

基于最小热量传递势容耗散 原理的导热优化

程新广 李志信 过增元

(清华大学工程力学系传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要 导热是一个不可逆过程, 它的优化遵循最小热量传递势容耗散原理。本文根据该原理, 对体点问题中的高导热材料布置进行了优化。当域内导热系数的积分为定值时, 最小热量传递势容耗散对应于导热系数与当地热流成正比, 即全场的温度梯度均匀。以温度梯度均匀化为准则, 利用仿生优化方法得到了域内有均匀和非均匀热源时高导热材料的最优布置。

关键词 导热优化; 最小热量传递势容耗散原理; 仿生优化

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2003)01-0094-03

HEAT CONDUCTION OPTIMIZATION BASED ON LEAST DISSIPATION PRINCIPLE OF HEAT TRANSPORT POTENTIAL CAPACITY

CHENG Xin-Guang LI Zhi-Xin GUO Zeng-Yuan

(Department of Engineering Mechanics, Education Ministry Key Lab of Enhanced Heat Transfer
and Energy Conservation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Heat conduction is an irreversible process, and its optimization follows the least dissipation principle of heat transport potential capacity. Based on this principle, the arrangement of high conductivity material in volume-to-point problem is optimized. For a given integration of thermal conductivity over the volume, the least dissipation of heat transport potential capacity corresponds to conductivity being proportional to local heat flux, that is, the temperature gradient field is uniform. According to the uniformity principle of temperature gradient, the high conductivity material constructs are optimized by bionic optimization method.

Key words heat conduction optimization; least dissipation principle of heat transport potential capacity; bionic optimization

1 引 言

随着集成度的不断提高, 微电子器件、生物芯片和微机械等微器件的散热问题受到越来越多的关注。体点问题是其中的一个基础问题, 它指的是如何将特定空间(“体”)内的发热量以传导方式高效地传到器件表面的某一指定位置(“点”)。它的解决方法之一是填充高导热材料构成高效导热通道以减小导热热阻, 从而达到增强散热的目的^[1]。合理的高

导热材料结构可以减少所使用的材料, 降低制造成本, 并且有利于器件的进一步微型化, 因此需要对高导热材料分布进行优化。

优化需要一个评判准则, 而通常采用的热阻最小化判据对于一维导热等简单问题虽有其比较直观的优点, 但缺乏普遍适用性。这是因为对于体点问题以及其他多维问题和复杂传热条件的情况下, 计算热阻所需温差的定义具有很大任意性, 它必然带来导热过程性能判别的不确定性。另外从热力学角

收稿日期: 2002-11-02; 修订日期: 2002-12-03

基金项目: 国家重大基础研究发展规划资助项目 (No.G2000026301)

作者简介: 程新广 (1977-), 男, 浙江永康人, 博士生, 主要从事传热强化与控制的研究。

度看, 热量传递是一种不可逆过程, 属于非平衡热力学范畴。已有的最小熵产原理^[2]和最小能量耗散原理^[3,4]是基于对做功能力的优化而言的, 对于传热过程, 杨东华^[5]从熵产角度去讨论导热过程, 认为由傅立叶形式热传导方程构成的泛函及其变分原理没有明确的物理意义。

过增元^[6]基于热量传递现象的本质, 从传热学的角度定义了热量传递势容和热量传递势容耗散函数, 针对以提高导热效率为目标函数的导热过程优化, 提出了最小热量传递势容耗散原理。本文根据最小热量传递势容耗散原理对体点问题中的高导热材料分布进行了优化。

2 最小热量传递势容耗散原理^[6]

热量传递是一种不可逆过程, 定义热量传递势容为:

$$Z_{tr} = \frac{1}{2}QT = \frac{1}{2}Mc_pT^2 \quad (1)$$

它的量纲是焦耳·开尔文(J·K), 它代表了该物体向周围介质导热的能力。其中 M, c_p 是介质质量和比热。随着热量 Q 从高温传向低温, 热量传递势容必然耗散, 即热量传递能力的降低。定义:

$$\psi = \frac{1}{2}k(\nabla T)^2 = \frac{1}{2}\frac{q^2}{k} \quad (2)$$

为热量传递势容耗散函数, 它的量纲为焦耳·开尔文·米⁻³秒⁻¹(J·K·m⁻³·s⁻¹), 其物理意义是导热过程中单位体积单位时间内热量传递势容的耗散(损失)。这样, 某一导热过程的热量传递势容的耗散(不可逆损失)就应等于热量传递耗散函数在空间和时间上的积分:

$$Z_{dis} = \int_{\Omega, t} \psi d\Omega dt \quad (3)$$

则有最小热量传递势耗散原理为: 具有约束条件的热量传递过程, 当其热量传递势容耗散为最小时, 热量传递效率最高。

3 高导热材料分布的优化

体点问题中高导热材料的最优布置可以等价于: 对任意形状的导热区域, 在内部发热量一定(或边界上传热量一定)以及全场的导热系数的积分为定值的条件下, 寻求导热系数在全场的最优分布。

根据最小热量传递势容耗散原理, 则问题为: 已知 $\int_{\Omega} k d\Omega = \text{Const}$, 求 $k(x, y, z)$, 使传热量 Q 一定时, $\delta Z_{dis} = 0$ 。变分求解的结果为^[7]:

$$k = Cq, \quad \text{即} \quad \nabla T = \text{Const} \quad (4)$$

这表明最佳的导热系数分布应与当地热流密度成正比, 此时的传热量最大。还可以注意到此时区域内的温度梯度为常数, 即全场的温度梯度处处相等。

在实际应用中导热系数分布的变化是通过填充一定量的高导热材料来实现的, 因此导热区域中只有高导热材料与低导热材料两个导热系数值, 即导热系数不能在区域内连续变化。这时最优的高导热材料布置可以通过仿生优化方法求得^[8]。它把高导热材料看作一种“生命体”, “生命体”生存的“自然环境”就是所考虑的物理空间及其特征, 包括几何形状和热边界条件, 内热源大小及其分布, 基体的导热性能等。高导热材料根据进化和退化原则在导热区域中生长, 其中进化选择整个传热空间中温度梯度最大的部位进行, 而退化是淘汰那些承担导热任务最小, 即温度梯度最小部位的高导热材料。而对于体点问题中的高导热材料布置优化, 温度梯度场愈均匀, 热量传递势容耗散愈小, 热量传递效率愈高。而进化和退化过程正是使温度梯度场不断均匀化。

针对均匀内热源的二维体点问题(如图1), 不同的高导热材料与基底材料的导热系数比得到的仿生优化的结果如图2所示。从图中可以发现当导热

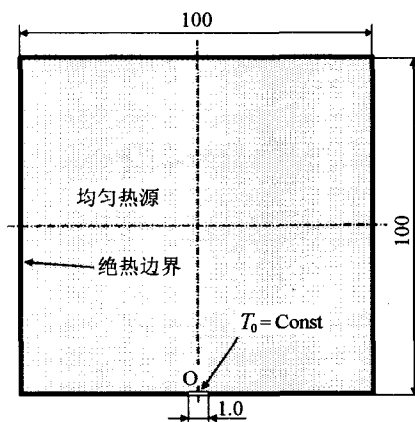
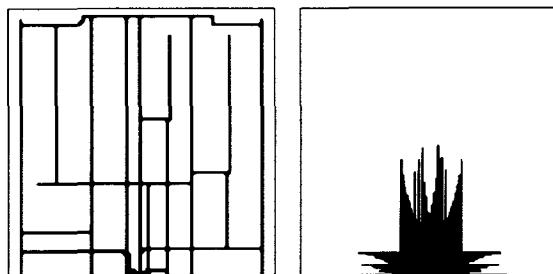


图1 二维体点问题



(a) $\bar{k} = 400$

(b) $\bar{k} = 3$

图2 仿生优化结果(均匀内热源)

系数比较大时,高导热材料在域内的分布比较均匀。随着导热系数比的降低,高导热材料集中在初始温度场中热流密度较大的部位,即热量出口的附近。这是因为当导热系数比很低时,加入的高导热材料对热量传递的影响较少。考虑极限情况,假设区域内的热流密度分布随着高导热材料的插入基本不变,根据傅立叶定律,则把高导热材料布置在热流密度较大的位置,区域内的温度降低最多。

当内热源为非均匀分布时(如图 3(a)),应用仿生优化方法得到了如图 3(b)的高导热材料的分布。高导热材料密集在热源区域内,并且在热源和冷却点间构建了导热快速通道从而使内热源区的热量快速传递到热量出口。

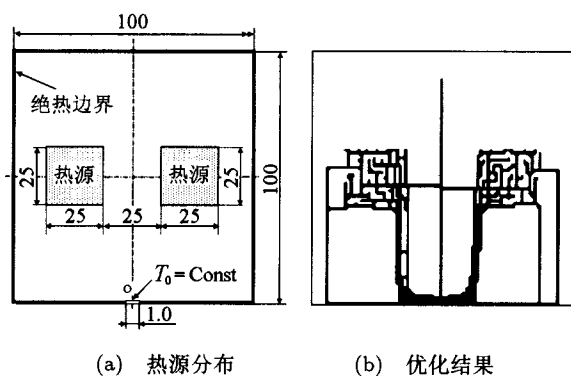


图 3 非均匀内热源分布的仿生优化

4 结 论

(1) 根据最小热量传递势容耗散原理,当域内材

料的导热系数积分为定值时,最小热量传递势容耗散对应于导热系数与当地热流密度成正比,即导热系数的最有分布应使域内温度梯度场均匀。

(2) 对于填充一定量高导热材料的导热优化问题,高导热材料的最优布置可以通过仿生优化方法求得,仿生优化过程遵循温度梯度均匀化原则。

(3) 仿生优化方法适用于不同的导热系数比和非均匀热源分布的复杂情况。

参 考 文 献

- [1] Bejan A. Constructal-theory Network of Conducting Paths for Cooling a Heat Generating Volume. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(4): 799-816
- [2] Prigogine I. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. 3rd edition. New York: Interscience Publishers, a Division of John Wiley & Sons, 1967
- [3] Onsager L. Reciprocal Relations in Irreversible Process II. Physical Review, 1931, 38: 2265-2279
- [4] Onsager L, Machlup S. Fluctuations and Irreversible Processes. Physical Review, 1953, 91(6): 1505-1512
- [5] 杨东华. 不可逆过程热力学原理及工程应用. 北京: 科学出版社, 1989
- [6] 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. 科学通报, 2002, 47(24)
- [7] 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. 工程热物理学报, 2002, 23(6): 715-717
- [8] Xia Z Z, Li Z X, Guo Z Y. Heat Conduction Optimization: High-conductivity Constructs Based on the Principle Biological Evolution. In: Heat transfer 2002, Proceeding of the Twelfth International Heat Transfer Conference. Grenoble, France, 2002. 2: 27-32