

文章编号: 2095-4980(2019)05-0919-05

FLTD 气体火花开关自放电特性

张昱钊, 李晓昂, 裴哲浩, 马超群, 刘琳, 刘轩东, 张乔根

(西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 快脉冲直线变压器驱动源(FLTD)是目前经济、高效构建大型脉冲功率源的重要技术途径, 但其多“子块”串并联的电路拓扑对开关提出极严苛的技术要求。针对多开关同步时系统自放电概率骤增的难题, 开展 FLTD 气体火花开关自放电特性研究。选取三电极场畸变和多间隙两种典型开关结构, 在 ± 100 kV 条件下研究放电电流和开关结构参数对自放电概率的影响规律。研究表明, 29 kA 脉冲电流多次作用下, 三电极场畸变开关和六间隙开关自放电电压均服从 Weibull 分布, 三电极开关放电分散性约 4%, 而六间隙开关放电分散性超过 15%, 两类开关均出现较明显的提前放电现象。分析认为开关放电分散性大与中间电极悬浮导致间隙电压分布不均有关, 采用电阻强制均压的方式, 三电极场畸变和六间隙多通道开关放电分散性明显减小, 分别减小至 2% 和 5%。

关键词: 快脉冲直线变压器驱动源; 气体火花开关; 三电极场畸变; 多间隙; 自放电概率

中图分类号: TN104.7; TM85 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201905.0919

Investigation on pre-fire characteristics of FLTD gas spark switches

ZHANG Yuzhao, LI Xiaoang, PEI Zhehao, MA Chaoqun, LIU Lin, LIU Xuandong, ZHANG Qiaogen
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

Abstract: Fast Linear Transformer Driver(FLTD) is an economic and effective technical routine for constructing high-current high-voltage pulsed power drivers, but its circuit topologies, multi “bricks” in series and parallel, put forward strict technical requirements on gas spark switches. Aimed at the problem of pre-fire, which seriously restricts the reliability and stability of FLTD facilities, researches of this paper are carried out on the focus of pre-fire in FLTD gas spark switches. Three-electrode field distortion gas switch and multi-stage multi-channel gas switch are employed, and the influence of discharge current and switch parameters on pre-fire characteristics is studied at ± 100 kV. The results show that the self-breakdown voltage of both switches fits well with Weibull distribution. Increasing the switch pressure and shortening the gap length can help decrease switch trigger delay, but directly increase pre-fire probability. Under 29 kA current amplitude and 75% working ratio, the discharge dispersivity of the three-electrode field distortion gas switch is about 4%, while the dispersivity of the discharge of the six-stage multi-channel gas switch is more than 15%. Both types of switches have obvious early discharge phenomena. The uneven distribution of potential of each gap in six-stage switch is thought to be responsible for the increase of pre-fire rate. By resistors parallel-connected with each gap to mandatorily realize voltage sharing, the pre-fire rates of the three-electrode field distortion and the six-stage gas switch decrease to 2% and 5%.

Keywords: Fast Linear Transformer Driver; gas spark switch; three-electrode field distortion; multi-stage; pre-fire probability

快脉冲直线变压器驱动源(FLTD)是目前经济、高效构建大型脉冲功率源的重要技术途径, 在 Z 箍缩、X 闪光灯等相领域具有重要应用前景^[1-5]。FLTD 采用多个低(LC)^{1/2}的“子块”串、并联放电实现高功率脉冲输出, 其电路拓扑决定了 FLTD 装置的开关数量巨大, 且必须同步触发放电, 因而对开关的触发动作、自放电概率、寿命等提出极严苛的要求, 目前气体开关尚不能全面满足要求, 而多开关同步时系统自放电概率骤增的难题则是关键限制因素之一^[6-11]。

收稿日期: 2017-11-20; 修回日期: 2018-04-26

据报道,国内外研究机构研制的多间隙多通道开关(Multi-stage Multi-channel Closing Switch, MMCS)、三电极场畸变开关等均出现自放电现象,虽然通过降低工作系数的方式可降低开关自放电概率,但是会造成开关触发困难,抖动增大^[12-13]。目前,FLTD 开关自放电的水平与 Stygar 在 1 000 TW 驱动源概念设想中提出的 10^{-7} 的要求相距甚远,是脉冲功率技术领域亟待解决的难题之一,有待进一步系统地研究^[14-15]。

1 实验方法

1.1 实验装置和方法

实验原理图采用典型的 LTD “子块” 结构,如图 1(a)所示,其中,主电容为 200 nF,水电阻阻值为 5Ω 。采用自击穿的放电模式进行开关放电实验,其中,放电电压和电流分别通过电阻分压器和罗氏线圈测量,典型放电电流波形如图 1(b)所示,经估算,回路电感约 400 nH。为获得开关自放电特性,采用如下试验流程:1) 老炼:在 1 kA 小电流下进行重复放电试验,试验次数 200 次,6 次/min;2) 自放电电压测量:在 29 kA 额定电流下进行重复放电试验(试验时间间隔为 3 min),并通过读取放电时刻的电容充电电压获得开关放电电压,升压方式采用“匀速升压法”,升压速率约为 2 kV/s。3) 换气:因放电电流较大,每经过 20 次放电,对开关内的气体进行更换,确保开关腔体内气体绝缘强度无明显变化。

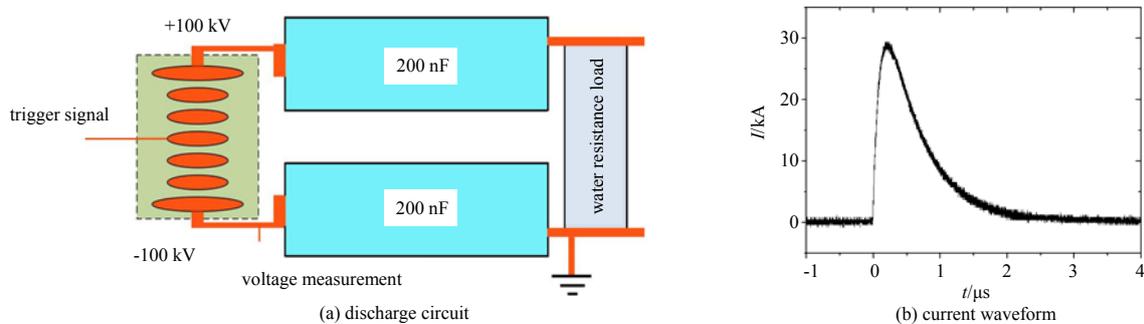


Fig.1 Test circuit of the statically breakdown voltage gas switch
图 1 开关放电电压测试回路

1.2 开关

本文选用最典型的两种开关结构,分别是三电极场畸变气体开关(Three-electrode Field-Distortion Gas Switch, TFGS)和多间隙多通道气体开关,实物如图 2 所示。其中,三电极场畸变开关采用球电极结构,间隙距离为 12 mm+12 mm,六间隙多通道开关(Six-stage Multi-channel Gas Switch, SMGS)采用环电极结构,间隙距离为 6×6 mm,电极材料均为不锈钢。采用有限元分析法进行开关电极间隙电场分布校核,发现三电极场畸变开关的电场不均匀系数为 1.2,六间隙开关的电场不均匀系数为 1.4,均为稍不均匀电场。

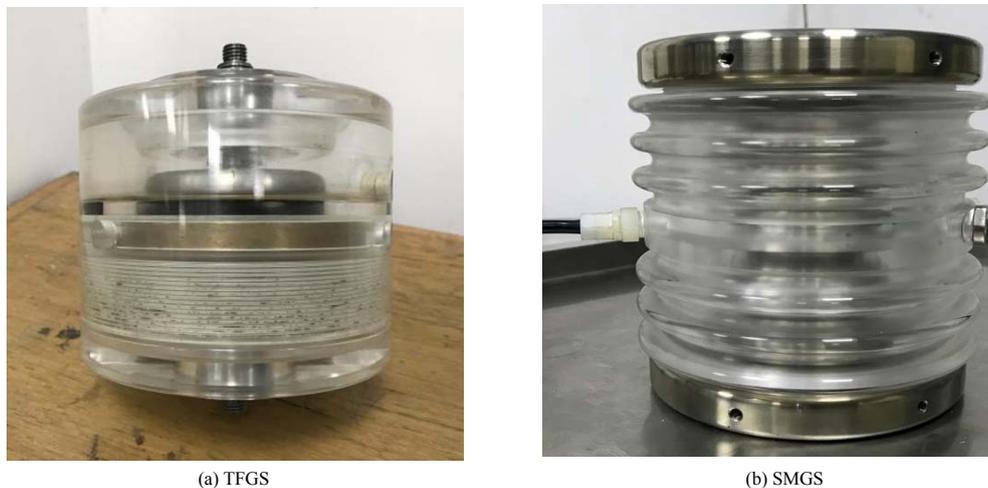


Fig.2 Pictures of the gas spark switches
图 2 开关实物图

2 静态自击穿特性

2.1 三电极场畸变开关自放电电压

三电极场畸变气体开关以干燥氮气作为绝缘介质，气压 0.31 MPa，在图 1(b)所示电流作用下的自放电电压散点如图 3 所示，其中，开关触发盘为完全悬浮状态。实验结果表明，开关放电电压在 174 kV 左右，开关放电电压标准差为 6.6 kV，不超过 U_b 的 5%，但开关存在提前放电(放电电压明显降低)的情况。

2.2 六间隙多通道开关自放电电压

六间隙多通道开关以干燥氮气作为绝缘介质，气压 0.23 MPa，在图 1(b)所示电流作用下的自放电电压散点如图 4 所示。发现，六间隙多通道开关的自放电电压分散性很大，200 次自放电实验的平均自放电电压 U_b 为 155 kV，而其自放电电压标准差为 22.7 kV，达到 U_b 的 15%。

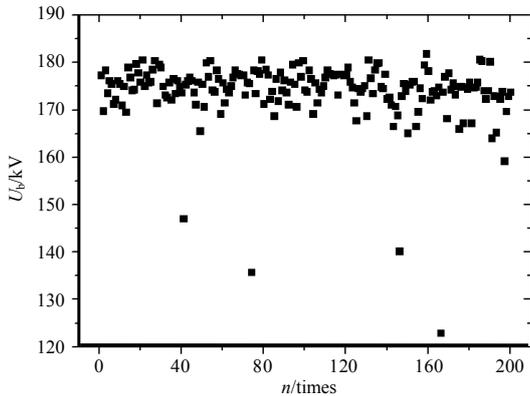


Fig.3 Scatter diagram of the self-breakdown voltage of TFGS
图 3 三电极场畸变气体开关自放电电压散点图

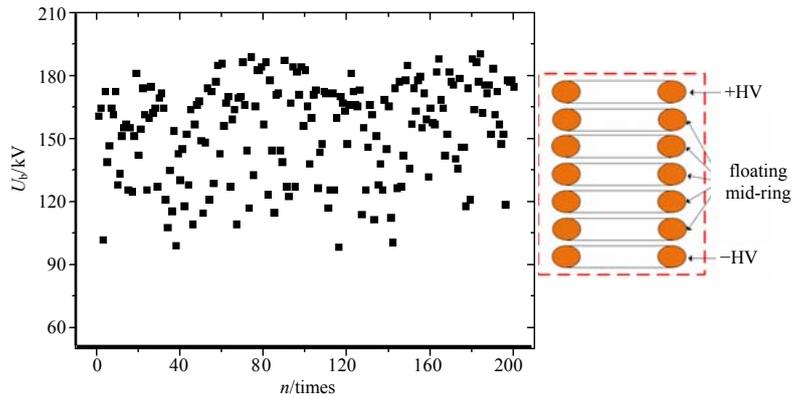


Fig.4 Scatter diagram of the self-breakdown voltage of SMGS
图 4 六间隙多通道气体开关自放电电压散点图

3 开关自放电概率计算

3.1 自放电电压分布的统计规律

分别进行三电极场畸变气体开关和六间隙多通道开关的重复静态击穿试验，统计分析开关自放电电压在不同区间的频次分布，并进行最小二乘拟合，获得放电电压分布的概率密度函数，如图 5 所示。发现两种开关的自放电电压分布均呈现出非对称分布的特点，采用三参数 Weibull 分布进行拟合具有较好的拟合优度，其表达式如下：

$$f_3(u) = 0.28 \left(\frac{u}{176.1} \right)^{48.8} \exp \left[- \left(\frac{u}{176.1} \right)^{49.8} \right] \quad (1)$$

$$f_6(u) = 0.05 \left(\frac{u-2.7}{164.4} \right)^{7.6} \exp \left[- \left(\frac{u-2.7}{164.4} \right)^{8.6} \right] \quad (2)$$

式中： $f_3(u)$ 表示三电极场畸变气体火花开关放电电压分布的概率密度函数； $f_6(u)$ 表示六间隙多通道开关放电电压分布的概率密度函数。为获得特定工作系数 γ 下的开关自放电概率，可采用概率密度函数积分的方式，如下：

$$P = \int_0^U f(u) du = F(U) = F(\gamma \cdot U_b) \quad (3)$$

因此，自放电概率表达式可表示为：

$$F_3(u) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{u}{176.1} \right)^{49.8} \right] \quad (4)$$

$$F_6(u) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{u-2.7}{164.4} \right)^{8.6} \right] \quad (5)$$

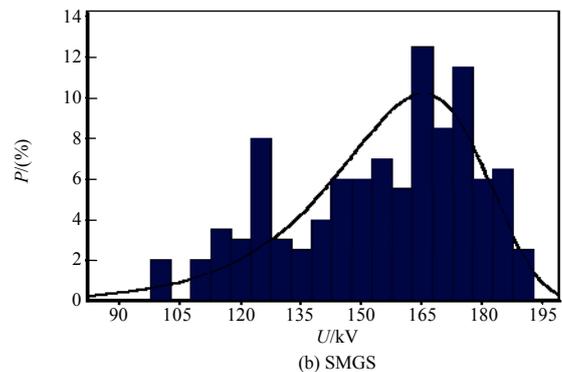
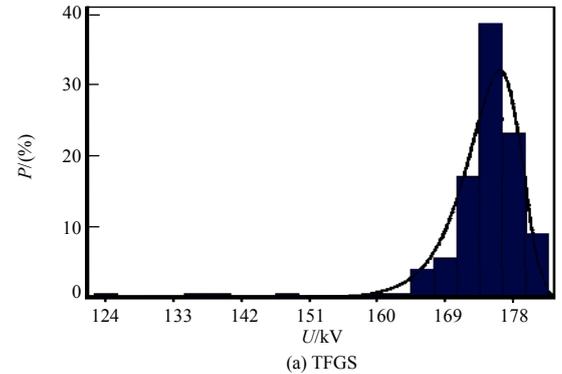


Fig.5 Distribution of self-breakdown voltage of gas switches
图 5 自放电电压分布规律

基于式(4)和式(5)，可计算获得不同工作系数下开关的理论自放电概率。

3.2 自放电概率

表 1 给出了通过重复放电过程中自放电频次统计方法获得的开关自放电概率，将实验结果与式(3)计算结果对比。结果表明，三电极开关和六间隙开关均存在较高的自放电概率，且六间隙开关的自放电概率尤为突出。

表 1 开关自放电压分布统计

Table1 Statistical data of self-breakdown voltage of gas switches

items		$P(U \leq 90\%U_b)/\%$	$P(U \leq 80\%U_b)/\%$	$P(U \leq 70\%U_b)/\%$	$P(U \leq 60\%U_b)/\%$	$P(U \leq 50\%U_b)/\%$
TFGS	actual statistics	3.00	2.00	0.50	0	0
	theoretical calculation	2.62	0.75	9.7×10^{-6}	4.5×10^{-9}	5.1×10^{-13}
SMGS	actual statistics	70.00	33.00	18.00	4.00	0
	theoretical calculation	76.37	40.78	15.32	4.32	0.92

分析表明，较高的自放电概率可能与多方面因素有关，包括电极熔蚀造成的表面凸起，气体介质中的异物混入，中间电极悬浮导致的间隙电压分布不均等。因为文中采用的开关经历的放电次数很少，在图 1(b)所示电流条件下，开关应仍处于寿命初期，电极熔蚀造成的性能变化基本可以忽略。本文开关进气和出气均装设了过滤装置，排除了异物混入的影响。因此，分析认为，文中开关较高的自放电概率主要是因为中间电极悬浮所致。当中间电极悬浮时，其电位不确定，受多个间隙(两间隙或六间隙)等效泄漏电阻、壳体静电积聚等因素的影响，其电位可能不处于固定电位，导致间隙电压分布不均，从而降低开关放电电压，导致开关提前放电。

4 中间电极限位对自放电特性的影响

根据上述分析，开关放电电压分散性大，自放电概率高，拟采用限定中间电极电位的方法进行研究，获得中间电极电位对自放电特性的影响。

三电极开关仅存在一个中间电极，其触发盘理论上应处于零电位，因此，采用电阻接地的方式进行中间触发盘电位限定。六间隙开关的中间电极较多，采用并联泄漏电阻的方式进行悬浮电极电位限定，选用 200 MΩ 的高压电阻作为间隙静态均压电阻，泄漏电流为数十微安。图 6 给出了中间电极电位限定后的开关自放电压分布规律。结果表明，中间电极电位限定对减小放电电压分散性的作用很明显。统计放电电压分布规律，如表 2 所示，发现加装中间电极限位电阻后，开关放电分散性明显较小。但是，目前的限位电阻会增大开关体积和降低结构稳定性，仍需进一步优化中间电极限位方式，使之满足 FLTD 开关紧凑型的要求。

表 2 中间电极悬浮和限位条件下的自放电概率统计

Table2 Pre-fire probability of gas switch with fixed or floating mid-electrode

items		standard deviation/kV	$P(U \leq 90\%U_b)/\%$	$P(U \leq 80\%U_b)/\%$	$P(U \leq 70\%U_b)/\%$	$P(U \leq 60\%U_b)/\%$
TFGS	trigger disk suspension	6.6	3.0	2.0	0.5	0
	trigger disk grounding	2.8	0.5	0	0	0
SMGS	middle electrode suspension	22.7	70.0	33.0	18.0	4.0
	resistance voltage-sharing	9.2	30.0	0.5	0	0

5 结论

针对多开关同步时系统自放电概率骤增的难题，开展 FLTD 气体火花开关自放电特性研究。选取三电极场畸变和多间隙两种典型开关结构，在 29 kA 电流条件下研究了开关放电电压分布规律，得到结论：

- 1) 三电极场畸变开关和六间隙开关自放电压均服从 Weibull 分布，三电极开关放电分散性约 4%，而六间隙开关放电分散性约 15%；
- 2) 开关放电分散性大与中间电极悬浮导致的间隙电压分布不均有关。采用电阻强

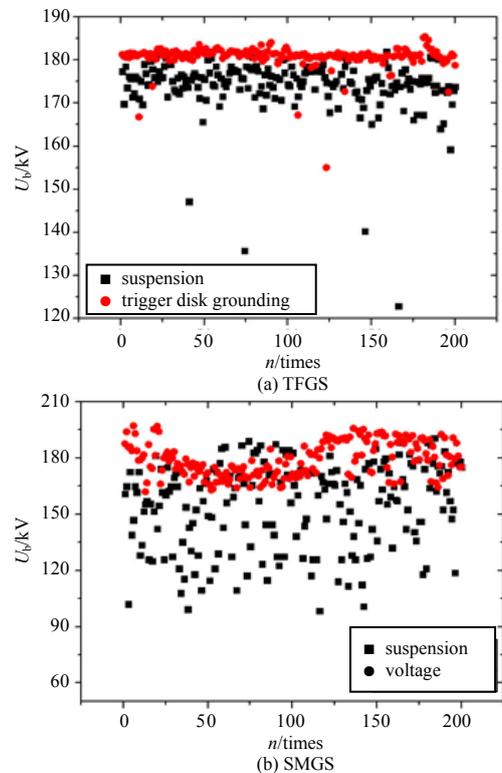


Fig.6 Scatter diagram of U_b with fixed or floating mid-electrode
图 6 中间电极悬浮和限位条件下放电电压散点图

制均压的方式可明显减小开关放电分散性,但其安装方式和对开关尺寸的影响仍需研究。

参考文献:

- [1] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安:陕西科学技术出版社, 2003. (ZENG Zhengzhong. Introduction to practical pulse power technology[M]. Xi'an,China:Shaanxi Science and Technology Press, 2003.)
- [2] 刘锡三. 高功率脉冲功率技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:15-24. (LIU Xisan. High-power pulsed power technology[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2005:15-24.)
- [3] 邱爱慈. 脉冲 X 射线模拟源技术的发展[C]// 中国物理学会粒子加速器学会会员代表大会暨成立 20 周年学术报告会. 扬州:[s.n.], 2000:24-28. (QIU Aici. The development of pulsed X-ray simulation source technology[C]// The Academic Conference of the Member Accelerator Society of the Chinese Academy of Physics and the 20th Anniversary of the Establishment. Yangzhou,China:[s.n.], 2000:24-28.)
- [4] 邱爱慈. 脉冲 X 射线模拟源技术的发展[J]. 中国工程科学, 2000,2(9):24-28. (QIU Aici. The development of technology for pulsed X-ray simulators[J]. Engineering Science, 2000,2(9):24-28.)
- [5] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用:(1)概述[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(1):10-15. (JIANG Weihua. High repetition rate pulse power technology and its applications: (1) overview[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1):10-15.)
- [6] KIM A A,KOVALCHUK B M, KUMPYAK E V, et al. Linear transformer driver with a 750-kA current and a 400-ns current risetime[J]. Russian Physics Journal, 1999,42(12):3-8.
- [7] WOODWORTH J R,ALEXANDER J A,GRUNER F R, et al. Low-inductance gas switches for linear transformer drivers[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2009,12(6):1-17.
- [8] KIM A A,KOVALCHUK B M,KUMPYAK E V, et al. 0.75 MA, 400 ns rise time LTD stage[C]// 12th IEEE International Pulsed Power Conference. Monterey,USA:IEEE, 1999:955-958.
- [9] LASSALLE F,LOYEN A,GEORGES A, et al. Status on the sphinx machine based on the on the 1- μ s LTD technology[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008,36(2):370-377.
- [10] MAZARAKIS M G,FOWLER W E,KIM A A, et al. High current, 0.5-MA, fast, 100-ns, linear transformer driver experiments[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2009,12(5):050401-1-050401-10.
- [11] KOVALCHUK B M,KHARLOV A V,ZHERLITSYN A A, et al. 40 GW linear transformer driver stage for pulse generators of mega-ampere range[J]. Laser and Particle Beams, 2009,27(3):371-378.
- [12] LI L,QI X,LI C, et al. Study on pre-fire phenomenon for multiplex high-energy spark gap switches with graphite electrodes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012,19(3):886-892.
- [13] SUN T,CONG P,LUO W. Improvement of self-breakdown characteristic of multi gap switch used for fast linear transformer driver[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016,28(7):075005-1-075005-6.
- [14] STYGAR W A,FOWLER W E,LECHIEN K R, et al. Shaping the output pulse of a linear-transformer-driver module[J]. Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams, 2009,12(3):030402-1-030402-11.
- [15] WOODWORTH J,ALEXANDER J,GRUNER F, et al. Low-inductance gas switches for linear transformer drivers[J]. Review of Modern Physics, 2008,13(8):060401-1-060401-9.

作者简介:



张昱钊(1994-), 男, 西安市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为脉冲功率.email: yuzhao106@163.com.

李晓昂(1989-), 男, 西安市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为脉冲功率技术。

裴哲浩(1995-), 男, 杭州市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为激光诱导长间隙放电。

马超群(1989-), 男, 哈尔滨市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为气固界面沿面放电。

刘琳(1990-), 女, 西安市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为 GIS 绝缘技术。

刘轩东(1981-), 男, 重庆市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为气体绝缘与放电等离子体、高功率脉冲源、气体开关及应用。

张乔根(1965-), 男, 江苏省泰州市人, 博士, 教授, 主要研究方向为气体绝缘与放电等离子技术、大功率脉冲技术及应用。