



·脉冲功率技术·

Blumlein 主放电开关中绝缘结构对 沿面闪络电压的影响*

武庆周, 李 劲, 李 远, 黄子平, 荆晓兵, 高 峰, 陈 茂, 刘邦亮

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: Blumlein 主放电开关作为关键部件被大量地应用于强流电子直线感应加速器等大型脉冲功率装置中, 其中绝缘子在主开关中起隔离水或油与气体的作用。设备在高电压脉冲下长时间或高频次作用时, 绝缘子气体会出现沿面闪络现象, 严重影响直线感应加速器的可靠运行。对 Blumlein 主放电开关中的绝缘结构进行了电场仿真计算, 通过对绝缘子的几何结构和电极形状的优化设计, 有效调控了绝缘子表面和电极表面的电场分布, 试制了不同构型的绝缘子, 开展了在标准雷电波脉冲条件下的沿面闪络研究。研究结果表明, 优化后的绝缘子的最低和最高沿面闪络电压相比原始结构分别提升了约 35.9% 和 37.2%。

关键词: Blumlein 主放电开关; 沿面闪络; 绝缘子; 电场分布; 绝缘结构优化

中图分类号: TM85

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220004

Influence of insulation system on surface flashover voltage in Blumlein main switch

Wu Qingzhou, Li Jin, Li Yuan, Huang Ziping, Jing Xiaobing,
Gao Feng, Chen Mao, Liu Bangliang

(Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: As a key component, the Blumlein switch is widely used in large pulsed power devices such as high-current electron linear induction accelerators. The insulator in the main switch plays the role of isolating water or oil and gas. When the equipment is subjected to high voltage pulse for a long time or high frequency, the gas side of the insulator will flashover along the surface. The occurrence of surface flashover seriously affects the reliable operation of linear induction accelerator. In view of this, electric field simulation calculation is carried out on the insulation structure of the Blumlein main switch, and the electric field distribution on the surface of the insulator and the electrode is effectively regulated by optimizing the geometric structure of the insulator and the shape of the electrode. At the same time, different insulators with different configurations were trial-produced, and flashover along surface was studied under standard lightning wave pulse conditions. The results show that, the minimum and maximum surface flashover voltages of the optimized insulator are about 35.9% and 37.2% higher than that of the original insulator respectively.

Key words: Blumlein main switch, surface flashover, insulator, electric field distribution, insulation system optimization

Blumlein 线是一种典型的脉冲形成装置, 被广泛应用于强流直线感应电子加速器^[1-3]等大型脉冲功率装置中。Blumlein 线主放电开关起着连接形成线与负载的作用。电场畸变气体火花开关作为一种主放电开关的重要应用形式常被应用于 Blumlein 脉冲形成装置中, 其优点主要有导通强电流、大电荷量转移、结构简单以及使用方便等。

研究者们主要开展了场畸变气体开关触发系统、长寿命电极材料以及开关电极结构等方面的研究, 取得了一

* 收稿日期: 2022-01-05; 修订日期: 2022-05-19

基金项目: 中国科学院无机功能材料与器件重点实验室开放课题(KLIFMD202003)

联系方式: 武庆周, wuqingzhou@163.com。

通信作者: 李 远, 693029@qq.com。

些有意义的研究成果^[4-8]。对于稳定性和可靠性要求很高的大型脉冲功率装置,如强流直线感应加速器中的 Blumlein 主放电开关,它除了包含一般场畸变开关的所有部组件外,还包括隔离 Blumlein 线水介质与主放电开关气室的绝缘子。在装置长时间多发次运行后,绝缘子气侧会发生沿面闪络现象,沿面闪络的发生严重影响主放电开关的稳定性和可靠性^[9-12]。

通过仿真计算来优化绝缘结构达到电场调控的方法已被广泛应用于电气设备与脉冲功率装置中^[13-15]。本文应用电场仿真计算方法,在有限边界条件下(仅可局部更换部件)对 Blumlein 线主放电开关的绝缘结构进行了优化设计,通过对阳极异型螺母和绝缘子的外形结构的优化设计,控制局部区域的电场强度,使得电场沿绝缘子表面的分布均匀化、合理化。开展了在标准雷电波条件下混合气体中的不同构形绝缘子的沿面闪络特性,优化后的绝缘子沿面闪络电压得到了明显的提升。

1 绝缘结构优化

1.1 问题分析与仿真模型

当 Blumlein 主放电开关中的绝缘子发生闪络时,就必须停止直线感应加速器的运行进行检修,处理方法为重新抛光绝缘子的表面或更换新的绝缘子。开关中的绝缘子发生闪络的痕迹如图 1 所示。经过对绝缘子沿面闪络放电路径的分析,对实际使用中可更换的部件进行实体建模,Blumlein 线主放电开关气室的二维模型如图 2 所示。模型主要由阳极(异型螺母)、阴极(法兰)和绝缘子组成。通过优化异型螺母和绝缘子的外形结构来实现绝缘子表面电场分布、阳极三结合点(ATJ)和阴极三结合点(CTJ)处场强的控制,达到提升沿面闪络电压的目的。计算模型中主要的物理参数有:有机玻璃绝缘子的相对介电常数为 2.8,体积电阻率为 $1.0 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$,阳极异型螺母加载电压 300 kV,阴极(法兰)接地。



Fig. 1 Insulator and nonstandard screw (anode)

图 1 绝缘子和异型螺母

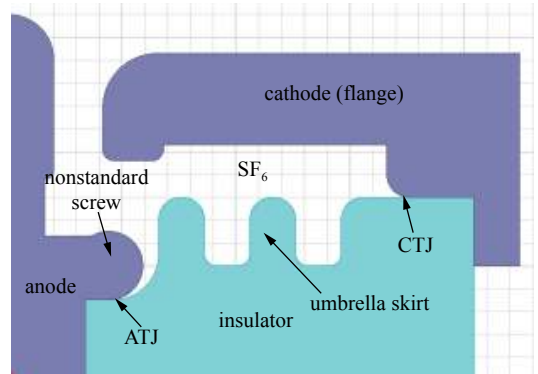


Fig. 2 Simulation model

图 2 计算模型

1.2 仿真计算结果

仿真计算了三种绝缘结构的电场分布,如图 3 所示。第一种为原始结构,由两个等径伞组成,爬电距离为 246 mm,如图 3(a)所示;第二种为单伞形结构,在异型螺母不变的情况下,绝缘子的伞形由原来的等径双伞形改为单伞形,

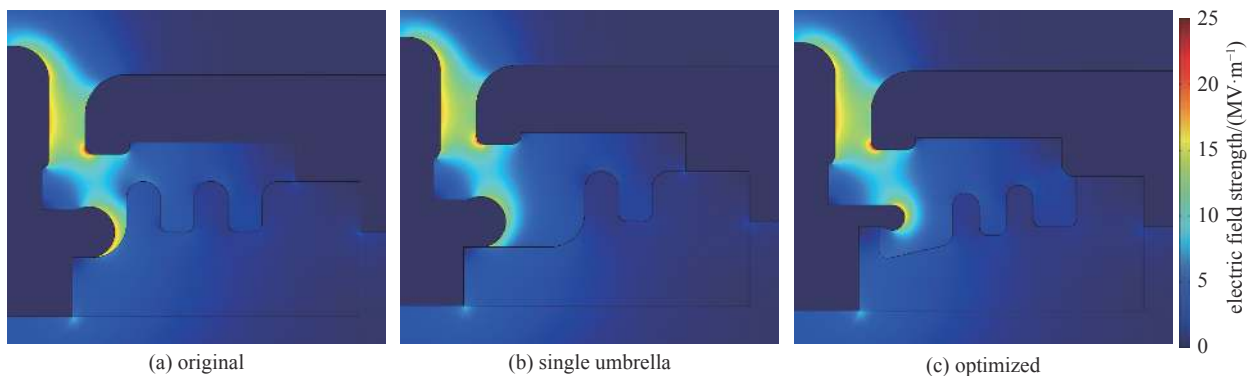


Fig. 3 Electric field distribution of three types of insulators

图 3 三种外型结构绝缘子的电场分布

爬电距离为 200 mm, 如图 3(b) 所示; 最后一种为优化结构, 即同时优化了异型螺母的尺寸和伞形结构, 爬电距离为 251 mm, 如图 3(c) 所示。阳极施加 300 kV 负高压, 阴极法兰接地。从计算结果中获取不同构形绝缘子的沿面电场分布, 如图 4 所示。从图中可以看出, 单伞结构的表面电场低于原始结构, 但是电场沿绝缘子表面的分布变化不大。优化结构的绝缘子表面电场低于原始结构, 且电场沿绝缘子分布得到了明显的改善。

表 1 对比了不同构形绝缘子表面最大场强、阳极三结合点处场强和阴极三结合点处的场强, 结果表明优化结构的绝缘子在以上三处的场强都得到了大幅的降低, 分别从原来的 10.8 kV/mm 降至 5.28 kV/mm、9.44 kV/mm 降至 1.42 kV/mm 和 3.12 kV/mm 降至 0.92 kV/mm。

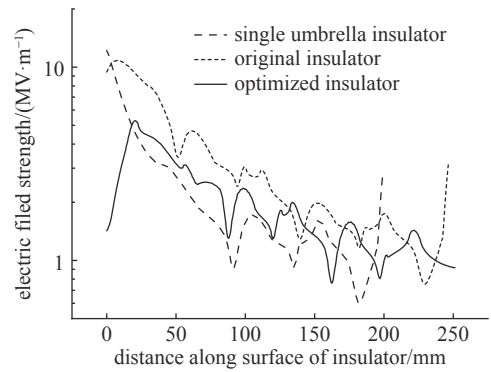


Fig. 4 Surface electric field distribution of different insulators with different configurations

图 4 不同构形绝缘子的表面电场分布

表 1 不同构形绝缘子表面电场强度的典型数值

Table 1 Electric field strength along insulator surface

insulator	$E_{max}/(kV \cdot mm^{-1})$	$E_{ATJ}/(kV \cdot mm^{-1})$	$E_{CTJ}/(kV \cdot mm^{-1})$
origin insulator	10.8	9.44	3.12
single umbrella insulator	11.5	11.5	2.88
optimized insulator	5.28	1.42	0.92

2 实验研究与讨论

由于强流直线感应加速器的脉冲功率系统的最高输出为 300 kV 的脉冲电压, 单次脉冲下沿面闪络电压不易发生, 因此, 为了研究绝缘结构对闪络电压的影响, 本项目开展了在标准雷电波 1.2 μs/50 μs 脉冲条件下不同构形绝缘子的沿面闪络电压试验。试验采用负极性标准雷电波, 试验方法为逐级升压法, 以预估击穿电压 U_0 的 60% 作为升压的起始电压, 每级电压至少进行 3 次加压, 加压后若没有发生闪络, 则每次以 30 kV 为步长, 逐级加压。每次升压间隔 1 min。首次闪络发生后, 继续进行 3 次加压, 如未发生闪络, 则认为首次闪络电压为老练电压, 继续升压, 如发生闪络, 则降低 5% 电压重复以上过程。直至加压后持续发生闪络至少 3 次, 取该电压作为绝缘子的闪络电压。闪络试验的工装设计示意图和实物图如图 5 所示, 试验工装主要由试验套管、六氟化硫气室、绝缘子和变压器油室组成。其中试验套管外绝缘可以耐受 1000 kV 标准雷电波冲击电压, 气室充 0.55 MPa 的 SF₆ 和 N₂ 的混合气, 二者混合比为 1:4 (与实际运行工况相同), 绝缘子及法兰尺寸与直线感应加速器中的 Blumlein 线主开关一致。采用变压器油 (Blumlein 线中为水介质) 对绝缘子背面进行沿面绝缘保护, 以确保获得在雷电波冲击电压下绝缘子的沿面闪络发生在气体侧的有效数据。

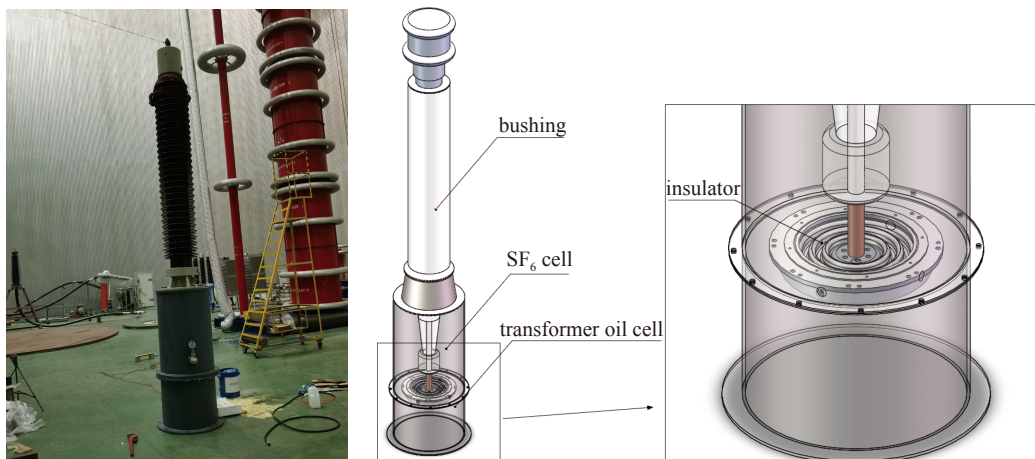


Fig. 5 Test unit

图 5 试验工装

每种构形的绝缘子试品数量为5件,样品如图6所示,分别进行了雷电冲击波条件下的闪络试验,闪络时延发生在雷电波的波尾,主要分布于4~5 μs 之间,试验结果如图7所示,原始结构绝缘子、单伞结构绝缘子和优化结构绝缘子的最低闪络电压分别为540, 588和734 kV,最高闪络电压均分别为656, 668和900 kV,优化结构绝缘子的最低和最高沿面闪络电压相比原始结构分别提升了约35.9%和37.2%,并且优化结构绝缘子的最低闪络电压要高于原始结构绝缘子和单伞结构绝缘子的最高沿面闪络电压。

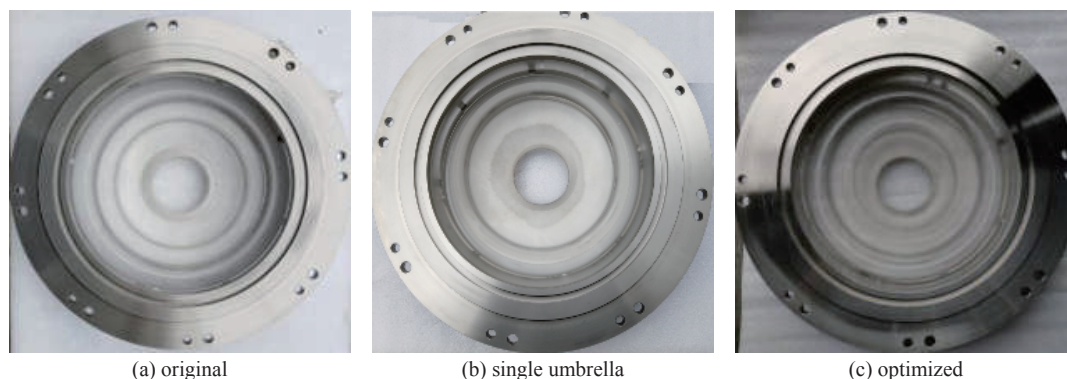


Fig. 6 Samples of three types of insulators

图6 三种构形的实验样品

3 结论

在 Blumlein 主放电开关中不规则绝缘结构设计时,爬电距离不是主要设计参数,电场的均匀性、阳极三结合点和阴极三结合点的场强控制更为重要。如电极与绝缘介质直接接触(原始结构与单伞结构),由于两种材料的介电常数差异巨大造成分界面上电场的增强,尤其是电极-绝缘介质-气体三结合点处电场的增强,从而导致沿面闪络电压的降低。本文通过电场仿真计算与分析,采用电极的布置方式与绝缘子的构形相互配合来实现优化设计。首先,对三结合点处的场强进行控制;其次,减少电极与绝缘子表面的接触面积;最后,将电极与绝缘子伞裙保持一定的距离。优化后的绝缘子的最低和最高沿面闪络电压相比原始结构分别提升了约35.9%和37.2%,从而大大提升了直线感应加速器的稳定性与可靠性。

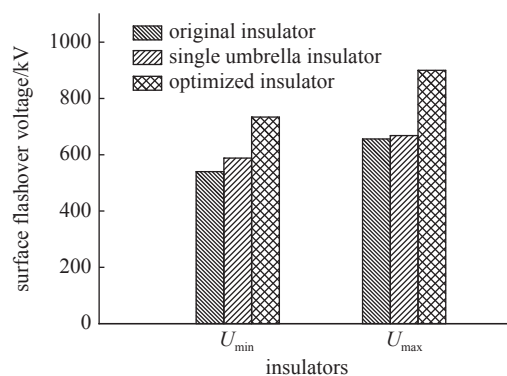


Fig. 7 Surface flashover tests of different insulators with different configurations

图7 不同构形的绝缘子沿面闪络试验结果

参考文献:

- [1] 丁伯南, 邓建军, 王华岑, 等. “神龙一号”直线感应电子加速器[J]. *高能物理与核物理*, 2005, 29(6): 604-610. (Ding Bonan, Deng Jianjun, Wang Huacen, et al. Dragon-I linear induction electron accelerator[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005, 29(6): 604-610)
- [2] 邓建军. 直线感应电子加速器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 145-193. (Deng Jianjun. Linear induction electron accelerator[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 145-193)
- [3] 石金水, 邓建军, 章林文, 等. 神龙二号加速器及其关键技术[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 010201. (Shi Jinshui, Deng Jianjun, Zhang Linwen, et al. Dragon-II accelerator and its key technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 010201)
- [4] 罗城, 丛培天, 张天洋, 等. 气体火花开关电极烧蚀研究综述[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 105001. (Luo Cheng, Cong Peitian, Zhang Tianyang, et al. Review of the research on electrode erosion of gas spark switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 105001)
- [5] Hutsel B T, Kovaleski S D, Sullivan D L, et al. Effects of laser triggering parameters on runtime and jitter of a gas switch[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, 16(4): 999-1005.
- [6] 李晓昂, 刘轩东, 曾凡辉, 等. 电极熔蚀导致的气体开关绝缘子性能劣化[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 085004. (Li Xiaoang, Liu Xuandong, Zeng Fanhui, et al. Degradation of gas switch insulator due to electrode erosion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 085004)
- [7] 党腾飞, 尹佳辉, 孙凤举, 等. 电极结构对触发管型开关击穿特性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 065004. (Dang Tengfei, Yin Jiahui, Sun Fengju, et al. Influence of electrode structure on breakdown characteristics of trigatron switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 065004)

- [8] 卢彦雷, 樊亚军, 石磊, 等. 高电压纳秒气体开关绝缘恢复特性的实验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1852-1856. (Lu Yanlei, Fan Yajun, Shi Lei, et al. Experiment research of high voltage nanosecond gas switch's insulation recovery[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1852-1856)
- [9] Ma Jingtian, Tao Fengbo, Ma Yong, et al. Quantitative analysis on the influence of surface charges on flashover of insulators in SF₆[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, 28(1): 274-281.
- [10] Sun Chuyu, Zhou Hui, Chen Weiqing, et al. Characteristics of nanosecond pulse dielectric surface flashover in high pressure SF₆[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(4): 1387-1392.
- [11] Liu Lin, Li Xiaoang, Wen Tao, et al. Investigation on surface electric field distribution features related to insulator flashover in SF₆ gas[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(5): 1588-1595.
- [12] Krile J T, Vela R, Neuber A A, et al. Pulsed dielectric-surface flashover in an SF₆ environment[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, 35(5): 1580-1587.
- [13] 武庆周, 李劲, 李远, 等. “神龙二号”气体火花开关中绝缘结构的电场分析与优化[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 025001. (Wu Qingzhou, Li Jin, Li Yuan, et al. Electric field analysis and optimization of the insulation system in gas-filled spark gap switch of Dragon- II accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 025001)
- [14] 吴泽华, 田汇冬, 王浩然, 等. 特高压GIL哑铃型三支柱绝缘子优化设计方法[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2754-2761. (Wu Zehua, Tian Huidong, Wang Haoran, et al. Optimization design method for UHVAC GIL dumbbell type tri-post insulators[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2754-2761)
- [15] 李乃一, 彭宗仁, 刘鹏. 1100 kV直流SF₆气体绝缘穿墙套管电场仿真分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 205-214. (Li Naiyi, Peng Zongren, Liu Peng. Electric field simulation and analysis of 1100 kV DC SF₆ gas-insulated wall bushing[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 205-214)