



·高功率微波技术·

GJB151B CS115 的电路仿真分析 (二) ——标准应用分析*

崔志同, 陈伟, 董亚运, 聂鑫, 吴伟, 刘政

(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: 为解决 GJB151B CS115 电缆束注入脉冲传导敏感度测试项目中的试验设计、效果预估等问题, 介绍不同类型受试线缆感性脉冲电流注入电路模型的基础上, 仿真分析了试验设置中的各项因素(线缆设置、末端负载等)对注入到受试设备端口耦合电流/电压的影响, 得到了 CS115 试验设置中存在的一些规律性特征, 给出了应用电路仿真开展 CS115 试验设置分析和优化的方法。

关键词: 电磁脉冲; CS115; 脉冲电流注入; 感性耦合; 电路仿真

中图分类号: TM13; O441

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210499

Circuit simulation of GJB151B CS115 part II: The analysis of application

Cui Zhitong, Chen Wei, Dong Yayun, Nie Xin, Wu Wei, Liu Zheng

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect,

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: To design the test setup and predict the effect of GJB151B CS115 “impulse excitation bulk cable injection conducted susceptibility”, we introduced the circuit model of inductive pulse current injection for different type of cables. The influences on the injected voltage/current caused by the factors of the test setup are simulated and analyzed. Some regularity characteristics of CS115 test setting are summarized, and the method of CS115 test design and optimization by circuit simulation is proposed.

Key words: electromagnetic pulse, CS115, pulsed current injection, inductive coupling, circuit modeling

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”^[1], 旨在考查电子设备抗由回路开关动作、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, 该测试项目作为国防军工装备电磁兼容性能测试的一项重要内容得到了广泛的应用。为增加标准的通用性, CS115 在实施过程中, 首先采用统一的校准平台确定测试系统设置, 之后再对被试设备开展试验测试工作^[1]。然而, 被试设备连接线缆的对地传输阻抗及其末端负载, 与采用同轴结构且两端匹配 50 Ω 负载的校准夹具差别较大, 这会导致实际加载到设备端口的脉冲干扰与校准波形有较大的差异。而设备的电磁兼容性能主要与实际注入到其端口的干扰相关, 因此在试验实施过程中应尽量减小上述差异。但目前 CS115 相关研究工作中尚缺乏对造成这种差异的物理影响因素的量化分析, 从而不利于开展试验布局设计、设置优化以及试验效果预估等。由于 CS115 采用基于变压器原理的感性电流注入环作为耦合装置, 本文拟在前期感性脉冲电流注入(PCI)电路仿真技术研究工作的基础上^[2-4], 按照被试线缆的种类(单线、线缆束、同轴电缆), 分析 CS115 试验平台及设置中各参量对被试设备端口脉冲注入电流的影响, 介绍基于电路仿真的 CS115 试验设计及优化技术。

1 CS115 标准应用的电路模型

感性脉冲电流注入中, 被试线缆种类对耦合到设备端口的干扰影响显著, 因此按照线缆种类开展 CS115 标准应用的分析和讨论, 具体分为单线、线缆束、同轴电缆三类。脉冲源和电流注入环部分的电路模型基本一致, 参

* 收稿日期: 2021-11-19; 修订日期: 2022-02-21

基金项目: 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金项目(SKLIPR1901)

通信作者: 崔志同, zhitong_cui@163.com。

见 GJB151B CS115 的电路仿真分析第一部分^[5],主要的区别在于注入环次级一侧,下面分别进行介绍。

CS115 作用于对地传输单线时,注入环次级的电路模型如图 1 所示,采用无损传输线模型 TL 进行表征,主要特征参数为传输阻抗和时间延迟。 L_{2d} 为次级漏感, R_L 和 R_R 为线缆末端负载,在本文中用于等效受试设备端口等效负载。方波脉冲激励下传输单线的感性脉冲电流注入电路模型在文献 [6] 中进行了验证,仿真与实验结果符合较好。

CS115 作用于线缆束时,注入环次级的电路模型如图 2 所示,包括注入环与线缆耦合电路模型、线缆束的集总近似电路模型两部分。前者有 3 项参数:注入环与线缆束各线间的互感 $L_{p1} \sim L_{pn}$, 其值等于注入环等效电感 L_{eq} ; 漏感 $L_{d1} \sim L_{dn}$; 线缆束各线与注入环壳体间的寄生电容 $C_{s1} \sim C_{sn}$, 可采用静电场仿真方法求取^[7]。后者有 4 项参数:线缆自感 L_{ii} 、互感 L_{ij} 、对地电容 C_{ii} 和线缆间电容 C_{ij} , 根据多导体传输线单位长度参数和线缆分段数 n 确定^[8]。这里用 $K=1$ 的线性变压器表征注入环初级与次级的耦合关系^[9], 文献 [6] 采用的则是电流控制电流源和电压控制电压源组成的理想变压器, 两者电路原理一致, 因此仿真结果相同。该模型可以用于线缆束的感性 PCI 仿真分析。

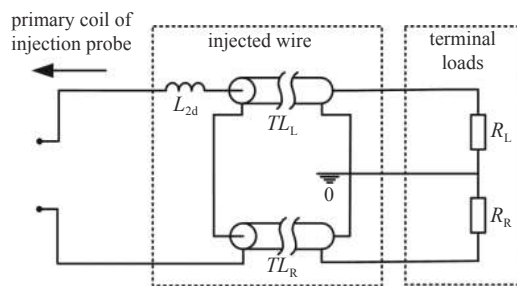


Fig. 1 Circuit model of CS115 injected on the single wire

图 1 CS115 作用于单线时注入环次级电路模型

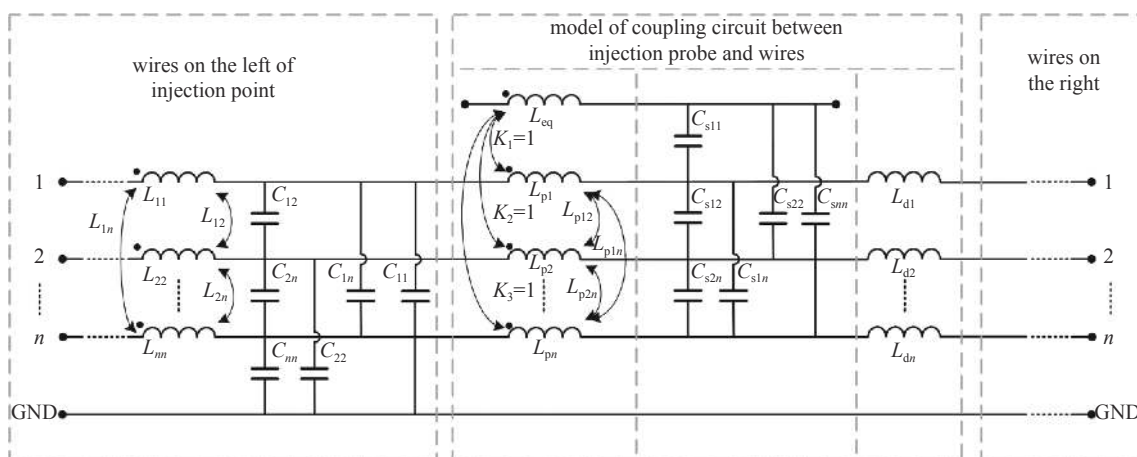


Fig. 2 Circuit model of CS115 injected on wire bundles

图 2 CS115 作用于线缆束时注入环次级电路模型

CS115 作用于同轴电缆时,注入环次级的电路模型如图 3 所示,包括将屏蔽层视为对地传输单线的耦合电路模型、屏蔽层与芯线间的耦合电路模型两部分。前者是在图 1 的基础上,将由电缆屏蔽层与地组成的传输线均分为 n 段,利用系数为 1 的电流控制电压源获取各分段处的电流值 I_n ; 后者是将屏蔽层与芯线组成的传输线模型同样分为 n 段,并在各段处加入由屏蔽层电流 I_n 和转移阻抗形成的电压源。其中, n 应使各段线缆长度满足电小条件,能够等效仿真屏蔽层与芯线间的分布耦合特性。这一模型在文献 [10] 中进行了详细推导和实验验证,可以用于开展 CS115 作用于同轴电缆时的仿真分析工作。

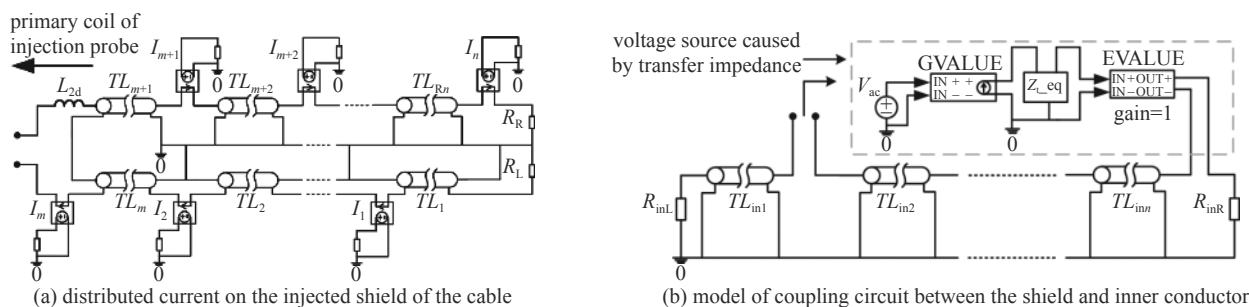


Fig. 3 Circuit model of CS115 injected on coaxial cable

图 3 CS115 作用于同轴电缆时注入环次级电路模型

2 CS115 标准应用的仿真分析

本文针对上述 3 种不同类型受试线缆,各自规定一种常用的 CS115 试验参考设置,建立其等效电路模型,在此基础上,分别单独改变模型中的某一特定参数,仿真分析该参数对受试线缆末端耦合电压的影响,总结得出试验设置的规律性特征和优化方法。在 3 种不同线缆 CS115 试验参考设置中,脉冲源与电流注入环两部分保持一致:方波脉冲源为日本 NOISEKEN 公司生产的高频噪声发生器 INS-4040,电流注入环为 FCC 公司的 F-1206A 型注入环,其性能指标和电路模型参数详见文献 [5]。

2.1 对地传输单线

参考设置中,受试对地传输单线长度 $l_w=1\text{ m}$,架高 $h_w=6.75\text{ cm}$,线 $r_w=0.4\text{ mm}$,特征阻抗 $Z_{cw}=349\ \Omega$,线缆左右两侧负载 $R_L=R_R=50\ \Omega$ 。首先,在保持其他条件不变的情况下,分别设置线缆架高 $h_w=1.00, 6.75, 10.00, 20.00\text{ cm}$,对应电路模型中受试线缆特征阻抗 Z_{cw} 依次为 235, 349, 372, 414 Ω ,仿真得到的线缆末端负载耦合电压波形前沿依次为 8, 12, 13, 15 ns,如图 4 所示。可见,随着线缆架高的增大,波形前沿逐渐变缓,主要原因在于线缆传输阻抗与末端负载不匹配程度的逐步扩大。但线缆传输阻抗与线缆高度成指数比例关系,因此随着线缆架高的不断增大,其对注入波形前沿的影响也将逐步变弱。

其次,在保持其他条件不变的情况下,分别设置线缆长度 $l_w=0.5, 1.0, 1.5, 2.0\text{ m}$,仿真得到的线缆末端负载耦合电压波形前沿依次为 6, 11, 16, 21 ns,如图 5 所示。可见,随着线缆长度增大,注入波形前沿变缓情况较为严重,因此在 CS115 实施过程中,应尽可能减短连接线缆长度。但需要指出的是,保持线缆特征阻抗 $Z_{cw}=349\ \Omega$ 不变,而增大其末端负载 $R_L=R_R=349, 1000\ \Omega$,仿真结果表明,上述规律主要适用于线缆特征阻抗大于末端负载阻抗的情况,而当前者小于或等于后者时,线缆长度对注入波形前沿基本无影响。

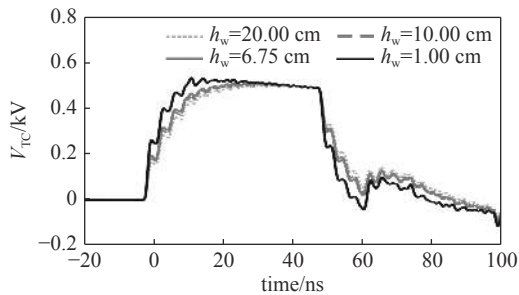


Fig. 4 Simulated voltage across the terminal load (V_{TC}) with different height of the wire

图 4 不同线缆架高下的末端负载耦合电压仿真波形

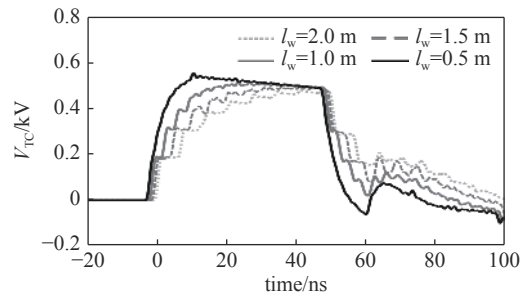


Fig. 5 Simulated voltage across the terminal load (V_{TC}) with different length of the wire

图 5 不同线缆长度下的末端负载耦合电压仿真波形

再次,在保持其他条件不变的情况下,分别设置线缆两侧负载 $R_L=R_R=10, 50, 120, 349\ \Omega$,仿真得到的线缆末端负载电压幅度依次为 0.2, 0.5, 0.6, 0.8 kV,波形前沿依次为 28, 12, 4, 1 ns,以 0.8 kV 为标准的幅度归一化波形如图 6 所示。其中, $R_L=R_R=349\ \Omega$ 时,波形前沿为 1 ns,再次表明了线缆特征阻抗与末端负载的匹配情况是决定注入波形前沿的主要因素。

最后,分析不同线缆长度下注入位置 D_{inj} 对注入波形的影响,仿真结果表明:注入位置对波形幅度基本无影响,如图 7 所示 ($l_w=1\text{ m}$);但对波形上升时间影响较大,如表 1 所示,其中 D_{inj} 为注入位置与右侧负载间 R_R (表征受

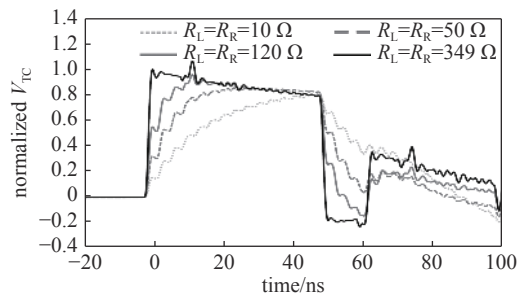


Fig. 6 Simulated normalized voltage across the terminal load (V_{TC}) with different values

图 6 不同末端负载下的归一化耦合电压仿真波形

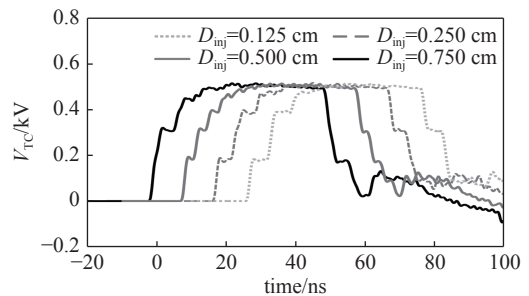


Fig. 7 Simulated voltage across the terminal load (V_{TC}) with different injected point of the wire

图 7 不同注入位置下末端负载 R_R 上的耦合电压仿真波形

表 1 不同线缆长度、不同注入位置下的耦合电压波形上升沿时间

Table 1 Rise time of coupling voltage with different length and injected point of the wire

l_w/m	rise time/ns			
	$D_{inj}=0.75l_w$	$D_{inj}=0.5l_w$	$D_{inj}=0.25l_w$	$D_{inj}=0.125l_w$
0.5	5	6	7	7
1.0	10	12	13	13
1.5	13	16	20	20

试设备)的距离。与直观认知不同,距离受试设备越远,注入波形前沿越快,特别是在线缆较长时这一规律尤为明显。当然,这也是以线缆特征阻抗大于末端负载阻抗为前提条件的。

综合以上仿真分析结果可知:注入波形上升沿和下降沿时间主要取决于线缆传输阻抗与末端负载的匹配状况,在设计受试线缆架高及长度时应考虑这一情况;注入点位置方面,若对注入波形前沿有一定要求,可考虑使注入位置适当远离受试设备。

另外,考虑到受试线缆两端负载较小时,注入波形畸变十分严重,如图 6 所示 $R_L=R_R=10\ \Omega$ 的情况。这主要是由脉冲源内阻与负载的失配所导致的,因此尝试通过在脉冲源和电流注入环间串联电阻 R_B 以提高注入波形质量。在 $l_w=1\ m$, $h_w=67.5\ mm$ 的情况下,分别设置串联电阻 $R_B=0, 50, 100, 200\ \Omega$, 末端负载耦合电压仿真波形前沿依次为 31, 25, 21, 14 ns, 以串联电阻 $0\ \Omega$ 时的耦合电压为标准的归一化幅度依次为 1.00, 0.80, 0.60, 0.43; 在 $l_w=0.5\ m$, $h_w=100\ mm$ 的情况下,分别设置串联电阻 $R_B=0, 50, 100, 200\ \Omega$, 末端负载耦合电压仿真波形前沿依次为 12, 7, 6, 5 ns, 同样以串联电阻 $0\ \Omega$ 时的注入耦合电压为标准的归一化幅度依次为 1.00, 0.60, 0.45, 0.29, 如图 8 所示。可见,通过在脉冲源和注入环之间增加串联电阻的方式,能够较好的提高波形前沿。但在采用此方法时,也需要结合考虑串联电阻后耦合电压幅度降低和反射增大的问题。

2.2 线缆束

在保持其他参数不变的情况下(线缆束长度 $l_w=1\ m$, 平均架高 $h_w=6.75\ cm$, 各线缆半径 $r_w=0.4\ mm$, 各线缆两端负载均为 $50\ \Omega$), 设置线缆数量 N_w 依次为 1, 2, 3, 4, 仿真得到的负载端耦合电压仿真波形前沿依次为 12, 11, 8, 7 ns, 幅度依次为 0.51, 0.41, 0.34, 0.30 kV, 如图 9(a) 所示; 进一步, 保持其他参数不变, 改变线缆长度 $l_w=0.5\ m$, 不同线缆数量下的负载端耦合电压仿真波形如图 9(b) 所示, 波形前沿依次为 8, 6, 5, 4 ns, 幅度依次为 0.54, 0.43, 0.35, 0.30 kV。可见, 随着线缆数量增大, 负载端耦合电压逐步降低, 波形上升沿变快。定性的分析, 这主要是由于被试线缆作为注入环的次级, 随着其数量的增大, 并联效应使注入环初级、次级的整体阻抗不断降低, 从而导致负载端耦合电压的降低; 同时, 并联效应可降低回路整体电感, 从而提升耦合电压波形前沿陡度。

2.3 同轴电缆

以 RG-58 型同轴电缆为例, 仿真分析电缆屏蔽层和转移阻抗两类参数变化对芯线末端耦合电压的影响。参考

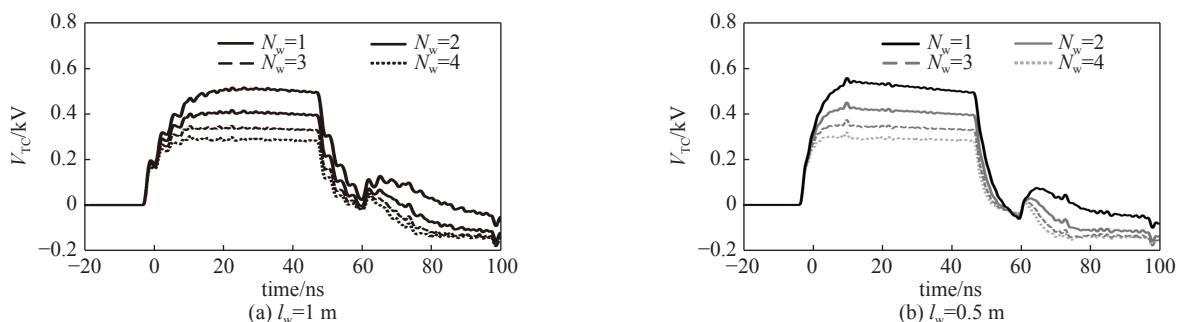
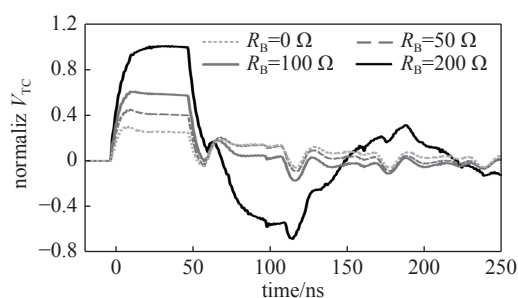
Fig. 9 Simulated voltage across the terminal load (V_{TC}) with different number of wires

图 9 不同线缆数量下的负载端耦合电压仿真波形

Fig. 8 Simulated normalized voltage across the terminal load (V_{TC}) with different values of the series resistance between the impulse generator and injection probe图 8 脉冲源与电流注入环之间串联不同 R_B 下的末端负载耦合电压仿真波形

设置中, 电缆长度 $l_{\text{shield}}=1 \text{ m}$, 电缆架高 $h_{\text{shield}}=6.75 \text{ cm}$, 屏蔽层两侧接地即其末端阻抗 $R_{\text{shield-L}}=R_{\text{shield-R}}=0 \Omega$, 电缆末端芯线与屏蔽层间阻抗均保持为 50Ω 。

2.3.1 电缆屏蔽层参数

首先, 分别设置电缆架高 $h_{\text{shield}}=1.00, 6.75, 10.00, 20.00 \text{ cm}$, 对应的电缆屏蔽层对地传输阻抗 Z_{shield} 依次为 155, 269, 292, 334 Ω , 仿真得到的芯线末端耦合电压幅度依次为 1.10, 0.77, 0.72, 0.65 V, 波形前沿均为 8 ns, 如图 10 所示。可见, 由于电缆架高与屏蔽层对地阻抗相关联, 改变电缆架高会影响屏蔽层耦合电流上升沿时间(参见图 4), 但这种影响经转移阻抗反映到芯线耦合电压后, 主要体现为波形幅度上的差异。

其次, 分别设置线缆长度 $l_{\text{shield}}=0.5, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ m}$, 芯线末端耦合电压仿真波形前沿依次为 5, 8, 13, 16 ns, 幅度依次为 0.64, 0.78, 0.83, 0.85 V, 如图 11 所示。可见, 随电缆长度的增大, 芯线耦合电压波形前沿变缓, 但其幅度会逐步提高。

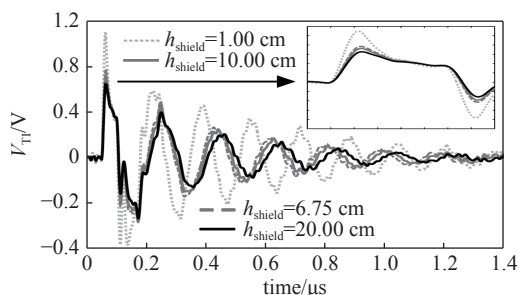


Fig. 10 Simulated voltage across the terminal load of the inner conductor (V_{T1}) with different height of the coaxial cable

图 10 不同电缆架高下的芯线末端耦合电压仿真波形

最后, 分别设置屏蔽层末端对地阻抗 $R_{\text{shield-L}}=R_{\text{shield-R}}=10, 50, 120, 1000 \Omega$, 芯线末端耦合电压仿真波形前沿依次为 16, 8, 8, 8 ns, 幅度依次为 0.51, 0.78, 1.06, 1.47 V, 如图 12 所示。可见, 在提高屏蔽层对地阻抗时, 屏蔽层耦合电压不断增大(参见图 6), 芯线末端耦合电压也随之增大; 上升时间在末端负载 R_{shield} 大于 50Ω 后基本保持不变, 但在 $R_{\text{shield}}=10 \Omega$ 时, 前沿相对缓慢, 这主要是因为末端负载较小时, 脉冲源输出负载远小于其内阻, 屏蔽层上无法有效的形成方波脉冲信号。

以上通过对不同设置下同轴电缆的 CS115 试验仿真分析, 得到了一些关于芯线耦合电压的基本规律, 除此之外, 必须引起注意的是: 在脉冲源加压 1 kV, 对应校准夹具末端负载电压 0.6 kV(校准电流 12 A)的情况下, 电缆芯线末端耦合电压仅为 1 V 左右(耦合电流约 20 mA)。可见, 这一试验中引入的脉冲干扰信号相对较弱, 因此在预估试验必要性及效果时, 应充分考虑这一特性, 同时结合受试对象所处电磁环境及其本身工作信号电平 3 个因素, 做出综合性的结论。

2.3.2 电缆转移阻抗参数

选择不同型号的同轴电缆, 按照 $Z_t=R_{dc}+L_t$ 表征的转移阻抗理论值如表 2 所示^[11]。其中 RG-222, RG-58, RG-316 具有近似的 L_t 值和较大差异的 R_{dc} ; RG-303, RG-58, RG-108 具有近似的 R_{dc} 值和较大差异的 L_a 。

除转移阻抗外, 保持其他参数与参考设置一致, 仿真分析结果如图 13 所示。可见, L_t 基本不变时, 随着 R_{dc} 的增大, 芯线末端耦合电压波形平顶降逐渐增大, 当 $R_{dc}=6.6, 14.2, 26.8 \text{ m}\Omega$ 时, 平顶降依次为 50%, 70%, 81%; R_{dc} 基本不变时, 随着 L_t 的增大, 芯线末端耦合电压幅度逐渐增大, 当 $L_t=0.43, 1.00, 4.60 \text{ nH}$, 电压幅度依次为 0.57, 1.20, 5.10 V。可见, 转移

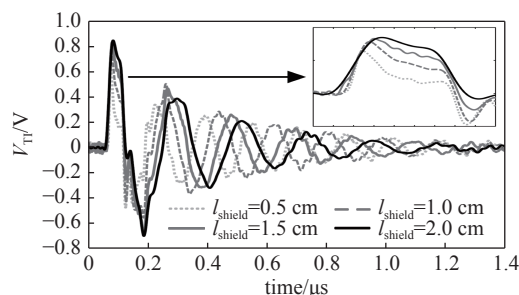


Fig. 11 Simulated voltage across the terminal load of the inner conductor (V_{T1}) with different length of the coaxial cable

图 11 不同电缆长度下的芯线末端耦合电压仿真波形

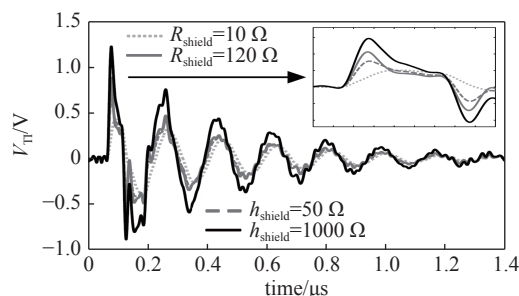


Fig. 12 Simulated voltage across the terminal load of the inner conductor (V_{T1}) with different load impedance of the shield

图 12 不同电缆屏蔽层末端阻抗下的芯线耦合电压仿真波形

表 2 不同型号电缆的转移阻抗参数值

Table 2 Transfer impedance of different coaxial cables

cable	$R_{dc}/\text{m}\Omega$	L_t/nH
RG-58	14.2	1.00
RG-303	14.1	0.43
RG-222	6.6	0.92
RG-316	26.8	0.88
RG-108	17.6	4.60

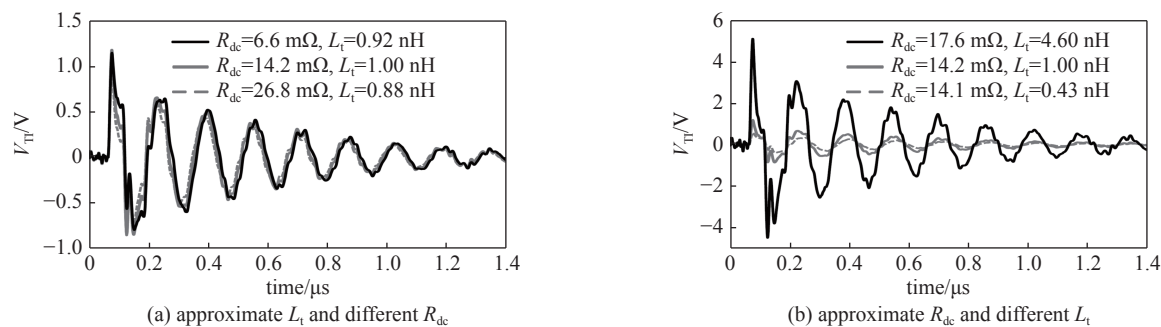


Fig. 13 Simulated voltage across the terminal load of the inner conductor (V_{T1}) with different transfer impedance

图 13 不同转移阻抗下的芯线末端耦合电压仿真波形

阻抗参数变化对注入耦合电压可产生较大影响,其中表征屏蔽层网孔电感的 L_t 对耦合电压幅度有着明显的作用;而表征屏蔽层散射效应的 R_{dc} 主要对耦合电压平顶降产生影响。

3 结 论

本文通过建立CS115试验电路模型,分析了试验设置对注入到设备端口耦合电流/电压的影响,包括了传输单线的架高、长度、注入位置、末端负载,线缆束的线缆数量、长度,同轴电缆的屏蔽层参数、转移阻抗,等等。另外针对受试线缆两端负载较小时注入波形畸变严重的问题,给出了在脉冲源和注入环之间增加串联电阻的优化方法;针对同轴电缆芯线耦合干扰较小的情况,提出了CS115作用于屏蔽电缆时试验效果可能不及预期的问题。以上规律性认识有助于试验的设置工作和效果预估,但脉冲电流注入是同时受多种因素影响的,因此针对特定情况还需参考本文提供的电路仿真方法进行量化分析工作。

参考文献:

- [1] GJB 151B-2013, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S]. (GJB 151B-2013, Electromagnetic emission and susceptibility requirements and measurements for military equipment and subsystems[S])
- [2] Cui Zhitong, Grassi F, Pignari S A. Circuit modeling of the test setup for pulsed current injection[C]//Proceedings of 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Shenzhen, China: IEEE, 2016.
- [3] 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)
- [4] Cui Zhitong, Grassi F, Pignari S A, et al. Pulsed current injection setup and procedure to reproduce intense transient electromagnetic disturbance[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(6): 2065-2068.
- [5] 崔志同, 陈伟, 董亚运, 等. GJB151B CS115的电路仿真分析(一)——校准设备指标需求分析[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 023002. (Cui Zhitong, Chen Wei, Dong Yayun, et al. Circuit simulation of GJB151B CS115 part I: The analysis of calibration equipment indicators[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34: 023002)
- [6] Cui Zhitong, Wei Bing, Grassi F, et al. Experimental analysis and circuit modeling of pulsed current injection in wire pairs[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. Singapore: IEEE, 2018.
- [7] Grassi F, Marliani F, Pignari S A. Circuit modeling of injection probes for bulk current injection[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, 49(3): 563-576.
- [8] Paul C R. Introduction to electromagnetic compatibility[M]. New Jersey: Wiley, 1992: 184-198.
- [9] Lafon F, Benlakhoy Y, De Daran F. Injection probe modeling for bulk current injection test on multi conductor transmission lines[C]//Proceedings of IEEE Symposium on Embedded EMC. Rouen, France: IEEE, 2007: 290-293.
- [10] 崔志同, 魏兵, 吴伟, 等. 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, Wu Wei, et al. Simulation methods for inductive pulsed current injection on the coaxial cable[J]. Journal of Xidian University, 2021, 48(4): 42-49)
- [11] Tesche F M, Ianoz M V, Karlsson T. EMC analysis methods and computational models[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.