

引用格式: 王禹博, 谢彦召, 葛延鹏, 等. 一种应用于脉冲电流注入的线路阻抗稳定网络[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(2): 204-210.

WANG Y B, XIE Y Z, GE Y P, et al. A line impedance stabilization network for pulse current injection[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(2): 204-210.

# 一种应用于脉冲电流注入的线路 阻抗稳定网络



扫码阅读全文

王禹博<sup>1</sup>, 谢彦召<sup>1</sup>, 葛延鹏<sup>1</sup>, 吴钰颖<sup>1</sup>, 李泽同<sup>1</sup>, 王硕威<sup>2</sup>, 王文卓<sup>2</sup>

1 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

**摘要:** [目的] 针对现有线路阻抗稳定网络(LISN)在电磁脉冲防护能力上的不足, 提出一款适用于电气电子设备脉冲电流注入(PCI)试验的LISN。[方法] 通过PSpice时域和频域仿真, 结合工程设计要求, 针对PCI试验中脉冲电流峰值高、上升快等特点, 在现有基础上改良LISN的电路拓扑和物理结构, 使其同时具有良好的纳秒脉冲防护性能和阻抗稳定能力, 并设计开展脉冲电流防护性能测试和阻抗曲线测试试验。[结果] 试验验证结果表明, 该LISN可以使电流衰减到注入的脉冲电流值的1/60; 试验结果与GJB 151B—2013中5  $\mu$ H型LISN的阻抗曲线之间的误差小于5%。[结论] 该LISN具有较好的阻抗稳定能力和去耦能力, 可用于电气电子设备的PCI试验, 以保护电源并提高试验的可重复性。

**关键词:** 电磁脉冲; 传导干扰; 去耦设备; 脉冲电流注入; 线路阻抗稳定网络

中图分类号: U665.26; TM862

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02449

## A line impedance stabilization network for pulse current injection

WANG Yubo<sup>1</sup>, XIE Yanzhao<sup>1</sup>, GE Yanpeng<sup>1</sup>, WU Yuying<sup>1</sup>, LI Zetong<sup>1</sup>, WANG Shuowei<sup>2</sup>, WANG Wenzhuo<sup>2</sup>

1 School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

**Abstract:** [Objective] Aiming at the deficiency of the existing line impedance stability network (LISN) in the electromagnetic pulse protection capability, a LISN suitable for the pulse current injection (PCI) test of electrical and electronic equipment is proposed. [Methods] Aiming at the characteristics of high peak value and fast rise of the pulse current in PCI testing, the circuit structure and physical structure of the LISN are improved on the existing basis through PSpice time-domain and frequency-domain simulation combined with engineering design requirements, thereby giving it good nanosecond pulse protection performance and impedance stability at the same time. Pulse current protection performance test and impedance curve test experiments are then designed and carried out. [Results] The experimental results show that the improved LISN can attenuate the injected pulse current by 60 times, while the error of its impedance curve is less than 5% compared with the Type 5  $\mu$ H LISN in GJB 151B-2013. [Conclusions] The proposed LISN has good impedance stability and decoupling ability, and can be used in the PCI testing of electrical and electronic equipment in order to protect the power supply and improve the repeatability of testing.

**Key words:** electromagnetic pulse; conducted interference; decoupling equipment; pulse current injection; line impedance stabilization network

## 0 引言

以高空核爆电磁脉冲(nuclear electromagnetic pulse, NEMP)为代表的电磁脉冲(electromagnetic

pulse, EMP)具有场强高、频谱宽和覆盖区域广等特点<sup>[1]</sup>, 对于舰载电气电子设备而言, 其是一个巨大的威胁。现有的研究成果表明, 电磁脉冲易经过天线、孔缝、线缆等耦合作用进入电气电子设

收稿日期: 2021-07-12

修回日期: 2021-10-11

网络首发时间: 2023-04-03 10:22

基金项目: 国防科技基础加强计划资助项目(2021-JCJQ-ZD-046-00)

作者简介: 王禹博, 男, 1996年生, 硕士生。研究方向: 电磁效应与电磁防护。E-mail: 291417989@qq.com

谢彦召, 男, 1973年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 电磁环境与电磁安全。E-mail: yanzhao.xie@gmail.com

葛延鹏, 男, 1991年生, 博士生。研究方向: 电磁防护技术。E-mail: yanpengge91@163.com

\*通信作者: 谢彦召

备内部，引起高幅值的感应电压和电流，进而对设备造成暂时或永久性损伤<sup>[2-5]</sup>。在 GJB 8848—2016《系统电磁环境效应试验方法》中，针对飞机、舰船、空间和地面系统的 EMP 效应及加固性能验证，规定了 3 种试验方法，包括威胁级辐照试验方法、脉冲电流注入 (pulsed current injection, PCI) 试验方法和连续波 (continuous waves, CW) 辐照试验方法<sup>[6]</sup>，其中 PCI 可产生威胁级传导电流和非线性效应<sup>[7]</sup>，是目前应用最为广泛的试验方法。在进行 PCI 试验时，为了更贴合设备受到电磁脉冲干扰时的真实状态，被试设备 (equipment under test, EUT) 由外部电网进行供电，因此，在试验过程中，脉冲电流极有可能耦合至外部电网进而形成破坏，必须在 PCI 试验回路和外部负载之间串联去耦设备，以利用其良好的电磁脉冲防护能力来保护外部电网。

线路阻抗稳定网络 (line impedance stability network, LISN) 即人工电源网络，在设备的电磁兼容性试验中，为客观地考查 EUT 产生的电磁干扰，需在 EUT 与供电电源间加入 LISN，以达到隔离干扰和稳定电源阻抗的目的，从而使试验结果具有重复性与可比性<sup>[8-10]</sup>，因此，在 GJB 151B—2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》和 CISPR 16-1-2<sup>[11]</sup> 中均规定，设备进行相关电磁兼容性试验时必须使用 LISN。

针对现有 LISN 的不足，国内外电磁兼容领域的学者一直在开展相关研究工作。在国外，Okuyama 等<sup>[12]</sup> 改良并设计了一款适用于甚高频的 LISN，从而拓宽了 LISN 的使用频段；Mitalkumar 等<sup>[13]</sup> 对标准 LISN 的参数进行了优化，从而研发了一款阻抗曲线更平滑的三相 LISN；Ibuchi 等<sup>[14]</sup> 分析了寄生参数对 LISN 高频响应的影响，提出优化建议，

研制出一款寄生参数较小的 LISN；还有其他国外学者研究了 LISN 不同接地方式对试验结果的影响<sup>[15]</sup> 以及精确测量 LISN 阻抗曲线的优化方法<sup>[16]</sup> 等。在国内，岳玲玲<sup>[17]</sup> 设计了一款用于传导干扰测试的多功能 LISN；赵品彰等<sup>[18]</sup> 探讨了采用 LISN 进行测试的校准方法。由此可见，国内外尚无学者从 PCI 试验的应用背景出发，研制一款适用于纳秒级的高峰值脉冲且兼具良好去耦性能和阻抗稳定能力的 LISN。

为了满足 GJB 8848—2016 中关于 PCI 试验对去耦能力的要求，并进一步提高试验的重复性与可比性，本文拟研制一款适用于电气电子设备 PCI 试验的 LISN，使其既可作为去耦设备使用，还具备线路阻抗稳定能力。首先，从电路结构出发，基于 PSpice 电路仿真，在现有基础上改良 LISN 的电路结构，使其同时具有良好的纳秒脉冲防护性能和阻抗稳定能力；然后，根据所设计电路进行相关物理布局和器件设计，使其具有良好的抗饱和能力和高频响应，且其绝缘水平可以耐受电磁脉冲的高电压水平；最后，基于 LISN 实物进行脉冲电流防护性能测试和阻抗曲线测试，以验证设计指标。

## 1 新型 LISN 电路结构设计

### 1.1 常规 LISN 电路结构简介

目前，CISPR 16-1-2 和 GJB 151B—2013 等标准均对 LISN 进行了详细说明，并按照 LISN 的阻抗特性进行了分类。不同阻抗特性的 LISN 所适用的频率范围也有所不同，以 GJB 151B—2013 中的 5  $\mu\text{H}$  型 LISN 为例 (图 1)，其基本电路为一个  $\pi$  型滤波结构，具体作用为：

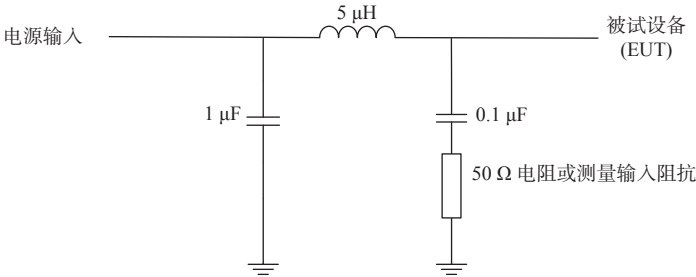


图 1 5  $\mu\text{H}$  型 LISN 电路结构图<sup>[8]</sup>  
Fig. 1 Type 5  $\mu\text{H}$  LISN circuit diagram<sup>[8]</sup>

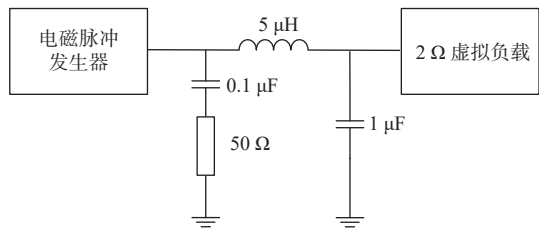
1) EUT 通过 LISN 供电，电感在高频下为高阻状态，从而减小了电源内阻变化带来的影响。即 LISN 为试验回路提供了限定的标准阻抗，从而提升试验的重复性与可比性。

2) LISN 可以隔开 EUT 与电源之间产生的谐波。如果主电源过多地耦合来自 EUT 端的谐波，可能将干扰电源上其他装置的正常运作；如果 EUT 端受到来自电源端谐波的影响，则可能影响

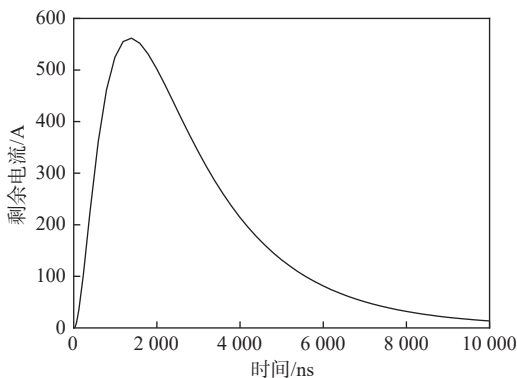
EUT 的试验结果。

1.2 新型 LISN 电路结构设计及仿真验证

针对 GJB 151B—2013 中 5 μH 型 LISN 的电路结构,在 PSpice 中进行电磁脉冲防护性能的仿真计算(图 2),其仿真配置参考 GJB 8848—2016 中电磁脉冲防护性能测试方法,负载采用 2 Ω 虚拟负载,注入方式采用最严酷的直接注入。该仿真电路主要由电磁脉冲发生器、5 μH 型 LISN 和 2 Ω 电阻组成,其中脉冲发生器在 60 Ω 负载短路时的输出为上升时间 20 ns、半高宽 550 ns、峰值 2 500 A 的双指数波,符合 GJB 8848—2016 的要求。通过仿真计算,2 Ω 电阻上的剩余电流峰值高达 560 A,这在实际应用中无疑是外部电网的一个极大威胁,因此,为提高 LISN 的电磁脉冲防护性能,其电路结构还需进一步设计优化。



(a) 仿真配置



(b) 剩余电流提取结果

图 2 5 μH 型 LISN 电磁脉冲防护性能仿真

Fig. 2 Simulation of electromagnetic pulse protection performance of type 5μH LISN

考虑到 PCI 试验中电磁脉冲的前沿较快(上升时间小于等于 20 ns)、峰值较高且含较多的高频分量,本文设计了一款匝间绝缘增强型空芯电感(见 1.3 节),以避免 LISN 在使用中电感值不稳定或匝间击穿的问题,但受限于工程实际,LISN 中的电感值不宜太大。本文以 GJB 151B—2013 中 5 μH 型 LISN 的电路结构为基础进行优化设计,并在常见的两级 LC 滤波结构上增加 1 个 5 μH 的电感  $L_1$ ,该新型 LISN 的单相电路结构如图 3 所示,其中  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $L_2$ 、 $R_1$  分别为滤波电容、隔离电容、隔离电感和稳值电阻。

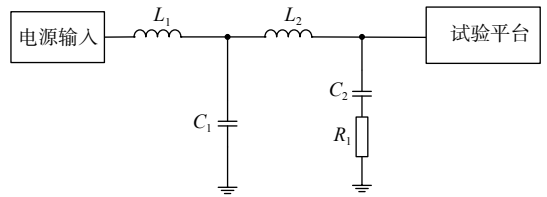


图 3 新型 LISN 单相电路结构

Fig. 3 New type LISN single-phase circuit structure

按照图 2(a)的仿真配置,对新型 LISN 的电路结构进行参数扫描,综合考虑不同参数配置下的剩余电流结果和工程实际,最终确定了新型 LISN 的参数(表 1)。

表 1 LISN 参数

Table 1 LISN parameters

| 参数                | 数值   |
|-------------------|------|
| $L_1/\mu\text{H}$ | 5    |
| $L_2/\mu\text{H}$ | 5    |
| $C_1/\mu\text{F}$ | 30   |
| $C_2/\mu\text{F}$ | 0.22 |
| $R_1/\Omega$      | 50   |

注入电流和剩余电流的仿真结果如图 4 所示,从图中可以看出,注入至 LISN 前端的注入电流峰值出现在 0.19 μs 处,且幅值高达 1 806 A;剩余电流峰值则出现在 9.57 μs 处,且幅值降至 29.8 A,故该电路结构的电磁脉冲防护性能明显优于 GJB 151B—2013 中的 5 μH 型 LISN,可以在波形陡度和峰值方面显著减小 PCI 试验中电磁脉冲对外部电网的干扰。

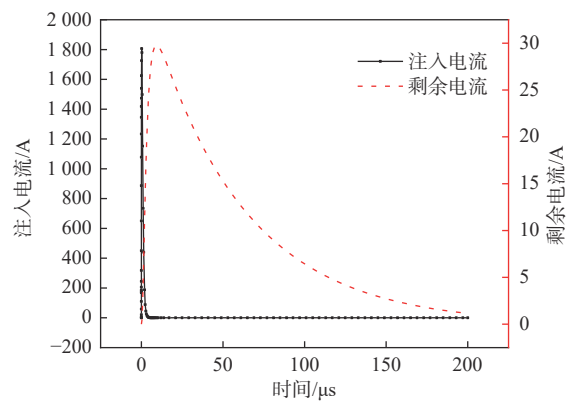


图 4 新型 LISN 电磁脉冲防护性能仿真结果

Fig. 4 Simulation results of electromagnetic pulse protection performance of new type LISN

由图 3 的电路结构可知,从 PCI 回路向外部电网看,假设此时外部电网内阻为  $R_2$ ,将外部电网和 LISN 视为一个整体,则其内阻  $Z_{in}$  为

$$Z_{in} = \left( \frac{1}{j\omega C_2} + R_1 \right) // \left[ j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_1} // (j\omega L_1 + R_2) \right] \quad (1)$$

式中:  $j$  为复数单位;  $\omega$  为角频率;  $//$  为并联运算符

号。在 LISN 工作频段(GJB 151B—2013 规定为 10 kHz~30 MHz)中,由于 $1/(j\omega C_2) \ll R_1$ ,故可忽略较小项;同理,由于 $1/(j\omega C_1)$ 较小, $j\omega L_2$ 较大,亦可忽略较小项,故式(1)可改写为

$$Z_{in} = R_1 / j\omega L_2 \tag{2}$$

由式(2)可知,内阻  $Z_{in}$  与  $50\ \Omega/5\ \mu\text{H}$  的阻抗等效,这与 GJB 151B—2013 中  $5\ \mu\text{H}$  型 LISN 的阻抗相同,与 CISPR 16-1-2 中  $50\ \Omega/(5\ \mu\text{H}+1\ \Omega)$  型 LISN 的阻抗也很相近。理论分析结果表明,该电路结构的阻抗曲线可满足 GJB 151B—2013 和 CISPR 16-1-2 的要求,实现稳定线路阻抗的目的。

下文将基于 PSpice 仿真进一步验证上述推导所得结论,仿真配置及计算结果如图 5 所示。在 EUT 端口设置交流源进行扫频分析,将  $R_2$  分别设为 2, 50, 10000  $\Omega$ , 分析计算 LISN 的单相结构,进而得到阻抗曲线,其中蓝线、红线和黄线分别为  $R_2=2, 50, 10000\ \Omega$  时的阻抗-频率曲线,紫线为 GJB 151B—2013 中  $5\ \mu\text{H}$  型 LISN 的阻抗-频率曲线。由图 5 可知,当  $R_2$  取不同电阻值时,阻抗曲线基本重合,与 CISPR 16-1-2 中  $50\ \Omega/(5\ \mu\text{H}+1\ \Omega)$  型 LISN 的阻抗-频率曲线也基本一致,故该结构可以实现稳定线路阻抗的目的。

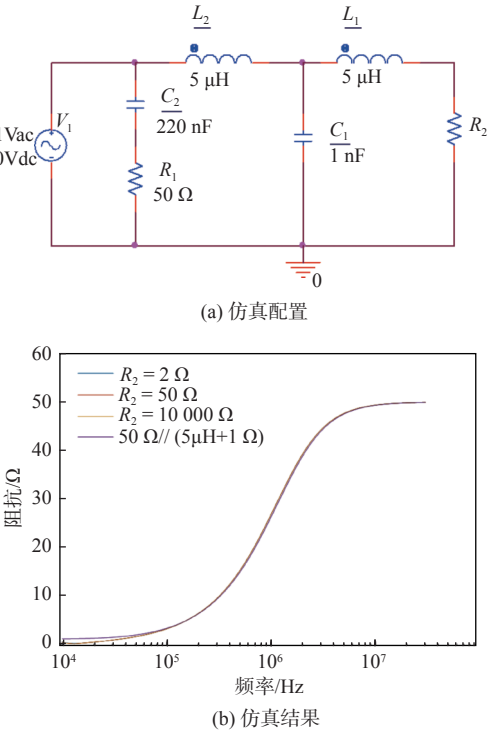


图 5 新型 LISN 的阻抗特性仿真  
Fig. 5 Simulation of impedance characteristics of new type LISN

1.3 LISN 的物理布局和部件选择

图 6 所示为 LISN 的整体物理布局示意图。为了保证 LISN 的绝缘水平满足 PCI 试验要求,本

文取消了传统 LISN 同轴测量端口的设计,而是在 LISN 内部放置了 50  $\Omega$  电阻。图中:1 为不锈钢外壳;2 为两个匝间的绝缘增强型 5  $\mu\text{H}$  空芯电感;3 为 30  $\mu\text{F}$  电容,4 为 220 nF 电容,且皆选用了高频下较稳定的聚丙烯薄膜电容;5 为两个高耐压穿墙接头,用以加强 LISN 进线和出线的绝缘水平;6 为高压金属氧化膜电阻,具有较高的耐压和较好的高频性能。

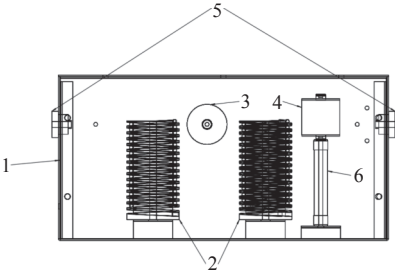


图 6 LISN 的物理布局  
Fig. 6 The physical layout of LISN

在 LISN 的器件选型与设计过程中,需时刻注意电磁脉冲波形幅值较高、频谱较宽的特点,为了避免电感在大电流和高频下发生饱和和效应,本文拟采用空芯电感技术。同时,在幅值较高的纳秒级脉冲电压波作用下,还需注意电感匝间较大电压差的影响,为避免此时电感发生匝间击穿,本文设计了如图 7 所示的空芯电感。该电感基于螺线管设计,电感匝间由尼龙层予以隔离,以减小电感发生匝间击穿的可能性。电感上的铜导线截面积为 16 mm<sup>2</sup>,以保证电感具有较大的载流量。图 7 中:  $R$  为螺线管横截面半径;  $l$  为螺线管长度。

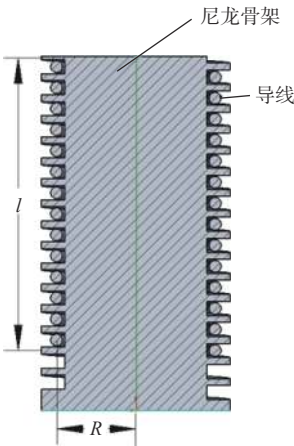


图 7 电感线圈的剖面图  
Fig. 7 Section of inductance coil

螺线管线圈电感量的计算公式为

$$L = \frac{k\mu N^2 S}{l} \tag{3}$$

式中:  $L$  为螺线管电感量,单位: H;  $k$  为由  $2R/l$  决定的系数;  $\mu$  为螺线圈内部磁导率,没有磁芯的情

况下等于真空磁导率 $\mu_0$ ,单位: H/m;  $N$ 为螺线管上的线圈匝数;  $S$ 为螺线管横截面的面积,单位:  $\text{m}^2$ 。

根据箱体的几何尺寸,  $R=0.035\text{ m}$ ,  $l=0.14\text{ m}$ , 即  $2R/l=0.5$ , 故  $k=0.82$ , 则电感匝数  $N$  为

$$N = \sqrt{\frac{IL}{k\mu S}} \quad (4)$$

取  $L=5\text{ }\mu\text{H}$ , 可得  $N=13.3$ , 在实际绕制中匝数向上取整为 14, 该空芯电感的最终实测电感值为  $5.2\text{ }\mu\text{H}$ 。

## 2 LISN 性能试验验证

### 2.1 去耦性能试验验证

为确保该 LISN 在 PCI 注入试验中可减小脉冲电流对外部电网的耦合, 基于 GJB 8848—2016<sup>[6]</sup> 和 MIL-STD-188-125<sup>[19]</sup> 中针对 EMP 防护器件的测试方法, 本文设计了如图 8 所示的试验配置, 其中电磁脉冲发生器在  $60\text{ }\Omega$  电阻负载下的短路电流输出峰值为  $2\text{ }500\text{ A}$ , 上升时间小于等于  $20\text{ ns}$ , 半高宽在  $500\sim 550\text{ ns}$  之间, 可满足 GJB 8848—2016 的要求。

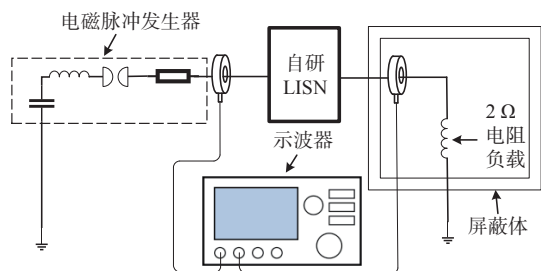


图 8 LISN 去耦性能试验配置

Fig. 8 Configuration for LISN decoupling performance test

根据电磁脉冲发生器的原理(图 9), 对于现代脉冲功率技术, 通常采用 Marx 发生器实现高峰值的双指数脉冲。考虑到 EMP 信号的上升时间较快, 故需在传统 Marx 发生器结构上加入峰化回路。图 9 中:  $C_m$  为 Marx 主回路导通时的等效储能电容;  $S_1$  为主回路中的气体开关;  $L_m$  为主回路导通时的电感;  $C_p$  为峰化回路的电容;  $S_2$  为峰化开关;  $L_p$  为峰化开关导通时的电感和峰化回路的杂散电感;  $R$  为 EMP 发生器的负载。EMP 发生器中 Marx 主回路的电容通过高压直流源进行充电, 当  $t=0$  时,  $S_1$  闭合,  $C_m$  对  $C_p$  充电; 当  $t=\omega/2\pi$  时,  $C_p$  上的电压达到峰化开关的击穿电压  $V_0$ ,  $S_2$  导通, 此时由于峰化电容  $C_p$  的容值远远小于主回路电容  $C_m$ , 故可输出上升更快的脉冲。

图 10 所示为实际搭建的试验平台, 本文将对新型 LISN 进行单相试验, 采集 LISN 前端的注入

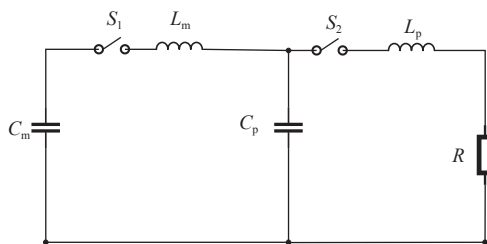


图 9 EMP 脉冲发生器的简化电路结构

Fig. 9 Simplified circuit structure of EMP pulse generator

电流和 LISN 后端的剩余电流。基于测量带宽为  $150\text{ MHz}$  的罗氏线圈即可实现电流测量, 罗氏线圈所采集的信号通过衰减器连接至泰克公司的 DPO3054 示波器(采样率  $2.5\text{ GS/s}$ , 带宽  $500\text{ MHz}$ ), 并由示波器进行数据记录。试验过程中, LISN 未发生异常放电, 注入电流和剩余电流实测结果与 PSpice 时域仿真结果的对比情况如图 11 所示, 其中蓝色曲线为示波器采集的电流时域波形, 红色曲线为 PSpice 时域仿真结果。由图 11 可知, 实测值与理论计算值符合良好, 注入电流约为  $1\text{ }800\text{ A}$ , 经过 LISN 滤波后, 剩余电流可降至  $30\text{ A}$  左右, 大约衰减至注入值的  $1/60$ , 故其具有良好的去耦能力。

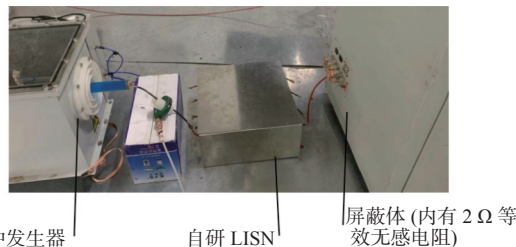
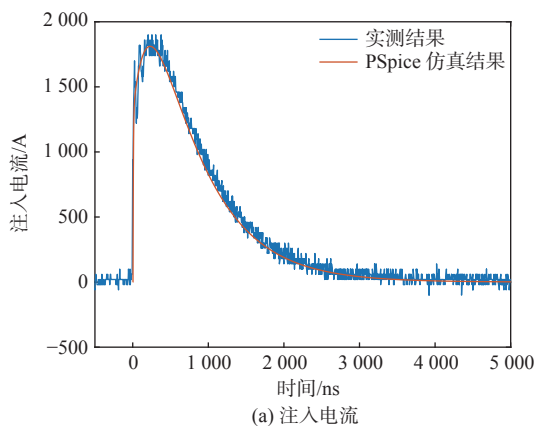


图 10 LISN 去耦性能试验平台

Fig. 10 LISN decoupling performance test platform

### 2.2 阻抗曲线实测

与现有的去耦设备相比, LISN 的优势体现在其具有限定的标准阻抗。本文将使用矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)进行阻抗-频率曲线的测量, 如图 12 所示, 将矢量网络分析仪连接至 LISN 的外部电网输出端, 获得反射系数  $S_{11}$ , 按式(5)计算对应频点的阻抗值。



(a) 注入电流

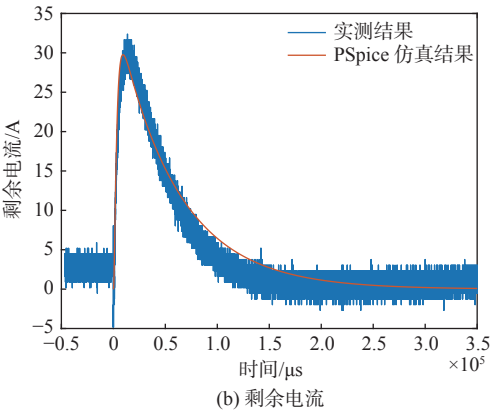


图 11 去耦性能的试验结果与仿真结果对比

Fig. 11 Comparison between test results and simulation results of decoupling performance

$$Z = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \tag{5}$$

式中： $Z$  为对应频点的阻抗值； $Z_0$  为矢量网络分析仪的测量参考阻抗，本文取值为  $50\ \Omega$ 。

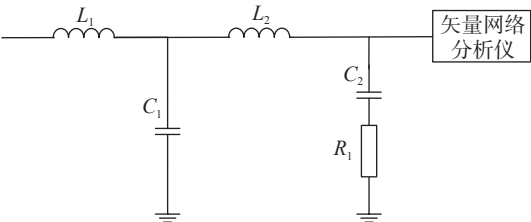


图 12 LISN 阻抗曲线测量方法

Fig. 12 Measurement method of LISN impedance curve

通过变换后，即可得到新型 LISN 阻抗曲线的实测值，与 GJB 151B—2013 中  $5\ \mu\text{H}$  型 LISN 阻抗曲线的对比，结果如图 13 所示。由图可以看到，新型 LISN 与  $5\ \mu\text{H}$  型 LISN 阻抗曲线之间的差值小于 5%，且可在  $4\sim30\ \text{MHz}$  频段将其阻抗稳定至  $50\ \Omega$ 。GJB 151B—2013 中要求 LISN 实测阻抗曲线与规定曲线之间的误差应在  $\pm 20\%$  以内，故该新型 LISN 具有阻抗稳定能力。

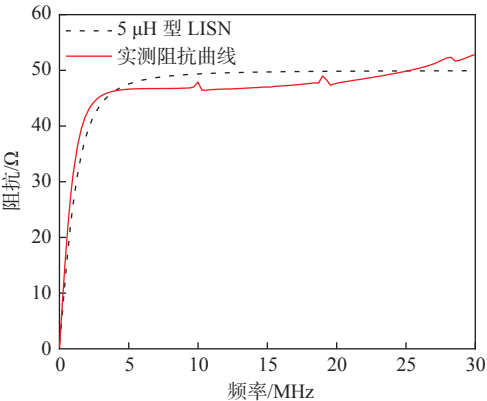


图 13 新型 LISN 阻抗曲线的实测值与标准值对比

Fig. 13 Comparison between measured results of new type LISN impedance curve and standard curve

3 结 语

本文通过电路仿真设计和物理布局设计，新研了一款可耐受高幅值快前沿脉冲的 LISN，并开展了电磁脉冲防护性能测试试验和阻抗曲线测试试验验证。实测结果表明，该新型 LISN 具有良好的去耦能力和阻抗稳定能力，可作为去耦设备，应用于舰载电气电子设备的脉冲电流注入试验，以避免试验中的脉冲电流对外部电网的不良影响，从而提高试验的稳定性和可重复性。

参考文献：

[1] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781-787.  
XIE Y Z, WANG Z J, WANG Q S, et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: a review [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(8): 781-787 (in Chinese).

[2] TESCHE F M, BARNES P R. Extrapolation of measured power system response data to high-altitude EMP excitation [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1988, 30(3): 386-392.

[3] RADASKY W A. Introduction to the special issue on high-altitude electromagnetic pulse (HEMP)[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(3): 410-411.

[4] SHI L H, ZHANG X, SUN Z, et al. An overview of the HEMP research in China[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(3): 422-430.

[5] ZHANG J, KOO J, MOSELEY R, et al. Modeling injection of electrical fast transients into power and IO pins of ICs[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(6): 1576-1584.

[6] 国防科技工业局. 系统电磁环境效应试验方法: GJB 8848—2016[S]. 北京: 中央军委装备发展部, 2016.  
State Administration of Science, Technology and Industry for National defense. Electromagnetic environmental effects test methods for systems: GJB 8848-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 65-77 (in Chinese).

[7] 崔志同. HEMP 脉冲电流注入的仿真与实验研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.  
CUI Z T. Simulation and experimental research on HEMP pulsed current injection[D]. Xi'an: Xidian University, 2020 (in Chinese).

[8] 中国人民解放军总装备部. 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量: GJB 151B—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 80-90.  
General Armament Department of the Chinese People's

- Liberation Army. Electromagnetic emission and susceptibility requirements and measurements for military equipment and subsystems: GJB 151B-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 80-90 (in Chinese).
- [9] 王晓辉, 张晓, 孙新贺. LISN 在电力电子设备 EMI 测试中的应用 [J]. 微波学报, 2010, 26(增刊 2): 131-133.  
WANG X H, ZHANG X, SUN X H. Application of LISN in EMI detection of power electronic equipment [J]. Journal of Microwaves, 2010, 26 (Supp 2): 131-133 (in Chinese).
- [10] 李英新, 晁远征, 徐聪. LISN 的工作原理及应用浅析 [J]. 中国检验检测, 2019, 27(6): 23-25, 55.  
LI Y X, CHAO Y Z, XU C. Analysis on the working principle and application of LISN [J]. China Inspection Body & Laboratory, 2019, 27(6): 23-25, 55 (in Chinese).
- [11] International Special Committee on Radio Interference. Coupling devices for conducted disturbance measurements, Part 1-2: CISPR 16-1-2[S]. [S.l.]: International Electrotechnical Commission, 2017: 14-25.
- [12] OKUYAMA S, OSABE K, TANAKAJIMA K, et al. Improvement of radiated emission measurement reproducibility by VHF-LISN — interim results of international inter-laboratory comparison[C]//Proceedings of 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo, Japan: IEEE, 2014: 255-258.
- [13] MITALKUMAR L, NISHA P V, SINDHU T K. Design of a modified three phase line impedance stabilization network for conducted emission test[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Chennai, India: IEEE, 2018: 1-5.
- [14] IBUCHI T, MORI S, FUNAKI T. Experimental evaluation of mutual coupling influence on the isolation characteristics of a dual-port v-type line impedance stabilization network [J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2018, 7(1): 39-45.
- [15] ANANDA W, CAHYADI S A, INAYATUROHMAN I, et al. The effect of the grounding condition of line impedance stabilization network on the measurement validity of conducted emission parameter[C]//Proceedings of 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS). Denpasar, Indonesia: IEEE, 2017: 498-502.
- [16] ZIADÉ F, KOKALJ M, OUAMEUR M, et al. Improvement of LISN measurement accuracy based on calculable adapters[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(2): 365-377.
- [17] 岳玲玲. 用于传导干扰测试的多功能线性阻抗稳定网络 (LISN) 的研究与设计 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.  
YUE L L. Multifunctional test system — LISN used for conducted interference test[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009 (in Chinese).
- [18] 赵品彰, 高佳, 刘平. 基于电长度补偿的 LISN 受试端阻抗 VNA 校准方法 [J]. 安全与电磁兼容, 2014(1): 74-76.  
ZHAO P Z, GAO J, LIU P. Calibration method of LISN's impedance by using VNA based on electrical length compensation[J]. Safety & EMC, 2014(1): 74-76 (in Chinese).
- [19] Department of Defense. High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) protection for ground-based C4I facilities performing critical: MIL-STD-188-125[S]. [S.l.]: Defense Information Systems Agency, 2005: 38-60.