

温度场与温度梯度场的均匀化

程雪涛, 徐向华, 梁新刚*

清华大学航天航空学院, 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084

* E-mail: liangxg@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-12-26; 接受日期: 2009-05-05

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2007CB206901)资助项目

摘要 基于模拟退火算法和仿生优化方法, 分别以均匀化温度场和均匀化温度梯度场为目标, 对二维导热问题进行了数值研究, 优化了高导热材料的分布. 研究表明: 这 2 个优化目标之间存在一定的一致性, 而仿生优化方法可以有效的节约计算时间; 此外, 对 2 个优化目标而言, 高导热材料的填充量和导热系数比都存在阈值, 高导热材料的填充量和导热系数比超过阈值后, 其增加对均匀化温度场与均匀化温度梯度场的作用不再明显.

关键词

温度场均匀化
温度梯度场均匀化
仿生优化方法
模拟退火算法

1 引言

由于对热变形量、工作温度等比较敏感, 许多元器件、系统、设备对温度场的均匀性都有较高的要求; 高分辨率望远镜、太阳能光伏电池^[1]等, 都会因为温度场不均匀而使得系统整体性能下降. 在卫星热控系统中, 温度场均匀化设计显得尤其重要. 对于一般的卫星而言, 基于轻量化的设计要求, 需要将功率不用的仪器集成到一块仪器板上, 要使各仪器在较均衡的温度下工作, 就要求温度场有较好的均匀性^[2]. 在微小卫星方面, 整星温度场均匀化设计不仅可以有效避免局部的高温或者低温、增加整星的温度稳定性, 更能降低热控系统对卫星姿态的要求、提高热控系统的适应能力和调节能力; 而且, 由于卫星体积小, 温度场均匀化设计更容易实现, 因而得到了更为广泛的重视^[3].

除了对温度场均匀性的要求, 随着微电子和微机械系统(MEMS)的发展, 元器件、系统、设备的体积越来越小, 其散热问题也日益突出, 如何对其进行传热优化设计也成为了亟待解决的问题^[4].

为同时解决上述 2 类问题, 目前人们主要采用填充高导热材料、预埋和外贴热管等技术方法^[3,4]. 这些方法在本质上可以等效为提高系统局部的传热能力, 以达到改善整个温度场均匀性和降低平均温度的目的.

由于成本和轻量化的设计要求, 只能采用有限的高导热材料或热管来改善温度场的均匀性和降低平均温度, 在航天领域尤其是如此. 因此, 在降低平均温度方面, “体点问题”就成为了一个基本的物理问题, 近年来得到了较多的研究. Bejan^[5]提出的构型理论, 为该问题提供了较好的优化方法, 有效的降低区域平均温度; 程新广等人^[4,6-9]根据过增元提出的热学新物理量“火积”, 以夏再忠等人提出的仿生优化方法(遵循温度梯度场均匀化原则)研究了该问题, 结果表明仿生优化方法可以有效的搭建起高效的导热通道, 达到优化传热的目的, 其结果优于构型理论的结果; 徐向华等人^[10]采用模拟退火算法、遗传算法、仿生优化算法、构型理论对该问题进行了对比研究, 发现模拟退火算法与遗传算法得到的优化结果优于仿

生优化算法的结果, 也优于构型理论的结果, 但计算时间较长. 综合考虑计算时间等方面的限制, 在降低平均温度方面, 以均匀化温度梯度场为目标的仿生优化算法是一个可以较快得到较优结果的优化方法. 在如何对高导热材料或者热管进行分配布置、以求最大限度改善温度场均匀性方面, 研究人员所做的理论研究工作还比较有限, 目前尚没有提出有效的布置准则.

本文以温度均方差作为衡量温度场均匀性的因子, 以最佳的温度场均匀性作为优化目标, 采用模拟退火算法^[10]对二维导热问题中高导热材料的优化布置问题进行计算; 采用仿生优化方法, 以温度梯度场均匀化为目标对同一物理问题的高导热材料进行优化布置. 针对 2 种优化目标所得到的结果进行分析讨论, 以研究温度场均匀性与温度梯度场均匀性之间的关系, 进而为改善温度场均匀性方面寻找有效的优化方法.

2 物理模型

考虑如图 1 所示的正方形区域, 其中有内热源 \dot{Q} , E, W, S, N 代表东、西、南、北 4 个边界. 考虑到实际应用中, “体”的散热区域一般不是“点”, 比如电子器件等, 而是依靠其边界进行散热; 因此, 在下面的讨论中不再研究“体点问题”, 而研究“体边问题”. 对于该区域, 有 2 个不同的优化目标, 即降低区域温度和提高温度的均匀性. 如上所述, 可以采用预埋或者外贴热管、填充高导热材料的方法对区域进行优化, 以达到上述目标. 考虑到预埋或者外贴热管的方法, 也相当于在热管所在区域内填充了导热系数很高的材料, 因此可以只研究填充高导热材料的问题.

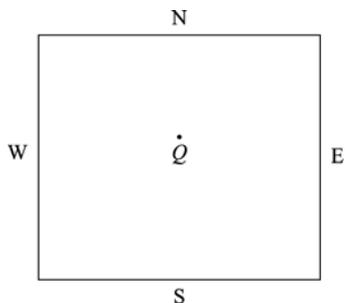


图 1 物理模型示意图

对于区域温度场, 以温度均方差衡量其均匀性, 有

$$f = \sqrt{\iint (T - T_a)^2 dx dy} / A, \quad (1)$$

其中, f 为温度均匀性因子, T 为区域内任意点温度, A 为区域面积, T_a 为区域平均温度, 其计算式为

$$T_a = \iint T dx dy / A, \quad (2)$$

可见, f 越小越接近 0, 则表示温度场越均匀.

对于传热过程的优化, 过增元等人^[9]基于热量传递现象的本质, 定义了描述物体热量传递能力的新物理量——焐, 并提出了焐积耗散极值原理. 具体到本文涉及的物理问题, 在区域内导热系数积分为定值时, 该原理即要求: 导热系数的分布应使得温度梯度场最均匀, 焐积耗散最小. 因此, 可以用焐积耗散的大小来衡量传热过程的优化程度, 具体表达式如下

$$Z_{dis} = \iint k |\nabla T|^2 dA, \quad (3)$$

其中, Z_{dis} 表示热量传递过程中的焐积耗散, k 为热导率, ∇T 为温度梯度. 焐积耗散越小, 则温度梯度场越均匀, 给定区域的温度也越低, 因而传热优化程度就越高.

3 高导热材料在不同情况下的布置结果

假定有占面积百分比为 p 的高导热材料在区域内进行填充布置, 设高低导热系数比为 r . 在计算中取高低导热系数比 $r=100$, $p=10\%$. 为减小计算量, 取正方形区域边长为 0.3 m.

分以下 3 种工况进行计算: (I) 内热源均匀, $\dot{Q}=100 \text{ W/m}^3$, 取 E, W, S, N 边界均为等温边界且边界温度为 300 K; (II) 内热源均匀, $\dot{Q}=100 \text{ W/m}^3$, 取 E, W, N 三个边界取为绝热边界, S 边界取为 300 K 等温边界; (III) 内热源不均匀, 如图 2 和 3 所示, 粗线方框内为 $\dot{Q}=1000 \text{ W/m}^3$, 其他区域 $\dot{Q}=100 \text{ W/m}^3$, 4 边为 300 K 等温边界. 这 3 种工况下, 分别用模拟退火的数值算法^[10]和仿生优化的数值算法^[6]对温度场和温度梯度场进行均匀化. 在模拟退火算法中, 直接以温度均匀性因子最小为计算目标; 为得到更具有确定性的解, 采用多次回火过程扩大搜索量, 最终得到高导热材料的分布, 其计算结果如图 2 所示. 该算法在搜索大量随机解的基础上寻找最优解, 因而其结果有一

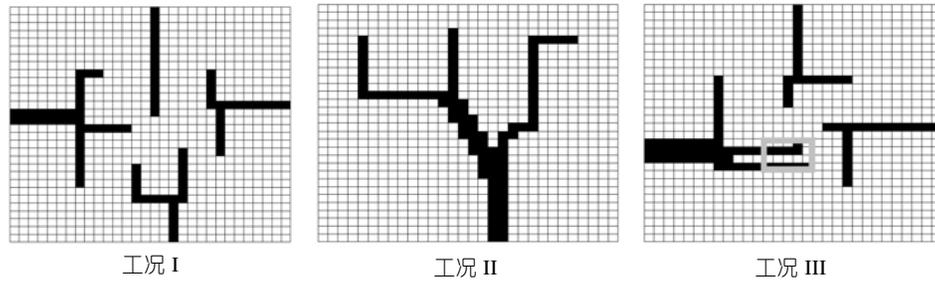


图 2 均匀化温度场的优化结果

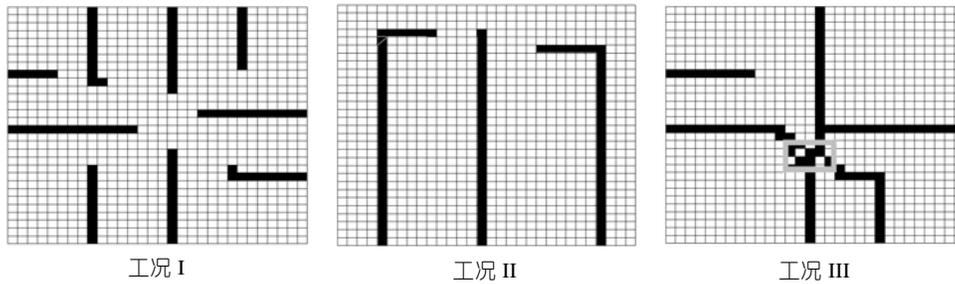


图 3 均匀化温度梯度场的优化结果

定的不确定性; 一般而言, 随机解取样越大, 则不确定性越小. 仿生优化算法则通过其进化与退化准则, 逐步演化以实现温度梯度场的均匀化^[4], 其优化结果如图 3 所示. 仿生优化算法由于具有明确的计算准则, 其计算结果是确定的.

计算了三边等温一边绝热、两边绝热两边等温等工况. 综合而言, 不论是均匀化温度场还是均匀化温度梯度场, 都可以发现高导热材料的分布具有以下特征.

1) 类似文献^[4], 有高导热材料的形状主要为细长矩形, 主要沿水平或者竖直方向布置.

2) 高导热材料的生长方向大致都指向温度梯度较大的方向: 以工况 I 为例, 高导热材料基本都从低温边界指向区域中心; 在工况 III 中, 高导热材料基本都从低温边界指向高内热源区域.

3) 计算工况都具有对称性, 但高导热材料的分布结果不具有对称性. 在仿生优化算法的计算过程中, 高导热材料的填充是逐个网格进行的, 填充完毕之后再继续进行进化和退化; 因而在填充第 1 个网格的高导热材料后, 问题的对称性已被破坏, 不能得到对称的分布结果. 模拟退火算法则是在搜索大量随机解的基础上寻找最优解, 在有限的计算时间里, 其计算结

果一般与最优解非常接近, 但仍不是最优解, 因而不能得到对称的分布也是合理的.

在第 1、第 2 个特点上, 均匀化温度梯度场的优化结果表现得更显著, 这更便于根据其分布结果进行人工规整, 从而构造出便于实施的分布结构^[4]. 而且, 以预埋或者外贴热管为例, 由于热管基本都为细长条状, 均匀化温度梯度场的优化结果也更有利于热管的布置应用.

4 两个优化目标之间的关系

温度场均匀化与温度梯度场均匀化是有所不同的. 以一维温度场为例, 如图 4 所示的 2 种温度分布, 实线所示的分布中, 温度梯度场是均匀的, 但温度场则不均匀; 虚线所示的温度梯度场是不均匀的, 但用 (1) 式去衡量, 其温度场则要比实线所示的温度场均匀. 这是因为温度梯度场的均匀性强调的是温度变化速度的大小, 而温度场的均匀性关注的则是温度本身.

换一个角度看, 温度梯度场的均匀化与温度场的均匀化之间也有一定的一致性. 在本文所讨论的问题中, 区域内高导热材料的填充, 本质上减小了当地的温度梯度, 即减缓了温度的变化, 从而起到均匀

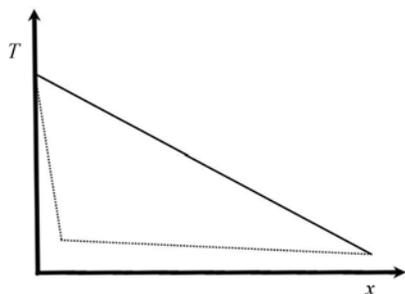


图 4 一维温度场示意图

化温度场的作用. 仿生优化方法^[7]要求将高导热材料布置在全场温度梯度最大处, 而后高导热材料依据进化与退化准则在区域内生长, 其中进化选择区域内温度梯度最大的部位, 退化则淘汰温度梯度最小的部位. 显然, “进化”过程降低了高温温度梯度, “退化”过程则提高了低温温度梯度, 如此即实现了温度梯度场的均匀化. 因此, 仿生优化方法的“进化”过程减小了最大的温度变化, 而“退化”过程则增加了最小的温度变化; 整体来看, 这可以使温度场更均匀. 反过来, 温度场的均匀化, 也将使得温度分布的变化减小, 这也能促进温度梯度场的均匀化. 在理想情况下, 如果温度场完全均匀, 即全场无温差, 此时全场温度梯度也等于 0, 温度梯度场也完全均匀, 两者在此时完全一致.

因此, 对本文所讨论的物理问题, 均匀化温度场与均匀化温度梯度场具有一定的一致性. 下面以(1)和(3)式作为判断指标, 对 2 个目标的一致性进行探讨. 首先对工况 I 进行计算, 取不同的导热系数比 r 、不同 p 值, 分别按照 2 个均匀化目标计算得到相应的高导热材料分布, 计算正方形区域内的积热耗散和温度均匀性因子, 计算结果如图 5 和 6 所示, 其中 BO 表示仿生优化方法均匀化温度梯度场的计算结果, SA 表示模拟退火方法均匀化温度场的计算结果(下同).

从图 5 可见, 以温度场均匀化为优化目标, 也有有效的降低了传热过程的积热耗散, 有效的促进了温度梯度场的均匀化. 而且, 随着高导热材料所占面积百分比的增加, 这种现象表现得更加突出. 从图 6 可见, 以温度梯度场均匀化为优化目标, 更是非常有效的降低了温度场均匀性因子, 促进了温度场的均匀化. 在计算中 p 的值取到了 50%, 计算结果仍然满足上述

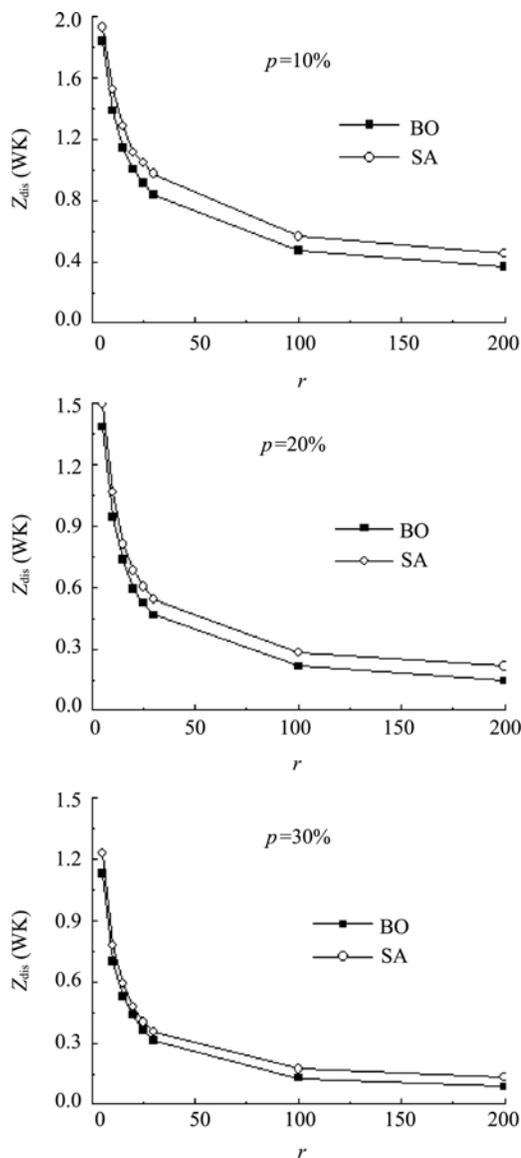


图 5 工况 I 中 2 个优化目标的积热耗散对比

规律. 因此可以认为, 在本文讨论的物理问题中, 温度场均匀化和温度梯度场均匀化有较强的一致性.

下面改变工况, 对上述结果进行进一步的验证. 取与图 2 和 3 中工况 III 部分相同的非均匀内热源问题, 可以得到如图 7 所示的计算结果, 其 $p=10%$. p 进一步增大时, 2 条积热耗散曲线更加接近, 在此不再给出, 温度场均匀性的曲线也非常接近, 也不再给出. 此外, 还计算了其他工况, 如 E, W, N 边界均为 300 K 等温边界, S 为绝热边界等. 这些工况都验证了“2 个均匀化目标之间具有一定的一致性”.

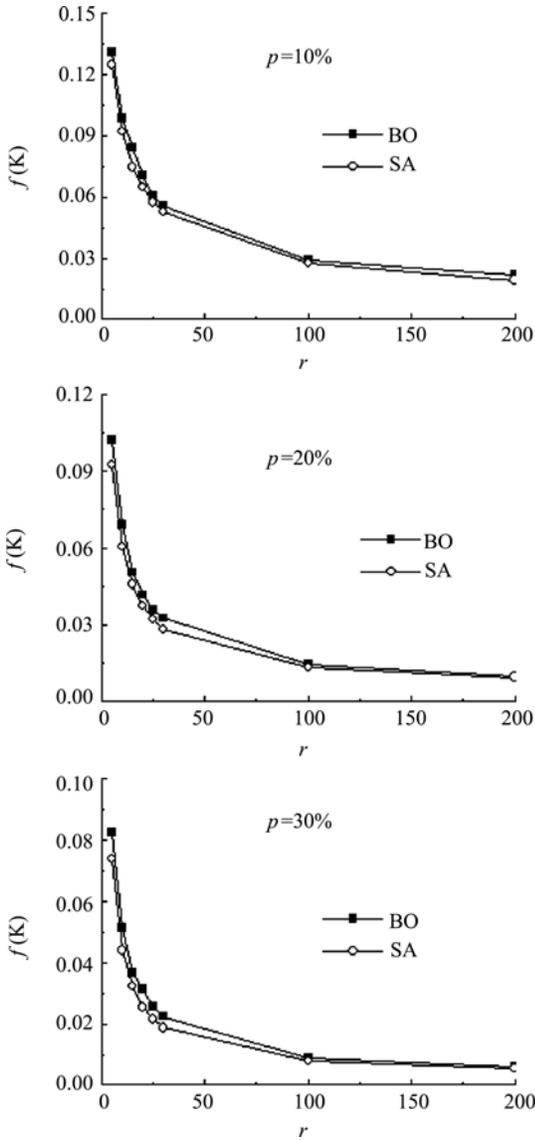


图 6 工况 I 中 2 个优化目标的温度均匀性因子对比

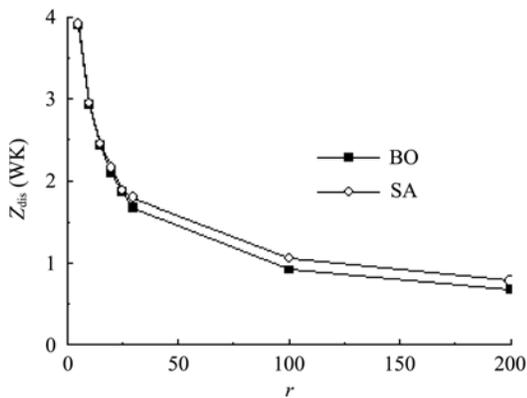


图 7 非均匀热源问题中 2 个目标的焓耗散对比

同时发现, 以仿生优化方法均匀化温度梯度场之时, 计算所耗的时间很短; 而用模拟退火算法均匀化温度场之时, 所耗的时间为前者的 100 倍以上. 通过前文的分析, 及从图 5, 6 和 7 可见, 仿生优化方法不仅能有效的减小焓积耗散、均匀化温度梯度场; 同时, 用这个算法得到的温度场, 其均匀性因子已经非常接近模拟退火算法得到的解. 综合考虑这些因素, 可以认为, 仿生优化方法是一个可以同时均匀化温度场与温度梯度场的有效方法.

5 导热系数比与高导热材料填充量的阈值

从图 5, 6 和 7 还可以看出, 随着导热系数比的增加, 焓积耗散和温度均匀性因子降低的速度在逐渐变小, 在导热系数比 $r > 100$ 之时, 增加导热系数比对焓积耗散和温度均匀性因子的作用已经很小. 因此, 在对高导热材料热导率或者热管性能进行选取之时, 可以考虑以 $r=100$ 作为参考值.

对于高导热材料的布置量, 以仿生优化方法的计算工况 I, 得到如图 8 和 9 所示的结果. 从图 8 和 9 可以看出, 在高导热材料填充比重也存在阈值, 但这个阈值与导热系数比的大小有关. 在导热系数比较小时, 阈值较大, 以 $r=5$ 之时为例, 此时阈值在 40% 左右; 而随着导热系数比的增大, 阈值则呈现减小的趋势, 在 $r=100$ 时, 阈值减小到 10% 左右. 在高导热材料填充比超过阈值之时, 再增加高导热材料的填充量, 对温度均匀性因子和焓积耗散的影响已经不大.

综上所述, 不论对导热比而言, 还是对高导热材料的填充量而言, 都存在阈值.

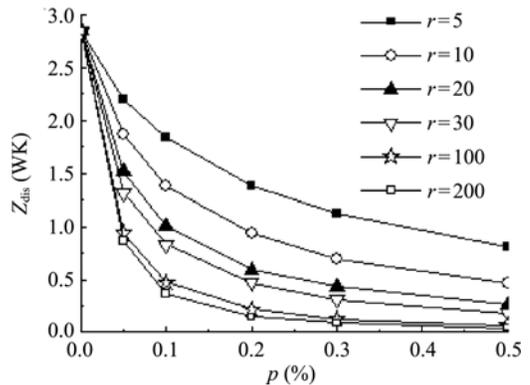


图 8 焓耗散随高导热材料填充量的变化

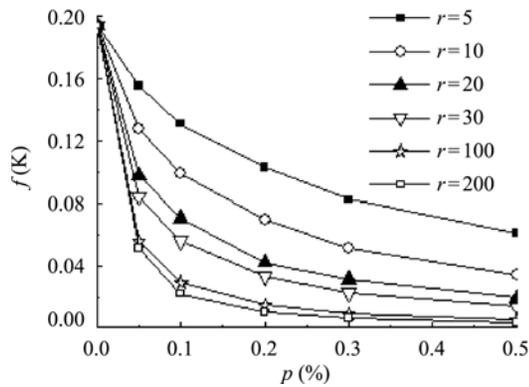


图 9 温度均匀性因子随高导热材料填充量的变化

6 结论

本文以温度均方差作为温度场均匀性的衡量因子、以焓耗散作为衡量温度梯度场均匀性的判据,对

二维导热问题进行了大量的数值分析,讨论了温度场均匀性与温度梯度场均匀性之间的关系,主要得到以下结论.

1) 虽然温度场的均匀化与温度梯度场的均匀化是 2 个不同的优化问题,但两者具有明显的一致性.一般而言,在均匀化温度场之时,也促进了温度梯度场的均匀化;在均匀化温度梯度场时,也会促使温度场均匀化.

2) 对均匀化温度场和均匀化温度梯度场而言,高导热材料的填充量和导热系数比存在阈值;高导热材料的填充量和导热系数比超过阈值后,其增加对均匀化温度场与均匀化温度梯度场的作用不再明显.

3) 仿生优化方法可以同时均匀化温度场和温度梯度场,且该方法可以有效的节约计算时间.

参考文献

- Coventry J S. Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. *Solar Energy*, 2005, 78(2): 211—222[DOI]
- 李卿, 王介康, 曹亮. FY-2C 业务静止气象卫星及发展展望. *上海航天*, 2005, (增刊): 1—8
- 麻慧涛, 钟奇, 范含林, 等. 微型卫星热控制技术研究. *航天器工程*, 2006, 15(2): 6—13
- 程新广, 李志信, 过增元. 基于仿生优化的高导热通道的构造. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2003, 33(3): 251—256
- Bejan A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. *Int J Heat Mass Transfer*, 1997, 40(4): 779—816
- Xia Z Z, Li Z X, Guo Z Y. Heat conduction: High-conductivity construction based on biological evolution. In: *Proceedings of the 12th International Heat Transfer Conference*. Grenoble: AIHTC. 2002, 2: 27—32
- 程新广, 李志信, 过增元. 基于最小热量传递势容耗散原理的导热优化. *工程热物理学报*, 2003, 24(1): 94—96
- 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*, 2003, 48(1): 21—25
- Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G. Entransy: A physical quantity describing heat transfer ability. *Int J Heat Mass Transfer*, 2007, 50(13): 2545—2556[DOI]
- Xu X H, Liang X G, Ren J X. Optimization of heat conduction using combinatorial optimization algorithms. *Int J Heat Mass Transfer*, 2007, 50(9): 1675—1682[DOI]