结构参数对真空触发开关输出脉冲 电流上升率的影响研究

柏昕澎¹ 陈占清^{1*} 吝伶艳¹ 郭烘瑛¹ 康爱亮¹ 雷志鹏¹ 廖敏夫² (1. 太原理工大学 电气与动力工程学院 太原 030024; 2. 大连理工大学 电气工程学院 大连 116024)

The Influence of Structural Parameters on the Output Pulse Current Rise Rate of Triggered Vacuum Switch

BAI Xinpeng¹, CHEN Zhanqing^{1*}, LIN Lingyan¹, GUO Hongying¹, KANG Ailiang¹, LEI Zhipeng¹, LIAO Minfu²
(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract In order to increase the discharge power of the triggered vacuum switch (TVS), meeting the demands for high-power switching devices in pulsed power systems, in this paper, relevant structural parameters affecting the output pulse current rise rate of the triggered vacuum switch are studied. First, combined with theoretical calculations, the effects of TVS structural inductance and arc resistance on the current rise rate are compared. Subsequently, a discharge test platform for TVS was built based on a detachable vacuum chamber. Effects of electrode structure, working voltage, and gap distance on the rising rate of pulse current are compared and analyzed. The results proved that differences in parameters such as electrode diameter, conductive rod size, and electrode material in TVS lead to the change of its structural inductance or arc resistance and affect the rising rate of pulse current. When using a flat plate electrode, the current rising rate of TVS is higher than that of the transverse magnetic fields electrode. By increasing operating voltage and decreasing gap distance, a steeper pulse current can be output by TVS, and the 10 mm TVS can output current with a rising rate of 1.91×10^9 A/s under 10 kV operating voltage. It is suggested that, when developing TVS for high-power systems, the gap distance, structure and other parameters should be reasonably designed to improve the rise rate of switching output current.

Keywords Triggered vacuum switch, Current rising rate, Electrode structure, Arc plasma, Arc diffusion

摘要 为提升真空触发开关的放电功率,满足脉冲功率系统对大功率开关器件的需求,文章对影响真空触发开关 (Triggered vacuum switch, TVS)输出脉冲电流上升率的相关结构参数进行研究。首先结合理论计算,明确结构电感与电弧电 阻变化对 TVS 电流上升率的影响。随后基于可拆真空腔体搭建 TVS 放电试验平台,对比并分析电极结构、工作电压及电极 间距等参数对开关输出电流上升率的影响。结果表明,TVS 内电极直径、导电杆尺寸、电极材料等参数的变化会导致结构电 感或电弧电阻的变化,影响其输出脉冲电流的上升率。采用平板电极时,TVS 输出的电流上升率要高于纵磁杯状电极。工作 电压的升高和电极间距的减小可使 TVS 输出更为陡峭的脉冲电流,间距 10 mm 的 TVS 样机可在 10 kV 电压下输出上升率 1.91×10° A/s 的电流。建议研制用于高功率系统的真空开关时,合理设计其电极间距、结构等参数以提高开关输出电流的上升率。

关键词 真空触发开关 电流上升率 电极结构 电弧等离子体 电弧扩散 中图分类号: TM564 **文**献标识码: A **doi:** 10.13922/j.cnki.cjvst.202412006

收稿日期:2024-12-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52177131);山西省"1331工程"提质增效建设计划项目(晋教科[2021]14号);山西省基础研究计划项目(202203021212225;202203021212274)

^{*}联系人: E-mail: chenzhanqing@tyut.edu.cn

随着脉冲功率技术的快速发展,在直流断路器、 电磁发射、快脉冲直线变压驱动等大电流快速关合 领域对高性能开关提出更高要求^[1]。真空触发开关 (Triggered vacuum switch, TVS)以真空为绝缘和灭 弧介质,利用触发环节产生大量初始等离子体快速 导通真空间隙。其触发时延可控制在 25±1 ns 以内, 通流容量在 100C 以上,工作寿命可达 18000 次,是 一种综合性能优异的脉冲功率闭合开关^[2-7]。

此前学者针对 TVS 的触发性能提升进行了大量研究。2010年, 西安交通大学姚学玲等^[8-9]发现 TVS 内闪络材料的介电常数越高, 触发时延和抖动 越小, 研制的沿面闪络 TVS 工作电压范围触发时延 为 100±10 ns。华中科技大学何正浩等^[10-11] 开发的 多棒型激光触发真空开关, 触发时延低于 17 ns。 大连理工大学廖敏夫等^[12-14] 研究了触发材料、激 光能量、工作电压等参数影响下激光触发真空开 关的触发时延特性, 参数优化后可将其触发时延控 制在 32 ns 以内。

近年来脉冲激光器、快直线变压器驱动源 (LTD) 等微秒或纳秒脉冲放电领域对开关的放电功 率提出了更高要求。现有高功率系统多采用气体 触发开关,2021年西安交通大学张永鹏等[15]设计的 用于紫外预电离的气体开关,可输出上升率1.9× 10¹⁰ A/s 以上的脉冲电流。中国工程物理研究院税 荣杰等^[16]2023年为10MA级大电流装置研制的气 体触发开关输出的脉冲电流上升率进可达 10¹² A/s。 与气体开关相比,现有 TVS 能稳定输出的脉冲电流 上升率相对较低,一定程度上阻碍其在脉冲功率系 统的推广应用。为提高真空开关放电功率,东京工 业大学 Watanabe M 等^[17] 设计了一种双通道激光触 发真空开关,输出电流上升率为1.3×10⁸ A/s。全俄 电工所 Alferov D F 等^[18] 开发的 TVS, 可输出上升 率达 9.4×10° A/s 的脉冲电流。大连理工大学廖敏 夫等[19]研究发现激光触发真空开关输出电流的上 升率受开关电感与电阻的影响,样机的电流上升率 约为1.43×10⁸ A/s。华中科技大学何孟兵等^[20] 通过 优化电极结构与材料,将沿面闪络真空触发开关输 出的电流上升率控制在 3.96×10⁸ A/s。为避免大电 流烧蚀对气体开关可靠性和运行寿命的影响,利用 真空触发开关的通流容量大的性能优势开发综合 性能更优的闭合开关,对保障脉冲功率系统的高质 量发展具有重要意义。然而目前关于 TVS 输出脉冲 电流上升率的针对性研究相对较少,影响开关电流 上升率的主要因素与内在机制并不清楚,阻碍真空 开关放电功率的有效提升。

181

为探明影响 TVS 输出脉冲电流上升率的主要 因素和内在机理。本文首先结合理论计算分析了 开关结构电感、电弧电阻对其电流上升率的影响; 随后搭建试验电路对比不同电极结构、电极间距、 工作电压对 TVS 输出电流上升率的作用。分析不 同 TVS 内部结构与材料影响下开关结构电感的变 化,给出高功率 TVS 的结构设计建议,为综合性能 更优的真空触发开关研发奠定基础。

1 TVS 放电等值参数分析

本文以此前研制的 10 kV 激光触发真空开关为 仿真模型,内部电极为直径 85 mm 的纵磁杯状电极, 电极间距 10 mm,如图 1 所示^[21]。通过有限元仿真 计算得到该 TVS 结构电感为 122.91 nH,固有电阻 为 7.1 μ Ω。实验验证该 TVS 电感约为 110 nH,电容 与 TVS 连接铜排电感即外电路电感约为 1.71 μ H, 外电路电阻约为 0.4 mΩ。又通过实验测得样机导 通 10 kA 工频电流时电弧电压约为 53 V,即开关导 通时电阻约为 5.3 mΩ。由于真空电弧的电感远低 于开关结构电感。因此可忽略结构电阻和电弧电 感变化带来的影响。



根据 TVS 样机的阻抗参数,建立理想的开关放 电电路如图 2 所示。图中 *R*₁、*L*₁ 为 TVS 的电弧电 阻和结构电感, *R*_t、*L*_d 为外电路电阻和电感, *K*₁ 是理 想开关, *C* 容值为 1 μF, 充电电压 5 kV 的放电电容。



图2 TVS 放电等值电路 Fig. 2 TVS discharge equivalent circuit

K导通瞬间,列写回路电压方程如下:

$$(R_{t} + R_{l})i + (L_{d} + L_{l})\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int_{-\infty}^{t}i(\tau)d\tau = 0 \qquad (1)$$

$$i = Ae^{\alpha}$$
升间化待到:
 $s^2 + R_t + R_1 = 1 = 0$

$$L_d + L_1$$
 $(L_d + L_1)C$

对上式求解,得到 TVS 输出电流为:

$$i = Ae^{\left(-\frac{R_{1}+R_{1}}{2(L_{d}+L_{2})} + \sqrt{\left(\frac{R_{1}+R_{1}}{2(L_{d}+L_{1})}\right)^{2} - \frac{1}{(L_{d}+L_{1})^{c}}\right)t}$$
(3)

(2)

求导得到电流上升率为:

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = B\mathrm{e}^{\left(-\frac{R_{\mathrm{t}}+R_{\mathrm{I}}}{2(L_{\mathrm{d}}+L_{\mathrm{I}})} + \sqrt{\left(\frac{R_{\mathrm{t}}+R_{\mathrm{I}}}{2(L_{\mathrm{d}}+L_{\mathrm{I}})}\right)^{2} - \frac{1}{(L_{\mathrm{d}}+L_{\mathrm{I}})C}\right)^{t}}$$
(4)

$$B = A \cdot \left(-\frac{R_{t} + R_{1}}{2(L_{d} + L_{1})} + \sqrt{\left(\frac{R_{t} + R_{1}}{2(L_{d} + L_{1})}\right)^{2} - \frac{1}{(L_{d} + L_{1})C}} \right)$$
(5)

由式(4)-(5)可知, TVS 输出的脉冲电流上升率 随开关结构电感和电弧电阻的增加逐渐减小。图 3



图3 电阻、电感对电流波形的影响

Fig. 3 Effects of resistance and inductance on current waveforms

为不同阻抗 TVS 输出的脉冲电流波形。可见此前 研制的 TVS 可在理想条件下输出上升率为 2.56× 10¹⁰ A/s 的脉冲电流,但文献 [16] 的试验结果与之 相比仍存在一定差距。同时,根据图 3 可知,在微秒 脉冲放电中,外电路参数会对 TVS 放电波形产生影 响。但在试验过程中,电容与 TVS 所连接的铜排保 持不变,即外电路参数固定不变,仅改变 TVS 结构 参数。因此,本文认为外电路参数对试验结果的影 响可予以忽略。

2 TVS 脉冲放电试验平台

为进一步明确相关结构因素对 TVS 输出脉冲 电流上升率的作用,基于可拆卸真空腔体搭建的 TVS 放电试验电路如图 4 所示。主要包括触发源 系统及 TVS 放电回路。触发源系统采用级联放电 的方式输出幅值最高 21 kV, 上升率 42 V/ns 的电压 脉冲,在位于 TVS 阴极中心的 Al₂O₃ 陶瓷环表面诱 导形成闪络放电,产生初始等离子体使真空间隙导 通。TVS 试验电路中 R_t 、 L_d 分别为电容 C_0 与 TVS 所连接的铜排电阻 0.4 mΩ 及铜排电感 1.71 μH。其 中, TVS 样机为可拆卸真空腔体, 内部真空度通过 分子泵维持在 5×10⁻⁴ Pa 以下, TVS 采用直径 58 mm 的纵磁杯状电极,阴极中心有直径 10 mm, 深 2.5 mm 的凹槽放置陶瓷环。陶瓷环内径 5 mm, 外径 10 mm, 厚度为1.5 mm, 陶瓷环心固定有外径 6 mm 的铜触 发极片, 触发极与触发源系统电气连接。TVS 内电 极间距设为 10 mm。采用泰克 P6015A 高压探头分 别测量 TVS 工作电压和触发电压波形, 通过知用 CP9301A 罗氏线圈测量开关的放电电流波形,采 用高速相机配合滤光片拍摄间隙内真空电弧扩散 图像。



图4 TVS 电流上升率试验电路图 Fig. 4 Test circuit of TVS current rising rate

TVS 典型放电波形如图 5 所示。脉冲电压作 用约 2 μs 后间隙被触发,随即通过间隙释放脉冲电 流。此前研究通常定义 TVS 触发时延为触发脉冲 信号开始上升至开关电压开始下降所需时间,认为 此时真空间隙内已建立起始放电通道。随后放电 通道逐渐演变为稳定真空电弧,传输电流并完成脉 冲放电过程。



Fig. 5 Typical discharge waveform of TVS

因此,本文定义 TVS 从被触发时刻,即开关电流开始上升至电流增长至峰值所需的时间为开关的电流上升时间。根据电流上升时间和电流峰值,由式(6)计算 TVS 输出电流的上升率 di/dt:

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = \frac{\Delta I}{\Delta t} \tag{6}$$

式中: ΔI 为电流从零上升到峰值的幅值变化, Δt 为 电流上升时间。为保证试验结果的可靠性, 在相同 条件下重复进行 10 次放电试验, 统计每次放电时 TVS 输出电流的上升率并计算平均值, 由此得到开 关的电流前沿特性。

由图 5 放电波形可知, 触发脉冲在陶瓷表面放 电产生初始等离子体后, 可快速在真空间隙内建立 初始放电通道, 经过约 3.12 μs 即可转变为稳定真空 电弧, 传输脉冲电流。图 6 为高速相机拍摄得到的 间隙内真空电弧的形态(曝光时间 1 μs), 可见触发 极输出的电压脉冲对陶瓷环放电, 形成起始放电斑 点, 随后部分初始等离子体沿闪络通道与阴极表面 碰撞亦会形成阴极斑点, 扩散至真空间隙的初始等 离子体在间隙电磁场的作用下不断与阴、阳极表面 碰撞并释放更多带电粒子, 并在阴极表面建立更多 阴极斑点, 形成相对稳定的放电通道传输电流, 如 图 6 中阴极表面上呈扩散形态分布的多个阴极放电



图6 TVS 脉冲放电时真空电弧形态 Fig. 6 Picture of pulse vacuum arc in TVS

斑点所示。

电弧等离子体在真空间隙内的扩散运动,即电 极表面阴极斑点的熄灭与再生,势必影响开关的电 荷传输过程,使 TVS 输出的脉冲电流波形发生变化。 为探明影响 TVS 输出脉冲电流上升率的主要因素, 本文在前人工作基础上,结合试验与仿真对相关结 构参数的影响进行了研究。

3 不同因素影响下 TVS 的电流上升率

3.1 电极结构对 TVS 电流上升率的影响

调整 TVS 内电极结构,分别采用直径 58 mm 的纵磁杯状电极与直径 45 mm 的平板电极,电极表 面材料均为 CuCr₅₀ 合金。设置电极间距 10 mm,触 发环节参数不变,得到工作电压 4 kV 时,两种 TVS 输出的脉冲电流波形如图 7 所示。







其中,平板电极 TVS 内陶瓷环的闪络电压约 为 7.78 kV, 触发时延为 2.62 μs 左右, 即触发电压开 始上升到间隙电压开始下降所需时间为 2.62 μs; 纵 磁杯状电极 TVS 内陶瓷环的闪络电压约为 6.65 kV, 触发时延为 1.96 μs 左右。两种电极 TVS 输出脉冲 电流达到峰值所需时间有明显差异。平板电极 TVS 被触发后经过约 2.8 μs, 电流达到峰值 2.19 kA; 而 纵磁杯状电极 TVS 输出电流达到峰值所需时间约 为 3.02 μs。据式 (6) 计算得到平板电极 TVS 输出 电流的上升率约为 7.8×10⁸ A/s, 略高于纵磁杯状电 极 TVS 的电流上升率 7.0×10⁸ A/s。

经过多次重复试验发现,两种 TVS 输出的脉冲 电流上升率存在明显差异,如表 1、表 2 所示。可见 电极结构会在不同程度上影响 TVS 的放电过程和 放电波形。

表 1 纵磁杯状电极 TVS 电流上升率

Tab. 1 The current rising rate of axial magnetic cup-shaped electrode in TVS

电流上升时间	电流峰值	电流上升率	电流上升平均值
/µs	/kA	/ ($kA/\mu s$)	/ (kA/µs)
3.1	2.13	0.69	
2.96	2.13	0.72	
3.06	2.14	0.7	
3.02	2.13	0.71	
3.02	2.13	0.71	
3.04	2.16	0.71	
3.04	2.13	0.7	0.71
2.98	2.13	0.71	
3.04	2.13	0.7	
3.06	2.13	0.7	

表 2 平板电极 TVS 电流上升率

Tab. 2 The current rising rate of plate electrode in TVS

电流上升时间	电流峰值	电流上升率	电流上升平均值
/µs	/kA	/ (kA/µs)	/ (kA/µs)
2.92	2.19	0.75	
2.86	2.16	0.76	
2.94	2.18	0.74	
2.96	2.19	0.74	
2.92	2.2	0.75	
2.8	2.19	0.78	
2.94	2.16	0.73	0.75
3	2.19	0.73	
2.98	2.2	0.74	
2.94	2.19	0.74	

图 8 为试验所用两种电极结构, 二者主要差异 为电极直径和燃弧期间间隙自生磁场。为理清电 极结构造成开关脉冲放电参数差异的原因, 结合仿 真分别分析了不同电极直径和电极磁场结构对电 极环节结构电感的影响。模型设置有两个对向布 置的电极,间距为10mm,电极间布置有直径40mm 的圆柱状理想电弧模型。



图8 TVS内不同电极结构。(a)纵磁杯状电极,(b)平板电极

Fig. 8 Structures of different electrodes in TVS. (a) Axial magnetic cup-shaped electrode, (b) Plate electrodes

首先,以平板电极为仿真对象,调整平板电极 直径 d,从 40 mm 增大至 60 mm,如表 3 所示,计算 得到不同电极直径下电极环节的结构电感变化如 图 9 所示。随着电极直径的增加,电极间有效的通 流面积逐渐增大,电极部分固有的结构电感也从 7.89 nH 逐渐增大至 16.619 nH,相应的, TVS 的结构 电感也有所增大。

表 3 平板电极 TVS 直径对比

Tab. 3 Comparison of plate electrode diameters in TVS









随后,固定电极直径为58mm,分别计算平板 电极与纵磁杯状电极的结构电感,结果如图10所示。 其中纵磁杯状电极的电感为 25.821 nH, 高于平板电极的电感 15.811 nH。







此外,根据前人研究,纵磁杯状电极在放电时, 电极线圈与电弧通道形成的纵向磁场可束缚电弧 等离子体无序扩散,在间隙内形成多条放电通道, 使真空电弧燃烧相对稳定,电弧电阻较低。而平板 电极在导通大电流时,由于缺乏磁场束缚,电弧燃 烧并不稳定,电弧电阻也相对较高。

由以上分析,得益于较小的电极直径与固有结构,试验中平板电极 TVS 具有相对较低的结构电感。 但由于平板电极间隙磁场对电弧扩散的束缚作用 偏弱,其电弧电阻必然高于纵磁电极。考虑到图 7 中放电电流峰值仅 4 kA,间隙磁场对电弧扩散的束 缚作用相对有限。本文认为此时电弧电阻对 TVS 放电电流上升率的作用要弱于结构电感,因此,平 板电极 TVS 可获得略高于纵磁杯状电极 TVS 的电 流上升率。间隙磁场对 TVS 脉冲放电时电弧扩散 和输出电流上升率的影响规律和相关机制,拟在后 续研究中展开。

3.2 不同工作电压下 TVS 的电流上升率

考虑电弧烧蚀对电极使用寿命的影响,本文后 续研究采用纵磁杯状电极展开。调整纵磁电极 TVS上的试验电压,对比开关工作电压 U_i 对其输出 脉冲电流上升率的影响。设置 TVS 内电极间距为 10 mm,工作电压变化范围为 2 kV-10 kV,得到不同 工作电压下 TVS 输出电流上升率的变化如图 11 所 示。可见随着工作电压的增加, TVS 输出脉冲电流 的上升率可逐渐增加。工作电压 10 kV 时,开关输 出电流的上升率达到 1.91×10⁹ A/s。





Fig. 11 Effects of operating voltages on the current rising rate of TVS

根据此前研究,触发阶段较高的工作电压可提 供更高的电场强度,加速真空间隙内初始等离子体 的碰撞电离和扩散运动,有利于在间隙内产生更多 速度更快的带电粒子,缩短 TVS 触发所需时间^[22]。 相应的,在放电起始阶段,数量更丰富的速度更快 的带电粒子可在电极表面诱导形成更多起始阴极 斑点,加速 TVS 的电荷传输过程,使开关获得相对 更高的电流上升率。从宏观参数来看,更高的工作 电压可在 TVS 内诱导产生更多等离子体,使燃弧期 间的电弧电阻有所下降,有利于提升开关输出电流 的上升率。

3.3 电极间距对 TVS 电流上升率的影响

随后保持纵磁电极 TVS 的触发源参数和工作 电压(4 kV)不变,调整腔体内电极间距 d,得到电极 间距在 2 mm-10 mm 范围内变化时开关输出脉冲 电流的上升率如图 12 所示。可见随着电极间距的 增加,TVS 输出电流的上升率逐渐下降。间距 2 mm 的 TVS 可在 4 kV 工作电压下输出上升率为 9.24× 10⁸ A/s 的脉冲电流。

由前文分析,电极间距的减小可在一定程度上 增大真空间隙内电场强度,有利于通过闪络沿面产 生更多高速运动的初始等离子体,从而在阴极表面 诱导形成更多的初始阴极斑点,加速 TVS 的电流传 输过程。此外,电极间距的减小亦会缩短间隙内等 离子体扩散至对电极所需时间,初始等离子体可通 过与阴、阳极表面的碰撞电离释放更多带电粒子进 入间隙,从而形成更多电子密度更高的放电斑点, 加速真空间隙的电荷传输过程,使 TVS 获得更高的 电流上升率。







但电极间距的减小不利于 TVS 耐压水平的提高,会阻碍其在高压脉冲功率系统的应用。因此, 建议结合 TVS 的应用环境设计其电极间距、电极 结构等参数,从而保证开关获得最优的工作性能。 此外,考虑到导电杆尺寸、电极材料等亦会影响开 关的结构参数,从而影响其电流上升率。受限于试 验条件,本文基于图1仿真模型对导电杆尺寸和电 极材料对开关结构电感的影响进行了初步分析。

3.4 其他结构参数对 TVS 放电的影响

保持图 1 内电极、间距与陶瓷壳等部件尺寸不 变,仅改变 TVS 下导电杆的直径 d₀ 与导电杆长度 h, 如表 4 所示,得到不同下导电杆尺寸下 TVS 的结构 电感的变化如图 13 所示。可见随着下导电杆长度 的减小和导电杆直径的增加,TVS 的结构电感会逐 渐降低。设置参数范围内,可将 TVS 结构电感降低 至 115.19 nH。造成图中变化的原因可由圆柱导体 电感的计算公式推导得到,此处不再赘述。

表 4 TVS 下导电杆长度、直径对比

Tab. 4 Comparison of the length and diameter of the lower conductive rod in TVS

纵磁杯状电极 TVS	下导电杆长度 h _t /mm	下导电杆直径 d ₀ /mm
	79	30
		34
	84	38
		42
d _o 1	89	46

随后改变模型中纵磁杯状电极的表面材料,分别设为钨、硅钢、铝、铜和 CuCr₅₀,计算得到不同电





极表面材料 TVS 的结构电感如图 14 所示。其中硅 钢电极的结构电感最大,高达 1692 nH,钨、铝、铜 电极的电感依次下降;目前最常用的 CuCr₅₀ 电极的 结构电感最小,为 122.91 nH。由于几种材料的磁导 率不同,造成 TVS 结构电感的差异。此外,电极表 面材料差异会影响燃弧阶段间隙内等离子体成分, 从而影响 TVS 的电弧电阻。具体对真空开关电流 上升率的影响规律会在后续研究展开。



图14 电极表面材料对 TVS 结构电感的影响



通过上述仿真与试验研究,建议设计用于高功 率系统的真空开关时,在满足所需工作电压和通流 容量的前提下,选取磁导率较低的电极和导电杆材 料并尽量减小相关部件的尺寸,以减小对 TVS 输出 电流上升率的影响。

4 结论

本文通过仿真与试验研究了影响真空触发开

关输出脉冲电流上升率的主要结构参数,可以得到 以下结论:

(1)随着下导电杆长度的减小、导电杆直径的 增加及电极直径的减小, TVS 结构电感可逐渐降低 至 115.19 nH,从而提高其输出脉冲电流上升率。相 较于纵磁杯状电极和不同表面材料的平板电极,选 用 CuCr₅₀ 平板电极时 TVS 结构电感最小,输出脉冲 电流的上升率更高。

(2)工作电压的增加与电极间距的减小均会导致 TVS 输出电流上升率的增加。间距 10 mm 的纵 磁电极 TVS 样机可在 10 kV 工作电压下输出上升 率为 1.91×10° A/s 的脉冲电流。但与现有气体开关 相比仍存在一定差距,有待进一步优化参数以提升 TVS 输出电流的上升率。

参考文献

- [1] Woodworth J R, Alexander J A, Stygar W A, et al. Low inductance switching studies for linear transformer drivers[C]//IEEE Pulsed Power Conference, Washington, DC, USA, 2010: 250–254
- [2] Zhou Y, Yao C G, Li C X, et al. Compact electromagnetic pulse forming system based on the trigger vacuum switch[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 367–373
- [3] Cong P T, Sun T P, Qiu A C, et al. Inductance of six-stage gas switch of fast linear transformer driver[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(8): 2009–2012 (丛培天, 孙铁平, 邱爱慈, 等. 多间隙气体开关电感 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(8): 2009–2012 (in Chinese))
- [4] Alferov D F, Nevrovsky V A, Sidorov V A, et al. Anode erosion of a high-current multigap vacuum triggered switch[C]. in: 19th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Xi'An, China, 2000, 2: 515–518
- [5] Kamakshaiah S, Rau R S N, et al. Delay Characteristics of a Simple Triggered Vacuum Gap[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1975, 8(12): 1426–1429
- [6] Dong M L, He J J, Pan Y, et al. Measurement and analysis of time delay characteristics of field-breakdown triggered vacuum switches[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 540–544
- [7] Dong M L. Study on working characteristic mechanism of triggered vacuum switch[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2008 (董曼玲. 触 发真空开关工作特性及其机理的研究 [D]. 武汉: 华中

科技大学, 2008 (in Chinese))

- [8] Chen J L, Yao X L, Sun W, et al. Research on the triggering characteristics of pseudo-spark switch based on surface flashover discharge[J]. Journal of Xi'an Jiao tong University, 2007, 41(8): 978–981 (陈景亮, 姚学玲, 孙 伟. 基于表面闪络放电的伪火花开关触发特性的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(8): 978–981 (in Chinese))
- [9] Yao X L, Chen J L, Sun W, et al. Experimental study on the trigger characteristics of a flashover vacuum switch along the surface[J]. High voltage technology, 2010, 36(2): 340-344 (姚学玲, 陈景亮, 孙伟. 沿面闪络真空 开关触发特性的实验研究 [J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 340-344 (in Chinese))
- [10] Mao X P, He Z H, Wang Y, et al. Trigger charac-teristics of the target material for laser-triggered vacuum switches[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 169–173 (毛晓坡,何正浩,王英,等.激 光触发真空开关的目标材料触发特性 [J]. 电工技术学 报, 2016, 31(9): 169–173 (in Chinese))
- [11] Fan W F, He Z H, Wang Y, et al. Experiment research on the trigger characteristics of a laser-triggered vacuum switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5360-5366 (樊文芳,何正浩,王英,等. 一种激光触发真空开关的 触发特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5360-5366 (in Chinese))
- [12] Chen Z Q, Duan X Y, Liao M F, et al. Influences of target configurations on the trigger characteristics of lasertriggered vacuum switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(8): 3601–3608
- [13] Chen Z Q, Liao M F, Duan X Y, et al. Investigations on trigger process of triple-gap laser triggered multi-stage vacuum switch[J]. Vacuum, 2024, 227: 113467
- [14] Chen Z Q, Duan X Y, Liao M F, et al. Analysis and calculation on trigger process of laser triggered vacuum switch[J]. Vacuum, 2025, 233: 113972
- [15] Zhang Y P, Yang L J, Lu Z J, et al. Wide working coefficient and large capacity four-electrode ultraviolet pre-ion-ization gas switch[J]. High voltage technology, 2021, 47(12): 4368-4376 (张永鹏, 杨兰均, 路至建, 等. 宽工 作系数大容量四电极紫外预电离气体开关 [J]. 高电压 技术, 2021, 47(12): 4368-4376 (in Chinese))
- [16] Sui R J, Chen X M, Wang G J, et al. High-current threeelectrode gas switch with high field distortion coefficient[J]. High power lasers and particle beams, 2023, 35(6): 110-117 (税荣杰, 陈学秒, 王桂吉, 等. 较高场畸

变系数的大电流三电极气体开关 [J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(6): 110-117 (in Chinese))

- [17] Watanabe M, Maehara J, Fukushi I, et al. Behavior of ablate-d plasma in laser-triggered vacuum switch[C]//28th IEEE Inter-national Conference on Plasma Science and 13th IEEE Inter-national Pulsed Power Conference, Las Vegas, NV, USA, 2001: 1425–1428
- [18] Alferov D F, Londer Y I, Ulyanov K N, et al. Limit Rate of current rise in triggered vacuum switch[C]. XXVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Tomsk, Russia, 2012: 258–261
- [19] Lu G, Liao M F, Sun Y F, et al. Research on current-rise rate during closing process of laser-triggered vacuum switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(10): 3685–3691
- [20] He M B, Wang Q L, Pan Y, et al. Development of high-

coulombs and high-current pulse closure switches[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 131-136 (何孟兵, 王清玲,潘垣,等. 高库仑量大电流脉冲闭合开关的研 制 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 131-136 (in Chinese))

- [21] Chen Z Q. Study on the delay characteristics of laser-triggered series vacuum gap[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021 (陈占清. 激光触发串联真空间隙时 延特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021 (in Chinese))
- [22] Xin T N. Initial plasma characteristics and optimization design of laser-triggered vacuum switch[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019 (辛铁男.激光触发真空开关的初始等离子体特性及优 化设计研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019 (in Chinese))

文章简介

利用真空触发开关(TVS)的性能优势研发高功率闭合开关,有望提升脉冲功率装置的整机容量并降低运维成本。但TVS输出脉冲电流的上升率与气体开关相比存在明显差距,阻碍其在瞬时高功率放电场景中的推广应用。影响TVS电流上升率的主要因素及其作用机制目前并不清楚。本文结合仿真,明确了降低结构电感和真空电弧电阻可提升TVS的电流上升率。随后搭建试验平台,对比不同电极结构、电极间距、工作电压下TVS输出电流上升率的变化规律,分析导电杆尺寸、电极材料等结构参数对结构电感和电流上升率的影响。结果表明,10 mm 的平板电极 TVS 在 10 kV 工作电压下输出电流的上升率为 1.9×10° A/s;优化TVS 电极结构与导电杆尺寸可降低其结构电感,调控脉冲真空电弧扩散有利于提升 TVS 的电流传输能力。

通讯作者介绍

陈占清,男,讲师,主要从事真空开关电弧与脉冲功率开关技术方面研究,近年主持或参与国家自然科 学基金项目、山西省基础研究计划项目及企业委托课题等6项,发表学术论文10余篇,授权国家发明专利 4项,PCT 国际专利1项。

团队介绍

团队来自太原理工大学"矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室",现有煤矿电气设备与智能控制 山西省重点实验,矿井数字化山西省"1331"协同创新中心、山西省矿井数字化行业技术中心等科技创新平 台。实验室面向山西乃至全国的矿井自动化、信息化和智能化发展的战略需求、人才需求和技术需求,按 照山西急需、国内一流的总要求,充分发挥高校、科研院所和煤矿企业的资源优势,长期从事矿用智能电器、 煤矿生产过程自动化、电力设备电气绝缘故障诊断、煤矿重大灾害预警等领域的科学研究与技术攻关。先 后获国家科技进步二等奖1项,省部级科技进步一等奖3项,二等奖3项,三等奖1项;获国家发明专利70 余件;发表科技论文400余篇;培养博士20余名,硕士150余名。