



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104569668 B

(45)授权公告日 2017.06.23

(21)申请号 201410837527.X

(22)申请日 2014.12.29

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104569668 A

(43)申请公布日 2015.04.29

(73)专利权人 北京航空航天大学
地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72)发明人 阎照文 张梦泽

(74)专利代理机构 北京慧泉知识产权代理有限公司 11232

代理人 王顺荣 唐爱华

(51)Int.Cl.
G01R 31/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 101452033 B,2011.08.17,
CN 203929927 U,2014.11.05,
CN 2852138 Y,2006.12.27,
CN 101782637 A,2010.07.21,
CN 101871975 A,2010.10.27,
CN 101072049 A,2007.11.14,
US 2014340111 A1,2014.11.20,
US 2009295416 A1,2009.12.03,
曹荣刚等.基于环探头测量含运动导体的瞬
态电流波形.《计算机工程与科学》.2012,第34卷
(第4期),第119-122页.

审查员 李萍萍

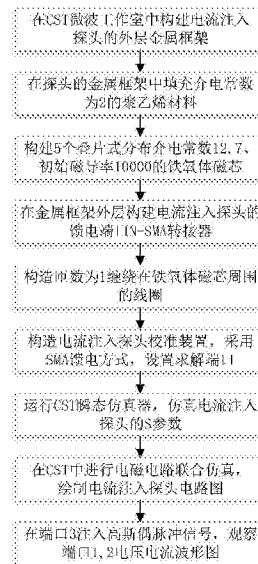
权利要求书1页 说明书6页 附图5页

(54)发明名称

一种高斯偶脉冲大电流大功率宽频带注入
探头设计方法

(57)摘要

一种高斯偶脉冲大电流高功率宽频带注入
探头设计方法,它有九大步骤:一、在CST微波工
作室中构建电流注入探头的外层金属框架;二、
在外层金属框架中填充介电常数为2的聚乙烯材
料;三、构建5个叠片式分布的介电常数为12.7、
初始磁导率为10000的铁氧体磁芯;四、在外层金
属框架构建电流注入探头的馈电端口N-SMA转接
器;五、构造匝数为1缠绕在铁氧体磁芯周围的线
圈,其中线圈分别连接N型转接头中心针与外层
金属框架;六、构造电流注入探头校准装置,采用
SMA馈电方式,设置求解端口;七、运行CST瞬态仿
真器,仿真电流注入探头的S参数;八、在CST中进
行电磁电路联合仿真,绘制电流注入探头电路
图;九、在端口3注入高斯偶脉冲信号,观察端口
1,2电压电流波形图。



1. 一种高斯偶脉冲大电流大功率宽频带注入探头设计方法,其特征在于:该方法具体步骤如下:

步骤一:在CST微波工作室中构建电流注入探头的外层金属框架;

步骤二:在探头的外层金属框架中填充介电常数为2的聚乙烯材料;

步骤三:构建5个叠片式分布的介电常数为12.7、初始磁导率为10000的铁氧体磁芯;

其中,叠片式分布的结构按照内径小、高度大的环形磁芯按层叠结构排列,形成宽而浅的绕组截面;

步骤四:在探头的外层金属框架构建电流注入探头的馈电端口N-SMA转接器;

步骤五:构造匝数为1缠绕在铁氧体磁芯周围的线圈,其中线圈分别连接N型转接头中心针与探头的外层金属框架;线圈采用横截面积大的耐高温材料;

步骤六:构造电流注入探头校准装置,采用SMA馈电方式,设置求解端口;

步骤七:运行CST瞬态仿真器,仿真电流注入探头的S参数;

步骤八:在CST微波工作室中进行电磁电路联合仿真,绘制电流注入探头电路图;

步骤九:在端口3注入高斯偶脉冲信号,观察端口1、2电压电流波形图。

一种高斯偶脉冲大电流大功率宽频带注入探头设计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种高斯偶脉冲大电流大功率宽频带注入探头设计方法。该探头模块将作为电磁兼容性传导敏感度时域测试系统的重要组成部分,它可以实现将大电流大功率宽频带的高斯偶脉冲注入到电源线或线缆上进行时域传导敏感度实验,从而探究传导敏感度机理。它属于电磁兼容传导敏感度技术领域。

背景技术

[0002] 系统级测试主要关心的是系统间的电磁兼容问题,电磁兼容(EMC)测试作为验证电子设备电磁兼容性设计的合理性及最终评价电子设备质量的重要手段,用于评估系统内部关于电磁兼容的各项性能指标是否达到要求。EMC测试中很重要的一部分就是电磁敏感度测试,特别是在设备的间距比较小的情况或者高速谐振的环境中,内部的电磁干扰源很有可能将辐射场耦合进传输线内部导致与其相连的设备受到电磁干扰。应该合理设计系统间的敏感度测试,使得测试的环境能够模拟设备在真正运行过程中所面临的严酷的电磁环境,从而评估设备在实际使用中的抗干扰能力。因此,人们越来越重视电子系统在强电磁环境中的电磁敏感性(Electromagnetic Susceptibility)的研究和测试,不仅是在商业、民用,尤其是在国防军事装备中,电子设备的抗电磁干扰能力已经成为衡量电子设备性能的一项基本指标,在实际应用中具有非常重要的意义。

[0003] 电流注入技术是一种新型的EMC测试方法,一直以来都被作为电磁兼容中抗干扰与敏感度测试的一种基本标准概念和方法。因其具有良好的可重复性而且简单实用,在EMC问题区域诊断和评估硬件加固技术领域,被验证为效果显著的技术,得到了商业、航空与军事电磁兼容等测试领域的普遍承认。国外主要将大电流注入技术BCI(Bulk Current Injection)用于较大电子系统,例如空间系统、飞机、地面和水下系统的连接电缆束等设备的敏感性测试试验。BCI技术注入的脉冲电流波形根据模拟的情况而定,主要有方波和振荡衰减脉冲。注入电流通过变压耦合的方式注入到电缆上,注入电流的幅度根据真实系统上辐射电磁场产生的感应电流决定,主要是模拟电子设备关键部位受到外场辐射的最坏情况下所产生的最大电流,从而考核电子系统的敏感部位承受电磁干扰的能力。

[0004] 当前对传导敏感度的研究只是按照国家军用标准关于传导敏感度的要求进行相关实验。在GJB151B-2013中,CS114给出了10kHz-400MHz电缆束注入传导敏感度的测试要求与方法,用于检验EUT承受耦合到与EUT有关电缆上的射频信号的能力。CS115给出了电缆束注入脉冲激励传导敏感度的测试要求与方法,用于检验EUT承受耦合到与EUT有关电缆上的脉冲信号的能力。这些实验只是从受试设备角度探究其能承受多大的电磁干扰,并没能从输入信号的角度来研究传导敏感度的机理。当前导致传导敏感度机理科学数据匮乏的主要原因在于:1.现有的传导敏感度测试信号无法模拟真实存在的工作环境;2.由于单个干扰源在频域上的确定性以及当干扰源共存时在时域上的随机性,导致频域传导敏感度实验存在局限性;3.当前的传导敏感度实验缺乏对由线缆引入的非线性进行检测。这些都是需要研究的问题。因此,首先我们需要产生一种信号(或多种同类型信号)来真实地模拟实际工

作环境,从而作为传导敏感度实验的输入信号。根据分析,单高斯脉冲可以有效激发低频成分;等幅双高斯脉冲可以验证敏感频点位置;高斯偶脉冲可激发高频成分;高斯奇偶脉冲可同时激发低频和高频成分;变幅度高斯奇偶脉冲可更灵活的激发低频和高频成分。通过控制脉冲宽度Td来调节频域成分,实现对环境的可控模拟,并验证敏感频点位置。因此以多高斯脉冲作为测试信号时,可以有效地模拟同时存在的多个信号、且每个信号包含多个频率所形成的电磁环境。这种以高斯偶脉冲为主的多高斯脉冲将作为我们的输入信号用于传导敏感度试验。这就需要设计一个能够将该多高斯脉冲信号注入到线缆上的电流注入探头。根据指标要求,我们设计的电流注入探头要能够承受大电流大功率而且具有宽频带低插入损耗的特点。

发明内容

[0005] 1、发明目的

[0006] 在将高斯偶脉冲信号注入电缆进行传导敏感度实验中,电流注入探头是很重要的一部分。信号源输出的信号通过电流注入探头注入到多导体电缆束中,从研究测试方法的角度来讲,研究注入探头并对其进行建模仿真对于准确定义电流注入法的相关参数是至关重要的。只有准确的预估计注入电流值和传输线终端的负载大小才能预算一定频率范围内的干扰水平,防止注入电流超过被测件输入端的电流阈值而导致设备损坏,甚至烧毁。同时,电流注入探头的频段与最大插入损耗之间的关系,也是研究的重点。

[0007] 2、技术方案

[0008] 本发明是研究一种电流注入探头能够将大电流大功率宽频带的高斯偶脉冲信号注入到电源线或线缆上进行传导敏感度实验。电流注入探头利用变压器互感原理将大电流信号注入到线缆上,它采用较高饱和磁通密度和低损耗的软磁铁氧体材料作为探头磁芯,采用叠片式磁芯设计方法,具有宽频带、低插入损耗的特点,同时探头空间利用率高、重量轻,制造成本低,能够广泛应用于传导敏感度实验中。

[0009] (1) 电流注入探头的工作原理

[0010] 电流注入探头的工作原理即利用变压器互感原理将信号注入到线缆或电源线上。探头的主级线圈与次级线圈的耦合现象用表达式为复数而且与频率有关的自感 $\hat{L}_1(\omega)$ 、 $\hat{L}_2(\omega)$ 和互感 $\hat{M}(\omega)$ 表示,因为主级与次级线圈都是缠绕在同一个铁氧体磁芯上的,所以相应的自感和互感可以用铁氧体磁芯的磁阻的函数来表示,图1表示的是用二端口网络描述磁芯与传输线间的电磁耦合效应,即:

$$[0011] \quad \hat{L}_1(\omega) = \frac{N_1^2}{\hat{R}(\omega)}, \quad \hat{L}_2(\omega) = \frac{1}{\hat{R}(\omega)} + L_{2d} \quad (1)$$

$$[0012] \quad \hat{M}(\omega) = \frac{N_1}{\hat{R}(\omega)}, \quad \hat{R}(\omega) = \frac{R_0}{\hat{\mu}(\omega)} \quad (2)$$

[0013] 其中, N_1 表示主级线圈的线圈匝数, N_2 表示次级绕线的线圈匝数(这里令 $N_2=1$), L_{2d} 表示次级线圈的电感漏损量, $\hat{R}(\omega)$ 表示铁磁芯的复数磁阻,它的值与铁氧体磁芯的几何结

构和物理特性有关, R_0 表示其它条件不变的情况下铁氧体磁导率为1时的磁阻。

[0014] 根据戴维宁电路原理可知,图1中的二端口需要满足以下方程组中的限制条件:

$$[0015] \begin{cases} V_1 = j\omega\hat{L}_1(\omega)\cdot I_1 + j\omega\hat{M}(\omega)\cdot I_2 \\ V_2 = j\omega\hat{L}_2(\omega)\cdot I_2 + j\omega\hat{M}(\omega)\cdot I_1 \end{cases} \quad (3)$$

[0016] 为了更详细的分析电流注入探头的电感耦合原理,我们可以采用图2所示的电路模型来等效替代图1中的耦合模型,可以得到以下的二端口电压电流的限制条件:

$$[0017] \begin{cases} I_1 = I_1' + I_1'' = -j[\omega\hat{L}_1(\omega)]^{-1}\cdot V_1 - \frac{1}{N_1}\cdot I_2 \\ V_2 = V_2' + V_2'' = \frac{1}{N_1}\cdot V_1 + j\omega L_{2d}\cdot I_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$[0018] \frac{I_1'}{V_1} = \frac{-j}{\omega\hat{L}_1(\omega)} \quad (5)$$

[0019] 由此可以得出输出电流电压与输入电流电压之间的关系,从而实现将大电流高功率信号通过电流注入探头注入到线缆上的目的。

[0020] (2) 注入高斯偶脉冲信号对电流注入探头的要求

[0021] 本发明的目的是利用电流注入探头将以高斯偶脉冲信号为主的多高斯脉冲注入到线缆上。该脉冲全底脉宽为0.5ns,脉冲间隔1-2ns,重复频率1-1000Hz(可调),峰值电压10-1000V(可调)。当信号源发出一个高斯偶脉冲电压信号时,在次级感应的脉冲电压开始并不突然上升,脉冲结束时也不突然下降,而要经过一定的时间过程,即要一个“脉冲上升时间 t_r ”、“脉冲下降时间 t_f ”,另外,脉冲顶部也不是水平的,而是随时间下降,即有一个顶部跌落(“顶降”D)。此外,上升时还有一个“上冲波形”,希望脉冲前沿特性“顶降”及“脉冲下降时间”,“反冲”等尽可能小。顶降D可表示为 $D = \frac{r\tau}{2L_1}$,其中 τ 为脉冲宽度, L_1 为初级电感, r 为内

阻。可见,增加电感 L_1 ,可使顶降D减小。脉冲上升时间主要与漏感和分布电容有关,减小上升时间,应使分布电容 C_s 尽量小,电感 L_1 尽量大。下降时间则主要受主电感所支配。总之,为了保证注入的高斯偶脉冲信号尽可能不失真的传输以得到良好的波形传输特性,这就要求探头磁芯漏感和分布电容应尽可能小,主电感必须大。为了得到大的主电感 L_1 ,要求探头磁芯有大的磁导率。对于传输脉冲信号的磁芯来说,实际上要求有大的脉冲磁导率,脉冲磁导

率 μ_p 由下式表示: $\mu_p = \frac{\Delta B}{\mu_0\Delta H}$ 。因此,在磁芯材料的选择上需要有大的初始磁导率 μ_i 和大的

磁感应变化 ΔB 。

[0022] (3) 大电流高功率的电流注入探头设计考虑因素

[0023] 我们设计的电流注入探头最大可承受电流幅值达到50A,瞬时功率幅值最大可达到1000W。由于工作在高磁通密度范围,大电流高功率将使电流注入探头温升达到很高,产生的涡流损耗增大,这样将严重降低电流注入探头的传输性能。因此,设计的探头应该保证

有较小的温升和较低的损耗。这就要求线圈匝数不宜太多,线圈的电阻应该尽可能的小。线圈材质的电阻率和熔点以及横截面积,是线圈承受电流的主要决定因素。线圈横截面积越大,线圈电阻越小,从而产生的热量越少。本设计采用横截面积较大的耐高温线圈。在设计电流注入探头磁芯和线圈绕组时,要使得在一定允许温升条件下,传输到线缆的功率尽可能大。当磁芯在接近饱和点处工作时,损耗将随频率上升而增大,铁氧体材料具有极高电阻率,高频损耗比金属低很多。因此对于大电流高功率电流注入探头来说,具有较高饱和磁通密度和低损耗的软磁铁氧体磁芯成为最佳的选择。

[0024] (4) 宽频带的电流注入探头设计考虑因素

[0025] 本发明的主要目的是研制一种宽频带电流注入探头,探头频带宽度从10kHz到800MHz,要求探头在较宽频带范围内有较小的插入损耗。经过查阅相关资料,目前SOLAR公司生产的9310-1N电流注入探头的工作频带为5MHz-800MHz,在15MHz-450MHz时的插入损耗低于10dB,650MHz-800MHz时的插入损耗低于15dB。而我们需要研制的探头要在800MHz内的插入损耗均低于10dB,即要求在较宽的频率范围内信号传输时有小的损耗和畸变,因此对探头磁芯和线圈提出了一些特殊的要求。

[0026] 电流注入探头的插入损耗主要由探头感抗引起的衰减、探头线圈绕组和磁芯材料引起的衰减组成,而且在不同的频段影响探头插入损耗的主要因素不同。在低频区域,磁芯特性对宽带电流注入探头传输衰减特性有很大的影响。影响低频段插入损耗的主要参数是 $R/\omega L_p$,其中R为线圈绕组电阻, L_p 为探头的初级电感。若低端截止频率 ω_1 位于铁氧体材料使用频率范围内,材料磁导率保持为常数,即 L_p 基本不变,随频率下降, $R/\omega L_p$ 将上升。因此探头的初级电感务必大,以使低频损耗降为最小,应选择有效磁导率 μ_e 较大的磁芯材料。在中频区域,插入损耗主要受线圈电阻与磁芯损耗电阻共同影响,即与 R/R_p 有关(R为线圈绕组电阻, R_p 为磁芯损耗电阻)。在该频区 R_p 很大,对中频区域损耗影响已很小,因此需要减小线圈绕组电阻,以降低线圈绕组高频涡流损耗。增大线圈截面积,减小线圈长度均能减小线圈电阻。在高频区域,传输特性主要受漏感和分布电容的影响。高频截止频率 $\omega = 1/\sqrt{L_s C_s}$,因此当需要更宽频带时,减小漏感 L_s 和分布电容 C_s 是重要的。对于规定的磁芯形状来说,降低漏感主要是通过提高探头初级和次级的耦合、采用宽而浅的绕组面积以及使用较少的线圈匝数来实现。绕组分布电容与绕组截面积有关,当绕组采用高而窄的截面积时,有最小的分布电容。

[0027] 综上所述,高斯偶脉冲大电流大功率的电流注入探头在设计上有以下要求。在磁芯材料的选择上,采用具有较大初始磁导率 μ_i 和饱和磁感应变化 ΔB 的软磁铁氧体材料。这种材料的初始磁导率 $\mu_i = 10000-12000$,频带范围可达800MHz,并且能够保证脉冲信号的传输质量。在设计磁芯形状时,我们采用叠片式结构来设计,将5个内径较小、高度较大(高而窄)的环形磁芯按层叠结构排列,形成宽而浅的绕组截面。这种结构因具有小的磁路长度 l_e 和大的磁芯截面 A_e 能够有效减小线圈绕组平均匝长和几何因子,从而降低线圈绕组涡流损耗,极大提高探头的高频截止频率。并且这种环形磁芯的漏感很低,并有较高的 A_L ($A_L = L/N^2$,表示单匝线圈的电感,与磁芯材料磁导率及磁芯形状有关),能减小高频磁芯损耗。同时磁芯之间的适当气隙,也能够提高探头的动态范围。在线圈绕组的选择上,采用横截面积较大的耐高温线圈,线圈匝数不宜太多(这里取为1匝),这样能极大降低线圈的电阻,从而减少热量损耗。

[0028] (5) 本发明一种高斯偶脉冲大电流高功率宽频带注入探头设计方法,该方法具体步骤如下:

[0029] 步骤一:在CST微波工作室中构建电流注入探头的外层金属框架;

[0030] 步骤二:在探头的外层金属框架中填充介电常数为2的聚乙烯材料;

[0031] 步骤三:构建5个叠片式分布的介电常数为12.7、初始磁导率为10000的铁氧体磁芯。

[0032] 步骤四:在探头的外层金属框架构建电流注入探头的馈电端口N-SMA转接器。

[0033] 步骤五:构造匝数为1缠绕在铁氧体磁芯周围的线圈,其中线圈分别连接N型转接头中心针与探头的外层金属框架。

[0034] 步骤六:构造电流注入探头校准装置,采用SMA馈电方式,设置求解端口。

[0035] 步骤七:运行CST瞬态仿真器,仿真电流注入探头的S参数。

[0036] 步骤八:在CST微波工作室中进行电磁电路联合仿真,绘制电流注入探头电路图。

[0037] 步骤九:在端口3注入高斯偶脉冲信号,观察端口1、2电压电流波形图。

[0038] 3、优点及功效

[0039] 1) 本发明采用较大初始磁导率和饱和磁感应变化的软磁铁氧体材料作为电流注入探头磁芯,能够实现将全底脉宽为0.5ns、脉冲间隔为1-2ns的高斯偶脉冲信号注入到线缆上,并能保证脉冲波形不失真的传输,能够用于传导敏感度机理探究测试中。

[0040] 2) 本发明采用横截面积较大的耐高温线圈,能够承受幅值高达50A的电流,瞬时功率幅值最大可达1000W,并且具有较小的温升。同时较高饱和磁通密度和低损耗的软磁铁氧体磁芯也使得磁芯损耗降到最低。

[0041] 3) 本发明采用叠片式磁芯设计方法,将5个内径较小、高度较大(高而窄)的环形磁芯按层叠结构排列,形成宽而浅的绕组截面,这种结构缩短了磁路长度、增大了磁芯截面,能够有效减小线圈绕组平均匝长和几何因子,从而降低线圈绕组涡流损耗,极大提高探头的高频截止频率,频带范围可达800MHz。

附图说明

[0042] 图1是磁芯与传输线间的电磁耦合效应二端口模型图

[0043] 图2是磁芯与传输线间的电磁耦合效应二端口模型等效替代电路图

[0044] 图3是电流注入探头的截面图

[0045] 图4是电流注入探头校准装置及端口设置图

[0046] 图5是电流注入探头频率响应S参数仿真结果图

[0047] 图6是电流注入探头在CST微波工作室与电路协同仿真的电路图

[0048] 图7是在端口3注入的高斯偶脉冲波形

[0049] 图8是在端口1中感应的电压波形

[0050] 图9是本发明流程框图

[0051] 图中符号说明如下:

[0052] 1:探头金属框架;2:填充介质;3:铁氧体磁芯;4:线圈;5:N-SMA转接头;6:线缆;7:SMA转接头;8:校准装置平行板;9:地平面;Port1:端口1;Port2:端口2;Port3:端口3。

[0053] V_1 :输入电压; I_1 :输入电流; I_1' :流入电感 $\hat{L}_1(\omega)$ 的输入电流分量; I_1'' :流入互感耦

合部分的输入电流分量; V_2 :输出电压; V_2' :互感耦合部分的输出电压分量; V_2'' :漏感 L_{2d} 的输出电压分量; I_2 :输出电流; $\hat{L}_1(\omega)$ 、 $\hat{L}_2(\omega)$:铁氧体磁芯的外层导体与电缆传输线之间的耦合电感; $\hat{M}(\omega)$:铁氧体磁芯的外层导体与电缆传输线之间的耦合互感; L_{2d} :次级线圈的电感漏损量; N_1 :主级线圈的缠绕匝数。

具体实施方式

[0054] 下面将结合附图对本发明做进一步的详细说明。见图1-图9,

[0055] 本发明是一种高斯偶脉冲大电流高功率宽频带注入探头设计方法,我们采用基于FDID(时域有限积分法)电磁场求解算法的CST微波工作室仿真器对电流注入探头进行建模。该方法具体步骤如下:

[0056] 步骤一:分别构造外径为54mm、内径为19mm、宽度为64mm的圆柱体及外径为21mm、内径为19mm、宽度为3mm的圆柱体,并将两者相减后形成新的模型命名为outer-frame,将其材料设为copper(铜)。这就构造了电流注入探头的外层金属框架。

[0057] 步骤二:在探头的金属框架中填充介电常数为2的聚乙烯材料,其中介质为外径52mm、内径为21mm、宽度为60mm,命名为substrate。

[0058] 步骤三:构造5个外径为43mm、内径为28mm、宽度为10mm的圆柱,这些圆柱呈叠型排列,每两个之间间隙为0.5mm,将它们设为介电常数为12.7、初始磁导率为10000的铁氧体材料,这就构成了电流注入探头的铁氧体磁芯。

[0059] 步骤四:构造连接在电流探头上的N型转接头,其中内径为1.385mm、外径为3.19mm。构造中心针直径为1.27mm、绝缘材料为介电常数2.1的聚四氟乙烯、外层直径为4.25的SMA转接头,将SMA转接头与N型转接头组合在一起,这样便构造了电流注入探头的馈电端口。

[0060] 步骤五:构造匝数为1缠绕在铁氧体磁芯周围的线圈,其中线圈一端与N型转接头中心针连接,另一端与探头外层框架连接。这样便构造了一个电流回路,从而能够实现通过SMA馈电将大电流高功率的高斯偶脉冲信号注入的目的。电流注入探头截面几何模型结构如图3所示。

[0061] 步骤六:构造电流注入探头校准装置,中心导体半径为0.4mm,线长250mm,阻抗为50欧姆,两端平行板厚4mm,高度为75mm,其中从地平面到中心导体之间高度为66mm,采用SMA馈电。设置求解端口,在校准装置两端SMA连接处分别设置端口1和端口2,在N-SMA转接头外端设置端口3。电流注入探头的频率响应校准模型结构如图4所示。

[0062] 步骤七:设置求解频率为10k-800MHz,运行CST瞬态仿真器,仿真电流注入探头的S参数。频率响应曲线如图5所示。由图可以看出,在10k-500MHz频段内,探头的频率响应曲线趋于平滑。

[0063] 步骤八:在CST微波工作室中进行电磁与电路联合仿真,绘制电流注入探头电路图,如图6所示。

[0064] 步骤九:在端口3注入幅度为500V周期为20ns持续时间为100ns的高斯偶脉冲信号,如图7所示。观察端口1,2电压变化情况,绘制端口1,2的电压电流波形图。图8显示的是端口1电压波形,说明设计的电流注入探头能够将高斯偶脉冲信号注入到线缆上。

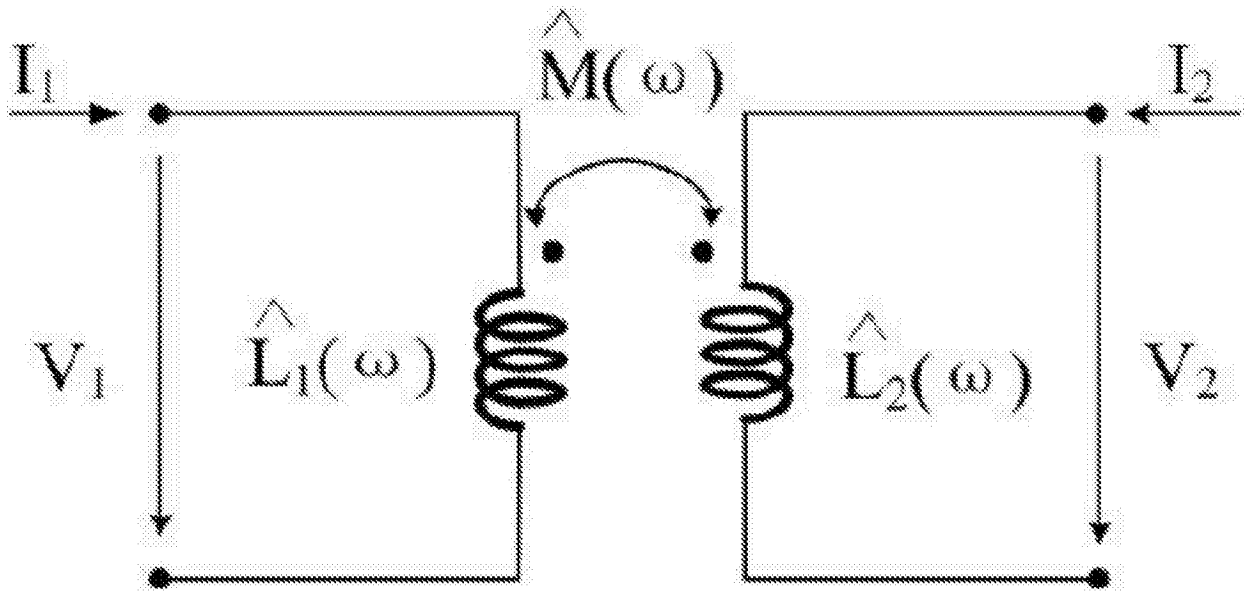


图1

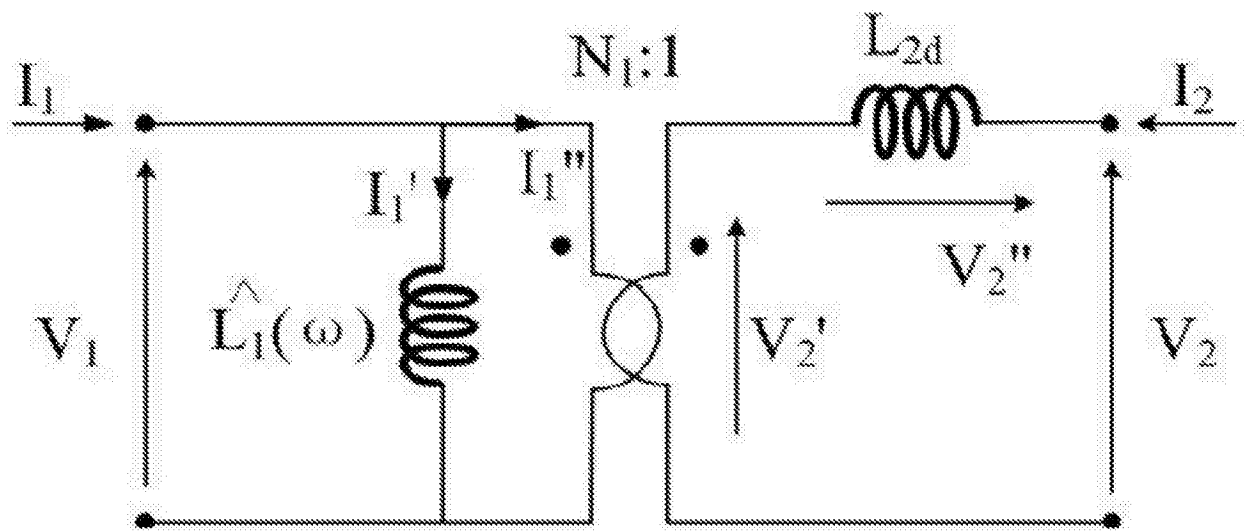


图2

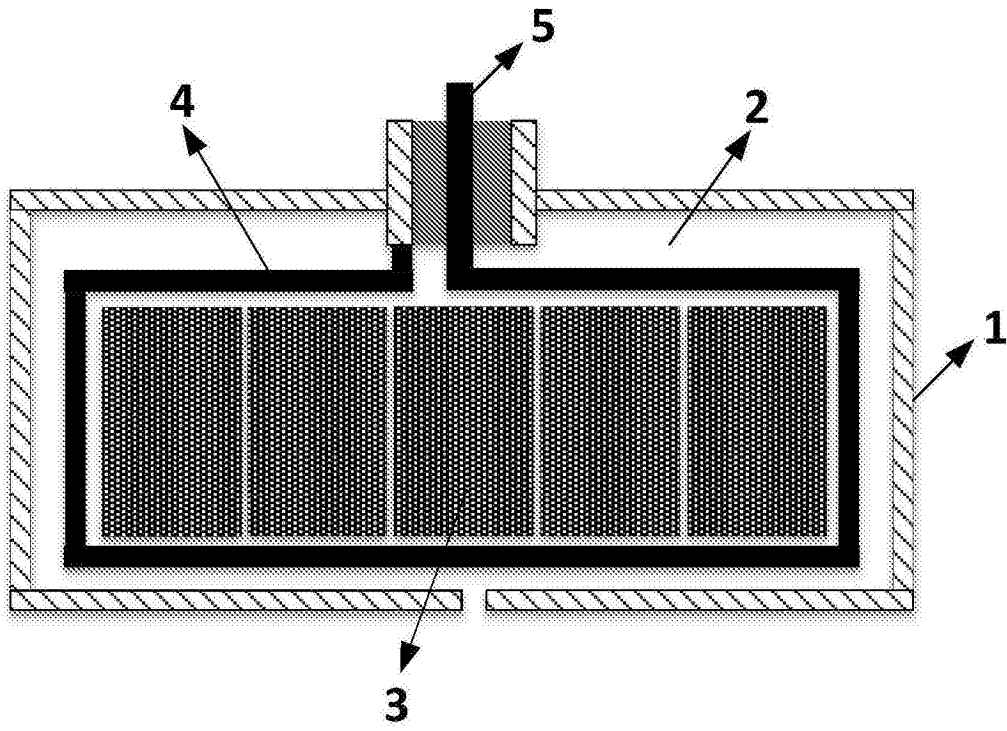


图3

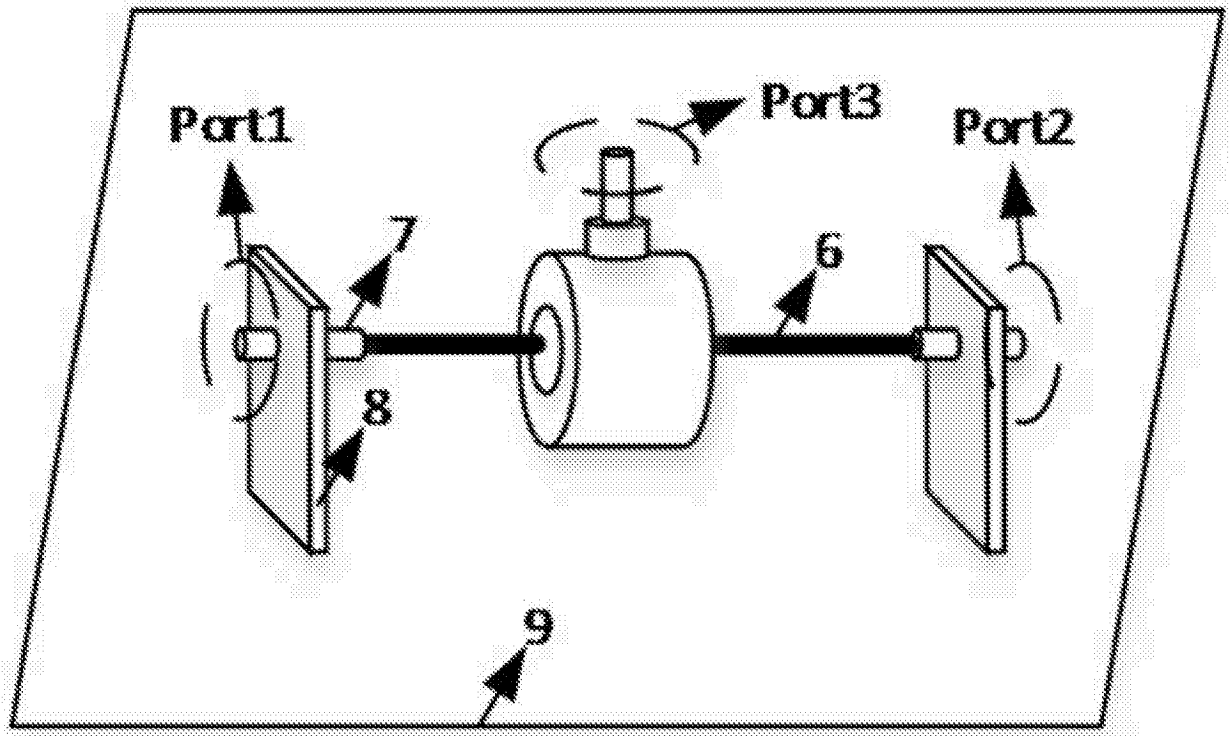


图4

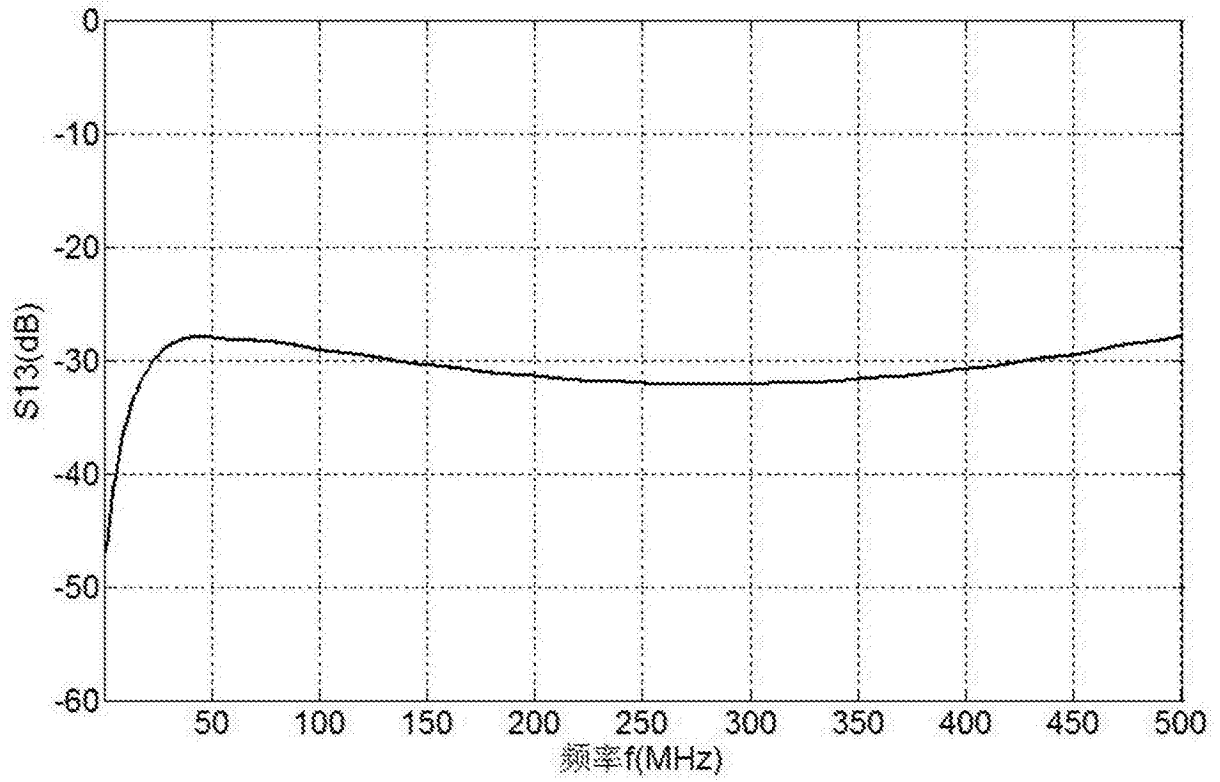


图5

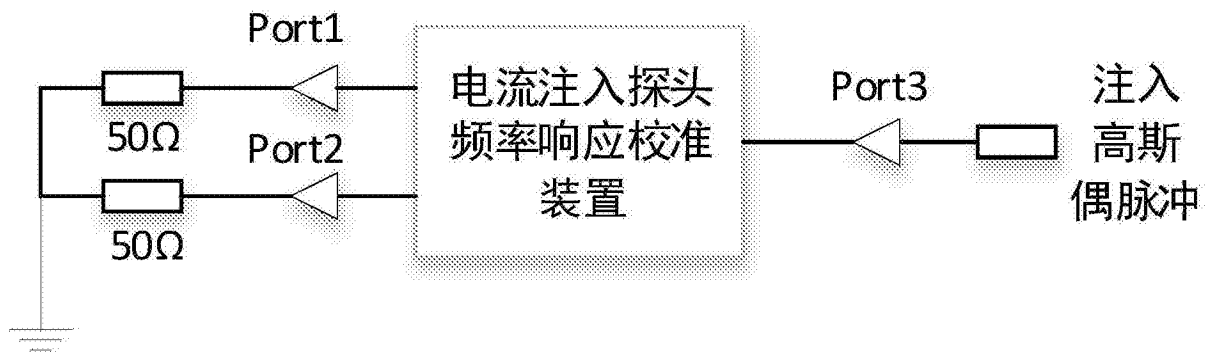


图6

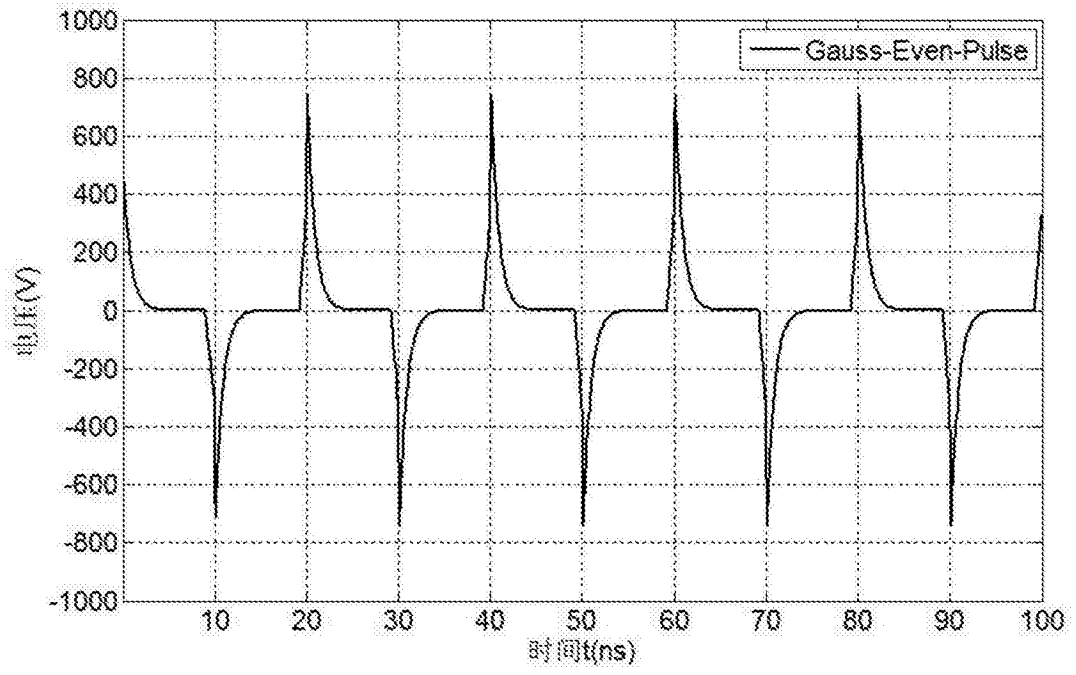


图7

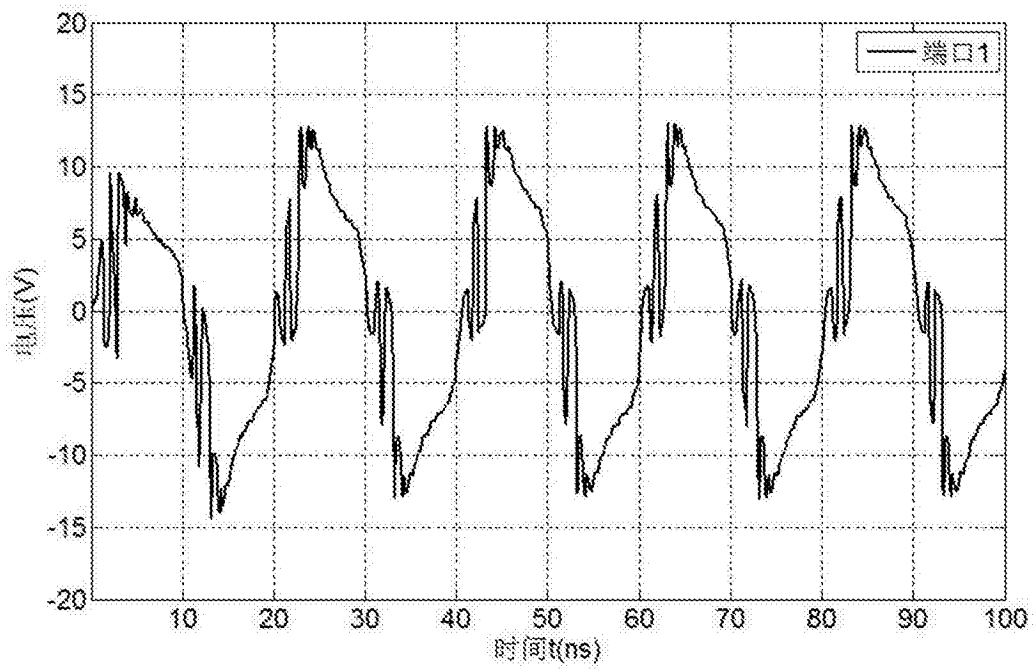


图8

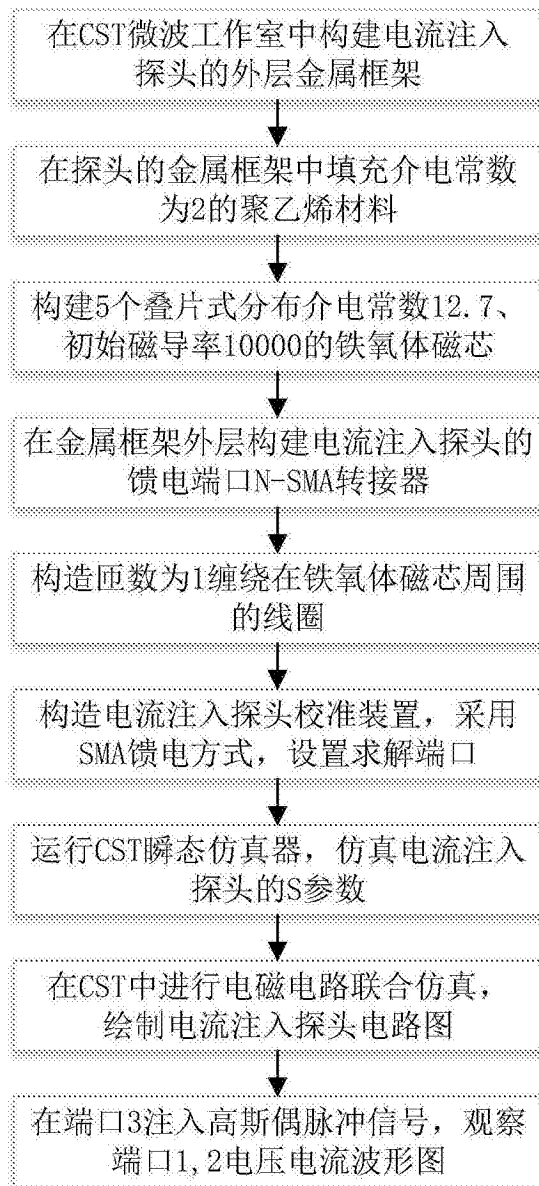


图9