

杯状带铁心和不带铁心两种纵磁触头 磁场特性的分析比较

郑跃胜, 王仲奕, 刘志远, 郝萌萌

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Analysis and Comparison of Magnetic Characteristics in Cup-type Axial
Magnetic Field Contacts with Irons and without Irons

ZHENG Yue-sheng, WANG Zhong-yi, LIU Zhi-yuan, HAO Meng-meng

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 用三维有限元方法研究了不同开距下杯状带铁心和不带铁心两种纵磁触头的磁场特性, 包括纵向磁感应强度和纵向磁场滞后时间。对两种触头进行对比分析的结果表明:

杯状纵磁触头引入铁磁环后在铁心区域纵向磁场大大增强, 在触头中心区域减弱, 呈凹形分布。电流过零时, 在铁心区域剩余纵向磁场明显高于不带铁心情况, 而在非铁心区域非常接近。随着开距的增大, 铁心区域纵向磁场下降显著, 非铁心区域纵向磁场几乎不变。而不带铁心结构纵向磁场随开距的增加呈较均匀的下降。与杯状不带铁心纵磁触头相比, 带铁心结构纵向磁场滞后时间在整个区域增大。随着开距的增大, 两种纵磁触头纵向磁场滞后时间都下降。铁磁环的引入一方面使得纵向磁感应强度以及分布都发生了很大的变化, 另一方面带来的涡流效应也变得更加明显了, 因此在设计触头时应同时关注其正反两方面的效应。

关键词: 真空灭弧室; 纵向磁场; 真空电弧

中文分类号: TM561.2 文献标识码: A

Abstract: Axial magnetic characteristics, which include axial magnetic flux density and phase shift time, of cup-type axial magnetic field contacts with irons and that without irons are studied by 3D finite element method. The results show that:

Axial magnetic flux density of cup-shaped AMF contacts with irons in the middle plane of contacts gap is changed to be a concave-shaped distribution at peak current. It weakens near the center, while it strengthens observably at the irons area. The values of the two contacts are almost the same at the no irons area while the current is zero, but the axial magnetic flux density of cup-shaped AMF contacts with irons strengthens observably at the irons area. With the increasing of contacts gap, axial magnetic flux density of cup-shaped

AMF contacts with irons changes little at the no irons area, while it weakens obviously at the irons area. Axial magnetic flux density of cup-shaped AMF contacts without irons weakens uniformity all over the range. Phase shift time of cup-shaped AMF contacts with irons increases all over the region. With the increasing of contacts gap, the phase shift time of the two contacts both decrease. Axial magnetic flux density and its distribution are changed observably after the introducing of irons, but the eddy effect is also remarkable. Both of the positive and negative effects should be considered in designing the contact.

Key words: vacuum interrupter; axial magnetic field(AMF); vacuum arc

0 引言

真空灭弧室是真空断路器的核心, 它对控制真空电弧完成导体和绝缘体之间开关作用的转换起到至关重要的作用。真空灭弧室中在开断电流时采用纵向磁场, 可以使真空电弧在大电流下仍处于扩散状态, 电弧电压保持在较低水平。

传统的线圈式纵磁触头和杯状纵磁触头能够在触头间隙中产生较均匀分布的纵向磁场, 文[1-3]对纵向磁场的空间分布和滞后时间作了细致的分析研究。然而随着电流不断增大, 电弧仍然出现收缩现象, 造成触头表面利用率下降, 局部烧蚀严重。文[4]从电弧自身磁场的磁压力沿弧柱半径由里向外逐渐增强、弧柱体压力沿弧柱半径由里向外逐渐减弱的物理现象出发, 通过改变触头结构来控制纵向磁场的分布, 使电弧在大电流下仍然能够保持扩散态, 从

而提高真空开关的开断能力,如文[5]研发的 SADE 电极结构。文[4],文[6]也开始研究利用非均匀纵向磁场来提高真空灭弧室的开断能力。

在传统的杯状纵磁触头中加入铁心后,磁场特性发生了显著的变化。合理设计铁心的形状可以控制纵向磁场,有利于提高真空灭弧室的开断能力。笔者主要研究杯状触头中加入铁心后对磁场特性产生的影响。通过对杯状带铁心和不带铁心两种纵磁触头进行三维有限元仿真,可以对比分析两种触头的磁场特性,包括在不同开距下触头间隙中心平面纵向磁感应强度和纵向磁场滞后时间的空间分布。研究结果可以为纵向磁场控制真空电弧分布的进一步研究提供参考。

1 电极结构模型

杯状纵磁触头结构见图 1,杯状带铁心纵磁触头结构见图 2。计算分析中杯状带铁心纵磁触头除了引入铁心外,其它触头设计参数都和杯状不带铁心纵磁触头的一样。触头直径为 48 mm,电弧直径与触头直径相同。触头片材料 CuCr50 的电导率为 $1.8 \times 10^7 \text{ S/m}$,电弧电导率为 2800 S/m ^[7]。铁心为电工纯铁 DT4,电导率为 $1.0 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。交流电流为 50 Hz,电流有效值为 20 kA。计算域为模型的 10 倍,边界条件为开域边界条件。

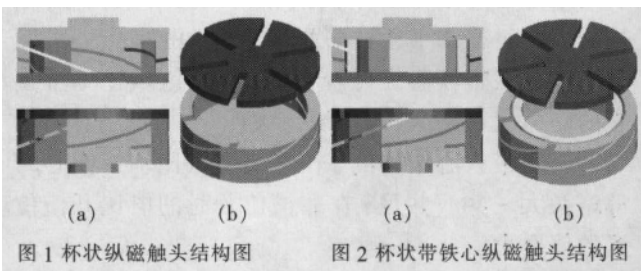


图 1 杯状纵磁触头结构图 图 2 杯状带铁心纵磁触头结构图

采用 Maxwell 3D 软件对图 1 和图 2 所示的结构进行了有限元分析。电流流过上述杯状纵磁触头后,会形成与轴向方向一致的纵向磁场作用在电弧上。杯、触头片、电弧和铁心均考虑涡流效应。触头开距从 2 mm 增加到 10 mm,步长为 2 mm。

2 计算结果比较与分析

2.1 纵向磁场 B_z 的分布

电流峰值时,两种纵磁触头在开距为 2 mm 的情况下,产生的纵向磁感应强度 B_z 在开距中心平面沿径向的分布见图 3,考察径向通过槽和不通过槽两种情况。由图 3(a)可以看出,不带铁心时 B_z 分布较均匀,最大值为 0.261 T,中心点的值为 0.245 T。带铁心时 B_z 沿径向呈凹形分布,与不带铁心相比,中心区域附近的 B_z 略有减小,其值为 0.200 T,而铁心区域的 B_z 大大加强,最大值为 0.425 T。由图 3(b)

可以看出, B_z 的径向分布形状与图 3(a) 很相似,但最大值有所提高,不带铁心的 B_z 最大值为 0.278 T,带铁心的 B_z 最大值为 0.493 T。

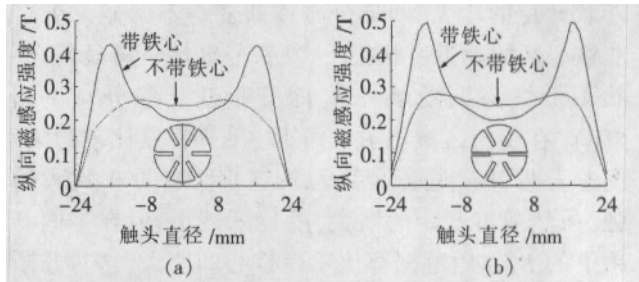


图 3 电流峰值时 B_z 在开距中心平面沿径向的分布

计算结果表明,加入铁心后, B_z 的最大值显著增大,且最大值沿径向向外移动,使磁场作用范围沿径向向外扩展,作用面积增大。在理论上这将使得触头表面得到更加充分的利用,更容易吸引电弧沿径向向外运动,减轻收缩^[4],使电弧处于扩散态,从而提高真空灭弧室的开断能力。径向通过槽和不通过槽两种情况下, B_z 分布变化不是很大。但是由于涡流的作用,使得非槽位置的 B_z 略微小于开槽位置的值。

电流过零时,两种纵磁触头在开距为 2 mm 的情况下,产生的 B_z 在开距中心平面沿径向的分布见图 4,考察径向通过槽和不通过槽两种情况。由图 4(a)可以看出,带铁心时 B_z 沿径向的分布仍然呈凹形分布,与不带铁心相比,中心区域的值几乎一样,而铁心区域的 B_z 较大。不带铁心的 B_z 最大值为 0.058 T,出现在中心点。带铁心的 B_z 在中心点的值为 0.057 T,最大值为 0.095 T。由图 4(b)可以看出, B_z 的径向分布与图 4(a) 很相似,带铁心结构铁心区域的 B_z 有所下降,最大值为 0.059 T。

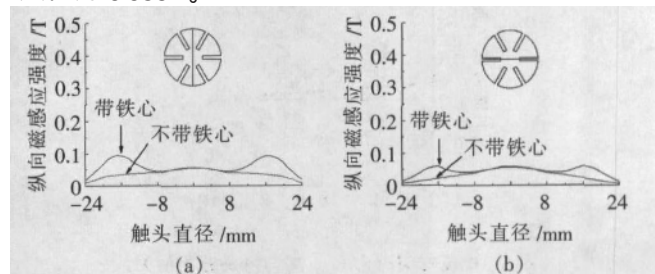


图 4 电流过零时 B_z 在开距中心平面沿径向的分布

电流过零时,场域内的 B_z 是由涡流产生的。剩余磁场越小,越有利于绝缘介质强度的恢复,也就越有利于成功开断。计算结果表明,电流过零时,杯状带铁心纵磁触头在整个区域内的 B_z 分布比杯状不带铁心纵磁触头的要大,尤其是铁心区域要大很多。可见铁磁环的引入,使得涡流效应增强,剩余磁场增大,不利于真空电弧的开断。径向通过槽和不通过槽两种情况下, B_z 分布的形态变化不是很大。这是由于开槽限制了涡流,使得开槽位置的 B_z 小于非槽位置的值。

电流峰值时在开距中心平面通过槽时 B_z 稍微大一点, 这是由于触头片开槽限制了涡流, 该位置杯状带铁心纵磁触头的 B_z 分布随开距的变化见图 5(a)。随着开距的增大, 凹形分布逐渐变得不明显。 B_z 在非铁心区域附近变化很小, 在铁心区域下降显著。杯状不带铁心纵磁触头 B_z 随开距变化的分布见图 5(b)。在整个区域内 B_z 均下降, 下降幅度比较均匀。图 5 表明引入铁磁环后, 靠近铁心区域的 B_z 大大增强, 虽然随着开距的增大, B_z 逐渐减小, 但在不同开距下的 B_z 作用范围都比不带铁心的要大, 这对开断能力的提高是有利的。

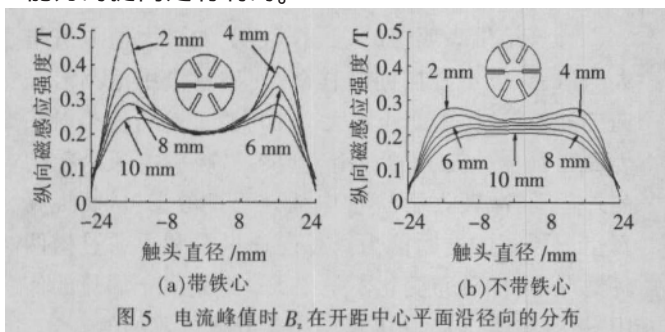


图 5 电流峰值时 B_z 在开距中心平面沿径向的分布

电流峰值时, 开距中心平面中心点的 B_z 与触头开距的关系见图 6。由图可知, 开距从 2 mm 变化到 10 mm 时, 带铁心中心点的 B_z 几乎没有变化, 不带铁心中心点的 B_z 从 0.245 T 减小到 0.204 T。在中心区域附近, 杯状带铁心纵磁触头的 B_z 虽然在开距比较小时比不带铁心的略微小些, 但是随着开距的增大却几乎没有下降。杯状带铁心纵磁触头的 B_z 呈凹形分布, 中心区域相对来说比较弱, 中心区域附近的 B_z 随开距几乎不变。

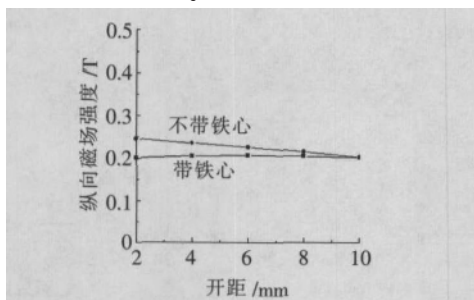


图 6 电流峰值时中心点 B_z 与触头开距的关系

电流过零时, 在开距中心平面不通过槽时 B_z 稍微大一点, 这是由于触头片未开槽处涡流比较大的缘故, 杯状带铁心纵磁触头的 B_z 在该位置随开距的变化见图 7(a)。随着开距的增大, 凹形分布逐渐变得不明显。 B_z 在非铁心区域附近变化很小, 在铁心区域下降显著。杯状不带铁心纵磁触头的 B_z 随开距变化的分布见图 7(b)。整个区域内的 B_z 均下降, 下降幅度比较均匀。图 7 表明, 虽然铁磁环的引入使得铁心区域零后 B_z 增大, 但是随着开距的增大, 该处零后 B_z 迅速减小, 滞后效应将变得不明显。

电流过零时, 开距中心平面中心点的 B_z 与触头

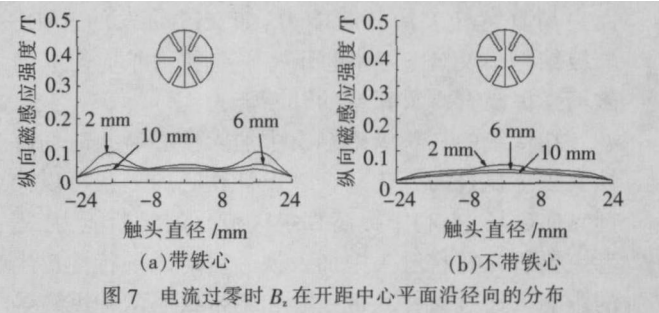


图 7 电流过零时 B_z 在开距中心平面沿径向的分布

开距的关系见图 8。由图可知, 开距从 2 mm 变化到 10 mm 时, 带铁心的 B_z 从 0.057 T 逐渐减小到 0.039 T, 不带铁心的 B_z 从 0.058 T 减小到 0.034 T, 两者差值很小, 因此引入铁磁环后对电流过零时剩余磁场强度造成的影响, 主要体现在铁心区域。

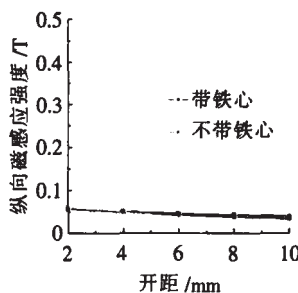


图 8 电流过零时中心点 B_z 与触头开距的关系

2.2 纵向磁场滞后时间 t 的分布

在开距为 2 mm 的情况下, 计算出纵向磁场滞后时间 t 在开距中心平面沿径向的分布见图 9, 考察径向通过槽和不通过槽两种情况。由图 9(a) 可以看出, 杯状带铁心纵磁触头 t 在整个区域比不带铁心的略微大一些, 铁心区域增大明显。由图 9(b) 可以看出, 带铁心结构的 t 在整个区域比不带铁心时都略微大一些, 并且 t 在非槽位置时的值比开槽位置的值要大。

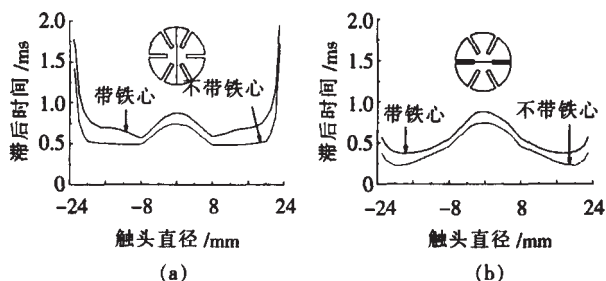


图 9 t 在开距中心平面沿径向的分布

由于涡流效应, B_z 滞后电弧电流一定时间 t 。当电弧燃烧 t 时间后, 纵向磁场才能作用于电弧上。当 t 大于一定值后, 电弧集中烧蚀阳极表面, 会使阳极温度升高, 影响真空开关的开断性能。此外, 当交流电流过零时, 剩余磁场 B_z 将约束电弧等离子体在电流过零时的扩散。当 t 较大时, 在暂态恢复电压的作用下, 真空开关成功开断的可能性降低^[8]。杯状带铁心纵磁触头在开距平面上 t 的整体分布值都比杯状

不带铁心纵磁触头的略微增大,对真空灭弧室的开断能力会有一些的负面影响。

两种触头的 t 在开距中心平面中心点的值都比较大,因此将该点作为一个典型点来研究。 t 与触头开距的关系见图 10。由图可知,开距从 2 mm 变化到 10 mm 时,带铁心触头的 t 从 0.875 ms 逐渐减小到 0.603 ms,不带铁心触头的 t 从 0.743 ms 逐渐减小到 0.526 ms。不同开距下,杯状带铁心纵磁触头的 t 都比不带铁心的略微大一些。随着开距的增大,两种触头的 t 都下降,且下降的程度相当。

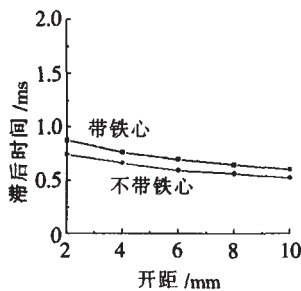


图 10 t 与触头开距的关系

3 讨论

通过对比分析杯状带铁心和不带铁心两种纵磁触头的磁场特性,包括电流峰值时和过零时的纵向磁场强度以及纵向磁场滞后时间,可见引入铁磁环后,电流峰值时纵向磁场强度和分布都发生了很大的变化,有利于开断能力的提高。但是铁心区域的零后剩余磁场和纵向磁场滞后时间也略微增大,对开断能力有一定的负面影响。

电流过零时,杯中的涡流比其它地方明显,在开距为 2 mm 的情况下,带铁心和不带铁心两种情况的电流密度分布见图 11。杯状不带铁心触头杯中的电流密度最大值 $J_{\text{环}}$ 为 $5.291 \times 10^7 \text{ A/m}^2$,触头片中的 $J_{\text{环}}$ 为 $1.202 \times 10^7 \text{ A/m}^2$;杯状带铁心触头杯中的 $J_{\text{环}}$ 为 $7.993 \times 10^7 \text{ A/m}^2$,触头片中的 $J_{\text{环}}$ 为 $1.605 \times 10^7 \text{ A/m}^2$,铁心中的 $J_{\text{环}}$ 为 $4.391 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 。显然,引入铁心后涡流最大值增大,使得滞后效应更加明显。

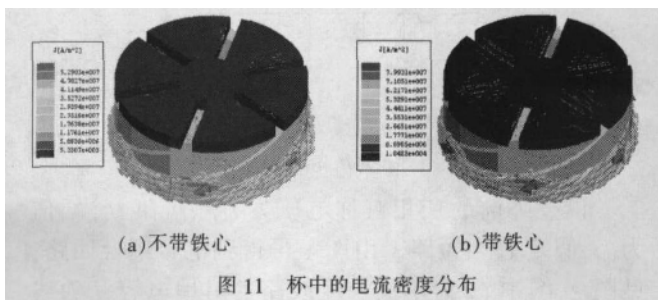


图 11 杯中的电流密度分布

通过对不同厚度的铁磁环进行计算,发现铁磁环厚度不是很厚的情况下,纵向磁场滞后时间主要是由杯和触头片中的涡流引起。随着铁磁环厚度增

大,铁心区域及边缘处的滞后效应会明显增加。如果要减小加入铁磁环后带来的磁场滞后效应,需要合理设计杯、触头和铁磁环的结构以及合理安排它们之间的位置。

4 结语

在传统杯状纵磁触头中引入一个铁磁环后,引起了触头磁场特性的显著变化,通过对比加入铁心前后的两种触头磁场特性,得到如下结果:

(1) 杯状纵磁触头引入铁心后在铁心区域纵向磁场大大增强,在触头中心区域减弱,呈凹形分布。电流过零时,在铁心区域剩余纵向磁场明显高于不带铁心情况,而在非铁心区域非常接近。随着开距的增大,铁心区域纵向磁场下降显著,非铁心区域纵向磁场几乎不变。而不带铁心结构纵向磁场随开距的增加呈较均匀的下降。

(2) 与杯状不带铁心纵磁触头相比,带铁心结构纵向磁场滞后时间在整个区域增大。随着开距的增大,两种纵磁触头纵向磁场滞后时间都下降。

(3) 铁心的引入一方面使得纵向磁场强度以及分布都发生了很大的变化,另一方面带来的涡流效应也变得更加明显了,因此在设计触头时应同时关注其正反两方面的效应。

参考文献:

- [1] Nitta K, Watanabe K, Kagenage K, et al. Three-dimensional Magnetic Field Analysis of Electrodes for VCBs [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1997, 12(4): 1520-1525.
- [2] Stoving P N, Bestel E F. Finite Element Analysis of AMF Vacuum Contacts [C]// IEEE 18th Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Eindhoven, 1998: 522-529.
- [3] 刘志远, 谢克松, 王仲奕, 等. 杯状纵磁真空灭弧室三维涡流场仿真[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(2): 26-28, 37.
- [4] Fu J, Jia S, Lan T. Observation and Investigation of Vacuum Arc under Various Distributed Axial Magnetic Fields[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2001, 29(5): 2111-2116.
- [5] Homma M, Somei H, Niwa Y, et al. Physical and Theoretical Aspects of a New Vacuum Arc Control Technology-self Arc Diffuse by Electrode SADE [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 1999, 27(4): 961-968.
- [6] SHI Zongqian, JIA Shenli, FU Jun, et al. Axial Magnetic Field Contacts with Nonuniform Distributed Axial Magnetic Field[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2003, 31(2): 289-294.
- [7] Fenski B, Lindmayer M. Vacuum Interrupters with Axial Field Contacts 3-D Finite Element Simulation and Switching Experiments [J]. IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(4): 407-412.
- [8] 刘志远, 王仲奕, 王季梅, 等. 杯状纵磁触头纵向磁场滞后时间研究[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 87-90.