

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.004

等效热路模型在高电压真空断路器额定通流温升仿真中的应用

许学勤¹, 徐肖庆², 王帅兵³, 田新强¹, 张彦鹏¹, 丁健刚³

(1. 云南电网有限责任公司, 昆明 650051; 2. 云南电网有限责任公司昆明供电局, 昆明 650051; 3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

摘要: 额定通流温升作为评估真空断路器工作状态的一项重要参数, 目前主要依赖于电磁耦合仿真。然而, 这种方法针对不同结构、尺寸的触头模型需要耗费大量时间建模。文中提出了一种基于热路方法的真空灭弧室额定通流温升估算模型, 与传统的电磁耦合仿真模型相比, 热路模型能快速反映高压真空断路器的温升, 有助于高压真空断路器的通流结构设计。针对真空灭弧室的通流结构, 构建了由热流和热阻构成的热路模型。建立了2/3匝线圈触头的热路模型, 并基于触头结构的物理参数, 将热路中的元件参数化, 仿真获得了真空灭弧室触头的关键节点的温升值。通过与真空灭弧室的电磁耦合仿真结果对比, 验证了热路模型的准确性和效率。

关键词: 热路模型; 温升; 热阻; 真空灭弧室; 触头

Application of Equivalent Thermal Circuit Model in Rated Current Temperature Rise Simulation of High Voltage Vacuum Circuit Breaker

XU Xueqin¹, XU Xiaoping², WANG Shuaibing³, TIAN Xinqiang¹, ZHANG Yanpeng¹,
DING Jianguang³

(1. Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650051, China; 2. Kunming Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650051, China; 3. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Temperature rise of rated current, as an important parameter for assessing the status of vacuum circuit breaker, currently relies primarily on electromagnetic coupling simulation. However, this method requires considerable time for modeling contact models with different structures and dimensions. In this paper a temperature rise estimation model for the rated current of vacuum interrupter based on a thermal circuit method is proposed. The thermal circuit model, compared with the traditional electromagnetic coupling simulation model, can quickly reflect the temperature rise of high-voltage vacuum circuit breaker, which is conducive to the design of current-carrying structures for high-voltage vacuum circuit breaker. A thermal circuit model consisting of heat flow and thermal resistance is constructed for the current-carrying structure of the vacuum interrupter. The thermal circuit models for 2/3 turn coil contacts are set up, and the components in the thermal circuit are parameterized based on the physical parameters of the contact structure. The temperature rise values of the key nodes of the vacuum interrupter contact are obtained by simulation. Both accuracy and efficiency of the thermal circuit model are verified by comparison with the electromagnetic coupling simulation results of the vacuum interrupter.

Key words: thermal circuit model; temperature rise; thermal resistance; vacuum interrupter; contacts

收稿日期:2025-09-16; 修回日期:2025-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U24B2098);南方电网公司科技项目(YNKJXM20222384)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(U24B2098), Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(YNKJXM20222384).

0 引言

真空断路器作为一种高效清洁的电气开关设备,其主要功能是承载、接通和开断电流,保护电路并实现故障隔离,在电力系统中起着至关重要的作用。在“双碳”目标背景下,真空断路器逐渐向着高电压、大容量、智能化的方向发展。随着容量和电压等级的提升,额定通流温升成为制约高电压真空断路器进一步发展的关键因素^[1]。额定通流温升将影响真空断路器的机械运动特性,也会影响其操动稳定性和使用寿命,而且局部区域的过高温升或持续发热将导致绝缘水平逐渐降低,引发设备故障和损坏^[2]。因此,监测和控制温升是确保断路器安全运行的首要条件之一。此外,通过对真空断路器额定通流温升的研究,还可以进一步优化真空断路器的通流结构设计,提高散热性能,从而提升其整体工作效率^[3-5]。

额定通流温升一直以来都是真空断路器设计中的重要参数之一。当前真空断路器的温升计算主要采用有限元法。该方法的优点是计算精度高,可以较为准确地获得真空断路器各个零部件的温升^[6-8]。但有限元法的建模和剖分过程复杂,计算时间长,而且不能实现结构的参数化调整。采用有限元法研究不同结构或尺寸的触头的温升特性时,需要重新建立相应的仿真模型,然后进行剖分、计算,需要耗费大量时间^[9-11]。因此,需要提出一种能够快速计算真空断路器额定通流温升的方法。热路模型能够将零部件的结构参数化,通过热路模型可以实现断路器通流结构关键位置通流温升的参数化设计,可以大幅降低计算的时间^[11-16]。热路仿真被广泛应用于变压器等电力装备通流过程的温升研究,在参考变压器、电机温升过程的研究方法之后,结合真空断路器自身结构特性,选择等效热路法作为真空断路器关键节点温升的计算方法^[17-23]。

文中提出了一种基于热路方法的真空灭弧室额定通流温升估算模型,用于实现真空断路器关键位置的额定通流温升的快速计算。该热路模型由热阻、热源等元件构成,各个元件的值由零件的物理参数计算而来。文中建立了126 kV真空断路器2/3匝线圈触头的等效热路模型,建立了热路模型中各元件的参数化公式,并计算了有效值为2 000 A交流电流条件下的关键节点的温升情况。通过将热路模型计算结果与有限元法的仿真结果进行比较,验证了热路模型的准确性和效率。

1 真空断路器热过程分析

1.1 真空断路器产热分析

真空断路器在额定通流条件下的能量损耗主要为3个方面,分别是电阻损耗、铁磁损耗和介质损耗。电流流过导体时由于导体存在电阻而造成的焦耳损耗;交变电流在绝缘体中产生的介质损耗;交变电流通过铁磁体时,由于涡流效应产生的铁磁损耗。其中,断路器中采用了无磁钢、无氧铜、铸铝等非磁性材料来减少铁磁损耗,因此铁磁损耗较电阻损耗可以忽略,而通过的电流频率较低,介质损耗也可以忽略,所以,电阻损耗是使断路器温度升高的主要原因。电阻损耗主要包含体电阻产热和接触电阻产热两个部分,同时还应考虑交流电流产生的集肤效应以及温度对电阻的影响。

1)导体。焦耳损耗是电流通过导体时所产生的能量损耗,损耗功率 P 为

$$P = K_j I^2 R \quad (1)$$

式(1)中: P 为损耗功率,W; I 为电流,A; R 为导体的体电阻, Ω ; K_j 为附加损耗系数,是同时考虑交变电流集肤效应和邻近效应对电阻影响的情况下的系数。导体的体电阻 R 为

$$R = \rho \frac{l}{A_0} \quad (2)$$

式(2)中: ρ 为导体材料的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; l 为导体长度,m; A_0 为导体横截面积, m^2 。

2)接触电阻。接触电阻分为两个部分,即收缩电阻和膜电阻。当电流流过接触面时,电流线发生剧烈收缩,由收缩现象产生的电阻成为收缩电阻。而接触面上由于覆盖氧化膜等产生的额外电阻称为膜电阻。经过简化并结合实验,接触电阻的经验公式为

$$R_j = \frac{K}{(0.102F)^m} \quad (3)$$

式(3)中: R_j 为接触电阻, $\mu\Omega$; K 为材料系数; F 为压力; m 为接触形式。对于点接触, $m=0.5$;对于线接触, $m=0.5\sim 1$;对于面接触, $m=1$ 。根据各个参数的经验值可以估算出接触电阻的经验值。

接触电阻的影响因素众多,包括接触压力、温度、材料、接触面的表面状况等。因此,难以从理论上精确计算出某一接触面的接触电阻。在实际研究中采用实验和理论相结合的方式,根据经验设置接触电阻幅值,使其接近实际情况。

3)温度反馈。由于体电阻及接触电阻的存在,其产生的焦耳热效应是断路器温升的主要原因。

而断路器中存在大量铜、铝等良好的导电材料,其电阻率随温度的升高而增大,这会导致产热进一步增加。以铜为例,其电阻随温度变化为

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4)$$

式(4)中: R 为温度为 T 时的电阻; R_0 为温度是 T_0 时的电阻; α 为铜的电阻率随温度变化的系数,通常情况下,对于铜,其值为 $0.0039 \Omega/K$,对于其他常见材料,铝是 $0.0043 \Omega/K$,铁是 $0.006 \Omega/K$ 。

额定电流下断路器温升达到稳态时,其触头温度可达 $200 \text{ }^\circ\text{C}$,按照室温为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,电阻值可达室温的 1.702 倍。可见,由温度升高造成的电阻增大对断路器的温升影响是不可忽略的,因而需要考虑温度变化对温升的影响,在热路模型中需增加温度反馈模块。

1.2 真空断路器散热分析

1)热传导。根据传热学相关理论,在稳态情况下,三维、有内热源、导热系数为常数的温度控制方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\phi}{\lambda} = 0 \quad (5)$$

根据傅里叶热传导定律,可以计算热阻:

$$Q_T = \frac{\Delta T}{R_T} \quad (6)$$

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta l}{A_B} \quad (7)$$

式(6)、(7)中: Q_T 为通过平板的热量, W ; ΔT 为导体两端温差, K ; R_T 为热阻, $K \cdot W^{-1}$; λ 为热导率, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,热导率随温度变化不大,可近似看为常数; Δl 为平板厚度, m ; A_B 为平板导热截面积, m^2 。

2)热对流。热对流是指流体和接触固体之间热量传递的过程。影响表面对流换热的因素有很多,如物体的形状、换热面的大小、流体的温度、流体的速度等。对流换热的基本公式为

$$Q_c = Ah\Delta T \quad (8)$$

式(8)中: Q_c 为对流传热热量, W ; A 为换热面积, m^2 ; h 为表面传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$,表面传热系数与发热体的形状、环境、布置方式等因素有关; ΔT 为传热温差, K ,即发热物体表面温度与环境温度的差值。

对流换热热阻的经验公式为

$$R_{cv} = 1/hA \quad (9)$$

式(9)中: A 为部件对流换热表面积; h 为对流换热系数。

3)热辐射。热辐射是由电磁波传播能量,物体单位面积的辐射功率为

$$P_r = \sigma \varepsilon_f (T_2^4 - T_1^4) \quad (10)$$

式(10)中: T_1 为接受辐射物体表面的温度, K ; T_2 为发热体表面的温度, K ; σ 为斯忒藩—玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε_f 为发射率,与发热体表面实际情况以及发热体颜色有关,如对于绝热纯黑体来说,他的辐射即吸热能力最强, $\varepsilon_f = 1$ 。

基于热阻定义,辐射热阻的计算公式为

$$R_{\text{rad}} = \frac{\Delta T}{Q} = \left(1 + \frac{r_1 \ln \frac{A_2}{A_1}}{r_2}\right) \frac{T_1 - T_2}{\sigma A_1 (\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon_2 T_2^4)} \quad (11)$$

式(11)中: A_1 、 A_2 分别为净发射端、接收端表面积; r_1 、 r_2 分别为线圈内径和外径; ε_1 、 ε_2 为材料的发射率; T_1 、 T_2 分别为发射端、净接收端的温度。

1.3 热路模型理论分析

真空断路器在额定电流工况下,由于电流的作用,其内部产生的热量一部分使导体本身温度升高,另一部分散失到周围介质中,最终达到热稳态平衡。在热平衡过程中,由导体和接触电阻产生的热量作为真空断路器内部的热源,经过热传导、热对流、热辐射等散热与产热最终达到平衡,在热路中等效为导热热阻、对流热阻和辐射热阻。其热路模型理论建立流程图见图1。

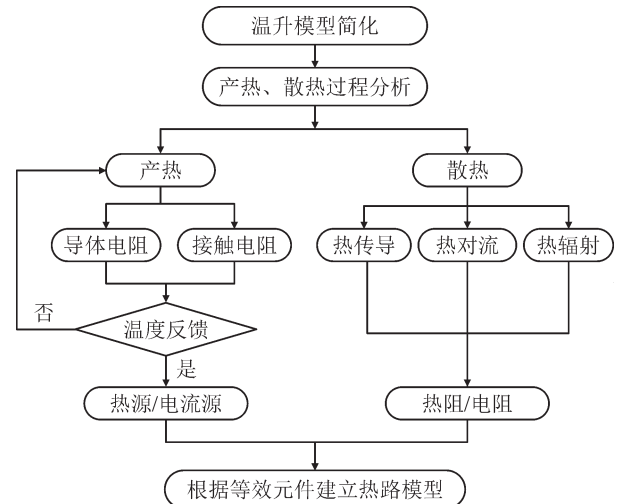


图1 热路模型理论建立示意图

Fig. 1 Theoretical establishment of thermal circuit model

2 真空灭弧室等效热路模型建立

2.1 热路模型建立方法

等效热路是将热传导、热对流和热辐射等传热过程等效为热阻和热源而建立起来的热路计算模型。热路元件的参数是基于物理参数、材料属性等确定的,设备关键部件或测点位置直接反映为网络节点。通过增加或删除节点,热网络可以适用于不同几何形状与其散热工况,具备良好的模块化扩展能力。热路模型具有计算简便、速度快、参数可调

节等特点,适合在工程中快速获取关键位置温度分布信息。该方法主要包括热路模型的建立和热路元件参数确定两个步骤。

根据电热类比,真空断路器触头内部的热过程全部可以采用电学类比,使用电路元件(电阻、电源、电容、电感)模拟热路元件,进而模拟热过程。在文中的热路模型中主要包含以下等效元件:

- 1) 电流源表示通流件的产热,单位为W。
- 2) 电压源表示温度,包含环境温度和热路的端点温度等,单位为K。
- 3) 电阻表示热阻,包含导热热阻、对流热阻和辐射热阻,限制热流,单位为K/W。

2.2 真空灭弧室线圈触头热路分析

真空灭弧室线圈触头的传热主要依赖线圈和触头部分的热传导,其从触头片向两侧线圈传递,再经由线圈传导至导电杆,最终在灭弧室外由空气对流散至环境中。真空灭弧室内是真空环境,不存在对流换热,同时辐射传热较少,主要考虑线圈外侧壁与灭弧室内壁的辐射换热。

2/3 匝线圈触头的物理模型示意图见图 2。2/3 匝线圈触头由动、静触头片,动、静线圈和动、静导电杆组成。2/3 匝线圈触头散热路径主要是由触头片分为 3 个并联支路传递至线圈,再由 3 个并联支路通过每节线圈传递至导电杆。产热主要是由 2/3 匝线圈触头各部分导体以及接触电阻的焦耳效应产生。由于线圈产热和散热并行,且路径较长,将线圈每个支路分为 3 部分通流结构。这种设计是必要的,因为无论是热源还是其他散热方式,都需要接入节点。如果只使用单个热阻,误差将较大,相当于将热源和其他散热方式的影响都归算到部件一端的温度上,这将导致较大的偏差。

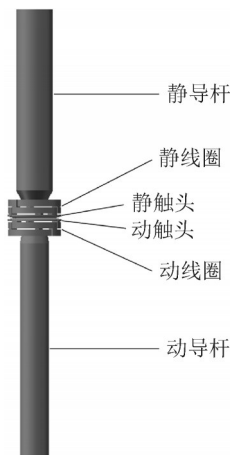


图 2 2/3 匝触头模型示意图
Fig. 2 2/3 turn contact model

基于 2/3 匝触头线圈结构不同部分的散热方式

存在差异,结合线圈和触头片的传热和散热路径,将线圈和触头片分为 3 个并联支路,其特征参数见图 3。图 3(a)展示了 2/3 匝线圈触头结构中的线圈的结构参数。其中 r_1 为线圈内径, r_2 为线圈外径, H 为单节线圈高度, 标号 1、2、3 分别为线圈的 3 条支路, 标号 A、B、C 为支路 1 的 3 个通流结构。图 3(b)展示了 2/3 匝线圈触头结构中触头片的结构参数。其中 d 为触头片厚度, L 为连接处弧长, r 为中心平面半径。

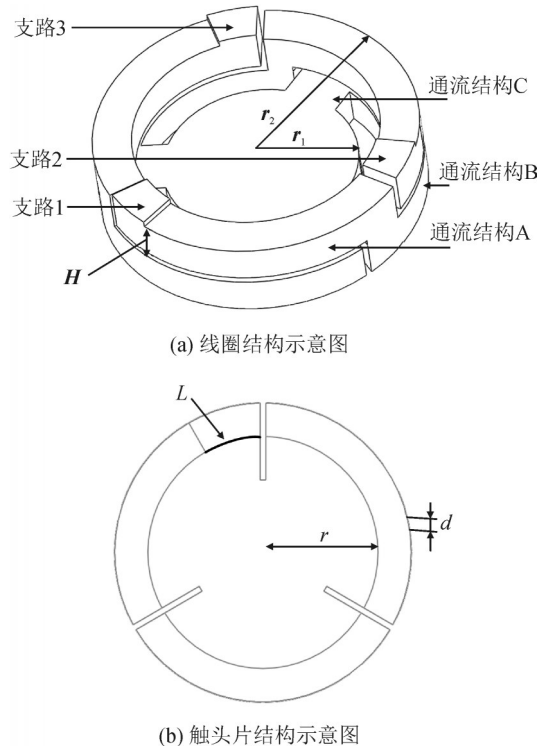


图 3 2/3 匝触头结构参数示意图

Fig. 3 2/3 turn contact structure and parameters

2.3 真空灭弧室线圈触头热路分析

1) 单一零部件热路模型。2/3 匝触头动线圈的热路模型示意图见图 4。动线圈 3 个支路的标号分别为 1、2、3, 每个支路 3 部分通流结构的标号为 A、B、C, 分别对应第 1 层线圈、第 2 层线圈和第 2 层线圈到轴心的部分。线圈热路元件与对应部位见表 1。表 1 中, DXQ_P_{x-y} (x 取 1、2、3, y 取 A、B、C) 为动线圈 x 支路 y 部分导电产热对应热流的电流源; DXQ_R_{x-y} (x 取 1、2、3, y 取 A、B、C) 为动线圈 x 支路 y 部分的导热热阻; 线圈处于真空灭弧室中, 还需考虑辐射热阻。线圈内部辐射传热较少, 主要考虑线圈外侧壁与灭弧室内壁的辐射换热, 辐射换热相较于传导散热的占比很小, 文中建立模型时忽略辐射散热的影响。文中 DXQ_DCT 表示动线圈和动触头片接触部分的温度; DXQ_DDG 表示动线圈和动导电杆接触部分的温度, 为动线圈热路模型的边界条件。

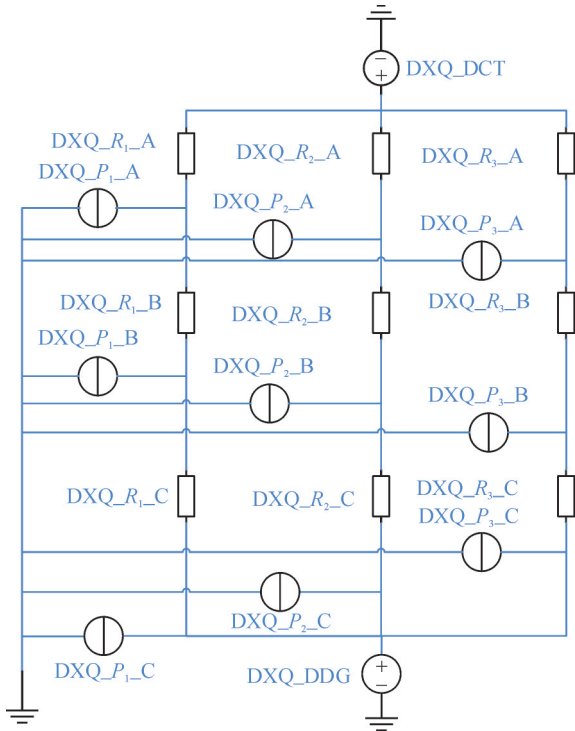


图4 2/3匝触头动线圈等效热路示意图

Fig. 4 Thermal circuit model of 2/3 turn moving coil

表1 线圈热路元件与对应部位

Table 1 Thermal circuit components and corresponding parts of the coil

元件	对应部位
DXQ_R _{1_A}	支路1通流结构A部分的热阻
DXQ_R _{1_B}	支路1通流结构B部分的热阻
DXQ_R _{1_C}	支路1通流结构C部分的热阻
DXQ_P _{1_A}	支路1通流结构A部分的热源
DXQ_P _{1_B}	支路1通流结构B部分的热源
DXQ_P _{1_C}	支路1通流结构C部分的热源
DXQ_DDG	动线圈和动导杆接触部分的温度
DXQ_DCT	动线圈和动触头片接触部分的温度

2/3匝触头动触头的热路模型示意图见图5。基于动触头的传热和散热路径,将动触头分为3个支路,编号分别为1、2、3。触头热路元件与对应部位见表2。DCT_P_z(z取1、2、3)为动触头z支路导电产热对应热流的电流源;DXQ_R_z(z取1、2、3)为动触头z支路的导热热阻;触头部分也存在辐射换热,但其辐射换热占比较小,可以忽略不计。DCT_JCT表示动触头和静触头片接触部分的温度;DCT_DXQ表示动触头和动线圈接触部分的温度,为动触头热路模型的边界条件。

2)2/3匝线圈触头热路模型。2/3匝线圈触头热路模型见图6。将单一部件等效热路相连接得到2/3匝线圈触头的等效热路模型。触头等效热路模型由动、静触头,动、静线圈等效热路以及接触热阻、接触电

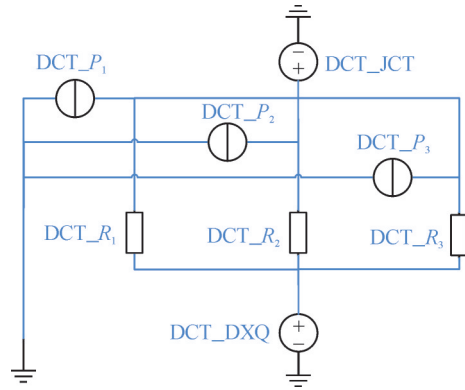


图5 2/3匝触头动触头等效热路示意图

Fig. 5 Thermal circuit model of 2/3 turn moving contact

表2 触头热路元件与对应部位

Table 2 Thermal circuit components and corresponding parts of the contact

元件	部位
DCT_R ₁	支路1通流结构的热源
DCT_P ₁	支路1通流结构的热源
DCT_DXQ	动触头和动线圈接触部分的温度
DCT_JCT	动触头和静触头接触部分的温度

阻产热构成。两端边界温度为动、静导电杆温度,热路模型中各热流、热阻元件的值由参数计算得到。通过热路模型可以快速计算真空灭弧室各关键节点的温升情况。

3 热路模型计算结果

3.1 2/3匝线圈触头热路模型元件参数计算结果

为完成热路模型的计算,需要确定热路中各元件的数值。文中采用参数化方法得到热路中各元件的数值。该方法不仅能大量减少建模时间和重复性工作,并且实现了结构类似的真空断路器触头温升的参数化调整。

该方法是基于等效热路中各元件对应真空断路器触头中各部分的物理结构和传热路径,结合传热学相关理论,将电路元件采用真空断路器触头的物理参数进行表达的过程。以线圈导热热阻DXQ_R_{1_A}为例,根据导热路径,该部分导热长度为1/3圆周,取线圈内外圆周长度平均值;导热截面积为线圈导体横截面积,即线圈单节的高度与内外半径差之积,则导热热阻DXQ_R_{1_A}应为

$$\frac{1}{3} \times \pi \times (r_2 + r_1) / [k \times H \times (r_2 - r_1)] \quad (12)$$

同理,可以确定等效热路模型中所有元件的参数化公式。再根据特定真空断路器的具体参数,即可得到热路中各元件的数值,热路即可进行求解计算。

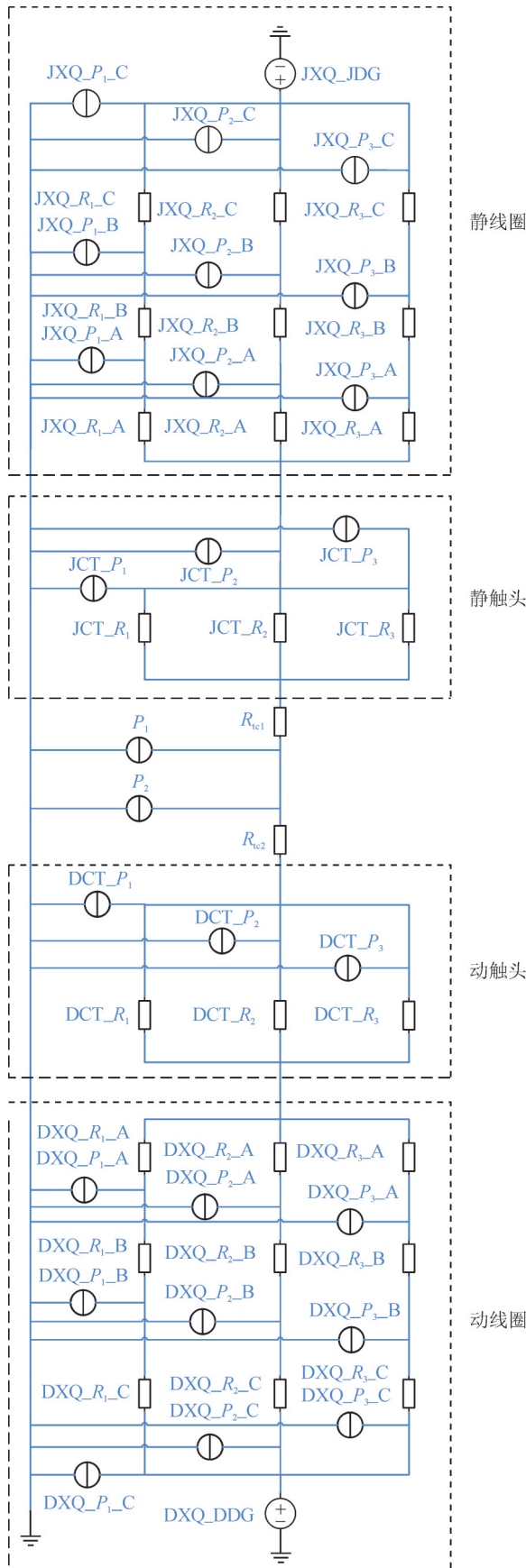


图6 2/3匝线圈触头热路模型示意图

Fig. 6 Thermal circuit model of 2/3 turn coil contact

使用参数化方法得到的2/3匝线圈触头等效热路模型中各元件的由其对应部分结构和物理参数

表达的热源和热阻的参数化公式见表3。依照表3, 对应2/3匝线圈触头等效热路可以获得结构相似、尺寸不同的真空断路器等效热路模型。

表3 2/3匝线圈触头参数化公式

Table 3 Parametric formula of 2/3 turn coil contact

元件	参数化公式
DXQ_R1_A	$\frac{1}{3} \times \pi \times (r_1 + r_2) / [k \times H \times (r_2 - r_1)]$
DXQ_R1_B	$\frac{1}{3} \times \pi \times (r_1 + r_2) / [k \times H \times (r_2 - r_1)]$
DXQ_R1_C	$L_2 / (k \times A_2)$
DXQ_P1_A	$F \times \rho_0 [1 + a \times (T - T_0)] \times \frac{1}{27} \times \pi \times (r_1 + r_2) / [H \times (r_2 - r_1)]$
DXQ_P1_B	$F \times \rho_0 [1 + a \times (T - T_0)] \times \frac{1}{27} \times \pi \times (r_1 + r_2) / [H \times (r_2 - r_1)]$
DXQ_P1_C	$F \times \rho_0 [1 + a \times (T - T_0)] \times \frac{1}{9} \times L_2 / A_2$
DCT_R1	$r / (k \times L \times d)$
DCT_P1	$F \times \rho_0 [1 + a \times (T - T_0)] \times \frac{1}{9} \times r / (L \times d)$

文中典型2/3匝线圈触头的结构和物理参数见表4。触头的结构分别为:线圈内外径、单节线圈高度、触头片内半径、连接处弧长、触头片厚度。仿真中2/3匝线圈触头物理参数包括:参考温度下电阻率、参考环境温度、导热系数。

表4 2/3匝线圈触头的结构和物理参数

Table 4 Physical parameters of 2/3 turn coil contact

参数	位置	设置值
r_1/mm	线圈内径	38
r_2/mm	线圈外径	50
H/mm	单节线圈高度	12
r/mm	触头片内半径	40
L/mm	连接处弧长	11.48
d/mm	触头片厚度	6
$\rho_0/(\Omega \cdot \text{m})$	参考温度下电阻率	1.72×10^{-8}
T_0/K	参考环境温度	300
$k/[\text{W} \cdot (\text{K} \cdot \text{m})^{-1}]$	导热系数	401

根据表3中的2/3匝线圈触头等效热路模型中各元件的热源和热阻的参数化公式以及表4为文中典型2/3匝线圈触头的结构和物理参数,计算获得典型2/3匝线圈触头在通流2000 A条件下触头热路中各元件的热源和热阻的数值,见表5。

3.2 由热路模型计算的关键节点温度

基于图6所示2/3匝线圈触头热路模型计算获得的通流2000 A条件下灭弧室各关键点的温升结果见表6。真空断路器温升结果对比图见图7。表6、图7对比了基于热路模型的真空断路器温升计算结果与基于热一流一固仿真126 kV单断口真空断路器温升仿真结果^[24],其通流电流为2000 A,电源频率为50 Hz,环境温度为10 °C。研究表明,从

表5 2/3匝线圈触头等效热路各元件计算结果

Table 5 Calculation results of thermal circuit model

元件	计算结果
DXQ_R _i _A	1.590 K/W
DXQ_R _i _B	1.590 K/W
DXQ_R _i _C	0.096 K/W
DXQ_P _i _A	6.670 W
DXQ_P _i _B	6.670 W
DXQ_P _i _C	0.400 W
DCT_R _i	1.448 K/W
DCT_P _i	2.142 W

动、静触头片到两端线圈,再到动、静导杆,热路仿真和耦合仿真温度分布趋势一致。触头处温度相差 27.2 °C;静导杆下端连接处温度相差 22.4 °C;静导杆上端连接处温度相差 9.6 °C;端部温度相差 3.2 °C,关键节点温度值相差不大。通过与 126 kV 真空断路器 2 000 A 通流下的温升测量结果对比^[24-25],各个关键点的温度与实验测量值相近,验证了 2/3 匝线圈触头等效热路模型的正确性与可行性。

表6 2/3匝线圈触头热路仿真结果与耦合仿真结果

Table 6 Thermal circuit simulation results of 2/3 turn coil contact

关键节点	热路仿真温度/°C	耦合仿真温度/°C
动、静触头片连接处	289.7	316.9
静导电杆与触头连接处	152.5	174.9
静导电杆与散热器连接处	72.3	81.9
散热器端部	39.7	42.9

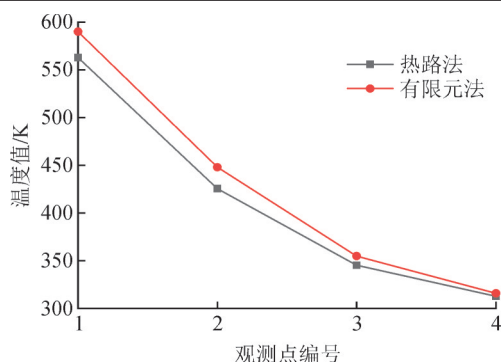


图7 真空断路器温升结果对比图

Fig. 7 Comparison of temperature rise results

4 讨论

基于热路模型对真空断路器温升进行的仿真计算,能够大量缩短计算所需时间。文中所建立的热路模型仿真完成均在 1 min 以内,而采用电磁耦合仿真因为流体域的存在耗时长达数小时,大量缩短了仿真时长。同时,流体域的存在还会导致仿真出现计算不收敛的情况,且占用资源大。热路模型

减少了计算工作量及计算结果的不确定性,并通过计算速度提高约两个数量级,实现快速预测真空断路器温升和散热路径热流。

热路模型具有参数可调、普遍适用的独特优势。该方法将真空断路器内传热过程等效为热阻与热源,设备关键部件或测温点位置直接反映为网络节点,其参数选择均依据物理结构。通过参数修改或局部替换,热路模型可以灵活适用于不同工况下及结构差异小的其他真空断路器。热路模型已经广泛应用于其他设备的关键节点温度监测,尤其适合快速获得关键节点的温度分布等信息。

热路模型的精度高度依赖于各热路元件如热阻、热源等参数的取值。因此,准确确定热路模型中各元件的参数至关重要。文中热路模型建立基于真空断路器内部传热散热平衡这一物理过程,参数确定基于真空断路器的物理参数,具备了良好的可解释性^[26-33]。此外,各接触部位的接触热阻与接触电阻产热对热路模型局部的仿真结果影响较大。准确获得接触部位的接触电阻与接触热阻能够使热路模型仿真精确性有较大提升。

5 结论

文中基于等效热路模型对真空断路器灭弧室进行了温升仿真。利用提出的热路模型得到了真空断路器 2/3 匝线圈触头的温升情况,得到了触头热路元件的参数化公式。结合 126 kV 真空断路器温升的热一流一固耦合仿真,验证了模型的正确性。文中的研究成果可以为真空断路器温升分析提供一种新的思路。得到了以下结论:

1)建立了基于热路模型的真空断路器温升仿真模型,能够通过仿真快速获得真空断路器关键节点温升,大幅缩短了真空断路器温升仿真时长;实现了真空断路器温升的快速预测。

2)研究获得了在通电电流为 2 000 A 交流电情况下 2/3 匝线圈触头真空灭弧室的关键节点温度。在动、静触头片接触位置,达到最高温度。与耦合仿真进行了对比分析,触头处温度相差 27.2 °C,误差为 4.6%。

3)针对 2/3 匝线圈触头真空断路器,建立了基于热路的参数化估计模型,实现了真空断路器温升仿真随工况变化的参数调整。

参考文献:

[1] 钟建英,孙广雷,杨葆鑫,等. 高压等级真空断路器研究现状

- 及展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 451-466.
- ZHONG Jianying, SUN Guanglei, YANG Baoxin, et al. Research status and prospect of high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 451-466.
- [2] LI Shengtao, LI Jianying. Condition monitoring and diagnosis of power equipment: Review and prospective[J]. High Voltage, 2017, 2(2): 82-91.
- [3] GUAN Weimian, YUAN Jie, LYU Hao, et al. Homogeneous arc ablation behaviors of CuCr cathodes improved by chromic oxide[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021(81): 1-12.
- [4] 罗传仙, 陶佳, 周正钦, 等. 考虑累积效应的35 kV油浸式三相变压器温升特性仿真与试验研究[J]. 广东电力, 2024, 37(8): 77-86.
- LUO Chuanxian, TAO Jia, ZHOU Zhengqin, et al. Study on simulation and test of temperature rise characteristics of 35 kV oil-immersed three-phase transformer considering cumulative effect[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(8): 77-86.
- [5] 傅晨钊, 汲胜昌, 王世山, 等. 变压器绕组温度场的二维数值计算[J]. 高电压技术, 2002, 28(5): 10-12.
- FU Chenzhao, JI Shengchang, WANG Shishan, et al. 2D numerical calculation of temperature field of winding in transformer[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(5): 10-12.
- [6] 马朝阳, 赵晓民, 李旭旭, 等. 基于ANSYS的真空断路器温升仿真迭代方法验证及其应用[J]. 真空电子技术, 2024(6): 71-76.
- MA Chaoyang, ZHAO Xiaomin, LI Xuxu, et al. Validation and application of ANSYS based iterative method for vacuum circuit breaker temperature rise simulation[J]. Vacuum Electronics, 2024(6): 71-76.
- [7] 黄添晶, 马子文, 孔凡良. 基于Workbench顺序耦合的中压直流断路器热稳定性仿真分析[J]. 电器与能效管理技术, 2023(12): 32-38.
- HUANG Tianjing, MA Ziwen, KONG Fanliang. Simulation analysis on thermal stability of medium voltage DC circuit breakers based on Workbench sequential coupling[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2023(12): 32-38.
- [8] 马朝阳, 孙广雷, 刘劭玮, 等. 采用4种不同纵磁触头结构的126 kV单断口真空断路器温升性能对比研究[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 64-71.
- MA Chaoyang, SUN Guanglei, LIU Shaowei, et al. Comparison study on temperature-rise performance of 126 kV single-break vacuum circuit breakers with 4 types of AMF contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 64-71.
- [9] LYU Qian, YU Xiaoling, TAN Youbo, et al. Structure improvement of a 126 kV vacuum circuit breaker using electromagnetic-thermal field coupling simulation[J]. Applied Thermal Engineering, 2019(160): 114076.
- [10] CHENG Xian, DU Shuai, GE Guowei, et al. Electromagnetic-thermal-flow field calculation and optimal design of environment-friendly live tank multi-break vacuum circuit breakers[J]. Electric Power Systems Research, 2023(217): 109081.
- [11] 刘兴鹏. 基于热电类比理论的油浸式电力变压器热点温度计算模型[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- LIU Xingpeng. Calculation model of hot spot temperature of oil-immersed power transformers based on thermoelectric analogy theory[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [12] 江涛莎. 基于底层油温的油浸式变压器热点估计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- JIANG Taosha. Research on hot spot estimation method of oil-immersed transformers based on Bottom oil temperature[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [13] SWIFT G, MOLINSKI T S, LEHN W A. A fundamental approach to transformer thermal modeling-part I: Theory and equivalent circuit[J]. IEEE, 2001, 6(2): 171-175.
- [14] 金能思. 油浸式变压器分布参数热路模型边界条件研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- JIN Nengsi. Research on boundary conditions of distributed parameter thermal circuit model for oil-immersed transformers[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [15] 刘辉, 吴新振, 陈春涛. 基于热路法的自然冷却永磁同步电机定子温度计算[J]. 大电机技术, 2023(5): 13-18.
- LIU Hui, WU Xinzhen, CHEN Chuntao. Stator temperature calculation of naturally cooled permanent magnet synchronous motor based on thermal circuit method[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(5): 13-18.
- [16] GUO Yujing, XU Ruihai, JIN Ping. A real-time temperature rise prediction method for PM motor varying working conditions based on the reduced thermal model[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023(47): 103098.
- [17] 陆彪, 汤凯, 陈德敏, 等. 基于响应曲面法的大电流开关柜结构优化[J]. 南方电网技术, 2021, 15(8): 112-119.
- LU Biao, TANG Kai, CHEN Demin, et al. Structural optimization of large-current switchgear based on response surface methodology[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(8): 112-119.
- [18] 刘振邦, 杜志叶, 黎鹏, 等. 基于参数等效及改进混合剖分的变压器绕组温升研究[J/OL]. 南方电网技术: 1-10[2025-09-16]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20240908003>.
- LIU Zhenbang, DU Zhiye, LI Peng, et al. Research of temperature rise in transformer windings based on parametric equivalence and improved hybrid profiling[J/OL]. Southern Power System Technology: 1-10[2025-09-16]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/en/debutDetail.html?serialNum=20240908003>.
- [19] FENG Jianghua, LIANG Dawei, ZHU Z Q, et al. Improved low-order thermal model for critical temperature estimation of PMSM[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(1): 413-423.
- [20] LI Marui, DONG Chaoyu, YU Xiaodan, et al. Multi-step ahead thermal warning network for energy storage system based on the core temperature detection[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 15332.
- [21] KIRCHGÄSSNER W, WALLSCHEID O, BÖCKER J. Thermal neural networks: Lumped-parameter thermal modeling with state-space machine learning[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023(117): 105537.
- [22] YANG Yun, XIAO Yukun, DU Zhengchun, et al. Data-driven varying state-space model based on thermal network for transient temperature field prediction of motorized spindles[J]. Applied Thermal Engineering, 2023(219): 119456.

- [23] 林韦弦, 钱乐天, 罗欣, 等. 基于集总参数热网络法的四足机器人温度分布预测[J]. 机器人, 2025, 47(2): 188-199.
LIN Weixian, QIAN Letian, LUO Xin, et al. Temperature distribution prediction of the quadruped robot based on the lumped-parameter thermal networks[J]. Robot, 2025, 47(2): 188-199.
- [24] YU Xiaoling, LIU Zhiyuan, FENG Quanke, et al. Research on a gravity heat pipe for high voltage vacuum interrupter[C]//2008 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Bucharest: IEEE, 2008: 129-132.
- [25] HUANG Lei, GENG Yingsan, WANG Jianhua, et al. A real-time reconstruction method of temperature field in high voltage vacuum circuit breaker based on physics-informed neural network[J]. Electric Power Systems Research, 2025, (248): 111984.
- [26] 李奎, 张杰凯, 郭泽, 等. 基于触头电弧侵蚀的直流断路器电性能退化及剩余电寿命预测[J]. 电工技术学报, 2025, 40(16): 5330-5342.
LI Kui, ZHANG Jiekai, GUO Ze, et al. Model of electrical performance degradation and remaining life prediction for DC circuit breaker based on arc erosion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(16): 5330-5342.
- [27] 潘文霞, 陈星池, 赵坤, 等. 基于温度场计算的油浸式变压器热点温度仿真分析方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(3): 71-77.
PAN Wenxia, CHEN Xingchi, ZHAO Kun, et al. Simulation analysis method of hot spot temperature of oil-immersed transformer based on temperature field calculation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(3): 71-77.
- [28] 张晓华, 吕志瑞, 孙云生, 等. 基于修正热路模型的油浸式变压器绕组热点温度计算研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(3): 78-84.
ZHANG Xiaohua, LYU Zhirui, SUN Yunsheng, et al. Research of hot spot temperature calculation in oil-immersed transformer based on modified thermal model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(3): 78-84.
- [29] 范兴明, 李涛, 张鑫. 基于电容自然充电换相的混合式直流断路器设计与仿真[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3510-3521.
FAN Xingming, LI Tao, ZHANG Xin. Design and simulation of hybrid DC circuit breaker based on capacitor natural charging com-mutation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(11): 3510-3521.
- [30] 郑峰, 王威东, 刘宝谨, 等. 计及柔性限流装置与直流断路器协同动作的电弧抑制暂态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 59-69.
ZHENG Feng, WANG Weidong, LIU Baojin, et al. Research on transient characteristic of arc suppression considering the joint operation of a flexible current limiting device and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 59-69.
- [31] 温惠, 郭晓雪, 曾馨艺. 基于磁流体动力学的无极性低压直流断路器电弧仿真及性能优化[J]. 电器与能效管理技术, 2024(2): 6-12.
WEN Hui, GUO Xiaoxue, ZENG Xinyi. Arc simulation and performance optimization of non-polar low voltage DC circuit breaker based on magnetohydrodynamics[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2024(2): 6-12.
- [32] 王顺亮, 李明, 辛清明, 等. 具备快速重合闸能力的低损耗低成本双向固态式直流断路器[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(12): 128-138.
WANG Shunliang, LI Ming, XIN Qingming, et al. A low-cost bidirectional solid-state DC circuit breaker with low power loss and fast-reclosing capability[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 128-138.
- [33] 戴冬云, 涂苑婷, 游一民, 等. 小型直流断路器用热双金属片动作特性测量方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2025(4): 54-59.
DAI Dongyun, TU Yuanting, YOU Yimin, et al. Research on measurement method of thermal bimetal strip action characteristics for miniature DC circuit breakers[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2025(4): 54-59.

许学勤(1982—), 女, 高级工程师, 硕士, 长期从事电网规划建设(变电一次部分)研究(E-mail: 342636456@qq.com)。

王帅兵(1987—), 男, 高级工程师, 博士, 长期从事高压开关仿真计算与性能评估技术研究(通信作者)(E-mail: wcangxing@163.com)。