



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110427661 A

(43)申请公布日 2019.11.08

(21)申请号 201910639486.6

(22)申请日 2019.07.16

(71)申请人 合肥中科重明科技有限公司

地址 230601 安徽省合肥市经济技术开发区天门路以西、锦绣大道以南天门湖工业园1幢厂房二层

(72)发明人 范学军 李轩 陆阳 吴坤

(74)专利代理机构 北京和信华成知识产权代理事务所(普通合伙) 11390

代理人 胡剑辉

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

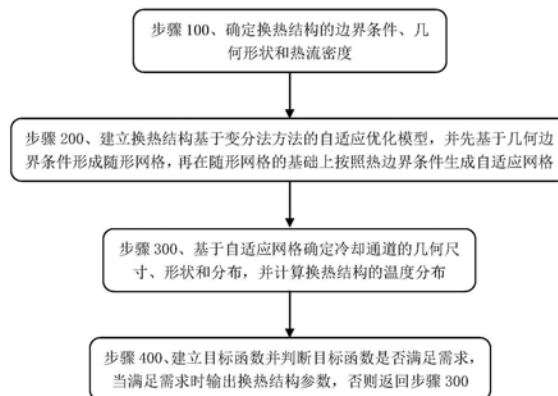
权利要求书3页 说明书7页 附图4页

## (54)发明名称

一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法

## (57)摘要

本发明实施例公开了一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法,包括如下步骤:确定换热结构的边界条件、几何形状和热流密度,其中边界条件包括几何边界条件和热边界条件;建立换热结构基于变分法方法的自适应优化模型,并先基于几何边界条件形成随形网格,再在随形网格的基础上按照根据热边界条件生成自适应网格;基于自适应网格确定冷却通道的几何尺寸、形状和分布,并计算换热结构的温度分布;建立目标函数并判断目标函数是否满足需求,当满足需求时输出换热结构参数,否则返回步骤300;本发明能够根据边界条件的不同或变化而相应调整,无论是用于冷却还是加热,该换热结构与传统的换热结构相比,能够提高换热量,换热效果更好。



1. 一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100、确定换热结构的边界条件、几何形状和热流密度,其中边界条件包括几何边界条件和热边界条件;

步骤200、建立换热结构基于变分法方法的自适应优化模型,并先基于几何边界条件形成随形网格,再在随形网格的基础上按照热边界条件生成自适应网格;

步骤300、基于自适应网格确定冷却通道的几何尺寸、形状和分布,并计算换热结构的温度分布;

步骤400、建立目标函数并判断目标函数是否满足需求,当满足需求时输出换热结构参数,否则返回步骤300。

2. 根据权利要求1所述一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法,其特征在于,所述换热结构的温度分布经过流固耦合计算,并经过多次迭代。

3. 根据权利要求1所述一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法,其特征在于,所述换热结构包括推力室壁面,在所述推力室壁面内设有冷却通道,所述冷却通道的出口和入口分别设置在推力室壁面的两个侧面,其中,换热结构的热边界条件和几何边界条件具体为推力室壁面的热流密度和外形尺寸。

4. 根据权利要求3所述一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法,其特征在于,生成随形网格的具体步骤为:

建立冷却通道内冷却剂流体的势流函数: $F = \xi + i\eta$ ,其中 $\xi$ 为势函数, $\eta$ 为流函数, $\xi$ 和 $\eta$ 满足拉普拉斯方程,即

$$\begin{cases} \nabla^2 \xi = 0 \\ \nabla^2 \eta = 0; \end{cases}$$

交换变量和自变量得到:

$$\alpha x_{\xi\xi} + 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} = 0$$

$$\alpha y_{\xi\xi} + 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} = 0;$$

其中, $\alpha = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2$ , $\beta = -(x_{\xi}x_{\eta} + y_{\xi}y_{\eta})$ , $\gamma = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2$ ;  $\nabla$ 为哈密顿算子, $x$ 和 $y$ 是物理场横纵坐标, $\xi$ 和 $\eta$ 是计算场横纵坐标, $x_{\eta}$ 是 $x$ 对 $\eta$ 的一阶偏导数, $x_{\xi}$ 是 $x$ 对 $\xi$ 的一阶偏导数, $x_{\xi\xi}$ 是 $x$ 对 $\xi$ 的二阶偏导数, $x_{\eta\eta}$ 是 $x$ 对 $\eta$ 的二阶偏导数, $x_{\xi\eta}$ 是 $x$ 对 $\xi$ 和 $\eta$ 各求一阶偏导数; $y_{\eta}$ 是 $y$ 对 $\eta$ 的一阶偏导数, $y_{\xi}$ 是 $y$ 对 $\xi$ 的一阶偏导数, $y_{\xi\xi}$ 是 $y$ 对 $\xi$ 的二阶偏导数, $y_{\eta\eta}$ 是 $y$ 对 $\eta$ 的二阶偏导数, $y_{\xi\eta}$ 是 $y$ 对 $\xi$ 和 $\eta$ 各求一阶偏导数;

根据上述公式生成推力室壁面的随形网格。

5. 根据权利要求4所述一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法,其特征在于,基于变分法生产自适应网格的方法为:

$$\text{加权函数的泛函为: } I_v = \iint_D qJ dx dy = \iint_D qJ^2 d\xi d\eta;$$

$$\text{网格光滑性的泛函为: } I_s = \iint_D [(\nabla \xi)^2 + (\nabla \eta)^2] J^2 dx dy;$$

网格正交性的泛函为： $I_0 = \iint_D (\nabla \xi \cdot \nabla \eta)^2 J^3 dx dy$ ；

其中， $J = x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi$ ， $q$ 为推力室壁面的热流密度；

将上述三个泛函代入  $I = \lambda_v I_v + \lambda_s I_s + \lambda_o I_0$ ，并使得泛函  $I$  最小，其中  $\lambda_v, \lambda_s, \lambda_o$  为加权系数，加权系数须根据具体问题的需要来选择其数值大小。

6. 根据权利要求5所述一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法，其特征在于，根据物理场和计算场之间的坐标变换并交换变量和自变量之后得到网格光滑性泛函以及网格正交性泛函变化后的关系，根据上述变换得到自适应网格的生成控制方程。

7. 根据权利要求6所述一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法，其特征在于，对偏微分方程采用有限差分来迭代求解，在计算域内设定  $\Delta \xi = 1$  和  $\Delta \eta = 1$ ， $\Delta \xi$  为计算场中  $x$  方向两相邻网格点之间的距离， $\Delta \eta$  为计算场中  $y$  方向两相邻网格点之间的距离， $i$  为  $x$  方向的网格点坐标， $j$  为  $y$  方向的网格点坐标：

对式中  $x$  的导数采用如下差分格式：

$$x_\xi = \frac{x_{i+1, j} - x_{i-1, j}}{2\Delta \xi}, \quad x_\eta = \frac{x_{i, j+1} - x_{i, j-1}}{2\Delta \eta},$$

$$x_{\xi\xi} = \frac{x_{i+1, j} - 2x_{i, j} + x_{i-1, j}}{\Delta \xi^2}, \quad x_{\eta\eta} = \frac{x_{i, j+1} - 2x_{i, j} + x_{i, j-1}}{\Delta \eta^2},$$

$$x_{\xi\eta} = \frac{x_{i+1, j+1} + x_{i-1, j-1} - x_{i+1, j-1} - x_{i-1, j+1}}{4\Delta \xi \Delta \eta};$$

对式中  $y$  的导数采用如下差分格式：

$$y_\xi = \frac{y_{i+1, j} - y_{i-1, j}}{2\Delta \xi}, \quad y_\eta = \frac{y_{i, j+1} - y_{i, j-1}}{2\Delta \eta},$$

$$y_{\xi\xi} = \frac{y_{i+1, j} - 2y_{i, j} + y_{i-1, j}}{\Delta \xi^2}, \quad y_{\eta\eta} = \frac{y_{i, j+1} - 2y_{i, j} + y_{i, j-1}}{\Delta \eta^2},$$

$$y_{\xi\eta} = \frac{y_{i+1, j+1} + y_{i-1, j-1} - y_{i+1, j-1} - y_{i-1, j+1}}{4\Delta \xi \Delta \eta}。$$

8. 根据权利要求7所述一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法，其特征在于，所述冷却通道的几何尺寸与所述自适应网格当地的密度正相关，其中的  $\eta$  线为冷却通道的中心线，冷却通道的宽度垂直于  $\eta$  线，表达为：

$$d \propto \left\{ \sqrt{[x(\xi + \Delta \xi, \eta) - x(\xi, \eta)]^2 + [y(\xi + \Delta \xi, \eta) - y(\xi, \eta)]^2} \right\}^{1/n},$$

$d$  为冷却通道的宽度。

9. 根据权利要求8所述一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法，其特征在于，在冷却通道的分布下得到推力室壁面的温度分布，并确定目标函数，其中，选取平均温度和温度不均匀度最小为目标函数，具体为：

$$F_0 = w_1 A + w_2 B + \dots + w_n D,$$

其中， $A$  表示温度不均匀度， $B$  表示平均温度， $D$  为温度的其它因素， $w_1, w_2, w_n$  分别表示目标函数中不同项所占的比重， $T$  为温度， $\bar{T}$  为平均温度， $V_s$  为固体体积， $N_s$  为固体节点数，具

体的,  $A = \sqrt{\frac{1}{V_s} \int_{\Omega_s} (T - \bar{T})^2 d\Omega_s}$ ,  $\bar{T} = \frac{1}{V_s} \int_{\Omega_s} T d\Omega_s$ ,  $V_s = \int_{\Omega_s} d\Omega_s$ ,  $B = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} T_i$ 。

10. 根据权利要求9所述一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法, 其特征在于, 根据目标函数建立优化数学模型:

$$\begin{cases} \text{find } Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \\ \min F_0 = w_1 A + w_2 B, \\ \text{s.t. } g_i(Y) \leq 0, R_j(Y) = 0 \end{cases}$$

其中,  $Y$  为形状设计变量,  $F_0$  为目标函数,  $y_n$  是物理场纵坐标,  $g_i(Y)$ 、 $R_j(Y)$  为约束条件。

## 一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明实施例涉及高效换热技术领域,具体涉及一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法。

### 背景技术

[0002] 在很多地方都需要用到高效换热结构,如在火箭发动机中,发动机壁面会受到高温燃气(3000K以上)的对流辐射等共同作用,承受着严酷热环境的考验,因此,其内冷却结构的好坏将直接影响发动机能否正常工作。类似地,在航空燃气涡轮发动机中,为了提高性能,涡轮叶片需要在高温条件下正常工作,同样的,涡轮叶片也需要高效的内部冷却结构。另外,在电子设备器件中,散热结构对电子设备结构的设计也十分重要,尤其是当面临能耗密度高,分布不均匀,热设计要求高等复杂情况时,依靠工程经验难以实现最优设计。

[0003] 对液体火箭发动机而言,追求高性能的发动机推力室工作压力较高,导致推力室壁面所受的热流密度大,燃气温度很高可以达到数千摄氏度,超出了一般发动机材料所能承受的温度。若不采取必要的防护措施,在这种恶劣条件下会导致推力室壁面的温度过高,甚至被烧毁,因此防止发动机壁面过热是发动机热防护的核心问题之一。液体火箭发动机工作时间长,对推进剂冷却剂的需求量大,一般情况下采用燃料来作为冷却剂。由于在应用中,燃料的流量比较小,因此充分合理地利用燃料来冷却推力室壁面就显得尤为重要。

[0004] 传统的冷却通道设计大多依靠工程经验,由于缺乏必要的理论依据,难以实现最优的设计。随着3D打印技术的发展,高效的冷却通道可以摆脱以往加工技术的限制被制造出来。但是这种新技术却由于缺乏与之适应的优化设计方法的有效指导,其推广应用仍然受到限制。

### 发明内容

[0005] 为此,本发明实施例提供一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法,以解决现有技术中的问题。

[0006] 为了实现上述目的,本发明实施例提供如下技术方案:

[0007] 一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法,包括如下步骤:

[0008] 步骤100、确定换热结构的边界条件、几何形状和热流密度;

[0009] 步骤200、建立换热结构的自适应优化模型,并形成随形网格,根据边界条件以随形网格为基础确立自适应网格;

[0010] 步骤300、基于自适应网格确定冷却通道的形状,并计算换热结构的温度分布;

[0011] 步骤400、建立目标函数并判断目标函数是否满足需求,当满足需求时输出换热结构参数,否则返回步骤300。

[0012] 本发明实施例的特征还在于,所述换热结构的温度分布经过流固耦合计算,并经过多次迭代。

[0013] 本发明实施例的特征还在于,所述换热结构包括推力室壁面,在所述推力室壁面

内设有冷却通道,所述冷却通道的出口和入口分别设置在推力室壁面的两个侧面,其中,换热结构的热边界条件和几何边界条件具体为推力室壁面的热流密度和外形尺寸。

[0014] 本发明实施例的特征还在于,生成随形网格的具体步骤为:

[0015] 建立冷却通道内冷却剂流体的势流函数: $F=\xi+i\eta$ ,其中 $\xi$ 为势函数, $\eta$ 为流函数, $\xi$ 和 $\eta$ 满足拉普拉斯方程,即

$$[0016] \quad \begin{cases} \nabla^2 \xi = 0 \\ \nabla^2 \eta = 0; \end{cases}$$

[0017] 交换变量和自变量得到:

$$[0018] \quad \alpha x_{\xi\xi} + 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} = 0$$

$$[0019] \quad \alpha y_{\xi\xi} + 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} = 0;$$

$$[0020] \quad \text{其中, } \alpha = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2, \beta = -(x_{\xi}x_{\eta} + y_{\xi}y_{\eta}), \gamma = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2;$$

[0021] 根据上述公式生成推力室壁面的随形网格。

[0022] 本发明实施例的特征还在于,基于变分法生产自适应网格的方法为:

$$[0023] \quad \text{加权函数的泛函为: } I_v = \iint_D q J dx dy = \iint_D q J^2 d\xi d\eta;$$

$$[0024] \quad \text{网格光滑性的泛函为: } I_s = \iint_D [(\nabla \xi)^2 + (\nabla \eta)^2] J^2 dx dy;$$

$$[0025] \quad \text{网格正交性的泛函为: } I_o = \iint_D (\nabla \xi \cdot \nabla \eta)^2 J^3 dx dy;$$

[0026] 其中, $J = x_{\xi}y_{\eta} - x_{\eta}y_{\xi}$ , $q$ 为推力室壁面的热流密度;

[0027] 将上述三个泛函代入 $I = \lambda_v I_v + \lambda_s I_s + \lambda_o I_o$ ,并使得泛函 $I$ 最小。

[0028] 本发明实施例的特征还在于,

[0029] 设定 $\xi_x = y_{\eta}/J$ , $\xi_y = -x_{\eta}/J$ , $\eta_x = -y_{\xi}/J$ , $\eta_y = x_{\xi}/J$ ,并交换变量和自变量之后,得到:

$$[0030] \quad b_1 x_{\xi\xi} + b_2 x_{\xi\eta} + b_3 x_{\eta\eta} + a_1 y_{\xi\xi} + a_2 y_{\xi\eta} + a_3 y_{\eta\eta} = -\lambda_v \frac{J^2}{2q} \frac{\partial q}{\partial x},$$

$$[0031] \quad a_1 x_{\xi\xi} + a_2 x_{\xi\eta} + a_3 x_{\eta\eta} + c_1 y_{\xi\xi} + c_2 y_{\xi\eta} + c_3 y_{\eta\eta} = -\lambda_v \frac{J^2}{2q} \frac{\partial q}{\partial y},$$

[0032] 其中,系数为:

$$[0033] \quad a_i = \lambda_v a_{vi} + \lambda_s a_{si} + \lambda_o a_{oi},$$

$$[0034] \quad b_i = \lambda_v b_{vi} + \lambda_s b_{si} + \lambda_o b_{oi},$$

$$[0035] \quad c_i = \lambda_v c_{vi} + \lambda_s c_{si} + \lambda_o c_{oi},$$

[0036] 根据上述变换得到自适应网格的生成控制方程。

[0037] 本发明实施例的特征还在于,对偏微分方程采用有限差分来迭代求解,在计算域内设定 $\Delta \xi = 1$ 和 $\Delta \eta = 1$ :

[0038] 对式中 $x$ 的导数采用如下差分格式:

$$[0039] \quad X_{\xi} = \frac{x_{i+1, j} - x_{i-1, j}}{2 \Delta \xi}, \quad X_{\eta} = \frac{x_{i, j+1} - x_{i, j-1}}{2 \Delta \eta},$$

$$[0040] \quad X_{\xi \xi} = \frac{x_{i+1, j} - 2x_{i, j} + x_{i-1, j}}{\Delta \xi^2}, \quad X_{\eta \eta} = \frac{x_{i, j+1} - 2x_{i, j} + x_{i, j-1}}{\Delta \eta^2},$$

$$[0041] \quad X_{\xi \eta} = \frac{x_{i+1, j+1} + x_{i-1, j-1} - x_{i+1, j-1} - x_{i-1, j+1}}{4 \Delta \xi \Delta \eta};$$

[0042] 对式中y的导数采用如下差分格式:

$$[0043] \quad y_{\xi} = \frac{y_{i+1, j} - y_{i-1, j}}{2 \Delta \xi}, \quad y_{\eta} = \frac{y_{i, j+1} - y_{i, j-1}}{2 \Delta \eta},$$

$$[0044] \quad y_{\xi \xi} = \frac{y_{i+1, j} - 2y_{i, j} + y_{i-1, j}}{\Delta \xi^2}, \quad y_{\eta \eta} = \frac{y_{i, j+1} - 2y_{i, j} + y_{i, j-1}}{\Delta \eta^2},$$

$$[0045] \quad y_{\xi \eta} = \frac{y_{i+1, j+1} + y_{i-1, j-1} - y_{i+1, j-1} - y_{i-1, j+1}}{4 \Delta \xi \Delta \eta}。$$

[0046] 本发明实施例的特征还在于,所述冷却通道的几何尺寸与所述随形网格当地的密度成正比,其中的 $\eta$ 线为冷却通道的中心线,冷却通道的宽d垂直于 $\eta$ 线,表达为:

$$[0047] \quad d \propto \left\{ \sqrt{[x(\xi + \Delta \xi, \eta) - x(\xi, \eta)]^2 + [y(\xi + \Delta \xi, \eta) - y(\xi, \eta)]^2} \right\}^{1/n}。$$

[0048] 本发明实施例的特征还在于,在冷却通道的分布下得到推力室壁面的温度分布,并确定目标函数,其中,选取平均温度和温度不均匀度最小为目标函数,具体为:

$$[0049] \quad F_0 = w_1 A + w_2 B + \dots + w_n D,$$

[0050] 其中,A表示温度不均匀度,B表示平均温度,D为温度的其它因素, $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_n$ 分别表示目标函数中不同项所占的比重,T为温度, $\bar{T}$ 为平均温度, $V_s$ 为固体体积, $N_s$ 为固体节点数,

$$\text{具体的, } A = \sqrt{\frac{1}{V_s} \int_{\Omega_s} (T - \bar{T})^2 d\Omega_s}, \quad \bar{T} = \frac{1}{V_s} \int_{\Omega_s} T d\Omega_s, \quad V_s = \int_{\Omega_s} d\Omega_s, \quad B = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} T_i。$$

[0051] 本发明实施例的特征还在于,根据目标函数建立优化数学模型:

$$[0052] \quad \begin{cases} \text{find } Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \\ \min F_0 = w_1 A + w_2 B, \\ \text{s.t. } g_i(Y) \leq 0, R_j(Y) = 0 \end{cases}$$

[0053] 其中,Y为形状设计变量, $F_0$ 为目标函数, $g_i(Y)$ 、 $R_j(Y)$ 为约束条件。

[0054] 本发明实施例具有如下优点:

[0055] 本发明在该自适应优化设计中,换热通道尺寸,形状和分布能够根据边界条件的不同或变化而相应调整,无论是用于冷却还是加热,该换热结构与传统的换热结构相比,能够提高换热量,换热效果更好。

## 附图说明

[0056] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式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,下面描述中的附图仅仅是示例性的,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据提供的附图引伸获得其它的实施附图。

[0057] 本说明书所绘示的结构、比例、大小等,均仅用以配合说明书所揭示的内容,以供熟悉此技术的人士了解与阅读,并非用以限定本发明可实施的限定条件,故不具技术上的实质意义,任何结构的修饰、比例关系的改变或大小的调整,在不影响本发明所能产生的功效及所能达成的目的下,均应仍落在本发明所揭示的技术内容得能涵盖的范围内。

[0058] 图1为本发明整体流程示意图;

[0059] 图2为本发明冷却结构物理场和计算场示意图;

[0060] 图3为本发明冷却结构的自适应网格示意图;

[0061] 图4为本发明根据自适应网格生成控制方程生成的网格示意图;

[0062] 图5为本发明优化后最佳的换热结构示意图;

[0063] 图6为本发明优化流程示意图。

### 具体实施方式

[0064] 以下由特定的具体实施例说明本发明的实施方式,熟悉此技术的人士可由本说明书所揭露的内容轻易地了解本发明的其他优点及功效,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0065] 如图1所示,本发明提供了一种基于变分方法的高效换热结构自适应优化设计方法,包括如下步骤:

[0066] 步骤100、确定换热结构的边界条件、几何形状和热流密度;

[0067] 步骤200、建立换热结构的自适应优化模型,并形成随形网格,根据边界条件以随形网格为基础确立自适应网格;

[0068] 步骤300、基于自适应网格确定冷却通道的形状,并计算换热结构的温度分布;

[0069] 步骤400、建立目标函数并判断目标函数是否满足需求,当满足需求时输出换热结构参数,否则返回步骤300。

[0070] 如图2所示,所述换热结构包括推力室壁面,在所述推力室壁面内设有冷却通道,所述冷却通道的出口和入口分别设置在推力室壁面的两个侧面,其中,换热结构的热边界条件和几何边界条件具体为推力室壁面的热流密度和外形尺寸,设定推力室壁面热流密度为 $q$ ,根据实际情况确定冷却通道入口的独立参数,比如入口流量 $m$ ,压力 $p_0$ ,温度 $T_0$ 等和冷却剂热属性参数,热传导率 $k_f$ 、定压比热容 $C_p$ 和密度 $\rho$ 等。根据所要达到的目标要求、推力室壁面的边界条件、推力室壁面的几何参数和冷却通道入口的独立参数,建立自适应优化设计模型,并根据该模型进行分析求解,得到推力室壁面的自适应设计冷却结构。

[0071] 如图3所示,在推力室壁面的物理场与计算场之间建立一一映射,进而基于推力室壁面的形状,生成随形网格。

[0072] 在本实施方式中,在冷却通道的流道中,由于流体为无旋不可压流动,因此有势流函数为:

[0073]  $F = \xi + i\eta$ ,其中 $\xi$ 为势函数, $\eta$ 为流函数, $\xi$ 和 $\eta$ 满足拉普拉斯方程,即

$$[0074] \begin{cases} \nabla^2 \xi = 0 \\ \nabla^2 \eta = 0; \end{cases}$$



[0075] 其中,为了计算方便,交换变量和自变量得到:

$$[0076] \quad \alpha x_{\xi\xi} + 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} = 0$$

$$[0077] \quad \alpha y_{\xi\xi} + 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} = 0;$$

[0078] 其中的系数分别为:  $\alpha = x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2$ ,  $\beta = -(x_{\xi}x_{\eta} + y_{\xi}y_{\eta})$ ,  $\gamma = x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2$ ; 而据此就可以在带有观测孔的推力室壁面中生成相应的随形网格。

[0079] 基于变分方法生成推力室壁面的自适应网格,综合考虑加权函数,网格的正交性和光滑性,使其达到最小。

[0080] 在这其中,需要考虑三个相关因素的泛函,具体如下所述:

$$[0081] \quad \text{加权函数的泛函为: } I_v = \iint_D q J dx dy = \iint_D q J^2 d\xi d\eta;$$

$$[0082] \quad \text{网格光滑性的泛函为: } I_s = \iint_D [(\nabla\xi)^2 + (\nabla\eta)^2] J^2 dx dy;$$

$$[0083] \quad \text{网格正交性的泛函为: } I_o = \iint_D (\nabla\xi \cdot \nabla\eta)^2 J^3 dx dy;$$

[0084] 其中J为任意形状的物理域映射到直角四边形计算域的jacobian式:,  $J = x_{\xi}y_{\eta} - x_{\eta}y_{\xi}$ , q为推力室壁面的热流密度。

[0085] 将上述三个泛函代入  $I = \lambda_v I_v + \lambda_s I_s + \lambda_o I_o$ , 并使得泛函I最小,就可以产生自适应的网格方程。

[0086] 为了对该泛函进行计算,需要交换变量和自变量,利用到如下关系式:

[0087] 设定  $\xi_x = y_{\eta}/J$ ,  $\xi_y = -x_{\eta}/J$ ,  $\eta_x = -y_{\xi}/J$ ,  $\eta_y = x_{\xi}/J$ , 并交换变量和自变量之后,得到:

$$[0088] \quad b_1 x_{\xi\xi} + b_2 x_{\xi\eta} + b_3 x_{\eta\eta} + a_1 y_{\xi\xi} + a_2 y_{\xi\eta} + a_3 y_{\eta\eta} = -\lambda_v \frac{J^2}{2q} \frac{\partial q}{\partial x},$$

$$[0089] \quad a_1 x_{\xi\xi} + a_2 x_{\xi\eta} + a_3 x_{\eta\eta} + c_1 y_{\xi\xi} + c_2 y_{\xi\eta} + c_3 y_{\eta\eta} = -\lambda_v \frac{J^2}{2q} \frac{\partial q}{\partial y},$$

[0090] 其中系数为:

$$[0091] \quad a_i = \lambda_v a_{vi} + \lambda_s a_{si} + \lambda_o a_{oi},$$

$$[0092] \quad b_i = \lambda_v b_{vi} + \lambda_s b_{si} + \lambda_o b_{oi},$$

$$[0093] \quad c_i = \lambda_v c_{vi} + \lambda_s c_{si} + \lambda_o c_{oi},$$

[0094] 这样就得到了自适应结构网格生成控制方程,加权系数须根据具体问题的需要来选择数值。

[0095] 对上述偏微分方程采用有限差分来迭代求解。在计算域内有  $\Delta\xi=1$  和  $\Delta\eta=1$ , 对式中x的导数采用如下差分格式:

$$[0096] \quad x_{\xi} = \frac{x_{i+1,j} - x_{i-1,j}}{2\Delta\xi}, x_{\eta} = \frac{x_{i,j+1} - x_{i,j-1}}{2\Delta\eta},$$

$$[0097] \quad x_{\xi\xi} = \frac{x_{i+1,j} - 2x_{i,j} + x_{i-1,j}}{(\Delta\xi)^2}, x_{\eta\eta} = \frac{x_{i,j+1} - 2x_{i,j} + x_{i,j-1}}{(\Delta\eta)^2},$$

$$[0098] \quad x_{\xi\eta} = \frac{x_{i+1,j+1} + x_{i-1,j-1} - x_{i+1,j-1} - x_{i-1,j+1}}{4\Delta\xi\Delta\eta},$$

[0099] 同样的,对y而言也是如此。

[0100] 如图4所示,其为根据自适应网格生成控制方程生成的网格。冷却通道的生成基于自适应网格,在网格密集的地方冷却通道窄,在网格疏松的地方冷却通道宽。其中的 $\eta$ 线为冷却通道的中心线,冷却通道的宽垂直于 $\eta$ 线,表达式为:

$$[0101] \quad d \propto \left\{ \sqrt{[x(\xi+\Delta\xi,\eta) - x(\xi,\eta)]^2 + [y(\xi+\Delta\xi,\eta) - y(\xi,\eta)]^2} \right\}^{1/n},$$

[0102] 在当前的冷却通道分布下得到壁面的温度分布下,确定目标函数,对于目标函数可以有多种取法,此处选取平均温度和温度不均匀度最小为目标函数,如下所示:

$$[0103] \quad F_0 = w_1A + w_2B + \dots + w_nD,$$

[0104] 其中,A表示温度不均匀度,B表示平均温度,D为温度的其它因素, $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_n$ 分别表示目标函数中不同项所占的比重,T为温度, $\bar{T}$ 为平均温度, $V_s$ 为固体体积, $N_s$ 为固体节点数,

$$\text{具体的, } A = \sqrt{\frac{1}{V_s} \int_{\Omega_s} (T - \bar{T})^2 d\Omega_s}, \quad \bar{T} = \frac{1}{V_s} \int_{\Omega_s} T d\Omega_s, \quad V_s = \int_{\Omega_s} d\Omega_s, \quad B = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} T_i.$$

[0105] 另外,根据已经建立的目标函数建立优化数学模型:

$$[0106] \quad \begin{cases} \text{find } Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \\ \min F_0 = w_1A + w_2B, \\ \text{s.t. } g_i(Y) \leq 0, R_j(Y) = 0 \end{cases}$$

[0107] 其中,Y为形状设计变量, $F_0$ 为目标函数, $g_i(Y)$ 、 $R_j(Y)$ 为约束条件。在此约束为冷却通道之间的厚度不小于某个尺寸等。根据最终要达到的目标,调整n的取值以及冷却通道根数,进而获得最佳的换热结构,如图5所示。

[0108] 以上具体的流程如图6所示。

[0109] 另外,本发明中涉及的方法,其冷却通道的形状由边界条件而决定,根据换热结构几何形状得到随形网格,在此基础上,根据换热结构上的热流密度,采用变分方程控制网格的疏密程度,光滑性以及正交性,使得在热流大的地方网格密,热流小的地方网格疏,从而使其冷却通道的宽度和当地网格疏密成正比,经过流固耦合计算得到结构的温度分布,多次迭代,得到满足目标要求优化的换热结构。

[0110] 本发明根据基于变分方法的冷却结构优化方法来设计冷却通道,可得到如下优点:

[0111] (1) 在此采用的计算模型能够准确地计算出各个参数的值,所以使用该模型可以应用于冷却结构的优化设计;

[0112] (2) 按照该方法设计的冷却通道可以在热流大的地方相比常规冷却通道带走更多的热量,优化后的冷却通道随着当地的热流而变化,可以降低冷却结构的平均温度和温度的不均匀度;

[0113] (3) 根据该方法得到冷却通道的优化设计,从中可以选取多组目标函数较优的设计优于常规人为的设计。

[0114] 虽然,上文中已经用一般性说明及具体实施例对本发明作了详尽的描述,但在本发明基础上,可以对之作一些修改或改进,这对本领域技术人员而言是显而易见的。因此,在不偏离本发明精神的基础上所做的这些修改或改进,均属于本发明要求保护的范围。

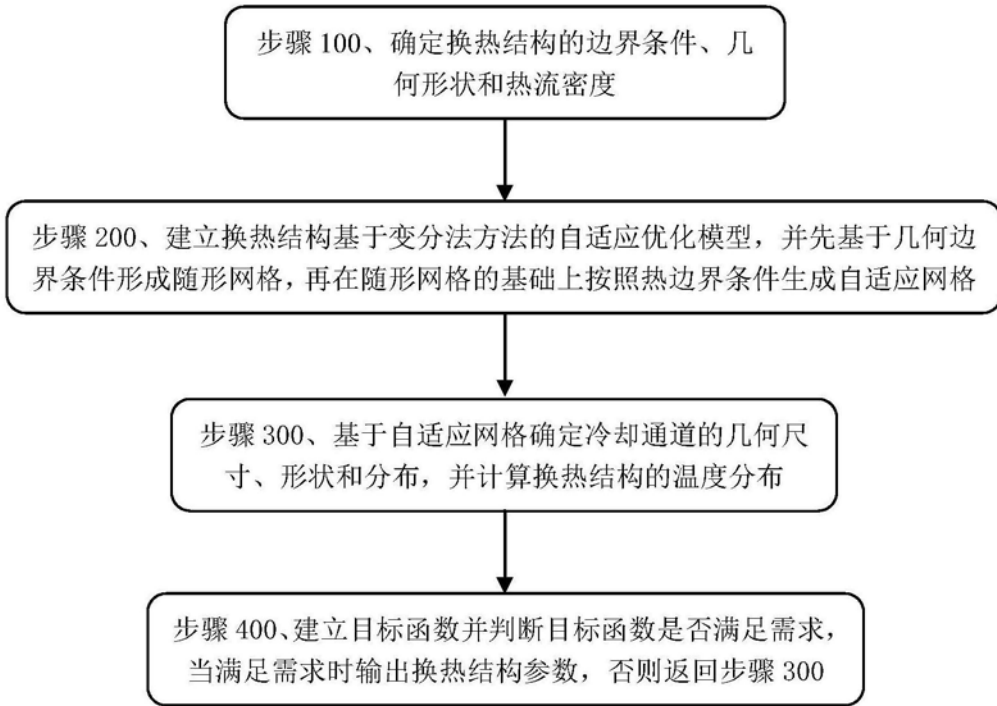


图1

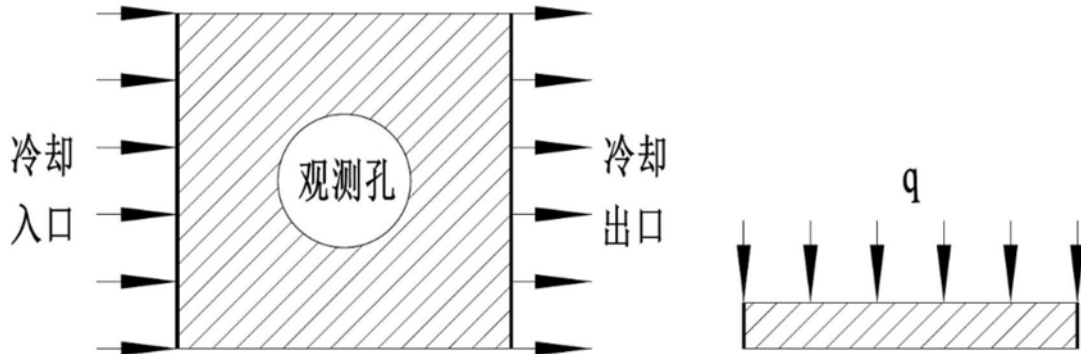


图2

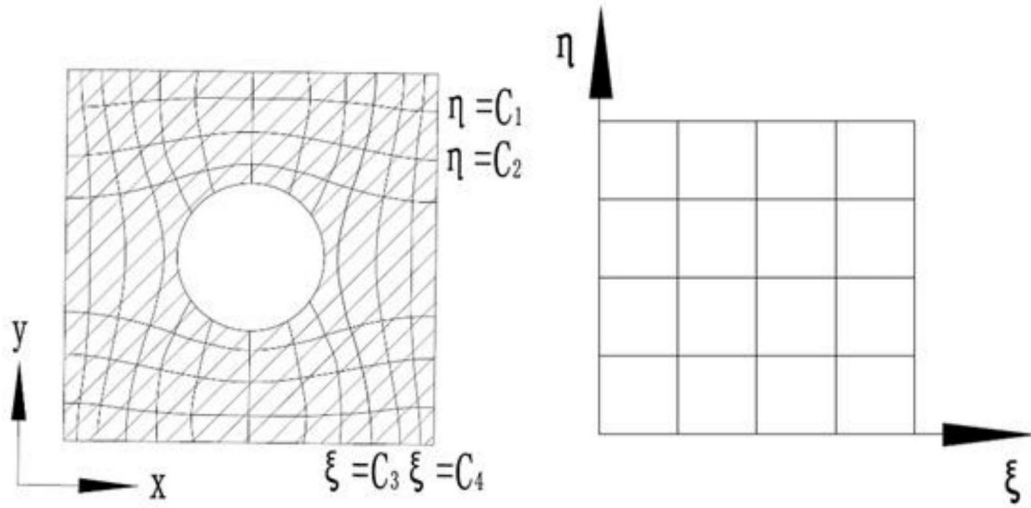


图3

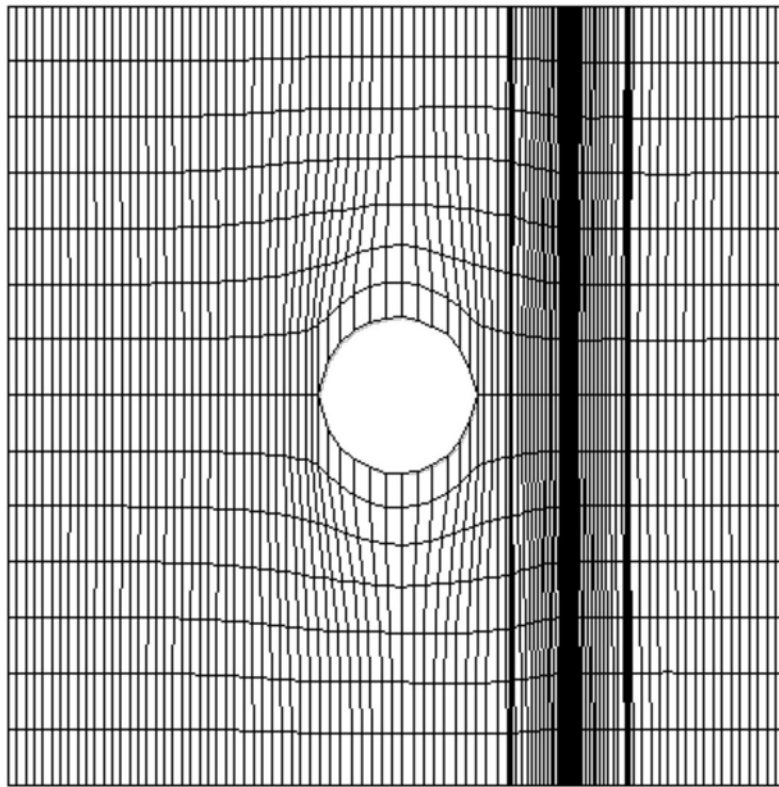


图4

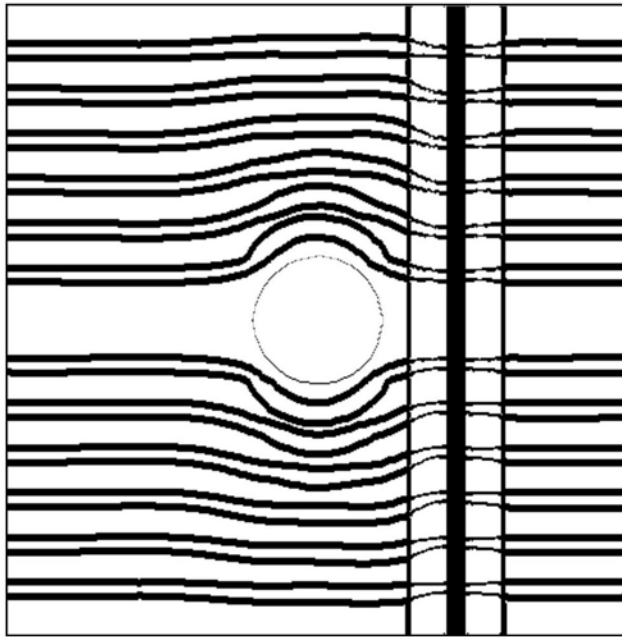


图5

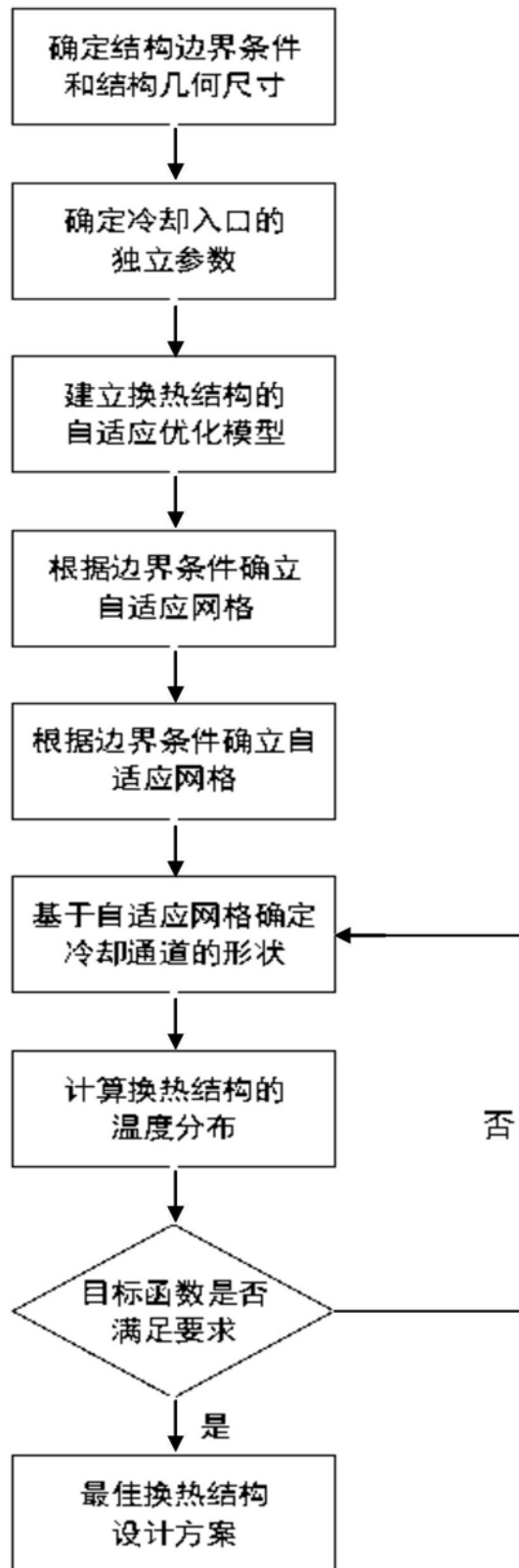


图6