

文章编号: 1001-4322(2007)02-0339-04

平板 Blumlein 线多通道轨道开关*

欧阳佳, 刘永贵, 刘金亮, 冯加怀

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 设计制作了一个有多通道连接的类似轨道的平行电极结构的开关, 给出了开关的结构, 对开关内的电场分布做出分析, 利用 Pspice 软件对安装在实验装置中的开关的电压电流进行了计算。实验测得此开关在实验系统中耐压约为 500 kV, 导通时通过阻值为 1 kΩ 的水电阻负载的电流为 400 A 左右。实验所得电压电流波形与模拟结果基本吻合。实验证明此开关具有体积小、更适于平板传输线的结构等优点。

关键词: 轨道开关; 多通道; 平板 Blumlein 线; 脉冲高电压

中图分类号: TM83 文献标识码: A

高功率开关是脉冲功率装置的关键性元件之一, 它的性能直接影响整个装置的性能。目前人们使用的开关多是由于同轴 Blumlein 线的^[1], 随着脉冲功率技术的发展, 采用固体介质的平板 Blumlein 线有较大的紧凑化发展空间, 而国内对适用于平板传输线结构的开关研究刚刚开展^[2-3]。所以研制一种紧凑的、适于传输平板电流的开关是一个重要的研究方向。本文设计了一种用于平板 Blumlein 线的多通道轨道开关, 并通过电路模拟和实验研究分析了该开关的特点, 为今后的应用提供理论基础。

1 开关的结构设计

理论上, 要使平板电流较好的传输, 最好是让开关电极沿整个铜板截面导入和导出电流, 为了尽量逼近这种情况, 从工程设计上考虑, 我们采用多通道连接的方式设计了如图 1 所示的开关, 其直径仅为 φ60 mm, 完全可以与平板 Blumlein 线紧凑地安装在一起。

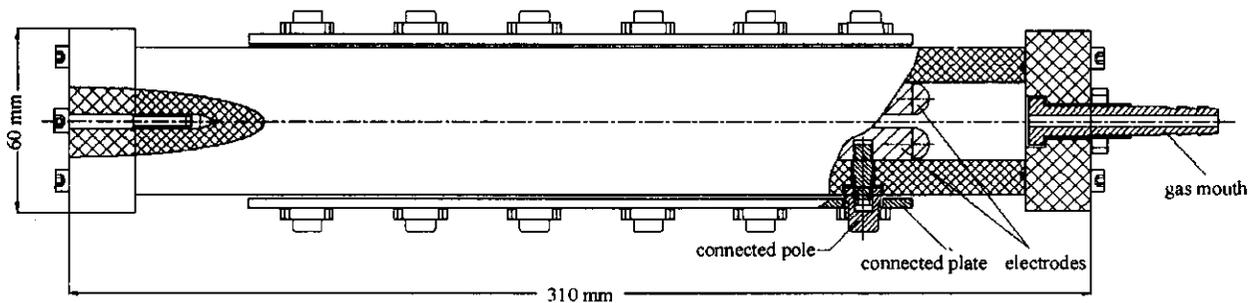


Fig. 1 Structure of switch

图 1 开关结构示意图

其中电极是一对铜棒, 在开关内部固定为类似轨道的结构, 间距为 5 mm, 每个电极由 6 根连接杆与铜板连接, 可以有效地传输平板电流和减小电感。用现有的电磁模拟软件对开关导通时的电场分布进行了模拟, 其结果由图 2 所示。可以看出开关内部电场分布较均匀, 只有铜棒两端电场稍强, 并可看出开关在 5 ns 时已导通比较稳定。

根据气体放电相关理论^[4-6], 可以得出开关在充 SF₆ 和 N₂ 混合气体的理论耐压值

$$U_{\text{mix}} = 35.1 \xi^{0.20} d^{0.982} p^{-(0.0013226\xi)} \quad (1)$$

式中 ξ 为混合气中 SF₆ 的体积分数, d 为电极间距, 单位 cm, p 为充气压力, 单位 100 kPa。由公式 (1) 可以得到如图 3 所示结果, 即开关内充约 0.3 MPa 的 SF₆、N₂ 混合气体 (SF₆、N₂ 混合比例为 1:4) 时, 可以完全满足耐压 600 kV 的要求。

* 收稿日期 2006-06-08; 修订日期 2006-08-25

基金项目 国家 863 计划项目资助课题

作者简介 欧阳佳 (1979—), 博士研究生, 从事脉冲功率技术方面的研究, akaerguli@nudt.edu.cn。

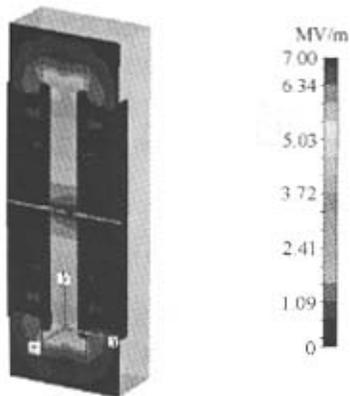


Fig. 2 Electric field of the inner switch at 5 ns after switch breakdown

图 2 开关导通 5 ns 后的电场分布

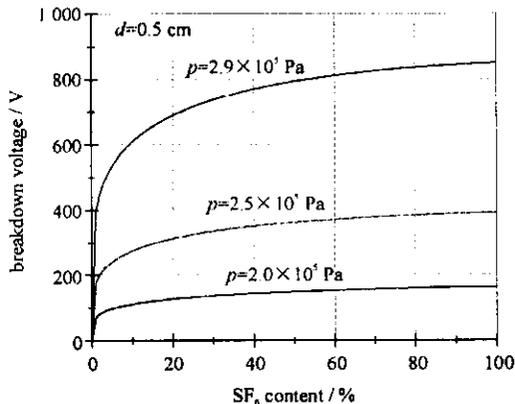


Fig. 3 Relation of breakdown voltage with gas pressure and SF₆ content

图 3 击穿电压和充气压力及 SF₆ 含量的关系

2 开关的电路模拟

根据实验需要,我们用模拟软件对开关安装在实验装置中的情形进行了电路模拟,实验装置如图 4 所示。其中 C_1 为充电电容, K 是变压器 R 是变压器中的等效电阻 L_s 和 C_s 为开关等效电感和电容, C_{s1} 和 C_{s2} 是开关的接地电容。模块 switch 为自己设计的理想开关元件,它有两个比较重要的参数:开关导通电压 V_b 和导通时间 T_c 。考虑到开关导通后高电压大电流直接通过负载对地放电,且开关老化需做多次实验,为了安全着想,选择 1 kΩ 的水电阻作负载。

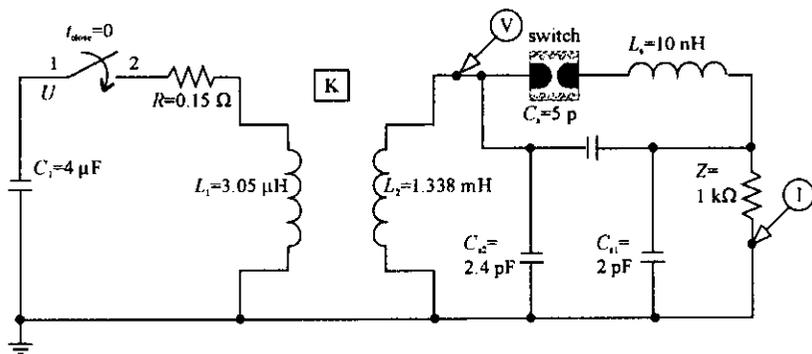


Fig. 4 Experimental circuit diagram
图 4 实验装置电路等效图

图 5 所示电压电流波形由以下参数设置得到: C_1 充电 25 kV, V_b 为 550 kV, T_c 为 25 ns, 电压电流测量位置由图 4 给出。而如将 V_b 设为 540 kV, 则得到类似图 6 所示波形。所以可以认为若在 C_1 充电 25 kV 时得到图 5 所示波形(即开关并未导通, 电压振荡周期为 17.5 μs, 电流波形是由开关电感和电容及接地电容耦合所得), 则开关耐压 550 kV。

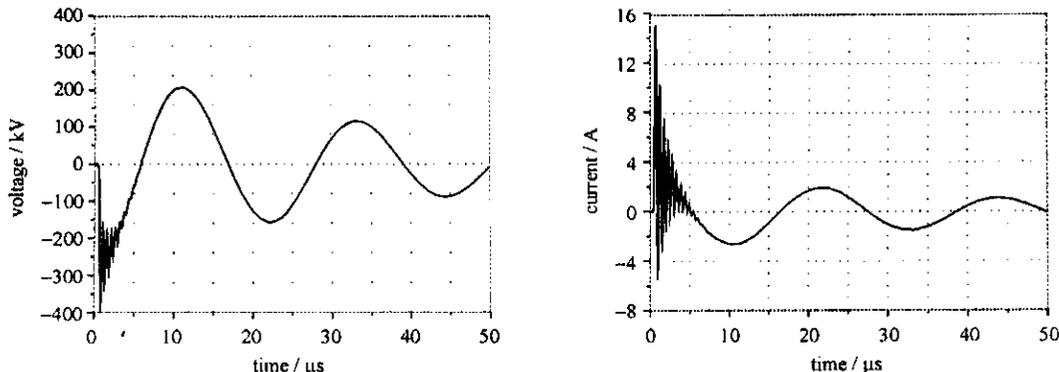


Fig. 5 Voltage and current waveform of switch breakdown voltage more than 550 kV (no breakdown) in the calculation
图 5 电路模拟中开关耐压 550 kV 以上(未导通)的电压电流波形

图 6 所示波形由以下参数设置得到： C_1 充电 40 kV， V_b 为 550 kV， T_e 为 25 ns。图 6 (a) 为开关导通瞬间的电压波形，图 6 (b) (c) 为导通后在实验系统中形成的电压电流振荡波形。

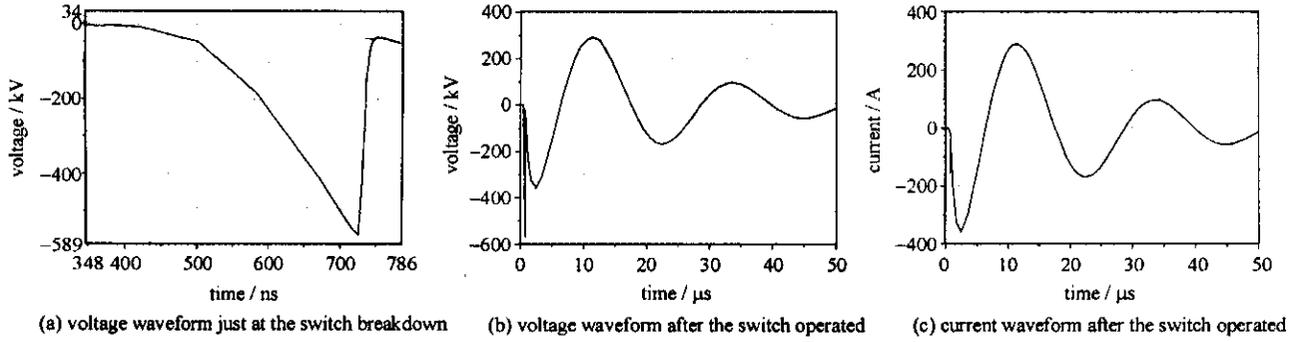


Fig. 6 Calculated waveform when the switch operated

图 6 电路模拟中开关导通后的波形

可以看出，电压电流振荡周期为 17.5 μ s，电压最大值为 357 kV，电流最大值为 358 A，开关导通瞬间电压值为 566 kV，导通时间为 30 ns。

3 实验结果

我们根据以上实验电路，按照高电压实验的相关工程要求^[7]搭建了实验平台，对此开关进行了实验。

首先在开关内充 0.3 MPa 的 1: 4 的 SF₆, N₂ 的混合气体，选择给充电电容 C_1 充电 25 kV，测得如图 7 所示波形。电压波形 (CH1) 由电阻分压器测得，分压比为 500，所接衰减器为 360: 1，则电压最大值为 2.08 V \times 500 \times 360 = 374.4 kV；电流波形 (CH2) 由罗氏线圈测得，灵敏度为 0.1 V/A，所接衰减器为 170: 1，则电流振荡幅值为 1.6 mV \times 170 / (0.1 V/A) = 2.72 A；其振荡周期可以看出为 18 μ s，所得结果与电路模拟结果 (如图 5 所示) 基本吻合，可以得到开关可耐压 550 kV 的结果，所充气压稍大于公式 (1) 计算得到的结果，原因是气压计量程刻度粗略，不能精确读数，误差较大。

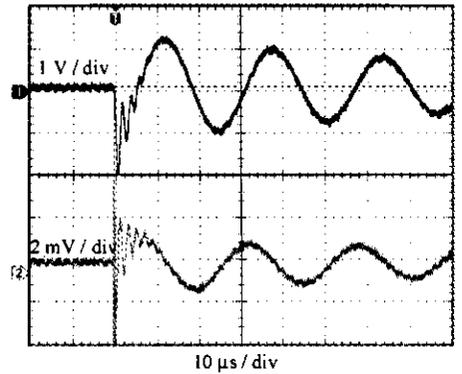
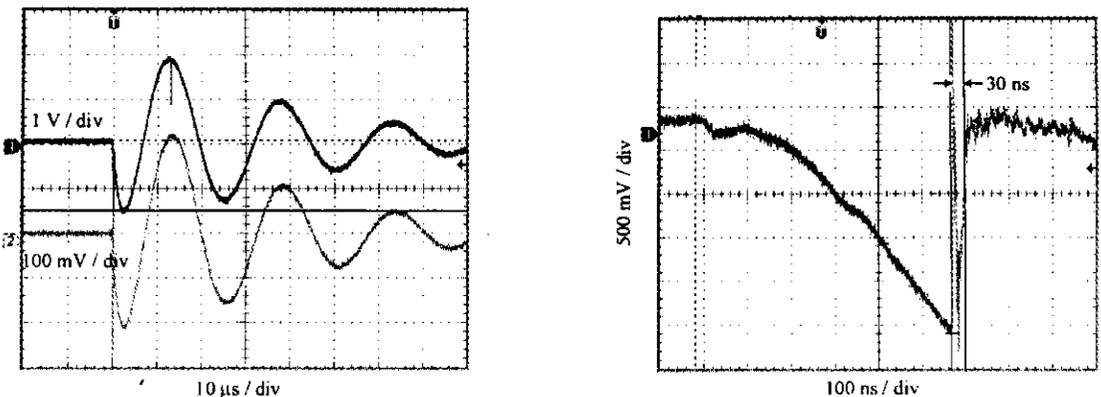


Fig. 7 Experimental waveform when switch has no breakdown

图 7 开关未导通时的实验波形

而后我们给充电电容 C_1 充电 40 kV，测得如图 8 所示波形。则电压振荡值为 1.58 V \times 500 \times 360 = 284.4 kV，电流振荡幅值为 208 mV \times 170 / (0.1 V/A) = 353.6 A，电压电流振荡周期为 19 μ s；开关导通时电压幅值为 2.46 V \times 500 \times 360 = 442.8 kV，导通时间约为 30 ns。电压电流波形周期及电流幅值所得结果与电路模拟结果 (如图 6 所示) 基本相符，电压幅值稍有差距，其原因可能是测量误差，也可能是开关在高电压 (充电电容 C_1 充电 40 kV) 运行时，导通电压有所降低。



(a) voltage(CH1) and current(CH2) waveform after the switch operated

(b) voltage waveform just at the switch breakdown

Fig. 8 Experimental waveform when the switch operated

图 8 开关导通后的实验波形

4 结 论

为实现适用于平板 Blumlein 线的紧凑化开关安装,我们设计了一个多通道轨道开关,开关具有体积小、适于平板电流传输的特点,开关可耐压 500 kV 以上,导通时通过阻值 1 k Ω 的水电阻负载的电流约为 400 A。如果将负载换为与传输线相当的 10 Ω ,可以得到 60 kA 以上的电流。此开关将作为主开关用于各种形状的平板 Blumlein 线之中。但因为其内部空间过小,难以完成耐压 600 kV 以上及重复频率运行的任务,因此,需要进一步的研究分析。

参考文献:

- [1] 罗敏,赵殿林,常安碧,等. MV 级多通道重复频率气体开关的设计及初步实验[J]. 强激光与粒子束,2006 ,18(6) 999-1002. (Luo M , Zhao D L , Chang A B , et al. Design and primary experiment of an MV-class repetitive multi-channel gas switch. *High Power Laser and Particle Beams* ,2006 ,18(6) 999-1002)
- [2] 夏明鹤,王勐,王玉娟,等. 4 MV 同轴-三平板型水介质自击穿开关设计[J]. 强激光与粒子束,2006 ,18(3) 496-500. (Xia M H , Wang M , Wang Y J , et al. Design of 4 MV coaxial-triplate water pulse forming line switch. *High Power Laser and Particle Beams* ,2006 ,18(3) 496-500)
- [3] 王桂吉,吴刚,赵剑衡,等. 平面火花隙三电极开关研制及性能测试[J]. 强激光与粒子束,2006 ,18(2) 349-352. (Wang G J , Wu G , Zhao J H , et al. Development on planar spark gap switch with three electrodes. *High Power Laser and Particle Beams* ,2006 ,18(2) 349-352)
- [4] 徐学基,诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海:复旦大学出版社,1995. (Xu X J , Zhu D C. The gas discharge physics. Shanghai :the Press of Fudan University ,1995)
- [5] Malik N H , Qureshi A H. Breakdown mechanisms in sulphur-hexafluoride[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation* ,1978 ,13(3) :135-145.
- [6] 李洪涛. Z-pinch 加速器闭合开关技术研究[D]. 北京:中国工程物理研究院研究生院,2003. (Li H T. A study on the closing switch techniques of " Z-pinch " accelerator. Beijing :Graduate School of Chinese Academy of Engineering Physics ,2003)
- [7] 梁曦东,陈昌渔,周远翔. 高电压工程[M]. 北京:清华大学出版社,2003. (Liang X D , Chen C Y , Zhou Y X. The engineering of high voltage. Beijing :Tsinghua University Press ,2003)

Multi-channel rail switch of parallel-plate Blumlein line

OUYANG Jia , LIU Yong-gui , LIU Jin-liang , FENG Jia-huai

(College of Opto-electronic Science and Engineering , National University of Defense Technology , Changsha 410073 , China)

Abstract : In this paper a rail-like switch with multi-channel connected with parallel electrodes is designed and manufactured. The structure of the switch is illustrated and the internal electric field distribution is simulated by an electromagnetic simulation code. The voltage and current of the switch installed in the experiment setup are calculated using the software Pispice. Meanwhile experiments give the voltage and current of the switch , which are basically agreed with those from experiments. Experiments also indicate that the breakdown voltage of this switch is about 500 kV and the current of water-resistance of 1 k Ω is about 400 A. This work shows that this switch is compact and suitable to connect with parallel-plates transmission line.

Key words : Rail switch ; Multi-channels ; Parallel-plates Blumlein line ; Pulse high-voltage