

斜圈弹簧触头接触特性与烧熔机理研究

马永福, 包正红, 任继云, 王理丽, 王志惠, 陈 尧
(国网青海省电力公司电力科学研究院, 西宁 810001)

摘要: 斜圈弹簧触头烧熔的故障频发, 对电力行业安全生产造成了较大影响。文中介绍两起 GIS 母线斜圈弹簧触头烧熔故障, 通过解体检查与检测分析, 发现故障前触头座和导体间存在偏心受力, 据此开展了基于电接触理论的触头接触特性和温升分布规律研究, 并搭建电—力—热多物理场耦合仿真模型进行了量化计算。结果表明, 正常运行状态下触头整体温升较低且分布均匀, 最大温差仅为 0.9 K; 长期运行后触头座与导体间出现偏心受力, 触头整体温升增加, 弹簧正下方因导热面积小而积聚热量, 局部温升高达 368.4 K, 最终造成触头烧熔。提出触头结构改进措施并经实践验证, 进一步得到了弹簧圈只能通流不能承重的关键结论。研究结果对斜圈弹簧触头异常发热机理分析及触头结构优化设计提供技术参考。

关键词: 斜圈弹簧; 触头烧熔; 接触电阻; 温升; 有限元仿真; GIS 母线

Study on Contact Characteristics and Melting Mechanism of Inclined Coil Spring Contact

MA Yongfu, BAO Zhenghong, REN Jiyun, WANG Lili, WANG Zhihui, CHEN Yao
(State Grid Qinghai Electric Power Research Institute, Xining 810001, China)

Abstract: The burning fault of the inclined coil spring contact occurs frequently, which has a great impact on the safety production of the power industry. This paper introduces two GIS bus inclined coil spring contact melting faults. Through disassembly inspection and detection analysis, it is found that there is an eccentric force between the contact seat and the conductor before the fault. Based on this, the distribution law of contact characteristics and temperature rise of the contact is studied based on the electrical contact theory, and the electrical mechanical thermal multi physical field coupling simulation model is built for quantitative calculation. The results show that the overall temperature rise of the contact under normal operation is low and evenly distributed, and the maximum temperature difference is only 0.9 K; After long-term operation, there is eccentric force between the contact seat and the conductor, the overall temperature rise of the contact increases, the heat under the spring accumulates due to the small heat conduction area, and the local temperature rise reaches 368.4 K, which will cause the contact to burn. The improvement measures of contact structure are put forward and verified by practice, and the key conclusion that the spring contact finger can only carry current but not load is further obtained. The research results provide technical reference for the analysis of the abnormal heating mechanism of the inclined coil spring contact and the optimal design of the contact structure.

Key words: inclined coil spring; contact melting; contact resistance; temperature rise; finite element simulation; GIS bus

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)因具有占地面积小、运行可靠性高、安装维护方便等优点, 在电力系统中应用广泛^[1]。GIS 触头过热故障时有发生, 严重威胁了电网的安全运行^[2-3]。GIS 母线使用的触头结构包括梅花触

头、表带触头和斜圈弹簧触头等, 其中, 斜圈弹簧触头因具有结构简单、对触头座和导体的加工精度要求低、导电性好等特点, 逐渐成为主流结构^[4-5]。母线触头长期工作在复杂的环境下, 受到电、热、力的共同作用, 加上 SF₆ 气体隔热性能好、GIS 密封性强等特点, 设备内部散热条件不佳, 运行中出现的导体异常发热缺陷, 无法在第一时间被运检人

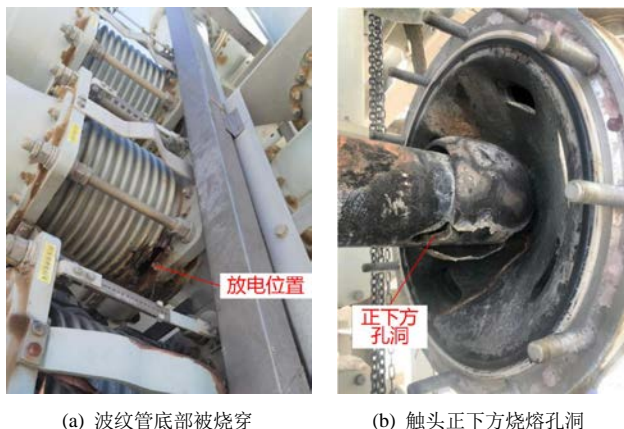
员发现，长期过热会导致绝缘气体被分解，严重时可能造成触头烧熔、放电，导致设备故障^[6]。

局部剧烈温升是导致触头发生诸多故障的重要原因^[7]，目前国内外对斜圈弹簧触头温升的影响因素已有相关研究，包括母线通流^[8]、分解气体成分^[9]、接触状态^[10-11]等。母线斜圈弹簧触头面临弹簧丝形变量大、周向接触电阻不均匀等问题，使弹簧圈温升差异较大，导致弹簧圈热故障频繁^[12-13]。

文中以两起 GIS 母线斜圈弹簧触头烧熔故障为例，通过现场检查检测、结构分析、理论推导、仿真计算等方式，对触头的运行状态、弹簧圈电接触和温升特性进行研究，得到了触头烧熔机理和改进措施，结果对触头烧熔故障原因分析以及优化触头结构设计具有借鉴意义。

1 故障概况

某 330 kV GIS 母线额定电流为 4 000 A，2013 年 6 月投运，两段导体间采用斜圈弹簧触头连接。2021 年 7 月 27 日和 2022 年 7 月 15 日，该母线 B 相 2 气室和 4 气室分别发生一起放电故障，解体检查发现故障现象均为触头与导体连接部位高温烧熔，触头座和导体正下方均被烧出孔洞，故障的直接原因为触头熔化的铝液在滴落过程中引起放电，两起故障情况见图 1、2。



(a) 波纹管底部被烧穿 (b) 触头正下方烧熔孔洞

图 1 2021 年故障情况

Fig. 1 Fault situation in 2021



(a) 触头正下方烧熔孔洞 (b) 触头正上方状态

图 2 2022 年故障情况

Fig. 2 Fault situation in 2022

2 检查与分析

2.1 触头结构

触头实物图见图 3，触头座为铝合金空心结构，表面有三条斜圈弹簧用以通流，端部有绝缘导向套用以引导导体插入对接，插入后导体内壁与三条弹簧接触，从而实现通流和相对滑动。

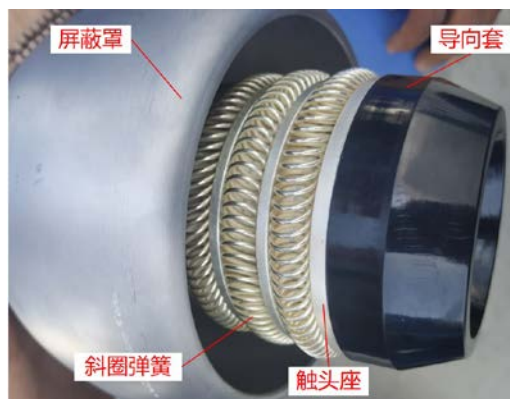
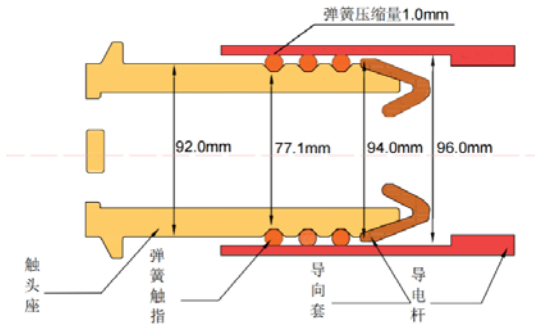


图 3 斜圈弹簧触头实物图

Fig. 3 Inclined coil spring contact

触头座外径为 92.0 mm，导向套外径为 94.0 mm，导体内径为 96.0 mm，弹簧圈安装在弹簧槽后自由状态下的外径为 98.0 mm。当导体插入触头后，假设不考虑导体重力，则触头座、弹簧和导体同心，得到弹簧圈单边压缩量为 1.0 mm，导向套与导体内壁间的单边配合间隙为 1.0 mm，见图 4。



(此处多了一行空白)

图4 弹簧触头结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of spring contact structure

实际运行时必须考虑导体重力，实测导体将正上方弹簧圈继续下压(0.3~0.5) mm，正下方弹簧圈释放(0.3~0.5) mm，最终正上方弹簧圈压缩量为(1.3~1.5) mm、正下方弹簧圈压缩量为(0.5~0.7) mm，其余弹簧圈压缩量在(0.5~1.5) mm 之间，最终由弹簧承担导体重力，导体与导向套上沿间距为(0.5~0.7) mm，见图 5。

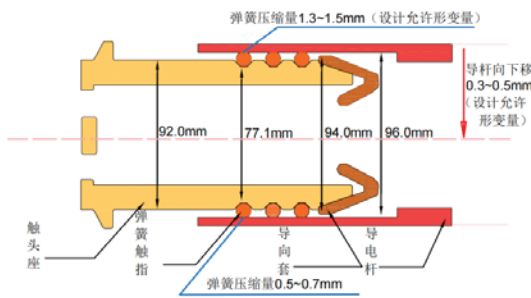


图5 触头正常运行状态示意图

Fig. 5 Schematic diagram of normal operation status of contacts

为保证弹簧整圈接触电阻均匀，弹簧圈压缩量上限为 2.0 mm，下限为 0.5 mm^[14-15]，正常运行情况下压缩量均在上述范围内，即设计压缩范围为(0.5~1.5) mm，该范围内触头温升无异常。

2.2 解体与检测

故障后触头座和导体熔炼成一体，对其切割分离后的形貌见图 6，发现导体与触头座对接面的正上方间隙较小，约为 1 mm，正下方间隙较大，约为 3 mm，推测故障前可能存在导体过度下压弹簧(即触头座和导体间偏心)的情况。



图6 切割分离检查

Fig. 6 Cutting separation inspection

为进一步印证上述推论，对在运非故障触头开展了 X 射线检测，结果发现大部分触头均存在上部间隙小下部间隙大且导体内壁正上方几乎与导向套上沿接触的情况，见图 7，结果与推论一致。由此可以得出：经过近 10 年的运行，正上方弹簧圈已发生永久性塑性形变，弹力不足以支撑导体重力，主要原因是弹簧圈长期受到导体的重力作用，加上运行中热、电磁等影响逐渐蠕变形成^[16]，此时导体重力由导向套承担。

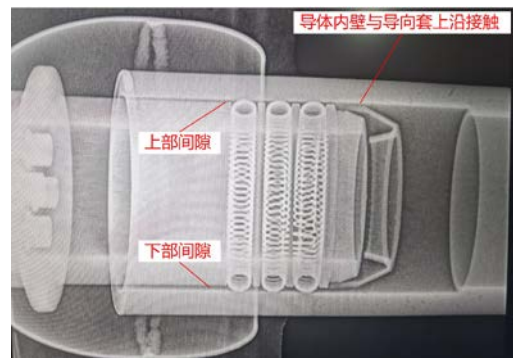


图7 触头接触情况射线影像

Fig. 7 Radiographic images of the contact condition

2.3 故障前触头状态还原

正上方弹簧圈塑性形变后无法支撑导体重力，导体内壁与导向套上沿接触，导体累计下压 1.0 mm，正上方弹簧圈压缩量接近上限值 2.0 mm，正下方弹簧圈压缩量趋近于 0 mm；其余部位压缩量基本保持不变，触头座与导体间已出现偏心受力，见图 8。

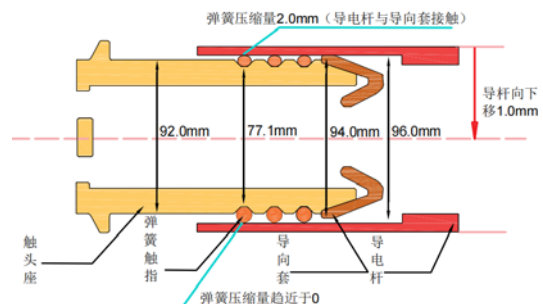


图 8 触头烧熔前状态示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the state of the contact before melting

3 烧熔机理分析

3.1 电接触理论

机加工物体的表面并非是光滑的,其表面是由许多大小不一的微凸体构成,微观上是凹凸不平的,物体之间真正的接触只会发生在一些离散的斑点上。在电接触理论中,两个接触表面相互重叠的面积通常被称为名义或视在接触面积,实际接触面为接触斑点,受接触表面氧化、腐蚀生成的污染膜层影响,尽管在接触斑点内,也只有刺破污染膜层的金属接触区域或金属与导电膜层接触的区域可以有效传导电流,这些区域称为导电斑点或 α 斑点^[17],见图 9。

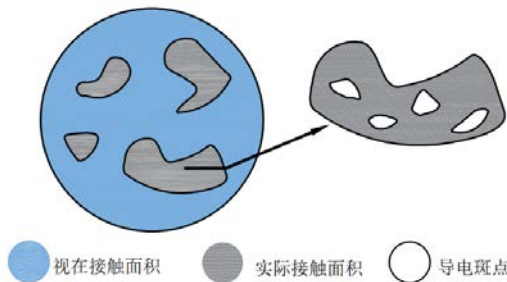


图 9 接触斑点

Fig. 9 Contact spot

因此,当电流通过机加工物体的接触面时,电流只会从导电斑点上流过,此时电流线必然有明显的收缩性,见图 10,使得实际导电面积减小、电流路径增长,从而产生局部附加电阻,此附加电阻称为收缩电阻;由于污染层形成的附加电阻,称为膜电阻;接触电阻就是收缩电阻和膜电阻之和。

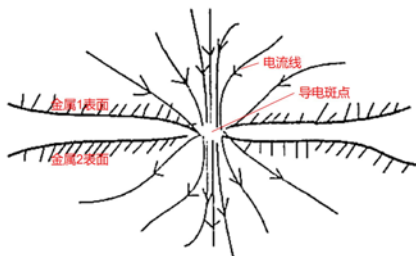


图 10 导电斑点处电流的收缩性

Fig. 10 Shrinkage of current at conductive spot

3.2 触头接触电阻

由于触头座表面、弹簧圈表面和导体内壁均有

镀银层,并且 SF_6 气体化学性质稳定,触头膜电阻影响可以忽略不计,仅考虑收缩电阻部分^[18]。

接触电阻的大小及其稳定性对触头长期工作的温升和故障电流冲击时的热动稳定性有着重大影响,其大小取决于弹簧材料理化特性以及弹簧圈接触压力、接触面状况等特征,单圈簧丝与导体内壁间的接触电阻可用下面的经验公式表达为^[19]

$$R_j = \frac{K_C}{\left(\frac{F_j}{9.8}\right)^m} \quad (1)$$

式(1)中: R_j 为接触电阻, $\mu\Omega$; K_C 为与触点材料和表面加工工艺有关的系数; m 为与接触形式有关的系数; F_j 为接触压力, N。

由式(1)可知,接触电阻大小与簧丝和导体间的接触压力成反比。对于斜圈弹簧触头铜镀银-铝镀银点状接触面,式(1)中的 K_C 取 100, m 取 0.5, 代入得到 R_j 与 F_j 之间的函数曲线见图 11。

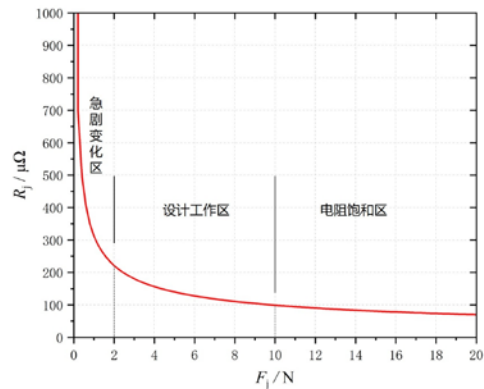


图 11 接触电阻与接触压力 R - F 函数曲线

Fig. 11 R - F function curve of contact resistance and contact pressure

在一定范围内,弹簧接触压力与压缩量之间呈线性关系(胡克定律),根据文[19]研究成果,当该型号弹簧工作在(0.5~1.5) mm 设计压缩范围内时,单圈簧丝接触压力约为(2~10) N。

3.3 触头温升

3.3.1 热量的产生

母线电流流经接触电阻产生的焦耳热使得接触面的温度超过导体和触头座温度,这一现象称为接触温升^[20]。根据文[21-22]的研究成果,母线触头接触温升的表达式为

$$\tau_j = \frac{I^2 R_\Sigma^2}{8LT} = \frac{U_j^2}{8LT} \quad (2)$$

式(2)中: τ_j 为接触温升, K; I 为母线电流, A; R_c 为触头等效接触电阻, $\mu\Omega$; U_j 为接触电阻电压降, V; L 为洛伦兹常数, T 为触头平均温度, K(在进行触头温升定性计算时 T 为常数)。

由式(2)可以看出, 触头温升与接触电阻电压降的平方成正比。

3.3.2 热量的传递

式(2)给出了绝热状态下触头温升的计算方法, 但是在实际计算时还必须考虑热传递(散热), 在触头结构中, 热传递主要以热传导方式进行。与电流的传导一样, 热流在弹簧圈与导体或触头座间传导时也会在接触斑点上出现收缩现象, 由此形成的阻力称为接触热阻, 它与接触面温度、压力、粗糙度等有关, 其中接触压力越大, 接触热阻越小^[23]。

3.4 烧熔机理

3.4.1 产热增大

根据 2.3 节还原的故障前触头状态, 触头正上方弹簧圈压缩量超过设计值(0.5~1.5) mm, 接近上限值 2.0 mm, 正下方弹簧圈压缩量趋近于 0 mm。结合图 11 和胡克定律可以得到: ①当正上方弹簧圈压缩量超过 1.5 mm(对应接触压力 10 N)时, 接触电阻趋于饱和, 随着压缩量增大接触电阻降幅极小; ②当正下方弹簧圈压缩量从 0.5 mm(对应接触压力 2 N)趋近于 0 mm时, 接触电阻将急剧增大至数倍; ③正下方两侧一定角度范围内的弹簧圈接触电阻均会不同程度地增大。

一条弹簧所有弹簧圈接触电阻呈并联关系, 正下方及相邻弹簧圈接触电阻增大时, 会导致触头等效接触电阻整体增大, 在母线电流不发生变化的情况下, 由式(2)可知, 触头温升会以指数关系增大。

3.4.2 烧熔过程

由于正上方弹簧圈与导体和触头座间的接触压力大、有效接触面积大, 因此该部位接触热阻小, 接触电阻产生的热量向导体和触头座热传导快、散热快, 局部温升较小。而正下方弹簧圈恰恰相反, 因此下部局部温升较明显^[24]。温度升高又会造成金属材料电阻率增大和软化, 恶性循环使得触头下部温度不断上升, 最终达到铝合金熔点后在正下方烧熔形成孔洞。

3.5 仿真计算

3.5.1 模型搭建

在有限元软件中等比例构建电-力-热多物理场耦合模型, 见图 12, 其中弹簧圈材料为钴青铜表面

镀银, 触头座及母线导体材料为铝合金表面镀银^[25-26], 设置模型边界条件见表 1。为简化计算, 本次仅考虑半条弹簧(0°~180°)范围, 正上方为 0°, 正下方为 180°, 另一半对称分布。

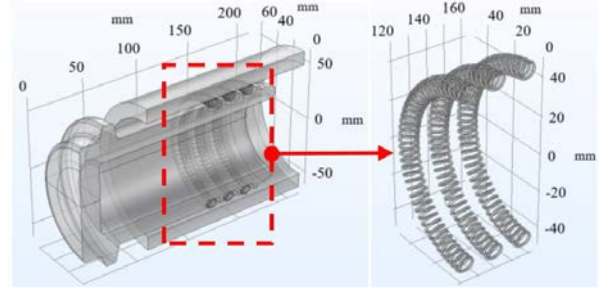


图 12 仿真模型

Fig. 12 Simulation model

表 1 模型边界条件类型

Table 1 Type of model boundary conditions

物理场	接触边界	非接触边界
力场	接触对、预紧力	触头座固定位移、母线与弹簧自由 触头座端部与母线尾部设置电流密度, 其他边界为电绝缘
电场	接触电阻	电绝缘
热场	接触热阻	热传导

在仿真模块中采用 Cooper-Mikic-Yovanovich(CMY)相关性模型等效文中 3.1 节介绍的电接触理论^[27], 该模型是计算接触面收缩电阻与收缩热阻的常用方法:

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

$$\sigma_{\text{contact}} = \frac{2\sigma_u \sigma_d}{\sigma_u + \sigma_d}, \quad k_{\text{contact}} = \frac{2k_u k_d}{k_u + k_d} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{asp}} = \sqrt{\sigma_{\text{asp,u}}^2 + \sigma_{\text{asp,d}}^2}, \quad m_{\text{asp}} = \sqrt{m_{\text{asp,u}}^2 + m_{\text{asp,d}}^2} \quad (5)$$

式(3)-(5)中: h_c 为接触收缩电导率, S/m; σ_{contact} 是接触面电导率的调和平均值; k_{contact} 为接触面热导率调和平均值; σ_{asp} 、 m_{asp} 分别是接触面等效粗糙度和接触表面平均斜率, 其余各参数见表 2。

表 2 物理参数描述

Table 2 Type of model boundary conditions

物理量	参数描述
H_c	接触材料硬度(较软材料)
p_c	接触压力

σ_u 、 σ_d	上下两接触材料电导率
k_u 、 k_d	上下两接触材料热导率
$\sigma_{asp, u}$ 、 $\sigma_{asp, d}$	上下接触表面平均粗糙度
$m_{asp, u}$ 、 $m_{asp, d}$	上下接触表面平均斜率

3.5.2 计算结果

依据实际情况，施加 4 000 A 交流电流：

1)正常运行时，正上方弹簧圈最大压缩量为 1.5 mm，正下方最小压缩量为 0.5 mm，其余压缩量在 (0.5~1.5) mm 之间，弹簧整圈压缩量均在设计值范围内，接触电阻以及等效散热面积相差不大，因此整圈弹簧电流密度及温升分布均匀，见图 13，平均温升为 46.4 K，最大温差仅为 0.9 K。

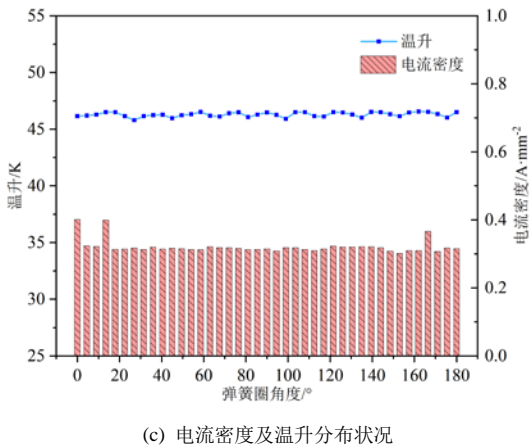
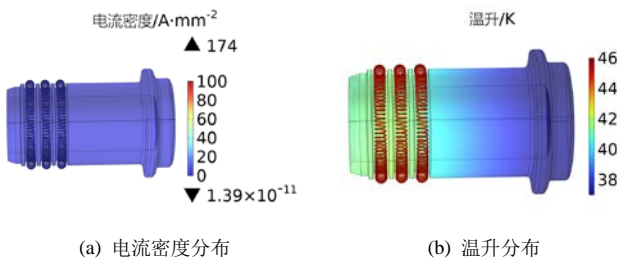
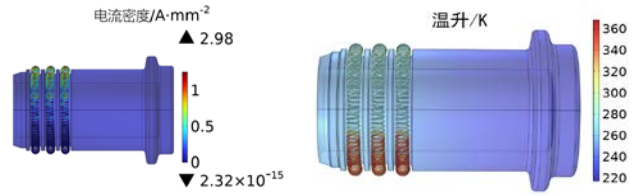


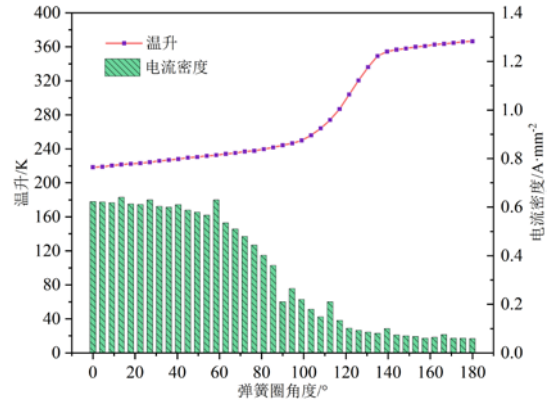
图 13 正常运行时电流密度及温升分布

Fig. 13 Contact current density and temperature rise distribution during normal operation

2)长期运行后，弹簧发生塑性形变，在重力作用下，导体内壁与导向套上沿接触，此时弹簧圈正上方最大压缩量增大至 2.0 mm，正下方趋近于虚接。根据 3.4 节烧熔机理分析结果，此时弹簧圈接触电阻整体增加，从而导致热功率增加。极限情况下，弹簧圈正下方温升高达 368.4 K，最大温差达到 151.1 K，见图 14。长期恶性循环下温升达到铝合金材料的熔点时，会对触头造成不可逆转的热损伤，最终引发烧熔故障。



(a) 电流密度分布 (b) 温升分布



(c) 电流密度及温升分布状况

图 14 触头烧熔前温升分布状况

Fig. 14 Distribution of temperature rise before melting

4 改进措施及验证

根据烧熔机理分析结果，出现烧熔的主要原因是弹簧圈既通流又承受导体重力，长期运行后弹簧弹力下降，不足以支撑导体重力，造成触头接触电阻不均匀而引起异常发热。根据故障机理针对性提出改进措施如下。

4.1 改进触头结构

在原结构中，要求弹簧压缩后必须能够利用弹力支撑导体重力，并且在长期运行过程中持久不变形，这与金属材料的自然老化规律相悖。因此改变思路，用绝缘导向套承担导体重力，弹簧只用来通流，防止出现偏心，确保触头整圈接触电阻的均匀性，该设计在国内多家开关厂的母线触头上应用并且通过了多年的运行考验，技术成熟、经验丰富。

具体措施是：在不改变导体、触头座和弹簧尺寸的前提下，增大绝缘导向套外径，即减小导向套与导体内壁之间的配合间隙。文[19]推荐的单边配合间隙为(0.1~0.2) mm，国内开关厂相同额定电流的母线触头单边平均配合间隙见表 3。

表 3 各开关厂单边平均配合间隙

Table 3 Average unilateral clearance of other factory

开关厂	甲	乙	丙	丁	戊	本文
间隙值	0.5	0.5	0.1	0.1	0.2	1.0

/mm

由表 3 可知,文中触头改进前的间隙值远大于其他厂家,此种情况还会影响触头动稳定性,造成短路电动力作用下导体与触头座间出现大幅径向位移,导致触头出现机械性损坏。需要考虑短路电流过后触头状态检查、大负荷运行期间触头 X 射线检测、日常运行中监测导体与导向套间隙等方面问题。

充分借鉴各厂经验,综合考虑备件加工精度、现场安装难度等,最终确定导向套外径由 94.0 mm 改为 95.2 mm,即导向套与导体内壁之间的单边平均配合间隙由 1.0 mm 改为 0.4 mm,见图 15。

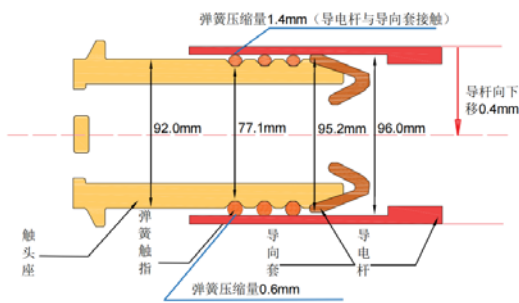


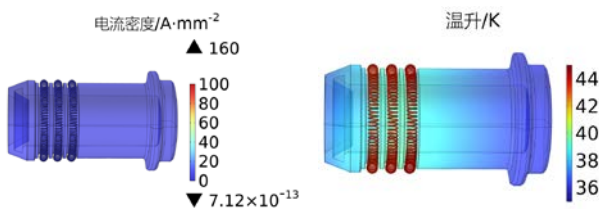
图 15 改进后触头结构

Fig. 15 Improved contact structure

改进后的结构中,导体重力由导向套承担,弹簧整圈压缩量在(0.6~1.4) mm 之间,在考虑极限公差的情况下也能保证接触均匀、稳定、可靠。

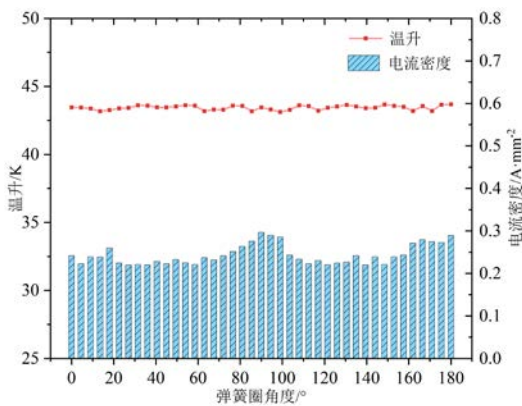
4.2 改进措施可行性计算

考虑长期运行后的最终形态,即在重力作用下导体与导向套上沿接触,其计算结果见图 16。



(a) 电流密度分布

(b) 温升分布



(c) 电流密度及温升分布状况

图 16 改进后电流密度及温升分布

Fig. 16 Improved current density and temperature rise distribution

改进后的弹簧触头在运行过程中,导向套能够为导体提供支撑,减弱了重力作用下弹簧圈的形变程度,使整圈弹簧受力更加均匀,压缩量及其等效接触电阻不产生显著变化,电流密度与温升分布均匀,平均温升仅为 43.7 K,最大温差仅为 0.2 K。计算结果验证了改进措施的可行性。

4.3 改进措施工程验证

采用上述措施对变电站现场同型号在运触头全部进行了改造,在经过 2 年时间的运行后开展 X 射线检测时,发现所有触头状态均完好,工程实际验证了改造措施的有效性。

5 结论

文中结合两起 GIS 母线斜圈弹簧触头烧熔故障,开展了基于电接触理论的触头接触特性与烧熔机理理论与仿真研究,对弹簧触头的运行状态、弹簧圈电接触和温升特性进行分析,得到以下结论:

1)正常运行状态下弹簧整圈接触压力、接触电阻、电流密度及温升分布均匀,触头平均温升仅为 46.4 K,最大温差仅为 0.9 K。

2)长期运行后触头座与导体间出现偏心受力,触头整体接触电阻增大、温升增加,正下方弹簧圈接触压力小、有效导热面积小,极限情况下温升高达 368.4 K,最终积聚热量造成铝材料烧熔。

3)对弹簧触头结构提出改进措施,得到新触头平均温升为 43.7 K,最大温差仅为 0.3 K,通过仿真计算和实际运行双重验证了新结构的有效性。

综上所述,斜圈弹簧触头中的弹簧圈只能用于通流而不能用于承重,必须合理设置导向套或定位杆等结构承担导体重力,防止出现偏心。

参考文献:

[1] 张森林. GIS 接触电阻与温升关系研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
ZHANG Senlin. Study on the relationship between c-ontact resistance and temperature rise of GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[2] LI Q, CONG H, XING J, et al. On-line temperature monitoring of the GIS contacts based on infrared S-ensing

- technology[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2014, 9(4): 1385-1393.
- [3] 郭一帆, 徐志钊, 李先锋, 等. 252 kV GIS 隔离开关温度场仿真及触头温度的预测方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 162-171.
GUO Yifan, XU Zhiniu, LI Xianfeng, et al. Research on temperature field simulation and contact temperature prediction method of 252 kV GIS disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 162-171.
- [4] 黄孟丹, 肖纯, 杨芷宁, 等. GIS 设备发热研究进展[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 24-33.
HUANG Mengdan, XIAO Chun, YANG Zhining, et al. Research progress of GIS equipment heating[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 24-33.
- [5] 王兆军, 谢田桑, 聂二磊. 弹簧触指在 GIS 中的使用[J]. 电气制造, 2013(7): 44-46.
WANG Zhaojun, XIE Tiansang, NIE Erlei. The use of spring finger in GIS[J]. Electrical Manufacturing, 2013(7): 44-46.
- [6] 鲁旭臣, 李爽, 唐佳能, 等. 550 kV GIS 内触头发热故障诊断方法与影响因素研究[J]. 高压电器, 2021, 57(11): 220-226.
LU Xuchen, LI Shuang, TANG Jianeng, et al. Study on diagnosis method and influence factor of overheating of contacts in 550 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 220-226.
- [7] 路亚娟, 李梦娜, 雪金海, 等. 弹簧触指镀银后线径变细事故分析与处理[J]. 现代商贸工业, 2016(25): 189-190.
LU Yajuan, LI Mengna, XUE Jinhai, et al. Analysis and treatment of wire diameter reduction accident after Silver plating on spring contact fingers[J]. Modern Business Trade Industry, 2016(25): 189-190.
- [8] 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 Chunping, QIANG Ruochen, RONG Mingzhe, et al. Simulation and experimental research on temperature rise of spring contact in steady state[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 8-14.
- [9] 吴细秀, 程诗敏, 周帆, 等. 母线通流温升对 GIS 内绝缘特性影响的仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 7-14.
WU Xixiu, CHENG Shimin, ZHOU Fan, et al. Influence of temperature rise due to rated-current flowing through busbar on the internal insulation characteristics of GIS: A simulation study[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 7-14.
- [10] 王珂珂, 李丽, 王久阳, 等. 基于混合绝缘气体的三相 GIS 母线温升多物理场耦合机制研究[J]. 高压电器, 2021, 57(4): 69-75.
WANG Keke, LI Li, WANG Jiuyang, et al. Study on multi-physical field coupling mechanism of three-phase GIS bus temperature rise based on mixed insulating gas[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 69-75.
- [11] 纽春萍, 矫璐璐, 王小华, 等. 基于多场耦合的环保型 GIS 热特性分析[J]. 高压电器, 2020, 35(17): 3765-3772.
NIU Chunping, JIAO Lulu, WANG Xiaohua, et al. Thermal characteristics analysis of environmentally friendly GIS based on multi-field coupling[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 35(17): 3765-3772.
- [12] 周秀, 吴旭涛, 田天, 等. GIS 隔离开关温度分布特性的试验研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(6): 71-78.
ZHOU Xiu, WU Xutao, TIAN Tian, et al. Experimental research on temperature distribution characteristics of GIS disconnecter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(6): 71-78.
- [13] 刘鹏, 谢韬, 靳守锋, 等. GIS/GIL 滑动触头电连接部件过热故障机制仿真分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 2090-2100.
LIU Peng, XIE Tao, JIN Shoufeng, et al. Simulation analysis of overheating fault mechanism of electrical connection components used in GIS/GIL sliding contact[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2090-2100.
- [14] 张正周, 宋新锋, 独田娃, 等. 弹簧触头设计(III)[J]. 高压电器, 2011, 47(5): 87-91.
ZHANG Zhengzhou, SONG Xinfeng, DU Tianwa, et al. Design of spring contacts(III)[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5): 87-91.
- [15] 赵飞, 李超, 何洲, 等. 高导电性弹簧触指几何尺寸与压变力关系研究[J]. 电工材料, 2017(1): 12-15.
ZHAO Fei, LI Chao, HE Zhou, et al. Relations between geometrical dimensions and pressure for high conductive screw-contact[J]. Electrical Engineering Materials, 2017(1): 12-15.
- [16] 王建平, 郭孟飞, 梁晓, 等. 斜圈弹簧应力松弛研究

- 及寿命预测[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(5): 795-803.
- WANG Jianping, GUO Mengfei, LIANG Xiao, et al. Study on stress relaxation and life prediction of canted coil spring[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(5): 795-803.
- [17] BRAUNOVIC M, 许良军. 电接触理论应用与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- BRAUNOVIC M, XU Liangjun. Application and technology of electrical contact theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [18]孙国霞. 基于电接触理论的 GIS 母线接头过热性故障的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- SUN Guoxia. Research of GIS busbar connector over-heating fault based on electrical contact theory[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [19]黎 斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- LI Bin. Design of SF₆ high voltage electrical appliances[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [20]HOLM R. Electrical contacts[M]. New York: Springer, 1979.
- [21]张节容. 高压电器原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- ZHANG Jierong. Principles and applications of high voltage electrical appliances[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989.
- [22]张冠生. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- ZHANG Guansheng. Fundamentals of electrical theory[M]. Beijing: China Machine Press, 1989.
- [23]严睿豪. 高温高压条件下固体传热界面接触热阻的实验研究和数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- YAN Ruihao. Experimental study and numerical simulation of contact thermal resistance of solid heat transfer interface at high temperature and high pressure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [24]史林全, 李 强. 高温条件下接触热阻的数值模拟与试验研究[J]. 热科学与技术, 2021, 20(5): 462-470.
- SHI Linquan, LI Qiang. Numerical simulation and experimental investigation on thermal contact resistance at high temperature conditions[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2021, 20(5): 462-470.
- [25]马金财, 刘 刚, 何 龙. 基于电—热—力耦合的螺旋弹簧触指稳态温升分布仿真研究[J]. 高压电器, 2023, 59(8): 223-231.
- MA Jincan, LIU Gang, HE Long. Simulation study on steady-state temperature rise distribution of helical spring contact finger based on electrical-thermal-mechanical coupling[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8): 223-231.
- [26]臧 旭, 马宏忠, 吴金利, 等. 基于振动原理的 GIS 母线导电杆松动故障分析与诊断[J]. 高压电器, 2021, 49(9): 12-20.
- ZANG Xu, MA Hongzhong, WU Jinli, et al. Analysis and diagnosis of a GIS bus conductor loosening based on mechanical vibration[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 49(9): 12-20.
- [27]YOVANOVICH M M. Four decades of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2005, 28(2): 182-206.
- 马永福(1994—), 男, 本科, 工程师, 主要从事变电设备诊断试验工作(E-mail: 1069671957@qq.com)。