graphene-coated chip radiator[J]. *Electric Engineering*, 2020(14):32-34.
- [19] 殷浩洋. 应用石墨烯复合材料的油浸式变压器温度场数值研究[D]. 北京:华北电力大学, 2020.
- YIN Haoyang. Numerical research on temperature field of oil-impregnated transformer using graphite composite materials[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2020.
- [20] 殷浩洋, 尹忠东. 防腐涂料导热率对片式散热器散热能力影响的数值计算[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(13):5142-5148.
- YIN Haoyang, YIN Zhongdong. Numerical on the effect of thermal conductivity of anti-corrosive coating on heat transfer of panel type radiator[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(13):5142-5148.
- [21] 王伟行. 变压器用片式散热器热镀锌工艺[J]. *工程建设与设计*, 2019(6):58-59.
- WANG Weixing. The hot galvanizing technology of plate radiator in transformer[J]. *Construction & Design for Engineering*, 2019(6):58-59.
- [22] CHANDAK V, PARAMANE S B, VEKEN W D, et al. Numerical investigation to study effect of radiation on thermal performance of radiator for onan cooling configuration of transformer[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 88:012033.
- [23] ISSAVI H, BAREZ F. Optimum spacing of vertical parallel plates for combined natural convection and radiation [C]//2017 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). IEEE, 2017.
- [24] KIM M G, CHO S M, KIM J K. Prediction and evaluation of the cooling performance of radiators used in oil-filled power transformer applications with non-direct and direct-oil-forced flow[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 44.
- [25] BOX G E P, WLISON K B J R. On the experient attainment of optimum conditions [J]. *Journal of Royal Statistical Society*, 1951, 13(1):1-45.
- [26] 李树云, 彭光前, 王现林, 等. 基于响应面方法的空调器室外机散热器位置的热设计[J]. *制冷与空调*, 2019, 19(3):16-20.
- LI Shuyun, PENG Guangqian, WANG Xianlin, et al. Thermal design of radiator position of outdoor unit of air conditioner based on response surface method [J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2019, 19(3):16-20.
- [27] LEI X S, SHUANG J J, YANG P, et al. Parametric study and optimization of dimpled tubes based on response surface methodology and desirability approach [J]. *International Journal*

of Heat and Mass Transfer, 2019, 142: 118453.

(10): 2071-2080.

- [28] 苟筋豪,张梦婷,张宇菁,等. 基于统计学习的概率潮流计算方法综述[J]. 供用电, 2021, 38(11): 33-39.

GOU Jiahao, ZHANG Mengting, ZHANG Yujing, et al. A review of probabilistic power flow calculation method based on statistical learning [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38 (11): 33-39.

- [29] 张富毅,吴钦,赵晓阳,等. 基于响应面方法的喷水推进器进水流道多目标优化[J]. 兵工学报, 2020, 41(10): 2071-2080.

ZHANG Fuyi, WU Qing, ZHAO Xiaoyang, et al. Multi-objective optimization of inlet duct of water-jet propeller based on response surface method [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41

作者简介:



苗阿乐

苗阿乐(1998),男,硕士在读,研究方向为强化热质传递技术(E-mail: alemiao@126.com);

白晓春(1979),男,硕士,研究员级高级工程师,从事动力机械及工程,电网功率与频率、电力市场与发电计划等相关工作;

朱超(1988),男,博士,工程师,从事动力机械及工程,电网功率与频率、电力市场与发电计划等相关工作。

Study and optimization of panel-type radiator parameters for oil-immersed transformer

MIAO Ale¹, BAI Xiaochun², ZHU Chao², WANG Lyu², LIU Yingwen¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Company Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Panel-type radiator plays an important role in the heat dissipation of oil-immersed transformers. To study the influence of structural parameters of panel-type radiator on its heat dissipation performance, the multi-variable design matrix is designed by using the Box-Behnken design (BBD) method. These three key parameters (the height of the panel-type radiator, the number of weld passes, and the difference of the weld pass height) are used as independent variables, and the heat dissipation and flow resistance are the response values. STAR-CCM+ is used for numerical simulation of the model and corresponding response results are obtained. Based on the variance analysis of heat dissipation and flow resistance of the model, a quadratic regression model is obtained to analyze the interaction effects of the height of the radiator and the number of passes on heat dissipation and flow resistance. Finally, the desirability approach is used to optimize the parameters of the dispersion and determine the optimal structural parameters. The results show that the predicted values and simulation results are distributed around the regression line. The error between the predicted and simulation results is within 10%, which meets the requirements of engineering design. The increase in the height of panel-type radiator and the number of weld passes leads to an increase in heat dissipation and flow resistance, but the sensitivity of heat dissipation and flow resistance to panel-type radiator height is higher than the number of weld passes. The panel-type radiator has the best heat dissipation performance when the values of the panel-type height, the number of weld passes, and the difference of weld passes height are 2 483 mm, 6, and 60 mm respectively.

Keywords: panel-type radiator; oil-immersed transformer; response surface methodology; desirability approach; heat dissipation performance; flow resistance

(编辑 方晶)