

1. 一种用于物理对象的三维3D表示的有限元分析的计算机实现的方法,所述计算机实现的方法包括:

在自动多级子结构化AMLS本征求解过程中嵌入用户定义的子结构生成的过程,所述AMLS本征求解过程包括:

组合所述3D表示的多个用户定义的保留的自由度,以形成根子结构;

将所述3D表示的结构缩减到缩减的AMLS子空间上并且通过使得所述根子结构为所述AMLS子空间的缩减的结构的根,来用所述根子结构增加所述AMLS子空间的所述缩减的结构;

使用AMLS技术基于所述缩减的结构来计算多个本征模式和全局子结构的压缩算子;

使用AMLS变换矩阵和所述用户定义的保留的自由度来计算所述全局子结构的多个约束模式;

基于计算出来的所述多个本征模式、约束模式以及压缩算子来生成所述3D表示的所述全局子结构;以及

将所述全局子结构存储在存储区域中。

2. 根据权利要求1所述的计算机实现的方法,还包括:计算刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵以及力向量矩阵中的至少一个,其中,除了增加的所述根子结构以外,所述缩减的结构是至少部分地基于所述刚度矩阵、所述质量矩阵、所述阻尼矩阵以及所述力向量矩阵中的至少一个来计算的。

3. 根据权利要求2所述的计算机实现的方法,其中,将结构缩减的步骤包括在多个级别上并至少部分地基于所述刚度矩阵、所述质量矩阵、所述阻尼矩阵以及所述力向量矩阵中的至少一个而将除了增加的所述根子结构以外的所述结构划分成所述至少一个子结构。

4. 根据权利要求1所述的计算机实现的方法,其中,计算多个本征模式和压缩算子的步骤包括使用缩减的结构来计算缩减的本征问题。

5. 根据权利要求1所述的计算机实现的方法,其中所述AMLS本征求解过程还包括:将所述多个本征模式、约束模式以及压缩算子存储在所述存储区域中。

6. 根据权利要求1所述的计算机实现的方法,其中,将结构缩减的步骤包括缩减除了所述根子结构之外的结构。

7. 根据权利要求1所述的计算机实现的方法,其中,将结构缩减的步骤包括缩减所述结构和所述根子结构。

8. 根据权利要求7所述的计算机实现的方法,还包括:计算所述AMLS子空间上多个正交的修改的全局动态模式。

9. 根据权利要求8所述的计算机实现的方法,还包括:将所述多个正交的修改的全局动态模式存储在所述存储区域中。

10. 一种用于物理对象的三维3D表示的有限元分析的计算机,所述计算机包括:
存储区域;以及

处理器,可操作地耦合到所述存储区域,并被配置为:

在自动多级子结构化AMLS本征求解过程中嵌入用户定义的子结构生成的过程,所述AMLS本征求解过程由所述处理器实现,所述处理器被配置成:

组合所述3D表示的多个用户定义的保留的自由度,以形成根子结构;

将所述3D表示的结构缩减到缩减的AMLS子空间上并且通过使得所述根子结构为所述AMLS子空间的缩减的结构的根,来用所述根子结构增加所述AMLS子空间的所述缩减的结构;

使用AMLS技术基于所述缩减的结构来计算多个本征模式和全局子结构的压缩算子;

使用AMLS变换矩阵和所述用户定义的保留的自由度来计算所述全局子结构的多个约束模式;

基于计算出来的所述多个本征模式、约束模式以及压缩算子来生成所述3D表示的所述全局子结构;以及

将所述全局子结构存储在所述存储区域中。

11.根据权利要求10所述的计算机,其中,所述处理器还被配置为:计算刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵以及力向量矩阵中的至少一个,并且其中,除了增加的所述根子结构以外,所述缩减的结构是至少部分地基于所述刚度矩阵、所述质量矩阵、所述阻尼矩阵以及所述力向量矩阵中的至少一个来计算的。

12.根据权利要求11所述的计算机,其中,所述处理器还被配置为:在多个级别上并至少部分地基于所述刚度矩阵、所述质量矩阵、所述阻尼矩阵以及所述力向量矩阵中的至少一个将除了增加的所述根子结构以外,所述3D表示的所述结构划分成至少一个子结构。

13.根据权利要求10所述的计算机,其中,所述处理器还被配置为:使用所述缩减的结构来计算缩减的本征问题。

14.根据权利要求10所述的计算机,其中,所述处理器还被配置为:作为所述AMLS本征求解过程的一部分,将所述多个本征模式、约束模式以及压缩算子存储在所述存储区域中。

15.根据权利要求10所述的计算机,其中,所述处理器还被配置为:缩减除了所述根子结构之外的结构。

16.根据权利要求10所述的计算机,其中,所述处理器还被配置为:缩减所述结构和所述根子结构。

17.根据权利要求16所述的计算机,其中,所述处理器还被配置为:计算所述AMLS子空间上多个正交的修改的全局动态模式。

18.根据权利要求17所述的计算机,其中,所述处理器还被配置为:将所述多个正交的修改的全局动态模式存储在所述存储区域中。

19.一种计算机可读介质,存储有指令用于物理对象的三维3D表示的有限元分析,当由处理器执行时,所述指令使得处理器执行操作,所述操作包括:

在自动多级子结构化AMLS本征求解过程中嵌入用户定义的子结构生成的过程,所述AMLS本征求解过程包括:

组合所述3D表示的多个用户定义的保留的自由度,以形成根子结构;

将所述3D表示的结构缩减到缩减的AMLS子空间上并且通过使得所述根子结构为所述AMLS子空间的缩减的结构的根,来用所述根子结构增加所述AMLS子空间的所述缩减的结构;

使用AMLS技术基于所述缩减的结构来计算多个本征模式和全局子结构的压缩算子;

使用AMLS变换矩阵和所述用户定义的保留的自由度来计算所述全局子结构的多个约束模式;

基于计算出来的所述多个本征模式、约束模式以及压缩算子来生成所述3D表示的所述全局子结构;以及

将所述全局子结构存储在存储区域中。

20. 根据权利要求19所述的计算机可读介质,所述操作还包括:

计算刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵以及力向量矩阵中的至少一个,其中,除了增加的所述根子结构以外,所述缩减的结构是至少部分地基于所述刚度矩阵、所述质量矩阵、所述阻尼矩阵以及所述力向量矩阵中的至少一个来计算的。

21. 根据权利要求20所述的计算机可读介质,其中,将结构缩减的步骤包括在多个级别上并至少部分地基于所述刚度矩阵、所述质量矩阵、所述阻尼矩阵以及所述力向量矩阵中的至少一个而将除了增加的所述根子结构以外的所述结构划分成所述至少一个子结构。

22. 根据权利要求19所述的计算机可读介质,其中,计算多个本征模式和压缩算子的步骤包括使用缩减的结构来计算缩减的本征问题。

23. 根据权利要求19所述的计算机可读介质,其中所述AMLS本征求解过程还包括:

将所述多个本征模式、约束模式以及压缩算子存储在所述存储区域中。

24. 根据权利要求19所述的计算机可读介质,其中,将结构缩减的步骤包括缩减除了所述根子结构之外的结构。

25. 根据权利要求19所述的计算机可读介质,其中,将结构缩减的步骤包括缩减所述结构和所述根子结构。

26. 根据权利要求25所述的计算机可读介质,所述操作还包括:

计算所述AMLS子空间上多个正交的修改的全局动态模式。

27. 根据权利要求26所述的计算机可读介质,所述操作还包括:

将所述多个正交的修改的全局动态模式存储在所述存储区域中。

使用自动多级子结构化生成子结构

技术领域

[0001] 概括地说,本申请描述的实施例涉及有限元分析,具体地说,本申请描述的实施例涉及具有大量自由度的结构的有限元分析(FEA)模拟。

背景技术

[0002] 在有限元框架中,通常采用子结构化技术(或部件模态综合法)来分析大型复杂结构的系统。这些技术使得局部设计修改变得更加容易并且加速了模型组装过程。尤其在大型车辆模型的设计阶段中,子结构化技术常常用于减小组装系统的大小,因此减小了对组装系统进行后续分析的成本。为了使用子结构化技术减小大型系统的大小,除了约束(有时还称作静态)模式之外,通常还会使用删减的正常模式。为了满足较为频繁的对有限元模型的不不断增加的精度需求,模型系统的大小显著地增加并且需要许多个子结构本征模式。

[0003] 对大规模本征值问题进行求解的一个已知方法是自动多级子结构化(AMLS)技术。AMLS技术还用于加速用于大型子结构生成的本征求解过程。然而,生成子结构占用了很多的计算时间并且需要大量的计算机资源,这是由于需要存储大型子结构的完全子结构模式以用于后续恢复,并且需要在子结构生成过程中获取大型子结构的完全子结构模式以进行压缩矩阵计算,其中生成子结构包括将子结构系统矩阵投影到包括本征模式和约束模式的子结构模态空间上。在大规模模型的传统动态子结构生成过程中,计算本征模式是强制性的,并且计算约束模式和将系统矩阵(即刚度、质量、阻尼矩阵以及力向量)投影到子结构模态空间上的成本非常高,这是由于投影是使用物理空间中的完全子结构模式来执行的,其大小可能很容易大于数亿的自由度。

发明内容

[0004] 在一个方面中,提供了一种用于物理对象的三维(3D)表示的有限元分析的计算机实现的方法。所述计算机实现的方法包括:用AMLS方法,组合所述3D表示的多个保留的自由度,以形成根子结构;将所述3D表示的结构投影到多级的AMLS子结构模态子空间(或缩减的AMLS子空间)上;计算缩减的AMLS子空间上的多个本征模式和压缩算子;以及使用AMLS变换矩阵来计算子结构约束模式。所述计算机实现的方法还包括:基于所述多个本征模式、约束模式以及压缩算子来生成所述3D表示的至少一个子结构;以及将所述至少一个子结构存储在存储区域中。

[0005] 在另一个方面中,提供了一种用于物理对象的三维(3D)表示的有限元分析的计算机。所述计算机包括:存储区域;以及处理器,可操作地耦合到所述存储区域。所述处理器被配置为:利用AMLS技术来组合所述3D表示的多个保留的自由度,以形成根子结构;将所述3D表示的结构投影到多级的子结构模态子空间上;基于缩减的结构来计算多个本征模式和压缩算子;以及使用AMLS变换矩阵来计算约束模式。所述处理器还被配置为:基于所述多个本征模式、约束模式以及压缩算子来生成所述3D表示的至少一个子结构;以及将所述至少一个子结构存储在存储区域中。

[0006] 在另一个方面中,提供了一种用于物理对象的三维(3D)表示的有限元分析的计算机程序产品。所述计算机程序产品包括具有计算机可执行组件的一个或多个计算机可读存储介质,其中所述组件包括根子结构生成组件,所述根子结构生成组件当由处理器执行时,使得所述处理器组合所述3D表示的多个保留的自由度,以形成根子结构。所述组件还包括子结构生成组件,所述子结构生成组件当由处理器执行时,使得所述处理器:将所述3D表示的结构缩减到子结构模态子空间(或缩减的AMLS子空间)上;基于缩减的结构来计算多个本征模式和压缩算子;以及使用AMLS变换矩阵来计算约束模式。所述子结构生成组件还使得所述处理器:基于所述多个本征模式、约束模式以及压缩算子来生成所述3D表示的至少一个子结构。

附图说明

[0007] 在下面的附图和描述中给出了本发明的一个或多个实施例的细节。根据说明书、附图以及根据权利要求书,本发明的其它特征、目的和优点将是显而易见的。

[0008] 图1的流程图示出了包括用于计算本征模式的AMLS技术以及已知的Craig-Bampton(或固定界面)子结构生成技术的已知过程。

[0009] 图2的流程图示出了用于物理对象的三维(3D)表示的有限元分析(FEA)的包括基于AMLS的Craig-Bampton过程的示例性方法。

[0010] 图3为被划分的系统的多级子结构树。

[0011] 图4为被划分的系统的多级子结构树,包括保留的自由度。

[0012] 图5的流程图示出了与图1中示出的过程类似的已知过程,其中,可以使用自由界面正常模式和约束模式来生成传统的Craig-Chang(或自由界面)子结构。

[0013] 图6的流程图示出了用于物理对象的3D表示的FEA的包括基于AMLS的Craig-Chang过程的示例性方法。

[0014] 图7为用于物理对象的3D表示的有限元分析的示例性计算机系统的示意性框图。

[0015] 图8为与在图7中示出的计算机系统一起使用的示例性计算机架构的示意性框图。

具体实施方式

[0016] 如同在本申请中所使用的,术语Craig-Bampton和Craig-Bampton过程、程序和/或方法一般涉及使用约束模式和固定界面动态模式的子结构化方法,固定界面动态模式包括本征模式和/或残余模式。

[0017] 如同在本申请中所使用的,术语Craig-Chang和Craig-Chang过程、程序和/或方法一般涉及使用约束模式和自由界面动态模式的子结构化方法,自由界面动态模式包括修改的本征模式和/或残余模式。Craig-Chang方法使用正交化过程来去除动态模式的可能的线性相关性,并将动态模式修改成与其在固定界面方法中相同的结构(然而,并未改变子空间)。

[0018] 如同在本申请中所使用的,术语通用混合界面过程、程序和/或方法一般涉及使用通用动态模式和/或任何其它动态模式的子结构化方法,通用动态模式可以包括在子结构界面处具有任意边界条件的本征模式。Craig-Bampton和Craig-Chang都是这种通用方案的子集。

[0019] 在本申请中描述了用于物理对象的三维(3D)表示的有限元分析(FEA)的方法、系统、装置以及计算机程序产品的示例性实施例。本申请中描述的实施例有助于将AMLS本征求解过程与子结构生成过程集成,以解决当前子结构生成过程的缺点。此外,使用本申请中描述的实施例,能够以非常小的额外计算成本在AMLS本征求解过程期间计算子结构正常模式和约束模式以及压缩的子结构系统矩阵。因此,本申请中描述的实施例通过消除对使用和计算完全子结构模式(包括本征模式和约束模式)的需求,显著地提高了子结构生成过程的性能,并且降低了计算资源的利用。

[0020] 本申请中描述的方法、系统、装置以及计算机程序的示例性技术效果包括新的基于AMLS的子结构生成算法。可以在AMLS本征求解过程中生成固定界面、自由界面以及混合界面子结构。在传统的子结构生成方法中,通过对刚度矩阵进行分解来获得消除的自由度(DOF)并对线性方程的系统进行求解来计算约束模式,在线性方程中,消除的DOF和保留的DOF之间的耦合刚度项作为该系统中的右端向量。接着,使用完全本征模式和约束模式来计算出压缩的系统矩阵。由于在AMLS变换期间对刚度矩阵进行分解,从而被分解的刚度矩阵可以在AMLS本征解过程中重用于计算约束模式。这将会在子结构生成过程中节省刚度矩阵的一次分解。并且,如果保留的子结构被定义为根子结构,则压缩的系统矩阵为保留的子结构的系统矩阵。这意味着,压缩矩阵的对角块是作为AMLS变换过程的一部分而计算出来的,从而对于生成子结构,不存在计算压缩的刚度和质量矩阵的对角块的额外成本。此外,由于缩减的AMLS子空间的大小通常比该结构的原始大小要小两个数量级,从而可以以较低的计算成本在缩减的AMLS子空间上计算出压缩的质量和阻尼矩阵中的需要完全本征模式的非对角块。因此,完全消除了子结构生成过程中的计算。此外,如同在本申请中关于本发明的示例性实施例所描述的,由于除了子结构完全恢复之外并不需要完全本征模式,所以对于子结构生成而言不需要计算出完全本征模式。因此,如果在子结构生成过程中请求选择性恢复,则可以请求仅选择性恢复用户定义的节点处的本征模式,以节省在AMLS本征求解过程中恢复完全本征模式的时间,并且消除了为后续的子结构生成过程存储大型的完全本征模式的二级磁盘空间需求。对于Craig-Chang方法,可以在缩减的AMLS子空间上有效地完成修改的动态模式的必要正交化,这会显著地降低计算需求。

[0021] 图1的流程图100示出了包括用于计算本征模式的AMLS技术102以及已知的Craig-Bampton(或固定界面)子结构生成技术104的已知过程。在已知过程中,对系统矩阵进行组装106,以获得物理对象的3D表示或模型,其中系统矩阵包括刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵和/或力向量矩阵。例如,如同公式(1)和(2)所示的,划分刚度矩阵(K)和质量矩阵M:

$$[0022] \quad K = \begin{pmatrix} K_{ee} & K_{er} \\ K_{er}^T & K_{rr} \end{pmatrix} \quad \text{公式(1)}$$

$$[0023] \quad M = \begin{pmatrix} M_{ee} & M_{er} \\ M_{er}^T & M_{rr} \end{pmatrix} \quad \text{公式(2)}$$

[0024] 这里,下标e表示子结构的消除的自由度,并且下标r表示子结构的保留的自由度。对于此系统,如同公式(3)所示的,Craig-Bampton变换矩阵可以写成:

$$[0025] \quad \begin{Bmatrix} u_e \\ u_r \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_e & \Psi_{er} \\ 0 & I_r \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \eta_e \\ u_r \end{Bmatrix} = [\Phi \quad \Psi] \begin{Bmatrix} \eta_e \\ u_r \end{Bmatrix} = T_{CB} \begin{Bmatrix} \eta_e \\ u_r \end{Bmatrix} \quad \text{公式(3)}$$

[0026] 其中, $\Psi_{er} = -K_{ee}^{-1}K_{er}$ 。

[0027] 如同公式(4)到公式(8)所示的,使用Craig-Bampton变换矩阵的压缩的(或投影的)刚度(K)和质量(M)矩阵可以写成:

$$[0028] \quad \hat{K} = T_{CB}^T K T_{CB} = \begin{pmatrix} \Lambda_{\alpha\alpha} & 0 \\ 0 & \hat{K}_{rr} \end{pmatrix} \quad \text{公式(4)}$$

$$[0029] \quad \hat{M} = T_{CB}^T M T_{CB} = \begin{pmatrix} I_{\alpha\alpha} & \hat{M}_{\alpha r} \\ \hat{M}_{\alpha r}^T & \hat{M}_{rr} \end{pmatrix} \quad \text{公式(5)}$$

[0030] 其中,

$$[0031] \quad \hat{K}_{rr} = K_{rr} - K_{er}^T K_{ee}^{-1} K_{er} = K_{rr} + K_{er}^T \Psi_{er} \quad \text{公式(6)}$$

$$[0032] \quad \hat{M}_{rr} = M_{rr} + \Psi_{er}^T (M_{ee} \Psi_{er} + M_{er}) + M_{er}^T \Psi_{er} \quad \text{公式(7)}$$

$$[0033] \quad \hat{M}_{\alpha} = \Phi_e^T (M_{ee} \Psi_{er} + M_{er}) \quad \text{公式(8)}$$

[0034] 这里, $\Lambda_{\alpha\alpha}$ 表示在对角线上具有本征值的对角矩阵并且 α 表示子结构的模态自由度。

[0035] 类似地,如同公式(9)到公式(12)所示的,可以形成压缩的阻尼矩阵:

$$[0036] \quad \hat{D} = T_{CB}^T D T_{CB} = \begin{pmatrix} \hat{D}_{\alpha\alpha} & \hat{D}_{\alpha r} \\ \hat{D}_{\alpha r}^T & \hat{D}_{rr} \end{pmatrix} \quad \text{公式(9)}$$

[0037] 其中,

$$[0038] \quad \hat{D}_{\alpha\alpha} = \Phi_e^T D_{ee} \Phi_e \quad \text{公式(10)}$$

$$[0039] \quad \hat{D}_{rr} = D_{rr} + \Psi_{er}^T (D_{ee} \Psi_{er} + D_{er}) + D_{er}^T \Psi_{er} \quad \text{公式(11)}$$

$$[0040] \quad \hat{D}_{\alpha} = \Phi_e^T (D_{ee} \Psi_{er} + D_{er}) \quad \text{公式(12)}$$

[0041] 此外,如同公式(13)所示的,压缩的(或投影的)力向量矩阵可以写成:

$$[0042] \quad \hat{F} = \begin{Bmatrix} \hat{F}_{\alpha} \\ \hat{F}_r \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_e & \Psi_{er} \\ 0 & I_r \end{pmatrix}^T \begin{Bmatrix} F_e \\ F_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Phi_e^T F_e \\ \Psi_{er}^T F_e + F_r \end{Bmatrix} \quad \text{公式(13)}$$

[0043] 子结构生成过程的目标为生成子结构模式(本征模式(Φ)+约束模式(Ψ))和压缩的子结构系统矩阵: $\hat{K}$ 、 $\hat{M}$ 、 $\hat{D}$ 以及 $\hat{F}$ 。

[0044] 因此,在AMLS过程102中,在多个级别上将结构划分成多个子结构108,接着将该结构缩减到子结构模态子空间上110。对所产生的本征问题进行求解112,以计算缩减的本征模式,接着恢复全局本征模式114并将其存储在存储区域中116。

[0045] 在Craig-Bampton过程104中,首先计算出约束模式118并将其存储在存储区域中120,接着通过计算压缩子结构算子122来生成一个或多个子结构,接着将这些压缩子结构算子存储在存储区域中124。

[0046] 使用上述过程具有已知的缺点。例如,这一已知的过程占用了很多的计算时间并且需要大量的计算机资源,这是由于需要存储大型子结构的完全子结构模式以用于后续恢复,并且需要在子结构生成过程中获取大型子结构的完全子结构模式以进行压缩矩阵计算。在大规模模型的传统动态子结构生成过程中,计算本征模式是强制性的,并且计算约束模式和将系统矩阵投影到Craig-Bampton子空间(本征模式和约束模式)上的成本非常高,

这是由于投影是使用物理空间中的完全子结构本征模式来执行投影,其大小可能很容易大于数亿的自由度。这需要大量的数据存储区域并使用不断增加的大量时间来将数据的一部分从一个存储区域(例如硬盘)传送到另一个存储区域(例如工作存储器)。

[0047] 图2的流程图200示出了将基于AMLS的过程与Craig-Bampton过程集成的用于物理对象的3D表示的FEA的示例性方法。在示例性实施例中,如同上文关于图1所描述的,组装系统矩阵202,以获得物理对象的3D表示或模型,其中系统矩阵包括刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵和/或力向量矩阵。

[0048] 此外,在AMLS过程中对根子结构本征问题进行求解,以使得变换的刚度矩阵完全对角化。因此,对于被定义为仅具有保留的自由度的根子结构,示例性实施例不再需要计算根子结构本征问题的解以及使用根子结构本征模式的缩减过程。因此,使用在AMLS本征求解过程期间所生成的副产物,可以在Craig-Bampton子空间上生成压缩的系统矩阵。

[0049] 在示例性实施例中,根据AMLS变换矩阵来表示AMLS过程所计算出的全局本征模式。如同公式(14)所示的,使用AMLS过程所计算出的本征模式可以表示成:

$$[0050] \quad \Phi_e = T_A \Phi_A \quad \text{公式(14)}$$

[0051] 其中, T_A 为AMLS变换矩阵,并且 Φ_A 为表示在AMLS子结构模态空间中计算出的缩减的本征模式的矩阵。由于可以将Craig-Bampton变换矩阵分成两个分量,所以可以将该AMLS变换矩阵自然地分成两个部分:子结构约束模式和子结构固定界面本征模式,如同公式(15)所示的:

$$[0052] \quad T_A = \left[\prod_{i=1}^n \Psi_s^{(i)} \Phi_s^{(i)} \right] = \left[\prod_{i=1}^n \Psi_s^{(i)} \right] \left[\prod_{i=1}^n \Phi_s^{(i)} \right] = \hat{\Psi}_s \Phi_s \quad \text{公式(15)}$$

[0053] 其中, n 为子结构的数量, $\Psi_s^{(i)}$ 为子结构 i 的约束模式矩阵,并且 $\Phi_s^{(i)}$ 为除了具有与子结构 i 相对应的本征向量的块之外在对角块上具有单位矩阵的块对角矩阵。

[0054] 此外,由于最终的AMLS变换矩阵为所有子结构变换矩阵的乘积,所以公式(15)中的 $\hat{\Psi}_s$ 表示完全耦合的约束模式矩阵,如下面在公式(16)中所示的:

$$[0055] \quad \hat{\Psi}_s = \left[\prod_{i=1}^n \Psi_s^{(i)} \right] \quad \text{公式(16)}$$

[0056] 图3为被划分的系统的两级子结构树300。使用上述过程,对于子结构1,如公式(17)所示的, $\Psi_s^{(1)}$ 被表示成:

$$[0057] \quad \Psi_s^{(1)} = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & \Psi_{13} & 0 & 0 & 0 & \Psi_{17} \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_7 \end{bmatrix} \quad \text{公式(17)}$$

[0058] 类似地,由公式(18)给出子结构2的 $\Psi_s^{(2)}$:

$$[0059] \quad \Psi_s^{(2)} = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & \Psi_{23} & 0 & 0 & 0 & \Psi_{27} \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_7 \end{bmatrix} \quad \text{公式 (18)}$$

[0060] 此外,对于子结构3,由公式(19)给出 $\Psi_s^{(3)}$:

$$[0061] \quad \Psi_s^{(3)} = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{37} \\ 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_7 \end{bmatrix} \quad \text{公式 (19)}$$

[0062] 子结构4和5的约束模式矩阵与子结构1和2的约束模式矩阵类似,并且子结构7的约束模式矩阵完全变为单位矩阵。因而,可以由公式(20)表示最终的约束模式矩阵:

$$[0063] \quad \hat{\Psi}_s = \prod_{i=1}^7 \Psi_s^{(i)} = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & \hat{\Psi}_{13} & 0 & 0 & 0 & \hat{\Psi}_{17} \\ 0 & I_2 & \hat{\Psi}_{23} & 0 & 0 & 0 & \hat{\Psi}_{27} \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & \Psi_{37} \\ 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 & \hat{\Psi}_{46} & \hat{\Psi}_{47} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_5 & \hat{\Psi}_{56} & \hat{\Psi}_{57} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_6 & \hat{\Psi}_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_7 \end{bmatrix} \quad \text{公式 (20)}$$

[0064] 其中, $\hat{\Psi}_{ij}$ 表示耦合在子结构i与j之间的约束模式,如公式(21)所示:

$$[0065] \quad \hat{\Psi}_{ij} = \Psi_{ij} + \sum_{k \in \zeta_{i,j}} (\Psi_{ik} \hat{\Psi}_{kj}) \quad \text{公式 (21)}$$

[0066] 并且其中 ζ_{ij} 为子结构i的祖先同时为子结构j的后代的索引的集合。

[0067] 在示例性实施例中,对于子结构本征模式矩阵,如同公式(22)所示的,子结构1的 $\Phi_s^{(1)}$ 被表示为:

$$[0068] \quad \Phi_s^{(1)} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_7 \end{bmatrix} \quad \text{公式 (22)}$$

[0069] 除了在相应对角块中出现本征模式矩阵之外,每个子结构的子结构本征模式矩阵与子结构1的子结构本征模式矩阵相同。因而,如同公式(23)所示的,最终的子结构本征模式矩阵可以被表示为:

$$[0070] \quad \Phi_s = \prod_{i=1}^7 \Phi_s^{(i)} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Phi_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_7 \end{bmatrix} \quad \text{公式(23)}$$

[0071] 由于每个子结构本征模式矩阵为块对角的,所以在最终矩阵中没有耦合项。因此,如同公式(24)所示的,AMLS变换矩阵可以被表示为:

$$[0072] \quad T_A = \hat{\Psi}_s \Phi_s = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & \hat{\Psi}_{13} & 0 & 0 & 0 & \hat{\Psi}_{17} \\ 0 & I_2 & \hat{\Psi}_{23} & 0 & 0 & 0 & \hat{\Psi}_{27} \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & \hat{\Psi}_{37} \\ 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 & \hat{\Psi}_{46} & \hat{\Psi}_{47} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_5 & \hat{\Psi}_{56} & \hat{\Psi}_{57} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_6 & \hat{\Psi}_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Phi_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_7 \end{bmatrix} \quad \text{公式(24)}$$

[0073] 在AMLS变换过程期间,从质量和刚度矩阵的左端和右端均应用子结构约束模式矩阵 $\Psi_s^{(i)}$ 和子结构本征模式矩阵 $\Phi_s^{(i)}$,以递增地对系统矩阵进行变换。在数值线性代数的意义上,可以将子结构约束模式矩阵 $\Psi_s^{(i)}$ 称作刚度矩阵的针对与子结构i相对应的块的分块高斯消元器。从而,通过应用这种高斯消元器来消除刚度矩阵中的与子结构i相对应的块,并且在应用了所有的子结构约束模式矩阵之后,所变换的刚度矩阵将是块对角的。当在AMLS变换中刚度矩阵的分块高斯消元发展到子结构树的根时,计算出子结构本征模式。高斯消元和子结构本征模式计算这两个操作可以分开。换言之,可以先对系统矩阵进行分解,稍后可以接着对每个子结构的本征值问题进行求解。

[0074] 将AMLS变换分成两个部分导致了新的形式的Craig-Bampton变换矩阵。如同公式(25)所示的,公式(3)中的Craig-Bampton变换矩阵与公式(14)和(15)组合可以被表示为:

$$[0075] \quad T_{CB} = \begin{pmatrix} \Phi_e & \Psi_{er} \\ 0 & I_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_A \Phi_A & \Psi_{er} \\ 0 & I_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_s & \Psi_{er} \\ 0 & I_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_s & 0 \\ 0 & I_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_A & 0 \\ 0 & I_r \end{pmatrix} \quad \text{公式(25)}$$

[0076] 在公式(25)中,由于在定义上 Ψ_{er} 为刚度矩阵的、与消除的自由度与保留的自由度之间的耦合相对应的分块高斯消元器,所以 Ψ_{er} 可以组合成 $\hat{\Psi}_s$ 。换言之,在AMLS变换中,可以在整个刚度矩阵的分块分解期间执行 K_{er} 的分块分解。这使得对于每个子结构而言每个 $\Psi_s^{(i)}$ 具有扩展的行和列,其与保留自由度的子结构相对应。例如,我们可以定义仅包括保留的自由度的根子结构,从而可以重新排列之前的两级子结构树400,如图4中所示的。

[0077] 仍然参见图4,如同公式(26)所示的,这种子结构树的 $\Psi_s^{(1)}$ 可以写成:

$$[0078] \quad \Psi_s^{(i)} = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & \Psi_{13} & 0 & 0 & 0 & \Psi_{17} & \Psi_{1r} \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_r \end{bmatrix} \quad \text{公式 (26)}$$

[0079] 此外,如同公式(27)所示的,约束模式 Ψ 可以被表示为:

$$[0080] \quad \Psi = \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{1r} \\ \hat{\Psi}_{2r} \\ \hat{\Psi}_{3r} \\ \hat{\Psi}_{4r} \\ \hat{\Psi}_{5r} \\ \hat{\Psi}_{6r} \\ \hat{\Psi}_{7r} \\ I_r \end{bmatrix} \quad \text{公式 (27)}$$

[0081] 这里, $\hat{\Psi}_{ir}$ 表示由于多级扩展而与子结构i相对应的高斯消元器的完全耦合的块。如同公式(28)所示,可以使用与公式(21)类似的如下公式来计算每个 $\hat{\Psi}_{ir}$:

$$[0082] \quad \hat{\Psi}_{ir} = \Psi_{ir} + \sum_{k \in \mathcal{A}} (\Psi_{ik} \hat{\Psi}_{kr}) \quad \text{公式 (28)}$$

[0083] 其中, $\mathcal{A}$ 表示作为子结构i的祖先的子结构的集合,但是不包括包含保留的自由度的根子结构。由于 $\hat{\Psi}_{ir}$ 是递归地计算的,从而可以在AMLS变换之后计算出 $\hat{\Psi}_{ir}$ 。然而,由于 Ψ_{ir} 是在每个子结构i处计算的,从而来自子结构i的对于保留的自由度的静态压缩(或schur补充)贡献 $K_{rr}^{(i)}$ 是在每个子结构i处计算的,并且之后可以被加到最终静态压缩。因此,通过组装根子结构的刚度矩阵,计算出仅针对保留的自由度的最终压缩刚度矩阵,如公式(29)所示的。这里, $\tilde{K}_{ir}^T$ 表示中间产品包含来自其所有后代的贡献。

$$[0084] \quad \tilde{K}_{rr} = K_{rr} + \sum_{i=1}^7 K_{rr}^{(i)} = K_{rr} + \sum_{i=1}^7 (\tilde{K}_{ir}^T \Psi_{ir}) \quad \text{公式 (29)}$$

[0085] 类似地,如同公式(30)所示,组装最终压缩的质量矩阵。这里, $\tilde{M}_{ir}$ 和 $\tilde{M}_{ir}$ 表示中间产品包括来自其所有后代的贡献。

$$[0086] \quad \tilde{M}_{rr} = M_{rr} + \sum_{i=1}^7 M_{rr}^{(i)} = M_{rr} + \sum_{i=1}^7 (\Psi_{ir}^T (\tilde{M}_{ir} \Psi_{ir} + \tilde{M}_{ir}) + \tilde{M}_{ir} \Psi_{ir}) \quad \text{公式 (30)}$$

[0087] 因此,通过对仅具有保留的自由度的根子结构(子结构r)的刚度矩阵和质量矩阵进行组装,可以获得压缩的刚度矩阵和质量矩阵,如同公式(29)和(30)所示的。尤其是,在AMLS变换中,没有对保留的子结构的本征问题进行求解,从而保留的子结构与消除的子结

构之间的非对角质量耦合没有减少。

[0088] 此外,如果针对消除自由度的子结构计算缩减的本征模式(Φ_A),则可以利用缩减的本征模式来计算压缩的非对角质量矩阵。这在公式(31)中示出。

$$\begin{aligned}
 \hat{M}_{\alpha r} &= \Phi_e^T (M_{ee} \Psi_{er} + M_{er}) \\
 &= \Phi_A^T T_A^T (M_{ee} \Psi_{er} + M_{er}) \\
 [0089] \quad &= \Phi_A^T \{ \Phi_S^T \hat{\Psi}_S^T (M_{ee} \Psi_{er} + M_{er}) \} \quad \text{公式 (31)} \\
 &= \Phi_A^T \{ \Phi_S^T \hat{M}_{er} \} \\
 &= \Phi_A^T \hat{\mu}_{er}
 \end{aligned}$$

[0090] 在公式(28)中, $\hat{\mu}_{er}$ 为保留的自由度与消除的自由度之间的左端缩减的质量耦合,通过在AMLS变换中不对保留的子结构的本征模式进行缩减,可以容易地获得 $\hat{\mu}_{er}$ 。因此,在AMLS变换期间,计算出压缩的Craig-Bampton矩阵 $\hat{K}_{rr}$ 和 $\hat{M}_{rr}$ 。可以通过在计算出仅具有消除的自由度的子结构的缩减的本征模式之后,将缩减的本征模式预先乘以一端的缩减的质量耦合 $\hat{\mu}_{er}$,来计算出压缩的非对角质量矩阵 $\hat{M}_{\alpha r}$ 。

[0091] 可以以与质量矩阵压缩类似的方式,除了对角块之外,将对称阻尼矩阵投影到Craig-Bampton子空间上。可以以与质量矩阵压缩类似的方式来计算 $\hat{D}_{rr}$ 和 $\hat{D}_{\alpha r}$ 。阻尼矩阵的对角块 $\hat{D}_{\alpha\alpha}$ 为模态阻尼矩阵,其通常是在AMLS恢复阶段中计算出来的,以用于后续的稳态动态分析。如同在公式(32)中推导出的,可以在缩减的AMLS子空间上计算出这种模态阻尼矩阵。

$$[0092] \quad \hat{D}_{\alpha\alpha} = \Phi_e^T D_{ee} \Phi_e = \Phi_A^T [T_A^T D_{ee} T_A] \Phi_A = \Phi_A^T D_A \Phi_A \quad \text{公式 (32)}$$

[0093] 因此,在AMLS变换过程期间,还可以压缩任意对称的阻尼矩阵。

[0094] 关于力向量压缩,如同公式(33)所示,可以根据AMLS缩减的本征模式来表示压缩的力向量。

$$[0095] \quad \hat{F} = \begin{Bmatrix} \hat{F}_\alpha \\ \hat{F}_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Phi_e^T F_e \\ \hat{\Psi}_{er}^T F_e + F_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Phi_A^T (T_A^T F_e) \\ \Psi_{er}^T F_e + F_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Phi_A^T F_A \\ \Psi_{er}^T F_e + F_r \end{Bmatrix} \quad \text{公式 (33)}$$

[0096] 在示例性实施例中,在AMLS恢复阶段中计算模态力向量,即 $\hat{F}_\alpha = \Phi_e^T F_e$ 。可以计算出针对保留的自由度的压缩力向量 $\hat{F}_r$,作为全部右端向量。如果受力的自由度被限制在子结构树中的在根子结构右下方的最后一个子结构中,则计算变得更简单。例如,如果受力的自由度仅包含在子结构7和子结构r中,则如同公式(34)所示的,可以计算出压缩的力向量:

$$[0097] \quad \hat{F}_r = \hat{\Psi}_{er}^T F_e + F_r = \Psi_{7r}^T F_7 + F_r \quad \text{公式 (34)}$$

[0098] 因此,在AMLS本征求解过程期间,可以计算出全局本征模式、约束模式以及所有的压缩子结构系统矩阵。这意味着去除了子结构生成过程中的用于计算约束模式和所有的系统矩阵在Craig-Bampton子空间上的投影的计算阶段。换言之,子结构生成过程完全嵌入在AMLS本征求解过程中。这将去除为了后续子结构生成在AMLS本征求解过程中对完全本征模式的需求,这将会释放与大型模型的完全本征模式相关的大量计算机资源利用。

[0099] 再次参见图2,将多个保留的自由度组合在根子结构中204。接着以多个级别将结构划分成多个子结构206,并且接着将该结构缩减到子结构模态子空间上208。然而,值得

注意的是,没有计算根子结构模态子空间并且没有缩减根子结构。对所产生的缩减的本征问题进行求解210,以恢复本征模式并且计算多个约束模式和压缩算子212,将所有的本征模式、约束模式和压缩算子都存储在存储区域中214。

[0100] 在示例性实施例中,由于AMLS和Craig-Bampton过程被集成在一起,从而不需要任何计算来生成一个或多个子结构。因此,以非常小的额外计算成本计算出了子结构正常模式和约束模式以及压缩子结构系统矩阵。上述实施例通过消除对使用和计算完全的子结构模式的需求,显著地提高了子结构生成过程的性能并且降低了计算资源的利用。

[0101] 图5的流程图500示出了与上文在图1中示出的过程类似的已知过程,其中,可以使用自由界面正常模式和约束模式来生成传统Craig-Chang(或自由界面)子结构。更具体地,图5示出的已知过程包括用于恢复本征模式的AMLS技术502以及已知的Craig-Chang(或自由界面)子结构生成技术504。在该已知过程中,使用与上文关于图1描述的操作的相同或类似的操作组装系统矩阵506,以获得物理对象的3D表示或模型,其中系统矩阵包括刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵和/或力向量矩阵。此外,由于该方法使用与Craig-Bampton方法相同的约束模式,所以子结构生成过程也可以嵌入在AMLS本征求解过程中。

[0102] 假定与上述公式(1)一样划分同一系统矩阵,如同公式(35)所示的,Craig-Chang方法的变换矩阵可以写成:

$$[0103] \quad \begin{Bmatrix} u_e \\ u_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{ea} & \Psi_{er} \\ \Phi_{ra} & I_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \eta_e \\ u_r \end{Bmatrix} = [\Phi \ \Psi] \begin{Bmatrix} \eta_e \\ u_r \end{Bmatrix} = T_{cc} \begin{Bmatrix} \eta_e \\ u_r \end{Bmatrix} \quad \text{公式(35)}$$

[0104] 此外,如同公式(36)所示的,使用Craig-Chang变换矩阵的压缩的刚度矩阵和质量矩阵可以写成:

$$[0105] \quad \hat{K} = T_{cc}^T K T_{cc} = \begin{pmatrix} \Lambda_{aa} & \hat{K}_{ar} \\ \hat{K}_{ar}^T & \hat{K}_{rr} \end{pmatrix}, \hat{M} = T_{cc}^T M T_{cc} = \begin{pmatrix} I_{aa} & \hat{M}_{ar} \\ \hat{M}_{ar}^T & \hat{M}_{rr} \end{pmatrix} \quad \text{公式(36)}$$

[0106] 其中,如同公式(6)和(7)所示的那样来表示 $\hat{K}_{ar}$ 和 $\hat{M}_{ar}$,并且如同公式(37)和(38)所示的那样来表示刚度矩阵和质量矩阵的非对角块:

$$[0107] \quad \hat{K}_{ar} = \Phi^T K \Psi \quad \text{公式(37)}$$

$$[0108] \quad \hat{M}_{ar} = \Phi^T M \Psi \quad \text{公式(38)}$$

[0109] 与Craig-Bampton方法不同,由于对于刚度矩阵而言自由界面本征模式与约束模式之间具有非正交关系,从而压缩的刚度矩阵具有非零的非对角块。换言之,在自由界面本征模式与约束模式之间可能具有线性相关性,由于没有对保留的自由度施加本征模式的边界条件,从而这种线性相关性将会导致压缩系统中的秩亏问题。

[0110] 通过将自由界面本征模式 Φ 与约束模式 Ψ 组合,可以获得修改的动态模式,并且这保证了修改的动态模式与约束模式之间线性无关性。通过从自由界面本征模式中减去约束模式,对于刚度矩阵而言,可以使得修改的动态模式与约束模式正交,如同公式(39)所示的:

$$[0111] \quad \overline{\Phi}^T K \Psi = 0 \quad \text{公式(39)}$$

[0112] 因而,如同公式(40)所示的,修改的动态模式可以被表示成:

$$[0113] \quad \bar{\Phi} = \Phi - \Psi \Phi_{r\alpha} = \begin{pmatrix} \Phi_{e\alpha} - \Psi_{er} \Phi_{r\alpha} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\Phi}_e \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{公式 (40)}$$

[0114] 应注意的是,由于取消了约束模式,从而修改的动态模式可能包括零向量或线性相关的向量。为了避免奇异的压缩系统,对于刚度矩阵和质量矩阵而言,修改的动态模式应当在它们之间被正交化。对于具有大量所需本征模式的大型模型而言,这种正交化过程导致了很高的计算成本。

[0115] 利用正交的修改的固定界面动态模式,如同公式(41)所示的,新的形式的Craig-Chang可以写成:

$$[0116] \quad \begin{Bmatrix} u_e \\ u_r \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_{e\alpha} - \Psi_{er} \Phi_{r\alpha} & \Psi_{er} \\ 0 & I_r \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \eta_e \\ u_r \end{Bmatrix} = [\bar{\Phi} \quad \Psi] \begin{Bmatrix} \eta_e \\ u_r \end{Bmatrix} = \bar{T}_{CC} \begin{Bmatrix} \eta_e \\ u_r \end{Bmatrix} \quad \text{公式 (41)}$$

[0117] 利用这种变换矩阵,如同公式(42)和(43)所示的,压缩的刚度矩阵和质量矩阵可以写成:

$$[0118] \quad \hat{K} = \bar{T}_{CC}^T K \bar{T}_{CC} = \begin{pmatrix} \hat{K}_{\alpha\alpha} & 0 \\ 0 & \hat{K}_{rr} \end{pmatrix} \quad \text{公式 (42)}$$

$$[0119] \quad \hat{M} = \bar{T}_{CC}^T M \bar{T}_{CC} = \begin{pmatrix} \hat{M}_{\alpha\alpha} & \hat{M}_{\alpha r} \\ \hat{M}_{\alpha r}^T & \hat{M}_{rr} \end{pmatrix} \quad \text{公式 (43)}$$

[0120] 其中,

$$[0121] \quad \hat{K}_{\alpha\alpha} = \bar{\Phi}^T K \bar{\Phi} = \bar{\Lambda}_{\alpha\alpha} \quad \text{公式 (44)}$$

$$[0122] \quad \hat{K}_{rr} = K_{rr} - K_{er}^T K_{ee}^{-1} K_{er} = K_{rr} + K_{er}^T \Psi_{er} \quad \text{公式 (45)}$$

$$[0123] \quad \hat{M}_{\alpha\alpha} = \bar{\Phi}^T M \bar{\Phi} = \bar{I}_{\alpha\alpha} \quad \text{公式 (46)}$$

$$[0124] \quad \hat{M}_{\alpha} = \bar{\Phi}^T M \Psi \quad \text{公式 (47)}$$

$$[0125] \quad \hat{M}_{rr} = M_{rr} + \Psi_{er}^T (M_{ee} \Psi_{er} + M_{er}) + M_{er}^T \Psi_{er} \quad \text{公式 (48)}$$

[0126] 因此,如同公式(49)所示的,压缩的阻尼矩阵还可以写成:

$$[0127] \quad \hat{D} = \bar{T}_{CC}^T D \bar{T}_{CC} = \begin{pmatrix} \hat{D}_{\alpha\alpha} & \hat{D}_{\alpha r} \\ \hat{D}_{\alpha r}^T & \hat{D}_{rr} \end{pmatrix} \quad \text{公式 (49)}$$

[0128] 其中,

$$[0129] \quad \hat{D}_{\alpha\alpha} = \bar{\Phi}^T D \bar{\Phi} = \bar{\Phi}_e^T D_{ee} \bar{\Phi}_e \quad \text{公式 (50)}$$

$$[0130] \quad \hat{D}_{\alpha} = \bar{\Phi}^T D \Psi \quad \text{公式 (51)}$$

$$[0131] \quad \hat{D}_{rr} = D_{rr} + \Psi_{er}^T (D_{ee} \Psi_{er} + D_{er}) + D_{er}^T \Psi_{er} \quad \text{公式 (52)}$$

[0132] 此外,如同公式(53)所示的,压缩的力向量可以写成:

$$[0133] \quad \hat{F} = \begin{Bmatrix} \hat{F}_e \\ \hat{F}_r \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\Phi}_e & \Psi_{er} \\ 0 & I_r \end{pmatrix}^T \begin{Bmatrix} F_e \\ F_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{\Phi}_e^T F_e \\ \Psi_{er}^T F_e + F_r \end{Bmatrix} \quad \text{公式 (53)}$$

[0134] 因此,在AMLS过程502中,以多个级别将结构划分成多个子结构508,接着将该结构缩减到子结构模态子空间上510。对所产生的本征问题进行求解512,以计算本征模式514,接着将本征模式存储在存储区域中。

[0135] 在Craig-Chang过程504中,计算出多个约束模式并且将修改的动态模式正交化518,并且将修改的动态模式和约束模式存储在存储区域中520。之后,计算压缩算子522并将其存储在存储区域中524。

[0136] 与图1中示出的过程类似,使用上述图5的过程具有已知的缺点。例如,这一已知的过程占用了很多的计算时间并且需要大量的计算机资源,这是由于需要存储大型子结构的完全子结构模式以用于后续恢复,并且需要在子结构生成过程中获取大型子结构的完全子结构模式以进行压缩矩阵计算。在大规模模型的传统动态子结构生成过程中,计算本征模式是强制性的,并且计算约束模式和将系统矩阵映射到子结构模态空间上的成本非常高,这是由于投影是使用物理空间中的完全子结构模式来执行的,其大小可能很容易大于数亿的自由度。这需要大量的数据存储区域并使用不断增长的大量时间来将数据的一部分从一个存储区域(例如硬盘)传送到另一个存储区域(例如工作存储器)。

[0137] 图6的流程图600示出了集成了基于AMLS的Craig-Chang过程的用于物理对象的3D表示的FEA的示例性方法。与上述参见图2-图4的基于AMLS的Craig-Bampton子结构生成方法类似,可以在AMLS本征求解过程中生成Craig-Chang子结构。然而,在Craig-Chang方法的情况下,对保留的子结构的本征问题进行了求解,以用于后续计算整个缩减的系统的自由界面缩减本征模式。在这种情况下,可以在缩减的AMLS子空间中而不是在物理FE空间中实现修改的动态模式的正交化,这将会大幅度降低对修改的动态模式进行正交化的成本。更具体地,图6示出了包括基于AMLS的过程与Craig-Chang过程的集成的用于物理对象的3D表示的FEA的示例性方法。在示例性实施例中,如同上文关于图1所描述的,组装系统矩阵602,以获得物理对象的3D表示或模型,其中系统矩阵包括刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵和/或力向量矩阵。

[0138] 与公式(26)类似,如同公式(54)所示的,整个系统的由AMLS所计算的本征模式可以被表示成如下,其中该整个系统包括根子结构,该根子结构仅包含保留的自由度:

$$[0139] \quad \Phi = \begin{Bmatrix} \Phi_{e\alpha} \\ \Phi_{r\alpha} \end{Bmatrix} = T_A \Phi_A = \hat{\Psi}_S \Phi_S \Phi_A = \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{ee} & \Psi_{er} \\ 0 & I_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_S^e & 0 \\ 0 & \Phi_S^r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_A^{e\alpha} \\ \Phi_A^{r\alpha} \end{pmatrix} \quad \text{公式 (54)}$$

[0140] 其中, T_A 为整个系统的AMLS变换矩阵并且 Φ_A 为自由界面缩减本征模式,可以基于子结构是具有消除的DOF还是具有保留的DOF而将 Φ_A 划分成两个子矩阵($\Phi_A^{e\alpha}$ 和 $\Phi_A^{r\alpha}$)。 Φ_S^e 为块对角矩阵,其中每个对角块填充有具有消除的自由度的每个子结构的本征模式,并且 Φ_S^r 为仅具有保留的自由度的根子结构的本征模式。从公式(54)中看出,可以 Φ_{ra} 表示成如公式(55)所示的:

$$[0141] \quad \Phi_{ra} = \Phi_S^r \Phi_A^{r\alpha} \quad \text{公式 (55)}$$

[0142] 如同公式(56)所示,可以使用公式(54)和(55)简化修改的动态模式:

$$\begin{aligned}
\bar{\Phi} &= T_A^T \Phi_A - \Psi \Phi_{r\alpha} = \bar{\Psi}_S^T \Phi_S \Phi_A - \Psi \Phi_{r\alpha} \\
&= \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{ee} & \Psi_{er} \\ 0 & I_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_S^e & 0 \\ 0 & \Phi_S^r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_A^{e\alpha} \\ \Phi_A^{r\alpha} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Psi_{er} \\ I \end{pmatrix} \Phi_{r\alpha} \\
[0143] \quad &= \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{ee} & \Psi_{er} \\ 0 & I_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_S^e \Phi_A^{e\alpha} \\ \Phi_S^r \Phi_A^{r\alpha} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Psi_{er} \\ I \end{pmatrix} \Phi_S^r \Phi_A^{r\alpha} \\
&= \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{ee} \Phi_S^e \Phi_A^{e\alpha} \\ 0 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{公式 (56)}$$

[0144] 由于在定义上由 $(\hat{\Psi}_{ee} \Phi_S^e)$ 的列向量组成的子空间是线性无关的,所以修改的动态模式的线性相关性仅可能来自项 $\Phi_A^{e\alpha}$ 。因此,仅 $\Phi_A^{e\alpha}$ 中的列向量需要被正交化,以得到正交的修改的动态模式。首先,使用修改的Gram-Schmidt算法来针对缩减的刚度矩阵 K_A 正交化 $\Phi_A^{e\alpha}$ 的列向量,以去除向量之间的线性相关性。由于在此正交化过程期间消除了零向量,所以可以缩减修改的动态模式的列维度。在正交化之后,需要对刚度-正交 $\Phi_A^{e\alpha}$ 执行Ritz分析,以使得它们既是刚度-正交向量,也是质量-正交向量,使得正交的修改的动态模式满足如下正交条件:

$$[0145] \quad (\bar{\Phi}_A^{e\alpha})^T K_A \bar{\Phi}_A^{e\alpha} = \bar{\Lambda}_{\alpha\alpha} \tag{公式 (57)}$$

$$[0146] \quad (\bar{\Phi}_A^{e\alpha})^T M_A \bar{\Phi}_A^{e\alpha} = \bar{I}_{\alpha\alpha} \tag{公式 (58)}$$

[0147] 其中, $\bar{\Lambda}_{\alpha\alpha}$ 为在其对角线上包括伪本征值的对角矩阵,可以在Ritz分析中计算这些伪本征值。

[0148] 利用正交的动态模式,压缩的刚度矩阵项 $\hat{K}_{\alpha\alpha} = \bar{\Phi}^T K \bar{\Phi}$ 变为对角的,并且其对角项为伪本征值($\bar{\Lambda}_{\alpha\alpha}$),并且压缩的质量矩阵项 $\hat{M}_{\alpha\alpha} = \bar{\Phi}^T M \bar{\Phi}$ 也变为对角的。由于在AMLS缩减子空间中修改的动态模式正交化,从而可以在AMLS缩减子空间中计算非对角的压缩质量矩阵 $\hat{M}_{\alpha}$ 。这可以在以下公式(59)中进行推导:

$$\begin{aligned}
\hat{M}_{\alpha} &= \bar{\Phi}^T M \Psi \\
&= \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{ee} & \Phi_S^e \bar{\Phi}_A^{e\alpha} \\ 0 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} M_{ee} & M_{er} \\ M_{er}^T & M_{rr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{er} \\ I \end{pmatrix} \\
[0149] \quad &= (\Phi_S^e \bar{\Phi}_A^{e\alpha})^T \left[\begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{ee} \\ 0 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} M_{ee} & M_{er} \\ M_{er}^T & M_{rr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{er} \\ I \end{pmatrix} \right] \tag{公式 (59)} \\
&= (\bar{\Phi}_A^{e\alpha})^T \left[(\Phi_S^e)^T \hat{\Psi}_{er} \right] \\
&= (\bar{\Phi}_A^{e\alpha})^T \hat{\mu}_{er}
\end{aligned}$$

[0150] 其中, $\bar{\Phi}_A^{e\alpha}$ 为针对缩减的刚度和质量矩阵的正交化的修改的动态模式。除了消除的子结构的缩减的本征模式 $\bar{\Phi}_A^{e\alpha}$ 应该在计算之间被正交化之外,这种非对角的质量项与Craig-Bampton方法具有相同形式。

[0151] 对于压缩的阻尼矩阵,除了对角阻尼项之外,可以以与质量矩阵相同的方式来计算所有的压缩阻尼项。如同在如下公式(60)中所提到的,可以计算出对角阻尼项:

$$\begin{aligned}
\hat{D}_{\alpha\alpha} &= \bar{\Phi}^T D \bar{\Phi} = \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{ee} \Phi_S^e \bar{\Phi}_A^{e\alpha} \\ 0 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} D_{ee} & D_{er} \\ D_{er}^T & D_{rr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{ee} \Phi_S^e \bar{\Phi}_A^{e\alpha} \\ 0 \end{pmatrix} \\
[0152] \quad &= (\bar{\Phi}_A^{e\alpha})^T \left[(\Phi_S^e)^T (\hat{\Psi}_{ee})^T D_{ee} \hat{\Psi}_{ee} \Phi_S^e \right] \bar{\Phi}_A^{e\alpha} \quad \text{公式 (60)} \\
&= (\bar{\Phi}_A^{e\alpha})^T D_{ee}^e \bar{\Phi}_A^{e\alpha}
\end{aligned}$$

[0153] 其中, D_{ee}^e 为消除的(自由度)子结构的缩减的阻尼矩阵。

[0154] 因此, 可以将压缩的力向量写成:

$$\begin{aligned}
\hat{F} &= \begin{Bmatrix} \hat{F}_\alpha \\ \hat{F}_r \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{ee} \Phi_S^e \bar{\Phi}_A^{e\alpha} & \Psi_{er} \\ 0 & I_r \end{pmatrix}^T \begin{Bmatrix} F_e \\ F_r \end{Bmatrix} \\
[0155] \quad &= \begin{Bmatrix} (\bar{\Phi}_A^{e\alpha})^T [(\hat{\Psi}_{ee} \Phi_S^e)^T F_e] \\ \Psi_{er}^T F_e + F_r \end{Bmatrix} \quad \text{公式 (61)} \\
&= \begin{Bmatrix} (\bar{\Phi}_A^{e\alpha})^T F_A^e \\ \Psi_{er}^T F_e + F_r \end{Bmatrix}
\end{aligned}$$

[0156] 其中, $\hat{F}_r$ 为根子结构的组装的力向量, 并且 $\hat{F}_\alpha$ 为使用消除的子结构的正交化的缩减的动态模式和缩减的力向量计算出的模态力向量。

[0157] 使用上述方法, 在AMLS本征求解过程期间, 可以计算出自由界面本征模式和约束模式以及所有的压缩Craig-Chang子结构系统矩阵。与使用AMLS方法的Craig-Bampton子结构生成类似, 子结构生成过程可以嵌入在AMLS本征求解过程中。由于在缩减的AMLS子空间中进行正交化这一事实, 可以显著地降低修改的子结构动态模式的重新正交化的高成本。

[0158] 在示例性实施例中, 将多个保留的自由度组合在根子结构中604。接着以多个级别将结构划分成多个子结构606。使用根子结构自己的本征模式来缩减根子结构608, 从而接着也将整个结构缩减到子结构模态子空间上610。此外, 通过对所产生的缩减的本征问题进行求解614和将修改的动态模式正交化612, 来计算出多个产生的本征模式。恢复修改的动态模式616, 并且计算多个约束模式和压缩算子, 将所有的这些本征模式、约束模式和压缩算子均存储在存储区域中618。

[0159] 在示例性实施例中, 由于将AMLS过程和Craig-Chang过程集成在一起, 所以不需要进行任何计算来生成一个或多个子结构。因此, 与上文在图2中示出的方法类似, 以非常小的额外计算成本计算出了子结构正常模式和约束模式以及压缩子结构系统矩阵。上述实施例通过消除对使用和计算完全子结构模式的需求, 显著地提高了子结构生成过程的性能并且降低了计算资源的利用。

[0160] 图7为用于物理对象的3D表示的有限元分析的示例性计算机系统700的示意性框图, 例如上述过程和/或可能与上述过程有关的附加过程。在示例性实施例中, 存储区域702包括用于存储数据(例如模拟数据)的一个或多个存储设备704, 所述模拟数据例如包括系统矩阵、结构信息、子结构信息、本征模式、本征值、约束模式、正交化的本征模式、压缩算子或可以用在FEA模拟环境中的任何其它适合的数据类型。在一些实施例中, 存储区域702耦合到服务器系统706, 该服务器系统706进而经由网络712耦合到管理员系统708和/或用户系统710。存储设备704可以体现为一个或多个数据库, 可以位于单个或多个地理位置处, 或

可以与服务器系统706集成。

[0161] 可以清楚的是,网络712可以为公共网络(例如因特网)、或者私人网络(例如LAN或WAN网络)、或者公共网络和私人网络的任意组合,并且还可包括PSTN或ISDN子网络。网络712还可以为有线的(例如以太网)、或者可以为无线的(例如包括EDGE、3G和4G无线蜂窝系统的蜂窝网络)。无线网络还可以为WiFi、蓝牙或已知的任何其它无线通信形式。因而,网络712仅为示例性的,绝不是限制本申请的范围。

[0162] 如本领域技术人员将认识到的,管理员系统708和/或用户系统710可以为任意适合的计算机系统,例如下文参考图8所描述的计算机系统,或已知的任何其它计算系统。此外,应理解的是,服务器系统706被配置为执行上述过程和/或可能与上述过程有关的任何附加过程。

[0163] 服务器系统706存储用于执行上述过程的计算机可读指令,并且将这些指令经由网络712提供给管理员系统708和/或用户系统710。此外,服务器系统706还可以根据需要从存储区域702向管理员系统708和用户系统710提供数据。这样,图7包括经由云计算、分布式计算等的计算机系统700实现。

[0164] 图8为以服务器系统706、管理员系统708和/或用户系统710(每个系统均在图7中示出)的形式使用的示例性计算机架构800的示意性框图。

[0165] 在示例性实施例中,计算机架构800包括执行上述过程和/或可能与上述过程有关的任何附加过程的一个或多个处理器802(CPU)。应理解的是,术语“处理器”一般是指任意可编程系统,包括系统和微控制器、精简指令集电路(RISC)、专用集成电路(ASIC)、可编程逻辑电路和/或能够执行本申请所描述的功能的任何其它电路或处理器。上述实例仅为示例性的,因而上述实例并不是要以任何方式限制术语“处理器”的定义和/或含义。

[0166] 上述过程和/或任何可能与上述过程有关的附加过程中的步骤可以作为计算机可执行指令而存储在例如存储区域804中,其中该存储区域804通过系统总线806可操作地和/或通信地耦合到处理器802。本申请中所使用的“存储区域”一般是指存储可由一个或多个处理器执行的程序代码和指令以帮助使用校准工具自动校准一个或多个二级对象的任意单元。存储区域804可以包括一个或多于一个形式的存储器。例如,存储区域804可以包括随机存取存储器(RAM) 808,其可以包括非易失性RAM、磁性RAM、铁电RAM和/或其它形式的RAM。存储区域804还可以包括只读存储器(ROM) 810和/或闪存和/或电可编程只读存储器(EEPROM)。任何其它适合的磁性、光学和/或半导体存储器(例如硬盘驱动器(HDD) 812)自身或与其它形式的存储器组合可以包括在存储区域804中。还可以将HDD 812耦合到磁盘控制器802以用于向处理器802发送消息并从处理器802接收消息。此外,存储区域804还可以为或者可以包括可拆卸的或可移动的存储器816,例如适合的盒式磁盘、CD-ROM、DVD或USB存储器。上述实例仅为示例性的,因而上述实例并不是要以任何方式限制术语“存储区域”的定义和/或含义。

[0167] 计算机架构800还包括显示设备818,该显示设备818耦合到显示控制器820,例如操作地耦合到显示控制器820。显示控制器820经由系统总线806接收数据,以供显示设备818进行显示。显示设备818可以是监控器、电视机显示器、等离子显示器、液晶显示器(LCD)、基于发光二极管(LED)的显示器、基于有机LED(OLED)的显示器、基于聚合物LED的显示器、基于表面传导电子发射器的显示器、包括投影的和/或反射的图像的显示器或任意其

它适合的电子设备或显示结构,但并限于此。此外,显示设备818可以包括具有相关联的触摸屏控制器的触摸屏。上述实例仅为示例性的,因而上述实例并不是要以任何方式限制术语“显示设备”的定义和/或含义。

[0168] 此外,计算机架构800包括网络接口822,用于与(图8中未示出的)网络通信。此外,计算机架构800包括一个或多个输入设备,例如键盘824和/或定点设备826,例如滚球、鼠标、触摸板等。输入设备耦合到输入/输出(I/O)接口828并由I/O接口828所控制,该I/O接口828还耦合到系统总线806。

[0169] 为简短起见,在本申请中省略了对显示设备818、键盘824、定点设备826以及显示控制器820、磁盘控制器814、网络接口822以及I/O接口828的通用特征和功能的描述,这是由于这些特征是已知的。

[0170] 在上文中详细描述了用于物理对象的3D表示的FEA的方法、系统、装置以及计算机程序产品的示例性实施例。这些方法、系统、装置以及计算机程序产品不限于本申请描述的特定实施例,而是这些方法和/或计算机程序产品的操作和/或系统和/或装置的组件可以单独地并与本申请描述的其它操作和/或组件分离地使用。此外,所述操作和/或组件还可以被定义在其它系统、方法和/或装置中,或与其它系统、方法和/或装置结合地使用,而不仅限于仅用本申请所描述的系统、方法以及存储介质来实施。

[0171] 客户计算机和服务器(例如本申请所描述的客户计算机和服务器)包括至少一个处理器或处理器单元和系统存储器。客户计算机和服务器通常至少具有某种形式的计算机可读介质。举例来说而非限制性地,计算机可读介质包括计算机存储介质和通信介质。计算机存储介质包括以任意方法或技术实现的易失的和非易失的、可移动的和不可移动的介质,用于存储例如计算机可读指令、数据结构、程序模块或其它数据之类的信息。通信介质通常用调制的数据信号(例如载波)或其它传输机制来表示计算机可读指令、数据结构、程序模块或其它数据,并包括任意的信息传递介质。本领域技术人员熟悉调制的数据信号,其以将信息编码到信号中的方式来设定或改变其特性中的一个或多个特性。任意上述介质的组合也包括在计算机可读介质的范围内。

[0172] 用于使用上述过程的示例性计算机可执行组件包括但不限于仅仅包括使得(图7中示出的)服务器系统706或(图8中示出的)处理器802组合3D表示的多个保留的自由度以形成根子结构的根子结构生成组件。所述组件还包括使得服务器系统706或处理器802将3D表示的结构缩减到子结构模态子空间上并基于缩减的结构来计算多个本征模式、约束模式以及压缩算子的子结构生成组件。此外,子结构生成组件使得服务器系统706或处理器802基于多个本征模式、约束模式以及压缩算子来生成3D表示的至少一个子结构。

[0173] 在一些实施例中,所述组件还包括使得服务器系统706或处理器802计算刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵以及力向量矩阵中的至少一个的矩阵生成组件。在这些实施例中,子结构生成组件使得服务器系统706或处理器802至少部分地基于刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵以及力向量矩阵中的至少一个来计算缩减的结构。

[0174] 在一些实施例中,子结构生成组件还使得服务器系统706或处理器802至少部分基于刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵以及力向量矩阵中的至少一个将结构划分成至少一个子结构,使得所述至少一个子结构包括多个级别。

[0175] 在一些实施例中,子结构生成组件还使得服务器系统706或处理器802使用缩减的

结构计算缩减的本征问题。

[0176] 此外,在一些实施例中,子结构生成组件使得服务器系统706或处理器802除了根子结构之外缩减结构。在其它实施例中,子结构生成组件使得服务器系统706或处理器802缩减该结构和该根子结构。

[0177] 在一些实施例中,子结构生成组件还使得服务器系统706或处理器802计算多个正交的修改的动态模式。

[0178] 尽管结合示例性FEA模拟系统环境描述了本发明,然而本发明的实施例可用于多个其它通用目的或特定目的的模拟系统环境或配置。模拟系统环境并不是要暗示对本发明的任何方面的用途或功能的范围进行任何限制。此外,模拟系统环境不应被解释为具有与在示例操作环境中示出的组件中的任意一个或组合有关的任何相关性或需求。可以适于与本发明的方面一起使用的公知模拟系统、环境和/或配置的实例包括但不限于个人计算机、服务器计算机、手持或膝上型设备、多处理器系统、基于微处理器的系统、机顶盒、可编程消费电子设备、移动电话、网络PC、微型计算机、大型计算机、包括任意上述系统或设备的分布式计算环境等。

[0179] 可以在由一个或多个计算机或其它设备执行的计算机可执行指令(例如程序组件或模块)的一般上下文中描述本发明的实施例。可以用任意数量的以及任意组成的组件或模块来实现本发明的方面。例如,本发明的方面不限于在附图中示出和在本申请中描述的特定的计算机可执行指令或特定的组件或模块。本发明的替代实施例可以包括比在本申请中示出和描述的功能具有更多或更少功能的不同计算机可执行指令或组件。

[0180] 除非另外指定,否则在本申请中示出和描述的本发明的实施例中的操作的执行或运行的次序不是必要的。即,除非另外指定,否则可以以任何次序执行这些操作,并且本发明的实施例可以包括额外的操作或者包括比本申请公开的操作更少的操作。例如,可以预料到在另一个操作之前执行或运行特定操作、与另一个操作同时执行或欲行特定操作、或在另一个操作之后执行或运行特定操作均在本发明的方面的范围内。

[0181] 当介绍本发明或本发明实施例的方面中的元素时,冠词“一”、“一个”、“该”以及“所述”旨在意味着具有一个或多个元素。术语“包含”、“包括”以及“具有”旨在是包容性的并且表示除了列出的元素之外还可能具有额外的元素。

[0182] 本书面说明书使用实例(包括最佳实施例)来公开本发明,并且还使得任何本领域技术人员能够实施本发明,包括制造和使用任意设备或系统和执行任意合并的方法。本发明的专利范围由权利要求来限定,并且可以包括本领域技术人员想到的其它实例。如果这些其它实例具有不与权利要求的书面语言不同的结构元素,或者如果其它实例包括具有与权利要求的书面语言非实质性不同的等同结构元素,则这些其它实例旨在落入权利要求的范围内。

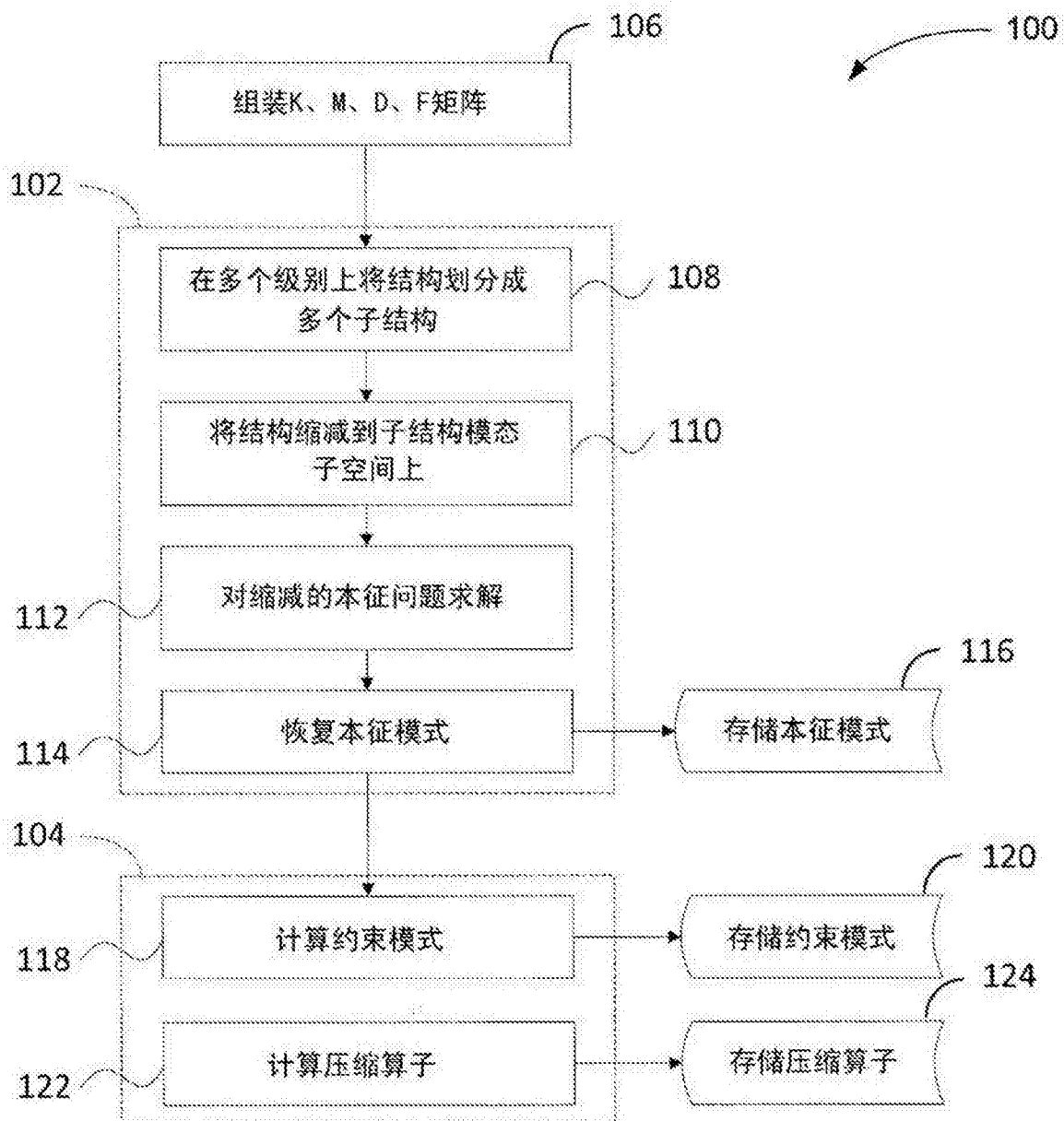


图1

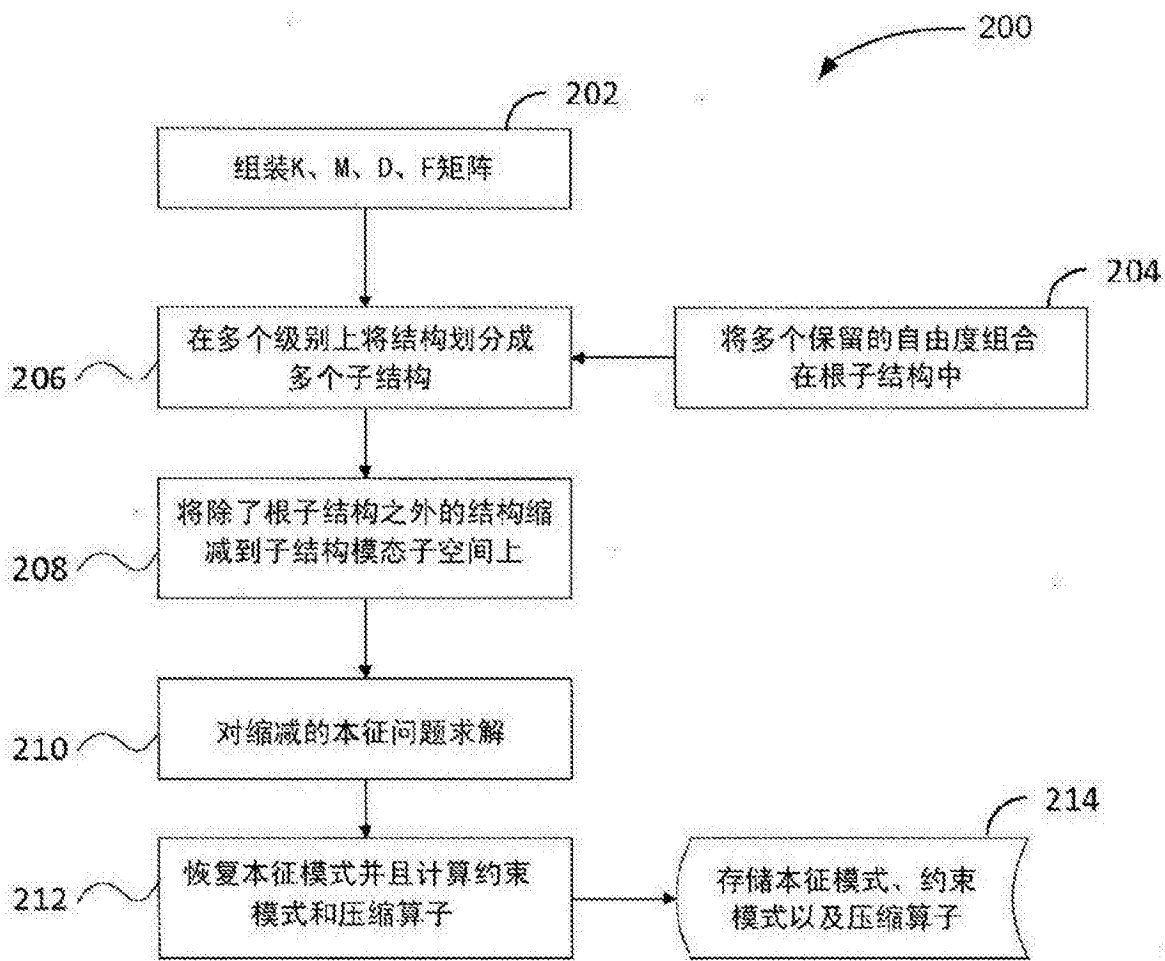


图2

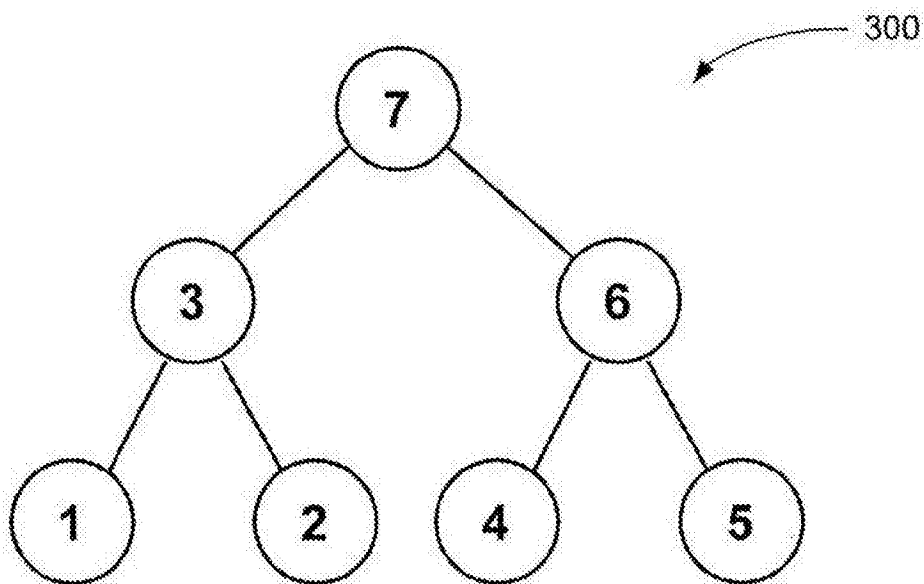


图3

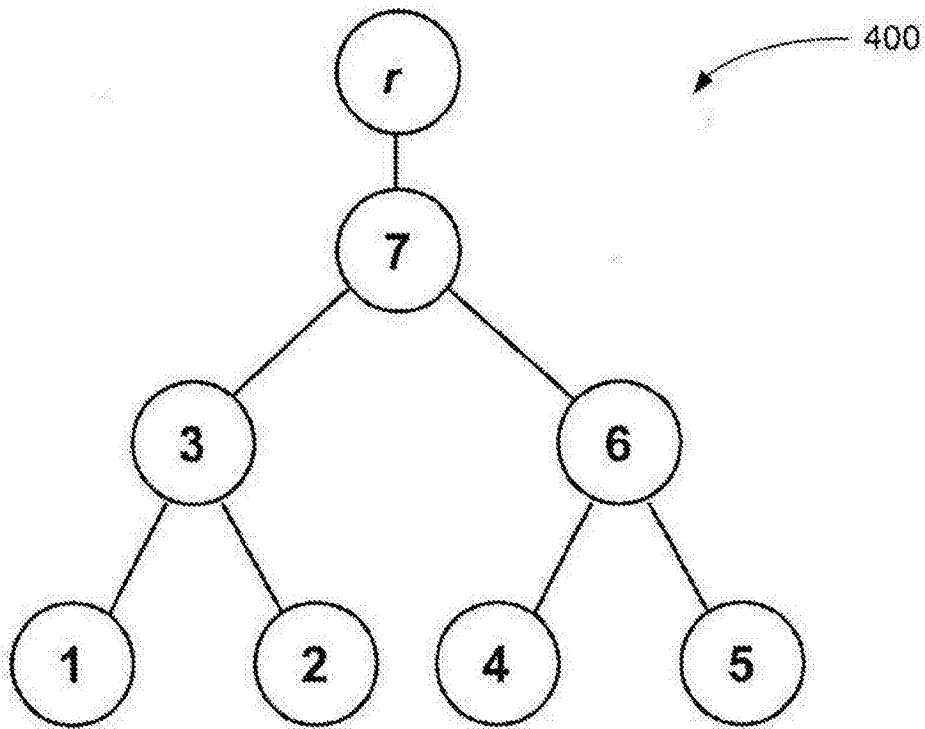


图4

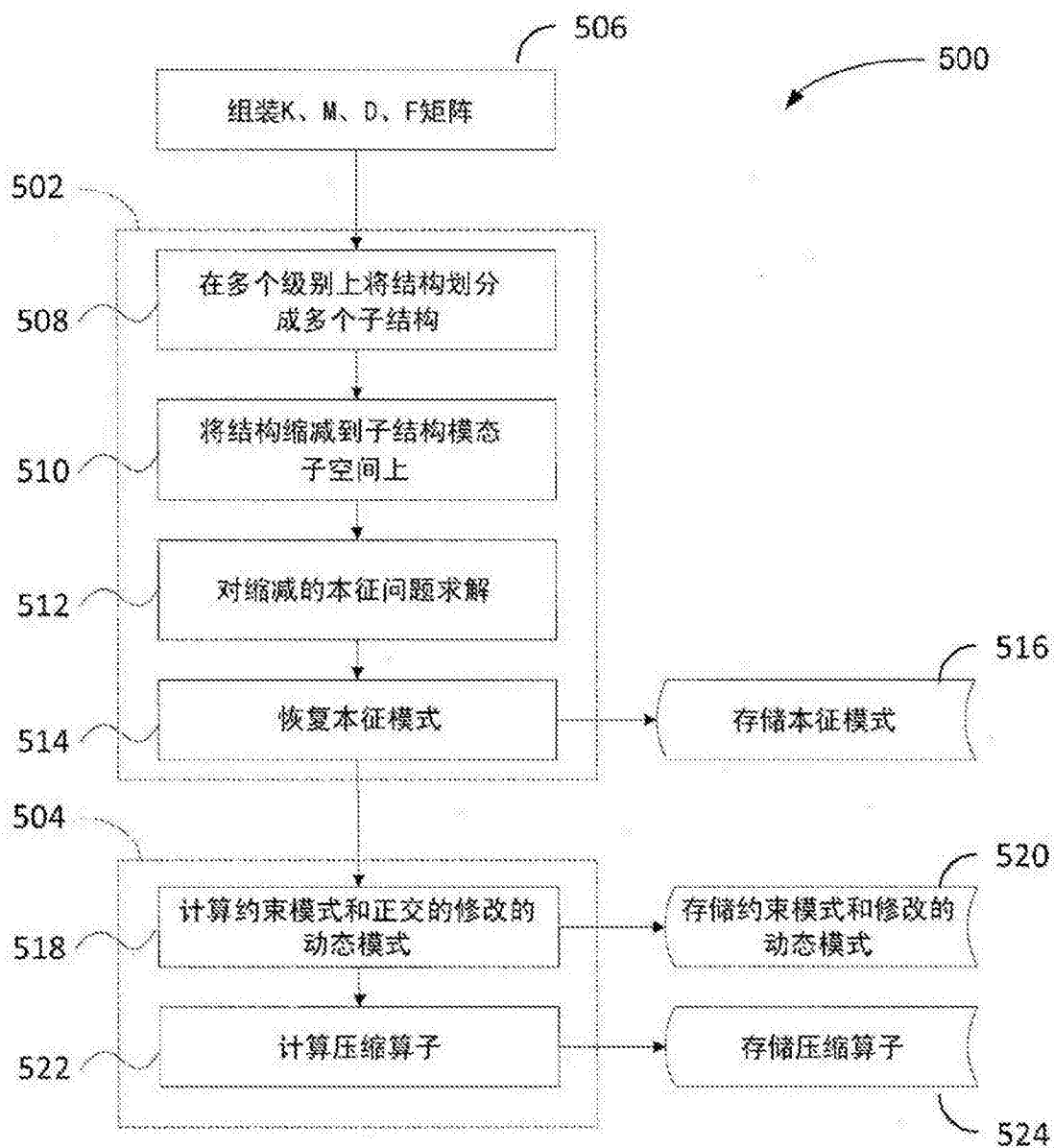


图5

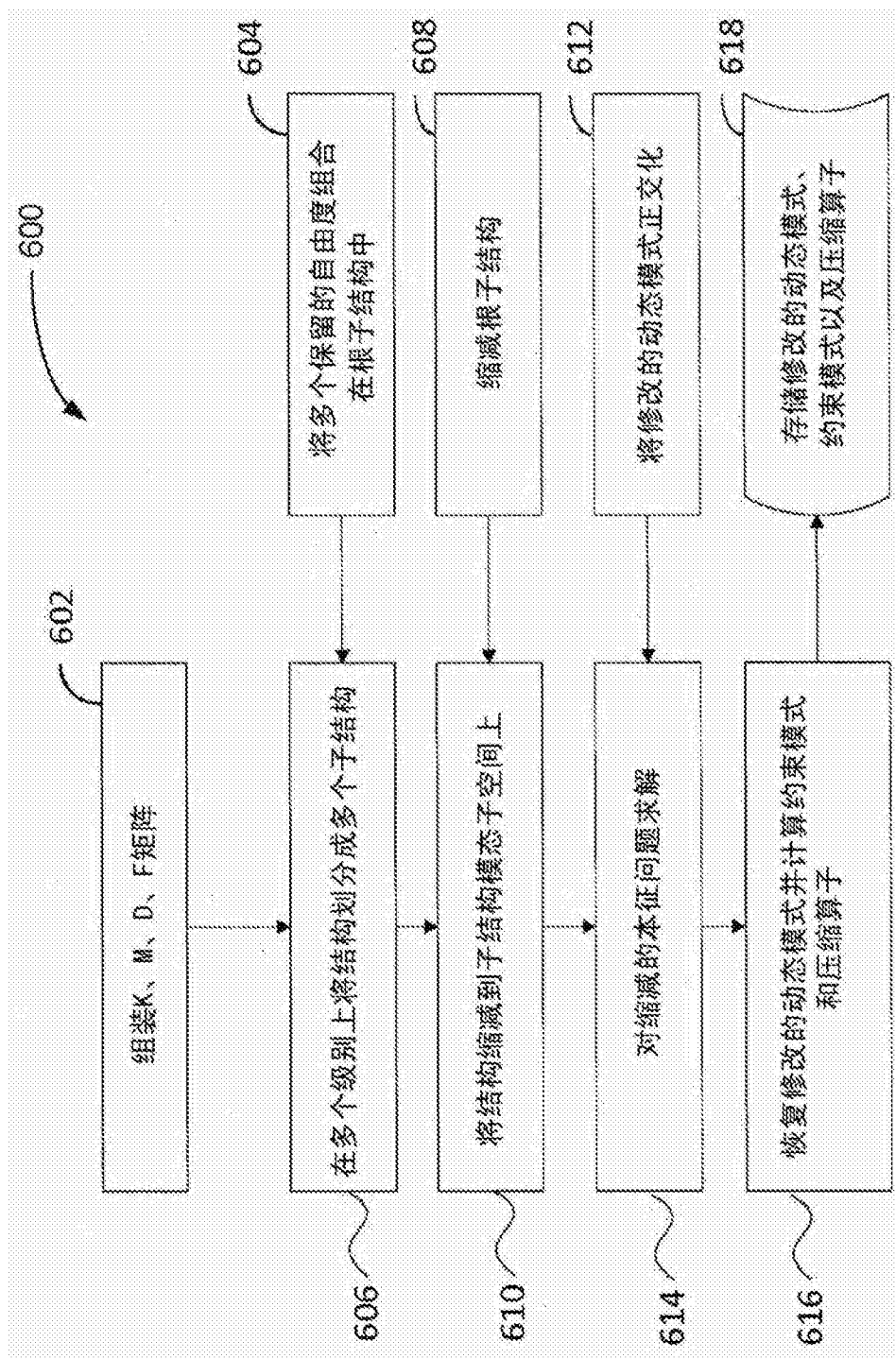


图6

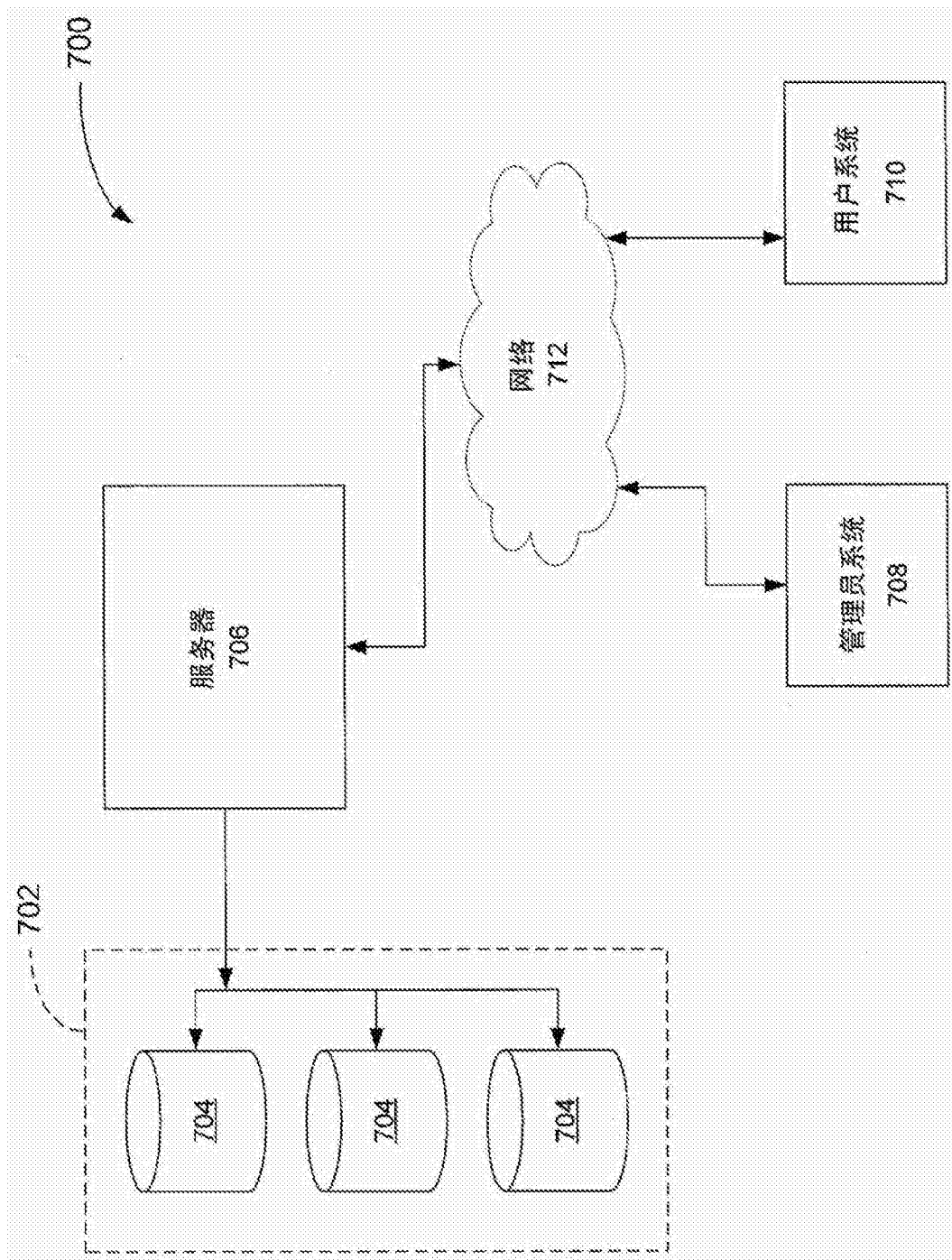


图7

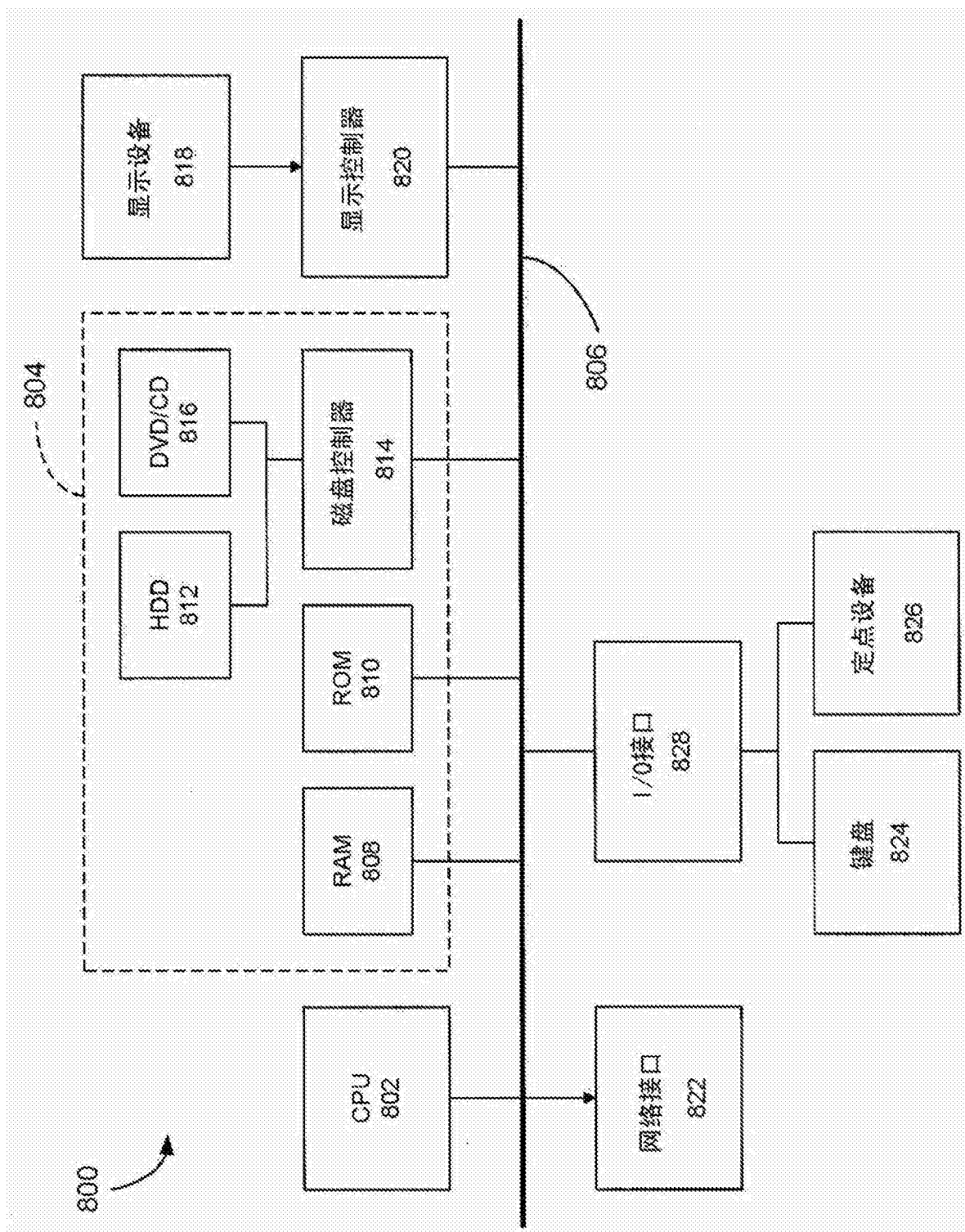


图8