

最小焓耗优化在椭圆管换热中的应用

贾 晖 刘志春 刘 伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要 本文以焓耗最小作为目标, 以流动过程中的功率消耗一定作为约束条件, 结合能量守恒方程和质量守恒方程得到了对流换热的优化场方程。通过数值计算, 对优化场方程下的椭圆管对流换热问题进行了研究。结果表明, 椭圆管优化速度场为多纵向涡结构, 在这种优化场下换热能力增加的幅度远大于阻力增加的幅度, 证明了以焓耗最小作为目标的优化理论能够用于指导强化换热元件的设计。

关键词 焓耗; 功率消耗; 优化; 纵向涡

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2012)06-1002-03

Convective Heat Transfer Optimization Based on Minimum Entransy Consumption in The Elliptic Tube

JIA Hui LIU Zhi-Chun LIU Wei

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract By setting entransy consumption as optimization objective and power consumption as constraint condition, optimized field equation coupled with energy conservation equation and mass conservation equation for convective heat transfer are deduced. Numerical investigations for convective heat transfer in an elliptic circular tube based on optimized governing equations are conducted. The results show that there exist longitudinal swirl flows with multi-vortexes in the tube, which leads to heat transfer enhancement at relatively small flow resistance. The present analysis indicates that the investigated optimization method is useful in design of heat transfer enhancement.

Key words entransy consumption; power consumption; optimization; longitudinal swirl

0 前 言

强化传热的目的是为了促进和适应高热流^[1,2], 为了达到这一工程目的, 研究者们大多只关注最终的结果是否强化以及强化了多么而往往忽略了这么一个事实, 即传热强化增加的幅度小于阻力增加的幅度。因此, 在当今能源问题严重的局面下, 寻求高效低阻的强化传热元件成为了科研工作者孜孜以求的目标。传热整体性能的优劣决定于传热过程局部性能的好坏, 寻求传热过程的优化^[3]具有重大意义。然而当前对于传热过程的优化主要停留在经验和试验的基础上, 亟待理论的指导。

过增元等^[4]在研究二维层流对流换热的局部行为与整体性能之间的关系时, 提出了对流换热场协同原理。他认为, 流体对流换热的性能取决于其速度场与热流场的协同, 在相同的速度和温度边界条件下, 它们的协同程度越好, 则换热强度越高。因此, 对流换热性能的好坏取决于流场的组织, 场协

同理论的提出指出了一条优化传热的途径, 即在流场中找出一种优化目标使之达到极值从而实现全场协同。夏再忠^[3]用热势损失作为传热优化的评价目标, 用黏性耗散表示机械能损失, 在机械能损失一定的条件下通过泛函分析得到了最优速度场方程, 但方程中存在一未知标量项。孟继安^[5,6]在文献^[3]的基础上, 用拉格朗日乘子构造泛函变分求出了场协同方程, 确定了方程中各项的意义, 并由此设计了两种具有优良综合换热性能的纵向涡强化换热管。过增元等^[7]提出了描述物质传递热量能力的新物理量—焓, 并提出了焓耗散极值原理, 分别为温度表述的最小焓耗散原理和热流表述的最大焓耗散原理; 基于焓耗散极值原理, 以过程的黏性耗散一定作为约束, 对传热问题乃至整个输运现象进行了优化, 得到了卓有成效的成果^[8-12]。

流体外掠管束换热在制冷空调用换热器、锅炉及暖风机等专用设备中特别常见。而圆柱型管束换

收稿日期: 2011-12-13; 修订日期: 2012-05-15

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51036003; No.51021065); 教育部博士点基金 (No.20100142110037)

作者简介: 贾 晖 (1986-), 男, 湖北荆门人, 博士研究生, 主要从事强化传热方面的研究。

热效果好、制造工艺简单等优点使得其在设备中应用最为普遍。但实践证明, 椭圆管束叉排对流换热时流动阻力降低, 换热效果更为显著。因此, 椭圆管换热器的研究开发日益受到人们的重视。国内外很多学者对有限空间内管排布置的优化以及椭圆管换热开展了不同程度的研究, 然而大都针对椭圆管管外流动问题, 对于管内的强化及其优化很少涉及, 文献 [5] 在黏性耗散一定的情况下使得全场焓耗最小对于椭圆管管内流动问题进行了一定程度的优化, 并用 1/4 周期边界计算了椭圆管管内优化流场。本文在功耗一定的情况下使得全场焓耗最小, 对椭圆管管内流动进行了一定的优化分析。

1 层流对流换热最小焓耗优化原理^[13]

焓耗最小意味着传热能力的损失最小^[7], 则可用焓耗的高低表征对流换热过程强化的程度:

$$e_h = \lambda(\nabla T)^2 \quad (1)$$

而流体在流动过程中, 所消耗的泵功不但要使得流体克服黏性阻力, 还要克服流体的动量损失, 因此流动过程中的功率消耗可表示为:

$$W_p = -U \cdot \nabla p = U \cdot [\rho(U \cdot \nabla)U - \mu \nabla^2 U] \quad (2)$$

由式 (2) 可以看到, 功耗只和速度场有关; 而对于对流换热过程, 其换热强度和阻力特征均和速度分布有关, 于是如何在功耗一定的限制下找到最优的速度场, 使其满足焓耗最小, 则可实现对流换热过程的优化, 这是一个典型的泛函变分问题, 具体过程如下所述:

- 1) 优化对象: 速度场 U
- 2) 优化目标: 焓耗取得极值, 用变分表示为:

$$\delta \int_{\Omega} e_h dV = 0 \quad (2)$$

- 3) 约束条件:
功耗一定:

$$\int_{\Omega} W_p dV = \text{const} \quad (4)$$

质量守恒:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (5)$$

能量守恒:

$$\lambda \nabla^2 T - \rho c_p U \cdot \nabla T = 0 \quad (6)$$

- 4) 边界条件:

边界上速度一定, 用变分表示为:

$$\delta U|_{\Gamma} = 0 \quad (7)$$

边界上黏性切应力一定^[14], 用变分表示为:

$$\delta(\mu \nabla U)|_{\Gamma} = \delta(\nabla U)|_{\Gamma} = 0 \quad (8)$$

边界上为等壁温或者等热流, 用变分表示为:

$$\delta T|_{\Gamma} = 0 \quad \text{or} \quad \delta(\lambda \nabla T)|_{\Gamma} = \delta(\nabla T)|_{\Gamma} = 0 \quad (9)$$

利用拉格朗日乘子法构造泛函:

$$J = \int_{\Omega} \{ \lambda(\nabla T)^2 + C_0 U \cdot [\rho(U \cdot \nabla)U - \mu \nabla^2 U] + A \nabla \cdot U + B(\lambda \nabla^2 T - \rho c_p U \cdot \nabla T) \} dV \quad (10)$$

式中, C_0 为常数, A 和 B 为未知标量函数。对式 (10) 进行变分并使之为零, 得到:

$$\rho[U \cdot \nabla U + U \times (\nabla \times U)] - 2\mu \nabla^2 U - \frac{\nabla A}{C_0} - \frac{\rho c_p B \nabla T}{C_0} = 0 \quad (11)$$

$$-2\lambda \nabla^2 T + \rho c_p U \cdot \nabla B + \lambda \nabla^2 B = 0 \quad (12)$$

$$(2\lambda \nabla T - \rho c_p U B - \lambda \nabla B) \delta T + \lambda B \delta(\nabla T) = 0 \quad (13)$$

$$(\rho C_0 U \cdot U + C_0 \mu \nabla U) \cdot \delta U +$$

$$A \delta U - C_0 \mu U \cdot \delta(\nabla U) = 0 \quad (14)$$

由动量守恒方程:

$$\rho(U \cdot \nabla)U = F - \nabla p + \mu \nabla^2 U \quad (15a)$$

也可写作:

$$\rho U \left(\frac{U^2}{2} \right) - \rho U \times (\nabla \times U) = F - \nabla p + \mu \nabla^2 U \quad (15b)$$

其中, F 为体积力。将方程 (11) 与动量方程 (15) 类比^[15], 若令:

$$\frac{\nabla A}{C_0} - \rho U \times (\nabla \times U) = -\nabla p - \mu \nabla^2 U \quad (16)$$

则得:

$$\rho U \cdot \nabla U = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + \frac{\rho c_p B}{C_0} \nabla T \quad (17)$$

其中, 未知标量 B 由控制方程 (12) 和边界条件 (13) 确定。通过分析优化场方程 (17) 可以看到, 等号右边最后一项相当于在原有的动量方程中产生了一体积力项。这一体积力项的加入, 可使流体产生旋流, 且在功率消耗一定时, 使得传热过程中的焓耗最小。于是, 在满足方程 (16) 的特定条件下, 通过数值计算, 可以得到优化方程的一组特解。

2 椭圆管内层流对流换热优化场分析

椭圆管是管壳式换热器中常用的换热单元, 管内层流强化对流换热是一个有着广泛工业应用的问题。为了验证本文推导出的优化方程组的优化效果, 考虑直椭圆管计算模型^[5]: 椭圆管长轴 15 mm, 短轴 10 mm, 总长 1800 mm, 其中第一段为进口段 1300

mm, 第二段为实验段 300 mm, 第三段为出口段 200 mm; 管内流动介质为常物性的水, 进口雷诺数为 400, 进口水温为 298 K, 进口段和实验段为 310 K 的等壁温加热。

数值计算的相关控制方程为连续性方程、能量守恒方程和优化场方程 (17), 其中方程 (17) 中的未知标量 B 的控制方程和边界条件分别为式 (12) 和式 (13)。

C_0 为泛函中与功率消耗对应的拉格朗日系数, 因此一定的 C_0 代表着一定的功耗大小。本文在不同的功耗下进行了计算, 以实验段正中横截面作为分析对象。图 1~图 3 为添加优化方程后在各种功率消耗下的截面温度场和流场图。计算结果表明, 对于给定的进口雷诺数, 添加优化方程后将得到多纵向涡结构的流场。在本文的雷诺数为 400 的情况下, 随着功率消耗增加, 流场结构由最初的 4 涡逐渐发展并稳定成 6 涡。然而, 功率消耗并不是任意的, 只有在一定范围内才能获得对称的多涡结构流场。相对于不添加优化方程的充分发展的椭圆管内层流换热过程, 和圆管光管理论值相比 ($f_s = 0.16, Nu_s = 3.66$), 添加优化方程后得到的优化流场 Nu 数增加 55%~182%, 阻力系数增加 5%~10%, 因此优化流场具有优越的换热和阻力特性。



图 1 $W_p = 8.87 \times 10^{-6}$ W 时的截面温度场和流场
Fig. 1 The temperature field and velocity field ($W_p = 8.87 \times 10^{-6}$ W)

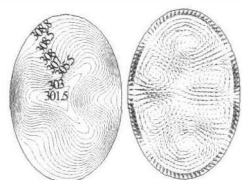


图 2 $W_p = 9.24 \times 10^{-6}$ W 时的截面温度场和流场
Fig. 2 The temperature field and velocity field ($W_p = 9.24 \times 10^{-6}$ W)

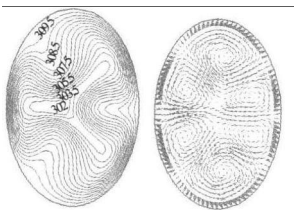


图 3 $W_p = 9.51 \times 10^{-6}$ W 时的截面温度场和流场
Fig. 3 The temperature field and velocity field ($W_p = 9.51 \times 10^{-6}$ W)

3 结 论

1) 在流动过程中功率消耗一定的约束下, 以焓耗最小作为目标, 利用拉格朗日乘子构造广义泛函, 通过变分得到了对流换热的优化场方程。

2) 利用数值计算解出了椭圆管管内流动状态下添加本文提出的优化体积力后的流场。在雷诺数为 400 的情况下, 满足本文目标和约束的优化流场为核心流区域的多纵向涡流型, 多涡流场相对光管而言其换热能力有了 55%~182% 的提高而阻力系数只有不到 10% 的提高, 换热能力增加的幅度远大于阻力增加的幅度, 因此本文提出的优化理论能够很好地指导高效低阻的强化传热元件的设计。

参 考 文 献

- [1] Bergles A E. Handbook of Heat Transfer Applications [M]. New York: McGraw-Hill, 1985
- [2] Bergles A E. Heat Transfer Enhancement—the Encouragement and Accommodation of High Heat Fluxes [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1997, 119: 8-19
- [3] XIA Zaizhong. Augmentation and Optimization on Heat Conduction and Convection Processes [D]. Beijing: Tsinghua University, 2001
- [4] GUO Z Y, LI D Y, WANG B X. A Novel Concept for Convective Heat Transfer Enhancement [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1998, 41: 2221-2225
- [5] MENG Ji'an. Enhanced Heat Transfer Technology of Longitudinal Vortices Based on Field-Coordination Principle and its Application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003
- [6] MENG J A, LIANG X G, LI Z X. Field Synergy Optimization and Enhanced Heat Transfer by Multi-Longitudinal Vortexes Flow in Tube [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2005, 48: 3331-3337
- [7] GUO Z Y, ZHU H Y, LIANG X G. Entransy—a Physical Quantity Describing Heat Transfer Ability [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2007, 50: 2545-2556
- [8] CHEN Q, REN J X, GUO Z Y. Field Synergy Analysis and Optimization of Decontamination Ventilation Designs [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2008, 51: 873-881
- [9] CHEN Q, REN J X, MENG J A. Field Synergy Equation for Turbulent Heat Transfer and its Application [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2007, 50: 5334-5339
- [10] CHEN Q, WANG M, PAN N, et al. Optimization Principles for Convective Heat Transfer [J]. Energy, 2009, 34: 1199-1206
- [11] WU J, LIANG X G. Application of Entransy Dissipation Extremum Principle in Radiative Heat Transfer Optimization [J]. Sci China Ser E-Tech Sci, 2008, 51: 1306-1314
- [12] Chen Q, Yang K D, Wang M R, et al. A New Approach to Analysis and Optimization of Vaporative Cooling System I: Theory [J]. Energy, 2010, 35: 2448-2454
- [13] Liu W, Liu Z C, Jia H, et al. Entransy Expression of the Second Law of Thermodynamics and its Application to Optimization in Heat Transfer Process [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54: 3049-3059
- [14] YANG Donghua. Principles and Engineering Applications of Irreversible Thermodynamics [M]. Beijing: Science Press, 1989
- [15] CHEN Q, REN J X, GUO Z Y. Fluid Flow Field Synergy Principle and its Application to Drag Reduction [J]. Chin Sci Bull, 2008, 53: 1-5