直流横磁真空灭弧室电弧运动特性影响因素分析

刘晓明1* 赵媛媛1 陈海1 闻福岳2

(1.智能配用电装备与系统全国重点实验室河北工业大学电气工程学院天津 300401;

2. 中电普瑞电力工程有限公司 北京 102200)

Analysis of Influencing Factors of Arc Motion Characteristics of DC Transverse Magnetic Vacuum Interrupter

LIU Xiaoming^{1*}, ZHAO Yuanyuan¹, CHEN Hai¹, WEN Fuyue²

(1. State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System, School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. C-EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract During the fault breaking process, the metal vapor arc plasma in the vacuum interrupter with a transverse magnetic field moves at high speed along the contact surface, and the evolution of the arc dynamic behavior directly affects the breaking performance of the vacuum circuit breaker. In this paper, in order to study the action of magnetic blowing force on the arc during the breaking performance, combing the operating mechanism characteristics of the operating mechanism on the breaking performance, combing the operating mechanism characteristic of the 12 kV/1250 A/25 kA vacuum circuit breaker, a three-dimensional finite element transverse magnetic field model is established. The research results indicate that the rotational speed of the arc root on the contact surface can be increased by improving the speed characteristics of the mechanism; however, the magnetic field is correspondingly weakened. In addition, by analyzing the effect of contact structure parameters on the force exerted on the arc, it can be obtained that, moving the starting point of the slot towards the outside of the contact or reducing the slot width is beneficial for the arc to cross the slot, and the stagnation time of the arc on the contact surface can be reduced to improve the breaking capacity of the vacuum circuit breaker.

Keywords Vacuum circuit breaker, Vacuum arc plasma, Transverse magnetic field, Operating mechanism

摘要 在故障开断过程中, 横磁真空灭弧室内部的金属蒸气电弧等离子体受横向磁场的作用沿触头表面高速运动, 电弧 动态演化行为直接影响真空断路器的开断性能。文章结合断路器机构运动特性曲线, 建立 12 kV/1250 A/25 kA 真空灭弧室横 磁触头系统三维磁场有限元模型, 研究伴随开断进程极间磁场和电弧所受磁吹力变化规律, 并探究机构运动特性对开断性能 的影响。研究结果表明, 提高机构速度特性可以增大电弧弧根在触头表面的旋转速度, 但同时会减弱极间磁场。此外, 通过 仿真分析触头结构参数对电弧作用力的影响, 发现将槽隙起点向触头外侧移动或减小槽隙宽度均有利于电弧跨越槽隙, 减小电弧在触头表面的停滞时间, 有利于提高断路器的开断能力。

关键词 真空断路器 真空电弧等离子体 横向磁场 操作机构 中图分类号: TM561.2 **文**献标识码: A **doi:** 10.13922/j.cnki.cjvst.202409007

真空断路器以其长寿命、小型化与介质环保等 特点被广泛应用于中压电力系统,担负着系统控制 与保护任务^[1]。真空断路器本体结构主要包括灭弧 室与操动机构。当所在线路出现短路故障时,在灭 弧室与机构协同配合下完成线路故障能量的快速 泄能,期间在灭弧室中不可避免产生金属蒸气电弧, 其发生、发展直至熄灭全过程的动力学演化行为直 接影响真空断路器的整机性能^[2]。真空灭弧室触头

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No.52177139)

^{*}联系人: E-mail: liuxiaoming@hebut.edu.cn

结构设计是调控极间电弧运动行为的有效途径之一,即通过改变触头结构改变电流流路,在极间产 生横磁、纵磁或旋转磁场,进而实现极间磁场对电 弧的逸散作用^[3]。其中,横磁触头的工作原理是在 极间产生横向磁场,驱使电弧在触头表面旋转运动, 使电弧向未熔区移动,使原熔区冷却,避免电弧对 触头电极产生局部烧蚀。相比于纵磁结构,横磁触 头在电流过零后具有较高的弧后介质强度恢复速 度,因此如何提高横磁触头系统开断能力引起广泛 关注^[4-5]。

在臺秒级时间和臺米级空间内真空电弧等离 子体的逸散进程伴随着复杂的电、磁、热、力多物 理场的耦合作用。为了揭示横磁触头与电弧互作 机理,邹积岩等⁶⁹通过建立横磁作用下的直流电弧 阴极过程模型,从微观角度解释了横磁作用下电弧 运动机理,并得到了粒子温度等参数与磁场之间的 定量关系。修士新等^[7]和段肖力等^[8]建立了触头三 维模型,在对比杯状横磁触头、螺旋槽型横磁触头 和万字型触头极间磁场和电弧受力研究中发现,弯 曲状缝隙螺旋槽型比直线状缝隙结构更有利于电 流的开断;杯状型横磁触头开槽倾斜角度和触头杯 的槽数越大,越有利于电弧开断,万字型触头槽隙 越小越有利于电弧运动。Dullni E 等^[9-10]在对横磁 作用下真空电弧运动特性分析中,提出了电弧运动 速度的计算方法,并以实验结果进行验证,研究表 明电极表面温度和电弧长度(极间距)与触头运动速 度存在相关性。Kaltenecker A 等^[11]在对杯形横磁 的实验研究中发现,伴随电极的运动过程,电弧具 有不同的运动模式,且电极运动对电弧特性具有重 要影响。

综上,为探究电极运动过程横磁触头磁场分布 规律及其对电弧作用机制,以12kV/1250A/25kA 直流真空灭弧室横磁触头为对象,建立三维极间磁 场物理数学模型,研究直流开断下操动机构速度特 性和触头结构参数对极间磁场和电弧受力的作用 机理(技术路线如图1所示),为设计高开断能力真 空断路器触头结构提供参考。

1 仿真分析模型建立

1.1 万字型触头结构模型

所建直流真空灭弧横磁场触头模型如图 2 所 示,采用有限元法进行极间三维磁场分析。材料参 数如表1所示。触头系统基本参数:触头直径 42.0 mm;开距12.0 mm。极间电流路径:上导电杆→ 上触头片→电弧柱→下触头片→下导电杆。





图2 万字型触头 3D 磁场仿真模型

Fig. 2 3D magnetic field simulation model of Wan-type contact

表1 触头系统材料参数取值

Tab. 1 Material parameters of contact

结构部件与电弧区域	材料与组成	由导率/S/m	相对磁导率
B.b.kr		5.0.107	114713 Haut 13
守电杆	Cu	5.8×10	0.999991
触头片	CuCr25	2.8×10^{7}	1.0
电弧	Arc	2800.0	1.0

1.2 仿真计算数学模型

触头系统电磁场^[12]满足麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = J + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases}$$
(1)

式中, ρ 为体电荷密度,**D**为电位移矢量,**H**为磁场强度,**B**为磁场感应强度。

采用有限元法进行电磁场求解,补充方程如下:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu}$$

$$\int_{s} J \cdot \mathbf{n} ds = i \qquad (2)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi$$

式中, **A**为磁矢位, φ 为标量电位, ε 为介电常数, μ 为 真空磁导率, *i* 为触头流过电流(电弧电流), **J**为电 流密度。

2 横向磁场作用时电弧速度计算

文献 [8] 基于能量平衡方程,考虑电弧热量、触 头电极材料蒸发损失能量和金属蒸气电离和运动 能量,提出电弧等离子体在横磁作用下的速度计算 公式:

$$v_{\rm arc} = i^{5/6} \left(\frac{j}{\pi}\right)^{1/2} \left[\left(\frac{b_{\rm T} I_{\rm a} h_{\rm ev}}{m_{\rm N}}\right)^2 \left(\frac{4}{(T_{\rm b} - T_0)^2 \kappa \xi c}\right) \right]^{1/3} \quad (3)$$

式中,*j*为电弧电流密度标量,*i*为电弧电流, T_b 为触 头表面最终温度, T_0 为触头表面初始温度, κ 、 ξ 、c分别为触头电极材料的热导率、质量密度、比热容, v_{arc} 为电弧运动速度, h_{ev} 为蒸发焓, b_T 为磁场标幺值, m_N 为原子质量。

*T*_b是在固定能量下所求得的触头表面温度;*l*_a 为电弧长度,可视为开断时触头极间距;*j*为实验 所测电流密度,当触头表面温度为 1400 K、电弧 电流密度为 1.5×10⁸ A/m²时,所求电弧速度如图 3 所示。







3 直流故障开断下电极运动过程分析

直流开断条件:依据实验所得真空断路器分闸



过程位移/时间特性(如图4所示),结合电流变化,

分析典型条件下的直流故障开断过程:

图4 5kA 直流故障开断电流和机构位移/时间特性曲线

Fig. 4 5 kA DC fault breaking current and mechanism displacement/time characteristic curve

0 ms 时,系统发生故障,故障电流快速上升,检测系统判定故障并发出分闸指令,断路器接到故障 开断信号,机构未动作。

0.5 ms 时,完成励磁,机构带动动触头运动,开 始分闸操作。

1.25 ms 时, 触头刚分, 极间产生金属蒸气电弧 等离子体, 随着机构运动, 极间距增大。横磁作用 下电弧在触头表面旋转。

4.25 ms 时, 投入换流, 触头间电流迅速下降, 此时极间距为 10.0 mm。

4.3 ms时,电流降至为零,电弧熄灭。

5.5 ms 时,完成分闸全过程。

假设: 燃弧电流 5kA, 极间距 1.0 mm 时, 电弧刚 好运动至触头边缘处; 不同极间距下, 触头表面温 度均为 T_b。计算得到在电流密度 1.5×10⁸ A/m²下, 伴随开断进程的发展, 电弧旋转速度如图 5 所示。

图 6 为万字型触头结构平面示意图,计算所得触头极间距从 1.0~10.0 mm 时电弧弧根运动轨迹, 对应图 6 中"1[#]"~"10[#]"所处位置,弧柱位置坐标如表 2 所示。











Fig. 6 Schematic diagram of arc root motion trajectory under different pole spacing

表 2 触头间隙中心平面最大磁感应强度变化

Tab. 2Variation of maximum magnetic induction intensity in
the center plane of the contact gap

l _a /mm	弧柱位置与坐标	触头中心最大 磁感应强度/mT
1.0	1 [#] , (17.25, 0)	572.13
2.0	2 [#] , (17.24, -0.39)	539.34
3.0	3 [#] , (17.202, -1.322)	507.23
4.0	4 [#] , (16.92, -3.451)	487.57
5.0	5 [#] , (16.26, -5.877)	497.13
6.0	6 [#] , (15.019, -8.7297)	477.37
7.0	7 [#] , (13.021, -11.64)	400.96
8.0	8 [#] , (11.283, -13.426)	408.34
9.0	9 [#] , (5.216, -17.447)	408.21
10.0	$10^{\#}, (-1.5268, -17.68)$	438.93

4 极间三维磁场仿真与分析

4.1 极间中心面磁感应强度分布和电弧受力分析

选取极间距 1.0 mm、3.0 mm、5.0 mm、7.0 mm、 9.0 mm 及 10.0 mm 典型位置进行分析,如图 7 所示。

仿真结果表明,磁场绕弧柱旋转,驱使电弧运动。极间中心平面磁感应强度并非呈均匀分布,其 最大值围绕在电弧周围,并向着四周逐渐减小;离 弧柱越远,磁感应强度越小。同时,弧柱周围磁感 应强度也并非呈均匀分布。

不同位置的电弧受力也不同,当电弧位于触头 前端(拐点周围)时,电弧受力偏向触头外侧,防止 电弧向触头中心移动;当电弧位置位于触臂末端时, 对电弧磁吹力方向与触头圆周相切,驱动电弧运动; 而当电弧处于触头槽隙时,所产生的磁吹方向沿着 槽隙朝向触头外侧,可能导致电弧更倾向于沿着槽 隙运动。

4.2 纵切面磁感应强度分析

从纵切面磁感应强度看,如图 8 所示,箭头方 向为磁场方向,箭头长度表示磁感应强度幅值,电 流流经触头所产生的横向磁场磁感应强度在两侧 触头处最大,并向着触头间隙中心平面逐渐减小。

在极间距为 3.0 mm 和 10.0 mm 时,电弧位置均 处于触臂中心。对比触头纵切面上磁感应强度分 布可知,极间距 3.0 mm 时,中心平面最大磁感应强 度为 502.9 mT;极间距 10.0 mm 时,中心平面最大 磁感应强度为 438.97 mT;极间距离的增大,会减小 触头中心面的磁感应强度。

4.3 极间中心面磁感应强度变化分析

极间距 7.0 mm 之前, 电弧在触头触臂上运动。 由表 2 可知, 极间距从 1.0 mm 增至 4.0 mm 时, 由于 极间距增加, 中心平面最大磁感应强度从 572.13 mT 减至 487.37 mT; 极间距 5.0 mm 时, 中心平面最大 磁感应强度增加; 极间距 6.0 mm 时, 磁感应强度略 有下降。电弧在触臂运动时, 在触臂末端时触头所 产生磁感应强度大于电弧在触臂前端的磁感应强 度。极间距增加时, 中心平面磁感应强度下降程度 逐渐减小。

极间距 7.0 mm 时,电弧刚好运动至触头槽隙, 极间中心平面磁感应强度急剧衰减,约为 400.96 mT; 极间距 9.0 mm 后,电弧离开槽隙到达触臂前端,极 间中心面最大磁感应强度相比电弧在触头槽隙时 有所增加,但较电弧过槽隙前磁感应强度下降明显。

5 电弧所受磁吹力变化

在触头极间距发生变化时,会影响电弧所处位 置,导致其所受磁吹力方向不同。磁场对电弧的磁



图7 不同极间距下磁场分布和电弧受力示意图。(a)极间距 1.0 mm, (b)极间距 3.0 mm, (c)极间距 5.0 mm, (d)极间距 7.0 mm, (e)极间距 9.0 mm, (f)极间距 10.0 mm

Fig. 7 Distribution of magnetic field and force at different gap distances. (a) Gap distance 1.0 mm, (b) gap distance 3.0 mm, (c) gap distance 5.0 mm, (d) gap distance 7.0 mm, (e) gap distance 9.0 mm, (f) gap distance 10.0 mm

吹作用力表达式为:

$$f = \iiint \mathbf{j} \times \mathbf{B} \mathrm{d} V \tag{4}$$

由式(4)可知,磁吹力与电弧长度和磁场大小 有关。

为分析电弧运动过程中磁吹力变化,计算弧柱 所受磁吹力沿x、y方向分量见表3;为分析电弧在 触头表面旋转运动规律,将电弧所受磁吹力x和v方向分量转换为沿圆周切向方向(θ方向)和径向方 向(r方向)分量,其受力变化转换如图9所示。定 义径向外法向方向和切向顺时针方向为正方向。

径向力和切向力的转换公式如下所示:

$$\begin{pmatrix} f_r \\ f_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ \sin\alpha & -\cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix}$$
(5)
式中, α 为弧柱所在位置的圆心角。

极距离在 7.0 mm 之前, 电弧在触臂上运动, 电 弧所受磁吹力随着极间距增加而增加。电弧切向 力随着极间距增加而不断增加,径向力在触臂拐点 两侧经历了先增大后减小的变化过程,电弧到达触 臂前端时,切向力达到最大而径向力最小,利于电 弧在沿触臂运动的过程中最终达到一个较高切向 速度以跨越槽隙。

当电弧经过触头槽隙时,即使极间距有所增加,

但电弧所受磁吹力急剧衰减,主要原因是电弧运动 到触头槽隙时触头间隙的磁感应强度骤减。同时 电弧所受的径向力明显增加,阻碍电弧跨越槽隙。

极间距 9.0 mm 后, 电弧重新运动至下一个触 臂。由于磁感应强度和极间距增加,电弧所受磁吹 力较电弧位于槽隙时有一定回升;但相较于极间距 6.0 mm 时仍有一定减小,这主要是由于极间磁感应 强度的减小。

分析可知,刚分时刻应使机构具有较高的初速 度;伴随极间距的增加,电弧很快具有较高旋转速 度,以减少触头烧蚀。投入换流前,应降低机构速 度,确保极间具有较高磁场强度,从而保持电弧在 运动过程中具有较高加速度。

6 触头结构参数对电弧所受磁吹力的影响

分析可知,不同电弧位置时极间磁场分布不同, 电弧受力也不同,这主要源于横磁结构的设计。为 减小电弧跨越槽隙的影响,有必要分析横磁触头结 构对极间磁场和电弧所受磁吹力的影响。根据万 字型触头的制备要求,选取主要参数如图 10 所示, 改变槽隙起点 A(x_A,y_A), 槽隙宽度 R₂研究磁场和电 弧所受磁吹力的变化规律。



图8 不同极间距下磁场纵向分布。(a)极间距 3.0 mm, (b)极间距 10.0 mm

Fig. 8 Longitudinal distribution of magnetic field at different gap distances. (a) Gap distance 3.0 mm, (b) gap distance 10.0 mm

表 3 不同极间距下弧柱所受磁吹力

Tab. 3 Magnetic blowing force on arc at different pole spacing

l _a /mm	ƒ∕N	$f_{\rm x}/{ m N}$	$f_{\rm y}/{ m N}$	f_{θ}/N	f_r/N
1.0	0.8234	0.109	-0.816	0.816	0.109
2.0	1.4801	0.136	-1.474	1.475	0.169
3.0	2.013	0.044	-2.013	2.010	0.194
4.0	2.569	-0.339	-2.487	2.506	0.151
5.0	3.1177	-0.948	-2.970	3.116	0.093
6.0	4.1245	-1.865	-3.468	3.937	0.082
7.0	2.7226	-0.87 8	-2.577	2.521	1.028
8.0	3.0008	-1.052	-2.811	2.634	1.640
9.0	3.6073	-1.882	-3.078	2.724	2.365
10.0	3.9508	-3.869	-0.797	3.784	1.136

6.1 触头槽隙宽度 (R₂) 对电弧所受磁吹力的影响

在极间距不变的前提下进行分析,选取极间距 7.0 mm、x_A为4.0 mm,分析电弧位于触头触臂和槽 隙时槽隙宽度对极间磁场和弧柱的影响,如图11 所



图9 电弧受力坐标变换示意图

Fig. 9 Schematic diagram of coordinate transformation of the force exerted on the arc



图10 横磁触头结构主要参数及弧柱位置

Fig. 10 Main parameters and arc column position of transverse magnetic contact structure





示。电弧位置在触臂上时,随着 R₂增加,极间平均 磁感应强度增加。原因是 R₂增加时,触头触臂面积 渐减,电弧电流密度增强,磁感应强度增加,磁吹作 用增强。而当电弧弧根位于槽隙时, R₂增加磁感应 强度降低。

电弧所受磁吹力变化如图 12 所示,比对分析 如下:



图12 弧柱受力随槽隙宽度变化(x_A=4.0 mm)



当电弧位于触头槽隙, R₂ 从 2.0 mm 增至 4.0 mm 时, 电弧所受磁吹力切向力逐渐减弱, 径向力渐增。 在 R₂ 增大到 3.0 mm 之后径向力增加显著, R₂ 在 3.7 mm 左右, 电弧位于槽隙时所受径向力大于切向力, 电弧沿槽隙方向运动, 跨越槽隙难度增加。

当电弧位于触臂上,触头槽隙宽度逐渐增加时, 电弧所受切向力逐渐增强,径向力逐渐减弱。因此 槽隙宽度增加时,电弧在触臂上的运动速度增加。

槽隙宽度越小,电弧所受切向力越大,同时径 向力越小,越有利于电弧跨越槽隙;槽隙宽度减小 在一定范围内可以减小槽隙对于电弧所带来的不 利影响。但电弧在触臂上运动时切向力减小,电弧 在触臂上的运动速度减小。

6.2 改变槽隙起点 (x_A) 对电弧所受磁吹力的影响

将横磁触头结构示意图中 x_A 向触头外侧移动 至 5.0 mm 时,改变 R_2 大小分析电弧受力变化。如图 13 可知, R_2 从 2.0 mm 变化到 4.0 mm 的过程中,触臂电 弧受切向力增加,径向力减弱;槽隙电弧受切向力减 小,径向力增加,变化趋势与 x_A 为 4.0 mm 时变化趋 势相同。当 R_2 大于 3.7 mm 左右时,触臂电弧所受 径向力变为负值,可能驱使电弧向触头中心移动,不 利于电弧粒子的逸散,从而降低断路器的开断性能。

相较于图 12 比对分析, x_A 为 5.0 mm 时, 触臂 电弧所受切向力始终大于 x_A 为 4.0 mm 的情况, 而 径向力始终小于 x_A 为 4.0 mm 的情况, 且在 R_2 增大 的过程中, 触臂电弧所受切向力和径向力的变化趋 势较 x_A 为 4.0 mm 更为显著; 对于槽隙弧柱, 将 x_A 从 4.0 mm 增加至 5 mm 时电弧所受切向力和径向 力变化不大。





Fig. 13 The variation of the force exerted on the arc column with the width of the groove ($x_A=5.0$ mm)

分析表4可知,固定 R₂为3.0 mm时,x_A为4.0 mm 和 5.0 mm 两种情况下的电弧受力,随着 A 点向触 头外侧移动,槽隙电弧所受磁吹力切向力和径向力 均有减小,切向力减小了 0.006 N,径向力减小了 0.104 N。电弧所受切向力占磁吹力的比重明显增 加。因此,将槽隙起点向触头外侧适当移动时,利 于电弧跨越槽隙,增强开断性能。

表 4 A 点水平位置对电弧所受磁吹力的影响(R₂=3.0 mm)

Tab. 4 The influence of the horizontal position of point A on the magnetic blowing force acting on the arc (R_2 = 3.0 mm)

弧柱位置	$x_{\rm A}/{ m mm}$	$f_{ heta}/{ m N}$	f_r/N
触头触臂	4.0	3.1505	0.8166
	5.0	3.3802	0.3568
触头槽隙	4.0	1.893	1.3289
	5.0	1.887	1.2253

通过以上分析可知槽隙起点 (x_A) 和槽隙宽度 (R₂) 两者均对电弧运动行为有直接影响。槽隙电弧 能否成功跨越槽隙主要影响因素是 R₂。触臂电弧 的运动速度的主要影响因素为触臂面积,触臂面积 越小时,触臂电弧受到的切向力越大,切向运动速 度越快,更有利于电弧围绕触头外表面做圆周运动。 因此 x_A 和 R₂ 的变化均转变为对触臂面积的影响, 当改变 x_A 和 R₂ 大小使得触臂面积减小时,电弧电 流密度增加,触头极间磁场和电弧所受切向力均有 增加,有利于断路器开断。但在触头面积减小到一 定数值时,电弧所受径向力方向指向触头内侧,可 能驱使电弧向着触头中心运动,导致断路器的开断 能力降低。

7 结论

采用有限元方法,对 12 kV/1250 A/25 kA 真空 断路器所用万字型触头进行数值模拟与可视化分 析。研究表明,电弧所受磁吹力与触头间隙磁场和 电弧长度关系密切。当极间距增加时,即使触头中 心面的磁场强度会减弱,但随着电弧长度增加,电 弧所受磁吹力越大。在开断大电流时,可以增加触 头刚分速度,使得电弧在触头表面有较高的旋转速 度从而减少电弧对于触头表面的烧蚀,以提高开断 性能。

仿真表明,增加 x_A时,电弧所受切向力占总力 的比重更大,利于电弧运动,对于本研究对象(直径 为 42.0 mm 横磁触头), x_A 为 5.0 mm 时极间磁场和 电弧受力优于 4.0 mm。

为探究槽隙宽度对于电弧运动的影响,设置 R₂ 在 2.0~4.0 mm 范围内变化,槽隙宽度越小,电弧位 于槽隙时所受切向磁吹力比重越大,越有利于电弧 跨越槽隙,但同时会牺牲电弧在触臂上的切向力, 减小电弧在触臂上的运动速度。将触头开槽位置 向外侧移动时,电弧在槽隙上的切向力和电弧在触 臂上的切向力显著增加,可弥补槽隙变窄而降低触 臂电弧运动速度。

参考文献

- [1] Zou J Y, Chen J P, Liu X M, et al. Vacuum switch technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2021 (邹积岩, 陈军平, 刘晓明, 等. 真空开关技术 [M]. 北京: 机械工业 出版社, 2021 (in Chinese))
- [2] Sun L, Yu L, Liu Z, et al. An opening displacement curve characteristic determined by high-current anode phenomena of a vacuum interrupter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2585–2593
- [3] Wang H Y, Dong E Y, Yin G X, et al. Research on the new type of 12 kV inflatable vacuum circuit breaker[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 397: 1230–1235
- [4] Wang J M. Vacuum switch technology and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2008 (王季梅.

真空开关技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008 (in Chinese))

- [5] Schade E. Physics of high-current interruption of vacuum circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(5): 1564–1575
- [6] Wang H, Lun J G, Wei L C, et al. Mode for the cathode mechanism in a transverse magnetic steered vacuum arc[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(2): 79-82 (王浩, 陆金桂, 韦伦存, 等. 横向磁场作用下真空电弧阴极 过程数学模型的研究 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2): 79-82 (in Chinese))
- [7] Xiu S X, Pang X H, Zhang M, et al. Calculation and analysis of magnetic blowing force between transverse magnetic field contacts in vacuum interrupters[J]. Vacuum Electronics, 2007(5): 19–22 (修士新, 庞先海, 张敏, 等. 真空灭弧室横向磁场触头间磁吹力的计算分析 [J]. 真 空电子技术, 2007(5): 19–22 (in Chinese))
- [8] Duan X L, Xiu S X, Wu S F, et al. Simulation of magnetic field and arc characteristics of transverse magnetic contacts in vacuum switches[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 57–63 (段肖力,修士新,吴水锋,等. 真空 开关横磁触头磁场仿真与电弧特性研究 [J]. 高压电器, 2017, 53(3): 57–63 (in Chinese))
- [9] Dullni E. Motion of high-current vacuum arcs on spiraltype contacts[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1989, 17(6): 875–879
- [10] Dullni E, Schade E, Shang W. Vacuum arcs driven by cross-magnetic fields (RMF)[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(5): 902–908
- [11] Kaltenecker A, Schussek M. Anode-spot formation and motion of vacuum arcs[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1985, 13(5): 269–276
- [12] Ding C, Wang Z L, Yuan Z, et al. Optimization design of vacuum arc extinguishing chamber contact structure based on multi-objective grey wolf optimization algorithm and RBF neural network[J]. High Voltage Technology, 2024, 50(2): 543-550 (丁璨, 王周琳, 袁召, 等. 基 于多目标灰狼优化算法与 RBF 神经网络的真空灭弧 室触头结构优化设计 [J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 543-550 (in Chinese))