(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107656226 A
(43)申请公布日 2018.02.02

(21)申请号 201710791146.6

(22)申请日 2017.09.05

(71)申请人 四川大学
地址 610065 四川省成都市武侯区一环路南一段24号

(72)发明人 周凯 陈诗佳 朱光亚 何珉 黄永禄 冉立

(74)专利代理机构 成都科海专利事务有限责任公司 51202
代理人 吕建平

(51)Int.Cl.
G01R 35/00(2006.01)

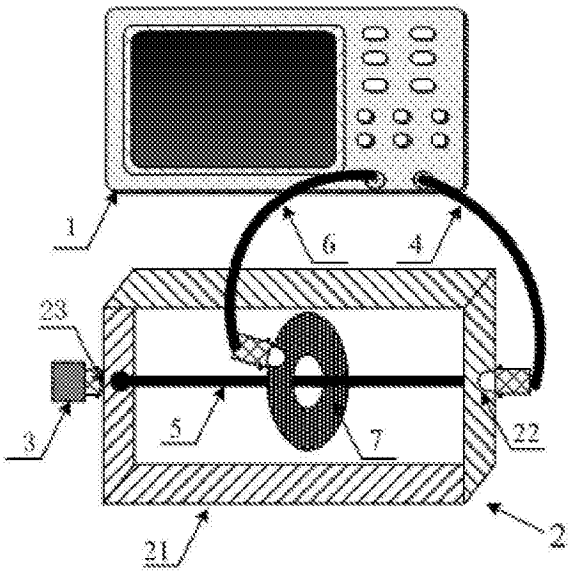
权利要求书1页 说明书5页 附图5页

(54)发明名称

基于传输系数的HFCT电气参数测试装置及测试方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于传输系数的HFCT电气参数测试装置及测试方法，该测试装置包括网络分析仪和测试仪；测试仪的构成包括金属壳体、分别设置在金属壳体两端通过金属导线连接的输入接口和输出接口，输入接口经第一同轴电缆与网络分析仪的输出端连接，输出接口连接有匹配电阻，待测试的HFCT置于金属壳体内，金属导线从其中心穿过，并经第二同轴电缆与网络分析仪的输入端连接。本发明通过一次测试便可以得到HFCT的传输系数，再依据其传递函数和传输阻抗与传输系数的关系得到传递函数和传输阻抗，进一步获得其电气参数(包括带宽、下限频率、上限频率、灵敏度等)，从而实现对HFCT电气参数的快速、稳定测量，为HFCT性能评估提供数据支撑。



CN 107656226 A

1.一种基于传输系数的HFCT电气参数测试装置，其特征在于包括网络分析仪(1)和测试仪(2)；所述测试仪的构成包括金属壳体(21)、分别设置在金属壳体两端通过金属导线(5)连接的输入接口(22)和输出接口(23)，输入接口经第一同轴电缆(4)与网络分析仪(1)的输出端连接，输出接口连接有匹配电阻(3)，待测试的HFCT置于金属壳体内，连接输入接口与输出接口的金属导线(5)从HFCT中心穿过，HFCT通过其BNC接头经第二同轴电缆(6)与网络分析仪的输入端连接。

2.根据权利要求1所述的基于传输系数的HFCT电气参数测试装置，其特征在于所述金属壳体至少上方和左右两侧为金属材质。

3.根据权利要求1或2所述的基于传输系数的HFCT电气参数测试装置，其特征在于所述HFCT通过绝缘支承件置于金属壳体内。

4.利用权利要求1或2或3所述的测试装置测试HFCT电气参数的方法，其特征在于包括如下测试步骤：

(1)对测试装置进行自校准，以消除测试装置自身的传输系数对测量结果的影响；

(2)对HFCT进行测试，获得其传输系数S_{12}：

将测试仪的输入接口(22)经第一同轴电缆(4)与网络分析仪(1)的输出端连接，输出接口(23)连接匹配电阻(3)，待测试的HFCT置于金属壳体内，连接输入接口与输出接口的金属导线(5)从HFCT中心穿过，HFCT通过其BNC接头经第二同轴电缆(6)与网络分析仪的输入端连接，通过网络分析仪(1)对HFCT进行测试，获得HFCT的传输系数S_{12}；

(3)依据以下公式(i)计算得到HFCT的传递函数：

$$|H(\omega)| = S_{12} + 20\log_{10}(R_t) \qquad (i)$$

其中，$|H(\omega)|$为HFCT的传递函数，S_{12}为传输系数，R_t为匹配电阻阻值；

取$|H(\omega)|$传递函数幅值下降设定参考值后所得$|H(\omega)|$对应频率为下限频率和上限频率，上限频率与下限频率之差为带宽；

(4)依据以下公式(ii)得到HFCT的传输阻抗，并将其作为HFCT的灵敏度：

$$Z(f) = R_t \times 10^{S_{12}/20} \qquad (ii)$$

其中，Z(f)为传输阻抗。

5.根据权利要求4所述的测试HFCT电气参数的方法，其特征在于对测试装置进行自校准的具体电路回路实现方式为：将测试仪的输入接口(22)经第一同轴电缆(4)与网络分析仪(1)的输出端连接，输出接口(23)经第二同轴电缆(6)与网络分析仪(1)的输入端连接，然后对测试装置自身的传输系数进行测试，并进行自校准，以消除测试装置自身的传递特性。

基于传输系数的HFCT电气参数测试装置及测试方法

技术领域

[0001] 本发明属于电力系统检测技术领域，涉及一种基于传输系数的HFCT电气参数测试装置及测试方法。

背景技术

[0002] 电力设备在运行过程中的放电、电磁力、热应力、湿热环境、有害的活性气体、油污、粉尘等都会造成绝缘材料性能的逐步劣化，从而使电力设备(电力传输线)中某些绝缘薄弱环节发生局部放电。随着电力系统的发展和电压等级的提高，局部放电已经成为电力设备绝缘劣化的主要原因之一。

[0003] 目前，主要采用局部放电检测法对电力系统中高压交流设备的绝缘状况进行检测和评估。局部放电检测法是以局部放电所产生的各种现象为依据，通过描述各种现象的物理量来表征局部放电；依据检测原理不同，局部放电检测法可以分为两类：(1)基于电流的电磁感应原理，包括电磁耦合法、方向耦合法、超高频电感耦合法等；(2)基于电压的电容耦合原理，包括电容耦合法、差分法、暂态对地电压法等。其中，电磁耦合法主要使用高频电流传感器(High Frequency Current Transformer)在地线上耦合高频电流脉冲，实现对电力设备局部放电信号的检测。采用该电磁耦合法对电力设备进行局部放电信号检测前，需要先对HFCT的电气性能参数(包括带宽、上下限频率、灵敏度等)进行测试，以选择适合于电力设备局部放电检测的HFCT。

[0004] 目前国内外测试HFCT电气性能参数主要有两种方式：(1)采用由信号源、三个高频电容和示波器构成的测试设备，利用信号源产生各种频率的正弦波，通过两个相同的高频电容进行分压，再用一个相同的高频电容穿过传感器几何中心，且与分压电容中的其中一个并联，采用示波器测量HFCT输出端口信号，最终得到HFCT的幅频特性曲线，参见【上海交通大学孙静的硕士论文《高压电力电缆局部放电检测技术研究》、戴旭益等人于2014年在《上海电力学院学报》上发表的《局部放电高性能电流传感器的设计》等】；(2)采用由信号源、无感电阻构成的测试设备，信号源外接一无感电阻并穿过HFCT，利用信号源产生各种频率的正弦波，测量无感电阻两端和HFCT输出端的信号，作出HFCT的幅频特性曲线或传输阻抗【赵学风等人于2010年在《仪器仪表》中发表的《振荡冲击电压下局部放电检测系统研究》】。上述两种方式均需对多个频率点一一进行测量，使用任意波形发生器产生信号，通过测试回路，将所获得的电流信号线尽可能垂直穿过HFCT几何中心，用示波器测取信号，由于任意波形发生器每个频率点只能产生一种波形，所以需要调整各个频率点进行一一测量，耗时较长；在低频时的测试效果较好，但对于较高的频率时，由于各种连接线在高频下的感抗以及每次测试时测试线穿过HFCT的位置不同会造成感应电动势的大小不同，这会对测量结果产生较大的影响，从而使高频测试结果产生较大误差。

[0005] 从上述分析可以看出，目前HFCT电气性能测试方式均存在测试局限性，特别是，缺少一种有效减小高频时HFCT电气性能测试误差的解决方案。因此，研发一种操作简单、测量精度高的HFCT电气性能测试方法，对于局部放电检测技术的发展具有十分重要的意义。

发明内容

[0006] 针对目前HFCT电气参数测试方法存在的耗时长、测试存在误差等问题，本发明提供了一种基于传输系数的HFCT电气参数测试装置及测试方法，不仅能够缩短测试时间、提高测量效率，而且能够减小测试误差，提高测量精度。

[0007] 本发明提供了一种基于传输系数的HFCT电气参数测试装置，包括网络分析仪和测试仪；所述测试仪的构成包括金属壳体、分别设置在金属壳体两端通过金属导线连接的输入接口和输出接口，输入接口经第一同轴电缆与网络分析仪的输出端连接，输出接口连接有匹配电阻，待测试的HFCT置于金属壳体内，连接输入接口与输出接口的金属导线从HFCT中心穿过，HFCT通过其BNC接头(Bayonet Nut Connector)经第二同轴电缆与网络分析仪的输入端连接。

[0008] 上述基于传输系数的HFCT电气参数测试装置，所述金属壳体内部构成容纳HFCT的空间，为了避免外界电磁场对HFCT测试的影响，所述金属壳体至少上方和左右两侧为金属材质；为了固定HFCT，且确保金属导线从HFCT中心通过，HFCT底部可以通过绝缘支承件固定在金属壳体内。

[0009] 上述基于传输系数的HFCT电气参数测试装置，采用网络分析仪对HFCT传输系数进行测试，利用网络分析仪自带的校准功能，在测试前对网络分析仪(型号：E5061B)和测试仪用测试线连接，对测试装置自身的传输系数进行测试，并进行自校准，以消除测试装置自身传递特性对HFCT传递特性测试的影响，从而减小测试误差；测试装置在进行自校准时，由网络分析仪、测试仪等构成的具体电路回路实现方式为：将测试仪的输入接口经第一同轴电缆与网络分析仪的输出端连接，输出接口经第二同轴电缆与网络分析仪的输入端连接。

[0010] 上述基于传输系数的HFCT电气参数测试装置，在测试仪输出接口连接有匹配电阻，以使测试装置构成电路回路，产生电流与测试装置自校准时形成电路回路产生电流相同。

[0011] 本发明进一步提供了一种基于传输系数的HFCT电气参数测试方法，采用上述基于传输系数的HFCT电气参数测试装置，其测试步骤如下：

[0012] (1)对测试装置进行自校准，以消除测试装置自身的传输系数对测量结果的影响；

[0013] (2)对HFCT进行测试，获得其传输系数S_{12}：

[0014] 将测试仪的输入接口经第一同轴电缆与网络分析仪的输出端连接，输出接口连接有匹配电阻，待测试的HFCT置于金属壳体内，连接输入接口与输出接口的金属导线从HFCT中心穿过，HFCT通过其BNC接头经第二同轴电缆与网络分析仪的输入端连接；通过网络分析仪对HFCT进行测试，获得HFCT的传输系数S_{12}；

[0015] (3)依据以下公式(i)计算得到HFCT的传递函数：

[0016] $$|H(\omega)| = S_{12} + 20\log_{10}(R_t) \quad (i)$$

[0017] 其中，$|H(\omega)|$为HFCT的传递函数，S_{12}为传输系数，R_t为匹配电阻阻值；

[0018] 取$|H(\omega)|$传递函数幅值下降设定参考值后所得$|H(\omega)|$对应频率为下限频率和上限频率，上限频率与下限频率之差为带宽；

[0019] (4)依据以下公式(ii)得到HFCT的传输阻抗，并将其作为HFCT的灵敏度：

[0020] $$Z(f)=R_t\times10^{S_{12}/20} \quad \text{(ii)}$$

[0021] 其中，Z(f)为传输阻抗。

[0022] 上述基于传输系数的HFCT电气参数测试方法，对测试装置进行自校准的具体电路回路实现方式为：将测试仪的输入接口经第一同轴电缆与网络分析仪的输出端连接，输出接口经第二同轴电缆与网络分析仪的输入端连接，然后对测试仪以及第一同轴电缆和第二同轴电缆进行传输系数测试，并进行自校准，以消除测试装置自身的传输系数。

[0023] 上述基于传输系数的HFCT电气参数测试方法，由$|H(\omega)|=S_{12}+20\log_{10}(R_t)$，可以看出HFCT的传递函数$|H(\omega)|$与其传输系数$S_{12}$成线性相关，当获得HFCT的传输系数后，便可以获得HFCT的传递函数，从而依据所得的传递函数$|H(\omega)|$，进一步获得HFCT的带宽以及上、下限频率；进一步，当获得HFCT的传输系数后，可由$Z(f)=R_t\times10^{S_{12}/20}$得到传输阻抗Z(f)，由于传输阻抗与灵敏度具有等效性，所以可以将得到的传输阻抗Z(f)作为HFCT的灵敏度参数，其峰值即为最大灵敏度。

[0024] 传统HFCT电气参数测试方法，在对HFCT幅频特性进行测试时，需要对多个频率点进行一一测量，每次测试需要很长的测试时间，且由于高频时测试装置自身会产生干扰，会产生一定的测试误差，从而对HFCT幅频特性测试结果产生不良影响。

[0025] 与现有技术相比，本发明提供的基于传输系数的HFCT电气参数测试装置及测试方法，具有如下有益效果：

[0026] 1、本发明HFCT电气参数测试装置利用网络分析仪对测试装置进行自校准，消除测试装置自身传输系数对测试HFCT传输系数的影响；

[0027] 2、本发明HFCT电气参数测试装置将HFCT封闭在金属壳体内，金属壳体具有屏蔽作用，从而避免部分空间电磁场的干扰；

[0028] 3、本发明HFCT电气参数测试装置金属壳体内部高度与HFCT高度匹配，从而使HFCT固定在金属壳体内，防止HFCT移动，从而避免因HFCT移动而造成的测量误差；

[0029] 4、本发明HFCT电气参数测试方法，通过一次测试便可以得到HFCT的传输系数，再依据HFCT传递函数和传输阻抗与HFCT传输系数的关系得到HFCT的传递函数和传输阻抗，进一步获得HFCT的电气参数(包括带宽、下限频率、上限频率、灵敏度等)，从而实现对HFCT电气参数的快速、稳定测量，大大减少了工作量。

附图说明

[0030] 图1为本发明基于传输系数的HFCT电气参数测试装置自校准时示意图。

[0031] 图2为本发明基于传输系数的HFCT电气参数测试装置测试时示意图。

[0032] 图3为本发明基于传输系数的HFCT电气参数测试装置测试时的等效电路图。

[0033] 图4为本发明实施例1中测试装置自校准前得到的传输系数随频率变化的曲线。

[0034] 图5为本发明实施例1中测试装置自校准后得到的传输系数随频率变化的曲线。

[0035] 图6为本发明实施例2中测试得到的HFCT传输系数随频率变化的曲线。

[0036] 图7为本发明实施例2中测试得到的HFCT传输阻抗随频率变化的曲线。

[0037] 图8为本发明实施例3中测试得到的HFCT传输系数随频率变化的曲线。

[0038] 图9为本发明实施例3中测试得到的HFCT传输阻抗随频率变化的曲线。

[0039] 1、网络分析仪，2、测试仪，21、金属壳体，22、输入接口，23、输出接口，3、匹配电阻，4、第一同轴电缆，5、金属导线，6、第二同轴电缆，7、HFCT。

具体实施方式

[0040] 以下将结合附图给出本发明的实施例，并通过实施例对本发明的技术方案进行进一步的清楚、完整说明。显然，所述实施例仅仅是本发明的一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明内容，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动的前提下所得到的所有其它实施例，都属于本发明所保护的范围。

[0041] 实施例1

[0042] 本实施例提供的基于传输系数的HFCT电气参数测试装置，主要由网络分析仪1、测试仪2、匹配电阻3、第一同轴电缆4、金属导线5、第二同轴电缆6构成。网络分析仪型号为安捷伦E5061B。测试仪2的构成包括矩形金属壳体21、分别设置在金属壳体两端通过金属导线5连接的输入接口22和输出接口23；面对测试仪时，矩形金属壳体21，包括上、下、左、右四个面，四个面的材质均为铝，金属壳体长319mm、宽220mm、高166mm。金属壳体21内部构成容纳HFCT的空间，金属壳体21内部高度大于HFCT外直径。上述基于传输系数的HFCT电气参数测试装置电路连接方式分为两种状态：测试装置自校准状态(如图1所示)和测试状态(如图2所示)：

[0043] (1)自校准状态，测试仪的输入接口22经第一同轴电缆4与网络分析仪1的输出端连接，输出接口23经第二同轴电缆6与网络分析仪1的输入端连接；

[0044] (2)测试状态，测试仪的输入接口22经第一同轴电缆4与网络分析仪1的输出端连接，输出接口23连接有匹配电阻3，待测试的HFCT通过绝缘支承件(如泡沫)置于金属壳体内，连接输入接口与输出接口的金属导线5从HFCT中心穿过，HFCT通过其BNC接头经第二同轴电缆6与网络分析仪1的输入端连接。

[0045] 实施例2

[0046] 本实施例采用实施例1中提供的基于传输系数的HFCT电气参数测试装置进行测试，测试步骤如下：

[0047] (1)对测试装置进行自校准，以消除测试仪的自身传输系数对测试结果的影响：

[0048] 将测试仪的输入接口22经第一同轴电缆4与网络分析仪1的输出端连接，输出接口23经第二同轴电缆6与网络分析仪1的输入端连接，然后对测试仪2以及第一同轴电缆4和第二同轴电缆6进行传输系数测试，其测试结果如图4所示，说明测试装置自身存在传输系数，如果不对测试装置自身进行校准，则会对HFCT的传输系数测试造成影响。依据测试结果操作网络分析仪，使得测试装置自身的传输系数基本为0(如图5所示)，完成测试装置的自校准，消除测试装置自身的传输系数对HFCT传输系数的影响。

[0049] (2)对HFCT进行测试，获得其传输系数S_{12}：

[0050] 将测试仪的输入接口22经第一同轴电缆4与网络分析仪1的输出端连接，输出接口23连接有匹配电阻3(本实施例中$R_t=50\Omega$)，待测试的HFCT通过绝缘支承件(如泡沫)置于金属壳体内，连接输入接口与输出接口的金属导线5从HFCT中心穿过，HFCT通过其BNC接头经第二同轴电缆6与网络分析仪1的输入端连接；通过网络分析仪1对HFCT进行测试，获得HFCT的传输系数S_{12}；传输系数S_{12}随频率变化曲线如图6所示。

[0051] (3)获得HFCT的传递函数，并进一步得到HFCT的下限频率、上限频率和带宽：

[0052] 上述基于传输系数的HFCT电气参数测试装置在对HFCT进行传输系数测试时的等效电路图如图3所示，上述HFCT传输系数S_{12}与网络分析仪的输入端的输入信号$u_1(\omega)$和网络分析仪的输出端的输出信号$u_2(\omega)$满足以下关系式：

[0053] $$S_{12}=20\cdot\log_{10}\frac{u_1(\omega)}{u_2(\omega)} \quad \text{(iii)}$$

[0054] $$i_i(\omega)=\frac{u_2(\omega)}{R_t} \quad \text{(iv)}$$

[0055] 由于HFCT的传递函数$|H(\omega)|=20\cdot\log_{10}\frac{u_1(\omega)}{i_i(\omega)}$ (v)，将上述(iii)式和(iv)式代入(v)式，便得到$|H(\omega)|=S_{12}+20\log_{10}(R_t)$ (i)，其中，$|H(\omega)|$为HFCT的传递函数，S_{12}为传输系数，R_t为匹配电阻阻值。

[0056] 取$|H(\omega)|$传递函数幅值下降设定参考值后所得$|H(\omega)|$对应频率为下限频率和上限频率，上限频率与下限频率之差为带宽；本实施例中设定参考值为-6dB；由于本实施例中传递函数$|H(\omega)|$与传输系数S_{12}成线性相关，且相关系数为1，因此，可以根据传输系数S_{12}随频率的变化曲线，依据传输系数S_{12}幅值下降设定参考值后所得S_{12}对应频率为下限频率和上限频率，本实施例所得HFCT下限频率为0.1MHz、上限频率为100MHz，带宽为99.9MHz。

[0057] (4)获得HFCT的灵敏度：

[0058] 由于HFCT的传输阻抗$Z(f)=\frac{u_1(\omega)}{i_i(\omega)}$ (vi)，将上述(iii)式和(iv)式代入(vi)式，便得到$Z(f)=R_t\times10^{S_{12}/20}$ (ii)，其中，Z(f)为传输阻抗。

[0059] 将步骤(2)得到的传输系数S_{12}代入公式(ii)得到HFCT的传输阻抗，得到的传输阻抗Z(f)随频率的变化曲线如图7所示，由于传输阻抗与灵敏度具有等效性，所以将传输阻抗作为HFCT的灵敏度，其峰值即为最大灵敏度，从图7中可以看出最大灵敏度为4.75V/A。

[0060] 本实施例所测试的HFCT型号为HFCT5861，依据其测试报告，换算到本实施例-6dB条件下的上、下限频率为0.1～99MHz，最大灵敏度为5.01V/A。

[0061] 由此可见，本实施例测得的HFCT的电气参数与厂家给出的基本一致，本实施例提供的基于传输系数的HFCT电气参数测试方法能够快速、稳定地获取HFCT的电气参数，为HFCT性能评估提供数据支撑。

[0062] 实施例3

[0063] 本实施例所测试的是HFCT型号为HFCT21970。

[0064] 本实施例采取的HFCT电气参数测试方法与实施例2相同，通过测试得到的传输系数S_{12}随频率变化曲线如图8所示，将传输系数S_{12}代入$|H(\omega)|=S_{12}+20\log_{10}(R_t)$，得到HFCT的-6dB(设定参考值)下的带宽为18.43MHz，其上限频率为18.53MHz，下限频率为0.1MHz。将得到的传输系数S_{12}代入$Z(f)=R_t\times10^{S_{12}/20}$得到HFCT的传输阻抗，得到的传输阻抗Z(f)随频率的变化曲线如图9所示，从图中可以看出其最大灵敏度为4.09V/A。

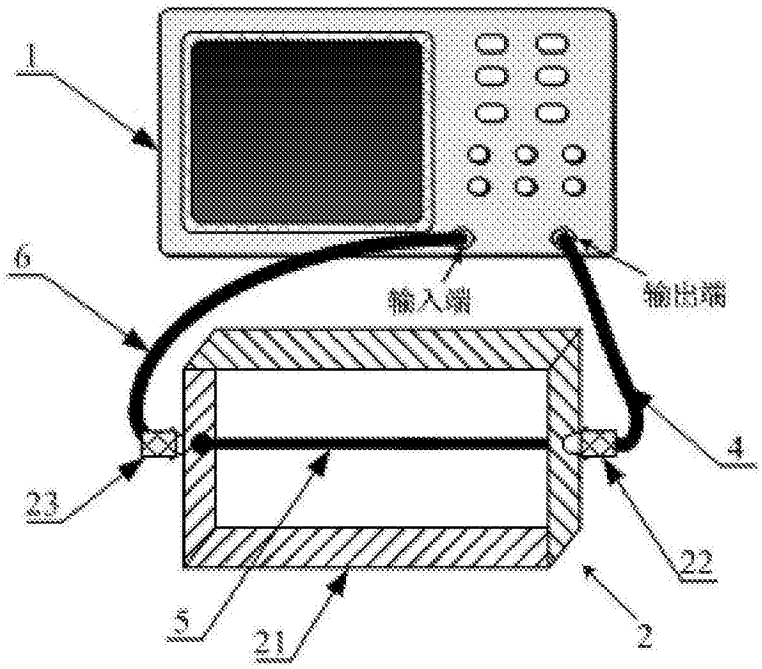


图1

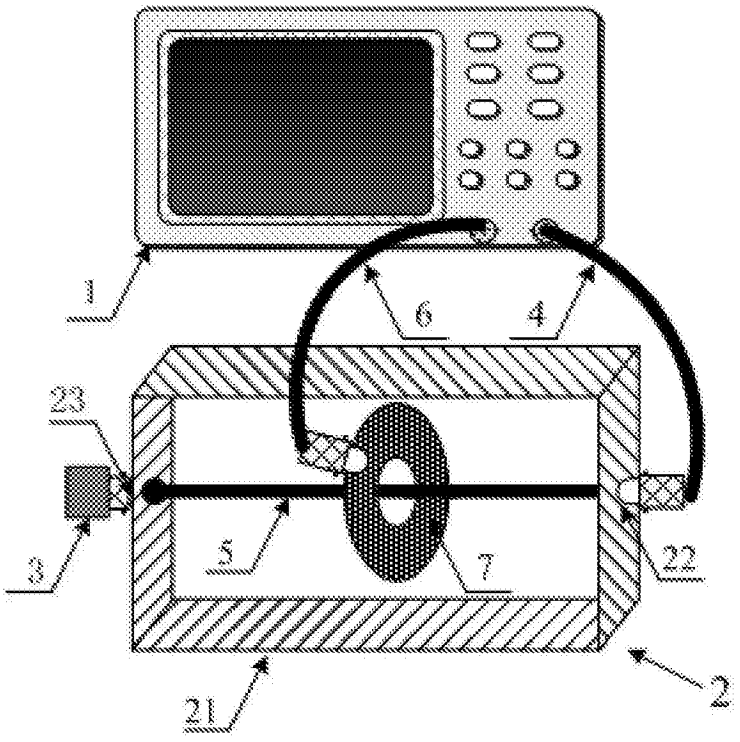


图2

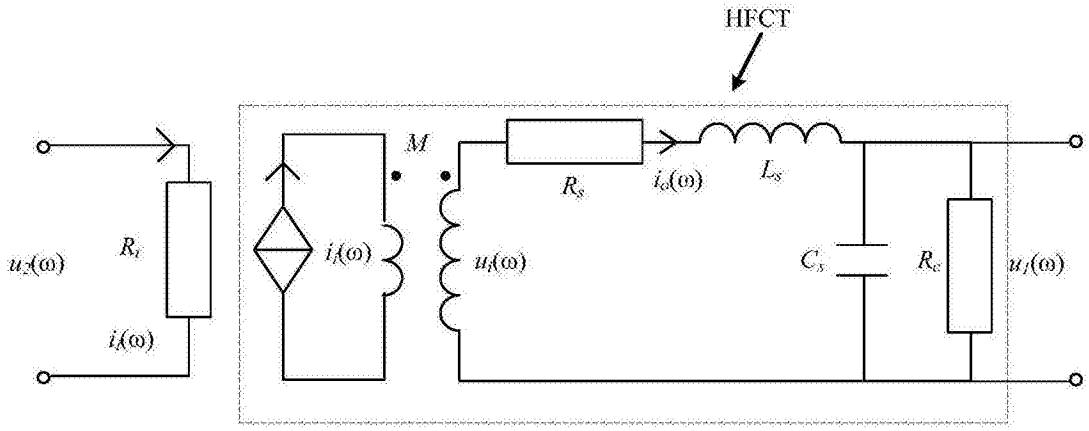

HFCT
M
R_s
$i_o(\omega)$
L_s
$u_2(\omega)$
R_t
$i_1(\omega)$
$i_1(\omega)$
$u_1(\omega)$
C_s
R_c
$u_1(\omega)$

图3

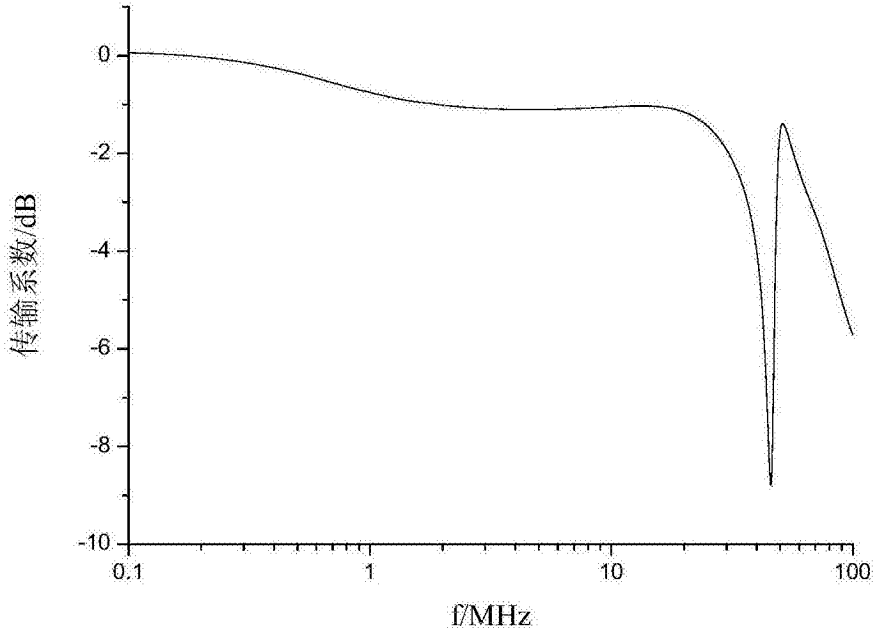

0
-2
-4
-6
-8
-10
传输系数/dB
0.1
1
10
100
f/MHz

图4

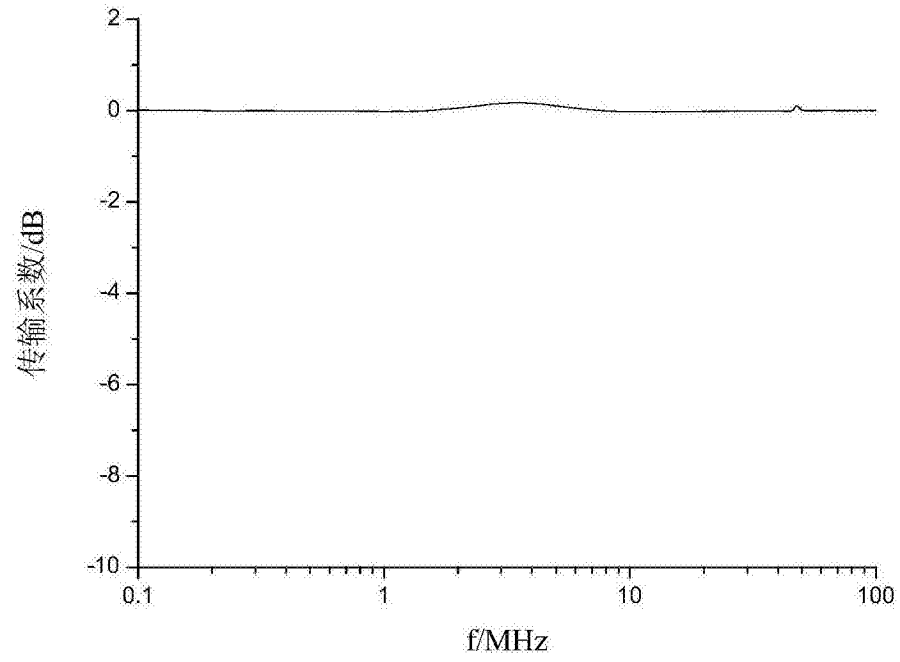

2
0
-2
-4
-6
-8
-10
传输系数/dB
0.1
1
10
100
f/MHz

图5

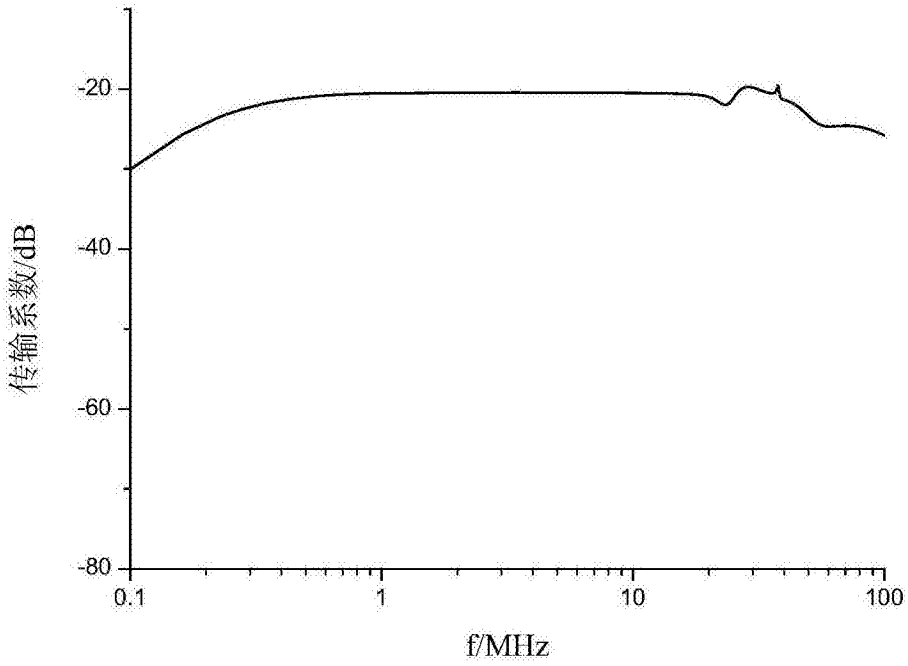

-20
-40
-60
-80
传输系数/dB
0.1
1
10
100
f/MHz

图6

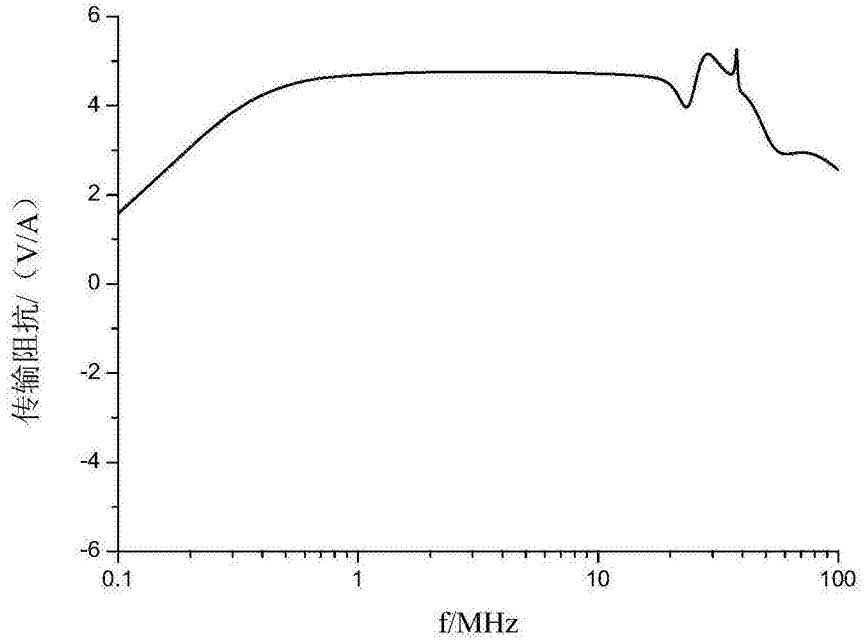

6
4
2
0
-2
-4
-6
0.1
1
10
100
传输阻抗/（V/A）
f/MHz

图7

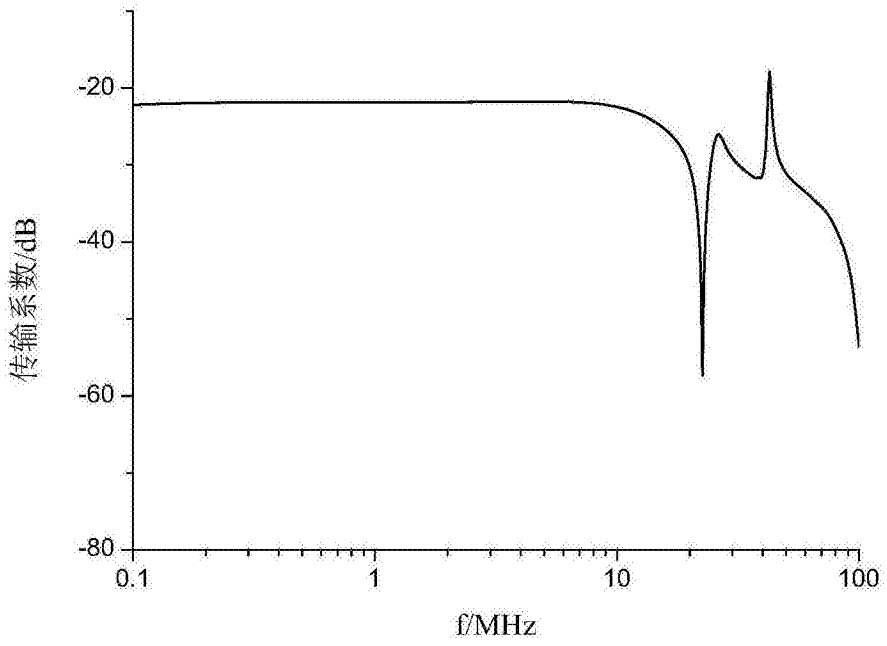

-20
-40
-60
-80
0.1
1
10
100
传输系数/dB
f/MHz

图8

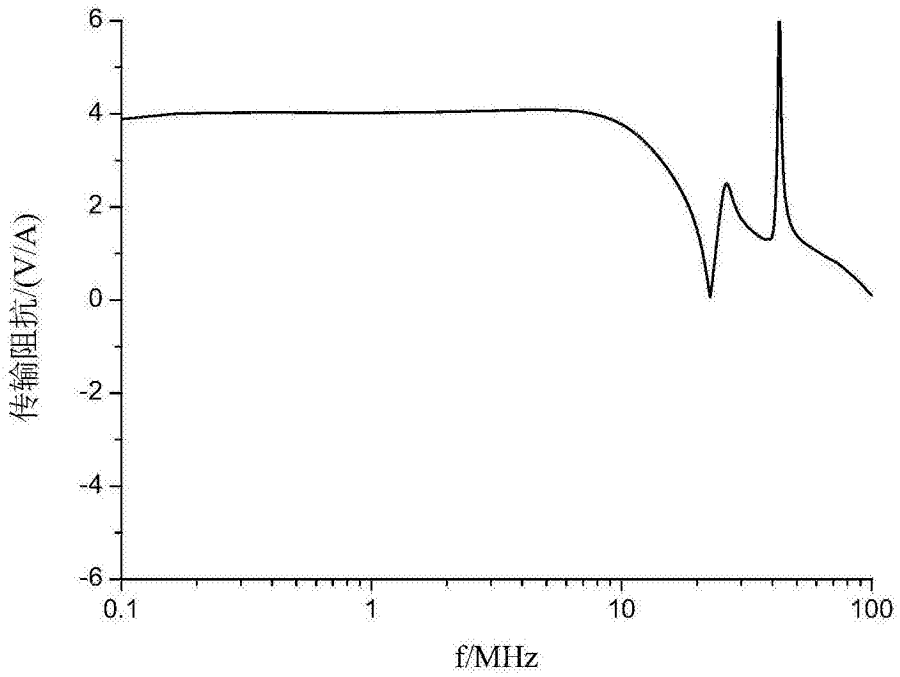


图9