

基于响应曲面法的电力开关柜脉动热管散热参数优化研究

胡青云, 许浩文, 陈德敏, 陆彪, 陈燕
(安徽工业大学建筑工程学院, 安徽马鞍山 243032)

摘要: 为提高电力开关柜母线的散热能力, 在电力开关柜 B 相母线表面加装直径为 2 mm 圆形脉动热管, 以脉动热管充液率、通风进口风速和母线负载电流作为变量, 采用中心复合设计法进行散热优化实验。基于实验结果, 通过多元线性回归建立母线表面平均温度与影响因素的函数关系, 并利用响应曲面法模拟分析各因素交互作用的影响规律, 优化脉动热管散热参数, 最后通过温升实验验证响应曲面法预测结果的准确性。结果表明: 通风进口风速、母线负载电流以及两者的交互作用对母线表面温度的影响显著; 最优工况为负载电流 853 A、通风进口风速 1.7 m/s、脉动热管充液率 50%, 此时母线表面平均温度最低, 脉动热管散热效果最佳; 温升实验数据均在响应曲面 95% 置信区间内, 验证了响应曲面法预测结果的可靠性。

关键词: 电力开关柜; 母线散热; 脉动热管; 温升优化; 响应曲面法; 复合实验设计; 热管理; 传热强化

中图分类号: TM 591 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24134



Optimization of Heat Dissipation Parameters for Pulsating Heat Pipes in Power Switchgear Using Response Surface Methodology

HU Qingyun, XU Haowen, CHEN Demin, LU Biao, CHEN Yan

(School of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: To improve the heat dissipation capability of power switchgear busbars, a 2 mm-diameter circular pulsating heat pipe was installed on the surface of phase B busbar, with the filling ratio of pulsating heat pipe, inlet ventilation velocity and busbar load current selected as experimental variables. The central composite design method was adopted to conduct heat dissipation optimization experiments. Based on experimental results, the functional relationship between average busbar surface temperature and influencing factors was established through multiple linear regression analysis. The response surface methodology was then applied to simulate and analyze the interaction effects of various factors, followed by optimization of pulsating heat pipe cooling parameters. Finally, the accuracy of response surface methodology predictions was verified by temperature rise experiments. The results indicate that inlet ventilation velocity, busbar load current and their interaction significantly affect the average busbar surface temperature. The optimal operating conditions are determined as 853 A load current, 1.7 m/s inlet ventilation velocity and 50% filling ratio of pulsating heat pipe, achieving the minimum average busbar surface temperature and

收稿日期: 2024-07-15

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目 (YJS20210352)

作者简介: 胡青云 (2000—), 男, 安徽宣城人, 硕士生, 主要研究方向为热工设备传热过程基础理论。

通信作者: 陆彪 (1979—), 男, 安徽合肥人, 博士, 副教授, 主要研究方向为电气系统传热及节能、建筑及其热工设备在线智能诊断与评价系统开发。

引文格式: 胡青云, 许浩文, 陈德敏, 等. 基于响应曲面法的电力开关柜脉动热管散热参数优化研究 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版), 2025, 42(4):383-391.

optimal heat dissipation performance. All temperature rise experimental data fall within the 95% confidence interval of response surface, confirming the reliability of response surface methodology predictions.

Keywords: electric switchgear; busbar heat dissipation; pulsating heat pipe; temperature rise optimization; response surface methodology; composite experimental design; thermal management; heat transfer enhancement

电力开关柜作为输配电的关键设备,主要由柜体结构、母线系统、断路器装置和负荷开关等部件组成^[1-3]。在设备运行过程中,母线因承载电流产生的焦耳热及涡流热^[4-6]会导致持续升温,这不仅加速材料的老化进程、缩短设备使用寿命,更可能导致设备故障甚至引发火灾等严重安全事故^[7-10]。当前行业普遍采用的散热方案包括自然对流冷却^[11-12]、强迫风冷系统^[13]及复合冷却模式^[14-16]。然而随着电力负荷的持续攀升,传统散热方式已难以有效解决设备局部过热问题。脉动热管(pulsating heat pipe; PHP)作为一种具有显著热管理效能的新型元件,已在热控制领域展现出卓越的应用价值^[17-19]。将PHP技术整合到电力开关柜散热系统中,为解决局部升温问题提供了新型解决方案。因此,优化PHP运行参数,对提高电力开关柜等电力设备的散热效率,增强设备系统运行可靠性并实现能耗的有效降低具有重要的现实意义。

当前脉动热管在散热领域的应用研究主要集中在航天器、汽车工程、数据中心及电子元器件等方向。在航天应用方面,金迪等^[20]采用高低温分区热管网络设计将脉动热管集成于高轨通信卫星热控系统,使卫星散热能力提升15%~20%。在汽车工程领域,韩丹丹等^[21]研究了脉动热管在车载蓄冷板中的应用特性,通过分析管道参数、工质流速及雷诺数等关键参数对充冷性能的影响规律,确定50 mm标准单层厚度下热管的最优结构参数及对应的平均冻结与完全冻结时间;黄小军等^[22]则聚焦于汽车散热,通过数值模拟揭示了换热器内气体流动与传热机理,获得了不同工况下振荡热管的平均对流换热系数特征。在数据中心散热方面,李新泽等^[23]通过对比实验证实,采用风冷/液冷式环路热管的服务器散热系统不仅热性能显著优于传统翅片系统,还能有效降低设备运行噪声,改善机房热环境;李月月^[24]针对电子散热难题,开发用于CPU散热器的开放式脉动热管装置,实验验证该设计能显著降低CPU工作温度,散热效率明显超越传统翅片式散热器。

当前脉动热管在电力开关柜中的应用研究仍较少,相关文献较为有限。刘国特等^[25]通过改进高压开关柜结构并集成脉动热管,有效提升了柜体散热

性能并解决了过热问题;曲捷^[26]的实验研究则揭示了热管蒸发段结构形式的关键作用,证实L型蒸发段设计可显著改善开关柜静触头的散热效果。值得注意的是,现有研究主要集中于静触头散热优化,且多聚焦于蒸发段结构的影响,而对母线表面采用脉动热管散热的研究明显不足。响应曲面法是一种结合数学与统计的方法,可用于优化实验设计或作业条件。鉴于此,将脉动热管应用于电力开关柜母线表面散热系统,并采用响应曲面法统计分析母线表面温度与脉动热管充液率、通风进口风速及母线负载电流等多因素的关系特性,通过建立数学模型模拟各因素交互作用对温升的影响规律,进而优化脉动热管关键运行参数,为提升电力开关柜整体散热性能提供新的技术途径和理论依据。

1 电力开关柜脉动热管散热系统仿真模型的构建

根据GB 7151.1—2013,GB 7251.6—2015搭建电力开关柜实验平台,结合脉动热管设计原则^[27]在电力开关柜母线表面加装脉动热管。脉动热管的材质为铜,选用HFE-7100(氟代醚化合物,分子式 $C_3H_3F_6O$)作为管内工质。设计的脉动热管电力开关柜及脉动热管物理模型分别如图1、2。

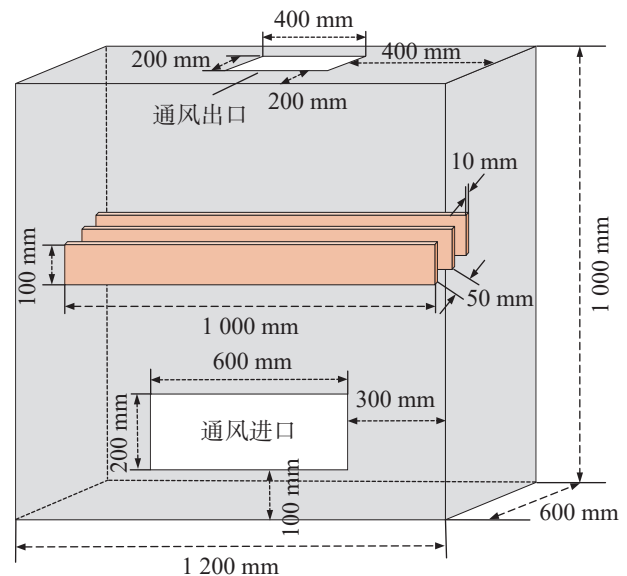


图1 电力开关柜的物理模型

Fig. 1 Physical model of electric switchgear

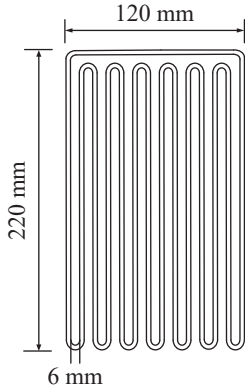


图2 脉动热管的物理模型

Fig. 2 Physical model of pulsating heat pipes

基于传热学理论, 设定电力开关柜和脉动热管的控制方程和边界条件。采用多面体网格划分的方法对模型进行网格划分, 建立加装脉动热管电力开关柜的传热仿真模型。

1.1 基本假设

电力开关柜内部流体流动状态与脉动热管内工质流动存在显著差异, 文中采用分步模拟方法: 首先建立开关柜整体温度场模型, 获取母线表面温度分布数据; 随后将该温度分布作为边界条件加载至脉动热管仿真模型。为合理简化计算过程, 进行如下假设:

1) 将计算域内的空气介质简化为理想气体模型, 除密度外, 空气的其余物性参数均设为恒定值。基于理想气体状态方程, 空气密度采用下式计算:

$$\rho = \frac{p}{R_0 T} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; p 为空气压力; R_0 为空气的气体常数, 取 287.058 J/(kg·K); T 为温度。

2) 在建模过程中, 将电力开关柜外壳及母线材料的物理参数设定为温度无关的恒定值。

3) 将脉动热管内的液体视为不可压缩流体、气体视为饱和蒸汽状态的理想气体, 同时气液两相的定压比热容均不随温度变化。

1.2 控制方程

1.2.1 电力开关柜

在稳态传热条件下, 基于热力学第一定律及傅里叶导热定律建立的母线导热微分方程^[28]:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + q_v = 0 \quad (2)$$

根据式 (2) 建立的大电流开关柜温度-速度场耦合模型, 其求解关键在于确定体积热源 (q_v) 的分布特性。而热源计算需首先求解交流工况下铜母线的等效电阻 (R), 其表达式^[29] 如下:

$$R = \frac{\zeta_0 L}{A} K_1 K_2 [1 + 0.004(T_1 - 20)] \quad (3)$$

其中铜母线单位体积热生成率的表达式^[9] 如下:

$$\begin{cases} P = I^2 R \\ q_v = \frac{P}{V} = \frac{I^2 \zeta_0 K_1 K_2 [1 + 0.004(T_1 - 20)]}{A^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P 为单相母线功率; I 为单相母线负载电流; V 为单相母线体积。

针对大电流开关柜内对流传热过程的数值模拟, 需耦合求解不可压缩流体的连续性方程、动量方程和能量方程^[9]。本研究中电力开关柜内部典型风速为 0.13 m/s, 流动雷诺数分析表明柜内空气处于湍流状态。考虑到电力开关柜具有复杂几何结构及低雷诺数流动特性, 选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型^[30], 其控制方程可表示为:

$$k \text{ 方程: } \rho(u \cdot \nabla k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_1}{\psi_k} \right) \cdot \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\varepsilon \text{ 方程: } \rho(u \cdot \nabla \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_1}{\psi_\varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right] + \frac{C_1 \varepsilon}{k} P_k + C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: k 为湍动能; ε 湍动能耗散率; u 为柜内空气的速度; μ_0 为柜内空气的黏性系数; μ_1 为柜内空气的湍流黏性系数; ψ_k, ψ_ε 分别为 k, ε 方程的湍流普朗特数, 分别取值 1.0, 1.3; C_1, C_2 为常数, 分别取值 1.44, 1.92; P_k 为单位湍流动能耗散的净产出。为准确模拟电力开关柜内的辐射传热过程, 文中采用基于 Hemicube 算法的辐射计算模型^[31]。

1.2.2 脉动热管

针对脉动热管内气液两相流的运动特性, 本研究选用流体体积 (volume of fluid, VOF) 多相流模型及 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型^[32-33]。在脉动热管内部气液两相流动的数值模拟中, 描述质量守恒的连续性方程可表示为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_l}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\alpha_l \mathbf{v}) = \frac{S_{m,l}}{\rho_l} \\ \frac{\partial \varphi_v}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\alpha_v \mathbf{v}) = \frac{S_{m,v}}{\rho_v} \end{cases} \quad (7)$$

式中: φ_l 为液体体积分数; φ_v 为气体体积分数; τ 为时间; \mathbf{v} 为速度; $S_{m,l}$ 为液体质量源项, $S_{m,v}$ 为气体质量源项; ρ_l 为液体密度; ρ_v 为气体密度。

管内两相流运动过程中, 动量方程可表示为^[34]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \mathbf{v}) + \nabla (\rho \mathbf{v}) = -\nabla F_1 + \nabla [\mu_2 (\nabla \mathbf{v})] + \rho \mathbf{g} + F_2 \quad (8)$$

式中: ρ 为气液两相混合后的平均密度; μ_2 为脉动热管内的黏性系数; F_1 为压力; \mathbf{g} 为重力加速度; F_2 为表面体积力。管内两相流运动过程中, 其能量方程

可表示为^[32]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho H) + \nabla[\nu F_1] = \nabla(\lambda_{\text{eff}} \nabla T_{\text{sat}}) + S_h \quad (9)$$

其中内能 H 的表达式为:

$$H = \frac{\alpha_l \rho_l C_{p,l}(T_{\text{sat}} - T_{\text{mix}}) + \alpha_v \rho_v C_{p,v}(T_{\text{sat}} - T_{\text{mix}})}{\rho} \quad (10)$$

汽化潜热质量源项 $S_{m,h}$ 的表达式为:

$$S_{m,h} = h_v S_{m,v} \quad (11)$$

式中: λ_{eff} 为有效导热系数; $C_{p,l}$ 为液体的定压比热容; $C_{p,v}$ 为气体的定压比热容; T_{sat} 为液体饱和温度; T_{mix} 为计算单元的混合温度; h_v 为汽化潜热。

1.3 边界条件

本研究采用混合边界条件设置方案: 电力开关柜外表面设为第三类边界条件, 给定对流换热系数及周围环境温度参数组合, 如表 1。设置脉动热管蒸发段为第二类边界条件, 绝热段边界条件为热流密度等于 0, 冷凝段为温度 298 K。

表 1 电力开关柜边界条件设置

Tab. 1 Setting of boundary condition for electric switchgear cabinets

边界	类型	边界条件
壳体	混合传热	对流传热系数 $7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 辐射发射率 0.3
通风进口	速度进口	进口速度为 0.13 m/s , 温度 298 K
通风出口	压力出口	出口压力 101325 Pa , 温度 298 K
周围环境	混合传热	环境温度 298 K

1.4 网格划分

1.4.1 电力开关柜

采用多面体网格对物理模型进行离散化处理, 通过网格敏感性分析优化计算精度与效率。如图 3 所示, 对 A、B、C 三相母线表面平均温度开展网格独立性验证。

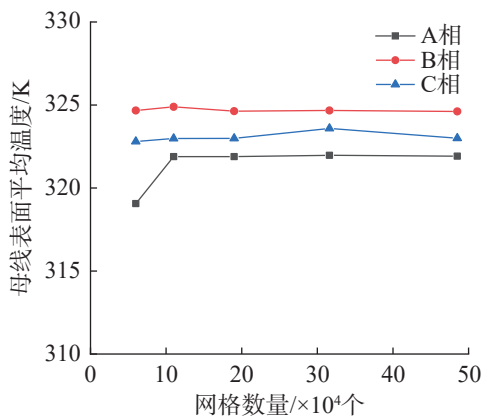


图3 三相母线表面平均温度随网格数量变化曲线

Fig. 3 Curve of average surface temperature of three-phase busbars varying with mesh count

从图 3 可看出: 当网格数增至 15 万个后, 三相母线表面平均温度趋于稳定。为节省计算资源, 选择电力开关柜模型网格数为 192 277 个, 其网格划分结果如图 4。

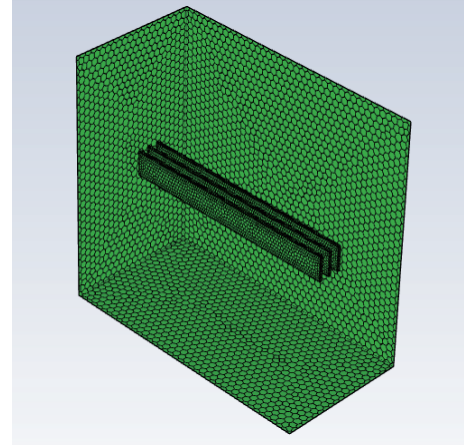


图4 电力开关柜的网格划分

Fig. 4 Meshing of electric switchgear

1.4.2 脉动热管

针对脉动热管弯曲处结构不规则且整体尺寸较小的特点, 在数值模拟中对管道弯曲处进行局部网格加密处理。图 5 为直径 2 mm 圆形脉动热管在不同网格数量 (N) 条件下工质分布状态的模拟结果。

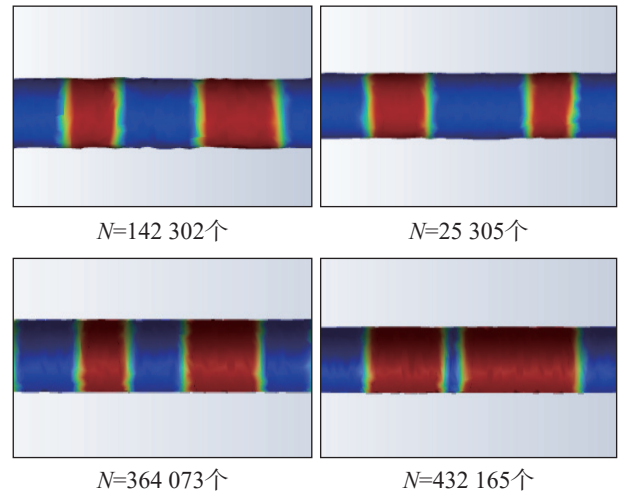


图5 不同网格密度下圆形脉动热管工质分布

Fig. 5 Working fluid distribution of circular pulsating heat pipes at different mesh densities

由图 5 可看出: 随网格数量的增加, 管内汽液两相界面逐渐清晰, 但当网格增至 364 073 个后, 界面分辨率的改善趋于平缓。基于计算精度与效率的综合考量, 最终采用 364 073 个网格单元进行数值求解。图 6 为脉动热管的网格剖分结果, 其中左侧为面网格, 右侧为体网格。网格质量评估显示: 最大偏斜度为 0.25(最优值为 0), 最小正交质量为 0.2(最优值为 1), 表明网格质量满足计算要求。

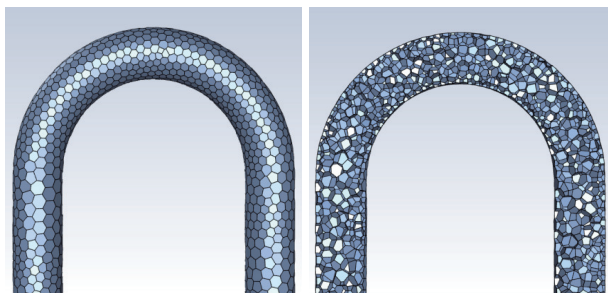


图6 圆形脉动热管的网格划分

Fig. 6 Meshing of circular pulsating heat pipes

1.5 模型验证

为验证加装脉动热管电力开关柜仿真模型的准确性,采用图1所示的HFE-7100脉动热管进行温升实验,对比分析实验与仿真模型计算结果。实验装置为东来公司生产的规格型号SDDL-1000A的三相大电流发生器,采用PLC与威纶工控屏幕控制系统调节三相的电流输出;内置铂电阻热电偶传感

器和数据采集装置,实时监测电力开关柜测量点的温升变化并记录于数据采集单元。其中:铂电阻温度传感器测量精度为 $(\pm 0.2\sim 0.5)$ ℃;脉动热管为圆形(直径2mm),内充工质为HFE-7100(充液率为40%,45%,50%,55%,60%);热线式风速仪(型号TES-1314)风速感应棒测速范围为0~30m/s、解析度为0.01m/s、准确度的读值误差为 $\pm 3\%$,满刻度误差为 $\pm 1\%$ 。

在电力开关柜每根母线表面布置5个热电偶,电力开关柜外壳表面布置2个热电偶、进口处布置1个热线式风速仪,并通过大电流发生器设定三相母线的电流。固定电流发生器产生电流后,分别测量相同条件下B相母线加装和未加装脉动热管的三相母线表面温度。表2为环境温度为298K、负载电流为1000A时三相母线及B相母线加装热管前后的实测温度和仿真计算结果。

表2 环境温度298K、负载1000A工况下实验与仿真计算结果

Tab. 2 Experimental and simulation calculation results under conditions of ambient temperature 298 K and load of 1 000 A

类别	实验温度/K			仿真温度/K		
	A相	B相	C相	A相	B相	C相
B相母线未加装PHP	322.30	324.75	322.56	321.10	324.53	321.40
B相母线加装PHP	322.30	322.70	322.56	321.10	321.56	321.40

实测温度与仿真结果误差的计算公式如下:

$$\zeta = \frac{|T_s - T_{fl}|}{T_s - 273.15} \times 100\% \quad (12)$$

基于表2中的数据由式(12)计算结果表明:在298K环境温度、1000A负载工况下,A相、C相母线表面温度仿真与实验误差分别为2.44%,2.35%;加装脉动热管后B相母线表面温度仿真与实验误差分别从0.43%增至2.30%,均在可接受范围内,验证了仿真模型的可靠性与设计方案的有效性。

2 脉动热管散热参数的优化

影响电力开关柜母线表面温度与热管散热能力的因素较多,其中受通风进口风速^[13]、母线负载电流^[14]、脉动热管充液率^[33]的影响较大。在实验组数量有限、数据量相对匮乏的情境下,响应曲面法中的中心复合设计方法能够精准判别实验模型的线性或非线性特征,可对影响因素之间的交互作用项进行有效估计。因此,以图1、2所示的电力开关柜和圆形脉动热管为例,选取脉动热

管充液率(Y_1)、通风进口风速(Y_2)、母线负载电流(Y_3)为影响因素,采用中心复合设计方法对脉动热管散热进行优化实验,实验因素及水平如表3。根据实验结果建立B相母线表面平均温度与影响因素之间的函数关系,模拟分析各因素及因素交互作用下B相母线表面温度的变化规律,优化脉动热管散热参数。

表3 实验因素及水平

Tab. 3 Test factors codes and levels

水平	$Y_1/\%$	$Y_2/(\text{m/s})$	Y_3/A
-2	40	0.1	800
-1	45	0.5	900
0	50	0.9	1000
+1	55	1.3	1100
+2	60	1.7	1200

2.1 响应曲面优化结果的方差分析

将内径2mm的圆形脉动热管安装于电力开关柜B相母线表面,不同实验组对应工况下B相母线表面平均温度分布如表4。

表 4 不同实验组下 B 相母线表面的平均温度

Tab. 4 Average surface temperature of B-phase busbar under different experimental groups

编号	水平			温度/K
	$Y_1/\%$	$Y_2/(m/s)$	Y_3/A	
1 [#]	-2	-2	+2	337.88
2 [#]	+2	+2	-2	306.50
3 [#]	0	0	-1	311.28
4 [#]	-2	-2	-2	315.80
5 [#]	-1	0	0	313.97
6 [#]	0	0	0	313.03
7 [#]	0	-1	0	315.67
8 [#]	+2	-2	-2	315.25
9 [#]	+1	0	0	314.40
10 [#]	-2	+2	-2	306.75
11 [#]	+2	-2	+2	336.22
12 [#]	-2	+2	+2	317.65
13 [#]	0	+1	0	311.26
14 [#]	+2	+2	+2	316.89
15 [#]	0	0	+1	317.57

通过对表 4 中的数据进行多元回归分析, 建立安装脉动热管电力开关柜 B 相母线表面平均温度 (T_B) 与充液率 (Y_1)、通风进口风速 (Y_2)、母线负载电流 (Y_3) 的二次多元回归方程:

$$T_B = 418.04 - 2.5449Y_1 - 8.1075Y_2 - 0.1176Y_3 + 0.01875Y_1Y_2 - 0.000101Y_1Y_3 - 0.017Y_2Y_3 + 0.02591Y_1^2 - 0.4470Y_2^2 + 0.000089Y_3^2 \quad (13)$$

对表 4 中的数据进行方差分析, 结果如表 5。由表 5 可看出: 通风进口风速 (Y_2)、母线负载电流 (Y_3) 及其交互项 (Y_2Y_3) 对 B 相母线表面温度的影响极显著 (P 值小于 0.000 1), 而脉动热管充液率 (Y_1) 对 B 相母线表面平均温度的影响较小。说明在电力开关柜温升控制中, 强制通风条件和电流负载是关键影响因素, 而工质充液率的调节作用有限。

表 5 方差分析

Tab. 5 Variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
模型	1 167.15	9	129.68	210.03	<0.000 1
Y_1	1.06	1	1.06	1.72	0.218 9
Y_2	417.41	1	417.41	676.02	<0.000 1
Y_3	535.79	1	535.79	867.75	<0.000 1
Y_1Y_2	0.18	1	0.18	0.29	0.601 1
Y_1Y_3	0.33	1	0.33	0.53	0.482 8
Y_2Y_3	59.19	1	59.91	95.86	<0.000 1
Y_1^2	1.26	1	1.26	2.03	0.184 3
Y_2^2	0.02	1	0.02	0.02	0.878 2
Y_3^2	2.36	1	2.36	3.82	0.079 2
残差	6.17	10	6.18		
总和	1 173.32	19			

2.2 响应曲面优化结果的模拟分析

采用响应曲面法分析 2 mm 管径、50% 充液率的圆形脉动热管对 B 相母线温升的影响。图 7 为母线负载电流与通风进口风速交互作用对母线表面温度影响的模拟结果。

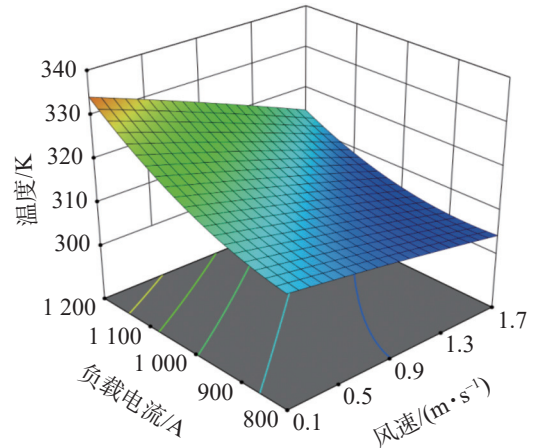


图 7 负载电流、通风进口风速与母线表面温度的响应曲面
Fig. 7 Response surface plot of load current, ventilation inlet air velocity versus busbar surface temperature

从图 7 可看出: B 相母线最低温度出现在 853 A 电流和 1.7 m/s 风速工况, 表明温控最优参数组合存在。此时通风进口风速最大但负载电流不是仿真设计电流的最小值, 说明 B 相母线表面温度还受其他因素的影响。为此, 固定母线负载电流为 853 A, 模拟分析通风进口风速和充液率交互作用对母线表面温度的影响, 结果如图 8; 固定通风进口风速为 1.7 m/s, 模拟分析母线负载电流与脉动热管充液率交互作用对母线表面温度的影响, 结果如图 9。

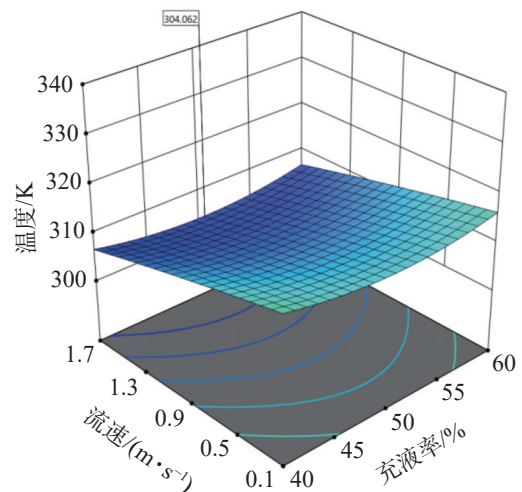


图 8 通风进口风速、充液率与母线表面温度的响应曲面
Fig. 8 Response surface plot of ventilation inlet air velocity, filling rate versus busbar surface temperature

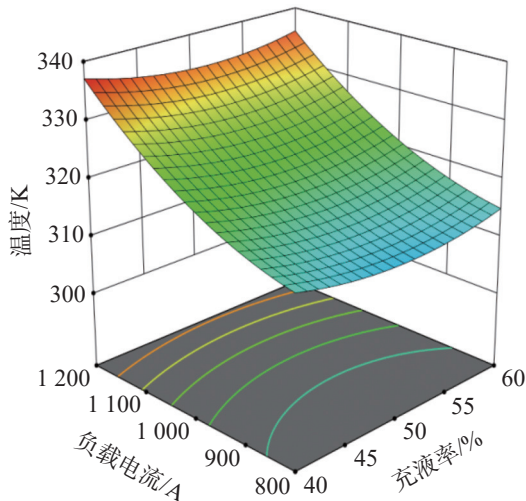


图9 负载电流、充液率与母线表面温度的等高线和响应曲面
Fig. 9 Contour line and response surface plot of load current and liquid filling rate versus busbar surface temperature

由图 8 可看出: 相同充液率下, 母线表面温度随通风进口风速的增大而逐渐减小, 风速为 1.7 m/s 时母线温度最低; 相同风速下随充液率的增加, 母线表面温度呈先降后升的趋势, 且充液率为 50% 左右时母线表面温度最低。

由图 9 可看出: 相同充液率下, 母线表面温度随负载电流的增大呈先降后增的趋势, 负载电流为 853 A 时母线表面温度最低; 相同负载电流下, B 相母线表面温度随充液率的增加呈先降后升的趋势。不同负载电流情况下, 加装脉动热管前后对应的最佳充液率如表 6。由表 6 可看出: 不同母线负载电流情况下, B 相母线表面平均温度最低时的充液率约 50%。

表 6 不同负载电流情况下加装脉动热管前后对应的最佳充液率

Tab. 6 Optimal filling ratios before and after installing pulsating heat pipes under different load currents

母线负载 电流/A	通风进口 风速/(m/s)	最佳 充液率/%	B相母线表面 平均温度/K		温差/K
			加装前	加装后	
800	1.7	50.1	316.54	305.31	11.23
900	1.7	50.2	321.43	306.26	15.17
1 000	1.7	50.4	324.75	307.98	16.77
1 100	1.7	50.6	332.92	313.47	19.45
1 200	1.7	50.8	339.53	315.74	23.79

综上可发现: 脉动热管充液率 50%、通风进口风速 1.7 m/s、负载电流 853 A 时, B 相母线表面温度最低; 母线表面温度在负载电流、通风进口风速

及其交互作用下变化剧烈, 在脉动热管充液率的影响下变化幅度较小。再次验证了电力开关柜通风进口风速、母线负载电流以及通风进口风速和母线负载电流的交互作用对 B 相母线表面温度影响显著; 而脉动热管充液率对其影响较小。

2.3 响应曲面优化结果的验证

为验证响应曲面法预测的最优工况 (脉动热管充液率 50%、通风进口风速 1.7 m/s、负载电流 853 A), 采用图 1 实验装置进行温升测试。若 3 次温升实验结果的平均值落在响应曲面预测值的 95% 置信区间内, 则证明响应曲面法预测结果准确。表 7 为温升实验与响应曲面法的预测结果。

表 7 温升实验与响应曲面法的预测结果

Tab. 7 Comparison between temperature rise experimental results and response surface methodology predictions

预测值/K	实验值/K	95%置信区间值/K
	306.62	
304.06	306.77	[300.29,307.83]
	307.27	

由表 7 可看出: 充液率为 50%、通风进口风速为 1.7 m/s、负载电流 853 A 时, 响应曲面法的预测值为 304.06 K, 实验平均值为 306.89 K, 两者温差仅 2.83 K; 同时 3 次温升实验结果的平均值均在响应曲面 95% 置信区间内, 有效验证了响应曲面优化结果的准确性。

3 结论

为提升电力开关柜母线散热性能, 建立 2 mm 管径脉动热管 (加装于电力开关柜 B 相母线表面) 仿真模型, 采用响应曲面法对脉动热管的散热参数进行优化, 得到如下主要结论:

1) 电力开关柜通风进口风速、母线负载电流以及两者交互作用对 B 相母线表面温度的影响较为显著 (方差分析 P 值均小于 0.001)。

2) 脉动热管充液率对 B 相母线表面温度的影响较小, 脉动热管的充液率为 50% 时, 在 853 A 负载电流、1.7 m/s 通风进口风速条件下, 加装脉动热管电力开关柜母线表面平均温度最低。

3) 响应曲面法预测的最优工况下温升实验的平均值与响应曲面法的预测值仅相差 2.83 K, 且 3 次温升实验结果均位于响应曲面 95% 置信区间内, 有效验证了响应曲面优化结果的准确性。

参考文献:

- [1] BAI J J, LI Y M, ZHAO Y C, et al. Experimental study of an integrated aluminum flat plate heat pipe for lightweight thermal management in electronic devices[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 257:124332.
- [2] BEDKOWSKI M, SMOLKA J, BANASIAK K, et al. Coupled numerical modelling of power loss generation in busbar system of low-voltage switchgear[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 82:122–129.
- [3] FRANK A, HEIDEMANN W, SPINDLER K. Electronic component cooling inside switch cabinets: combined radiation and natural convection heat transfer[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2019, 55(3):699–709.
- [4] MAHMOUD K A A, BADR M M, ELMALHY N A, et al. Transfer learning by fine-tuning pre-trained convolutional neural network architectures for switchgear fault detection using thermal imaging[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 103:327–342.
- [5] PLESCA A. Thermal analysis of busbars from a high current power supply system[J]. *Energies*, 2019, 12(12): 2288.
- [6] RITTIDECH S, TERDTON P, MURAKAMI M, et al. Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe at normal operating condition[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(4):497–510.
- [7] RYFA A, BULINSKI Z, SMOLKA J, et al. Determination of busbar system heat losses in naturally ventilated and hermetic switchgear[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(7):1652–1660.
- [8] SIDDIQA S, HOSSAIN M A, SAHA S C. The effect of thermal radiation on the natural convection boundary layer flow over a wavy horizontal surface[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 84:143–150.
- [9] SON M, KANG H, LEE S, et al. The study of temperature rise in low voltage switchgear about cooling system[C]// 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment–Switching Technology. Xi'an, China: IEEE, 2017: 218–220.
- [10] WANG B, JIA X Y, YANG J, et al. Numerical study on temperature rise and structure optimization for a three-phase gas insulated switchgear busbar chamber[J]. *Energy*, 2022, 254:124463.
- [11] WANG L J, ZHENG W S, WANG L H, et al. Electromagnetic-thermal-flow field coupling simulation of 12 kV medium-voltage switchgear[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2016, 6(8):1208–1220.
- [12] WANG L J, LI X L, LIN J, et al. Studies of modeling and simulation method of temperature rise in medium-voltage switchgear and its optimum design[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018, 8(3):439–446.
- [13] WANG X R, CAI S X, PENG Z W, et al. Research on temperature rise of high current switchgear in distribution system[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(16): 2931–2934.
- [14] XIA H T, GUAN Y G, YU Z Q, et al. Temperature rise test and analysis of high current switchgear in distribution system[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(16): 754–757.
- [15] 曹萍. 配电柜的温度场仿真及优化设计[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- CAO P. Simulation and Optimization Design of Temperature Field for Distribution Cabinets[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [16] 陈德敏, 王昭, 汤凯, 等. 电力开关柜散热因素分析及重要性排序[J]. *电工电能新技术*, 2022, 41(3):72–80.
- CHEN D M, WANG Z, TANG K, et al. Power switchgear heat dissipation factor analysis and importance ranking[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(3):72–80.
- [17] 陈德敏, 许浩文, 王昭, 等. 涂层传热性能对母线散热能力影响分析[J]. *电工电能新技术*, 2024, 43(2):12–19.
- CHEN D M, XU H W, WANG Z, et al. Analysis of influence of heat transfer performance of coating on busbar heat dissipation capacity[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2024, 43(2):12–19.
- [18] 陈荆洲, 杜志叶, 王栋, 等. 高压开关柜温度场数值分析[J]. *电工电能新技术*, 2018, 37(1):38–44.
- CHEN J Z, DU Z Y, WANG D, et al. Numerical analysis of temperature field of high voltage switchgear[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2018, 37(1):38–44.
- [19] 高可君, 方晓蓉, 刘文意, 等. 基于热管技术的数据中心通信机柜散热[J]. *中国科技信息*, 2023(23):43–47.
- GAO K J, FANG X R, LIU W Y, et al. Heat dissipation of communication cabinet in data center based on heat pipe technology[J]. *China Science and Technology Information*, 2023(23):43–47.
- [20] 金迪, 韩崇巍, 任振岳, 等. 基于高低温分区热管网络的高轨通信卫星散热能力提升方法[J]. *航天器环境工程*, 2024, 41(1):49–54.
- JIN D, HAN C W, REN Z Y, et al. A method for improving the heat dissipation capacity of GEO communication satellites based on high-low temperature partition of heat-pipe network[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2024, 41(1):49–54.
- [21] 韩丹丹, 王强, 王达, 等. 基于正交试验的热管换热蓄冷

- 板充冷性能研究[J/OL]. 制冷学报,(2024-03-18). <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20240229.1341.004>.
- HAN D D, WANG Q, WANG D, et al. Study on charging performance of heat pipe heat exchange cold storage plate based on orthogonal experiments[J/OL]. Journal of Refrigeration,(2024-03-18). <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20240229.1341.004>.
- [22] 黄小军,裴军,王继龙,等. 3 150 A 中置柜 1.1 倍自然风冷结构研发及温升验证[J]. 电工电气, 2022(2):52-56.
- HUANG X J, PEI J, WANG J L, et al. 3 150 A center cabinet 1.1 times natural air cooling structure research and development and temperature rise verification[J]. *Electrotechnics Electric*, 2022(2):52-56.
- [23] 李新泽,张双星,杨洪海,等. 基于电池冷却用新型脉动热管性能的实验研究[J]. 化工学报, 2024, 75(6):2222-2232.
- LI X Z, ZHANG S X, YANG H H, et al. Experimental study on performance of new type of pulsating heat pipe for battery cooling[J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(6):2222-2232.
- [24] 李月月. 脉动热管启动和稳定运行的数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- LI Y Y. Numerical Simulation Study on the Startup and Stable Operation of Pulsating Heat Pipes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [25] 刘国特,宋新明,江栩铄,等. 高压开关柜复合毛细管增容热管蒸发器性能与结构优化[J]. 高电压技术, 2019, 45(2):518-524.
- LIU G T, SONG X M, JIANG X S, et al. Structure optimization and performance of composite capillary heat exchanger for high voltage switchgear[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(2):518-524.
- [26] 曲捷. 三维脉动热管传热与流动特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- QU J. Research on Heat Transfer and Flow Characteristics of Three-dimensional Pulsating Heat Pipes [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [27] 汪倩,屈建宇,吴刚,等. 配电开关柜温升特性的多物理场仿真和实验[J]. 高电压技术, 2016, 42(6):1775-1780.
- WANG Q, QU J Y, WU G, et al. Multi-physical field simulation and experiment of temperature-rise characteristics of switchgear compartment[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(6):1775-1780.
- [28] 王海明. 用于汽车散热的振荡流热管换热器的研发[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- WANG H M. Development of an Oscillating Flow Heat Pipe Heat Exchanger for Automotive Cooling [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [29] 薛继鹏,唐景春. 大电流开关柜热管散热实验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(11):1474-1477, 1501.
- XUE J P, TANG J C. Experimental study of thermal dissipation of large current switchgear with heat pipe[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2017, 40(11):1474-1477,1501.
- [30] 薛志虎,艾邦成,曲伟. 基于LHP的数据中心服务器芯片级散热技术[J/OL]. 华中科技大学学报(自然科学版), (2024-03-18). <https://link.cnki.net/doi/10.13245/j.hust.240339>.
- XUE Z H, AI B C, QU W. Chip-level cooling technology for data center servers based on LHP [J/OL]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, (2024-03-18). <https://link.cnki.net/doi/10.13245/j.hust.240339>.
- [31] 姚远. 高压开关柜过热问题及其解决方法研究与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- YAO Y. Research and Application on Overheating Problems and Solutions of High-voltage Switchgear Cabinets[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [32] 张操,彭志敏,魏逸飞,等. 电力开关设备关键位置温升特性仿真与实验分析[J]. 电子技术, 2023, 52(4):64-66.
- ZHANG C, PENG Z M, WEI Y F, et al. Analysis on simulation and experiment of temperature characteristics at key positions of power switchgear[J]. *Electronic Technology*, 2023, 52(4):64-66.
- [33] 张东,侯宏艺,李庆亮,等. 非均匀热流密度条件下脉动热管运行特性分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(7):126-135.
- ZHANG D, HOU H Y, LI Q L, et al. Analysis of operation characteristics of pulsating heat pipe under the condition of non-uniform heat flux[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(7):126-135.
- [34] 张东伟,蒋二辉,周俊杰,等. 脉动热管强化传热技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(21):1-7.
- ZHANG D W, JIANG E H, ZHOU J J, et al. Research progress on enhanced pulsating heat pipe heat transfer technology[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(21):1-7.