



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106446372 A

(43)申请公布日 2017. 02. 22

(21)申请号 201610817857.1

(22)申请日 2016.09.12

(71)申请人 广东电网有限责任公司电力科学研究院

地址 510080 广东省广州市越秀区东风东路水均岗8号

申请人 广东电网有限责任公司云浮供电局

(72)发明人 李德波 许凯 钟俊 冯永新
王庆斌 余岳溪 殷立宝 林友新
周杰联

(74)专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

代理人 杨炳财 屈慧丽

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006.01)

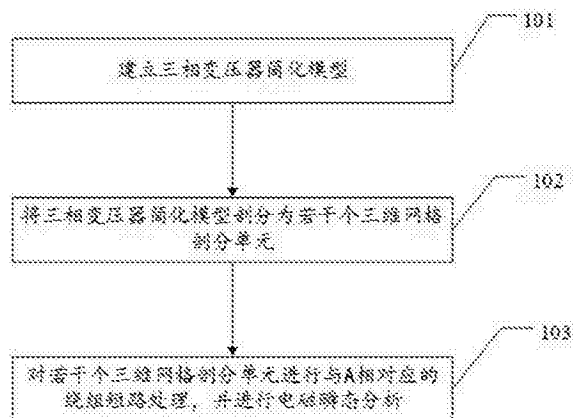
权利要求书2页 说明书13页 附图16页

(54)发明名称

一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法及装置

(57)摘要

本发明实施例公开了一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法及装置,解决了由于目前的大型变压器的模型比较复杂,材料的非线性特性难以获得,求解的计算量比较大,而导致的大型变压器三维电磁场求解效率低的技术问题。本发明实施例方法包括:三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法包括:建立三相变压器简化模型;将三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元;对若干个三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理,并进行电磁瞬态分析。



1. 一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法,其特征在于,包括:
建立三相变压器简化模型;
将所述三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元;
对若干个所述三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理,并进行电磁瞬态分析。
2. 根据权利要求1所述的三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法,其特征在于,将所述三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元具体包括:
将所述三相变压器简化模型剖分为若干个四面体二阶单元。
3. 根据权利要求2所述的三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法,其特征在于,对若干个所述三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理,并进行电磁瞬态分析具体包括:
对若干个所述四面体二阶单元进行与A相对应的绕组短路处理;
对所述四面体二阶单元的棱边的矢量位自由度进行一阶元计算,对所述四面体二阶单元的节点的标量位自由度进行二阶元计算,求解出三维瞬态磁场;
对所述三维瞬态磁场进行计算结果分析。
4. 根据权利要求3所述的三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法,其特征在于,对所述三维瞬态磁场进行计算结果分析具体包括:
根据求解出的所述三维瞬态磁场进行分析确定所述三相变压器简化模型对应的内部磁场分布特性、各相绕组和铁芯欧姆损耗,以及各相绕组受力情况。
5. 根据权利要求4所述的三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法,其特征在于,根据求解出的所述三维瞬态磁场进行分析还包括:
获取到在A相短路状态下所述三相变压器简化模型对应的三相电流瞬态波形、预置时刻下所述三相变压器简化模型对应的磁感应强度分布云图和在指定路径位置下考察得到的磁感应强度分布曲线图。
6. 一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算装置,其特征在于,包括:
建立单元,用于建立三相变压器简化模型;
剖分单元,用于将所述三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元;
分析单元,用于对若干个所述三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理,并进行电磁瞬态分析。
7. 根据权利要求6所述的三相变压器A相短路状态下电磁场的计算装置,其特征在于,剖分单元,具体用于将所述三相变压器简化模型剖分为若干个四面体二阶单元。
8. 根据权利要求7所述的三相变压器A相短路状态下电磁场的计算装置,其特征在于,分析单元包括:
短路处理子单元,用于对若干个所述四面体二阶单元进行与A相对应的绕组短路处理;
计算子单元,用于对所述四面体二阶单元的棱边的矢量位自由度进行一阶元计算,对所述四面体二阶单元的节点的标量位自由度进行二阶元计算,求解出三维瞬态磁场;
分析子单元,用于对所述三维瞬态磁场进行计算结果分析。
9. 根据权利要求8所述的三相变压器A相短路状态下电磁场的计算装置,其特征在于,分析子单元包括:

第一分析模块,用于根据求解出的所述三维瞬态磁场进行分析确定所述变压器简化模型对应的内部磁场分布特性、各相绕组和铁芯欧姆损耗,以及各相绕组受力情况。

10. 据权利要求9所述的三相变压器A相短路状态下电磁场的计算装置,其特征在于,分析子单元还包括:

第二分析模块,用于根据求解出的所述三维瞬态磁场进行分析,获取到在A相短路状态下所述三相变压器简化模型对应的三相电流瞬态波形、预置时刻下所述三相变压器简化模型对应的磁感应强度分布云图和在指定路径位置下考察得到的磁感应强度分布曲线图。

一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及电力技术领域,尤其涉及一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法及装置。

背景技术

[0002] 随着电力建设的不断发展,电力设备朝着大型化方向发展。随着变压器电压等级的大幅提升,作为电力系统主要载体之一的变压器的安全稳定运行,关系着电网的整体抗风险能力。如何保证变压器长期处于良好的工作状态一直是电力企业设备管理的重中之重。近些年,电网系统屡次发生因外部短路冲击造成主变重瓦斯保护跳闸、压力释放阀动作喷油等。当因外部电路短路而造成电流冲击时绕组导线中所通过的短路电流数值可达到而定数值的15~20倍。变压器在极短的时间之内将产生较大的电磁力和电磁损耗。在电磁力的作用下,绕组可能会发生振动,从而影响油箱中的油流运动,产生油流涌动。要准确的确定油箱中的油流运动,需要对变压器在短路状态产生的电磁场强度分布、绕组受到的电磁力以及油流的温升有精确的了解。

[0003] 要对变压器中绕组的受力进行准确的计算,首先应对变压器短路时的电磁场进行精确的计算。因此,有限元法在很早就被引入到了变压器的磁场分析中。对于变压器的损耗计算,常有的计算手段是运用解析公式和半经验公式的时域法,正交分解合成法,但局限性太大。在采用计算机辅助分析方面,一般也都是采用2D有限元法。

[0004] 这些方法都能在一定程度上解决工程问题。但是这些方法本身含有的简化太多,计算的结果适用性比较小,提供的数据难以支持进一步的变压器振动或油流涌动的分析。因此,针对此种大型变压器的三维电磁场求解,进行分析的很少见。

[0005] 究其原因,其大型变压器的模型比较复杂,材料的非线性特性难以获得,求解的计算量比较大,从而导致了大型变压器三维电磁场求解效率低的技术问题。

发明内容

[0006] 本发明实施例提供了一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法及装置,解决了由于目前的大型变压器的模型比较复杂,材料的非线性特性难以获得,求解的计算量比较大,而导致的大型变压器三维电磁场求解效率低的技术问题。

[0007] 本发明实施例提供了一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法,包括:

[0008] 建立三相变压器简化模型;

[0009] 将所述三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元;

[0010] 对若干个所述三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理,并进行电磁瞬态分析。

[0011] 优选地,将所述三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元具体包括:

[0012] 将所述三相变压器简化模型剖分为若干个四面体二阶单元。

[0013] 优选地,对若干个所述三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理,并进行

电磁瞬态分析具体包括：

[0014] 对若干个所述四面体二阶单元进行与A相对应的绕组短路处理；

[0015] 对所述四面体二阶单元的棱边的矢量位自由度进行一阶元计算，对所述四面体二阶单元的节点的标量位自由度进行二阶元计算，求解出三维瞬态磁场；

[0016] 对所述三维瞬态磁场进行计算结果分析。

[0017] 优选地，对所述三维瞬态磁场进行计算结果分析具体包括：

[0018] 根据求解出的所述三维瞬态磁场进行分析确定所述三相变压器简化模型对应的内部磁场分布特性、各相绕组和铁芯欧姆损耗，以及各相绕组受力情况。

[0019] 优选地，根据求解出的所述三维瞬态磁场进行分析还包括：

[0020] 获取到在A相短路状态下所述三相变压器简化模型对应的三相电流瞬态波形、预置时刻下所述三相变压器简化模型对应的磁感应强度分布云图和指定路径位置下考察得到的磁感应强度分布曲线图。

[0021] 本发明实施例提供的一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算装置，包括：

[0022] 建立单元，用于建立三相变压器简化模型；

[0023] 剖分单元，用于将所述三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元；

[0024] 分析单元，用于对若干个所述三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理，并进行电磁瞬态分析。

[0025] 优选地，剖分单元，具体用于将所述三相变压器简化模型剖分为若干个四面体二阶单元。

[0026] 优选地，分析单元包括：

[0027] 短路处理子单元，用于对若干个所述四面体二阶单元进行与A相对应的绕组短路处理；

[0028] 计算子单元，用于对所述四面体二阶单元的棱边的矢量位自由度进行一阶元计算，对所述四面体二阶单元的节点的标量位自由度进行二阶元计算，求解出三维瞬态磁场；

[0029] 分析子单元，用于对所述三维瞬态磁场进行计算结果分析。

[0030] 优选地，分析子单元包括：

[0031] 第一分析模块，用于根据求解出的所述三维瞬态磁场进行分析确定所述变压器简化模型对应的内部磁场分布特性、各相绕组和铁芯欧姆损耗，以及各相绕组受力情况。

[0032] 优选地，分析子单元还包括：

[0033] 第二分析模块，用于根据求解出的所述三维瞬态磁场进行分析，获取到在A相短路状态下所述三相变压器简化模型对应的三相电流瞬态波形、预置时刻下所述三相变压器简化模型对应的磁感应强度分布云图和指定路径位置下考察得到的磁感应强度分布曲线图。

[0034] 从以上技术方案可以看出，本发明实施例具有以下优点：

[0035] 本发明实施例提供的一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法及装置，其中，三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法包括：建立三相变压器简化模型；将三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元；对若干个三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理，并进行电磁瞬态分析，解决了由于目前的大型变压器的模型比较复杂，材料的非线性特性难以获得，求解的计算量比较大，而导致的大型变压器三维电磁场

求解效率低的技术问题。

附图说明

[0036] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其它的附图。

[0037] 图1为本发明实施例提供的一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法的一个实施例的流程示意图;

[0038] 图2为本发明实施例提供的一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法的另一个实施例的流程示意图;

[0039] 图3为本发明实施例提供的一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算装置的一个实施例的结构示意图;

[0040] 图4为本发明实施例提供的一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算装置的另一个实施例的结构示意图;

[0041] 图5为四面体二阶单元示意图;

[0042] 图6(a)为A相短路时高压侧电流波形图;

[0043] 图6(b)为A相短路时该相瞬态电流波形图;

[0044] 图7(a)为变压器剖面场强分布云图;

[0045] 图7(b)为变压器铁芯场强分布云图;

[0046] 图7(c)为变压器铁芯磁矢量分布图;

[0047] 图8(a)为旁轭A(短路)相外侧考察路径位置图;

[0048] 图8(b)为旁轭A(短路)相外侧场强分布曲线;

[0049] 图9(a)为旁轭A(短路)相内侧考察路径位置图;

[0050] 图9(b)为旁轭A(短路)相内侧场强分布曲线;

[0051] 图10(a)为B相铁轭靠近A(短路)相考察路径位置图;

[0052] 图10(b)为B相铁轭靠近A(短路)相侧场强分布曲线;

[0053] 图11(a)为B相铁轭靠近C(非短路)相考察路径位置图;

[0054] 图11(b)为B相铁轭靠近C(非短路)相侧场强分布曲线;

[0055] 图12(a)为旁轭C(非短路)相内侧考察路径位置图;

[0056] 图12(b)为旁轭C(非短路)相内侧场强分布曲线;

[0057] 图13(a)为旁轭C(非短路)相外侧考察路径位置图;

[0058] 图13(b)为旁轭C(非短路)相外侧场强分布曲线;

[0059] 图14(a)为上轭外侧考察路径位置图;

[0060] 图14(b)为上轭外侧场强分布曲线;

[0061] 图15(a)为上轭内侧考察路径位置图;

[0062] 图15(b)为上轭内侧场强分布曲线;

[0063] 图16(a)为下轭内侧考察路径位置图;

[0064] 图16(b)为下轭内侧场强分布曲线;

[0065] 图17(a)为下轭外侧考察路径位置图；

[0066] 图17(b)为下轭外侧场强分布曲线。

具体实施方式

[0067] 本发明实施例提供了一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法及装置，解决了由于目前的大型变压器的模型比较复杂，材料的非线性特性难以获得，求解的计算量比较大，而导致的大型变压器三维电磁场求解效率低的技术问题。

[0068] 为使得本发明的发明目的、特征、优点能够更加的明显和易懂，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，下面所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而非全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其它实施例，都属于本发明保护的范围。

[0069] 本次电磁计算采用ANSYS Maxwell R17.0低频电磁场有限元分析软件进行仿真，ANSYS Maxwell R17.0集成于ANSYS Electronic Desktop R17.0电子桌面。ANSYS Maxwell是全球最著名的电磁场有限元分析软件，广泛应用于电机、作动器、高压电器设备、高压开关等机电产品和电力产品的电磁场计算和方案优化。

[0070] 请参阅图1，本发明实施例提供的一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算方法的一个实施例包括：

[0071] 101、建立三相变压器简化模型；

[0072] 本实施例中，当需要对三相变压器三维电磁场进行分析时，首先获取到通过Maxwell工具中的变压器基元模型建立的三相变压器简化模型。

[0073] 102、将三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元；

[0074] 当获取到通过Maxwell工具中的变压器基元模型建立的三相变压器简化模型，需要通过Maxwell工具的静态自适应网格将三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元。

[0075] 103、对若干个三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理，并进行电磁瞬态分析。

[0076] 当通过Maxwell工具的静态自适应网格将变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元之后，需要通过Maxwell工具对若干个三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理，并进行电磁瞬态分析。

[0077] 请参阅图2，本发明实施例提供的一种三相变压器三维电磁场的计算方法的另一个实施例包括：

[0078] 201、建立三相变压器简化模型；

[0079] 本实施例中，当需要对三相变压器三维电磁场进行分析时，首先获取到通过Maxwell工具中的变压器基元模型建立的三相变压器简化模型。

[0080] 202、将三相变压器简化模型剖分为若干个四面体二阶单元；

[0081] 当获取到通过Maxwell工具中的变压器基元模型建立的三相变压器简化模型，需要通过Maxwell工具的静态自适应网格将三相变压器简化模型剖分为若干个四面体二阶单元。

[0082] 203、对若干个四面体二阶单元进行与A相对应的绕组短路处理；

[0083] 当通过Maxwell工具的静态自适应网格将三相变压器简化模型剖分为若干个四面体二阶单元之后,需要通过Maxwell工具对若干个四面体二阶单元进行与A相对应的绕组短路处理。

[0084] 204、对四面体二阶单元的棱边的矢量位自由度进行一阶元计算,对四面体二阶单元的节点的标量位自由度进行二阶元计算求解出三维瞬态磁场；

[0085] 当通过Maxwell工具对若干个四面体二阶单元进行对应绕组短路处理之后,需要对四面体二阶单元的棱边的矢量位自由度进行一阶元计算,对四面体二阶单元的节点的标量位自由度进行二阶元计算求解出三维瞬态磁场。

[0086] 205、根据求解出的三维瞬态磁场进行分析确定三相变压器简化模型对应的内部磁场分布特性、各相绕组和铁芯欧姆损耗,以及各相绕组受力情况；

[0087] 求解出三维瞬态磁场之后,需要根据求解出的三维瞬态磁场进行分析确定三相变压器简化模型对应的内部磁场分布特性、各相绕组和铁芯欧姆损耗,以及各相绕组受力情况。

[0088] 206、获取到在A相短路状态下三相变压器简化模型对应的三相电流瞬态波形、预置时刻下三相变压器简化模型对应的磁感应强度分布云图和在指定路径位置下考察得到的磁感应强度分布曲线图。

[0089] 求解出三维瞬态磁场之后,需要获取到短路状态下变压器简化模型对应的三相电流瞬态波形、预置时刻下变压器简化模型对应的磁感应强度分布云图和在指定路径位置下考察得到的磁感应强度分布曲线图。

[0090] 下面以一具体应用场景进行详细的描述,应用例包括:

[0091] 变压器高、中、低压绕组电流均为190.9/599.8/2200A(变压器铭牌数据),调压线圈未通电流,单相(取A相)高中压绕组短路,进行瞬态磁场分析。

[0092] 电力变压器等级110KV,额定容量40MVA,铭牌和结构参数见表1

[0093]

参数名称	取值	参数名称	取值
变压器型号	SFSZ8-40000/110	额定容量/MVA	40
联接组标号	YNyn0d11	电压组合/kV	121±8×1.25%/38.5/10.5
额定频率/Hz	50	额定电流/A	190.9/599.8/2200
空载电流/%	0.50	空载损耗/kW	44.03
负载损耗/kW	240.10/248.65/-	短路电压/%	9.75/17.4/6.43
冷却方式	ONAF	油箱长度/mm	5400

	油箱宽度/mm	1730	油箱高度/mm	2925
	铁芯高度/mm	2420	铁芯直径/mm	620
	铁窗高度/mm	1520	铁窗宽度/mm	730
	油枕半径/mm	450	油枕长度/mm	3550
	低压绕组内径/mm	329	高压绕组内径/mm	518
	低压绕组外径/mm	389.5	高压绕组外径/mm	601.5
	低压绕组高度/mm	1280	高压绕组高度/mm	1280
[0094]	低压绕组垫块总高	438	高压绕组垫块总高	423
	低压绕组段数	104	高压绕组段数	92
	低压绕组匝数	100	高压绕组匝数	665
	中压绕组内径/mm	421.5	中压绕组垫块总高	324
	中压绕组外径/mm	472	中压绕组段数	76
	中压绕组高度/mm	1280	中压绕组匝数	212
	油箱平均厚度	8	绕组预紧力	1.5-2
[0095]	/mm		/MPa	

[0096] 表1

[0097] 变压器内部铁芯采用冷轧硅钢片叠压制成,计算采用Maxwell自带变压器铁芯基元模型。线圈采用饼式结构,变压器线圈采取饼式结构,其中高压线圈共92饼,每饼有15匝线圈;中压线圈共76饼,每饼有6匝线圈;低压线圈共100饼,每饼有1匝线圈;调压压线圈共9饼,每饼有1匝线圈。

[0098] 变压器内部铁芯采用冷轧硅钢片叠压制成,结构参数如表2,计算采用Maxwell自带变压器铁芯基元模型。线圈采用饼式结构,结构参数如表3,计算采用Maxwell自带变压器线圈基元模型,首先对变压器铁芯及线圈进行建模。

参数名称	取值
腿外直径/mm	620
腿中心距/mm	1350
上下中心距/mm	2130
迭压层数	9

[0100] 表2

参数名称	高压线圈	中压线圈	低压线圈	调压压线圈
中心距/mm	1350	1350	1350	1350
内部宽/mm	1040	847	658	1279
深度/mm	1040	847	658	1279
半径/mm	520	423.5	329	639.5
单边厚度	83.5	50.5	60.5	18.5

	/mm				
[0102]	高度/mm	1292	1292	1292	1292
	层数	92	76	100	9
	垫片厚/mm	4	4.25	4.5	6

[0103] 表3

[0104] 其他结构,如拉板、夹件、油箱结构参数去表4所示。

[0105]

参数名称	长/mm	宽/mm	高/mm
拉板	2390	160	12
夹件	4080	25	450
油箱	5400	1730	2925

[0106] 表4

[0107] 材料参数见表5。

参数名称	
线圈电阻率	0.02135 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 备注: 75 $^{\circ}\text{C}$
[0108] 铁芯电导率	2.23* S/m
油介电常数	2.2
纸板介电常数	4.5
夹件、拉板	Q235 (绝缘)

[0109] 表5

[0110] 在三维瞬态场中仍旧采用的是T- Ω 算法,对于低频瞬态磁场,麦克斯韦方程组可以写为式(1)一式(3)的形式。

[0111] ANSYS Maxwell软件磁场有限元计算分析满足下列Maxwell方程:

[0112] ANSYS Maxwell软件磁场有限元计算分析满足下列Maxwell方程:

$$[0113] \quad \nabla \times H = J \quad (1)$$

$$[0114] \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

[0115] $B = \mu H$ (3)

[0116] 在式(1)一式(3)的基础上,可以构造出两个恒等式,如式(4), (5)所示。

[0117]
$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times H + \frac{\partial B}{\partial t} = 0$$
 (4)

[0118]
$$\nabla \cdot B = 0$$
 (5)

[0119] Maxwell在求解三维瞬态磁场时,其棱边上的矢量位自由度采用了一阶元计算,而节点上的标量位自由度采用二阶元计算。

[0120] 在三维瞬态磁场中,可以调用电压源或电流源作为模型激励源,而绕组又分为两种,一种是绞线型绕组,一种是实体绕组。其中绞线绕组不考虑涡流分布,认为绕组内的电密是完全均匀的,而实体绕组则需要计算其趋肤效应。在施加电压源时,绕组上的电流并不知道,所以需要进行绕组回路上的电压计算。

[0121] 对于绞线型绕组,因其电阻值是一个集中参数,所以在外加电压源的时候,可以直接由电压源和直流电阻计算得到电流的数值,而对于实体线圈,因为其电阻值与频率、材料等有关,所以该电阻也称作交流电阻。在对实体线圈施加电压源的时候其交流电阻值并不知道,Maxwell是先按照式(6)进行计算,

[0122]
$$V_i = \iiint_{R_i} J_{0i} (E + v \times B) dR$$
 (6)

[0123] 其中, J_{0i} 是第*i*个回路上的电密,同样包含X、Y、Z三个方向上的分量。

[0124] 如果是变化的磁场,那么还应该计算绕组反电势,反电势可以按照式(7)计算。

[0125]
$$E_i = \iiint_{R_i} H_i \cdot B_i dR$$
 (7)

[0126] 在三维瞬态磁场中,瞬态包含两个含义,一个是瞬态的电磁过程,一个是瞬态的机械过程。由于此次计算未涉及在机械瞬态过程,故在此不再对处理方式进行说明。

[0127] 电磁场的分析和计算通常归结为求微分方程的解。对于常微分方程,只要由辅助条件决定任意常数之后,其解就成为唯一的。对于偏微分方程,使其能成为唯一的辅助条件可以分为两种,一种是表达场的边界所处的物理情况,称为边界条件;一种种是确定场的初始状态,称为初始条件。边界条件和创始条件合称为定解条件。泛定方程和定解条件作为一个整体,称为定解问题。电磁场求解过程中有各种各样的边界条件本次求解过程中,具体应用了以下两类:

[0128] (1) 诺依曼边界条件

[0129]
$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{\tau} + f(\tau) \phi|_{\tau} = h(\tau)$$
 (21)

[0130] 其中, τ 为诺依曼边界; n 为边界 Γ 的外法线矢量。

[0131] $f(\tau)$ 和 $h(\tau)$ 为一般函数,可以为常数和零,当为零时称齐次诺依曼边界条件。一般电磁场问题中将诺依曼边界条件称为第二类边界条件,它规定了边界处势的法向导数分布,在Maxwell计算中提到的齐次诺依曼边界条件,即法向导数为零,为默认边界条件,不需要用户指定。

[0132] (2) 自然边界条件

[0133] 媒质分解面上的边界条件,即不同媒质交界面场量的切向和法向边界条件属于自然边界条件,在Maxwell计算中是系统的默认边界条件,不需要用户指定。

[0134] 整个模型统一将工作线圈均考虑在内,出于工程分析的角度出发,本次分析对模

型进行了简化,简化的假设条件有:

[0135] (1) 整个模型建模时对局部细节进行简化;

[0136] (2) 模型结构参数不明确处由经验建模;

[0137] (3) 铁芯材料导磁特性BH曲线与损耗特性BP曲线均由提供资料图片读图描点得到;

[0138] (4) 变压器单相高中压短路瞬态电流有提供资料图片读图描点得到激励;

[0139] (5) 除短路相绕组激励外,其余激励源均认为是随时间正弦变化;

[0140] (6) 由于线圈饼数非常多,大大增加了后续流体计算的复杂程度,所以在结果提取时对每相各等级绕组做了简化求和处理。

[0141] 这些假设或简化对分析的精确度是有所影响,由于这些因素带来的误差不予计及。

[0142] 分析过程的重难点解决方法如下:

[0143] (1) 电磁流体一体化耦合

[0144] 此项目目的是在变压器发生单相高中压短路时,对其内部油流影响的分析,需要将发生短路时各相绕组各饼所受电磁力作为油流分析的源条件。各饼受力可以在流体仿真软件Fluent中直接赋值,然后进行计算得到相应的油流分析结果。但是由于变压器的结构比较复杂,运行时的实际工况与直接添加的电磁力可能存在比较大的偏差,导致油流分析的结果不准确。

[0145] 此时需要采用多物理场耦合功能,利用电磁仿真软件Maxwell计算变压器线圈上的电动力,并将其直接映射到Fluent软件,计算对变压器内部油流分布的影响。需要特别指出的是,基于ANSYS Workbench进行多物理场耦合时,所有的模型、仿真结果等信息在不同软件之前进行传递时,均通过Workbench的数据映射功能自动实现,而无需再通过其他第三方软件,从而保证了工作的效率,以及数据传递的准确性。

[0146] (2) 模型处理

[0147] 由于变压器的外形尺寸较大,内部结构复杂,且未提供仿真模型。变压器全部模型均从零开始建立,过程中采用了Maxwell自带基元对铁芯和高、中、低及调压线圈建模,大大提高了工作效率。

[0148] (3) 材料属性、工况条件等前处理工作

[0149] 计算所涉及材料属性,如铁芯导磁特性、损耗特性,单相高中压绕组短路瞬态电流波形均只提供了图片,读图工作不仅繁琐,并且对精度要求很高。

[0150] 计算采用Maxwell自带的图片捕捉工具,直接读取电子图片中曲线,省去纸质手动描点,大大简化了工作繁琐程度。但需说明,此工具仍与工程师操作、图片质量,有较大依赖性,读图工作得到数据造成的误差,仿真计算不予考虑。

[0151] (4) 网格剖分

[0152] Maxwell是基于有限元算法,有限元法是将整个求解区域离散化,分割成许多小的区域,称之为“单元”或“有限元”。由此,网格剖分的质量将直接影响计算结果的精度。而变压器外形尺寸较大,内部结构复杂,给网格剖分带来极大挑战。且网格剖分工作较难把握,尤其对于经验不是很丰富的工程师。

[0153] (5) 计算量

[0154] Maxwell是基于有限元算法,模型剖分网格量在150万左右,而且Maxwell所采用的三维网格剖分单元是有限元理论中最为稳定的四面体二阶单元,即每个网格除了将其4个顶点作为节点外,同时还将每条棱中心也作为其计算节点,每个网格共有10个节点(如图5所示),所以计算精度很高。

[0155] 另外,由于本次电磁计算的主要目的是对变压器各相绕组各饼受力的分析,所以在基本计算量的基础上,添加了800多个受力计算矩阵,显然,计算量非常庞大。

[0156] 采用HPC并行计算,进行求解,计算使用了16个核同时运行。计算采用一台32核,128G内存配置的服务器进行求解。

[0157] (6) 结果提取

[0158] 由于变压器模型复杂,各相各等级绕组饼数达800多饼,每饼受力数据为80多组,计算量非常多,且大大增加了后续流体计算中的复杂程度。

[0159] 最终决定结果提取时对每相各等级绕组做了简化求和处理。

[0160] 变压器三相绕组高、中、低压电流均为190.9/599.8/2200A(变压器铭牌数据参数),其中,中压绕组工作时起调压作用,调压线圈不在工作状态。工况为单相高、中压绕组短路,A相高、中压绕组短路时,各相绕组电流施加具体参数设置见表6。

[0161]

参数名称	A相	B相	C相
高压绕组 /A		$190.9 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + 120 \cdot \pi / 180)$	$190.9 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + 240 \cdot \pi / 180)$
中压绕组 /A		$599.8 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + 120 \cdot \pi / 180)$	$599.8 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + 240 \cdot \pi / 180)$
低压绕组 /A	$2200 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time})$	$2200 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + 120 \cdot \pi / 180)$	$2200 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + 240 \cdot \pi / 180)$
调压绕组 /A	0	0	0

[0162] i_{kA} 为短路瞬态电流。

[0163] 对变压器单相高中压绕组短路瞬态过程进行电磁分析,计算变压器单相高、中压绕组短路时,内部磁场分布特性、各相绕组和铁芯欧姆损耗,以及各相绕组受力情况。

[0164] (1) 激励波形

[0165] 变压器在发生单相短路时,高压侧A、B、C三相电流瞬态波形如图6(a)所示,其中虚线波形为短路相瞬态电流。短路相高、中、低压侧电流波形如图6(b)所示,虚线波形为高中压短路瞬态电流。

[0166] (2) 场量结果

[0167] 整个结果可以显示任何时刻变压器全部结构的磁场分布,图7(a)、图7(b)和图7(c)分别是不同相高中压短路时,同一时刻变压器内部磁感应强度分布云图和矢量图。

[0168] 以上为场图分布结果,为更准确的了解变压器内部磁场,计算考察了几条关键路上的磁场分布,图8(a)~图17(b)为在不同指定路径位置下考察得到的磁感应强度分布曲线图。

[0169] 请参阅图3,本发明实施例中提供的一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算装置的一个实施例包括:

[0170] 建立单元301,用于建立三相变压器简化模型;

[0171] 剖分单元302,用于将三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元;

[0172] 分析单元303,用于对若干个三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理,并进行电磁瞬态分析。

[0173] 本实施例中,建立单元301通过获取到通过Maxwell工具中的变压器基元模型建立的三相变压器简化模型,剖分单元302通过Maxwell工具的静态自适应网格将三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元,分析单元303通过Maxwell工具对若干个三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理,并进行电磁瞬态分析,解决了由于目前的大型变压器的模型比较复杂,材料的非线性特性难以获得,求解的计算量比较大,而导致的大型变压器三维电磁场求解效率低的技术问题。

[0174] 上面是对三相变压器A相短路状态下电磁场的计算装置的各单元进行详细的描述,下面将对子单元进行详细的描述,请参阅图4,本发明实施例中提供的一种三相变压器A相短路状态下电磁场的计算装置的另一个实施例包括:

[0175] 建立单元401,用于建立三相变压器简化模型;

[0176] 剖分单元402,用于将三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元,剖分单元402,具体用于将三相变压器简化模型剖分为若干个四面体二阶单元;

[0177] 分析单元403,用于对若干个三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理,并进行电磁瞬态分析。

[0178] 分析单元403具体包括:

[0179] 短路处理子单元4031,用于对若干个所述四面体二阶单元进行与A相对应的绕组短路处理;

[0180] 计算子单元4032,用于对四面体二阶单元的棱边的矢量位自由度进行一阶元计算,对四面体二阶单元的节点的标量位自由度进行二阶元计算,求解出三维瞬态磁场;

[0181] 分析子单元4033,用于对三维瞬态磁场进行计算结果分析。

[0182] 分析子单元4033具体包括:

[0183] 第一分析模块4033a,用于根据求解出的三维瞬态磁场进行分析确定变压器简化模型对应的内部磁场分布特性、各相绕组和铁芯欧姆损耗,以及各相绕组受力情况;

[0184] 第二分析模块4033b,用于根据求解出的三维瞬态磁场进行分析,获取到在A相短路状态下三相变压器简化模型对应的三相电流瞬态波形、预置时刻下所述三相变压器简化模型对应的磁感应强度分布云图和指定路径位置下考察得到的磁感应强度分布曲线图。

[0185] 本实施例中,建立单元401通过获取到通过Maxwell工具中的变压器基元模型建立的三相变压器简化模型,剖分单元402通过Maxwell工具的静态自适应网格将三相变压器简化模型剖分为若干个三维网格剖分单元,分析单元403通过Maxwell工具对若干个三维网格剖分单元进行与A相对应的绕组短路处理,并进行电磁瞬态分析,解决了由于目前的大型变压器的模型比较复杂,材料的非线性特性难以获得,求解的计算量比较大,而导致的大型变压器三维电磁场求解效率低的技术问题。

[0186] 所属领域的技术人员可以清楚地了解到,为描述的方便和简洁,上述描述的系统,装置和单元的具体工作过程,可以参考前述方法实施例中的对应过程,在此不再赘述。

[0187] 在本申请所提供的几个实施例中,应该理解到,所揭露的系统,装置和方法,可以通过其它的方式实现。例如,以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的,例如,所述单元的划分,仅仅为一种逻辑功能划分,实际实现时可以有另外的划分方式,例如多个单元或组件可以结合或者可以集成到另一个系统,或一些特征可以忽略,或不执行。另一点,所显示或讨论的相互之间的耦合或直接耦合或通信连接可以是通过一些接口,装置或单元的间接耦合或通信连接,可以是电性,机械或其它的形式。

[0188] 所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部单元来实现本实施例方案的目的。

[0189] 另外,在本发明各个实施例中的各功能单元可以集成在一个处理单元中,也可以是各个单元单独物理存在,也可以两个或两个以上单元集成在一个单元中。上述集成的单元既可以采用硬件的形式实现,也可以采用软件功能单元的形式实现。

[0190] 所述集成的单元如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用,可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解,本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品存储在一个存储介质中,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备)执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括:U盘、移动硬盘、只读存储器(ROM,Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM,Random Access Memory)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0191] 以上所述,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

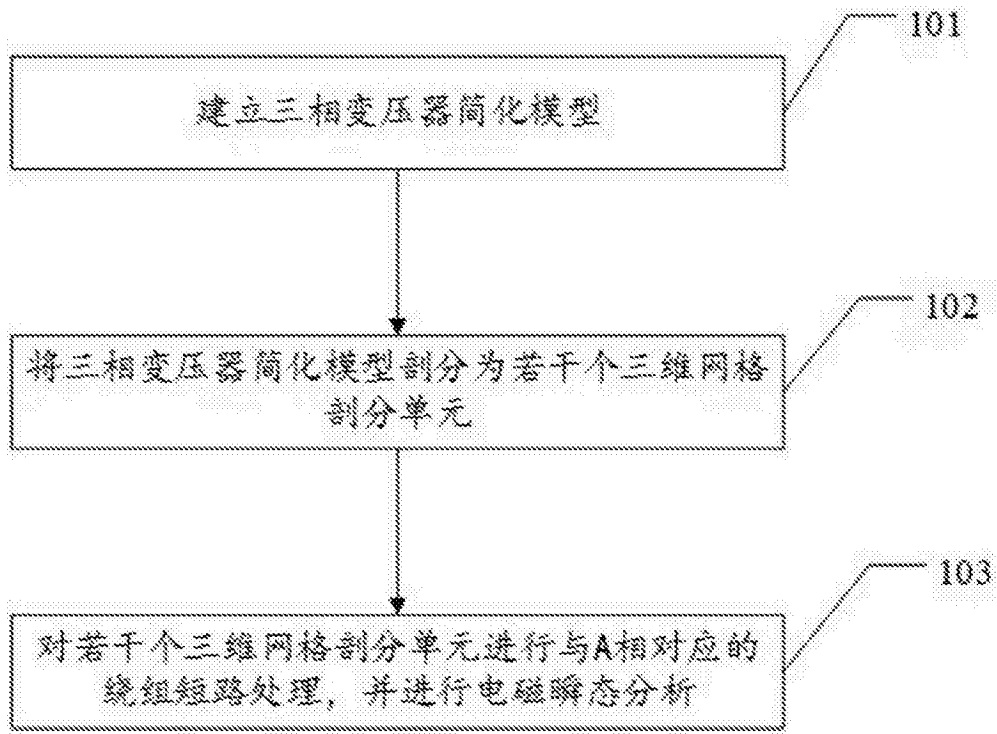


图1

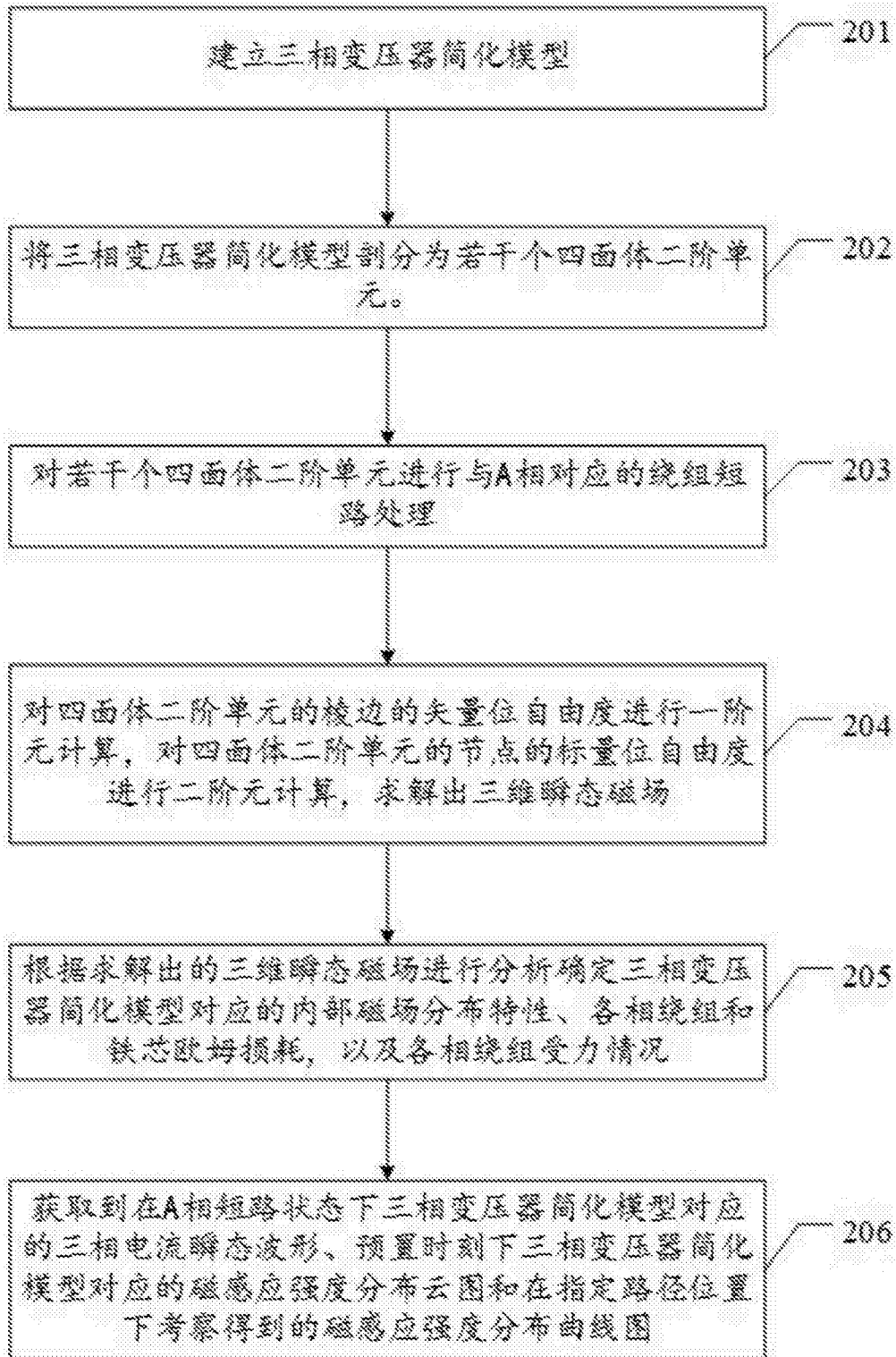


图2

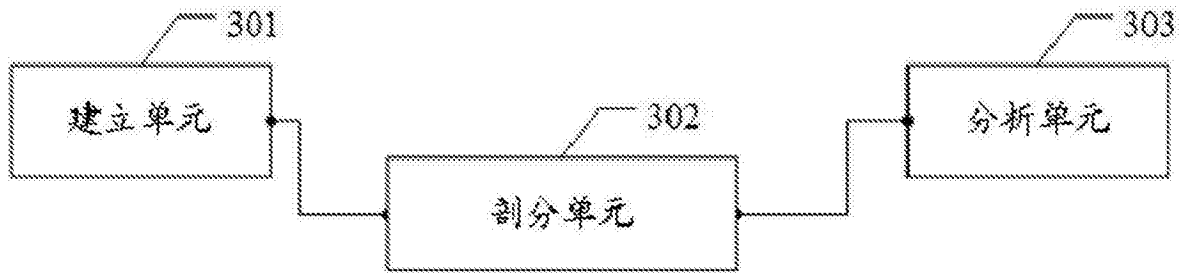


图3

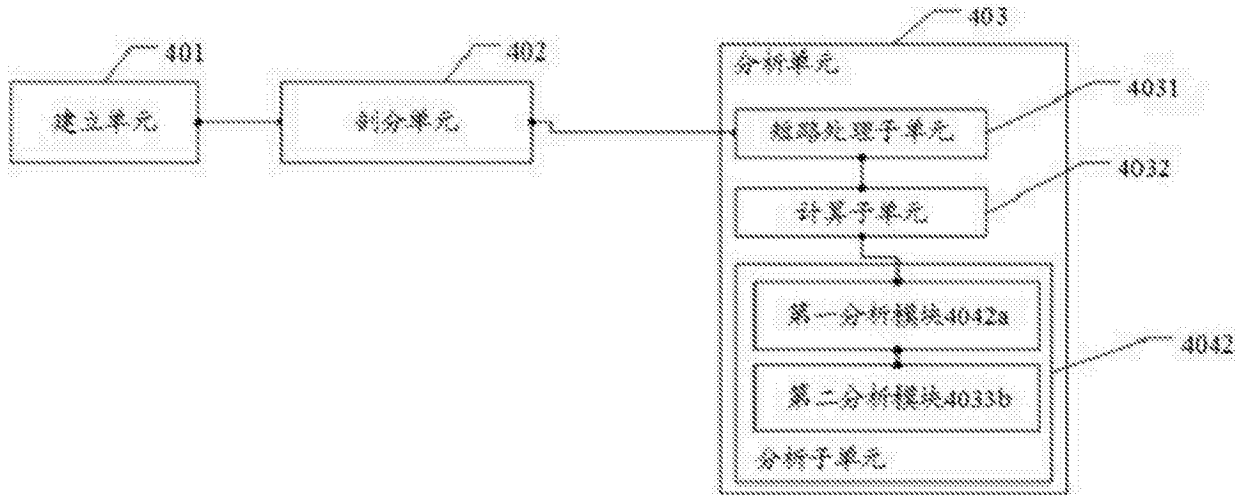


图4

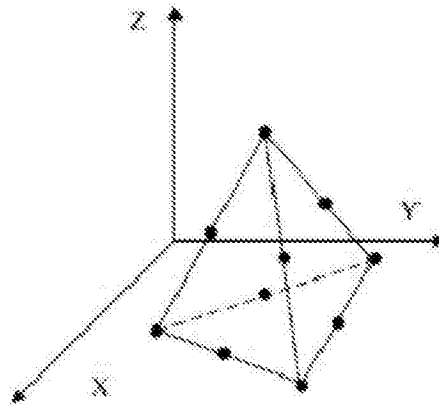


图5

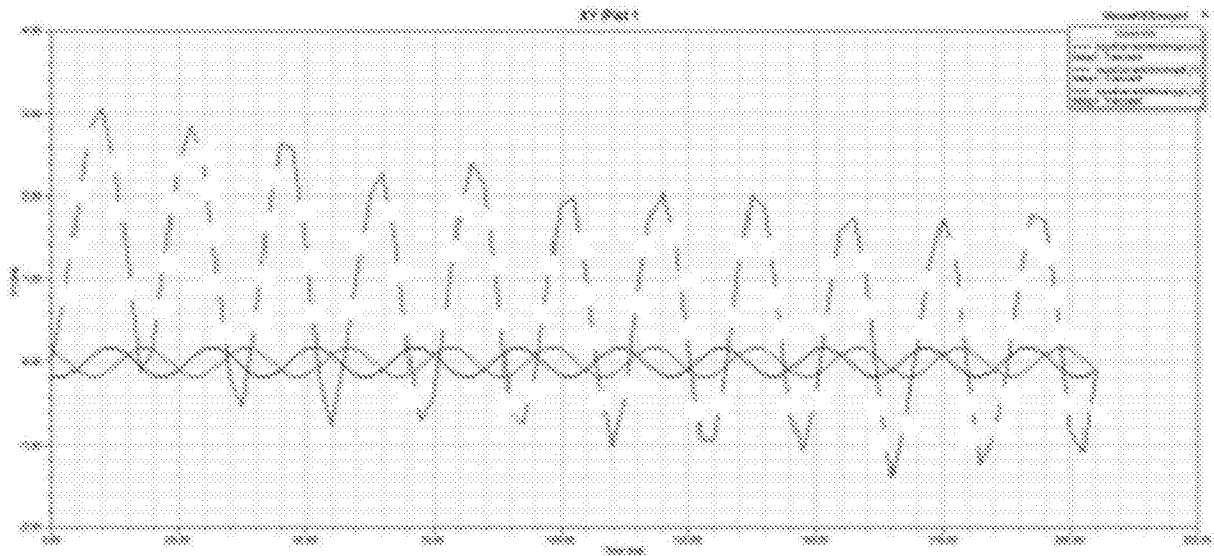


图6 (a)

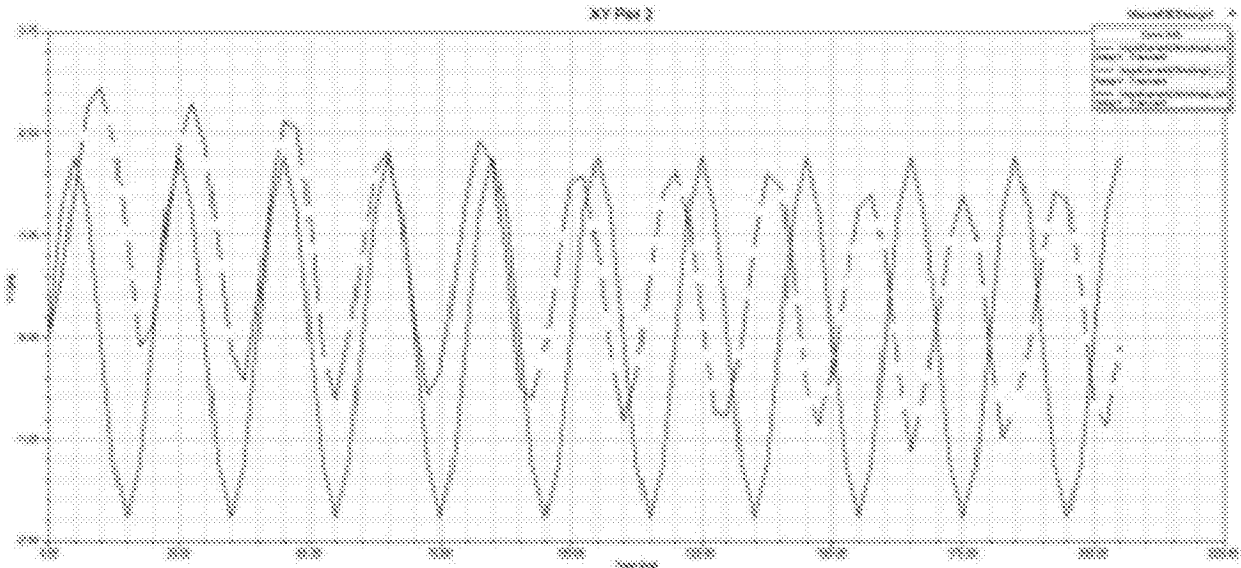


图6 (b)

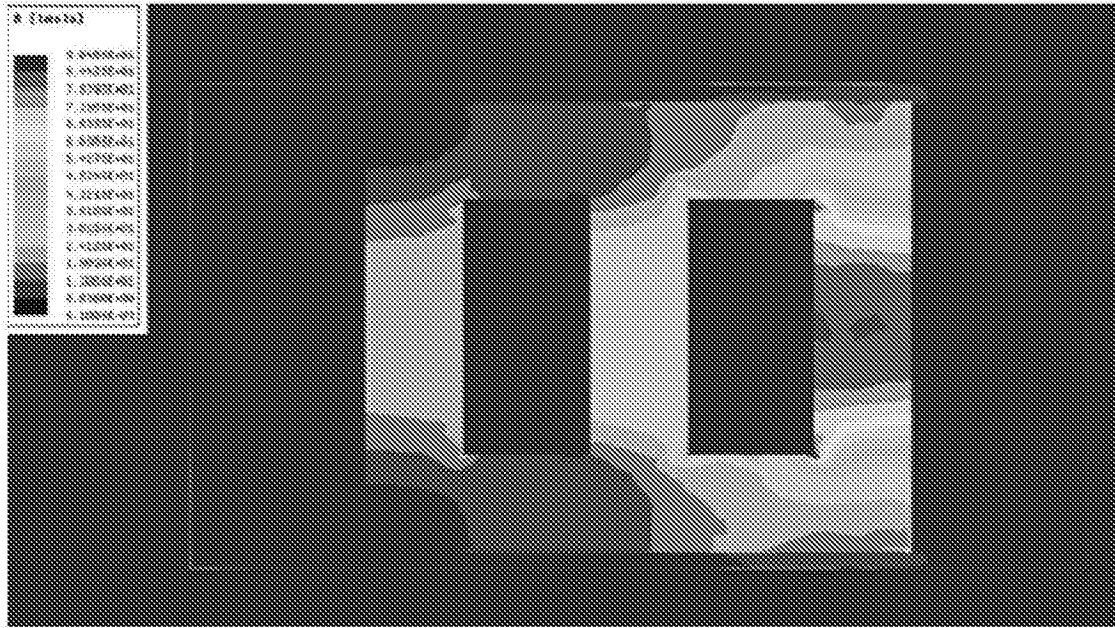


图7 (a)

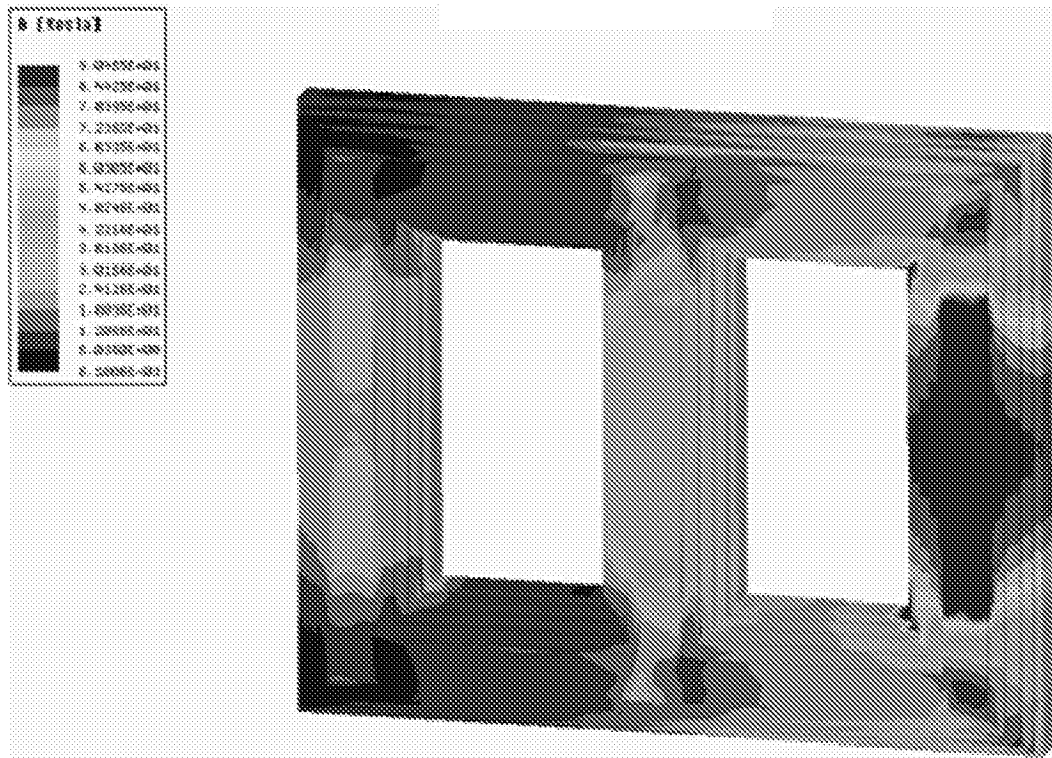


图7 (b)

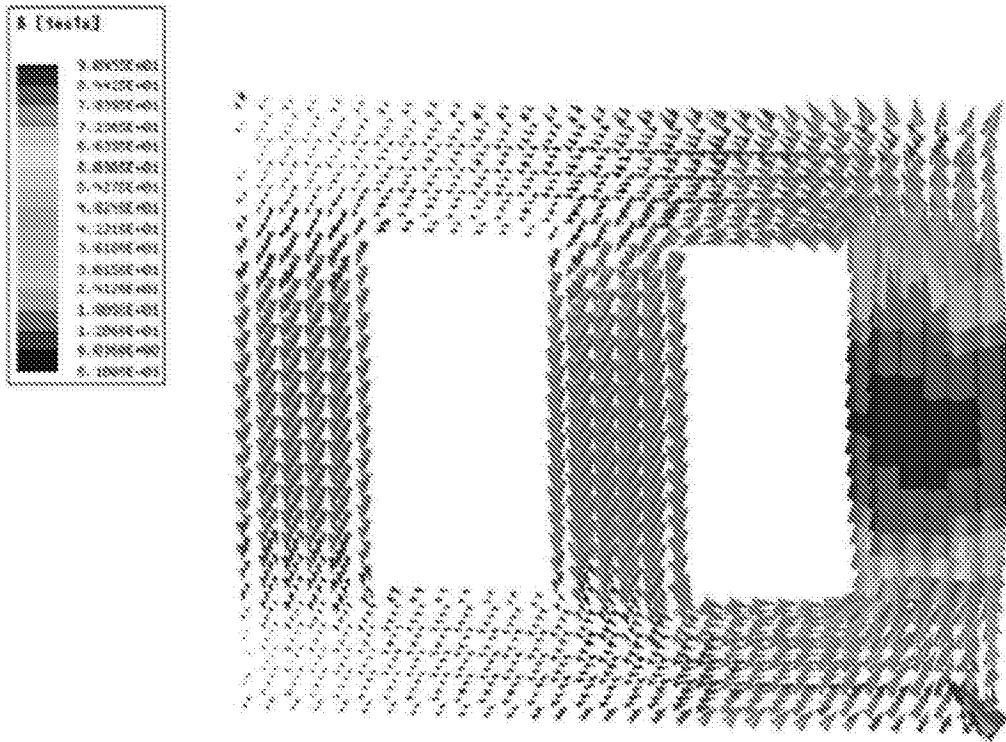


图7(c)

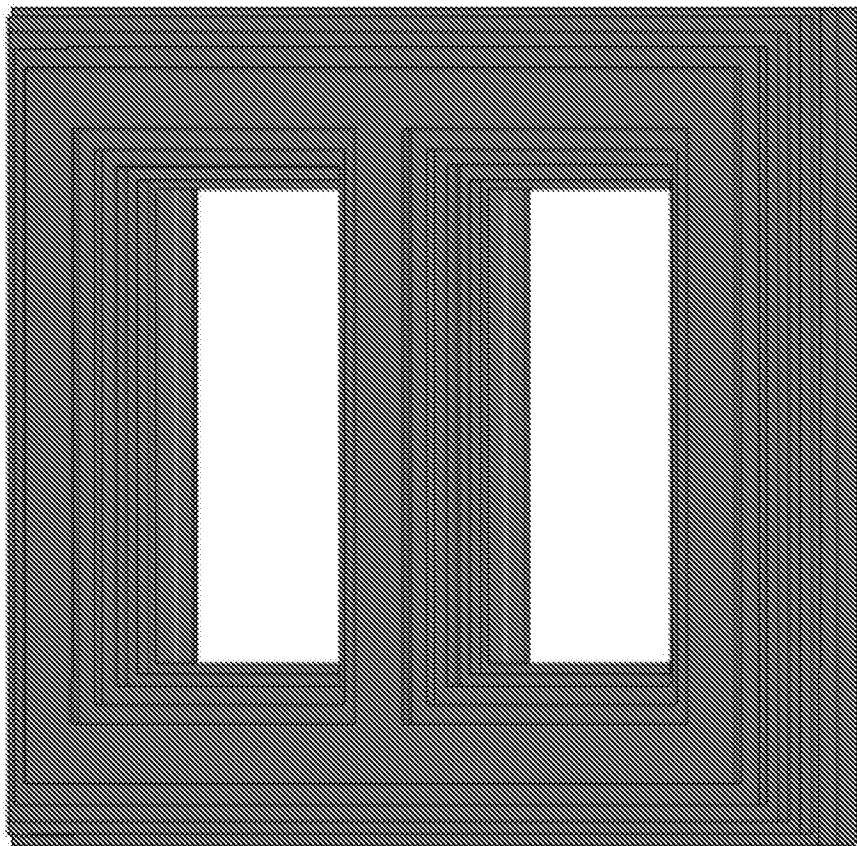


图8(a)

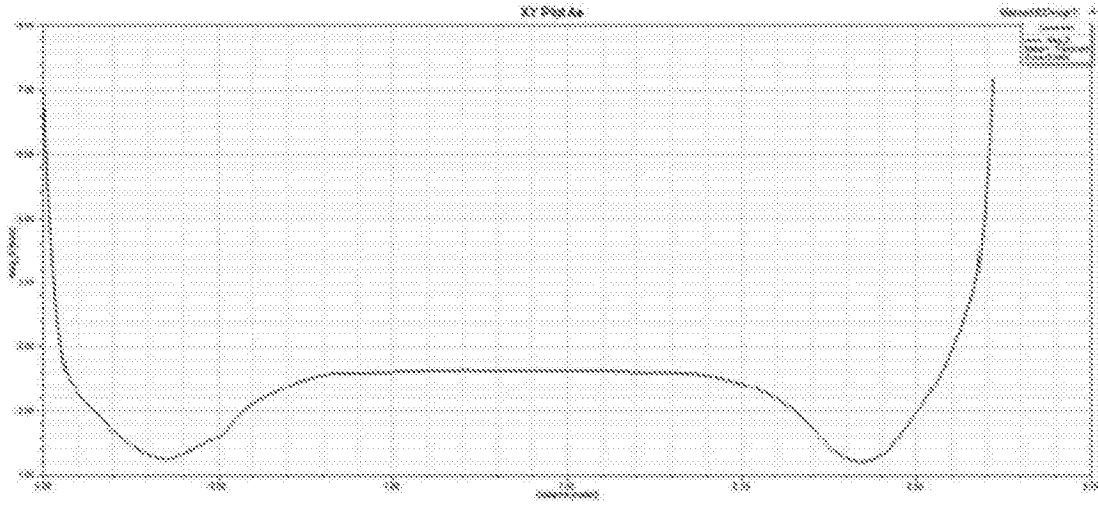


图8 (b)

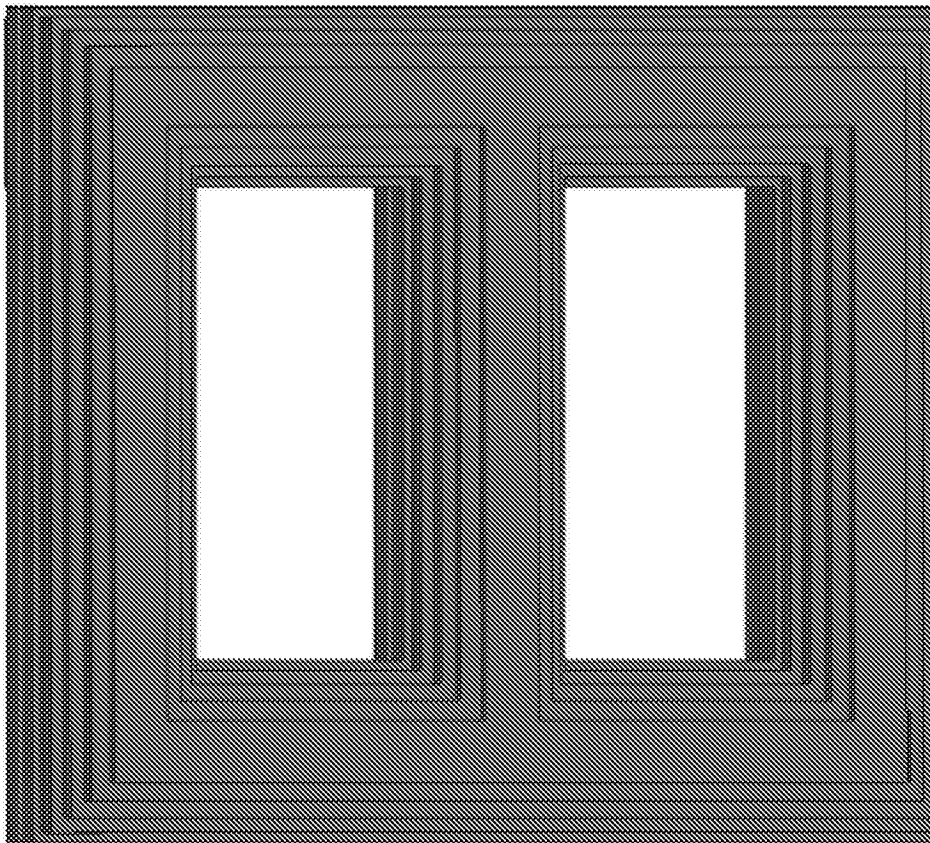


图9 (a)

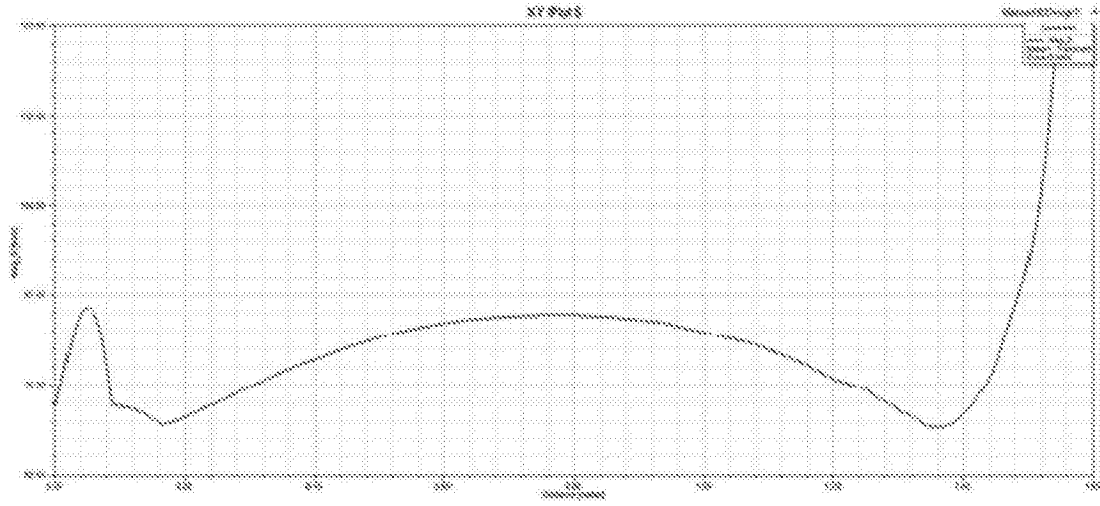


图9 (b)

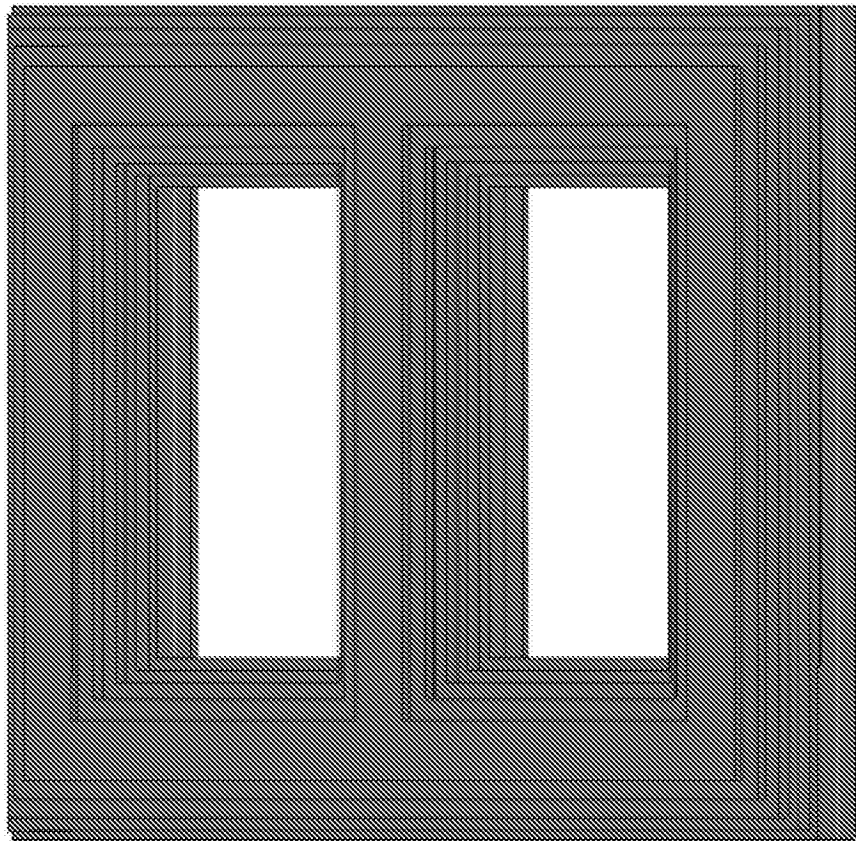


图10 (a)

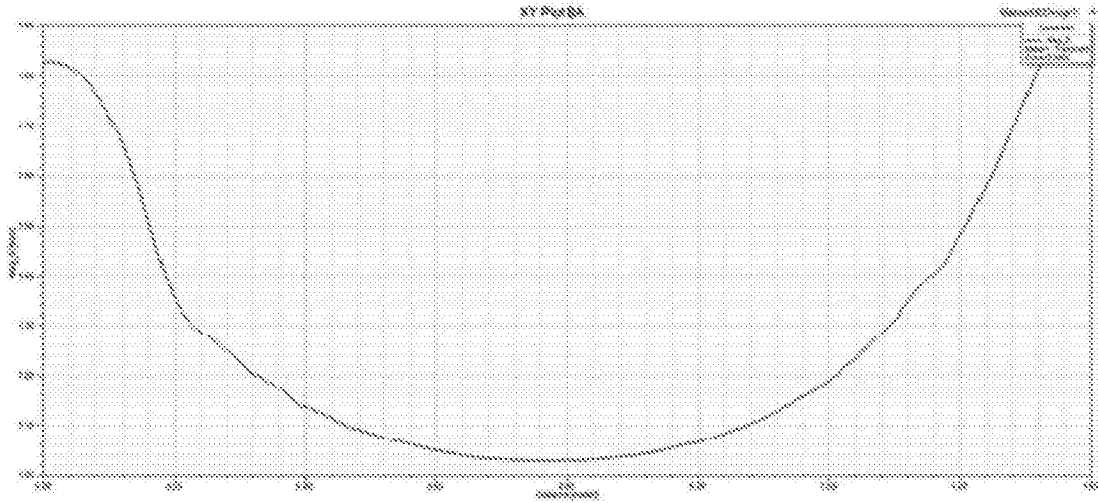


图10 (b)

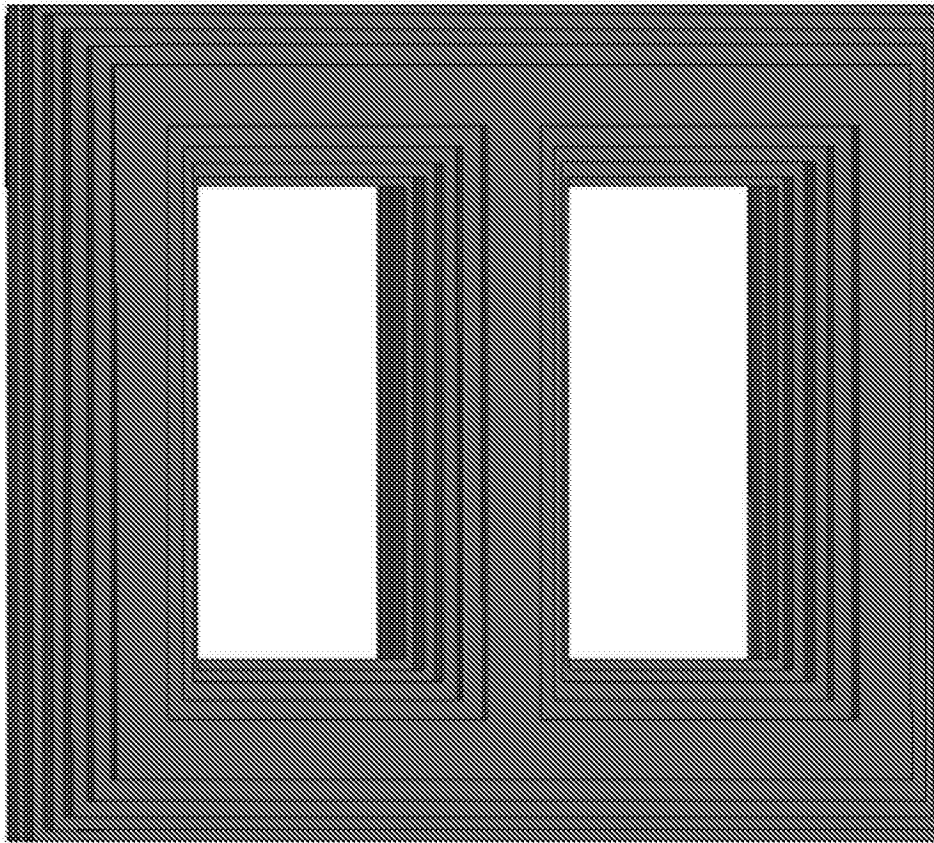


图11 (a)

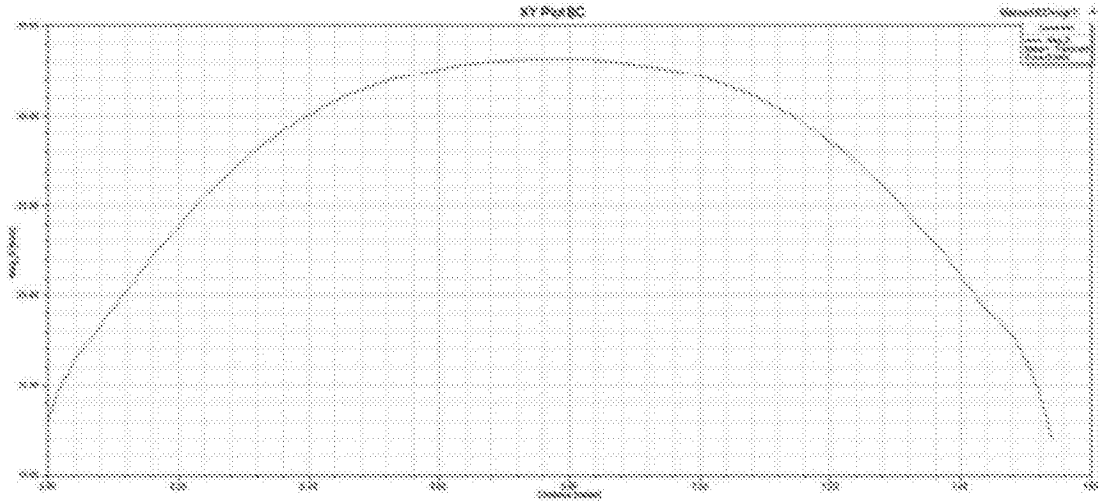


图11 (b)

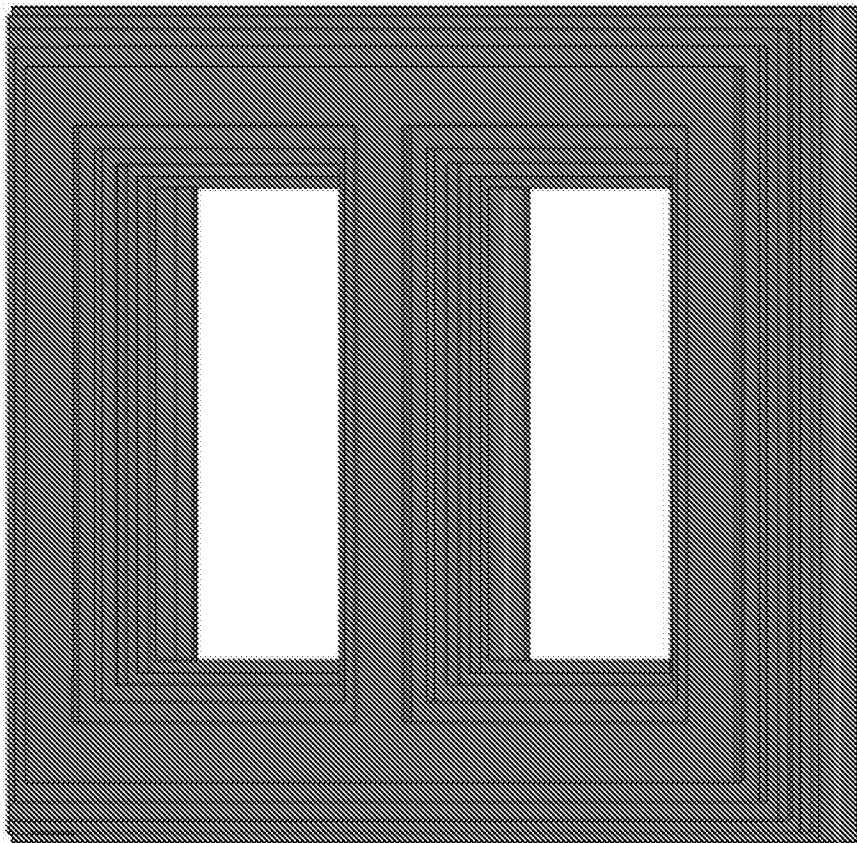


图12 (a)

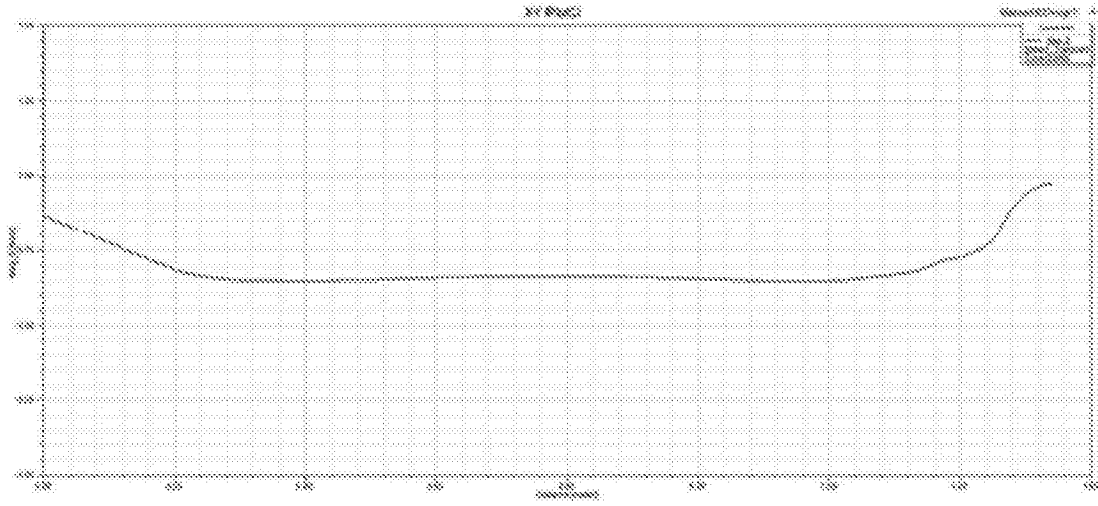


图12(b)

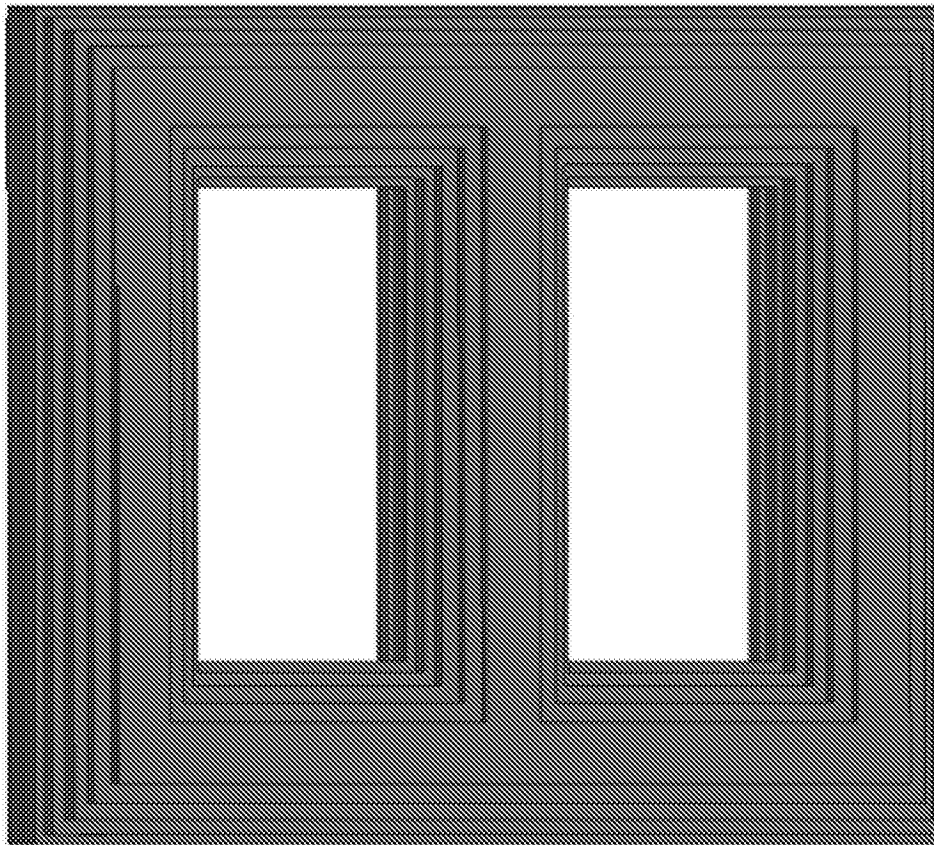


图13(a)

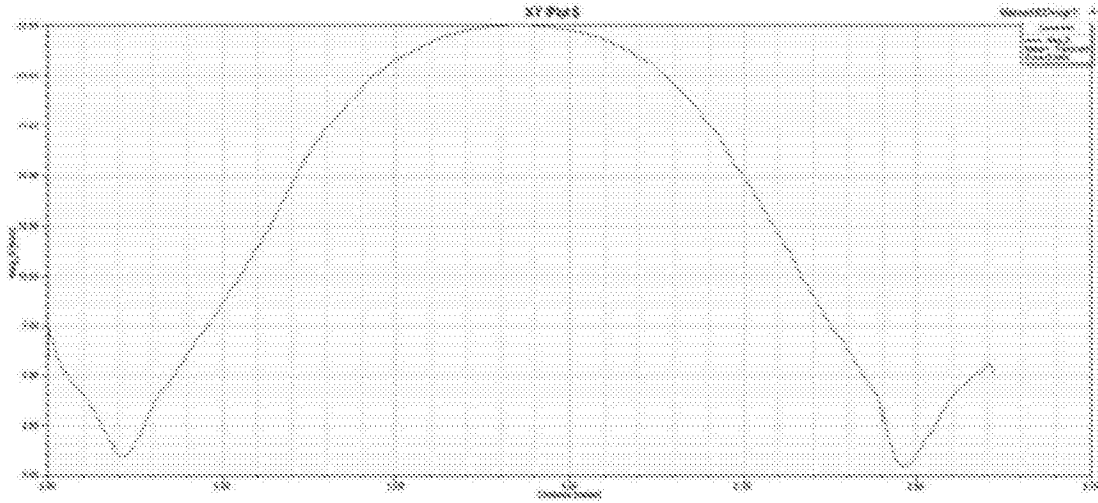


图13(b)

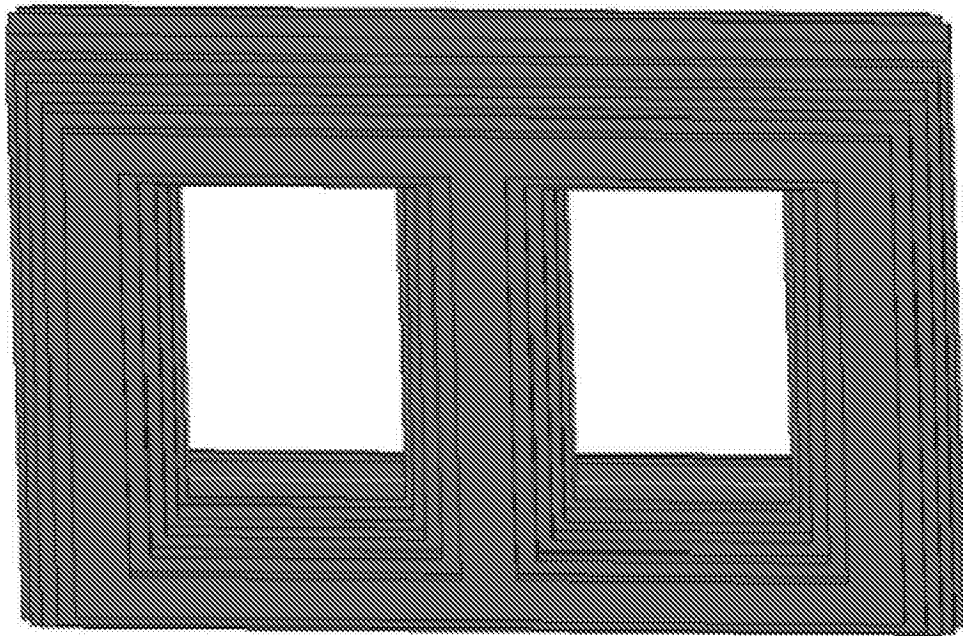


图14(a)

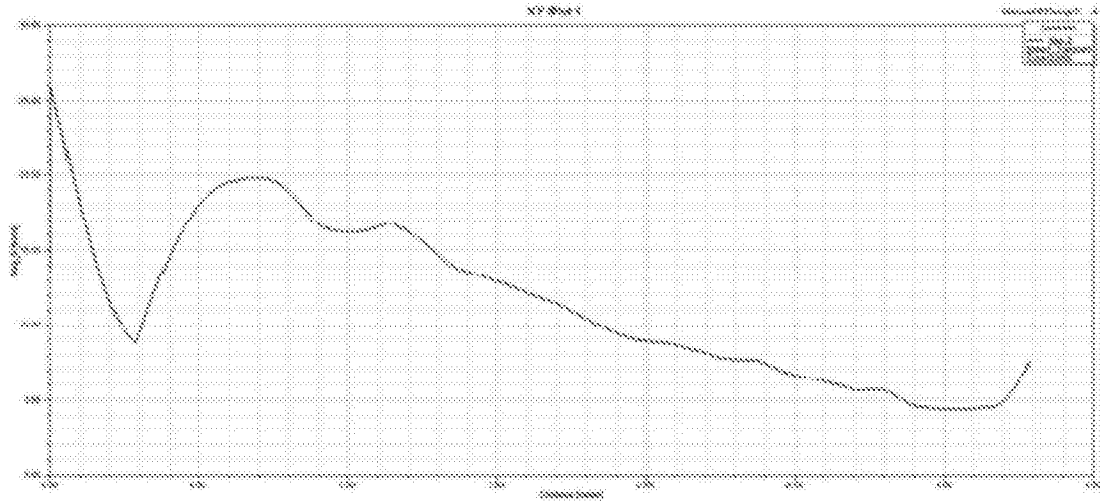


图14 (b)

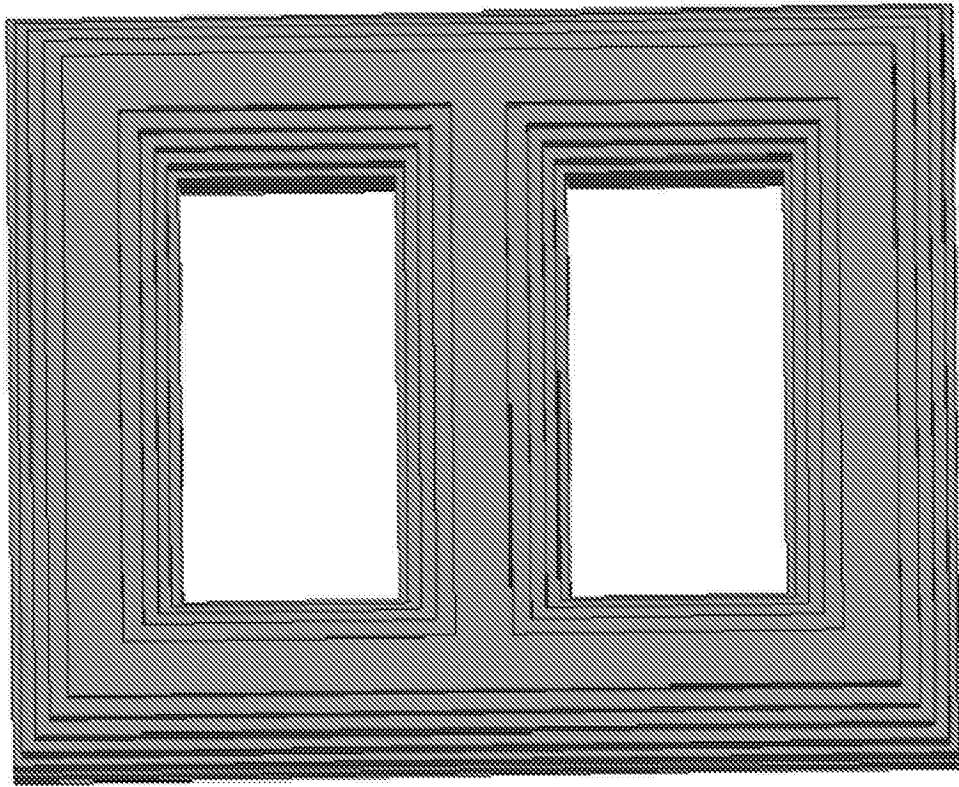


图15 (a)

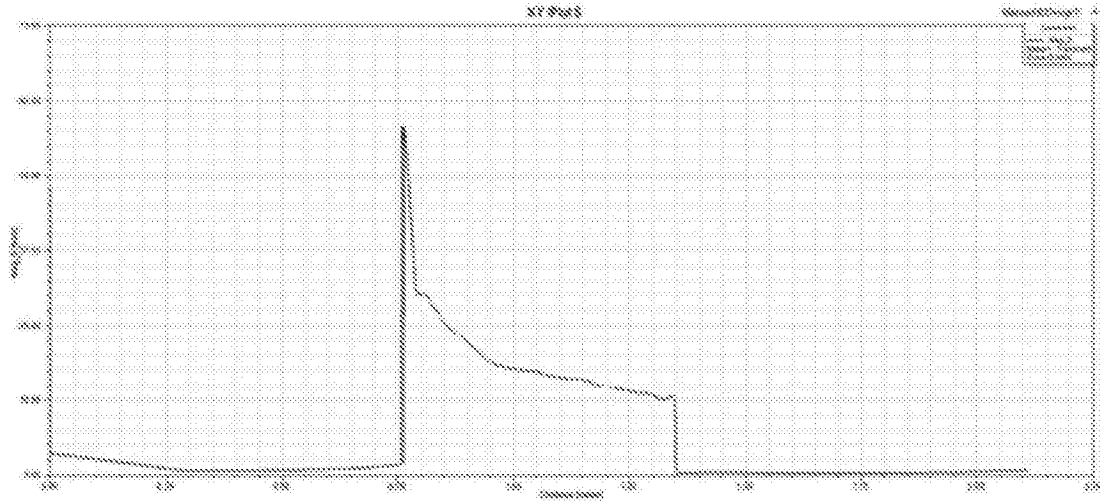


图15 (b)

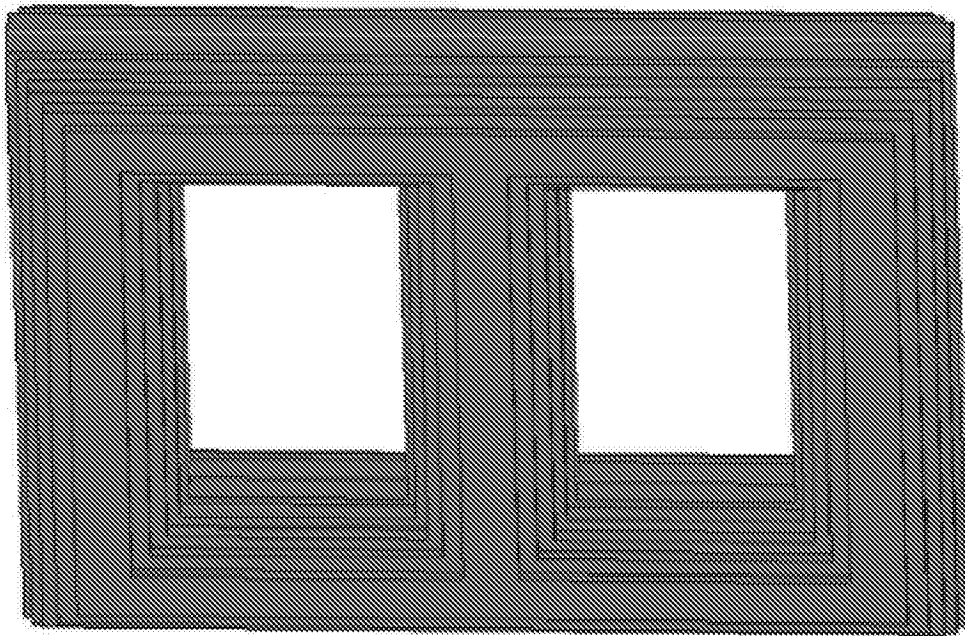


图16 (a)

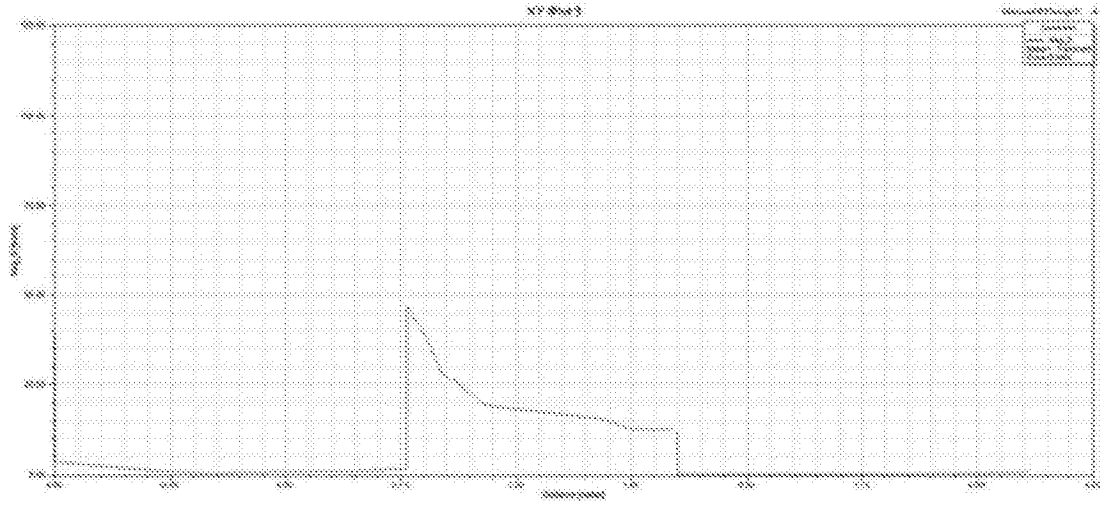


图16 (b)

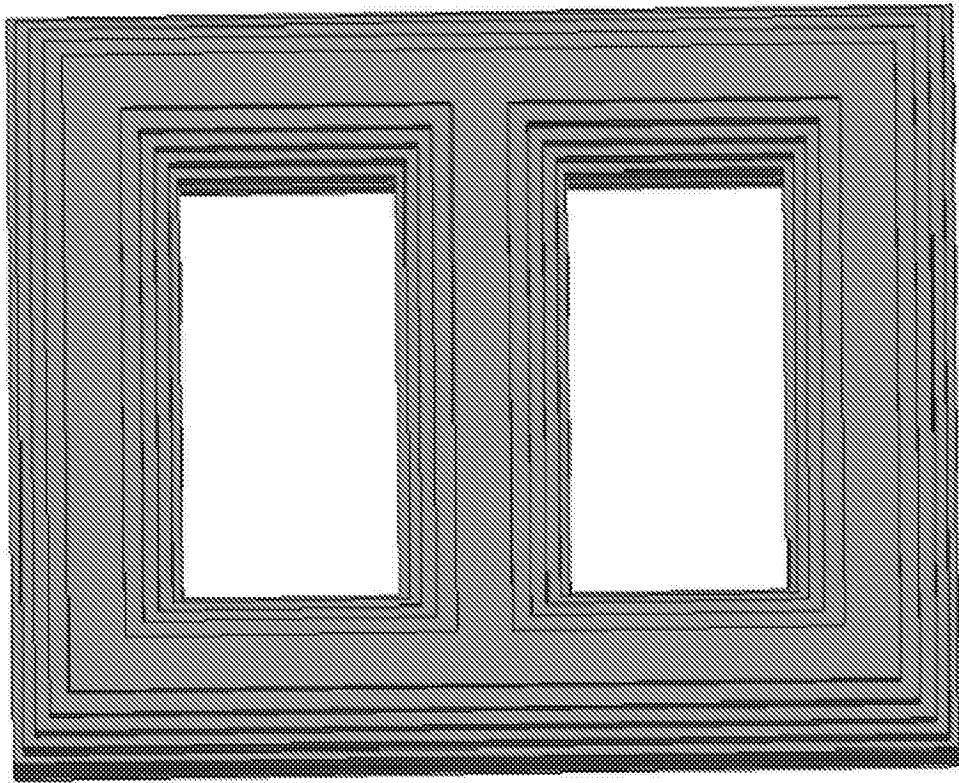


图17 (a)

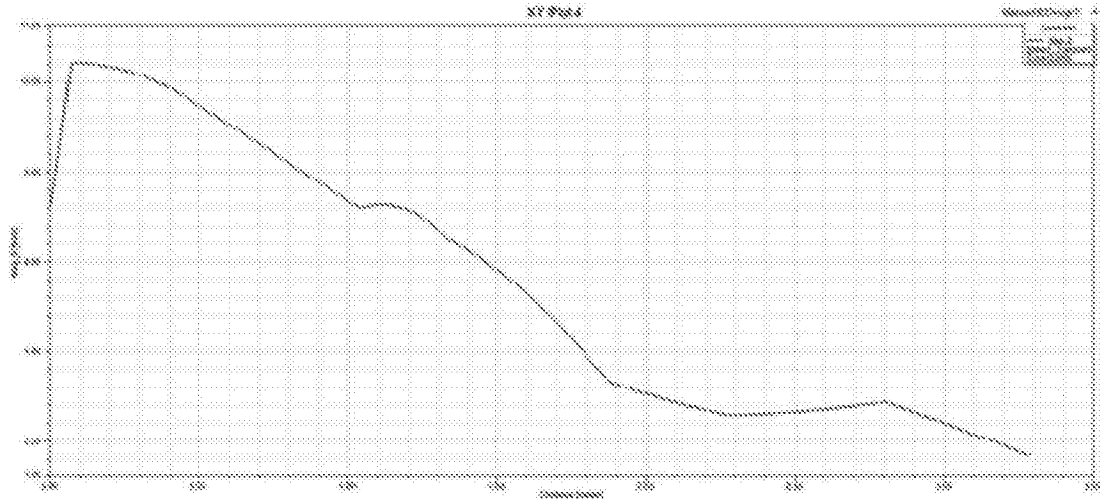


图17 (b)