

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 5 月 5 日 (05.05.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/087770 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 30/23 (2020.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/123566

(22) 国际申请日: 2020 年 10 月 26 日 (26.10.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(71) 申请人: 大连理工大学(DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国辽宁省大连市凌工路2号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。

(72) 发明人: 张晓鹏(ZHANG, Xiaopeng); 中国辽宁省大连市凌工路2号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。 罗阳军(LUO, Yangjun); 中国辽宁省大连市凌工路2号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。

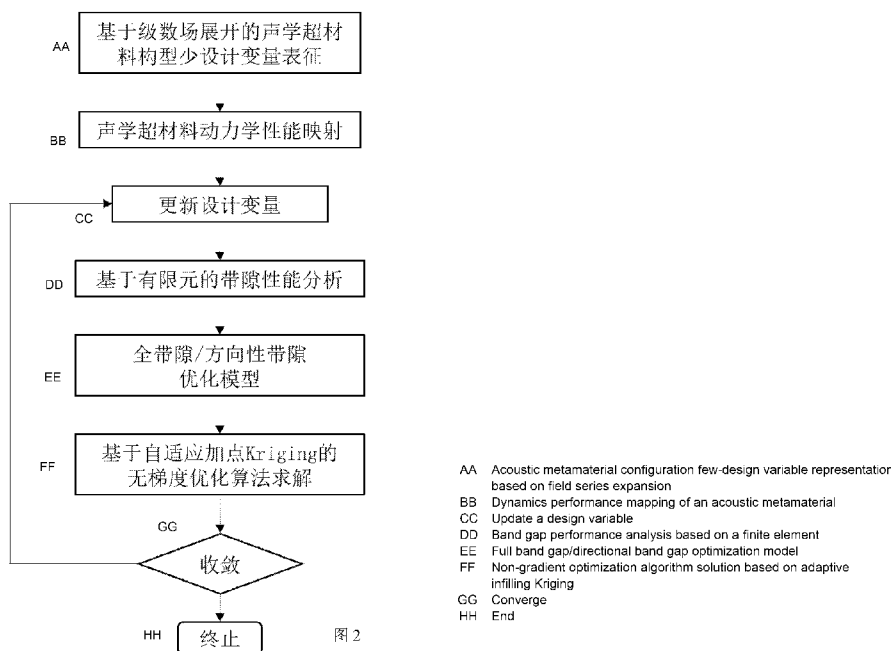
(CN)。 亢战(KANG, Zhan); 中国辽宁省大连市凌工路2号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,

(54) Title: ACOUSTIC METAMATERIAL DESIGN METHOD BASED ON NON-GRADIENT TOPOLOGICAL OPTIMIZATION

(54) 发明名称: 一种基于非梯度拓扑优化的声学超材料设计方法



(57) Abstract: An acoustic metamaterial design method based on non-gradient topological optimization, the method mainly comprising two parts, that is, a few-parameter description of an acoustic metamaterial unit cell topology, and an acoustic metamaterial topological optimization model based on a non-gradient optimization algorithm. On the basis of a material-field series expansion policy, a few-parameter description method for an acoustic metamaterial unit cell topology is proposed, and an acoustic metamaterial topological optimization model based on a non-gradient optimization algorithm is established, such that the acoustic metamaterial design method may

NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

be suitable for solving the problem of the optimization design of a full band gap and a directional band gap of an acoustic metamaterial. By means of the method, topological representation of a complex acoustic metamaterial unit cell structure and material performance mapping are realized by means of few independent design variables, the optimization calculation amount of the acoustic metamaterial unit cell topology is reduced, and the difficulty of a local optimal solution in an acoustic metamaterial design can be effectively overcome. The method is suitable for solving the problem of the optimization design of an acoustic metamaterial with various functions, such as a full band gap and a directional band gap; and sensitivity information of band gap characteristics is not needed, and the acoustic metamaterial optimization design of a band gap of any order can be realized.

(57) 摘要：一种基于非梯度拓扑优化的声学超材料设计方法，主要包括声学超材料单胞拓扑的少量参数描述、基于非梯度优化算法的声学超材料拓扑优化模型两部分。基于材料级数场展开策略，提出声学超材料单胞拓扑的少量参数描述方法，并建立基于非梯度优化算法的声学超材料拓扑优化模型，可适用于声学超材料的全带隙和方向性带隙的优化设计问题。该方法通过少量独立设计变量，实现复杂声学超材料单胞结构的拓扑表征与材料性能的映射，降低声学超材料单胞拓扑优化计算量，可有效克服声学超材料设计中的局部最优解困难，适用于全带隙、方向性带隙等多种功能声学超材料优化设计问题；且不需要带隙特性的灵敏度信息，可实现任意阶带隙的声学超材料优化设计。

一种基于非梯度拓扑优化的声学超材料设计方法

技术领域

本发明属于结构与多学科优化设计领域，涉及一种声学超材料的非梯度拓扑优化与设计方法。本方法适用于声学超材料及先进声学元器件的拓扑优化设计。

背景技术

声学超材料是指具有控制声波或弹性波传播的一类新型人造周期性材料，其显著特点是可以阻断声波和弹性波在特定频率范围内的传播，在实际应用中具有广阔的潜力。拓扑优化作为强大的设计工具，已成功应用于声子晶体的设计中，并且通过拓扑优化获得了一些新颖且有吸引力的声学功能器件。

然而，已有声学超材料设计采用的梯度类拓扑优化方法面临着难以解决的本质困难，即声学超材料优化设计为一典型多局部解问题，存在严重的初始解依赖性。在基于梯度的拓扑优化设计方法中，初始猜测（或初始设计）会显著影响微结构的优化配置，陷入局部解，甚至导致优化过程难以收敛。此外，基于遗传算法等智能类算法的拓扑优化设计方法，因其计算量巨大，使得设计空间十分有限，优化效果欠佳。

本发明基于材料级数场展开策略，提出一种声学超材料单胞拓扑的少量参数描述方法，并建立基于非梯度优化算法的声学超材料拓扑优化模型，可适用于声学超材料的全带隙和方向性带隙的优化设计问题。本方法通过少量独立设计变量，实现了复杂声学超材料单胞结构的拓扑表征与材料性能的映射，大大降低了声学超材料单胞拓扑优化计算量，可有效克服声学超材料设计中的局部最优解困难，适用于全带隙、方向性带隙的多种功能声学超材料优化设计问题。

发明内容

针对传统梯度类拓扑优化方法在求解声学超材料优化过程中存在的严重初始解依赖性和易于陷入局部解等缺点，本发明提供一种有效的声学超材料带隙微结构非梯度拓扑优化方法。该方法可用少量设计变量和代理模型优化算法解决复杂声学超材料单胞的设计问题，不需要优化目标及约束函数的灵敏度信息，

并且可以直接扩展到其他复杂声学特性的超材料设计中，便于与各种有限元商业和自研软件进行对接。本发明适用于多学科的超材料微结构及声学、光学等敏感元器件的优化设计。

为了达到上述目的，本发明采用的技术方案为：

一种基于非梯度拓扑优化的声学超材料设计方法，包括以下步骤：

S1：将时间域声学超材料中弹性波的波传导问题转换为频率域下微结构的弹性波的广义特征值问题（将时间域的波传导方程 $\rho(\mathbf{r})\ddot{\mathbf{U}} = \nabla(\lambda(\mathbf{r}) + \mu(\mathbf{r}))\nabla \cdot \mathbf{U} + \nabla \cdot \mu(\mathbf{r})\nabla \mathbf{U}$ 转化为频率域的广义特征值方程 $(\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{U} = 0$ ），采用平面应变单元对声学材料单胞进行离散，得到离散后的微结构总体刚度矩阵和总体质量矩阵。

公式中字母指代为： $\mathbf{r} = \{x, y\}$ 表示位置向量； $\rho(\mathbf{r})$ 表示材料密度； $\mathbf{U}$ 和 $\ddot{\mathbf{U}}$ 分别表示沿坐标轴 x ， y 和 z 方向的位移和加速度向量； $\lambda(\mathbf{r})$ 和 $\mu(\mathbf{r})$ 表示随位置变化的拉梅系数； $\mathbf{k}$ 表示平面波矢； $\mathbf{K}(\mathbf{k})$ 表示与平面波矢相关的周期单胞总体刚度矩阵； $\mathbf{M}$ 表示周期单胞的总体质量矩阵； ω 表示圆频率。

S2：基于 Floquet-Bloch 定理，在步骤 S1 中建立的广义特征值方程中引入周期性边界条件（ $\mathbf{U}(\mathbf{r}) = \mathbf{U}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}$ ，其中， $\mathbf{U}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ 表示与位置向量 $\mathbf{r}$ 有相同周期性的周期位移场）；基于有限元方法对微结构的特征值问题进行离散。

S3：对步骤 S2 中离散的声学超材料单胞内材料分布与等效材料属性进行表征与映射。基于材料场级数展开策略，引入材料场函数 $\varphi(\mathbf{r}) \in [-1, 1]$ 和距离相关函数 $C(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$ 描述单胞内部材料分布；利用级数展开降维技术，将声学超材料单胞内的材料分布用 M 个独立设计变量 $\xi = \{\xi_1 \ \xi_2 \ \cdots \ \xi_M\}^T$ 进行表征。进而，引入 RAMP 材料插值模型，建立单元相对密度与材料等效杨氏模量的映射关系。

S4：对步骤 S3 中声学超材料微结构的广义特征方程求解中，设置不同大小的平面波矢量 $\mathbf{k}$ 的入射波对简约布里渊区边界进行扫略，在简约布里渊区的 ΓXM 边界等距选取 0 度、45 度、90 度波矢各 5 组，通过求解任意可能的波矢 $\mathbf{k}$

求解广义特征值问题 $(\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{U} = 0$ 。计算声学超材料的能带结构，并得到指定阶频率对应的带隙 $\omega_j(\mathbf{k}_i)$ ，式中， $\mathbf{k}_i$ 表示选取的第 i 个代表性平面波矢量， $\omega_j(\mathbf{k}_i)$ 表示在指定平面波矢量 $\mathbf{k}_i$ 下单胞的第 j 阶特征圆频率。

S5: 根据步骤 S4 中带隙计算结果，以 $\xi = \{\xi_1 \ \xi_2 \ \cdots \ \xi_M\}^T$ 为设计变量，建立全带隙或方向性带隙的声学超材料拓扑优化模型：

(1) 若指定第 j 阶和 $j+1$ 阶的全带隙为目标，建立全带隙拓扑优化问题模型：

$$\begin{aligned} \max_{\xi} \quad & f_F(\xi) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i, \xi) \\ \text{s.t.} \quad & (\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{u} = 0 \\ & \xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, \ (i = 1, 2, \dots, N_p). \end{aligned}$$

式中， $f_F(\xi)$ 为全带隙目标函数； N_p 为总观察点个数； $\mathbf{W}_i$ 为与第 i 个观察点相关的特征矩阵； n_k 为简约布里渊区边界的计算点个数。

(2) 若指定第 j 阶和 $j+1$ 阶的方向性带隙为目标，建立局部带隙拓扑优化问题模型：

$$\begin{aligned} \max_{\xi} \quad & f_P(\xi) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi) \\ \text{s.t.} \quad & (\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{u} = 0 \\ & g_P = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) \leq 0 \\ & \xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, \ (i = 1, 2, \dots, N_p). \end{aligned}$$

式中， $f_P(\xi)$ 为 0 度方向方向性带隙目标函数； g_P 为 45 度方向性通带约束函数。S6: 利用乘子法将步骤 S5 中所提的全带隙或方向带隙的约束优化问题转化为无约束优化问题：

$$\begin{aligned} & \text{For } loop = 1, 2, \dots \\ & \text{find } \xi = \{\xi_1 \ \xi_2 \ \cdots \ \xi_M\}^T \\ & \min_{\xi \in \Omega_k} f_{obj}(\xi) = f(\xi) + p_0 \cdot \max_i (g_P, (\xi^T \mathbf{W}_i \xi - 1), 0) \end{aligned}$$

式中, $loop$ 为子优化问题个数; $f_{obj}(\xi)$ 为所求子优化问题目标函数; $f(\xi)$ 为原优化问题目标函数; p_0 为将有约束优化问题转化为无约束优化问题的罚函数乘子; Ω_k 为子优化问题的可行域。

采用自适应设计空间调整策略, 限制声学超材料单胞的材料布局单次优化更新的变化程度, 基于序列 Kriging 代理模型优化算法求解步骤 S6 中的优化模型, 直至优化问题收敛。

进一步的, 所述的步骤述 S3 中, 声学超材料单胞内材料分布与等效材料属性的表征与映射的具体步骤为:

S31: 采用材料常函数 $\varphi(\mathbf{r}) \in [-1, 1]$ 描述声学超材料单胞内两相材料的的布局, 在超材料单胞内均匀选取观察点。

S32: 引入距离相关函数 $C(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \exp(-\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|^2 / l_c^2)$, 建立单胞内部任意两点 $\mathbf{r}_i$ 和 $\mathbf{r}_j$ 的材料场相关关系, 其中 l_c 为相关长度。

S33: 在单胞内选与有限单元中心相重合的 N_p 个材料场函数观察点, 建立求各观察点的距离相关函数矩阵 $\mathbf{C} = [C(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1) \cdots C(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_{N_p}); \cdots; C(\mathbf{r}_{N_p}, \mathbf{r}_1) \cdots C(\mathbf{r}_{N_p}, \mathbf{r}_{N_p})]$, 求解广义特征值问题广义特征值方程 $\mathbf{C}\Psi_k = \lambda_k \Psi_k$ 。其中 λ_k 和 Ψ_k 分别表示第 k 阶特征值和特征向量。

S34: 根据前 M 阶的最大特征值 $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ 及其对应的特征向量 $\Phi = \{\Psi_1 \ \Psi_2 \ \cdots \ \Psi_M\}$, 得到声学超材料的材料场近似表达 $\varphi(\mathbf{r}, \xi) \approx \sum_{k=1}^M \xi_k \frac{\Psi_k^T \mathbf{C}_d(\mathbf{r})}{\sqrt{\lambda_k}}$ 。

S35: 引入单元密度与材料场的映射关系 $x_e(\xi) = \frac{1 + \varphi(\mathbf{r}_e, \xi)}{2}$, 根据两相材料杨氏模量插值模型 $E_e(\xi) = E_1 + \frac{x_e(\xi)}{1 + p(1 - x_e)}(E_2 - E_1)$, 建立声学超材料插值模型。其中, E_1 , E_2 分别为两种材料的杨氏模量, p 为惩罚因子。

进一步的, 基于材料场级数展开描述的全带隙或方向性带隙非梯度声学超材料拓扑优化模型, 具体步骤为:

S51: 以 $\Gamma X(0^\circ)$ 方向带隙为目标, 则将拓扑优化的目标函数取为

$f_p(\xi) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi)$ (若考虑全带隙优化, 则选取全部方向带隙的目标函数为 $\max_{\xi} : f_F(\xi) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i, \xi)$)

S52: 引入 ΓM 方向通带约束 $g_p = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) \leq 0$, 实现在 45 度方向上允许声波通过 (若考虑全带隙优化问题则无此步骤)。

S53: 引入材料场函数界限约束函数 $\xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, (i=1, 2, \dots, N_p)$ 保证声学超材料单胞的材料表征函数值介于 $\varphi(\mathbf{r}) \in [-1, 1]$ 之间。

S54: (1) 若考虑全带隙拓扑优化问题, 则建立拓扑优化问题模型:

$$\max_{\xi} : f_F(\xi) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i),$$

$$\text{s.t.} : (\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{U} = 0,$$

$$\xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, (i=1, 2, \dots, N_p).$$

(2) 若考虑方向性波传导优化问题, 建立局部带隙拓扑优化问题模型:

$$\max_{\xi} : f_p(\xi) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi)$$

$$\text{s.t.} : (\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{u} = 0$$

$$g_p = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) \leq 0$$

$$\xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, (i=1, 2, \dots, N_p).$$

本发明的有益效果为: 本方法通过少量独立设计变量, 实现复杂声学超材料单胞结构的拓扑表征与材料性能的映射, 大大降低了声学超材料单胞拓扑优化计算量, 可有效克服声学超材料设计中的局部最优解困难, 适用于全带隙、方向性带隙等多种功能声学超材料优化设计问题, 该方法不需要带隙特性的灵敏度信息, 可实现任意阶带隙的声学超材料优化设计, 并且可以直接扩展到其他复杂声学特性的超材料设计中, 便于与各种有限元商业和自研软件进行对接

附图说明

图 1 为本发明实施例提供的全带隙和方向性带隙材料微结构设计。(a) 全带隙声学超材料微结构示意图; (b) 由方向性带隙声学超材料组成的波导管示意图; (c) 全带隙声学超材料色散曲线示意图; (d) 方向性带隙声学超材料色散曲线示意图;

图 2 基于非梯度优化算法的声学超材料优化流程图；

图 3 (a) 指定阶全带隙声学超材料最优拓扑构型；

图 3 (b) 为指定频率 (30kHz) 下全带隙声学超材料结构声波传输振幅云图；

图 3 (c) 为指定频率 (50kHz) 下全带隙声学超材料结构声波传输振幅云图；

图 4 (a) 指定阶方向性带隙声学超材料最优拓扑构型；

图 4 (b) 指定频率 (20 kHz) 下方向性带隙声学超材料构成的波导管左侧入射声波传输振幅云图；

图 4 (c) 指定频率 (20 kHz) 下方向性带隙声学超材料构成的波导管右侧入射声波传输振幅云图；

图 4 (d) 指定频率 (33 kHz) 下方向性带隙声学超材料构成的波导管左侧入射声波传输振幅云图；

图 4 (e) 指定频率 (33 kHz) 下方向性带隙声学超材料构成的波导管右侧入射声波传输振幅云图。

具体实施方式

以下结合技术方案和附图详细叙述本发明的具体实施例。

一种基于非梯度优化算法的声学超材料拓扑优化设计方法，该拓扑优化方法通过材料场级数展开策略，实现少量参数表征声学超材料单胞的任意拓扑，建立这些设计参数与材料性能插值模型及声学材料动力学性能的映射关系。通过求解广义特征值方程，得到声学超材料的色散曲线，建立全带隙和方向性带隙声学超材料拓扑优化模型，基于序列 Kriging 代理模型优化算法求解优化问题。优化过程避免了求解复杂声学超材料设计问题的灵敏度信息，并且能有效克服局部最优解陷阱。

图 1 描述的是全带隙和方向性带隙材料微结构设优化示意图。本发明以典型的铅—环氧树脂声学超材料单胞为例，其单胞尺寸为 0.02m 边长的正方形。选取第 6-7 阶全带隙和 3-4 阶段 0 度方向性带隙为优化问题的目标。图 2 是本方法的实施流程图。

S1：将声学材料单胞划分为 1600x1600 个平面应变单元，将时间域波传导

方程转化为基于有限元描述的频率域广义特征值方程 $(\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{U} = 0$ 。

S2: 基于 Floquet-Bloch 定理, 在基于有限元的广义特征值方程中设置周期性边界条件 $\mathbf{U}(\mathbf{r}) = \mathbf{U}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$ 。

S3: 对声学超材料单胞内材料分布与等效材料属性进行表征与映射。其具体步骤为:

(31) 采用材料场函数 $\varphi(\mathbf{r}) \in [-1, 1]$ 描述声学超材料单胞内两相材料的布局, 在超材料单胞内均匀选取 1600 个观察点。

(32) 引入距离相关函数 $C(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \exp(-\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|^2 / l_c^2)$, 其中 l_c 取单胞尺寸的 20%, 建立单胞内部任意两点 $\mathbf{r}_i$ 和 $\mathbf{r}_j$ 的材料场相关关系。

(33) 计算并组装具有正定对称特性的观察点相关矩阵 $\mathbf{C} = [C(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1) \cdots C(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_{N_p}); \cdots; C(\mathbf{r}_{N_p}, \mathbf{r}_1) \cdots C(\mathbf{r}_{N_p}, \mathbf{r}_{N_p})]$, 求解广义特征值问题广义特征值方程 $\mathbf{C}\boldsymbol{\Psi}_k = \lambda_k \boldsymbol{\Psi}_k$ 的前 50 阶的特征值和其对应的特征向量。

(34) 根据前 50 阶最大特征值 $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_{50})$ 及其对应的特征向量 $\boldsymbol{\Phi} = \{\boldsymbol{\Psi}_1 \ \boldsymbol{\Psi}_2 \ \cdots \ \boldsymbol{\Psi}_M\}$, 得到声学超材料的材料场近似表达 $\varphi(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}) \approx \sum_{k=1}^{50} \xi_k \frac{\boldsymbol{\Psi}_k^T \mathbf{C}_d(\mathbf{r})}{\sqrt{\lambda_k}}$ 。

(35) 引入单元密度与材料场的映射关系 $x_e(\boldsymbol{\xi}) = \frac{1 + \varphi(\mathbf{r}_e, \boldsymbol{\xi})}{2}$, 根据两相材料杨氏模量插值模型 $E_e(\boldsymbol{\xi}) = E_1 + \frac{x_e(\boldsymbol{\xi})}{1 + p(1 - x_e)}(E_2 - E_1)$, 建立声学超材料插值模型, 其中惩罚因子 p 取 4。

S4: 在简约布里渊区的 ΓXM 边界等距选取 0 度, 45 度, 90 度波矢 $\mathbf{k}$ 各 5 组, 通过求解任意可能的波矢 $\mathbf{k}$ 求解广义特征值问题 $(\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{U} = 0$ 计算声学超材料的能带结构, 得到前 10 阶频率对应的带隙 $\omega_j(\mathbf{k}_i)$ 。

S5: 以 $\boldsymbol{\xi} = \{\xi_1 \ \xi_2 \ \cdots \ \xi_M\}^T$ 为设计变量, 考虑如下两种情况, 分别建立声学超材料拓扑优化模型。

(51) 指定第 6 阶和 7 阶的全带隙为目标, 则拓扑优化目标函数可表达为

$\max: f_F(\xi) = \min_{i=1}^{15} \omega_i(\mathbf{k}_i, \xi) - \max_{i=1}^{15} \omega_i(\mathbf{k}_i, \xi)$, 引入材料场函数界限约束函数 $\xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, (i=1, 2, \dots, 1600)$ 使得材料表征函数值介于 $\varphi(\mathbf{r}) \in [-1, 1]$ 之间, 进而建立拓扑优化问题模型 (相关优化计算结果如图 3 所示):

$$\begin{aligned} \max_{\xi} &: f_F(\xi) = \min_{i=1}^{15} \omega_i(\mathbf{k}_i, \xi) - \max_{i=1}^{15} \omega_i(\mathbf{k}_i, \xi), \\ \text{s.t.} &: (\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{U} = 0, \\ &\xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, (i=1, 2, \dots, 1600). \end{aligned}$$

(52) 指定第 3 阶和 4 阶的方向性带隙为目标, 则选取 ΓX 为带隙建立目标函数为 $\max: f_P(\xi) = \min_{i=1}^5 \omega_4(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi) - \max_{i=1}^5 \omega_3(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi)$, 设置 ΓM 方向通带约束 $g_P = \min_{i=1}^5 \omega_4(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) - \max_{i=1}^5 \omega_3(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) \leq 0$, 实现在 45 度方向上允许声波通过, 引入材料场函数界限约束函数 $\xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, (i=1, 2, \dots, 1600)$ 使得材料表征函数值介于 $\varphi(\mathbf{r}) \in [-1, 1]$ 之间, 进而建立拓扑优化问题模型 (相关优化计算结果如图 4 所示):

$$\begin{aligned} \max_{\xi} &: f_P(\xi) = \min_{i=1}^5 \omega_4(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi) - \max_{i=1}^5 \omega_3(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi) \\ \text{s.t.} &: (\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{u} = 0 \\ &g_P = \min_{i=1}^5 \omega_4(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) - \max_{i=1}^5 \omega_3(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) \leq 0 \\ &\xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, (i=1, 2, \dots, 1600). \end{aligned}$$

S6: 利用乘子法将声学超材料带隙的约束优化问题转化为无约束优化问题:

$$\begin{aligned} \text{For } &k = 1, 2, \dots \\ \text{find } &\xi = \{\xi_1 \ \xi_2 \ \dots \ \xi_{50}\}^T \\ \min_{\xi \in \Omega_k} &: f_{obj}(\xi) = f(\xi) + p_0 \cdot \max_i \left(g_P, (\xi^T \mathbf{W}_i \xi - 1), 0 \right) \end{aligned}$$

采用自适应设计空间调整策略, 限制声学超材料单胞的材料布局单次优化更新的变化程度, 基于序列 Kriging 代理模型优化求解算法求解优化问题, 直至优化问题收敛。

以 6-7 阶全带隙为目标的声学超材料非梯度拓扑优化方法所得声学超材料最优微结构如图 3 (a)。优化后全带隙声学超材料组成的宏观结构在 30kHz 和 50kHz 声波传输振幅云图见图 3 (b), 结果表明全带隙声学超材料可阻断其带隙频率段内声波的传播, 并允许不在其带隙内的声波通过。

以 3-4 阶方向性带隙为目标的声学超材料非梯度拓扑优化方法所得声学超材料最优微结构如图 4 (a)。由方向性声学超材料微结构组成的波导管结构在 20kHz 和 33kHz 下声波传输振幅云图见图 4 (b)，结果表明方向性带隙声学超材料在带隙频率范围内能可阻断 0 度方向传播的声波而 45 度方向传播的声波可以自由通过，在带隙外各方向的声波均可通过。

本发明提供的能够有效克服声学超材料拓扑优化设计中的初始解依赖性和局部最优解陷阱难题，并能稳定高效的获得各阶带隙的声学超材料最优构型。

其对前述各实施例所记载的优化问题的带隙性能目标函数进行修改，或者对其中部分材料插值模型进行等同替换，并不使相应方法与方案的本质脱离本发明各实施例方法与方案的范围。

1.一种基于非梯度拓扑优化的声学超材料设计方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1: 将时间域声学超材料中弹性波的波传导问题转换为频率域下微结构的弹性波的广义特征值问题,即将时间域的波传导方程 $\rho(\mathbf{r})\ddot{\mathbf{U}} = \nabla(\lambda(\mathbf{r}) + \mu(\mathbf{r}))\nabla \cdot \mathbf{U} + \nabla \cdot \mu(\mathbf{r})\nabla \mathbf{U}$ 转化为频率域的广义特征值方程 $(\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{U} = 0$; 采用平面应变单元对声学材料单胞进行离散,得到离散后的微结构总体刚度矩阵和总体质量矩阵;

公式中字母指代为: $\mathbf{r} = \{x, y\}$ 表示位置向量; $\rho(\mathbf{r})$ 表示材料密度; $\mathbf{U}$ 和 $\ddot{\mathbf{U}}$ 分别表示沿坐标轴 x , y 和 z 方向的位移和加速度向量; $\lambda(\mathbf{r})$ 和 $\mu(\mathbf{r})$ 表示随位置变化的拉梅系数; $\mathbf{k}$ 表示平面波矢; $\mathbf{K}(\mathbf{k})$ 表示与平面波矢相关的周期单胞总体刚度矩阵; $\mathbf{M}$ 表示周期单胞的总体质量矩阵; ω 表示圆频率;

S2: 基于 Floquet-Bloch 定理,在步骤 S1 中建立的广义特征值方程中引入周期性边界条件, $\mathbf{U}(\mathbf{r}) = \mathbf{U}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}$, 其中, $\mathbf{U}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ 表示与位置向量 $\mathbf{r}$ 有相同周期性的周期位移场; 基于有限元方法对微结构的特征值问题进行离散;

S3: 对步骤 S2 中离散的声学超材料单胞内材料分布与等效材料属性进行表征与映射; 基于材料场级数展开策略,引入材料场函数 $\varphi(\mathbf{r}) \in [-1, 1]$ 和距离相关函数 $C(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$ 描述单胞内部材料分布; 利用级数展开降维技术,将声学超材料单胞内的材料分布用 M 个独立设计变量 $\xi = \{\xi_1 \ \xi_2 \ \cdots \ \xi_M\}^T$ 进行表征; 进而,引入 RAMP 材料插值模型,建立单元相对密度与材料等效杨氏模量的映射关系;

S4: 对步骤 S3 中声学超材料微结构的广义特征方程求解中,设置不同大小的平面波矢量 $\mathbf{k}$ 的入射波对简约布里渊区边界进行扫略,在简约布里渊区的 ΓXM 边界等距选取 0 度、45 度、90 度波矢各 5 组,通过求解任意可能的波矢 $\mathbf{k}$ 求解广义特征值问题 $(\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{U} = 0$; 计算声学超材料的能带结构,并得到指定阶频率对应的带隙 $\omega_j(\mathbf{k}_i)$, 式中, $\mathbf{k}_i$ 表示选取的第 i 个代表性平面波矢量, $\omega_j(\mathbf{k}_i)$ 表示在指定平面波矢量 $\mathbf{k}_i$ 下单胞的第 j 阶特征圆频率;

S5: 根据步骤 S4 中带隙计算结果, 以 $\xi = \{\xi_1 \ \xi_2 \ \cdots \ \xi_M\}^T$ 为设计变量, 建立全带隙或方向性带隙的声学超材料拓扑优化模型:

(1) 若指定第 j 阶和 $j+1$ 阶的全带隙为目标, 建立全带隙拓扑优化问题模型:

$$\begin{aligned} \max_{\xi} \quad & f_F(\xi) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i, \xi) \\ \text{s.t.} \quad & (\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{u} = 0 \\ & \xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, \ (i = 1, 2, \dots, N_p). \end{aligned}$$

式中, $f_F(\xi)$ 为全带隙目标函数; N_p 为总观察点个数; $\mathbf{W}_i$ 为与第 i 个观察点相关的特征矩阵; n_k 为简约布里渊区边界的计算点个数;

(2) 若指定第 j 阶和 $j+1$ 阶的方向性带隙为目标, 建立局部带隙拓扑优化问题模型:

$$\begin{aligned} \max_{\xi} \quad & f_P(\xi) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi) \\ \text{s.t.} \quad & (\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{u} = 0 \\ & g_P = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) \leq 0 \\ & \xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, \ (i = 1, 2, \dots, N_p). \end{aligned}$$

式中, $f_P(\xi)$ 为 0 度方向方向性带隙目标函数; g_P 为 45 度方向性通带约束函数; S6: 利用乘子法将步骤 S5 中所提的全带隙或方向带隙的约束优化问题转化为无约束优化问题:

$$\begin{aligned} \text{For} \quad & loop = 1, 2, \dots \\ \text{find} \quad & \xi = \{\xi_1 \ \xi_2 \ \cdots \ \xi_M\}^T \\ \min_{\xi \in \Omega_k} \quad & f_{obj}(\xi) = f(\xi) + p_0 \cdot \max_i \left(g_P, (\xi^T \mathbf{W}_i \xi - 1), 0 \right) \end{aligned}$$

式中, $loop$ 为子优化问题个数; $f_{obj}(\xi)$ 为所求子优化问题目标函数; $f(\xi)$ 为原优化问题目标函数; p_0 为将有约束优化问题转化为无约束优化问题的罚函数乘子; Ω_k 为子优化问题的可行域;

采用自适应设计空间调整策略，限制声学超材料单胞的材料布局单次优化更新的变化程度，基于序列 Kriging 代理模型优化算法求解步骤 S6 中的优化模型，直至优化问题收敛。

2.根据权利要求 1 所述的一种基于非梯度拓扑优化的声学超材料设计方法，其特征在于，所述的步骤述 S3 中，声学超材料单胞内材料分布与等效材料属性的表征与映射的具体步骤为：

S31:采用材料常函数 $\varphi(\mathbf{r}) \in [-1, 1]$ 描述声学超材料单胞内两相材料的的布局，在超材料单胞内均匀选取观察点；

S32:引入距离相关函数 $C(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) = \exp(-\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|^2 / l_c^2)$ ，建立单胞内部任意两点 $\mathbf{r}_i$ 和 $\mathbf{r}_j$ 的材料场相关关系，其中 l_c 为相关长度；

S33: 在单胞内选与有限单元中心相重合的 N_p 个材料场函数观察点，建立求各观察点的距离相关函数矩阵 $\mathbf{C} = [C(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1) \cdots C(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_{N_p}); \cdots ; C(\mathbf{r}_{N_p}, \mathbf{r}_1) \cdots C(\mathbf{r}_{N_p}, \mathbf{r}_{N_p})]$ ，求解广义特征值问题广义特征值方程 $\mathbf{C}\boldsymbol{\psi}_k = \lambda_k \boldsymbol{\psi}_k$ ；其中 λ_k 和 $\boldsymbol{\psi}_k$ 分别表示第 k 阶特征值和特征向量；

S34: 根据前 M 阶的最大特征值 $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_M)$ 及其对应的特征向量 $\boldsymbol{\Phi} = \{\boldsymbol{\psi}_1 \ \boldsymbol{\psi}_2 \ \cdots \ \boldsymbol{\psi}_M\}$ ，得到声学超材料的材料场近似表达 $\varphi(\mathbf{r}, \boldsymbol{\xi}) \approx \sum_{k=1}^M \xi_k \frac{\boldsymbol{\psi}_k^T \mathbf{C}_d(\mathbf{r})}{\sqrt{\lambda_k}}$ ；

S35: 引入单元密度与材料场的映射关系 $x_e(\boldsymbol{\xi}) = \frac{1 + \varphi(\mathbf{r}_e, \boldsymbol{\xi})}{2}$ ，根据两相材料杨氏模量插值模型 $E_e(\boldsymbol{\xi}) = E_1 + \frac{x_e(\boldsymbol{\xi})}{1 + p(1 - x_e)}(E_2 - E_1)$ ，建立声学超材料插值模型；其中， E_1 ， E_2 分别为两种材料的杨氏模量， p 为惩罚因子。

3.根据权利要求 1 或 2 所述的一种基于非梯度拓扑优化的声学超材料设计方法，其特征在于，基于材料场级数展开描述的全带隙或方向性带隙非梯度声学超材料拓扑优化模型，具体步骤为：

S51: 以 ΓX (0 度) 方向带隙为目标，则将拓扑优化的目标函数取为 $f_p(\boldsymbol{\xi}) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \boldsymbol{\xi}) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \boldsymbol{\xi})$ (若考虑全带隙优化，则选取全部方向带隙

的目标函数为 $\max: f_F(\xi) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i, \xi)$

S52: 引入 ΓM 方向通带约束 $g_P = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) \leq 0$, 实现在 45 度方向上允许声波通过 (若考虑全带隙优化问题则无此步骤);

S53: 引入材料场函数界限约束函数 $\xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, (i=1, 2, \dots, N_p)$ 保证声学超材料单胞的材料表征函数值介于 $\varphi(\mathbf{r}) \in [-1, 1]$ 之间;

S54: (1) 若考虑全带隙拓扑优化问题, 则建立拓扑优化问题模型:

$$\max_{\xi} : f_F(\xi) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i),$$

$$\text{s.t.} : (\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{U} = 0,$$

$$\xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, (i=1, 2, \dots, N_p).$$

(2) 若考虑方向性波传导优化问题, 建立局部带隙拓扑优化问题模型:

$$\max_{\xi} : f_P(\xi) = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_1}, \xi)$$

$$\text{s.t.} : (\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{u} = 0$$

$$g_P = \min_{i=1}^{n_k} \omega_{j+1}(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) - \max_{i=1}^{n_k} \omega_j(\mathbf{k}_i^{\theta_2}, \xi) \leq 0$$

$$\xi^T \mathbf{W}_i \xi \leq 1, (i=1, 2, \dots, N_p).$$

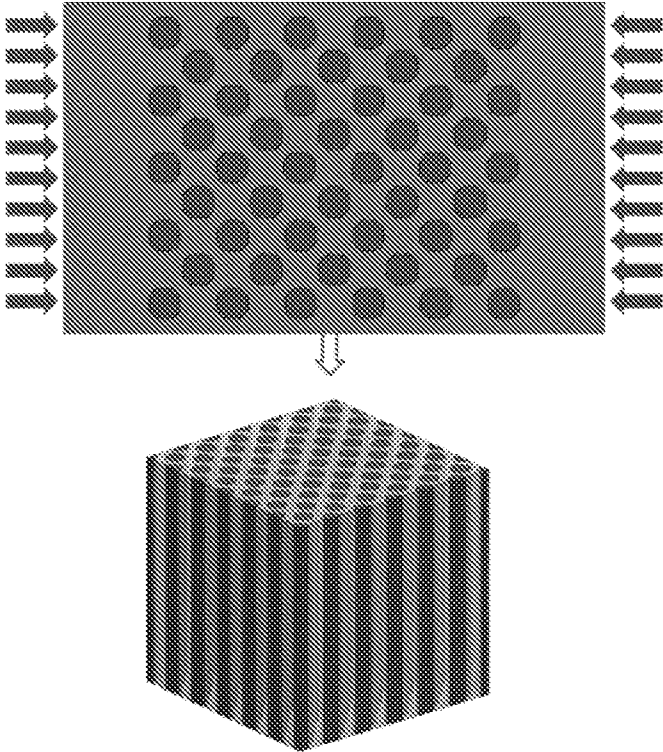


图 1 (a)

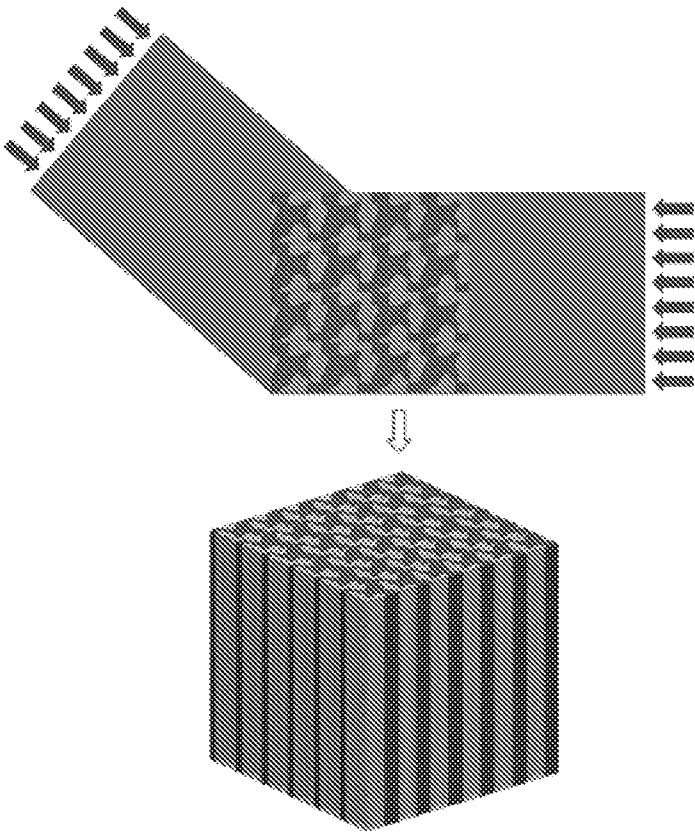


图 1 (b)

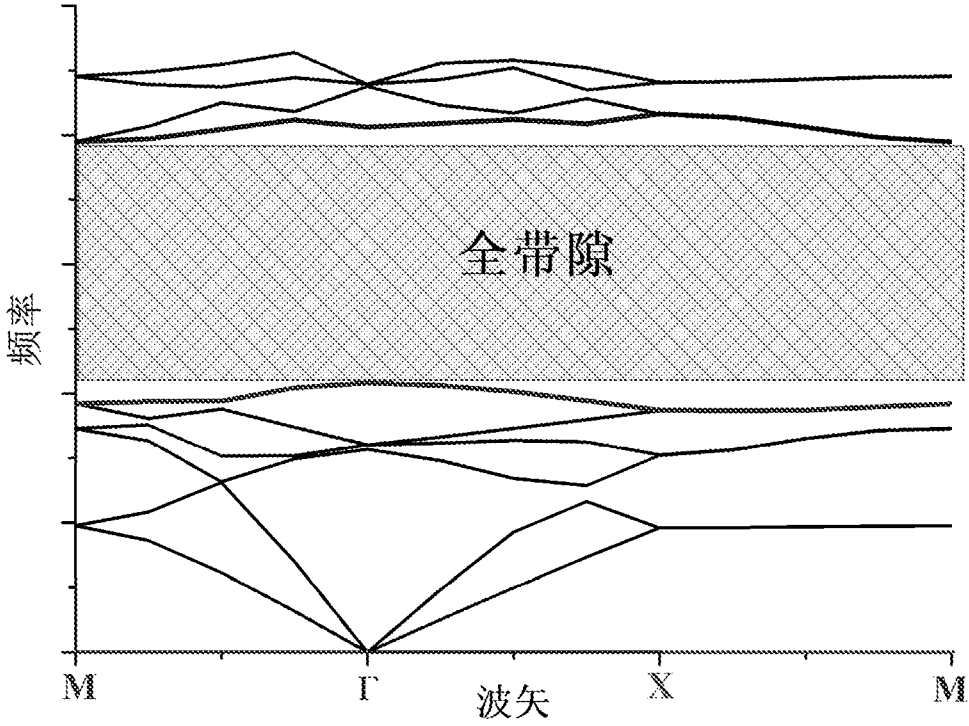


图 1 (c)

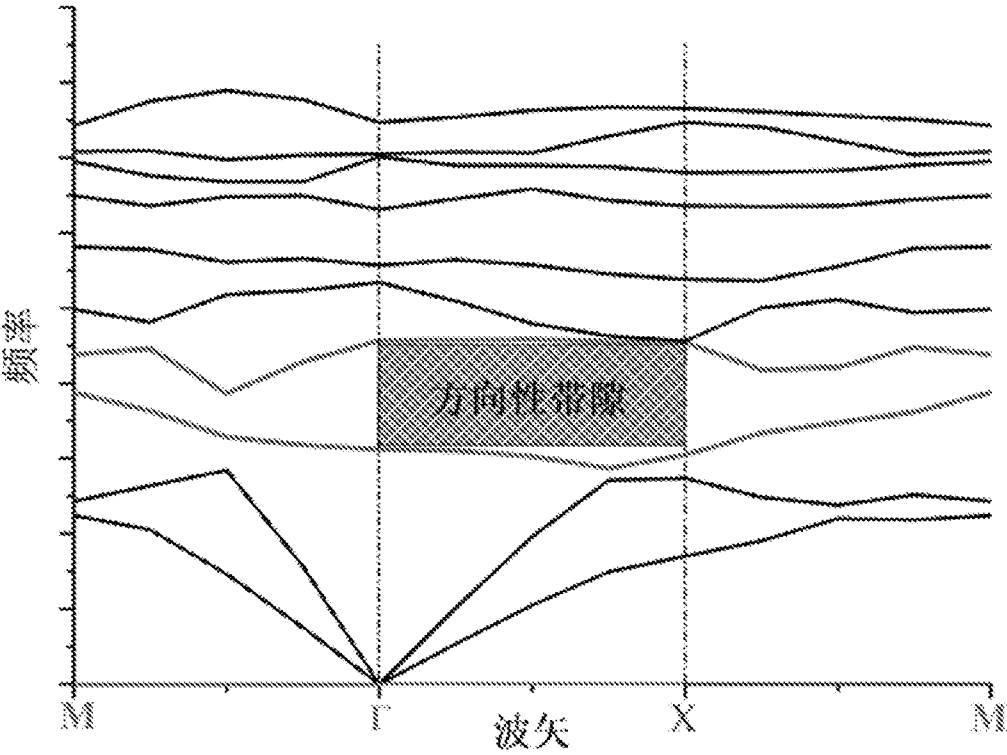


图 1 (d)

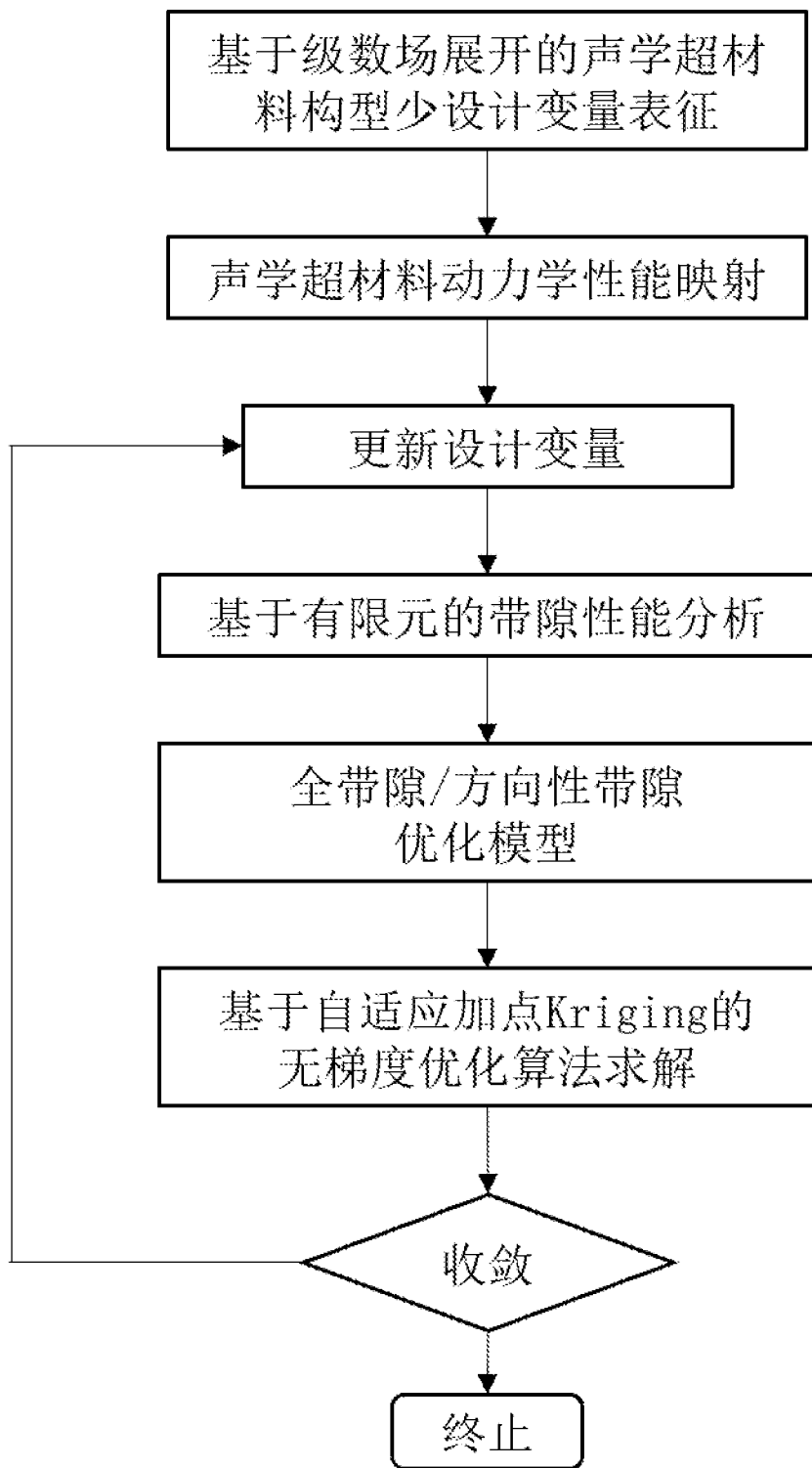


图 2

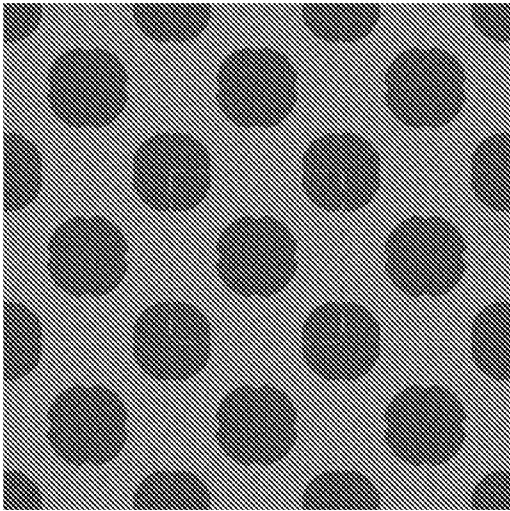


图 3 (a)

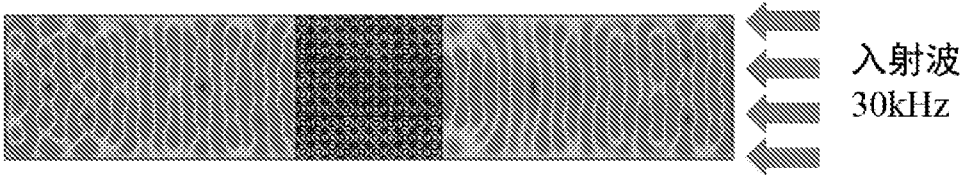


图 3 (b)

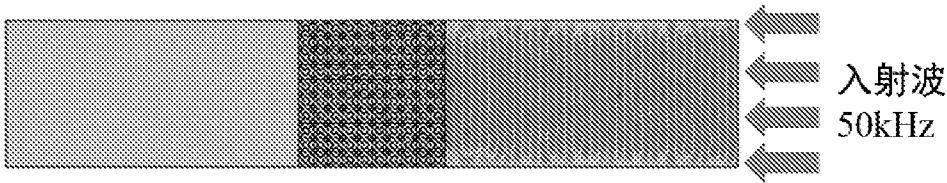


图 3 (c)

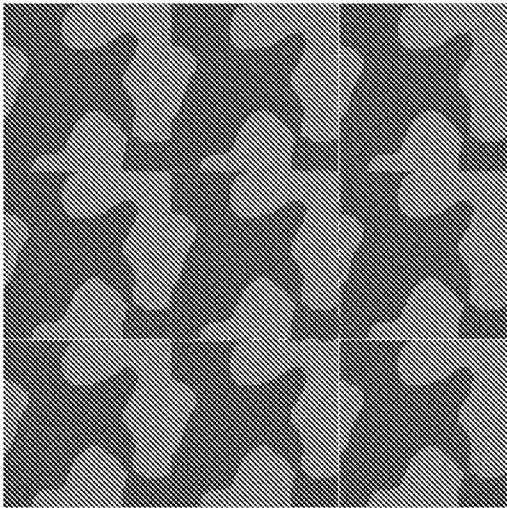


图 4 (a)

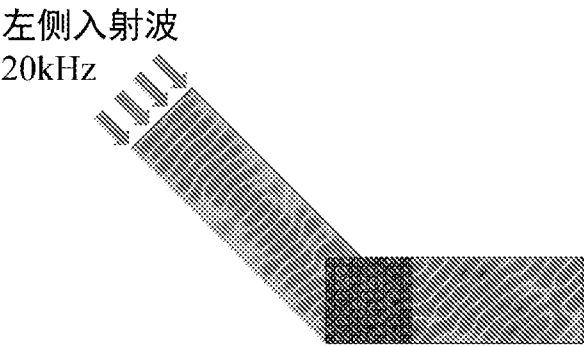


图 4 (b)

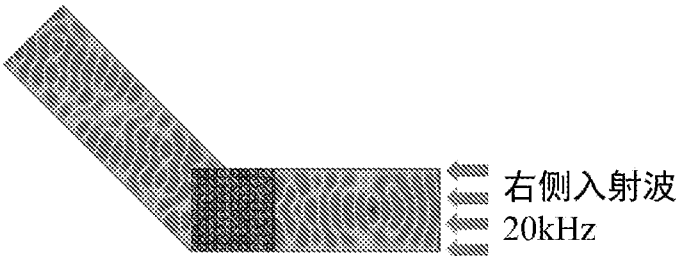


图 4 (c)

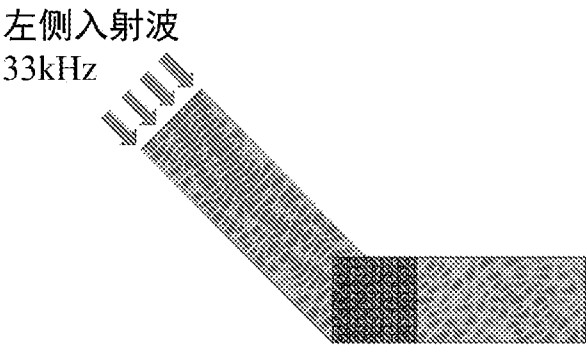


图 4 (d)

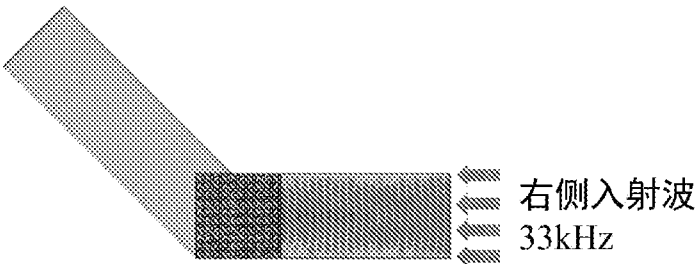


图 4 (e)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/123566

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 30/23(2020.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 声学, 超材料, 超构材料, 拓扑优化, 非梯度, 带隙, 有限元, acoustic, metamaterial, topology optimization, non-gradient, band gap, finite element

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 111259592 A (HUNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 09 June 2020 (2020-06-09) description paragraphs [0034]-[0132]	1-3
A	CN 110110413 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 09 August 2019 (2019-08-09) entire document	1-3
A	CN 110852011 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 28 February 2020 (2020-02-28) entire document	1-3
A	CN 110472305 A (NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY) 19 November 2019 (2019-11-19) entire document	1-3
A	CN 106650179 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 10 May 2017 (2017-05-10) entire document	1-3
A	US 2011166833 A1 (THE BOARD OF GOVERNORS FOR HIGHER EDUCATION, STATE OF RHODE ISLAND AND PROVIDENCE PLANTATIONS) 07 July 2011 (2011-07-07) entire document	1-3



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

13 July 2021

Date of mailing of the international search report

26 July 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088

China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/123566

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	ZHANG, Xiaopeng et al. "A phase-field based robust topology optimization method for phononic crystals design considering uncertain diffuse regions" <i>Computational Materials Science</i> , Vol. 160, 10 January 2019 (2019-01-10), pp. 159-172	1-3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/123566

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111259592	A	09 June 2020	None			
CN	110110413	A	09 August 2019	EP	3754521	A1	23 December 2020
				WO	2020215533	A1	29 October 2020
CN	110852011	A	28 February 2020	None			
CN	110472305	A	19 November 2019	None			
CN	106650179	A	10 May 2017	None			
US	2011166833	A1	07 July 2011	US	2008300831	A1	04 December 2008
				WO	2007076357	A2	05 July 2007

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/123566

A. 主题的分类 G06F 30/23 (2020.01) i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类																										
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) G06F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) WPI, EPDOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 声学, 超材料, 超构材料, 拓扑优化, 非梯度, 带隙, 有限元, acoustic, metamaterial, topology optimization, non-gradient, band gap, finite element																										
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 111259592 A (湖南工业大学) 2020年 6月 9日 (2020 - 06 - 09) 说明书第[0034]-[0132]段</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 110110413 A (大连理工大学) 2019年 8月 9日 (2019 - 08 - 09) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 110852011 A (大连理工大学) 2020年 2月 28日 (2020 - 02 - 28) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 110472305 A (西北工业大学) 2019年 11月 19日 (2019 - 11 - 19) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106650179 A (东南大学) 2017年 5月 10日 (2017 - 05 - 10) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2011166833 A1 (THE BOARD OF GOVERNORS FOR HIGHER EDUCATION, STATE OF RHODE ISLAND AND PROVIDENCE PLANTATIONS) 2011年 7月 7日 (2011 - 07 - 07) 全文</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>ZHANG, Xiaopeng et al. "A phase-field based robust topology optimization method for phononic crystals design considering uncertain diffuse regions" Computational Materials Science, 第160卷, 2019年 1月 10日 (2019 - 01 - 10), 第159-172页</td> <td>1-3</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 111259592 A (湖南工业大学) 2020年 6月 9日 (2020 - 06 - 09) 说明书第[0034]-[0132]段	1-3	A	CN 110110413 A (大连理工大学) 2019年 8月 9日 (2019 - 08 - 09) 全文	1-3	A	CN 110852011 A (大连理工大学) 2020年 2月 28日 (2020 - 02 - 28) 全文	1-3	A	CN 110472305 A (西北工业大学) 2019年 11月 19日 (2019 - 11 - 19) 全文	1-3	A	CN 106650179 A (东南大学) 2017年 5月 10日 (2017 - 05 - 10) 全文	1-3	A	US 2011166833 A1 (THE BOARD OF GOVERNORS FOR HIGHER EDUCATION, STATE OF RHODE ISLAND AND PROVIDENCE PLANTATIONS) 2011年 7月 7日 (2011 - 07 - 07) 全文	1-3	A	ZHANG, Xiaopeng et al. "A phase-field based robust topology optimization method for phononic crystals design considering uncertain diffuse regions" Computational Materials Science, 第160卷, 2019年 1月 10日 (2019 - 01 - 10), 第159-172页	1-3
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																								
A	CN 111259592 A (湖南工业大学) 2020年 6月 9日 (2020 - 06 - 09) 说明书第[0034]-[0132]段	1-3																								
A	CN 110110413 A (大连理工大学) 2019年 8月 9日 (2019 - 08 - 09) 全文	1-3																								
A	CN 110852011 A (大连理工大学) 2020年 2月 28日 (2020 - 02 - 28) 全文	1-3																								
A	CN 110472305 A (西北工业大学) 2019年 11月 19日 (2019 - 11 - 19) 全文	1-3																								
A	CN 106650179 A (东南大学) 2017年 5月 10日 (2017 - 05 - 10) 全文	1-3																								
A	US 2011166833 A1 (THE BOARD OF GOVERNORS FOR HIGHER EDUCATION, STATE OF RHODE ISLAND AND PROVIDENCE PLANTATIONS) 2011年 7月 7日 (2011 - 07 - 07) 全文	1-3																								
A	ZHANG, Xiaopeng et al. "A phase-field based robust topology optimization method for phononic crystals design considering uncertain diffuse regions" Computational Materials Science, 第160卷, 2019年 1月 10日 (2019 - 01 - 10), 第159-172页	1-3																								
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																										
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> "T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																						
* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																									
国际检索实际完成的日期		国际检索报告邮寄日期																								
2021年 7月 13日		2021年 7月 26日																								
ISA/CN的名称和邮寄地址		受权官员																								
中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		吴琼 电话号码 86-(10)-53961338																								

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/123566

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	111259592	A	2020年 6月 9日	无			
CN	110110413	A	2019年 8月 9日	EP	3754521	A1	2020年 12月 23日
				WO	2020215533	A1	2020年 10月 29日
CN	110852011	A	2020年 2月 28日	无			
CN	110472305	A	2019年 11月 19日	无			
CN	106650179	A	2017年 5月 10日	无			
US	2011166833	A1	2011年 7月 7日	US	2008300831	A1	2008年 12月 4日
				WO	2007076357	A2	2007年 7月 5日