(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 117390833 B
(45)授权公告日 2024.07.05

(21)申请号 202311256234.8
(22)申请日 2023.09.27
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 117390833 A
(43)申请公布日 2024.01.12
(73)专利权人 人工智能与数字经济广东省实验室(广州)
地址 510330 广东省广州市海珠区新港东路2429号首层自编051房
专利权人 华南理工大学
(72)发明人 龚嘉豪 唐文虎 许雄文 蓝海娟 张泽懿
(74)专利代理机构 广州科粤专利商标代理有限公司 44001
专利代理师 邓潮彬
(51)Int.Cl.
G06F 30/20(2020.01)
G06F 30/23(2020.01)
G06T 17/20(2006.01)
G06F 119/08(2020.01)
G06F 119/12(2020.01)
G06F 111/10(2020.01)
(56)对比文件
WO 2021260005 A1,2021.12.30
CN 105651812 A,2016.06.08
审查员 刘洛

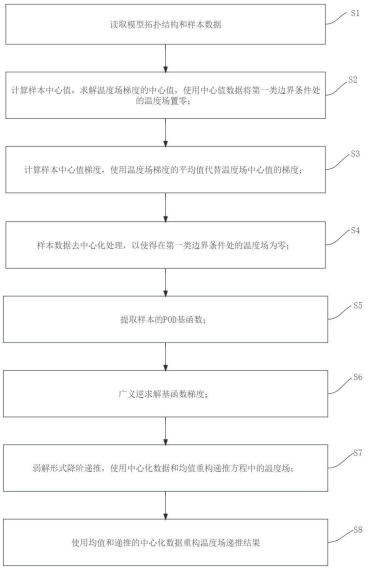
权利要求书2页 说明书6页 附图6页

(54)发明名称

一种第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理方法及装置

(57)摘要

本发明公开了一种第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理方法及装置,该方法包括S1、读取模型拓扑结构和样本数据;S2、计算样本中心值,求解温度场梯度的中心值,使用中心值数据将第一类边界条件处的温度场置零;S3、计算样本中心值梯度,使用温度场梯度的平均值代替温度场中心值的梯度;S4、样本数据去中心化处理,以使得在第一类边界条件处的温度场为零;S5、提取样本的POD基函数;S6、广义逆求解基函数梯度;S7、弱解形式降阶递推,使用中心化数据和均值重构递推方程中的温度场;S8、使用均值和递推的中心化数据重构温度场递推结果。本发明保证了边界处的温度值在递推的过程中维持不变。



CN 117390833 B

1.一种第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理方法,其特征在于,所述方法包括:

S1、读取模型拓扑结构和样本数据;

S2、计算样本中心值,求解温度场梯度的中心值,使用中心值数据将第一类边界条件处的温度场置零;

S3、计算样本中心值梯度,使用温度场梯度的平均值代替温度场中心值的梯度;

S4、样本数据去中心化处理,以使得在第一类边界条件处的温度场为零;

S5、提取样本的POD基函数;

S6、广义逆求解基函数梯度;

S7、弱解形式降阶递推,使用中心化数据和均值重构递推方程中的温度场;

S8、使用均值和递推的中心化数据重构温度场递推结果;

所述读取模型拓扑结构和样本数据包括:

用数据分析软件读取有限元模型的网格拓扑连接关系,读取网格的顶点个数为N,读取有限元计算的网格顶点温度场和温度场梯度仿真数据,取一段时间内的温度场分布数据构成样本T(x,t),x为网格的编号,t为时间变量;同时取该一段时间内的温度梯度分布离散时间数据构成矩阵$T_x(x,t)$和$T_y(x,t)$;

所述计算样本中心值,包括:

读取样本数据后,将样本T(x,t)按行求平均得$\overline{T}(x)$,即求取每个顶点温度场样本数据随时间变化的平均值;同时将x方向温度梯度矩阵$T_x(x,t)$按行求平均得到均值的x方向梯度$\overline{T_x}(x)$;y方向温度梯度矩阵$T_y(x,t)$按行求平均得到均值的y方向梯度$\overline{T_y}(x)$;

所述计算样本中心值梯度包括:

利用连续函数可交换微分次序的性质,温度场中心值的梯度等价于温度场梯度的平均值;将步骤S2中求解温度场梯度的中心值,作为温度场中心值的梯度;

所述样本数据去中心化处理,包括:

用样本数据T(x,t)每一列减去样本均值$\overline{T}(x)$,得到去中心化后的样本数据θ(x,t);同时将x方向温度梯度矩阵$T_x(x,t)$每一列减去$\overline{T_x}(x)$得到去中心化样本x方向梯度$\theta_x(x,t)$;将y方向温度梯度矩阵$\theta_y(x,t)$每一列减去$\overline{T_y}(x)$得到去中心化样本y方向梯度$\theta_y(x,t)$,以使得在第一类边界条件处的温度场为零。

2.如权利要求1所述的第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理方法,其特征在于,所述提取样本的POD基函数,包括:

按照如下等式计算去中心化样本的相关矩阵R:

$$R=\frac{1}{N}\theta(x,t)[\theta(x,t)]^{T},$$

对矩阵进行特征值分解,获得N个特征值和特征向量,并按照特征值的大小对特征向量进行升序排序,排序后的特征向量为$\varphi(x)=[\varphi_1(x),\varphi_2(x),\ldots,\varphi_N(x)]$;

取特征值之和占所有特征值之和超过99.99%的前s个特征向量构成一组正交基函数$\varphi(x)=[\varphi_1(x),\varphi_2(x),\ldots\varphi_s(x)]$;

将高维空间样本数据θ(x,t)投影到特征向量空间φ(x),获得降阶模型的谱系数α(t):

$\alpha(t)=[\theta(x,t)]^{T}\varphi(x)$。

3.如权利要求2所述的第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理方法,其特征在于,所述广义逆求解基函数梯度,包括:

采用广义逆函数对特征值分解的基函数进行梯度求取:

$\varphi_{x}(x)=\theta_{x}(x,t)*\mathrm{pinv}([\alpha(t)]^{T})$,

$\varphi_{y}(x)=\theta_{y}(x,t)*\mathrm{pinv}([\alpha(t)]^{T})$;

其中,$\varphi_{x}(x)$和$\varphi_{y}(x)$分别为基函数在x方向的梯度分布和,在y方向的梯度分布。

4.如权利要求3所述的第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理方法,其特征在于,所述弱解形式降阶递推,包括:

采用非稳态导热控制方程的弱解表达式对温度场进行递推,将边界热流密度置为零;

递推过程中采用样本去中心化的POD-Galerkin法对导热控制方程进行降维,温度场分解为:

$$T(x,k)=\theta(x,k)+\overline{T}(x)=\sum_{i=1}^{s}\alpha_{i}(k)\phi_{i}(x)+\overline{T}(x)\ ,$$

温度梯度分解为:

$$T_{x}(x,k)=\theta_{x}(x,k)+\overline{T_{x}}(x)=\sum_{i=1}^{s}\alpha_{i}(k)[\phi_{i}(x)]_{x}+\overline{T_{x}}(x)\ ,$$

$$T_{y}(x,k)=\theta_{y}(x,k)+\overline{T_{y}}(x)=\sum_{i=1}^{s}\alpha_{i}(k)[\phi_{i}(x)]_{y}+\overline{T_{y}}(x)\ ,$$

其中,基函数梯度$[\varphi_{i}(x)]_{x}$和$[\varphi_{i}(x)]_{y}$用S6中广义逆方法求得;

取样本末尾时刻作为递推起始时刻进行递推,获得温度场降阶预测数据$\alpha'(t)$;

所述使用均值和递推的中心化数据重构温度场递推结果,包括:

首先重构中心化温度场数据结果$\widehat{\theta'}(x,t)$:

$$\widehat{\theta'}(x,t)=\sum_{i=1}^{s}\alpha_{i}^{'}(t)\phi_{i}(x)\ ,$$

然后重构温度场,在重构出的去中心化数据$\widehat{\theta'}(x,t)$的基础上,加上温度场均值$\overline{T}(x)$获得完整的温度场分布递推结果$\widehat{T'}(x,t)$。

5.一种第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理装置,包括存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序,其特征在于,所述处理器执行所述计算机程序时实现如权利要求1至4中任一所述方法的步骤。

6.一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,其特征在于,所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至4中任一所述方法的步骤。

一种第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及温度场离散数值计算技术领域,具体涉及一种第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理方法及装置。

背景技术

[0002] 在多物理场的仿真研究中,用于描述物理场的控制方程通常为一组偏微分方程,例如:电磁场中的麦克斯韦方程组、流体场中的纳维-斯托克斯方程、温度场中的导热控制方程等。而边界条件,是指在求解区域边界上所求解的变量或其导数随时间和地点的变化规律。边界条件是控制方程有确定解的前提,对于任何问题,都需要给定边界条件。边界条件的处理,直接影响了计算结果的精度。

[0003] 在利用本征正交分解(Proper orthogonal decomposition,POD)对温度场控制方程实现降阶时,同样也需要考虑边界条件的处理问题。对于第一类边界条件:给定未知函数在边界上的数值,即在整个物理场随时间的演变过程中,边界上的函数值不随时间改变。由于其在边界处的函数值不连续,边界热流密度未知,因此给基于Galerkin有限元的数值计算方法上带来了问题。根据文献(冯俞楷,杜小泽,杨立军所发表的论文《非稳态导热基于温度梯度的本征正交分解降维方法》),温度场的传统Galerkin有限元的递推方程如式:

[0004]
$$\begin{aligned}\int_{\Omega}\rho c\frac{T^{k}-T^{k-1}}{\Delta t}\varphi\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y=&\oint_{\Gamma}\lambda\frac{\partial T^{k-1}}{\partial\vec{n}}\varphi\,\mathrm{d}s\\&-\int_{\Omega}\lambda\left(\frac{\partial T^{k-1}}{\partial x}\frac{\partial\varphi}{\partial x}+\frac{\partial T^{k-1}}{\partial y}\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)\mathrm{d}\Omega\\&+\int_{\Omega}S\varphi\,\mathrm{d}\Omega\end{aligned}\tag{1.1}$$

[0005] 等式右边第一项为边界热流密度项,可写为式:

[0006]
$$q=\lambda\frac{\partial T^{k-1}}{\partial\vec{n}}\tag{1.2}$$

[0007] 对于第一类边界条件,边界处的函数值不连续,该边界热流密度项未知,无法直接带入求解。因此在文献《非稳态导热基于温度梯度的本征正交分解降维方法》对于第一类边界条件的处理中,直接将第一类边界条件下的热流密度置零,即用绝热条件代替,式写为式:

[0008]
$$\begin{aligned}\int_{\Omega}\rho c\frac{T^{k}-T^{k-1}}{\Delta t}\varphi\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y=&-\int_{\Omega}\lambda\left(\frac{\partial T^{k-1}}{\partial x}\frac{\partial\varphi}{\partial x}+\frac{\partial T^{k-1}}{\partial y}\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)\mathrm{d}\Omega\\&+\int_{\Omega}S\varphi\,\mathrm{d}\Omega\end{aligned}\tag{1.3}$$

[0009] 然而使用绝热条件代替第一类边界条件进行有限元递推,会导致递推过程中边界处的温度场发生改变,其温度值的递推结果逐渐偏离第一类边界条件预设温度,进而影响到下一时刻与边界网格相邻的内部网格温度的递推,使温度场递推结果逐步产生偏差。

[0010] 文献《非稳态导热基于温度梯度的本征正交分解降维方法》在处理第一类边界条件时,使用了绝热条件代替第一类边界条件,进而将式变化为式。然而,使用绝热条件代替

第一类边界条件进行有限元递推,会导致递推过程中边界处的温度场发生改变,其温度值的递推结果逐渐偏离第一类边界条件预设温度,进而影响到下一时刻与边界网格相邻的内部网格温度的递推,使温度场递推结果逐步产生偏差。

发明内容

[0011] 本发明的目的在于克服上述现有技术的不足,提供一种第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理方法及装置,以解决第一类边界条件降阶递推过程中维持边界温度场不变的问题。

[0012] 为实现上述目的,本发明的技术方案是:

[0013] 第一方面,本发明提供一种第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理方法,所述方法包括:

[0014] S1、读取模型拓扑结构和样本数据;

[0015] S2、计算样本中心值,求解温度场梯度的中心值,使用中心值数据将第一类边界条件处的温度场置零;

[0016] S3、计算样本中心值梯度,使用温度场梯度的平均值代替温度场中心值的梯度;

[0017] S4、样本数据去中心化处理,以使得在第一类边界条件处的温度场为零;

[0018] S5、提取样本的POD基函数;

[0019] S6、广义逆求解基函数梯度;

[0020] S7、弱解形式降阶递推,使用中心化数据和均值重构递推方程中的温度场;

[0021] S8、使用均值和递推的中心化数据重构温度场递推结果。

[0022] 第二方面,本发明提供一种第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理装置,包括存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序时实现如上所述方法的步骤。

[0023] 第三方面,本发明提供一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如上所述方法的步骤。

[0024] 本发明与现有技术相比,其有益效果在于:

[0025] 本发明充分考虑第一类边界条件下,边界温度不随时间改变的情况,所以在温度场递推前,对样本数据进行过余温度处理或去中心化处理,使得POD基函数在第一类边界条件位置处的值为零,从而保证了边界处的温度值在递推的过程中维持不变,解决了第一类边界条件降阶递推过程中维持边界温度场不变的问题,且能适用于多条边界条件和混合边界条件的情况,应用广泛。

附图说明

[0026] 图1为本发明实施例1提供的非稳态温度场POD降阶递推边界条件处理方法的流程图;

[0027] 图2为边长为0.1m的方形非稳态热传导几何模型;

[0028] 图3为COMSOL网格剖分方案

[0029] 图4为COMSOL计算的有限元仿真50秒时刻的温度场分布云图;

[0030] 图5为用本发明方法的第一类边界条件的POD降阶递推处理方法在采集20.1~

24.0秒时刻样本下递推计算出的50秒时刻处的温度场分布云图；

[0031] 图6为本发明方法的递推结果与COMSOL有限元仿真结果差值的分布云图

[0032] 图7为本发明实施例1编号为585号顶点(坐标(0.05,0.05)附近)在20.1～100.0的温度场递推结果中等间隔抽取的8各点绘制的对比曲线；

[0033] 图8为本发明实施例1编号为1号顶点(坐标(0,0))的温度场递推结果对比曲线；

[0034] 图9为不做任何处理的数据构建的降阶模型对边界点温度的递推结果；

[0035] 图10为使用本发明方法处理的数据构建的降阶模型对边界点温度的递推结果；

[0036] 图11为本发明实施例2提供的第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理装置组成示意图。

具体实施方式

[0037] 下面结合附图和实施例对本发明的技术方案做进一步的说明。

[0038] 实施例1：

[0039] 参阅图1所示,本实施例提供的非稳态温度场POD降阶递推边界条件处理方法主要包括：

[0040] S1、读取模型拓扑结构和样本数据

[0041] 具体地,在COMSOL中采用图2所示的边长为0.1m的方形非稳态热传导模型,材料的密度为8800[kg/m^3],导热系数为24.8[W/(m*℃)],恒压热容为343[J/(kg*℃)],模型的初始温度设置为边界设置为30℃,全局热源设置为20000[W/(m^3)],模型边界采用第一类边界条件上边界和右边界设置为10℃,左边界和下边界设置为20℃,进行如图3所示的网格剖分,设置仿真步长为0.01秒,在有限元仿真软件中仿真5000个时间步长到500.0秒。

[0042] 用数据分析软件读取模型的网格拓扑连接关系,和以0.1秒的时间步长导出网格顶点温度场和温度场梯度仿真数据,取20.1～24.0秒温度场分布的离散时间数据构成样本T(x,t),同时取20.1～24.0秒的温度梯度分布离散时间数据构成矩阵$T_x(x,t)$和$T_y(x,t)$。所述温度场样本数据T(x,t)为矩阵,T(x,t)的每一列为一个时间步长下各顶点的温度场分布数据,每一行为该行编号顶点温度场随时间的变化;x方向温度梯度矩阵$T_x(x,t)$的每一列为一个时间步长下各顶点的x方向温度梯度分布数据,每一行为该行编号顶点x方向温度场梯度随时间的变化;y方向温度梯度矩阵$T_y(x,t)$的每一列为一个时间步长下各顶点的y方向温度梯度分布数据,每一行为该行编号顶点y方向温度场梯度随时间的变化。

[0043] S2、计算样本中心值,求解温度场梯度的中心值,使用中心值数据将第一类边界条件处的温度场置零；

[0044] 具体地,所述计算样本中心值包括:读取样本数据后,将样本T(x,t)按行求平均得$\overline{T}(x)$,即求取每个顶点温度场样本数据随时间变化的平均值;同时将x方向温度梯度矩阵$T_x(x,t)$按行求平均得到均值的x方向梯度$\overline{T_x}(x)$;y方向温度梯度矩阵$T_y(x,t)$按行求平均得到均值的y方向梯度$\overline{T_y}(x)$。

[0045] S3、计算样本中心值梯度,使用温度场梯度的平均值代替温度场中心值的梯度：

[0046] 利用连续函数可交换微分次序的性质,温度场中心值的梯度等价于温度场梯度的平均值。将第二步中求解温度场梯度的中心值,作为温度场中心值的梯度。

[0047] S4、样本数据去中心化处理：

[0048] 用样本数据T(x,t)每一列减去样本均值$\overline{T}(x)$,得到去中心化后的样本数据θ(x,t)；同时将x方向温度梯度矩阵T_x(x,t)每一列减去$\overline{T_x}(x)$得到去中心化样本x方向梯度θ_x(x,t)；将y方向温度梯度矩阵θ_y(x,t)每一列减去$\overline{T_y}(x)$得到去中心化样本y方向梯度θ_y(x,t)。

[0049] S5、提取样本的POD基函数：

[0050] 按照如下等式计算去中心化样本的相关矩阵R

[0051] $$R=\frac{1}{N}\theta(x,t)[\theta(x,t)]^{T},$$

[0052] 对相关矩阵进行特征值分解,获得N个特征值和特征向量,并按照特征值的大小对特征向量进行升序排序,排序后的特征向量为φ(x)=[φ_1(x),φ_2(x),...,φ_N(x)]。

[0053] 取特征值之和占所有特征值之和超过99.99%的前s个特征向量构成一组正交基函数,

[0054] 经过计算本例中s取3,因此本例中取φ(x)=[φ_1(x),φ_2(x),φ_3(x)]。

[0055] 将高维空间样本数据θ(x,t)投影到特征向量空间φ(x)获得,降阶模型的谱系数α(t)：

[0056] α(t)=[θ(x,t)]^{T}φ(x),

[0057] 通过$\hat{T}(x,t)=\phi(x)[\alpha(t)]^{T}$获得温度场重构数据$\hat{T}(x,t)$。

[0058] S6、广义逆求解基函数梯度：

[0059] 采用广义逆函数,对特征值分解的基函数进行梯度求取：

[0060] φ_x(x)=θ_x(x,t)*pinv([α(t)]^{T}),

[0061] φ_y(x)=θ_y(x,t)*pinv([α(t)]^{T})。

[0062] 其中,φ_x(x)和φ_y(x)分别为基函数在x方向的梯度分布和,在y方向的梯度分布。

[0063] S7、弱解形式降阶递推：

[0064] 采用非稳态导热控制方程的弱解表达式对温度场进行递推,由于第一类边界条件的边界温度为定值,所以暂时不考虑边界热流密度对边界温度场的影响,将边界热流密度置为零。

[0065] 递推过程中采用样本去中心化的POD-Galerkin法对导热控制方程进行降维,温度场分解为

[0066] $$T(x,k)=\theta(x,k)+\overline{T}(x)=\sum_{i=1}^{s}\alpha_i(k)\phi_i(x)+\overline{T}(x),$$

[0067] 温度梯度分解为：

[0068] $$T_x(x,k)=\theta_x(x,k)+\overline{T_x}(x)=\sum_{i=1}^{s}\alpha_i(k)[\phi_i(x)]_x+\overline{T_x}(x),$$

[0069] $$T_y(x,k)=\theta_y(x,k)+\overline{T_y}(x)=\sum_{i=1}^{s}\alpha_i(k)[\phi_i(x)]_y+\overline{T_y}(x),$$

[0070] 其中,基函数梯度[φ_i(x)]$_x$和[φ_i(x)]$_y$用S6中广义逆方法求。

[0071] 取样本末尾时刻作为递推起始时刻进行递推,获得温度场降阶预测数据α′(t)；

[0072] 本例中取样本末尾时刻k-1＝240时刻的温度场降阶数据α(240)开始递推,递推到k＝1000,得到温度场预测数据α′(t)＝[α(241),α(242),...,α(1000)]。

[0073] S8、重构温度场递推结果:

[0074] 首先重构中心化温度场数据结果$\widehat{\theta'}(x,t)$:

[0075] $$\widehat{\theta'}(x,t)=\sum_{i=1}^{s}\alpha_i^{'}(t)\phi_i(x),$$

[0076] 然后重构温度场,在重构出的去中心化数据$\widehat{\theta'}(x,t)$的基础上,加上温度场均值$\overline{T}(x)$获得完整的温度场分布递推结果$\widehat{T'}(x,t)$。

[0077] 图3-4是本实施样例使用的几何模型和COMSOL网格剖分方案,1号顶点和585号顶点位置已在图3中标出,图4为本案例COMSOL计算的有限元仿真50秒时刻的温度场分布云图,图5为用本发明方法的第一类边界条件的POD降阶递推处理方法在采集20.1～24.0秒时刻样本下递推计算出的50秒时刻处的温度场分布云图,本发明提出方法的递推结果与COMSOL仿真数据绘制的云图几乎一样。

[0078] 图6为本发明提出方法的递推结果与COMSOL有限元仿真结果差值的分布云图,50秒时刻处,各顶点预测的温度偏差的绝对值维持在0.01以内,说明了本发明提出方法的有效性。

[0079] 图7为本样例编号为585号顶点(坐标(0.05,0.05)附近)在20.1～100.0的温度场递推结果中等间隔抽取的8各点绘制的对比曲线,与COMSOL的有限元仿真结果对比,该顶点处的温度预测结果保持在较小的误差范围内。

[0080] 图8为本样例编号为1号顶点(坐标(0,0))的温度场递推结果对比曲线,该顶点位于模型的左下角,是第一类边界条件处的顶点,可以看出在该顶点递推的过程中,温度几乎保持不变。因此,本发明提出的方法在程序上解决了第一类边界条件降阶递推过程中维持边界温度场不变的问题。

[0081] 本发明对样本数据进行过余温度处理或去中心化处理,使得POD基函数在第一类边界条件位置处的值为零,从而保证了边界处的温度值在递推的过程中维持不变。

[0082] 下面结合一个试验实例来对本方法进行进一步的验证说明:

[0083] 试验条件:在COMSOL中采用图2所示的边长为0.1m的方形非稳态热传导模型,材料的密度为8800[kg/m^3],导热系数为24.8[W/(m*℃)],恒压热容为343[J/(kg*℃)],模型的初始温度设置为边界设置为30℃,全局热源设置为20000[W/(m^3)],模型边界采用第一类边界条件上边界和右边界设置为10℃,左边界和下边界设置为20℃,进行如图所示的网格剖分,设置仿真步长为0.01秒,在有限元仿真软件中仿真5000个时间步长到500.0秒。

[0084] 图9-10是第一类边界条件下用不做任何处理的数据构建降阶模型用于降阶递推,和采用去中心化数据构建降阶模型用于降阶递推的温度场预测结果和COMSOL有限元计算结果在边界顶点(1号顶点)处的温度变化对比曲线。

[0085] 由此可见,本发明方法对样本数据进行过余温度处理或去中心化处理,使得POD基函数在第一类边界条件位置处的值为零,从而保证了边界处的温度值在递推的过程中维持不变。

[0086] 实施例2:

[0087] 参阅图11所示,本实施例提供的第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理装置包括处理器111、存储器112以及存储在该存储器112中并可在所述处理器111上运行的计算机程序113,例如第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理程序。该处理器111执行所述计算机程序113时实现上述实施例1步骤,例如图1所示的步骤。

[0088] 示例性的,所述计算机程序113可以被分割成一个或多个模块/单元,所述一个或者多个模块/单元被存储在所述存储器112中,并由所述处理器111执行,以完成本发明。所述一个或多个模块/单元可以是能够完成特定功能的一系列计算机程序指令段,该指令段用于描述所述计算机程序113在所述第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理装置中的执行过程。

[0089] 所称处理器111可以是中央处理单元(Central Processing Unit,CPU),还可以是其他通用处理器、数字信号处理器(Digital Signal Processor,DSP)、专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit,ASIC)、现成可编程门阵列(FieldProgrammable Gate Array,FPGA)或者其他可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件等。通用处理器可以是微处理器或者该处理器也可以是任何常规的处理器等。

[0090] 所述存储器112可以是所述第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理装置的内部存储元,例如第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理装置的硬盘或内存。所述存储器112也可以是所述第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理装置的外部存储设备,例如所述第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理装置上配备的插接式硬盘,智能存储卡(SmartMedia Card,SMC),安全数字(Secure Digital,SD)卡,闪存卡(Flash Card)等。进一步地,所述存储器112还可以既包括所述第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理装置的内部存储单元也包括外部存储设备。所述存储器112用于存储所述计算机程序以及所述第一类边界条件POD降阶递推边界条件处理装置所需的其他程序和数据。所述存储器112还可以用于暂时地存储已经输出或者将要输出的数据。

[0091] 实施例3:

[0092] 本实施例提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现实施例1所述方法的步骤。

[0093] 所示计算机可读介质可以是任何可以包含、存储、通信、传播或传输程序以供指令执行系统、装置或设备或结合这些指令执行系统、装置或设备而使用的装置。计算机可读介质的更具体的示例(非穷尽性列表)包括以下:具有一个或多个布线的电连接部(电子装置),便携式计算机盘盒(磁装置),随机存取存储器(RAM),只读存储器(ROM),可擦除可编辑只读存储器(EPROM或闪速存储器),光纤装置,以及便携式光盘只读存储器(CDROM)。另外,计算机可读介质甚至可以是可在其上打印所述程序的纸或其他合适的介质,例如通过对纸或其他介质进行光学扫描,接着进行编辑、解译或必要时以其他合适方式进行处理再以电子方式获得所述程序,然后将其存储在计算机存储器中。

[0094] 上述实施例只是为了说明本发明的技术构思及特点,其目的是在于让本领域内的普通技术人员能够了解本发明的内容并据以实施,并不能以此限制本发明的保护范围。凡是根据本发明内容的实质所做出的等效的变化或修饰,都应涵盖在本发明的保护范围内。

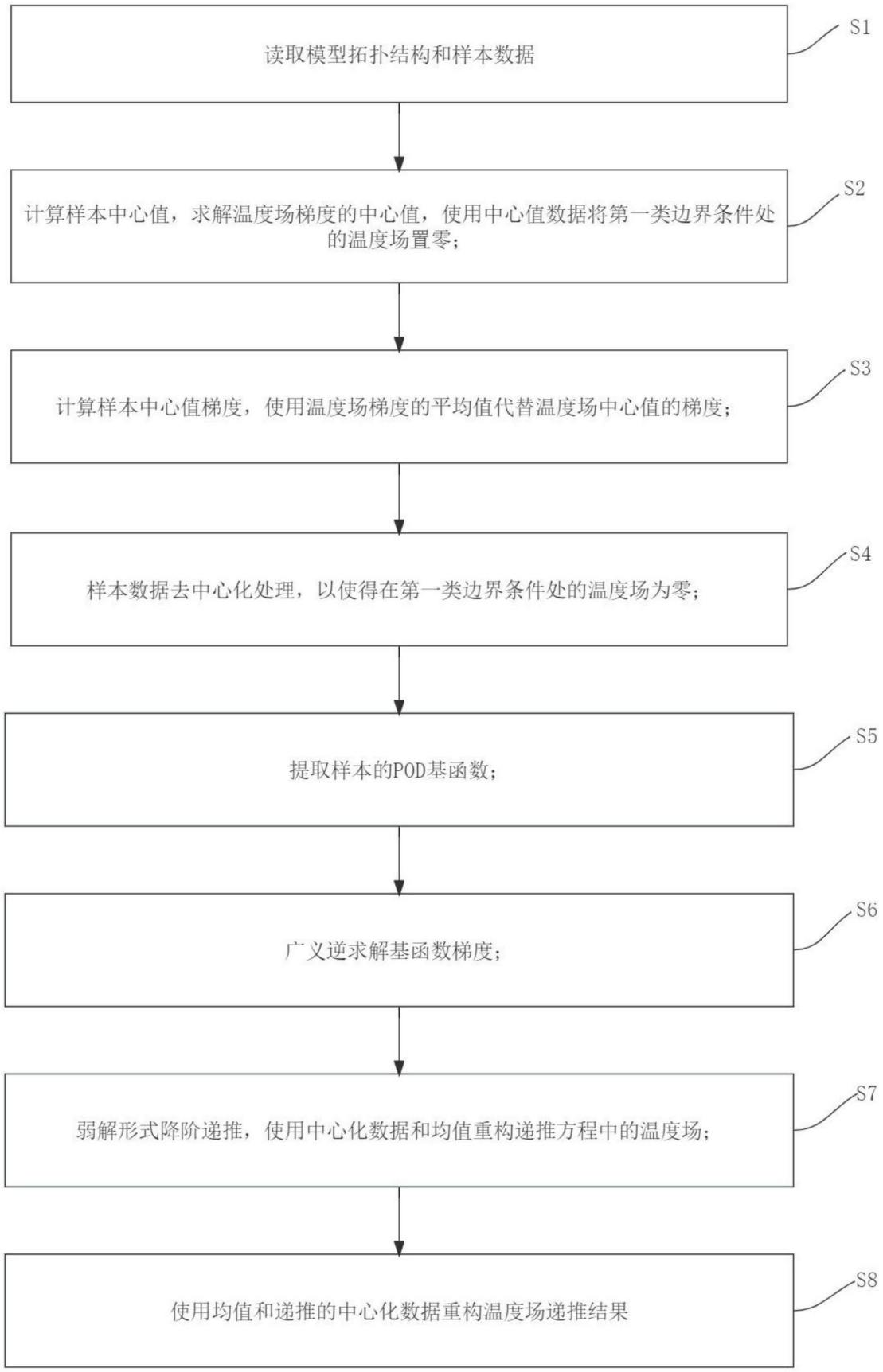

读取模型拓扑结构和样本数据
S1
计算样本中心值，求解温度场梯度的中心值，使用中心值数据将第一类边界条件处的温度场置零；
S2
计算样本中心值梯度，使用温度场梯度的平均值代替温度场中心值的梯度；
S3
样本数据去中心化处理，以使得在第一类边界条件处的温度场为零；
S4
提取样本的POD基函数；
S5
广义逆求解基函数梯度；
S6
弱解形式降阶递推，使用中心化数据和均值重构递推方程中的温度场；
S7
使用均值和递推的中心化数据重构温度场递推结果
S8

图1

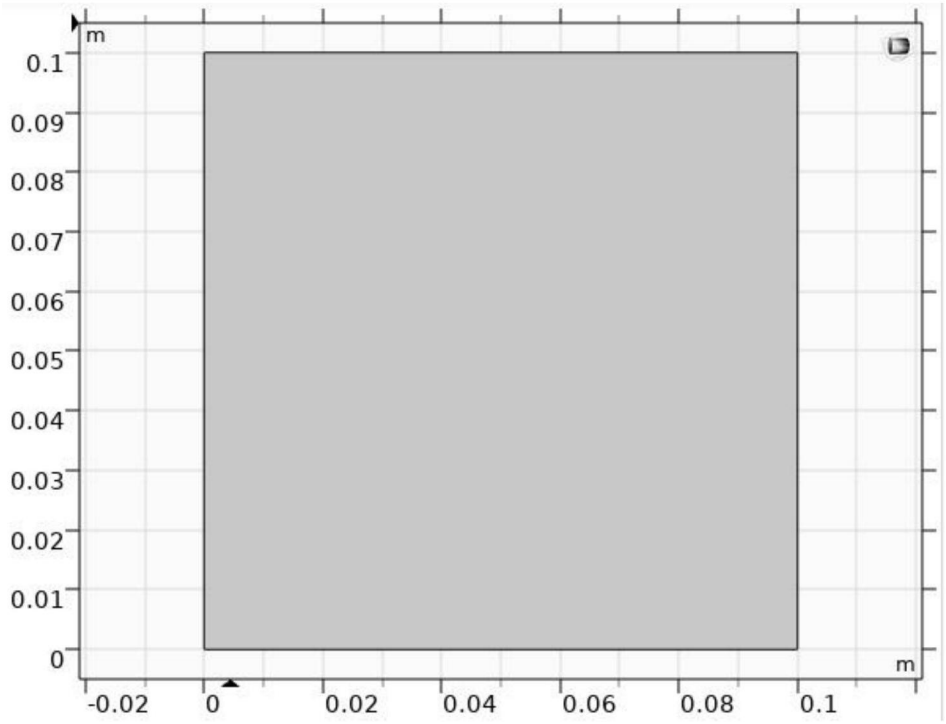

m
0.1
0.09
0.08
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
-0.02
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
m

图2

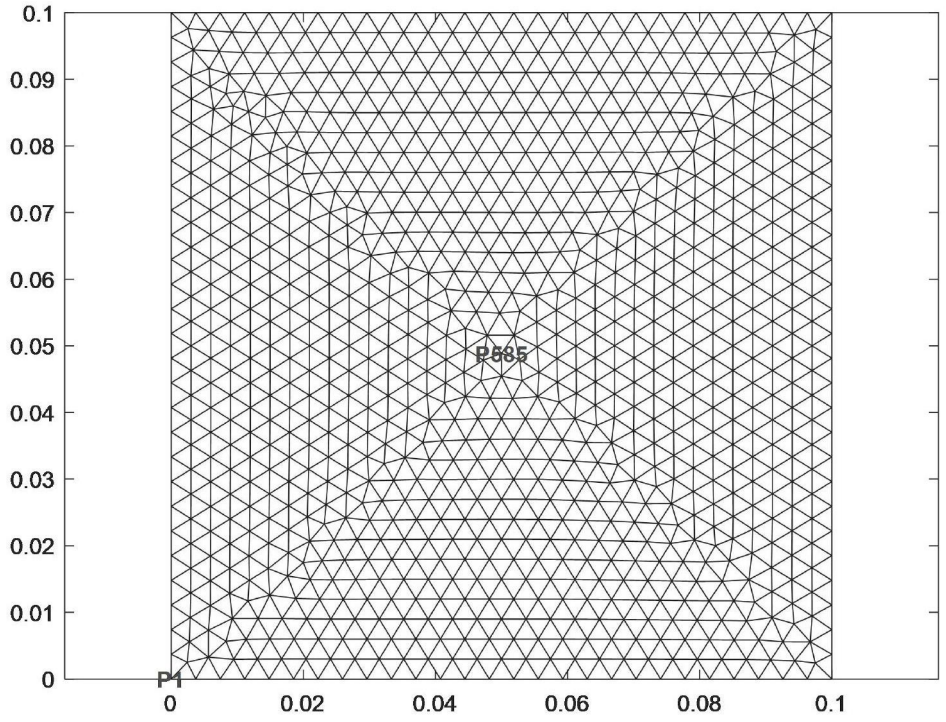

0.1
0.09
0.08
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
P1
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1

图3

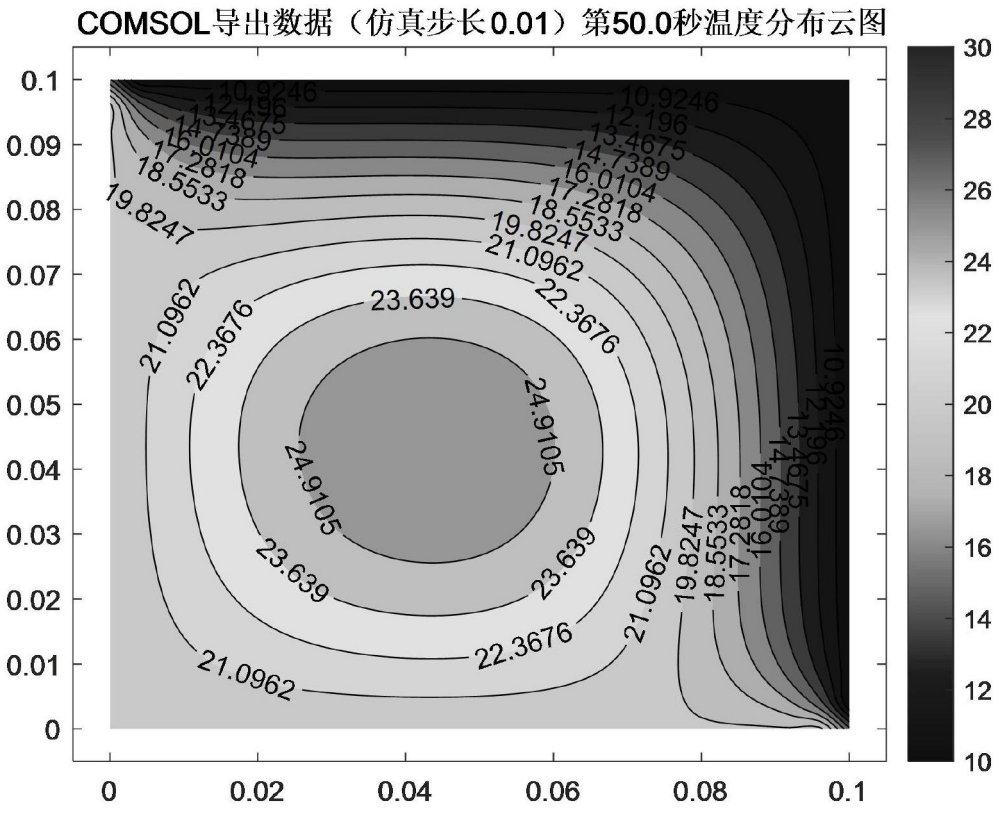

COMSOL导出数据（仿真步长0.01）第50.0秒温度分布云图
0.1
0.09
0.08
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
10.9246
12.196
13.4675
14.7389
16.0104
17.2818
18.5533
19.8247
21.0962
22.3676
23.639
24.9105

图4

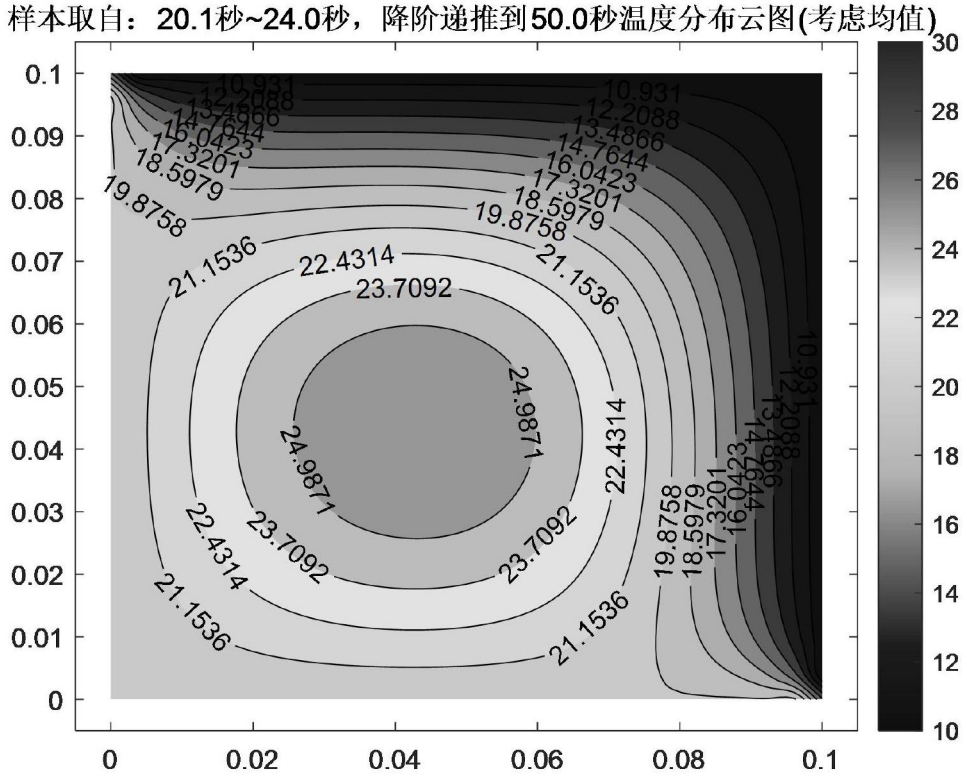

样本取自：20.1秒~24.0秒，降阶递推到50.0秒温度分布云图(考虑均值)
0.1
0.09
0.08
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
10.931
12.2088
13.4866
14.7644
16.0423
17.3201
18.5979
19.8758
21.1536
22.4314
23.7092
24.9871

图5

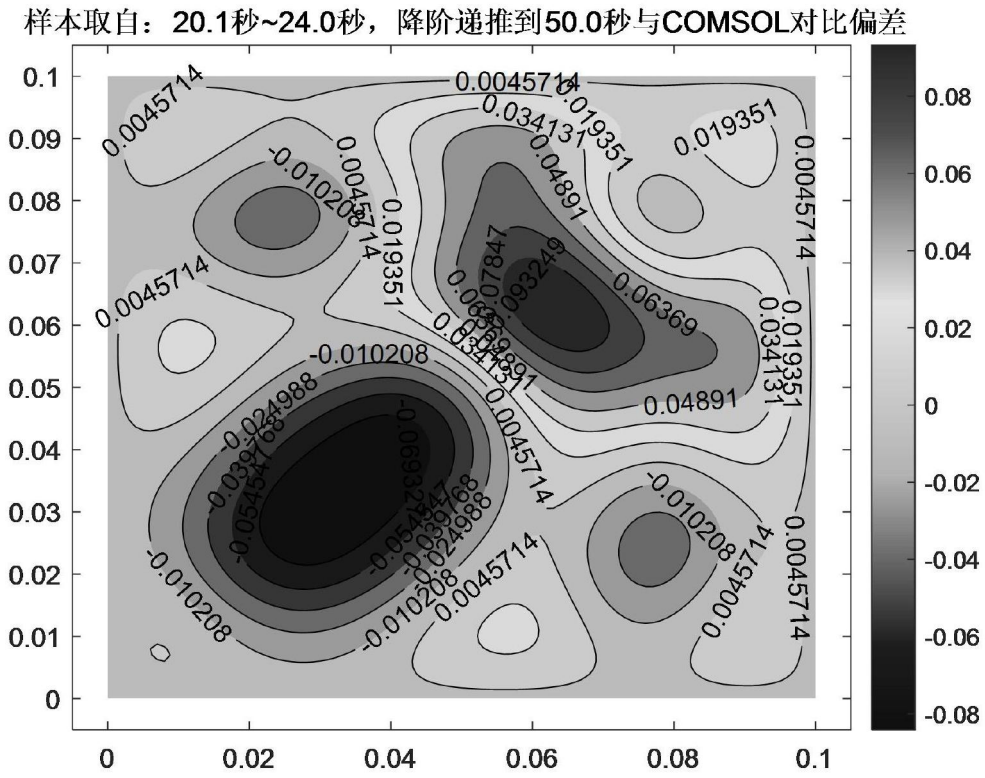

样本取自：20.1秒~24.0秒，降阶递推到50.0秒与COMSOL对比偏差

图6

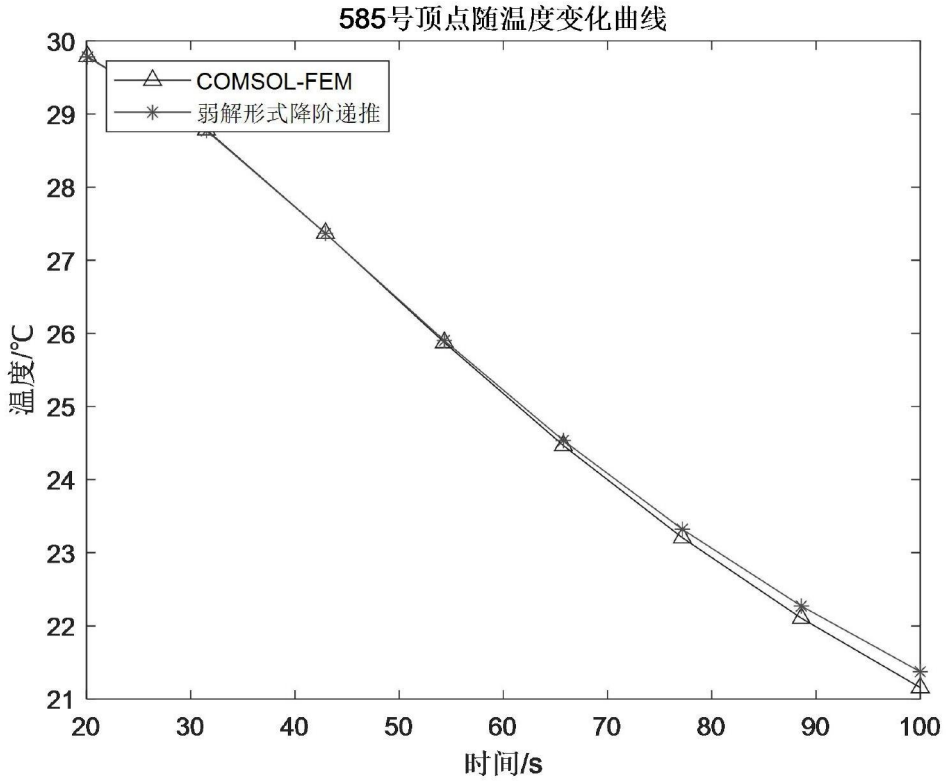

585号顶点随温度变化曲线
COMSOL-FEM
弱解形式降阶递推
温度/℃
时间/s

图7

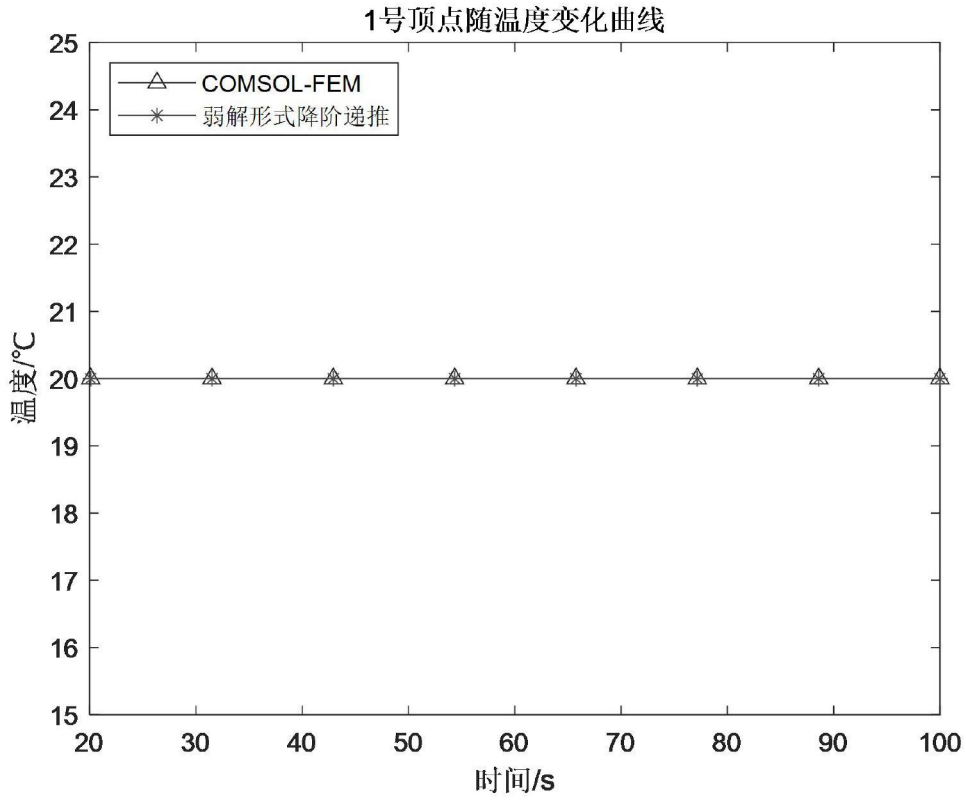

1号顶点随温度变化曲线
COMSOL-FEM
弱解形式降阶递推
温度/℃
时间/s
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
20
30
40
50
60
70
80
90
100

图8

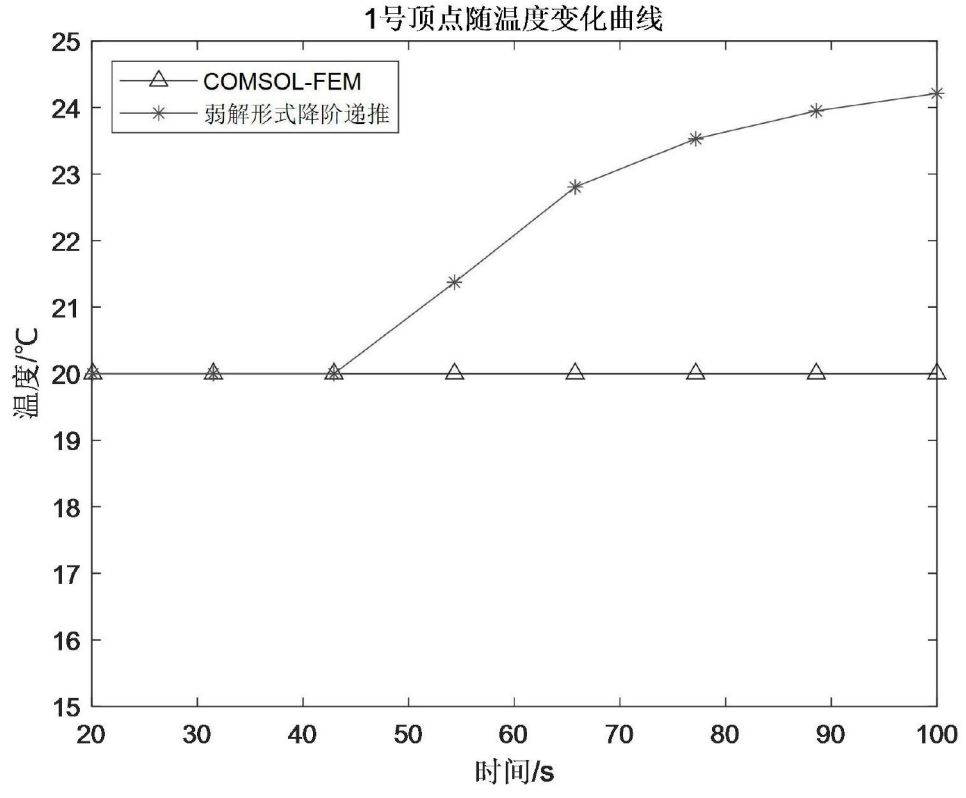

1号顶点随温度变化曲线
COMSOL-FEM
弱解形式降阶递推
温度/℃
时间/s
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
20
30
40
50
60
70
80
90
100

图9

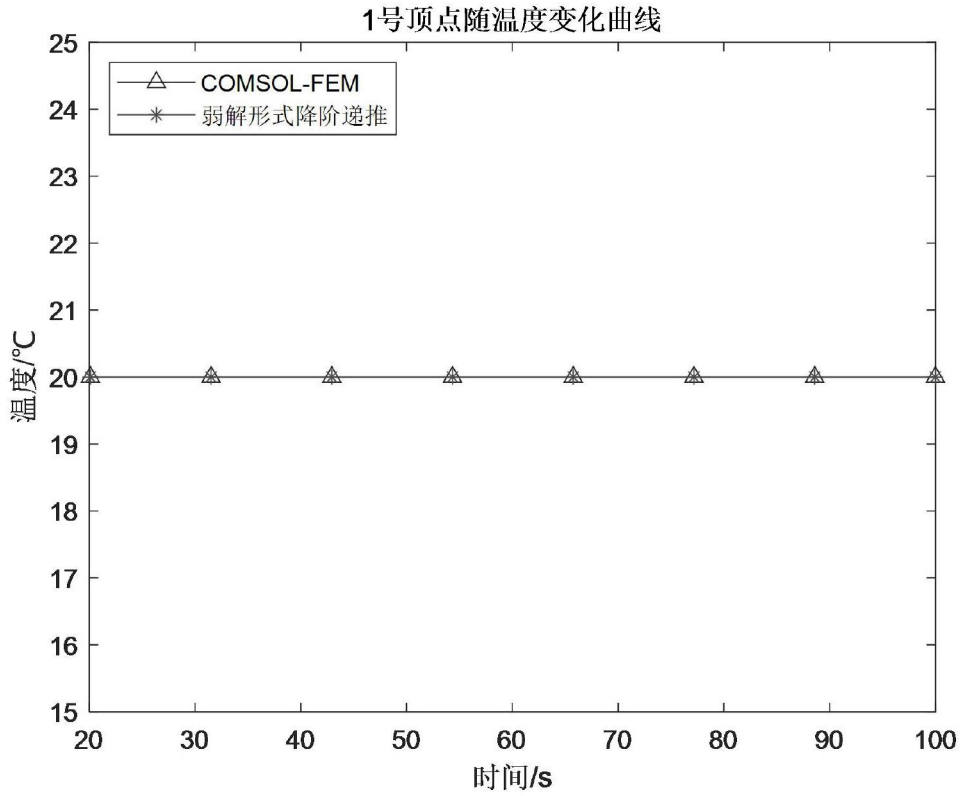

1号顶点随温度变化曲线
COMSOL-FEM
弱解形式降阶递推
温度/℃
时间/s
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
20
30
40
50
60
70
80
90
100

图10

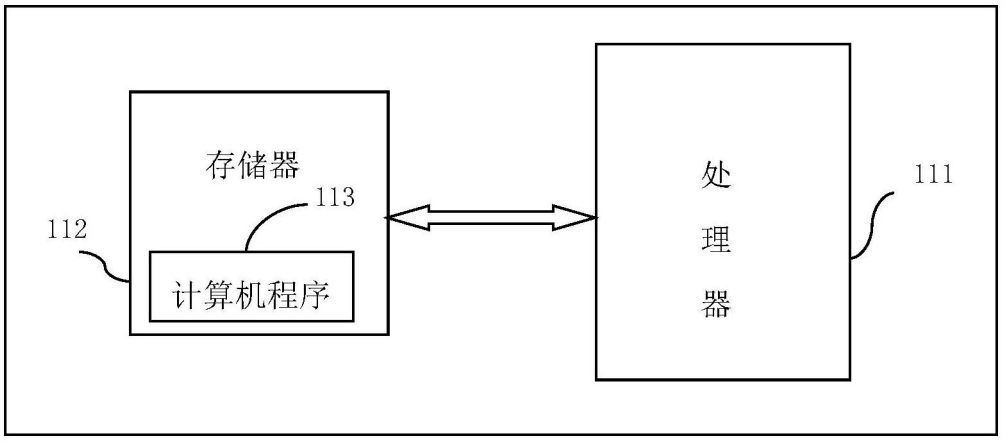

存储器
113
112
计算机程序
处
理
器
111

图11