

阻尼正弦瞬变传导抗扰度的校准实验研究

陈 畅, 许 鸣, 张孙虎, 彭 飞, 郑泽宇

(南京模拟技术研究所, 江苏 南京 210016)

[摘要] 阻尼正弦瞬变常见于电力系统、强电磁干扰中,会对敏感的电气电子设备造成损害.分析了阻尼正弦瞬变发生的机理,参照国军标GJB151A-97和GJB152A-97的要求,设计了阻尼正弦瞬变传导抗扰度的校准实验.实验合理的利用了现有仪器设备,采集到了符合标准要求的阻尼正弦波形.

[关键词] 电磁兼容, 阻尼正弦瞬变, 传导抗扰度, 校准实验

[中图分类号] TM15 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)03-0035-05

The Calibration Experiment Research on the Damped Sinusoidal Transients Conducted Susceptibility

Chen Yang, Xu Ming, Zhang Sunhu, Peng Fei, Zheng Zeyu

(Nanjing Research Institute on Simulation Technique, Nanjing 210016, China)

Abstract: The damped sinusoidal transient susceptibility in cables is usually operated in power grid and EMP. The transient pulse does harm to susceptible electronic equipment. This paper analyzes the mechanism of the damped sinusoidal pulse. The calibration experiment is designed on the basis of GJB151A-97 and GJB152A-97. The experiment consists of several reasonable equipment and qualified waves reference to the standards are gathered.

Key words: electromagnetic compatibility, damped sinusoidal transients, conducted suppression, calibration experiment

线束阻尼正弦瞬变传导抗扰度试验是GJB151A-97和GJB152A-97中规定的关于军用设备和分系统的一项电磁兼容敏感度测试.该试验考察的是受测设备的电源线和电缆承受阻尼正弦瞬变的强干扰脉冲的能力,适用于海军、空军、陆军和空间系统平台的军品.在进行军品电磁兼容测试前,必须进行校准试验,以确保试验条件、精度等满足测试强度的要求,保证测试结果的有效性.

本文基于校准实验的必要性和重要性,对阻尼正弦瞬变的机理做了简要分析,设计并实施了校准实验.

1 阻尼正弦瞬变的机理分析

当典型的RLC串联振荡电路处于欠阻尼状态,即 $R \ll 2\sqrt{L/C}$ 时,电容上的电压 u_c 会在放电过程中随着正弦函数的周期性变化而改变,其变化的趋势是以 $e^{-\alpha t}$ 为包络线的指数形式衰减^[1].实际工业生产中,由于中高压变电所的隔离刀闸切合高压母线时会产生机理相同的阻尼振荡磁场,干扰到附近的电气电子设备.而在军事领域中,阻尼正弦瞬变属于强电磁干扰(EMP)的一种表现形式,对敏感设备产生暂时性或是永久性的损害.在GJB151A-97和GJB152A-97中明确了测试所用脉冲的数模模型为:

$$I = I_p e^{-\frac{Rt}{L}} \sin(2\pi ft), \quad (1)$$

式中, f 为试验频率/Hz; t 为时间/s; Q 为阻尼因子, $Q=15 \pm 5$.

为了描绘阻尼正弦波形的特点,令 $Q=15$, $I_p=10$ A, $2\pi ft = \omega t$,得式(2),并得到如图1所示的阻尼正弦瞬变波形:

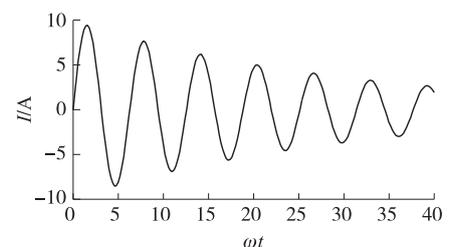


图1 阻尼正弦瞬变波形

Fig.1 Damped sinusoidal transients pulse

收稿日期:2014-11-02.

通讯联系人:许鸣,高级工程师,研究方向:电磁兼容、通信网络、无人机测控. E-mail: xm4214@sina.com.cn

$$I = 10 \cdot e^{-\frac{\omega t}{30}} \sin(\omega t). \tag{2}$$

2 军用标准的要求

线束阻尼正弦瞬变传导抗扰度试验原理是模拟由于固有谐振而在被测设备上产生的干扰电流和电压. 当被测设备暴露在强电磁脉冲(如核爆、雷电)等外部环境中时, 由于线束自身谐振和有关设备平台上的其他谐振, 被测设备的感应电流和电压波形常常表现为阻尼正弦波. 测试的频点至少应包括 10 kHz、100 kHz、1 MHz、10 MHz、30 MHz、100 MHz 以及确定的其他谐振频率^[2-4].

试验按图2所规定的最大电流 I_p 进行, 试验信号的重复率为 0.5 pps ~ 1 pps, 每个频点应施加脉冲 5 min. 最大电流 I_p 极限值是设置在对外部环境的系统级时, 被测设备内所发现的最大感应电流. 在谐振频率以下, 耦合的强度与频率成正比, 斜率为 20 dB/10 倍频程. 试验前应采用如图3所示的测试波形校准典型配置, 对发生器产生的阻尼正弦信号进行校准实验, 检验其波形是否满足要求, 一般应遵循以下步骤:

- Step 1 将发生器的频率调至 10 kHz;
- Step 2 按要求的电平调整阻尼正弦瞬变信号的幅度;
- Step 3 记下发生器的调整位置;
- Step 4 检验波形是否满足要求;
- Step 5 对要求的每个频率重复 Step 1 ~ 4 的步骤, 直至完成校准实验.

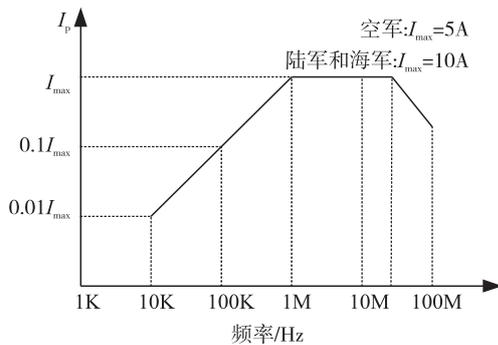


图2 电流强度
Fig.2 Current level

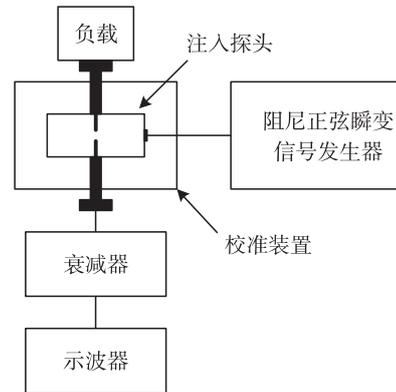


图3 标准中校准典型配置
Fig.3 Calibration setup based on standard

3 校准实验设计

校准实验的目的是对现有的阻尼正弦信号发生器所输出信号的质量进行校验, 通过监测负载上电压波形来推算是否满足标准规定的电流强度. 根据图3所示的校准典型配置, 可得出校准实验的等效电路, 如图4所示.

为保护示波器在监测模拟终端波形时不损坏, 特在校准实验中串联了 -40 dB 的衰减器. 示波器上监测到的电流强度与实际电流强度满足式(3)的关系:

$$I_{osc} = I_p \cdot 10^{\frac{40}{20}}. \tag{3}$$

以 $I_{max} = 10 \text{ A}$ 为例, 在 $f = 10 \text{ kHz}$ 时, $I_p = 0.1 \text{ A}$, 校准实验中示波器采集到的电压波形幅度应为:

$$V_{osc} = Z \cdot I_{osc} = Z \cdot I_p \cdot 10^{\frac{40}{20}} = 50 \times (0.1 \times 10^{\frac{40}{20}}) = 0.05 \text{ V}. \tag{4}$$

由此可计算出所有频点对应的标准波形的幅度.

校准实验的主要仪器设备参数如表1所示. 信号发生器由 SOLAR 公司提供, 能够生产 10 kHz、100 kHz、1 MHz、10 MHz、30 MHz 和 100 MHz 的阻尼正弦瞬变信号输出. 发生器有数码管显示, 便于记录校准细节. 图5所示为校准实验搭建后的实际布置.

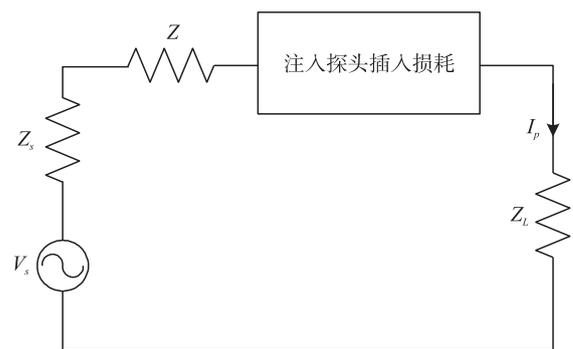


图4 校准实验等效电路

Fig.4 Calibration circuit

表1 仪器设备主要参数
Table 1 Parameter of equipments

名称	型号	主要参数
阻尼正弦信号发生器	SOLAR 9354-1	开路电压 30 V~3 200 V, 源阻抗<(0.25~50) Ω
模拟终端	BIRD 150-T-FN	最大功率 150 W, 阻抗 50 Ω
注入探头	SOLAR SO-9335-2	最大功率 100 W(持续 30 min), BNC 接口
校准装置	SOLAR SO-2925-1	频段 20 Hz ~ 100 MHz, N 型接口
衰减器	SOLAR SO-9410-1	衰减 40 dB, 阻抗 50 Ω
示波器	LeCroy WAVEJET 352	带宽 500 MHz, 输入阻抗 50 Ω, 有存储功能

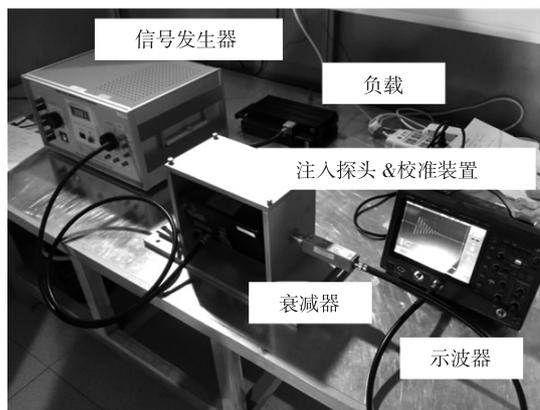


图5 校准实验布置

Fig.5 Calibration setup

校准实验的操作步骤如图6所示. 需要注意的是, 在每一次波形校准之前, 都必须对发生器进行一次放电过程, 释放残存的电量, 以确保操作人员的安全.

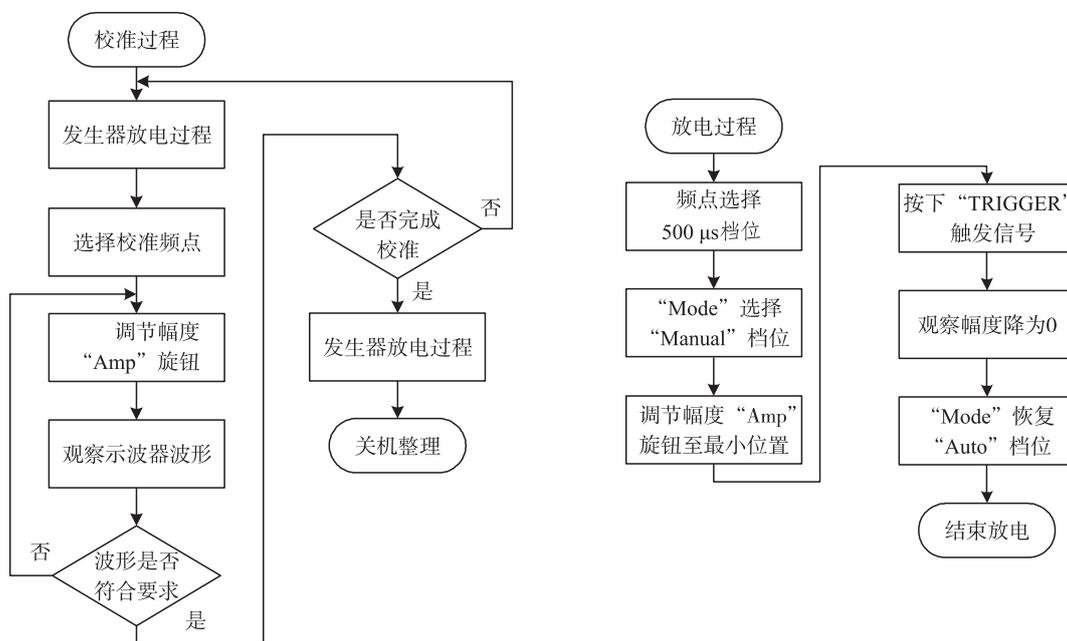


图6 操作流程

Fig.6 Flow chart

4 校准结果记录与误差分析

本次校准实验选择标准中陆军和海军的极限值进行校准, 即 $I_{max}=10$ A. 考察的频点为 10 kHz、100 kHz、1 MHz、10 MHz、30 MHz 和 100 MHz, 信号发生器输出波形的电流强度 0.1 A ~ 10 A, 由式(4)计算示波器采集到的幅度应为 0.05 V ~ 1.5 V. 实验中除需记录存储波形外, 还需记录注入探头的端口和发生器的数码管显示度数, 方便测试时阻尼信号发生器的使用.

本次校准实验使用了注入探头的 Port1 和 Port4 端口, 校准结果如表 2 和图 7 所示, 校准结果与预期结果相符. 所采集到阻尼正弦瞬变波形的频率和幅度与标准要求相比, 误差均在 $\pm 5\%$ 之内. 存在误差的主要原因为^[5]:

(1) 示波器误差: 示波器虽经计量检定合格, 但在幅度测量、时间测量和频带测量上存在 $U=0.3\% \sim 1\%$ ($k=2$) 的扩展不确定度;

(2) 信号发生器误差: 信号发生器本身会存在输出幅度误差及波形失真误差的可能, 阻尼因子也存在 $U=1.5\%$ ($k=2$) 的不确定度;

(3) 注入探头与校准装置误差: 注入探头会带来校准系数误差、探头摆放位置误差, 校准装置的插入

损耗及阻抗的不匹配也会引入误差;

(4)传输线缆、衰减器和模拟终端误差:射频同轴电缆及衰减器的衰减量也存在误差,而模拟终端虽经计量检定合格,其电阻值也存在 $U=0.05\ \Omega(k=2)$ 的不确定度.

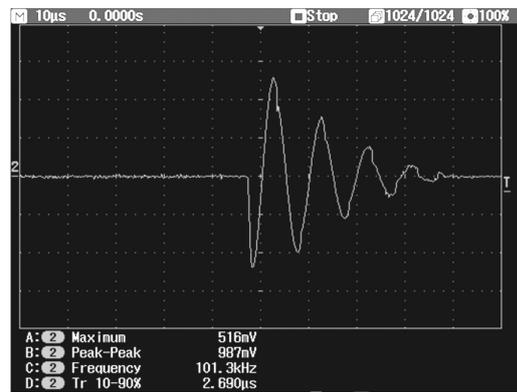
表2 校准结果

Table 2 Result of calibration

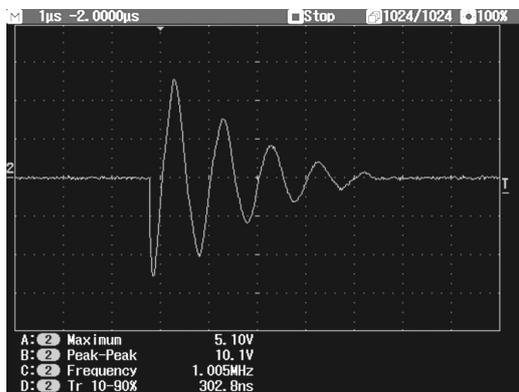
要求		端口选择	发生器读数	校准数据				示意图
频率	幅度			频率	误差	幅度	误差	
10 kHz	0.05 V		2	10.5 kHz	+5.00%	51.6 mV	+3.20%	图 7(a)
100 kHz	0.5 V		40	101.3 kHz	+1.30%	516 mV	+3.20%	图 7(b)
1 MHz	5 V	Port1(1:1)	547	1.005 MHz	+0.50%	5.10 mV	+2.00%	图 7(c)
10 MHz	5 V		700	10.32 MHz	+3.20%	5.16 V	+3.20%	图 7(d)
30 MHz	5 V		623	28.40 MHz	+3.16%	5.16 V	+3.20%	图 7(e)
100 MHz	1.5 V	Port4(1:3)	338	100.1 MHz	+0.10%	1.49 V	-0.67%	图 7(f)



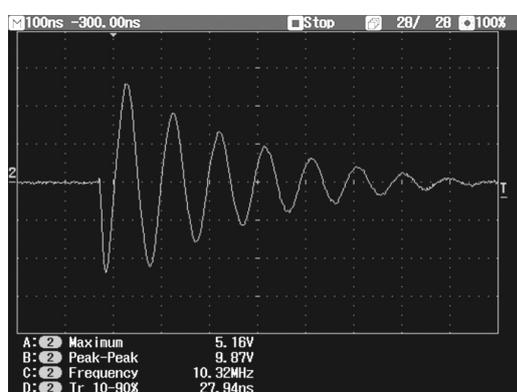
(a) 10 kHz波形



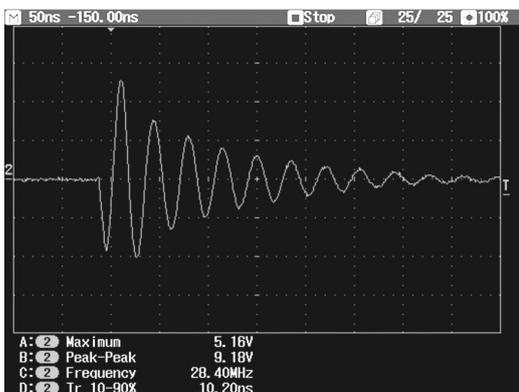
(b) 100 kHz波形



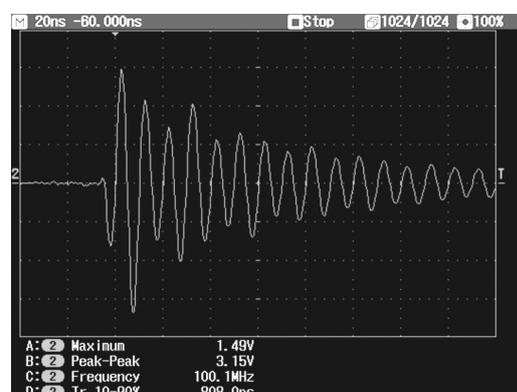
(c) 1 MHz波形



(d) 10 MHz波形



(e) 30 MHz波形



(f) 100 MHz波形

图7 校准波形

Fig.7 Waves of calibration

5 结语

线束阻尼正弦瞬变抗扰度试验是国军标中明确规定的传导抗扰度项目之一,测试进行前,必须进行校准实验^[6-8],以保证测试结果的有效性.本文参照标准中校准的要求,设计了校准实验.校准结果与预期结果相符,所采集到阻尼正弦瞬变波形的频率和幅度与标准要求相比,误差均在 $\pm 5\%$ 之内.同时设计了校准装置与信号发生器的设置,分析了误差来源,为该项目进行测试提供了有效可行的操作指导.

本文为阻尼正弦瞬变传导抗扰度的进一步研究作了铺垫.后续将着重研究电气电子产品因阻尼正弦瞬变抗扰而失效的机理和解决方法.

[参考文献](References)

- [1] 陈洁,蒋全兴,蒋宇. 阻尼正弦瞬变信号源研制中的几个问题[J]. 机械制造与自动化,2004,33(3):78-81.
Chen Jie, Jiang Quanxing, Jiang Yu. Some questions in research of the damped sinusoid source[J]. Machine Building & Automation, 2004, 33(3):78-81. (in Chinese)
- [2] 国防科学技术委员会. GJB 151A-97 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求[S]. 北京:中国标准出版社,1997.
COSTIND. GJB 151A-97 Electromagnetic emission and susceptibility requirement for military equipment and subsystems [S]. Beijing: China Standard Press, 1997. (in Chinese)
- [3] 国防科学技术委员会. GJB 152A-97 军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量[S]. 北京:中国标准出版社,1997.
COSTIND. GJB 152A-97 Measurement of electromagnetic emission and susceptibility requirement for military equipment and subsystems[S]. Beijing: China Standard Press, 1997. (in Chinese)
- [4] Shim Jongjoo. Circuitual modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2010, 52(3):566-577.
- [5] 杜爱华. CS116测试不确定度评估和应用[J]. 舰船电子工程,2010,30(8):168-170.
Du Aihua. Evaluation and application of uncertainty in test of CS116[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(8):168-170. (in Chinese)
- [6] 陈旸. 电快速脉冲群引起的辐射电磁干扰机理分析及其应用[D]. 南京:南京师范大学电气与自动化工程学院,2014.
Chen Yang. Study on mechanism and application of radiated EM noise caused by the EFT burst[J]. Nanjing: School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, 2014. (in Chinese)
- [7] 陈旸,赵阳,黄学军,等. 线束串扰的电磁骚扰应用仿真研究[J]. 电子质量,2013(9):74-78.
Chen Yang, Zhao Yang, Huang Xuejun, et al. Crosstalk from cable bundles study based on TLM algorithm[J]. Electronics Technology & Quality Engineering, 2013(9):74-78. (in Chinese)
- [8] 苏东林,王东方,王明皓,等. 机载天线电磁兼容性分析[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(2):228-230.
Su Donglin, Wang Dongfang, Wang Minghao, et al. Electromagnetic compatibility analysis on plane antennas[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(2):228-230. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]