



·高功率微波技术·

基于 D-dot 传感器的弓网离线放电瞬态 电场时域测试方法*

李智宇¹, 李昊^{2,3}, 曹鹤飞¹, 金梦哲³, 胡曼³

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070; 2. 石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 石家庄 050043;
3. 石家庄铁道大学 河北省电磁环境效应与信息处理重点实验室, 石家庄 050043)

摘要: 弓网离线放电电磁辐射具有瞬态、宽频带的特性, 可使用 D-dot 传感器对其进行时域瞬态电场测量, 但在对传感器所测微分信号积分还原时, 存在信号恢复失真问题严重。搭建了包含脉冲电场发生装置和测量装置的瞬态电场时域波形还原系统, 开展了基于 D-dot 传感器的去直流、数值积分、消除趋势项以及系统辨识低频补偿在内的瞬态电场时域波形测试方法的研究, 利用该方法测试了不同电压下弓网离线放电电磁辐射的电场时域波形。理论与实验结果表明: 本文所提出的方法能准确、稳定地还原弓网离线放电所辐射瞬态电场的原始时域波形, 还原信号与实测微分信号的主要频率分量均在 7.5 MHz, 二者的相关系数达到 93% 以上。

关键词: D-dot 传感器; 瞬态电场; 时域测试; 弓网离线放电

中图分类号: TN98

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220172

Time-domain measurement of the transient electric field caused by pantograph-catenary off-line discharge based on D-dot Sensor

Li Zhiyu¹, Li Hao^{2,3}, Cao Hefei¹, Jin Mengzhe³, Hu Man³

(1. China Railway Signal & Communication Corp Research & Design Institute Group Co., Ltd, Beijing 100070, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Hebei Key Laboratory for Electromagnetic Environmental Effects and Information Processing, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The electromagnetic radiation of pantograph-catenary offline discharge has the characteristics of transient and broadband. We can use the D-dot sensor to measure its transient electric field in time domain. However, the direct integral operation of the differential signal seriously distorts the original signal. To solve this problem, a transient electric field time-domain waveform restoration system including a pulse electric field generating device and a measuring device is built in the laboratory firstly. Then, we propose a time-domain waveform restoration method for transient electric field including DC removal, numerical integration, elimination of trend items and low frequency compensation. Finally, the method is used to test the electric field time domain waveform of electromagnetic radiation of pantograph-catenary offline discharge under different voltages. Theoretical and experimental results show that the proposed method can accurately and stably restore the original time-domain waveform of the transient electric field radiated by off-line discharge of the pantograph. The main frequency components of the reduced signal and the measured differential signal are both at 7.5MHz, and the correlation coefficient between them is more than 93%.

Key words: D-dot sensor, transient electric field, time-domain measurement, pantograph-catenary offline discharge

近年来, 我国高铁发展迅速。高速动车组运行过程中由于车体震动、接触网导线不平顺和轨道不平顺等因素, 其受电弓与接触网之间会发生离线的现象^[1-2]。弓网离线时会产生放电进而产生电磁辐射, 所辐射的电磁脉冲信号具有持续时间短、前沿快、频带宽等特点, 会对列车控制系统造成瞬态电磁干扰, 严重时威胁列车运

* 收稿日期: 2022-04-05; 修订日期: 2022-08-30

基金项目: 轨道交通电磁环境效应研究与测试平台建设项目; 国家自然科学基金项目 (51807123)

联系方式: 李智宇, lizhiyu@crscd.com.cn

行的安全性和可靠性。为了获取弓网离线放电时所辐射的电磁脉冲特性,瞬态电磁场时域测试技术尤为重要。传统频域上的稳态测试技术,由于其较长的扫描时间,无法完整地捕获瞬态电磁脉冲信号,不再适用于弓网离线放电电磁辐射瞬态电磁场的测量^[3-5]。而通过时域瞬态电磁场测试法得到的电磁场时域波形,不仅方便分析其时域特性,还可以利用傅里叶变换得到瞬态电磁场信号的频域特性,因此近年来瞬态电磁场时域测试技术受到广泛关注^[6-9],D-dot 传感器也因其响应频带宽、体积较小等优点,在瞬态电场时域测量中得到了十分广泛的应用^[10-13]。

D-dot 传感器的等效负载为低阻,测得的信号为原始信号的微分信号^[14],需通过后续的数据处理进行积分还原。但由于环境噪声的存在以及测试系统低频响应较差等因素,积分后信号会出现“趋势项”^[15]、“平等降落”^[16]等严重失真,且由于传感器系数^[17]未知,所得信号在数值大小上与真实信号也存在差异。针对“趋势项”问题,张虚怀^[18]等研究了返回舱着水的冲击特性,指出多项式最小二乘法能够较好地消除趋势项。谢宇超等利用小波分解法解决了水中电爆炸冲击信号在积分还原时的趋势项问题^[19]。陈为真等通过研究实际振动位移的获取方法,指出运用拟合多项式求极值的方法可以很好地消除趋势项^[20]。针对低频响应较差的问题,Yang^[21]等将矩形矩阵的正交(QR)分解和改进的最小二乘(GLS)算法相结合,利用系统辨识改善了传感器的动态性能。Papamarkos^[22]等提出了一种数字积分器设计的新方法,通过在系统中引入新的约束来优化低频补偿。Chen^[23]等设计了一个 FIR(有限脉冲响应)滤波器,对光纤系统的带宽损失进行频率补偿。Mete^[24]研究了二阶非线性 volterra 级联 Hammerstein 模型和线性 FIR 模型在系统辨识中的应用,采用递归最小二乘算法对系统响应进行补偿。对于传感器系数的校准问题,王可^[25]等提出了一种基于传感器输出模型的传感器标定方法,有效避免因阻抗突变引起的过冲或振铃现象对标定精度的影响。Duan^[26]等人利用系统传递函数对 D-dot 传感器的频率响应特性进行近似,并通过偏线性回归得到适应工作频率范围的灵敏度系数。Wang^[27]等采用了基于高斯-切比雪夫算法的节点参数重构技术,优化了传感器的响应特性。Huiskamp, Mcknight^[28-29]等则是为了数值地重建通过传感器位置的电压和电流波形,通过实验及后处理的方式对传感器系数进行了校准。综上可知,国内外学者对信号波形重建过程中出现的失真提出了诸多针对性强的方法,但存在的问题是缺乏普适性,对诸如弓网离线放电电磁脉冲信号这类具有持续时间短、前沿快、频带宽等特点的信号,已有方法不适用。

因此,本文提出一种基于 D-dot 传感器的弓网离线放电瞬态电场时域测试方法,首先设计了瞬态电场波形还原系统,然后对持续时间短、前沿快且频率含量丰富的方波电场信号进行还原,验证了包括去直流、数值积分、消除趋势项、低频补偿与传感器系数修正的波形还原方法的有效性,最后将所提出的方法用于弓网离线放电电磁辐射电场的测试中,得到弓网离线放电电磁辐射瞬态电场的原始时域波形。

1 基于 D-dot 传感器的瞬态电场波形还原方法

脉冲电磁场时域测量的技术关键在于不失真地将空间传播的瞬态电场信号转换成易于处理的电压信号,并利用电压信号还原原始瞬态电场波形。为了保证本文提出的波形还原方法针对不同频段的信号均有效,采用高低频含量均丰富的标准方波信号作为还原方法的测试对象,设计如图 1 所示的瞬态电场波形还原系统结构示意图,该系统由波形发生器、TEM 小室、D-dot 传感器、巴伦以及示波器组成。

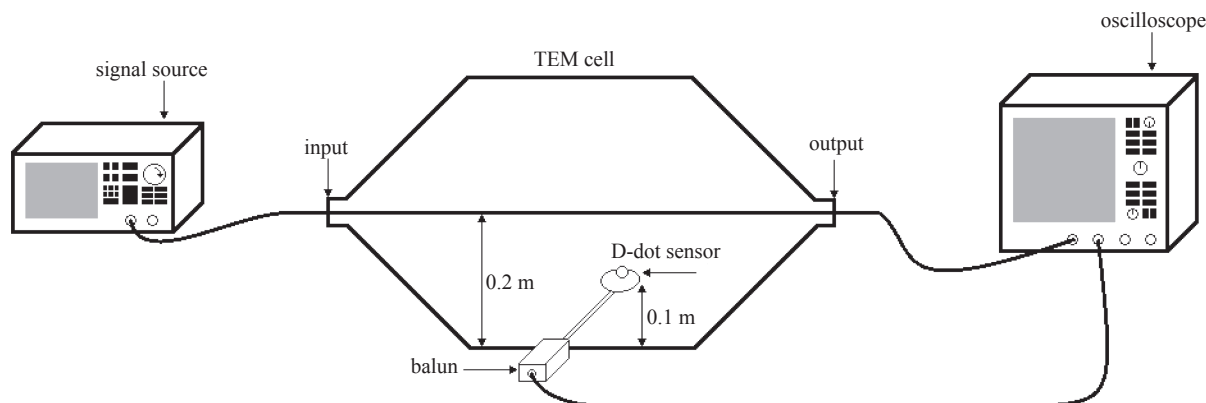


Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the transient electric field waveform restoration system

图 1 瞬态电场波形还原系统结构示意图

将 D-dot 瞬态电场传感器置于 TEM 小室的上下极板之间,通过示波器获取传感器所测数据,即标准方波的微分信号。由于示波器基线不归零、测量系统噪声等因素会在测量结果中引入直流成分,首先在对 D-dot 传感器输出微分信号去直流,通过减去均值的方式来实现

$$V'(n\Delta T) = V(n\Delta T) - \mu_V = V(n\Delta T) - \sum_{n=1}^N V(n\Delta T) / N \quad (1)$$

式中: n 为信号的采样个数; ΔT 为信号的采样间隔; $V'(n\Delta T)$ 为去直流后的电磁脉冲微分测量信号; $V(n\Delta T)$ 为 D-dot 传感器输出微分测量信号; μ_V 为电磁脉冲微分测量信号的算术平均值。

其次再对微分测量信号 $V'(n\Delta T)$ 进行数值积分。采用复化梯形数值积分公式进行去直流后的测试信号积分

$$\int_0^T V'(nT)dt = \frac{\Delta T}{2} \left[V'(0) + 2 \sum_{i=0}^{n-1} V'(nt_i) + V'(nt) \right] \quad (2)$$

然后利用小波分解^[18]法对积分后的信号 $\int_0^T V'(nT)dt$ 消除趋势项。这是由于经去直流后,微分测量信号 $V'(n\Delta T)$ 的低频分量未能完全去除,这些低频分量随着对 $V'(n\Delta T)$ 的积分被放大,继而形成趋势项,使得积分后的信号波形整体发生了较大的偏移。

另外,由于测试系统存在低频响应失真,导致方波平顶出现下降的趋势。继而需要对消除趋势项后的信号进行低频补偿。本文采用系统辨识方法,将理想方波的微分信号作为系统辨识结果得到辨识函数 $H(z^{-1})$,对 D-dot 传感器输出微分信号进行低频补偿,从而解决“平顶降落”问题。

最后进行传感器的修正系数标定。由于 D-dot 传感器未经校准,经过低频补偿后的信号在数值上与原始方波信号仍存在差异,因此需要对传感器系数进行标定。D-dot 传感器的响应特性被转折频率 f_0 分为微分模式

$$u_0(j\omega) = j\omega\varepsilon_0 E(j\omega)A_c R \quad (3)$$

式中: u_0 为输出电压, ε_0 为真空介电常数, E 为输入电场, A_c 为等效面积, R 为传感器的阻抗。以及自积分模式:

$$u_0(j\omega) = \varepsilon_0 E(j\omega)A_c / C \quad (4)$$

式中: C 为传感器的电容。 $\omega \ll 1/RC$ 情况下传感器的输出电压与电场频率成线性关系,在时域表现为输出电压与电场的时域变化率呈线性关系,即

$$u_0(t) = \varepsilon_0 A_c R \frac{\partial}{\partial t} E(t) \quad (5)$$

对于方波信号 $V_1(t)$,经过 TEM 小室后,产生均匀电场记为 $E(t)$,通过微分电场探头和巴伦,连接到示波器,示波器显示 $V_2(t)$ 。记 $E(t) = \int V_2(T) \cdot K dt$,其中, K 为测试系统的修正系数,可由(5)式计算得 $K = 1/\varepsilon_0 A_c R$ 。至此便可得到还原后的信号。

瞬态电场波形还原流程如图 2 所示,具体过程如下:首先搭建试验验证系统,馈入方波激励信号,使用 D-dot 传感器与示波器获取 TEM 小室中的脉冲电场的原始信号与微分信号;其次对 D-dot 传感器输出的微分信号去直流、去噪,得到去直流后的微分测量信号;然后将去直流后的微分测量信号进行系统辨识,得到辨识函数,同时应用复化梯形积分方对去直流后的信号数值积分,得到带有趋势项的积分还原信号;再对还原信号应用小波分解法消除趋势项,利用辨识函数对消除趋势项得到的结果信号进行低频补偿,得到方波还原信号最后通过计算与试验获得传感器系数,对方波还原信号进行系数修正,实现对 TEM 小室内瞬态脉冲电场的波形还原。

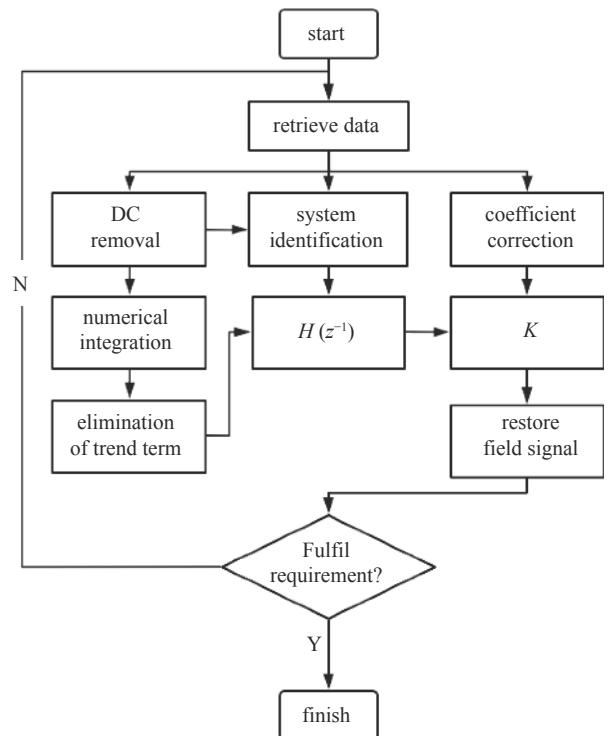


Fig. 2 Waveform reduction process
图 2 瞬态电场波形还原流程图

2 试验验证与分析

2.1 试验系统搭建

依据图1所示瞬态电场波形还原系统结构示意图,构建了如图3所示的验证系统。该验证系统分为脉冲电场发生装置和脉冲电场测量装置两部分,其中,脉冲电场发生装置由波形发生器和TEM小室构成,脉冲电场测量装置由D-dot电场传感器、巴伦和数字示波器构成。波形发生器的输出端连接TEM小室输入端,向TEM小室馈入脉冲激励信号,产生并提供标准脉冲电场环境。波形发生器产生重复频率为100 kHz(周期为10 μ s)的方波脉冲,峰值分别为20 V、15 V和10 V。在输入端馈入激励信号后,TEM小室上下极板之间便产生垂直方向的横电磁波,电场强度大小同激励信号源电压幅度呈线性关系。因此,可知TEM小室上下极板之间电场峰峰值分别为100 $V \cdot m^{-1}$ 、75 $V \cdot m^{-1}$ 和50 $V \cdot m^{-1}$ 。D-dot传感器被置于TEM小室下半腔中部,传感器末端装有双芯输出,与Montena巴伦(Balun3-5G型)相连。巴伦的作用是将偶极子平衡天线传输转换为同轴电缆传输,保持与D-dot传感器响应频率相同,最高为3.5 GHz。采用Tektronix-MSO64B型示波器对脉冲电场的瞬态信号进行记录,示波器的模拟带宽为4 GHz,最高采样率达 5×10^{10} 帧/s。示波器与TEM小室的输出端相连,同时采集显示场源电压波形和传感器输出波形,当待测电场的激励电压峰峰值为20 V时,方波源电场信号及D-dot传感器输出微分信号测量结果如图4所示。

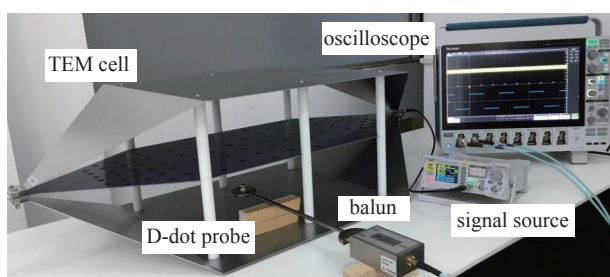


Fig. 3 The transient electric field waveform restoration system

图3 瞬态电场波形还原系统实物图

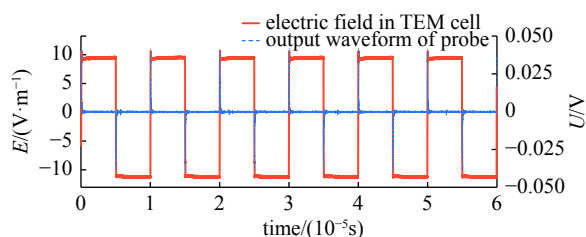


Fig. 4 Square wave source electric field signal and D-dot output differential signal

图4 方波源电场信号及D-dot输出微分信号

2.2 电场波形还原结果与分析

应用式(2)对去直流后的电磁脉冲微分测量信号进行数值积分,结果如图5所示。

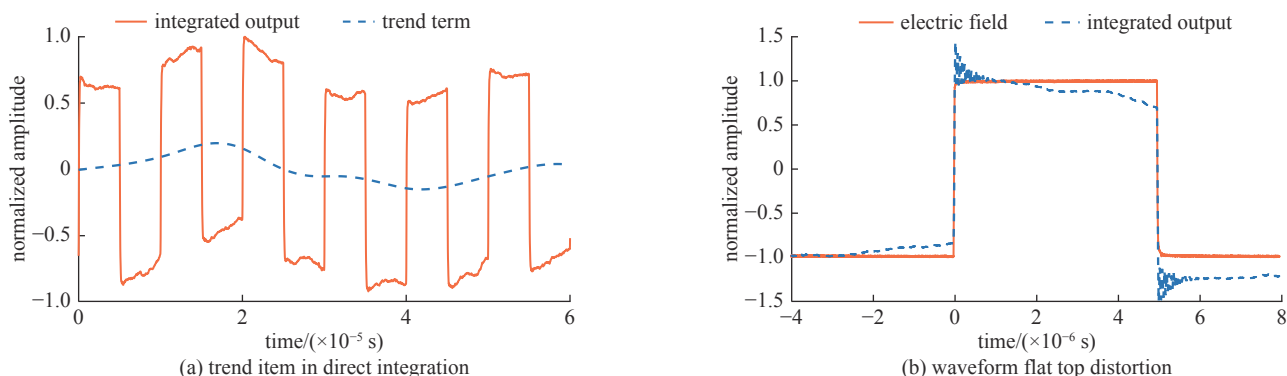


Fig. 5 Direct integration result of the electromagnetic pulse differential measurement signal after de-averaging

图5 去直流后的电磁脉冲微分测量信号直接积分结果

由图5可以看出,当信号中未被彻底消除的直流分量以及噪声被积分放大后,将会产生趋势项。趋势项是在测试信号中存在线性项或缓变的非线性项成分,其存在会使数值积分的结果产生很大的误差,严重地背离真实情况。另外由于测试系统存在低频响应失真,积分还原后的方波波形会存在“平顶降落”的现象,因此需要消除趋势项并进行平顶修复。本文采用小波分解法消除趋势项,针对如图6(a)所示微分测量信号的直接积分信号,消除趋势项后的结果如图6(b)所示,为了验证本文所采用小波分解法,图6(b)中还对比了采用最小二乘法及EMD分解法消除趋势项后的结果。由图6可知,相较另外两种方法,小波分解法去趋势后的信号波形更加接近原始方波信号波形。

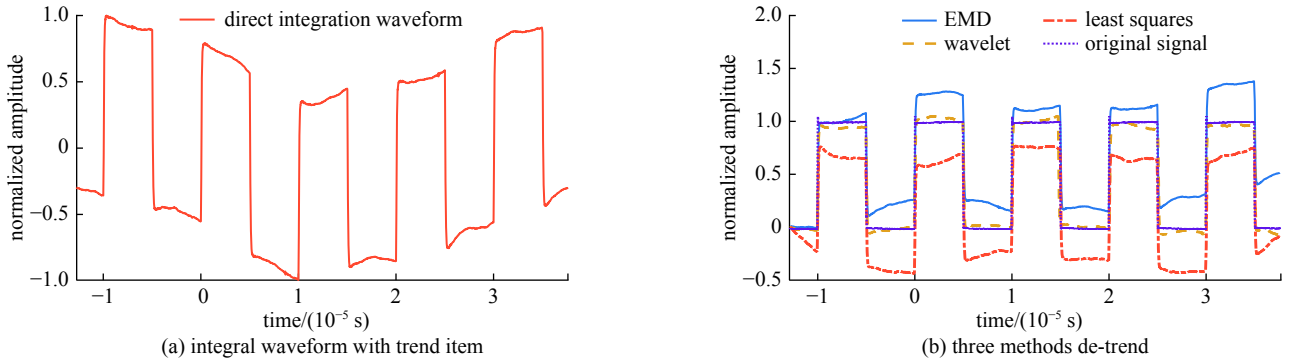


Fig. 6 Result of three methods to remove trend item

图 6 三种方法消除趋势项结果图

为了更直观地对比不同方法消除趋势项的效果,引入均方根误差 RMSE 和相关系数,两者均用来判断消除趋势项后波形与原始信号波形(均归一化)的相关程度。计算三种方法消除趋势项后的信号与原始方波信号的 RMSE 和相关系数,计算结果如表 1 所示。由表 1 可知,小波分解法消除趋势项后均方根误差最小,小波分解法消除趋势项后与原始方波信号的相关系数为 84.14%,与 EMD 分解法和最小二乘法相比,分别提高了 11.81% 和 19.43%,这表明小波分解法消除趋势项后信号与原始方波信号的相似度较其他算法高,即小波分解法消除趋势项的效果相较另外两种方法更好。

表 1 三种方法消除趋势项结果的均方根误差及相关系数

Table 1 Three methods to eliminate root mean square error and correlation coefficient of trend term results

method	RMSE	correlation coefficient/%
least squares	0.420	63.71
wavelet	0.193	84.14
EMD	0.370	72.33

然后针对已消除趋势项的信号进行平顶修复。本文提出在微分测量信号数值积分前加入方波测试信号的低频补偿,以减小测试系统的低频失真。低频补偿采用系统辨识方法,首先将 D-dot 传感器输出微分信号作为辨识系统的输入,对方波信号进行微分处理,并利用小波分解去噪(选取 db4 型小波基,4 层分解),结果作为待辨识系统的输出。低频补偿辨识系统的输入信号与输出信号如图 7 所示。

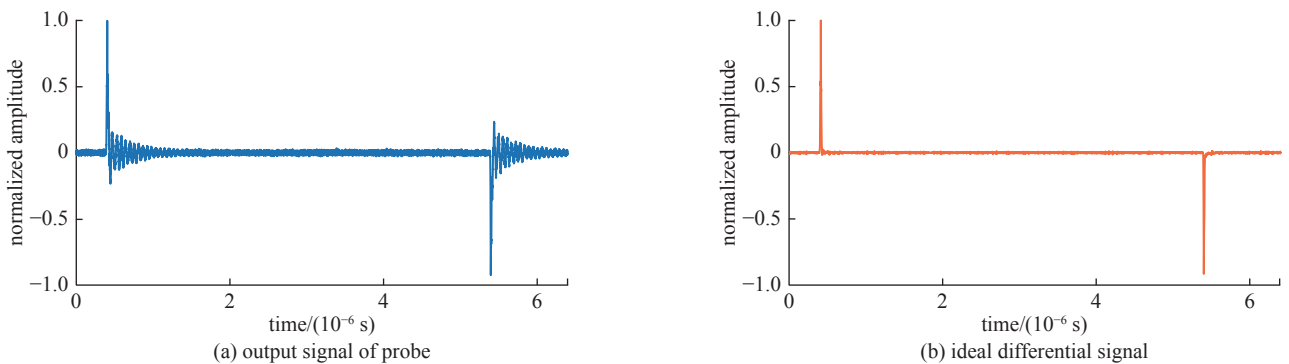


Fig. 7 Input signal and output signal of low frequency compensation identification system

图 7 低频补偿辨识系统的输入信号与输出信号

应用 MATLAB 系统辨识工具箱进行系统辨识,计算得到微分信号补偿系统的四阶离散传递函数为

$$H(z^{-1}) = \frac{0.630 6z^{-1} - 1.188z^{-2} + 0.486 2z^{-3} + 0.071 3z^{-4}}{1 - 1.568z^{-1} - 0.395 5z^{-2} + 1.554z^{-3} - 0.572 2z^{-4}} \quad (6)$$

以已消除趋势项的信号作为模型输入,经过以上辨识模型后,得到的结果与原方波信号和传感器输出微分信号直接积分结果的对比如图 8 所示。

低频补偿前后的均方根误差如表 2 所示,同时表 2 还给出了低频补偿前后的信号与原始方波信号的相关系

数。通过与直接积分的结果对比,可以看出经辨识函数模型输出的积分波形与原始被测方波波形基本一致,低频补偿后信号与原始方波信号的相关系数较直接积分信号提高了 12.38%,表明低频补偿后信号的波形与原始方波信号具有更高的相似度,系统的低频失真得到了有效修复,说明本文提出的补偿环节能较好地将被测电场的输出信号波形恢复成被测电场的原始信号波形。

由于 D-dot 传感器未经校正,低频补偿后的信号在数值大小上与理论值相比存在差异,如图 9(a)所示,因此最后进行修正系数的标定。由公式(5)可得修正系数 K 的计算公式

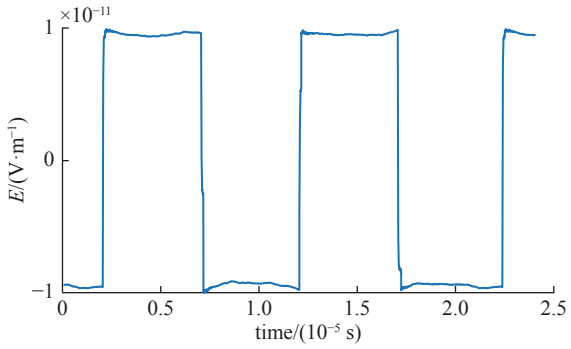
$$K = 1/\varepsilon_0 A_e R \quad (7)$$

经计算可得 $K = 5.15 \times 10^{12}$ 。低频补偿后的信号经系数修正后得到信号波形结果如图 9(b),由图可得,还原后的电场信号峰峰值约为 $100 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$,与理论值基本一致。

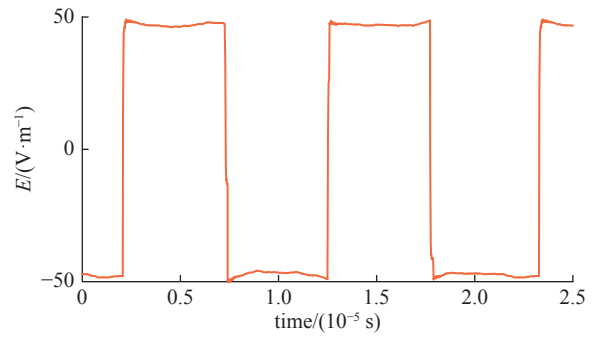
表 2 低频补偿前后信号的均方根误差及相关系数

Table 2 Root mean square error and correlation coefficient of the signal before and after low frequency compensation

state	RMSE	correlation coefficient/%
before compensation	0.041	82.39
after compensation	0.083	94.77



(a) output waveform of test system (uncalibrated electric field)



(b) output waveform of calibrated electric field signal

Fig. 9 Transient electric field waveform restoration signal before and after correction factor calibration

图 9 修正系数标定前后的瞬态电场波形还原信号

由图 9 可见本文提出的波形还原方法很好的还原了信号的时域特性,引入信号的上升时间与带宽的关系分析还原方法的频域还原效果。信号的上升时间指的是从高电平的 10% 上升到 90% 所经历的时间,信号上升时间的减小,从频谱分析的角度来说就是信号带宽的增加,也就是信号中有更多的高频分量,信号上升时间和带宽的关系^[30]

$$t_r = 0.35/B_w \quad (8)$$

式中: t_r 是信号的上升时间, B_w 是信号的频带宽度。

本文中方波源电场信号的上升沿部分如图 10(a)所示,电场还原信号的上升沿部分如图 10(b)所示。由图 10(a)可得到该方波的上升时间约为 3.4684 ns,经式(8)计算可得信号带宽约为 100.91 MHz,由图 10(b)可得电场波形还原信号的上升时间约为 3.7139 ns,经计算可得其带宽为 94.24 MHz,与方波源电场信号的带宽相差约 6.59%,可见该方法很好的还原了信号的频域特性。另外,本文提出的方法为普适性方法,实际中本方法的适用频率范围取决于构建瞬态电场波形还原系统时所使用的方波信号的带宽,如果利用该方法还原瞬态电场信号,需使得用于构建瞬态电场波形还原系统时所使用的方波信号的带宽大于被测瞬态电场信号的带宽。

为了验证本文提出的瞬态电场波形还原方法,复现了一种基于系统辨识的频域还原方法^[26],两种波形还原方法的结果如图 11 所示。由图可知,从还原信号波形的整体以及“平顶”部分来看,本文提出的波形还原方法较现有

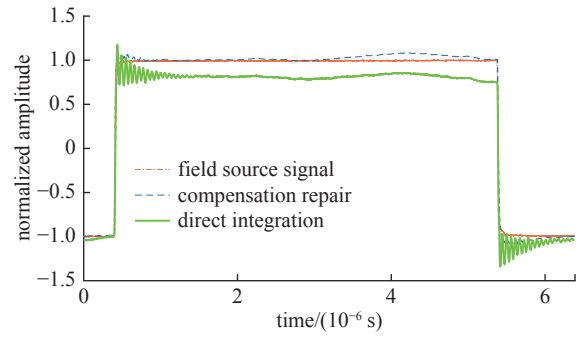


Fig. 8 Comparison of direct integration and compensation after integration

图 8 直接积分信号与低频补偿后积分信号对比

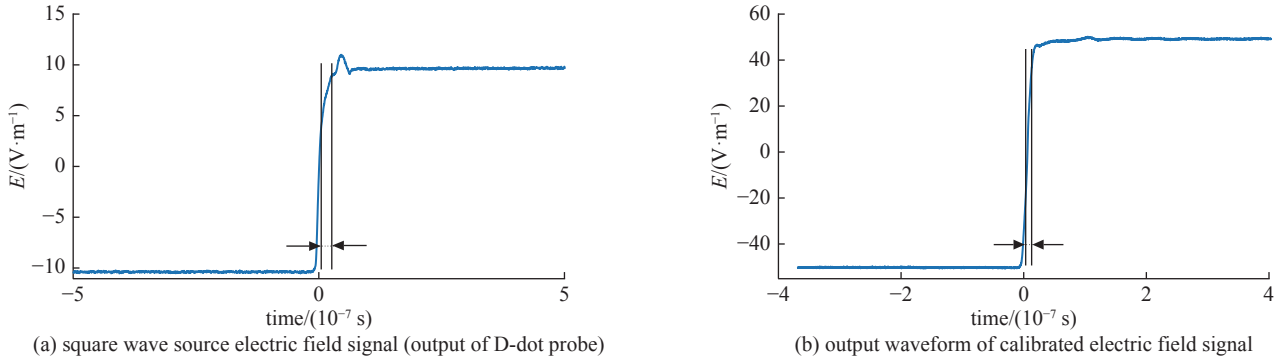


Fig. 10 Rising edge of square wave signal before and after reduction

图 10 方波信号还原前后的上升沿部分

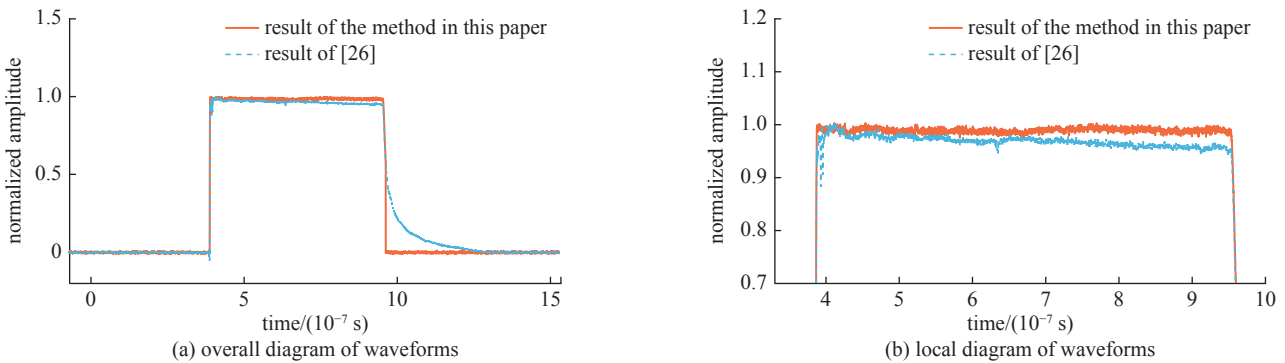


Fig. 11 Results comparison of two transient electric field waveform restoration methods

图 11 两种瞬态电场波形还原方法的结果对比

波形还原方法的还原度更高。

3 弓网离线电弧电场测试

将本文所提出的瞬态电场波形还原方法用于实验室弓网离线电弧电场的测试中,搭建如图 12 所示的测试系统。弓网离线电弧电场测试系统由高压电源模块、结构支架、弓网运动模拟模块(碳滑板及接触线)、D-dot 传感器和数字示波器构成,可以利用高压电源模块和弓网运动模拟模块来模拟实际的弓网离线电弧,通过 D-dot 传感器和数字示波器对弓网离线电弧电场的微分信号进行采集,从而进行弓网离线电弧电场信号的还原。

在激励电压为 30 kV 的情况下,利用 D-dot 传感器获得其时域波形如图 13(a)所示,频谱如图 13(b)所示。

通过测试系统还原的电场信号时域波形及其频谱如图 14 所示,信号的频率主要分布在 80 MHz 以内,约为方波频率范围的 80%,满足测量条件。使用传统积分方法还原电场信号波形,由于趋势项等因素的存在,势必会造成信号的失真,同时在频域也会出现幅值较大的低频直流量^[8],而经该系统还原的信号主要频率分量与实测微分信号基本一致,且两者的相关系数高达 93.47%。

为进一步验证测试波形还原方法的可行性,分别在激励电压为 15 kV, 20 kV, 25 kV 及 30 kV 的情况下获取瞬态电场的微分信号进行还原,其结果如图 15 所示,并计算不同激励电压下瞬态电场还原信号频谱与 D-dot 传感器输出微分信号频谱的相关系数,结果如表 3 所示。由图 15 可得,三组电压不同的实测弓网离线放电瞬态辐射电场信号经由本文所提方法还原后,还原信号与实测微分信号(见图 13(b))的频谱幅值最大值对应的频率均在 7.5 MHz。同理,由表 3 可知,在不同的电压下,瞬态电场还原信号频谱与 D-dot 传感器输出微分信号频谱的相关系数均在 93% 以上,这表明还原前后两种信号频谱的相似度很高,说明本文所提出的瞬态电场时域波形还原方法,可以很好

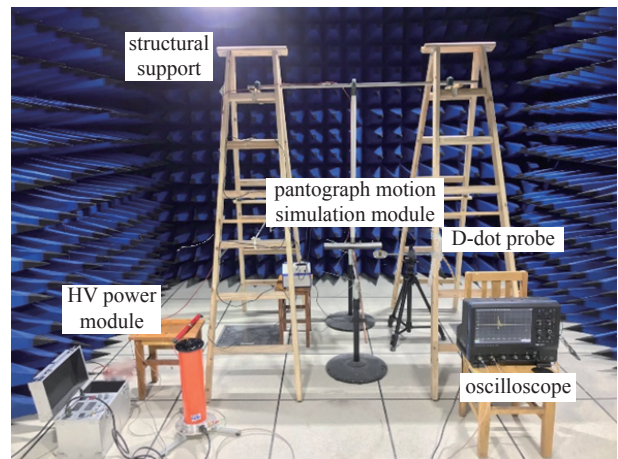


Fig. 12 Off-line arc electric field test system of pantograph

图 12 弓网离线电弧电场测试系统

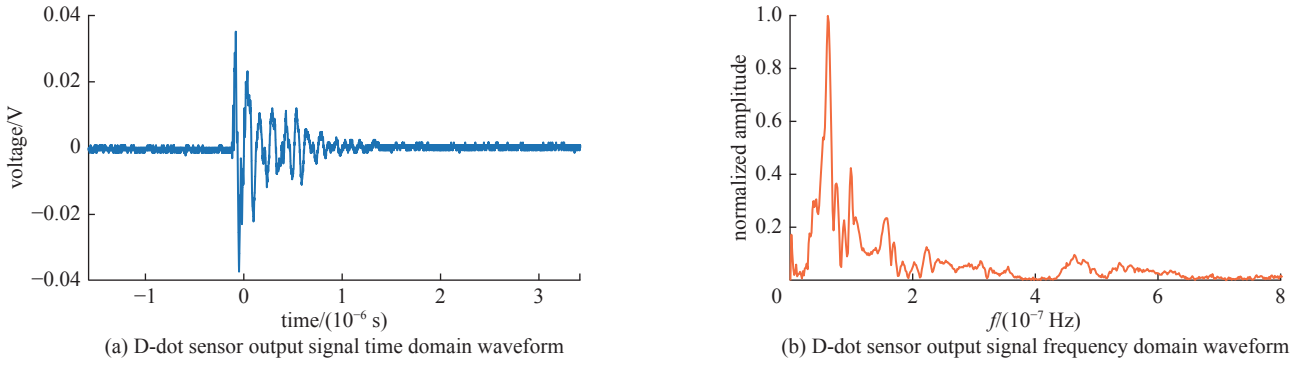


Fig. 13 D-dot sensor output differential signal and its amplitude spectrum

图 13 D-dot 传感器输出差分信号及信号频谱图

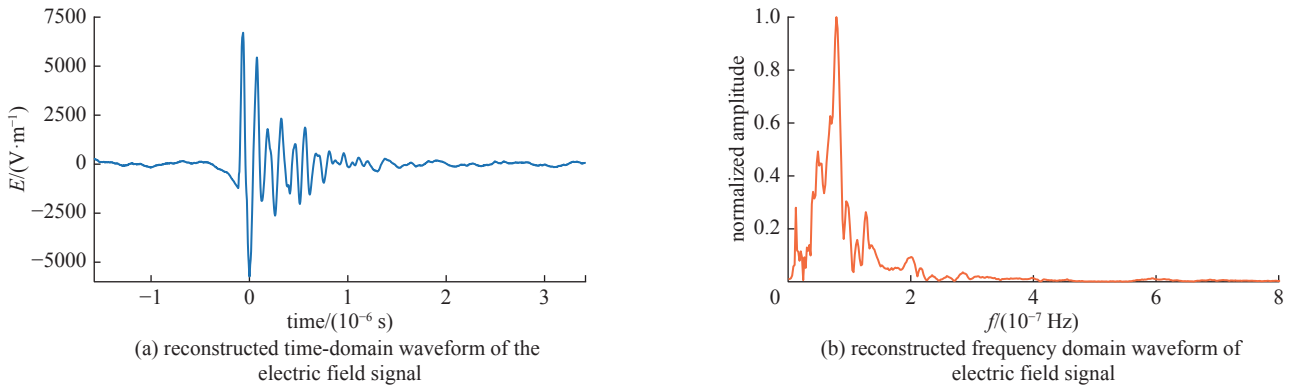


Fig. 14 Transient electric field waveform restoration system restored electric field signal and its amplitude spectrum

图 14 瞬态电场波形还原系统还原电场信号及信号频谱图

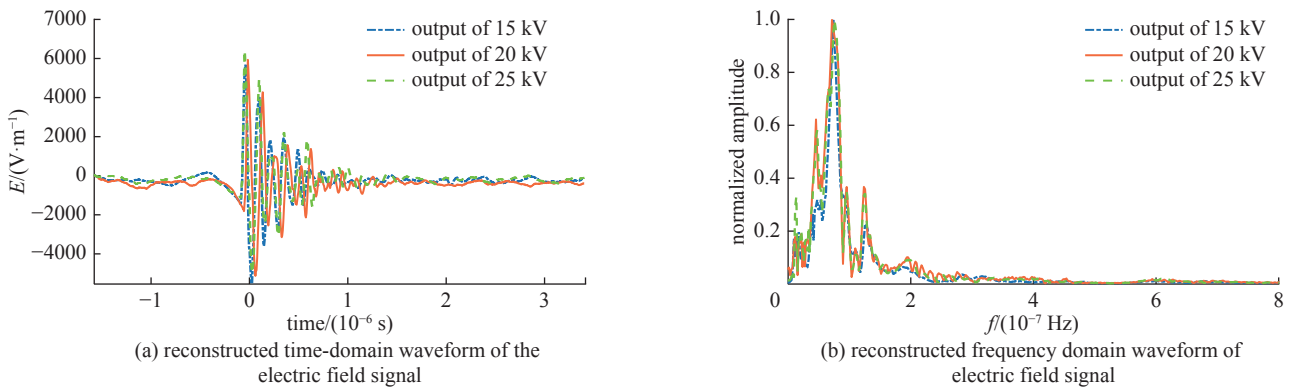


Fig. 15 Transient electric field restoration signals under different excitation voltages

图 15 不同激励电压下的瞬态电场还原信号

表 3 不同激励电压下瞬态电场还原信号的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of transient electric field restoration signals under different excitation voltages

applied voltage/kV	correlation coefficient/%
15	93.19
20	94.96
25	93.11

地还原瞬态电场信号的频域特性。因此,本文提出的瞬态电场波形还原方法可用于弓网离线放电所辐射瞬态电场的原始时域波形测试。

4 结 论

现有波形还原方法存在诸如趋势项、低频失真及传感器系数未修正等问题,难以测量弓网离线放电所辐射的

瞬态电磁脉冲信号。本文研究了基于 D-dot 传感器的瞬态电场时域测试方法,提出了通过去直流、小波分解消除趋势项、系统辨识低频补偿以及修正系数标定进行瞬态电场原始波形还原的方法。该方法采用小波分解法消除趋势项,消除趋势项后的信号与原始方波信号的相关系数较 EMD 分解法和最小二乘法分别提高了 11.81% 和 19.43%,并利用系统辨识方法改善了由测试系统低频响应差导致的低频失真问题,经低频补偿后信号与原始方波信号的相关系数较直接积分信号提高了 12.38%。实验结果表明,在不同激励电压下,本文所提出的方法可有效还原弓网离线放电所辐射瞬态电场的原始时域波形,还原信号与实测微分信号的主要频率分量均在 7.5 MHz,且两者的相关系数均高达 93% 以上。本文所提出方法适用于电磁兼容领域快前沿、宽频带的瞬态电场时域测试。

参考文献:

- [1] 高国强,郝静,古圳,等.高速铁路中受电弓升弓过程弓网电弧电气特性[J].高电压技术,2016,42(11):3569-3575. (Gao Guoqiang, Hao Jing, Gu Zhen, et al. Electrical characteristics on pantograph-catenary arc during pantograph rising in high speed railway[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3569-3575)
- [2] Zhou Hongyi, Duan Fuchun, Liu Zhigang, et al. Study on electric spark discharge between pantograph and catenary in electrified railway[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2022, 12(2): 128-142.
- [3] 刘卫东,胡小锋.瞬态电场时域测试技术的研究现状与展望[J].高压电器,2014,50(7):132-138. (Liu Weidong, Hu Xiaofeng. Review of transient electric field measurement in time domain[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 132-138)
- [4] 陈锦,刘小龙,燕有杰,等.小型短电磁脉冲传感器[J].强激光与粒子束,2012,24(12):2797-2801. (Chen Jin, Liu Xiaolong, Yan Youjie, et al. Compact short electromagnetic pulse sensor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(12): 2797-2801)
- [5] Keller C, Feser K. Fast emission measurement in time domain[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(4): 816-824.
- [6] 胡蔚中,杜衡.一种具有频率自适应能力的高精度数字积分算法[J].电力科学与工程,2017,33(2):1-8. (Hu Weizhong, Du Heng. A high precision digital integrator algorithm with frequency self-adaption ability[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(2): 1-8)
- [7] 李振华,胡蔚中,闫苏红,等.基于龙贝格算法的高精度数字积分算法[J].电力系统自动化,2016,40(16):138-142. (Li Zhenhua, Hu Weizhong, Yan Suhong, et al. High precision algorithm of digital integrator based on Romberg algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 138-142)
- [8] 刘福才,吴晨,何锁纯.数字积分器在脉冲电流检测中的应用[J].仪表技术与传感器,2012(10):85-87,90. (Liu Fucui, Wu Chen, He Suochun. Pulse current measurement based on digital integrator[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(10): 85-87,90)
- [9] 朱长青.脉冲电场微型传感探头的研制[J].高电压技术,2009,35(8):1940-1945. (Zhu Changqing. Development of a mini-probe for testing pulsed e-field[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1940-1945)
- [10] 卫兵,顾元朝,周荣国,等.阳加速器水传输线D-dot的设计、标定和实验[J].强激光与粒子束,2007,19(5):830-834. (Wei Bing, Gu Yuanchao, Zhou Rongguo, et al. Design, calibration and measurement of D-dot monitor for Yang accelerator water transmission line[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(5): 830-834)
- [11] 王启武,李炎新,石立华.纳秒电磁脉冲测量用D-dot探头设计及实验[J].强激光与粒子束,2015,27:115004. (Wang Qiwu, Li Yanxin, Shi Lihua. Design and experiment of D-dot probe for nanosecond electromagnetic pulse measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 115004)
- [12] 齐路,张国钢,刘竞存,等.电磁脉冲D-dot电场传感器的设计与优化[J].高压电器,2018,54(7):237-241,247. (Qi Lu, Zhang Guogang, Liu Jingcun, et al. Design and optimization of d-dot e-field sensor for electromagnetic pulse detection[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 237-241,247)
- [13] 刘波,文忠,曾涯. MATLAB信号处理[M].北京:电子工业出版社,2006. (Liu Bo, Wen Zhong, Zeng Ya. MATLAB signal processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006)
- [14] 赵墨,马良,吴伟,等.差分型脉冲电场测量系统的研制[J].核电子学与探测技术,2012,32(10):1148-1152. (Zhao Mo, Ma Liang, Wu Wei, et al. The develop of pulsed E-field sensor based on differential measurement[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012, 32(10): 1148-1152)
- [15] 王广斌,刘义伦,金晓宏,等.基于最小二乘原理的趋势项处理及其MATLAB的实现[J].有色设备,2005(5):4-8. (Wang Guangbin, Liu Yilun, Jin Xiaohong, et al. Treatment of tendency part and its MATLAB accomplishment based on least-square principle[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2005(5): 4-8)
- [16] 张美凤.测试系统的低频特性补偿研究[J].科技信息,2007(36):776-777. (Zhang Meifeng. Research on low frequency characteristic compensation of measuring system[J]. Science & Technology Information, 2007(36): 776-777)
- [17] 谭坚文,石立华.脉冲电流探头的时域标定研究[J].强激光与粒子束,2006,18(2):337-340. (Tan Jianwen, Shi Lihua. Time domain calibration of pulsed current probe[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(2): 337-340)
- [18] 张虚怀,杜汇良,马春生.返回舱着水的数值模拟及冲击特性分析[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(8):1297-1301. (Zhang Xuhuai, Du Huiliang, Ma Chunsheng. Water impact simulations and analyses of space capsule response characteristics[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(8): 1297-1301)
- [19] 谢宇超,周海滨,陶妍,等.基于小波分解的水中电爆炸冲击波波波形重建方法研究[J].振动与冲击,2021,40(5):149-153,178. (Xie Yuchao, Zhou Haibin, Tao Yan, et al. Reconstruction method of shock wave shape of underwater electric explosion based on wavelet decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 149-153,178)
- [20] 陈为真,汪秉文,胡晓娅.基于时域积分的加速度信号处理[J].华中科技大学学报(自然科学版),2010,38(1):1-4. (Chen Weizhen, Wang Bingwen, Hu Xiaoya. Acceleration signal processing by aumerical integration[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),

- 2010, 38(1): 1-4)
- [21] 杨文杰, 张志杰, 李岩峰, 等. QR分解与GLS改进算法在压力传感器动态性能改善中的应用[J]. *传感技术学报*, 2016, 29(11): 1698-1704. (Yang Wenjie, Zhang Zhijie, Li Yanfeng, et al. The application of QR decomposition and GLS improved algorithm in improving the dynamic performance of pressure sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(11): 1698-1704)
- [22] Papamarkos N, Chamzas C. A new approach for the design of digital integrators[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1996, 43(9): 785-791.
- [23] Ouyang Hongzhi, Yao Xueling, Chen Jingliang. Development of a transient magnetic field sensor based on digital integration and frequency equalization[J]. *Sensors*, 2021, 21: 4268.
- [24] Mete S, Ozer S, Zorlu H. System identification using Hammerstein model optimized with differential evolution algorithm[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2016, 70(12): 1667-1675.
- [25] 王可, 段艳涛, 李炎新, 等. 基于输出误差模型的B-dot传感器标定方法[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 103214. (Wang Ke, Duan Yantao, Li Yanxin, et al. Calibration method of B-dot sensors based on OE model[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 103214)
- [26] Wang Ke, Duan Yantao, Shi Lihua, et al. Laboratory calibration of D-dot sensor based on system identification method[J]. *Sensors*, 2019, 19: 3255.
- [27] Wang Jingang, Yan Xiaojun, Zhong Lu, et al. Simulation and test of a contactless voltage measurement method for overhead lines based on reconstruction of integral node parameters[J]. *Sensors*, 2019, 20: 246.
- [28] Lagnese J, McKnight R H. Calculation of confidence intervals for high-voltage impulse reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1988, 37(2): 201-206.
- [29] Huiskamp T, Beckers F J C M, Van Heesch E J M, et al. B-dot and D-dot sensors for (sub) nanosecond high-voltage and high-current pulse measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10): 3792-3801.
- [30] Jiang Yunsheng, Xu Zhiqian, Wu Ping, et al. A time-domain calibration method for transient EM field sensors[J]. *Measurement*, 2021, 168: 108368.