

避雷线预绞丝端口的电磁损耗分布分析

刘刚¹, 郭德明¹, 郑文成^{1†}, 陈冠豪², 潘铖¹, 黎俊文¹, 陈星宇¹, 陈芝淳¹

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;
2. 广东电网有限责任公司 东莞供电局, 广东 东莞 523000)

摘要: 避雷线预绞丝端口所产生的电磁损耗是预绞丝端口高温的主要热源, 局部高温可能导致避雷线发生损伤. 基于避雷线与预绞丝之间接触点的实际分布特征, 利用 Comsol 有限元分析软件构建预绞丝端口的三维电磁场仿真模型. 通过仿真计算得到预绞丝端口的电磁损耗密度分布, 并进行分析讨论. 结合稳态温升实验与接触电阻测量实验对仿真模型的准确性进行验证. 基于该仿真模型, 探究了预绞丝端口电磁损耗与钢的相对磁导率和绞线绞合参数之间的关系. 研究表明, 仿真模型具有足够的准确性, 误差没有超过 8%. 预绞丝端口的电磁损耗主要集中于避雷线与预绞丝之间的接触点, 各排接触点的电磁损耗随着轴向距离的增加逐步递减. 此外, 预绞丝端口的电磁损耗与钢的相对磁导率、相邻接触点的轴向距离呈正相关.

关键词: 避雷线; 预绞丝; 电磁损耗; 相对磁导率; 绞线绞合参数

中图分类号: TM715

文献标志码: A

Analysis on Electromagnetic Losses Distribution of Armor Rod Segment of Lightning Wire

LIU Gang¹, GUO Deming¹, ZHENG Wencheng^{1†}, CHEN Guanhao²,
PAN Cheng¹, LI Junwen¹, CHEN Xingyu¹, CHEN Zhichun¹

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd, Dongguan 523000, China)

Abstract: The electromagnetic losses generated at the armor rod segment of lightning wire are the main heat source for the high temperature of armor rod segment. The local high temperature may cause damage to the lightning wire. Based on the actual distribution characteristics of the contact points between the lightning wire and armor rod, a three-dimensional electromagnetic field simulation model of armor rod segment was established by Comsol. The electromagnetic losses density distribution of armor rod segment obtained by simulation was analyzed and discussed. Subsequently, the steady-state temperature rise experiment and the contact resistance measurement experiment were combined to verify the accuracy of the simulation model. Based on the simulation model, the relationship between the electromagnetic losses of armor rod segment and the relative permeability of steel and twisting parameters of stranded wires was explored. The research results show that the simulation models are accurate enough and the error is less than 6%. The electromagnetic losses of armor rod segment are mainly concentrated on the contact points between

* 收稿日期:2019-09-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977083), National Natural Science Foundation of China(51977083)

作者简介:刘刚(1969—),男,广东广州人,华南理工大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: JMS1995scut@163.com

lightning wire and armor rod. The electromagnetic losses of each row of contact points gradually decrease with the increase of the axial distance. In addition, the electromagnetic losses of the armor rod segment are positively related to the relative permeability of steel and the axial distance of adjacent contact points.

Key words: lightning wire; armor rod; electromagnetic losses; relative permeability; twisting parameters of stranded wires

输电线路雷电防护是保障电力系统稳定运行的重要环节,避雷线在雷电防护中发挥着重要作用.位于悬垂线夹的避雷线通常缠绕预绞丝以避免由于应力集中导致避雷线磨损疲劳^[1-2].当短路电流流经避雷线预绞丝端口时,预绞丝端口将发热严重^[3-4].在高温与轴向拉力的共同作用下,避雷线可能出现断股甚至断线^[5-6].预绞丝端口的热源主要是由短路电流流经预绞丝端口时所产生的电磁损耗构成,因此有必要对预绞丝端口的电磁损耗展开分析.

在电接触领域的研究中,Holm^[7]提出了基于微观层次的 α 斑点收缩电阻理论,得到了众多学者的认可.在该理论基础上,Kogut等^[8]提出了基于粗糙表面接触的数学模型.由于上述研究均未能与宏观层次建立起联系,因此难以在实际中应用.随着计算机技术的发展,基于有限元分析的仿真方法已经开始应用于电接触领域的研究,但对于接触界面的等效处理仍是一个难点.在文献[9-11]中,采用在接触界面上建立一层薄膜的方法实现对接触界面上接触情况的模拟.在文献[12-15]中,采用在接触界面上建立微小的接触点模型的方法实现对接触界面上接触情况的模拟,其中接触点模型主要包括导电桥模型和耦合接触界面模型.文献[14]中并没有考虑多接触点的情况,仅仅用一个导电桥模型实现接触界面的电气连接.文献[15]虽然建立了含有多个均匀分布导电桥的仿真模型,但导电桥的分布规律与实际分布规律不同.因此,这些方法不一定能准确模拟接触界面的电磁损耗真实分布情况.

本文采用圆柱体导电桥模拟避雷线和预绞丝之间的接触点,根据避雷线与预绞丝接触点的空间分布特征构建预绞丝端口三维电磁场仿真模型.基于该仿真模型,分析了预绞丝端口的电磁损耗密度分布.本文还提出基于预绞丝端口稳态温度的仿真计算和实验测量的导电桥半径确定方法,利用预绞丝端口接触电阻测量实验对仿真模型进行验证.除此之外,本文分别讨论了钢的相对磁导率以及绞线绞

合参数对电磁损耗功率分布的影响.

1 避雷线与预绞丝接触端口电磁场仿真模型的建立

1.1 避雷线与预绞丝接触点的空间分布

避雷线与杆塔通过悬垂线夹连接,为了避免线夹处避雷线应力集中导致避雷线磨损疲劳,在工程上往往缠绕一层由多股钢丝绞合而成的预绞丝^[1],如图1所示.为了准确计算出预绞丝端口处表征热源的电磁损耗功率分布,需要建立相应的电磁场仿真模型.在建立模型之前有必要对避雷线与预绞丝之间的接触情况进行分析.

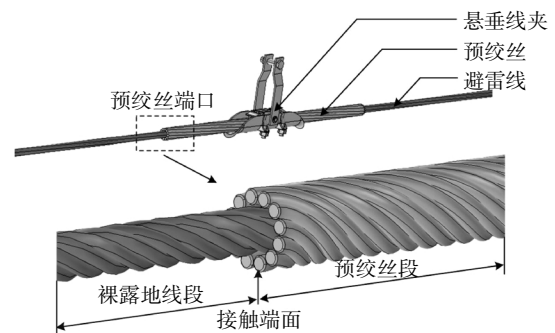


图1 预绞丝端口结构图

Fig.1 Structure diagram of armor rod segment

任意取一节预绞丝段,结合避雷线与预绞丝的结构特点,两者间的接触点位于避雷线最外层与预绞丝层之间股与股的切点上,存在接触点的预绞丝段径向截面如图2中的截面X所示.沿着预绞丝段的轴向方向前移时,因绞线的绞合特性,同一径向截面的不同层将会发生旋转,旋转方向与绞合方向一致,旋转角度则与对应层的捻距成反比.以图2中的截面X为起点,随着预绞丝段的轴向前移,由于实际中的避雷线最外层与预绞丝层捻距不同,避雷线最外层和预绞丝层之间会发生相对位移,将会出现图2中截面Y所示的避雷线最外层和预绞丝无接触点的

过渡阶段,直至下一个存在接触点的预绞丝段径向截面(图2中截面Z)出现。

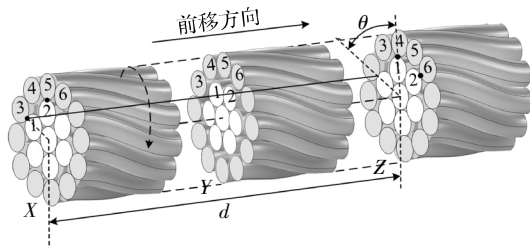


图2 接触点分布的变化过程

Fig.2 Transformation of contact point distribution

对于同一根避雷线和预绞丝而言,避雷线各层和预绞丝层的捻距是固定不变的,结合图2展示的接触点分布的变化过程,任意相邻两个存在接触点的径向截面(如截面X和截面Z)之间的距离 d 是一个固定值。除此之外,同一股避雷线最外层绞线上相邻两个接触点也将对应转过一个恒定的角度 θ 。因此,可以通过与绞线绞合参数相关联的轴向距离 d 以及角度 θ 两个参数表征接触界面的接触点分布特性。其中, d 和 θ 可分别通过式(1)和式(2)计算得到:

$$d = \frac{360/12}{|360/l_1 \pm 360/l_2|} = \frac{l_1 l_2}{12 |l_1 \pm l_2|} \quad (1)$$

$$\theta = 360 \frac{d}{l_{\min}} = \frac{30 l_1 l_2}{|l_1 \pm l_2| l_{\min}} \quad (2)$$

式中: l_1 和 l_2 分别表示避雷线最外层绞线和预绞丝的捻距,m;式(1)和式(2)中分母部分的“+”号表示避雷线最外层绞线和预绞丝绞合方向相反的情况,而“-”号则表示绞合方向相同的情况; l_{\min} 表示 l_1 和 l_2 中的最小值,即

$$l_{\min} = \min(l_1, l_2) \quad (3)$$

1.2 几何模型的搭建

本文以型号为GJ-50的避雷线与对应型号的预绞丝为研究对象,通过Comsol建立预绞丝端口的电磁场仿真模型,分析预绞丝端口处的电磁损耗密度分布。

本文在建立预绞丝端口的仿真模型时对几何模型进行了一系列的简化,以减少仿真模型几何建模的工作量:利用圆柱体(圆柱体的外径与避雷线的外径相等)替代绞线形态的避雷线,利用圆管(圆管的内径比避雷线的外径大 $2h$,而圆管的外径与预绞丝的外径相等)替代绞线形态的预绞丝^[6]。

对于避雷线与预绞丝之间的接触点,本文采用半径为 r 、高度为 $h=0.1$ mm的圆柱体导电桥进行等

效,不同的接触情况还可通过改变导电桥的半径 r 可模拟^[14]。而对于避雷线与预绞丝之间的非接触部分,则采用空气填充。为了使仿真结果与实际相符,本文还在预绞丝端口周围建立了同轴圆柱体的空气域,并将该空气域设置为无限元域,从而使有限尺寸的区域等效为无限远的区域。图3为预绞丝端口的几何模型。预绞丝端口模型的几何参数如表1所示。

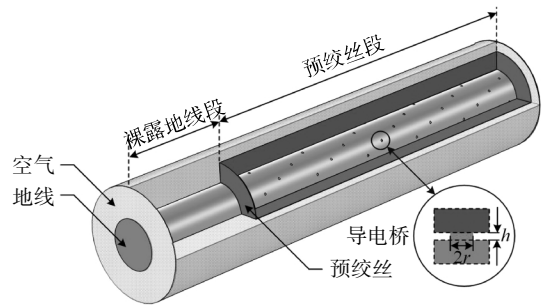


图3 预绞丝端口的几何模型

Fig.3 Geometric model of armor rods segment

表1 模型几何参数

Tab.1 Geometric parameters of the model

模型参数	参数值
避雷线直径/mm	9.0
预绞丝直径/mm	3.6
空气域半径/mm	10
裸露避雷线段轴向长度/mm	20
预绞丝段轴向长度/mm	70

1.3 材料属性与边界条件的设置

在材料属性的设置中,避雷线、预绞丝以及导电桥均为钢。表2为钢的物理参数。其中,不同钢材的相对磁导率由于含碳量差异有所不同^[17]。

表2 钢的物理参数

Tab.2 Physical parameters of steel

物理参数	计算取值
电导率/($S \cdot m^{-1}$)	6×10^6
相对磁导率	300 ~ 4 000
热导率/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	420

电流的集肤效应与相对磁导率息息相关,作为衡量集肤效应的一个重要参数,集肤深度 D 可通过式(4)计算得到:

$$D = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_r \mu_0 \gamma}} \quad (4)$$

式中: D 为集肤深度, m ; f 为交流频率,取 50 Hz ; μ_r 为钢的相对磁导率; μ_0 为真空磁导率, H/m ; γ 为钢的电导率, S/m .

图 4 展示了不同电流类型流经同一钢绞线时电流径向分布示意图. 对于同一钢绞线,相同长度钢绞线的交流电阻和直流电阻比值满足式(5):

$$k = \frac{R_1}{R_z} = \frac{S_z}{S_j} = \frac{L^2}{L^2 - (L - D)^2} \quad (5)$$

式中: k 为避雷线的交流电阻与直流电阻的比值; R_z 为直流电阻, Ω ; R_1 为交流电阻, Ω ; S_z 为直流电流流经地线的等效截面积, m^2 ; S_j 为交流电流流经绞线的等效截面积, m^2 ; L 为绞线半径, m .

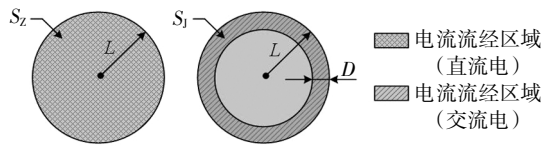


图 4 电流径向分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of radial distribution of current

结合式(4)和式(5),实际避雷线的相对磁导率可通过式(6)计算得到:

$$\mu_r = \frac{k}{\pi f \gamma \mu_0 r^2 (\sqrt{k} - \sqrt{k-1})^2} \quad (6)$$

图 5 为预绞丝端口仿真模型的边界条件加载方式. 在图 5 中,将边界 S_1 (裸露避雷线段端面)、边界 S_2 (预绞丝段端面)分别设置为电流终端、接地端. 本文通过改变电流终端的电流大小来模拟预绞丝端口不同的运行工况. 为了便于下文对电磁损耗进行分析,本文按距离电流终端面的远近对各排接触点进行排序(1,2,3,...,n),并取裸露避雷线表面作为参照(0),如图 5 所示.

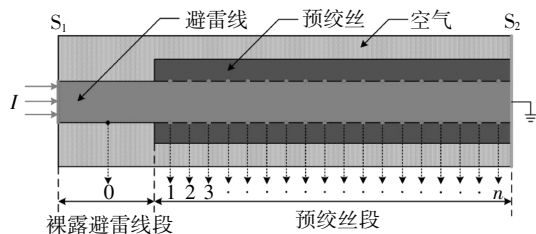


图 5 边界条件的加载

Fig.5 Loading of boundary conditions

1.4 仿真结果与分析

基于预绞丝端口的三维电磁场仿真模型,以 100 A 的工频电流为例进行仿真计算,分析预绞丝端口处的电磁损耗密度分布情况. 其中,导电桥的半径设置为 0.2 mm ,钢的相对磁导率取 $1\ 000$. 图 6 为预绞

丝端口的电磁损耗密度分布.

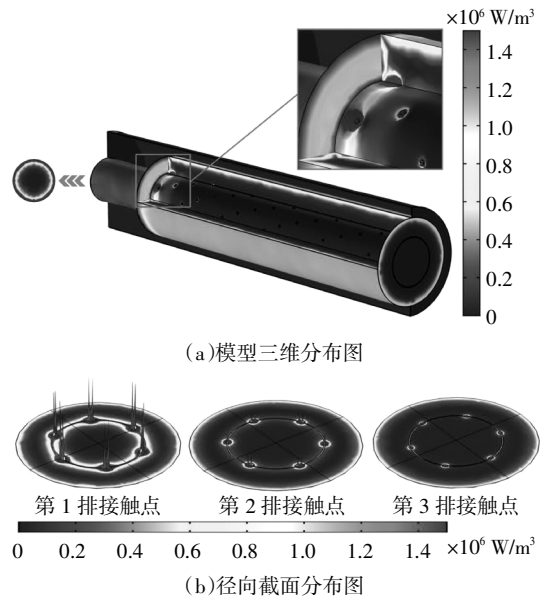


图 6 预绞丝端口的电磁损耗密度分布

Fig.6 Electromagnetic losses density distribution of armor rods segment

从图 6(a)中可以看出,裸露避雷线段的电磁损耗主要集中于避雷线外表面,而预绞丝段的电磁损耗主要集中于预绞丝与避雷线之间的接触点以及预绞丝外表面. 电磁损耗密度与电流密度大小息息相关,电磁损耗密度随着电流密度增加而增大. 因此,电流的集肤效应将进一步加剧电磁能量的损耗. 当电流流经裸露避雷线段时,避雷线中的电流由于集肤效应将沿着外表面流通,电磁损耗密度由外至内逐步衰减. 当电流流经预绞丝段时,预绞丝与避雷线之间的接触点为电流扩散至预绞丝外表面提供流通通道,扩散至预绞丝外表面的电流产生一定的电磁损耗. 由于接触点位置的电流相对集中,接触点的电磁损耗显著,且主要集中于预绞丝端面附近.

图 6(b)展示了预绞丝端口前 3 排接触点所在径向截面的电磁损耗密度分布状况. 对于前几排接触点所在径向截面,接触点的电磁损耗密度远大于同一径向截面其他位置. 同时,接触点的电磁损耗密度随着各排接触点序号的增加逐步下降,后几排接触点的电磁损耗甚至低于预绞丝外表面. 图 6(b)还表明了导电桥处电磁损耗密度的“U”型特征,越靠近导电桥两侧,其对应的电磁损耗密度的峰值越大.

为进一步分析预绞丝端口的电磁损耗规律,本文分别对裸露避雷线段的避雷线表面、各排接触点表面的电磁损耗密度进行平均值运算. 图 7 为各排

接触点的电磁损耗柱状图. 由于第1排接触点的平均电磁损耗($1.4 \times 10^6 \text{ W/m}^3$)远大于其他位置. 为避免因不同位置电磁损耗密度差异过大而导致柱状图变化趋势不明显, 纵轴的电磁损耗密度采用自然对数形式表示.

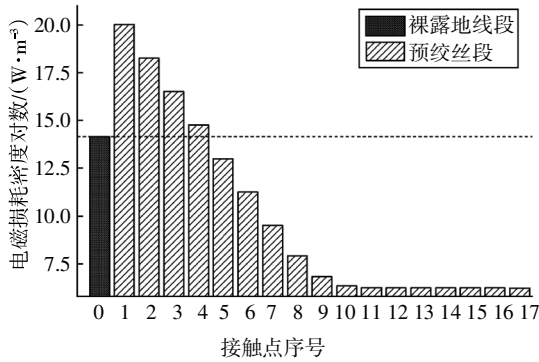


图7 各排接触点的电磁损耗密度对数

Fig.7 Logarithm of electromagnetic losses density of each group of contacts

由于电流的扩散具有一定的范围, 电磁损耗的衰减同样发生在一定的范围内, 即预绞丝段第1排至第9排接触点之间(轴向长度约33.22 mm). 当超过该段范围, 接触点的电磁损耗密度趋于稳定. 对于预绞丝端口, 预绞丝段前4排接触点是电磁损耗的主要来源, 其电磁损耗密度均高于裸露避雷线段.

2 实验验证

2.1 导电桥半径确定

改变导电桥的半径可以模拟预绞丝与避雷线之间不同的接触状态. 而对上述电磁场模型进行验证之前, 首先要确定导电桥半径. 在本节中, 设计预绞丝端口的温升实验, 同时对预绞丝端口的稳态温度进行仿真计算. 基于预绞丝端口稳态温度的计算结果和仿真结果, 提出导电桥半径的确定方法.

基于GJ-50避雷线的预绞丝端口温升实验的设计和实施通过电流温升平台^[18]实现. 在预绞丝端口处一共设置3个测温点, 分别是裸露避雷线段距离接触端面20 mm的表面(图8的点 M_1)、接触端面(图8的点 M_2)和预绞丝段距离接触端面70 mm的表面(图8的点 M_3). 在实验过程中, 利用已经校正过的热电偶(平均测量误差小于0.1 °C)测量各测温点的温度数据. 所有的热电偶连接到温度无纸记录仪对所采集的数据进行处理和记录. 实验共进行3组, 对预绞丝端口所在回路分别施加55 A、68 A、76

A的工频电流, 加载时间为40 min, 以确保预绞丝端口的温度达到稳态.

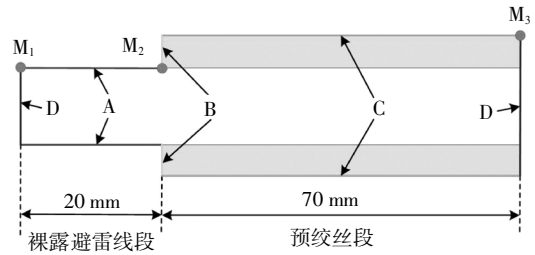


图8 温度测量点的布置

Fig.8 Arrangement of temperature measurement points

接下来建立与电磁场相耦合的预绞丝端口稳态温度场的三维仿真模型, 对预绞丝端口处接触端面的稳态温度进行计算. 温度场中预绞丝端口几何模型与电磁场一致. 在电磁场仿真模型中计算得到的电磁损耗功率则作为温度场的热源, 并且考虑温度系数的影响, 如式(7)所示.

$$P_T = P_{20} [1 + \alpha(T - 20)] \quad (7)$$

式中: P_T 为 T 温度下的热源功率, W/m^3 ; α 为钢的温度系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; T 为导体温度, $^{\circ}\text{C}$; P_{20} 为 20°C 下的热源功率, W/m^3 , 即电磁场模型输出的电磁损耗功率. 而在温度场中预绞丝端口与外界环境的对流散热则通过设置热边界条件进行等效模拟. 具体的热边界条件结合图8进行说明:

1) 边界A和C属于水平边界, 在Comsol中分别输入裸露避雷线段和预绞丝段的直径以及环境温度即可设置表面对流传热系数 h_A 和 h_C .

2) 边界B属于垂直边界, 在Comsol中输入垂直高度和环境温度即可设置表面对流传热系数 h_B .

3) 边界D设置为第一类热边界条件, 即边界D的温度. 温度的数值来源于测量点 M_1 和 M_3 的稳态温度实验值.

结合所建立的与电磁场相耦合的稳态温度场仿真模型, 计算基于导电桥半径 r 下的预绞丝端口处接触端面的稳态温度 T_a . 当 T_a 与接触端面的稳态温度实验值 T_b 之间的相对误差小于2%时, 如式(8)所示, 可认为 r 是使预绞丝端口温度场仿真模型中温度分布和真实情况相一致的导电桥半径.

$$\left| \frac{T_a - T_b}{T_b} \right| < 2\% \quad (8)$$

基于稳态温升实验中实测的 T_b , 不断调整导电桥半径 r 从而使温度场仿真模型中 T_a 的计算结果满足式(8), 即可得到不同负荷下对应的导电桥半径, 如表3所示. 从表3的结果可以看出, 不同负荷下计

算得到的导电桥半径 r 几乎相同.

表 3 不同负荷下的导电桥半径

Tab.3 Conductive bridge radius under different loads

负荷/A	$T_a/^\circ\text{C}$	$T_b/^\circ\text{C}$	温度相对误差/%	导电桥半径/mm
55	66.9	66.1	1.2	0.028
68	75.2	74.0	1.6	0.030
76	86.8	85.5	1.5	0.029

2.2 模型验证

由于无法通过实验直接测量得到预绞丝端口的电磁损耗功率,因此,本文通过测量与电磁场仿真模型相同轴向长度的预绞丝端口的接触电阻,对模型进行间接验证.如果直接采用常规的直流电桥测量法对其接触电阻进行测量,则预绞丝端口内不会出现集肤效应现象,从而导致测量过程中预绞丝端口中电流密度分布和工频电流作用下的电流密度分布不同,测量得到的电阻结果存在较大的误差.因此,本文采用基于大电流的交流电压降法和直流电桥测量法相结合的方式,实现对其接触电阻的测量,实验测量系统如图 9 所示.

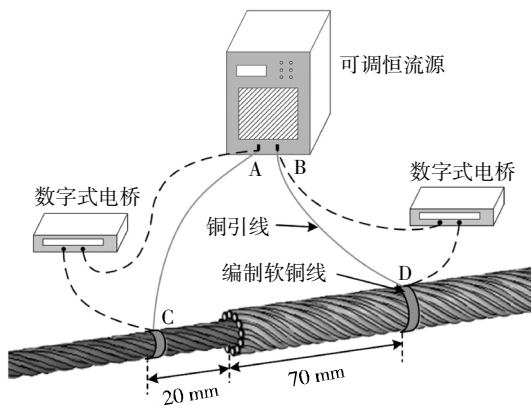


图 9 预绞丝端口接触电阻实验测量系统

Fig.9 System of contact resistance measurement experiment for the armor rod segment

在图 9 中,两条恒流源的铜引线通过编制软铜线与预绞丝端口相连接.为了保证实验测量对象与电磁场仿真模型的接触电阻对应部分相一致,编制软铜线分别缠绕在裸露避雷线段距离接触端面 20 mm 处(点 C)以及预绞丝段距离接触端面 70 mm 处(点 D).恒流源为预绞丝端口所在的回路提供恒定的工频电流,并且可以测量得到恒流源输出端(即图 9 中 A、B 两端)的交流电流 I 、交流电压 U 和功率因数 $\cos \varphi$.实验时为了避免因回路总阻抗过小而导致电压测量精度达不到要求,设定恒流源输出的工频

交流电流为 75 A.本文提出的预绞丝端口交流接触电阻的测量方法具体步骤如下:

1)基于恒流源中所测量得到的参数,通过式(9)计算 A、B 两端的总交流电阻 R .其中,总交流电阻 R 包括三部分:预绞丝端口的交流接触电阻 R_{CD} 以及两条铜引线和编制软铜线的交流电阻 R_{AC} 、 R_{BD} .

$$R = \frac{U}{I} \cos \varphi \tag{9}$$

2)由于铜引线和编制软铜线的材料铜为非铁磁材料,铜引线和编制软铜线的交流电阻与直流电阻之间差异很小.因此,利用数字式电桥(PC36C,精度为 $0.01 \mu\Omega$) 分别测量图 9 中 A、C 两端和 B、D 两端的直流电阻,进而近似代替 R_{AC} 、 R_{BD} .

3)结合上述实验测量结果,通过式(10)可计算得到预绞丝端口的交流接触电阻 R_{CD} .

$$R_{CD} = R - R_{AC} - R_{BD} \tag{10}$$

将预绞丝端口交流接触电阻的实验值与仿真值进行对比,如表 4 所示.在预绞丝端口的电磁场仿真模型中,交流接触电阻由导电桥半径决定.而导电桥半径的确定又是基于预绞丝端口内稳态温度实验值与仿真值的误差.因此,确定导电桥半径所引起的误差必然会累积到交流接触电阻的计算误差中.在表 4 中实验值和仿真值的对比结果表明,所建立的预绞丝端口电磁场仿真模型具有足够的准确性,可以用于实际计算和分析.

表 4 预绞丝端口接触电阻的仿真和实验结果对比

Tab.4 Comparisons between experimental and calculated results of contact resistance for armor rod segment

负荷/A	导电桥半径/mm	电阻实验值/ $\mu\Omega$	电阻仿真值/ $\mu\Omega$	相对误差/%
55	0.028	945.3	1 017.7	7.7
68	0.030	945.3	987.2	4.4
76	0.029	945.3	1 003.6	6.2

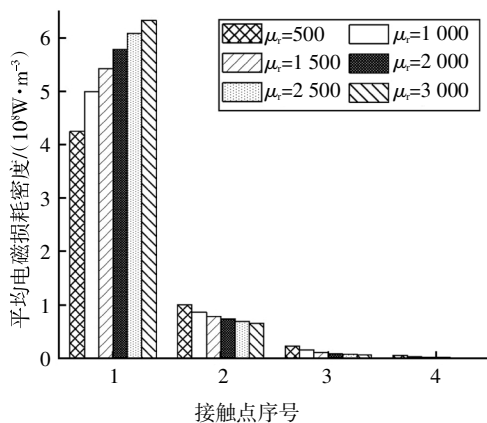
3 预绞丝端口电磁损耗的影响因素分析

预绞丝端口的电磁损耗密度分布与电流密度分布息息相关.电流密度分布又受集肤效应以及接触点分布规律的影响.对于预绞丝端口,在工频电流的作用下,集肤效应取决于材料钢的相对磁导率.而接触点的分布规律则与避雷线和预绞丝的绞合方向和节距相关.因此,本节将分别讨论钢的相对磁导率以及绞线绞合参数对电磁损耗功率分布的影响.

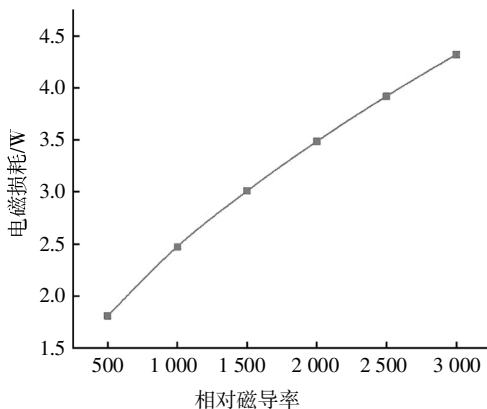
3.1 钢的相对磁导率对电磁损耗的影响分析

为了探究钢的相对磁导率与预绞丝端口电磁损耗之间的关系,本文基于预绞丝端口的三维电磁场仿真模型,分别将钢的相对磁导率 μ_r 设置为500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000进行仿真计算。

由于预绞丝段前4排接触点是电磁损耗的主要来源,本文仅对不同相对磁导率下预绞丝段前4排接触点的电磁损耗分布进行计算,如图10(a)所示。从图10(a)中可以看出,相对磁导率的大小差异对第1排接触点的电磁损耗密度影响较为显著。当相对磁导率较大时,电流的集肤效应愈加明显。此时,更多的电流将通过第1排接触点从避雷线扩散至预绞丝,第1排接触点的平均电磁损耗密度比相对磁导率较小时大。这也导致更小的电流流经余下的接触点,其余接触点的平均电磁损耗密度比相对磁导率较小时小。因此,预绞丝端口各排接触点电磁损耗密度的衰减幅度随着相对磁导率的增加而增大。



(a)不同磁导率下接触点平均电磁损耗密度($d=4.13 \text{ mm}$, $\theta=18.57^\circ$)



(b)不同磁导率下电磁损耗曲线($d=4.13 \text{ mm}$, $\theta=18.57^\circ$)

图10 不同磁导率下预绞丝端口的电磁损耗

Fig.10 Electromagnetic losses of armor rods segment under different permeability

同时,本文还对整个预绞丝端口的电磁损耗密

度进行体积分运算,所得结果如图10(b)所示。由图10(b)可知,在同一激励电流作用下,预绞丝端口的电磁损耗与钢的相对磁导率呈正相关。

3.2 绞线绞合参数对电磁损耗的影响分析

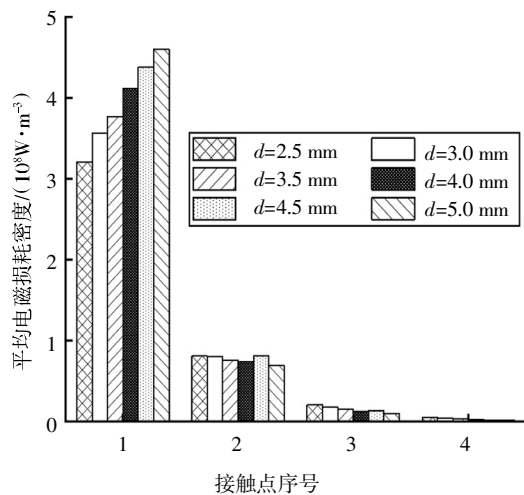
根据1.1节中避雷线与预绞丝接触点的空间分布分析可知,接触点的分布规律取决于绞线的绞合方向和节距,可用相邻导电桥间的轴向距离 d 和旋转角度 θ 这两个绞线绞合参数进行表征。因此,为了进一步探究绞线绞合参数与预绞丝端口电磁损耗之间的关系,本文基于预绞丝端口的三维电磁场仿真模型,分别调整相邻导电桥间的轴向距离 d 和旋转角度 θ 进行仿真计算。其中,相邻导电桥间的轴向距离 d 分别取2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 mm,而旋转角度 θ 分别取 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 。图11为不同绞线绞合参数下预绞丝端口的电磁损耗情况。

相邻导电桥间的轴向距离对各排接触点的电磁损耗密度影响效果与3.1节中相对磁导率对各排接触点的电磁损耗密度影响效果相近,如图11(a)所示。相邻导电桥间的轴向距离不同,将导致同样长度的预绞丝段所存在的接触点数目存在差异。当相邻导电桥间的轴向距离较大时,预绞丝端口的接触点分布较为稀疏,此时预绞丝端口第1排导电桥将作为更多的电流扩散通道,从而导致该处的电磁损耗密度较大。

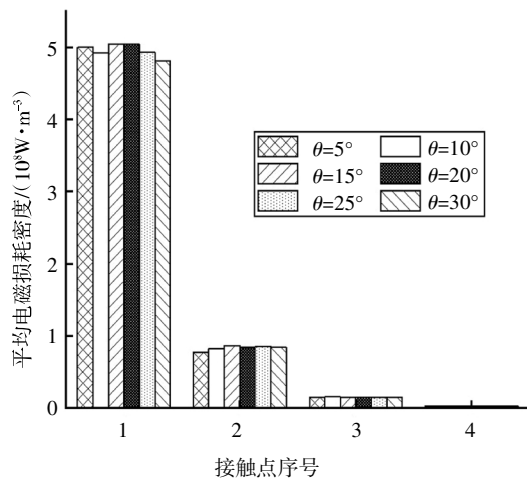
相邻导电桥间的不同旋转并没有从根本上改变架空地线与预绞丝之间的接触状态,在轴向位置上二者间接触点数量不变。此时,不同旋转角度下电流的扩散效果一致,故相邻导电桥间的不同旋转角度 θ 对各排接触点电磁损耗密度分布几乎没有影响,如图11(b)所示。

图11(c)展示了不同绞线绞合参数下整个预绞丝端口的电磁损耗密度的体积分运算结果。不难看出,在同一激励电流作用下,相邻导电桥间的轴向距离 d 与预绞丝端口的电磁损耗呈正相关,相邻导电桥间的旋转角度 θ 的改变几乎不会产生影响。因此,可以利用相邻导电桥间的轴向距离 d 来研究绞线的绞合方向和节距对电磁损耗的影响。

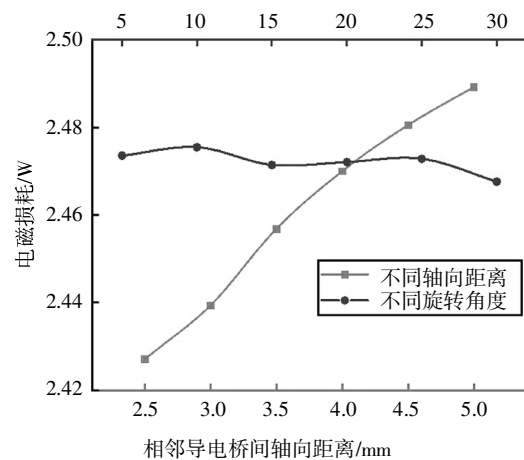
由于工频短路电流的作用时间短,散热可以忽略不计,此时电磁损耗所产生的热量将全部用于接触端口的温升。故当相对磁导率 μ_r 和相邻导电桥间的轴向距离 d 较大时,预绞丝端口电磁损耗较大,端口处发热严重,容易因高温导致机械性能骤降,从而造成损伤。



(a)不同轴向距离下接触点平均电磁损耗密度 ($\mu_r = 1\ 000, \theta = 20^\circ$)



(b)不同旋转角度下接触点平均电磁损耗密度 ($d = 4.13\ mm, \mu_r = 1\ 000$)
旋转角度/ $^\circ$



(c)不同绞线绞合参数下电磁损耗曲线

图 11 不同绞线绞合参数下预绞丝端口的电磁损耗

Fig.11 Electromagnetic losses of armor rods segment under different twisting parameters of stranded wires

4 结 论

本文采用圆柱体导电桥模拟避雷线和预绞丝之间的导电接触点, 基于避雷线与预绞丝之间接触点的空间分布特征构建了避雷线预绞丝端口的三维电磁场仿真模型, 通过仿真计算得到预绞丝端口附近的电磁损耗密度分布, 并分析了钢的相对磁导率和绞线绞合参数对预绞丝端口电磁损耗的影响, 最终得到以下结论:

1) 裸露避雷线段的电磁损耗主要集中于避雷线外表面, 而预绞丝段的电磁损耗主要集中于预绞丝与避雷线之间的接触点以及预绞丝外表面. 各排接触点的电磁损耗密度随着轴向距离的增加逐步下降, 具有一定的衰减范围.

2) 本文提出了基于预绞丝端口稳态温度的仿真计算和实验测量的导电桥半径确定方法, 以计算值与测量值之间的误差作为判据. 通过测量预绞丝端口的接触电阻间接验证预绞丝端口电磁场仿真模型具有足够的准确性(误差没有超过 8%), 可用于实际分析.

3) 在同一激励电流作用下, 钢的相对磁导率、相邻导电桥间的轴向距离均与预绞丝端口的电磁损耗呈正相关, 相邻导电桥间的旋转角度的改变几乎不会对电磁损耗产生影响. 在实际工程当中, 可通过控制钢的相对磁导率以及相邻导电桥间的轴向距离以降低预绞丝端口的电磁损耗, 减少工频短路电流流经避雷线预绞丝端口所产生的热量.

参考文献

[1] KONG W, CHENG Y J. Measures of introduction and look forward to prevent breeze vibration of overhead power transmission lines[C] //2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Jilin: IEEE, 2011: 2299—2301.

[2] 邹国林, 从怀贤, 吕泉根. 我国架空输电线路金具技术发展及应用[J]. 电力工程技术, 2012, 31(6): 82—84.

ZOU G L, CONG H X, LÜ Q G. Development and application of Chinese overhead transmission line fitting technology [J]. Electric Power Engineering Technology, 2012, 31(6): 82—84. (In Chinese)

[3] 王刚, 杜志叶. 接触电阻计算新方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(8): 117—123.

WANG G, DU Z Y. The new method for calculating contact resistance [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),

- 2017,44(8):117—123. (In Chinese)
- [4] 王海燕,郭德明,刘刚,等. 基于有限元分析的架空地线与预绞丝接触端面暂态温升计算 [J]. 广东电力,2018,31(12):106—112.
WANG H Y, GUO D M, LIU G, *et al.* Temperature rise calculation of contact surface between overhead ground wire and armor rod based on finite element analysis [J]. Guangdong Electric Power, 2018,31(12):106—112. (In Chinese)
- [5] IWATA M, OHTAKA T, GODA Y. Melting and breaking of 80 mm² OPGWs by DC arc discharge simulating lightning strike [C]// 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). Estoril, Portugal: IEEE, 2016:25—30.
- [6] 刘红军,周佳林,赵亚新. 基于断线作用的输电塔线体系动力效应影响分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(3):62—71.
LIU H J, ZHOU J L, ZHAO Y X. Analysis on dynamic effect of transmission line system based on wire breakage [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018,45 (3):62—71. (In Chinese)
- [7] HOLM R. Electrical contacts [M]. 4th ed. New York: Springer, 1979:9—16.
- [8] KOGUT L, KOMVOPIULOS K. Electrical contact resistance theory for conductive rough surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 2003,94:3153—3162.
- [9] LAOR A, HERRELL P J, MAYER M. A study on measuring contact resistance of ball bonds on thin metallization [J]. IEEE Transaction on Components, Packaging, Manufacturing Technology, 2015, 5: 704—708.
- [10] DHOTRE M T, KORBEL J, YE X, *et al.* CFD simulation of temperature rise in high-voltage circuit breakers [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2017,32:2530—2536.
- [11] 曾嵘,周佩朋,王森,等. 接地系统中接触电阻的仿真模型及其影响因素分析[J]. 高电压技术,2010,36(10):2393—2397.
ZENG R, ZHOU P P, WANG S, *et al.* Modeling of contact resistance in ground system and analysis on its influencing factors [J]. High Voltage Engineering, 2010,36(10):2393—2397. (In Chinese)
- [12] 纽春萍,强若辰,荣命哲,等. 弹簧触指的稳态温升仿真与实验研究[J]. 高压电器,2015,51(3):8—14.
NIU C P, QIANG R C, RONG M Z, *et al.* Simulation and experimental research on temperature rise of spring contact in steady state [J]. High Voltage Apparatus, 2015,51 (3):8—14. (In Chinese)
- [13] LI X W, QU J Y, WANG Q, *et al.* Numerical and experimental study of the short-time withstand current capability for air circuit breaker [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2013,28:2610—2615.
- [14] 李兴文,陈德桂,向洪岗,等. 低压塑壳断路器中电动斥力的三维有限元非线性分析与实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004,24(2):150—155.
LI X W, CHEN D G, XIANG H G, *et al.* 3-D finite element nonlinear analysis and experimental investigation of electro-dynamic repulsion force in molded case circuit breakers [J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(2):150—155. (In Chinese)
- [15] KAWASE Y, MORI H, ITO S. 3-D finite element analysis of electrodynamic repulsion forces in stationary electric contacts taking into account asymmetric shape (invited)[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1997,33:1994—1999.
- [16] DE PAULIS F, OLIVIERI C, ORLANDI A, *et al.* Exploring remote monitoring of degraded compression and bolted joints in HV power transmission lines [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2016,31(5):2179—2187.
- [17] LIU G, PENG X Y, ZHONG M S. A case study of ruptures in overhead ground wire under a large lightning over 400 kA [J]. Engineering Failure Analysis, 2019,104:1211—1233.
- [18] 刘刚,周凡,刘毅刚. 高压单芯电缆铝护套下热阻的动态特性与实验研究[J]. 高电压技术,2013,39(3):712—718.
LIU G, ZHOU F, LIU Y G. Dynamic characteristic and experimental study on thermal resistance in aluminum sheath of high voltage single-core cable [J]. High Voltage Engineering, 2013,39(3): 712—718. (In Chinese)