



论文

流体域内热量传递过程的导热-对流并联热阻分析方法

王秋旺*, 李香璇, 王婷, 麻世鸿, 张波, 马挺

西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049

* E-mail: wangqw@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-10-09; 接受日期: 2023-12-29; 网络版发表日期: 2024-07-15

国家自然科学基金(批准号: 52130609)资助项目

摘要 热阻理论被广泛用于传热过程问题的分析, 传统的热阻分析方法往往只适用于一维、稳态、无内热源的热传导问题. 然而, 在能源电力、石油化工、航空航天等工程应用中还涉及热对流问题. 针对此问题, 本文提出了流体域内、多维导热-对流并联热阻分析方法以及总体热阻的概念, 构建了热阻网络模型, 并通过分析通道内强制对流问题证明了导热-对流并联热阻分析方法的实用性. 流体域内的面积对流热阻与温度梯度及速度大小和方向密切相关, 速度越大, 面积对流热阻越小, 同时面积对流热阻存在“负热阻”现象, 相当于流体域内的“热源”或“热汇”. 研究结果表明, 导热-对流并联热阻网络的建立对于分析流动传热过程, 以及指导传热过程的调节和优化具有重要意义.

关键词 热电比拟方法, 局部热阻, 对流热阻, 传热调控, 并联热阻

1 引言

换热设备是工业生产流程的关键装置, 广泛应用于电力、动力、炼油、化工、钢铁、冶金、轻工、制药、机械、食品加工以及原子能工业等领域^[1]. 工业过程能量传递75%以上依靠对流传热^[2]. 然而, 对流传热过程计算多数依靠经验关系式, 缺乏诸如力学、电学等领域的严格理论体系, 始终制约着对流传热强化理论和技术的发展. 因此, 对流传热强化理论及方法的建立, 对于提高能源利用率以及推动整个能源科技的发展都极为重要.

为加强对流传热的强化, 国内外学者开展了一系列新理论的提出与应用. Bejan^[3]推导了流动与传热过程中的熵产表达式, 并将熵产最小理论^[4]引入热系统的优化设计中. 过增元等人提出了焓耗散极值理论^[5-8]和温度-速度双场协同理论^[9-11], 即对流换热取决于流体的温度场和速度场的协同程度, 证明了温度场和速度场的夹角越小, 换热效果越优. 刘伟等人^[12]在此基础上提出了温度-速度-压力三场协同理论, 确立了流体压力与功耗的本构关系, 阐明了流体压力对换热设备流体传热和流动的作用机制, 建立了关于压力和速度的层流协同方程和协同角数学式, 构建了湍流传热

引用格式: 王秋旺, 李香璇, 王婷, 等. 流体域内热量传递过程的导热-对流并联热阻分析方法. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 1789–1796
Wang Q W, Li X X, Wang T, et al. Analysis methodology of thermal conduction-advection resistance in parallel during heat transfer in the fluid domain (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 1789–1796, doi: [10.1360/SST-2023-0310](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0310)

与流动三场协同传热强化理论. Chen等人^[13]、赵甜等人^[14]基于焓耗散热阻的概念, 引入一维等效热阻网络来描述换热器网络的传热过程, 分析了每个换热器中所有工质的温度变化, 并建立了多回路、串联和并联等三种基本换热器网络布局的等效热路. Cruz等人^[15]考虑了结构的展向与法向二维导热热阻, 基于熵产最小化准则, 比较了模拟退火、统一粒子群及螺旋算法对于矩形微通道热沉的优化效果, 研究结果显示统一粒子群算法有着较高的精确性.

虽然上述流动传热评价方法已取得了广泛的应用, 然而熵产最小化原理和焓耗散极值原理未将流体流速的影响考虑到传热过程中^[16,17]; 场协同理论对温度场和速度场进行了耦合, 将温度梯度和流体速度的夹角作为评估准则, 但却不能反映温度和速度的大小对传热过程的影响. 此外, 相比于熵产和焓耗散, 应用热电比拟方法^[18], 用热阻的概念可以使得复杂的传热过程得到简化^[19], 更能够直观地评价、分析和优化传热过程. 根据热电比拟原理, 温差相当于电势差, 热流相当于电流, 热阻相当于电阻. 然而, 热阻概念的引入虽使得稳态传热问题得以简化, 但通常适用于一维、稳态、无内热源的导热问题.

对于有流体流动的传热问题, 例如流体流过固体壁面的对流换热问题, 通常采用对流换热热阻($1/hA$)进行描述. 一方面, 对流换热热阻只能描述壁面附近的综合传热性能, 不能充分体现整个流体域内的综合换热能力; 另一方面, 对流换热系数 h 是一个经验系数, 它简化了流体流速、流体物性和通道几何参数等不确定性, 其应用条件受到换热结构复杂度的限制^[20], 不具有普适性.

因此, 对于流体域内的对流传热问题, 有必要探索描述流体流动及传热性能的通用热阻表达式, 扩展现有热阻网络模型的适用范围, 归纳出广义的热阻网络建立方法, 为工业领域广泛涉及的宏观流动传热过程提供指导. 本文正是基于这一想法, 从能量方程出发, 试图开展相关的探索与尝试.

2 对流热阻概念提出及热阻网络模型构建

假设不可压缩牛顿流体、常物性、忽略黏性耗散、忽略热辐射、忽略内热源的稳态传热问题, 在直角坐标系下的二维能量方程为

$$\rho c_p \left(\frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

其中, ρ 为密度, c_p 为比热容, u 为速度, T 为温度, λ 为导热系数. 等式右边为扩散项(导热项), 等式左边为对流项. 能量方程中的扩散项对应导热热阻(即假定流体静止不动时的导热热阻, 只取决于流体物性参数及单元体几何参数). 受此启发, 引入对流热阻的概念, 认为其表示流体在流动传热过程中由于流动所引起的额外影响, 并与能量方程中的对流项相对应.

2.1 局部导热热阻与对流热阻推导

以下推导是建立在空间的速度场和温度场唯一确定的条件下进行的. 以笛卡儿坐标系中固定在空间位置的流体点为分析对象, 通过该流体点的热流量有导热热流量 Φ_{cond} 和对流热流量 Φ_{adv} , 如图1所示.

根据傅里叶导热定律, 在 x 方向, 通过 $x=x$ 表面的热流量为

$$\Phi_{\text{cond},x} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x dy. \quad (2)$$

根据式(2), 按照面积热阻定义(温差和热流密度的比值), 可得 x 方向上的面积导热热阻为

$$Rt_{\text{cond},x} = \frac{-dT_x}{\Phi_{\text{cond},x}/dy} = \frac{-dT_x}{-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x}. \quad (3)$$

这里值得一提的是, 对于导热问题, 温度降低方向为热流方向, 而温度降低方向与温度梯度方向相反, 故需要在分子的 dT_x 前添加负号. 当网格划分足够细时, 偏微

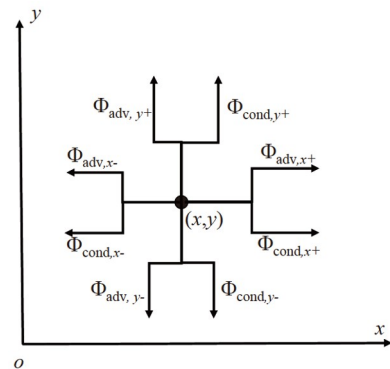


图1 二维直角坐标系中热流量示意图

Figure 1 Heat transfer rate in a two-dimensional rectangular coordinate system.

分约等于微分, 故式(3)可以简化为

$$Rt_{\text{cond},x} = \frac{dx}{\lambda}. \quad (4)$$

同理可得y方向上的面积导热热阻, 并可统一表达为如下形式:

$$Rt_{\text{cond},x_i} = \frac{dx_i}{\lambda}, \quad (5)$$

其中, x_i 代指与热阻方向相同的方向.

下面讨论流体域内的面积对流热阻. 与导热阶段的封闭系统不同, 对流不是封闭系统, 由热对流导致的热流量为流入焓流量的变化量. 在x方向, 通过 $x=x$ 表面的焓流量:

$$H_x = \rho c_p u T dy. \quad (6)$$

因此流体对流的热流量 Φ_{adv} 即焓流量 H 的变化量:

$$\Phi_{\text{adv},x} = dH_x = \rho c_p d(uT) dy. \quad (7)$$

可得x方向上的面积对流热阻, 即温差和热流密度的比值为

$$Rt_{\text{adv},x} = \frac{-dT_x}{\Phi_{\text{adv},x}/dy} = \frac{-dT_x}{\rho c_p d(uT)} = -\frac{dT_x/dx}{d(uT)/dx} \cdot \frac{1}{\rho c_p}. \quad (8)$$

同理可得y方向上的面积对流热阻, 并可统一表达成如下形式:

$$Rt_{\text{adv},x_i} = -\frac{dT_{x_i}/dx_i}{\frac{\partial(u_i T)}{\partial x_i}} \cdot \frac{1}{\rho c_p}. \quad (9)$$

根据面积对流热阻的推导结果, 可以发现当面积热阻赋值到具体点时, 且当速度、温度确定时, 热阻场为唯一确定. 此外, 还发现面积对流热阻的值不仅仅与结构和材料物性有关, 还与当前点与临近点的温度和速度有关, 也就是说, 面积对流热阻是一个与流动传热状态有关的量. 当速度方向与温度梯度方向相同时, 局部面积对流热阻值为负, 称为负热阻. 在电学中, 也存在负电阻的概念^[21], 它代表一种有源元件, 可以中和正电阻. 它在LC振荡电路和负阻抗缓冲器的设计中起着一定的作用, 其串并联等效电阻的计算方法与正电阻的计算方法相同.

2.2 热阻网络模型构建

根据2.1节推导所得的导热热阻与对流热阻公式, 可知当速度为0时, 面积对流热阻趋近于无穷大, 面积对流热阻远远大于面积导热热阻, 此时为纯导热问题, 对流可以忽略不计; 当速度趋近于无穷大时, 面积对流热阻趋近于0, 面积对流热阻远远小于面积导热热阻, 此时导热相比于对流可以忽略不计; 而当面积对流热阻与面积导热热阻大小相当时, 传热过程中热对流和热传导都必须考虑在内, 因此, 建立如图2所示的面积

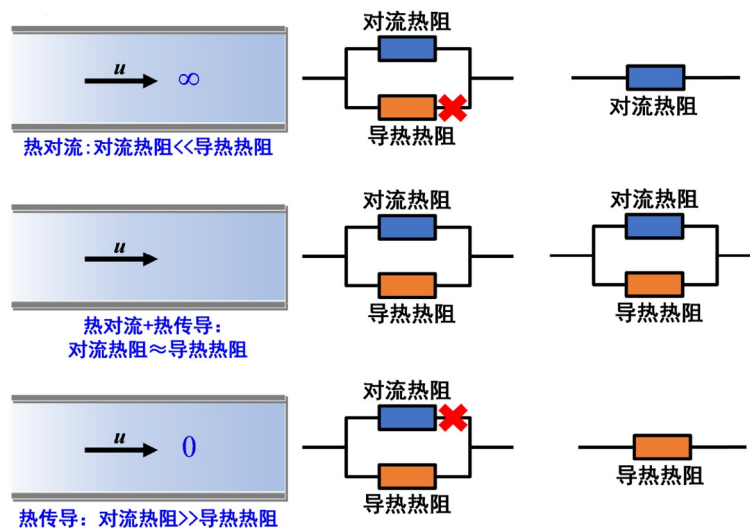


图 2 (网络版彩图) 流体域内对流-导热热阻并联关系示意图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of conduction-advection area thermal resistance in parallel in the fluid domain.

导热热阻与面积对流热阻并联的热阻网络。

如图2所示, 当速度为0时对流热阻支路相当于断路, 而当速度趋近于无穷大时, 对流热阻支路相当于短路, 可以视为导热热阻支路断路, 从而将热传导和热对流问题从热阻的角度进行了统一。

2.3 总体热阻的概念提出

局部面积导热热阻和局部面积对流热阻可以清晰地判明局部位置的流动传热能力大小, 但流体域内整体流动传热性能的优劣却无法很好地评价, 因此本节提出了流体域内 x 和 y 两个方向上的总体简化面积热阻。按照2.1节所述面积热阻的概念, 热阻场应为连续, 这里为了直观地表示热阻的分布, 借用了微元体的概念。如图3所示, 热阻网络中 x 方向的总体简化面积热阻计算方法为: 将 x 方向上同一 y 值的热阻串联, 再将不同 y 值串联后的热阻并联; 同理, y 方向的总体简化面积热阻计算方法为: 将 y 方向上同一 x 值的热阻串联, 再将不同 x 值串联后的热阻并联, 写作

$$\frac{1}{R_{t_{\text{total},x}}} = \sum_j \frac{1}{\sum_i |R_{t_{x,ij}}|}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{R_{t_{\text{total},y}}} = \sum_i \frac{1}{\sum_j |R_{t_{y,ij}}|}. \quad (11)$$

通过计算 x 和 y 方向上的总体简化面积热阻, 可以实现流体域内热阻场的量化评价, 用于分析、评价、诊断传热过程, 为传热过程的优化指明方向。

3 应用举例

流体域内的流动换热问题以强制对流问题最为典型, 本节中以左侧低温流体流入被壁面加热的强制对流问题为例进行分析。

以空气为流动介质, 冷流体($T=283.15\text{ K}$)以固定速度($u=1.0\text{ m/s}$)从左侧流入, 被通道上下壁面加热($T=293.15\text{ K}$), 并从右侧流出的强制对流问题为例, 右侧设置0 Pa压力出口边界。空气的热物性参数如表1所示。计算得到雷诺数 $Re=205$, 基于有限体积法和层流模型计算得到稳态条件下的速度场与温度场分布如图4所示, 另外数值计算的边界条件也在图4中进行了表示。分别计算 89×890 , 127×1270 , 180×1800 , 254×2540 和 360×3600 网格数量的温度场和速度场, 经过网格无关性验证, 发现当网格数量大于 180×1800 后, 宏观参数随网格数量变化不大。

根据前述面积对流热阻与面积导热热阻的公式, 计算得到 180×1800 网格数量下 x 和 y 方向上的面积对流热阻场分布如图5所示, 根据面积对流热阻的定义式可知, 当温度场和速度场不随网格数量变化有明显变化的情况下, 面积对流热阻不会发生明显变化。由对流引起的热流密度如图6所示。由图4可知, 低温流体从左侧流入通道, 并沿程逐渐升温, 流道内部各点流体均主要沿 x 正方向流动, 且流场和温度场分布均呈现明显入口区和充分发展区分布。图6(a)为 x 方向的对流热流密度 $q_{\text{adv},x} = \Phi_{\text{adv},x} / dy = \rho c_p d(uT)$ 。在入口区通道两侧和充分发展段热流方向与温度降低方向相反, 故面积对流热阻为负。根据面积对流热阻的定义式, 对于

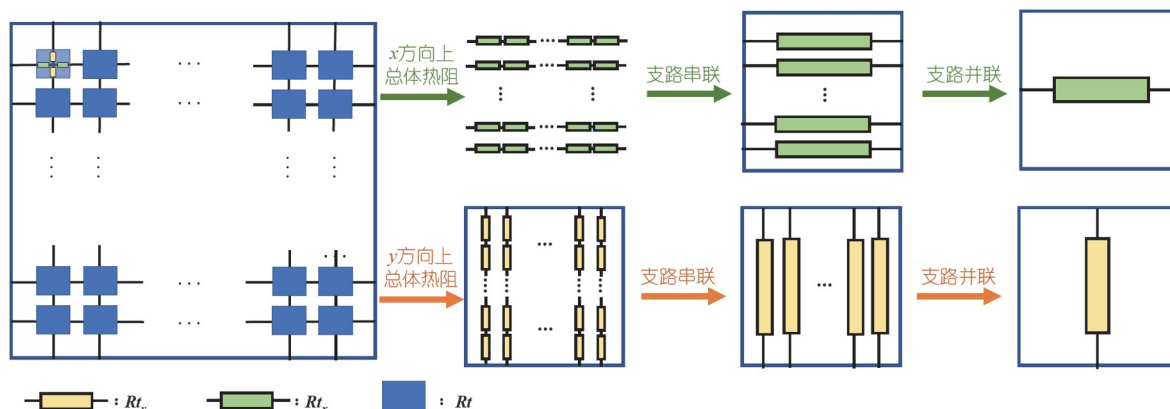


图3 (网络版彩图)简化总体面积热阻计算示意图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of simplified overall area thermal resistance calculation.

表 1 空气的热物性参数及通道尺寸

物性参数	数值大小
密度 (kg/m ³)	1.225
比热 (J/(kg K))	1006.43
导热系数 (W/(m K))	0.0242
动力黏度 (kg/(m s))	1.79×10 ⁻⁵
通道尺寸 (m)	0.03×0.003

沿坐标轴方向温度降低的情况下, 热流密度为负时“负热阻”出现. 这相当于在坐标轴正方向上引入“热源”或在坐标轴负方向上引入“热汇”, 使得热流方向与温度降低方向相反.

整体上面积对流热阻的绝对值是沿x正方向逐渐升高的, 这表明通道内的对流传热过程主要发生在入口段. 此外, 从图5所示的x方向面积对流热阻分布图中可以发现, 边界层附近和通道中心的面积对流热阻

绝对值较小, 而在垂直流动方向存在热阻绝对值很大的点(虚线内部对角线填充区域). 这是因为设定上下壁面为定温边界条件, 理论上热阻为0; 而通道中心流速快, 热流量大, 热阻小, 因此垂直流动方向(y方向)的从通道中心到壁面之间一定存在一个x方向面积对流热阻很大的值.

图6(b)为y方向上单位控制体内的对流热流密度 $q_{adv,y} = \Phi_{adv,y} / dx = \rho c_p d(uT)$. 可以发现图5所示的y方向面积对流热阻在入口段区域面积对流热阻阻值均较小, 且面积对流热阻沿x正方向呈现逐渐升高的趋势, 即通道内y方向的对流传热过程也主要发生在入口段和充分发展段前段中心区域. 这是由于沿流体流动方向, 边界层逐渐增厚, 边界层内主要传热方式为热传导, 面积对流热阻值理论上趋于无穷大而导致的. 相似地, 综合x和y方向上面积对流热阻分布和对流热流密度分布图, 可以归纳出负热阻的物理意义: 在坐标轴的正方向存在“热源”或在坐标轴的负方向存在“热

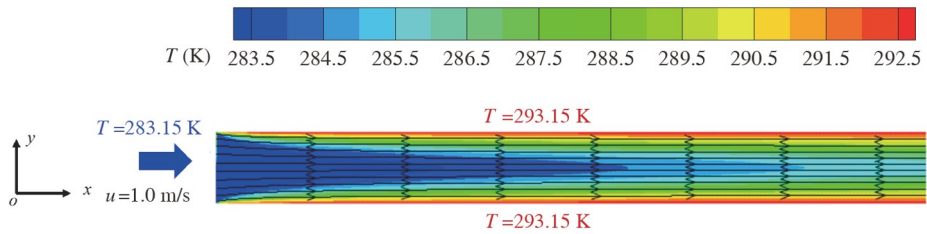


图 4 (网络版彩图)强制对流稳态温度和速度场分布
Figure 4 (Color online) Distribution of steady-state temperature and velocity fields for forced convection.

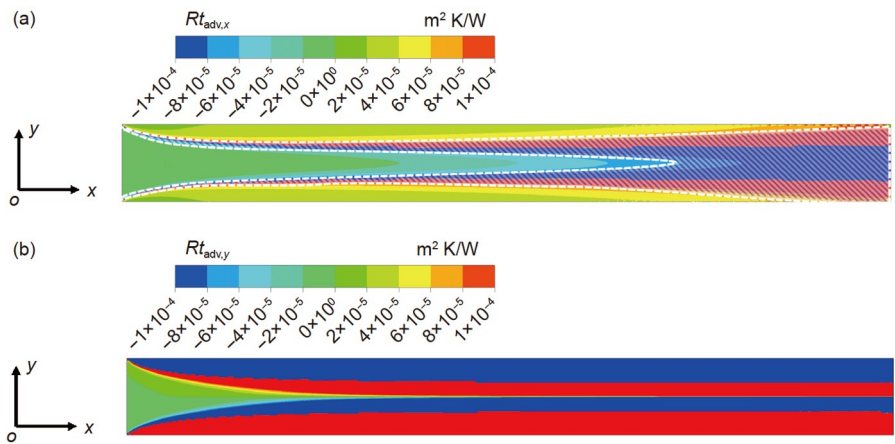


图 5 (网络版彩图)强制对流问题的x (a)和y (b)方向面积对流热阻分布
Figure 5 (Color online) Distribution of area-averaged advection area thermal resistance in x (a) and y (b) directions for forced convection.

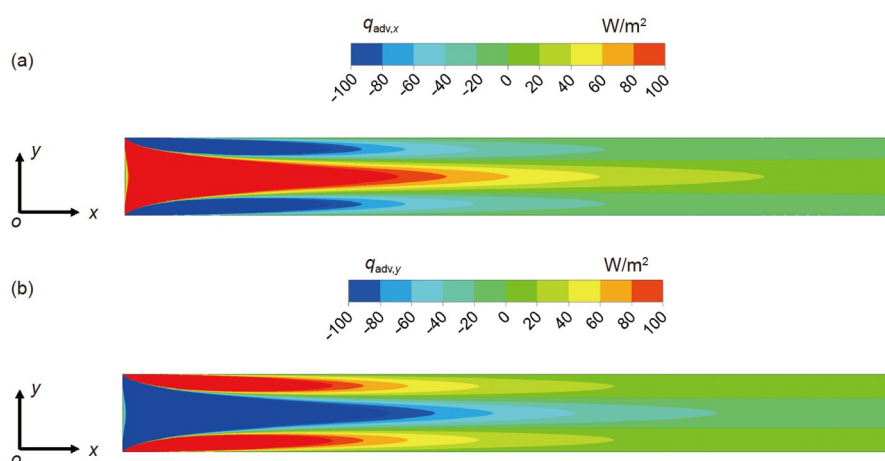


图6 (网络版彩图)强制对流问题的x方向(a)和y方向(b)的对流热流密度

Figure 6 (Color online) Distribution of advection heat flux in x (a) and y (b) directions for forced convection.

汇”,这与电学中的负电阻意义一致。

根据2.3节提出的总体简化热阻的概念,计算得到当网格数量为 180×1800 时, x 方向的总体面积热阻为 $7.81 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ K/W}$, y 方向的总体面积热阻为 $5.87 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ K/W}$,相比之下 y 方向的总体面积热阻小于 x 方向的总体面积热阻,即 y 方向的传热能力相比于 x 方向的对流传热能力强。因此,在强制对流问题中,本文提出的面积对流热阻概念以及基于热阻的分析方法与传统的分别分析温度场和流场的方法相比,可以得到相似的结论,并能够更直观地评价流体域内传热能力的强弱。

4 结论

本文提出了流体域内局部导热及对流热阻的概

念,以及可以描述热对流问题的多维导热-对流并联热阻分析方法,通过强制对流算例说明了其实用性,得到以下结论。

(1) 从能量方程出发,提出了流体域内局部导热及对流热阻的概念,推导了二维流体域内相应的面积导热及面积对流热阻表达式,并论证了二者之间的并联关系。

(2) 基于所提出的导热-对流热阻并联网路,获得了强制对流问题的热阻场,提出了总体面积热阻的概念,可用于直观评价流体域内传热能力的强弱。

(3) 基于热阻网络可获得相应的热阻场,用于分析、评价、诊断传热过程,并为传热过程的精细调控指明方向。

本文提出的热阻分析方法还需要进一步完善,并将热阻网络进一步拓展到非稳态、有内热源以及相变等系列问题的研究。

参考文献

- 1 Qi C Z, Chen L G, Xie S Z, et al. Effect of heat transfer on the performance of thermal Brownian heat pump (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2023, 53: 385–394 [齐丛正, 陈林根, 谢尚珍, 等. 传热对热布朗热泵性能的影响. 中国科学: 技术科学, 2023, 53: 385–394]
- 2 Liu W. Scientifically reducing industrial energy consumption and efficiently improving energy utilization (in Chinese). Thepaper, 2022-01-23, https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_16417665 [刘伟. 科学降低工业能耗, 高效提升能源利用. 澎湃新闻, 2022-01-23, https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_16417665]
- 3 Bejan A. Entropy generation minimization, exergy analysis, and the constructal law. *Arab J Sci Eng*, 2013, 38: 329–340
- 4 Chen L, Wu C, Sun F. Finite time thermodynamic optimization or entropy generation minimization of energy systems. *J Non-Equilib Thermodyn*, 1999, 24: 327–359
- 5 Guo Z Y, Liang X G, Zhu H Y. Entranspy—A physical quantity that describes the ability of an object to transfer heat (in Chinese). *Prog Nat Sci*,

- 2006, 16: 1288–1296 [过增元, 梁新刚, 朱宏晔. 焓——描述物体传递热量能力的物理量. 自然科学进展, 2006, 16: 1288–1296]
- 6 Chen X, Zhao T, Zhang M Q, et al. Entropy and entransy in convective heat transfer optimization: A review and perspective. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 137: 1191–1220
- 7 Guo Z Y. Entransy · Thermomass energy · Relativistic kinetomass energy (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 1137–1154 [过增元. 焓 · 热质能 · 相对论性动质能. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1137–1154]
- 8 Su C J, Zhao T, Guo Z Y. Generalized entransy dissipation and its application in heat conduction optimizations with arbitrary boundary conditions. *Int J Heat Mass Transfer*, 2023, 216: 124534
- 9 Tao W Q, He Y L. Field synergy principle: Its scientific beauty and relationship with entransy theory (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 1155–1165 [陶文铨, 何雅玲. 场协同原理: 她的科学之美及与焓的关系. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1155–1165]
- 10 Guo Z Y. Physical mechanism of convective heat transfer and its control: Coordination of velocity field and heat flow field (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2000, 45: 5 [过增元. 对流换热的物理机制及其控制: 速度场与热流场的协同. 科学通报, 2000, 45: 5]
- 11 Tao W Q, He Y L, Chen L. A comprehensive review and comparison on heatline concept and field synergy principle. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 135: 436–459
- 12 Liu W, Liu Z C, Guo Z Y. Analysis of physical quantity coordination and heat transfer enhancement in convective laminar flow field (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 1779–1785 [刘伟, 刘志春, 过增元. 对流换热层流流场的物理量协同与传热强化分析. 科学通报, 2009, 54: 1779–1785]
- 13 Chen Q, Fu R H, Xu Y C. Electrical circuit analogy for heat transfer analysis and optimization in heat exchanger networks. *Appl Energy*, 2015, 139: 81–92
- 14 Zhao T, Chen X, He K L, et al. Heat current method for integrated analysis and optimization of thermodynamic systems (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 1251–1274 [赵甜, 陈曦, 贺克伦, 等. 热力系统整体分析和优化的热量流法. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1251–1274]
- 15 Cruz J, Amaya I, Correa R. Optimal rectangular microchannel design, using simulated annealing, unified particle swarm and spiral algorithms, in the presence of spreading resistance. *Appl Therm Eng*, 2015, 84: 126–137
- 16 Cheng X T, Zhang L F, Liang X G. Applicability analyses of equipartition principles in heat exchanger optimization (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 1231–1244 [程雪涛, 张龙飞, 梁新刚. 换热器优化中均分原则的适用性分析. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1231–1244]
- 17 Han Z X, Guo J F, Huai X L. Optimization method of a novel airfoil fin heat exchanger based on the entransy dissipation theory (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 1219–1230 [韩增孝, 郭江峰, 淮秀兰. 基于焓耗散理论的新翼型换热器优化方法研究. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1219–1230]
- 18 Tang W H, Wu Q H, Richardson Z J. A simplified transformer thermal model based on thermal-electric analogy. *IEEE Trans Power Deliver*, 2004, 19: 1112–1119
- 19 Yang S M, Tao W Q. Heat Transfer (in Chinese). 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006 [杨世铭, 陶文铨. 传热学. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006]
- 20 Karwa R. Empirical Relations for Forced Convection Heat Transfer. In: Heat and Mass Transfer. Berlin: Springer, 2017
- 21 Qian B S. Negative Resistance Device Negative Resistance Circuit and Its Application (in Chinese). Tianjin: Tianjin University Press, 1993 [钱博森. 负阻器件负阻电路及其应用. 天津: 天津大学出版社, 1993]

Analysis methodology of thermal conduction-advection resistance in parallel during heat transfer in the fluid domain

WANG QiuWang, LI XiangXuan, WANG Ting, MA ShiHong, ZHANG Bo & MA Ting

Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

The thermoelectric analogy method and thermal resistance are widely used to solve heat transfer problems to simplify the analysis process of complex heat transfer networks. Traditional thermal resistance is usually applicable to one-dimensional steady-state heat conduction problems. However, heat convection is always involved in engineering applications, such as energy power, petrochemicals, and aerospace. To solve this problem, the concepts of multidimensional thermal conduction-advection parallel resistance analysis in the fluid domain and overall thermal resistance are proposed in this study, and a thermal resistance network is constructed. The area-averaged advection thermal resistance in the fluid domain is closely related to the magnitude and direction of the temperature gradient and velocity. The higher the velocity is, the smaller the area-averaged advection thermal resistance. Simultaneously, “negative thermal resistance” exists in the area-averaged advection thermal resistance, which is equivalent to a “heat source” or “heat sink” in the fluid domain. Results showed that the thermal conduction-advection parallel resistance network plays an important role in the analysis of the flow and heat transfer process and in guiding the regulation and optimization of the heat transfer process.

thermoelectric analogy method, local thermal resistance, advection thermal resistance, heat transfer regulation, parallel thermal resistance

doi: [10.1360/SST-2023-0310](https://doi.org/10.1360/SST-2023-0310)