(19) 国家知识产权局



(12)发明专利

(10) 授权公告号 CN 112231900 B (45) 授权公告日 2023.11.17

- (21)申请号 202011073380.3
- (22)申请日 2020.10.09
- (65) 同一申请的已公布的文献号 申请公布号 CN 112231900 A
- (43)申请公布日 2021.01.15
- (73) 专利权人 中国科学院力学研究所地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

专利权人 合肥中科重明科技有限公司

- (72)发明人 吴坤 李新磊 赵林英 范学军
- (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

专利代理师 焦海峰

(51) Int.Cl. *G06F 30/20* (2020.01) (56)对比文件

CN 111159939 A,2020.05.15

张晖;刘书田;张雄.拓扑相关热载荷作用下 稳态热传导结构拓扑优化.中国机械工程.2009, (第11期),82-86.

尤芳;陈建军;曹鸿钧;谢永强.稳态热传导 结构非概率可靠性拓扑优化设计.振动与冲击 .2015,(第03期),126-130.

尤芳;陈建军;林峰;曹鸿钧.热传导结构概 率-非概率混合可靠性拓扑优化设计.西南交通 大学学报.2017,(第03期),154-159+175.

蔡坤:张洪武;周强;陈飙松.几何非线性连续体结构拓扑优化仿生方法.大连理工大学学报.2008,(第01期),11+13-16.

李新磊.面向发动机再生冷却的流热耦合拓 扑优化.《力学学报》.2023,1-14.

审查员 王超

权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

一种变物性拓扑优化方法

(57)摘要

本发明提供一种变物性拓扑优化方法,首先 确定换热结构的物理模型、几何形状、边界条件 信息及材料物性参数变化信息;再建立变物性热 传导的拓扑优化模型,推导出灵敏度公式以及伴 随关系式;搭建数值求解器,分别求解状态变量 和伴随变量,并计算对应的灵敏度、目标函数;在 求解器中耦合优化算法对设计变量进行更新,根 据目标函数是否满足收敛要求确定进行下下一 步骤;最终得到热传导结构的变物性拓扑优化设 计方案。本发明能够适应材料在不同热载荷下物 性参数的变化,可进行换热结构的变物性拓扑优 化设计,能够获得更加优良的换热效果,相比于 常规结构能够带走更多热量,降低冷却结构的平 均温度。



CN 112231900 B

1.一种变物性拓扑优化方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100:确定换热结构的物理模型、几何形状、边界条件信息及材料物性参数变化信息;

步骤200:建立变物性热传导的拓扑优化模型,并基于拉格朗日乘子法和连续伴随理 论,推导出灵敏度公式以及伴随关系式;

步骤300:基于有限体积法搭建数值求解器,分别求解状态变量和伴随变量,并计算对 应的灵敏度、目标函数;

步骤400:在求解器中耦合优化算法对设计变量进行更新,同时判断目标函数是否满足 收敛要求,在满足要求时继续下一步骤,否则返回步骤300,利用新的设计变量重新求解;

步骤500:输出优化结果并进行后处理,得到热传导结构的变物性拓扑优化设计方案; 所述拓扑优化模型的建立步骤如下:

find $\gamma = \{\gamma_i\}, i=1, \cdots, n$

min $J(\gamma, y(\gamma))$

s.t.R_i(γ ,y(γ))=0,j=1,...,m

 $g_h(\gamma, y(\gamma)) \leq 0, h=1, \cdots, 1$

 $\gamma_i \leq \gamma_i \leq \overline{\gamma}_i$

其中, γ 表示设计变量的集合, $y(\gamma)$ 表示状态变量,包括但不限于速度、压力和温度,J 表示目标函数,R表示等式约束,g表示限制导热材料使用比例的不等式约束, $\underline{\gamma}_i$ 和 $\overline{\gamma}_i$ 分别 为设计变量的上下限;

所述的目标函数取的是计算域平均温度,其计算公式如下:

$$J = \frac{1}{V} \int_{\Omega} T d\Omega$$

其中,V表示计算域的总体积,T表示有限体积求解框架下每个控制体中心的温度,是依赖于设计变量γ的状态变量,Ω表示设计域内部域;

所述变物性热传导的控制方程如下:

 $R_T = \nabla \cdot [k(\gamma, T)\nabla T] + Q = 0$

该式同时满足三类边界条件:

 $\begin{cases} T = T_0, & on \ \Gamma_T \\ -[k(\gamma, T)\nabla T] \cdot \mathbf{n} = 0, & on \ \Gamma_a \\ -[k(\gamma, T)\nabla T] \cdot \mathbf{n} = q, & on \ \Gamma_q \end{cases}$

其中,T表示每个控制单元的温度,是状态变量;k表示材料的热导率;Q表示体积热源; Γ₁为等温边界;Γ₂为绝热边界,Γ₆为热流边界;

限制高导热率材料使用比例的不等式约束g的计算公式如下:

$$g = \frac{1}{V} \int_{\Omega} \gamma d\Omega \le \varphi_{max}$$

其中, φ_{max} 表示期望的导热材料的体积分数比,

所述拓扑优化模型采用密度法对材料的热物性进行插值处理,采用SIMP模型对两种材料的热导率进行插值:

 $k = k_1 + (k_h - k_1) \gamma^{\theta}$

其中,θ为惩罚参数用来控制惩罚函数的形状,取大于3的实数;k_h和k₁表示两种材料的 热导率,表示为关于状态变量T的函数表达式,该函数是任意形式,采用了二次多项式进行 拟合后为:

 $k_{h} = a_{1} + a_{2}T + a_{3}T^{2}$

其中,a为根据材料热传导系数随温度变化得到的多项式拟合参数;

所述灵敏度公式的推导过程如下:

首先引入拉格朗日乘子τ,构造拉格朗日函数:

 $L = J + \int_{\Omega} \tau R_{T} d\Omega$

然后基于连续伴随理论,通过进一步的数学关系推导,即可得到目标函数关于设计变量的简化后的灵敏度表达式为:

$$\frac{\partial L}{\partial \gamma} = -\int_{\Omega} \frac{\partial k}{\partial \gamma} \nabla \tau \cdot \nabla T d\Omega$$

同时可推导出伴随变量满足的伴随方程及伴随边界条件为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (k\nabla\tau) - \frac{\partial k}{\partial T} \nabla \tau \cdot \nabla T + \frac{1}{V} = 0, & \text{in } \Omega \\ \tau = 0, & \text{on } \Gamma_a \\ \nabla \tau \cdot \mathbf{n} = 0, & \text{on } \Gamma_q \end{cases}$$

最后搭建数值求解器求出原始状态变量T和伴随变量 τ ,即可求得灵敏度 $\frac{\partial L}{\partial r}$ 。

2. 根据权利要求1所述的变物性拓扑优化方法,其特征在于,

所述步骤100中,换热结构的边界条件信息包括等温边界、热流边界和绝热边界;所述 换热结构的材料包括高导热率材料和常规材料。

3. 根据权利要求1所述的变物性拓扑优化方法,其特征在于,

所述求解器中加入有滤波函数和投影函数,以对设计变量进行滤波和投影,进而应对可能出现的异常数值问题。

4. 根据权利要求1所述的变物性拓扑优化方法,其特征在于,

所述求解器中耦合的优化算法为移动渐近线法。

一种变物性拓扑优化方法

技术领域

[0001] 本发明涉及传热领域,特别是涉及一种能够对换热结构中变物性的导热材料分布进行拓扑优化设计的方法。

背景技术

[0002] 在众多工程设备中,高效的换热结构起着至关重要的作用。如在火箭发动机中,由 于受到高温燃气(3000K以上)的热对流与辐射等共同作用,燃烧室壁面承受着严酷热环境 的考验,因此,其冷却结构是否高效工作直接影响发动机能否正常工作。另外,在芯片等微 电子器件中,高热流密度同样会使器件温度升高,温度分布不均匀,导致可靠性和寿命都显 著下降。因此,换热结构的优化设计是一项十分重要的工作,尤其是在能耗密度高、热载荷 复杂的环境中,结构的材料性能随温度变化剧烈,完全依靠工程经验的传统设计难以获得 优良的换热性能。

[0003] 拓扑优化是一种具有发展前景的先进设计方法,它可以根据设计目标和约束自由 生成冷却通道,具有较高的设计自由度,可以拓展到换热结构的优化设计中。然而,目前的 拓扑优化应用均采用"常物性"的假设,即在优化时材料的物性参数是不随温度变化的。然 而,在一些复杂热环境中,多数材料的热物理性质变化很大,仅采用常物性进行拓扑优化设 计无疑会带来较大的误差。因此,在实际工程应用当中,利用"变物性"进行的拓扑优化设计 就显得尤为重要。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供涉及一种能够对换热结构中变物性的导热材料分布进行拓扑优化设计的方法。

[0005] 具体地,本发明提供一种变物性拓扑优化方法,包括如下步骤:

[0006] 步骤100:确定换热结构的物理模型、几何形状、边界条件信息及材料物性参数变化信息;

[0007] 步骤200:建立变物性热传导的拓扑优化模型,并基于拉格朗日乘子法和连续伴随 理论,推导出灵敏度公式以及伴随关系式;

[0008] 步骤300:基于有限体积法搭建数值求解器,分别求解状态变量和伴随变量,并计 算对应的灵敏度、目标函数;

[0009] 步骤400:在求解器中耦合优化算法对设计变量进行更新,同时判断目标函数是否 满足收敛要求,在满足要求时继续下一步骤,否则返回步骤300,利用新的设计变量重新求 解;

[0010] 步骤500:输出优化结果并进行后处理,得到热传导结构的变物性拓扑优化设计方案。

[0011] 本发明能够适应材料在不同热载荷下物性参数的变化,可进行换热结构的变物性 拓扑优化设计,该换热结构与传统的常物性换热结构优化相比,能够获得更加优良的换热

效果,相比于常规结构能够带走更多热量,降低冷却结构的平均温度,与常物性的拓扑优化相比,降低了多次优化的计算负担和风险。同时,本方法能够适应不同的几何边界条件和物理边界条件,自动生成对应的优化结构。

[0012] 此外,本方法的设计思路可以简单地拓展到其他领域的变物性拓扑优化设计中, 如固体力学、流体动力学、燃烧学等领域,使得结构的特定指标更好。

附图说明

[0013] 图1是本发明一个实施方式的变物性拓扑优化方法流程示意图;

[0014] 图2是本发明一个实施方式的换热结构的计算域示意图;

[0015] 图3是本发明一个实施方式中经过变物性拓扑优化后得到的高导热率材料分布示意图;

[0016] 图4是图3所示高导热率材料的温度云图。

具体实施方式

[0017] 以下通过具体实施例和附图对本方案的具体结构和实施过程进行详细说明。

[0018] 如图1所示,在本发明的一个实施方式中,公开一种变物性拓扑优化方法,包括如下步骤:

[0019] 步骤100:确定换热结构的物理模型、几何形状、边界条件信息及材料物性参数变化信息;

[0020] 这里研究的对象是热传导结构的拓扑优化,即对某个计算域内的导热材料分布进行优化,如图2所示为计算域,除了内部计算域,还包括了三类边界:等温边界 Γ_{r} 、热流边界 Γ_{q} 和绝热边界 Γ_{a} ,计算域内有两种导热材料,一种是高导热率材料,一种是常规材料(即低导热率材料),这里采用的高导热率材料的热导率可随温度变化;通过对内部的高导热率材料的分布进行优化,可以带走更多加热面的热量,使计算域整体的平均温度降低。

[0021] 步骤200:建立变物性热传导的拓扑优化模型,基于拉格朗日乘子法和连续伴随理论,推导出灵敏度公式以及伴随关系式;

[0022] 拓扑优化模型的建立步骤如下:

[0023] find $\gamma = \{\gamma_i\}, i=1,...,n$

[0024] min $J(\gamma, y(\gamma))$

[0025] s.t.R_j(γ ,y(γ))=0,j=1,...,m

[0026] $g_h(\gamma, y(\gamma)) \leq 0, h=1,...,1$

 $[0027] \quad \gamma_i \leq \gamma_i \leq \overline{\gamma}_i$

[0028] 其中, γ 表示设计变量的集合, $y(\gamma)$ 表示状态变量,包括但不限于速度、压力和温度, J表示目标函数, R表示等式约束, g表示限制所述导热材料使用比例的不等式约束, γ_i 和 $\overline{\gamma}_i$ 分别为设计变量的上下限。

[0029] 这里目标函数取的是计算域平均温度,其计算公式如下:

 $[0030] \quad J = \frac{1}{V} \int_{\Omega} T d\Omega$

[0031] 其中,V表示计算域的总体积,T表示有限体积求解框架下每个控制体中心的温度, 是依赖于设计变量γ的状态变量。

[0032] 本实施方式采用的变物性热传导的控制方程如下:

$$[0033] \quad R_T = \nabla \cdot [k(\gamma, T)\nabla T] + Q = 0$$

[0034] 该式需要同时满足下述三类边界条件:

$$\begin{bmatrix} 0035 \end{bmatrix} \begin{cases} T = T_0, & on \ \Gamma_T \\ -[k(\gamma, T)\nabla T] \cdot \mathbf{n} = 0, & on \ \Gamma_a \\ -[k(\gamma, T)\nabla T] \cdot \mathbf{n} = q, & on \ \Gamma_q \end{cases}$$

[0036] 其中,T表示每个控制单元的温度,是状态变量;k表示材料的热导率;Q表示体积热源; Γ_{r} 为等温边界; Γ_{a} 为绝热边界, Γ_{a} 为热流边界。

[0037] 限制导热材料使用比例的不等式约束g的计算公式如下:

$$[0038] \quad g = \frac{1}{V} \int_{\Omega} \gamma d\Omega \le \varphi_{max}$$

[0039] 其中, *Q*max 表示期望的导热材料的体积分数比。

[0040] 拓扑优化模型在计算过程中,采用传统拓扑优化中常用的密度法对材料物性参数进行惩罚处理,使两种材料的两种物性参数实现连续转换,这里采用了SIMP模型(固体各向同性材料惩罚模型)对两种材料的热导率进行插值处理:

[0041]
$$k = k_1 + (k_h - k_1) \gamma^{\theta}$$

[0042] 其中, θ为惩罚参数用来控制惩罚函数的形状, 取大于3的实数; k_h和k₁表示两种材料的热导率, 可表示为关于状态变量T的函数表达式, 该函数可以是任意形式, 采用了二次 多项式进行拟合后为:

[0043] $k_{h} = a_{1} + a_{2}T + a_{3}T^{2}$

[0044] 其中,a为根据材料热传导系数随温度变化得到的多项式拟合参数;实际计算中, 设置 k_1 为1w/(m•K), k_h =84.533-0.0635T。

[0045] 灵敏度公式的推导过程如下:

[0046] 首先引入拉格朗日乘子r,构造拉格朗日函数:

 $[0047] \quad L = J + \int_{\Omega} \tau R_{T} d\Omega$

[0048] 然后基于连续伴随理论,通过进一步的数学关系推导(主要是分部积分法的应用),即可得到目标函数关于设计变量的简化后的灵敏度表达式为:

$$\begin{bmatrix} 0049 \end{bmatrix} \quad \frac{\partial L}{\partial \gamma} = -\int_{\Omega} \frac{\partial k}{\partial \gamma} \nabla \tau \cdot \nabla T d\Omega$$

[0050] 同时可推导出对应的原始伴随方程及伴随边界条件为:

$$\begin{bmatrix} 0051 \end{bmatrix} \begin{cases} \nabla \cdot (k\nabla\tau) - \frac{\partial k}{\partial T} \nabla \tau \cdot \nabla T + \frac{1}{v} = 0, \text{ in } \Omega \\ \tau = 0, & \text{ on } \Gamma_a \\ \nabla \tau \cdot \mathbf{n} = 0, & \text{ on } \Gamma_q \end{cases}$$

[0052] 至此,有了原始方程、原始边界条件,伴随方程和伴随边界条件,就可以利用数值

方法求出原始状态变量T和伴随变量 τ ,也就可以求得灵敏度 $\frac{\partial L}{\partial v}$ 。

[0053] 步骤300:基于有限体积法搭建数值求解器,分别求解状态变量和伴随变量,并计 算对应的灵敏度、目标函数;

[0054] 本实施方式采用了基于有限体积法的求解框架,即在开源软件OpenFOAM上编写求解器进行求解,原始方程和伴随方程可采用一套求解算法,节省计算开销。

[0055] 由于本实施方式采用的是密度法的插值处理,这样可能会造成数值问题,进而导致数值不稳定的问题出现,如棋盘格现象和灰色单元问题,因此,可在求解器中加入滤波函数和投影函数,以对设计变量进行过滤和投影,从而应对可能出现的数值问题。

[0056] 步骤400:在求解器中耦合优化算法对设计变量进行更新,同时判断目标函数是否 满足收敛要求,在满足要求时继续下一步骤,否则返回步骤300,利用新的设计变量重新求 解;

[0057] 在求解器里,除了有解方程的部分,还耦合了优化算法,这里的优化算法采用的是移动渐近线方法(MMA)。

[0058] 利用前步骤得到的灵敏度 $\frac{\partial L}{\partial \gamma}$,将其作为输入信息,代入优化算法中,获得新的设计

变量值,此时判断目标函数的变化是否满足要求,如果不满足,将新的设计变量代回原方程,继续求解;如果满足,则停止迭代计算。

[0059] 步骤500:输出优化结果并进行后处理,得到热传导结构的变物性拓扑优化设计方案。

[0060] 本发明能够适应材料在不同热载荷下物性参数的变化,可进行换热结构的变物性 拓扑优化设计,该换热结构与传统的常物性换热结构优化相比,能够获得更加优良的换热 效果,相比于常规结构能够带走更多热量,降低冷却结构的平均温度,与常物性的拓扑优化 相比,降低了多次优化的计算负担和风险。同时,本方法能够适应不同的几何边界条件和物 理边界条件,自动生成对应的优化结构。

[0061] 此外,本方法的设计思路可以简单地拓展到其他领域的变物性拓扑优化设计中, 如固体力学、流体动力学、燃烧学等领域,使得结构的特定指标更好。

[0062] 在本发明的一个实施方式中,如图2所示,换热结构的计算域为一个简化的正方体,底部中心有等温壁面、顶部有热流壁面、其余均为绝热壁面。在正方体内部为两种不同导热材料的设计区域,本实施例中设置k₁为1w/(m•K),k_h=84.533-0.0635T,进而采用SIMP 模型对k进行插值。

[0063] 图3所示为通过本方法得到的高导热率材料分布示意图,而图4为对应的温度分布。原正方形设计域的15%的空间为高导热材料,设计域其余85%的空间填充常规(低导热率)材料。该材料分布函数经过了滤波和投影的处理,得到了清晰的结果,避开了棋盘格现象和灰度单元问题。该设计类似于仿生学的构型,像树的枝干一样向四周扩展,用来带走设计域内部以及热流面生成的热量。

[0064] 至此,本领域技术人员应认识到,虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示例性实施例,但是,在不脱离本发明精神和范围的情况下,仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此,本发明的范围应被理解和认

定为覆盖了所有这些其他变型或修改。



图1



图2



图3



图4