

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.06.009

## 10 kV 并沟线夹温升诱发机制的 多物理场耦合研究

刘强强<sup>1</sup>, 何文信<sup>1</sup>, 冯玉<sup>2</sup>, 吴凯<sup>2</sup>, 吴少雷<sup>2</sup>, 王伟<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 国网安徽省电力有限公司 电力科学研究院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 并沟线夹是带电作业中最常用的接续金具之一, 针对并沟线夹容易因接触力不足、发热不均匀等原因而出现过热甚至烧毁的现象, 文章建立并沟线夹的等比例多物理场仿真模型, 在不同安装扭矩下, 对其不同部位的电流密度、欧姆损耗和温度分布进行分析。结果表明, 主导线和副导线与并沟线夹接触区域的电流密度及欧姆损耗的分布极不均匀, 其中与副导线接触的并沟线夹下夹块接触区域欧姆损耗最高, 达到  $19.6 \text{ MW/m}^3$ , 由于电流密度和欧姆损耗分布不均匀, 温度最高点也出现在与副导线接触的并沟线夹下夹块上。根据不同安装扭矩下的温度仿真结果可知, 并沟线夹的温度随安装扭矩的增大而减小并最终趋于稳定, 为了保证线夹在运行中的可靠性, 螺栓的扭矩应保持在  $16 \text{ N} \cdot \text{m}$  以上。

**关键词:** 并沟线夹; 多场耦合; 接触电阻; 欧姆损耗; 温度分布

**中图分类号:** TM51; TM726.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)06-0774-07

### Multi-physical field coupling study on induction mechanism of temperature rise of a 10 kV parallel groove clamp

LIU Qiangqiang<sup>1</sup>, HE Wenxin<sup>1</sup>, FENG Yu<sup>2</sup>, WU Kai<sup>2</sup>, WU Shaolei<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230601, China)

**Abstract:** Parallel groove clamp is one of the most commonly used connection fittings in electrification. In view of the phenomenon that parallel groove clamp is easy to overheat or even burn out due to insufficient contact force and uneven heating, this paper established the equal proportion multi-physical field simulation model of parallel groove clamp. Under the conditions of different installation torques, the current density, ohmic loss and temperature distribution at different parts of the parallel groove clamp were analyzed. The results show that the distribution of current density and ohmic loss in the contact area between the main conductor and auxiliary conductor and the parallel groove clamp is extremely uneven. The ohmic loss in the contact area of the lower clamp block of the parallel groove clamp in contact with the auxiliary conductor is the highest, reaching  $19.6 \text{ MW/m}^3$ . Due to the uneven distribution of current density and ohmic loss, the highest temperature point also appears on the lower clamp block of the parallel groove clamp in contact with the auxiliary conductor. According to the temperature simulation results under different installation torques, the temperature of the parallel groove clamp decreases with the increase of installation torque and finally tends to be stable. In order to ensure the reliability of clamp in operation, the torque of bolt should be kept above  $16 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2022-03-10

基金项目: 国家电网有限公司科技资助项目(52120520005B)

作者简介: 刘强强(1994—), 男, 安徽宿州人, 合肥工业大学硕士生;

吴少雷(1973—), 男, 安徽合肥人, 国网安徽省电力有限公司教授级高工;

王伟(1976—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: weiwang@hfut.edu.cn.

**Key words:** parallel groove clamp; multi-field coupling; contact resistance; ohmic loss; temperature distribution

## 0 引 言

文献[1]的研究结果表明,10 kV 线路故障率约占全电网的 70%;文献[2]对北京地区耐张线夹的发热情况以及原因进行了调研和分析,结果表明安装质量、安装错误、接触面氧化是导致线夹发热的几个主要诱因;文献[3-5]分别对不同工况下穿刺线夹的温升、安装扭矩对绝缘穿刺线夹接触电阻的影响等进行了研究,结果表明,安装扭矩和载流量等因素都会使穿刺线夹的接触电阻增大,进而导致线夹异常发热;文献[6-8]对微观随机粗糙表面模型进行了构建,探究接触电阻随粗糙度的变化,结果表明随着粗糙度的增大,接触电阻也会相应增大;文献[9]根据电热耦合的基础理论分析了线路接头的温升状态,提出了一种可以在不拉限负荷的条件下,减小线夹温度的方法;文献[10-12]研究了接续金具材料的温度与接触压力的关系,结果表明在一定范围内随着接触压力的增加,试样温度呈现减小的趋势。

并沟线夹是配电网带电作业中最常用的接续金具之一,但是目前文献中对于并沟线夹的实验和仿真较少。线夹的失效主要是由于螺栓松动、材料软化等原因导致温度在短时间内的异常升高<sup>[13-15]</sup>,为了探究并沟线夹在不同工况下的温度分布,本文首先测量不同安装扭矩下并沟线夹与导线间的接触电阻,并根据赫兹接触理论计算并沟线夹-导线的接触面积,然后将结构场的结果作为初始值导入电场和热场中,在有限元软件的电磁热模块中,实现结构场、电场、热场的耦合仿真,探究并沟线夹温度分布差异的内部原因以及在不同安装扭矩、不同载流量下并沟线夹的温度变化,相关结论对并沟线夹的安装、检测和维修提供一定的参考。

## 1 仿真模型

### 1.1 并沟线夹的三维模型

并沟线夹主要用于架空输电线路中 2 根导线间的接续工作,在非直线杆塔的跳线、配电网电连接处的 T 接线和分支线处等都得到了广泛的使用。JBL50-240 型号的并沟线夹由螺栓、弹性垫圈、圆形垫片、圆弧垫片、上夹块和下夹块组成。本文依照线夹的实际参数建立等比例的仿真模型,建模时所使用的参数有:线夹的下夹块长

度 46 mm,上夹块长度 21 mm,下夹块圆弧直径 20.5 mm,上夹块圆弧直径 25.5 mm,主导线直径 14.6 mm,副导线直径 10 mm。其三维模型如图 1 所示。

在安装时应首先将导线放入线夹的上下夹块中,依靠螺栓的轴向力将导线固定到并沟线夹的上下夹块之中,然后通过弹簧垫圈和圆形垫片向导线提供均匀且恒定的力,并利用线夹材料的导电特性来达到接续的目的。

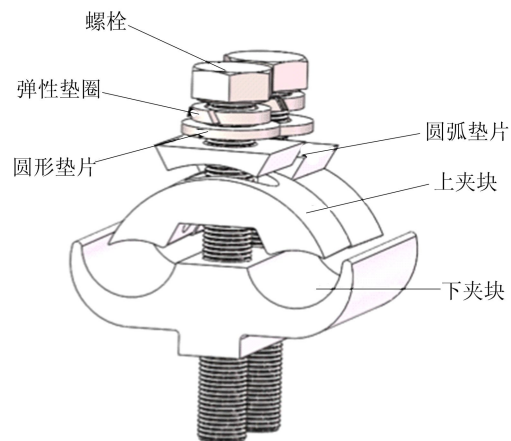
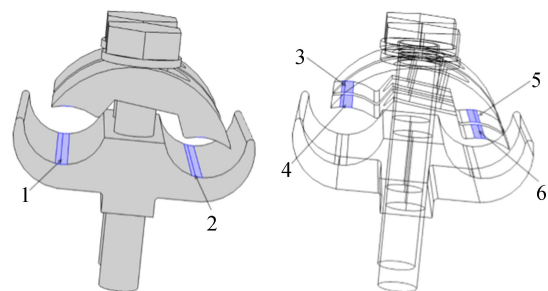


图 1 并沟线夹的三维模型

### 1.2 仿真模型的建立及简化

本文以 JBL50-240 并沟线夹及 150 mm<sup>2</sup> 主导线、70 mm<sup>2</sup> 副导线为研究对象,建立并沟线夹的多物理场耦合仿真模型,为了方便地探究并沟线夹发热不均匀的原因,对并沟线夹的三维模型进行相应地简化处理,如去掉螺栓的螺纹、较小的倒角等。同时,切割出并沟线夹与导线的接触区域,便于仿真模型中建立并沟线夹与导线间的接触导电和传热特性。对简化模型进行网格划分,得到线夹的有限元模型。

并沟线夹的仿真模型如图 2 所示。



(a) 并沟线夹下夹块接触面 (b) 并沟线夹上夹块接触面

图 2 并沟线夹的仿真模型

为方便说明线夹与导线的各接触部位,图 2 中将导线隐藏,其中电流经主导线由区域 1、区域 4 流入,由区域 2、区域 5 经副导线流出,为了提高计算效率,将线夹上的弹性垫圈、圆弧垫片以及螺栓上的螺纹等特征进行省略,并将导线简化为圆柱体,材料设置为铝合金。

### 1.3 控制方程与边界条件

仿真中电流接触面上的控制方程为:

$$J_1 = h_c(V_1 - V_2) \quad (1)$$

$$J_2 = h_c(V_2 - V_1) \quad (2)$$

$$h_c = 1.25\sigma_{\text{contact}} \frac{m_{\text{asp}}}{k_{\text{asp}}} \left( \frac{p}{H_c} \right)^{0.95} \quad (3)$$

$$\frac{2}{\sigma_{\text{contact}}} = \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} \quad (4)$$

其中:  $J_1$ 、 $J_2$  分别为源接触面和目标接触面的电流密度;  $h_c$  为金属导体的收缩电导率;  $V_1$ 、 $V_2$  分别为源接触面和目标接触面的电势;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为金属导体的电导率和接触面的电导率;  $\sigma_{\text{contact}}$  为  $m_{\text{asp}}$ 、 $k_{\text{asp}}$  分别为材料接触表面的粗糙平均高度和粗糙平均斜率;  $p$  为接触压力;  $H_c$  为材料的微硬度。

热接触面上的控制方程为:

$$q_1 = h(T_2 - T_1) \quad (5)$$

$$q_2 = h(T_1 - T_2) \quad (6)$$

$$h = h_c + h_g + h_r \quad (7)$$

其中:  $q_1$ 、 $q_2$  为传递热量;  $h$  为材料的传热系数;  $T_1$ 、 $T_2$  分别为源接触面和目标接触面的温度;  $h_c$ 、 $h_g$ 、 $h_r$  分别为收缩电导率、间隙热导率和辐射热导率。

电磁热耦合控制方程如下:

$$\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_c \quad (8)$$

$$Q_c = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (9)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (10)$$

其中:  $\rho$  为材料的密度;  $c_p$  为比定压热容;  $k$  为材料的热导率;  $\nabla$  为微分算子符号;  $T$  为温度;  $\mathbf{J}$  为电流密度;  $\mathbf{E}$  为电场强度;  $Q_c$  为热源;  $\sigma$  为材料的电导率。

并沟线夹和导线的材料参数均参照铝合金的参数设置。经查阅相关文献和标准可知,  $70 \text{ mm}^2$  导线所允许的最大载流量为 226 A, 本文假设导线所流过的最大电流为 225 A, 设定并沟线夹的夹块与导线接触区域的接触压力为  $100 \text{ N/m}^2$ , 并考虑空气自然对流的影响, 仿真过程中的传热系数均参照文献[16]进行设置。

综上所述, 本文所建立仿真模型的部分仿真

参数见表 1 所列。

表 1 仿真参数

参数	数值
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2 700
表面辐射率	0.98
粗糙峰斜率	0.40
粗糙峰平均高度/ $\mu\text{m}$	1.00
微硬度/GPa	100
泊松比	0.33
导热率/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	114
杨氏模量/GPa	69
比定压热容/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	900
相对介电常数	1
电导率/( $\text{MS} \cdot \text{m}^{-1}$ )	30.3

### 1.4 不同安装扭矩下接触面积的确定

对于并沟线夹-导线模型来说, 接触电阻主要存在于并沟线夹与导线的接触区域中。因此在仿真分析中, 结合接触电阻的实验测量结果、载流量、接触面积得到并沟线夹-导线的产热速率[9], 计算公式为:

$$q = \frac{p}{S} = \frac{i^2 R_c}{2S} \quad (11)$$

其中:  $i$  为电流;  $R_c$  为测量得到的接触电阻;  $S$  为计算得到的接触面积总和。

由(11)式可以发现, 产热速率主要与接触电阻和总的接触面积有关, 而在不同的安装扭矩下并沟线夹与导线的接触面积必然会产生变化。并沟线夹-导线的仿真模型如图 3a 所示, 根据经典的赫兹接触理论知识可知, 并沟线夹与导线的实际接触都可以抽象为两圆柱形弹性体之间的内接触。

线类-导线接触区域如图 3b 所示。

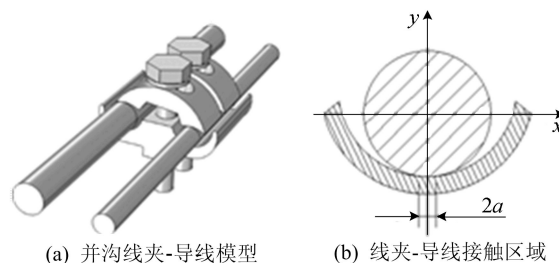


图 3 并沟线夹导线接触的抽象模型

当并沟线夹与导线接触受螺栓预紧力的作用时, 将由线接触变为面接触, 其接触面变成宽为  $2a$  的狭长矩形, 由此可以计算出在不同安装扭矩下并沟线夹与  $150 \text{ mm}^2$  主导线、 $70 \text{ mm}^2$  副导线

的接触面积。计算得出并沟线夹在 8~19 N·m 下安装扭矩的接触面积如图 4 所示。

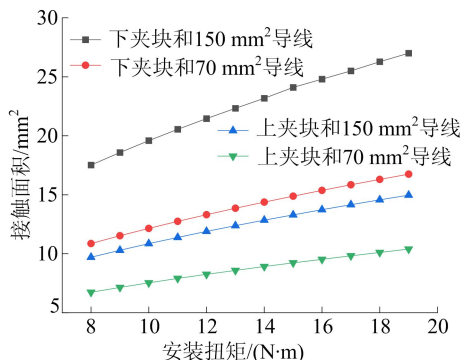


图 4 不同安装扭矩下的接触面积

## 2 仿真结果分析

### 2.1 电流密度分布

并沟线夹在工作过程中,主导线的电流经并沟线夹下夹块和上夹块的接触面传送到线夹中,然后电流由线夹传入副导线达到接续的目的,在整个传输过程中并沟线夹在两根导线之间充当桥梁的作用,为了探究这个过程中并沟线夹各部分的作用,对安装扭矩为 15 N·m,载流量为 150 A 时并沟线夹的电流密度分布云图进行提取,提取的结果如图 5 所示。

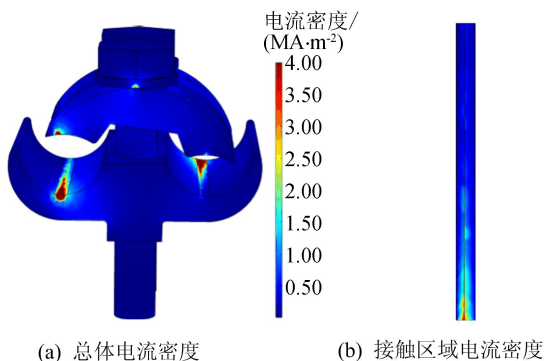


图 5 并沟线夹的电流密度分布

从图 5a 可以看出,并沟线夹在服役过程中,其接触区域的电流密度分布是极不均匀的,在电流流入并沟线夹端部和电流流出并沟线夹端部的电流密度会远大于其他部位,这些区域承担着绝大部分电流的传输,而螺栓在其中主要起连接作用,因此并沟线夹螺栓部位的电流密度相对较低,这与仿真结果是一致的。从图 5b 可以看出,在并沟线夹下夹块与主导线接触前 15 mm 区域以内的电流密度比较大,这意味着并沟线夹的少部分

接触面完成了大部分电流的传输功能,对于接触面的利用率不高,在实际应用过程中可以发现并沟线夹的端部常因受力过大而产生变形,可以推测由于结构设计的原因并沟线夹的端部会产生应力集中现象,此时施加螺栓预紧力会导致线夹端部与导线之间的接触比其他部位更紧密,这会进一步影响电流在线夹中的流动路径,使得端部的电流密度较大。

当安装扭矩为 15 N·m、载流量为 50~225 A 时,并沟线夹各接触区域的电流密度分布如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着载流量的增加,并沟线夹的电流密度也在增加,且与副导线接触区域的电流密度大于与主导线的接触区域,电流密度分布的最高点和最低点分别在与副导线接触的下夹块和与主导线接触的下夹块上。

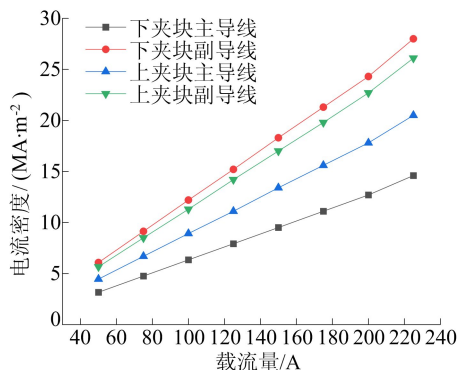


图 6 电流密度随载流量的变化

### 2.2 欧姆损耗分布

并沟线夹的欧姆损耗是指电流流经并沟线夹和导线自身的固有电阻,由电能转化成为热能的过程,因此电流密度和欧姆损耗的分布与温度的分布密切相关。当安装扭矩为 15 N·m、载流量为 150 A 时,并沟线夹的欧姆损耗分布如图 7 所示。

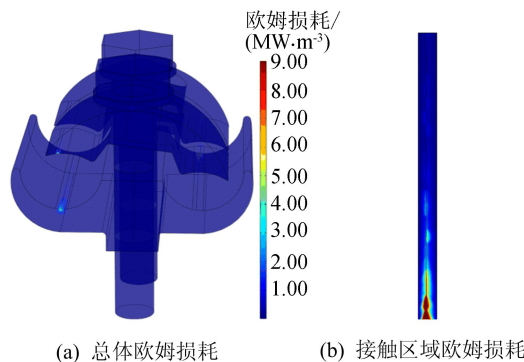


图 7 并沟线夹的欧姆损耗分布

从图 7a 可以看出,并沟线夹在服役过程中欧姆损耗是不均匀的,其分布规律与电流密度分布大致相同,但又有些差异。欧姆损耗较大的部位在电流流入主导线和电流流出副导线与并沟线夹接触的端部。从图 7b 可以看出,越靠近端部的欧姆损耗越大。

对并沟线夹与导线各接触部位的欧姆损耗分别进行提取,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,在并沟线夹与导线接触的区域中,欧姆损耗最小的区域在并沟线夹的下夹块与主导线的接触部位,最小的欧姆损耗为  $5.31 \text{ MW/m}^3$ ,欧姆损耗最大的区域在并沟线夹的下夹块与副导线相接触的部位,最大的欧姆损耗达到  $19.60 \text{ MW/m}^3$ 。

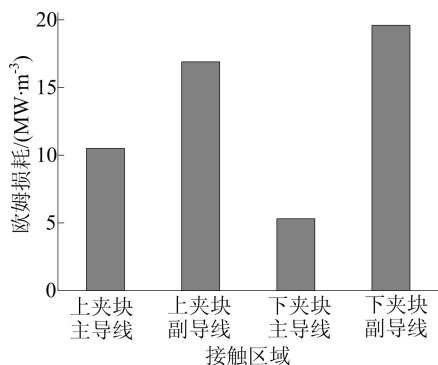


图 8 不同接触部位并沟线夹的欧姆损耗

当安装扭矩为  $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、载流量为  $50 \sim 225 \text{ A}$  时,并沟线夹各接触区域的欧姆损耗分布如图 9 所示。从图 9 可以看出,随着载流量的增加,并沟线夹的欧姆损耗呈非线性的增长趋势,且增长速率越来越快;从图 9 还可以看出,并沟线夹与副导线接触区域的欧姆损耗明显大于与主导线的接触区域,这可能是由于副导线的直径比较小,电流在单位面积所转换的热量远大于主导线所导致的。

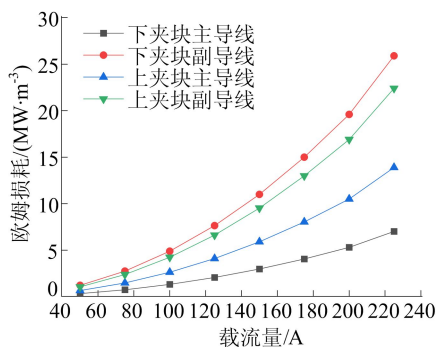


图 9 欧姆损耗随载流量的变化

### 2.3 不同载流量下并沟线夹的温度变化

当安装扭矩为  $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、载流量为  $150 \text{ A}$  时,并沟线夹的温度分布如图 10 所示,由于电流密度和欧姆损耗分布的不均匀导致温度分布也存在差异,从图 10 可以看出,在除并沟线夹与导线接触区域的其他部位温度的分布较为均匀,而并沟线夹的温度最高点出现在并沟线夹的下夹块与副导线的接触部位,并且与副导线接触部位的温度明显高于与主导线的接触部位,这与前面的分析是一致的,说明与副导线接触的并沟线夹的下夹块为并沟线夹的薄弱环节,应在此处采用更好的材料或增加散热处理。

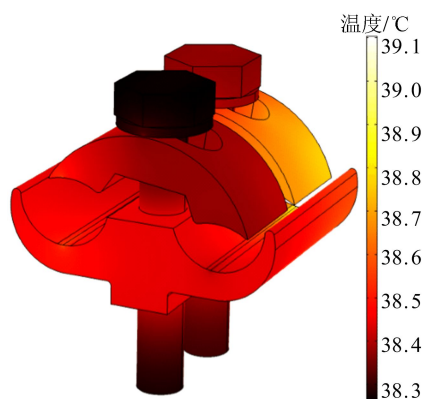


图 10 并沟线夹的温度分布

为了探究并沟线夹在服役过程中的工作状态,选取安装扭矩为  $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、载流量范围为  $50 \sim 225 \text{ A}$ ,在环境热属性中设置外界环境温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,将导线的一端通入电流,对并沟线夹进行多物理场耦合的稳态研究,当载流量为  $50 \sim 225 \text{ A}$  时,并沟线夹的温度分布曲线如图 11 所示。

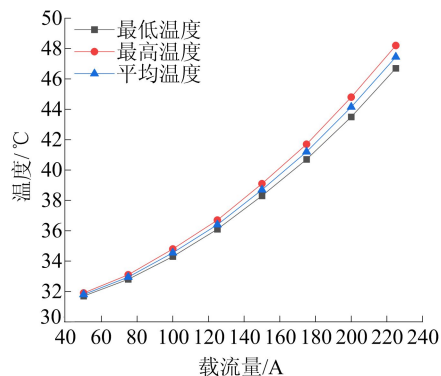


图 11 温度随载流量的变化

从图 11 可以看出,随着载流量的增加,并沟线夹的温度均非线性的增加,且增加的速率越来越

越快,根据焦耳热公式  $Q=I^2Rt$  可知,当通电时间和材料的电阻值一定时,因为通电所产生的热量  $Q$  与电流  $I$  的平方成正比,虽然并沟线夹与环境之间的对流热通量可以抵消一部分的产热量,但是热量散失的速率却远远小于热量产生的速率,所以并沟线夹的温度随载流量的变化呈现二次多项式的关系,这与仿真结果是一致的,通过分析可以看出载流量对线夹的温度分布有着重要的影响。

#### 2.4 不同安装扭矩下并沟线夹的温度变化

当载流量为 150 A 时,将不同安装扭矩下并沟线夹接触面积和接触电阻的数值代入(11)式计算得出生热率,并导入有限元仿真软件中,得到温度随安装扭矩的变化曲线,如图 12 所示。从图 12 可以看出,并沟线夹的温度随安装扭矩的增大而逐渐减小,并且最终会趋于稳定;安装扭矩为  $8\text{ N}\cdot\text{m}$  时的最高温度与安装扭矩为  $19\text{ N}\cdot\text{m}$  时的最高温度相差了  $9.7\text{ }^\circ\text{C}$ ,这可能是由于当安装扭矩为  $8\text{ N}\cdot\text{m}$  时并沟线夹和导线刚刚接触,此时接触面积比较小,对于电流的阻碍作用比较大,使得接触电阻和温度的数值较大,随着安装扭矩的进一步增大,并沟线夹的上下夹块和导线发生挤压,两者之间的接触面积也在增大,对电流的阻碍作用逐渐减小,接触电阻出现下降的趋势,当安装扭矩增大到一定程度时,并沟线夹和导线已经趋于完全接触,此时增加安装扭矩已经难以增大有效接触面积,最终使线夹与导线的接触电阻值和温度值趋于稳定。从图 12 可以看出,因为安装扭矩在  $16\text{ N}\cdot\text{m}$  及以后并沟线夹的温度始终小于  $40\text{ }^\circ\text{C}$ ,并且开始趋于稳定,所以在工作中螺栓扭矩应在  $16\text{ N}\cdot\text{m}$  以上。

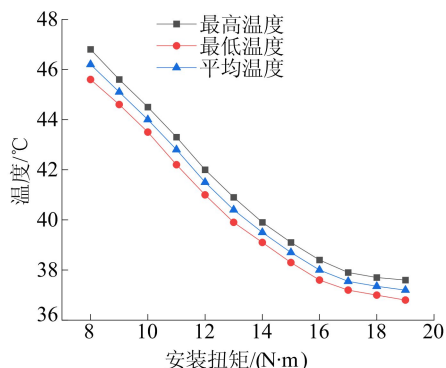


图 12 温度随安装扭矩的变化

### 3 结 论

(1) 并沟线夹在服役过程中电流密度和欧姆

损耗的分布是极不均匀的,主导线与并沟线夹下夹块接触的前 15 mm 区域以及电流流出的副导线与并沟线夹下夹块靠近端部的 10 mm 区域内的电流密度和欧姆损耗比较大。

(2) 由于电流密度和欧姆损耗的分布不均匀,导致并沟线夹的温度分布也有差异,在运行中,并沟线夹的最高温度出现在电流流出副导线与并沟线夹下夹块的接触区域,且与副导线接触区域的温度明显大于与主导线接触区域的温度。

(3) 根据不同载流量下并沟线夹的耦合仿真结果可知,线夹的电流密度、欧姆损耗和温度都随载流量的增大而增大,且欧姆损耗与温度增大的速率越来越快。

(4) 根据不同安装扭矩下并沟线夹的耦合仿真结果可知,并沟线夹的温度随安装扭矩的增大而逐渐减小并最终趋于稳定,为保证线夹可靠运行,服役过程中螺栓扭矩应保持在  $16\text{ N}\cdot\text{m}$  以上。

#### [参 考 文 献]

- [1] 施迅,王伟,刘焜,等. 微观随机粗糙表面接触有限元模型的构建与接触分析[J]. 润滑与密封, 2020, 45(5): 25-29.
- [2] 李雪. 耐热导线耐张线夹发热问题解决方案研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [3] ANGADI S V, JACKSON R L, CHOE S Y, et al. A multi-physics finite element model of a 35 A automotive connector including multiscale rough surface contact[J]. Journal of Electronic Packaging, 2012, 134(1): 1-11.
- [4] 吴少雷,冯玉,吴凯,等. 基于有限元的三维粗糙表面电接触模型构建与仿真分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(11): 1441-1445.
- [5] 吴少雷,冯玉,吴凯,等. 绝缘穿刺线夹带电安装作业现状分析和改进[J]. 电力安全技术, 2018, 20(9): 62-65.
- [6] 齐贵广. 基于故障模式后果分析法的 10 kV 线路供电可靠性分析[J]. 电源技术应用, 2014(3): 40-41.
- [7] SIDDAPPA P G, TARIQ A. Contact area and thermal conductance estimation based on the actual surface roughness measurement[J]. Tribology International, 2020, 148: 106358.
- [8] 岳洋,孙逸翔,孙毓明,等. 载荷和电压对纯铜滚动载流摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 67-74.
- [9] 周念成,兰雪珂,莫复雪,等. 计及线路接头温升约束的受端电网转供优化模型[J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3237-3249.
- [10] 包健康,高波,张血琴. 500 kV 输电线路耐张线夹电接触计算及其发热研究[J]. 中国电力, 2016, 49(11): 25-30.
- [11] YAO K, LIU Y C, ZHOU Y P, et al. Influence of thermal contact resistance on thermal conductivity measurement with a high-temperature guarded hot plate apparatus[J]. International Journal of Thermophysics, 2020, 41(2): 18-30.

(下转第 787 页)

- the counterbalance forklift based on extension hierarchical control[J]. International Journal of Automotive Technology, 2021, 22(3): 643-656.
- [2] WANG T T, DONG R Y, ZHANG R, et al. Research on stability design of differential drive fork-type AGV based on PID control[J]. Electronics, 2020, 9(7): 1072.
- [3] 刘显贵, 杨坤全, 张福斌, 等. 平衡重式叉车满载急转工况下横向稳定性控制[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 154-159.
- [4] 韩雪雯, 何锋, 陈江生. 重型车辆防侧翻控制研究[J]. 机械设计与制造, 2018(7): 206-209.
- [5] 张之路. 货物对叉车稳定性影响机理研究及控制策略设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [6] 肖遥. 主动后轮转向系统控制策略及其测试研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [7] 梁南胜, 葛建平, 任勇生. 质心运动守恒问题的一般解[J]. 华北工学院学报, 1995, 16(3): 197-201.
- [8] 巨永锋, 李登峰. 最优控制[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2005: 139-147.
- [9] JIANG X Y, LI S. Beetle antennae search without parameter tuning (BAS-WPT) for multiobjective optimization[J]. Filomat, 2020, 34(15): 5113-5119.
- [10] WANG T T, YANG L, LIU Q. Beetle swarm optimization algorithm: theory and application [J]. Filomat, 2020, 34(15): 5121-5137.
- [11] MARZAKI M H, TAJJUDIN M, RAHIMAN M H F, et al. Performance of FOPI with error filter based on controllers performance criterion (ISE, IAE and ITAE) [C]// 2015 10th Asian Control Conference (ASCC). [S. l.]: IEEE, 2015: 1-6.

(责任编辑 张 镛)

**(上接第 779 页)**

- [12] PAN Y S, CUI X Y, LIU S S, et al. Research progress of thermal contact resistance[J]. Journal of Low Temperature Physics, 2020, 201(4): 213-253.
- [13] 陈锐. 接续金具粗糙接触与温升特性的有限元分析及实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [14] ANGADI S V, JACKSON R L, PUJAR V, et al. A Comprehensive review of the finite element modeling of electrical connectors including their contacts [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 10(5): 836-844.
- [15] 李阳林, 周龙武, 张宇, 等. 双分裂导线连接金具异常发热原因分析与研究[J]. 中国电力, 2016, 49(5): 35-38.
- [16] LINDMAYE M. Simulation of switching arcs under transverse magnetic fields for DC interruption[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(2): 1-8.

(责任编辑 张 镛)

**· 信息与动态 ·****《合肥工业大学学报(自然科学版)》专栏征稿启事**

为了贯彻落实党的二十大精神,紧密围绕科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发展战略,《合肥工业大学学报(自然科学版)》设置“机器人与人工智能”“环境污染与防治”两个专栏,即日起面向国内外专家学者征集“机器人与人工智能”“环境污染与防治”领域的原创性学术论文、专题综述;稿件一经录用将优先刊发。

来稿要求政治导向正确、论证充分、具有较强的引领性和创新性。格式要求参见《合肥工业大学学报(自然科学版)》网页投稿指南的征稿简则和投稿模板。

在线投稿网址: <http://xbzss.hfut.edu.cn/xbzk.html>。