



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112836269 A

(43) 申请公布日 2021.05.25

(21) 申请号 202011279106.1

(22) 申请日 2020.11.16

(71) 申请人 西南交通大学

地址 610000 四川省成都市二环路北一段

(72) 发明人 李鹏 代成栋 张德春 周跃民

郭严 杨翊仁 刘欢 杨钰莹

李伟才

(74) 专利代理机构 成都慕川专利代理事务所

(普通合伙) 51278

代理人 谢芳

(51) Int. Cl.

G06F 30/13 (2020.01)

G06F 30/23 (2020.01)

G06F 30/28 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

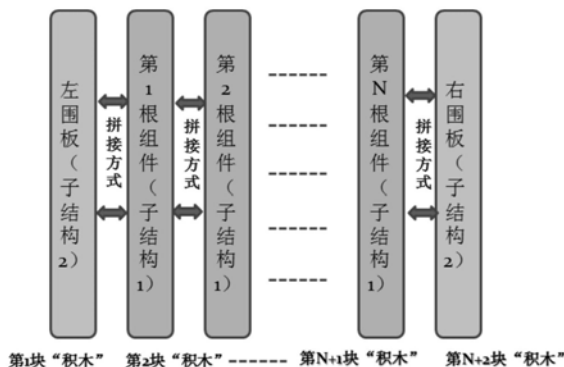
权利要求书2页 说明书9页 附图4页

(54) 发明名称

一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法

(57) 摘要

本发明具体涉及一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法,其特征在于包括如下步骤:步骤1.总结出组件建模的特点,梳理出其中两类重复的两类基本子结构,分别针对这两类结构发展相应的两类组合单元类型;步骤2.将两类组合单元类型分为:用于模拟可以发生横向振动组件各根组件模型和用于模拟计算组件外侧的围板;步骤3.将步骤2中两类组合单元模型进行组合方式设计;步骤4.按照组件个数任意选择组合单元模型型子结构,并将其进行拼接形成整体的全结构;步骤5.采用共节点力传递的方式将步骤4中的各个子结构拼接耦合成一个整体,完成对核反应堆燃料组件抗震分析的建模。



1. 一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法,其特征在于包括如下步骤:

步骤1. 总结出组件建模的特点,梳理出其中两类重复的两类基本子结构,分别针对这两类结构发展相应的两类组合单元类型;

步骤2. 将步骤1中涉及到的两类组合单元类型分为:用于模拟可以发生横向振动组件各根组件模型的第一类组合单元有限元模型和用于模拟计算组件外侧的围板的第二类组合单元有限元模型;

步骤3. 将步骤2中第一类组合单元模型和第二类组合的单元模型进行组合方式设计;

步骤4. 按照组件个数任意选择第一类组合单元模型及第二类组合单元模型子结构,并将其进行拼接形成整体的全结构;

步骤5. 采用共节点力传递的方式将步骤4中的各个子结构拼接耦合成一个整体,完成对核反应堆燃料组件抗震分析的建模。

2. 根据权利要求1所述一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法其特征在于:所述第一类复合型单元模型包括:梁单元模型、非线性弹性单元模型、线性弹性单元模型和,所述梁单元模型和非线性弹性单元模型为线性弹性单元和间隙单元组合而成。

3. 根据权利要求1所述一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法其特征在于:所述第二类组合单元模型包括:非线性弹性单元模型,其由线性弹性单元和间隙单元组合而成;附加流体质量单元模型。

4. 根据权利要求1所述一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法其特征在于:所述子结构类型包括固定不可发生横向振动的围板结构和可发生横向振动的单根组件结构。

5. 根据权利要求3所述一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法其特征在于:所述梁单元模型、弹簧单元模型、非线性弹簧单元模型和附加流体质量单元的模型基础参数可以根据需求进行修改。

6. 根据权利要求3所述一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法其特征在于:所述梁单元模型包含二维欧拉伯努利有限元梁模型、考虑剪切效应的有限元梁模型和轴向变形的有限元梁模型。

7. 根据权利要求3所述一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法其特征在于:所述弹簧单元为线性弹簧约束的线性弹簧单元模型,其特征在于所述线性弹簧单元用于约束相邻两个节点的位移。

8. 根据权利要求3所述一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法其特征在于:所述非线性弹簧单元由线性弹簧单元模型及间隙单元模型依靠端部节点的位移相耦合组合而成,所述非线性弹簧单元模型同时具备线性弹簧单元和间隙单元的作用。

9. 根据权利要求3所述一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法其特征在于:所述附加流体质量单元模型包括流体附加质量影响系数。

10. 根据权利要求1所述一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法其特征在于:所述步骤5中的详细步骤为:采用子结构建模获得多个单根组件的振

动方程,如下:

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_1 = \mathbf{F}_1$$

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_2 = \mathbf{F}_2$$

.....

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_n = \mathbf{F}_n$$

将上述方程将依靠右端的非线性力进行耦合,依据力耦合及预估校正格式构建耦合迭代求解格式。

## 一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于新型能源电力生产领域,涉及核反应燃料组件抗震设计分析领域,具体涉及一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法。

### 背景技术

[0002] 核能作为清洁、高效和安全的绿色能源,具有储量丰富、能量密集度高、低碳无污染的优点,受到各国的极大重视。实现核电技术的完全自主研发,必定需要有完备的基础理论研究予以支撑。针对核电结构中的基础理论问题尤其是基础的力学问题进行研究,并以此储备核电设计技术,对新一代反应堆的自主设计和发展至关重要。

[0003] 燃料组件是反应堆内的重要部件。压水堆燃料组件的设计准则要求:在极限的事故工况下,如地震及冷却剂丧失工况,燃料组件应保持结构完整,确保堆芯可冷却;燃料组件的横向变形应不影响控制棒组件的插入和反应堆的安全停堆。因此燃料组件在正常运行和事故工况下的结构动力学特性将影响燃料组件的结构完整性,并直接影响反应堆运行的安全性和可靠性。反应堆燃料组件事故工况下的安全性已被各国列为重点安全审查项目,各核能设计机构都需要具备有相应自主开发的计算软件。针对燃料组件事故工况安全评估主要包括计算分析及实验验证两个方面,两者相辅相成互为支撑。横向计算分析在整个设计阶段起着重要作用,可以为燃料组件模型的设计、修改提供所需要的计算数据支持。现阶段针对燃料组件的计算分析主要借助于专用软件及商业软件进行,主要的计算模型可以分为:单个燃料组件横向详细模型、横向简化模型、横向碰撞模型及一排多个燃料组件的抗震计算分析模型,以下简称组件抗震模型,如图1所示。抗震模型的计算分析效率则强烈依赖于多个组件的建模方式。

[0004] 目前组件抗震模型主要是将多个组件依次排列成一排而获得。各个组件之间依靠上下管座、围板边界条件及非线性碰撞力相互耦合。采用有限元方法对全部15个组件进行“全结构”式的离散,如图2所示,通过施加边界条件而获得系统的运动微分方程组。考虑地震等极限工况下的等效外部激励,采用比例阻尼或者模态阻尼的施加系统阻尼,通过直接积分求解该微分方程组获得系统的响应。由于系统中含有碰撞等强非线性环节,需要采用较小的计算时间步进行内外交替迭代求解才能保证结果的收敛性,这显然要以牺牲计算效率为代价。

[0005] 目前组件抗震模型主要采用繁琐的“全结构”式建模方法,该建模方式存在以下明显的缺陷和不足:

[0006] ①“全结构”的建模方式未考虑燃料组件结构的自相似特征,建模过程复杂,建模成本高;

[0007] ②“全结构”的建模方式会导致高维强非线性的求解效率和计算精度低的问题;

[0008] ③“全结构”的建模方式需要一次性建立全部结构的模型,不适合复杂工况的计算,复杂工况下的计算效率普遍偏低。

## 发明内容

[0009] 针对上述现有技术中忽略组件结构存在的“自相似”特征而普遍采用“全结构”式的建模方式而导致建模过程繁复、建模效率低、适用性差、计算效率和计算精度差的问题，本发明充分利用了组件结构的局部特征，发展“子结构”式的建模策略，提出了核反应堆燃料组件抗震分析的建模新方法。

[0010] 本发明提出的一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法，其特征在于包括如下步骤：

[0011] 步骤1. 总结出组件建模的特点，梳理出其中两类重复的两类基本子结构，分别针对这两类结构发展相应的两类组合单元类型；

[0012] 步骤2. 将步骤1中涉及到的两类组合单元类型分为：用于模拟可以发生横向振动组件各根组件模型的第一类组合单元有限元模型和用于模拟计算组件外侧的围板的第二类组合单元有限元模型；

[0013] 步骤3. 将步骤2中第一类组合单元模型和第二类组合的单元模型进行组合方式设计；

[0014] 步骤4. 按照组件个数任意选择第一类组合单元模型及第二类组合单元模型子结构，并将其进行拼接形成整体的全结构；

[0015] 步骤5. 采用共节点力传递的方式将步骤4中的各个子结构拼接耦合成一个整体，完成对核反应堆燃料组件抗震分析的建模。

[0016] 所述第一类复合型单元模型包括：梁单元模型、非线性弹性单元模型、线性弹性单元模型和，所述梁单元模型和非线性弹性单元模型为线性弹性单元和间隙单元组合而成。

[0017] 所述第二类组合单元模型包括：非线性弹性单元模型，其由线性弹性单元和间隙单元组合而成；附加流体质量单元模型。

[0018] 所述子结构类型包括固定不可发生横向振动的围板结构和可发生横向振动的单根组件结构。

[0019] 所述梁单元模型、弹簧单元模型、非线性弹簧单元模型和附加流体质量单元的模型基础参数可以根据需求进行修改。

[0020] 所述梁单元模型包含二维欧拉伯努利有限元梁模型、考虑剪切效应的有限元梁模型和轴向变形的有限元梁模型。

[0021] 所述弹簧单元为线性弹簧约束的线性弹簧单元模型，其特征在于所述线性弹簧单元用于约束相邻两个节点的位移。

[0022] 所述非线性弹簧单元由线性弹簧单元模型及间隙单元模型依靠端部节点的位移相耦合组合而成，所述非线性弹簧单元模型同时具备线性弹簧单元和间隙单元的作用。

[0023] 所述附加流体质量单元模型包括流体附加质量影响系数。

[0024] 所述系数为外部输入系数，程序内部不计算，只是读取后用于生成流体单元，该系数由其他软件计算而得到。

[0025] 所述步骤5中的详细步骤为：采用子结构建模获得多个单根组件的振动方程，如下：

$$[0026] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_1 = \mathbf{F}_1$$

$$[0027] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_2 = \mathbf{F}_2$$

[0028]       .....

$$[0029] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_n = \mathbf{F}_n$$

[0030] 将上述方程将依靠右端的非线性力进行耦合,依据力耦合及预估校正格式构建耦合迭代求解格式。

[0031] 本发明的有益效果:

[0032] 1. 本发明由于采用“子结构”式的建模方式,会大大降低计算量,提高计算效率。

[0033] 2. 本发明建模方式考虑结构局燃料组件的自相似特征,建模过程简单,建模成本低。

[0034] 3. 本发明不会导致高维强非线性的求解效率问题,提升了求解效率,增加了计算精度。

[0035] 4. 本发明不需要一次性建立全部结构的模型,适合复杂工况的计算,复杂工况下的计算效率高。

#### 附图说明

[0036] 图1为压水堆及堆内燃料组件示意图;

[0037] 图2为“全结构”建模方式建立的燃料组件横向排列模型示意图;

[0038] 图3为两类基本子结构单元---组合类示意图;

[0039] 图4为有限元派生类示意图;

[0040] 图5为各个子结构之间的力传递示意图;

[0041] 图6为各个子结构之间的拼接方式示意图;

[0042] 图7为子结构振动之间的与预估校正迭代格式的流程图。

#### 具体实施方式:

[0043] 实施例1:

[0044] 一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法,其特征在于包括如下步骤:

[0045] 步骤1. 总结出组件建模的特点,梳理出其中两类重复的两类基本子结构,分别针对这两类结构发展相应的两类组合单元类型;

[0046] 步骤2. 将步骤1中涉及到的两类组合单元类型分为:用于模拟可以发生横向振动组件各根组件模型的第一类组合单元有限元模型和用于模拟计算组件外侧的围板的第二类组合单元有限元模型;

[0047] 步骤3. 将步骤2中第一类组合单元模型和第二类组合的单元模型进行组合方式设计;

[0048] 步骤4. 按照组件个数任意选择第一类组合单元模型及第二类组合单元模型子结构,并将其进行拼接形成整体的全结构;

[0049] 步骤5. 采用共节点力传递的方式将步骤4中的各个子结构拼接耦合成一个整体,完成对核反应堆燃料组件抗震分析的建模。

[0050] 所述第一类复合型单元模型包括：二维欧拉伯努利梁有限元模型、考虑剪切效应的有限元梁模型，及轴向变形的有限元梁模型；非线性弹性单元模型，其由线性弹性单元和间隙单元组合而成；线性弹性单元模型，附加流体质量单元模型。

[0051] 所述第二类组合单元模型包括：非线性弹性单元模型，其由线性弹性单元和间隙单元组合而成；附加流体质量单元模型。

[0052] 所述子结构类型包括固定不可发生横向振动的围板结构和可发生横向振动的单根组件结构。

[0053] 所述梁单元模型、弹簧单元模型、非线性弹簧单元模型和附加流体质量单元的模型基础参数可以根据需求进行修改。

[0054] 所述梁单元包含二维欧拉伯努利有限元梁模型、考虑剪切效应的有限元梁模型，及轴向变形的有限元梁模型。

[0055] 所述弹簧单元为线性弹簧约束的线性弹簧单元模型，其特征在于所述线性弹簧单元用于约束相邻两个节点的位移。

[0056] 所述非线性弹簧单元由线性弹簧单元模型及间隙单元模型依靠端部节点的位移相耦合联系在一起组合而成；所述非线性弹簧单元模型可以同时起到线性弹簧单元和间隙单元的作用。

[0057] 所述附加流体质量单元模型包括流体附加质量影响系数。

[0058] 所述系数为外部输入系数，程序内部不计算，只是读取后用于生成流体单元，该系数由其他软件计算而得到。

[0059] 所述步骤5中的详细步骤为：采用子结构建模获得多个单根组件的振动方程，如下：

$$[0060] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_1 = \mathbf{F}_1$$

$$[0061] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_2 = \mathbf{F}_2$$

[0062] .....

$$[0063] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_n = \mathbf{F}_n$$

[0064] 将上述方程将依靠右端的非线性力进行耦合，依据力耦合及预估校正格式构建耦合迭代求解格式。

[0065] 实施例2：

[0066] 下面以具有n个组件的系统的建模为例说明计算量的变化，其中每个组件还有m个自由度。

[0067] 当采用全结构建模方式，建立的方程为

$$[0068] \quad \mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}$$

[0069] 矩阵M,C,K的维数均为  $(m \times n) \times (m \times n)$ ；而求解方程的计算量为

$$[0070] \quad T_0 = (m \times n) \times (m \times n)$$

[0071] 当采用子结构建模时，需建立n个子结构方程，

$$[0072] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_1 = \mathbf{F}_1$$

$$[0073] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_2 = \mathbf{F}_2$$

[0074]     ……

$$[0075] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_n = \mathbf{F}_n$$

[0076]     这时,矩阵 $\mathbf{M}_s, \mathbf{C}_s, \mathbf{K}_s$ 的维数均为 $(m \times m)$ ,而求解的整个方程的计算量为

$$[0077] \quad T = (m \times m)$$

[0078]     两种计算量比较

$$[0079] \quad T/T_0 = 1/n$$

[0080]     由此可知,采用现有的“子结构”建模方式求解计算量仅为“全结构”建模计算的 $1/n$ 。当建立包含15根组件的组件抗震工程计算模型时,“子结构”式的计算量仅为原来的 $1/15$ 。采用相同的硬件计算可知,“子结构”式计算时间也为原来的 $1/15$ 。因此,采用“子结构”式的建模方式,会大大降低计算量,提高计算效率。

[0081]     实施例3:

[0082]     一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法,其特征在于包括如下步骤:

[0083]     步骤1.总结出组件建模的特点,梳理出其中两类重复的两类基本子结构,分别针对这两类结构发展相应的两类组合单元类型;

[0084]     步骤2.将步骤1中涉及到的两类组合单元类型分为:用于模拟可以发生横向振动组件各根组件模型的第一类组合单元有限元模型和用于模拟计算组件外侧的围板的第二类组合单元有限元模型;

[0085]     步骤3.将步骤2中第一类组合单元模型和第二类组合的单元模型进行组合方式设计;

[0086]     步骤4.按照组件个数任意选择第一类组合单元模型及第二类组合单元模型子结构,并将其进行拼接形成整体的全结构;

[0087]     步骤5.采用共节点力传递的方式将步骤4中的各个子结构拼接耦合成一个整体,完成对核反应堆燃料组件抗震分析的建模。

[0088]     所述第一类复合型单元模型包括:二维欧拉伯努利梁有限元模型、考虑剪切效应的有限元梁模型,及轴向变形的有限元梁模型;非线性弹性单元模型,其由线性弹性单元和间隙单元组合而成;线性弹性单元模型,附加流体质量单元模型。

[0089]     所述第二类组合单元模型包括:非线性弹性单元模型,其由线性弹性单元和间隙单元组合而成;附加流体质量单元模型。

[0090]     所述梁单元模型、弹簧单元模型、非线性弹簧单元模型和附加流体质量单元的模型基础参数可以根据需求进行修改。

[0091]     所述梁单元包含二维欧拉伯努利有限元梁模型、考虑剪切效应的有限元梁模型,及轴向变形的有限元梁模型。

[0092]     所述附加流体质量单元模型包括流体附加质量影响系数。

[0093]     所述系数为外部输入系数,程序内部不计算,只是读取后用于生成流体单元,该系数由其他软件计算而得到。

[0094]     所述步骤5中的详细步骤为:采用子结构建模获得多个单根组件的振动方程,如



下:

$$[0095] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_1 = \mathbf{F}_1$$

$$[0096] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_2 = \mathbf{F}_2$$

[0097] .....

$$[0098] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_n = \mathbf{F}_n$$

[0099] 将上述方程将依靠右端的非线性力进行耦合,依据力耦合及预估校正格式构建耦合迭代求解格式。

[0100] 实施例4:

[0101] 一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法,其特征在于包括如下步骤:

[0102] 步骤1.总结出组件建模的特点,梳理出其中两类重复的两类基本子结构,分别针对这两类结构发展相应的两类组合单元类型;

[0103] 步骤2.将步骤1中涉及到的两类组合单元类型分为:用于模拟可以发生横向振动组件各根组件模型的第一类组合单元有限元模型和用于模拟计算组件外侧的围板的第二类组合单元有限元模型;

[0104] 步骤3.将步骤2中第一类组合单元模型和第二类组合的单元模型进行组合方式设计;

[0105] 步骤4.按照组件个数任意选择第一类组合单元模型及第二类组合单元模型子结构,并将其进行拼接形成整体的全结构;

[0106] 步骤5.采用共节点力传递的方式将步骤4中的各个子结构拼接耦合成一个整体,完成对核反应堆燃料组件抗震分析的建模。

[0107] 所述第一类复合型单元模型包括:二维欧拉伯努利梁有限元模型、考虑剪切效应的有限元梁模型,及轴向变形的有限元梁模型;非线性弹性单元模型,其由线性弹性单元和间隙单元组合而成;线性弹性单元模型,附加流体质量单元模型。

[0108] 所述第二类组合单元模型包括:非线性弹性单元模型,其由线性弹性单元和间隙单元组合而成;附加流体质量单元模型。

[0109] 所述子结构类型包括固定不可发生横向振动的围板结构和可发生横向振动的单根组件结构。

[0110] 所述梁单元模型、弹簧单元模型、非线性弹簧单元模型和附加流体质量单元的模型基础参数可以根据需求进行修改。

[0111] 所述梁单元包含二维欧拉伯努利有限元梁模型、考虑剪切效应的有限元梁模型,及轴向变形的有限元梁模型。

[0112] 所述弹簧单元为线性弹簧约束的线性弹簧单元模型,其特征在于所述线性弹簧单元用于约束相邻两个节点的位移。

[0113] 所述非线性弹簧单元由线性弹簧单元模型及间隙单元模型依靠端部节点的位移相耦合联系在一起组合而成;所述非线性弹簧单元模型可以同时起到线性弹簧单元和间隙单元的作用。

[0114] 所述附加流体质量单元模型包括流体附加质量影响系数。

[0115] 所述步骤5中的详细步骤为：采用子结构建模获得多个单根组件的振动方程，如下：

$$[0116] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_1 = \mathbf{F}_1$$

$$[0117] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_2 = \mathbf{F}_2$$

[0118] ……

$$[0119] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_n = \mathbf{F}_n$$

[0120] 将上述方程将依靠右端的非线性力进行耦合，依据力耦合及预估校正格式构建耦合迭代求解格式。

[0121] 实施例5：

[0122] 步骤1. 总结出组件建模的特点，梳理出其中两类重复的两类基本子结构，分别针对这两类结构发展相应的两类组合单元类型；

[0123] 步骤2. 将步骤1中涉及到的两类组合单元类型分为：用于模拟可以发生横向振动组件各根组件模型的第一类组合单元有限元模型和用于模拟计算组件外侧的围板的第二类组合单元有限元模型；

[0124] 步骤3. 将步骤2中第一类组合单元模型和第二类组合的单元模型进行组合方式设计；

[0125] 步骤4. 按照组件个数任意选择第一类组合单元模型及第二类组合单元模型子结构，并将其进行拼接形成整体的全结构；

[0126] 步骤5. 采用共节点力传递的方式将步骤4中的各个子结构拼接耦合成一个整体，完成对核反应堆燃料组件抗震分析的建模。

[0127] 所述第一类复合型单元模型包括：二维欧拉伯努利梁有限元模型、考虑剪切效应的有限元梁模型，及轴向变形的有限元梁模型；非线性弹性单元模型，其由线性弹性单元和间隙单元组合而成；线性弹性单元模型，附加流体质量单元模型。

[0128] 所述第二类组合单元模型包括：非线性弹性单元模型，其由线性弹性单元和间隙单元组合而成；附加流体质量单元模型。

[0129] 所述子结构类型包括固定不可发生横向振动的围板结构和可发生横向振动的单根组件结构。

[0130] 所述梁单元模型、弹簧单元模型、非线性弹簧单元模型和附加流体质量单元的模型基础参数可以根据需求进行修改。

[0131] 所述梁单元包含二维欧拉伯努利有限元梁模型、考虑剪切效应的有限元梁模型，及轴向变形的有限元梁模型。

[0132] 所述弹簧单元为线性弹簧约束的线性弹簧单元模型，其特征在于所述线性弹簧单元用于约束相邻两个节点的位移。

[0133] 所述非线性弹簧单元由线性弹簧单元模型及间隙单元模型依靠端部节点的位移相耦合联系在一起组合而成；所述非线性弹簧单元模型可以同时起到线性弹簧单元和间隙单元的作用。

[0134] 所述附加流体质量单元模型包括流体附加质量影响系数。

[0135] 所述系数为外部输入系数,程序内部不计算,只是读取后用于生成流体单元,该系数由其他软件计算而得到。

[0136] 实施例6:

[0137] 一种用于核反应堆燃料组件抗震分析建模子结构类型进行拼接的方法,其特征在于包括如下步骤:

[0138] 步骤1.总结出组件建模的特点,梳理出其中两类重复的两类基本子结构,分别针对这两类结构发展相应的两类组合单元类型;

[0139] 步骤2.将步骤1中涉及到的两类组合单元类型分为:用于模拟可以发生横向振动组件各根组件模型的第一类组合单元有限元模型和用于模拟计算组件外侧的围板的第二类组合单元有限元模型;

[0140] 步骤3.将步骤2中第一类组合单元模型和第二类组合的单元模型进行组合方式设计;

[0141] 步骤4.按照组件个数任意选择第一类组合单元模型及第二类组合单元模型子结构,并将其进行拼接形成整体的全结构;

[0142] 步骤5.采用共节点力传递的方式将步骤4中的各个子结构拼接耦合成一个整体,完成对核反应堆燃料组件抗震分析的建模。

[0143] 所述第一类复合型单元模型包括:二维欧拉伯努利梁有限元模型、考虑剪切效应的有限元梁模型,及轴向变形的有限元梁模型;非线性弹性单元模型,其由线性弹性单元和间隙单元组合而成;线性弹性单元模型,附加流体质量单元模型。

[0144] 所述第二类组合单元模型包括:非线性弹性单元模型,其由线性弹性单元和间隙单元组合而成;附加流体质量单元模型。

[0145] 所述子结构类型包括固定不可发生横向振动的围板结构和可发生横向振动的单根组件结构。

[0146] 所述梁单元模型、弹簧单元模型、非线性弹簧单元模型和附加流体质量单元的模型基础参数可以根据需求进行修改。

[0147] 所述梁单元包含二维欧拉伯努利有限元梁模型、考虑剪切效应的有限元梁模型,及轴向变形的有限元梁模型。

[0148] 所述弹簧单元为线性弹簧约束的线性弹簧单元模型,其特征在于所述线性弹簧单元用于约束相邻两个节点的位移。

[0149] 所述非线性弹簧单元由线性弹簧单元模型及间隙单元模型依靠端部节点的位移相耦合联系在一起组合而成;所述非线性弹簧单元模型可以同时起到线性弹簧单元和间隙单元的作用。

[0150] 所述附加流体质量单元模型包括流体附加质量影响系数。

[0151] 所述系数为外部输入系数,程序内部不计算,只是读取后用于生成流体单元,该系数由其他软件计算而得到。

[0152] 所述步骤5中的详细步骤为:采用子结构建模获得多个单根组件的振动方程,如下:

$$[0153] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_1 = \mathbf{F}_1$$

$$[0154] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_2 = \mathbf{F}_2$$

[0155]     .....

$$[0156] \quad \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_n = \mathbf{F}_n$$

[0157]     将上述方程将依靠右端的非线性力进行耦合,依据力耦合及预估校正格式构建耦合迭代求解格式。

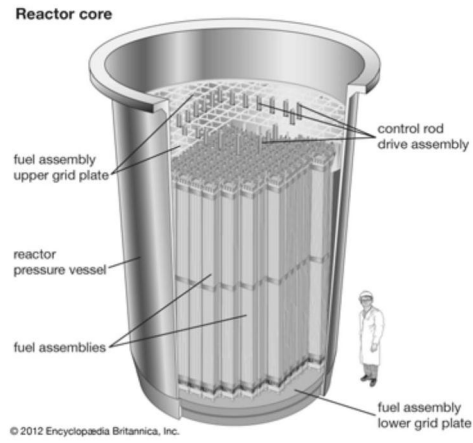


图1

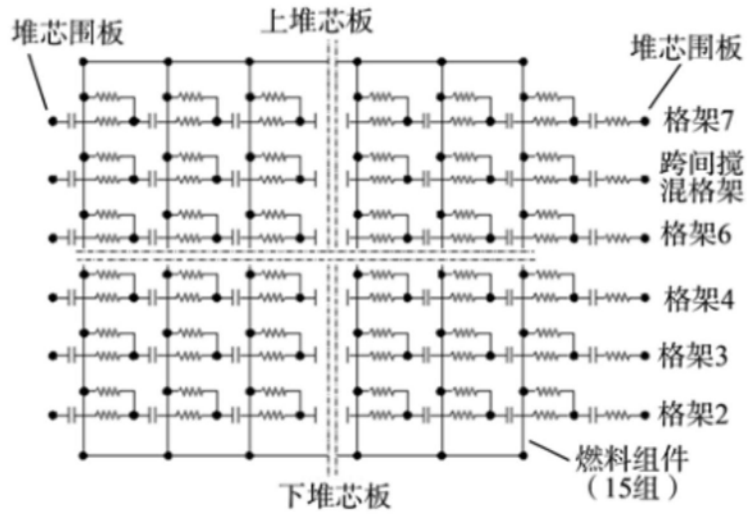


图2

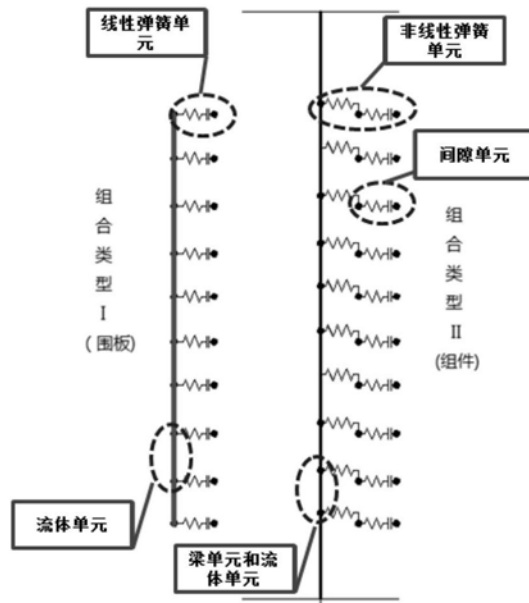


图3

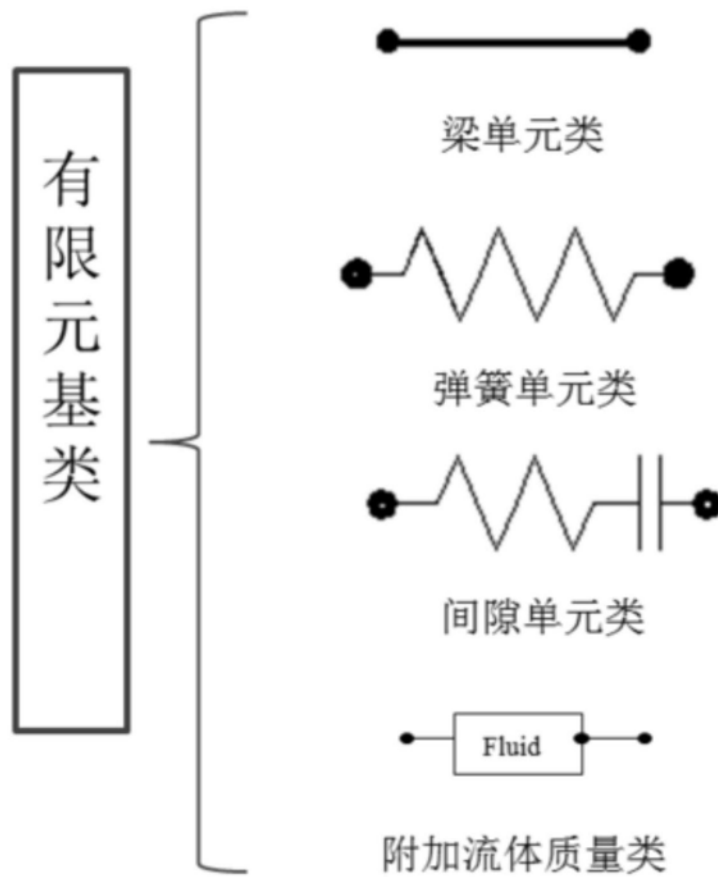


图4

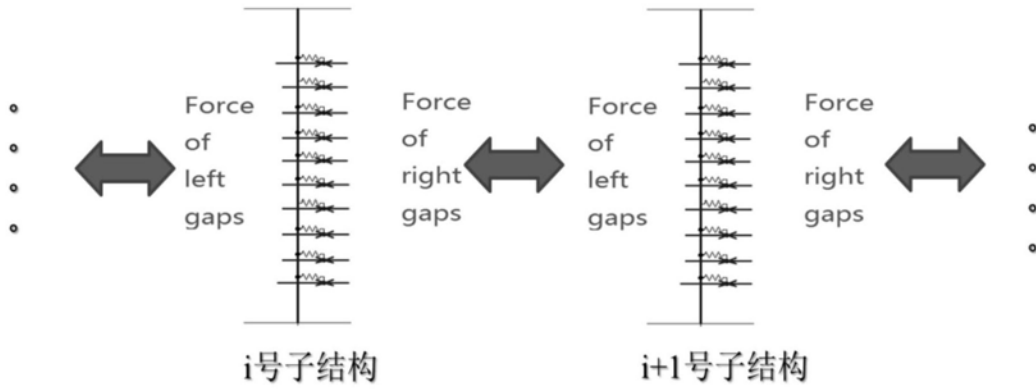


图5

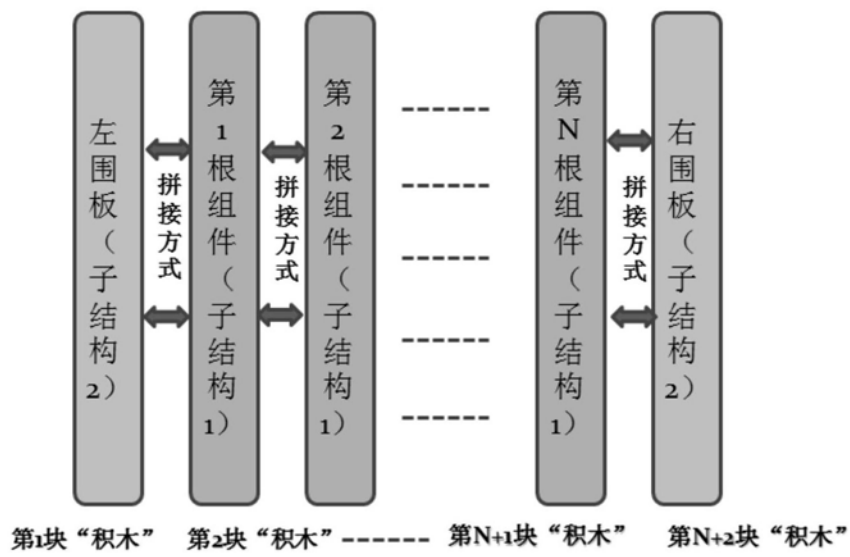


图6

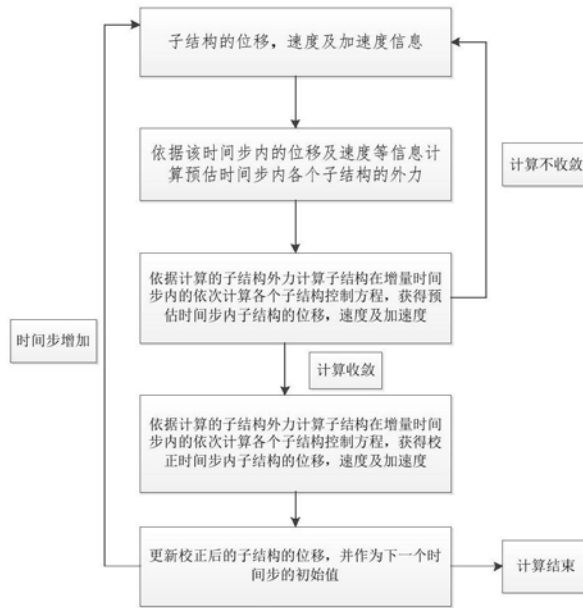


图7