

DOI: 10.7652/xjtuxb201610005

利用开断模型分析引弧板对低压断路器 电弧运动的影响

季良^{1,2}, 刘颖异³, 周翔⁴, 苏玲², 王家凯²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 全球能源互联网研究院, 102200, 北京;
3. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 100191, 北京; 4. 国家电网公司, 100031, 北京)

摘要: 为了描述电弧在跑弧道上运动的动态过程, 得出引弧板对低压断路器灭弧性能的影响规律, 提出了一种基于开断模型的描述电弧在跑弧道(含引弧板)上运动全过程的分析方法。首先建立了一种基于多场耦合的对低压断路器开断过程进行仿真的方法, 该方法通过对多体动力学仿真软件 ADAMS 进行二次开发, 实现了开断过程中电路、电弧、气吹、电动斥力、复杂机械运动等多场域的相互耦合; 然后以某带引弧板的低压断路器为分析对象, 利用所提出的仿真方法, 对电弧从起燃、运动、转移到熄灭的全过程进行了计算仿真, 分析了不同引弧板形状对低压断路器开断性能的影响, 并通过实验验证。计算与实验结果表明, 钩状引弧板的弧形轮廓在迎着电弧运动方向上具有更大的接触面积, 且弧角朝栅片方向弯曲符合电弧的整体运动趋势, 有利于电弧在弧根转移后进一步进入灭弧栅片, 从而减少触头的烧蚀和提升电弧进入栅片的效果。

关键词: 低压断路器; 引弧板; 开断模型

中图分类号: TM561 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)10-0027-09

Influence of Different Arc Run-on End Tab on the Arc Movement Process of Low Voltage Circuit Breaker with Interruption Model

JI Liang^{1,2}, LIU Yingyi³, ZHOU Xiang⁴, SU Ling², WANG Jiakai²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102200, China; 3. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 4. State Grid Corporation, Beijing 100031, China)

Abstract: To describe the dynamic process of electric arc on the arc run-on plate to yield the influencing law of the arc run-on end tab on the breaker interruption performance, an analysis strategy based on the interruption model of low voltage circuit breaker is proposed for arc movement on the arc runner with arc run-on end tab. Firstly, a multi-field coupled calculation model that enables to simulate the interruption process of low voltage circuit breaker is constructed. Secondly developing the multi-body dynamic simulation software ADAMS, a set of differential equations describing the coupling relations among electric circuit, magnetic field, puffer effect, complex mechanical movement and dynamic arc model are established. This model is used to simulate the arc movement process undergoing arc striking, moving, transferring and extinguishing. The influences of different structures of arc run-on end tabs on the interruption performance of low voltage circuit breaker are analyzed and verified by the tests. Both calculation

收稿日期: 2016-01-15。 作者简介: 季良(1979—),男,高级工程师;刘颖异(通信作者),女,讲师。 基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3163038);国家自然科学基金资助项目(51207005)。

网络出版时间: 2016-07-14 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160714.1730.018.html>

and experiment results demonstrate that the hook-like arc run-on end tab has a larger contact area than the flat end tab towards the arc movement direction, that the arc angle of the hook-like end tab bends to the direction of splitter plates conforming to the overall movement trend of the electric arc, and the arc root on hook-like end tab is thus easier to jump onto the arc run-on plate than on the flat end tab to consequently decrease the contact erosion.

Keywords: low voltage circuit breaker; arc run-on end tab; interruption model

开断能力作为考核低压断路器性能的关键指标,一直是低压断路器的主要研究方向。长期以来,为了提高低压断路器的开断性能,许多学者作了大量的研究工作。文献[1-2]研究了弧柱压降对低压断路器限流性能的影响,分析了利用双向斥开触头系统提高低压断路器限流性能的机理。文献[3]分析了低压断路器的大电流开断技术,并分别研究了横向磁场及触头材料对其开断性能的影响。文献[4-5]不考虑机构运动,分别研究了栅片形状和出气孔对低压断路器开断大电流时电弧特性的影响。除了优化灭弧室结构参数外,大量研究工作还从优化设计操作机构的角度,提出了各种提升低压断路器开断性能的方法。文献[6-7]研究了分断弹簧、关键轴位置、杆件质心位置和质量等对操作机构性能的影响,并通过对这些参数的优化设计,提高了机构的打开速度。文献[8-10]研究了电动斥力等对操作机构打开速度的影响。在不考虑短路电流作用的情况下,文献[11-12]通过改进操作机构中的连杆参数,提出了一种提高低压断路器在小电流下开断性能的优化方法。实际上,除了上述影响因素外,灭弧室中经特殊设计的引弧板,同样对低压断路器的开断性能产生非常重要的影响。关于这方面的研究工作,国内外的文献报道并不多见,尤其是利用数值方法描述电弧在跑弧道(含引弧板)上运动的全过程,从而得出引弧板对低压断路器灭弧性能的影响规律的相关研究更是鲜有开展。

在低压断路器的开断过程中,电弧从起燃、运动、转移到熄灭的动态过程受操作机构与动导杆相互运动关系、灭弧室结构、电动斥力、吹弧磁场和气吹灭弧等多种因素的影响。其中,电动斥力、吹弧磁场和气吹灭弧等又通过电流、电压、气流等参数受到电路瞬态、电磁场、电弧过程等的影响。因此,为了描述电弧在跑弧道(含引弧板)上运动的全过程,必须首先建立适用的低压断路器多场耦合开断仿真模型,以综合考虑以上因素。

围绕低压断路器的开断模型,很多学者做了大量的工作。一些学者利用磁流体动力学(MHD)电

弧数学模型,研究了固定平板电极间的电弧运动特性,得出了开断过程中电弧电压、电流等动态参数的变化规律^[13-18]。最近,研究人员成功将触头运动过程与电弧数学模型相耦合,建立了基于MHD电弧模型的低压断路器动态开断模型^[19-21]。但是,考虑到触头运动过程(受操作机构等因素影响)的复杂性,上述研究工作将触头运动速度假设为恒定值。对于包含碰撞、连杆转换、凸轮运动等复杂形态的低压断路器操作机构的运动过程,尚不能实现与MHD电弧数学模型的耦合计算。因此,虽然MHD电弧模型是当前公认的最接近电弧实际形态的数学模型,但是由于其计算比较复杂、耗时过长,且不能实现与复杂机械运动的耦合,并不适用于含复杂机械运动的低压断路器开断过程的仿真。也就是说,对于诸如电弧在跑弧道(含引弧板)上运动的全过程仿真,考虑到其受触头运动的影响较大,不适合采用MHD电弧模型来描述电弧动态特性。

一种可行的解决办法是利用链式电弧模型替代MHD电弧模型。链式电弧模型由文献[22]首先提出,假定电弧由许多圆柱形的电流元连接而成,电弧的运动由各个电流元的单独运动、电流元之间的相互作用所共同决定。以此形象地模拟电弧在灭弧室中被拉长和弯曲的过程,较接近电弧的实际形态。链式电弧模型虽然在本质上不是一种场的方法,但它能较好地模拟电弧在灭弧室中的运动过程,是除MHD电弧模型外最接近电弧实际形态的数学模型。值得指出的是,MHD电弧模型的某些缺点恰好是链式电弧模型的优点。例如,链式电弧模型具有简单、灵活、计算速度快,且能够实现与复杂机械运动相耦合等特点,因而作为实际应用来说,仍是目前最适合描述电弧性态的数学模型。

围绕基于链式电弧模型的低压断路器开断过程仿真,同样开展了大量的研究工作。文献[23]基于Horinouchi的链式电弧模型,采用自开发程序,实现了考虑电磁机构、开关机构和电弧运动的低压断路器开断过程仿真。但是,上述模型的机械运动部分只适用于某种特定结构的断路器,程序可移植性

稍差,且对于具有更为复杂机械系统的计算(例如运动中有碰撞、凸轮运动等)不易实现。文献[24]通过对多体动力学软件 ADAMS 的二次开发,成功解决了复杂机械运动与链式电弧模型的相互耦合问题,建立了耦合链式电弧模型、复杂机械运动、电磁场和电路瞬态的低压断路器开断模型。但是,作为组成开断过程的物理过程之一,在开断模型中未能考虑气吹灭弧过程,需进一步完善。

本文以某带引弧板的微型断路器为研究对象,在文献[24]的基础上,通过对 ADAMS 和有限元软件 ANSYS 进行二次开发,实现了低压断路器开断过程中,气流场模型、链式电弧模型和复杂机械运动的相互耦合,建立了一种可耦合复杂机械运动、电路瞬态、电磁场、气流场以及电弧过程的低压断路器开断模型。利用该模型,仿真了电弧从起燃、运动、转移到熄灭的全过程,分析了引弧板形状对断路器开断过程的影响,并通过实验验证。

1 分析对象

本文的分析对象为某型号微型断路器(MCB),图 1 为该断路器的灭弧室与触头系统结构。图 2 给出动导杆打开过程中随着弧根的转移引起的电流走向变化。在动导杆运动过程的初始阶段、电弧未转移到引弧板之前,电流在触头系统中的流向如图 2a 所示;当动导杆打开到一定角度时,电弧发生弧根转移,当弧根脱离动触头转移到引弧板时,电流的流向如图 2b 所示。

2 分析方法

2.1 开断过程综合仿真模型

低压断路器的开断过程涉及机械运动、电弧、电路、磁场、气流场等多种物理量的变化。开断过程中的各个物理量之间并不是相互孤立的,而是存在相互影响和耦合的关系。本文对这些物理量以及它们

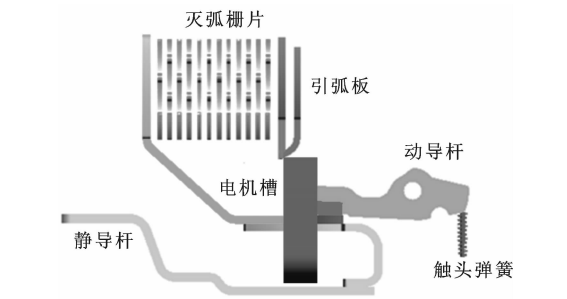
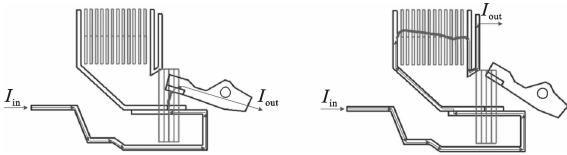


图 1 某型号微型断路器的灭弧室与触头系统结构图



(a)弧根未转移到上引弧板 (b)弧根转移到上引弧板

图 2 开断过程的电流走向

之间的相互作用关系进行了综合考虑,建立起如图 3 所示的低压断路器开断过程的综合仿真模型。在该模型中,复杂机械运动利用 ADAMS 求解,而各个物理过程之间的耦合则通过对 ADAMS 用户子程序进行二次开发的方法解决。在 ADAMS 用户子程序中,将各个物理过程组成综合微分方程组,并调用 ANSYS 的 CFD 模块求解气流场模型的控制方程组。

如图 3 所示,通过二次开发接口,可从 ADAMS 中获得某时刻 t 对应的动导电杆转角 θ_t ;在 ADAMS 用户子程序中调用 ANSYS/CFD 模块并计算相关的气流参数,连同此时刻的电弧电流等参数,利用 ADAMS 用户子程序求解微分方程组,计算出 $t + \Delta t$ 时刻的动导杆受力 $F_{t+\Delta t}$,并返回到 ADAMS 中。通过这种双向迭代计算,即可仿真出低压断路器的整个开断过程。同时,利用 ADAMS 用户子程序,将数据结果动态保存在本地文件中,通过自行编写的可视化后处理程序,可实时观看电弧的运动轨迹以及电弧电压和电流的变化规律。

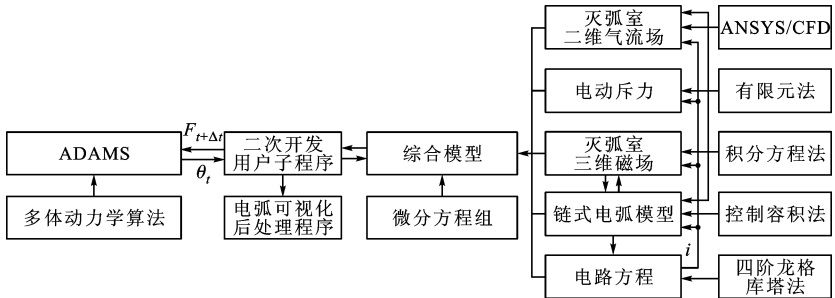


图 3 耦合气流场模块的低压断路器开断过程综合仿真模型

2.2 各物理场的子模型

2.2.1 考虑气吹作用的改进型链式电弧模型 如前所述,链式电弧模型假定电弧由许多圆柱形的柔性电流元连接而成,如图 4 所示,电弧的运动由各个电流元的单独运动、电流元之间的相互作用所共同决定。借助这一关系,链式电弧模型可以形象地模拟电弧在灭弧室中被拉长和弯曲的过程,较接近电弧的实际形态。如图 5 所示,设 G_i 代表第 i 个电流元的重心,有表征矢量 $\mathbf{S}_i = 0.5 \overline{G_{i+1}G_{i-1}}$,则电流元 i 的方向平行于矢量 $\mathbf{S}_i$,其长度等于 $\mathbf{S}_i$ 的模。

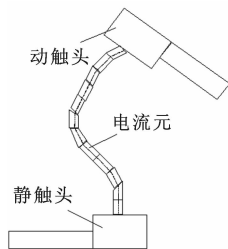


图 4 电流元链

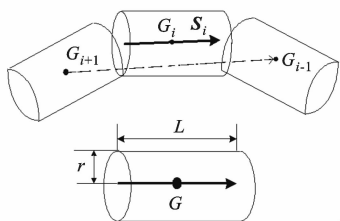


图 5 单个电流元

在开断过程中,组成链式电弧模型的各个电流元在磁吹力和气吹力的综合作用下,以不同的速度朝各个方向运动,从而引起整个链条的拉长和弯曲。考虑到电弧运动的实际情况,在计算电流元的运动过程时作以下近似处理。

(1)每段电流元的长度不超过 0.5 mm,当超过时将此电流元分裂为两个新的电流元,这一限制可及时对电弧的弯曲和拉长状态作出反应。

(2)当任意两个电流元之间的距离过近时,依据电流元的导体性质,这两个电流元将发生短路,而链接在它们之间的其他电流元将消失。

(3)电流元链的两端应始终位于动、静触头或跑弧道表面。当不是电流元链端部的某个电流元与触头或跑弧道表面接触时,依据电流元的导体性质,这个电流元将和触头或跑弧道发生短路,在此电流元和链条端部之间的所有电流元将不复存在,这个电流元将成为新的链条端部,并直接与短路点接触,从而发生弧根的转移。

电弧等离子体的温度以弧柱中心为最高,并沿径向逐渐降低。在弧柱内部区域,电弧能量以热传导和辐射方式从弧柱中心沿径向传递。在弧柱边界面上,由于弧柱和空气之间存在较高的相对运动速度及较大的温度差,电弧能量主要以对流的方式向周围空气传递。为了描述电弧在灭弧室中运动的物理过程,如图 6 所示,将空气介质中的电流元划分为 3 个区域:区域 I 为导电圆柱体区域,其电导率 σ 为

温度的函数;区域 II 为围绕区域 I 的高温热边界层,电导率为零;区域 III 为包围在区域 II 之外的空气。

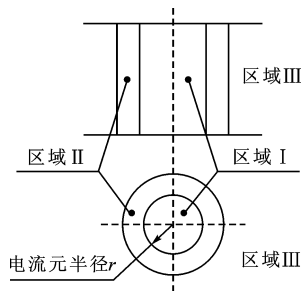


图 6 电流元的区域划分

对于区域 I 和区域 II,其控制方程如下

区域 I

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \sigma E^2 - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(-r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - u \quad (1)$$

区域 II

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(-r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - u - \alpha \left(-\frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

式中: T 为电流元弧柱温度, K; t 为时间, s; r 为电流元半径, m; ρ 为空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_p 为比定压热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; σ 为电导率, $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$; E 为电场强度, $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$; λ 为热导率, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; u 为辐射项, $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$; α 为对流换热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$; σE^2 为外电路输入的焦耳热; $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(-r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)$ 为传导散热; $\alpha \left(-\frac{\partial T}{\partial r} \right)$ 为对流散热; u 为辐射散热。

对于区域 III,采用 ANSYS 的 CFD 模块求解其控制方程组,并作如下假定:

(1)不考虑因化学反应导致的灭弧室气体组分变化;

(2)电弧作为一个对灭弧室气体进行能量输入的源项;

(3)灭弧室内的气体为理想气体;

(4)忽略重力加速度。

在开断过程中,电弧与灭弧室气流场相互耦合作用。首先,电弧是引起灭弧室气流场波动的强扰动源。电弧产生后,由于将外电路能量输入到灭弧室气体中,导致其所在位置的气体压力、温度等急剧上升,即电弧对周围气体产生了很强的扰动。其次,灭弧室气流场的强烈波动会反过来影响电弧的运动。如图 7 所示,对于组成链式电弧模型的各个电流元,运动情况受周围气体的压力、温度、流速等参数的影响:在 t 时刻,电弧在位置 L_i 处将部分能量 $(K_p P_{ei})_i$ 输入给灭弧室气体,导致灭弧室气流参数

由 $(p_c, T_c, u_c)_t$ 变为 $(p_c, T_c, u_c)_{t+\Delta t}$, 新的气流参数将驱动电弧运动到新的位置 $L_{t+\Delta t}$; 在 $t+\Delta t$ 时刻, 电弧在 $L_{t+\Delta t}$ 处继续将部分能量 $(K_p P_{el})_{t+\Delta t}$ 往灭弧室输送, 导致灭弧室气流参数再一次改变, 并且反过来驱动电弧运动到更新的位置。以上过程周而复始, 直到整个开断过程结束。

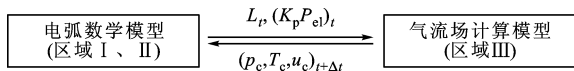


图 7 电弧与气流场之间的耦合作用关系

单个电流元在洛伦兹力和空气阻力的综合作用下的运动速度为^[23]

$$u_a = (kRT_c)^{1/2} \frac{B_z I}{2P_{cr}} \left(k + \frac{k+1}{2} \frac{B_z I}{2P_{cr}} \right)^{-1/2} + u_c \quad (3)$$

式中: k 为灭弧室气体绝热指数; p_c 、 T_c 和 u_c 分别为灭弧室内的气压、温度和流速; I 为电弧电流; B_z 为电流元重心处磁场的 z 方向分量。

欧姆定律的积分形式为

$$E = \frac{I}{\int_0^r 2\pi r \sigma dr} \quad (4)$$

联合求解控制方程组, 即可得到每个电流元的电导率 σ_i 和电场强度 E_i , 从而得到电弧电压的计算式

$$u_{arc} = MU_0 + \sum_{i=1}^N E_i L_i \quad (5)$$

式中: M 为电弧被栅片切割的段数; U_0 为近极压降; N 为电流元数量; L_i 为每个电流元的长度。

2.2.2 其他物理场的子模型 在 ADAMS 用户子程序中, 除气吹灭弧过程外, 将组成开断过程的其他物理场的子模型用一套微分方程组表达, 并采用四阶龙格库塔法计算电路的微分方程, 采用积分方程法求解灭弧室的三维磁场分布, 采用控制容积法求解链式电弧模型, 并根据最终求解到的下一时刻的电流和从 ADAMS 获得的动导电杆位移等数据, 利用 ANSYS 提前计算的数据网格插值求出下一时刻动导电杆的电动斥力。

3 仿真结果

在微型断路器中, 引弧板的作用是将停留在触头上的弧根转移到跑弧道上。一方面, 有利于减少触头烧蚀; 另一方面, 弧根转移到跑弧道后有利于电弧进入栅片, 从而提高低压断路器的限流能力。对于图 1 所示的研究对象, 本文研究了不同引弧板形状对开断过程电弧运动的影响。如图 8 所示, 在其

他条件相同的情况下, 分别取引弧板形状为平板状和钩状, 并利用第 2 节所述的分析方法, 计算得到两种情形下的电弧运动结果。

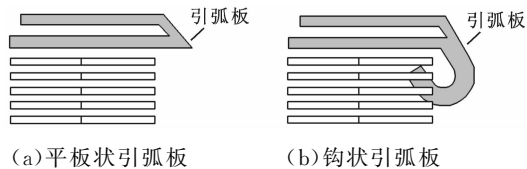


图 8 两种引弧板结构

3.1 平板状引弧板的电弧运动情况

如前所述, 借助于自行开发的后处理程序, 可以观看开断过程中电弧在灭弧室内的运动过程。图 9 为在 8 kA 预期短路电流下, 采用平板状引弧板的电弧在灭弧室中的运动情况, 图中选取了电弧运动过程中 4 个具有代表性时刻的运动情况。为便于观察, 仅绘制了电弧轴线的形状及其弧柱中心在灭弧室中的位置, 并未画出整个电弧弧柱。从图中可以看出, 随着动静触头的分离, 电弧在触头间产生并被拉长, 同时在磁吹和气吹的作用下向灭弧栅片的方向深入。静触头上的弧根沿着跑弧道逐渐向灭弧栅片的方向移动, 而动触头上的弧根由于没能被引弧板转移, 所以始终停留在动触头上。弧根长时间停留在动触头上会造成触头的烧蚀; 另外, 由于灭弧栅片距离触头有一定距离, 电弧无法进入栅片, 限制了 MCB 的开断性能。

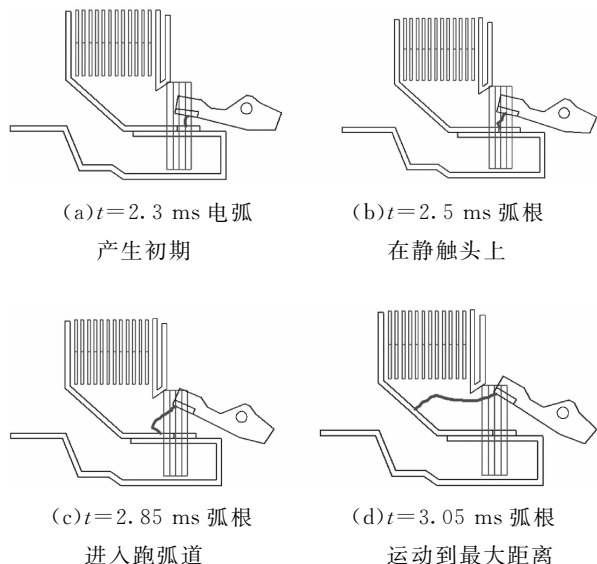


图 9 平板状引弧板的电弧运动情况 (8 kA)

图 10 给出对应上述开断过程的电弧电流及电压波形。从电压波形可以看到, 由于电弧未能进入栅片, 所以电弧电压基本上由弧柱压降组成, 弧压波形呈现随电流大小和电弧长度变化的馒头状。

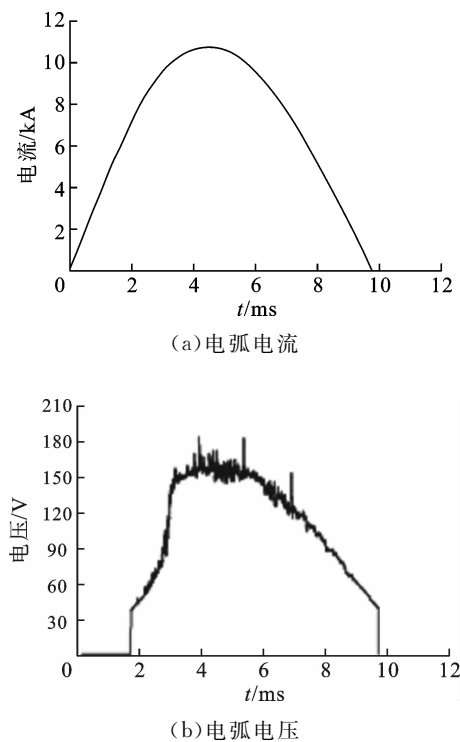


图 10 平板状引弧板的开断计算波形(8 kA)

3.2 钩状引弧板的电弧运动情况

图 11 为当预期短路电流等于 8 kA 时,带钩状引弧板 MCB 的电弧在灭弧室中的运动情况。从图中可以看到,由于钩状引弧板的引弧作用,当动导杆斥开到某一角度,且电弧距离引弧板足够近时,弧根将离开动触头表面转移到引弧板的圆弧段。接着,在磁吹和气吹力的共同作用下,电弧弧根进一步跳到引弧板的平板上,使电弧几乎全部进入灭弧栅片。图 12 为对应上述开断过程的电弧电流及电压波形。

3.3 对比分析

对比带平板状和钩状引弧板 MCB 的电弧运动过程可以发现,钩状引弧板相对于平板状引弧板更易于将弧根转移到跑弧道上,从而减少触头的烧蚀和提升电弧进入栅片的效果。这是因为:电弧在磁吹和气吹的作用下,整体朝着灭弧栅片的方向运动。在迎着电弧运动的方向上,钩状引弧板的弧形轮廓具有更大的接触面积,增加了与电弧接触的几率,有利于弧根的转移;另一方面,钩状引弧板的弧角朝着栅片方向弯曲,符合电弧的整体运动趋势,有利于电弧在弧根转移后进一步进入灭弧栅片。因此,在开断某些中等大小的预期短路电流,且电弧无法完全依靠电流的作用使弧根转移时,钩状引弧板可利用其结构上的特点,将某些无法在平板状引弧板上转移的弧根成功转移到跑弧道上。表 1 为采用两种引

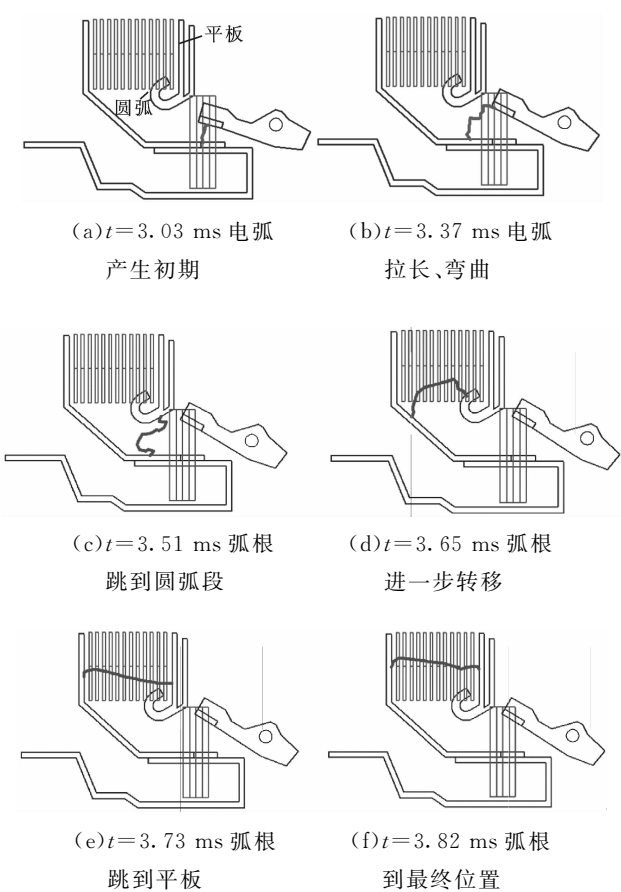


图 11 钩状引弧板的电弧运动情况(8 kA)

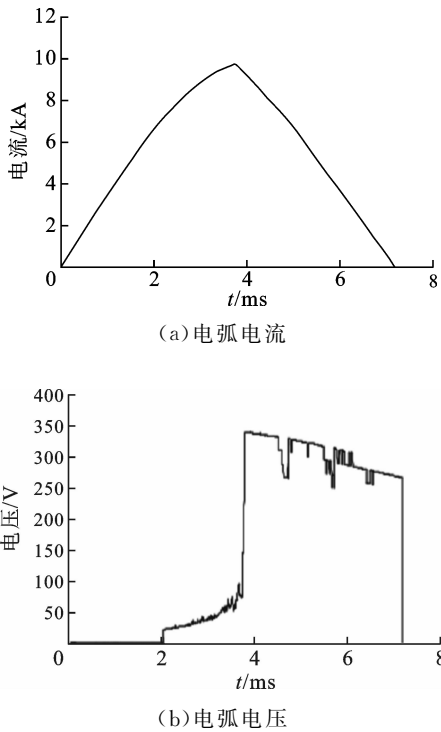


图 12 钩状引弧板的开断计算波形(8 kA)

弧板结构的 MCB 开断参数对比。由表可见,钩状引弧板的电弧电压峰值明显比平板状引弧板的高,

且燃弧时间更短。这说明,对于微型断路器而言,设计良好的引弧板结构对提高其开断性能有非常重要的作用。

表 1 采用两种引弧板结构的开断计算结果对比

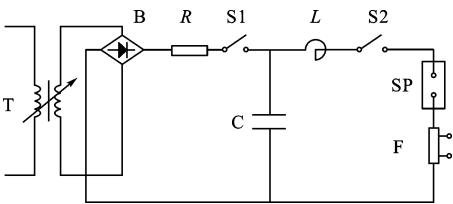
引弧板结构	电弧电压峰值/V	燃弧时间/ms
平板状引弧板	156	9.8
钩状引弧板	341	7.2

4 实验验证

为了对以上计算结果进行验证,本文以某类似结构的实际微型断路器产品为对象,对其分别采用平板状和钩状引弧板时的开断过程进行了实验研究。实验在大电流合成实验回路上进行,图 13 给出短路电流开断实验的实验线路及原理图。实验前,断开主合闸开关 S2,闭合充电回路开关 S1,调节调压器 T 通过整流硅堆对电容器组 C 充电;充电至所需实验电压后调压器 T 回零断开充电回路,实验准备就绪。实验中,接通主合闸开关 S2,由电容器组 C、电感 L、试品 SP、分流器 F 构成典型的单频振荡放电回路。电弧电压由高压探头(TektronixP6015A)接在试品两端测得,电弧电流由分流器($90\ \mu\Omega$)测得。



(a) 大电流合成实验回路

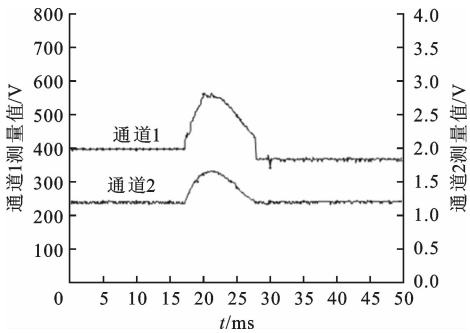


(b) 单频振荡回路原理

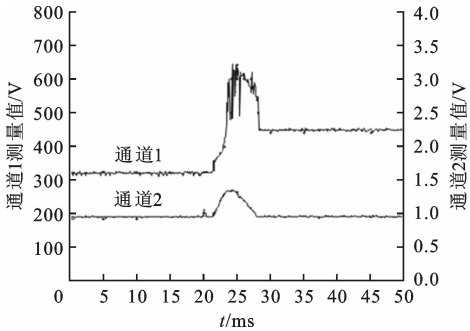
图 13 实验线路及其原理图

实验取预期短路电流为 8 kA,得到采用平板状和钩状引弧板时的开断实验波形如图 14 所示。将其与图 10、图 12 的计算波形对比,容易发现计算波形的形态与实验波形基本一致。

表 2 为对实验波形的统计情况,对比表 1 的计算结果,同样可以发现两者对于反映不同引弧板带来的开断性能差异仍表现出较好的一致性。



(a) 平板状引弧板



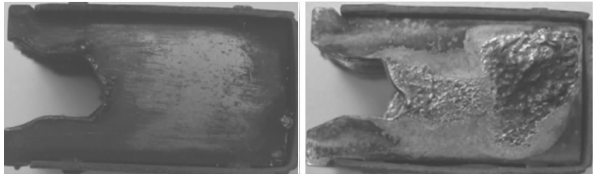
(b) 钩状引弧板

图 14 采用不同引弧板的开断实验波形(8 kA)

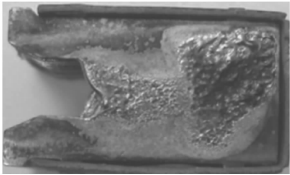
表 2 采用两种引弧板结构的开断实验结果对比

引弧板结构	电弧电压峰值/V	燃弧时间/ms
平板状引弧板	163	10.2
钩状引弧板	317	6.7

图 15 为采用两种引弧板的栅片烧蚀情况的对比,可以看到,采用钩状引弧板的栅片烧蚀情况明显比平板状引弧板的严重,从而从另一个角度进一步验证了仿真结果。总的来说,虽然实验样机与计算样机存在一些结构上的细小差异,但就定性的角度验证计算结果而言,实验结果仍能较好地说明本文所提分析方法的有效性。



(a) 平板状引弧板



(b) 钩状引弧板

图 15 采用不同引弧板的栅片烧蚀情况

5 结 论

通过对多体动力学软件 ADAMS 进行二次开发,本文建立了基于改进型链式电弧模型的低压断路器开断过程仿真模型,实现了链式电弧模型、复杂

机械运动、气流场、电磁场和电路瞬态的相互耦合。利用该模型,分析了引弧板形状对某型号微型断路器开断过程的影响,并得出以下结论。

(1)对于带平板状引弧板的灭弧室,由于动触头上的弧根没能被引弧板转移,所以始终停留在动触头上,一方面造成触头烧蚀,另一方面导致电弧无法进入栅片,限制了开断性能的提升。

(2)相比较平板状引弧板,钩状引弧板的弧形轮廓在迎着电弧运动方向上具有更大的接触面积,增加了与电弧接触的机率,有利于弧根转移;另外,钩状引弧板的弧角朝着栅片方向弯曲,符合电弧的整体运动趋势,有利于电弧在弧根转移后进一步进入灭弧栅片,从而减少触头的烧蚀和提升电弧进入栅片的效果。

参考文献:

- [1] 陈德桂,戴瑞成,刘洪武. 弧柱压降对塑壳断路器限流性能的作用[J]. 低压电器, 2005(11): 6-9.
CHEN Degui, DAI Ruicheng, LIU Hongwu. Effect of arc column voltage on the current limiting performance in molded case circuit breaker[J]. Low Voltage Apparatus, 2005(11): 6-9.
- [2] 季良,陈德桂,刘颖异,等. 利用电弧动态数学模型的低压断路器开断过程仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 27(30): 20-25.
JI Liang, CHEN Degui, LIU Yingyi, et al. Simulation of the interruption process of low voltage circuit breaker using dynamic mathematic arc model[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 27(30): 20-25.
- [3] RENZ R. Thermodynamic models for RMF- and AMF-vacuum arcs [C]// International Symposium on Discharges & Electrical Insulation in Vacuum. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 443-446.
- [4] WANG Qian, LI Xingwen, CHEN Degui. Simulation of the venting configuration effects on arc plasma motion in low voltage circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 38(9): 2300-2305.
- [5] LIU Hongwu, GUAN Ruiliang. Low-voltage circuit breaker arcs-simulation and measurements[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2013, 96(9): 1119-1123.
- [6] 陈德桂,刘庆江,康艳. 塑壳断路器操作机构分断速度的影响因素[J]. 低压电器, 2005(12): 9-12.
CHEN Degui, LIU Qingjiang, KANG Yan. Effect of different factors to the operating velocity of molded case circuit breakers[J]. Low Voltage Apparatus, 2005(12): 9-12.
- [7] CHEN Degui, JI Liang, WANG Yunfeng, et al.

Analysis and optimization for the operating mechanism of air circuit breaker [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2008, 91(8): 1280-1285.

- [8] ITO S, KAWASE Y, MORI H. 3-D finite element analysis of repulsion forces on contact systems in low voltage circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(3): 1677-1680.
- [9] 纽春萍,陈德桂. 电动斥力作用下低压断路器分断特性的研究[J]. 电工技术学报, 2005(7): 34-38.
NIU Chunping, CHEN Degui. Research on the breaking characteristics of low-voltage circuit breaker with the effect of electrodynamic repulsion force [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005 (7): 34-38.
- [10] 李兴文,陈德桂,汪倩,等. 低压塑壳断路器三相短路开断特性的仿真分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 76-82.
LI Xingwen, CHEN Degui, WANG Qian, et al. Simulation and analysis of the interruption characteristics of low voltage molded case circuit breakers under 3-phase short circuit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(10): 76-82.
- [11] JI Liang, CHEN Degui, LIU Yingyi, et al. Analysis and improvement of linkage transfer position for the operating mechanism of MCCB [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 222-227.
- [12] KIM Y S, RYU B J, AHN K Y. Development of a molded case circuit breaker with a spring-actuated linkage based on multi-body dynamics analysis [J]. Advanced Materials Research, 2013(117): 299-304.
- [13] ZHANG Junmin, LAN Jian, TIAN Lei. Influence of DC component of short-circuit current on arc characteristics during the arcing period [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 81-87.
- [14] RUMPLER C, STAMMBERGER H, ZACHARIAS A. Low-voltage arc simulation with out-gassing polymers [C]// IEEE 57th Holm Conference on Electric Contacts. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [15] TARCZYNSKI W, DASZKIEWICZ T. Switching arc simulation [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 88 (7b): 60-64.
- [16] REN Zhigang, WU Mingliang, YANG Fei, et al. Numerical study of the arc behavior in an air DC circuit breaker considering turbulence [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 2712-2713.
- [17] LINDMAYER M, MARZAHN E, MUTZKE A, et al. The process of arc-splitting between metal plates in low voltage arc chutes [C]// IEEE 50th Holm Confer-

- ence on Electric Contacts, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 28-34.
- [18] RONG Mingzhe, MA Ruiguang, CHEN Junxing, et al. Numerical investigation on arc behavior in low-voltage arc chamber considering turbulence effect [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 2716-2717.
- [19] WU Yi, RONG Mingzhe, YANG Fei, et al. Numerical modeling of arc root transfer during contact opening in a low-voltage air circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(4): 1074-1075.
- [20] CHRISTIAN R, ALBERT Z, HARTWIG S, et al. Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 2716-2717.
- [21] LOIC R, OLIVIER C, GÉRARD M. 3-D magnetostatic moment method dedicated to arc interruption process modeling [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2014, 50(2): 941-944.
- [22] HORINOUCI K, NAKAYAMA Y, KOHYAMA H, et al. Practical simulation method for magnetically driven arc in a gas [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Tokyo, Japan: Institute of Electrical Engineers of Japan, 1995: 102-105.
- [23] 张晋, 陈德桂, 付军. 低压断路器灭弧室中磁驱电弧的数学模型 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 22-26, 54.
- ZHANG Jing, CHEN Degui, FU Jun, et al. Mathematical model of magnetic field driven arc in arc chamber of low voltage circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(10): 22-26, 54.
- [24] LIU Yingyi, YUAN Haiwen, CHEN Degui. Experiment and simulation research on influence of different main contact system on the interruption performance of control and protective switch [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1556-1563.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 18 页)

- JIA Qi, HUANG Binke. A differential extrapolation method to extract dielectric parameters of PCB with roughened conductor surface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(8): 11-16.
- [6] 波扎尔. 微波工程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 26-29.
- [7] GROISS S, BARDI I, BIRO O, et al. Parameters of lossy cavity resonators calculated by the finite element method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(3): 894-897.
- [8] HUANG B, CHEN J, JIANG W. Effects of surface roughness on TE modes in rectangular waveguide [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009, 30(7): 717-726.
- [9] CHEN C D, TZUANG C K C, PENG S T. Full-wave analysis of a lossy rectangular waveguide containing rough inner surfaces [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1992, 2(5): 180-181.
- [10] GOLD G, HELMREICH K. A physical model for skin effect in rough surfaces [C]//2012 7th European Microwave Integrated Circuit Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 631-634.
- [11] GOLD G, HELMREICH K. Surface impedance concept for modeling conductor roughness [C]//2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1-4.
- [12] TSANG L, GU X, BRAUNISCH H. Effects of random rough surface on absorption by conductors at microwave frequencies [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2006, 16(4): 221-223.
- [13] 叶鸣, 贺永宁, 胡少光, 等. 微波频段金属表面电阻的谐振腔测试方法研究 [C]//2013 全国天线年会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2013: 1428-1430.
- [14] WILKER, C, SHEN Z Y, PANG P, et al. 5 GHz high-temperature-superconductor resonators with high Q and low power dependence up to 90 K [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(9): 1462-1467.
- [15] 曾成. 镜像法测试高温超导薄膜微波表面电阻的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009: 42-47.

(编辑 刘杨)