



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110837685 A

(43)申请公布日 2020.02.25

(21)申请号 201910732408.0

(22)申请日 2019.08.09

(30)优先权数据

16/059,817 2018.08.09 US

(71)申请人 达索系统西姆利亚公司

地址 美国罗得岛

(72)发明人 N·克里希纳穆尔蒂 L·达莱西奥

张绕阳 陈沪东

(74)专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 周衡威

(51)Int.Cl.

G06F 30/20(2020.01)

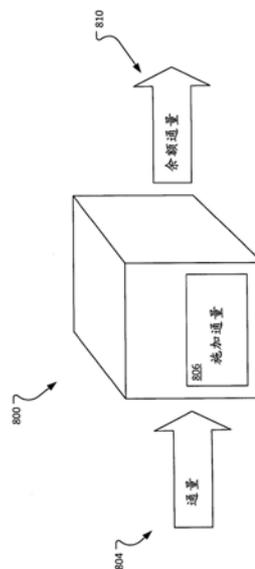
权利要求书2页 说明书11页 附图7页

(54)发明名称

提高稳定显式扩散的性能和准确性

(57)摘要

本发明涉及提高稳定显式扩散的性能和准确性。方法、计算机程序产品和系统可用于模拟物理过程。一种方法包括确定要施加于第一元素的输入通量。该方法包括确定施加通量,该施加通量是可以施加到第一元素而不会引起数值不稳定的通量的量。该方法包括确定余额通量,余额通量是输入通量与施加通量之间的差。该方法还包括将平衡通量提供给第二元素。



1. 一种用于模拟物理过程的计算机实现的方法,包括以下步骤:
确定要施加于第一元素的输入通量;
确定施加通量,所述施加通量是能够被施加到所述第一元素而不引起数值不稳定性的通量的量;
确定余额通量,所述余额通量是所述输入通量与所述施加通量之间的差;以及
将所述余额通量提供给第二元素。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述第二元素是基于标量梯度的方向确定的。
3. 如权利要求1所述的方法,还包括将所述余额通量的至少一部分提供给第三元素。
4. 根据权利要求1所述的方法,其中,确定要施加到所述第一元素的所述输入通量包括识别施加到所述第一元素的面中的每个面的热通量。
5. 根据权利要求4所述的方法,其中,确定施加通量包括确定将对应的热通量施加到所述面中的至少一个面将导致数值不稳定性。
6. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述物理过程是以下各项之一:诸如发动机的功率生成装备中的热流;涡轮机械中的热流;电磁机械中的热流;来自电子装备的废热管理;传感器和致动器的热管理和保护;热驱动应力和疲劳;热驱动机械冲击;固体中热驱动的化学变化;热驱动退磁;导体中的组合的电热产生和热流;半导体中的热产生和传导;热电设备中的热流和电流;热驱动尺寸变化;散热片;热交换器中的固体传导;单相和相变材料中的热能储存;诸如PCB、轮胎和钢筋混凝土的复杂结构中的详细热流;用于汽车上的发动机缸体、传感器、反应器、方向盘、汽车座椅和电池的电加热器;用于汽车挡风玻璃和视镜除冰和除霜的电加热器;在制造和操作中通过车辆结构的热量传导。
7. 一种存储指令的非暂时性计算机可读介质,所述指令在被执行时使计算机处理器执行包括以下各项的操作:
确定要施加于第一元素的输入通量;
确定施加通量,所述施加通量是能够被施加到所述第一元素而不引起数值不稳定性的通量的量;
确定余额通量,所述余额通量是所述输入通量与所述施加通量之间的差;以及
将所述余额通量提供给第二元素。
8. 如权利要求7所述的非暂时性计算机可读介质,其中,所述第二元素是基于标量梯度的方向确定的。
9. 如权利要求7所述的非暂时性计算机可读介质,还包括将所述余额通量的至少一部分提供给第三元素。
10. 根据权利要求7所述的非暂时性计算机可读介质,其中,确定要施加到所述第一元素的所述输入通量包括识别施加到所述第一元素的面中的每个面的热通量。
11. 根据权利要求10所述的非暂时性计算机可读介质,其中,确定施加通量包括确定将对应的热通量施加到所述面中的至少一个面将导致数值不稳定性。
12. 如权利要求7所述的非暂时性计算机可读介质,其中,所述物理过程是以下各项之一:诸如发动机的功率生成装备中的热流;涡轮机械中的热流;电磁机械中的热流;来自电子装备的废热管理;传感器和致动器的热管理和保护;热驱动应力和疲劳;热驱动机械冲击;固体中热驱动的化学变化;热驱动退磁;导体中的组合的电热产生和热流;半导体中的

热产生和传导;热电设备中的热流和电流;热驱动尺寸变化;散热片;热交换器中的固体传导;单相和相变材料中的热能储存;诸如PCB、轮胎和钢筋混凝土的复杂结构中的详细热流;用于汽车上的发动机缸体、传感器、反应器、方向盘、汽车座椅和电池的电加热器;用于汽车挡风玻璃和视镜除冰和除霜的电加热器;在制造和操作中通过车辆结构的热量传导。

13. 一种用于模拟物理过程的系统,包括一个或多个处理设备和存储指令的一个或多个硬件存储设备,所述指令在由所述一个或多个处理设备执行时能够操作以使所述一个或多个处理设备执行包括以下各项的操作:

确定要施加于第一元素的输入通量;

确定施加通量,所述施加通量是能够被施加到所述第一元素而不引起数值不稳定性的通量的量;

确定余额通量,所述余额通量是所述输入通量与所述施加通量之间的差;以及
将所述余额通量提供给第二元素。

14. 如权利要求13所述的系统,其中,所述第二元素是基于标量梯度的方向确定的。

15. 如权利要求13所述的系统,还包括将所述余额通量的至少一部分提供给第三元素。

16. 根据权利要求13所述的系统,其中,确定要施加到所述第一元素的所述输入通量包括识别施加到所述第一元素的面中的每个面的热通量。

17. 根据权利要求16所述的系统,其中,确定施加通量包括确定将对应的热通量施加到所述面中的至少一个面将导致数值不稳定性。

18. 如权利要求13所述的系统,其中,所述物理过程是以下各项之一:诸如发动机的功率生成装备中的热流;涡轮机械中的热流;电磁机械中的热流;来自电子装备的废热管理;传感器和致动器的热管理和保护;热驱动应力和疲劳;热驱动机械冲击;固体中热驱动的化学变化;热驱动退磁;导体中的组合的电热产生和热流;半导体中的热产生和传导;热电设备中的热流和电流;热驱动尺寸变化;散热片;热交换器中的固体传导;单相和相变材料中的热能储存;诸如PCB、轮胎和钢筋混凝土的复杂结构中的详细热流;用于汽车上的发动机缸体、传感器、反应器、方向盘、汽车座椅和电池的电加热器;用于汽车挡风玻璃和视镜除冰和除霜的电加热器;在制造和操作中通过车辆结构的热量传导。

提高稳定显式扩散的性能和准确性

背景技术

[0001] 已经通过在表示宏观物理量(例如,密度、温度、流动速度)的变量的许多离散空间位置中的每一个处执行高精度浮点算术运算而生成Navier-Stokes微分方程的离散化解来模拟高雷诺数(Reynolds number)流。另一种方法用通常称为晶格气体(或细胞)自动机的方法取代微分方程,其中通过求解Navier-Stokes方程而提供的宏观水平模拟被微观水平模型取代,该微观水平模型对在晶格上的站点之间移动的粒子执行操作。

发明内容

[0002] 通常,本说明书中描述的主题的一个创新方面可以体现在包括确定要施加于第一元素的输入通量的动作的方法中。该方法包括确定施加通量的动作,施加通量是可以被施加到第一元素而不会导致数值不稳定性的通量的量。该方法包括确定余额通量的动作,余额通量是输入通量与施加通量之间的差。该方法还包括将余额通量提供给第二元素的动作。

[0003] 该方面的其他实施例包括对应的计算机系统、装置和记录在一个或多个计算机存储设备上的计算机程序,每一者被配置为执行方法的动作。一个或多个计算机的系统可以被配置为通过在系统上安装软件、固件、硬件或它们的组合来执行特定操作或动作,这些软件、固件、硬件或它们的组合在操作中导致或使得系统执行这些动作。一个或多个计算机程序可以被配置为通过包括当由数据处理装置执行时使装置执行这些动作的指令来执行特定操作或动作。

[0004] 前述和其他实施例可以各自可选地包括以下特征中的一个或多个、单独或组合。可以基于标量梯度的方向来确定第二元素。一种方法可以包括将余额通量的至少一部分提供给第三元素的动作。确定要施加到第一元素的输入通量可以包括识别施加到第一元素的每个面的热通量。确定施加通量可以包括确定将对应的热通量施加到至少一个面将导致数值不稳定性。物理过程可以是以下各项之一:功率生成装备(如发动机)中的热流;涡轮机械中的热流;电磁机械中的热流;电子装备的废热管理;传感器和致动器的热管理和保护;热驱动应力和疲劳;热驱动机械冲击;固体中热驱动的化学变化;热驱动退磁;导体中的组合的电产生和热流;半导体中的热产生和传导;热电设备中的热流和电流;热驱动尺寸变化;散热片;热交换器中的固体传导;单相和相变材料中的热能储存;诸如PCB、轮胎和钢筋混凝土的复杂结构中的详细热流;用于汽车上的发动机缸体、传感器、反应器、方向盘、汽车座椅和电池的电加热器;用于汽车挡风玻璃和视镜除冰和除霜的电加热器;在制造和操作中通过车辆结构的热量传导。

[0005] 在附图和以下描述中阐述了本说明书中描述的主题的一个或多个实施例的细节。根据说明书、附图和权利要求,本主题的其他特征、方面和优点将变得清楚。

附图说明

[0006] 图1和2示出了两个LBM模型的速度分量。

- [0007] 图3是物理过程模拟系统遵循的过程的流程图。
 [0008] 图4是微观块的透视图。
 [0009] 图5A和5B是图3的系统使用的晶格结构的图示。
 [0010] 图6和7示出了可变分辨率技术。
 [0011] 图8示出了将元素的热通量分成施加通量和余额通量的示例。
 [0012] 图9示出了跨多个元素相继发送余额通量的示例。
 [0013] 图10示出了在施加热通量期间的元素1000。
 [0014] 各附图中相同的附图标记和名称表示相同的元素。

具体实施方式

- [0015] 本发明涉及物理过程(例如流体流动)的计算机模拟。
 [0016] 在基于LBM的物理过程模拟系统中,流体流可以由按离散速度的集合 c_i 进行评估的分布函数值 f_i 表示。分布函数的动力学是由以下方程支配的,其中 $f_i(0)$ 已知为平衡分布函数,其被定义为:

$$[0017] \quad f_{\alpha}^{(0)} = w_{\alpha} \rho \left[1 + u_{\alpha} + \frac{u_{\alpha}^2 - u^2}{2} + \frac{u_{\alpha}(u_{\alpha}^2 - 3u^2)}{6} \right]$$

[0018] 这个方程是描述分布函数 f_i 的时间演化的众所周知的晶格玻尔兹曼方程。左手侧表示由于所谓的“流化过程”造成的分布的变化。流化过程是一块流体在网格位置出发,然后沿其中一个速度向量移动到下一个网格位置的时候。在那个点,计算“碰撞算子”,即,附近流体块对出发的流体块的影响。流体只能移动到另一个网格位置,因此速度向量的适当选择是必要的,使得所有速度的所有分量都是共同速率(common speed)的倍数。

[0019] 第一个方程的右手侧是上面提到的“碰撞算子”,其表示由于流体块之间的碰撞造成的分布函数的变化。这里使用的碰撞算子的特定形式归功于Bhatnagar、Gross和Krook(BGK)。它迫使分布函数去向由第二个方程给出的规定值,其中第二个方程是“平衡”形式。

[0020] 根据这个模拟,常规的流体变量,诸如质量 ρ 和流体速度 u ,作为简单求和而被获得。这里, c_i 和 w_i 的集合值定义LBM模型。LBM模型可以高效地在可扩展计算机平台上实现并且对于时间不恒定流和复杂的边界条件以最大的健壮性运行。

[0021] 从玻尔兹曼方程获得用于流体系统的运动的宏观方程的标准技术是Chapman-Enskog方法,在该方法中采取全玻尔兹曼方程的逐次逼近。

[0022] 在流体系统中,密度的小扰动以声速行进。在气体系统中,声速一般由温度确定。流体中可压缩性的效果的重要性是由特征速度与声速的比来测量的,该比被称为马赫数。

[0023] 参考图1,第一模型(2D-1) 100是包括21个速度的二维模型。在这21个速度中,一个速度(105)表示不移动的粒子;三组四个速度表示在沿晶格的x或y轴的正方向或负方向以归一化速率(r) (110-113)、归一化速率的两倍($2r$) (120-123)或归一化速率的三倍($3r$) (130-133)移动的粒子;以及两组四个速度表示相对于x和y晶格轴二者以归一化速率(r) (140-143)或归一化速率的两倍($2r$) (150-153)移动的粒子。

[0024] 还如图2中所示,第二模型(3D-1) 200是包括39个速度的三维模型,其中每个速度由图2的箭头之一表示。在这39个速度中,一个速度表示不移动的粒子;三组六个速度表示

在沿晶格的x、y或z轴的正方向或负方向以归一化速率(r)、归一化速率的两倍(2r)或归一化速率的三倍(3r)移动的粒子;八个速度表示相对于x、y、z晶格轴当中的全部三个晶格轴以归一化速率(r)移动的粒子;以及十二个速度表示相对于x、y、z晶格轴当中的两个晶格轴以归一化速率的两倍(2r)移动的粒子。

[0025] 也可以使用更复杂的模型,诸如包括101个速度的3D-2模型以及包括37个速度的2D-2模型。如表1和表2中分别记载的那样,通过沿每个轴的速度分量来更清楚地描述速度。

[0026] 对于三维模型3D-2,在101个速度中,一个速度表示不移动的粒子(组1);三组六个速度表示在沿晶格的x、y或z轴的正方向或负方向以归一化速率(r)、归一化速率的两倍(2r)或归一化速率的三倍(3r)移动的粒子(组2、4和7);三组八个速度表示相对于x、y、z晶格轴当中的全部三个晶格轴以归一化速率(r)、归一化速率的两倍(2r)或归一化速率的三倍(3r)移动的粒子(组3、8和10);十二个速度表示相对于x、y、z晶格轴当中的两个晶格轴以归一化速率的两倍(2r)移动的粒子(组6);二十四速度表示相对于x、y、z晶格轴的当中两个晶格轴以归一化速率(r)和归一化速率的两倍(2r)移动并且不相对于剩下的轴移动的粒子(组5);以及二十四速度表示相对于x、y、z晶格轴当中的两个晶格轴以归一化速率(r)移动并且相对于剩下的轴以归一化速率的三倍(3r)移动的粒子(组9)。

[0027] 对于二维模型2D-2,在37个速度中,一个速度表示不移动的粒子(组1);三组四个速度表示在沿晶格的x或y轴的正或负方向以归一化速率(r)、归一化速率的两倍(2r)或归一化速率的三倍(3r)移动的粒子(组2、4和7);两组四个速度表示相对于x晶格轴和y晶格轴二者以归一化速率(r)或归一化速率的两倍(2r)移动的粒子;八个速度表示相对于x晶格轴和y晶格轴之一以归一化速率(r)移动并且相对于另一个轴以归一化速率的两倍(2r)移动的粒子;以及八个速度表示相对于x晶格轴和y晶格轴之一以归一化速率(r)移动并且相对于另一个轴以归一化速率的三倍(3r)移动的粒子。

[0028] 上述LBM模型在二维和三维中为流的数值模拟提供了特定类的高效且健壮的离散速度动力学模型。这种类型的模型包括离散速度的特定集合和与那些速度关联的权重。这些速度与速度空间中的笛卡尔坐标的网格点相符,这便于离散速度模型(尤其是被称为晶格玻尔兹曼模型的种类)的准确和高效实现。利用这种模型,流可以以高保真度被模拟。

[0029] 参考图3,物理过程模拟系统根据过程300操作以模拟诸如流体流动的物理过程。在流动模拟之前,将模拟空间建模(步骤302)作为体元的集合。通常,使用计算机辅助设计(CAD)程序生成模拟空间。例如,CAD程序可以用于绘制位于风洞中的微器件。此后,处理由CAD程序产生的数据以添加具有适当分辨率的晶格结构,并考虑模拟空间内的对象和表面。

[0030] 晶格的分辨率可以基于正在被模拟的系统的雷诺数(Reynolds number)来选择。雷诺数涉及流的粘度(ν)、流中的对象的特征长度(L)和流的特征速度(u):

$$[0031] \quad Re = uL/\nu$$

[0032] 对象的特征长度表示对象的大尺度特征。例如,如果微型设备周围的流正在被模拟,则该微型设备的高度可以被认为是特征长度。当对象的小区域(例如,汽车的侧视镜)周围的流是所关心的时,模拟的分辨率可以增加,或者增加分辨率的区域可以在所关心的区域周围被采用。体元的维度随着晶格的分辨率增加而减小。

[0033] 状态空间被表示为 $f_i(x, t)$,其中 f_i 表示在时间t在由三维向量x表示的晶格位点处在状态i下的每单位体积的元素或粒子的数量(即,状态i下的粒子的密度)。对于已知的时

间增量,粒子的数量被简称为 $f_i(x)$ 。晶格位点的所有状态的组合被表示为 $f(x)$ 。

[0034] 状态的数量由每个能级内可能的速度向量的数量来确定。速度向量由具有三个维度 x 、 y 和 z 的空间中的整数线性速率组成。对于多种属模拟,状态的数量增加。

[0035] 每个状态 i 表示处于特定能级(即,能级零、一或二)的不同速度向量。每个状态的速度 c_i 利用其在三个维度当中的每一个维度中的“速率”指示如下:

$$[0036] \quad c_i = (c_{ix}, c_{iy}, c_{iz})$$

[0037] 能级零状态表示在任何维度都不移动的停止的粒子,即, $c_{\text{stopped}} = (0, 0, 0)$ 。能级一状态表示在三个维度之一中具有 ± 1 速率并且在其它两个维度中具有零速率的粒子。能级二状态表示在所有三个维度中都具有 ± 1 速率、或者在三个维度之一中具有 ± 2 速率并且在其它两个维度中具有零速率的粒子。

[0038] 生成三个能级的所有可能的排列给出总共39个可能的状态(一个能量零状态、6个能量一状态、8个能量三状态、6个能量四状态、12个能量八状态和6个能量九状态)。

[0039] 每个体元(即,每个晶格位点)由状态向量 $f(x)$ 表示。该状态向量完全定义体元的状态并且包括39个条目。这39个条目对应于一个能量零状态、6个能量一状态、8个能量三状态、6个能量四状态、12个能量八状态和6个能量九状态。通过使用这个速度集合,系统可以对实现的平衡状态向量产生麦克斯韦-玻尔兹曼(Maxwell-Boltzmann)统计。

[0040] 为了处理效率,体元被分组在被称为微观块的 $2 \times 2 \times 2$ 的体积中。微观块被组织成允许体元的并行处理并且最小化与数据结构关联的开销。微观块中用于体元的速记符号被定义为 $N_i(n)$,其中 n 表示微观块中晶格位点的相对位置并且 $n \in \{0, 1, 2, \dots, 7\}$ 。微观块在图4中示出。

[0041] 参考图5A和5B,表面 S (图5A)在模拟空间(图5B)中被表示为面元 F_α 的集合:

$$[0042] \quad S = \{F_\alpha\}$$

[0043] 其中 α 是列举特定面元的索引。面元不限于体元的边界,但是通常具有量级为与该面元相邻的体元的尺寸的尺寸,或者具有稍小于与该面元相邻的体元的尺寸的尺寸,以使得面元影响相对少量的体元。为了实现表面动力学,向面元分配属性。具体地,每个面元 F_α 具有单位法线(n_α)、表面积(A_α)、中心位置(x_α)和描述面元的表面动态属性的面元分布函数($f_i(\alpha)$)。总能量分布函数 $q_i(\alpha)$ 以与面元和体元相互作用的流动分布相同的方式处理。

[0044] 参考图6,不同的分辨率水平可以在模拟空间的不同区域中使用,以提高处理效率。通常,对象655周围的区域650是最关心的并且因此利用最高分辨率进行模拟。因为粘度的影响随着离对象的距离而减小,所以采用降低的分辨率水平(即,扩大的体元体积)来模拟在离对象655按增加的距离隔开的区域660、665。类似地,如图7中所示,较低分辨率水平可以被用来模拟对象775的较不显著特征周围的区域770,而最高的分辨率水平被用来模拟对象775的最显著特征(例如,前沿和后缘表面)周围的区域780。边远区域785利用最低分辨率水平和最大的体元来模拟。

[0045] 识别受面元影响的体元

[0046] 再次参考图3,一旦模拟空间已经被建模(步骤302),受一个或多个面元影响的体元就被识别(步骤304)。体元可以以多种方式受面元影响。首先,被一个或多个面元相交的体元受影响在于:该体元相对于非相交的体元具有减小的体积。这会发生是因为面元以及在由该面元表示的表面下面的材料占据了体元的一部分。分数因子 $P_f(x)$ 指示体元的不受

面元影响的部分(即,可以被流体或为对其模拟流的其它材料占据的部分)。对于非相交体元, $P_f(x)$ 等于1。

[0047] 通过将粒子传送到面元或者从面元接收粒子而与一个或多个面元交互的体元也被识别为受面元影响的体元。被面元相交的所有体元都将包括从面元接收粒子的至少一个状态以及向面元传送粒子的至少一个状态。在大多数情况下,附加的体元也将包括这种状态。

[0048] 执行模拟

[0049] 一旦受一个或多个面元影响的体元被识别(步骤304),定时器就被初始化,以开始模拟(步骤306)。在模拟的每个时间增量期间,粒子从体元到体元的移动由说明粒子与表面面元的相互作用的平流阶段模拟(步骤308-316)。接下来,碰撞阶段(步骤318)模拟每个体元内粒子的相互作用。其后,定时器递增(步骤320)。如果递增后的定时器不指示模拟完成(步骤322),则平流阶段和碰撞阶段(步骤308-320)重复。如果递增后的计时器指示模拟已完成(步骤322),则模拟的结果被存储和/或显示(步骤324)。

[0050] 标量扩散

[0051] 由于在传导传热、质量扩散、电传导等方面的应用,对扩散主导的物理现象的数值模拟非常普遍。这些现象的支配方程被公式化为一组偏微分方程(PDE),其包含不稳定的扩散和体积源项。数值求解涉及对感兴趣的区域进行离散化,然后利用时间积分技术来在时间上推进求解。空间离散化通常使用高度自动化的网格生成工具来完成,而时间离散化(时间步子大小)需要仔细选择,从而以可接受的数值成本来确保数值解的稳定性和准确性。具体而言,时间推进方案(time-marching scheme)的稳定性特征(Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 约束)确定了在不使解不稳定的情况下可以使用的最大时间步子大小。通常采用两种类型的时间推进方案——隐式的和显式的。一方面,隐式方法通过构造来满足CFL约束,因此可以使用大的时间步子而不使解不稳定(然而,太大的时间步子通常导致不准确的结果)。隐式方法需要求解大的矩阵系数系统,因此使得它们的实现方案既是非平凡的(non-trivial)又计算成本高。另一方面,显式方法实现起来非常简单、(每次迭代)计算成本低廉并且可高度并行化,但需要满足严格的CFL约束。对显式扩散方案的这种约束规定由 $\kappa \Delta_t / \Delta_x^2$ 给出的CFL数小于某一限制(其是0(1)的),其中 κ 是扩散系数, Δ_x 是最小的空间网格的大小并且 Δ_t 是时间步子大小。换句话说,如果空间网格尺寸 Δ_x 在域中的任何地方按照因子F减小,则时间步子大小 Δ_t 将必须按照 F^2 减小以便维持数值稳定性。因此,对于具有小尺寸元素的空间网格,显式方法可能需要极小的时间步子大小,这严重影响模拟性能。即使在模拟域中这种小尺寸元素的数量非常有限,也是如此——整个域中的最小元素决定了CFL条件,因此决定了时间步子大小。对于涉及复杂几何形状的实际问题,使用不规则网格对于表面和体积离散化是不可避免的。在这些网格上, Δ_x 可能显著变化,并且由于CFL约束所需的极小的时间步子大小,显式方案的使用可能变得非常低效。因此,显式方案实践者花费大量的时间和精力来尝试提高空间网格的质量,以试图缓解问题。即便如此,从真实几何形状的任何离散化中去除所有小尺寸元素几乎是不可能的,因此小的时间步子大小(至少局部地)是使得解稳定的唯一方法。

[0052] 用于显式方案的改进扩散

[0053] 为了克服上述用于不规则网格上的扩散问题的显式方案的缺陷,当两个相邻元素

中的至少一个元素否则会违反CFL约束时,对两个相邻元素之间的通量计算引入新的修改。如下所述,这些修改取决于这两个元素的材料和几何特性以及元素附近的感兴趣的量(quantity)的状态,并且这些修改有助于稳定数值解而不管两个元素的大小如何,并确保时空准确性。当两个相邻元素很大(因此满足CFL约束)时,通量计算缩减到教科书实现方案,这意味着所描述的方法是标准方法的一致扩展。

[0054] 假定是显式欧拉(Euler)方案和有限体积公式。在下面的例子中,感兴趣的量是温度并且支配方程是热传导方程,但是,应该理解任何标量都可以与适当的支配方程一起使用。数值方案需要计算元素所有面处的热通量。随后,将这些通量相加并用于更新所考虑的元素温度。考虑两个面共享相邻元素 α 和 β 。根据热传导的傅立叶定律(Fourier's law),热通量为:

$$[0055] \quad q_m^{\beta \rightarrow \alpha} = k_m^{\alpha\beta} \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_m^{\alpha\beta} \quad (1)$$

[0056] 其中 $k_m^{\alpha\beta}$ 是公共面的热导率, $\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_m^{\alpha\beta}$ 是垂直于公共面的温度梯度,“m”用于指定这

些量是在时间步子“m”处评估的。由于考虑的是进入 α 的热量(而不是离开 α 的热量),所以傅立叶定律的常用形式中的负号被舍弃。计算此处使用的温度梯度以确保平滑度,尤其是在存在不同大小的元素的情况下。如果两个相邻元素 α 和 β 满足CFL约束,则通过将热通量乘以公共面的面积 $A^{\alpha\beta}$ 和时间步子大小 Δt ,来得到在时间步子m到m+1期间跨公共面的能量传递,即:

$$[0057] \quad Q_m^{\beta \rightarrow \alpha} = q_m^{\beta \rightarrow \alpha} A^{\alpha\beta} \Delta t \quad (2)$$

[0058] 在传统方法中,时间步子结束时元素 α 的最终温度是根据到 α 的净能量传递(来自所有面的能量传递的总和)来计算的:

$$[0059] \quad T_{m+1}^\alpha = T_m^\alpha + \frac{1}{\rho_m^\alpha c_p^\alpha \forall^\alpha} \sum_i q_m^{\beta_i \rightarrow \alpha} A^{\alpha\beta} \Delta t \quad (3)$$

[0060] 我们注意到上面的方程(3)表明温度变化与净热通量成比例并且与元素的大小 \forall^α 成反比,即,对于小元素,相同的净能量传递导致更大的温度变化。

[0061] 当时间步长 Δt 足够大以至于违反两个元素中的至少一个元素的CFL约束时,上述形式可能导致数值不稳定性。在元素 α 小于元素 β 的情形中,至少对于元素 α 违反了CFL约束。这种数值不稳定性的产生是因为,对于元素 α (我们假设它的尺寸很小),假定用于计算 $q_m^{\beta_i \rightarrow \alpha}$ 的温度梯度在时间步长 Δt 的整个持续时间内保持为恒定值是不正确的。如上所述,对于相同的净能量传递,小元素的温度变化较大,因此标准显式时间积分要求减小时间步长以确保恒定温度梯度假设是有效的。显然,对于给定的 Δt ,只要该问题中存在不稳定性,这个问题就会持续存在,并且该问题仅在每个元素上的所有传入和传出通量完全相互平衡时的稳定状态下才会消失。

[0062] 作为新方法的一部分,我们提出将方程(1)中定义的项 $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}$ 细分为两部分:(1)

施加通量 $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}$ app, 其将被用于 α 的温度演变 (在上述总和中), 以及 (2) 余额通量 $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}$ bal, 其将在不改变元素 α 的温度的情况下被传递到界面 $\alpha\beta$ 的另一侧。

[0063] 图8示出了将元素的热通量分成施加通量和余额通量的示例。元素800接收热通量, 如箭头802所示。常规上, 热通量804将完全施加到元素800, 导致违反CFL约束并导致不稳定性。在该示例中, 热通量804被分成施加通量806和余额通量810。从概念上讲, 施加通量806是可以施加到元素800而不违反CFL约束的热通量的量。余额通量808是热通量804和施加通量806之间的差。

[0064] 施加通量806被施加到元素800。在接收来自元素800的热通量时, 余额通量被传递到下游元素 (如箭头808a-c所示)。

[0065] 在一些实施方案中, 余额通量可以在施加通量被施加到元素800的时间步子之后的时间步子中被施加到下游元素。即, 如果施加通量在时间 $t=1$ 处被施加到元素800, 则可以在 $t>1$ 的某个时间处将余额通量施加到下游元素。

[0066] 热通量项 $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}$ 可以被表示如下:

[0067]

$$q_m^{\beta \rightarrow \alpha} \text{ app} = q_m^{\beta \rightarrow \alpha} \left[\frac{1 - \exp(-C_m^{\alpha\beta} \Delta t)}{C_m^{\alpha\beta} \Delta t} \right] + \Delta G \left[\frac{1 - \exp(-C_m^{\alpha\beta} \Delta t)}{(C_m^{\alpha\beta} \Delta t)^2} - \frac{1}{C_m^{\alpha\beta} \Delta t} \right] \quad (4)$$

[0068] 其中, 项 $C_m^{\alpha\beta}$ 和 ΔG 由下式给出:

$$C_m^{\alpha\beta} = \frac{k_m^{\alpha\beta} A^{\alpha\beta}}{d^{\alpha\beta}} \left(\frac{1}{\rho_m^{\alpha} C_p^{\alpha} \nabla^{\alpha}} + \frac{1}{\rho_m^{\beta} C_p^{\beta} \nabla^{\beta}} \right) \quad (5)$$

$$\Delta G = \frac{k_m^{\alpha\beta}}{d^{\alpha\beta}} \left(\frac{\sum_{\gamma=\beta} q_{OLD}^{\gamma \rightarrow \alpha} A^{\alpha\gamma}}{\rho_m^{\alpha} C_p^{\alpha} \nabla^{\alpha}} + \frac{\sum_{\gamma=\alpha} q_{OLD}^{\gamma \rightarrow \beta} A^{\beta\gamma}}{\rho_m^{\beta} C_p^{\beta} \nabla^{\beta}} \right) \quad (6)$$

[0071] 并且

$$q_m^{\beta \rightarrow \alpha} \text{ bal} = q_m^{\beta \rightarrow \alpha} - q_m^{\beta \rightarrow \alpha} \text{ app} \quad (7)$$

[0073] 在上述方程中, 几何特征由用于计算温度梯度的距离 $d^{\alpha\beta}$ 、元素体积 ∇^{α} 和 ∇^{β} 、以及公共面的面积 $A^{\alpha\beta}$ 表示。材料性质由 $\rho_m^{\alpha} C_p^{\alpha}$ 和 $\rho_m^{\beta} C_p^{\beta}$ (此处 ρ 表示密度并且 C_p 表示比热) 以及导热系数 $k_m^{\alpha\beta}$ 考虑。求和中的通量项 $q_{OLD}^{\gamma \rightarrow \alpha}$ 和 $q_{OLD}^{\gamma \rightarrow \beta}$ 分别给出了可能存在于元素 α 和 β 的不同面上的通量的合理估计。

[0074] 两个通量项 $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}_{app}$ 和 $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}_{bal}$ 的物理解释如下。

[0075] 施加通量 $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}_{app}$ 表示总通量 $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}$ (由式 (1) 给出) 中的、可以被用于元素 α 的温度演变而不引入数值不稳定性的一部分。该形式源自由元素 α 和 β 组成的隔离系统的第一原理, 以包括对于该系统附近的连续演变温度场的影响的估计。因此, 该项显示出对元素的几何/热性质 ($C_m^{\alpha\beta}$) 以及这些元素与周围环境的相互作用 (ΔG) 二者的依赖性。

[0076] 应该注意的是, 在方程 (4) 中, $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}_{app}$ 仍依赖在前一时间步子处在其他面上观察到的通量来提供对当前时间步子期间在这些面处正在进行的相互作用的估计。对于强瞬态问题, 这导致 $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}$ 和 $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}_{app}$ 之间的不匹配。称为余额通量 $q_m^{\beta \rightarrow \alpha}_{bal}$ 的第二项考虑了这种不匹配, 该项穿过 α 传输到界面 $\alpha\beta$ 另一侧的相邻元素。该余额通量仅在其沉积在足够大而满足 CFL 约束的元素中时 (此前它沿着通量方向相继传输) 才应用于温度演变。

[0077] 图 9 示出了跨多个元素相继传输余额通量的示例。在该示例中, 输入通量 900 在时间步子 (在该示例中, 时间步子 t) 处被传递到相对小的元素 902。该通量使得将整个通量施加到元素 902 将导致违反 CFL 约束。因此, 通量的一部分 912 被施加到元素 902, 并且余额通量 908 (即, 在不违反 CFL 约束的情况下不能施加到元素 902 的通量部分) 被传递到第二元素 904 (例如, 在时间 $t+1$ 处)。

[0078] 在时间步子 $t+1$ 处, 模拟可以尝试将余额通量施加于第二元素 904。(例如, 源自不同元素的) 附加的输入通量 912 也可以同时施加到第二元素 904。该输入通量 913 可以与余额通量 908 聚合。模拟可以尝试将得到的聚合通量施加于第二元素 904。在该示例中, 将整个聚集通量应用于第二元素 904 将导致违反 CFL 约束。因此, 输入通量 915 和余额通量 908 的组合的一部分被施加到第二元素 904, 并且新的余额通量 910 在时间步子 $t+2$ 处被继续传递到较大的第三元素 906。

[0079] 在时间步子 $t+2$ 处, 余额通量 910 与通量 914 (其是作为模拟的一部分被传递到第三元素 906 的通量) 聚合。在该示例中, 可以将整个聚合通量 916 (通量 914 和余额通量 910) 施加于第三元素而不违反 CFL 约束, 因此不会产生新的余额通量。

[0080] 上述方案严格确保在任意两个元素 α 和 β 之间的界面处结合总通量的正确的量 ($= q_m^{\beta \rightarrow \alpha}$), 同时精确控制可用于小元素 α 的温度演变的通量。总体上, 该方案能够维持数值稳定性以及良好的空间和时间准确性。最后, 应该注意的是, 在稳定状态下, 施加通量变得等于全通量 ($q_m^{\beta \rightarrow \alpha}_{app} = q_m^{\beta \rightarrow \alpha}$), 结果, 余额通量变为等于零 ($q_m^{\beta \rightarrow \alpha}_{bal} = 0$)。

[0081] 如在以上描述中所指出的, 使得用于不规则空间网格上的扩散问题的显式数值方案稳定化的过程可以包括若干算法步骤。图 10 示出了在施加热通量期间的元素 1000。

[0082] 该过程可以识别要应用热通量的修改定义的面——两个元素之间的任何面, 其中至少一个元素违反 CFL 条件。在一些实施方案中, 在所有其他面上, 可以使用热通量的标准定义。例如, 参考图 10, 在该示例中, 热通量被施加到元素 1000 的三个面 (面 1008、面 1010 和

面1012)。在该示例中,该过程可以计算出施加到面1008的热通量1002可以使用标准定义,而施加到面1010的热通量1004以及施加到面1012的热通量1006需要修改的热通量定义。

[0083] 在需要修改的热通量的面处,该过程可以使用所考虑的元素附近的平均温度梯度来计算热通量的总量,以确保解的平滑度。相反,标准热通量可以利用基于传统差分形式计算出的温度梯度。

[0084] 如上所述,修改的热通量可以分成两部分——施加通量和余额通量。施加通量可以被用在所考虑的元素温度演变方程中。余额通量可以或可以不被用在温度演变中,这取决于元素的尺寸。如果元素小到足以违反CFL约束,则余额通量可以被传输到通量方向上的相邻元素。另一方面,如果元素很大,则余额通量可以被用于温度演变。

[0085] 如上所述,余额通量可以沿着通量方向相继传输,直到它最终被传递到足够大的元素(在该元素处它被应用于温度演变)。

[0086] 目前,采用了一些方法来克服具有不同元素尺寸的不规则网格上扩散问题的数值不稳定性的问题。最常用的方法是对网格生成工具强制执行其他约束以减少此类情况。即便如此,由于不能完全避免该问题,通常的做法是使用全局时间步长(该时间步长足够小以确保稳定性)或在遇到小网格元素时使用局部子循环。第一种方法(小的全局时间步长)大大增加了计算成本(即使在空间网格上任意地方存在单次出现的小尺寸元素也是如此),而第二种方法(局部子循环)增加了算法及其实现方案的复杂性。替代的方法是完全放弃显式方案,或者至少放弃靠近小元素的局部区域,而代替地使用隐式方案。此方法受到隐式方案的实现的复杂性以及解的非局部性的影响,这导致方程系统不便于并行化。

[0087] 相比之下,新方法提供了几个明显的优势:

[0088] (1) 该方法允许使用基于时间准确性考虑(而不是网格中的最小元素的大小)而决定的单个时间步长大小。对于每个可想到的场景,这在计算成本和易于实现方面是巨大的益处。

[0089] (2) 所提出的方法依赖于两个相邻元素的几何特性,从而确保无论元素的大小如何这种方法都可以工作。因此,可以在很大程度上放松对网格生成过程(网格质量、大小等)的通常约束。

[0090] (3) 计算新项的计算成本非常合理。项的数学形式很简单,不涉及任何迭代。这与现有方法(减小时间步长大小或使用混合的隐式-显式方案)形成鲜明对比,现有方法大大增加了计算成本。

[0091] (4) 由于公式的体积性质,该方案保持精确的保存,这是许多应用中的重要要求。

[0092] (5) 新的变化本质上仍然是明确的,并且需要距离所考虑的元素一小段距离内的元素的信息,这意味着需要对原始实现方案中的计算模板进行微小的改变。因此,原始显式方法的并行化特性被保留,并且可以在大规模计算中被利用。

[0093] 新方法可用于各种不同的工业应用。例如,该方法可以用于模拟功率生成装备(如发动机)中的热流;涡轮机械中的热流;电磁机械中的热流(动力总成和驾驶室内部的交流发电机、启动器、牵引电动机、各种致动器);电子装备的废热管理;传感器和致动器的热管理和保护;热驱动应力和疲劳;热驱动机械冲击;固体中热驱动的化学变化(例如塑性老化、胶固化、油漆固化、热固化);热驱动退磁(例如居里温度效应);导体(例如电力电缆)中的组合的电热产生和热流;半导体中的热产生和传导(例如,跨越二极管、IGBT、FET);热电设备中

的热和电流(热电偶、塞贝克(Seebeck)效应);热驱动尺寸变化;散热片;热交换器中的固体传导;单相和相变材料的热能储存;诸如PCB、轮胎和钢筋混凝土的复杂结构中的详细热流;用于汽车上的发动机缸体、传感器、反应器、方向盘、汽车座椅和电池的电加热器;用于汽车挡风玻璃和视镜除冰和除霜的电加热器;在制造和操作中通过车辆结构的热量传导。此外,以上列表并非详尽无遗,而是代表可以使用本文描述的方法的应用的种类。

[0094] 本说明书中描述的主题和功能操作的实施例可以在数字电子电路、有形体现的计算机软件或固件、计算机硬件(包括本说明书中公开的结构及其结构等同物)或它们中的一个或多个的组合中实现。本说明书中描述的主题的实施例可以实现为一个或多个计算机程序(即,在有形非暂时性程序载体上编码的一个或多个计算机程序指令模块,用于由数据处理装置执行或控制数据处理装置的操作)。计算机存储介质可以是机器可读存储设备、机器可读存储基板、随机或串行存取存储器设备、或它们中的一个或多个的组合。

[0095] 术语“数据处理装置”指的是数据处理硬件,并且包括用于处理数据的所有类型的装置、设备和机器,包括例如可编程处理器、计算机或多个处理器或计算机。该装置还可以是或进一步包括专用逻辑电路(例如,FPGA(现场可编程门阵列)或ASIC(专用集成电路))。除了硬件之外,该装置还可以包括为计算机程序创建执行环境的代码(例如,构成处理器固件、协议栈、数据库管理系统、操作系统或它们中的一个或多个的组的代码)。

[0096] 计算机程序也可以被称为或描述为程序、软件、软件应用、模块、软件模块、脚本或代码,可以用任何形式的编程语言编写,包括编译或解释语言或者声明性或过程性语言,它可以以任何形式部署,包括作为独立程序或作为模块、组件、子例程或适用于计算环境的其他单元。计算机程序可以但不必对应于文件系统中的文件。程序可以存储在保存其他程序或数据的文件的一部分中(例如,存储在标记语言文档中的一个或多个脚本、专用于所讨论的程序的单个文件中、或者在多个协调文件(例如,存储一个或多个模块,子程序或代码部分的文件)中)。可以部署计算机程序,使得程序在一个计算机上或在位于一个站点上或分布在多个站点上并通过数据通信网络互连的多个计算机上执行。

[0097] 本说明书中描述的过程和逻辑流程可以由执行一个或多个计算机程序的一个或多个可编程计算机执行,以通过对输入数据进行操作并生成输出来执行功能。过程和逻辑流程也可以由专用逻辑电路(例如,FPGA(现场可编程门阵列)或ASIC(专用集成电路))执行,并且装置也可以实现为专用逻辑电路。

[0098] 适合于执行计算机程序的计算机可以基于通用或专用微处理器或两者,或任何其他类型的中央处理单元。通常,中央处理单元将从只读存储器或随机存取存储器或两者接收指令和数据。计算机的基本元件是用于执行或运行指令的中央处理单元和用于存储指令和数据的一个或多个存储器设备。通常,计算机还将包括或可操作地耦合以从一个或多个大容量存储设备接收数据或将数据传输到一个或多个大容量存储设备,以用于存储数据(例如,磁盘、磁光盘或光盘)。计算机不需要这样的设备。此外,计算机可以嵌入在另一个设备中(例如,移动电话、个人数字助理(PDA)、移动音频或视频播放器、游戏控制台、全球定位系统(GPS)接收器或便携式存储设备(例如,通用串行总线(USB)闪存驱动器),仅举几例)。

[0099] 适用于存储计算机程序指令和数据的计算机可读介质包括介质和存储器设备上的所有形式的非易失性存储器,包括例如半导体存储器设备(例如,EPROM、EEPROM和闪存设备)、磁盘(例如,内部硬盘或可移动磁盘)、磁光盘、CD ROM和DVD-ROM盘。处理器和存储器可

以由专用逻辑电路补充或并入专用逻辑电路中。

[0100] 为了提供与用户的交互,本说明书中描述的主题的实施例可以在具有显示设备(例如,CRT(阴极射线管)或LCD(液晶显示器)监视器)的计算机上实现,用于向用户和键盘以及用户可以通过其向计算机提供输入的指示设备(例如,鼠标或轨迹球)。其他类型的设备也可用于提供与用户的交互;例如,提供给用户的反馈可以是任何形式的感觉反馈(例如,视觉反馈、听觉反馈或触觉反馈),并且可以以任何形式接收来自用户的输入,包括声学、语音或触觉输入。此外,计算机可以通过向用户使用的设备发送文档和从用户使用的设备接收文档来与用户交互,例如,通过将网页发送到用户设备上的web浏览器以及响应从web浏览器接收的请求。

[0101] 本说明书中描述的主题的实施例可以在包括后端组件(例如,作为数据服务器)或包括中间件组件(例如,应用服务器)或包括前端组件(例如,具有图形用户界面的客户端计算机或用户可以通过其与本说明书中描述的主题的实现交互的web浏览器)或者一个或多个这样的后端、中间件或前端组件的计算系统中实现。系统的组件可以通过任何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)和广域网(WAN)(例如,互联网)。

[0102] 计算系统可以包括客户端和服务端。客户端和服务端通常彼此远离,并且通常通过通信网络进行交互。客户端和服务端的关系借助于在各个计算机上运行并且彼此具有客户端-服务端关系的计算机程序而产生。在一些实施例中,服务端将数据(例如,HTML页面)发送到用户设备(例如,用于向与用户设备交互的用户显示数据和接收用户输入的目的),用户设备充当客户端。可以在服务端处从用户设备接收在用户设备处生成的数据(例如,用户交互的结果)。

[0103] 虽然本说明书包含许多具体的实现方案细节,但是这些不应被解释为对任何发明的范围或可以要求保护的范围的限制,而是作为特定于特定发明的特定实施例的特征的描述。在单独实施例的上下文中在本说明书中描述的某些特征也可以在单个实施例中组合实现。相反,在单个实施例的上下文中描述的各种特征也可以单独地或以任何合适的子组合在多个实施例中实现。此外,尽管上面的特征可以描述为以某些组合起作用并且甚至最初如此声明,但是在某些情况下可以从组合中切除来自所要求保护的组合的一个或多个特征,并且所要求保护的组合可以针对子组合或子组合的变型。

[0104] 类似地,虽然在附图中以特定顺序描绘了操作,但是这不应该被理解为要求以所示的特定顺序或按顺序执行这些操作,或者执行所有示出的操作,以实现期望的结果。在某些情况下,多任务处理和并行处理可能是有利的。此外,上述实施例中的各种系统模块和组件的分离不应被理解为在所有实施例中都需要这种分离,并且应当理解,所描述的程序组件和系统通常可以集成在单个软件产品中或打包成多个软件产品。

[0105] 已经描述了主题的特定实施例。其他实施例在以下权利要求的范围内。例如,权利要求中记载的动作可以以不同的顺序执行并且仍然实现期望的结果。作为一个示例,附图中描绘的过程不一定需要所示的特定顺序或连续顺序来实现期望的结果。在某些情况下,多任务处理和并行处理可能是有利的。

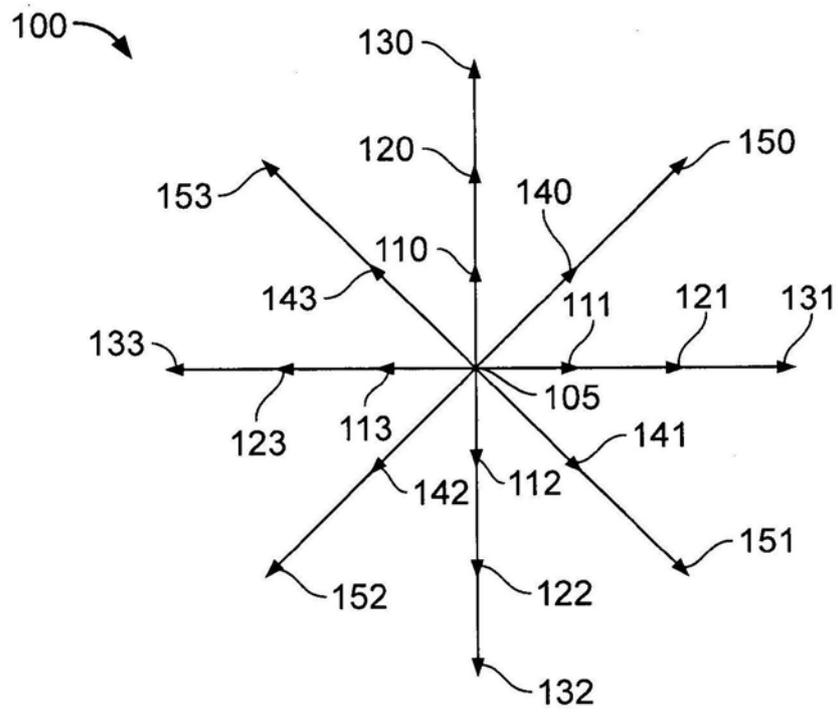


图1

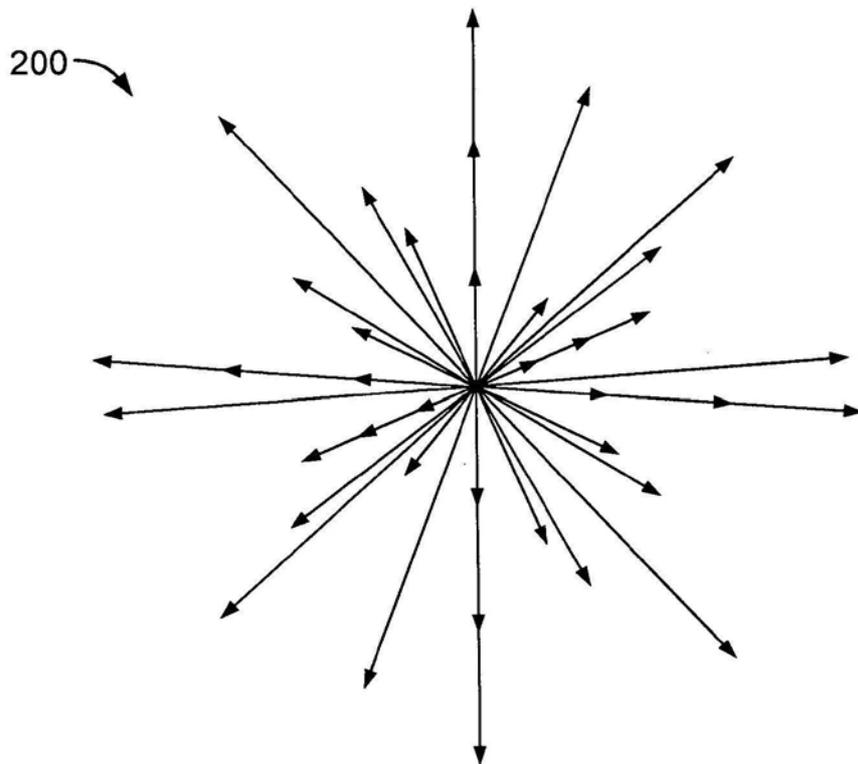


图2

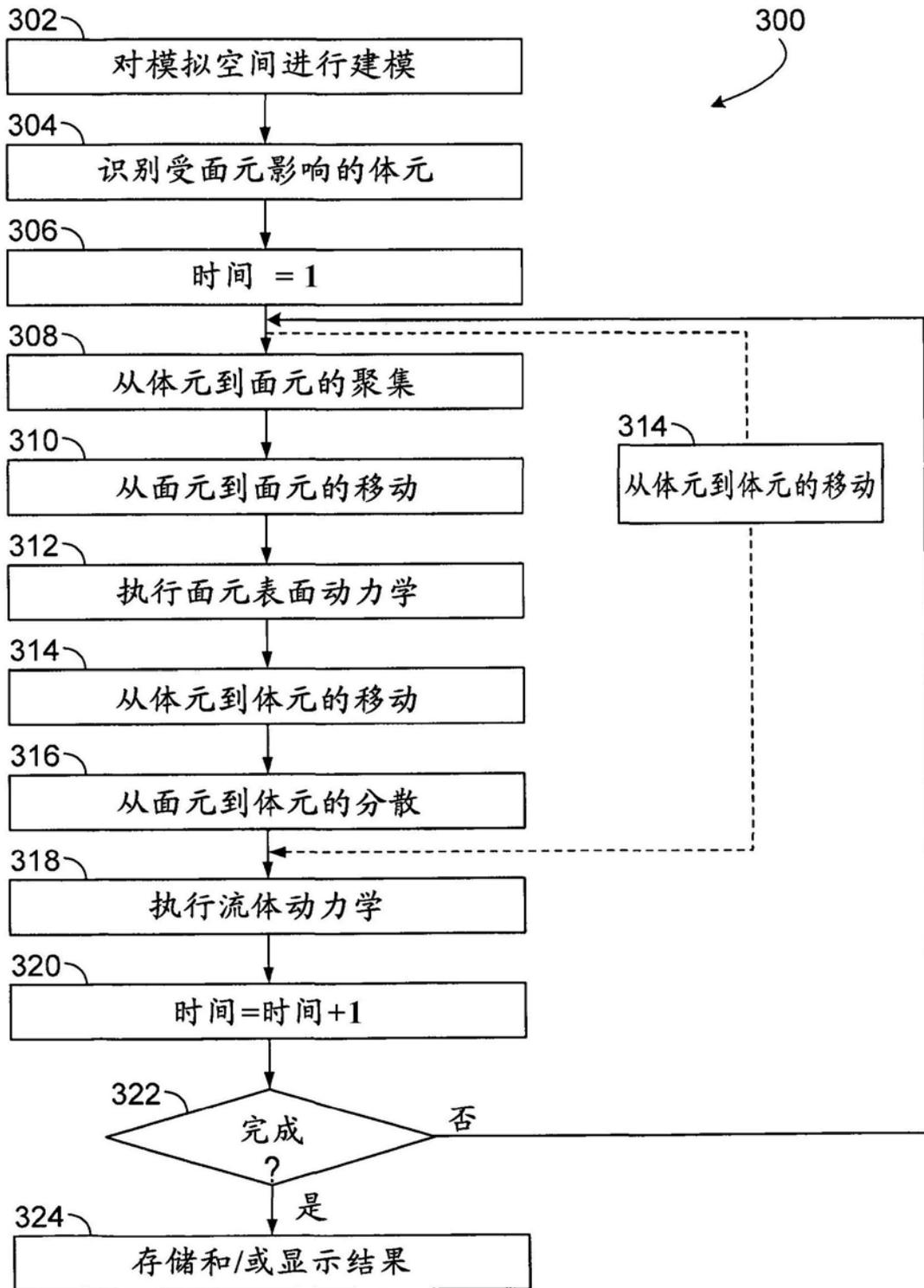


图3

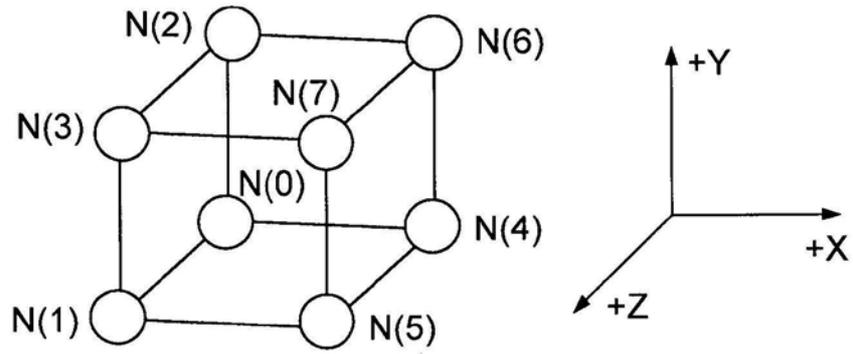


图4

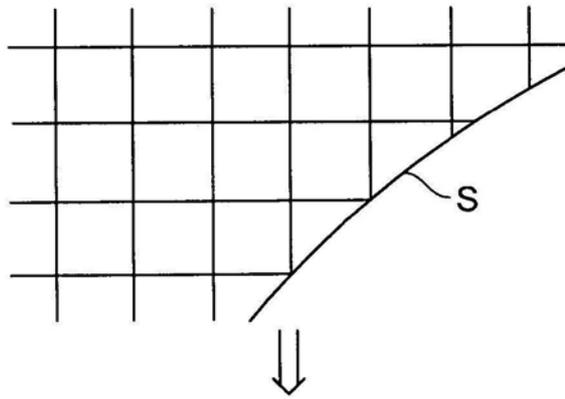


图5A

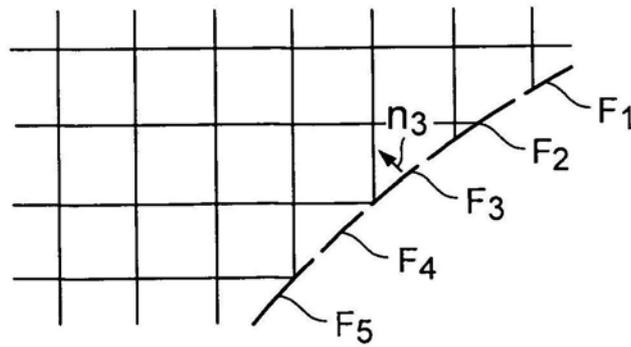


图5B

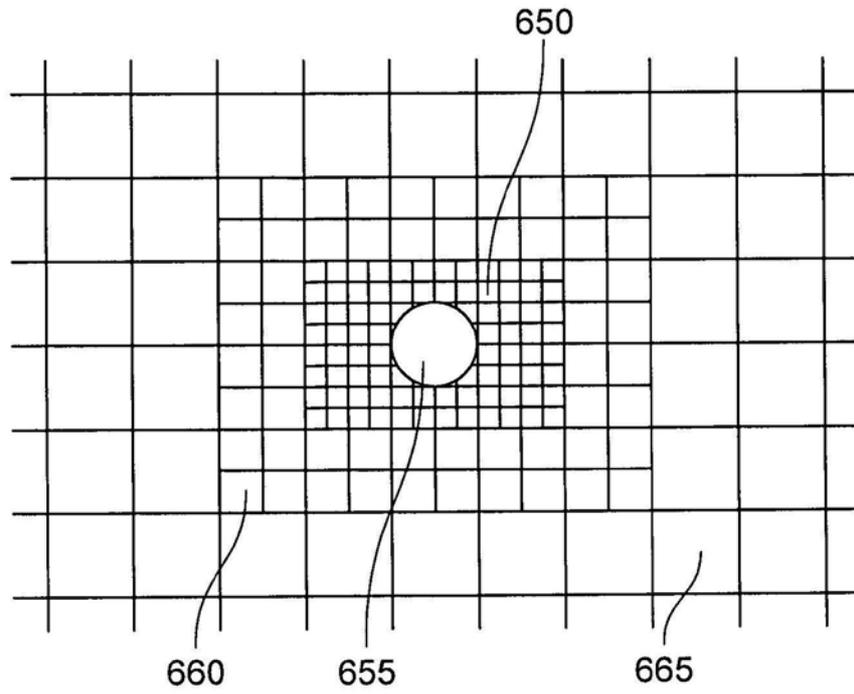


图6

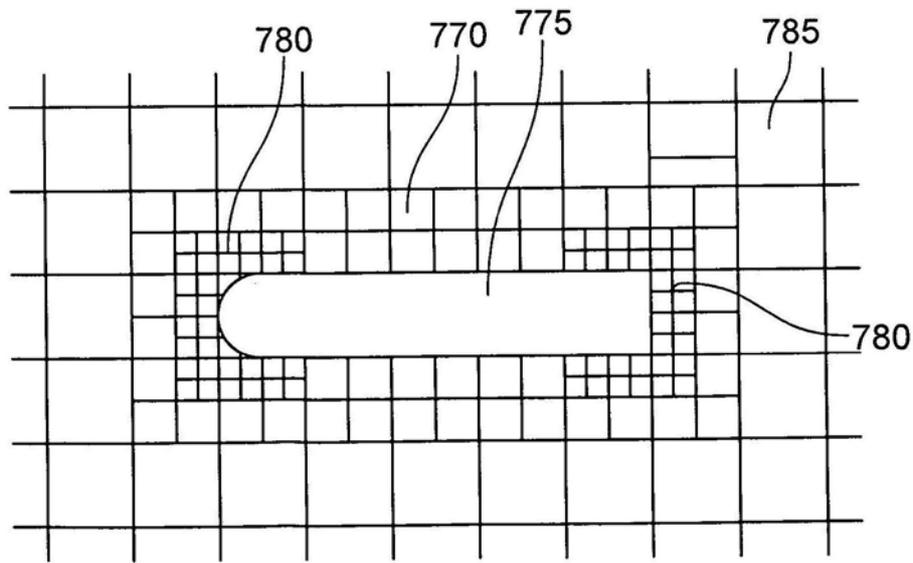


图7

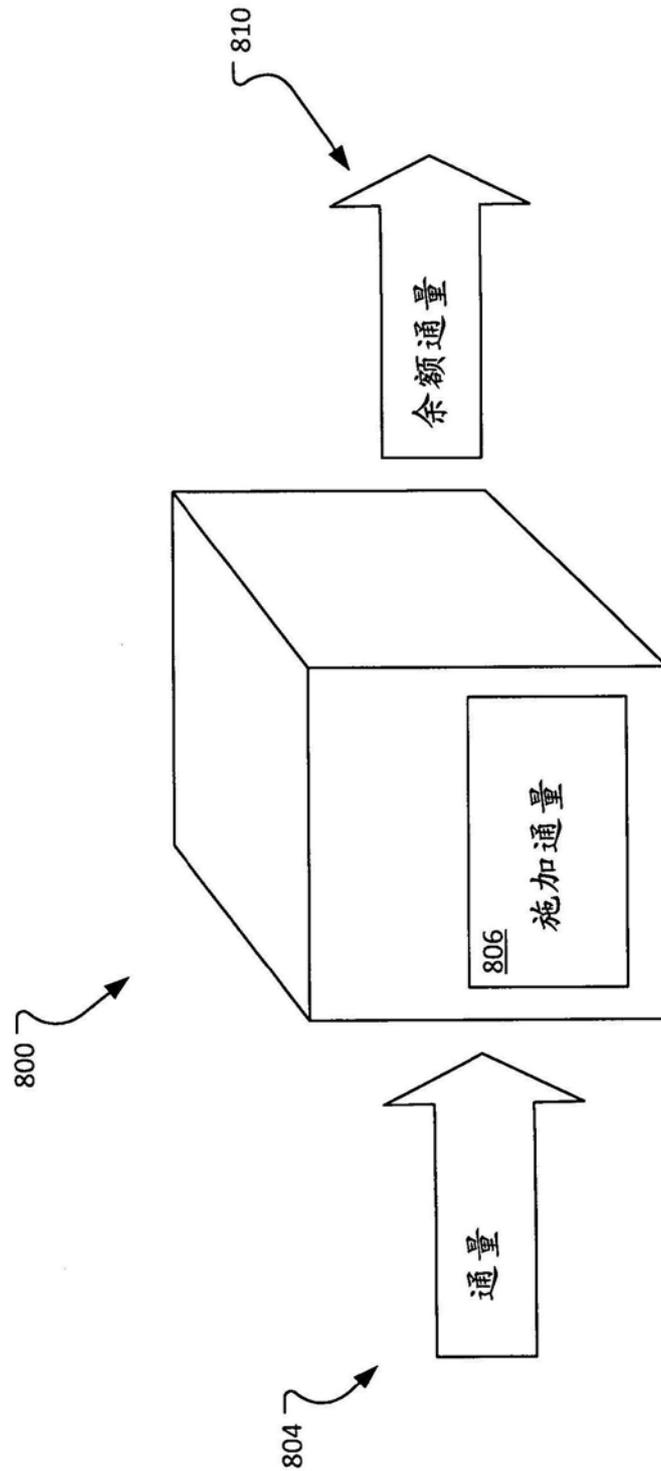


图8

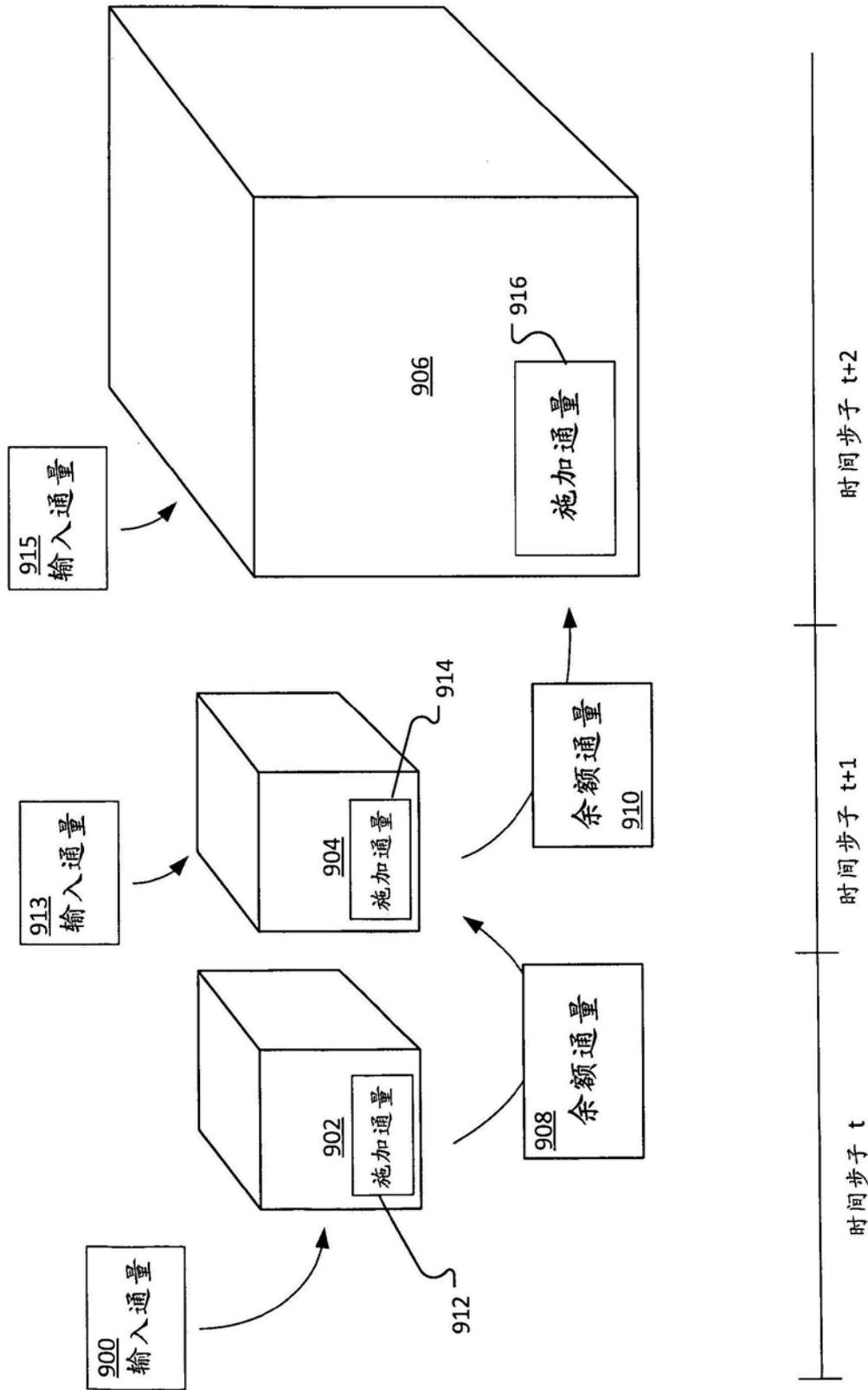


图9

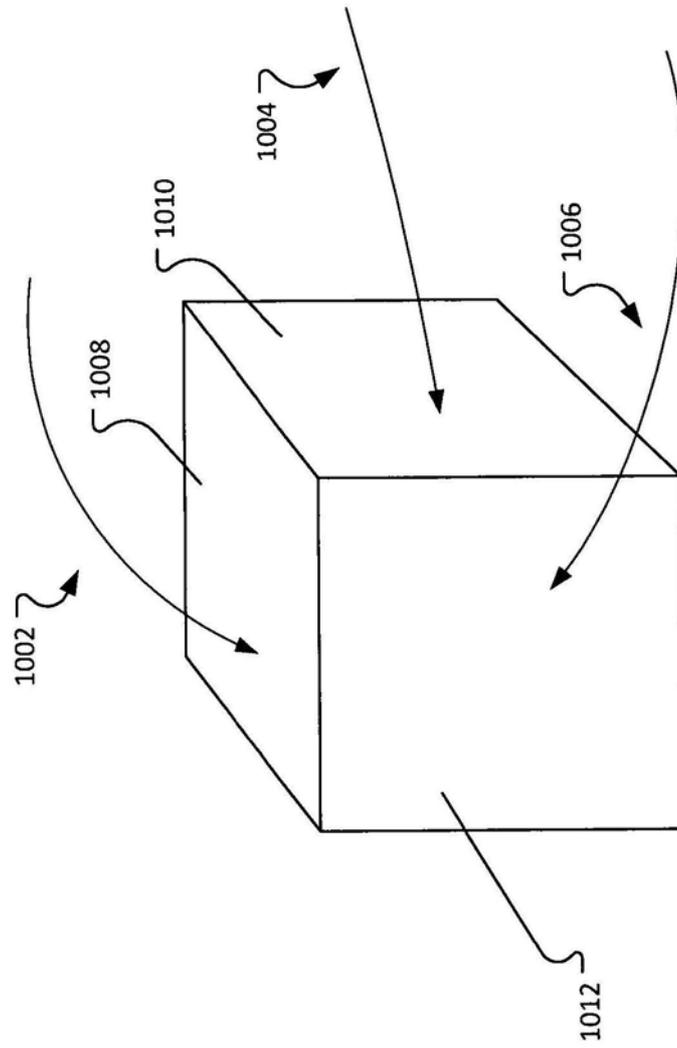


图10