



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105677995 A

(43) 申请公布日 2016. 06. 15

(21) 申请号 201610018353. 3

(22) 申请日 2016. 01. 12

(71) 申请人 北京航空航天大学

地址 100191 北京市海淀区学院路 37 号

(72) 发明人 邱志平 陈贤佳 孙佳丽 吕峥

朱静静 王鹏博

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责

任公司 11251

代理人 杨学明 顾炜

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006. 01)

G06N 7/06(2006. 01)

权利要求书1页 说明书7页 附图2页

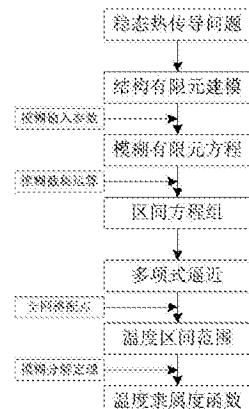
(54) 发明名称

一种基于全网格配点理论的模糊稳态热传导

问题数值求解方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于全网格配点理论的模糊稳态热传导问题数值求解方法,步骤如下:1、稳态传热结构的有限元建模;2、利用模糊变量表征不确定输入参数,进而得到热传导问题的模糊有限元方程;3、利用截集运算,将模糊有限元方程改写为一组区间有限元方程;4、基于多项式理论对区间有限元方程中的温度响应函数进行近似表示;5、根据全网格配点理论对温度响应近似函数的区间变化范围进行快速求解;6、利用模糊分解定理,将所有截集水平下的温度响应区间进行重组,最终得到模糊温度响应的隶属度函数。本发明可系统化解决含有模糊不确定参数的结构热传导温度场预测问题,在保证计算效率满足工程需求的前提下,可以有效提高计算精度,这是一般商用软件所不能实现的。



1. 一种基于全网格配点理论的模糊稳态热传导问题数值求解方法，其特征在于包括以下步骤：

步骤一：针对稳态热传导问题，选取合适的单元类型对结构进行离散，得到此传热结构的有限元模型，建立热传导有限元离散方程；

步骤二：利用模糊向量表征热传导问题中的所有不确定参数，根据步骤一中的离散方程进一步得到热传导问题的模糊有限元方程；

步骤三：利用截集运算，将步骤二中的模糊向量转化为一组区间向量，进而可以将步骤二中的模糊有限元方程改写为一组区间有限元方程；

步骤四：基于多项式理论，对步骤三中区间有限元方程的温度响应函数进行近似表示；

步骤五：基于全网格配点理论，利用步骤三中的区间有限元方程和步骤四中的多项式表达式，对温度响应的区间变化范围进行快速求解；

步骤六：利用模糊分解定理将步骤五中得到的所有温度响应区间进行重组，最终得到模糊温度响应的隶属度函数。

2. 根据权利要求1所述的一种基于全网格配点理论的模糊稳态热传导问题数值求解方法，其特征在于：所述步骤四中利用多项式理论对温度响应函数进行近似表示，多项式基底函数根据变量类型事先选定；多项式的阶数则根据精度要求灵活选取。

3. 根据权利要求1所述的一种基于全网格配点理论的模糊稳态热传导问题数值求解方法，其特征在于：所述步骤五中配点方案的选取并不是固定不变的；根据多项式展开系数的数量和计算精度的要求灵活选取配点水平。

一种基于全网格配点理论的模糊稳态热传导问题数值求解方法

技术领域

[0001] 本发明属于机械工程领域,具体涉及一种基于全网格配点理论的模糊稳态热传导问题数值求解方法。

背景技术

[0002] 传热问题在工程中普遍存在,在汽车制造、电子工程、能源化工等领域,如何更为有效的实现热量传递使结构和电子设备正常工作也是工程师所面临的重要问题。尤其是在航空航天领域,传热与结构的耦合作用更为显著。随着科学技术的不断进步,飞行器传热系统日趋复杂,对性能的要求也越来越高,这就使得精细化分析成为飞行器设计的一个重要发展趋势。

[0003] 小到电子元件的开发,大到飞行器结构系统的设计,不确定性因素无处不在。近些年来,不确定性理论得到了广泛的研究且被应用到许多实际工程问题中,带来的社会与经济效益是巨大的。这一方面反映了不确定性理论在实际工程应用中发挥了重要作用,另一方面也为我们进一步研究不确定性计算方法和优化理论提供了基础保障和动力源泉。具体到传热问题中,结构温度变化会引起热应力、热变形等一系列衍生现象,研究这类物理问题的前提和关键就是首先要确定结构的温度分布规律。实际工程中,系统的复杂性导致物理问题数学表述上的困难和不便,往往不得不做出简化,将客观中的不确定性问题近似转化为主观上的确定性问题来处理,这就导致了经典的计算和设计方法越来越不能满足复杂传热系统精细化分析和设计的要求。要获得更客观真实的计算结果,必须通过不确定性理论对传热系统进行建模和求解。事物的模糊性是指其概念本身难以确定,是一种由于概念外延模糊而带来的不确定性,普遍存在与工程实际中。模糊理论在结构静力学分析中已取得了一些成果,但在传热领域中的应用才刚刚起步。如何快速准确预测热传导问题结构温度场的模糊不确定性特征,是目前学术领域的一个热点,对于弥补现有传热数值方法的不足,具有重要的工程应用价值。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题为:克服现有技术在稳态热传导问题求解中存在的不足,充分考虑系统模糊输入参数的影响,基于多项式逼近思想和全网格配点理论,提出了一种准确预测结构温度场模糊不确定特征的数值计算方法。

[0005] 本发明解决上述技术问题采用的技术方案为:一种基于全网格配点理论的模糊稳态热传导问题数值求解方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤一:针对稳态热传导问题,选取合适的单元类型对结构进行离散,得到此传热结构的有限元模型,建立热传导有限元离散方程;

[0007] 步骤二:利用模糊向量表征热传导问题中的所有不确定参数,根据步骤一中的离散方程进一步得到热传导问题的模糊有限元方程;

[0008] 步骤三:利用截集运算,将步骤二中的模糊向量转化为一组区间向量,进而可以将步骤二中的模糊有限元方程改写为一组区间有限元方程;

[0009] 步骤四:基于多项式理论,对步骤三中区间有限元方程的温度响应函数进行近似表示;

[0010] 步骤五:基于全网格配点理论,利用步骤三中的区间有限元方程和步骤四中的多项式表达式,对温度响应的区间变化范围进行快速求解;

[0011] 步骤六:利用模糊分解定理将步骤五中得到的所有温度响应区间进行重组,最终得到模糊温度响应的隶属度函数。

[0012] 其中,所述步骤四中利用多项式理论对温度响应函数进行近似表示,多项式基底函数根据变量类型事先选定;多项式的阶数则根据精度要求灵活选取。

[0013] 其中,所述步骤五中配点方案的选取并不是固定不变的;根据多项式展开系数的数量和计算精度的要求灵活选取配点水平。

[0014] 另外,本发明基于全网格配点理论的模糊稳态热传导问题数值求解方法具体包括以下步骤:

[0015] 步骤一:针对稳态热传导问题,选取合适的单元类型对结构进行离散,得到此传热结构的有限元模型,建立热传导有限元离散方程;

[0016] $KT=R$

[0017] 其中T为温度向量,K为热传导矩阵,R为等效的热载荷向量。

[0018] 步骤二:利用模糊向量表征热传导问题中的所有不确定参数 $\alpha=(\alpha_i)_{\text{m}}=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$,其中n为模糊参数的个数。根据步骤一中的离散方程进一步得到热传导问题的模糊有限元方程:

[0019] $K(\alpha)T(\alpha)=R(\alpha)$

[0020] 步骤三:利用截集运算,将步骤二中的模糊向量转化为一组区间向量:

[0021] $(\alpha)_\lambda = \alpha_\lambda^I = [\underline{\alpha}_\lambda, \bar{\alpha}_\lambda] = (\alpha_{i,\lambda}^I)_n = ([\underline{\alpha}_{i,\lambda}, \bar{\alpha}_{i,\lambda}])_n = (\alpha_{i,\lambda}^c + \Delta\alpha_{i,\lambda}^I)_n = (\alpha_{i,\lambda}^c + \Delta\alpha_{i,\lambda}\delta_i^I)_n$

[0022] 其中 λ 为在0到1范围内所选取的截集水平, $\alpha_{i,\lambda}^I$ 表示区间变量, $\underline{\alpha}_{i,\lambda}$ 和 $\bar{\alpha}_{i,\lambda}$ 为其下界和上界, $\alpha_{i,\lambda}^c = (\bar{\alpha}_{i,\lambda} + \underline{\alpha}_{i,\lambda})/2$ 和 $\Delta\alpha_{i,\lambda} = (\bar{\alpha}_{i,\lambda} - \underline{\alpha}_{i,\lambda})/2$ 表示区间中点和半径, δ_i^I 为标准区间变量 $\delta_i^I = [-1,1]$ 。

[0023] 如此一来,可以将步骤二中的模糊有限元方程改写为一组区间有限元方程:

[0024] $K(\alpha_\lambda^I)T(\alpha_\lambda^I)=R(\alpha_\lambda^I)$

[0025] 其中 $T(\alpha_\lambda^I)$ 为区间变量 α_λ^I 影响下的温度响应向量。

[0026] 步骤四:利用多项式理论,可以将步骤三中区间有限元方程的节点温度响应 $T(\alpha_\lambda^I)$ 用有限阶多项式 $T_N(\alpha_\lambda^I)$ 近似地表示为:

[0027] $T(\alpha_\lambda^I) \approx T_N(\alpha_\lambda^I) = \sum_{i \in N} T_i \Phi_i(\alpha_\lambda^I)$

[0028] 其中 $\Phi_i(\alpha_\lambda^I)$ 为正交多项式基底函数, T_i 为对应的展开系数, $i=(i_1, i_2, \dots, i_n)$ 表示多维指标,且满足 $|i|=i_1+i_2+\dots+i_n$, N 为此多项式的截断阶数。此多项式展开项的个数可用变量个数n和截断阶数N表示为 C_{n+N}^n 。

[0029] 步骤五：基于全网格配点理论，求取温度响应的区间变化范围。首先，引入指标k来表示配点水平，则单个区间变量 $\alpha_{i,\lambda}^l = [\underline{\alpha}_{i,\lambda}, \bar{\alpha}_{i,\lambda}]$ 内的配点数量 m_i 和配点位置 $\beta_j^{(i)}$ 分别为：

$$[0030] m_i = \begin{cases} 1 & \text{若 } k=1 \\ 2^{k-1}+1 & \text{若 } k>1 \end{cases}$$

$$[0031] \beta_j^{(i)} = \begin{cases} \alpha_{i,\lambda}^c & \text{若 } k=1 \\ \alpha_{i,\lambda}^c - \cos \frac{\pi(j-1)}{m_i-1} \cdot \Delta \alpha_{i,\lambda} & j=1, 2, \dots, m_i \quad \text{若 } k>1 \end{cases}$$

[0032] 其次，用点集 $\Theta_i^{m_i} = \{\beta_1^{(i)}, \beta_2^{(i)}, \dots, \beta_{m_i}^{(i)}\}$ 表示单个区间变量 $\alpha_{i,\lambda}^l = [\underline{\alpha}_{i,\lambda}, \bar{\alpha}_{i,\lambda}]$ 内所有配点组成的集合，那么对于n个变量组成的高维空间而言，直接利用张量积运算，其全网格配点集合 Θ 可表示为：

$$[0033] \Theta = \Theta_1^{m_1} \times \Theta_2^{m_2} \times \dots \times \Theta_n^{m_n}$$

[0034] 而配点总数M为：

$$[0035] M = \prod_{i=1}^n m_i = m_1 \times m_2 \times \dots \times m_n$$

[0036] 因此将 Θ 改写为 $\Theta = \{\xi_1^{\text{node}}, \xi_2^{\text{node}}, \dots, \xi_M^{\text{node}}\}$ ，用来表示所有的配点 $\xi_i^{\text{node}} \quad i=1, 2, \dots, M$ 。

[0037] 令步骤三中建立的区间有限元方程在所有配点处成立，进一步基于步骤四中的多项式表达式可以得到关于展开系数 T_i 的一个方程组：

$$[0038] \begin{pmatrix} \Phi_0(\xi_1^{\text{node}}) & \Phi_1(\xi_1^{\text{node}}) & \Phi_2(\xi_1^{\text{node}}) & \dots & \Phi_{C_{n+N}^n-1}(\xi_1^{\text{node}}) \\ \Phi_0(\xi_2^{\text{node}}) & \Phi_1(\xi_2^{\text{node}}) & \Phi_2(\xi_2^{\text{node}}) & \dots & \Phi_{C_{n+N}^n-1}(\xi_2^{\text{node}}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_0(\xi_M^{\text{node}}) & \Phi_1(\xi_M^{\text{node}}) & \Phi_2(\xi_M^{\text{node}}) & \dots & \Phi_{C_{n+N}^n-1}(\xi_M^{\text{node}}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_0 \\ T_1 \\ \vdots \\ T_{C_{n+N}^n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T(\xi_1^{\text{node}}) \\ T(\xi_2^{\text{node}}) \\ \vdots \\ T(\xi_M^{\text{node}}) \end{pmatrix}$$

[0039] 其中 $(\Phi_i(\xi_j^{\text{node}})) \quad |i| \leq N \quad 1 \leq j \leq M$ 表示多项式基底函数 $\Phi_i(\alpha_{\lambda}^l)$ 在配点 ξ_j^{node} 处的取值， $T(\xi_j^{\text{node}})$ 表示节点温度响应 $T(\alpha_{\lambda}^l)$ 在配点 ξ_j^{node} 处的取值。

[0040] 利用最小二乘方法求解上述方程组，得到展开系数 T_i 的一组值，将其代回到步骤四中的多项式中，利用函数 $T_N(\alpha_{\lambda}^l)$ 的光滑性，进而得到温度响应的下界和上界：

$$[0041] \underline{T}(\alpha_{\lambda}^l) \approx \min T_N(\alpha_{\lambda}^l) \quad \bar{T}(\alpha_{\lambda}^l) \approx \max T_N(\alpha_{\lambda}^l)$$

[0042] 步骤六：利用模糊分解定理将步骤五中得到的所有温度响应区间 $T^I(\alpha_{\lambda}^l) = [\underline{T}(\alpha_{\lambda}^l), \bar{T}(\alpha_{\lambda}^l)]$ 进行重组，最终得到模糊参数向量 α 影响下的模糊温度响应的隶属度函数 $T(\alpha)$ ：

$$[0043] T(\alpha) = \bigcup_{j=1, \dots, m} \{\lambda_j T^I(\alpha_{\lambda_j}^l)\}$$

[0044] 其中m为模糊截集运算中所选取的截集数量。

[0045] 本发明与现有技术相比的优点在于：

[0046] (1)与传统的稳态热传导问题求解方法相比，所建立的计算模型充分考虑到实际工程中材料参数、载荷和边界条件的模糊不确定性，计算结果对温度场分析及结构设计具有更重要的指导意义。

[0047] (2)基于多项式理论对温度响应函数进行近似,截断阶数可自主选择,有效提高逼近精度。另外,利用多项式函数的光滑性,可快速确定温度响应关于区间变量的极值点,进而得到温度响应的上下界。

[0048] (3)在多项式展开系数求解的过程中,利用全网格配点方法,可以充分利用原有确定性模型的计算程序而无需对原模型做进一步的加工和修改。通过选择合适的配点方案,少量的配点数量就可以最大程度的保证计算精度,这个优势是传统蒙特卡洛模拟方法所不能比拟的。

[0049] (4)本发明操作简单,实施方便,有效提高了计算精度。

附图说明

[0050] 图1为本发明的一种基于全网格配点理论的模糊稳态热传导问题数值求解方法流程图;

[0051] 图2为本发明的平板传热结构有限元模型示意图;

[0052] 图3为特征点2处模糊温度响应的隶属度函数示意图;

[0053] 图4为特征点4处模糊温度响应的隶属度函数示意图。

具体实施方式

[0054] 下面结合附图和实施例对本发明做进一步说明。

[0055] 本发明适用于含有模糊不确定参数的稳态热传导问题的结构温度场预测。本实施方式以某平板传热结构的温度场预测为例,具体说明所述的模糊稳态热传导问题数值求解方法。另外,此平板传热结构模糊不确定温度响应数值计算方法可以推广到其他含有模糊参数的稳态热传导问题温度场预测中。

[0056] 模糊稳态热传导问题数值计算过程如图1所示,基于结构的有限元模型,建立传热系统的离散方程,利用模糊变量对不确定参数进行定量化描述,并基于截集运算对不确定参数做进一步处理,根据多项式逼近理论和全网格配点方法对所有截集水平下温度响应的区间变化范围进行快速求解,利用模糊分解定理对其进行重组,最终得到模糊不确定温度响应的隶属度函数。可分为如下几个步骤进行:

[0057] 步骤一:建立平板传热结构有限元模型,如图2所示:矩形区域和圆形区域分别划分为100个四边形单元和188个三角形单元,阴影区域8有容积热Q生成,同时板底部沿边界9施加热流载荷 q_s ,左侧边界10给定温度值 T_s ,选定编号为1~7的7个节点作为此算例的特征点。根据有限元模型建立热传导有限元离散方程:

[0058] $KT=R$

[0059] 其中T为温度向量,K为热传导矩阵,R为等效的热载荷向量。

[0060] 步骤二:此热传导问题中,受材料加工工艺的限制和测量误差的影响,所有参数均为模糊数,且隶属度函数满足三角分布规律,其中导热系数 $k=(174, 204, 234)W/(m \cdot ^\circ C)$,热流密度 $q_s=(750, 900, 1050)W/m^2$,热源强度 $Q=(1700, 2000, 2300)W/m^3$,边界温度 $T_s=(42, 50, 58)^\circ C$ 。为方便起见,将此计算模型中所涉及到的所有模糊参数表示为向量 α 的形式 $\alpha=(k, q_s, Q, T_s)$,根据步骤一中的离散方程进一步得到热传导问题的模糊有限元方程:

[0061] $K(\alpha)T(\alpha)=R(\alpha)$

[0062] 步骤三: 定义11个截集水平 $\lambda_q = (q-1) \times 0.1$ $q=1, \dots, 11$, 利用截集运算可以将步骤二中的模糊向量 α 改写为:

$$[0063] (\alpha)_\lambda = \alpha_\lambda^I = [\underline{\alpha}_\lambda, \bar{\alpha}_\lambda] = (\alpha_{i,\lambda}^I)_n = ([\underline{\alpha}_{i,\lambda}, \bar{\alpha}_{i,\lambda}])_n = (\alpha_{i,\lambda}^e + \Delta\alpha_{i,\lambda}^I)_n = (\alpha_{i,\lambda}^e + \Delta\alpha_{i,\lambda} \delta_i^I)_n$$

[0064] 其中 $\alpha_{i,\lambda}^I$ 表示区间变量, $\underline{\alpha}_{i,\lambda}$ 和 $\bar{\alpha}_{i,\lambda}$ 为其下界和上界, $\alpha_{i,\lambda}^e = (\bar{\alpha}_{i,\lambda} + \underline{\alpha}_{i,\lambda})/2$ 和 $\Delta\alpha_{i,\lambda} = (\bar{\alpha}_{i,\lambda} - \underline{\alpha}_{i,\lambda})/2$ 表示区间中点和半径, δ_i^I 为标准区间变量 $\delta_i^I = [-1,1]$ 。

[0065] 如此一来, 可以将步骤二中的模糊有限元方程改写为一组区间有限元方程:

$$[0066] \mathbf{K}(\alpha_\lambda^I) \mathbf{T}(\alpha_\lambda^I) = \mathbf{R}(\alpha_\lambda^I)$$

[0067] 其中 $\mathbf{T}(\alpha_\lambda^I)$ 为区间变量 α_λ^I 影响下的温度响应向量。

[0068] 步骤四: 根据区间变量的分布特点, 选用勒让得型正交多项式作为基底函数, 截断阶数设定为 $N=3$, 则步骤三中区间有限元方程的节点温度响应 $T(\alpha_\lambda^I)$ 可以近似地表示为:

$$[0069] T(\alpha_\lambda^I) \approx T_N(\alpha_\lambda^I) = \sum_{|i| \leq N} T_i \Phi_i(\alpha_\lambda^I)$$

[0070] 其中 $\Phi_i(\alpha_\lambda^I)$ 为勒让得型正交多项式基底函数, T_i 为对应的展开系数, $i = (i_1, i_2, \dots, i_n)$ 表示多维指标, 且满足 $|i| = i_1 + i_2 + \dots + i_n$, 此时多项式展开项的个数为 $C_{4+3}^4 = 35$ 。

[0071] 步骤五: 基于全网格配点, 求取温度响应的区间范围。首先, 对于截集水平 $\lambda_9 = 0.8$, 设定配点水平 $k=3$, 则单个区间变量 $\alpha_{i,0.8}^I = [\underline{\alpha}_{i,0.8}, \bar{\alpha}_{i,0.8}]$ 内的配点数量 m_i 和配点位置 $\beta_j^{(i)}$ 分别为:

$$[0072] m_i = 5$$

$$[0073] \beta_j^{(i)} = \alpha_{i,\lambda}^e - \cos \frac{\pi(j-1)}{m_i-1} \cdot \Delta\alpha_{i,\lambda} \quad j = 1, 2, \dots, 5$$

[0074] 其次, 用点集 $\Theta_i^S = \{\beta_1^{(i)}, \beta_2^{(i)}, \dots, \beta_5^{(i)}\}$ 表示单个区间变量 $\alpha_{i,0.8}^I = [\underline{\alpha}_{i,0.8}, \bar{\alpha}_{i,0.8}]$ 内所有配点组成的集合, 那么对于4个变量组成的高维空间而言, 直接利用张量积运算, 其全网格配点集合 Θ 可表示为:

$$[0075] \Theta = \Theta_1^S \times \Theta_2^S \times \dots \times \Theta_4^S$$

[0076] 而配点总数 M 为:

$$[0077] M = \prod_{i=1}^4 5 = 625$$

[0078] 因此将 Θ 改写为 $\Theta = \{\xi_1^{node}, \xi_2^{node}, \dots, \xi_{625}^{node}\}$, 用来表示所有的配点 ξ_i^{node} $i = 1, 2, \dots, 625$ 。

[0079] 令步骤三中建立的区间有限元方程在所有配点处成立, 进一步基于步骤四中的多项式表达式可以得到关于展开系数 T_i 的一个方程组:

$$[0080] \begin{pmatrix} \Phi_0(\xi_1^{node}) & \Phi_1(\xi_1^{node}) & \Phi_2(\xi_1^{node}) & \dots & \Phi_{34}(\xi_1^{node}) \\ \Phi_0(\xi_2^{node}) & \Phi_1(\xi_2^{node}) & \Phi_2(\xi_2^{node}) & \dots & \Phi_{34}(\xi_2^{node}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_0(\xi_{625}^{node}) & \Phi_1(\xi_{625}^{node}) & \Phi_2(\xi_{625}^{node}) & \dots & \Phi_{34}(\xi_{625}^{node}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_0 \\ T_1 \\ \vdots \\ T_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T(\xi_1^{node}) \\ T(\xi_2^{node}) \\ \vdots \\ T(\xi_{625}^{node}) \end{pmatrix}$$

[0081] 利用最小二乘方法求解上述方程组, 得到展开系数 T_i 的一组值, 将其代回到步骤

四中的多项式中,利用函数 $T_N(\mathbf{a}_{0.8}^I)$ 的光滑性,进而得到截集水平 $\lambda_9=0.8$ 下温度响应的下界和上界:

[0082] $\underline{T}(\mathbf{a}_{0.8}^I) \approx \min T_N(\mathbf{a}_{0.8}^I) \quad \bar{T}(\mathbf{a}_{0.8}^I) \approx \max T_N(\mathbf{a}_{0.8}^I)$

[0083] 同样的,对于截集水平 $\lambda_6=0.5$,设定配点水平 $k=4$,重复上述操作,得到截集水平 $\lambda_6=0.5$ 下温度响应的下界和上界。

[0084] $\lambda_9=0.8$ 和 $\lambda_6=0.5$ 两个截集水平下特征点处温度响应的计算结果如表2和表3所示。与样本数为 10^5 的蒙特卡洛模拟方法计算结果相比,本方法对温度响应区间上下界预测的相对误差维持在一个较低水平,完全可以满足实际工程的精度要求。另外,从样本数量上看,本方法的计算效率远远高于蒙特卡洛方法。

[0085] 表2截集水平 $\lambda_9=0.8$ 下温度响应上下界

特征点	界限	蒙特卡洛(10^5 样本)		本方法(625 样本) 数值($^{\circ}$ C)	相对误差(%)
		数值($^{\circ}$ C)	本方法(625 样本) 数值($^{\circ}$ C)		
[0086]	1 下界	52.63	52.84	0.40	
		56.32	56.11	0.37	
	2 下界	57.26	57.52	0.45	
		61.42	61.15	0.44	
	3 下界	60.24	60.53	0.48	
		64.71	64.41	0.46	
	4 下界	62.20	62.51	0.50	
		66.83	66.50	0.49	
	5 下界	63.67	64.01	0.53	
		68.50	68.15	0.51	
	6 下界	64.42	64.78	0.56	
		69.36	69.00	0.52	
	7 下界	66.52	66.92	0.60	
		71.75	71.33	0.69	

[0087] 表3截集水平 $\lambda_6=0.5$ 下温度响应上下界

特征点	界限	蒙特卡洛(10^5 样本)	本方法(6561 样本)	
		数值(°C)	数值(°C)	相对误差(%)
[0088]	1	下界	49.90	0.32
		上界	59.12	0.27
	2	下界	54.19	0.39
		上界	64.62	0.34
	3	下界	56.97	0.42
		上界	68.15	0.38
	4	下界	58.82	0.44
		上界	70.40	0.40
	5	下界	60.15	0.47
		上界	72.24	0.43
	6	下界	60.82	0.49
		上界	73.20	0.45
	7	下界	62.73	0.54
		上界	75.82	0.50

[0089] 步骤六:利用模糊分解定理将步骤五中得到的所有温度响应区间进行重组,最终得到模糊参数向量 α 影响下的模糊温度响应的隶属度函数 $T(\alpha)$:

$$[0090] T(\alpha) = \bigcup_{j=1, \dots, 11} \{\lambda_j T^j(\alpha_{\lambda_j})\}$$

[0091] 以特征点2和特征点4为例,模糊温度响应的隶属度函数如图3和图4所示。可以看出,本方法计算得到的结果与蒙特卡洛抽样得到的参考值吻合程度很好,计算精度完全满足工程要求。用本方法可以解决含有模糊不确定参数的稳态温度场预测问题,计算精度高,计算耗时少,此功能是一般商用软件所不能实现的。

[0092] 以上所述的仅为本发明的较佳实施例而已,本发明不仅仅局限于上述实施例,凡在本发明的精神和原则之内所作的局部改动、等同替换、改进等均应包含在本发明的保护范围之内。

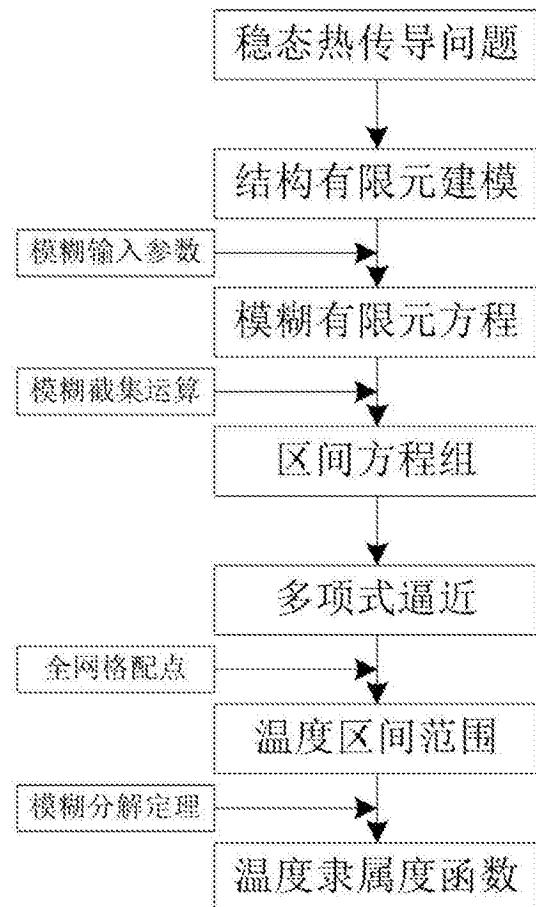


图1

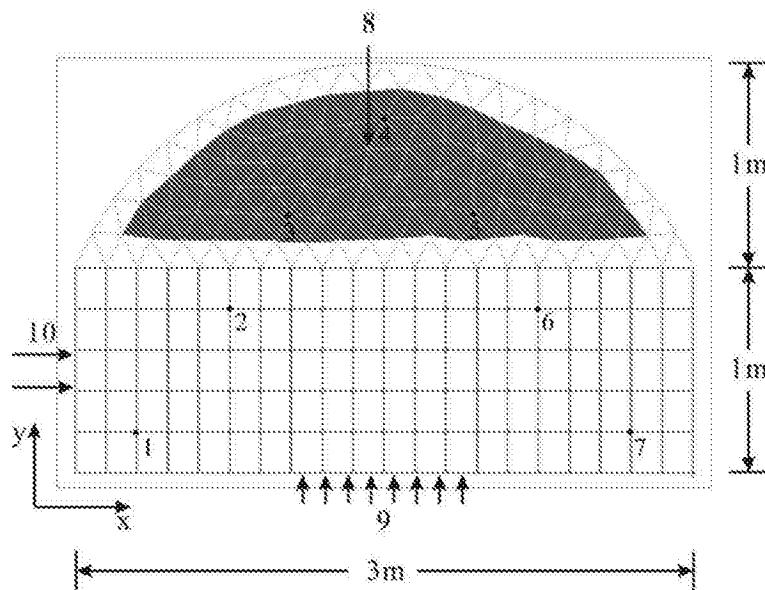


图2

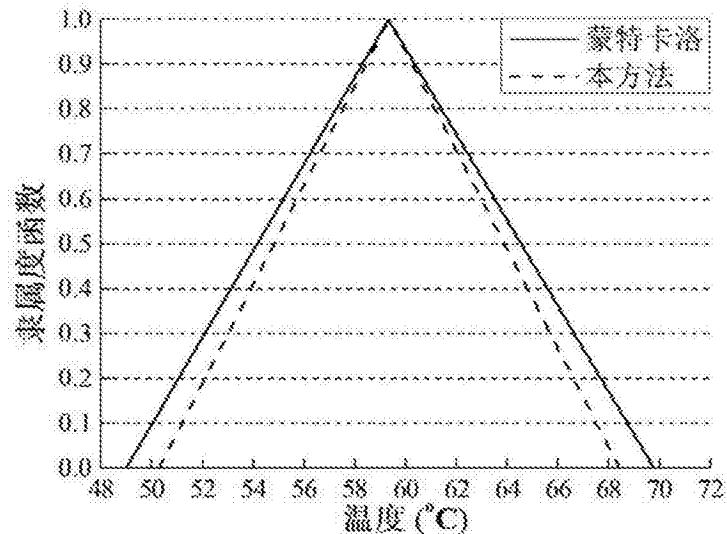


图3

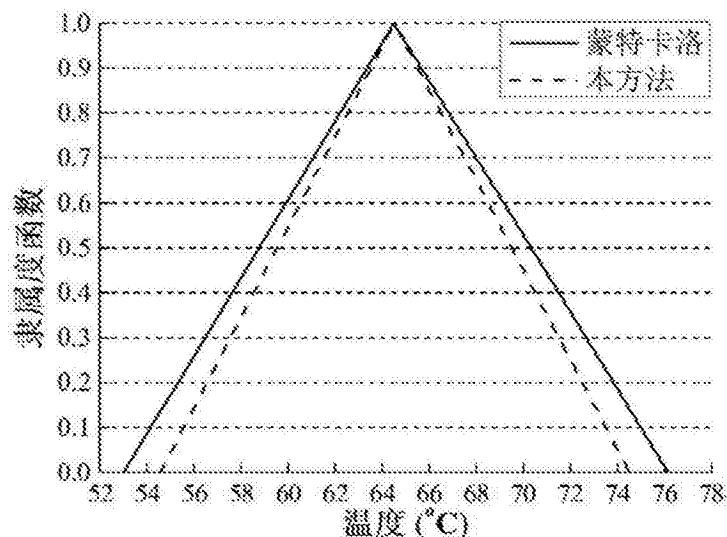


图4