

[开关设备]

某型断路器弧触头的设计参数分析

文/西安西电开关电气有限公司 程立 董桂华 马冲

建立了某型断路器弧触头的有限元模型，基于静力学方法对动、静触头之间的接触状态进行了计算，分析了触头曲率半径对接触面积和接触压力的影响。基于显式动力学分析方法，对合闸时由于碰撞产生的触头弹跳现象进行了分析，研究了各几何参数对触头弹跳幅值的影响。计算结果表明，触头的曲率半径对接触状态影响较大，动触头前端倾角、过渡段的倒角半径以及触指的曲率半径都对弹跳的幅值有一定的影响。通过对各几何参数对触头动静特性影响的分析，为后续触头的设计及优化提供一定的理论基础。

高压六氟化硫断路器的触头起着导通和切断电流的作用，其中弧触头由于其接触面积相对较小，电流密度大，因此其设计的合理性尤为重要。整体式自力型弧触头利用材料自身在弹性变形时产生的变形力为触指的电接触提供可靠的接触压力，并利用自身的高导电性承受电流。

触头的磨损、烧蚀以及摩擦力等对高压断路器的机械、电气性能有着显著的影响，而触头磨损、摩擦力与动静触头间的接触状态息息相关。

由于断路器开合过程中的动静触头的碰撞以及电动力的影响，触指在分合闸的过程中存在着明显的弹跳现象，即静弧触头的触指在径向发生数次来回跳跃。在弹跳过程中，每次触头分开都会伴随电弧产生，引起触头侵蚀。同时弹跳也会导致触指根部以及铜钨-铜铬接触面的应力增加，对触头的性能、寿命等影响较大。对于铜钨-铜铬触头而言，铜钨触头中钨粉的粒度，钨骨架的加工工艺等对触头的机械、电气寿命等性能也有明显的影响。某文献利用冲击动力学方法研究了动静触头碰撞引起的触指根部应力变化，某文献利

用显式动力学方法对铜钨-铜铬触头结合面的设计进行了优化。

综合利用静力学和显式动力学有限元方法，分析了某型高压断路器弧触头部分几何参数对动静触头接触状态以及合闸过程中触头弹跳的影响，为后续的设计及优化提供一定的理论支撑。

基本控制方程

在有限元显式动力学分析中，系统的控制方程为

$$M\ddot{a}(t) + C\dot{a}(t) + Ka(t) = Q(t) \quad (1)$$

式中， M 为质量矩阵， C 为阻尼矩阵， K 为刚度矩阵， Q 为载荷， $Q_i = F_{ext}(t) + F_{in}(t)$ ， F_{ext} 为外载荷矢量，为内力矢量。

$$F_{in} = \int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega + F_{hg} + F_{com} \quad (2)$$

式中， $\int_{\Omega} B^T \sigma_n d\Omega + F_{hg} + F_{com}$ 为单元的等效节点内力，其中 B 为单元应变矩阵， σ_n 为节点应力， Ω 为对单元的积分， F_{hg} 为沙漏阻力， F_{com} 为接触力。

由于在系统的控制方程中包括惯性力和阻尼力，在显式动力学分析中，加速度和速度项采用中

心差分格式计算, 分别为:

$$\ddot{a}_t = (a_{t-\Delta t} - 2at + a_{t+\Delta t}) / \Delta t^2 \quad (3)$$

$$\ddot{a}_t = (a_{t+\Delta t} - a_{t-\Delta t}) / 2\Delta t \quad (4)$$

将式(3)和(4)代入式(1)即可求得各时间点的离散控制方程, 然后利用变步长积分法进行求解。

有限元模型

弧触头的几何模型如图1所示。其中 R_1 为静弧触头触指的曲率半径, R_2 为动弧触头的半径, δ 为静态接触时, 静弧触头接触点的法向位移量。

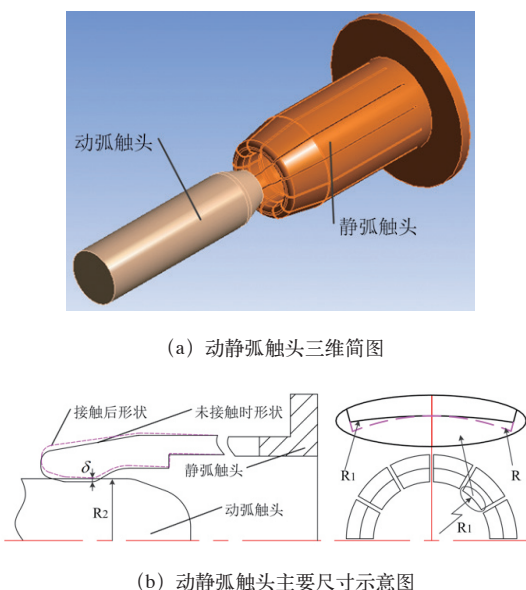


图1 动静弧触头的几何模型

为了减小计算量, 采用弧触头的1/12模型, 静弧触头端部施加固定约束, 根部两侧施加对称约束, 在静力学分析中, 动弧触头内孔节点固定, 在动力学分析中, 动弧触头的轴向运动。触头的材料选用铜合金, 其网格划分如图2所示。

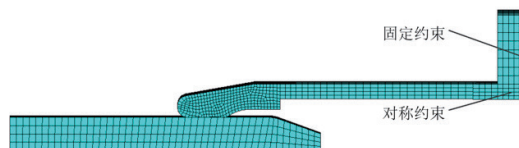


图2 2弧触头1/12有限元模型

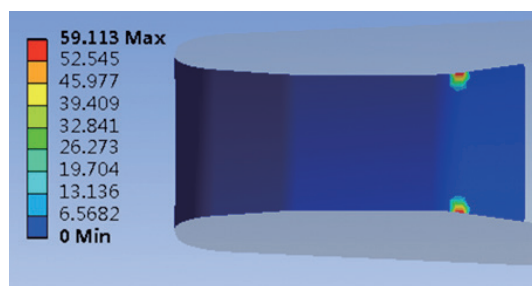
计算结果

1. 接触状态分析

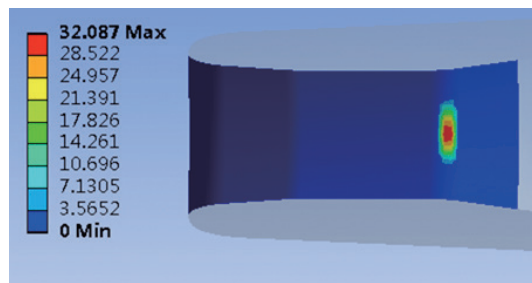
触头的抱紧力与触指的弹性变形 δ 相关, 而动静弧触头之间的接触状态与 R_1 与 R_2 的选取相关, 进而影响动静触头之间的接触电阻, 因此本文中将

影响静弧触头抱紧力和接触状态的几何参数分开表述, R 为静弧触头内径, 用来确定触指的弹性变形 δ , 确定触头的抱紧力。 R_1 为在 R 基础上对静弧触头单个触指二次成型形成的表面曲率半径, 如图1(b)所示。本文首先基于静力学分析, 研究 R_1 的选取对动静触头之间接触力(抱紧力)、接触状态的影响。

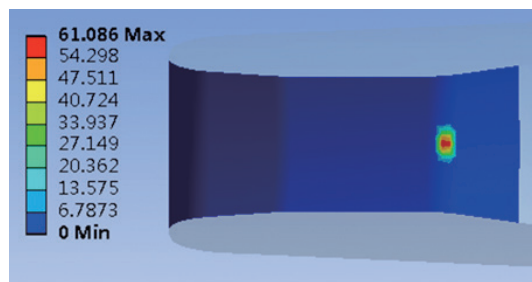
图3为保持 δ , R_2 不变, 动静触头间接触力为65 N时, 改变触头的曲率半径 R_1 , 动静触头间接触状态的变化情况。可见在 $R_1 < R_2$ 时, 如果相差较为明显, 则动静触头之间的接触发生在触头的两侧, 类似于点接触, 接触面积较小, 最大接触压力大。当 $R_1 = R_2$ 时, 理论上动静触头之间的接触应该为线接触, 由于几何模型中的圆是由小的直线段构成, 另外网格划分也有一定的影响, 此时接触点在触头中部, 但接触面积增大, 最大接触压力降低。当 $R_1 > R_2$ 时, 与 $R_1 = R_2$ 时的接触状态相比, 但接触面积减小, 最大接触压力增加。



(a) $R_1 < R_2$ (差值0.5 mm)



(b) $R_1 = R_2$



(c) $R_1 > R_2$ (差值0.5 mm)

图3 接触力65 N时, R_1 的选取对接触状态的影响

图4为保持 δ 、 R_2 不变,改变 R_1 时,不同 R_1 与 R_2 差值(R_1-R_2)情况下动静触头间接触力与最大接触压力的变化情况。可见在 δ 不变时,动静弧触头之间的接触力即触头的抱紧力变化不大。当 R_1 与 R_2 之间相差较大时,动静触头间的最大接触压力明显较大,而接触力基本相同,因此可知接触面积相对较小,当 R_1 与 R_2 相差较小时最大接触压力较低。

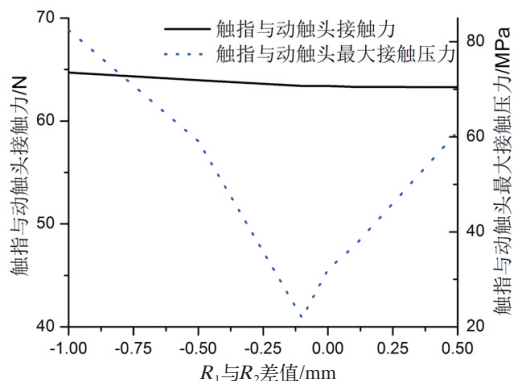


图4 R_1 的选取接触力与最大接触压力的影响

从静力学的分析结果来看,静弧触头的曲率半径选取对动静触头间的接触面积影响较大。考虑到在主触头不接触、弧触头接触的情况下,电流仅通过弧触头导通,接触面积小,电流密度大,因此应尽量保证 R_1 与 R_2 差值较小,增大接触面积,降低电流密度。同时在接触面积增加时也需要考虑其对动静触头间电动力的影响。

2. 触头的弹跳分析

在基于静力学分析了动静触头接触状态的基础上,基于显式动力学方法,分析弧触头的尺寸参数对合闸操作时触头的弹跳情况的影响。其尺寸参数如图5所示,以静弧触头端部倾角 15° ,合闸速度5 m/s为例,研究动弧触头端部倾角 α_1 、后部的锥度 α_2 、过渡面圆角半径 R_3 以及触头曲率半径对弹跳情况的影响。

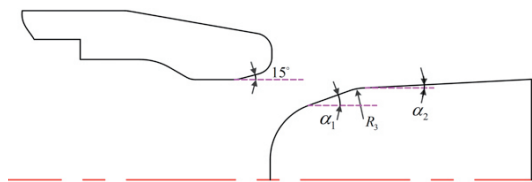


图5 弧触头的尺寸参数

图6为动弧触头端部倾角 α_1 分别为 15° 、 17.5° 和 20° 时触头的弹跳情况的计算结果,其他的计算参数分别是 α_2 为 0° , R_3 为8 mm。可见在 α_1 等于 15° 时,第一次弹跳的幅值略大于 α_1 为 20° 时的结果,但后续的小幅值弹跳的幅值要大于 α_1 为

20° 时的幅值。当 α_1 为 17.5° 时,第一次与第二次的弹跳幅值较大,但后续的弹跳幅值明显小于 α_1 为 15° 和 20° 的弹跳幅值。

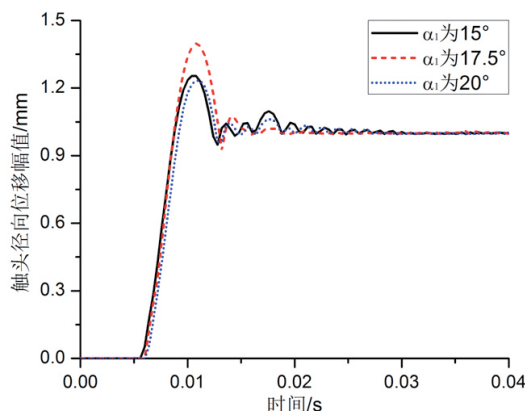


图6 动弧触头端部倾角 α_1 对弹跳情况的影响

图7为动弧触头过渡面倒角半径 R_3 对弹跳情况的影响,其他的计算参数分别是 α_1 为 20° , α_2 为 0° 。在圆角半径为6 mm时,第一次与第二次的弹跳幅值较大,但后续的弹跳幅值较小。当圆角半径为8 mm时,第一次弹跳的幅值较小,当圆角半径为10 mm时,基本上每次弹跳的幅值都略大于圆角半径为8 mm时的结果。

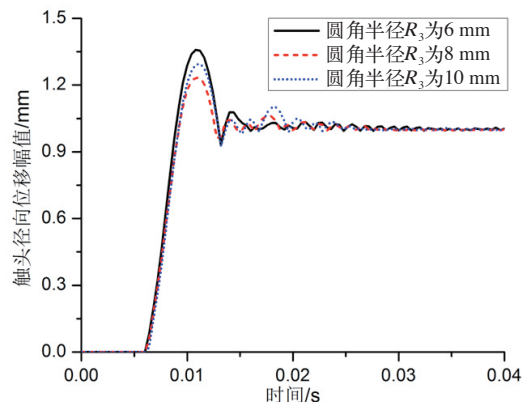


图7 动弧触头过渡面圆角半径 R_3 对弹跳情况的影响

图8为动弧触头后部圆柱的锥度 α_2 对弹跳情况的影响,其他的计算参数分别是 α_1 为 20° ,圆角半径为8 mm。从计算结果看,当动弧触头后部的圆柱部分存在锥度时,前几次弹跳的幅值略大于没有锥度时的幅值。随动弧触头继续运动,当存在锥度时,由于接触点处动弧触头直径的增加,二者之间的接触力增大,因此后续的小幅值弹跳次数减少。

图9为触头曲率半径对弹跳情况的影响,其他的计算参数分别是 α_1 为 20° , α_2 为 0° ,圆角半径为8 mm。从计算结果看,触头的曲率半径对第一次

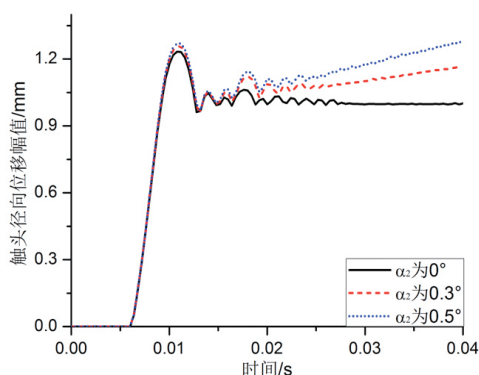


图8 动弧触头后部的锥度 α_2 对弹跳情况的影响

和第二次弹跳幅值的影响不大，但对后续的弹跳幅值影响较大，随触头的曲率半径 R_1 的增大，后续弹

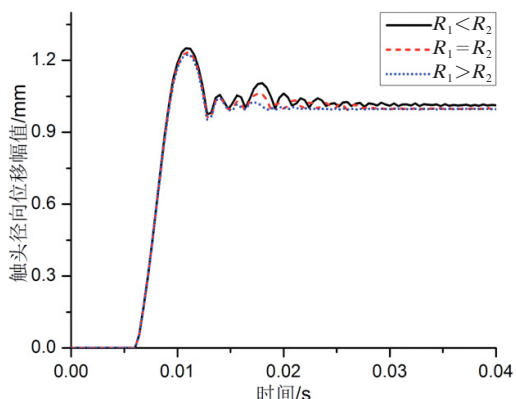


图9 触头曲率半径 R_1 对弹跳情况的影响

跳的幅值逐渐减小。

从计算结果来看，动弧触头端部倾角、后部的锥度、过渡面圆角半径以及触头曲率半径都对合闸过程中触头的弹跳情况有一定的影响。随动弧触头端部倾角、过渡面倒角半径变化，弹跳幅值的变化趋势也发生变化，因此在设计中应根据具体尺寸进行相应分析以确定最优设计。随动弧触头后部圆柱的锥度增加，弹跳幅值略有增加，因此在动弧触头的设计中应避免后部锥度的存在。随触头曲率半径增加，弹跳幅值略有降低，因此在设计中应尽量取较大的触头曲率半径。

总结

本文建立了某型断路器弧触头的有限元模型，基于静力学方法分析了动静触头间的接触状态，基于显式动力学方法分析了触头的几何参数对合闸过程中弹跳的影响。从分析结果看，触头的曲率半径对动静触头的接触影响较大，并且对合闸过程中的弹跳也有一定的影响，综合来看曲率半径与动弧触头的半径相等时较为合适。动弧触头的前端倾角与过渡段的倒角需要根据实际情况分析，同时应避免动弧触头后端的锥度存在。EA

(收稿日期：2016.09.27)

(编辑：白文亭)

(上接第47页)

5. 管理问题的解决策略探究

想要有效解决以上的相关问题，就要从实际情况出发，暴露真实的线损从而制定出切实可行的指标，如此才能够真正地降低线损。

针对农村低压线损管理面临的问题和现状，做好农村低压线损管理应从以下三方面抓管理、抓落实。

1) 加强线损管理。就是建立组织机构，以指标管理为核心，以统计分析为手段，以线损波动的分析与控制为关键点，建立健全线损管理制度，加大营业普查力度和查处窃电行为，达到降低管理线损目的。

2) 加快线损管理技术的应用。做好低压电网

建设、改造规划，通过低压电网的合理规划、优化低压电网结构、淘汰高耗能设备、调整低压供电半径、调整用电负荷平衡度，提高低压电网的运行水平。加强营销管理、电能计量表计管理，积极推广使用降损新技术、新设备。通过低压线损理论计算，发现电网中的薄弱环节，为科学的下达线损指标提供依据。

3) 使线损管理工作更有保障。通过强化人力资源的培训，提高线损管理人员的素质，从制度上完善监督制约机制与激励机制，为做好低压线损管理工作奠定良好的基础。EA

(收稿日期：2016.10.17)

(编辑：白文亭)