

文章编号: 1001-4322(2005)04-0603-06

# 高压重复频率纳秒脉冲下电信号的测量与诊断\*

邵 涛<sup>1,2</sup>, 潘 洋<sup>1,2</sup>, 王 珏<sup>1</sup>, 袁伟群<sup>1</sup>, 孙广生<sup>1</sup>,  
严 萍<sup>1</sup>, 张适昌<sup>1</sup>, 苏建仓<sup>3</sup>, 俞建国<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;  
3. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘 要:** 为了更准确地获得重复频率纳秒脉冲下气体击穿试验参数, 分析了击穿电压、放电电流的测量及影响测量结果的因素等, 并介绍重复频率下气体间隙击穿的耐受时间测量方法。信号测量传感器的响应带宽、间歇性存在的电磁干扰、气体间隙被击穿时瞬态高频振荡及地电位暂态升高等因素会干扰被测信号, 甚至会导致被测信号局部干扰严重。采用软阈值小波降噪法可有效减小干扰。在测得分流器方波响应的基础上, 采用 Wiener 滤波器反卷积补偿分流器输出信号的方法来校验分流器输出, 结果表明分流器输出波形满足试验要求。

**关键词:** 纳秒脉冲信号; 测量; 重复频率耐受时间; 降噪; 校验

**中图分类号:** TM835.4; TM836 **文献标识码:** A

高压纳秒级脉冲下电压、电流等信号的测量一直是脉冲功率领域一个研究重点。被测脉冲信号上升沿通常约 10 ns, 有时低达 ps 级, 要求测量系统的响应须满足一定要求<sup>[1]</sup>。被测信号的幅值可高达 MV, MA, 要求对信号要多级测量或衰减。强烈快速的瞬态电磁脉冲, 将在低压测量系统产生干扰噪声。因此, 在测量时不仅需要设计合理的测量方法、手段, 还需要根据不同的情况对信号进行再处理及校验。

在进行重复频率纳秒级脉冲下气体介质放电试验时, 分析气体介质绝缘特性的关键是: 如何精确有效的测量间隙击穿时的电参量, 主要包括施加电压及放电电流信号。本文将介绍重复频率气体放电试验中施加电压、放电电流的测量, 及利用两台 TDS 示波器实现测量施加重复频率脉冲后, 气体间隙击穿所需的时间(重复频率耐受时间), 以及对测量信号进行的信号处理、补偿及校验。

## 1 纳秒脉冲信号测量

图 1 是进行重复频率纳秒脉冲气体击穿试验接线及信号测量的示意图。试验用重复频率脉冲源为基于半导体断路开关的 SPG200<sup>[2]</sup>, 其输出电压由与试验腔回路并联的循环盐水浓度控制, 同时为防止放电回路过流, 在试验腔回路串联一定阻值的限流电阻。整个测量电缆均采用双层屏蔽电缆, 示波器、触发脉冲发生器、信号处理计算机等均放置在屏蔽室内。影响纳秒脉冲信号测量的主要因素包括分压器/分流器的响应, 高频电缆的响应, 示波器的带宽等。使用的示波器 TDS684A 带宽 1 GHz, 采样率 5 GS/s, TDS3054B 带宽 500 MHz, 采样率 5 GS/s, 由文献<sup>[3]</sup>可知, 到满足上述示波器测量精度的脉冲信号上升沿约 350 ps, 试验脉冲源输出脉冲的上升沿约 10 ns, 所以示波器带宽满足测量要求。

### 1.1 电压测量

电压信号通常采用电阻分压器或电容分压器测量。本试验中采用的是具有响应时间快、结构紧凑、制作方便、对被测量系统影响小等特点的耦合式电容分压器<sup>[1,4]</sup>, 其分压比标定值约 4 780。设计良好的电容分压器测量带宽可以达到 6 GHz<sup>[5]</sup>, 一般可以满足纳秒级脉冲信号上升沿的测量要求, 但须尽量避免杂散电感等影响。试验中发现当放电电流达到一定值时, 电压波形上叠加了一定的持续高频振荡, 如图 2(a) 所示。尤其当气体间隙击穿发生在电压上升沿或峰值附近时, 叠加在电压波形上的振荡使得不方便读取击穿电压相关参数。因此须对电压信号进行降噪, 消除干扰因素。

\* 收稿日期: 2004-10-09; 修订日期: 2004-12-27

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 国家自然科学基金资助课题(50207011)

作者简介: 邵 涛(1977—), 男, 博士生, 从事脉冲功率、高电压技术方面的研究; 北京 2703 信箱; E-mail: st@mail. iee. ac. cn.

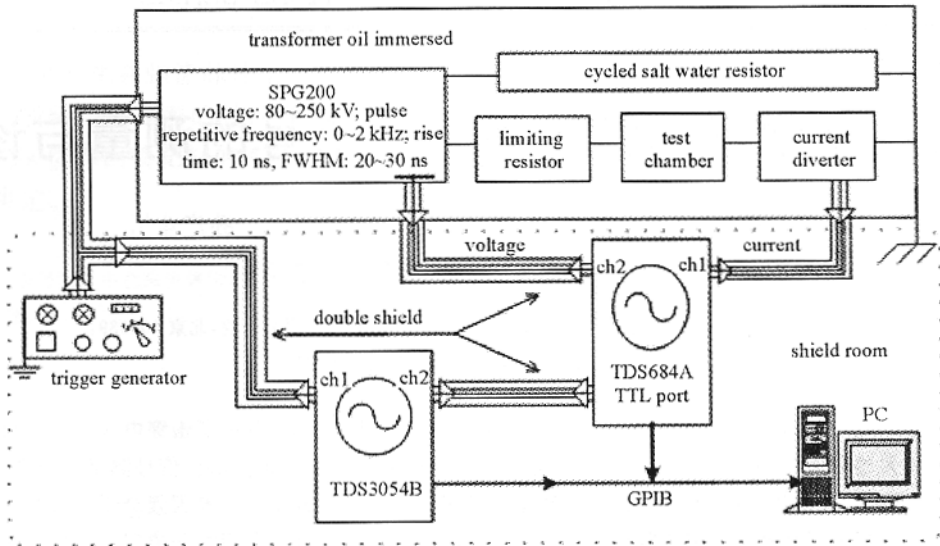


Fig. 1 Experimental arrangement  
 图 1 试验装置及信号测量示意图

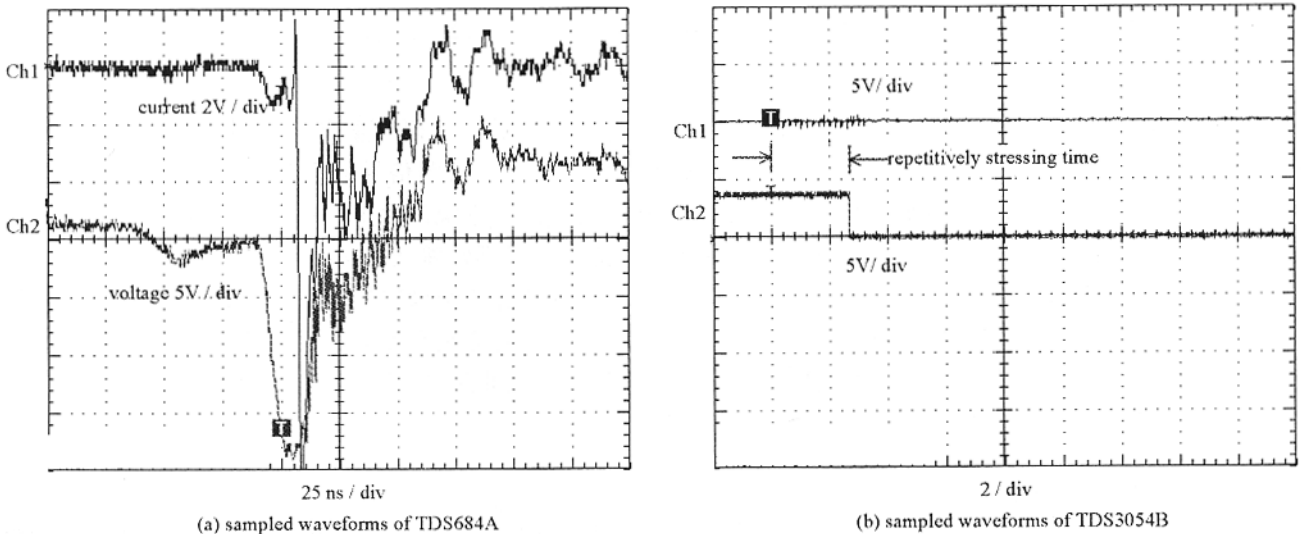


Fig. 2 Sketch of applied voltage, current and repetitively stressing time (parallel-plate gap: 5 mm, 100 Hz, 0.3 MPa)

图 2 电压、电流波形及耐受时间示意图(平板间隙 5 mm, 频率 100 Hz, 0.3 MPa)

### 1.2 电流测量

纳秒级脉冲大电流的测量可采用小电阻分流器或自积分罗氏线圈<sup>[6]</sup>。采用分流器监测击穿时放电电流波形对于判断击穿时延较方便,本试验中根据分流器上测量电阻的电压计算得到电流信号。分流器采用同轴管式结构,测量电阻为特制高频响应良好的超高频氧化膜电阻。分流器信号经 20 dB 衰减后送入 TDS684A 的 ch1 通道,波形如图 2(a)所示。试验中电流信号的测量是关键,因为重复频率条件下间隙击穿时电压及耐受时间的测量均是依靠分流器检测到放电电流信号时同步触发 TDS684A 记录电压信号,以及给 TDS3054B 提供时间终止记录信号。电阻分流器测量几十 ns 脉冲以下的信号时,测量电阻高频响应可能不够,杂散电容、电感等因素导致电流信号可信度下降,因此需要对电流信号采取一定的补偿与校验,保证测量信号的可信度。

### 1.3 重复频率耐受时间测量

重复频率脉冲条件下气体间隙的击穿与单次脉冲下的击穿不同,其击穿需要考虑到重复频率脉冲序列的“累积效应”<sup>[7]</sup>。从施加脉冲电压开始到间隙击穿所需时间即是重复频率耐受时间,其对分析空间电荷、受激粒子等在气体击穿过程的作用是重要的。重复频率耐受时间采用 TDS684A 和 TDS3054B 联合测量,如图 1 所示。在控制 SPG200 输出频率的触发脉冲发生器发出触发脉冲给 SPG200 时,其同步提供触发脉冲给 TDS3054B,该信号作为重复频率耐受时间记录的起始点。当 SPG200 发出一序列高压纳秒脉冲后,试验腔中气体间隙击穿,分流器记录下放电电流,该电流触发 TDS684A,同步记录下击穿电压及放电电流波形如图 2

(a)所示。放电电流触发 TDS684A 的同时,后者的一个“TTL”端口会同步输出一个低电平脉冲信号,通过约 1 m 的信号电缆传入 TDS3054B 的 ch2 通道,作为重复频率耐受时间记录的终止点。如图 2(b)所示,由 ch2 通道上电平从记录的“T”点开始到电平翻转到低电平为止的时间即所求时间。由测量系统来看,从触发脉冲发生器开始工作开始到间隙击穿,电信号在电缆上传输有一定的延时,这种延时可能达到几十 ns,试验中施加脉冲的最高频率是 1 kHz,记录时间是 ms 级,故信号在电缆上的延时可以忽略不计。

## 2 脉冲信号的降噪处理

对测得的脉冲电压、电流信号分析可知,ns 级重复频率脉冲下存在电磁干扰等多种因素影响被测信号。电磁干扰主要有连续存在的背景白噪声、施加重复频率序列脉冲时存在的间歇性干扰噪声及间隙被击穿时瞬态产生的持续高频振荡噪声。试验中有时很难绝对地将试验系统接地和测量系统接地分开,这种局限决定接地系统地电位暂态升高可能会对被测信号产生干扰。因此需要对被测信号根据以上几种情况进行必要的降噪及补偿,以期达到准确地根据测量信号得到间隙绝缘特征的各种参量,减小不必要的误差。

传统的信号降噪处理办法主要是傅氏变换或拉氏变换,这些变换方法不具有时-频分辨能力,有一定的局限性。小波变换处理是近 20 年来迅速发展起来的一种具有多分辨率的时-频分析<sup>[8]</sup>。小波变换可以实现在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,很适合检测出在正常信号中叠加的瞬态反常信号,结合重复频率纳秒脉冲下的电压、电流信号被噪声干扰的特点,采用小波变换降噪是比较合适的一种信号处理办法<sup>[9]</sup>。

根据小波分解与重构算法,对信号进行降噪处理,可以分为以下三步<sup>[10]</sup>。

(1)选择合适的母小波和分解层数,对被测信号进行分解。可以取母小波  $\Psi(t)$  及其尺度函数  $\varphi(t)$ ,得到镜像滤波器组为

$$h_l = \int_R \varphi(t) \varphi_{l,l}^*(t) dt, \quad g_l = \int_R \Psi(t) \varphi_{l,l}^*(t) dt \quad (1)$$

对含噪声的离散信号  $f_k = c_{0,k}$  进行小波分解到  $j$  层,得到尺度系数和小波系数分别为

$$c_{j,k} = \sum_n c_{j-1,n} h_{n-2k}, \quad d_{j,k} = \sum_n d_{j-1,n} g_{n-2k} \quad (2)$$

小波系数的分解过程如图 3(a)所示, $H, G$  为高低通分解算子<sup>[11]</sup>。

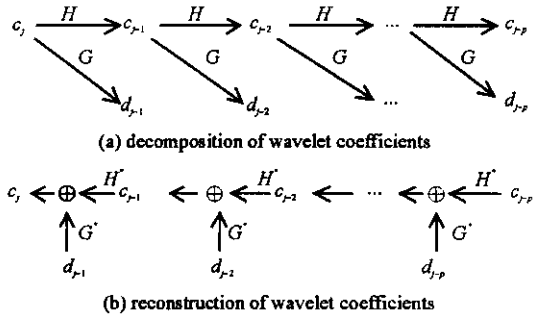


Fig. 3 Sketch of wavelet decomposition and reconstruction  
图 3 小波系数分解及重构示意图<sup>[11]</sup>

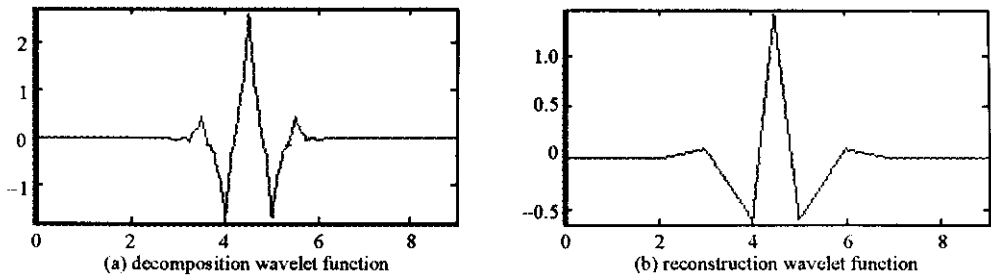


Fig. 4 Decomposition and reconstruction function waveforms of Bior2.4 wavelet

图 4 Bior2.4 母小波分解及重构波形

(2)对分解的小波系数阈值化处理。对每一层的高频系数( $d_{j-1}, d_{j-2}, \dots$ )适当置零或取合适的阈值对小波系数量化处理。选取阈值和阈值的量化处理方法直接关系到信号消噪的效果。通常阈值处理办法有强制消噪(即将高频系数全部置零)、默认阈值消噪、软/硬阈值消噪处理等<sup>[10]</sup>。

(3)小波重构。根据小波分解的低频系数和阈值量化处理后的高频系数,进行一维信号的小波重构,如图 3(b)所示, $H^*, G^*$  为  $H, G$  的共轭算子。

根据各种母小波特点,选取 Bior2.4 母小波,其具有线性相位性,主要应用在信号和图像处理中。Bior2.4 母小波使用一个小波函数分解,另一个小波函数重构,如图 4 所示<sup>[10]</sup>。对试验中由 TDS684A 采集到的离散信号,基于 MATLAB6.0 软件,对信号进行 5 层小波分解,采用软阈值降噪处理,对每层小波系数分 5 段,根据噪声特点,分别取不同的阈值量化降噪后重构电压、电流信号。图 5 是根据上述方法对图 2(a)中的电压、电流信

号降噪前后波形比较,显示软阈值小波降噪可以有效地减小被测信号上叠加的干扰。

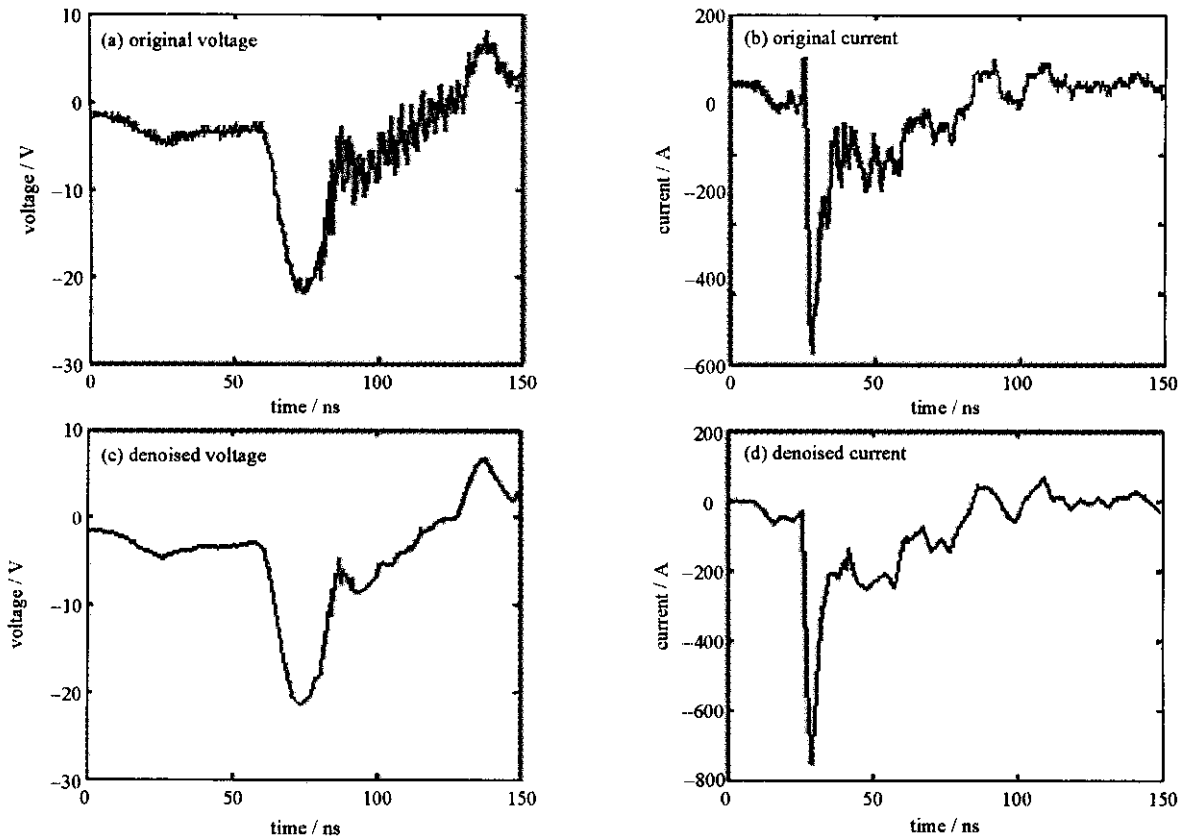


Fig. 5 Comparison of original and denoised voltage, current

图 5 小波降噪前后的电压电流波形比较

### 3 脉冲电流信号的校验

采用电阻分流器测量电流可能导致对快脉冲电流信号的上升沿响应不够,需要采取一定措施对被测信号进行补偿及校验,保证测量可信度。信号的校验即将测量信号和补偿后的信号对比判断测量的可信度。对信号的补偿除了可以在测量回路上进行一些处理外,从软件上也可以方便的实现信号补偿。可以先测得系统在宽带范围内的频谱和相位响应,得到系统的传递函数,再用傅立叶逆变换的方法实现重构<sup>[3]</sup>;或者采用先求得系统的冲击响应,再用反卷积来重构信号。本文通过测量分流器对已知的标准方波响应来实现对电流信号的补偿。

设分流器系统是线性时不变系统,标准方波为  $x(t)$ ,分流器响应为  $y(t)$ ,其传递函数为  $h(t)$ ,满足卷积:  $y(t) = h(t) * x(t)$  ( $*$  表示时域卷积乘),对应频域内:  $Y(j\omega) = H(j\omega)X(j\omega)$ ,  $Y(j\omega)$ ,  $H(j\omega)$ ,  $X(j\omega)$  是  $y(t)$ ,  $h(t)$ ,  $x(t)$  的傅里叶变换。采用 Wiener 滤波器对进行反卷积,传递函数  $H(j\omega)$  可用公式(3)估计<sup>[4,12]</sup>。通过分流器的被测信号和测得的信号  $V_i, V_o$  满足  $V_o(j\omega) = H(j\omega)V_i(j\omega)$ ,与公式(3)类似,得到被测信号的  $V_i$  如公式(4)所示。其中  $\lambda, \beta$  是正常数,即信号噪声比的倒数<sup>[12]</sup>,  $H^*(j\omega)$  是  $H(j\omega)$  的共轭。

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)X^*(j\omega)}{|X(j\omega)|^2 + \lambda} \quad (3)$$

$$V_i(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)H^*(j\omega)}{|H(j\omega)|^2 + \beta} \quad (4)$$

采用 SMP—2020A 型的标准脉冲方波发生器输出标准方波及分流器响应测试如图 6 所示。由上升沿约 1.2 ns、脉宽 50 ns、幅值 200 V 的方波对 50  $\Omega$  宽带匹配电阻的响应作为参考脉冲,同步在另一条支路中,脉冲源与宽带匹配电阻回路中串入分流器测得分流器响应,信号由 Agilent—54832B 型示波器采集(带宽 1 GHz,采样率 4 GS/s)。根据式(3)计算得到传递函数后,对图 5 中降噪后电流信号用式(4)进行补偿,补偿前后及未降噪的原始电流波形比较如图 7 所示。补偿后波形消除了电流起始处的反冲,波形整体更光滑,上升沿保持较

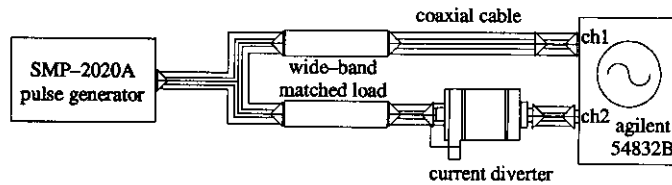


Fig. 6 Calibration setup of current diverter

图 6 分流器的校验示意图

好, 电流幅值适当增大; 小波降噪方法保持了原始信号的幅值, 也消除了波尾的振荡。补偿校验结果表明分流器对本试验中的击穿电流测量实际是可以接受的, 采取小波降噪及反卷积补偿后的信号更利于提取绝缘特征参数。

#### 4 结 论

结合在进行重复频率纳秒脉冲试验过程中电压、电流信号测量及后期处理的需要, 对测量方法、影响因素进行分析, 并对信号进行了处理及校验, 得到如下的结论: 采用电容分压器、小电阻分流器测量击穿电压、放电电流, 并利用两台 TDS 示波器实现了气体绝缘间隙在重复频率纳秒脉冲下的耐受时间的测量; 电压、电流信号受重复频率间歇性电磁脉冲及间隙被击穿时瞬态产生的持续高频振荡噪声、地电位暂态升高等因素的干扰。采用软阈值小波降噪法可以有效地减小信号干扰; 在求得标准方波响应的基础上采用 Wiener 滤波器进行反卷积运算实现对被测信号的补偿。校验结果发现分流器测量结果可以接受, 降噪和补偿后的波形更方便使用。

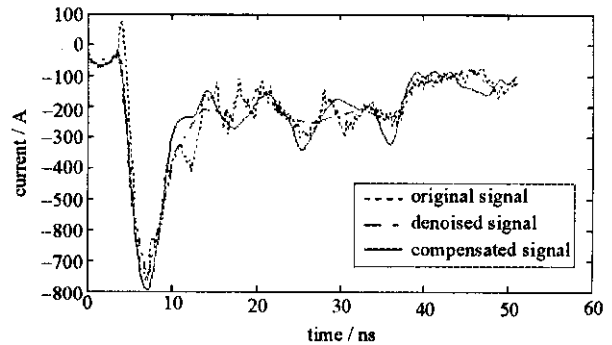


Fig. 7 Waveforms before and after compensation through deconvolution

图 7 反卷积补偿前后电流波形比较

致 谢: 感谢西北核技术研究所六室在重复频率纳秒脉冲气体放电试验中给予的大力帮助。

#### 参考文献:

- [1] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 2003. 147—181. (Zeng Z Z. Introduction to applied pulsed power technology. Shaanxi: Shaanxi Science Press, 2003. 147—181)
- [2] Su J C, Liu G Z, Ding Y Z, et al. Nanosecond sos-based pulsed generator SPG200[A]. Proceedings of the Third International Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications[C]. Mianyang, 2002. 258—261.
- [3] Mankowski J, Dickens J, Kristiansen M. High voltage subnanosecond breakdown[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1998, **26**(3): 874—881.
- [4] 韩英杰, 孙广生, 严萍, 等. 纳秒脉冲电压的波形重建[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(4): 514—516. (Han Y J, Sun G S, Yan P, et al. Waveform reconstruction of nanosecond pulse voltage. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(4): 514—516)
- [5] Pate R, Riley D, Patterson P, et al. System analysis, modeling, simulation, and signal processing aspects of coordinated experimental and modeling investigations of high-speed gas discharge switch breakdown behavior[A]. Proceedings of 2001 IEEE Pulsed Power & Plasma Science Conference[C]. USA, 2001. 466 — 470.
- [6] 王珏, 张适昌, 严萍, 等. 用自积分式罗氏线圈测量纳秒级高压脉冲电流[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(3): 399—403. (Wang J, Zhang S C, Yan P, et al. Self-integrating rogowski coil for nanosecond current measurement. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(3): 399—403)
- [7] Shao T, Sun G S, Yan P, et al. Repetitively nanosecond-pulse breakdown of air at an atmospheric pressure[A]. 2004 Annual Report of IEEE International Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena[C]. Boulder, Colorado, USA, 2004. 599—602.
- [8] 曾正中, 邱毓昌, 邱爱慈. 小波分析在脉冲功率技术中的应用初探[J]. 电工电能新技术, 1998, **17**(3): 47—51. (Zeng Z Z, Qiu Y C, Qiu A C. Application of wavelet analysis to pulsed power technology. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 1998, **17**(3): 47—51)
- [9] Angrisani L, Daponte P, Custodio D, et al. Advanced processing techniques of high-voltage impulse test signals[J]. *IEEE Trans Instrumentation and Measurement*, 1998, **47**(2): 439—444.
- [10] 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M]. 陕西: 西安电子科技大学出版社, 2000. (Hu C H, Zhang

J B, Xia J, et al. System analysis and design based on MATLAB: wavelet analysis. Shaanxi: Xidian University Press, 2000)

- [11] 冉启文. 小波变换与分数傅里叶变换理论及应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002. 102—108. (Ran Q W. Application and theory of wavelet-transform and fractional Fourier-transform. Harbin: Harbin Institute of Technology Press,2002. 102—108)
- [12] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京:国防工业出版社,2001. 91—96. (Zou M Y. Deconvolution and signal recovery. Beijing: National Defence Industry Press, 2001. 91—96)

## Measurement and diagnostics of electrical signals under high voltage repetitive nanosecond-pulses

SHAO Tao<sup>1, 2</sup>, PAN Yang<sup>1, 2</sup>, WANG Jue<sup>1</sup>, YUAN Wei-qun<sup>1</sup>, SUN Guang-sheng<sup>1</sup>,  
YAN Ping<sup>1</sup>, ZHANG Shi-chang<sup>1</sup>, SU Jian-cang<sup>3</sup>, YU Jian-guo<sup>3</sup>

1. *Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 2703, Beijing 100080, China;*
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69, Xi'an 710024, China)*

**Abstract:** In order to obtain experimental parameters of gas breakdown under repetitive nanosecond-pulses, this paper introduces measurement and influencing factors of incident voltage and discharge current, and describes repetitively stressing time which is peculiar to repetitively nanosecond-pulse breakdown. The response bandwidth of measurement component, intermittent electromagnetic interference, and transient high-frequency oscillation when insulating gas gap is brokendown can affect the measured results of electrical signals, especially lead to a short-duration disturbance on the measured signals. The wavelet soft-threshold denoising method can reduce the interference effectively. Based on the response measurement of current diverter, the deconvolution using Wiener filtering theory can compensate and calibrate measured current signals. The calibration shows that the output of current diverter satisfies the experimental requirement.

**Key words:** Nanosecond-pulse signals; Measurement; Repetitively stressing time; Denoising; Calibration