

文章编号: 1001-4322(2006)02-0337-04

脉冲电流探头的时域标定研究*

谭坚文, 石立华

(解放军理工大学 工程兵工程学院, 南京 210007)

摘 要: 介绍了一种 Rogowski 线圈脉冲电流探头时域标定和标定数据处理的方法, 将脉冲法时域标定的结果和频域标定结果进行了比较。针对电流探头的低频失真, 采用系统辨识方法建立了测量系统的动态模型, 并对探头输出信号的失真进行校正。实测数据验证了所建模型的有效性, 设计出的数字补偿滤波器可将测量系统校正为一理想的比例环节。

关键词: 脉冲电流; 电流探头; Rogowski 线圈; 时域标定; 补偿

中图分类号: TM155 **文献标识码:** A

纳秒级脉冲大电流的测量是脉冲功率技术和电磁脉冲防护等研究领域中的重要问题, 对于线缆中由于耦合等原因产生的脉冲电流的测量而言, 使用得较多的是 Rogowski 线圈^[1]。这类电流探头实际测量的是导线附近磁通量的变化率, 其原始响应信号正比于电流波形的微分形式。出于直接测量的需要, 可将探头设计参数调整为对微分信号进行积分的形式, 从而成为自积分式电流探头, 且自积分式 Rogowski 线圈以其优越的高频响应而成为测量纳秒级大电流最常用的手段, 关于其原理和设计方法也已有了较多的报道^[2]。对于电磁脉冲测量来说, 采用的电流探头应当在低频到高频一个宽广的频率范围内具有平坦的频率响应特性, 以保证输出波形准确体现被测电流的脉冲形状。但由于制作条件的限制, 实际探头的特性往往难以达到理想的频响特性, 主要表现为低频响应不足。本文针对上述问题, 以自行研制的自积分式 Rogowski 线圈为例, 就其时域标定及标定数据处理的方法进行探讨。

1 电流探头的时域标定方法与结果

标定一般可分为时域法和频域法两种。频域标定法采用单频信号源进行, 逐点测量不同频率下测量系统的传递特性参数(分压比、灵敏度等)并绘制成响应曲线。随着电子技术的飞速发展, 各种精度高、频带宽、量程大的测量系统如全景频谱分析仪、标量及矢量网络分析仪相继出现, 功能化、自动化程度也在不断提高, 这大大提高了频响特性测量的效率^[3], 但频域标定法提供的频域曲线不便于时域测量的应用。针对脉冲电流测量的特点, 如果采用时域标定方法, 则可直接获得电流探头的时域特性, 通过 FFT 还可同时获得其频域特性, 且时域标定数据可被直接用来对时域测量波形进行校正处理。

基于 Rogowski 线圈设计的电流探头主要用于纳秒级前沿电磁脉冲的测量。为了对探头进行标定, 根据有关试验方法^[4]设计了图 1 所示的标定装置。首先对标定装置本身的传输特性进行测试。采用 HP 8714B 网络分析仪对设计的标定装置进行了扫频分析, 由分析结果可知当信号频率在 300 MHz 以内时, 幅频曲线基本平坦, 因此可应用于标定实验中产生的标定用电流信号。

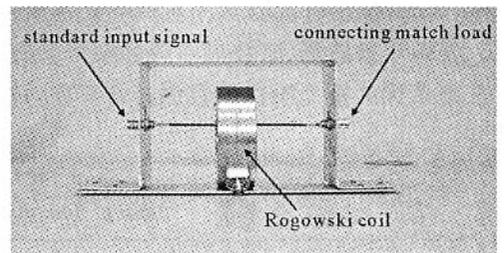


Fig. 1 Profile of the calibration equipment

图 1 标定装置外形

图 2 为采用双指数波和方波标定时输入输出波形, 图中的输入波形通过图 1 中的匹配负载端监测得到, 输出波形则通过 Rogowski 的输出端测得, 波形峰值均经过归一化处理。当输入标准信号为符合 MIL-STD-461E 标准中 RS105 规定的 HEMP 波形时, 电流探头的输出信号见图 2(a)。由该图可知, 探头能真实地反映输入信号的瞬变细节, 输入输出波形的一致性较好, 证实了其良好的高频特性。当输入标准信号为前沿小于 2ns、脉宽为 100ns 的方波时, 探头的输出信号见图 2(b)。

* 收稿日期 2005-06-20; 修订日期 2006-01-19

基金项目 国家自然科学基金资助课题(50237040; 60471013)

作者简介 谭坚文(1980—), 男, 硕士, 现从事电磁防护和电力电子方面的研究工作; artan@126.com。

该图仍能反映探头良好的高频响应,但方波响应的平顶降落(小于 10%)表明探头的低频响应不够理想。

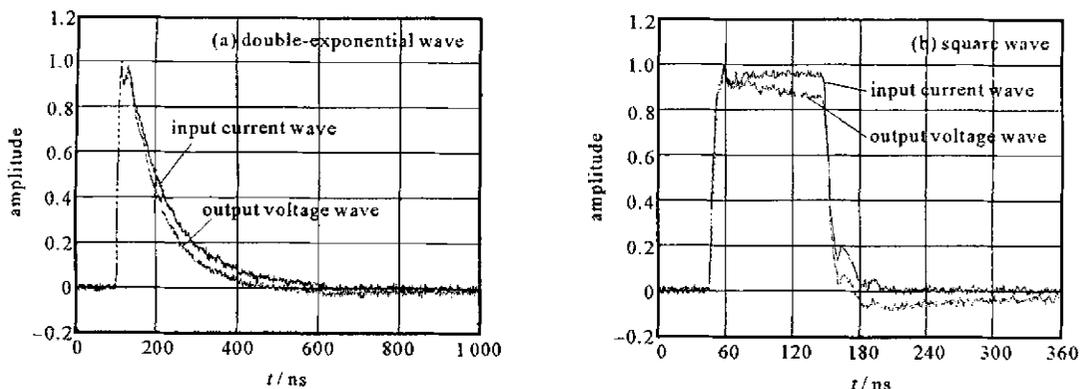


Fig.2 Comparison of input and output normalized waves when calibrating with double-exponential wave and square wave

图 2 双指数波和方法标定时输入输出波形的比较

2 时域标定数据的处理

2.1 电流探头的系统辨识

为进一步利用时域标定的结果描述探头的时域和频域响应特性,采用了基于系统辨识技术的系统参数模型估计方法^[5]。本文所研究的自积分式 Rogowski 线圈的输入输出模型可由线性常系数微分方程描述^[2]

$$MdI_m/dt = Ldi/dt + iZ \tag{1}$$

式中 i 为测量回路电流, L 为线圈电感, Z 为线圈的负载,包括线圈的电阻; M 为导线与线圈的互感; I_m 为要测的电流信号。对于标定实验得到的探头输入信号 $u(t)$ 、输出信号 $x(t)$ 通过离散化后可建立其输出误差模型

$$x(k) = \frac{B(d^{-1})}{A(d^{-1})}u(k) + \epsilon(k) \tag{2}$$

式中 $A(d^{-1}) = 1 + a_1d^{-1} + \dots + a_{n_a}d^{-n_a}$; $B(d^{-1}) = b_0 + b_1d^{-1} + \dots + b_{n_b}d^{-n_b}$; d 为时移算子 $d^{-i}u(k\Delta t) = u[(k-i)\Delta t]$, Δt 为采样间隔, $\epsilon(k)$ 为误差项。图 3 为模型的系统图^[6-7]。

由(2)式可得系统的离散传递函数

$$H(z^{-1}) = B(z^{-1})/A(z^{-1}) \tag{3}$$

式中 $A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}$; $B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b}$ 。

采用图 2(b) 的实验数据和 Matlab 系统辨识工具箱

进行系统的辨识计算,计算数据长度 N 为 1 000,采样时

间 $t = 0.6$ ns,模型阶次取 $n_a = n_b = 4$,计算所得的模型参数结果见表 1。这里忽略了测量系统的延时,故取 $n_a = n_b$ 。值得注意的是,应针对不同的模型阶次进行计算,根据模型输出信号估计值与实际测量值之间的误差大小来选择最优的模型阶次。在进行计算前,还应对实验数据进行必要的滤波和去除直流分量的处理,以提高计算精度。

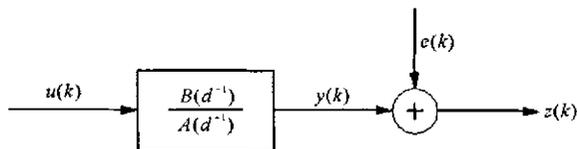


Fig.3 Block diagram of OE model

图 3 输出误差(OE)模型的系统方块图

表 1 电流探头 OE 模型辨识结果

Table 1 Identification result of current probe using OE model

n_a	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
4	1.000 0	-3.693 5	5.108 1	-3.135 6	0.720 9
n_b	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
4	0.127 9	-0.446 5	0.578 2	-0.328 5	0.068 9

系统的传递函数可由(3)式得出

$$H(z^{-1}) = \frac{0.1279 - 0.4465z^{-1} + 0.5782z^{-2} - 0.3285z^{-3} + 0.0689z^{-4}}{1 - 3.6935z^{-1} + 5.1081z^{-2} - 3.1356z^{-3} + 0.7209z^{-4}} \tag{4}$$

为验证辨识出的模型是否准确,将输入信号经过该模型后得到输出信号的估计值 $\hat{x}(k) = Z^{-1}\{H(z^{-1})Z[u(k)]\}$,图 4(a)和图 4(b)为 $\hat{x}(k)$ 与 $x(k)$ 的波形比较,由图可见辨识得到的模型能较好地描述系统的特性。

根据(4)式中的离散传递函数,可采用 Matlab 提供的 freqz() 函数计算得到系统的频域特性^[8]。但值得注

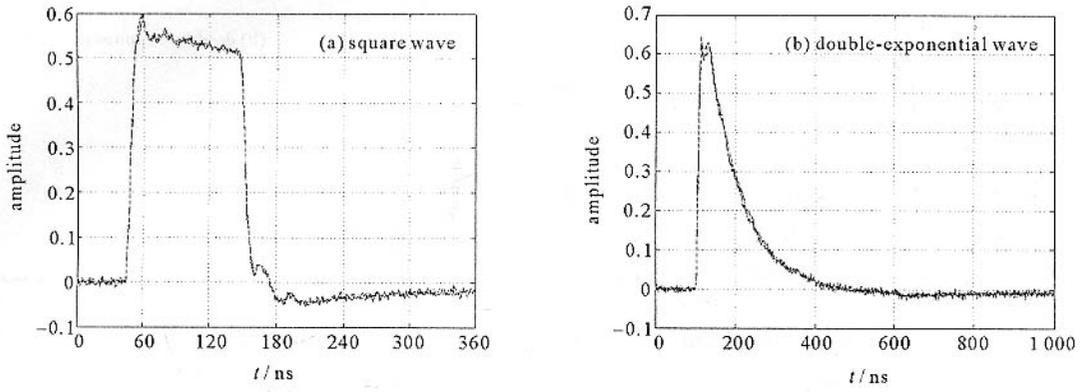


Fig.4 Comparison of output wave of model and that of practical system

图 4 模型的输出信号估计与实际系统输出信号的比较

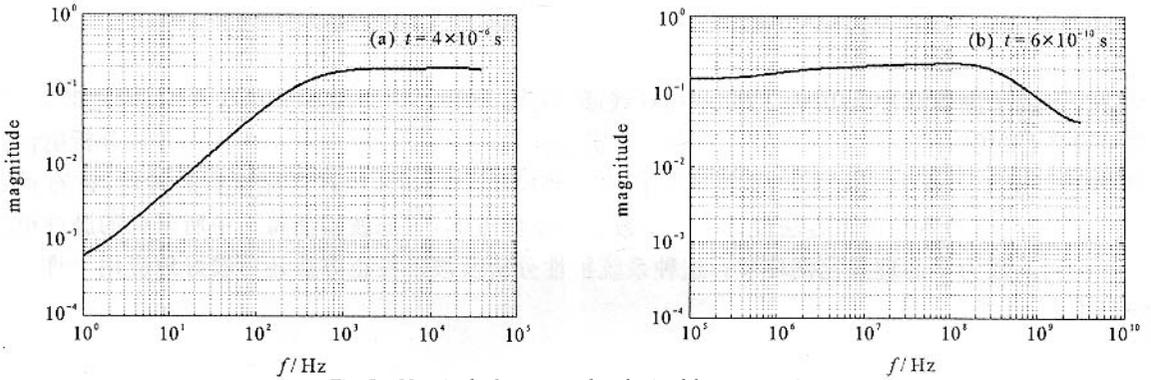


Fig.5 Magnitude-frequency plot obtained by computation

图 5 计算所得的幅频曲线

意的是,由于受采样频率的影响,一般很难由一次实验数据的计算来求得系统的全频段特性,其低频特性须由采样频率低的数据计算得来,高频特性则须使用采样频率高的实验数据。图 5 为分别采用采样时间 t 为 4×10^{-6} 和 6×10^{-10} s 的实验数据计算所得的幅频曲线。为比较计算结果的准确性,给出了如图 6 所示的频域标定实测幅频曲线。由计算结果可见,其下限频率 f_L 与测试结果基本一致,上限频率 f_H 则为 300 MHz;此外,测量系统在 200 kHz 附近的衰落也能在该曲线中体现出来,说明计算结果是比较准确的。

2.2 失真测量波形的校正

对电流探头的输出波形进行校正,即设计一个数字补偿滤波器,将探头的输出信号经滤波器后恢复成输入信号的波形。在设计该补偿滤波器时仍然采用上面的系统辨识方法,只是将探头的实际输出信号作为待设计滤波器的输入,而将探头的实际输入信号作为待设计滤波器的输出,这样设计出的滤波器实质上是电流探头的逆系统。利用图 2(b)中的实验数据,辨识得到的补偿滤波器参数见表 2,图 7(a)给出了滤波器对于方波电流测量的校正效果,图 7(b)则是采用图 2(a)中的实验数据对该滤波器校正效果的验证。无论是对于双指数波还是方波信号,设计的补偿滤波器都能较好地将电流探头的输出信号恢复成被测电流的原始波形,使得电流探头-数字补偿滤波器的测量系统成为一个理想的比例环节(比例系数为 1)。

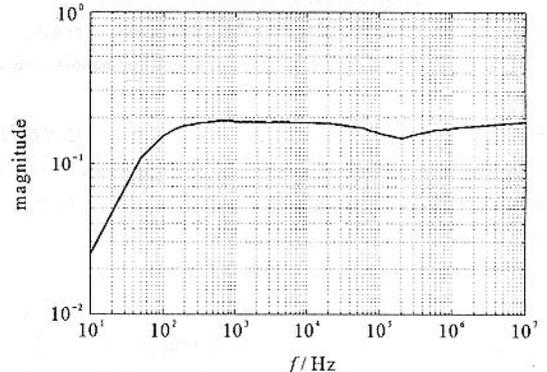


Fig.6 Magnitude-frequency plot of the current probe

图 6 电流探头的幅频曲线

表 2 补偿滤波器参数

Table 2 Parameters of compensating filter

n_a	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
4	1.000 0	-3.371 1	4.471 8	-2.788 0	0.687 4
n_b	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
4	2.136 8	-5.742 8	5.948 7	-3.030 1	0.688 1

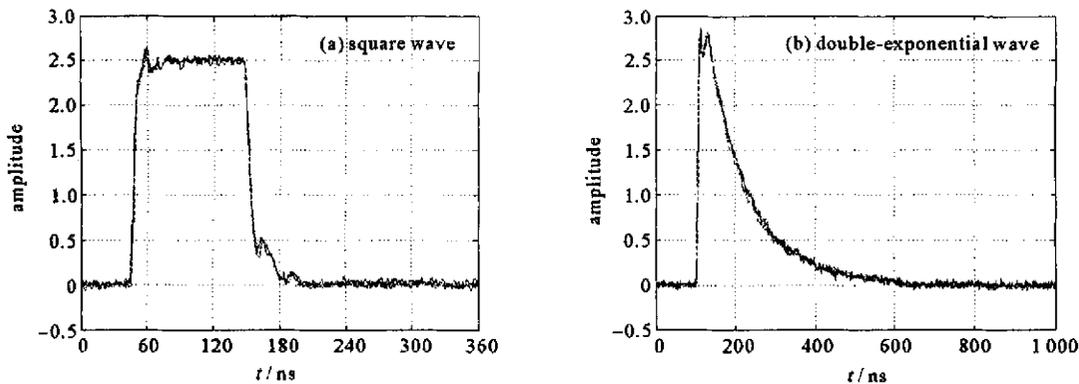


Fig.7 Correction effect of compensating filter

图 7 补偿滤波器的校正效果

3 结 论

本文研究了用于测量脉冲大电流的 Rogowski 线圈的标定问题。利用纳秒高压脉冲源、标定装置、信号源和示波器等设备,采用时域法对脉冲电流探头进行了实验标定,介绍了一种基于系统辨识方法分析电流探头特性的手段,经实验数据验证,这种方法建立的离散传递函数模型能较好地描述电流探头的特性,针对探头的低频失真,本文采用同样的系统辨识方法设计了一个数字补偿滤波器,该滤波器能将文中所研究的脉冲电流探头补偿为一个比例系数为 1 的理想比例环节。这种系统特性分析及波形校正方法还可较好地应用于许多类似的测量系统当中。

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 Z Z. Introduction to practical pulsed power technique. Xi'an: Shaanxi Technology Press, 2003)
- [2] 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)
- [3] 何津云,朱长春. 罗可夫斯基线圈频率响应特性的测量方法 [J]. 强激光与粒子束,1992,4(2):233-238.(He J Y, Zhu C C. Rogowski coil frequency response measurement. High Power Laser and Particle Beams, 1992, 4(2):233-238)
- [4] 陈淑凤,马蔚宇,马晓庆. 电磁兼容试验技术 [M]. 北京:北京邮电大学出版社,2001.(Chen S F, Ma W Y, Ma X Q. EMC test technique. Beijing: Beijing Post and Telecom University Press, 2001)
- [5] 石立华,陶宝祺,周璧华. 脉冲磁场传感器的时域标定 [J]. 计量学报,1997,18(2):140-144.(Shi L H, Tao B Q, Zhou B H. Time domain calibration of pulsed magnetic field sensors. Acta Metrologica Sinica, 1997, 18(2):140-144)
- [6] 黄俊钦. 静、动态数学模型的实用建模方法 [M]. 北京:机械工业出版社,1988.(Huang J Q. Practical modeling method of static and dynamic mathematical model. Beijing: China Machine Press, 1988)
- [7] Ljung L. System identification: Theory for the user (second edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [8] Mitra S K. Digital signal processing: A computer-based approach (second edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

Time domain calibration of pulsed current probe

TAN Jian-wen, SHI Li-hua

(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: A method of time domain calibration and data processing on pulsed current probe which is based on Rogowski coil is introduced. The result of time domain calibration using pulsed signal is compared with the frequency domain calibration result. A dynamic model of measurement system is established through system identification method according to low frequency distortion of the current probe. This method is also used to correct the distorted output signal of the probe. The validity of established model is verified by experimental data and the measurement system can be corrected into an ideal proportional system by designed compensating digital filter.

Key words: Pulsed current; Current probe; Rogowski coil; Time domain calibration; Compensation