

文章编号: 2095-4980(2020)06-1151-06

## 陶瓷电容分压器幅度线性度研究

郭晓东, 朱宇洁, 魏竹, 王建忠

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 高功率电脉冲装置常使用电容分压器监测其电压值。电容分压器的幅度线性度表征了分压器在大电压与小电压下分压比的一致程度。线性度的好坏直接关系到监测的电压值的准确程度。本文对陶瓷电容分压器进行原理分析, 并通过仿真软件在脉宽为 200 ns 的矩形脉冲高压源(500 V~4 kV)与半高宽约为 10  $\mu$ s 的冲击高压源(10~100 kV)下分别对陶瓷电容分压器的性能进行仿真, 并设计加工。之后分别采用两种高压源对分压器进行实验研究, 研究显示, 陶瓷电容分压器的幅度线性度在 500 V~100 kV 之内为 1.5%, 线性度较好, 可以将小信号下校准的分压比用于大信号的测量中。

**关键词:** 陶瓷电容; 分压器; 自积分; 线性度

**中图分类号:** TN06

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019300

## Study on amplitude linearity of ceramic capacitance voltage divider

GUO Xiaodong, ZHU Yujie, WEI Zhu, WANG Jianzhong

(Metrology and Measurement Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** Capacitance voltage dividers are often utilized to monitor voltage values in high power electrical pulse devices. The amplitude linearity of the capacitive voltage divider characterizes the consistency of the voltage value monitored. In this paper, the principle of the ceramic capacitance divider is analyzed, and the performance of the ceramic capacitance divider is simulated by the simulation software under the rectangular pulse high-voltage source(500 V~4 kV) with a pulse width of 200 ns and the impulse high-voltage source(10 kV~100 kV) with a half-width of 10  $\mu$ s respectively, and the design and processing are carried out. The results show that the amplitude linearity of the ceramic capacitor voltage divider is 1.5% within the range of 500 V~100 kV, and the linearity is good. The voltage divider calibrated under small signals can be applied to the measurement of large signals.

**Keywords:** ceramic capacitor; voltage divider; self-integration; linearity

国内存在着许多高功率电脉冲发生装置, 如用于实验研究的强流脉冲装置阳加速器、快脉冲直线型变压器驱动源、高功率微波研究中加速器平台及 PTS 大型实验装置等。这些脉冲发生装置发出的波形大多为单次脉冲形式, 且其电压幅值在几十千伏到几兆伏之间。这些脉冲电压一般通过在相应传输线上安装电容分压器进行监测<sup>[1-3]</sup>。高功率电脉冲发生器产生的大电压信号加载到传输线上, 在传输线外导体上安置一个电容分压器, 由传输线本身内外导体形成结构高压臂电容, 而电容分压器自身存在电容为低压臂电容, 电容分压器按照一定关系分得一定电压, 最后使用示波器测得分在电容分压器的电压<sup>[4-10]</sup>。若已知电容分压器的分压比, 则可通过测得的电压乘以分压比, 最终求得高功率电脉冲发生器的输出电压值。因此电容分压器分压比是高功率电脉冲电压测量系统中非常关键的一个参数。

对陶瓷电容分压比的校准, 目前国内常采用小信号进行校准<sup>[11-13]</sup>, 或使用内置标准电阻分压器的方法进行校准<sup>[14-15]</sup>。采用小信号进行校准, 之后将校准结果外推于大信号。这样做有一前提条件是, 即认为在一定准确度下, 分压比与所加载信号大小无关或影响较小, 即线性度好, 小于其准确度, 因而可以忽略; 否则, 在大信号下也必须计量。因此问题的关键在于其是否线性, 需要加以研究证明。采用内置标准电阻分压器的方法进行校准, 由于电阻分压器体积较大, 对传输线内电容、特性阻抗影响非常大, 会引入较大的测量误差。

收稿日期: 2019-08-16; 修回日期: 2019-11-04

作者简介: 郭晓东(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁场与无线技术。email: podarguo@163.com

本文模拟大型高功率电脉冲发生装置建立一套小型高功率电脉冲发生装置，通过标准高压源直接馈电的方法(标准源法)对其中的陶瓷电容分压器分压比线性度进行研究。若分压器的幅度线性度较好，则可以通过小信号对分压比进行校准，然后应用到大电压的测量中，这样可以大大节约校准成本，且校准结果更为可信。

### 1 陶瓷电容分压器工作原理与设计

图 1 为高功率电脉冲电压测量系统框图，图 2 为高功率电脉冲电压测量系统的电路图，其中  $C_1$  为传输线内外导体结构电容， $C_2$  为电容分压器等效电容， $R$  为示波器端口电阻， $U_1(t)$  为脉冲高压， $U_2(t)$  为电容分压器电压。其回路方程为：

$$C_1 \frac{d(U_1(t) - U_2(t))}{dt} = C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} + \frac{U_2(t)}{R} \tag{1}$$

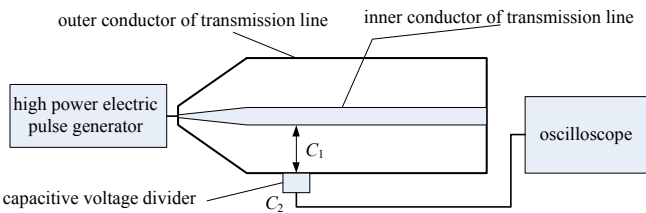


Fig.1 Block diagram of high power electric pulse voltage measurement system  
图 1 高功率电脉冲电压测量系统框图

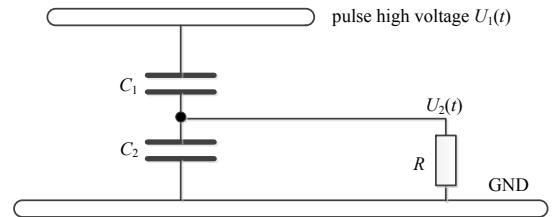


Fig.2 Schematic diagram of a high power electric pulse voltage measurement system  
图 2 高功率电脉冲电压测量系统示意图

陶瓷电容分压器为自积分形式的电容分压器，镶嵌在传输线的外导体上。陶瓷电容分压器的外导体与传输线外导体连接，内导体与外导体之间有一电容为  $C_2$  的电容。此时，电容分压器自身电容较大，其电容主要来自于电容分压器中电容，此时满足条件  $1/\omega C_2 \gg R$ ，则回路方程简化为：

$$U_2(t) = C_1 U_1(t) / (C_1 + C_2) \tag{2}$$

由上式可以看出，陶瓷电容分压器输出电压波形与原始信号相同。

图 3 为陶瓷电容分压器工作示意图，传输线结构电容表达式为：

$$C = 2\pi\epsilon' \ln \frac{b}{a} \tag{3}$$

式中： $C$  为传输线结构电容； $\epsilon'$  为传输线内介质介电常数； $b$  为传输线外导体内径； $a$  为传输线内导体外径。式(3)给出的是结构电容线密度，其值表示为绕圆筒一周的电容密度值。由于电容分压器结构并非绕圆筒一周，所以要求出传输线结构电容的面密度值。用线密度值除以圆的圆周  $2\pi R$ ，即可求出。

$$C_\rho = \frac{2\pi\epsilon'}{2\pi R \ln \frac{b}{a}} = \frac{\epsilon'}{R \ln \frac{b}{a}} \tag{4}$$

高压臂电容  $C_1$  通过结构电容面密度与电容分压器的顶部面积相乘得到：

$$C_1 = C_\rho S = \epsilon' S / R \ln \frac{b}{a} \tag{5}$$

式中  $S$  为电容分压器顶部面积。由于传输线外导体内径为 200 mm，内导体半径为 59 mm，传输线内介质为空气，相对介电常数为 1.000 53，探头直径为 36 mm， $C_1$  为 0.037 pF。低压臂电容  $C_2$  采用容值约为 890 pF 的陶瓷电容。

为了实现 500 V~100 kV 电压幅度下电容分压器幅度线性度，利用现有设备对同轴传输线进行馈电，包括电压幅度为 500 V~4 kV、脉冲宽度为 200 ns 的矩形脉冲高压源以及电压幅度为 10~100 kV、半高宽约为 10  $\mu$ s 的冲击高压源。利用 Pspice 仿真软件在两种高压源下对陶瓷电容分压器进行仿真，仿真电路见图 4 与图 5。

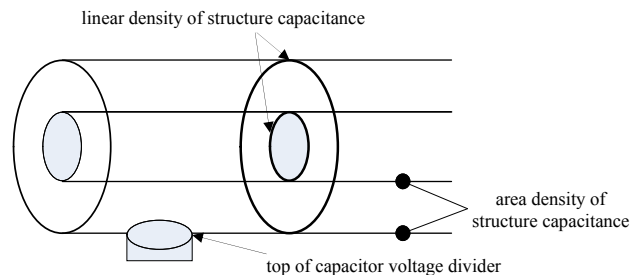


Fig.3 Schematic diagram of a ceramic capacitive divider placed in a coaxial transmission line  
图 3 陶瓷电容分压器放置于同轴传输线内示意图

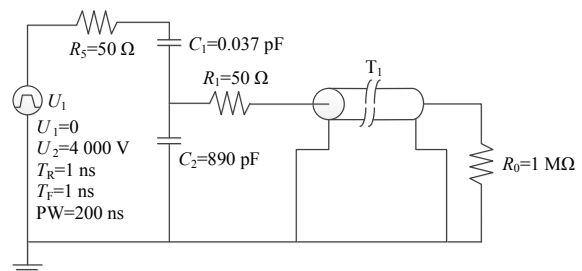


Fig.4 Simulation circuit diagram of ceramic capacitor voltage divider fed by rectangular pulse high voltage source  
图 4 矩形脉冲高压源馈电下陶瓷电容分压器仿真电路图

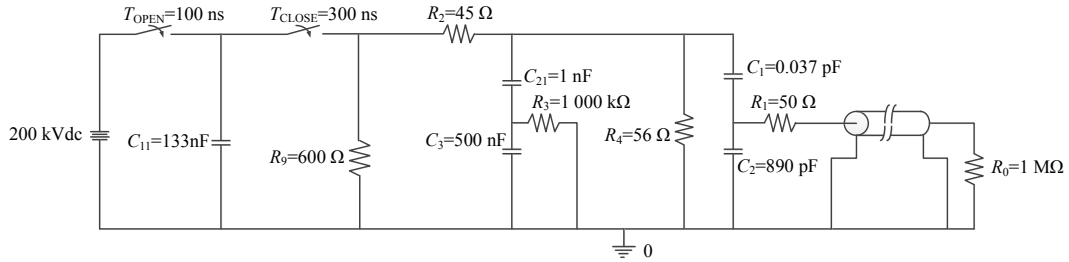


Fig.5 Simulation circuit of ceramic capacitor voltage divider fed by impulse high voltage source  
图 5 冲击高压源馈电下陶瓷电容分压器仿真电路图

图 6 为仿真结果，由图 6 可知，在两种不同高压源馈电下，分压器输出波形与输入波形吻合度很好。通过计算得出，矩形脉冲高压源馈电下的分压比为 23 575，冲击高压源馈电下的分压比为 23 580，两种波形下的分压比非常相近。可以看出，此陶瓷电容分压器可同时对 ns 级及  $\mu$ s 级的波形进行无失真测量。

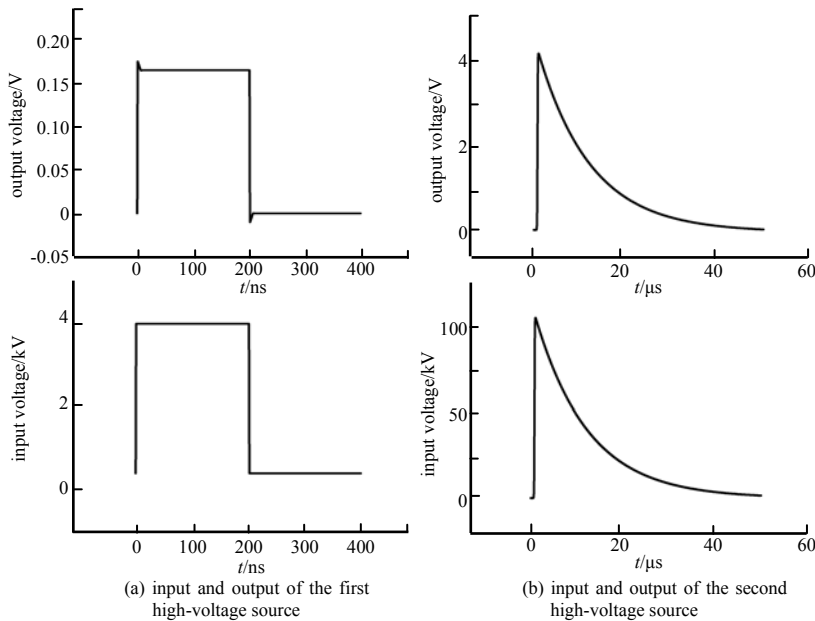


Fig.6 Simulation results of voltage divider ratio of ceramic capacitor divider under two kinds of high voltage sources  
图 6 两种高压源下陶瓷电容分压器分压比仿真结果

由以上分析及仿真可知，陶瓷电容分压器由低压臂电容  $C_2$ 、积分电阻  $R_1$  以及同轴输出端组成。其中低压臂电容  $C_2$  采用陶瓷电容设计，积分电阻  $R_1$  采用 50  $\Omega$  无感电阻，其机械结构与实物如图 7 所示。

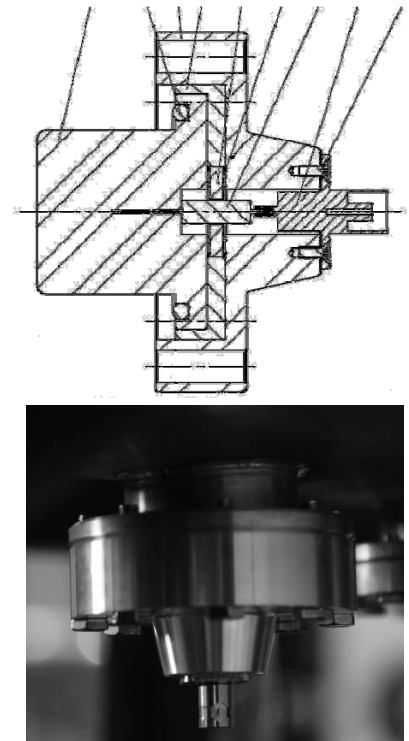


Fig.7 Mechanical structure of ceramic capacitor divider  
图 7 陶瓷电容分压器机械结构图

## 2 陶瓷电容分压器幅度线性度实验

电容分压器分压比通过标准源法对其校准。分压比测量系统的高压源由矩形脉冲高压源、标准衰减器、示波器(电压幅度为 500 V~4 kV)或冲击高压源、标准分压器、示波器(电压幅度为 10~100 kV)组合而成。通过标准衰减器/标准分压器及示波器可以准确得到矩形脉冲高压源与冲击高压源的输出幅度值，使分压比的测量更加准确。图 8 为矩形脉冲高压源馈电时的实验框图及现场图；图 9 为冲击高压源馈电时的实验框图及现场图。

调节矩形脉冲高压源脉冲宽度为 200 ns，输入电压从 0.5~4 kV，用示波器测量陶瓷电容分压器的输出电压。图 10 为矩形脉冲高压源馈电时的陶瓷电容分压器输出电压波形。通过图 10 可以看出，输出电压波形脉冲宽度在 200 ns 附近，基本还原了矩形脉冲高压源波形，说明陶瓷电容分压器在百 ns 级可以完全还原波形。表 1 为标准脉冲发生器输入不同幅度时，陶瓷电容分压器输出电压值。

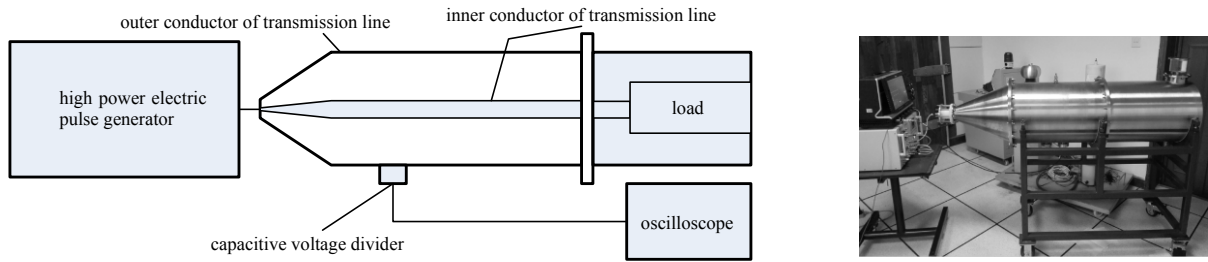


Fig.8 Experimental block diagram and field diagram of rectangular pulse high voltage source feeding  
图 8 矩形脉冲高压源馈电时的实验框图及现场图

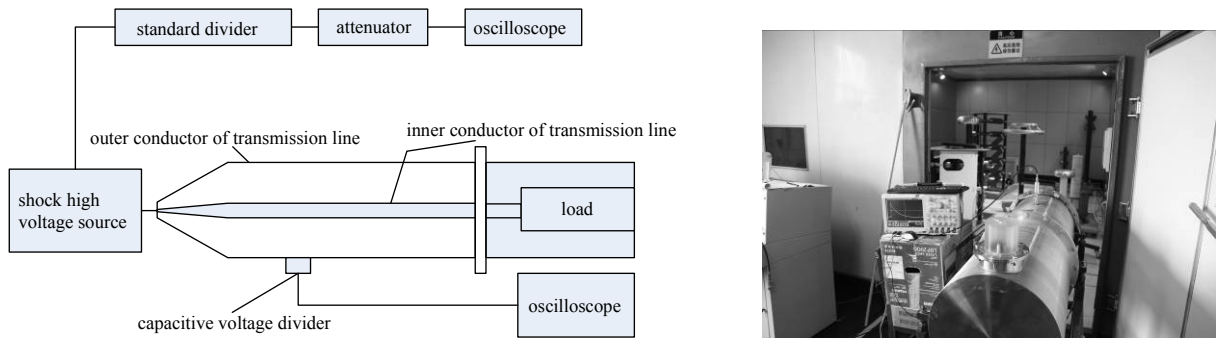


Fig.9 Experimental block diagram and field diagram of impulse high voltage source feeding  
图 9 冲击高压源馈电时的实验框图及现场图

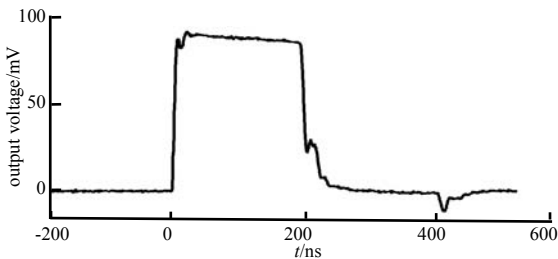


Fig.10 Output waveform of ceramic capacitor divider  
图 10 陶瓷电容分压器输出波形

表 1 陶瓷电容分压器输出值及分压比(500 V~4 kV)

Table1 Output value and voltage ratio of ceramic capacitance voltage divider

amplitude of rectangular pulse high voltage source/kV	output amplitude of ceramic capacitor voltage divider/mV	partial voltage ratio of ceramic capacitor voltage divider
0.5	22.7	22 026
1.0	45.9	21 786
1.5	69.0	21 739
2.0	91.8	21 786
2.5	114.7	21 796
3.0	138.6	21 645
3.5	160.7	21 780
4.0	183.8	21 763

调节冲击高压源输入电压从 10 kV 至 100 kV，用示波器测量陶瓷电容分压器的输出电压。图 11 为冲击高压源馈电时的陶瓷电容分压器输出电压波形。通过图 11 可以看出，输出电压波形与冲击高压发生器发出波形一致，说明陶瓷电容分压器在  $\mu\text{s}$  量级可以完全还原波形。已知标准分压器的分压比为 20:1 及衰减器的衰减幅度为 100:1，可以得出冲击高压源输入不同幅度时陶瓷电容分压器输出电压值，如表 2 所示。将标准分压器的输出幅度与标准分压器的分压比以及衰减器的衰减量相乘，即可得到冲击高压源的输出幅度。陶瓷电容分压器的输出幅度由其直接分压得到，其分压比可由冲击高压发生器的输出幅度除以陶瓷电容分压器的输出幅度求得。

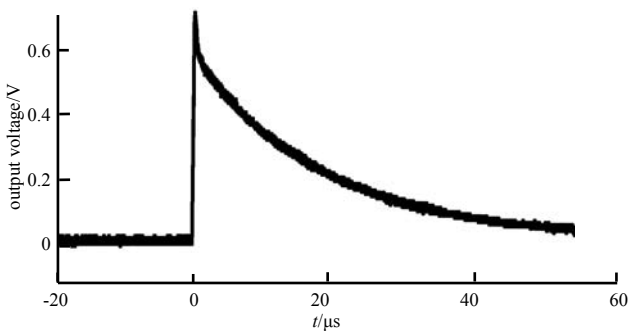


Fig.11 Output waveform of ceramic capacitor voltage divider  
图 11 陶瓷电容分压器输出波形

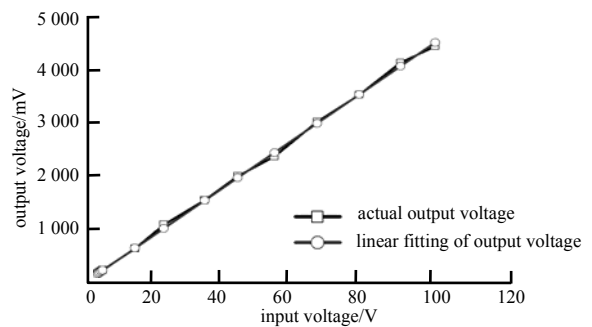


Fig.12 Linear fitting between actual curve and output voltage  
图 12 实际曲线与输出电压的线性拟合曲线

传感器校准曲线与拟合直线间的最大偏差  $\Delta_{y,\max}$  与满量程输出  $y$  的百分比，称为线性度。图 12 为实际输出电压曲线与输出电压的线性拟合曲线。其中过零点拟合曲线方程为： $y=4.47\times 10^{-5}x$ 。通过计算得到曲线的最大偏差  $\Delta_{y,\max}$  为 0.07 V，线性度为 1.5%。

陶瓷电容分压器分压比较准结果不确定度主要来源于：a) 示波器测量电容分压器时，输出电压引入的不确定度  $u_1$ ；b) 示波器测量经标准衰减器后的电压引入的不确定度  $u_2$ ；c) 标准衰减器衰减不准引入的不确定度  $u_3$ ；d) 标准分压器分压比不准引入的不确定度  $u_4$ ；e) 测量重复性引入的不确定度  $u_5$ 。通过综合评定，得出校准结果扩展不确定度为  $U=3.8\%(k=2)$ 。

表 2 陶瓷电容分压器输出值及分压比(10~100 kV)  
Table 2 Output value and voltage divider ratio of ceramic capacitor divider(10~100 kV)

output amplitude of standard voltage divider/V	amplitude of impulse high voltage generator/V	output amplitude of ceramic capacitor voltage divider/V	partial voltage ratio of ceramic capacitor voltage divider
0.675	13 568	0.598	22 689
1.100	22 110	1.060	20 858
1.700	34 170	1.530	22 333
2.190	44 019	2.000	22 010
2.730	54 873	2.380	23 056
3.360	67 536	3.050	22 143
3.980	79 998	3.570	22 408
4.590	92 259	4.190	22 019
5.100	102 510	4.510	22 729

### 3 结论

本文通过对陶瓷电容分压器原理进行分析，在矩形脉冲高压源(500 V~4 kV)与冲击高压源(10~100 kV)馈电情况下，对分压器的性能进行仿真，并对其机械结构进行设计加工。搭建陶瓷电容分压器幅度线性度实验系统，利用矩形脉冲高压源与冲击高压源进行馈电，在 500 V~100 kV 电压幅度内，得出陶瓷电容分压器不同幅度线性度为 1.5%，分压比较准结果不确定度最大为 3.8%，陶瓷电容分压器线性度小于不确定度的一半，说明其幅度线性度较好，对高压测量影响可以忽略。通过此次研究，今后在使用陶瓷电容分压器时，可以在小信号下对分压器的分压比进行校准，可将此分压比应用到 100 kV 以内的大信号的测量中，大大节约了校准成本。

### 参考文献：

- [1] 张钊,谈效华. 高功率脉冲变压器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(5):626-634. (ZHANG Zhao,TAN Xiaohua. Design of high power pulse transformer[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(5):626-634.)
- [2] 乐小云,张高龙,喻晓,等. 强流脉冲粒子束加速器及其应用[C]// 第三届全国核技术与应用学术研讨会. 广西南宁:中国核物理学会, 2012:24. (LE Xiaoyun,ZHANG Gaolong,YU Xiao,et al. High current pulsed particle beam accelerator and its application[C]// Information Collection of the Third National Symposium on Nuclear Technology and Applications. Nanning,Guangxi,China:Chinese Society of Nuclear Physics, 2012:24.)
- [3] 陈林,王勣,邹文康,等. 中物院快脉冲直线型变压器驱动源技术研究进展[J]. 高电压技术, 2015,41(6):1798-1806. (CHEN Lin,WANG Meng,ZOU Wenkang,et al. Recent advances in fast linear transformer driver in CAEP[J]. High Voltage Engineering, 2015,41(6):1798-1806.)
- [4] 夏明鹤,计策,王玉娟,等. PTS 装置脉冲输出开关[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(10):2516-2520. (XIA Minghe,JI Ce,WANG Yujuan,et al. Pulse output switch of primary test stand[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(10):2516-2520.)
- [5] 张思群,李晶,王昆仑,等. 应用于 PTS 装置的多通道 X 射线二极管阵列谱仪[J]. 强激光与粒子束, 2016,28(8):149-154. (ZHANG Siqun,LI Jing,WANG Kunlun,et al. Multi-channel filtered X-ray diode array used on PTS facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016,28(8):149-154.)
- [6] 夏明鹤,计策,王玉娟,等. PTS 装置工作模式及波形调节[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(11):2768-2772. (XIA Minghe,JI Ce,WANG Yujuan,et al. Operation models and waveform shaping of primary test stand[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(11):2768-2772.)
- [7] STYGAR W A,CORCORAN P A,IVES H C,et al. 55-TW magnetically insulated transmission-line system:design, simulation, and performance[J]. Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams, 2009(12):120401.

- [8] WAGONER T C, STYAR W A, IVES H C, et al. Differential-output B-dot and D-dot monitors for current and voltage measurements on a 20-MA, 3-MV pulsed-power accelerator[J]. *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*, 2008, 11(10):100401-1-18.
- [9] WEBER B V, ALLEN R J, COMMISSO R J, et al. 6-MV vacuum voltmeter development[C]// 17th IEEE International Pulsed Power Conference. Washington DC, USA: IEEE, 2009:1339-1344.
- [10] 潘洋, 严萍, 袁伟群. 纳秒脉冲电容分压器测量系统分析及波形重建[J]. *高电压技术*, 2005, 31(2):53-55. (PAN Yang, YAN Ping, YUAN Weiqun. Analysis and waveform reconstruction of nanosecond pulse voltage divider measurement system[J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(2):53-55.)
- [11] 刘金亮, 怀武龙, 霍哲, 等. 一种测量脉冲高电压的电容分压器[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(2):122-124. (LIU Jinliang, HUAI Wulong, HUO Zhe, et al. A compact capacitive divider for measuring pulse high voltage[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(2):122-124.)
- [12] 欧阳佳, 刘金亮, 田亮, 等. 纳秒级不同脉宽的信号对电容分压器的影响[J]. *高电压技术*, 2004, 30(12):42-44. (OUYANG Jia, LIU Jinliang, TIAN Liang, et al. Influence of different input signals with nanosecond pulse width on capacitive voltage divider[J]. *High Voltage Engineering*, 2004, 30(12):42-44.)
- [13] 呼义翔, 郭宁, 韩娟娟. 磁绝缘传输线电压测量用自积分式电容分压器研制[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(7):1839. (HU Yixiang, GUO Ning, HAN Juanjuan. Self-integral capacitance divider used for voltage measurement along magnetically insulated transmission lines[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7):1839.)
- [14] 卫兵, 傅贞, 王玉娟, 等. 脉冲功率装置中电容分压器的设计和应用[J]. *高电压技术*, 2007, 33(12):39-43. (WEI Bing, FU Zhen, WANG Yujuan, et al. Design and performance of capacitive divider for high-voltage pulse measurement[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(12):39-43.)
- [15] 魏竹, 王建忠, 郭晓东, 等. D-dot 电容分压器线性度测试方法[J]. *中国测试*, 2016, 42(11):31-34. (WEI Zhu, WANG Jianzhong, GUO Xiaodong, et al. Linearity test method for D-dot capacitive voltage divider[J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(11):31-34.)

### 2019~2020 年《太赫兹科学与电子信息学报》优秀编委

艾 渤	北京交通大学	刘长军	四川大学
张怀武	电子科技大学	黄清华	中国工程物理研究院
曹俊诚	中科院微系统所	黎 明	中国工程物理研究院

### 2019~2020 年《太赫兹科学与电子信息学报》优秀审稿人

陈志敏	南京理工大学	粘永健	第三军医大学
张 恒	安徽农业大学	王正勇	四川大学
赵海军	西华师范大学	石 荣	中国电子科技集团公司第二十九研究所

### 2019~2020 年《太赫兹科学与电子信息学报》优秀论文及作者

《基于太赫兹技术的太阳能电池寿命预测算法》	周 兴	北京信息科技大学
《具有谐波抑制功能的双极化缝隙天线》	杨 阳	四川大学
《YIG 陶瓷太赫兹介电谱的光调制特性研究》	汪川惠	湖北第二师范学院
《机载预警雷达网络化协同探测模式及能力评估研究》	陈小龙	海军航空大学
《一种基于恒虚警检测和密度聚类的 ISAR 图像预处理方法》	金元华	北京无线电测量研究所
《一种用于 MEMS 超低值封装残余应力的测量方法》	刘 猛	中国工程物理研究院电子工程研究所