

kA级脉冲电流注入环的SPICE电路模型

崔志同, 陈 伟, 董亚运, 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, 陕西西安 710024)

摘要: 在考核电力/电子设备抗强电磁脉冲性能的千安培(kA)级脉冲电流注入试验中,注入环通过感性耦合的方式将脉冲源输出能量加载到受试设备端口,是注入试验平台的重要组成部分.为解决kA级电流注入环的时域电路仿真难题,本文以Montena IC3B型注入环为例,采用多段集总参数电路串联的方法,建立了考虑分布参数因素的kA级注入环SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, SPICE)电路模型;并依据注入环磁芯材料特性,对端口阻抗测试数据进行了分段拟合,采用粒子群优化算法求取了电路模型参数;最后将该模型应用于kA级脉冲电流注入平台的整体电路仿真,并进行了实验验证,结果表明该模型具有较高的时域仿真精度,可用于电力/电子设备强电磁脉冲电流注入试验的设计、分析、效果预估等工作.

关键词: 电磁脉冲;脉冲电流注入;电流注入环;SPICE电路模型

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(No.SKLIPR1901)

中图分类号: TM13;O441

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)03-0632-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210535

SPICE Circuit Model of the kA Pulsed Current Injection Probe

CUI Zhi-tong, CHEN Wei, DONG Ya-yun, LIU Zheng

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

Abstract: In the kA pulsed current injection test to evaluate the anti-strong electromagnetic pulse performance of electric/electronic equipment, the injection probe can load the pulse generator energy to the port of the tested equipment through inductive coupling, which is an important part of the injection test platform. In order to solve the time-domain circuit simulation problem of kA-level current injection probe, taking Montena IC3B injection probe as an example, the paper develop a SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) model with series of lumped parameter circuit. According to the material characteristics of the injection probe, the input impedance measurement data is fitted in frequency band, and the circuit model parameters are obtained by particle swarm optimization algorithm. Finally, the model is applied to the complete circuit simulation of the kA pulse current injection platform, and the experimental results show that the model has high time-domain simulation precision and can be used in the design and analysis of the high electromagnetic pulse current injection test of electric/ electronic equipment.

Key words: electromagnetic pulse; pulsed current injection; current injection probe; SPICE circuit model

Foundation Item(s): Program of State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect (No. SKLIPR1901)

1 引言

高空电磁脉冲(High-altitude ElectroMagnetic Pulse, HEMP)可在连接有长线缆的设备端口产生高达千安(kA)级的耦合电流^[1],影响电子设备/系统的正常运行甚至造成永久性损伤^[2]. HEMP是国家基础设施特别是电力系统面临的重大安全威胁之一^[3,4]. 脉冲电流注入(Pulsed Cur-

rent Injection, PCI)是电子设备/系统 HEMP 效应研究及性能鉴定的一种重要试验方法,是 GJB 8848-2016 等标准规定的测试手段^[5,6]. 开展脉冲电流注入的电路仿真研究,有助于开展 PCI 试验设计、设置优化及效果预估等^[7].

基于变压器原理的电流注入环,可将脉冲源能量通过感性耦合的方式加载到受试设备端口,是 PCI 试验

平台的重要组成部分. 由于注入环所采用的磁性材料(铁氧体等)具有随频率变化的复数磁导率^[8], 其电路特性表征及建模方法一直是 PCI 仿真的难点和重点^[9].

归纳国内外相关文献可知, 当前电流注入环的仿真模型主要有 4 种: 一是 Flavia Grassi 等利用注入环端口阻抗测试数据, 计算得出注入环磁芯不同频率下的阻抗数据, 建立了注入环的频域集总参数 SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, SPICE) 电路模型^[8,10]; 二是 Nicola Toscani 等针对电磁兼容标准 IEC61000-4-6 中的电磁钳(尺寸近似于 kA 级脉冲电流注入环), 基于传输线原理, 提出了注入环频域分布参数电路模型, 主要方法是将初级线圈、受试线缆和参考地视为三导体传输线, 并通过工程优化算法确定了其模型参数数值^[11]; 三是崔志同等在 Flavia Grassi 工作的基础上, 采用 RLC(电阻/电感/电容)网络拟合表征注入环磁芯阻抗, 用以解决频域模型在时域仿真过程中的收敛性问题, 建立了注入环的时域集总参数电路仿真模型^[9,12]; 四是 Patrick Deroy 等通过对注入环磁芯磁导率参数的拟合确定其物理参数, 并使用电磁仿真软件(CST Microwave Studio)建立了注入环的三维全波模型^[13,14].

对于 kA 级脉冲电流注入环, 上述前两种频域模型一方面存在时域仿真上的收敛性等问题, 另一方面不能加载脉冲源的实际电路模型, 无法实现脉冲电流注入的全平台仿真^[9]; 同时, kA 级脉冲电流注入环由于存在高压绝缘、防止磁饱和等要求, 其尺寸通常较大(如 Montena IC3B 型注入环长度为 0.7 m), 在电磁脉冲传导环境频段内无法满足电小条件, 前述第三种基于 RLC 网络的时域集总参数电路模型无法对其进行精确仿真, 特别是受高频影响显著的脉冲前沿部分; 至于注入环的全波模型, 由于磁芯参数难以精确拟合, 导致仿真精度较低, 且无法利用 SPICE 丰富的元器件模型库处理受试设备为非线性的情况^[15].

因此有必要建立一种考虑分布参数的 SPICE 电路模型, 实现注入环的时域仿真, 提高其高频仿真精度, 同时也为开展脉冲电流注入的全平台电路仿真奠定基础. 本文以 Montena 公司的 IC3B 型 kA 级电流注入环为例, 介绍考虑分布参数的 PCI 电流注入环电路建模方法, 研究基于多段集总参数电路的注入环 SPICE 建模技术, 并在此基础上开展模型的应用和验证工作.

2 基本原理及设置

IC3B 注入环实物及结构尺寸如图 1 所示, 包括连接电缆、磁芯、金属材质外壳, 其中电缆一端连接激励源, 另一端屏蔽层连接注入环壳体, 芯线则从左侧穿入磁芯, 在右侧短路连接至壳体构成注入环初级线圈. 注入环外壳长宽高为 700 mm×205 mm×250 mm, 磁芯内外

径分别为 78 mm、134 mm, 磁芯长度为 620 mm. 其主要技术指标如下: 频率范围 180 kHz~60 MHz, 最大耐受电压 100 kV(500 ns 脉宽下), 最大峰值电流大于 5 kA.

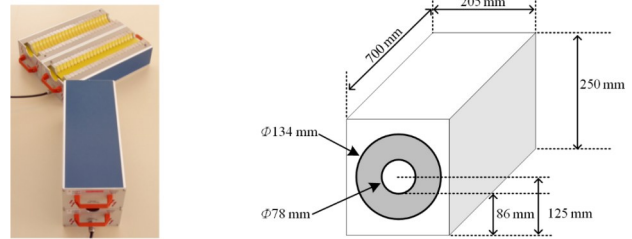


图 1 IC3B 电流注入环实物及外形尺寸

本文拟参考传输线的集总参数近似电路模型, 使用多段串联的集总电路模型表征电流注入环的分布参数特性^[16,17]. 分段数 N 由注入环长度 l_{probe} 、注入环初级线缆单位长度参数(电感 L 和电容 C)、应用频率上限 f_{max} 、仿真精度 α 等共同决定^[18]. 估算公式如下:

$$N \geq \frac{l_{\text{probe}} \pi f_{\text{max}} \sqrt{LC}}{\sqrt{1 - (\alpha^2/2)^2}} \quad (1)$$

$$LC = \mu_r \mu_0 \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (2)$$

其中, $l_{\text{probe}} = 0.62$ m; 按照 HEMP 传导环境频率范围, 设 $f_{\text{max}} = 100$ MHz^[19]; μ_0 、 ε_0 为真空磁导率和介电常数, μ_r 、 ε_r 分别为注入环初级线缆与壳体之间介质的平均相对磁导率和相对介电常数, 这里按照 $\mu_r \varepsilon_r = 10$ 进行估算. 取 $N = 50$ 时, 根据式(1)、式(2)计算得知, 采用分段集总参数模型仿真传输线分布特性的误差 $\alpha < 5\%$, 可用于开展 IC3B 电流注入环的电路仿真研究.

为进行注入环电路模型在 kA 级 PCI 中的验证及应用研究, 本文参照 PCI 试验的基本设置, 建立基于 IC3B 电流注入环的 kA 级 PCI 电路建模研究平台, 如图 2 所示. 该平台主要由激励源、注入环、被试线缆及其末端负载(R_L , 测量设备端口阻抗)、参考地平面及线缆固定支架构成, 另外还包括用于监视、记录被试线缆末端耦合电压的测量设备.



图 2 基于 IC3B 注入环的 kA 级 PCI 电路建模研究平台

3 注入环的电路建模与分析

3.1 注入环的电路建模

将注入环的初级划分为 $N = 50$ 段集总参数电路,

每段包括两部分:一是电缆芯线与壳体组成的传输线特性参数,用 C_{wire_n} 、 L_{wire_n} 表示;二是由各段磁芯形成的电感,用 L_{core_n} 表示.其中 $n=1,2,3,\dots,N$.注入环初级的多段集总参数电路模型如图3所示.

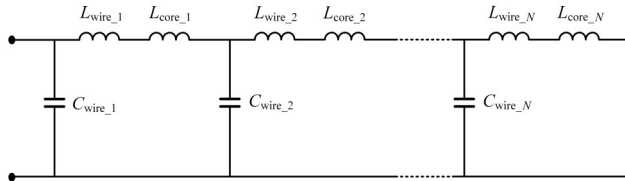


图3 注入环初级的多段集总参数电路模型

与百安培以下注入环(如文献[9]中的FCC-1206-A)的时域建模方法相似,IC3B注入环的电路建模首先在不考虑次级的情况下,获取其端口阻抗测试数据,之后再采用粒子群优化算法拟合得到 C_{wire_n} 、 L_{wire_n} 、 L_{core_n} 三个参数在频域上的取值,最后再利用RLC网络对上述参数进行时域表征.具体分为四个步骤.

(1) 注入环阻抗的测量与计算

将IC3B外接电缆末端高压连线接头更改为同轴电缆N型接头,以便于开展测试工作,减小杂散参数影响.IC3B连接电缆的型号为RG217/U,长度 $l_{\text{cable}}=1.3\text{ m}$,单位长度电感 $L_{\text{cable}}=250\text{ nH/m}$,电容 $C_{\text{cable}}=100\text{ pF/m}$,特征阻抗 $Z_{\text{cable}}=50\ \Omega$,其传输矩阵如式(3)所示.

$$\Phi_{\text{F}} = \begin{pmatrix} \cos \theta & jZ_{\text{cable}} \sin \theta \\ j\frac{1}{Z_{\text{cable}}} \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 $\theta = w \sqrt{L_{\text{cable}} C_{\text{cable}}} \times l_{\text{cable}}$.

使用矢量网络分析仪测量注入环端口S参数.利用 S_{11} 可以计算得到电流注入环输出电缆端口阻抗 Z_{m} ,如式(4)所示,其中 R_0 为网络分析仪内阻.去除连接电缆因素,便可得到注入环磁芯初级阻抗 Z_{probe_m} ,如式(5)所示.

$$Z_{\text{m}} = R_0 \times \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (4)$$

$$Z_{\text{probe}_m} = \frac{\Phi_{\text{F}}(1,2) - \Phi_{\text{F}}(2,2) \times Z_{\text{m}}}{\Phi_{\text{F}}(2,1) \times Z_{\text{m}} - \Phi_{\text{F}}(1,1)} \quad (5)$$

(2) 电路模型表征的注入环阻抗

参照传输线单位长度电参数的求解方法,同时假定线缆对地电容 C_{wire_n} 、电感 L_{wire_n} 为常数,而磁芯形成的阻抗 L_{core_n} 保持频变特性,三个参数的数学表达式分别为^[11]:

$$L_{\text{wire}_n} = \left(\frac{l_{\text{wire}_n}}{N} \right) \times \frac{\mu_0 \mu_{\text{wire}}}{2\pi} \ln \left(\frac{2h_{\text{wire}}}{r_{\text{wire}}} \right) \quad (6)$$

$$C_{\text{wire}_n} = \left(\frac{l_{\text{wire}_n}}{N} \right) \times \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_{\text{wire}}}{\ln(2h_{\text{wire}}/r_{\text{wire}})} \quad (7)$$

$$L_{\text{core}_n} = \left(\frac{b_{\text{core}}}{N} \right) \times \frac{\mu_0 \mu_{\text{core}}}{2\pi} \ln(r_{\text{core}}^{(o)}/r_{\text{core}}^{(i)}) \quad (8)$$

其中,线缆长度 $l_{\text{wire}} \approx$ 磁芯长度 $b_{\text{core}} = 620\text{ mm}$,分段数 $N = 50$; $r_{\text{core}}^{(o)}$ 、 $r_{\text{core}}^{(i)}$ 、 h_{wire} 、 r_{wire} 依次为磁芯外径和内径、初级线缆高度及半径: $r_{\text{core}}^{(o)} = 67\text{ mm}$ 、 $r_{\text{core}}^{(i)} = 39\text{ mm}$ 、 $h_{\text{wire}} = 86\text{ mm}$ 、 $r_{\text{wire}} = 1.35\text{ mm}$; μ_{wire} 、 ϵ_{wire} 分别为线缆与地之间介质的平均相对磁导率和相对介电常数, μ_{core} 为磁环磁导率.

电流注入环磁芯的磁化过程是由磁畴转动和畴壁移动叠加而成,磁导率 μ_{core} 可用式(9)表示. K_{spin} 、 w_{spin} 、 K_{dw} 、 w_{dw} 和 β 分别为磁畴转动的静态磁化率、磁畴转动的共振频率、畴壁移动的静态磁化率、畴壁移动的共振频率以及畴壁移动过程中的阻尼系数^[20-22].

$$\mu_{\text{core}}(w) = 1 + \frac{K_{\text{spin}}}{1 + jw/w_{\text{spin}}} + \frac{K_{\text{dw}} w_{\text{dw}}^2}{w_{\text{dw}}^2 - w^2 + j\beta w} \quad (9)$$

依据图3所示的电路模型,建立注入环传输矩阵 Φ_{probe} ,如式(10),将式(6)~式(9)代入式(10),之后便可得到电路模型表征的注入环初级阻抗计算值 Z_{probe_c} ,如式(11).

$$\Phi_{\text{probe}} = \left[\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ jwC_{\text{wire}_n} & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & jwL_{\text{wire}_n} + jwL_{\text{core}_n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right]^N \quad (10)$$

$$Z_{\text{probe}_c} = \frac{\Phi_{\text{probe}}(1,2)}{\Phi_{\text{probe}}(2,2)} \quad (11)$$

(3) 注入环磁芯参数的拟合求解

以式(12)为目标函数,采用粒子群优化算法对注入环阻抗测量值 Z_{probe_m} 进行拟合^[23],求解参量 K_{spin} 、 w_{spin} 、 K_{dw} 、 w_{dw} 、 β 、 μ_{wire} 、 ϵ_{wire} 的具体数值.

$$\text{OF} = \sum_f \left| \text{abs}(Z_{\text{probe}_m}) - \text{abs}(Z_{\text{probe}_c}) \right| \quad (12)$$

目标函数OF中包含7个未知参数,如果同时求解难以保证拟合精度,而根据各参数随频率变化的特性,可以分频段进行拟合求解.

首先是低频段(0.01~1 MHz),由于注入环磁芯磁畴转动共振频率 w_{spin} 和畴壁移动共振频率 w_{dw} 通常较高(大于10 MHz),式(9)可简化为 $\mu_{\text{core}} \approx 1 + K_{\text{spin}} + K_{\text{dw}}$;同时低频段 jwC_{wire} 对 Z_{probe_c} 的影响很小,可将 ϵ_{wire} 假设为1;这样OF便可简化仅包含 μ_{wire} 、 $(K_{\text{spin}} + K_{\text{dw}})$ 两组待求参量的函数.拟合计算得到 $\mu_{\text{wire}} \approx 1$ 、 $K_{\text{spin}} + K_{\text{dw}} \approx 49.5$.

之后以上述计算结果为基础,在1~100 MHz范围内对其他参数进行拟合求解,得出 $K_{\text{spin}} \approx 18.2$ 、 $w_{\text{spin}} \approx 1.9 \times 10^8$ 、 $K_{\text{dw}} \approx 31.3$ 、 $w_{\text{dw}} \approx 4.5 \times 10^8$ 、 $\beta \approx 2.2 \times 10^{10}$ 、 $\epsilon_{\text{wire}} \approx 3.3$.这种分频段拟合的方法,可以有效提高参数拟合计算的精度.

(4) 建立注入环的SPICE电路模型

将各参数拟合结果代入式(9),求得 μ_{core} ,进一步利用式(6)~式(8)计算得到图3所示IC3B电流注入环初级

电路模型中的各参数值,并得到该电路模型表征的注入环阻抗 Z_{probe_c} 。其中, $L_{wire_n} = 11.9 \text{ nH}$, $C_{wire_n} = 0.47 \text{ pF}$, L_{core_n} 随频率变化,其阻抗 $Z_{core_n} (j\omega L_{core_n})$ 可用 RLC 网络来表征。

文献[9]详细介绍了基于 RLC 网络的注入环时域建模方法,主要基于阻抗等效原理,选取合适结构和数值的集总元件(电阻、电感、电容),来表征磁芯阻抗,具体过程这里不再赘述。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。其中初级等效电路由 L_{core_eq} 和 R_{core_eq} 并联组成,优化电路由 L_{core_op} 和 R_{core_op} 并联组成。各参数值分别为: $L_{core_eq} = 69.2 \text{ nH}$, $R_{core_eq} = 5.3 \text{ } \Omega$, $L_{core_op} = 48.1 \text{ nH}$, $R_{core_op} = 1.1 \text{ } \Omega$ 。对 50 组串联的 SPICE 模型进行电路方程求解,可得到注入环的 RLC 等效电路端口阻抗 Z_{probe_s} 。

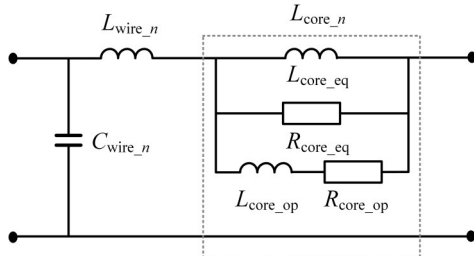


图 4 注入环初级单段集总参数 SPICE 电路模型

3.2 注入环电路模型的分析

通过上一小节的工作,我们得到了三种形式的注入环输入端口阻抗(不含电缆部分),即实验测量值 (Z_{probe_m})、电路模型计算值 (Z_{probe_c})、基于 RLC 网络的 SPICE 模型拟合值 (Z_{probe_s})。三者的比对如图 5 所示。在幅频域,三者一致性较好;在相位谱上,电路模型计算值和 SPICE 模型拟合值一致性较好(说明 SPICE 模型较好的表征了计算值),但它们与实测数据在部分区域存在一定差异,原因在于拟合所采的目标函数 OF 是阻抗幅度差值,另外在拟合过程中对一些参数进行了假定性的简化,比如在电路模型中将线缆对地的单位电参数 μ_{wire} 、 ϵ_{wire} 设定为常数等等。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。

另外一方面,对于 IC3B 电流注入环,若忽略分布参数因素,采用文献[9]介绍的集总参数建模方法。首先面临的问题是初级线圈本身尺寸较长,其自感 (L_{wire_n}) 与磁芯产生的电感 (L_{core_n}) 具有可比性,仅仅测试端口阻抗难以将两者区别并拟合,必须结合次级耦合情况进行注入环电路参数的拟合,具体过程这里不做详细介绍。通过这一方法得到的磁环

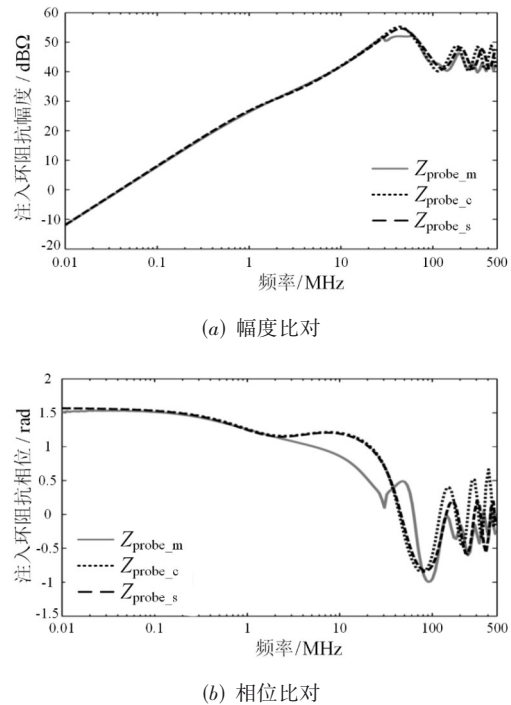


图 5 IC3B 注入环三种形式阻抗 ($Z_{probe_m} / Z_{probe_c} / Z_{probe_s}$) 的比对

阻抗拟合值与实测值的对比如图 6 所示,可见,该方法在低频段 (<10 MHz) 也具有较高的仿真精确度,但在高频段与实测值的差异较为明显。这也印证了

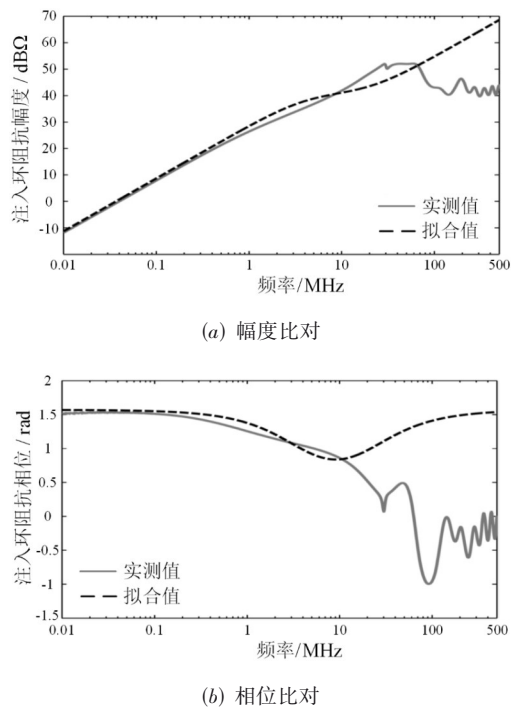


图 6 注入环阻抗测量值与集总参数电路模型拟合值比对

kA 级电流注入环建模时考虑分布参数影响的必要性.

4 注入环模型的应用与验证

在注入环建模的基础上,完成注入环初级与次级耦合电路的建模,加入激励源、受试线缆末端负载等,实现图2所示 kA 级 PCI 平台的完整电路模型,开展注入环模型的应用与验证工作.

4.1 注入环初级与次级耦合电路的 SPICE 模型

与初级电路模型相对应,注入环次级与初级的耦合电路模型采用多段集总参数串联的方式.各分段单元模型如图7所示,主要包括线缆及其串扰模型、磁芯耦合作用模型两部分.

表征次级线缆对地传输特性的参数 $C_{\text{wire}2_n}$ 、 $L_{\text{wire}2_n}$ 可参考式(6)、式(7)求取,其中相对磁导率和介电常数按与初级一致估算,计算结果为 $C_{\text{wire}2_n}=0.35 \text{ pF}$, $L_{\text{wire}2_n}=16 \text{ nH}$;不考虑磁芯作用下,次级与初级间的直接耦合参数按照双传输线串扰模型计算^[24],互感 $L_{\text{wire}12_n}=4.16 \text{ nH}$,互电容 $C_{\text{wire}12_n}=0.04 \text{ pF}$,耦合系数 $k_{\text{wire}_n}=0.3$.

磁环耦合电感采用线性理想变压器模型进行表征,耦合电感 $L_{\text{core}2_{\text{eq}}}=L_{\text{core}_{\text{eq}}}=69.2 \text{ nH}$,耦合系数 $k_{\text{core}}=1$.

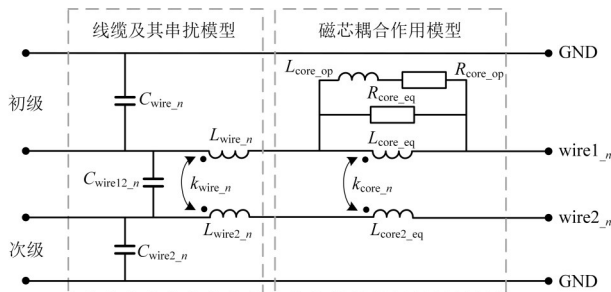


图7 注入环初级与次级耦合的 SPICE 模型

4.2 PCI 平台的完整电路模型

基于 IC3B 注入环的 PCI 平台(图2)的完整电路模型如图8所示.除50组串联的单段电路模型(如图7所示)外,初级还包括激励源、1.3 m 注入环自带连接电缆 TL_0 (特征阻抗 $Z_{\text{cable}}=50 \Omega$,传输时间延迟 $\tau=6.75 \text{ ns}$)、电缆芯线在进入磁环前的4 cm 连接线(用T型集总电路近似表征,按传输线进行参数估算, $L_c=76 \text{ nH}$, $C_c=0.45 \text{ pF}$).

注入环两侧传输线 TL_L 、 TL_R 的主要参数设置:架高 $h_{\text{wire}2}=125 \text{ mm}$,线长 $l_{\text{wire}2}=0.9 \text{ m}$,线径 $r_{\text{wire}2}=0.4 \text{ mm}$,对应的特征阻抗 $Z_{\text{wire}2}=386 \Omega$,传输时间延迟 $\tau=0.47 \text{ ns}$;线缆固定竖板采用电感 L_f 、电容 C_f 组成的T型集总电路模型

(参见图8), $L_f=6 \text{ nH}$, $C_f=2.5 \text{ pF}$.

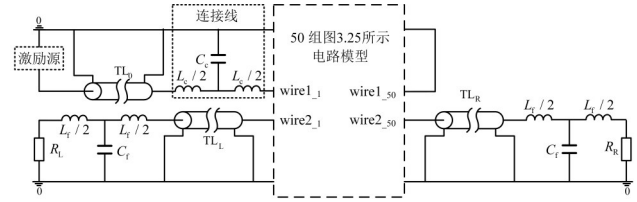


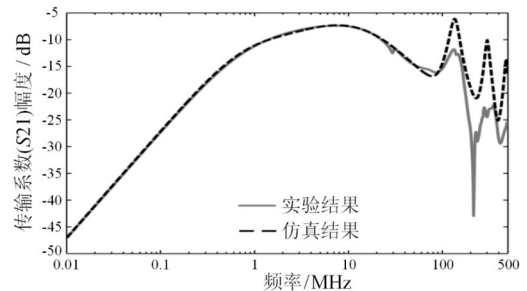
图8 IC3B PCI 实验研究平台的整体电路模型

4.3 实验验证

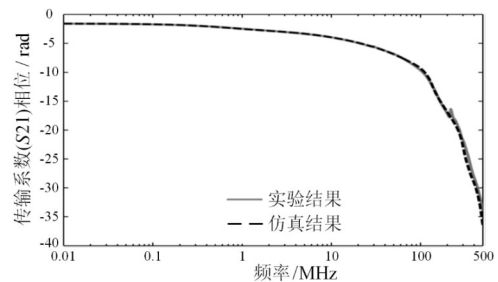
电路模型的验证实验包括频域实验和时域实验两种,前者使用矢量网络分析仪作为激励源,端口1连接注入环,端口2连接测试支架右侧,同时内阻设为 50Ω (R_R),测试支架左侧 R_L 设为 50Ω ;后者使用前沿 20 ns 、半高宽 500 ns 的双指数波脉冲源作为激励源,其电路模型参见文献[9],脉冲源输出端连接注入环,测试支架左侧 R_L 设为 50Ω ,右侧连接示波器测量电压值,示波器内阻设为 50Ω (R_R).

频域验证实验中,传输系数(S_{21})的测试结果与仿真结果比对如图9所示,在 100 MHz 以下,两者具有很好的 consistency,但在更高频段上仿真的精确性相对较低.

时域验证实验中,脉冲源加压 1 kV ,测试支架右侧 R_R 上耦合电压的测试结果和仿真结果如图10所示,除部分细节上的差异外,两者一致性较好.



(a) 幅度比对



(b) 相位比对

图9 IC3B PCI 频域验证实验的测试与仿真结果比对

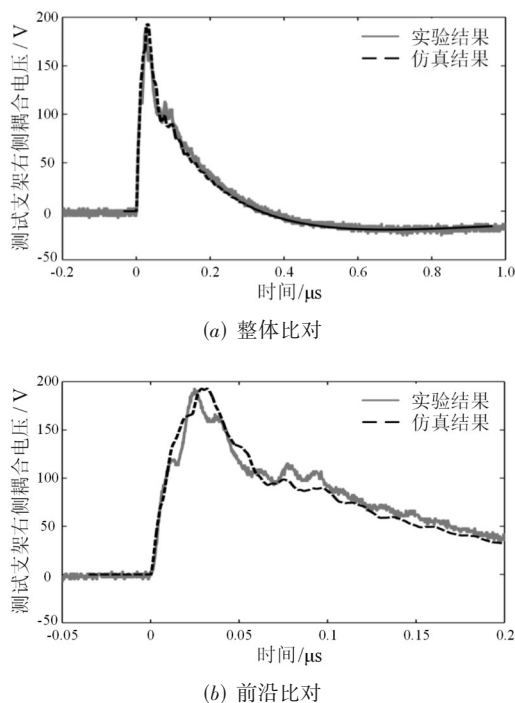


图 10 IC3B PCI 时域验证实验的测试与仿真结果比对

5 总结

本文以 IC3B 电流注入环为例,采用多段集总参数电路串联的方法,建立 kA 级大尺寸脉冲电流注入环的 SPICE 电路模型.主要是通过对端口阻抗测试数据的分频段拟合,利用粒子群优化算法求解了注入环初级电路模型参数;之后利用传输线串扰模型和理想线性变压器实现了注入环初级和次级间的耦合电路 SPICE 模型;最后再加入脉冲源、负载等实现了 kA 级脉冲电流注入实验平台的完整电路建模,应用和验证了注入环的 SPICE 电路模型.

在频域和时域的验证实验中,仿真与测试结果呈现了良好的一致性,验证了所建模型及参数计算方法,表明该模型满足电磁脉冲 PCI 试验的时域仿真研究需求;同时得益于 SPICE 丰富的电子器件模型库,该模型可实现试验系统与受试设备的联合仿真,用于开展 PCI 试验设计、效果预估等工作.

需要说明的是,在 kA 级脉冲电流注入试验中,被试线缆两端通常在电磁干扰防护器的作用下对地导通短路而呈现低阻抗,注入环初级和次级电流方向相反、幅度相近,注入环磁芯工作于非饱和状态,因此本文在仿真和验证过程中使用低幅度激励信号获取的注入环磁芯参数可适用于 kA 级脉冲电流注入.

另外,本文所建注入环模型在 100 MHz 以上频段的仿真精确性仍显不足,其本质原因是基于电路和传输线理论的注入环模型,在用于大尺寸复杂结构注入

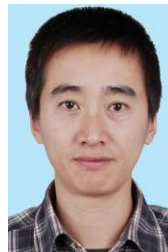
环仿真时,物理上存在一定程度的缺陷.下一步拟引入电磁场仿真的方法,提高注入环高频段的仿真计算精度.

参考文献

- [1] MORA N, DAOUT B, NYFFELER M, et al. Revisiting the calculation of the early time HEMP conducted environment[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021, 63(1): 111-124.
- [2] 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.
- [3] 谢彦召,刘民周,陈宇浩.国家关键基础设施电磁恢复力[J].强激光与粒子束,2019,31(7): 2-9.
XIE Y Z, LIU M Z, CHEN Y H. Electromagnetic resilience of critical national infrastructure[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(7): 2-9. (in Chinese)
- [4] 张举丘,梁志珊.高空核爆电磁脉冲 E_2 部分对架空管道的影响[J].电子学报,2019,47(8): 1762-1767.
ZHANG J Q, LIANG Z S. Effects of intermediate-time HEMP(E_2) on overhead pipeline[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(8): 1762-1767. (in Chinese)
- [5] 系统电磁环境效应试验方法: GJB 8848-2016[S].北京:国家军用标准出版发行部,2016: 67.
- [6] 潘晓东,魏光辉,卢新福,等.基于定向耦合装置的宽频带差模电流注入试验技术[J].电子学报,2014,42(6): 1103-1109.
PAN X D, WEI G H, LU X F, et al. Wideband differential-mode current injection testing technology based on directional coupling device[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(6): 1103-1109. (in Chinese)
- [7] 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 Z T, MAO C G, SUN B Y. SPICE modeling of pulsed current injection with inductive coupling[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(6): 1513-1517. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] CUI Z T, GRASSI F, PIGNARI S A, et al. Pulsed current injection setup and procedure to reproduce intense transient electromagnetic disturbances[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(6): 2065-2068.
- [10] 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 XIX URSI

- General Assembly. Piscataway: IEEE, 2008: 160-164.
- [11] TOSCANI N, SPADACINI G, GRASSI F, et al. Lumped and distributed-parameter circuit models of the electromagnetic clamp[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(4): 1007-1015.
- [12] CUI Z T, WEI B, GRASSI F, et al. Experimental analysis and circuit modeling of pulsed current injection in wire pairs[C]//2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway: IEEE, 2018: 1109-1113.
- [13] DEROY P, PIPER S. Full-wave modeling of bulk current injection probe coupling to multi-conductor cable bundles [C]//2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway: IEEE, 2016: 770-774.
- [14] TOSCANI N, GRASSI F, SPADACINI G, et al. Circuit and electromagnetic modeling of bulk current injection test setups involving complex wiring harnesses[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(6): 1752-1760.
- [15] 谢海燕. 瞬态电磁拓扑理论及其在电子系统电磁脉冲效应中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2010: 58.
XIE H Y. Transient Electromagnetic Topology Theory and Its Application in Electromagnetic Pulse Effects of Electronic Systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 58. (in Chinese)
- [16] PAUL C R. Introduction to Electromagnetic Compatibility[M]. New York: Wiley, 1992.
- [17] 林赛华, 杨华中, 钟晓征. 一种基于RLC元包的有损传输线的渐近式构造模型[J]. 电子学报, 2006, 34(5): 902-905.
LIN S H, YANG H Z, ZHONG X Z. An asymptotic and tectonic modeling method by formative RLC cells for lossy transmission lines[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(5): 902-905. (in Chinese)
- [18] MUSOLINO F, FIORI F. Modeling the IEC 61000-4-4 EFT injection clamp[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(4): 869-875.
- [19] FENG Q, MAO C G, WU G, et al. Characteristic parameter estimations of EMP energy spectrum[C]//2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Piscataway: IEEE, 2016: 11-13.
- [20] TSUTAOKA T. Frequency dispersion of complex permeability in Mn-Zn and Ni-Zn spinel ferrites and their composite materials[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(5): 2789-2796.
- [21] TSUTAOKA T, NAKAMURA T, HATAKEYAMA K. Magnetic field effect on the complex permeability spectra in a Ni-Zn ferrite[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(6): 3068-3071.
- [22] TSUTAOKA T, UESHIMA M, TOKUNAGA T, et al. Frequency dispersion and temperature variation of complex permeability of Ni-Zn ferrite composite materials[J]. Journal of Applied Physics, 1995, 78(6): 3983-3991.
- [23] BIRGE B. PSOt—A particle swarm optimization toolbox for use with Matlab[C]//Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. SIS' 03 (Cat. No.03EX706). Piscataway: IEEE, 2003: 182-186.
- [24] PAUL C R. Analysis of Multiconductor Transmission Lines[M]. 2nd edition. New York: Wiley-IEEE Press, 2007.

作者简介



崔志同 男, 1981年生, 山东沾化人. 博士. 西北核技术研究所高级工程师. 主要从事电磁脉冲试验技术研究.
E-mail: cuizhitong@nint.ac.cn



陈伟 男, 1968年生, 陕西延安人. 博士. 西北核技术研究所研究员. 主要从事辐射物理和抗辐射加固技术研究. 中国电子学会会员编号: E190003071S.