



·脉冲功率技术·

kA 级脉冲电流注入环的电路建模与分析*

董亚运, 崔志同, 程引会, 秦 锋, 聂 鑫

(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: 为满足 kA 级脉冲电流注入应用需求, 设计了一种基于非晶磁芯的电流注入环, 其初级线圈采用线缆直接引出的方式, 有效解决了传统注入环 N 型电缆接头耐压不足的问题。之后根据注入环结构建立了其电路模型, 并应用粒子群优化算法确定了模型参数值。频域和时域的验证实验表明, 仿真结果和实验结果具有较好的一致性, 验证了该电路模型的可靠性和正确性。对注入环的实际应用场景进行了仿真分析, 结果表明该电流注入环可满足实际应用中 kA 级脉冲电流注入的需求。

关键词: 脉冲电流注入; kA 级; 非晶磁芯; 电流注入环; 感性耦合

中图分类号: TM27

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210565

Circuit modeling and analysis of kA level pulse current injection probe

Dong Yayun, Cui Zhitong, Cheng Yinwei, Qin Feng, Nie Xin

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

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

Abstract: To meet the application requirement of kA level pulse current injection, a kind of current injection probe based on amorphous magnetic core is designed. Then the circuit model is established based on the injection probe structure, and the model parameter values, frequency domain and time domain are verified by the particle swarm optimization algorithm. Finally, the performance difference between the kA level injection probe and the traditional injection probe (FCC-120-6A) is analyzed.

Key words: pulsed current injection, kA level, amorphous core, current injection probe, inductive coupling

随着电磁环境的日益复杂, 电子设备的抗电磁脉冲干扰能力已经成为基本指标, 电子设备的电磁敏感性研究更加重要^[1-3]。脉冲电流注入法是 GJB8848-2016 规定的一种电磁脉冲试验方法^[4-5], 用于电子设备敏感性位置确定和敏感性阈值测试等。

脉冲电流注入 (pulsed current injection, PCI) 试验中, 注入环作为能量耦合装置, 将脉冲源输出能量加载到受试设备端口, 是试验平台的重要组成部分。在前期的研究工作中, 解决了注入环的时域电路建模等关键技术问题, 建立了脉冲电流注入试验平台的完整电路模型, 实现了 PCI 试验的量化仿真设计, 可用于指导和优化 PCI 试验设置。

但是, 以上工作都是基于电磁兼容领域广泛应用的电流注入环, 如美国 FCC 公司生产的 FCC-120-6A 等, 受其电缆连接头的耐压强度限制 (小于 2 kV), 此类注入环的注入电流幅度通常在百安以下, 难以满足高空电磁脉冲试验中 kA 级电流注入的需求。

针对上述问题, 本文设计了一种基于非晶磁芯^[6-8]的 kA 级脉冲电流注入环, 初级线圈采用线缆直接引出的方式, 可避免传统注入环电缆接头在高压情况下可能出现沿面闪络的问题, 但是这一方式也导致了两种注入环在电路结构上的差异。因此在开展脉冲电流注入试验仿真设计过程中, 参考文献 [9] 建立的注入环 (FCC-120-6A) 电路模型已经不再适用。为解决基于 kA 级电流注入环的 PCI 试验仿真问题, 本文建立了上述注入环的集总参数电路模型, 通过对端口阻抗测试数据的拟合求取了模型参数值, 然后对模型进行了频域和时域验证。

* 收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-05-15

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)

联系方式: 董亚运, dongyayun@nint.ac.cn。

1 基本原理

采用感性耦合方式的 PCI 试验平台包括脉冲源、电流注入环、受试设备 (equipment under test, EUT)、陪试设备 (auxiliary equipment, AE)、电流测试与记录系统。典型的试验设置如图 1 所示。

图 2 为 PCI 试验平台整体电路的基本模型, 包括脉冲源及输出电缆、电流注入环及受试线缆间的耦合、受试线缆和负载四部分。其中 R_L 和 R_R 为测试支架两端连接负载, 用以代表受试设备和陪试设备的端口阻抗。

在建立模型时, 首先建立线缆及其固定支架的电路模型; 再根据实验获取受试设备和陪试设备的电压响应数据, 便可推导出电流注入环与受试线缆构成的耦合电路模块的各端口响应; 最后建立耦合模块的电路模型, 并计算出电流注入环的输入阻抗, 完成整个平台的建模^[10-12]。

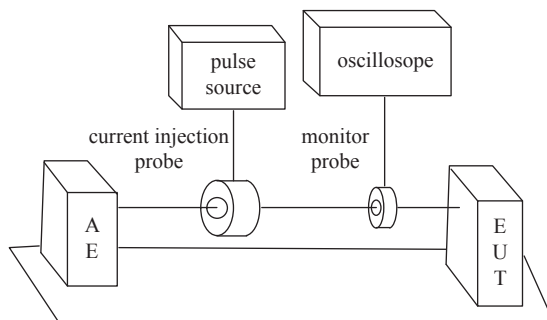


Fig. 1 Typical test setting of PCI

图 1 PCI 试验典型设置

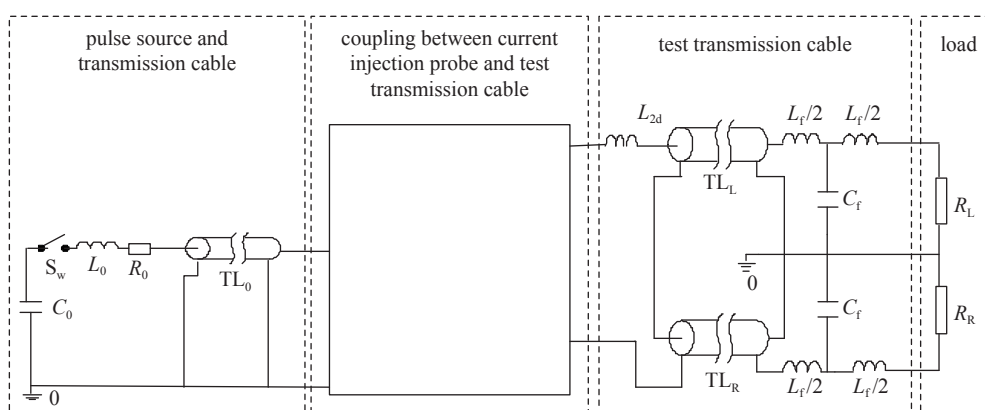
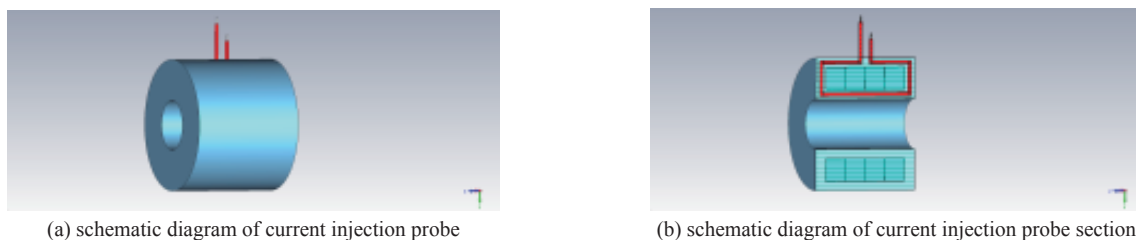


Fig. 2 Model of the integrated circuit of PCI test platform

图 2 PCI 试验平台整体电路模型

本文主要介绍注入环以及受试线缆间耦合部分的建模, PCI 试验平台整体模型其他部分与文献 [9] 基本一致, 此处不做介绍。

图 3 示出了本文研制的电流注入环的结构示意图。注入环的外径为 160 mm, 内径为 44 mm, 宽度为 170 mm。注入环采用非晶磁芯, 相比于铁氧体磁芯具有更高的磁饱和度。另外, 现有技术中电流注入环的初级线圈是通过电缆接头引出的, 其中, 电缆一端连接激励源, 另一端屏蔽层连接注入环壳体, 芯线穿入磁芯, 在另一端短路连接至壳体形成注入环线圈。本方案中, 为了避免电缆接头在高压下出现的沿面闪络的问题, 注入环初级线圈采用线缆直接引出, 如图 3(b) 所示, 耐压强度主要取决于两线间的空气绝缘距离, 在其接头相距大于 2 cm 的情况下, 按空气绝缘强度 25 kV/cm 预估, 可实现大于 50 kV 的绝缘强度, 能够用于开展 kA 级电流注入。



(a) schematic diagram of current injection probe

(b) schematic diagram of current injection probe section

Fig. 3 Schematic diagram of current injection probe structure

图 3 电流注入环结构示意图

2 注入环的建模

2.1 物理模型

图 4 示出了电流注入环的电路模型, 在电流注入环的端口阻抗部分中, C_1 是初级线圈与注入壳体间的电容, L_1 为初级线圈与注入环壳体间的电感, L_2 为磁芯电感。磁芯具有随频率变化的复数磁导率^[3], 因此 L_1 和 L_2 的值同

样具有频变特性,其阻抗可由 RLC 电路等效。文中基于阻抗等效原理,选取合适结构和数值的集总元件(电阻、电感、电容)来表征 L_1 和 L_2 阻抗。考虑到模型的复杂程度,为保证仿真收敛,适当减少了拟合电路的参数数量。如图 4 所示, L_1 的初级等效电路由 L_{eq1} , C_{eq1} , R_{eq1} 并联组成, L_2 的初级等效电路由 L_{eq2} , C_{eq2} , R_{eq2} 并联组成。为了提高模型对磁芯阻抗的拟合精度,进一步优化 L_1 和 L_2 电路模型。如图 4 所示,优化电路由电感和电阻串联构成,优化后的电路模型中, L_1 包括 1 条优化电路,如图 4 中的 L_{op1} , R_{op1} ; L_{eq} 包括 2 条优化电路,如图 4 中的 L_{op2} , R_{op2} 和 L_{op3} , R_{op3} 。

容易理解的是, L_1 和 L_2 的优化电路越多,模型对磁芯阻抗的拟合精度越高,但随着优化电路的增多,模型的复杂度随之增大。本文在保证拟合精度的前提下,为了减小模型的复杂度,模型中 L_1 包括 1 条优化电路, L_2 包括 2 条优化电路。应用中,可以根据实际需求增加优化电路的数量。

2.2 参数求取

为求取电路模型中各参数值,文章将测试获取的电流注入环输入阻抗 Z_{probe} 作为目标值,采用粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO)^[13] 对电路模型中的各参数值进行求解。

粒子群优化算法^[14-16]由 Eberhart 与 Kennedy 在 1995 年提出,是一种通过模仿自然界中鸟群寻找食物的现象来构建数据模型的仿生优化算法,因其参数较少,搜索过程简单,且搜索效果较好,算法一经提出便受到学术界的广泛关注,并应用于函数优化、神经网络训练、工程应用等诸多领域。

Brian Birge 在 2003 年开发了粒子群优化算法的 MATLAB 工具箱 PSOt^[17],实际计算过程中,只需要根据需求编写好目标函数,并设置好函数各变量的取值范围、迭代次数及间隔,PSOt 便可以自动开展优化计算,使用灵活性非常强。

在利用 PSOt 求取参数值的过程中,设定目标函数为

$$F = \sum_f |\text{abs}(Z_{\text{probe_op}}) - \text{abs}(Z_{\text{probe}})| + \sum_f |\text{abs}(S_{21_m}) - \text{abs}(S_{21_s})| \quad (1)$$

式中: Z_{probe} 为实验获取的电流注入环输入阻抗; $Z_{\text{probe_op}}$ 为电流注入环等效电路模型输入阻抗; S_{21_m} 为计算出的传输系数; S_{21_s} 为 PSPICE 仿真的传输系数。根据电路模型,可以得出

$$Z_{\text{probe}} = R_0 \times \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (2)$$

$$Z_{\text{probe_op}} = \frac{A_{11}(Z_{\text{wire_op}} + Z_{\text{core_op}}) + A_{12}}{A_{21}(Z_{\text{wire_op}} + Z_{\text{core_op}}) + A_{22}} \quad (3)$$

式中: 初级传输线段矩阵 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & jZ\sin(\theta) \\ j\frac{1}{Z}\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix}$, $\theta = \sqrt{L_{\text{pri}} \times C_{\text{pri}}} \times l_{\text{pri}}$, L_{pri} 为初级线缆的等效电感, C_{pri} 为初级线缆的等效电容, l_{pri} 为初级线缆的长度。

$$Z_{\text{wire_op}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{j\omega L_{eq1}} + \frac{1}{R_{eq1}} + j\omega C_{eq1}} + \frac{1}{j\omega L_{op1} + R_{op1}}} \quad (4)$$

$$Z_{\text{core_op}} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_{eq2}} + \frac{1}{R_{eq2}} + j\omega C_{eq2} + \frac{1}{j\omega L_{op2} + R_{op2}} + \frac{1}{j\omega L_{op3} + R_{op3}}} \quad (5)$$

$$Z_{\text{sec_total}} = 2 \times \frac{B_{11} \times 50 + B_{12}}{B_{21} \times 50 + B_{22}} \quad (6)$$

式中: 次级传输线段矩阵 $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & jZ\sin(\theta_1) \\ j\frac{1}{Z}\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) \end{pmatrix}$, $\theta_1 = \sqrt{L_{\text{sec}} \times C_{\text{sec}}} \times l_{\text{sec}}$, L_{sec} 为次级线缆的等效电

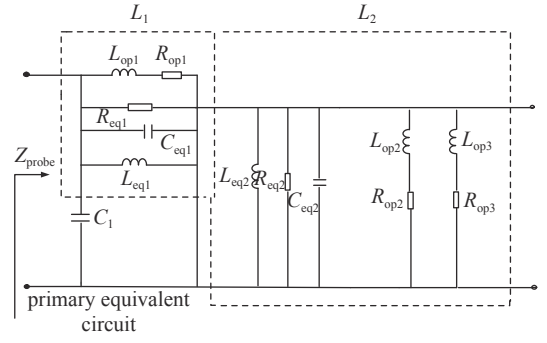


Fig. 4 Model of the integrated circuit of current injection probe

图 4 电流注入环电路模型

感, C_{sec} 为次级线缆的等效电容, l_{sec} 为次级线缆的长度。

$$Z_{\text{total1}} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{\text{core_op}}} + \frac{1}{Z_{\text{sec_total}}}} \quad (7)$$

$$Z_{\text{total2}} = Z_{\text{wire_op}} \quad (8)$$

$$Z_{\text{total}} = Z_{\text{total1}} + Z_{\text{total2}} \quad (9)$$

$$S_{21_m1} = 2 \times \frac{Z_{\text{total}}}{A_{11} \times Z_{\text{total}} + A_{12} + A_{21} \times 50 \times Z_{\text{total}} + A_{22} \times 50} \quad (10)$$

$$S_{21_m2} = 0.5 \times \frac{S_{21_m1} \times Z_{\text{total1}}}{Z_{\text{total}}} \quad (11)$$

$$S_{21_m} = \frac{50 \times S_{21_m2}}{50 \times B_{11} + B_{12}} \quad (12)$$

图 4 中电流注入环及受试线缆间的耦合电路中各参数值经过优化后分别取 $L_{\text{op1}}=1.16 \mu\text{H}$, $R_{\text{op1}}=496 \Omega$, $L_{\text{eq1}}=1.5 \mu\text{H}$, $R_{\text{eq1}}=200 \Omega$, $C_{\text{eq1}}=42 \text{ pF}$, $L_{\text{eq2}}=17 \mu\text{H}$, $R_{\text{eq2}}=96 \Omega$, $C_{\text{eq2}}=100 \text{ pF}$, $L_{\text{op2}}=2.83 \mu\text{H}$, $R_{\text{op2}}=38 \Omega$, $L_{\text{op3}}=84 \mu\text{H}$, $R_{\text{op3}}=208 \Omega$, 采用上述参数时, 电流注入环输入阻抗 Z_{probe} 实验与仿真结果比对如图 5 所示, 图 5(a) 示出了幅度对比结果, 图 5(b) 示出了相位对比结果。其中, 仿真数据是图 4 的电路模型在 PSPICE 中采用优化参数时获取到的, 实际测量数据是通过本文提出的电流注入环的实物通过网络分析仪测量得到。从图中可以观察到, 低频时, Z_{probe} 的幅值和相位的实验结果与仿真结果具有较高的一致性, 在高频分量上, 由于传输线缆自身的阻抗影响, 实验结果的幅度低于仿真结果的幅度。

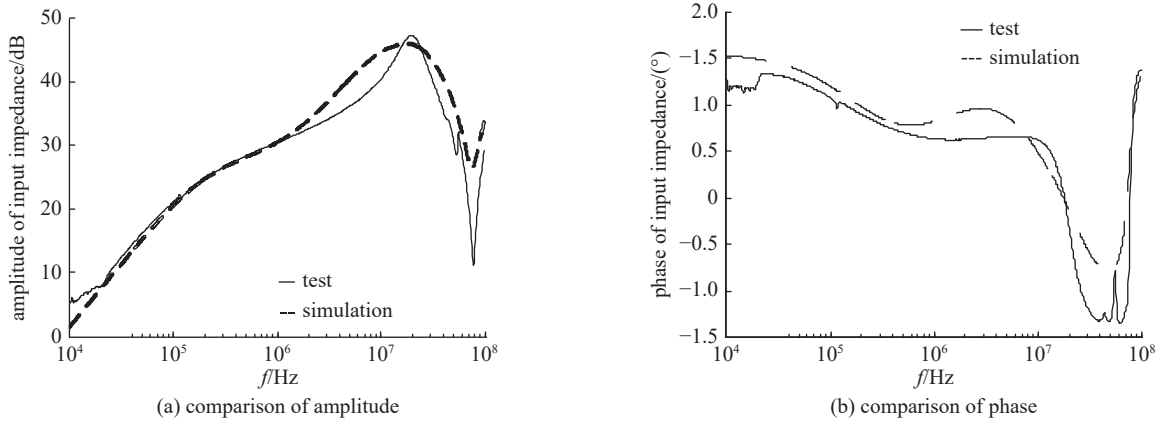


Fig. 5 Input impedance comparison of current injection probe between test and simulation

图 5 电流注入环输入阻抗的实验与仿真结果对比

3 模型的实验验证

下边开展图 2 试验平台全模型的实验验证, 模型的实验验证包括频域验证和时域验证两部分。

3.1 频域验证

在频域验证中, 激励源由矢量网络分析仪构成。矢量网络分析仪型号为 E5062A, 频率范围为 10 kHz~3 GHz。网络分析仪的端口 1 连接电流注入环, 端口 2 连接测试支架右端, 测试支架的左侧接 50 Ω 匹配负载。同时用内阻 50 Ω 的正弦信号源代替基本电路模型中的脉冲源, 测量得到 S_{21} 参数, 开展频域仿真。实验结果与仿真结果对比如图 6 所示, 其中, 图 6(a) 为 S_{21} 参数测量的幅频特性曲线, 图 6(b) 为 S_{21} 参数测量的相频特性曲线, 测量的频率范围为 10 kHz~100 MHz。从图中可以看出, 两者在低频一致性较好, 高频存在差异的本质原因是基于电路和传输线理论的注入环模型, 在进行结构复杂、尺寸较大的注入环建模时, 物理上存在一定的缺陷。不过对于宽频谱脉冲电流注入而言, 这种差异对时域波形影响不大, 误差在可接受范围之内。

3.2 时域验证

在时域验证中, 双指数脉冲源作为激励源, 电流注入环连接脉冲源, 示波器设置在 50 Ω 负载状态, 连接在测试

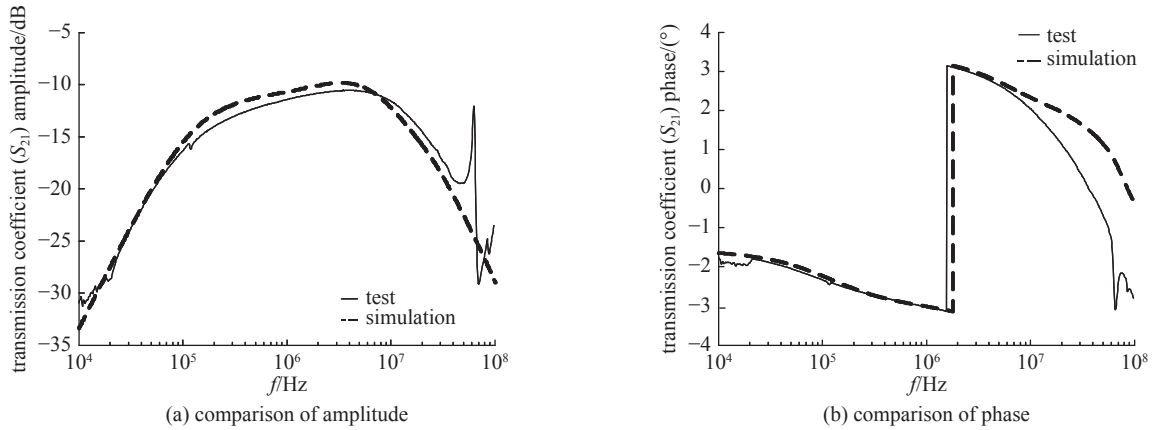


Fig. 6 Frequency domain verification

图 6 频域验证结果

支架右侧,测试支架左侧连接 $50\ \Omega$ 负载。监测测试支架右侧负载端的耦合电压。图 7 示出了负载耦合电压的实验结果与仿真结果的对比。从图中可以观察到两者在波形上整体符合较好,从而验证了感性 PCI 整体电路模型的可行性与正确性。

4 注入环应用分析

设定一种常用的应用场景:传输线缆连接在测试支架上,测试支架两边短路,其中,传输线缆长度为 $2\ \text{m}$,测试支架线缆高度为 $0.13\ \text{m}$,电流注入环连接双指数波脉冲源。在此应用场景下,验证本文设计的电流注入环可实现 kA 级电流注入,仿真过程中分别监测电流注入环端口电压和测试支架右侧负载端的耦合电流(支架两侧负载耦合电流幅值相同)。图 8 示出了仿真结果图,其中,图 8(a)为负载耦合电流仿真图,图 8(b)为电流注入环端口电压幅值仿真图。从图中可以观察到,在线缆两侧短路时,负载耦合电流幅值约为 $1100\ \text{A}$,可满足实际试验中的 kA 级电流注入的需求,此时电流注入环的端口电压幅值可达到 $38\ \text{kV}$ 左右。

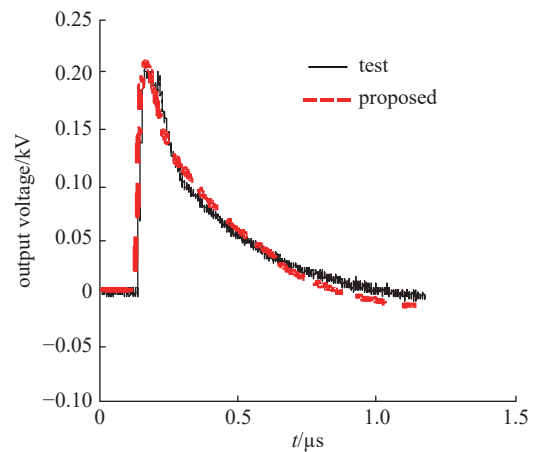


Fig. 7 Time domain verification

图 7 时域验证结果

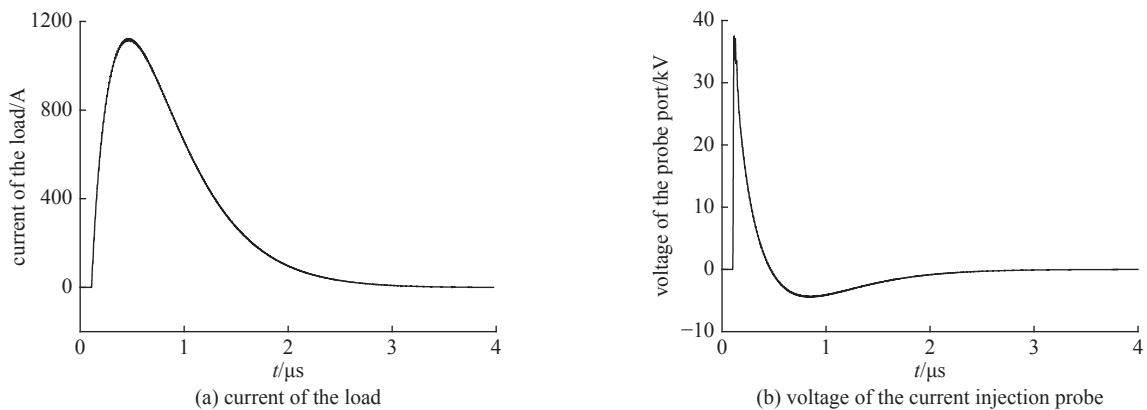


Fig. 8 Simulation results

图 8 仿真结果

5 结论

本文设计的电流注入环,初级线圈采用了线缆直接引出的方式,可实现 kA 级的脉冲电流注入。同时为开展基于该注入环的脉冲电流注入试验仿真分析,本文建立了其集总参数 SPICE 电路模型,并通过对注入环端口阻抗测试结果的拟合,获取了模型参数,最后对模型进行了频域和时域的验证。本文介绍的电流注入环及其模型,满足了

高空电磁脉冲试验中的 kA 级电流注入需求, 该模型还可用于不同试验装置对注入效果影响的分析, 具有重要的工程应用价值。受实验条件的限制, 本文对电流注入环的注入电流幅值可达到 kA 级仅进行了仿真验证, 下一步工作将围绕如何进行实验验证开展。

参考文献:

- [1] 毛从光, 程引会, 谢彦召. 高空电磁脉冲技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 2019. (Mao Congguang, Chen Yinhui, Xie Yanzhao. Technical basis of high altitude electromagnetic pulse[M]. Beijing: Science Press, 2019)
- [2] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. High power microwaves[M]. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2007.
- [3] 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)
- [4] GJB 8848-2016, 系统电磁环境效应试验方法[S]. (GJB 8848-2016, Electromagnetic environmental effects test methods for systems[S])
- [5] 李云, 静广宇. GJB 8848应用于运载火箭的试验方法探讨[J]. 安全与电磁兼容, 2020(1): 41-45. (Li Yun, Jing Guangyu. Discussion on the test method of GJB 8848 applied to launch vehicle[J]. Safety & EMC, 2020(1): 41-45)
- [6] 秦锋, 周辉, 毛从光, 等. 纳秒级脉冲电流下铁氧体磁环饱和特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3381-3386. (Qin Feng, Zhou Hui, Mao Congguang, et al. Saturation characteristics of ferrite beads impacted by the nanosecond's current pulse[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3381-3386)
- [7] 秦锋, 周辉, 崔志同. 磁环的HEMP传导特性实验[J]. 现代应用物理, 2016, 7: 040602. (Qin Feng, Zhou Hui, Cui Zhitong. Experimental study on HEMP conduction properties of magnetic rings[J]. Modern Applied Physics, 2016, 7: 040602)
- [8] 张国伟, 丛培天, 乔开来, 等. 脉冲磁化条件下非晶磁芯的损耗特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(5): 1247-1250. (Zhang Guowei, Cong Peitian, Qiao Kailai, et al. Loss characteristics of glassy alloy magnetic core under pulsed magnetization[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(5): 1247-1250)
- [9] 崔志同, 毛从光, 孙蓓云. 感性脉冲电流注入装置的SPICE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)
- [10] Grassi F. Accurate modeling of ferrite-core effects in probes for bulk current injection[C]//Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems. Tel Aviv, Israel: IEEE, 2009: 1-6.
- [11] Grassi F, Spadacini G, Pignari S A. SPICE behavioral modeling of RF current injection in wire bundles[J]. IEICE Transactions on Communications, 2014, E97.B(2): 424-431.
- [12] Grassi F, Marliani F, Pignari S A. SPICE modeling of BCI probes accounting for the frequency-dependent behavior of the ferrite core[C]//Proceedings of the 19th General Assembly of International Union of Radio Science. Chicago, USA: IEEE, 2008: 120-125.
- [13] 刘波. 粒子群优化算法及其工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 26-39. (Liu Bo. Particle swarm optimization algorithm and its engineering applications[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 26-39)
- [14] Kennedy J, Eberhart R C, Shi Yuhui. Swarm intelligence: a volume in the Morgan Kaufmann series in artificial intelligence[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [15] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of International Conference on Neural Networks. Perth: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [16] 刘开丽. 粒子群优化算法的研究与应用[D]. 合肥: 安徽大学, 2013. (Liu Kaili. Research and application of particle swarm optimization algorithm[D]. Hefei: Anhui University, 2013)
- [17] Eberhart R C, Shi Yuhui. Particle swarm optimization: developments, applications and resources[C]//Proceedings of 2001 Congress on Evolutionary Computation. Seoul: IEEE, 2001: 81-86.