

基于耗散极值原理的渐进结构成长方法

宋 宇, 丁晓红

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 目前的传热通道设计普遍使用的是传统密度法, 密度法有一个不被大家重视的问题就是伪密度问题. 因为使用伪密度, 每一个单元导热系数都不是真实存在的, 当将这些单元筛选后, 和真实值存在差异. 针对此问题提出了基于熵耗散极值原理的渐进结构优化方法, 通过比较分析, 采用以生长为主退化为辅的策略, 整体熵耗散在3个不同算例下比密度法筛选后的结果分别小了14%, 24%, 9%, 即先生长后退化的双向渐进结构优化方法在真实情况下是一种比传统密度法更优秀的优化方法.

关键词: 耗散极值; 传热通道; 渐进结构法; 密度法

中图分类号: TH 11 **文献标志码:** A

Evolutionary Structural Optimization Method Based on the Principle of Extremum Entropy Dissipation

SONG Yu, DING Xiaohong

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

Abstract: The variable density method has been mostly adopted in designing cooling channels. However, it still has some major drawbacks. The thermal conductivity of the material, in physical truth, should be a certain value. However, based on the variable density method, this value can vary between the upper and lower bounds (high and low thermal conductivity), hence needs to be manually adjusted. A bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) method based on the principle of extremum entropy dissipation was proposed to enhance the heat transfer efficiency. Three numerical examples were studied and the simulation results reveal that by the extremum entropy dissipation method, it shows the overall entropy dissipation is 14%, 24%, and 9% less than that by the conventional variable density method.

Keywords: entropy dissipation; cooling channel; evolutionary structural optimization; variable density method

收稿日期: 2017-02-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175347)

第一作者: 宋 宇(1988-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 结构优化设计. E-mail: songyu99631@163.com

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

1 研究背景及意义

随着电子元器件集成度的提高,工作时产生的热量急剧增加.小空间大热流密度会使电子元件发生引线疲劳、芯片断裂、键合点腐蚀等破坏,将严重影响使用寿命.将高导热材料布置在高热流密度的电子产品内部,将热量快速导出是解决这类问题的有效途径^[1].

目前的传热通道设计普遍使用的是传统密度法,密度法有一个不被大家重视的问题就是伪密度问题.因为,使用伪密度,每一个单元的导热系数都不是真实存在的,当将这些单元筛选后,同真实值存在差异.

伪密度筛选过滤后,与真实值存在差异的原因如图1所示,图中的数值是单元导热系数的伪密度,截图只是整个分析域中的一小部分.数值0对应低导热材料的导热系数值,数值1对应高导热材料的导热系数值,数值在0~1之间代表导热系数的伪密度,即导热系数在低导热和高导热之间,按伪密度值线性分布.

0.0429	0.0662	0.0930	0.1185	0.1491	0.1901	0.2345	0.2728	0.3001
0.0482	0.0736	0.1055	0.1281	0.1456	0.1703	0.1998	0.2216	0.2292
0.0481	0.0714	0.1100	0.1421	0.1522	0.1539	0.1606	0.1686	0.1674
0.0431	0.0571	0.0893	0.1314	0.1655	0.1687	0.1466	0.1230	0.1133
0.0384	0.0431	0.0599	0.0850	0.1196	0.1636	0.1832	0.1429	0.0780
0.0374	0.0391	0.0445	0.0528	0.0659	0.0822	0.1274	0.1935	0.1496
0.0401	0.0475	0.0482	0.0425	0.0414	0.0486	0.0566	0.0850	0.2372
0.0473	0.0658	0.0698	0.0560	0.0404	0.0332	0.0345	0.0448	0.0572
0.0650	0.0887	0.0983	0.0878	0.0619	0.0427	0.0292	0.0226	0.0336
1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.0388	0.0256	0.0194	0.0121	1	1	1	1	1
0.0278	0.0310	0.0276	1	1	1	1	1	1
0.0458	0.0393	1	1	1	1	0.0392	0.0741	0.0668
0.0519	1	1	1	0.0559	0.1587	0.0596	0.0618	0.1017
1	1	1	0.0725	0.1005	0.1034	0.0690	0.0739	0.1392
1	1	0.0923	0.1127	0.0810	0.0789	0.0701	0.0923	0.1478
1	0.0764	0.1286	0.0827	0.0721	0.0678	0.0721	0.1013	0.1314
0.0621	0.0819	0.0821	0.0722	0.0623	0.0603	0.0726	0.1010	0.1241
0.0276	0.0450	0.0545	0.0564	0.0513	0.0541	0.0706	0.1003	0.1340
0.5111	0.0874	0.0546	0.0467	0.0430	0.0476	0.0661	0.0986	0.1391

图1 单元伪密度

Fig.1 Pseudo density

由于是采用密度法,使伪密度的值逐渐趋于0和1两个极端,为了保证密度矩阵不奇异,所以,并不存在0值.若将其筛选过滤,即将趋近于0的值变为0,将趋近1的值变为1,结果将变差.因为,单元数量多,虽然每个单元都接近于0,但是,当大量接近0的伪密度单元都变为0时,差异就变大了.

可以用一个具体例子来说明,经典的一端热沉均布热源传热结构如图2所示,设计空间是边长为0.1 m的正方形.内部设计域 Ω_d 内存在均匀生热率 Q_1 , $Q_1 = 6 \times 10^4 \text{ W/m}^3$.设计区域四周边界为绝热.在下边界存在 Dirichlet 边界 Γ_T ,边界温度 $T_0 =$

0 °C,边界长度 $L_1 = 0.01 \text{ m}$.低导热材料的导热系数为 $1 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,高导热材料的导热系数为 $400 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,体积约束为30%.

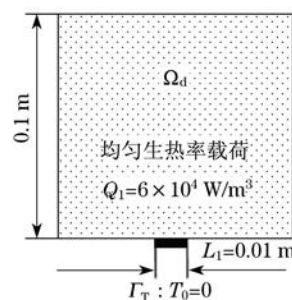


图2 一端热沉均布热源

Fig.2 Uniform heat source with single heat sink

利用 Ansys 编程分析.因为,密度法已经对数据进行了惩罚,密度法结果数据基本都分布在0.7以上和0.3以下,所以,这里将大于0.7的值都过滤为1,其他值过滤为0.如图3所示,未过滤前,最高温度为 $3.42 \text{ }^\circ\text{C}$,算术平均温度为 $2.37 \text{ }^\circ\text{C}$.过滤后,最高温度为 $7.60 \text{ }^\circ\text{C}$,算术平均温度为 $3.22 \text{ }^\circ\text{C}$.

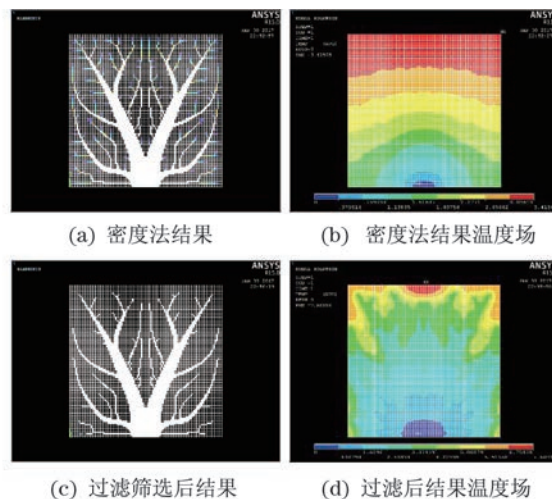


图3 一端热沉密度法分析结果

Fig.3 Topology configuration and temperature distribution using density method with single heat sink

筛选过滤后,最高温度上升了122%,算术平均温度上升了36%.由此可以看出,密度法中的伪密度是一个不可忽视的问题.

2 渐进结构成长法

2.1 概述

根据过增元所提出的焓耗散理论,热量在介质中传递的过程是不可逆的,热流传递过程的热耗散

就是焓耗散^[2]. 传热过程中的焓耗散 Φ 可以表示为^[3]

$$\Phi = -\mathbf{q} \cdot \nabla T = k |\nabla T|^2 \quad (1)$$

式中: ∇T 为温度梯度; k 为导热系数; $\mathbf{q}$ 表示热流密度矢量.

传热计算中单元体的焓耗散可以表示为^[4-7]

$$\Phi_{m,n} = -\mathbf{q}_{m,n} \cdot \nabla T_{m,n} = k_{m,n} |\nabla T|_{m,n}^2 \quad (2)$$

式中: m, n 表示单元节点坐标; $k_{m,n}$ 为单元的材料导热系数.

对于某一固定的传热过程, 焓耗散值最小时, 传热过程热量损失最小, 传热效率最高, 这就是焓耗散极值原理^[8].

过增元提出的焓耗散极值理论可以简单理解为: 在设计区域、热源及边界条件都相同时, 整体的焓耗散越小, 热流的损失越小, 传热效率越高.

在设计区域、热源及边界条件都相同时, 只要找到使整体的焓耗散最小的结构, 也就找到了传热效率最高的结构. 因此, 以下数学模型都以整体的焓散值最小为目标. 为了达到这个目标值, 本文采用了双向渐进结构法^[9-10]. 双向渐进结构法有退化和生长2个方向, 因此, 也就有以退化为主和生长为主2种方式. 本文将依次介绍2种方法. 并针对3种不同的算例, 分别用2种方法进行分析.

通过对计算结果进行比较, 分析以整体的焓耗散值最小为目标时2种方法的优劣, 也就是生长机制和退化机制的优劣. 最终确定渐进结构法的成长机制, 并与密度法相比较, 得出结论.

2.2 退化为主的双向渐进结构法

退化为主的渐进结构成长法数学模型可以描述为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find: } k_{m,n} = k_p \text{ or } k_0 \\ \text{min: } \Delta J \\ \text{s.t. } J = \sum k_{m,n} |\nabla T|_{m,n}^2 \\ \nabla(k_{m,n} \nabla T) + Q = 0 \text{ or } \Omega_s \quad (3) \\ T = 0 \text{ or } \Gamma_D \\ -k_{m,n} \nabla T = 0 \text{ or } \Gamma_N \\ \int_{\Omega_s} k_p d\Omega = \Phi \Omega \end{array} \right.$$

式中: k_p 为高导热材料的异热系数; k_0 为低导热材料的异热系数; J 为焓耗散; Q 为设计区域内的生热率; Ω_s 为设计区域; Γ_D 为设计区域的热沉; Γ_N 为设计区域的非热沉边界; Ω 为设计区域面积; Φ 为材料体积分.

这个数学模型所表达的意思是: 在满足导热微

分方程和各种边界条件下, 基于焓耗散极值原理, 不断地将高导热材料中焓耗散最小的单元更替为低导热材料, 最终寻找到整体焓耗散变化最小的结构. 因为, 每次更替的都是对整体传热贡献最小的单元, 所以, 整体焓耗散升高最小, 即整体的焓耗散值变化最小. 这就保证了更替这些单元相对于更替同样多其他单元的情况下整体的焓耗散值是最小的.

先退化后生长的双向渐进结构优化法优化流程如图4所示.

- 按照要求建立几何模型, 将设计区域内所有材料赋予高导热材料, 并设定热边界条件.
- 在 Ansys 中对全局进行热分析, 计算出每个单元的节点温度, 获得温度云图, 将温度数据导入 Matlab 中.
- 在 Matlab 中, 根据节点温度计算单元的温度梯度, 得到每个单元的节点温度梯度, 获得温度梯度云图.
- 计算每个单元的焓耗散.
- 按照设定的退化率, 将焓耗散最小的单元更替为低导热材料.
- 对全局进行热分析, 重复 b—e 的步骤, 直到计域中低导热结构的体积达到生长起始条件.
- 开启生长模块, 此时, 每次生长迭代之后都进行一次生长迭代, 所谓的生长就是从单元中寻找焓耗散最大的单元更替为低导热材料.
- 按照整体焓耗散值的变化率和体积分数判定是否收敛, 如果整体焓耗散值基本不变, 根据焓耗散极值原理, 说明结构的传热性能基本不变, 则循环结束.

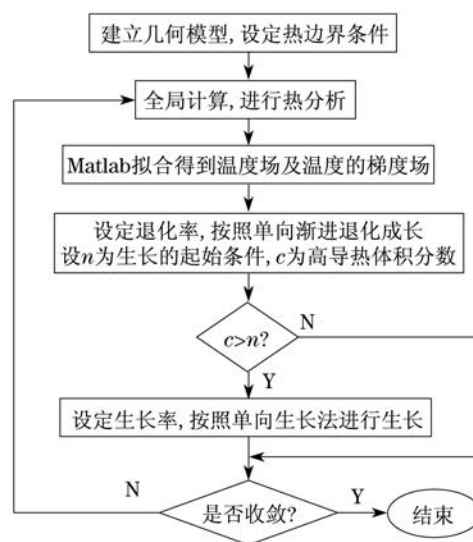


图4 优化流程(1)

Fig.4 Optimization process (1)

2.3 生长为主的双向渐进结构法

数学模型可以描述为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find: } k_{m,n} = k_p \text{ or } k_0 \\ \text{min: } J = \sum k_{m,n} |\nabla T|_{m,n}^2 \\ \text{s.t. } \nabla(k_{m,n} \nabla T) + Q = 0 \text{ or } \Omega_s \\ T = 0 \text{ or } \Gamma_D \\ -k_{m,n} \nabla T = 0 \text{ or } \Gamma_N \\ \int_{\Omega_s} k_p d\Omega = \Phi\Omega \end{array} \right. \quad (4)$$

这个数学模型所表达的意思是:在满足导热微分方程和各种边界条件下,基于熵耗散极值原理不断地改变单元的导热系数,最终寻找到整体熵耗散最小的结构。

优化流程如图5所示。

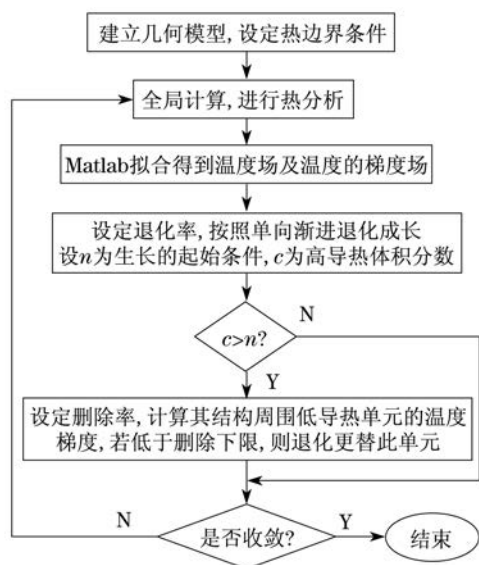


图5 优化流程(2)

Fig.5 Optimization Process (2)

a. 按照要求建立几何模型,将设计区域内所有材料赋予低导热材料,并设定热边界条件。

b. 在Ansys中,对全局进行热分析,计算出每个单元的节点温度,获得温度云图,将温度数据导入Matlab中。

c. 在Matlab中,根据节点温度计算单元的温度梯度,得到每个单元的节点温度梯度,获得温度梯度云图。

d. 计算每个单元的熵耗散。

e. 按照设定的进化率,将熵耗散最大的单元更替为高导热材料。

f. 对全局进行热分析,重复步骤b—e,直到计域中高导热结构的体积达到退化起始条件。

g. 开启退化模块,此时,每次生长迭代之后都进行一次退化迭代,所谓的退化就是寻找结构体四周的边界单元,从单元中寻找熵耗散最小的单元更替为低导热材料。

h. 按照整体熵耗散值的变化率和体积分数判定是否收敛,如果整体熵耗散值基本不变,根据过增元的熵耗散极值原理,说明结构的传热性能基本不变,则循环结束。

3 数值算例

对图2,6,7这3个算例,用不同的方法进行分析。

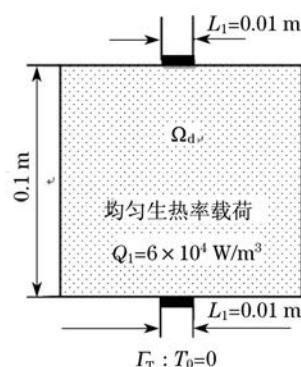


图6 两端对称热沉均布热源

Fig.6 Uniform heat source with two symmetric heat sinks

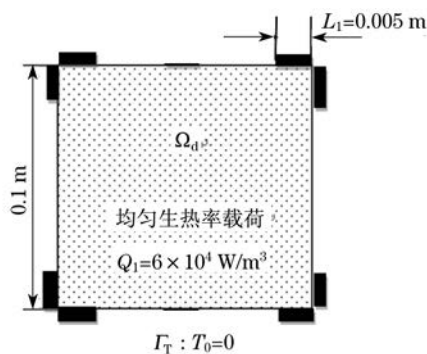


图7 四角热沉均布热源

Fig.7 Uniform heat source with four corner heat sinks

用密度法对图6和图7进行优化,结果如图8和图9所示(见下页)。

利用以退化为主的渐进结构成长法对图2,6,7进行优化,所得结果如图10~12所示(见下页)。

利用以生长为主的渐进结构成长法对图2,6,7进行优化,所得结果如图13~15所示(见下页)。

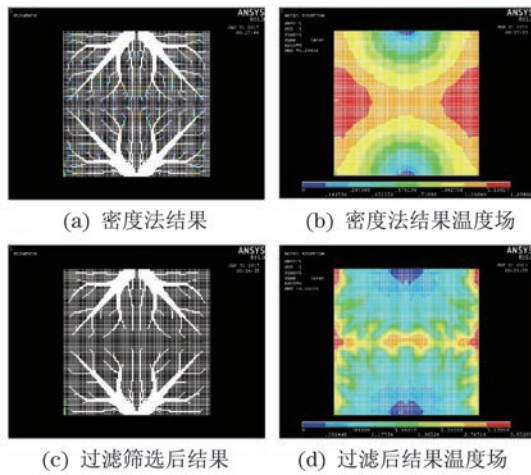


图8 两端对称热沉密度法分析结果

Fig.8 Topology configuration and temperature distribution using the density method with two symmetric heat sinks

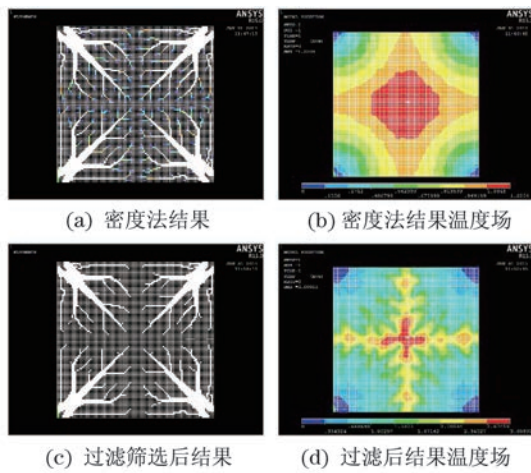


图9 四角热沉密度法分析结果

Fig.9 Topology configuration and temperature distribution using the density method with four corner heat sinks

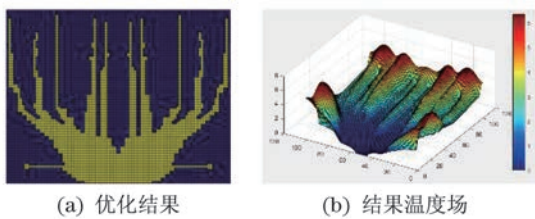


图10 一端热沉结构分析结果(1)

Fig.10 Topology configuration and temperature distribution using the degeneration dominated BESO with single heat sink (1)

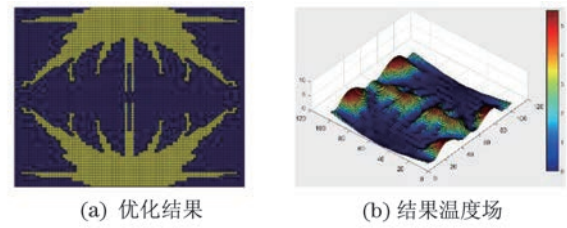


图11 两端热沉结构分析结果(1)

Fig.11 Topology configuration and temperature distribution using the degeneration dominated BESO with two symmetric heat sinks (1)

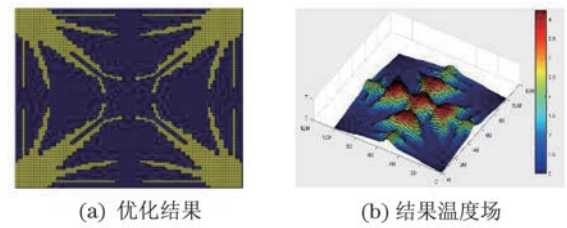


图12 四角热沉结构分析结果(1)

Fig.12 Topology configuration and temperature distribution using the degeneration dominated BESO with four corner heat sinks (1)

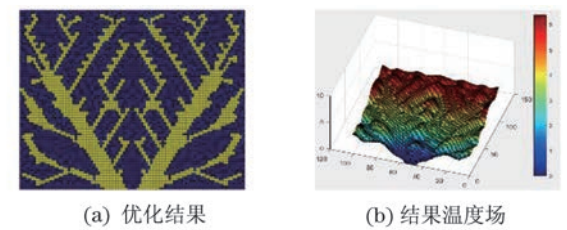


图13 一端热沉结构分析结果(2)

Fig.13 Topology configuration and temperature distribution using the generation dominated BESO with single heat sink (2)

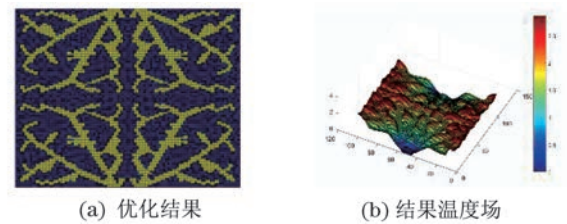


图14 两端热沉结构分析结果(2)

Fig.14 Topology configuration and temperature distribution using the generation dominated BESO with two symmetric heat sinks (2)

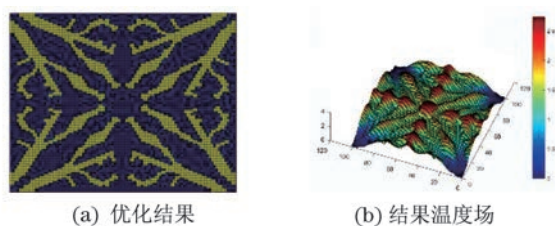


图 15 四角热沉结构分析结果(2)

Fig.15 Topology configuration and temperature distribution using the generation dominated BESO with four corner heat sinks (2)

按照 3 个算例分类,将所有优化数据整合到表 1~3 中.

表 1 一端热沉均布热源算例

Tab.1 Calculation example of the uniform heatsource with single heat sink

方法	N	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$J/(\text{W}\cdot\text{K}\cdot\text{m}^{-1})$
1	140	3.42	2.37	749
2	140	7.60	3.22	2 519
3	83	7.60	3.04	3 523
4	59	6.40	3.93	2 160

表 2 两端热沉均布热源算例

Tab.2 Calculation example of the uniform heat source with two symmetric heat sinks

方法	N	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$J/(\text{W}\cdot\text{K}\cdot\text{m}^{-1})$
1	164	1.29	0.93	283
2	164	3.53	1.45	1 828
3	69	5.52	1.73	2 785
4	56	1.88	2.87	1 395

表 3 四角热沉均布热源算例

Tab.3 Calculation example of the uniform heat source with four corner heat sinks

方法	N	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	$J/(\text{W}\cdot\text{K}\cdot\text{m}^{-1})$
1	223	1.22	3.01	262
2	223	0.86	1.28	1 623
3	69	5.52	1.73	2 785
4	30	2.74	1.42	1 476

N 代表迭代次数, T_1 代表最高温度, T_2 代表平均温度, J 代表整体焓耗散.

方法 1 代表传统密度法,方法 2 代表经过过滤处理后的密度法,方法 3 代表先退化双向渐进结构优化法,方法 4 代表先生长双向渐进结构优化法.

综合 3 个表中的数据来看,密度法迭代次数最

高,是其他两种方法的 2~7 倍,可以看出,密度法迭代计算效率最低.

生长为主的双向渐进结构优化法比退化为主的双向渐进结构优化法,在迭代次数上低 19%~57%,在整体焓耗散上低 39%~50%,由此发现,在基于焓耗散极值原理优化时,其成长机制在寻优能力上优于退化机制.

4 结 论

通过对不同策略的渐进结构优化法进行研究,发现在基于焓耗散极值原理优化时,成长机制在寻优能力上优于退化机制.通过 3 个算例结果进行比较分析,整体焓耗散在 3 个不同算例下比密度法筛选后的结果分别小了 14%,24%,9%,在真实情况下,用以生长为主的双向渐进结构优化法进行优化设计,其结果的传热能力比传统密度法更优秀.

参考文献:

- [1] 荣见华,谢忆民,姜节胜,等.渐进结构优化设计的现状与进展[J].长沙交通学院学报,2001,17(3):17-23.
- [2] HUANG X D, XIE Y M. A further review of ESO type methods for topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 41(5): 671-683.
- [3] 谢忆民,黄晓东.渐进结构优化法(ESO)和双向渐进结构优化法(BESO)的近期发展[J].力学进展,2011, 41(4):462-471.
- [4] 韩光泽,过增元.导热能力损耗的机理及其数学表述[J].中国电机工程学报,2007,27(17):98-102.
- [5] 过增元,程新广,夏再忠.最小热量传递势容耗散原理及其在导热优化中的应用[J].科学通报,2003, 48(1):21-25.
- [6] 过增元,梁新刚,朱宏晔.焓——描述物体传递热量能力的物理量[J].自然科学进展,2006, 16(10): 1288-1296.
- [7] 闻讯,杜文静,刘宁,等.最小热阻原理在典型导热优化中的应用[C]//2012 年中国工程热物理学会论文集.哈尔滨:中国工程热物理学会,2012:31-35.
- [8] 程新广,夏再忠,李志信,等.导热优化:热耗散与最优导热系数场[J].工程热物理学报,2002, 23(6): 715-717.
- [9] 程新广,李志信,过增元.热传导中的变分原理[J].工程热物理学报,2004,25(3):457-459.
- [10] 朱宏晔,陈泽敬,过增元.焓耗散极值原理的电热模拟实验研究[J].自然科学进展,2007, 17(12): 1692-1698.

(编辑:石 瑛)