



·脉冲功率技术·

百 kV/cm 场强下 SF₆ 气体开关纳秒脉冲击穿场强和时延经验公式*

郭 帆¹, 贾 伟¹, 谢霖霖¹, 陈志强¹, 吴 伟¹, 谢彦召²

(1. 西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024;

2. 西安交通大学电气绝缘与电力设备国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 百 kV/cm 高场强纳秒脉冲条件下, 采用 J. C. Martin 经验公式估算 SF₆ 气体击穿场强时, 估算值与实验结果差异显著。为了进一步指导高场强脉冲气体开关设计, 为开关工作状态调节提供依据, 借鉴经典击穿场强经验公式形式建立了百 kV/cm 场强下 SF₆ 气体开关纳秒脉冲击穿场强和时延与实验参数之间的关系, 基于实验数据拟合形成了修正系数的击穿场强和时延经验公式。研究表明, 百 kV/cm 场强和纳秒脉冲条件下脉冲电压斜率对开关击穿特性有重要影响, 击穿场强与击穿时延相互关联。百 ns 至 μs 脉冲与几十 ns 脉冲气体放电机理的区别引起放电过程中击穿时延组成发生变化, 导致了经典击穿场强经验公式估算值与实验结果的显著差异。修正系数的击穿经验公式可为电磁脉冲模拟器输出开关提供更为精确的工程设计依据。

关键词: 高电场强度; 纳秒脉冲; 击穿场强; 击穿时延; 经验公式

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210538

Empirical formula of breakdown electric field and time delay for SF₆ gas switch under nanosecond pulse and hundreds of kV/cm electric field

Guo Fan¹, Jia Wei¹, Xie Linshen¹, Chen Zhiqiang¹, Wu Wei¹, Xie Yanzhao²

(1. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Stimulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: There are significant differences between the calculation results and experimental results by using J. C. Martin empirical formula to estimate the breakdown electric field for hundreds of kV/cm electric field and nanosecond pulse. To improve the design of pulsed gas switch and adjustment of working conditions, the relationships between the breakdown electric field and time delay and the experimental parameters based on the classical empirical formula is established. The empirical formula of breakdown electric field and time delay for SF₆ gas switch under nanosecond pulse and hundreds of kV/cm electric field is presented. It is indicated that the slope of pulse will affect the breakdown characteristics of nanosecond pulse in high electric field and the breakdown electric field is correlated with the breakdown time delay. The differences between the calculation results and experimental results are caused by the experimental conditions. The fitting expression of empirical formula can give more guidance for the design of output switch in the electromagnetic pulse simulator.

Key words: high electric field, nanosecond pulse, breakdown electric field, breakdown time delay, empirical formula

直流气体放电研究和直流气体开关设计中, 根据绝缘气体介质种类、电极场型结构、间隙距离和气体压力等参数即可计算获得对应条件下的击穿场强和击穿电压^[1-5]。但是, 对于前沿为几十 ns 的脉冲放电而言, 目前还没有统一的公式可用于精确计算确定场型结构、间隙距离、气体压力和脉冲前沿条件下的击穿场强。无论是实验研究还是工程设计, 只能首先依据已有的脉冲击穿经验公式进行参数初步估算, 然后根据实验结果进行迭代和优化确定。经典脉冲击穿场强经验公式包括: Bradley 经验公式、考虑场增强因子的 Bradley 经验公式以及 J. C. Martin 经

* 收稿日期: 2021-11-29; 修订日期: 2022-05-04
联系方式: 郭 帆, guofan@nint.ac.cn。

验公式^[6-7]。采用上述脉冲击穿场强经验公式设计电磁脉冲模拟器输出开关参数时发现, 击穿场强估算值与实验结果差异显著。对于电磁脉冲模拟器而言, 为了实现 MV 高电压和 ns 脉冲前沿, 输出开关采用介电强度更高的电负性气体 SF₆ 作为绝缘介质, 最高气压达 1.5 MPa, 间隙距离仅为 2 cm, 激励脉冲前沿为几十 ns, 击穿场强在 kV/cm 至 MV/cm 范围^[8-10]。然而, 经典脉冲击穿场强经验公式是在脉冲前沿相对慢的百 ns 甚至是 μs 条件下开展而拟合形成的, 实验条件的显著差别可能是导致击穿场强估算值与实验结果存在差异的重要原因^[11]。为了进一步指导高场强纳秒脉冲气体开关设计, 更为精确地获得其击穿场强和击穿时延值, 本文主要针对 SF₆ 绝缘气体介质, 开展了百 kV/cm 场强纳秒脉冲高压实验平台设计, 研究了百 kV/cm 场强下纳秒脉冲气体开关击穿特性规律, 拟合形成了击穿场强和击穿时延经验公式。

1 百 kV/cm 场强纳秒脉冲高压实验平台设计

根据电磁脉冲模拟器输出开关工作条件, 设计了百 kV/cm 场强纳秒脉冲高压实验平台^[12]。实验平台电路采用一级脉冲压缩模式。综合考虑输出脉冲电压幅值、单级 Marx 电容容值和脉冲压缩电路峰化电容容值等因素, 结合 Pspice 电路仿真, 确定了实验平台等效电路参数, 如图 1 所示。

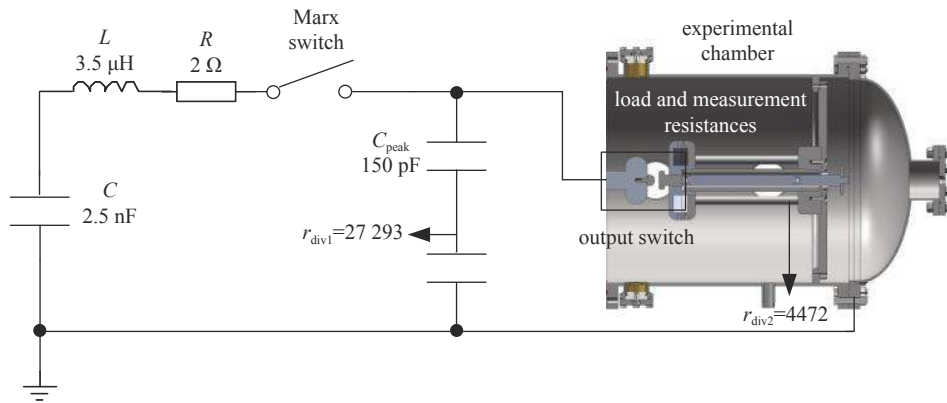


Fig. 1 Equivalent circuit of experimental setup

图 1 实验平台等效电路

初级储能单元采用 8 级直线型 Marx 发生器, 由 8 个场畸变气体开关和 16 个容值 40 nF 高压脉冲电容器组成, 建立等效电容值为 2.5 nF, Marx 回路串联电感值为 3.5 μH, 串联电阻值为 2 Ω。一级脉冲压缩电路中峰化电容采用基于聚丙烯薄膜的同轴型结构脉冲电容器, 电容值为 150 pF。利用二级电阻分压的自积分电容分压器进行高压脉冲信号测量。采用 2 kΩ 高精度低电感金属膜电阻作为二级分压高压臂电阻, 50 Ω 同轴匹配头作为低压臂电阻, 同时起到阻抗匹配的作用。北极星 PVM-6 型高压探头测量最高脉冲电压幅值为 100 kV, 测量带宽为 110 MHz, 可实现百千伏脉冲幅值和十纳秒脉冲前沿的标定要求, 因此, 采用北极星 PVM-6 型高压探头作为标准高压探头对电容和电阻分压器进行了脉冲测量标定。经标定计算, 电容分压器分压比为 27293±121^[12]。实验腔体直径与峰化电容腔体直径一致, 腔内包括开关间隙、负载电阻和测量引出, 整体长度约 820 mm。开关一端电极连接峰化电容中心轴作为阴极, 另一端电极连接负载电阻作为阳极。负载电阻由 6 根 1 kΩ 阻值的高功率金属膜电阻并联而成, 并联后阻值为 166 Ω。其中一根电阻后端串有测量电阻, 可形成电阻分压器测量输出电压。经标定计算, 电阻分压器分压比为 4472±23^[12]。SF₆ 气体开关击穿特性研究高压实验平台如图 2 所示, 实验平台输出脉冲参数为脉冲前沿 50 ns, 电压幅值范围 180 kV~1 MV, 电场强度范围 225 kV/cm~1.25 MV/cm, 气体压力范围 0.1~1 MPa。输出开关采用半球、锥型和环型三种场型结构, 间隙距离均为 0.8 cm, 电场分布如图 3 所示, 三种场型结构开关场不均匀系数分别为 1.35, 1.72 和 1.54。

峰化电容脉冲电压、负载脉冲电压和气体开关击穿电压典型波形以及击穿时延定义如图 4 所示。脉冲电压斜率延

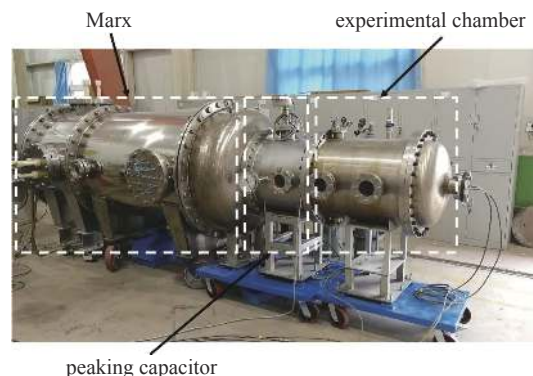


Fig. 2 High electric field nanosecond pulse experimental setup

图 2 SF₆ 气体开关击穿特性研究高压实验平台

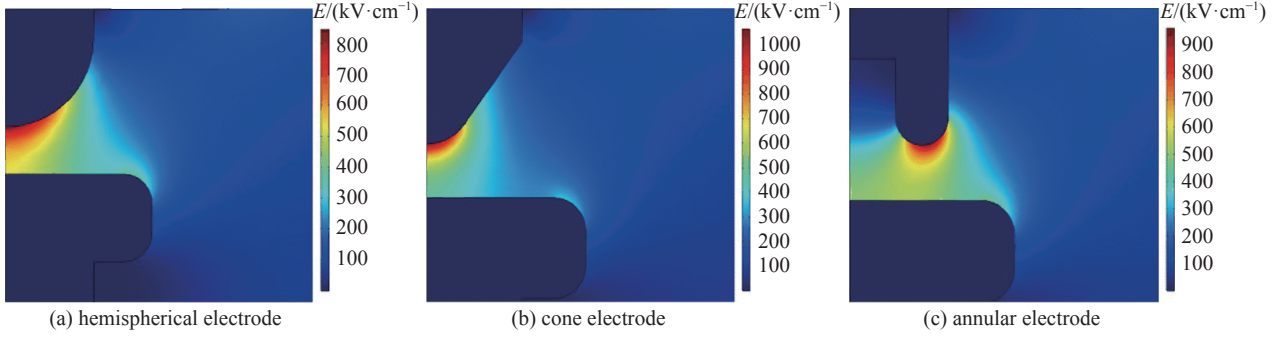


Fig. 3 Electric field distribution of three electrode configurations

图 3 三种场型结构电极电场分布图

长线与 x 轴的交点定义为零点, 开关击穿电压峰值点定义为击穿点。击穿时延定义为零点到击穿点的时间, 击穿电压定义为零点到击穿点的幅值。

击穿电压及其分散性和击穿时延及其抖动均采用平均值和方差表示, 如下

$$\bar{U}_d = \frac{1}{n} \left(\sum U_{di} \right) \quad (1)$$

$$U_j = \sqrt{\frac{\sum (U_{di} - \bar{U}_d)^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$\bar{t}_d = \frac{1}{n} \left(\sum t_{di} \right) \quad (3)$$

$$t_j = \sqrt{\frac{\sum (t_{di} - \bar{t}_d)^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中: \bar{U}_d 为击穿电压平均值; n 为实验次数; U_{di} 为每一次击穿电压; U_j 为击穿电压分散性; \bar{t}_d 为击穿时延平均值; t_{di} 为每一次击穿时延; t_j 为击穿抖动。

每个实验状态下采集 20 发次数据进行统计, 对比分析不同场型结构、脉冲电压斜率和气体压力条件下输出开关击穿特性变化规律。

2 击穿特性规律与经典经验公式的对比

经典的脉冲击穿场强经验公式包括: Bradley 经验公式、考虑场增强因子的 Bradley 经验公式及 J. C. Martin 经验公式。其中, Bradley 经验公式为

$$E_1 = 194p^{0.5}d^{-1/6} \quad (5)$$

考虑场增强因子的 Bradley 经验公式为

$$E_2 = 227p^{0.5}d^{-1/6}/\beta_M \quad (6)$$

J. C. Martin 经验公式为

$$E_3 = 72p^{0.4}(dt_{\text{eff}})^{-1/6} \quad (7)$$

研究中三种场型结构电极开关均为稍不均匀场, 其击穿特性的差异并不显著。同时, 环型电极开关击穿场强介于半球和锥型电极开关之间, 因此, 以环型电极开关为例, 采用三种经典击穿场强经验公式分别计算了气体压力范围 0.1~1 MPa 和间隙距离 0.8 cm 条件下的击穿场强估算值, 其与实验结果的对比如图 5 所示。由图 5 可知, 整个气体压力范围内考虑

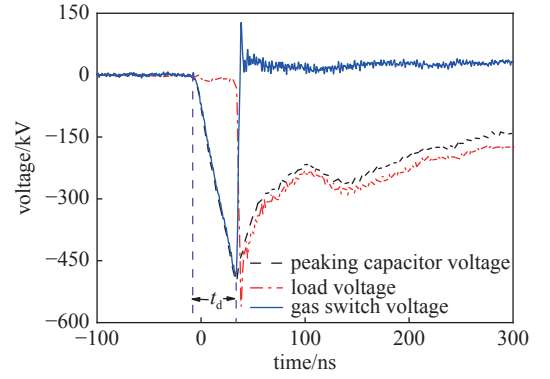


Fig. 4 Typical waveforms of breakdown characteristics experiment

图 4 击穿特性实验典型输出波形

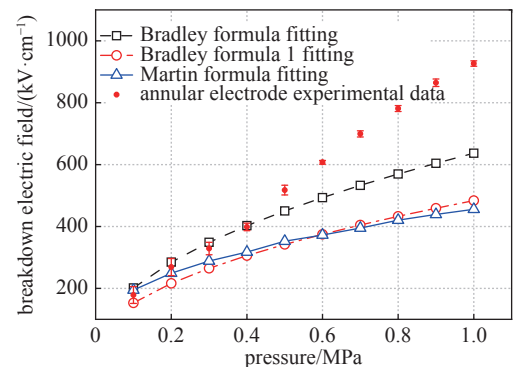


Fig. 5 Comparisons of calculation and experiment results

图 5 击穿场强实验结果与经典经验公式估算值的对比

增强因子的 Bradley 经验公式与 J. C. Martin 经验公式两者的击穿场强估算值符合较好,除了 0.1 和 0.2 MPa 两者相差 21.4% 和 13.1% 外,其他气压条件下两者相差在 0.5%~8.1%。Bradley 经验公式击穿场强估算值均高于此,相差 3.4%~39.7% 并且差值随气体压力的升高而增大。气体压力小于 0.3 MPa 时,采用 J. C. Martin 经验公式击穿场强估算值与实验结果相差约 10%,差距不显著。然而,当气体压力超过 0.4 MPa 时,击穿场强实验值基本呈线性增大趋势,由于经典经验公式击穿场强随气体压力存在 0.4~0.5 次方的关系,计算时均呈现出一定饱和趋势。当气体压力为 0.9 和 1 MPa 时,击穿场强实验结果均在 J. C. Martin 经验公式估算值的 2 倍以上。

分析认为,经典击穿场强经验公式中实验条件为百纳秒至微秒脉冲前沿,棒板极不均匀场型结构开关, kV/ns 量级脉冲电压斜率,击穿场强在几十 kV/cm 甚至更低。而文中实验条件为几十纳秒脉冲前沿,稍不均匀场型结构开关, 10 kV/ns 量级脉冲电压斜率,击穿场强高达百 kV/cm 至 MV/cm,两者实验条件差异显著。从击穿时延的组成来看, T. H. Martin 认为百纳秒至微秒脉冲条件下击穿时延组成中统计时延、电子崩和流注发展时间均可忽略,主要由等离子通道加热时间决定^[13-14]。随着气压的增大,击穿时延逐渐与静态击穿电压所对应的时间一致。高场强纳秒脉冲击穿特性研究结果显示,几十纳秒脉冲条件下击穿时延主要由有效电子形成时间、电子崩流注发展时间以及等离子体通道加热时间等部分组成。其中,有效电子形成时间主要取决于静态击穿电压所对应的时间,而电子崩流注发展时间以及等离子体通道加热时间之和在 10~20 ns^[15]。这种条件下击穿场强可以视为两部分构成,一部分为静态击穿场强,另一部分是由于电子崩、流注发展和等离子体通道加热等过程所引起的击穿场强增量。当脉冲电压斜率为 25 kV/ns 时,估计击穿场强增量将达到 300~600 kV/cm,已与静态击穿场强相当,由此造成快脉冲条件下击穿场强实验值远高于经验公式击穿场强估算值。

虽然 J. C. Martin 经验公式考虑了脉冲前沿或者有效作用时间这一参数对击穿场强的影响,但由于表达式中有效作用时间的幂次方为 -1/6,即使脉冲前沿从微秒变为纳秒,由此引起的击穿场强变化并不显著,因而不能采用 J. C. Martin 经验公式表征几十 ns 脉冲条件下击穿场强与击穿时延之间的关系。电磁脉冲模拟器工作状态调节中,常常将脉冲电压斜率作为一重要的实验变量,其与击穿场强和击穿时延均相互关联^[16]。因此,建立击穿场强与脉冲电压斜率的关系,即可获得击穿时延与脉冲电压斜率的关系,一方面可提供电磁脉冲模拟器输出开关设计依据,另一方面可指导输出开关工作状态调节。

3 击穿场强和时延经验公式的拟合

经典击穿场强经验公式中虽然系数参数存在差异,但就形式而言是类似的,包括线性影响因子、气体压力指数影响因子、间隙距离指数影响因子和有效作用时间指数影响因子等。考虑脉冲电压斜率对击穿场强和击穿时延的影响,将其作为一影响因素纳入经验公式中,那么, SF₆ 气体开关纳秒脉冲击穿场强与气体压力、间隙距离和脉冲电压斜率之间关系可描述为

$$E_b = Ap^a d^b k^c \quad (8)$$

式中: E_b 为击穿场强; A 为线性影响因子; p 为气体压力; d 为间隙距离; k 为脉冲电压斜率; a 为气体压力指数影响因子; b 为间隙距离指数影响因子; c 为脉冲电压斜率指数影响因子。

二级脉冲压缩模式的电磁脉冲模拟器输出开关间隙距离是固定的,开关工作状态通过改变前级脉冲电压幅值和开关气压来调节,因此,根据开关实际工况和击穿场强及时延的主要影响因素,采取固定间隙距离,重点研究脉冲电压斜率和气压的影响。当间隙距离固定时,可将其折算到线性影响因子中。与 J. C. Martin 经验公式相比,将有效作用时间替换为脉冲电压斜率。此时,击穿场强可表示为

$$E_b = Ap^a k^b \quad (9)$$

首先,对方程两边求对数

$$\ln E_b = \ln A + a \ln p + b \ln k \quad (10)$$

其次,将击穿场强、气体压力和脉冲电压斜率实验数据分别求对数后带入方程,形成含有二元一次参数的方程组。然后,采用 Matlab 最小二乘法对其进行二元线性拟合。最后,根据拟合系数,即可计算获得击穿场强关系式的各个影响因子值。通过相同方法可获得击穿时延关系式的各个影响因子值。

根据三种场型结构电极的击穿场强特性实验数据,半球电极开关击穿场强和击穿时延经验公式分别为

$$E_{bh} = 125p^{0.5}k^{1/3} \quad (11)$$

$$t_{dh} = 100p^{0.5}k^{-2/3} \quad (12)$$

锥型电极开关击穿场强和击穿时延经验公式分别为

$$E_{bc} = 105p^{0.5}k^{1/3} \quad (13)$$

$$t_{dc} = 85p^{0.5}k^{-2/3} \quad (14)$$

环型电极开关击穿场强和击穿时延经验公式分别为

$$E_{ba} = 110p^{0.5}k^{1/3} \quad (15)$$

$$t_{da} = 90p^{0.5}k^{-2/3} \quad (16)$$

三种场型结构电极开关击穿场强拟合曲线与实验结果的对比如图 6 所示。由图 6 可知，三种场型结构电极开关击穿场强拟合结果与实验值吻合较好，未出现经典经验公式中击穿场强随气压升高呈现偏差增大的趋势。高场强纳秒脉冲条件下，击穿场强和击穿时延相互关联，引入脉冲电压斜率 k 后可建立击穿场强和击穿时延与实验参数之间的关系。根据击穿场强和击穿时延经验公式，可为电磁脉冲模拟器输出开关提供更为精确的工程设计依据。

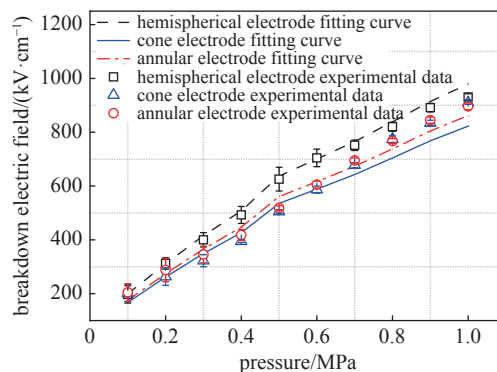


Fig. 6 Comparison of calculation and experiment results

图 6 三种场型结构电极开关击穿场强拟合结果与实验结果的对比

4 结论

为了建立高场强快脉冲条件下击穿场强和击穿时延与实验参数之间的关系，指导电磁脉冲模拟器输出开关设计，本文设计了高场强纳秒脉冲高压实验平台，研究了百 kV/cm 场强下 SF₆ 气体开关纳秒脉冲击穿特性规律。研究结果显示，高场强纳秒脉冲气体放电机理可能与百纳秒至微秒脉冲放电机理有所区别，导致击穿时延的组成及其占比发生变化，并不能完全采用 J. C. Martin 经验公式及理论来解释。借鉴经典的击穿场强经验公式形式，根据实验结果拟合形成了高场强纳秒脉冲条件下击穿场强和击穿时延与实验参数之间的关系。修正系数的经验公式表明，击穿场强与击穿时延二者密切关联，引入脉冲电压斜率 k 后的经验公式既能提供输出开关工程设计依据，又能指导输出开关工作状态调节。

致谢 高场强纳秒脉冲实验平台设计研制和开关击穿特性实验过程中得到了程永平、杨天、李尧尧、祁宇航和张建利等实验师的帮助，在此表示感谢！

参考文献：

- [1] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2015. (Yan Zhang, Zhu Deheng. High voltage insulation technology[M]. 3rd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2015)
- [2] 施围, 邱毓昌, 张乔根. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. (Shi Wei, Qiu Yuchang, Zhang Qiaogen. High voltage engineering foundation[M]. Beijing: China Machine Press, 2011)
- [3] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High power pulse technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [4] Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [5] Mesyats G A. Pulsed power[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2005.
- [6] 尹佳辉, 孙凤举, 邱爱慈, 等. MV级气体开关脉冲自击穿特性及支撑结构的优化[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(7): 1220-1224. (Yin Jiahui, Sun Fengju, Qiu Aici, et al. Self-breakdown properties and optimization of insulator envelope for MV gas switch under pulsed voltage[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(7): 1220-1224)
- [7] Martin T H, Guenther A H, Kristiansen M. J. C. Martin on pulsed power[M]. New York: Plenum Press, 1996.
- [8] Gilman C, Lam S K, Naff J T, et al. Design and performance of the FEMP-2000: a fast rise time, 2 MV EMP pulser[C]//Proceedings of the 12th IEEE International Pulsed Power Conference. Monterey, USA: IEEE, 1999: 1437-1440.
- [9] Belt D, Mazuc A, Sebacher K, et al. Operational performance of the Horizontal Fast Rise EMP pulser at the Patuxent River EMP test facility[C]//Proceedings of 2011 IEEE Pulsed Power Conference. Chicago, USA: IEEE, 2011.
- [10] 邱爱慈. 脉冲功率技术应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. (Qiu Aici. Pulsed power technology application[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 2016)
- [11] 张永民, 来定国, 程亮, 等. 纳秒脉冲电压下气体开关的击穿特性[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(8): 1267-1270. (Zhang Yongmin, Lai Dingguo, Cheng

- Liang, et al. Breakdown characteristics of gas switch under nanosecond pulse voltage[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(8): 1267-1270)
- [12] Guo Fan, Xie Yanzhao, Jia Wei, et al. Effect of electrode surface micro-protrusions on the breakdown time delay and jitter for nanosecond pulsed gas discharge under hundreds of kV/cm in sulfur hexafluoride[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27: 083502.
- [13] Martin T H. An empirical formula for gas switch breakdown delay[C]//Proceedings of the 7th Pulsed Power Conference. Monterey, USA: IEEE, 1989: 73-79.
- [14] Schaefer G, Kristiansen M, Guenther A. Gas discharge closing switches[M]. New York: Plenum Press, 1990.
- [15] 郭帆. 兆伏级SF₆气体开关纳秒脉冲击穿时延和抖动的影响机制研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2021. (Guo Fan. The influence mechanism of breakdown time delay and jitter for megavolt level SF₆ gas switch under nanosecond pulse[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2021)
- [16] Guo Fan, Xie Yanzhao, Jia Wei, et al. The self-breakdown characteristics of the output switch for EMP simulator[C]//Proceedings of 2019 Asia Electromagnetic Conference. Xi'an, China, 2019.