

# 构造理论在工程领域中的应用研究进展

范志伟, 周兴贵, 袁渭康

(华东理工大学化学工程联合国家重点实验室, 上海 200237)

**摘要:** 从工程设计与优化的角度, 对构造理论在不同工程领域的应用进行了总结, 重点介绍了构造理论在传热和流体分布等单元设备设计和优化中的应用, 展现了构造理论(Constructal theory)在工程应用中的意义和重要价值. 构造理论作为相对较新的过程系统设计理论, 还需要继续发展和完善. 对构造理论在化工过程及设备的设计和优化中的应用前景进行了展望.

**关键词:** 构造理论; 工程设计; 工程优化; 多尺度

**中图分类号:** TQ021.8      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2007)04-0832-08

## 1 前言

在进行过程系统的工程设计时, 都希望能达到设计目标的同时使系统效能最佳. 如对热水供给系统的设计, 要求在将热水送达用户(设计目标)的同时, 使输送耗能和热量损失最小(最佳效能). 但要实现最优设计, 必须首先明确系统结构和效能之间的关系, 这种关系在绝大多数情况下是定性的、模糊的, 工程师通常只有依靠经验进行设计, 尽管能够达到设计目标, 但却难以达到最佳效能. 构造理论的出现为摆脱这种局面提供了一种新方法.

构造理论是由美籍罗马尼亚科学家 Bejan<sup>[1]</sup>在 20 世纪 90 年代中期首先提出的. 构造理论是一种最优设计方法, 它从系统的基本单元结构开始优化, 之后再将这些经过优化的最小单元结构通过优化逐级组合起来, 一直到满足设计要求. 在构造理论中, 系统效能和结构之间的关系由物理和数学方程描述, 系统结构通过优化方法确定. 因此, 利用构造理论进行系统设计在某种意义上是最优设计.

构造理论的提出引起科技人员的极大兴趣, 目前已被应用于众多不同的研究领域, 如电网<sup>[2,3]</sup>、热水供给系统<sup>[4,5]</sup>、冷却系统<sup>[6]</sup>的构建, 建筑墙体<sup>[7-9]</sup>和电磁体的结构设计<sup>[10]</sup>, 以及生命体结构、地球气候、土地的风化龟裂等众多自然现象的诠释等<sup>[11-14]</sup>.

构造理论其实是 20 多年来热力学系统优化的一种延续<sup>[15]</sup>. 到目前为止对构造理论关注较多的主要是美国、法国以及罗马尼亚. 在我国, 陈林根等<sup>[16,17]</sup>最早在介绍热力学优化理论时提到 Constructal theory, 并将其翻译为构形理论, 以后程新广等<sup>[18]</sup>将其应用于构造导热通道, 周圣兵等<sup>[19]</sup>从广义热力学优化的角度对构造理论

进行了介绍, 罗灵爱等<sup>[20]</sup>着重介绍了构造理论在流体分布多尺度优化中的应用.

本工作在简单介绍构造理论基本思想的基础上, 综述了构造理论在众多领域, 特别是在传热和流体分布系统工程的设计和优化中的应用, 并对构造理论今后在化学工程等领域的发展进行了展望.

## 2 构造理论的基本思想

Bejan 在研究城市街道网络时发现, 众多城市的街道网络具有非常相似的树状结构. 城市的主干街道较宽, 上面行驶的多是速度较快的机动车辆, 且流量较大, 而行人则多在较窄的小巷中穿行, 流量较小. 他认为城市街道网络的树状结构是城市长时间发展和进化的结果, 它使居民在耗能(花费)最小的情况下, 出行速度最快, 因此具有最佳效能. 为此, Bejan 按照逐级优化的方法建立了一个街道网络模型, 准确地描述了实际情况. 在此基础上, Bejan<sup>[21-23]</sup>进一步研究了传热和流体流动系统的设计和优化, 最终发展形成了构造理论(Constructal theory)<sup>[24,25]</sup>.

下面用一个简单的例子说明构造理论方法. 在城市建设中, 合理的街道网络可使居民出行更加高效、快捷. 将此问题简化为构建从面(A)上任意一点到达点(M)时间最短的路径, 如图 1. 假设体系中有不同速度的运动方式: 慢速(步行, 速度  $V_0$ ), 快速(车辆, 速度  $V_1 < V_2 < V_3$ ). 设计从选取基本单元  $A_1$  开始, 其中  $A_1$  的面积( $A_1 = H_1 L_1$ )是固定的, 但其形状( $H_1/L_1$ )是可变的, 而  $A_1$  (最小街区)的大小与当地的自然状况和居民的习惯有关.

通过分析找到影响从  $A_1$  上各点到边界点  $M_1$  间速度的结构参数, 其中包括  $A_1$  的形状参数  $H_1/L_1$ 、快速通道(速度  $V_1$ )的位置、步行(速度  $V_0$ )的角度  $\alpha_1$ . 当速度  $V_1$  远

大于  $V_0$  时, 经过分析优化可确定这个矩形的最佳几何参数为快速通道位于长轴上,  $H_1/L_1=2V_0/V_1$ ,  $\alpha_1=0$ .

下一步是数个基本单元  $A_1$  优化组合到一起. 如图 1 所示, 一级组合  $A_2$  就是由  $N_2$  个基本单元  $A_1$  构成的, 速

度为  $V_2(>V_1)$  的路径用来连接速度为  $V_1$  的路径和所有的  $A_1$ . 以  $A_2$  与点  $M_2$  之间行进速度最快为目标进行分析优化, 可以推导出街道(速度  $V_2$ )的位置(区域  $A_2$  的长轴)、 $A_2$  的形状参数  $H_2/L_2$  和角度  $\alpha_2$ .

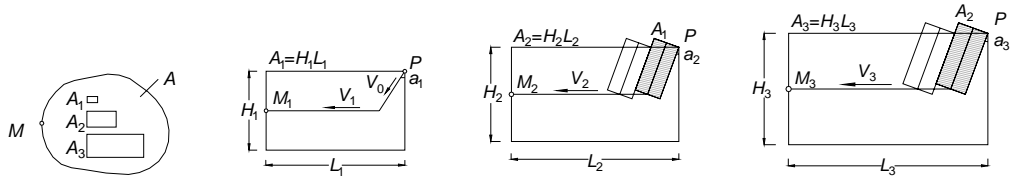


图 1 运用构造理论构建点面间行进速度最快的路径

Fig.1 Construction of high speed paths between points and areas with constructal theory

通过重复相同的步骤就可得到更高级、尺寸更大的组合结构, 如  $A_3$ , 并直到所得组合区域的大小满足设计要求. 在整个结构中, 每个几何结构参数都是为达到同一目标(行进速度最快)优化的结果. 在此过程中, 没有任何假设条件, 也没有受到任何自然结构的影响.

以上只是构造理论工程应用的一个小例子, 而在其他与流体相关的工程领域中, 构造理论方法同样适用. 工程师只需在应用相关流体方程的同时, 遵循一条简单的、唯一的构造理论法则: 从小到大, 用几何学的方法, 对系统的不完美特性进行最优的配置. 如在解决一点与无数点(体点或面点)之间的流体流动问题时, 构造理论先是构造一个最小单元结构(其大小与制造工艺水平有关), 然后再将一定数量的最小单元组合成更大的单元结构, 并按此步骤逐级继续, 直到得到符合要求的流体路径结构. 在整个构造过程中, 每次组合的结构参数, 包括单元组合结构的几何尺寸、组合单元的数量等, 都是以优化流体流动为目标的分析计算结果. 在构造结构中, 传输阻力大的流动形式, 如慢速流动、高耗能流动、扩散、步行等, 被限制在每个最小单元结构内, 而传输阻力较小的流动形式, 如快速流动、低能耗流动、强对流、运输工具的行驶等, 则出现在各个组合之间, 用来连接体点或面点间的流动, 最后全部构建单元组成一个有机的整体, 形成树状结构的流动路径, 其中每层结构的几何结构参数都是优化所得.

按构造理论得到的系统结构与分形结构看上去非常相似, 但事实上构造理论与分形论有着本质区别. 分形论<sup>[26]</sup>是应用分形几何学对自然界中的各种几何图形和结构如树木、河流等进行研究的方法. 由于分形具有扩展对称性的自相似结构, 其部分结构在形式上与其整体结构本身相似. 分形作为一种从大到小的无限过程, 可以非常近似地描述自然界中的许多几何形状和结构. 分形论也被用于流体分布器、混合器<sup>[27]</sup>和传热系统<sup>[28]</sup>的设计优化中, 并起到提高系统性能的作用. 但需要强

调的是, 分形是一个从大到小的无限过程, 它将系统不断分割一直到无限小. 分形的过程在时间方向上从大到小, 是描述性和非决定性的, 而构造理论却正好与其“相反”, 在进行系统结构设计时, 从有限小的结构单元优化开始, 将小的单元结构不断组合为更大的结构, 整个过程通过一级一级的构建来实现. 构造理论在时间方向上是从小到大的, 是可预测的和决定性的<sup>[24]</sup>.

### 3 构造理论的发展应用

构造理论提出之初就被用于高导热材料优化配置强化传热的研究中, 其后又被用于对流换热强化. 与此同时, 研究者还将构造理论应用于流体分布、传质过程强化等.

#### 3.1 构造理论优化系统传热

从 Bejan<sup>[21]</sup>运用构造理论解决电子元件中高热导材料的布置以强化热传导开始, 这方面的研究就一直倍受关注. 与 Bejan 的最小化热阻不同, Dan 等<sup>[29]</sup>研究了如何在最短时间内将一定体积内的热量导出的问题, 将研究从二维的点面扩展到三维的点体范围; 而 Almgöbel 等<sup>[30]</sup>提出两种提高二维树状结构导热性能的方法, 可用于解决任意形状电子元件的冷却问题. 按此方法得到的导热路径(图 2)具有典型的树状结构, 而且通过比较发现, 增加结构复杂度有利于提高系统性能.

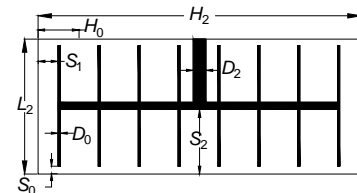


图 2 内含 2 个一级高导热材料组装结构的二级热传导结构<sup>[30]</sup>  
Fig.2 Second-assembly configuration containing two first assemblies<sup>[30]</sup>

Almgöbel 等<sup>[31]</sup>在研究过程中发现, 如放松对基本单元结构的尺寸限制, 提高结构自由度, 能够提高系统

的热传导性能,并可得到与自然界中真实结构更加相似的树状结构. Rocha 等<sup>[32]</sup>运用构造理论设计出圆形电子元件上高热导材料的最优分布(图 3), 以将电子元件产生的热量从圆心导出(图中从圆心出发的黑线代表高热导材料), 最后得到辐射状布置结构, 其中扇形面积( $\alpha$ )的大小、辐射路径长度( $L_0$ )以及分叉数目都是优化得到的结果.

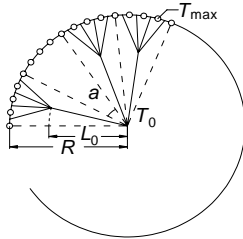


图3 扇形区域内具有分叉状冷却结构的圆碟型发热体<sup>[32]</sup>  
Fig.3 Disc-shaped body cooled by a structure consisting of several branched sectors<sup>[32]</sup>

Ghodoossi 等<sup>[33,34]</sup>研究了由 2 种基本单元(矩形和三角形)组合成不同形式(矩形和三角形)的导热路径, 并比较了这些组合的性能. 组合方式包括矩形组合成矩形(RR), 矩形组合成三角形(RT), 三角形组合成三角形(TT)以及三角形组合成矩形(TR), 如图 4 所示, 结果发现当冷却区域面积相同时( $A_2=L_2H_2$ ), 矩形组合成三角形的组合方式性能最好. 另外, 他们还探讨了三角形电子元件的传热冷却问题<sup>[35]</sup>.

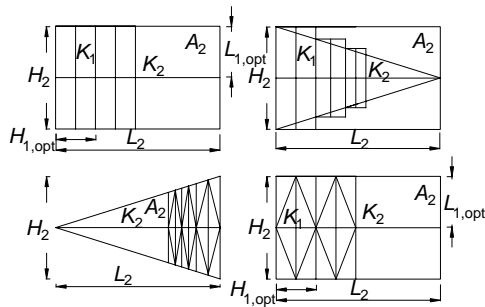


图4 各种二级组合<sup>[33,34]</sup>  
Fig.4 Second RR, RT, TT, and TR assembled configurations (R for rectangular, and T for triangular, from left to right and top to bottom)<sup>[33,34]</sup>

除了强化热传导之外, 构造理论在对流换热强化方面也有许多应用. Bejan 等<sup>[36]</sup>运用构造理论提出了一种多尺度板片组合结构以达到强化层流换热的目的(图 5). 他们发现在大的板片(长  $L_0$ , 间距  $D_0$ )中间插入较小的板片( $L_2 < L_1 < L_0$ ), 可以改善层流换热时大板片边界层之间部分的传热状况, 从而提高对流换热能力. 其中, 最佳的插入位置  $D_1, D_2$  和相应的板片长度  $L_1, L_2$  都可由优化计算确定.

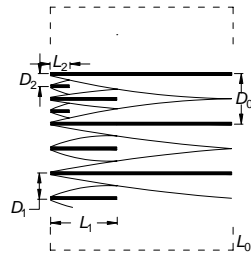


图5 优化的多尺度平行板片组合<sup>[36]</sup>  
Fig.5 Optimal multi-scale package of parallel plates<sup>[36]</sup>

随后 Bello-Ochende 等<sup>[37-39]</sup>将这种方法用于强制对流换热强化研究, 提出了多尺度管路组合结构(图 6)以强化传热性能, 优化参数包括各尺度管尺寸( $D_0, D_1, D_2$ )的选择以及各尺度管在组合中的位置安排( $S_0, S_2$ ).

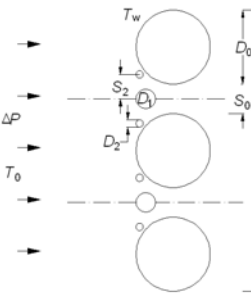


图6 三种不同尺寸管路组合结构<sup>[38]</sup>  
Fig.6 Row of cylinders with three sizes<sup>[38]</sup>

Silva 等<sup>[40,41]</sup>则研究了自然对流换热下多尺度结构的设计方法和如何在含有热源的封装结构中构造多尺度结构, 以达到最大传热性能.

从图 7 可看出插入小的板片可强化系统换热(红色区域越大、蓝色区域越小代表传热性能越好). 从左到右, 随着新板片的插入, 系统的传热性能也越来越强. 而 Silva 等<sup>[42,43]</sup>在其他关于对流换热强化的研究中主要研究自然层流和强制对流冷却的壁面上分散热源的安置问题. 此外他们还求得了自然对流冷却情况下, 垂直开放通道里离散热源的最优分布(图 8 中  $S_0, S_1, S_2, S_3$ )和其几何尺寸( $D_0, y_0$ )<sup>[44]</sup>, 并对这些研究进行了分析总结<sup>[45]</sup>.

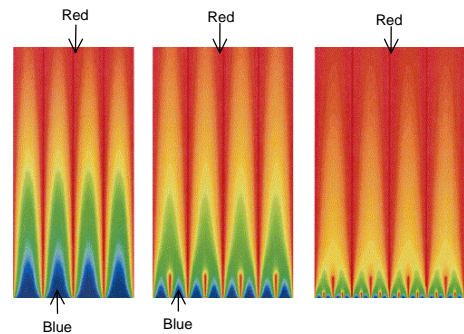


图7 具一、二、三级尺度板片结构的温度分布<sup>[40]</sup>  
Fig.7 The temperature distributions in packages with one, two and three length scales<sup>[40]</sup>

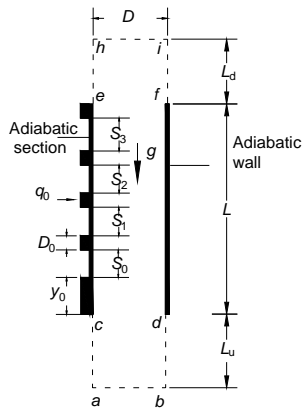


图 8 垂直开放通道上多尺度热源的不均匀分布<sup>[44]</sup>  
 Fig.8 Multiple length scales of the non-uniform distribution of finite-size heat sources on a vertical channel<sup>[44]</sup>

构造理论另一常见的强化传热应用是通过优化翅片形状及结构参数以达到翅片热阻最小和传热能力最大等目标. Bejan 等<sup>[46]</sup>研究了在翅片材料总量和总体积一定的条件下(图 9)如何通过优化 T 状翅片的几何形状( $L_1/L_0, t_1/t_0$ )达到热传导性能最大的目的, 并将这种 T 状翅片与末端向下弯曲的 Tau 状翅片进行了比较.

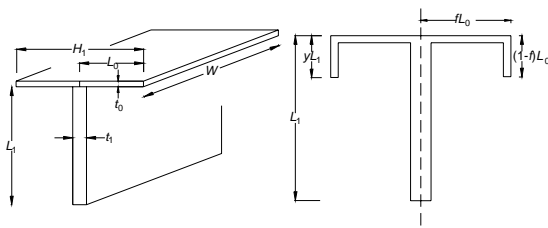


图 9 T 状和 Tau 状翅片结构<sup>[46]</sup>  
 Fig.9 T-shaped (left) and Tau-shaped (right) assembly of plate fins<sup>[46]</sup>

Almogbel 等<sup>[47]</sup>研究了圆柱体和辐射状翅片组合结构的外部形状、主干和翅片直径比及翅片形状对组合结构传热性能的影响. 在此基础上加入新的分支翅片, 可得到传热表面更大、结构更加紧凑、传热性能更强的新

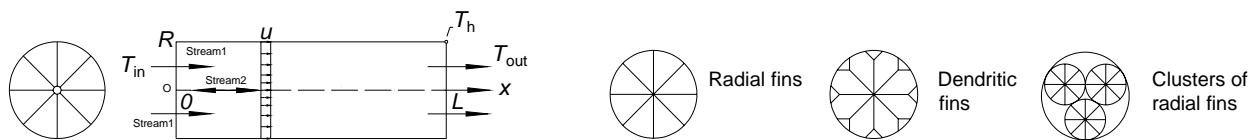


图 11 具有发散状翅片的共轴双流体换热器和三类翅片组合设计形式<sup>[52]</sup>  
 Fig.11 Coaxial two-stream heat exchanger with radial plate fins (left) and three competing configurations in the design of fins for coaxial heat exchanger (right)<sup>[52]</sup>

最近几年, 关于微型换热器在过程强化方面的研究和应用受到很大关注, 出现了很多新颖的设备结构形式. Muzychka<sup>[53]</sup>在微型换热器的构形设计中引入了构造理论, 进行体积大小和压降固定条件下微通道列管式换热

结构<sup>[48]</sup>. Silva 等<sup>[49]</sup>研究了在材料总量一定的条件下, 碟状发热体中矩形高导翅片的分布情况, 以使发热体的热阻最小. Matos 等<sup>[50]</sup>运用模拟和实验相结合的方法研究了翅片和椭圆管道组合结构在体积一定和外部流动恒定时, 各几何结构参数(管与管之间的空间距离( $L$ )、翅片间距( $\delta$ )、椭圆管道的偏心率)对结构传热效能的影响, 并求得其最佳值(图 10). 这一研究引入了实验工作, 这在构造理论应用探索研究中为数不多, 因而具有重要的现实意义.

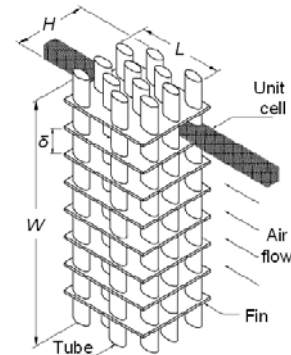


图 10 椭圆管道和翅片的组合结构以及用于模拟计算的三维区域<sup>[50]</sup>  
 Fig.10 Arrangement of finned elliptic tubes and three-dimensional computational domain<sup>[50]</sup>

换热器是重要的化工系统单元设备, 研究者通过设计新的结构和优化结构参数来提高其换热性能. 由 Bejan<sup>[51]</sup>设计的树枝形换热器具有多尺度内部流体通道结构, 并以消除层流流动中纵向温差、强化换热为目的, 对换热器基本单元结构进行优化, 同时通过调整基本单元之间的空隙和流体通道的几何尺寸, 降低换热器内流体的流动耗能. 而由 Bonjour 等<sup>[52]</sup>设计的圆柱形双流体共轴换热器(图 11)则通过在环形空间中插入翅片和优化翅片几何结构达到强化换热的目的. 研究发现最佳翅片组合设计形式为放射状还是分枝状与换热器横截面的大小( $R$ )密切相关.

器的设计, 考察了不同截面形状(平板式、矩形、椭圆形、圆形以及三角形等)和尺寸的微通道及其组合对换热器性能的影响(图 12), 发现正方形和等腰三角形微通道换热器的换热性能最好.

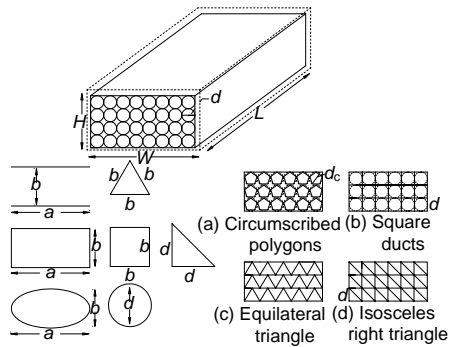


图 12 微型换热器(上)、各种通道截面形式(左下)和其组合形式(右下)<sup>[53]</sup>

Fig.12 Micro heat exchanger (top) elemental geometries being considered (left bottom) and some possible packing arrangements (right bottom)<sup>[53]</sup>

以上介绍的只是构造理论在强化传热方面的部分应用,其实在工程应用中,它还有很大的拓展空间,如具有翅片的冷却或加热装置,包括快速吸热的气化器、乙烯裂解装置中的核心部件—裂解管的结构设计和优化等。

### 3.2 构造理论优化系统流体分配

构造理论除了可以用来构造强化热传导的流体通道之外,对于其他流体通道路径的构造也同样适用,如构造耗能最小的流体分布网络等。以下将主要介绍构造理论在流体分配中的应用。

燃料电池作为新型洁净能源装置,受到能源工程界的广泛关注。作为反应器,其内部结构的合理设计对于提高燃料电池的性能非常重要。Vargas 等<sup>[54-56]</sup>通过优化燃料电池的单元外形和内部结构,在达到电力输出最大的同时,将供给反应物的耗能降到最低。Senn 等<sup>[57]</sup>设计和优化了 DMFC 燃料电池单元内部的多尺度流体通道和电流收集结构的几何尺寸( $L_k$ ,  $h_k$ ,  $b_k-h_k$ ),得到比传统

单一通道燃料电池更大的输出电力和更高的电池效率(图 13)。

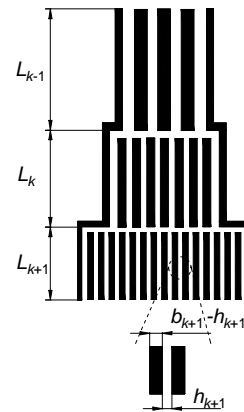


图 13 金字塔状流体分布几何结构<sup>[57]</sup>

Fig.13 Geometric structure of the pyramidal tree network fluid delivery system including channels (white) and current collector shoulders (black)<sup>[57]</sup>

在列管式反应器、换热器等化工设备的设计中,经常会遇到流体均布的问题。在寻找最佳解决方法的过程中, Tondeur 等<sup>[58]</sup>提出了多尺度流体分布器的概念(图 14),它可以将速率一定的流体均匀地分布到一组规则分布的孔道中,并同时达到停留时间最小和耗能最少的目的。值得一提的是,他们用立体激光印刷术制造了第 1 个构造理论的实体部件—分枝结构流体分布器。Luo 等<sup>[59]</sup>对分枝结构流体分布器进行了进一步发展和完善,提出了新的四分叉树状结构以降低流体能耗,并用高速摄像机观察记录了分布器中流体的均布情况,定性地表明了分布器的流体均布能力。他们还将流体分布器与一个微型换热器组合在一起,通过实验考察了不同分布器对换热器性能的影响。

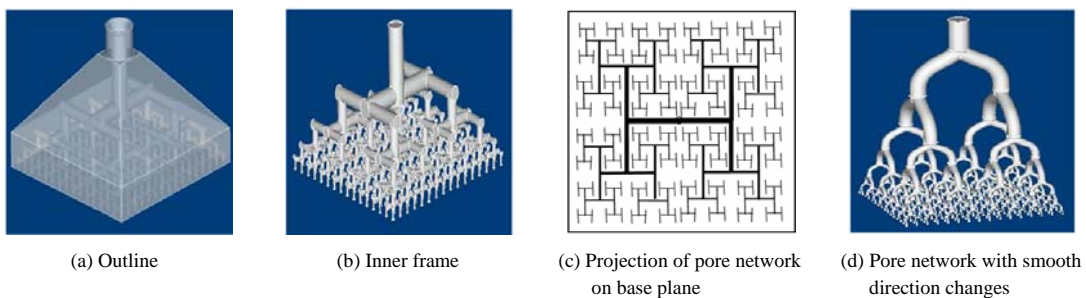


图 14 具有 8 级多尺度、256 个出口的流体分布器<sup>[58]</sup>

Fig.14 Constructal fluid distributor with 8 generations and 256 outlets<sup>[58]</sup>

此外,还有构造理论用于其他一些流体分布的研究,如点到面、点到圆周和点到直线等<sup>[60-64]</sup>其间流体路径的构建(图 15),以及包含 T 状或 Y 状接管的管路网络

的构建<sup>[65,66]</sup>,虽不如上面介绍的流体分布器有典型的可被应用于化工过程的特征,但在化工管路网络的设计和 optimization 研究中仍具有巨大的潜在价值。而 Alvarez 等<sup>[67]</sup>将

构造理论用于吸附-脱附过程时空结构的优化, 又显示了构造理论在优化质量交换结构时的优越性.

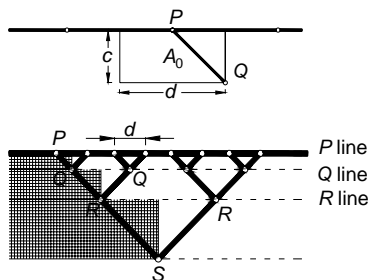


图 15 具有一条流体通道的基元系统(上)和点线间长度最小的树状结构(下)<sup>[62]</sup>

Fig.15 Elemental system with one flow segment (top) and the construction of the minimal-length tree between a line and a point (bottom)<sup>[62]</sup>

除了以上构造理论在传热和流体分布等系统工程优化方面的应用, 还有研究者将构造理论运用到自然界结构经济性最优的分析和证明<sup>[68,69]</sup>, 对一些电学理论如欧姆定律的证明<sup>[70]</sup>及飞行物体自身重量和能耗之间关系的最优分析<sup>[71]</sup>之中, 显示了构造理论的普适性.

## 4 总结和展望

正如 Bejan 构造理论专著<sup>[25]</sup>的书名(从工程到自然)所暗示, 构造理论开始应用于工程设计和优化, 之后又应用于自然界中一些结构和现象的分析和解释. 构造理论不仅被用于优化流体流动单元外部形态和内部构造, 也被用来解释一些自然规律(生物结构是生物体自身以性能最优为目标不断进化的结果). 对自然规律的成功解释反过来也证明了构造理论的合理性和正确性, 由此进一步拓展了其在系统结构的设计、分析和预测中的应用.

构造理论自身有着鲜明的特点, 与现代物理学从大到小步步简化的研究方法相反, 构造理论则是按照从小到大、层层优化组合的方式, 将基本单元结构组合构建成为优化的整体宏观结构. 构造理论本身也不是完美无缺的, 需要我们在认识、运用的同时, 加以发展和完善. 构造理论作为一种相对较新的过程系统设计理论, 目前了解、接受和应用的研究者还不多. 但随着时间的推移, 越来越多的研究者会认识构造理论. 构造理论提供了工程设计与优化创新的新方法, 在与不同工程领域相结合的过程中, 将产生丰富多彩的创新设计思想, 并最终变为现实, 应用于各工程领域.

化学工程是跨度最广的工程领域, 构造理论在化工过程及设备的工程设计和优化中大有用武之地. 目前, 化工过程强化是化学工程的重点发展领域, 而化工流体

力学设备(用于进行混合、均布、反应、分离、换热等)的强化是过程强化的主要内容. 对这些设备进行强化的根本途径是对流体进行结构化, 而为实现流体结构化必须对设备内部进行结构化. 目前对流体进行结构化的主要方式是利用特殊设计的内构件(如导流筒、挡板、盘管、花板等)和规整填料(用于催化反应器、精馏塔、静态混合器等). 不可否认, 这些内构件和填料的设计在很大程度上依赖经验, 与最优设计有一定距离. 这些手段尽管能够实现过程强化, 有时甚至效果十分显著, 但仍有潜力可挖. 因此, 构造理论不仅如前所述能够提供新的设备强化思路, 也为现有过程强化手段的挖潜和优化提供了重要的理论基础.

### 参考文献:

- [1] Bejan A. Street Network Theory of Organization in Nature [J]. *J. Adv. Transp.*, 1996, 30(2): 85-107.
- [2] Valentin A, Alexandru C, Bejan A. Constructal Tree Shaped Networks for the Distribution of Electrical Power [J]. *Energy Convers. Manage.*, 2003, 44(6): 867-891.
- [3] Valentin A, Alexandru C, Bejan A. Integral Measures of Electric Power Distribution Networks: Load-Length Curves and Line-network Multipliers [J]. *Energy Convers. Manage.*, 2003, 44(7): 1039-1051.
- [4] Wechsato W, Lorent S, Bejan A. Tree-shaped Insulated Designs for the Uniform Distribution of Hot Water over an Area [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, 44(16): 3111-3123.
- [5] Wechsato W, Lorent S, Bejan A. Development of Tree-shaped Flows by Adding New Users to Existing Networks of Hot Water Pipes [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, 45(4): 723-733.
- [6] Zamfirescu C, Bejan A. Tree-shaped Structures for Cold Storage [J]. *Int. J. Refrig.*, 2005, 28(2): 231-241.
- [7] Lorente S, Bejan A. Combined "Flow and Strength" Geometric Optimization: Internal Structure in a Vertical Insulating Wall with Air Cavities and Prescribed Strength [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, 45(16): 3313-3320.
- [8] Gosselin L, Lorent S, Bejan A. Combined "Heat Flow and Strength" Optimization of Geometry: Mechanical Structures Most Resistant to Thermal Attack [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, 47(14/16): 3477-3489.
- [9] Rocha L, Lorenzini E, Biserni C. Geometric Optimization of Shapes on the Basis of Bejan's Constructal Theory [J]. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 2005, 32(10): 1281-1288.
- [10] Gosselin L, Bejan A. Constructal Thermal Optimization of an Electromagnet [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2004, 43(4): 331-338.
- [11] Bejan A, Ikegami Y, Ledezma G A. Constructal Theory of Natural Crack Pattern Formation for Fastest Cooling [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, 41(13): 1945-1954.
- [12] Bejan A. The Constructal Law of Organization in Nature: Tree-shaped Flows and Body Size [J]. *J. Exp. Biol.*, 2005, 208(9): 1677-1686.
- [13] Reis H, Bejan A. Constructal Theory of Global Circulation and Climate [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2006, 49(11/12): 1857-1875.
- [14] Bejan A. How Nature Takes Shape: Extensions of Constructal Theory to Ducts, Rivers, Turbulence, Cracks, Dendritic Crystals and Spatial Economics [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 1999, 38(8): 653-663.



- [15] Poirier H. Une Théorie Explique l'intelligence de la Nature [J]. *Science & Vie*, 2003, 1034(1): 44–63.
- [16] 陈林根, 孙丰瑞. 有限时间热力学理论和应用的发展现状 [J]. *物理学进展*, 1998, 18(4): 395–422.
- [17] 陈林根, 孙丰瑞. 热力学优化理论的研究进展 [J]. *武汉化工学院学报*, 2002, 24(1): 81–85.
- [18] 程新广, 李志信, 过增元. 基于仿生优化的高效导热通道的构造 [J]. *中国科学 E 辑*, 2003, 33(3): 251–256.
- [19] 周圣兵, 陈林根, 孙丰瑞. 构形理论: 广义热力学优化的新方向之一 [J]. *热科学与技术*, 2004, 3(4): 283–292.
- [20] Luo L A, Tondeur D. Multiscale Optimisation of Flow Distribution by Constructal Approach [J]. *China Particuology*, 2005, 3(6): 329–336.
- [21] Bejan A. Constructal-theory Network of Conducting Paths for Cooling a Heat Generating Volume [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1997, 40(4): 799–816.
- [22] Bejan A. Constructal Tree Network for Fluid Flow between a Finite-size Volume and One Source or Sink [J]. *Rev. Gén. Therm.*, 1997, 36(8): 592–604.
- [23] Bejan A. Theory of Organization in Nature: Pulsating Physiological Processes [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1997, 40(9): 2097–2104.
- [24] Bejan A. Constructal Theory: From Thermodynamic and Geometric Optimization to Predicting Shape in Nature [J]. *Energy Convers. Manage.*, 1998, 39(16/18): 1705–1718.
- [25] Bejan A. *Shape and Structure, from Engineering to Nature* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 5–19.
- [26] Mandelrot B. *The Fractal Geometry of Nature* [M]. New York: WH Freeman, 1982. 9–33.
- [27] Mike M K. Engineered Fractals Enhance Process Applications [J]. *Chem. Eng. Prog.*, 2000, 96(12): 61–68.
- [28] Chen Y P, Cheng P. Heat Transfer and Pressure Drop in Fractal Tree-like Microchannel Nets [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, 45(13): 2643–2648.
- [29] Dan N, Bejan A. Constructal Tree Networks for the Time-dependent Discharge of a Finite-size Volume to One Point [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, 84(6): 3042–3050.
- [30] Almgöbel M, Bejan A. Conduction Trees with Spacings at the Tips [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1999, 42(20): 3739–3756.
- [31] Almgöbel M, Bejan A. Constructal Optimization of Nonuniformly Distributed Tree-shaped Flow Structure for Conduction [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, 44(22): 4185–4194.
- [32] Rocha L, Lorente S, Bejan A. Constructal Design for Cooling a Disc-shaped Area by Conduction [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, 45(8): 1643–1652.
- [33] Ghodoossi L, Egrican N. Flow Area Optimization in Point to Area or Area to Point Flows [J]. *Energy Convers. Manage.*, 2003, 44(16): 2589–2608.
- [34] Ghodoossi L, Egrican N. Flow Area Structure Generation in Point to Area or Area to Point Flows [J]. *Energy Convers. Manage.*, 2003, 44(16): 2609–2623.
- [35] Ghodoossi L, Egrican N. Conductive Cooling of Triangular Shaped Electronics Using Constructal Theory [J]. *Energy Convers. Manage.*, 2004, 45(6): 811–828.
- [36] Bejan A, Fautrelle Y. Constructal Multi-scale Structure for Maximal Heat Transfer Density [J]. *Acta Mechanica*, 2003, 163(1): 39–49.
- [37] Bello-Ochende T, Bejan A. Maximal Heat Transfer Density: Plates with Multiple Lengths in Forced Convection [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2004, 43(12): 1181–1186.
- [38] Bello-Ochende T, Bejan A. Constructal Multi-scale Cylinders in Cross-flow [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005, 48(7): 1373–1383.
- [39] Bello-Ochende T, Bejan A. Constructal Multi-scale Cylinders with Natural Convection [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005, 48(21/22): 4300–4306.
- [40] Silva A K, Bejan A. Constructal Multi-scale Structure for Maximal Heat Transfer Density in Natural Convection [J]. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2005, 26(1): 34–44.
- [41] Silva A K, Lorente S, Bejan A. Constructal Multi-scale Structures with Asymmetric Heat Sources of Finite Thickness [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005, 48(13): 2662–2672.
- [42] Silva A K, Lorente S, Bejan A. Optimal Distribution of Discrete Heat Sources on a Plate with Laminar Forced Convection [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, 47(10/11): 2139–2148.
- [43] Silva A K, Lorente S, Bejan A. Optimal Distribution of Discrete Heat Sources on a Wall with Natural Convection [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, 47(2): 203–214.
- [44] Silva A K, Lorenzini G, Bejan A. Distribution of Heat Sources in Vertical Open Channels with Natural Convection [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005, 48(8): 1462–1469.
- [45] Silva A K, Lorente S, Bejan A. Constructal Multi-scale Structures for Maximal Heat Transfer Density [J]. *Energy*, 2006, 31(5): 620–635.
- [46] Bejan A, Almgöbel M. Constructal T-shaped Fins [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2000, 43(12): 2101–2115.
- [47] Almgöbel M, Bejan A. Cylindrical Trees of Pin Fins [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2000, 43(23): 4285–4297.
- [48] Almgöbel M. Constructal Tree-shaped Fins [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2005, 44(4): 342–348.
- [49] Silva A K, Vasile C, Bejan A. Disc Cooled with High-conductivity Inserts that Extend inward from the Perimeter [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, 47(19/20): 4257–4263.
- [50] Matos R S, Laursen T A, Vargas J, et al. Three-dimensional Optimization of Staggered Finned Circular and Elliptic Tubes in Forced Convection [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2004, 43(5): 477–487.
- [51] Bejan A. Dendritic Constructal Heat Exchanger with Small-scale Crossflows and Larger-scales Counter Flows [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, 45(23): 4607–4620.
- [52] Bonjour J, Rocha L, Bejan A, et al. Dendritic Fins Optimization for a Coaxial Two-stream Heat Exchanger [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2003, 47(1): 111–124.
- [53] Muzychka Y S. Constructal Design of Forced Convection Cooled Microchannel Heat Sinks and Heat Exchangers [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005, 48(15): 3119–3127.
- [54] Vargas J, Ordóñez J C, Bejan A. Constructal Flow Structure for a PEM Fuel Cell [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, 47(19/20): 4177–4193.
- [55] Vargas J, Bejan A. Thermodynamic Optimization of Internal Structure in a Fuel Cell [J]. *Int. J. Energy Res.*, 2004, 28(4): 319–339.
- [56] Vargas J, Ordóñez J C, Bejan A. Constructal PEM Fuel Cell Stack Design [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005, 48(21/22): 4410–4427.
- [57] Senn S M, Poulikakos D. Pyramidal Direct Methanol Fuel Cells [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2006, 49(7/8): 1516–1528.
- [58] Tondeur D, Luo L A. Design and Scaling Laws of Ramified Fluid Distributors by the Constructal Approach [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2004, 59(8/9): 1799–1813.
- [59] Luo L A, Tondeur D. Optimal Distribution of Viscous Dissipation in a Multi-scale Branched Fluid Distributor [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2005,

- 44(12): 1131–1141.
- [60] Ledezma G A, Bejan A, Errera M R. Constructal Tree Networks for Heat Transfer [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, 82(1): 89–100.
- [61] Wechsatoł W, Lorente S, Bejan A. Optimal Tree-shaped Networks for Fluid Flow in a Disc-shaped Body [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, 45(25): 4911–4924.
- [62] Lorente S, Wechsatoł W, Bejan A. Tree-shaped Flow Structures Designed by Minimizing Path Lengths [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, 45(16): 3299–3312.
- [63] Gosselin L, Bejan A. Tree Networks for Minimal Pumping Power [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2005, 44(1): 53–63.
- [64] Gosselin L. Minimum Pumping Power Fluid Tree Networks without a Priori Flow Regime Assumption [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005, 48(11): 2159–2171.
- [65] Bejan A, Rocha L, Lorente S. Thermodynamic Optimization of Geometry: T- and Y-shaped Constructs of Fluid Streams [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2000, 39(9/11): 949–960.
- [66] Zimparov V D, Silva A, Bejan A. Thermodynamic Optimization of Tree-shaped Flow Geometries [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2006, 49(9/10): 1619–1630.
- [67] Rivera-Alvarez A, Bejan A. Constructal Geometry and Operation of Adsorption Processes [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2003, 42(10): 983–994.
- [68] Bejan A, Badescu V, De Vos A. Constructal Theory of Economics [J]. *Appl. Energy*, 2000, 67(1/2): 37–60.
- [69] Bejan A, Badescu V, De Vos A. Constructal Theory of Economics: Structure Generation in Space and Time [J]. *Energy Convers. Manage.*, 2000, 41(13): 1429–1451.
- [70] Lewins J. Bejan's Constructal Theory of Equal Potential Distribution [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2003, 46(9): 1541–1543.
- [71] Ordóñez J C, Bejan A. System-level Optimization of the Sizes of Organs for Heat and Fluid Flow Systems [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2003, 42(4): 335–342.

## Advances of Constructal Theory in Engineering Applications

FAN Zhi-wei, ZHOU Xing-gui, YUAN Wei-kang

(*State Key Laboratory of Chemical Engineering, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China*)

**Abstract:** In view of engineering design and optimization, applications of constructal theory in several engineering areas are introduced, especially in design and optimization of heat transfer and fluid distribution devices, the significance and potential value of constructal theory in engineering applications are highlighted. As a novel process system designing theory, constructal theory needs to be developed and improved. The application prospect of constructal theory in chemical engineering process/devices design and optimization is also discussed.

**Key words:** constructal theory; engineering design; engineering optimization; multi-scale approach