

传热结构自适应成长法的敏度过滤技术研究

季懿栋, 丁晓红

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 基于自然界分支系统机理的自适应成长法能获得结构简单且传热效果好的设计结果, 该方法在复杂热边界条件下得到的传热通道布局中存在一定数量的平行通道。针对这一问题, 提出了一种两层顺序优化的生长新策略。第一层优化采用加入敏度过滤的自适应成长法, 优化迭代所得的结果作为第二层优化的初始解; 第二层优化采用无过滤的成长法继续生长直至结果收敛。研究表明, 该方法得到的设计结果不仅拓扑形态简单清晰, 平行通道大幅减少, 且热性能进一步改善。此外, 加入考虑密度梯度信息的敏度过滤法获得的设计结果最好。

关键词: 自适应成长法; 敏度过滤; 密度梯度; 传热结构; 拓扑优化

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Sensitivity Filtering Technique of the Adaptive Growth Method for Heat Transfer Structures

Ji Yidong, Ding Xiaohong

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The adaptive growth method for heat transfer structures which emulates the natural branch systems provides simpler and more effective results. However, parallel channels can not be avoided in the method under the complex boundary conditions. To solve this disadvantage, a new strategy was suggested, which includes two sequential steps. In the first step, the method was applied with the sensitivity filtering technique and the result of the step was adopted as an initial design for the second step. In the second step, the method was applied without the sensitivity filtering technique. The research shows that the topology configurations achieved by the suggested strategy are clear with few parallel channels and the heat performances are improved. What's more, the results obtained with the density gradient filtering technique are the best.

Keywords: adaptive growth method; sensitivity filtering; density gradient; heat transfer structure; topology optimization

随着电子产品的功率增大、体积减小, 工作时积聚的热量急剧增加, 寻找一种合适的散热方

式变得尤为重要。自然对流等传统散热方式的效率低, 无法满足当前散热要求。而强制对流等方

收稿日期: 2017-12-13

第一作者: 季懿栋(1993-), 硕士研究生。研究方向: 传热结构优化。E-mail: anose@163.com

通信作者: 丁晓红(1965-), 教授。研究方向: 结构优化设计。E-mail: dingxhsh021@126.com

法虽然效率高但需要较大空间, 难以应用于小空间电子产品^[1-3]。一种有效的方法是采用能量疏导方式。所谓能量疏导就是将一定体积的高导热系数材料敷设于元器件基板表面或直接嵌入其内部形成传热通道, 从而将工作时产生的热量高效传导至外部环境^[4]。

合理的传热通道布局设计, 可以有效地提高传热效率。早期传热通道布局的设计依赖于经验或直觉, 设计结果不仅传热效率低且难以应对实际工程中复杂的热边界条件。以热阻最小为目标, Bejan^[5]提出构形理论并设计得到树形传热通道。此后随着拓扑优化技术发展, 以 SIMP(solid isotropic material with penalization)插值的变密度法^[6]、渐进结构优化法(evolutionary structural optimization, ESO)^[7], 以及水平集方法^[8]为代表的各类结构拓扑优化方法都被应用于设计传热通道的分布。上述方法获得的设计结果的传热效率高且形态皆与树形结构相类似, 然而, 设计结果中存在棋盘格现象, 灰度单元较多, 过多细小分支, 且不利于制造。Ding 等^[9]通过对自然界分支系统成长机理的研究, 提出了自适应成长法, 并应用于传热通道的布局设计中^[10]。由该方法得到的传热通道布局简单清晰, 但在较复杂热边界条件下, 会出现平行通道分支。

本文提出一种包含敏度过滤的两层顺序优化生长新策略, 从而解决了现有问题。通过不同热边界条件的典型二维散热问题, 验证提出方法的有效性, 并比较各类敏度过滤技术在该方法中的适用性。

1 传热结构自适应成长法

1.1 自适应成长法原理

自然界的生物分支结构, 例如, 植物根系, 在生长过程中, 其根系在自身遗传因素影响及重力性、向触性、趋水性等限制^[11]下, 自适应成长并尽可能多地将土壤中的营养物质传输到根部。如图 1 所示, 植物根系在趋水性的作用下, 根系向水源所在方向生长, 以获得最大的生长动力, 同时生长过程中长出大量分支。具有高导热系数的传热通道的功能是在不同边界条件的限制下, 将基体中的热量尽可能多地传导至外部环境。图 1 中传热通道由风扇延展至具有高热量的 CPU 区域。由此可见, 传热结构与自然生物分支结构在

功能及形态上较为相似。因此, 传热结构优化设计应如同自然分支结构一般可在给定的目标下, 按照某种设计准则, 向最优方向生长。

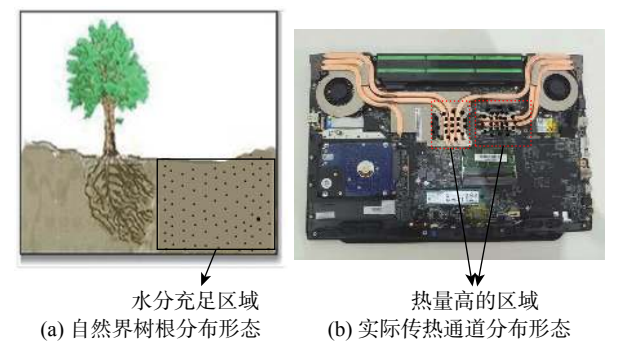


图 1 自然界与实际通道的分布形态
Fig.1 Distribution morphology in nature and practical channel

传热结构自适应成长法中, 通过在设计域内引入固定结构形式的基结构, 将高自由度的材料拓扑优化问题转变为低自由度的以截面积为设计变量的拓扑优化问题。建立合适的数学模型并推导针对截面积变化的迭代公式, 对截面积进行优化。优化后的几何形态即为用高导热材料铺设的传热通道的分布形态。

1.2 自适应法的数学模型及最优准则迭代公式推导

考虑如图 2 所示的典型稳态热传导问题的传热结构拓扑优化设计, 该问题可以描述为: 在具有内热源的设计域内, 给定绝热边界和散热边界, 以散热弱度最小为目标函数, 在给定高导热材料体积的约束下, 寻求各传热结构分支截面积的最佳分布。

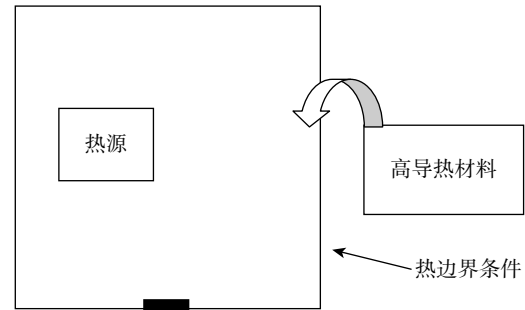


图 2 传热通道的设计问题
Fig.2 Design problem of the heat transfer channel

在传热结构自适应拓扑优化方法中通过引入设计变量 x_i 与分支的截面积相关联。截面积 A_i 与相应的设计变量之间的插值关系可以表示为

$$A_i = (A_{\max} - A_{\min})x_i^p + A_{\min} \tag{1}$$

式中： $A_{\max}$ ， $A_{\min}$ 分别为分支截面积的最大值和最小值； p 为插值模型的惩罚系数。

通过该插值模型可以将设计变量 A_i 转化为设计变量 x_i 。其中， p 不同取值下的插值模型如图 3 所示。可以看出，当惩罚系数 $p > 1$ 时，该插值模型对变量 A_i 具有惩罚效果，且 p 取值越大，惩罚效果也越明显。

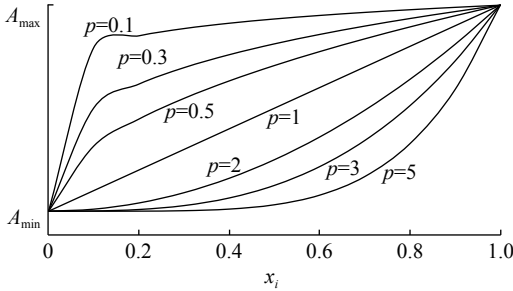


图 3 插值模型

Fig.3 Interpolation model

在引入变量 x_i 后，稳态热传导问题中的传热结构拓扑优化设计的数学模型可表示为

$$\begin{cases} \text{find } x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \min f(x) = \mathbf{T}^T \mathbf{P} \\ \text{s.t. } V = \sum_{i=1}^n x_i v_i \leq q V_0 \\ \mathbf{P} = k \mathbf{T} \\ x_i \leq x_{\max} \\ x_i \geq x_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中： x_i 为各分支的截面积 A_i 对应的设计变量； n 为基结构个数； $\mathbf{T}$ 为各节点温度矢量； $\mathbf{P}$ 为节点热载荷矢量； V 为优化后基结构总体积； v_i 为第 i 个单元体积； q 为体积约束因子； V_0 为初始体积； $x_{\max}$ ， $x_{\min}$ 分别为设计变量的上限与下限。

采用最优准则法进行求解，由式(2)构造拉格朗日函数。当该拉格朗日函数满足一定条件时^[12]，目标函数 $f(x)$ 可取最小值。综合考虑设计变量上下限的值、体积约束条件以及热刚度矩阵的对称性，最终得到优化迭代公式：

$$c_i = (K - 1)x_i^p + 1 \quad (3)$$

$$D_i = \frac{2pr_i}{\beta_1 x_i} \left(\frac{c_i - 1}{c_i} \right) \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_i^{z+1} = x_{\min}, & D_i^\alpha x_i^z \leq x_{\min} \\ x_i^{z+1} = D_i^\alpha x_i^z, & x_{\min} \leq D_i^\alpha x_i^z \leq x_{\max} \\ x_i^{z+1} = x_{\max}, & D_i^\alpha x_i^z \geq x_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中： K 为导热系数比； β_1 为体积约束条件的拉格朗日乘子； r_i 为第 i 个单元的热耗散值； z 为迭代

次数； α 为阻尼系数。

2 改进的传热结构自适应成长法

2.1 灵敏度过滤技术

目前，传热结构自适应成长法得到的传热通道布局中存在一定数量的平行通道，而产生平行通道是算法数值不稳定的一种表现。解决该问题的方法有高阶单元法^[13]、周长约束法^[14]和灵敏度过滤方法^[15]等。其中，灵敏度过滤更具有实际参考意义^[16]。

灵敏度过滤技术^[17]是利用过滤范围内所有单元的灵敏度信息修正中心单元的灵敏度信息，即采用过滤半径范围内各单元灵敏度的加权平均值代替中心单元的灵敏度值，从而避免数值不稳定现象的发生。由 Sigmund 在 SIMP^[18]中提出的灵敏度过滤 (SIMP 过滤) 中首先定义某一单元邻域的集合

$$N_e = \{i | \|x_i - x_e\| \leq r\} \quad (6)$$

式中：单元 e 为中心单元；单元 i 为单元 e 邻域中的一个单元； x_i 与 x_e 分别为单元 i 与单元 e 的空间中心位置； r 为过滤半径。

SIMP 过滤公式为

$$\frac{\tilde{\partial} f}{\partial x_e} = \frac{\sum_{i \in N_e} \omega(x_i) x_i \frac{\partial f}{\partial x_i}}{x_e \sum_{i \in N_e} \omega(x_i)} \quad (7)$$

$$\omega(x_i) = r - \|x_i - x_e\| \quad (8)$$

式中： $\frac{\tilde{\partial} f}{\partial x_e}$ 和 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 为相应单元的灵敏度； $\omega(x_i)$ 为距离权函数。

为了使拓扑优化结果的边界进一步清晰，Borrvall 提出了修正的灵敏度过滤 (Borrvall 过滤)^[19]，其公式为

$$\frac{\tilde{\partial} f}{\partial x_e} = \frac{\sum_{i \in N_e} \omega(x_i) x_i \frac{\partial f}{\partial x_i}}{\sum_{i \in N_e} \omega(x_i) x_i} \quad (9)$$

杜义贤等^[19]借鉴标准粒子群优化算法 (PSO) 中的粒子状态更新方法，提出了一种改进的灵敏度过滤技术 (PSO 过滤)，即根据单元及其相邻单元中灵敏度的极大值和极小值来修正该单元的灵敏度，公式为

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{\partial} f}{\partial x_e} = & \omega \frac{\partial f}{\partial x_e} + c_1 \max \left\{ \frac{\partial f}{\partial x_i} \middle| i \in N_e \right\} + \\ & c_2 \min \left\{ \frac{\partial f}{\partial x_j} \middle| j \in N_e \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: ω 为惯性权重; c_1, c_2 为学习因子, 为正常数。

ω 控制着原单元敏感度值对当前修正值的影响程度, 学习因子反映了单元向邻域中 2 个敏感度极值学习的程度。杜义贤等^[19]通过数值算例验证认为, 当学习因子 $c_1 = c_2 = 0.4$, 而惯性权重 $\omega = 0.2$ 时, PSO 过滤方法能够得到更好的效果。

为了克服敏度过滤方法带来的边界扩散问题, 龙凯等^[20]提出了考虑密度梯度信息的敏度过滤方法 (Density 过滤), 该方法在原有敏度过滤表达式中增加了密度梯度修正权函数项, 来获取具有清晰边界的拓扑优化结果, 其公式为

$$\frac{\partial \tilde{f}}{\partial x_e} = \frac{\sum_{i \in N_e} \omega(x_i) \lambda x_i \frac{\partial f}{\partial x_i}}{x_e \sum_{i \in N_e} \omega(x_i) \omega} \quad (11)$$

$$\lambda = \begin{cases} 1, & \|x_i - x_e\| \leq \beta \\ 0.001, & \|x_i - x_e\| > \beta \end{cases} \quad (12)$$

式中: λ 为考虑密度梯度信息的修正权函数; β 为密度界限值。

大量数值算例结果表明, 在本文研究的问题中, 为取得较为良好的拓扑优化结果, 密度界限值 $\beta=0.2$ 。

2.2 改进的传热结构自适应成长法流程

原成长法得到的设计结果形态清晰, 但存在平行通道, 针对这一问题提出了一种两层顺序优化的传热结构自适应成长法, 第一层优化采用包含敏度过滤的自适应成长法, 优化迭代收敛后所得的结果作为第二层优化的初始解; 第二层优化采用无敏度过滤的自适应成长法继续生长, 直至结果收敛。改进的传热结构自适应成长法流程如图 4 所示。

首先定义设计域, 并建立基结构。根据具体工况, 为设计域施加相应热边界条件以及热载荷, 并给出成长参数及敏度过滤参数。

通过对设计域进行有限元热分析, 获取设计域内各类热性能结果, 从而为后续迭代作准备。计算各设计变量对目标函数的敏感度值, 并通过敏度过滤修正各设计变量相应的敏感度值。随后采用求解得到的迭代公式计算出下一步的设计变量结果, 并根据设计变量更新相应分支的截面积。重复以上步骤直到目标函数收敛后, 去除敏度过滤这一步骤, 并重复以上其他步骤。当相邻两次迭代的目标函数值的差值小于收敛容差且迭代步数达到要求, 认为结果收敛。

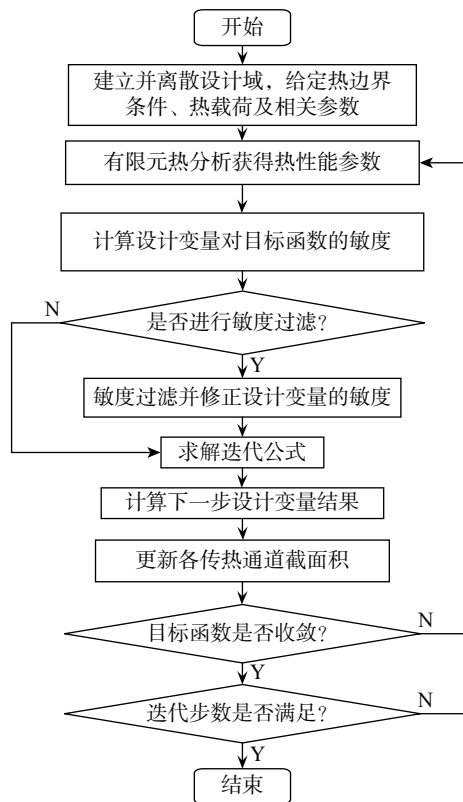


图 4 改进的传热结构自适应成长法流程

Fig.4 Flow chart of the improved adaptive growth method for heat transfer structure

3 典型数值算例

3.1 底边单点热沉算例

考虑如图 5 所示的底边单点热沉同时内部均匀生热的数值算例问题。设计域 Ω_s 为 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 正方形。设计域内部均匀生热, 其生热率 $\dot{Q}$ 为 $6 \times 10^4 \text{ W/m}^3$ 。在设计域的底边中部有散热边界, 长度 $L=0.01 \text{ m}$, 温度 $T_0=0^\circ\text{C}$, 其余边界绝热。覆盖设计域的材料为低导热材料, 并用白色表示。相关成长参数以及敏度过滤相关参数如表 1 及表 2 所示。分别采用两层顺序优化的改进成长法与原成长法求解。

原成长法得到的设计结果如图 6(a) 所示, 迭代历程如图 6(b) 所示。迭代收敛后, 获得的传热通道分布形态大致呈“山”字形, 传热通道的底部存在分别向两侧延展的传热通道分支。得到的传热通道的分布中, 中央传热通道的顶部存在有三根平行的传热通道分支, 同时两侧传热通道的顶端也各分布有三根高度依次递减的平行通道分支。

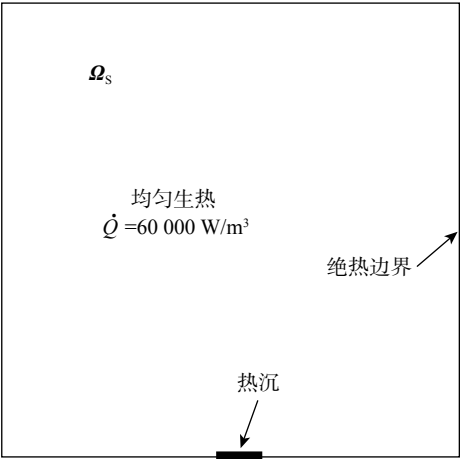


图 5 底边单点热沉算例模型

Fig.5 Design problem about single heat sink at the bottom of design domain

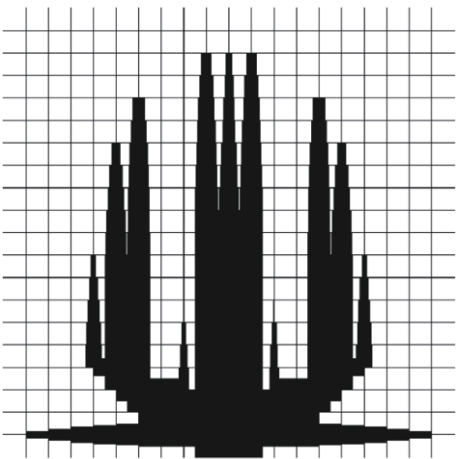
表 1 成长相关参数
Tab.1 Relevant parameters for growth

成长参数	取值	成长参数	取值
基结构网格数	20×20	收敛容差 ε	0.001
导热系数比 K	400	迭代次数 z	200
惩罚系数 p	1.5	阻尼系数 α	0.3
设计变量初始值 x_0	0.15	体积约束因子 q	0.15
设计变量 x 上下限	1/0.000 1		

表 2 敏度过滤参数
Tab.2 Parameter for sensitivity filtering

敏度过滤参数	取值
过滤半径 R	1 个单元宽度
密度界限值 β	0.2
惯性权重 ω	0.2
学习因子 c_1	0.4
学习因子 c_2	0.4

加入不同敏度过滤的改进成长法得到的传热通道分布形态分别如图 7(a), 7(b), 7(c) 以及 7(d) 所示。迭代历程如图 7(e) 所示, 迭代均收敛。使用 SIMP 过滤的改进成长法得到的传热通道形态为“V”字形, 底部有向两侧延展的传热通道分支。Borrvall 过滤得到的传热通道中存在小部分未与传热通道相连接的传热通道分支。Density 过滤得到的分布大致与 SIMP 过滤结果相似, 其中央还生长有两根竖直传热通道分支。由 PSO 过滤得到的传热通道分布形态为“山”字形。观察不同结果可以发现, Density 过滤所取得的拓扑形态中



(a) 热流通道分布形态

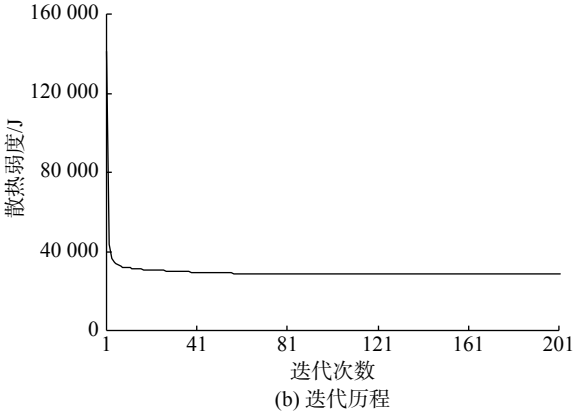


图 6 无敏度过滤的传热结构自适应成长法设计结果 (1)

Fig. 6 Design result of the adaptive growth method without sensitivity filtering(1)

的平行通道数量最少, 结构最清晰。由图 7(e) 所示的迭代历程可以发现, 与其他三类敏度过滤结果以及原成长法结果相比, Density 过滤能取得最小的散热弱度。Density 过滤取得的散热弱度为 27 055, 而原成长法散热弱度为 28 756。

从最高温度、平均温度以及温度标准差三方面对比评价无过滤成长法与改进成长法得到的设计结果, 如图 8 所示, 改进成长法的温度性能大部分优于原成长法的温度性能。其中, 加入 Density 过滤的改进成长法所得到的温度性能均最低, 分别为 68, 42 和 16 ℃, 比原成长法结果分别降低了 18%, 12% 和 5.9%。

3.2 中心单点热沉算例

考虑中心单点热沉同时内部均匀生热的数值算例问题。如图 9 所示, 热沉为一正方形, 长宽均为 $L=10\text{ mm}$ 。其余边界条件与优化参数均与底边单点热沉算例一致。分别采用改进成长法与原成长法求解该问题。

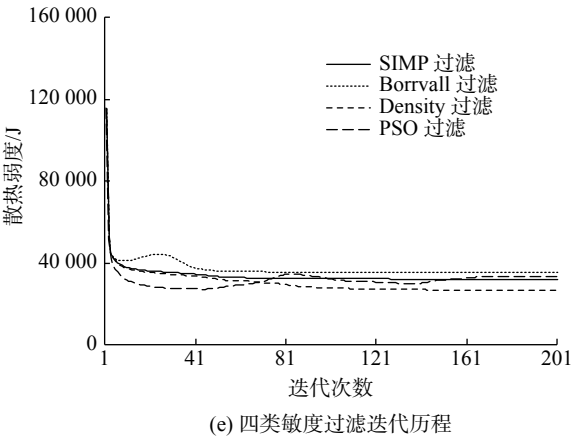
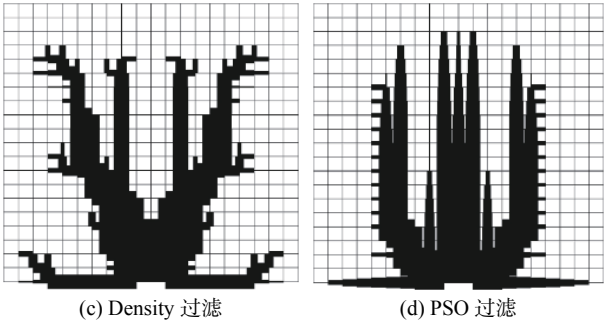
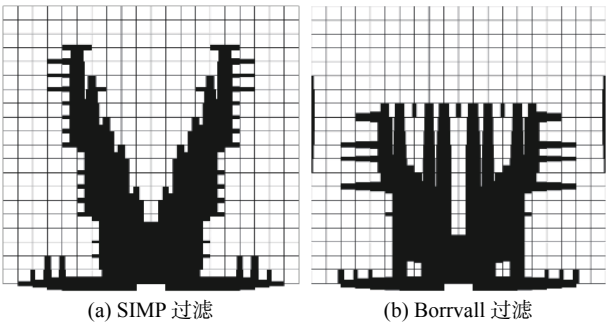


图 7 改进成长法设计结果 (1)

Fig. 7 Design result of the improved adaptive growth method(1)

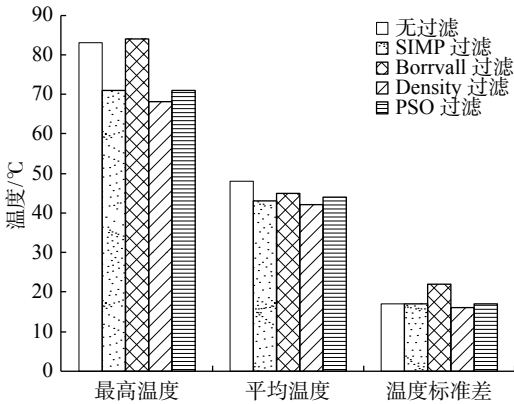


图 8 改进成长法与原成长法设计结果的温度性能对比 (1)

Fig. 8 Comparison of temperature performances obtained by the improved adaptive growth method and original adaptive growth method(1)

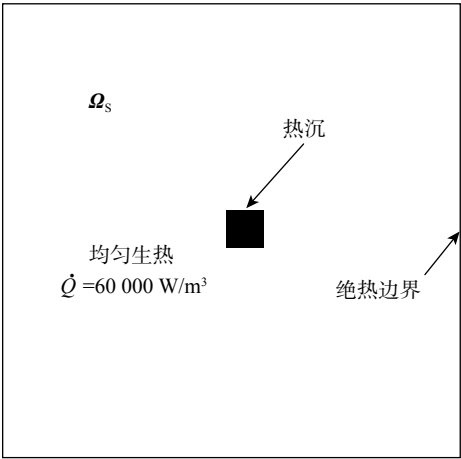


图 9 中心单点热沉算例模型

Fig.9 Design problem about single heat sink at the center of design domain

原成长法获得的传热通道的分布形态如图 10(a)所示, 迭代历程如图 10(b)所示。传热通道的分布呈“米”字形, 以热沉为圆心, 垂直和竖直方向以及对角线方向都有传热通道存在。在垂直以及竖直方向的传热通道分支各分布有三根平行的传热通道。

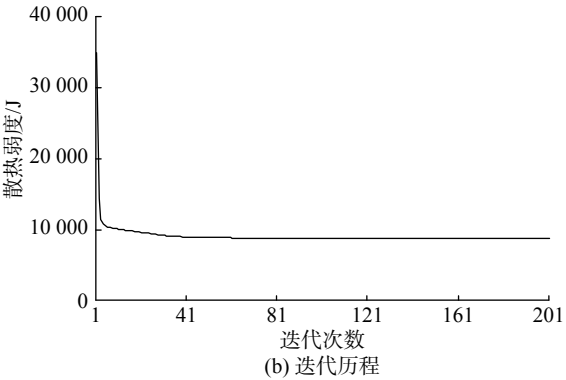
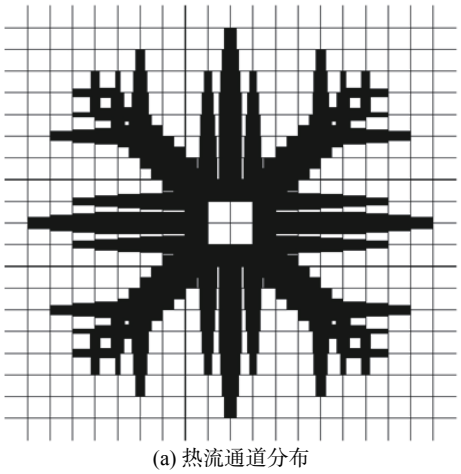


图 10 原成长法设计结果 (2)

Fig.10 Design result of the original adaptive growth method(2)

加入不同敏度过滤的改进成长法得到的传热通道分布形态如图 11(a)，11(b)，11(c)以及 11(d)所示，迭代历程如图 11(e)所示，迭代均收敛。四类敏度过滤下的传热通道分布较为相似，呈“米”字形分布。以热沉为圆心，垂直和竖直方向以及对角线方向都有传热通道存在。加入 Density 过滤得到的传热通道分布中的平行通道数量最少，没有出现大量长分支，且分布清晰、边界不模糊。其余结果中均有较多平行通道。由图 11(e)迭代历程发现，Density 过滤取得的散热弱度比其他过滤方法及原成长法更小。Density 过滤取得的散热弱度为 8 080，而原成长法散热弱度则为 8 778。

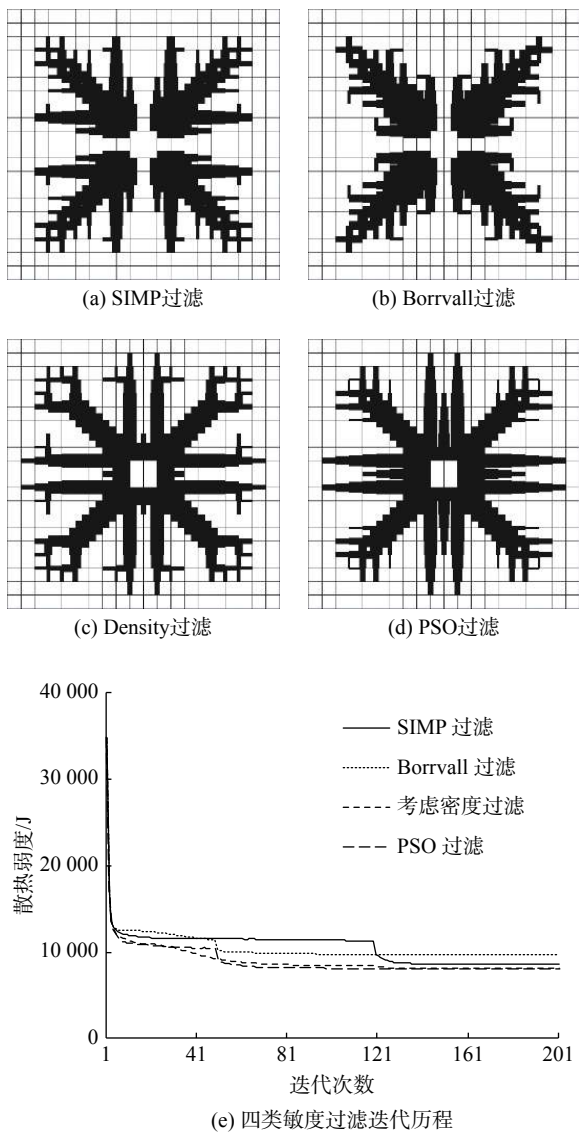


图 11 改进成长法设计结果 (2)
Fig.11 Design result of the improved adaptive growth method(2)

三类温度性能对比如图 12 所示，改进成长法得到的三类温度性能大部分优于原成长法的三类温度性能。其中，加入 Density 过滤的改进成长法得到的三类温度性能最低，分别为 26，13 和 5.9℃，比无过滤情况分别降低了 13%，7.1% 和 18%。

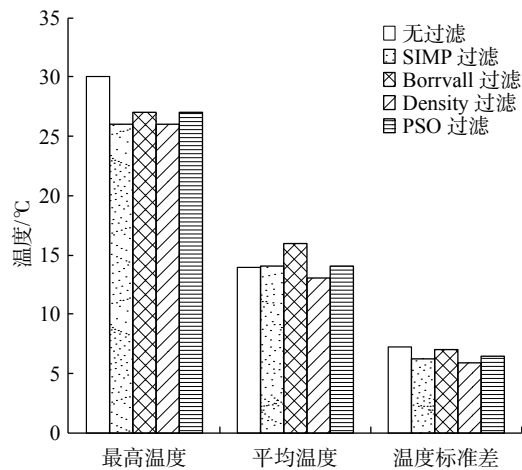


图 12 改进成长法与原成长法设计结果的温度性能对比 (2)
Fig.12 Comparison of temperature performances obtained by the improved adaptive growth method and original adaptive growth method(2)

3.3 底边单点热沉不均匀生热算例

考虑底边单点热沉同时内部不均匀生热的数值算例问题。如图 13 所示，灰色部分表示生热区域，生热率 $\dot{Q}=60\,000\text{ W/m}^3$ ，白色部分表示无生热区域。其余边界条件与参数仍与底边单点热沉算例一致。分别采用两种方法求解该问题。

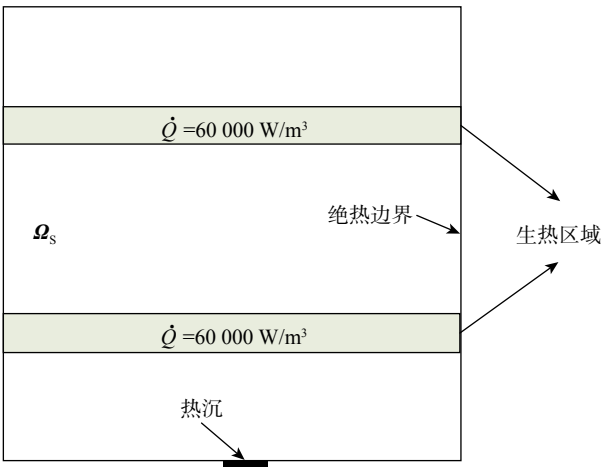


图 13 底边单点热沉不均匀生热模型
Fig.13 Design problem about single heat sink at the bottom of design domain

原成长法得到传热通道分布形态如图 14(a)所示, 迭代收敛情况如图 14(b)所示。获得的传热通道分布形态呈“山”字形, 存在平行传热通道分支与独立传热通道分支。

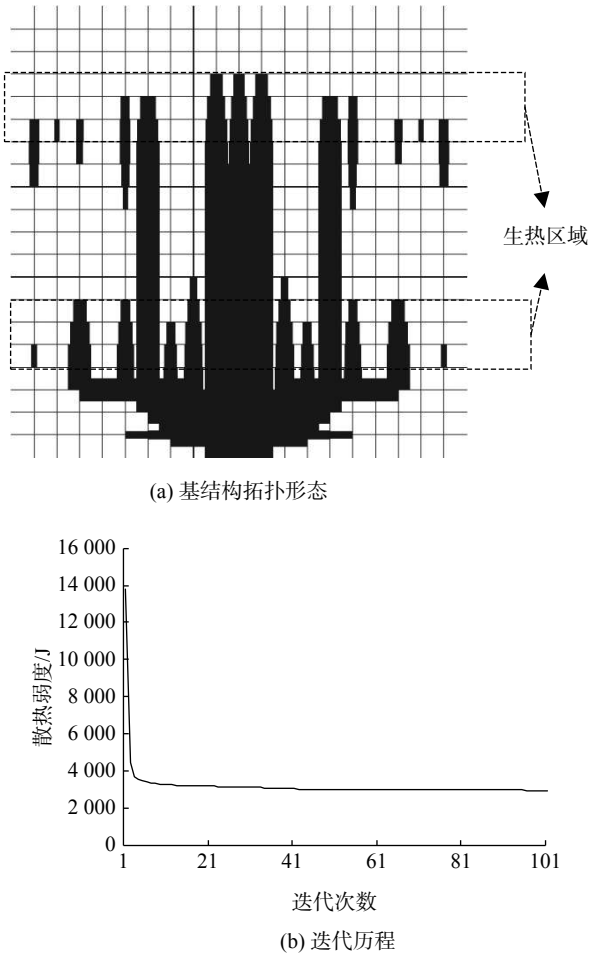


图 14 原成长法设计结果 (3)

Fig.14 Design result of the original adaptive growth method(3)

改进成长法的设计结果如图 15(a), 15(b), 15(c) 以及 15(d) 所示, 迭代历程如图 15(e) 所示。可以发现, 使用不同敏度过滤的改进成长法得到的传热通道分布均较为相似, 大致呈“业”字形。在虚线框处, 即有生热区域均有斜向传热通道分支出现。SIMP 过滤与 Density 得到的结果在传热通道边界处均有一定数量的细小平行通道分支。其中, Density 过滤得到的拓扑形态中虽然仍有一定数量的平行通道, 但与其他 3 种过滤方法相比, 图 15(c) 中平行通道最少。其他方法中平行通道较多且存在独立分支。由图 15(e) 迭代历程发现, Density 过滤取得的散热弱度最小。Density 过滤取得的散热弱度为 2 398, 而原成长法散热弱

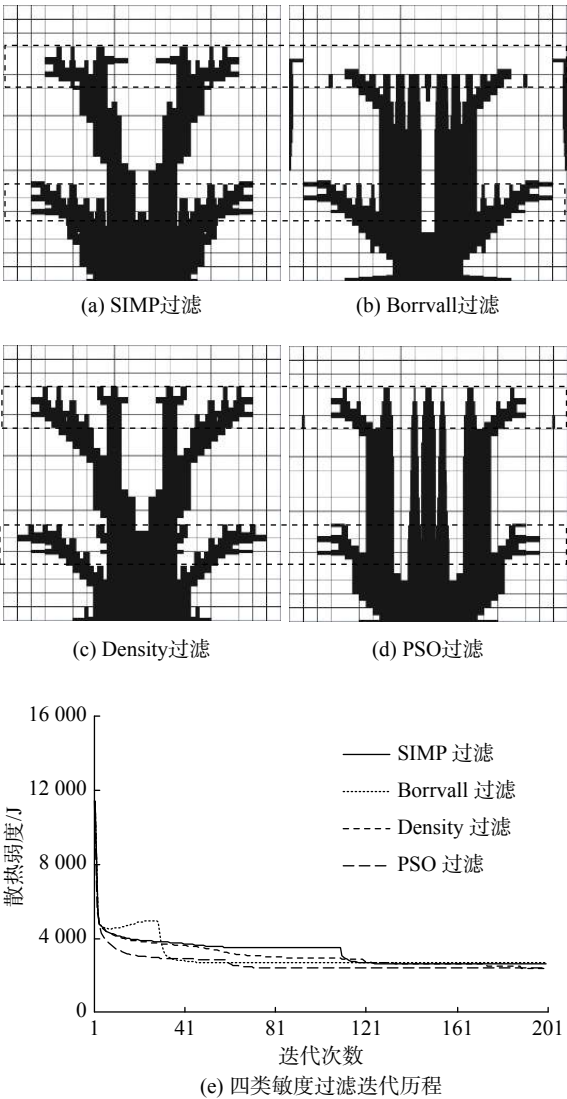


图 15 改进成长法设计结果 (3)

Fig.15 Design result of the improved adaptive growth method(3)

度则为 2 969。

改进成长法的三类温度性能与原成长法对比如图 16 所示, 均优于原成长法设计结果。其中, 加入 Density 过滤的改进成长法的设计结果的温度性能最佳, 分别为 21, 13 和 5.1℃, 比无过滤情况分别降低了 22%, 13% 和 12%。

3.4 讨论

在以上 3 个数值算例中, 加入 Density 过滤的改进成长法在拓扑形态、目标函数以及温度性能均取得最优的结果, 这是由于在 Density 过滤中引入了密度修正权函数。在传热通道分布内部, 即密度分布较为接近的区域中, Density 过滤与 SIMP 过滤一致。而在分布的边界处, 即密度分布变化较大的区域, 修正权函数能消除密度较大单

元的敏度对密度非常小单元的敏度修改，从而避免边界不断扩散，在 SIMP 过滤与 Borrvall 过滤中均无法避免这一问题。而在 PSO 过滤中，只考虑邻域中最大敏度与最小敏度对当前敏度的影响。因此，在本文研究的 3 个数值算例中，Density 过滤能得到更为合理的传热通道分布，平行通道少且边界清晰。

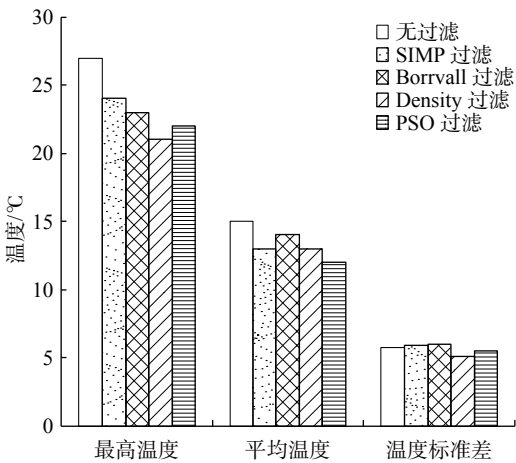


图 16 改进成长法与原成长法设计结果的温度性能对比 (3)

Fig.16 Comparison of temperature performances obtained by the improved adaptive growth method and original adaptive growth method(3)

在 3 个数值算例中，对比了改进成长法与原成长法的设计结果，但未与只使用过滤的原成长法进行对比。为了进一步验证改进成长法，选取加入 Density 过滤的改进成长法与加入 Density 过滤的原成长法，对比分析两者的设计结果，对比数据如表 3 所示。

表 3 改进成长法与原成长法对比

Tab.3 Comparison between the improved adaptive growth method and original adaptive growth method

算例	加入 Density 过滤的方法	最高温度/℃	平均温度/℃	标准差/℃	散热弱度
1	改进成长法	68	42	16	27 055
	原成长法	78	44	18	26 855
2	改进成长法	26	13	5.9	8 080
	原成长法	27	14	6.0	8 304
3	改进成长法	21	13	5.1	2 398
	原成长法	22	13	5.1	2 598

通过表 3 中的数据对比可以发现，加入 Density 过滤的改进成长法与加入 Density 过滤的原成长法在不同算例中不同热性能参数上十分接近，整体而言，改进成长法略优于原成长法。选择第一个

数值算例，对比两种方法的拓扑形态。

图 17(a)为加入 Density 过滤的改进成长法所得拓扑形态，而图 17(b)为加入 Density 过滤的原成长法拓扑形态。两者的拓扑形态十分相似，其中，改进成长法的拓扑形态边界十分清晰，而原成长法的拓扑形态边界非常模糊。

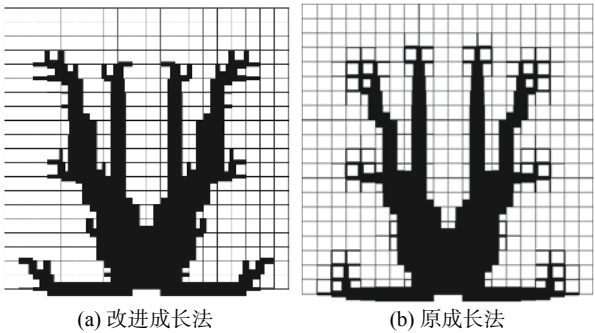


图 17 不同方法拓扑形态

Fig.17 Topology configuration by different methods

4 结 论

- a. 针对传热结构拓扑优化问题中普遍存在的棋盘格现象、无效细小分支过多等问题，在已有的传热结构自适应成长法基础上，提出了加入敏度过滤的两层顺序优化的改进成长法，解决了存在平行通道以及边界不清晰的问题。迭代公式以及敏度过滤有严格的数学推导，设计参数较少，迭代过程收敛性好。
- b. 与原成长法相比，改进成长法可用于各种复杂的热边界条件，尤其是热量不均匀分布情况下均能得到简单规则、对称且边界清晰的传热通道。同时，改进成长法所得到的热性能参数也大部分优于原成长法。此外，值得注意的是，不同边界条件下，加入密度梯度过滤技术的改进成长法得到的设计结果均最优。
- c. 加入 Density 过滤的改进成长法与加入 Density 过滤的原成长法相比，热性能略有改善，拓扑形态更为清晰。

参考文献:

[1] SHABANY Y. Heat transfer: thermal management of electronics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009: 353–355.

[2] GUO K, QI W Z, LIU B T, et al. Optimization of an “area

- to point” heat conduction problem[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 61–71.
- [3] HANNEMANN R. Thermal control of electronics: perspectives and prospects[C]//Proceedings of Rohsenow Symposium on Future Trends in Heat Transfer. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [4] 李庆友, 王文, 周根明. 电子元器件散热方法研究[J]. *电子器件*, 2005, 28(4): 937–941.
- [5] BEJAN A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(4): 799–816.
- [6] BENDSOE M P. *Topology optimization: theory, methods, and applications*[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2004.
- [7] LI Q, STEVEN G P, XIE Y M, et al. Evolutionary topology optimization for temperature reduction of heat conducting fields[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(23): 5071–5083.
- [8] ZHUANG C G, XIONG Z H, DING H. A level set method for topology optimization of heat conduction problem under multiple load cases[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007, 196(4/5/6): 1074–1084.
- [9] DING X H, YAMAZAKI K. Adaptive growth technique of stiffener layout pattern for plate and shell structures to achieve minimum compliance[J]. *Engineering Optimization*, 2005, 37(3): 259–276.
- [10] 魏啸. 传热结构自适应拓扑优化准则法研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2017.
- [11] DING X H, YAMAZAKI K. Constructal design of cooling channel in heat transfer system by utilizing optimality of branch systems in nature[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, 129(3): 245–255.
- [12] 罗震, 陈立平, 黄玉盈, 等. 连续体结构的拓扑优化设计[J]. *力学进展*, 2004, 34(4): 463–476.
- [13] HABER R B, JOG C S, BENDSOE M P. A new approach to variable-topology shape design using a constraint on perimeter[J]. *Structural Optimization*, 1996, 11(1/2): 1–12.
- [14] JOG C S, HABER R B. Stability of finite element models for distributed-parameter optimization and topology design[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, 130(3/4): 203–226.
- [15] 崔天福, 丁晓红, 侯丽园. 基于密度法的传热结构拓扑优化设计[J]. *上海理工大学学报*, 2014, 36(6): 548–555.
- [16] SIGMUND O. On the design of compliant mechanisms using topology optimization[J]. *Mechanics of Structures and Machines*, 1997, 25(4): 493–524.
- [17] STOLPE M, SVANBERG K. An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2001, 22(2): 116–124.
- [18] BORRVALL T, PETERSSON J. Topology optimization using regularized intermediate density control[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, 190(37/38): 4911–4928.
- [19] 杜义贤, 王伟, 李然, 等. 结构拓扑优化中敏度过滤技术研究[J]. *工程设计学报*, 2012, 19(1): 20–24.
- [20] 龙凯, 傅晓锦. 考虑密度梯度的敏度过滤方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2014, 26(4): 669–674.

(编辑: 石 瑛)