



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117709129 B

(45) 授权公告日 2024.05.14

(21) 申请号 202410160264.7

G06F 119/14 (2020.01)

(22) 申请日 2024.02.05

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 117709129 A

CN 116050196 A, 2023.05.02

CN 114254537 A, 2022.03.29

CN 113642105 A, 2021.11.12

(43) 申请公布日 2024.03.15

CN 103207926 A, 2013.07.17

(73) 专利权人 国家超级计算天津中心
地址 300457 天津市滨海新区经济技术开
发区信环西路19号5号楼5102

CN 108021741 A, 2018.05.11

CN 108228970 A, 2018.06.29

CN 112463326 A, 2021.03.09

专利权人 中国人民解放军国防科技大学
先进计算与关键软件(信创)海河
实验室

CN 113792419 A, 2021.12.14

CN 114117864 A, 2022.03.01

US 2005203725 A1, 2005.09.15

US 2013185029 A1, 2013.07.18

(72) 发明人 杨灿群 仲彦旭 王伟 黄颖杰
张兵 夏梓峻 郑伟龙 卢海林

Omar Bettinotti. A weakly-intrusive
multi-scale substitution method in
explicit dynamics.《HAL openscience》.2014,
正文第1-203页. (续)

(74) 专利代理机构 北京开阳星知识产权代理有
限公司 11710

专利代理师 王艳斌

审查员 郝强

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 9/50 (2006.01)

G06F 111/02 (2020.01)

权利要求书3页 说明书17页 附图6页

(54) 发明名称

多尺度仿真方法、装置、设备及存储介质

(57) 摘要

本公开实施例涉及一种多尺度仿真方法、装置、设备及存储介质,其中,该方法包括:获取目标网格模型;根据多个单元的初始理论时间步长对多个单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个候选单元组以及多个单元的目标时间步长;针对每个候选单元组分别各自执行内部循环操作。本公开实施例可将目标网格模型中的多个单元划分为多个不同尺度的候选单元组,以便对目标网格模型进行多尺度仿真,而非像相关技术中将多个单元的时间步长统一为最小的时间步长从而进行单一尺度仿真,如此,可减少计算量,提高计算效率,从而满足快速仿真需求。



CN 117709129 B

[接上页]

(56) 对比文件

陈丽华,程建钢,姚振汉.冲击动力问题的混合积分并行算法及应用.工程力学.2003,(02),

正文第15-20页.

孙琦;周军;林鹏.基于LS-DYNA的弹体撞水过程流固耦合动力分析.系统仿真学报.2010,(06),正文第1498-1501页.

1. 一种多尺度仿真方法,其特征在于,包括:

获取目标网格模型,其中,所述目标网格模型中包括多个单元及对应的物理量;

根据所述多个单元的初始理论时间步长对所述多个单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个候选单元组以及所述多个单元的目标时间步长;

针对每个所述候选单元组分别各自执行内部循环操作,所述内部循环操作包括如下步骤:

将所述候选单元组作为目标单元组;

按照所述目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算所述目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量,若监测到满足所述内部循环操作的完成条件则确定内部循环操作完成,若监测到不满足所述内部循环操作的完成条件,则监测是否满足组内分组条件,若不满足所述组内分组条件,则返回所述按照所述目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算所述目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量的步骤,若满足所述组内分组条件,则对所述目标单元组所包括的目标单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个新的目标单元组以及所述目标单元组所包括的目标单元的新的目标时间步长,并针对每个所述新的目标单元组分别各自返回按照所述目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算所述目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量的步骤。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述根据所述多个单元的初始理论时间步长对所述多个单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个候选单元组以及所述多个单元的目标时间步长,包括:

根据所述初始理论时间步长对所述多个单元进行多尺度分组,得到多个不同尺度的第一单元组;

针对每个第一单元组,从所述第一单元组所包括的单元的初始理论时间步长中选取最小值,并将其作为所述第一单元组所包括的单元的第一时间步长;

根据所述多个单元的第一时间步长确定所述多个单元中节点的第二时间步长;

针对每个单元,从所述单元所包括的节点的第二时间步长中选取最小值,并将其作为所述单元的第三时间步长;

根据所述第三时间步长对所述多个单元进行多尺度分组,得到所述多个候选单元组;

针对每个候选单元组,从所述候选单元组所包括的单元的第三时间步长中选取最小值,并将其作为所述候选单元组所包括的单元的目标时间步长;

根据所述多个单元的目标时间步长确定所述多个单元中节点的第二时间步长。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述根据所述多个单元的第一时间步长确定所述多个单元中节点的第二时间步长,包括:

若所述节点位于所述目标网格模型的刚体或接触面上,从所述目标网格模型所包括单元的第一时间步长中选取最小值,并将其作为所述节点的第二时间步长;

否则,从所述节点所属单元的第一时间步长中选取最小值,并将其作为所述节点的第二时间步长。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述目标单元组中包括多种类型的目标单元;

其中,所述采用混合单元统一求解格式,计算所述目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量,包括:

针对所述目标单元组中每个类型的目标单元,根据所述目标单元的类型确定所述目标单元中节点的形函数;

根据所述节点的形函数确定所述节点对应的应力算子;

根据所述节点应力算子和所述节点所属目标单元的平均应力张量,确定所述节点的内力。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,监测是否满足组内分组条件的过程,包括:根据所述目标单元在下一时间步的物理量,确定所述目标单元的当前理论时间步长;根据所述目标单元的当前理论时间步长和对应的初始理论时间步长,确定是否满足组内分组条件。

6. 根据权利要求5所述的方法,其特征在于,所述根据所述目标单元的当前理论时间步长和对应的初始理论时间步长,确定是否满足组内分组条件,包括:

若所述目标单元的当前理论时间步长大于等于对应的初始理论时间步长,确定不满足组内分组条件;

若所述目标单元的当前理论时间步长小于对应的初始理论时间步长,调整所述目标单元的虚拟质量,以将所述当前理论时间步长调整至等于对应的初始理论时间步长;

根据所述目标单元的真实质量和调整后的虚拟质量,确定是否满足组内分组条件。

7. 根据权利要求6所述的方法,其特征在于,所述根据所述目标单元的真实质量和调整后的虚拟质量,确定是否满足组内分组条件,包括:

根据所述目标单元的真实质量和调整后的虚拟质量,确定所述目标单元的总质量;

若所述目标单元的调整后的虚拟质量相对于所述目标单元的总质量的占比在预设误差范围内,确定不满足组内分组条件;

若所述目标单元的调整后的虚拟质量相对于所述目标单元的总质量的占比超出预设误差范围,检测所述目标单元是否满足失效条件;

若所述目标单元满足失效条件,删除所述目标单元,并确定不满足组内分组条件;

若所述目标单元不满足失效条件,去除所述目标单元的虚拟质量,并确定满足组内分组条件。

8. 根据权利要求1-7任一项所述的方法,其特征在于,在监测到所有所述候选单元组满足所述内部循环操作的完成条件之后,还包括:

在监测到不满足外部循环停止条件时,返回根据所述多个单元的初始理论时间步长对所述多个单元进行多尺度分组和时间步长调整的步骤,以进入下一外部循环,直至监测到满足外部循环停止条件。

9. 一种多尺度仿真装置,其特征在于,包括:

第一获取模块,用于获取目标网格模型,其中,所述目标网格模型中包括多个单元及对应的物理量;

分组和调整模块,用于根据所述多个单元的初始理论时间步长对所述多个单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个候选单元组以及所述多个单元的目标时间步长;

内部循环模块,用于针对每个所述候选单元组分别各自执行内部循环操作,所述内部循环操作包括如下步骤:

将所述候选单元组作为目标单元组;

按照所述目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算所述目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量,若监测到满足所述内部循环操作的完成条件则确定内部循环操作完成,若监测到不满足所述内部循环操作的完成条件,则监测是否满足组内分组条件,若不满足所述组内分组条件,则返回所述按照所述目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算所述目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量的步骤,若满足所述组内分组条件,则对所述目标单元组所包括的目标单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个新的目标单元组以及所述目标单元组所包括的目标单元的新的目标时间步长,并针对每个所述新的目标单元组分别各自返回按照所述目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算所述目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量的步骤。

10. 一种电子设备,其特征在于,包括:

处理器和存储器,其中,所述存储器中存储有计算机程序,当所述计算机程序被所述处理器执行时,所述处理器执行权利要求1-8中任一项所述的方法。

11. 一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述存储介质中存储有计算机程序,当所述计算机程序被处理器执行时,实现如权利要求1-8中任一项所述的方法。

多尺度仿真方法、装置、设备及存储介质

技术领域

[0001] 本公开实施例涉及计算机技术领域,尤其涉及一种多尺度仿真方法、装置、设备及存储介质。

背景技术

[0002] 在各个领域的装备研发过程中,通过试验方法研发存在周期长、危险系数大,成本高等问题,由于CAE仿真技术可有效地对试验进行替代,并且极大地缩短研发周期和降低研发成本,因此在装备研发过程中通常基于CAE仿真技术对实际工程问题进行仿真。

[0003] 目前,对实际工程问题进行仿真的过程如下:首先,获取实际工程问题对应的模型,然后,计算模型中每个单元的时间步长并从中选取出最小的时间步长,然后,按照最小的时间步长计算模型中每个单元在下一时间步的物理量。但是,该种仿真方法计算效率较低,难以满足快速仿真的需求。针对上述问题目前还没有有效的解决办法。

发明内容

[0004] 为了解决上述技术问题或者至少部分地解决上述技术问题,本公开实施例提供了一种多尺度仿真方法、装置、设备及存储介质。

[0005] 本公开实施例的第一方面提供了一种多尺度仿真方法,该方法包括:

[0006] 获取目标网格模型,其中,目标网格模型中包括多个单元及对应的物理量;根据多个单元的初始理论时间步长对多个单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个候选单元组以及多个单元的目标时间步长;

[0007] 针对每个候选单元组分别各自执行内部循环操作包括如下步骤:

[0008] 将候选单元组作为目标单元组;

[0009] 按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量,直至监测到满足内部循环操作的完成条件时确定内部循环操作完成、或者监测到目标单元组满足组内分组条件时,对目标单元组所包括的目标单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个新的目标单元组以及目标单元组所包括的目标单元的新的目标时间步长,并针对每个新的目标单元组分别各自返回按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量的步骤。

[0010] 本公开实施例的第二方面提供了一种多尺度仿真装置,该装置包括:

[0011] 第一获取模块,用于获取目标网格模型,其中,所述目标网格模型中包括多个单元及对应的物理量;

[0012] 分组和调整模块,用于根据所述多个单元的初始理论时间步长对所述多个单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个候选单元组以及所述多个单元的目标时间步长;

[0013] 内部循环模块,用于针对每个候选单元组分别各自执行内部循环操作,内部循环

操作包括如下步骤:

[0014] 将候选单元组作为目标单元组;

[0015] 按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量,直至监测到满足内部循环操作的完成条件时确定内部循环操作完成、或者监测到目标单元组满足组内分组条件时,对目标单元组所包括的目标单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个新的目标单元组以及目标单元组所包括的目标单元的新的目标时间步长,并针对每个新的目标单元组分别各自返回按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量的步骤。

[0016] 本公开实施例的第三方面提供了一种电子设备,该服务器包括:处理器和存储器,其中,所述存储器中存储有计算机程序,当所述计算机程序被所述处理器执行时,所述处理器执行上述第一方面的方法。

[0017] 本公开实施例的第四方面提供了一种计算机可读存储介质,该存储介质中存储有计算机程序,当该计算机程序被处理器执行时,可以实现上述第一方面的方法。

[0018] 本公开实施例提供的技术方案与现有技术相比具有如下优点:

[0019] 本公开实施例,可将目标网格模型中的多个单元划分为多个候选单元组,且不同候选单元组的目标时间步长不同,以便根据多个目标时间步长对目标网格模型进行多尺度仿真,而非像相关技术中将多个单元的时间步长统一为最小的时间步长从而进行单一尺度仿真,如此,可减少计算量,提高计算效率,从而满足快速仿真需求。

附图说明

[0020] 此处的附图被并入说明书中并构成本说明书的一部分,示出了符合本公开的实施例,并与说明书一起用于解释本公开的原理。

[0021] 为了更清楚地说明本公开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,对于本领域普通技术人员而言,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他的附图。

[0022] 图1是本公开实施例提供了一种多尺度仿真方法的流程图;

[0023] 图2是本公开实施例提供了一种多尺度仿真过程的流程示意图;

[0024] 图3是本公开实施例提供了一种泰勒杆动态撞击问题对应的泰勒杆模型的结构示意图;

[0025] 图4是图3中A区域中的部分区域的放大示意图;

[0026] 图5是图4中B区域中的部分区域的放大示意图;

[0027] 图6是本公开实施例提供了一种内部循环和外部循环示意图;

[0028] 图7是本公开实施例提供的图2中泰勒杆模型的多重循环分组模型图;

[0029] 图8是本公开实施例提供了一种仿真计算时间对比示意图;

[0030] 图9是本公开实施例提供了一种多尺度仿真装置的结构示意图;

[0031] 图10是本公开实施例中的一种电子设备的结构示意图。

具体实施方式

[0032] 为了能够更清楚地理解本公开的上述目的、特征和优点,下面将对本公开的方案进行进一步描述。需要说明的是,在不冲突的情况下,本公开的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0033] 在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本公开,但本公开还可以采用其他不同于在此描述的方式来实施;显然,说明书中的实施例只是本公开的一部分实施例,而不是全部的实施例。

[0034] 图1是本公开实施例提供的一种多尺度仿真方法的流程图,该方法可以由一种电子设备来执行。该电子设备可以示例性的理解为诸如手机、平板电脑、笔记本电脑、台式机、智能电视等具有页面展示功能的设备。如图1所示,本实施例提供的方法包括如下步骤:

[0035] S110、获取目标网格模型,其中,目标网格模型中包括多个单元以及对应的物理量;

[0036] S120、根据多个单元的初始理论时间步长对多个单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个候选单元组以及多个单元的目标时间步长。

[0037] 其中,同一候选单元组所包括的单元的目标时间步长相同,且单元的目标时间步长小于等于对应的初始理论时间步长。

[0038] S130、针对每个候选单元组分别各自执行内部循环操作,内部循环操作包括如下步骤:

[0039] 将候选单元组作为目标单元组;

[0040] 按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量,直至监测到满足内部循环操作的完成条件时确定内部循环操作完成、或者监测到目标单元组满足组内分组条件时,对目标单元组所包括的目标单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个新的目标单元组以及目标单元组所包括的目标单元的新的目标时间步长,并针对每个新的目标单元组分别各自返回按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量的步骤。

[0041] 其中,内部循环操作的完成条件为候选单元组的累计时间步长达到所有候选单元组对应的目标时间步长的公倍数。

[0042] 本公开实施例,可将目标网格模型中的多个单元划分为多个候选单元组,且不同候选单元组的目标时间步长不同,以便根据多个目标时间步长对目标网格模型进行多尺度仿真,而非像相关技术中将多个单元的时间步长统一为最小的时间步长从而进行单一尺度仿真,如此,可减少计算量,提高计算效率,从而满足快速仿真需求。

[0043] 在另一些实施例中,可选地,在监测到所有候选单元组满足内部循环操作的完成条件之后,还包括:在监测到不满足外部循环停止条件时,返回根据多个单元的初始理论时间步长对多个单元进行多尺度分组和时间步长调整的步骤,直至监测到满足外部循环停止条件。

[0044] 具体地,外部循环停止条件可以包括仿真时长达到预设时长、接收用户通过停止控制触发的到仿真停止操作、或者外部循环操作的执行次数达到预设次数等,但并不限于此。

[0045] 如此,多尺度仿真过程包括:

[0046] 获取目标网格模型;

[0047] 重复执行外部循环操作,直至监测到满足外部循环停止条件,其中,每次外部循环操作包括如下两步(或者说外部循环所循环的具体内容):

[0048] 步骤1、根据多个单元的初始理论时间步长对多个单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个候选单元组以及多个单元的目标时间步长,其中,同一候选单元组所包括的单元的目标时间步长相同,且单元的目标时间步长小于等于对应的初始理论时间步长;

[0049] 步骤2、针对每个候选单元组分别各自完成内部循环操作,内部循环操作的完成条件为候选单元组的累计时间步长达到步骤1划分出的所有候选单元组对应的目标时间步长的公倍数,需要说明的是,各候选单元组各独立进行内部循环操作时可以并行也可以串行,对此不作限定。内部循环操作包括如下步骤:将候选单元组作为目标单元组;按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量,直至监测到满足内部循环操作的完成条件时确定内部循环操作完成、或者监测到目标单元组满足组内分组条件时,对目标单元组所包括的目标单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个新的目标单元组以及目标单元组所包括的目标单元的新的目标时间步长,并针对每个新的目标单元组分别各自返回按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量的步骤。

[0050] 当然,在第一次内部循环操作之前,还可以对目标网格模型中的单元和/或节点施加运动学约束,例如接触、边界条件、焊点等,但并不限于此。

[0051] 下面针对S110进行详细说明。

[0052] 具体地,目标网格模型为实际工程问题对应的物理模型。

[0053] 实际工程问题可以包括超大规模爆炸领域的工程问题、聚能射流毁伤与防护领域的工程问题、高超声速先进武器研发设计领域的工程问题等,其中,超大规模爆炸领域的工程问题可以包括城市安全防护、风险评估与应急预警、危化品生产/储存/处置、水下/空中爆炸毁伤与防护、气泡脉动等,但并不限于此。

[0054] 在一些实施例中,S110可以包括:接收其它电子设备发送的目标网格模型、或者从存储设备中读取目标网格模型。

[0055] 在另一些实施例中,S110可以包括:建立实际工程问题对应的目标几何模型;对目标几何模型进行网格划分,得到目标网格模型。

[0056] 具体地,目标网格模型的具体类型可以包括欧拉类型、拉格朗日类型等,但并不限于此。

[0057] 具体地,可以采用单一类型的单元对目标几何模型进行网格划分、也可以采用多种类型的单元对目标几何模型进行网格划分,对此不作限定。

[0058] 在一个示例中,可选地,对目标几何模型进行网格划分可以包括:根据结构复杂度将目标几何模型划分出第一类区域、连接区域、以及第二类区域,其中,第一类区域的结构复杂度大于第二类区域的结构复杂度,连接区域位于第一类区域和第二类区域之间;针对第一类区域,采用四面体/三角形单元进行网格划分;针对第二类区域,采用六面体/四边形

单元进行网格划分;针对连接区域,采用五面体/多面体单元进行网格划分。

[0059] 可以理解的是,采用多种类型的单元对目标几何模型进行网格划分,可确保目标几何模型中复杂几何外形的精确表征。

[0060] 当然,还可以为目标网格模型的各单元设置初始物理量(即在第0s(秒)的物理量)。如此,电子设备可以在S110获取各单元对应的物理量。

[0061] 下面针对S120进行详细说明。

[0062] 具体地,电子设备每完整执行一次S120和S130称为一次外部循环操作。在每次外部循环操作中,初始理论时间步长为当前外部循环操作(或者说本次外部循环操作)开始时单元的理论时间步长,其中,理论时间步长为根据单元的物理量、尺寸和CFL稳定条件确定的时间步长。

[0063] 具体地,目标时间步长为对单元的初始理论时间步长进行调整之后得到的时间步长,也即每仿真计算一次单元的物理量所更新的时间。

[0064] 示例性的,单元A的目标时间步长为 $3\mu\text{s}$ (微秒),则仿真计算单元A在第 $1\mu\text{s}$ 的物理量、在第 $4\mu\text{s}$ 的物理量、在第 $7\mu\text{s}$ 的物理量...,依此类推。

[0065] 在一些实施例中,S120可以包括:根据初始理论时间步长对多个单元进行多尺度分组,得到多个不同尺度的候选单元组;针对每个候选单元组,从候选单元组所包括的单元的初始理论时间步长中选取最小值,并将其作为候选单元组所包括的单元的目标时间步长。

[0066] 在另一些实施例中,S120可以包括:S121、根据初始理论时间步长对多个单元进行多尺度分组,得到多个不同尺度的第一单元组。

[0067] 具体地,“多个不同尺度”的具体数量,本领域技术人员可根据实际情况设置,此处不作限定。

[0068] 可选地,S121可以包括:从多个预设时间步长范围中,确定单元的初始理论时间步长所属时间步长范围;将单元划分至该所属时间步长范围对应的第一单元组。

[0069] 示例性的,目标网格模型包括单元A、单元B、单元C、单元D、单元E、以及单元F,单元A的初始理论时间步长为 $1\mu\text{s}$,单元B和单元C的初始理论时间步长为 $4\mu\text{s}$,单元D的初始理论时间步长为 $6\mu\text{s}$ 、单元E的初始理论时间步长为 $7\mu\text{s}$,单元F的初始理论时间步长为 $8\mu\text{s}$ 。预设时间步长范围包括 $[1\mu\text{s}, 5\mu\text{s}]$ 和 $[6\mu\text{s}, 10\mu\text{s}]$,则将单元A、单元B以及单元C划分至 $[1\mu\text{s}, 5\mu\text{s}]$ 对应的第一单元组,将单元D、单元E以及单元F划分至 $[6\mu\text{s}, 10\mu\text{s}]$ 对应的第一单元组。

[0070] S122、针对每个第一单元组,从第一单元组所包括的单元的初始理论时间步长中选取最小值,并将其作为第一单元组所包括的单元的第一时间步长。

[0071] 示例性的,沿用前文示例,由于 $[1\mu\text{s}, 5\mu\text{s}]$ 对应的第一单元组中初始理论时间步长的最小值为 $1\mu\text{s}$,因此将单元A的第一时间步长、单元B的第一时间步长以及单元C的第一时间步长确定为 $1\mu\text{s}$,同理,将单元D的第一时间步长、单元E的第一时间步长以及单元F的第一时间步长确定为 $6\mu\text{s}$ 。

[0072] S123、根据多个单元的第一时间步长确定多个单元中节点的第二时间步长。

[0073] 在一种示例中,S123可以包括:从目标网格模型所包括单元的第一时间步长中选取最小值,并将其作为节点的第二时间步长。

[0074] 在另一种示例中,S123可以包括:若节点位于目标网格模型的刚体或接触面上,从

目标网格模型所包括单元的第一时间步长中选取最小值,并将其作为节点的第二时间步长;否则,从节点所属单元的第一时间步长中选取最小值,并将其作为节点的第二时间步长。如此,可将单元的时间步长同步至节点,并且,通过将刚体、接触面上所包含的节点分配至模型中最小的时间步长,可提高计算精度与稳定性。

[0075] 示例性的,继续沿用前文示例,目标网格模型所有单元的第一时间步长中的最小值为 $1\mu\text{s}$ 。单元F包括节点F1、节点F2以及节点F3,同时,节点F1也是单元E上的一个节点,如此,若节点F1位于目标网格模型的刚体或接触面上,则确定节点F1的第二时间步长为 $1\mu\text{s}$,若节点F1不位于目标网格模型的刚体或接触面上,则确定节点F1的第二时间步长为 $6\mu\text{s}$ 。

[0076] S124、针对每个单元,从单元所包括的节点的第二时间步长中选取最小值,并将其作为单元的第三时间步长。如此,可提高单元的时间步长和节点的时间步长的一致性。

[0077] S125、根据第三时间步长对多个单元进行多尺度分组,得到多个候选单元组。

[0078] 具体地,S125与S121类似,此处不再赘述。

[0079] S126、针对每个候选单元组,从候选单元组所包括的单元的第三时间步长中选取最小值,并将其作为候选单元组所包括的单元的目标时间步长。

[0080] 具体地,S126与S122类似,此处不再赘述。

[0081] S127、根据多个单元的目标时间步长确定多个单元中节点的第四时间步长。

[0082] 具体地,S127与S123类似,此处不再赘述。

[0083] 下面针对S130进行详细说明。

[0084] 具体地,内部循环操作的时间步长(即内部循环操作更新的总时间)为所有目标时间步长中的公倍数。

[0085] 具体地,在本次内部循环操作开始时,若候选单元组中单元仿真至在T1时刻的物理量,本次执行“按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量(称之为仿真计算操作)”得到候选单元组中单元在T2时刻的物理量,则累计时间步长为T2-T1。当候选单元组中所有单元的累计时间步长达到所有候选单元组对应的目标时间步长的公倍数时,认为满足内部循环完成条件。

[0086] 具体地,针对一个目标单元组,电子设备每执行一次仿真计算操作,判断针对目标单元组的仿真计算物理量的累计时间步长是否达到公倍数,如果达到公倍数,则该目标单元组完成了内部循环操作,如果未达到公倍数,则判断该目标单元组是否满足组内分组条件,如果不满足组内分组条件,则进行下一次仿真计算操作,如果满足组内分组条件,则对该目标单元组所包括的目标单元进行多尺度分组和时间步长调整以将该目标单元组拆分为多个新的目标单元组,然后继续对每个新的目标单元执行上述操作。需要说明的是,根据目标单元组所包括的目标单元的当前理论时间步长对“目标单元组所包括的目标单元进行多尺度分组和时间步长调整”可参照S120,只是需要根据,此处不再赘述。

[0087] 示例性的,目标网格模型包括单元A、单元B、单元C、单元D、单元E、以及单元F,单元A、单元B、单元C、以及单元D属于同一候选单元组M,目标时间步长为 $3\mu\text{s}$,单元E和单元F,属于同一候选单元N,目标时间步长为 $6\mu\text{s}$,则内部循环操作完成后更新的总时间为 $6\mu\text{s}$,内部循环操作的完成条件为候选单元组的累计时间步长达到 $6\mu\text{s}$ 。

[0088] 针对候选单元组M执行内部循环操作:将候选单元组M作为目标单元组M,执行第一

次仿真计算操作,可得到单元A、单元B、单元C、以及单元D在第 $3\mu\text{s}$ 的物理量,累计时间步长为 $3\mu\text{s}$,小于公倍数,则判断当前是否满足组内分组条件,如果不满足组内分组条件,则执行第二次仿真计算操作,可得到单元A、单元B、单元C、单元D在第 $6\mu\text{s}$ 的物理量,累计时间步长为 $6\mu\text{s}$ (达到公倍数),候选单元组M的内部循环操作完成,如果满足组内分组条件,则对该目标单元组M所包括的单元A、单元B、单元C、以及单元D进行多尺度分组和时间步长调整以将该目标单元组M拆分为多个新的目标单元组,若拆分得到新的目标单元组M1和新的目标单元组M2,新的目标单元组M1包括单元A、以及单元B,目标时间步长为 $3\mu\text{s}$,新的目标单元组M2包括单元C、以及单元D,目标时间步长为 $1.5\mu\text{s}$,则针对新的目标单元组M1执行仿真操作,可得到单元A、以及单元B在第 $6\mu\text{s}$ 的物理量,累计时间步长为 $6\mu\text{s}$,达到公倍数,针对新的目标单元组M2执行仿真操作,可得到单元C、单元D在第 $4.5\mu\text{s}$ 的物理量,累计时间步长为 $4.5\mu\text{s}$,小于 $6\mu\text{s}$ 公倍数,判断当前是否满足组内分组条件,如果不满足组内分组条件,则再次执行仿真计算操作,可得到单元C、以及单元D在第 $6\mu\text{s}$ 的物理量,累计时间步长为 $6\mu\text{s}$,达到公倍数,至此,候选单元组M中的所有单元的累计时间步长达到公倍数,候选单元组M的内部循环操作完成。针对候选单元组N执行内部循环操作:将候选单元组M作为目标单元组N,执行第一次仿真计算操作,可得到单元E、以及单元F在第 $6\mu\text{s}$ 的物理量,累计时间步长为 $6\mu\text{s}$,达到公倍数,候选单元组N的内部循环操作完成。至此,所有候选单元组均各自完成内部循环操作,本次外部循环操作完成。

[0089] 具体地,物理量可以包括如下至少一项:节点的运动变量(例如加速度、速度、和/或位移等)、节点的动量和/或内能、节点的外力和/或单元的外力、节点的内力和/或单元的内力等。但并不限于此。

[0090] 可选地,目标单元组中包括多种类型的目标单元;其中,采用混合单元统一求解格式,计算所述目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量,包括:针对目标单元组中每个类型的目标单元,根据目标单元的类型确定目标单元中节点的形函数;根据节点的形函数确定节点对应的应力算子;根据节点应力算子和节点所属目标单元的平均应力张量,确定节点的内力。

[0091] 任意类型单元的节点的内力可通过公式(1)计算:

$$[0092] \quad f_i^I = \bar{t}^{\bar{ij}} B_j^I \quad \text{公式(1)}$$

[0093] 其中, f_i^I 表示节点I在i方向的内力, $\bar{t}^{\bar{ij}}$ 表示单元平均应力张量, B_j^I 表示为节点I引入的应力算子。

[0094] 任意类型单元的节点的应力算子可通过公式(2)计算:

$$[0095] \quad B_j^I = \frac{\partial V}{\partial X_I^i} = \sum X_j^j X_K^k D^{LK} \quad \text{公式(2)}$$

[0096] 其中, ∂X_I^i 表示节点I在i方向的坐标, X_j^j 表示节点J在j方向的坐标, X_K^k 表示节点K在k方向的坐标,节点I、节点J以及节点K属于同一单元, V表示单元体积, D^{LK} 表示为了计算节点I、节点J以及节点K对应的应力算子引入的积分算子。

[0097] 任意类型单元的节点的积分算子可通过公式(3)计算:

$$[0098] \quad D^{IJK} = \iiint_V \frac{\partial N^I}{\partial \xi^i} \frac{\partial N^J}{\partial \xi^j} \frac{\partial N^K}{\partial \xi^k} J d\xi^1 d\xi^2 d\xi^3 \quad \text{公式(3)}$$

[0099] 其中, ξ^i 表示节点I在i方向的自然坐标, ξ^j 表示节点J在j方向的自然坐标, ξ^k 表示节点K在k方向的自然坐标, ξ^1 表示节点在x方向的自然坐标, ξ^2 表示节点在y方向的自然坐标, ξ^3 表示节点在z方向的自然坐标, N^I 表示节点I的形函数, N^J 表示节点J的形函数, N^K 表示节点K的形函数, V 表示单元体积, J 表示单元雅可比矩阵的行列式。

[0100] 由于不同类型单元的节点的形函数不同,因此,不同类型单元的节点的积分算子不同,进而使得不同类型单元的节点的应力算子不同,基于上述公式(1)、公式(2)以及公式(3)可分别计算不同类型单元的节点对应的应力算子,相比于不同类型单元采用单元退化方法,即六面体/四边形单元通过部分节点重合,从而退化不同类型单元,可更准确地计算各类型单元的节点的内力。例如,六面体、五面体、四面体单元中节点1在x方向的应力算子可通过如下公式(4)计算:

$$[0101] \quad B_x^1 = \frac{1}{12} \times \begin{cases} [y_2(z_{63} - z_{45}) + y_3 z_{24} + y_4(z_{38} - z_{52}) + y_5(z_{86} - z_{24}) + y_6 z_{52} + y_8 z_{45}] & \text{六面体} \\ [y_2(z_{43} - z_{35}) + y_3(z_{24} - z_{62}) + y_4(z_{32} - z_{56}) + y_5 z_{42} + y_6 z_{43}] & \text{五面体} \\ [y_6 z_{24} + y_{24} z_{34}] \times 2 & \text{四面体} \end{cases} \quad \text{公式(4)}$$

[0102] 其中,针对 $y_{\text{下标}}$,当下标中包含单个数字时表示节点号为下标的节点在y方向的坐标,当下标中包含两个数字时表示节点号为下标的两个节点在y、z方向的坐标之差,即 $y_{ij} = y_i - y_j$,同理,针对 $z_{\text{下标}}$,当下标中包含单个数字时表示节点号为下标的节点在z方向的坐标,当下标中包含两个数字时表示节点号为下标的两个节点在z方向的坐标差,即 $z_{ij} = z_i - z_j$ 。同理,可得其它节点、其它方向的应力算子。

[0103] 可以理解的是,基于平均应力缩减积分计算方法,可得到不同类型单元的节点的内力的统一求解格式,结合各个单元类型优势,可以实现精细化模型的高精度求解,同时确保复杂几何外形的精确表征,避免了单元退化方法导致的计算精度低、节点质量集中、计算效率低等问题。

[0104] 监测是否满足组内分组条件的过程,可以包括:S1331、根据目标单元在下一时间步的物理量,确定目标单元的当前理论时间步长。

[0105] S1332、根据目标单元的当前理论时间步长和对应的初始理论时间步长,确定是否满足组内分组条件。

[0106] 具体地,在内部循环操作中,每执行一次仿真计算操作,若还未满足内部循环完成条件,则还需要执行:监测是否满足组内分组条件。

[0107] 具体地,在内部循环操作中,每执行一次仿真计算操作可得到目标单元在下一时间的物理量(也即当前的物理量),根据该物理量可以确定目标单元的理论时间步长(当前理论时间步长)。相较于上一次仿真计算操作仿真计算出的物理量,下一次仿真计算操作仿

真计算出的物理量可能会发生变化,而理论时间步长与物理量相关,因此,当前理论时间步长与初始理论时间步长可能会不同,需要根据当前的物理量重新确定当前理论时间步长。

[0108] 在一些实施例中,S1332可以包括:若目标单元的当前理论时间步长大于等于对应的初始理论时间步长,确定不满足组内分组条件;若目标单元的当前理论时间步长小于对应的初始理论时间步长,确定满足组内分组条件。

[0109] 在另一些实施例中,S1332可以包括:S13321、若目标单元的当前理论时间步长大于等于对应的初始理论时间步长,确定不满足组内分组条件。

[0110] S13322、若目标单元的当前理论时间步长小于对应的初始理论时间步长,调整目标单元的虚拟质量,以将当前理论时间步长调整至等于对应的初始理论时间步长。

[0111] S13323、根据所述目标单元的真实质量和调整后的虚拟质量,确定是否满足组内分组条件。

[0112] 在一个示例中,S13323可以包括:根据目标单元的真实质量和调整后的虚拟质量,确定目标单元的总质量;若目标单元的调整后的虚拟质量相对于目标单元的总质量的占比在预设误差范围内,确定不满足组内分组条件;若目标单元的调整后的虚拟质量相对于目标单元的总质量的占比超出预设误差范围,确定满足组内分组条件。

[0113] 在另一个示例中,S13323可以包括:根据目标单元的真实质量和调整后的虚拟质量,确定目标单元的总质量;若目标单元的调整后的虚拟质量相对于目标单元的总质量的占比在预设误差范围内,确定不满足组内分组条件;若目标单元的调整后的虚拟质量相对于目标单元的总质量的占比超出预设误差范围,检测目标单元是否满足失效条件;若目标单元满足失效条件,删除目标单元,并确定不满足组内分组条件;若目标单元不满足失效条件,去除目标单元的虚拟质量,并确定满足组内分组条件。

[0114] 具体地,预设误差范围的具体范围本领域技术人员可根据实际情况设置,此处不作限定。

[0115] 具体地,为了权衡计算精度与计算稳定性,调整后的虚拟质量相对于总质量的占比需要在预设误差范围,以满足虚拟质量误差要求。例如,当调整后的虚拟质量和总质量满足如下公式(5)时满足虚拟质量误差要求:

$$[0116] \quad 0 \leq \frac{|m_{ghost}|}{m_{total}} = \frac{|m_{ghost}|}{m_{ghost} + m_{real}} \leq 0.5 \text{ 公式(5)}$$

[0117] 其中, m_{total} 表示单元总质量, m_{ghost} 表示单元的调整后的虚拟质量, m_{real} 表示单元的真实质量。

[0118] 具体地,可以采用任意可能的失效条件来检测目标单元是否失效,此处不作限定。例如,可以根据几何条件(例如网格角度和体积)和物理条件(例如失效模型),对单元失效状态进行判断。但并不限于此。

[0119] 具体地,若目标单元达到失效条件,可采用侵蚀方法将目标单元删除,使其不参与当前外部循环操作中后续的仿真计算,否则去除目标单元的虚拟质量,进入下一次外部循环操作。

[0120] 可以理解的是,每次外部循环操作均需先进行多尺度分组,需要耗费一定的时长,

基于虚拟质量调整和/或失效条件检测,可在一定程度上避免内部循环操作停止并进入下一次外部循环操作,从而避免频繁循环多尺度分组造成的计算量增加,进一步提升计算效率,对于无法再进行调控的单元,及时进入下一次外部循环操作进行重新多尺度分组,确保了整体计算的稳定性与精度。

[0121] 还可以理解的是,采用时域多重循环计算方法,基于不同初始理论单元时间步长对目标网格模型中的多个单元进行多尺度分组,实现复杂模型的时域多尺度仿真计算,在确保计算稳定与精度的基础上,提升计算速度与计算效率。

[0122] 为了更好的说明本公开实施例的目的和优点,下面,将基于一个具体示例,对本公开实施例提供的多尺度仿真方法进行详细说明。

[0123] 图2是本公开实施例提供的一种多尺度仿真过程的流程示意图。参见图2,该多尺度仿真过程如下:

[0124] 步骤1:CAE仿真初始化。

[0125] 根据实际工程问题对CAE仿真计算模型进行初始化定义,包括建立几何模型、设置初始条件(包括初始物理量)、设定求解时间(即预设时长)。

[0126] 步骤2:空间多尺度混合单元建模。

[0127] 针对几何模型,采用混合单元实现空间多尺度网格划分。

[0128] 针对精细化仿真需求,采用混合单元对几何模型进行表征。为了保证计算精度与计算效率,同时确保复杂几何外形的精确表征,采用六面体/四边形对几何模型主体进行网格划分,在此基础上,针对局部复杂结构采用四面体/三角形单元,同时根据三维问题特点,采用五面体/多面体单元进行过度。

[0129] 示例性的,图3是本公开实施例提供的一种泰勒杆动态撞击问题对应的泰勒杆模型的结构示意图。图4是图3中A区域中的部分区域的放大示意图。图5是图4中B区域中的部分区域的放大示意图。根据问题特点,设置固壁边界条件,求解时间设置为 $300\mu\text{s}$ 。

[0130] 步骤3:混合单元时空多尺度分组。

[0131] 步骤3.1:求解网格模型中各个单元的时间步长(即理论时间步长)。

[0132] 步骤3.2:基于单元的时间步长,对网格模型中不同单元进行预分组,并针对每个组,将组中单元的最小时间步长作为组内所有单元的时间步长。

[0133] 步骤3.3:将步骤3.2得到的单元的时间步长同步至节点。

[0134] 每个节点分配其所属单元的最小时间步长,同时为了确保计算精度与稳定性,为刚体、接触所包含的节点分配模型中最小时间步长。

[0135] 步骤3.4:将步骤3.2得到的节点的时间步长同步至单元。

[0136] 为了保证单元与节点计算的一致性,每个单元分配其包含节点的最小时间步长。

[0137] 步骤3.5:基于步骤3.2得到的单元的时间步长,对网格模型中不同单元再次分组,并针对每个组,将组中单元的最小时间步长作为组内所有单元的时间步长,并将新得到的单元的时间步长同步至节点。

[0138] 步骤4:运动学约束施加。

[0139] 对于网格模型中单元和/或节点施加运动学约束,包括接触、边界条件、焊点。

[0140] 示例性的,针对泰勒杆动态撞击算例,由于设置了固壁边界条件,因此需要施加固壁边界条件的运动学约束。

[0141] 步骤5:针对时空多尺度网格模型,为了提升计算效率,降低流程复杂度,采用同步推进方法进行内部循环求解。

[0142] 步骤5.1:采用多重循环判断条件,基于步骤3计算得到的单元的时间步长,判断单元/节点在此次内部循环中是否启用。若启用则进行下述仿真计算步骤,若不启用则该单元/节点在此次内部循环中不参与计算。

[0143] 步骤5.2:计算节点运动学变量,包括加速度、速度、位移。

[0144] 步骤5.3:计算节点动量与内能,验证能量守恒条件。

[0145] 步骤5.4:求解单元/节点外力。

[0146] 步骤5.5:采用混合单元统一求解格式计算单元内力。

[0147] 步骤5.6:判断内部循环是否完成,若完成则进行步骤7,否则进行步骤6。

[0148] 步骤6:采用单元临界状态判断条件,根据单元状态,采用不同技术路线,确保多尺度计算的稳定性。

[0149] 步骤6.1:针对内部循环中启动的单元,求解下一步时间步长。

[0150] 步骤6.2:若时间步长满足其所属分组时间步长条件,则返回步骤5,进行下一内部循环的计算,否则进行步骤6.3。

[0151] 步骤6.3:根据计算稳定时间步长条件,通过调整该单元虚拟质量,实现时间步长的调控,使其满足分组时间步长条件。计算单元虚拟质量,若虚拟质量符合误差要求,则返回步骤5,进行下一内部循环的计算,否则进行步骤6.4。

[0152] 步骤6.4:采用单元失效判断条件,包括几何条件(网格角度与体积)和物理条件(失效模型),对单元失效状态进行判断。若单元达到失效条件,则采用侵蚀方法将单元删除,使其不参与后续计算,避免了重新分组,否则去除单元虚拟质量,返回步骤3,进行时空多尺度分组。

[0153] 示例性的,图6是本公开实施例提供的一种内部循环和外部循环示意图。如图6所示,不同时间步长的单元在内部循环中进行仿真计算。

[0154] 示例性的,图7是本公开实施例提供的图2中泰勒杆模型的多重循环分组模型图,可以看出,可以根据单元时间步长,将单元进行多重循环分组,同一外部循环内实现了1~128次不同内部循环。

[0155] 步骤7:判断当前时刻是否需要输出结果。

[0156] 步骤8:判断当前计算时刻 t_n 是否超过设定的结束时间 t_{end} ,若 $t_n > t_{end}$,则结束仿真计算,并输出最终计算结果;若 $t_n < t_{end}$,则返回步骤3,继续进行下一外部循环计算。

[0157] 示例性的,经过上述步骤,可完成泰勒杆模型的多尺度仿真,得到仿真结果。表1是泰勒杆模型仿真计算结果与试验结果的对比,可以看出仿真计算结果与试验结果吻合良好,计算精度较高,满足误差要求。

[0158] 表1

轴向位置	直径 (mm)		误差 (%)
	试验结果	仿真结果	
0.00	18.69	18.70	0.05
1.00	17.25	17.10	0.87
2.48	15.30	15.10	1.31
4.24	13.67	13.50	1.24
8.9	13.21	13.08	0.98
11.78	12.55	12.45	0.80
16.00	11.83	11.62	1.78
21.00	10.92	10.60	2.93
25.59	10.30	10.10	1.94
35.00	10.00	10.00	0.00

[0159] 图8是本公开实施例提供的一种仿真计算时间对比示意图。可以明显看出,对于同一泰勒杆模型,采用本公开实施例能够缩短超过2/3的时间,大大提升了仿真速度,提升了计算效率。

[0161] 本公开实施例,结合空间混合单元与时域多重循环,能够大幅度提升精细化仿真的计算精度与计算效率,减小仿真与试验的误差。基于平均应力方法,得到的六面体/五面体/四面体单元以及四边形/三角形平面单元及其混合单元统一格式,实现不同单元类型的统一求解,避免单元退化方法的使用,提升计算精度,同时精确表征复杂几何外形;多重循环能够实现不同时间步长的时域多尺度求解,减小计算量,提升计算效率;单元临界状态判断条件可以精确判断单元状态,结合多元稳定处理方法,避免频繁的多重循环分组,进一步提升计算效率。本发明有效地对复杂结构动态力学分析领域的工程问题实现高精度、高效率仿真预测。

[0162] 图9是本公开实施例提供的一种多尺度仿真装置的结构示意图,该多尺度仿真装置可以被理解为上述电子设备或者上述电子设备中的部分功能模块。如图9所示,该多尺度仿真装置900包括:

[0163] 第一获取模块910,用于获取目标网格模型,其中,目标网格模型中包括多个单元;

[0164] 分组和调整模块920,用于根据多个单元的初始理论时间步长对多个单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个候选单元组以及多个单元的目标时间步长;

[0165] 内部循环模块930,用于针对每个候选单元组分别各自执行内部循环操作,内部循环操作包括如下步骤:

[0166] 将候选单元组作为目标单元组;

[0167] 按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量,直至监测到满足内部循环操作的完成条

件时确定内部循环操作完成、或者监测到目标单元组满足组内分组条件时,对目标单元组所包括的目标单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个新的目标单元组以及目标单元组所包括的目标单元的新的目标时间步长,并针对每个新的目标单元组分别各自返回按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量的步骤。

[0168] 在本公开另一种实施方式中,分组和调整模块920可以包括:

[0169] 第一分组子模块,用于根据初始理论时间步长对多个单元进行多尺度分组,得到多个不同尺度的第一单元组;

[0170] 第一确定子模块,用于针对每个第一单元组,从第一单元组所包括的单元的初始理论时间步长中选取最小值,并将其作为第一单元组所包括的单元的第一时间步长;

[0171] 第二确定子模块,用于根据多个单元的第一时间步长确定多个单元中节点的第二时间步长;

[0172] 第三确定子模块,用于针对每个单元,从单元所包括的节点的第二时间步长中选取最小值,并将其作为单元的第三时间步长;

[0173] 第二分组子模块,用于根据第三时间步长对多个单元进行多尺度分组,得到多个候选单元组;

[0174] 第四确定子模块,用于针对每个候选单元组,从候选单元组所包括的单元的第三时间步长中选取最小值,并将其作为候选单元组所包括的单元的目标时间步长;

[0175] 第五确定子模块,用于根据多个单元的目标时间步长确定多个单元中节点的第四时间步长。

[0176] 在本公开又一种实施方式中,第二确定子模块可以包括:

[0177] 第一确定单元,用于若节点位于目标网格模型的刚体或接触面上,从目标网格模型所包括单元的第一时间步长中选取最小值,并将其作为节点的第二时间步长;否则,从节点所属单元的第一时间步长中选取最小值,并将其作为节点的第二时间步长。

[0178] 在本公开再一种实施方式中,目标单元组中包括多种类型的目标单元;内部循环模块930可以包括:

[0179] 第六确定子模块,用于针对目标单元组中每个类型的目标单元,根据目标单元的类型确定目标单元中节点的形函数;

[0180] 第七确定子模块,用于根据节点的形函数确定节点对应的应力算子;

[0181] 第八确定子模块,用于根据节点应力算子和节点所属目标单元的平均应力张量,确定节点的内力。

[0182] 在本公开再一种实施方式中,该装置还可以包括监测模块,用于监测是否满足内部循环停止,其中,监测模块可以包括:

[0183] 第九确定子模块,用于根据目标单元在下一时间步的物理量,确定目标单元的当前理论时间步长;

[0184] 第十确定子模块,用于根据目标单元的当前理论时间步长和对应的初始理论时间步长,确定是否满足组内分组条件。

[0185] 在本公开再一种实施方式中,第十确定子模块可以包括:

[0186] 第二确定单元,用于若目标单元的当前理论时间步长大于等于对应的初始理论时

间步长,确定不满足组内分组条件;

[0187] 第三确定单元,用于若目标单元的当前理论时间步长小于对应的初始理论时间步长,调整目标单元的虚拟质量,以将当前理论时间步长调整至等于对应的初始理论时间步长;

[0188] 第四确定单元,用于根据目标单元的真实质量和调整后的虚拟质量,确定是否满足组内分组条件。

[0189] 在本公开再一种实施方式中,第四确定单元可以包括:

[0190] 第一确定子单元,用于根据目标单元的真实质量和调整后的虚拟质量,确定目标单元的总质量;

[0191] 第二确定子单元,用于若目标单元的调整后的虚拟质量相对于目标单元的总质量的占比在预设误差范围内,确定不满足组内分组条件;

[0192] 第三确定子单元,用于若目标单元的调整后的虚拟质量相对于目标单元的总质量的占比超出预设误差范围,检测目标单元是否满足失效条件;

[0193] 第四确定子单元,用于若目标单元满足失效条件,删除目标单元,并确定不满足组内分组条件;

[0194] 第五确定子单元,用于若目标单元不满足失效条件,去除目标单元的虚拟质量,并确定满足组内分组条件。

[0195] 在本公开再一种实施方式中,该装置还包括返回模块,用于在监测到所有所述候选单元组满足所述内部循环操作的完成条件之后,在监测到不满足外部循环停止条件时,返回根据多个单元的初始理论时间步长对多个单元进行多尺度分组和时间步长调整的步骤,直至监测到满足外部循环停止条件。

[0196] 本实施例提供的装置能够执行上述任一实施例的方法,其执行方式和有益效果类似,在这里不再赘述。

[0197] 本公开实施例还提供了一种电子设备,该电子设备包括:存储器,存储器中存储有计算机程序;处理器,用于执行所述计算机程序,当所述计算机程序被所述处理器执行时可以实现上述任一实施例的方法。

[0198] 示例的,图10是本公开实施例中的一种电子设备的结构示意图。下面具体参考图10,其示出了适于用来实现本公开实施例中的电子设备1000的结构示意图。本公开实施例中的电子设备1000可以包括但不限于诸如移动电话、笔记本电脑、数字广播接收器、PDA(个人数字助理)、PAD(平板电脑)、PMP(便携式多媒体播放器)、车载终端(例如车载导航终端)等等的移动终端以及诸如数字TV、台式计算机等等的固定终端。图10示出的电子设备仅仅是一个示例,不应对本公开实施例的功能和使用范围带来任何限制。

[0199] 如图10所示,电子设备1000可以包括处理装置(例如中央处理器、图形处理器等)1001,其可以根据存储在只读存储器(ROM)1002中的程序或者从存储装置1008加载到随机访问存储器(RAM)1003中的程序而执行各种适当的动作和处理。在RAM 1003中,还存储有电子设备1000操作所需的各种程序和数据。处理装置1001、ROM 1002以及RAM 1003通过总线1004彼此相连。输入/输出(I/O)接口1005也连接至总线1004。

[0200] 通常,以下装置可以连接至I/O接口1005:包括例如触摸屏、触摸板、键盘、鼠标、摄像头、麦克风、加速度计、陀螺仪等的输入装置1006;包括例如液晶显示器(LCD)、扬声器、振

动器等的输出装置1007;包括例如磁带、硬盘等的存储装置1008;以及通信装置1009。通信装置1009可以允许电子设备1000与其他设备进行无线或有线通信以交换数据。虽然图10示出了具有各种装置的电子设备1000,但是应理解的是,并不要求实施或具备所有示出的装置。可以替代地实施或具备更多或更少的装置。

[0201] 特别地,根据本公开的实施例,上文参考流程图描述的过程可以被实现为计算机软件程序。例如,本公开的实施例包括一种计算机程序产品,其包括承载在非暂态计算机可读介质上的计算机程序,该计算机程序包含用于执行流程图所示的方法的程序代码。在这样的实施例中,该计算机程序可以通过通信装置1009从网络上被下载和安装,或者从存储装置1008被安装,或者从ROM 1002被安装。在该计算机程序被处理装置1001执行时,执行本公开实施例的方法中限定的上述功能。

[0202] 需要说明的是,本公开上述的计算机可读介质可以是计算机可读信号介质或者计算机可读存储介质或者是上述两者的任意组合。计算机可读存储介质例如可以是——但不限于——电、磁、光、电磁、红外线、或半导体的系统、装置或器件,或者任意以上的组合。计算机可读存储介质的更具体的例子可以包括但不限于:具有一个或多个导线的电连接、便携式计算机磁盘、硬盘、随机访问存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、可擦式可编程只读存储器(EPROM或闪存)、光纤、便携式紧凑磁盘只读存储器(CD-ROM)、光存储器件、磁存储器件、或者上述的任意合适的组合。在本公开中,计算机可读存储介质可以是任何包含或存储程序的有形介质,该程序可以被指令执行系统、装置或者器件使用或者与其结合使用。而在本公开中,计算机可读信号介质可以包括在基带中或者作为载波一部分传播的数据信号,其中承载了计算机可读的程序代码。这种传播的数据信号可以采用多种形式,包括但不限于电磁信号、光信号或上述的任意合适的组合。计算机可读信号介质还可以是计算机可读存储介质以外的任何计算机可读介质,该计算机可读信号介质可以发送、传播或者传输用于由指令执行系统、装置或者器件使用或者与其结合使用的程序。计算机可读介质上包含的程序代码可以用任何适当的介质传输,包括但不限于:电线、光缆、RF(射频)等等,或者上述的任意合适的组合。

[0203] 在一些实施方式中,客户端、服务器可以利用诸如HTTP(HyperText Transfer Protocol,超文本传输协议)之类的任何当前已知或未来研发的网络协议进行通信,并且可以与任意形式或介质的数字数据通信(例如,通信网络)互连。通信网络的示例包括局域网(“LAN”),广域网(“WAN”),网际网(例如,互联网)以及端对端网络(例如,ad hoc端对端网络),以及任何当前已知或未来研发的网络。

[0204] 上述计算机可读介质可以是上述电子设备中所包含的;也可以是单独存在,而未装配入该电子设备中。

[0205] 上述计算机可读介质承载有一个或者多个程序,当上述一个或者多个程序被该电子设备执行时,使得该电子设备:获取目标网格模型,其中,目标网格模型中包括多个单元及对应的物理量;

[0206] 根据多个单元的初始理论时间步长对多个单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个候选单元组以及多个单元的目标时间步长;

[0207] 针对每个候选单元组分别各自执行内部循环操作,内部循环操作包括如下步骤:

[0208] 将候选单元组作为目标单元组;

[0209] 按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量,直至监测到满足内部循环操作的完成条件时确定内部循环操作完成、或者监测到目标单元组满足组内分组条件时,对目标单元组所包括的目标单元进行多尺度分组和时间步长调整,得到不同尺度的多个新的目标单元组以及目标单元组所包括的目标单元的新的目标时间步长,并针对每个新的目标单元组分别各自返回按照目标单元组对应的目标时间步长,采用混合单元统一求解格式,计算目标单元组中所包括的目标单元在下一时间步的物理量的步骤。

[0210] 可以以一种或多种程序设计语言或其组合来编写用于执行本公开的操作的计算机程序代码,上述程序设计语言包括但不限于面向对象的程序设计语言—诸如Java、Smalltalk、C++,还包括常规的过程式程序设计语言—诸如“C”语言或类似的设计语言。程序代码可以完全地在用户计算机上执行、部分地在用户计算机上执行、作为一个独立的软件包执行、部分在用户计算机上部分在远程计算机上执行、或者完全在远程计算机或服务器上执行。在涉及远程计算机的情形中,远程计算机可以通过任意种类的网络—包括局域网(LAN)或广域网(WAN)—连接到用户计算机,或者,可以连接到外部计算机(例如利用因特网服务提供商来通过因特网连接)。

[0211] 附图中的流程图和框图,图示了按照本公开各种实施例的系统、方法和计算机程序产品的可能实现的体系架构、功能和操作。在这点上,流程图或框图中的每个方框可以代表一个模块、程序段、或代码的一部分,该模块、程序段、或代码的一部分包含一个或多个用于实现规定的逻辑功能的可执行指令。也应当注意,在有些作为替换的实现中,方框中所标注的功能也可以以不同于附图中所标注的顺序发生。例如,两个接连地表示的方框实际上可以基本并行地执行,它们有时也可以按相反的顺序执行,这依所涉及的功能而定。也要注意,框图和/或流程图中的每个方框、以及框图和/或流程图中的方框的组合,可以用执行规定的功能或操作的专用的基于硬件的系统来实现,或者可以用专用硬件与计算机指令的组合来实现。

[0212] 描述于本公开实施例中所涉及到的单元可以通过软件的方式实现,也可以通过硬件的方式来实现。其中,单元的名称在某种情况下并不构成对该单元本身的限定。

[0213] 本文中以上描述的功能可以至少部分地由一个或多个硬件逻辑部件来执行。例如,非限制性地,可以使用的示范类型的硬件逻辑部件包括:现场可编程门阵列(FPGA)、专用集成电路(ASIC)、专用标准产品(ASSP)、片上系统(SOC)、复杂可编程逻辑设备(CPLD)等等。

[0214] 在本公开的上下文中,机器可读介质可以是有形的介质,其可以包含或存储以供指令执行系统、装置或设备使用或与指令执行系统、装置或设备结合地使用的程序。机器可读介质可以是机器可读信号介质或机器可读储存介质。机器可读介质可以包括但不限于电子的、磁性的、光学的、电磁的、红外的、或半导体系统、装置或设备,或者上述内容的任何合适组合。机器可读存储介质的更具体示例会包括基于一个或多个线的电气连接、便携式计算机盘、硬盘、随机存取存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、可擦除可编程只读存储器(EPROM或快闪存储器)、光纤、便捷式紧凑盘只读存储器(CD-ROM)、光学储存设备、磁储存设备、或上述内容的任何合适组合。

[0215] 本公开实施例还提供一种计算机可读存储介质,所述存储介质中存储有计算机程

序,当所述计算机程序被处理器执行时可以实现上述任一实施例的方法,其执行方式和有益效果类似,在这里不再赘述。

[0216] 需要说明的是,在本文中,诸如“第一”和“第二”等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来,而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者设备中还存在另外的相同要素。

[0217] 以上所述仅是本公开的具体实施方式,使本领域技术人员能够理解或实现本公开。对这些实施例的多种修改对本领域的技术人员来说将是显而易见的,本文中所定义的一般原理可以在不脱离本公开的精神或范围的情况下,在其它实施例中实现。因此,本公开将不会被限制于本文所述的这些实施例,而是要符合与本文所公开的原理和新颖特点相一致的最宽的范围。

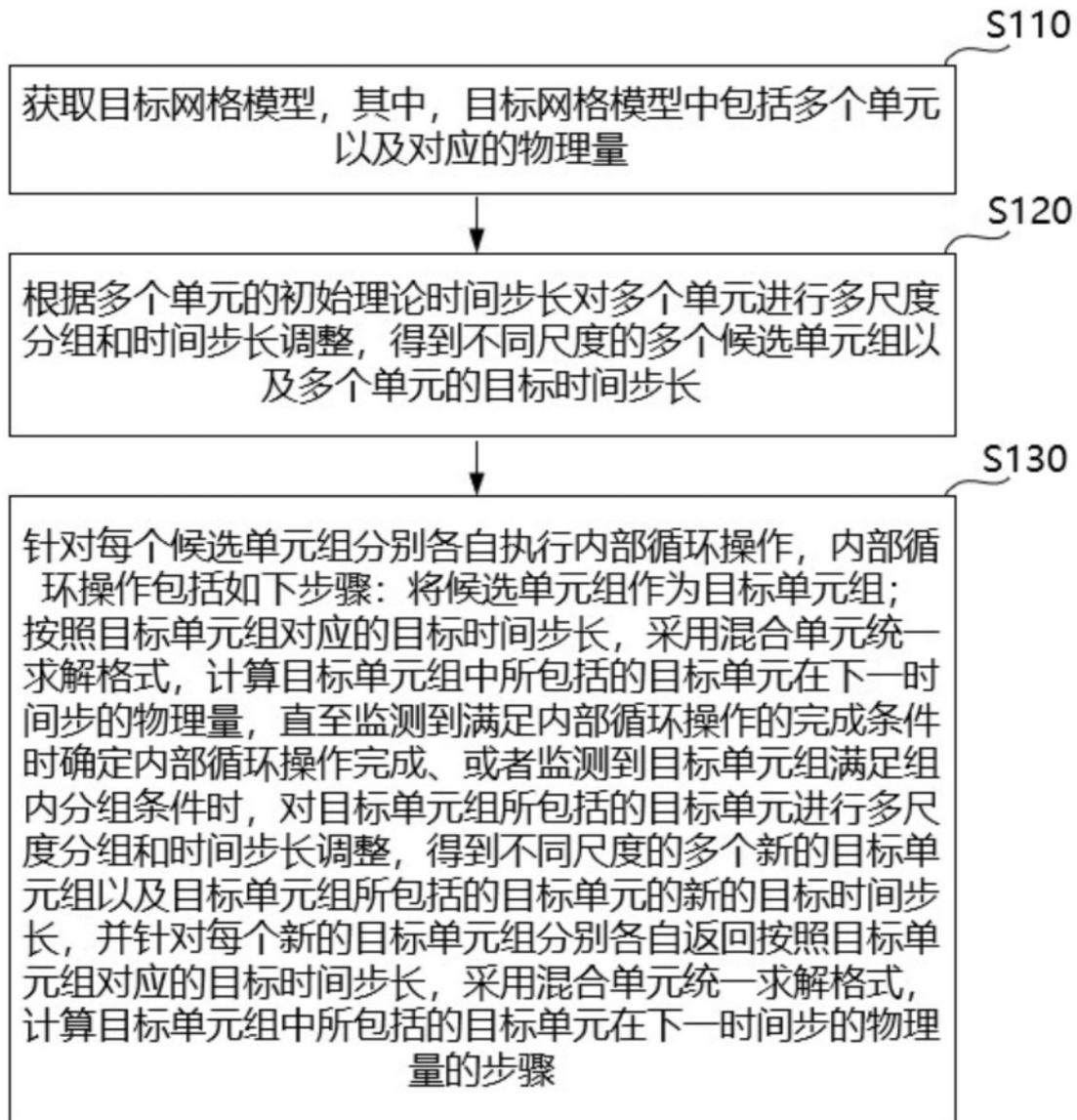


图1

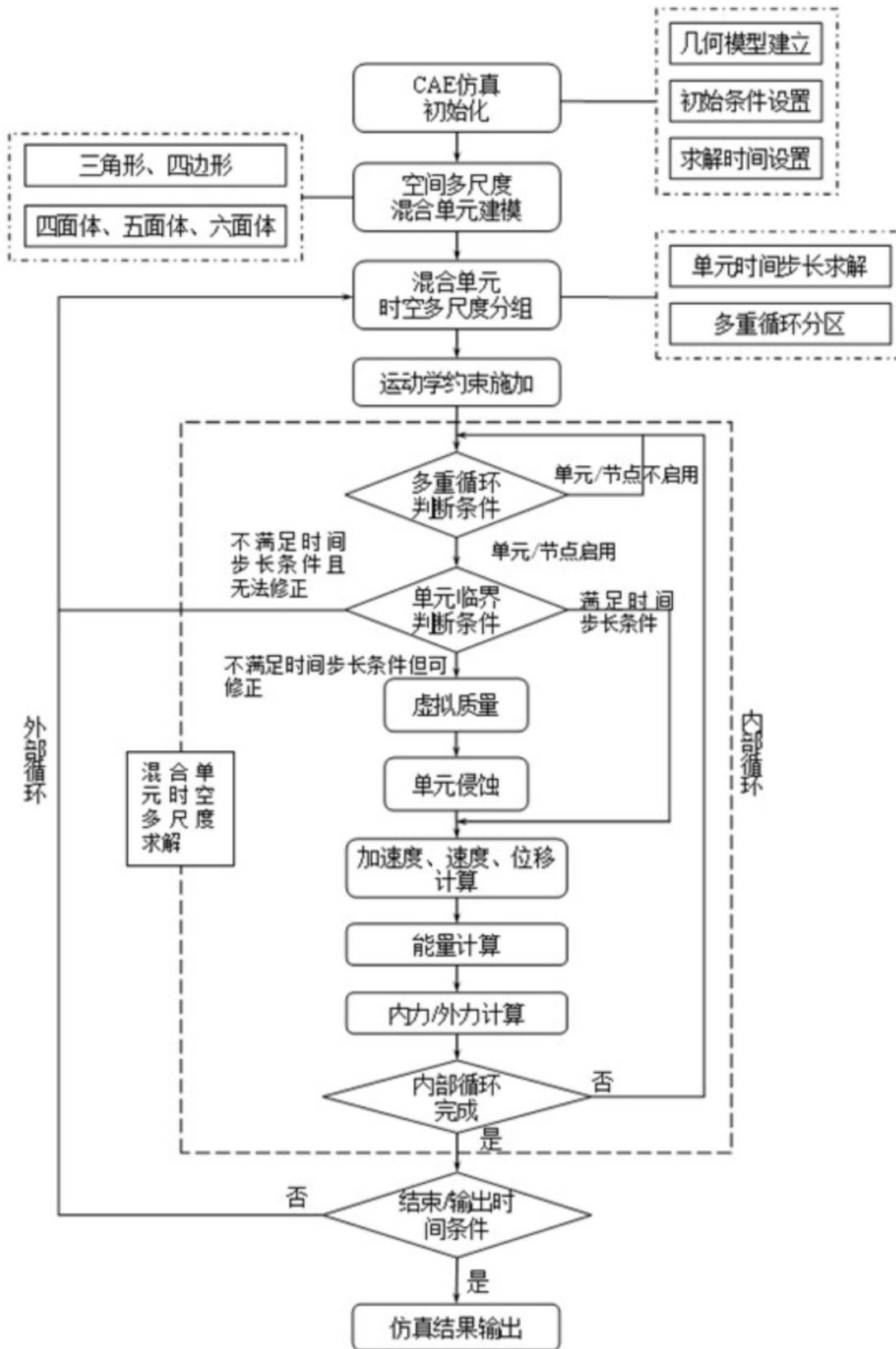


图2

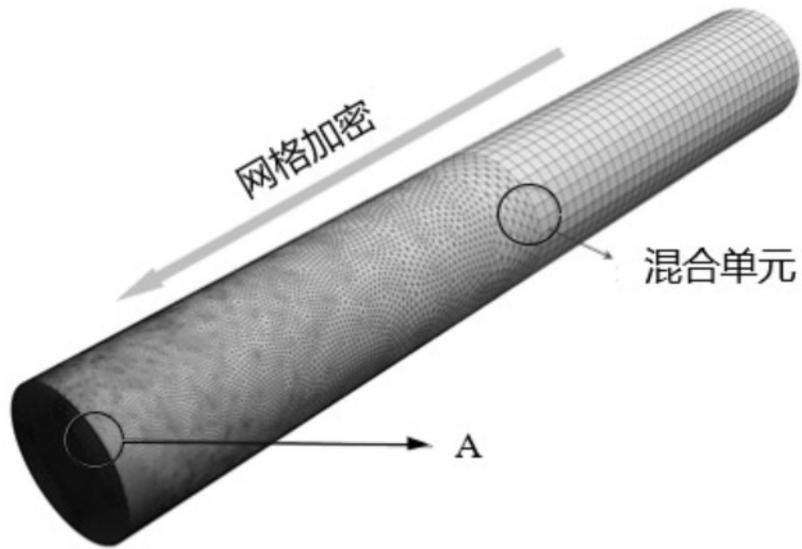


图3

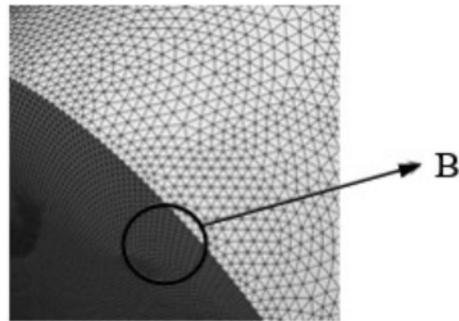


图4

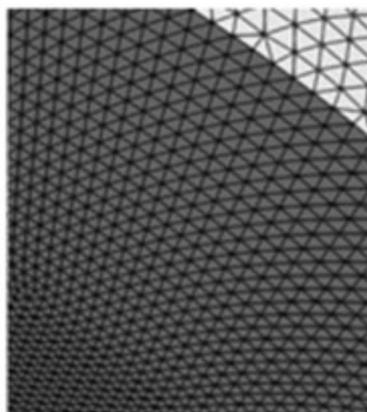


图5

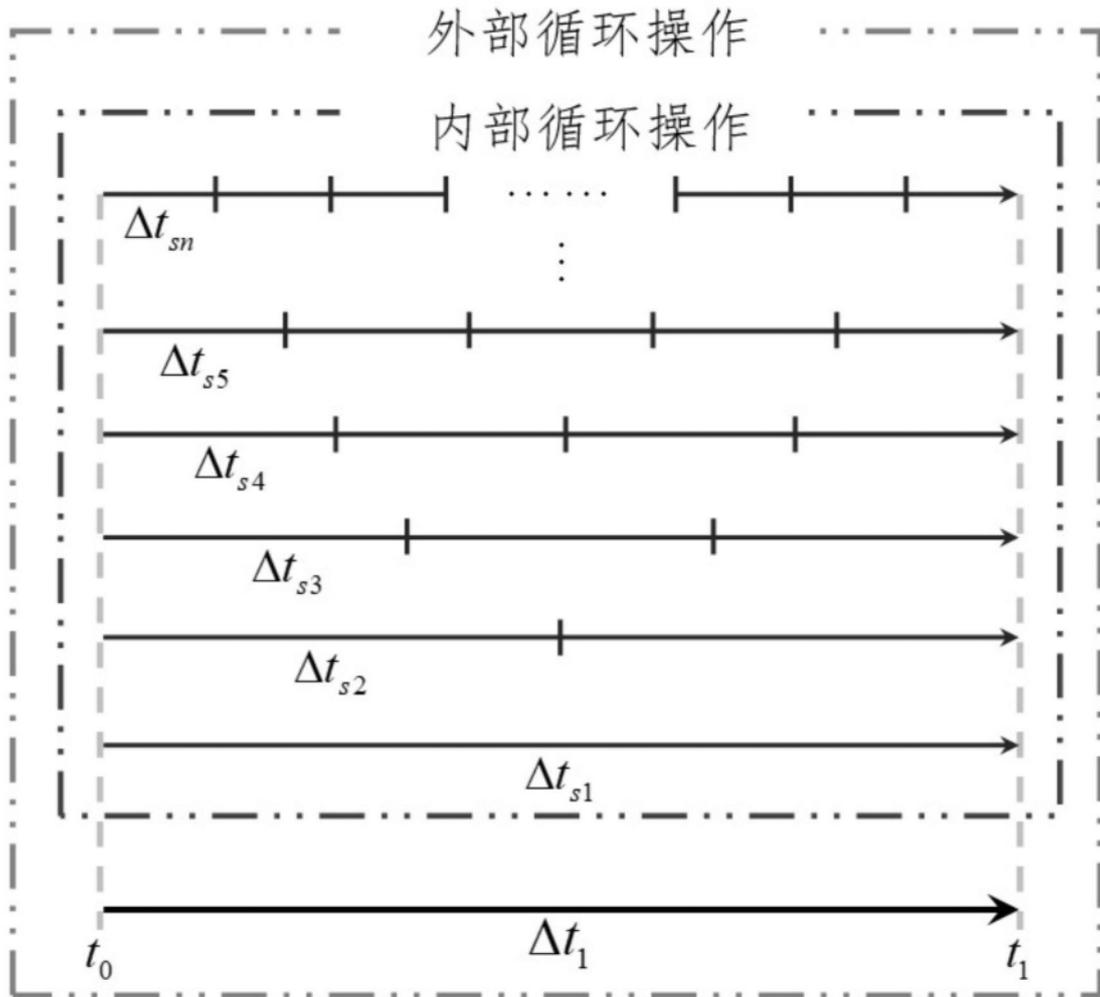


图6

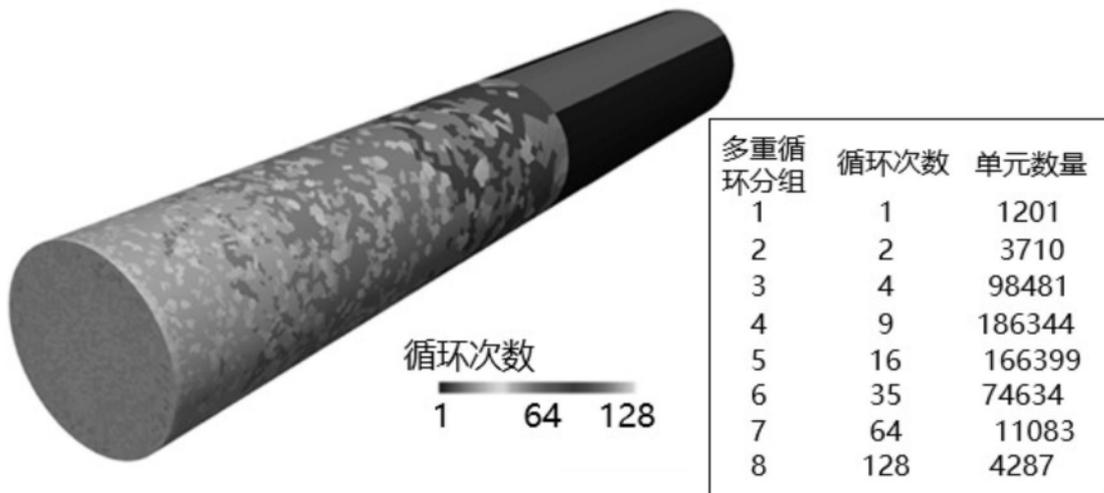


图7

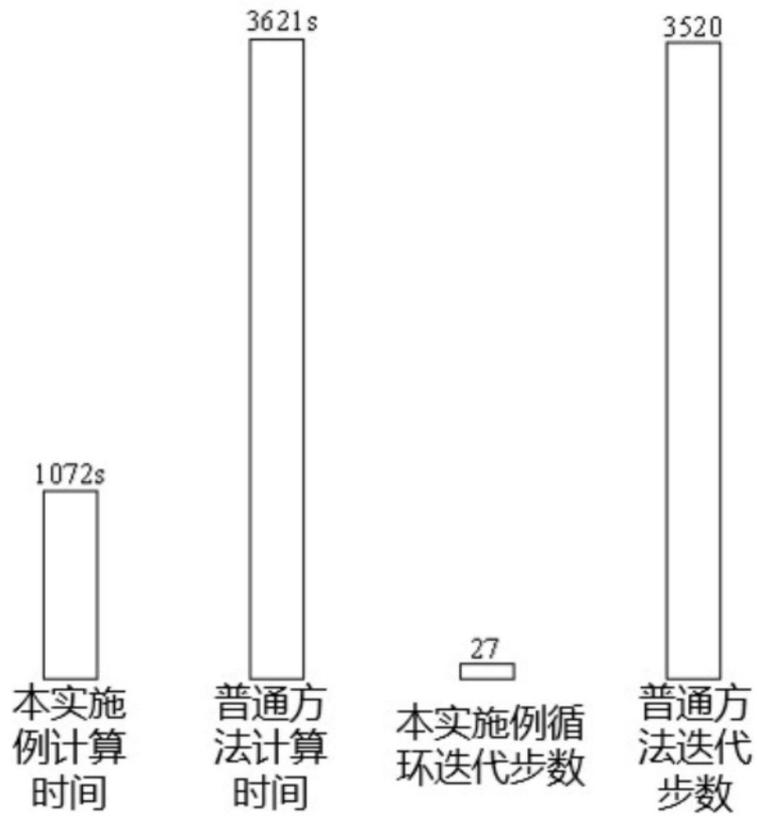


图8



图9

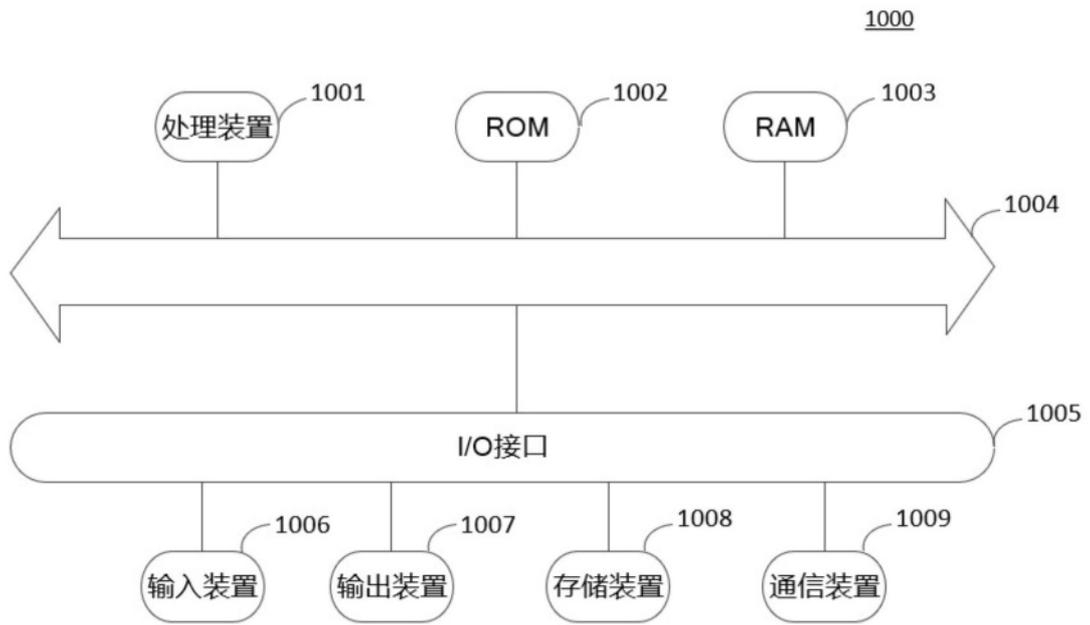


图10