



·高功率微波技术·

# GJB151B CS115 的电路仿真分析 (一) ——校准设备指标需求分析\*

崔志同, 陈伟, 董亚运, 聂鑫, 吴伟, 秦锋

(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, 西安 710024)

**摘要:** GJB151B CS115 给出了开展脉冲传导敏感度试验的校准平台构成和校准波形标准, 但未明确校准平台各设备(脉冲源、电流注入环、校准夹具等)的具体指标需求。为解决这一问题, 本文在前期脉冲电流注入电路仿真研究工作的基础上, 构建了校准平台的时域电路模型, 通过逐一改变模型参数的方法, 仿真分析了脉冲源内部回路电感、电流注入环等效电感/电阻/电容等对校准波形前沿、半宽以及平顶降的影响, 得出了平台各设备应达到的技术指标。该工作是对 GJB151B CS115 的有益补充, 为搭建 CS115 试验平台, 开展电子设备脉冲传导敏感度试验提供了技术支撑。

**关键词:** 电磁脉冲; CS115; 传导敏感度; 电流注入

中图分类号: TM13;O441

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210406

## Circuit Simulation of GJB151B CS115 Part I: The analysis of calibration equipment indicators

Cui Zhitong, Chen Wei, Dong Yayun, Nie Xin, Wu Wei, Qin Feng

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

**Abstract:** The composition and waveform of the calibration platform were defined in GJB151B CS115 for pulsed conducted sensitivity test, but the specific requirements for each device (pulse generator, current injection probe, calibration clamp, etc.) in the calibration platform are still not clear. To solve this problem, a time domain circuit model of the calibration platform was developed according the previous research on circuit simulation of pulsed current injection. By adjusting the parameters respectively, influences on the rise time and fall time of the calibration waveform caused by the inner inductance of the pulse generator and equivalent elements of the injection probe are simulated. Finally, the technical indicators for each device in the platform are obtained. This work is an essential supplement to GJB151B CS115 and is helpful to set up CS115 test platform for conducted immunity of electronic equipment test.

**Key words:** electromagnetic pulse; CS115; conducted immunity; current injection

GJB151B-2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》中 CS115 试验项目“电缆束注入脉冲传导敏感度测试”<sup>[1]</sup>, 主要针对屏蔽体内或者防护端口后的电子设备, 考察其抗由回路开关动作、高空电磁脉冲(HEMP)或雷电电磁脉冲引起的快上升沿和快下降沿瞬变干扰的能力, 是军用电子设备/分系统传导敏感度试验的重要项目, 在国防军工领域有着广泛的应用<sup>[2-4]</sup>。GJB151B-2013 CS115 借鉴于美军标 MIL-STD-461E《设备/分系统电磁干扰特性控制要求》, 是国际公认的一种电磁脉冲传导敏感度测试方法<sup>[5]</sup>。

CS115 标准给出了开展传导试验工作的基本设置和流程, 规定了校准设置下的输出波形指标等。然而, 该标准并未给出校准平台各设备(脉冲源、注入环、校准夹具)的具体指标要求, 不利于搭建规范化的试验平台以开展电子设备的脉冲传导敏感度测试工作。相对而言, CS114(0.01~200 MHz 传导敏感度测试)对试验设备有着较为

\* 收稿日期: 2021-09-10; 修订日期: 2021-11-25  
基金项目: 国家重点实验室基金项目(SKLIPR1901)  
联系方式: 崔志同, zhitong\_cui@163.com。

详细的规定,包括电流注入环插损要求、校准夹具电压驻波比要求(VSWR)等。

目前国内外关于CS115的研究主要围绕着这一方法的操作实践,以及试验过程中的测试测量问题、不确定度评定等<sup>[6-8]</sup>,在试验平台的搭建方面缺乏深入具体的分析。其中的主要原因在于:试验平台中将脉冲源能量加载到受试设备的耦合装置,即电流注入环,通常是由铁氧体磁芯构成的,该类材料具有随频率变化的复数磁导率,其在时域脉冲激励下的响应特性难以明确,因此无法量化的划分脉冲源、注入环、校准夹具各部分对校准波形的影响。

在作者近年的工作中,电流注入环在脉冲激励下的时域电路仿真问题得到了解决<sup>[9-13]</sup>,为开展CS115校准实验平台的量化研究奠定了基础。本文拟在前期脉冲电流注入(PCI)电路仿真技术研究的基础上,构建CS115校准平台的电路模型,分析各设备参数对校准输出波形的影响,确定其应具备的技术指标。

## 1 CS115 校准平台及其电路模型

CS115校准平台主要包括方波脉冲源、电流注入环、校准夹具以及配套测试设备等,校准设置如图1(a)所示;校准波形指标规定为:在校准夹具上形成的方波激励脉冲上升时间 $\leq 2$  ns,下降时间 $\leq 2$  ns,脉宽 $\geq 30$  ns,电流幅度 $\geq 5$  A,如图1(b)所示。

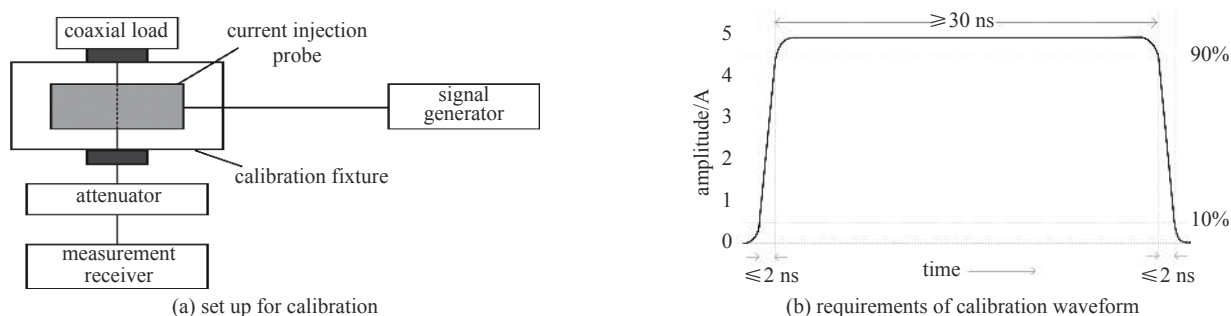


Fig. 1 Requirements of calibration setup and waveform in CS115

图1 CS115校准设置及波形指标要求

校准平台的电路模型如图2所示,主要包括3部分:(1)方波脉冲源模型中,DC为直流充电电源, $R_C$ 为充电电阻; $TL_1$ 为特征阻抗 $50\ \Omega$ 的储能同轴电缆,改变其长度可以调节脉冲宽度, $TL_2$ 为输出电缆; $L_0$ 为放电回路杂散电感,其值可通过输出波形前沿推算得出<sup>[12]</sup>;(2)电流注入环采用文献[12]所述集总参数电路模型,由初级等效模型(电感 $L_{eq}$ 、电阻 $R_{eq}$ 、电容 $C_{eq}$ )和两级优化模型(电感 $L_{op1\sim 2}$ 、电阻 $R_{op1\sim 2}$ 、电容 $C_{op1\sim 2}$ )组成,各参数值可通过对注入环端口阻抗测试数据的拟合得到<sup>[11]</sup>;(3)校准夹具采用电感 $L_f$ 和电容 $C_f$ 组成的T型集总参数电路模型<sup>[10,14]</sup>。

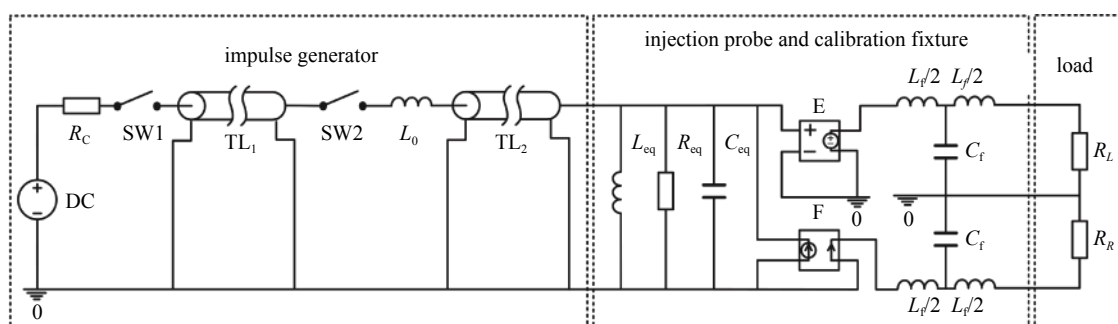


Fig. 2 Circuit model of the calibration platform in CS115

图2 CS115校准平台的电路模型

## 2 电路仿真分析的参考设置

本文按照CS115标准建立了一种校准平台的参考设置,通过仿真分析其中各参数的变化对校准波形的影响,确定为得到符合标准规定的校准波形,平台中各设备所应达到的指标要求。

该参考设置中各校准设备主要技术指标及其电路模型参数值如下:(1)方波脉冲源为日本NOISEKEN公司生产的INS-4040型高频噪声发生器,该设备可在 $50\ \Omega$ 负载上产生最大4 kV电压输出,波形前沿小于1 ns;脉冲宽度50~1000 ns分档可调<sup>[15]</sup>;其电路模型内部电感 $L_0=32$  nH<sup>[12]</sup>,设置 $V_{DC}=1$  kV,延迟时间 $T_{L1}$ 为50 ns;(2)电流注入环为FCC公司的F-1206-A型,可应用于0.01~400 MHz的注入试验,在1.8~400 MHz内的插入损耗小于9 dB;其电路

模型各参数取值  $L_{eq}=17.5 \mu\text{H}$ ,  $R_{eq}=216 \Omega$ ,  $C_{eq}=14.8 \text{ pF}$ 。  $R_{op1\sim 2}=150, 255 \Omega$ ,  $L_{op1\sim 2}=80.8, 12.7 \mu\text{H}$ ,  $C_{op1\sim 2}=1.4, 1.6 \text{ F}$  [12]; (3)校准夹具为 FCC 公司的 FCC-BCICF-1, 400 MHz 内电压驻波比小于 3; 其等效电路模型  $L_f=7 \text{ nH}$  和电容  $C_f=6 \text{ pF}$ ; 利用网络分析仪扫描校准夹具端口  $S$  参数, 计算得出其电压驻波比, 与电路模型所得仿真结果相比, 在 400 MHz 以下最大偏差小于 10%, 如图 3 所示。

按照上述参考设置, 方波脉冲源直接输出电压仿真波形(脉冲源连接  $50 \Omega$  负载)和校准耦合电压仿真波形如图 4 所示, 直接输出电压波形上升沿  $0.7 \text{ ns}$ , 下降沿  $1.1 \text{ ns}$ , 脉宽  $50 \text{ ns}$ ; 校准电压仿真波形上升沿  $1.2 \text{ ns}$ , 下降沿  $1.4 \text{ ns}$ , 脉宽约  $50 \text{ ns}$ 。值得注意的是, 相比于脉冲源直接输出电压波形, 校准耦合电压波形存在明显的平顶下降, 这主要是由电流注入环的低频响应特性所致, 可通过方波平顶幅度下降百分比( $F_{DR}$ )来表征, 其值根据上升沿幅值  $V_{RE}$  和下降沿幅值  $V_{FE}$  来计算, 即:  $F_{DR}=(V_{RE}-V_{FE})/V_{RE}\times 100\%$ 。若  $F_{DR}$  较大将会影响校准波形的脉冲宽度和能量, 因此在后面的研究过程中也将校准波形平顶降百分比作为一个重要衡量指标。

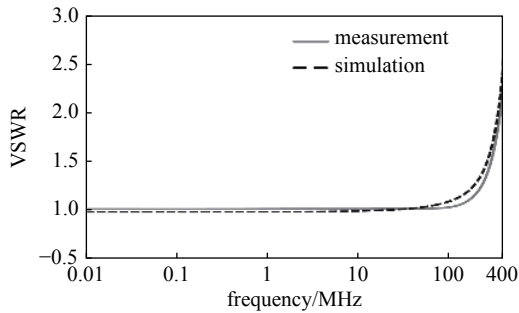


Fig. 3 Measured and simulated VSWR of FCC-BCICF-1

图 3 FCC-BCICF-1 校准支架电压驻波比实验与仿真结果

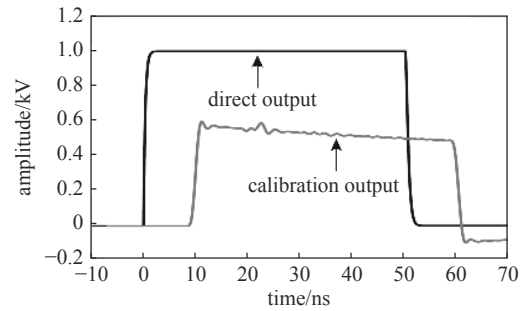


Fig. 4 Direct output and calibration waveform under reference setup in simulation

图 4 参考设置下脉冲源直接输出电压与校准耦合电压仿真波形

### 3 模型参数对 CS115 校准波形的影响分析

在校准平台电路模型中, 影响校准波形指标的主要参数包括: 脉冲源内部电感  $L_0$ 、电流注入环初级等效模型中的  $L_{eq}$ 、 $R_{eq}$ 、 $C_{eq}$  (优化模型各参数对时域仿真结果影响相对较小, 不予考虑)、测试支架模型中的  $L_f$ 、 $C_f$ 。下面通过分别改变模型中的某一特定参数分析其对校准波形的影响。由于参考设置中各设备均具有较优的性能指标, 分析过程中以降低各参数性能指标为主。

#### 3.1 脉冲源内部电感 $L_0$

由方波脉冲源的电路模型可知, 其内部电感  $L_0$  是影响输出波形上升及下降时间的主要因素。设置  $L_0$  分别为 32, 46, 60 nH, 脉冲源在  $50 \Omega$  负载上的直接输出电压波形上升时间依次为 0.7, 1.0, 1.3 ns, 下降时间依次为 1.2, 1.3, 1.5 ns。校准电压仿真波形及其前后沿细节如图 5 所示, 上升时间依次为 1.2, 1.3, 1.5 ns, 下降时间依次为 1.4, 1.7, 2.1 ns, 平顶降  $F_{DR}$  基本无变化。可见, 脉冲源内部电感  $L_0$  增大, 校准波形的上升沿和下降沿时间随之增大, 在  $L_0=60 \text{ nH}$  时, 下降时间达到了 2.1 ns。因此, 在其他条件不变的情况下,  $L_0$  应小于 60 nH, 以使校准波形满足上升和下降时间小于 2 ns 的要求。

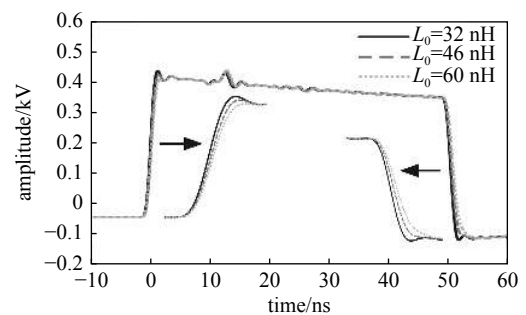


Fig. 5 Simulated calibration waveform with different  $L_0$  of pulsed current source

图 5 脉冲源不同电感  $L_0$  下的校准电压仿真波形

#### 3.2 电流注入环初级等效电路参数

电流注入环作为 CS115 试验的能量耦合装置, 对校准波形特性有着重要影响。注入环初级等效电路中的  $L_{eq}$ 、 $R_{eq}$ 、 $C_{eq}$  决定了其主要的阻抗和传输特性, 其中  $L_{eq}$  主要影响注入环低频特性,  $R_{eq}$  影响其中、高频特性,  $C_{eq}$  则在高频段起作用 [15], 下面分别开展分析工作。

首先, 设置  $L_{eq}$  分别为 2, 5, 12.5, 30  $\mu\text{H}$ , 仿真得到的校准电压波形如图 6 所示, 主要特征指标见表 1。由仿真结果可知,  $L_{eq}$  的变化主要影响校准波形平顶降  $F_{DR}$ , 且当  $L_{eq}<2 \mu\text{H}$  时,  $F_{DR}$  大于 50%, 这将影响波形半宽的

判读(需要指出的是,若脉冲源输出宽度为 30 ns,  $L_{eq}=2\ \mu\text{H}$  时  $F_{DR}$  约 30%,);而当  $L_{eq}>12.5\ \mu\text{H}$  时,  $F_{DR}$  将小于 20%,表明电流注入环具有足够好的低频响应。同时,对比分析  $L_{eq}$  增大与  $F_{DR}$  下降的趋势可知,当  $L_{eq}>12.5\ \mu\text{H}$  后,通过提高  $L_{eq}$  数值来降低  $F_{DR}$  将变的愈加困难。因此,在其他条件不变的情况下  $L_{eq}$  较为合适的取值范围为 2~12.5  $\mu\text{H}$ 。

其次,设置  $R_{eq}$  分别为 8, 32, 120, 480  $\Omega$ , 仿真得到的校准电压波形如图 7 所示,主要特征指标见表 1。由仿真结果可知,  $R_{eq}$  主要影响校准波形幅度,同时对平顶降也有所影响。当  $R_{eq}=120\ \Omega$  时,校准电压为 0.54 kV,这一数值达到了假设  $R_{eq}$  为无穷大时校准电压的 80%,可以认为注入探头实现了较高的耦合效率;而当  $R_{eq}=8\ \Omega$  时,校准电压为 0.13 kV,相应的在脉冲源输出 2 kV 的情况下校准电压为 0.26 kV,负载端电流为 5.2 A (0.26 kV/50  $\Omega$ ),刚刚满足标准要求的 5 A。因此,  $R_{eq}$  为 8~120  $\Omega$  是  $R_{eq}$  较为适宜的取值范围。

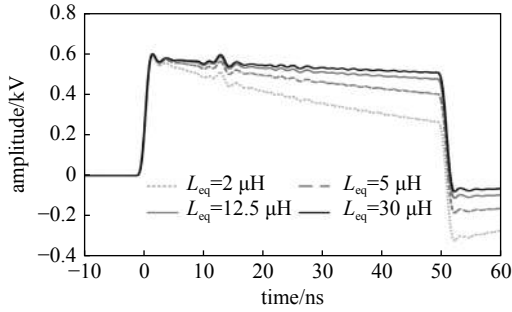


Fig. 6 Simulated calibration waveforms with different  $L_{eq}$   
图 6 不同  $L_{eq}$  下的校准电压仿真波形

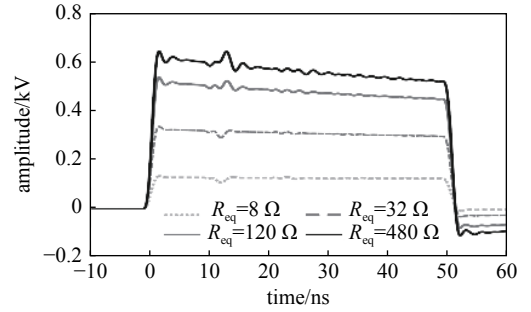


Fig. 7 Simulated calibration waveforms with different  $R_{eq}$   
图 7 不同  $R_{eq}$  下的校准电压仿真波形

表 1 不同  $L_0$ 、 $L_{eq}$ 、 $R_{eq}$  下的校准波形输出指标

Table 1 Indicators of calibration waveform with different  $L_0$ ,  $L_{eq}$  and  $R_{eq}$

		rise time/ns	fall time/ns	$V_{RE}/\text{kV}$	$V_{FE}/\text{kV}$	$F_{DR}/\%$
impulse generator output with 50 $\Omega$ load		0.7	1.1	1	1	0
$L_0=32\ \text{nH}$ , $R_{eq}=216\ \Omega$ , $L_{eq}=17.5\ \mu\text{H}$		1.2	1.4	0.59	0.49	17
inductance of the generator	$L_0=46\ \text{nH}$	1.3	1.7	0.58	0.49	16
	$L_0=60\ \text{nH}$	1.5	2.1	0.56	0.49	13
$R_{eq}$ of the injection probe model	$R_{eq}=8\ \Omega$	1.3	1.5	0.13	0.12	8
	$R_{eq}=32\ \Omega$	1.3	1.5	0.34	0.30	12
	$R_{eq}=120\ \Omega$	1.2	1.4	0.54	0.46	15
	$R_{eq}=480\ \Omega$	1.2	1.4	0.64	0.53	17
$L_{eq}$ of the injection probe model	$L_{eq}=2\ \mu\text{H}$	1.2	1.4	0.59	0.27	54
	$L_{eq}=5\ \mu\text{H}$	1.2	1.4	0.59	0.40	32
	$L_{eq}=12.5\ \mu\text{H}$	1.2	1.4	0.59	0.47	20
	$L_{eq}=30\ \mu\text{H}$	1.2	1.4	0.59	0.51	14

最后,分析等效电路模型参数  $C_{eq}$ ,其主要影响在于校准波形上升沿和下降沿时间,但与  $L_{eq}$  和  $R_{eq}$  可以独立影响校准波形指标不同,  $C_{eq}$  的作用与  $R_{eq}$  的取值有较大关系,如表 2 所示。可以明确的是,如果  $C_{eq}<30\ \text{pF}$ ,无论

表 2 不同  $R_{eq}$ 、 $C_{eq}$  的校准波形上升时间  $t_r$  和下降时间  $t_p$

Table 2 The rise time and fall time of calibration waveform with different  $R_{eq}$  and  $C_{eq}$

	$C_{eq}=10\ \text{pF}$		$C_{eq}=20\ \text{pF}$		$C_{eq}=30\ \text{pF}$		$C_{eq}=40\ \text{pF}$		$C_{eq}=50\ \text{pF}$	
	$t_r/\text{ns}$	$t_p/\text{ns}$	$t_r/\text{ns}$	$t_p/\text{ns}$	$t_r/\text{ns}$	$t_p/\text{ns}$	$t_r/\text{ns}$	$t_p/\text{ns}$	$t_r/\text{ns}$	$t_p/\text{ns}$
$R_{eq}=8\ \Omega$	1.3	1.4	1.3	1.5	1.3	1.5	1.4	1.6	1.4	1.6
$R_{eq}=32\ \Omega$	1.2	1.4	1.3	1.5	1.4	1.6	1.6	1.8	1.8	2.0
$R_{eq}=120\ \Omega$	1.2	1.4	1.3	1.5	1.6	1.8	1.9	2.2	2.4	2.6
$R_{eq}=216\ \Omega$	1.1	1.3	1.4	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.6	2.9
$R_{eq}=400\ \Omega$	1.0	1.3	1.4	1.5	1.7	1.9	2.2	2.4	2.8	3.0

$R_{eq}$  取值, 均可使校准波形上升和下降时间满足标准要求; 反之, 如果  $C_{eq} > 30$  pF, 则需要结合  $R_{eq}$  考虑其影响。

### 3.3 校准夹具等效电路参数

保持其他参数不变, 将校准夹具电路模型中的  $L_f$ 、 $C_f$  值增大一倍至 14 nH, 12 pF, 则校准夹具的电压驻波比 VSWR 在 400 MHz 时将达到 8, 但两组不同取值仿真得到的校准波形, 仅峰值存在 3% 的微小区别, 其余部分(上升时间、下降时间、平顶降  $F_{DR}$ )基本一致, 如图 8 所示。而在实际情况下, 按照 CS114 提供的参考样例制作的校准夹具, 由于采用了近似同轴结构, 其电压驻波通常比较小, 基本不会出现大于 8 的情况。因此, CS114 对校准夹具的要求, 能够较好地适用于 CS115。

综合以上电路仿真分析结果可知, 为实现满足 CS115 标准要求的校准波形指标, 搭建校准平台时各设备应满足的基本条件如下: (1) 方波脉冲源内部回路电感  $L_0$  不大于 60 nH(必要不充分条件); (2) 电流注入环采用时域等效电路模型进行表征, 其中  $L_{eq}$ 、 $R_{eq}$  取值范围须高于图 9 中由  $L_{eq}=2$   $\mu$ H 及  $R_{eq}=8$   $\Omega$  确定的阻抗曲线, 而若其取值范围高于由  $L_{eq}=12.5$   $\mu$ H 及  $R_{eq}=120$   $\Omega$  确定的阻抗曲线, 则意味着注入环具有较好的低频和高频耦合特性, 校准输出波形在幅度和平顶降上能较好地满足指标要求; 另外, 注入环等效电路电容  $C_{eq}$  应尽量小于 30 pF, 以避免影响校准波形上升时间及下降时间; (3) 校准夹具对校准波形影响较小, 可参考 CS114 标准提供的同轴型结构进行制作。

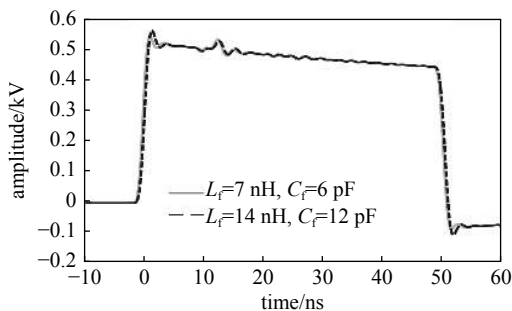


Fig. 8 Simulated calibration waveforms with different  $L_f$  and  $C_f$

图 8 不同  $L_f$  和  $C_f$  下的校准电压仿真波形

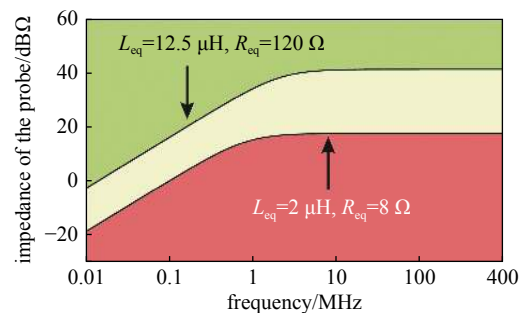


Fig. 9 Regions of current injection probe indicators according to the ferrite-core impedance

图 9 按照磁芯阻抗估算的电流注入环指标区间

## 4 结论

本文介绍了 CS115 校准平台及其时域电路模型, 包括脉冲源、电流注入环、校准支架等, 并选用高性能指标设备建立了开展仿真分析的参考设置。在此基础上, 明确了影响校准波形指标的主要参数, 即脉冲源内部电感  $L_0$ 、电流注入环初级等效模型中的  $L_{eq}$ 、 $R_{eq}$ 、 $C_{eq}$ 、测试支架模型中的  $L_f$ 、 $C_f$ , 通过分别改变上述各参数开展仿真分析工作。最后给出了为实现满足标准规定的校准波形, 校准平台各设备所应具备的指标要求。本文工作可用于指导 CS115 试验平台的搭建, 同时也加深了对校准物理过程的理解。另外, 电路仿真方法也可应用于 CS115 的试验设计和优化, 后续将在这一方面开展相关研究工作。

### 参考文献:

- [1] GJB151B-2013, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. (GJB151B-2013, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. (GJB151B-2013, Electromagnetic emission and susceptibility requirements and measurements for military equipment and subsystems[S]))
- [2] 黄华, 陈量. 信息系统装备电磁兼容性设计技术及工程实践[J]. 微波学报, 2018, 34(7): 483-486. (Huang Hua, Chen Liang. EMC design technology and engineering of information system equipment[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(7): 483-486)
- [3] 曹斌, 蔡明娟. GJB151B与GJB151A对舰船装备电磁兼容性要求的对比分析[J]. 船舶, 2017, 28(3): 72-78. (Cao Bin, Cai Mingjuan. Comparison analysis of electromagnetic compatibility requirements of ship equipment between GJB 151B and GJB 151A[J]. Ship & Boats, 2017, 28(3): 72-78)
- [4] 钟辉. 某机载设备电磁兼容性改进设计[J]. 安全与电磁兼容, 2018, 2: 80-84. (Zhong Hui. The improved design of EMC for an airborne equipment[J]. SAFETY & EMC, 2018, 2: 80-84)
- [5] MIL-STD-461E, Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment[S].
- [6] 董佳, 姚利军, 余臻译. 一种CS115/CS116电流监测探头时域校准夹具的设计[J]. 宇航技测技术, 2017, 37(5): 35-39. (Dong Jia, Yao Lijun, Yu Canyi. Design of calibration-jig using in CS115/CS116 current monitor probe time-domain calibration[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2017, 37(5): 35-39)
- [7] 徐亮, 胥明. GJB151B传导敏感度测试要求的分析[J]. 微波学报, 2016 (S2): 3 441-443. (Xu Liang, Xu Ming. Analysis of conducted susceptibility requirement

- for GJB151B[J]. *Journal of Microwaves*, 2016 (S2): 3: 441-443)
- [8] 林荣刚, 凤卫锋, 梁双港. 注入脉冲激励传导敏感度测试的不确定度评定[J]. *电子设计工程*, 2013, 21(17): 86-89. (Lin Ronggang, Feng Weifeng, Liang Shuanggang. Evaluation of uncertainty in test of conducted susceptibility of injection impulse excitation[J]. *Electronic Design Engineering*, 2013, 21(17): 86-89)
- [9] Cui Z T, Grassi F, Pignari A S. Circuit modeling of the test setup for pulsed current injection[C]//*Proceedings of 2016 IEEE 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2016.
- [10] 崔志同, 毛从光, 孙蓓云. 感性脉冲电流注入装置的PSPICE电路建模[J]. *电子学报*, 2017, 45(6): 1513-1517. (Cui Zhitong, Mao Congguang, Sun Beiyun. SPICE modeling of pulsed current injection with inductive coupling[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(6): 1513-1517)
- [11] Cui Z T, Wei B, Grassi F, Pignari A S. A pulsed current injection setup and procedure to reproduce intense transient electromagnetic disturbance[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(6): 2065-2068.
- [12] Cui Z T, Wei B, Grassi F, Pignari A S. Experimental analysis and circuit modeling of pulsed current injection in wire pairs[C]//*Proceedings of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2018.
- [13] 崔志同, 魏兵. 同轴电缆感性脉冲电流注入试验仿真方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2021, 48(4): 42-49. (Cui Zhitong, Wei Bing. Simulation methods for inductive pulsed current injection on coaxial cable[J]. *Journal of Xidian University*, 2021, 48(4): 42-49)
- [14] Lofon F, Belakhoy Y, Daran F. Injection probe modeling for bulk current injection test on multiconductor transmission lines[C]//*Proceedings of IEEE Symposium on Embedded Electromagnetic Compatibility*. 2007.
- [15] 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 Zhitong. Simulation and experimental research on HEMP pulsed current injection[D]. Xi'An: Xidian University, 2020)