

三电极气体火花开关导通电流及其电磁辐射特性*

邱永峰¹, 卞立安¹, 刘柱¹, 肖培¹, 蒋建辉¹, 李高升¹, 杨建华², 刘金亮²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

摘 要: 针对三电极气体火花开关工作时产生的强电磁辐射, 首先对开关的导通电流及其电磁辐射进行了理论分析, 利用 CST 电磁仿真软件对气体火花开关开展了静电场仿真研究, 分析了开关短程导通时的击穿场强; 其次对三电极气体火花开关的导通电流和远场辐射场强进行了实验测量, 对实验结果进行分析和总结; 最后采用电磁屏蔽方法对开关的强电磁辐射进行了有效抑制。研究结果可以为有关脉冲功率装置的电磁辐射及防护提供参考和借鉴。

关键词: 气体火花开关; 电磁辐射; 脉冲电流; 频谱

中图分类号: TP2

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190326

Current and electromagnetic radiation characteristics of three-electrode gas spark switch

Qiu Yongfeng¹, Bian Li'an¹, Liu Zhu¹, Xiao Pei¹, Jiang Jianhui¹, Li Gaosheng¹, Yang Jianhua², Liu Jinliang²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Strong electromagnetic radiation is produced when the three-electrode gas spark switch works. In this paper, firstly, theoretical analysis of the on-current and electromagnetic radiation of the switch is carried out, then the switch is simulated by CST software and the breakdown field strength of which is calculated. Secondly, the on-current and far-field radiation field strength of the three-electrode gas spark switch are measured experimentally, and the results are summarized and analyzed. Finally, the strong electromagnetic radiation of the switch is suppressed with electromagnetic shielding method effectively. The research results can provide reference for electromagnetic radiation and protection of pulse power devices.

Key words: gas spark switch; electromagnetic radiation; pulse current; frequency spectrum

气体火花开关同其它闸流管、真空开关、磁开关、固态开关等相比, 具有结构简单、工作电压范围宽、通流能力强、电流上升速率快等优点, 在脉冲功率领域得到广泛运用^[1-2]。国内外的科研人员对此也展开了广泛和深入研究, 主要包括火花电阻^[3]、电极烧蚀^[4-6]、电极材料^[7-8]、气体种类^[9-10]、电压极性^[11]、气体恢复^[12-13]、预火花特性^[14]及抖动^[15]等方面的研究, 追求的目标大体是实现气体火花开关在高压大电流条件下长寿命的高重频稳定运行。根据气体火花开关的工作方式不同, 可分为自击穿开关^[16]和触发开关, 触发开关又分为电触发和激光触发^[17-18], 激光触发具有抖动小和触发精度高的优点, 但是由于系统复杂、造价昂贵和激光系统容易收到电磁干扰的原因, 限制了其在脉冲功率技术领域的应用。而和二电极自击穿气体开关相比, 三电极电触发气体火花开关具有工作电压高、触发精确可控、闭合时间短、抖动和延时小等优点^[19-20], 因此更受科研工作者的青睐。气体火花开关除了在脉冲功率装置中当作主开关使用外, 还可以为气体化学反应提供高压电弧条件^[21], 另外, 气体火花开关可能是新一代的宽带辐射源^[22]。

气体火花开关工作时, 由于大电流的突变会产生极强的电磁辐射, 对脉冲功率装置及其临近的电子电气设备产生电磁干扰, 造成诸多电磁不兼容问题。有关气体火花开关导通电流及其电磁辐射特性研究的文献报道并不多, 樊旭亮^[22]和 Siew^[23]等人分别对二电极自击穿气体火花开关工作时的电磁辐射特性进行了初步的实验研究, 对辐射场强和频谱进行了测量和分析; 对于开关导通电流和辐射场之间的关系没有深入研究, 对于存在的强电磁辐

* 收稿日期: 2019-09-01; 修订日期: 2019-10-29

基金项目: 电子测试技术重点实验室开放基金项目(6142001180205); 广西精密导航技术与应用重点实验室开放基金项目(DH201811)

作者简介: 邱永峰(1985—), 男, 博士后, 主要从事脉冲功率技术、强电磁脉冲测量、天线新技术等方面的研究; qiu19851219@126.com。

射,也没有从电磁兼容的角度去分析和研究抑制的方法,以减少其电磁干扰。基于此,本文以三电极电触发气体火花开关为研究对象,开展有关开关导通电流及其电磁辐射特性的研究,这些为进一步深入研究三电极气体火花开关、提高其工作性能提供理论依据,也为有关脉冲功率装置的电磁辐射及防护提供参考和借鉴。

1 理论分析

1.1 瞬变电流辐射场强

关于交变电磁场问题,从麦克斯韦方程组出发,引入矢势 A 和标势 φ ,可以推导瞬变电流的辐射电场公式^[24]

$$E = -\nabla\varphi - \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{-\nabla\rho(\mathbf{x}', t-r/c)}{r} dV' - \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{j}(\mathbf{x}', t-r/c)}{\partial t} dV' \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为位置矢量; V' 为电荷或电流的分布区域体积; r 为辐射源点到辐射场点的距离; $t-r/c$ 为推迟变量; $\rho(\mathbf{x}', t-r/c)$ 和 $\mathbf{j}(\mathbf{x}', t-r/c)$ 分布表示电荷分布和电流分布。

气体火花开关内部空间电荷的分布是一个复杂的统计问题,因此假设开关内部整体呈电中性,电荷密度 $\rho=0$ 。式(1)可简化为

$$E = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{x}', t-r/c)}{R} dV' = -\frac{\mu_0}{4\pi r} \frac{\partial}{\partial t} \int \mathbf{j}(\mathbf{x}', t-r/c) dV' = -\frac{\mu_0}{4\pi r} \frac{\partial}{\partial t} \int I(\mathbf{x}', t-r/c) d\mathbf{l}' = -\frac{\mu_0 l}{4\pi r} \frac{\partial}{\partial t} I(t-r/c) \approx -\frac{\mu_0 l}{4\pi r} \frac{I(t_{\max}-r/c)}{T_r} \quad (2)$$

式中: $I(t-r/c)$ 为开关导通电流; $I(t_{\max}-r/c)$ 为开关导通峰值电流; T_r 为开关导通电流上升时间; l 为开关电流通道的长度。考虑到测量距离 r 远大于开关电流通道的长度,因此在积分求解时认为 r 是不变的。

1.2 气体火花开关导通电流的上升时间

在气体火花开关的放电过程中,会产生随时间不断变化的火花通道电感和火花通道电阻。J. C. 马丁仔细试验研究了气体火花开关的击穿特性和触发特性,研究表明气体火花开关击穿导通时,脉冲电流的上升时间主要由传输线阻抗、火花电感和火花电阻决定^[25]。上升时间的表达式如下

$$\tau = \tau_l + \tau_r \approx \frac{14d}{Z} + \frac{88}{Z^{1/3} E_b^{4/3}} (\rho/\rho_0)^{1/2} \quad (3)$$

式中: τ_l 和 τ_r 分别表示通道火花电感和火花电阻引起的时间常数; d 是火花长度; Z 为传输线特性阻抗; ρ/ρ_0 表示气体密度在标准状态下与空气密度之比; E_b 为开关的击穿电场(MV/cm)。

2 静电场仿真

基于上述的理论分析,利用 CST 电磁仿真软件开展对三电极气体火花开关导通时的静电场仿真。正常工作时,气体火花开关高压电极充电 550 kV,触发电极输出 -150 kV 的高压脉冲,导通过程为长程先导通,短程后导通。也就是高压电极和触发电极先导通,此时,触发电极与高压电极电压相同,紧接着触发电极和地电极实现纳秒量级的快速导通。开关高压电极和触发电极间距约 4 cm,触发电极与地电极间距约 1 cm,开关内充的气体为氮气和六氟化硫的混合体,混合体积比约为 6:1,混合气体的压强约为 0.4 MPa。

为研究开关的短程导通过程,将高压电极和触发电极的电压都设置为 550 kV。静电场的仿真结果如图 1 所示,开关内部的电场峰值为 3.8 MV/cm。当取击穿电场为 3.2 MV/cm 时,根据公式(3),其中特性阻抗 Z 约为 36 Ω ,因此,可以粗略估计开关导通脉冲电流的上升时间为 12 ns。

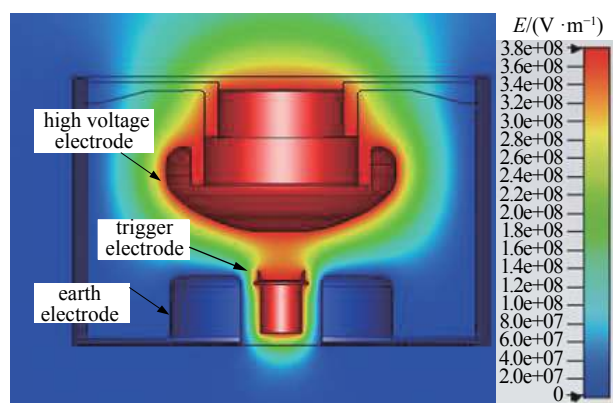


Fig. 1 Electrostatic field simulation with CST

图 1 CST 静电场仿真

3 实验研究

利用罗氏线圈测量了气体火花开关导通时的脉冲电流波形,典型的电流波形如图 2 所示,因为示波器对电流

波形进行了反向,所以显示为一个负脉冲信号。脉冲上升沿约 12 ns,下降沿约 18 ns,脉冲半高宽约为 135 ns。经标定计算,气体火花开关导通电流的峰值约为 10.8 kA。罗氏线圈安装在气体火花开关内部,如图 3 所示。

利用双锥天线,在正对气体火花开关前端辐射面的 10 m 远处,对气体火花开关的远场辐射场强进行了测量,实验测量的布局图如图 3 所示,其中双锥天线的测量频段为 20~300 MHz。

实验测量的典型辐射信号波形如图 4 所示,该辐射信号由两个阻尼振荡波形组成。两个阻尼振荡包络面中的主峰值间隔约 130 ns,与气体火花开关导通时的脉冲电流波形的半高宽 135 ns 非常相近。两个阻尼振荡波形分别由气体火花开关导通时脉冲电流的上升过程和下降过程产生,因此两个振荡波形的间隔时间和脉冲电流的脉宽基本相同。参考该型号双锥天线的使用手册可得,气体火花开关在 10 m 远处的辐射场强约为 3 280 V/m。根据式(1)估算,气体火花开关在 10 m 远处的辐射电场场强约为 3 150 V/m,因此,研究表明实验测量值(3 280 V/m)与理论计算值(3 150 V/m)基本吻合。

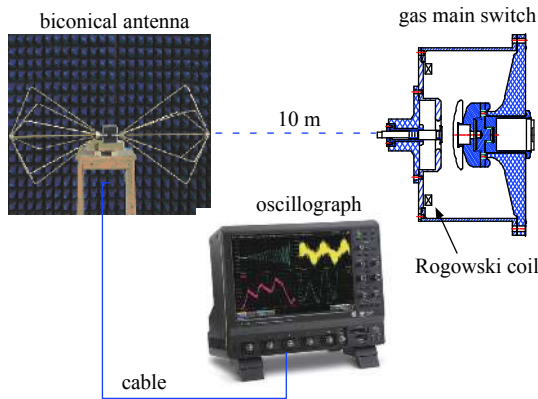


Fig. 3 Experimental setup in measurement
图 3 实验测量布局图

图 4 中 CH2 为辐射信号经傅里叶变化后得到的频谱波形,气体火花开关的电磁辐射属于典型的宽谱辐射,辐射频率覆盖 1~100 MHz 的范围,辐射信号存在两个较明显的主频 84 MHz 和 56 MHz。频谱分析表明,84 MHz 的辐射主频刚好对应脉冲电流上升沿(12 ns)的辐射,而 56 MHz 的辐射主频与脉冲电流下降沿(18 ns)对应。因此,开关导通电流的上升沿 t 和电磁辐射信号的主频 f ,基本满足关系式 $ft \approx 1$ 。

针对气体火花开关工作时在空间产生的强电磁辐射,设计了如图 5 所示的金属电磁屏蔽系统,对外置的气体火花开关进行了完整的封装和屏蔽。金属屏蔽系统为环形圆柱结构,其外形尺寸与气体火花开关前端面的外围尺寸匹配,金属屏蔽环底端与气体火花开关的前端面通过螺丝紧密连接,顶端有圆形金属盖板进行密封(未在图中显示)。为方便气体主火花开关高压触发信号的引入,金属屏蔽环设计了高压线过孔,过孔外侧用金属波纹板将高压线包覆。金属屏蔽环内侧放置了高分子绝缘支撑屏蔽环,防止电气击穿。利用双锥天线开展了对比实验测量,气体火花开关在 10 m 远处的辐射场强为 115 V/m。实验结果表明,利用电磁屏蔽的方法,有效地抑制了气体火花开关的电磁辐射场强。

4 结 论

本文针对工作在 550 kV 的三电极气体火花开关,开展了有关导通电流及其电磁辐射特性的研究。理论和实验研究表明,当开关高压电极和触发电极间距约 4 cm,触发电极与地电极间距约 1 cm,开关内氮气和六氟化硫混合体

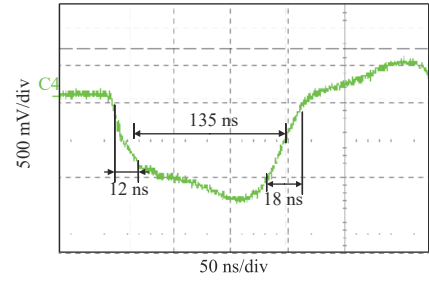


Fig. 2 Current waveform of gas spark switch
图 2 气体火花开关电流波形

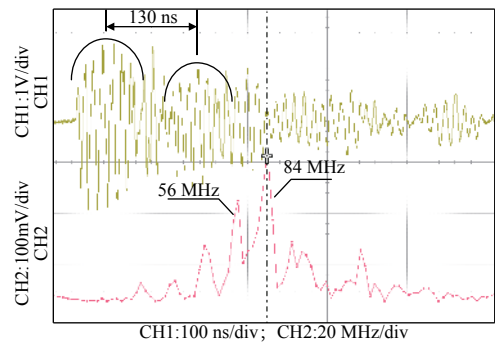


Fig. 4 Electromagnetic radiation signal of gas spark switch
图 4 气体火花开关电磁辐射信号

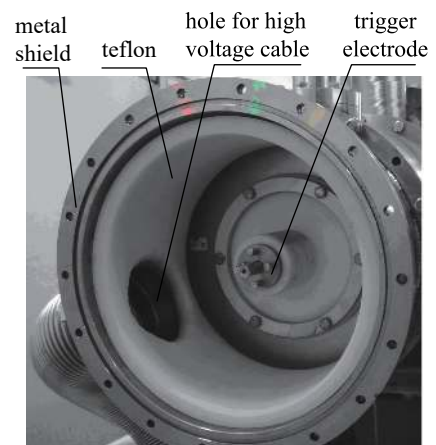


Fig. 5 Metal shielding system
图 5 金属屏蔽系统

积比为 6 : 1, 混合气体压强约为 0.4 MPa 时, 气体火花开关导通电流脉冲上升沿约为 12 ns, 下降沿为 18 ns, 电流峰值约 10.8 kA, 在距离开关 10 m 的位置, 其辐射的电场强度为 3 280 V/m, 傅里叶变化频谱分析表明, 电磁辐射信号存在两个较明显的主频, 84 MHz 和 56 MHz, 分别对应脉冲电流上升沿和下降沿。空间电磁屏蔽技术是抑制此类强电磁辐射的有效方法。关于气体火花开关的近场辐射特性在本文中并没有开展, 主要是因为瞬态强电磁脉冲环境下, 近场辐射测量十分困难。后续将利用测量精度高、抗电磁干扰能量强的集成光波导电场测量仪开展有关工作。

致 谢 感谢“湖南大学国家超级计算长沙中心”在仿真计算方面给予的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 程新兵, 刘金亮, 陈蒸, 等. 高电压长寿命型气体火花开关的设计及初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1753-1756. (Cheng Xinbing, Liu Jinliang, Chen Zhen, et al. Design and primary experiment of high voltage long-life gas spark switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(10): 1753-1756)
- [2] 程新兵, 刘金亮, 陈蒸, 等. 一种大电流三电极气体火花开关的工作特性[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1689-1694. (Cheng Xinbing, Liu Jinliang, Chen Zhen, et al. Operating characteristics of a heavy current three-electrode gas spark switch[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1689-1694)
- [3] Li X A, Liu X D, Zeng F H, et al. Study on resistance and energy deposition of spark channel under the oscillatory current pulse[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(9): 2259-2265.
- [4] Li X A, Liu X D, Zeng F H, et al. Ejection of electrode molten droplet and its effect on the degradation of insulator in gas spark switches[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2015, 43(4): 1049-1053.
- [5] Wu J W, Han R Y, Ding W D, et al. Electrode erosion characteristics of repetitive long-life gas spark switch under airtight conditions[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2015, 43(10): 3425-3433.
- [6] Wu J W, Han R Y, Ding W D, et al. Experimental study of electrode erosion and aging process of a specially designed gas switch under repetitive arc discharge[J]. *IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(4): 2164-2171.
- [7] Chen D H, Li L, Yu B, et al. Study on graphite-electrode gas switch applied for pulsed power supply with a 700-kA peak current[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2015, 43(10): 3419-3424.
- [8] Wu J W, Han R Y, Ding W D, et al. Experimental study of self-breakdown voltage statistics in Cu-W electrode spark gap switches[J]. *IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(4): 2056-2065.
- [9] Santamaria F, Roman F. Experimental study of a submillimeter spark-gap[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2013, 41(4): 985-992.
- [10] Zhang J, Van Heesch B, Beckers F, et al. Breakdown voltage and recovery rate estimation of a supercritical nitrogen plasma switch[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2014, 42(2): 376-383.
- [11] Hogg M G, Timoshkin I V, Mcgregor S J, et al. Polarity effects on breakdown of short gaps in a point-plane topology in air[J]. *IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(4): 1815-1822.
- [12] Wang X X, Luo H Y, Hu Y. Numerical simulation of the gas discharge in a gas peaking switch[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2007, 35(3): 702-708.
- [13] Reddy C S, Sharma A, Mittal K C. Experimental investigations into pulse-charged spark gap recovery times and influencing factors[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2016, 44(3): 331-337.
- [14] Li X A, Pei Z H, Ma C Q, et al. Prefire properties of high pressure gas spark switches for fast linear transformer drivers[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2018, 46(12): 4099-4108.
- [15] Chen Y J, Mankowski J J, Walter J W, et al. Jitter and recovery rate of a triggered spark gap with high pressure gas mixtures[C]. Pulsed Power Conference, 2009, 244 - 249.
- [16] Cheng X B, Liu J L, Zhou S P, et al. Surface creepage of high-voltage self-breakdown gas switch[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2009, 37(5): 678-682.
- [17] Deng J J, Xie W P, Feng S P, et al. Initial performance of the primary test stand[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2013, 41(10): 2580-2583.
- [18] Larsson A, Yap D, Au J, et al. Laser triggering of spark gap switches[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2014, 42(10): 2943-2947.
- [19] Cheng X B, Liu J L, Qian B L, et al. Research of a high-current repetitive triggered spark-gap switch and its application[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 2010, 38(3): 516-522.
- [20] Geng J Y, Yang J H, Cheng X B, et al. The development of high-voltage repetitive low-jitter corona stabilized triggered switch[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(4): 044705.
- [21] Dai H Y, Li L, Wu H B, et al. Characteristics of N₂/O₂ reaction in spark gap switch: The effect of high-current pulsed arc[J]. *IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(2): 492-500.
- [22] Fan X L, Liu J L, Lv X M. Research on the electromagnetic fields radiating during the operation of intense electron-beam accelerator[J]. *Laser and Particle Beams*, 2013, 31(01): 149-154.
- [23] Siew W H, Howat S D, Chalmers I D. Radiated interference from a high voltage impulse generator[J]. *IEEE Trans Electromagnetic Compatibility*, 1996, 38(4): 600-604.
- [24] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1997. (Guo Shuohong. Electrodynamics. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1997)
- [25] Martin T H, Guenther A H, Kristiansen M. J C Martin on pulsed power[M]. New York: Plenum press, 1996.