

文章编号: 2095-4980(2016)05-0738-04

电磁脉冲微分测量信号的数值积分

李进玺, 郭景海, 赵 墨, 刘逸飞, 吴 伟

(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, 陕西 西安 710024)

摘 要: 电磁脉冲(EMP)探测器测量结果为微分信号的情况下, 需要将测量信号进行积分。测量信号中的噪声在数值积分被放大, 产生的累积误差会引起波形的严重失真。同时, 由于被测信号上升沿与下降沿宽度不一致, 测量到的微分信号正、负峰值以及脉冲宽度不对称, 采取消除一次趋势项的方法不能完全消除积分信号的线性趋势。本文结合脉冲电磁场的微分测量结果, 在分析了误差传递规律和被测信号特征的基础上, 应用信号微调的方法对数值积分结果进行修正, 修正后的积分结果消除了线性趋势, 能够反映出被测信号的基本特征, 为高斯脉冲、方波的微分信号的数值积分提供了一种很好的途径。

关键词: 电磁脉冲; 微分测量; 数值积分; 修正

中图分类号: TN12; O441.5

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0738

Processing of electromagnetic pulse signal based on numerical integration

LI Jinxi, GUO Jinghai, ZHAO Mo, LIU Yifei, WU Wei

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China)

Abstract: The processing of differential signal is an important task in Electromagnetic Pulse(EMP) measurement. Numerical integration is one of the ways to process the differential data, but the noise accumulation of measurement signal and the characteristics of original waveform will result in serious distortion to the integration waveform. With the EMP measurement data, on the basis of analysis of error transferring rules and the waveform characteristics, the integration waveform correction method based on piecewise adjustment is adopted in the paper. The results indicate that the correction waveforms are properly to eliminate the trend of errors, and the method is helpful in EMP differential measurement.

Key words: Electromagnetic Pulse; differential measurement; numerical integration; correction

单极天线、偶极天线和平行板天线等经常被用于测量脉冲电场^[1], 当天线的等效负载为低阻时, 将得到脉冲电场的微分信号, 通常称这样的测量方式为脉冲电场的微分测量; 环天线以及微分环经常被用于测量脉冲磁场和脉冲电流^[2], 它们测量到的信号通常也是微分信号。在后续的测量数据处理中, 需要对以上测量信号进行数值积分, 电磁脉冲测量微分信号的积分方法主要有 2 种, 即通过硬件积分电路^[1,3]和软件积分来实现。目前的 Origin 等商用数据处理软件虽然能够进行信号积分, 但由于实测信号含有噪声等因素, 导致数值积分中的累积误差引起波形的严重变形, 无法准确地给出积分结果。

常用的数值积分方法有频域法^[4]和时域法^[5]2 种。由于在线积分的要求, 时域积分方法越来越受到关注和应用, 直接利用时域积分的方法对微分信号进行积分可避免傅里叶变换和滤波所引起的截断误差。本文在分析了误差传递规律和被测信号特征的基础上, 采用去直流、数值积分、最小二乘法消除一次趋势项等方法, 对电磁脉冲微分测量信号进行数值积分, 从而得到了较为准确的积分信号。

1 数值积分

1.1 去直流

示波器基线不归零、测量系统噪声等会在测量结果中引入直流成份, 因此, 在进行数值积分前要对测量信号

进行去直流处理。处理方法很简单,首先求出测量信号的平均值,然后用所有时间点的值减去这个平均值即可。由于被测信号正负脉冲宽度以及正负峰值不对称,实际处理中,不能用测量信号所有点去平均值的方法,而是选取测量信号触发时刻前的值对其求平均值,然后用所有时间点的值减去这个均值。

1.2 数值积分

去直流时不可能完全消除直流分量,因此,经过去直流处理的信号中会存在微小的直流分量 σ ,以连续函数 $y(t)$ 来表示测量信号:

$$y(t)=f(t)+\sigma$$
(1)

式中 $f(t)$ 为不含直流分量的测量信号。对 $y(t)$ 进行数值积分,采用梯形积分^[6],计算公式如下:

$$M(i)=M(i-1)+[y(i)+y(i+1)]\times T_s/2$$
(2)

式中: $y(i)$ 为微分信号; $M(i)$ 为积分信号; T_s 为采样时间; i 为采样点。

采用式(1)和式(2)积分时,直流分量 σ 也被积分,使得积分后的信号含有一次项 $At+B$,因此,积分信号的表达式为:

$$M(t)=\int y(t)dt=\int f(t)dt+(At+B)$$
(3)

1.3 消除一次项

对经过数值积分后的离散信号采用最小二乘拟合^[6]即可得到一次项 A, B , 式(2)表示的积分离散信号减去一次项 $At+B$, 就可以得到消除一次项的积分信号了。

表 1 离散信号序列
Table1 Discrete signal sequence

time	$t(i)$	0	1	2	...	n	$n+1$
differential signal	$y(i)$	$y(0)$	$y(1)$	$y(2)$	...	$y(n)$	$y(n+1)$
integral signal	$M(i)$	$M(0)$	$M(1)$	$M(2)$	...	$M(n)$	

对于表 1 给出的离散信号,令 $m_{12}=\sum_{i=0}^n i, m_{22}=\sum_{i=0}^n i^2, m_1=\sum_{i=0}^n M(i), m_2=\sum_{i=0}^n t(i)M(i)$, 则最小二乘拟合矩阵为:

$$\begin{bmatrix} n+1 & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix}$$
(4)

由此可知: $A=\frac{-m_{12}\cdot m_1+(n+1)m_2}{(n+1)m_{22}-m_{12}^2}, B=\frac{-m_{22}\cdot m_1-m_1m_2}{(n+1)m_{22}-m_{12}^2}$ 。

1.4 信号微调与程序集成

测量信号中,触发时刻前后的噪声特性有可能不一样,因此,采用测量信号触发时刻前的值对其求平均值,不能完全去除直流成分;同时,由于测量信号的正、负峰值和脉冲宽度不对称,因此,经过上述步骤处理过的信号还不能完全正确地反应被测信号的特征。通过分析被测信号特征,采用分段微调信号的方法,可以消除以上干扰,从而得到较为准确的积分信号。分段微调时,不能破坏信号的整体趋势,不能改变信号的过零特征;根据误差的累计效应,微调某一时刻之后的信号时,该时刻之前的信号保持不变。

依据上述的原理和方法,编制了数值积分程序,并且基于 C++Builder 编写了积分软件,图 1 给出了积分软件界面。

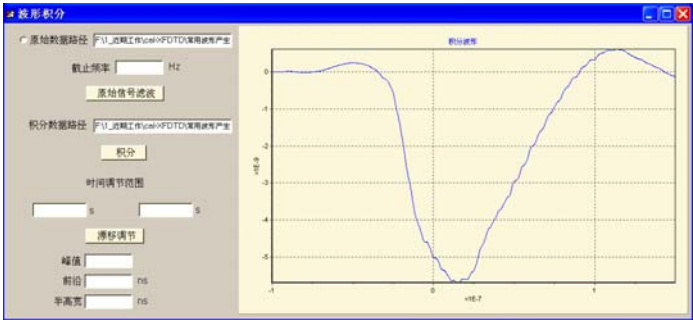


Fig.1 Interface of integration software
图 1 积分软件界面

2 实例分析

图 2 给出了腔体内系统电磁脉冲磁场信号微分测量结果, 图 3 给出采用商用数据处理软件对该波形的积分, 可以明显地看出积分结果存在线性趋势。图 4 给出了采用本文给出的方法数值积分得到的磁场波形和数值计算得到的腔体内系统电磁脉冲磁场的比较, 图 5 给出了产生该腔体内系统电磁脉冲的 X 射线时间波形^[7]。

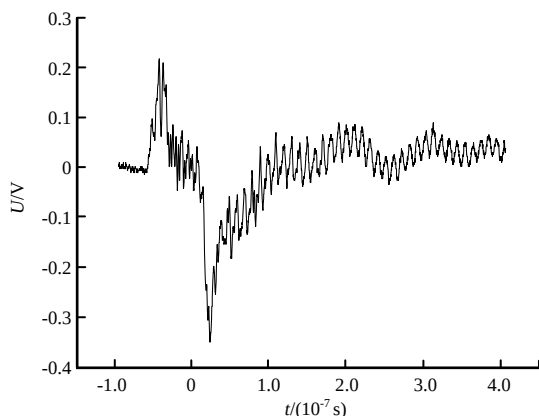


Fig.2 Output signal of loop sensor
图 2 环天线测量波形

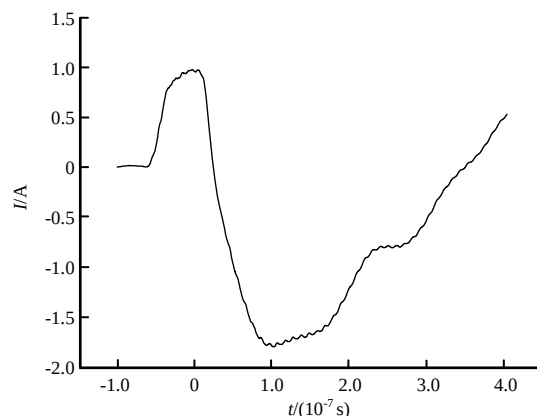


Fig.3 Numerical integration waveform of output signal
图 3 Origin 软件积分结果

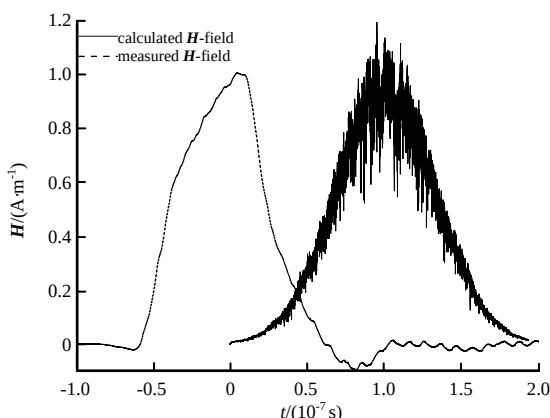


Fig.4 Waveforms of H -field
图 4 磁场波形

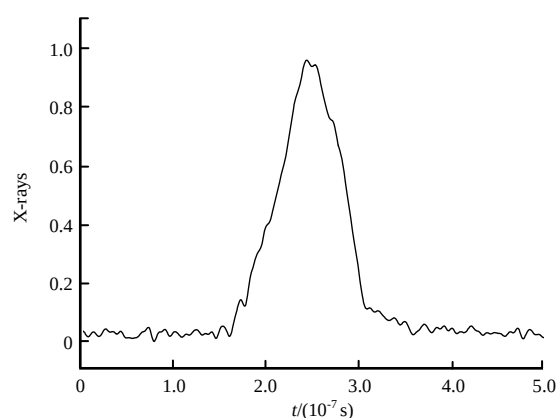


Fig.5 Waveform of X-rays in time domain
图 5 脉冲 X 射线时间波形

研究表明^[8], 图 5 所示的脉冲 X 射线产生的腔体内系统电磁脉冲磁场脉宽与 X 射线脉宽一致。比较图 2、图 4 以及图 5 可以看出, 积分结果符合微分波形的变化趋势, 能够反映出被测信号的基本特征, 并且与脉冲 X 射线和计算结果的脉冲宽度符合较好。图 6 给出了小室内电场微分测量波形, 图 7 给出了积分波形。积分结果与文献 [1,3] 给出的积分测量结果一致。

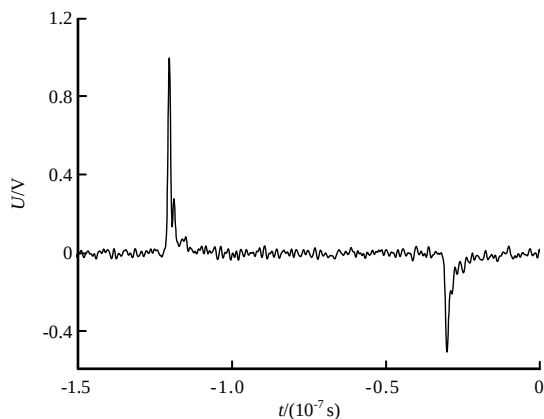


Fig.6 Waveform of output voltage of sensor in TEM cell
图 6 小室内电场微分测量波形

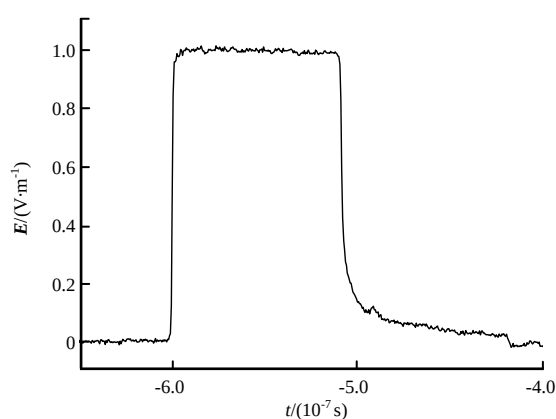


Fig.7 Waveform of E -field in TEM cell
图 7 小室内电场数值积分波形

由以上实例分析可知,采用本文介绍的方法,积分结果符合微分波形的变化趋势,能够反映出被测信号的基本特征,为高斯脉冲、方波的微分信号的数值积分提供了一种很好的途径。

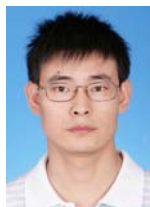
3 结论

探测器测量结果为微分信号的情况下,需要在后续的数据处理中,对测量信号进行数值积分,常见软件的积分结果存在线性趋势。由于测量信号的正、负峰值以及脉冲宽度不对称,因此,采用去直流、数值积分、最小二乘法消除一次趋势项等方法不能完全消除积分信号的线性趋势。本文结合实际脉冲电磁场的微分测量结果,在分析了误差传递规律和被测信号特征的基础上,应用信号微调的方法对数值积分结果进行修正,修正后的积分结果消除了线性趋势,能够反映出被测信号的基本特征。文中给出了详细的数值积分方法,并应用该方法编制了简单的积分软件。

参考文献:

- [1] 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 development of pulsed E-field sensor based on differential measurement[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2012,32(10):1148-1152.)
- [2] 郭宁,王亮平,韩娟娟,等. 测量 1 MA/100 ns 脉冲大电流的微分环[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(3):519-523. (GUO Ning, WANG Liangping, HAN Juanjuan, et al. Differential loop for measuring 1 MA/100 ns pulsed high current[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(3):519-523.)
- [3] 马良,吴伟,程引会,等. 基于原始波形测量的脉冲电场探测器[J]. 强激光与粒子束, 2010,22(11):2763-2768. (MA Liang, WU Wei, CHENG Yin-hui, et al. Pulsed electric field sensor based on original waveform measurement[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(11):2763-2768.)
- [4] 董礼,廖明夫,杨伸记. 振动信号频域积分的滤波修正算法[J]. 机械设计与制造, 2010,1(1):46-48. (DONG Li, LIAO Mingfu, YANG Shenji. Filtering modification of vibration signal integration algorithm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010,1(1):46-48.)
- [5] 周小祥,陈尔奎,吕桂庆,等. 基于数字积分和 LMS 的振动加速度信号处理[J]. 自动化仪表, 2006,27(9):51-53. (ZHOU Xiaoxiang, CHEN Erkui, LYU Guiqing, et al. The processing of vibration acceleration signal based on numeric integration and LMS[J]. Process Automation Instrumentation, 2006,27(9):51-53.)
- [6] 李乃成,邓建中. 数值计算方法[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1991:110-115. (LI Naicheng, DENG Jianzhong. Numerical Calculation Method[M]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University Press, 1991:110-115.)
- [7] 来定国,张永民,李进玺,等. 强流电子束韧致辐射复合薄靶设计[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1396-1400. (LAI Dingguo, ZHANG Yongmin, LI Jinxi, et al. Design of bremsstrahlung composite thin converter for high current electron beams[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6):1396-1400.)
- [8] 程引会,周辉,李宝忠,等. 光电子发射引起的柱腔内系统电磁脉冲的模拟[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(8):1029-1032. (CHENG Yin-hui, ZHOU Hui, LI Baozhong, et al. Simulation of system-generated electromagnetic pulse caused by emitted photoelectron in cavity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004,16(8):1029-1032.)

作者简介:



李进玺(1978-),男,甘肃省白银市人,副研究员,主要从事电磁脉冲效应研究工作.email: lijinxixi@nint.ac.cn.

郭景海(1986-),男,河南省周口市人,助理研究员,主要从事电磁脉冲测量研究工作.

赵墨(1986-),男,吉林省松辽市人,工程师,主要从事电磁脉冲效应研究工作.

刘逸飞(1986-),男,石家庄市人,助理研究员,主要从事电磁防护理论与研究工作.

吴伟(1976-),男,吉林省东辽市人,高级工程师,主要从事电磁脉冲效应研究工作.