

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.04.012

场协同理论及其在脉动流传热技术中的应用前景

杨志超, 杨臧健, 钟英杰*

(浙江工业大学 能源与动力工程研究所, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对目前脉动流强化传热研究中的问题, 提出了将场协同理论应用于其机理研究。分析了现有脉动流强化传热问题的研究理论, 指出了现有理论的局限性。介绍了场协同理论, 阐述了其在研究脉动流强化传热问题中的优势。结合已有研究结果, 分析了场协同的观点应用于脉动流强化传热研究的可行性和应用前景。研究表明, 场协同理论是独立于具体技术之外的基本理论, 将其应用于脉动流强化传热机理研究是必要的和可行的, 得到的结论具有较好的普遍性, 对于脉动流强化传热技术的工程应用与理论研究具有指导意义。

关键词: 脉动流传热; 场协同理论; 强化换热

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)04-0435-04

Field synergy principle and its application prospect in pulsating heat convection

YANG Zhi-chao, YANG Zang-jian, ZHONG Ying-jie

(Institute of Energy and Power Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The field synergy principle was proposed to apply in the study on the mechanism of heat transfer enhancement in pulsating flow. Existing researches were reviewed and analyzed, and it shows that the results were defective and inconsistent. The field synergy principle and its advantage were presented. Combining with the existing research results, the feasibility and prospect of applying field synergy principle in the study on heat transfer enhancement in pulsating flow were investigated. The results show that the field synergy principle is a basic theory independent on the specific techniques, it is necessary and feasible to investigate the heat transfer enhancement in pulsating flow from the view point of field. The field synergy principle is instructive and significant or promoting the application of pulsating flow in heat transfer enhancement.

Key words: pulsating heat convection; field synergy principle; heat transfer enhancement

0 引言

世界性能源危机的出现, 使节能技术成为可持续发展的关键科技。强化传热技术由于能使各种换热设备的效率提高及重量、体积减小, 对节能降耗和经济可持续发展起着至关重要的作用。近年来, 我国科研技术人员在理论和实验研究的基础上, 发展了许多强化换热新技术, 如交叉缩放椭圆管、不连续双斜内肋管、螺旋槽管、螺旋凹槽管、内翅管、扭曲椭圆管

等。其中, 脉动流传热技术是一项能显著强化对流输运作用、提升传热效果的高效节能手段, 该技术通过流体脉动或传热管振动, 可以清除换热面上沉积的污垢, 降低污垢热阻, 提高换热器性能和寿命, 在电子元件的冷却、汽车涡轮增压、海洋环境原子能利用^[1]等领域有广泛的应用。对于脉动流强化传热的机理进行分析后发现, 现有结论的得出存在局限性, 是特定条件下的机理研究, 各国学者对各特定参数的研究较多, 而对各参数间内在联系的研究较少。对场协同理论

收稿日期: 2012-11-27

作者简介: 杨志超(1989-), 男, 浙江永康人, 主要从事强化传热等方面的研究。E-mail: wings2502@qq.com

通信联系人: 钟英杰, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: zhong_yingjie@zjut.edu.cn

进行研究后发现,场协同理论^[2]讨论的是在一定边界条件下什么样的速度场与温度梯度场能使对流换热的性能达到最优,这是独立于具体强化技术之外的基本理论问题,通过研究速度场与温度梯度场之间的协同,场协同理论对于脉动流传热技术的研究具有理论指导意义。

基于此,本研究主要探讨场协同理论及其在脉动流传热技术中的应用前景。

1 脉动流传热技术

脉动流是自然界和工程中常见的物理现象,如人体内的血液流动、容积式泵和往复式压缩机输出流体的流动等都属于脉动流。当流体与固壁间存在温差时,由于脉动流可引起流动和热边界层的变化从而影响换热,与其相关的流动和传热问题很早就引起了人们的关注。

在国外,早在1929年,Richadrson^[3]通过实验测得了圆管内脉动流的速度分布,发现速度分布存在“速度环效应”,即在壁面附近的流速大于管中心处的流速,整个截面的速度分布较稳态流动的速度分布更平坦。Uchida^[4]、Siege^[5]分别对圆管和平行平板通道内脉动流的速度分布进行了理论推导,得到了圆管和平行平板通道内脉冲流速度分布的解析解,证实了“速度环效应”的存在。由此,人们认为脉冲流动将使对流换热得到强化。Kim等人^[6]通过数值研究表明,在某一特定的脉动频率下,强化传热效果可以达到最大,定性的指出强化传热效率与脉动频率有关。D. X. Jin等人^[7]利用流场可视化技术为对脉动流进行了更精确的研究,试验中借助PIV粒子图像测速技术研究了在脉动流作用下,三角形槽道内漩涡产生、发展和脱离槽道的整个过程,发现当频率与漩涡在槽内振动的周期相匹配时,传热效果最好,证实了使传热效果最大化的最优频率的存在。Nishimura等人^[8]在实验中研究了影响传质效果的各种因素,发现脉动流可以有效强化传质过程,在最优脉动频率下传质效果最好。Lee等人^[9]的数值研究得到了与Nishimura等人同样的结论。Ghaddar^[10]利用数值模拟研究了脉动流强化传热的机理,随后Greiner^[11]通过实验验证了Ghaddar的结论,他的实验在 $Re=700$,20%的脉动分率下进行,指出在最佳脉动频率下,强化传热效果提高了160%。

在国内,西安交通大学何雅玲^[12]通过数值研究,讨论了雷诺数(Re),斯德鲁哈尔数(St),脉动振幅(A)等参数对凸块散热性能和通道中压力损失的影响。结果表明,脉动流加强了流体的扰动和掺混作用,增强了流体的传热能力,强化了凸块的散热。刘

建红等^[13]通过对脉动热管间协同耦合强化传热特性的实验分析,结果表明:从50℃起,耦合式脉动热管冷凝段出现振荡现象,整个换热器的传热过程由于两脉动热管间的脉动特性相互激励而得到强化。谢公南^[14]通过数值研究了周期性渐扩渐缩波纹通道内脉动流动与换热情况,计算考察了不同雷诺数、脉动频率以及振幅对通道内强化传热和压力损失的影响。贾宝菊^[15]对波壁管内脉动流场下的层流流动、质量传递强化进行了数值研究,并将得到的结果与已有的实验结果进行了比较,结果表明存在一个最佳斯德鲁哈尔数使得强化效果最好;李华^[16]在对脉动流强化传热机理进行了实验研究,发现在旺盛湍流状态下脉动传热可以实现较好的强化传热效果,所得实验结果中强化传热比最高可达40%。重庆大学高虹和刘娟芳^[17]利用Helmholtz共振腔产生脉动流进行强化传热试验研究,结果表明与稳定流相比,脉动流换热系数明显提高约10%~40%。

尽管人们对脉动流对流传热问题已经进行了长期、大量的研究,然而,脉动流属于典型的非线性瞬态过程,理论分析困难,模拟试验难度大,快速精准测量要求高。俞接成^[18]对有关脉动流对流传热有关文献的分析表明,脉动流对换热的影响还没有统一的结论。Pierre O.Charreyron^[19]、John E.Dec^[20]等总结了现有的脉动流强化换热机理,如表1、表2所示。

表1 Pierre O. Charreyron总结的脉动流强化传热机理

序号	脉动流强化传热机理名称(英文原文)
1	气穴作用(Cavitation)
2	预层流-湍流过渡区 (Anticipated Laminar-Turbulent Transition)
3	入口段效应(Entry Length Effect)
4	流(Streaming)

表2 John E. Dec等总结的脉动流强化传热机理

序号	脉动流强化传热机理名称(英文原文)
1	充分湍流条件过渡区 (Transition to Fully Turbulent Conditions)
2	声流(Acoustic Streaming)
3	入口效应(Entrance Effects)
4	减薄边界层(Stripping of The Boundary Layer)
5	半稳态流动(Quasi-Steady Flow)
6	增加湍流强度(Increased Turbulence Intensity)
7	回流伴随附加对流 (Additional Convection at Times of Flow Reversal)

表1中第4项“流”用于描述由惯性耦合效果形成的流体稳态循环,是平均压头对稳态运动的一种作用,当“流”速度分量与稳态流动分量相近时,“流”作用对传热产生影响。表2中第2项的“声流”是指脉动流动与声波传递方式同向,由此产生二次时均速度分

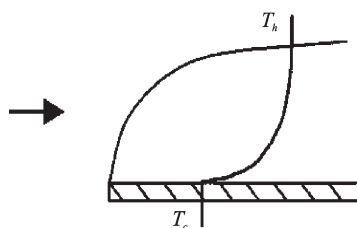
量,增加近壁处的速度,从而实现强化传热。表2中第5项“半稳态流动”认为,脉动流强化传热的原因是由于绝对速度的平均值比平均速度大。

虽然这些机理能够解释某些特定脉动传热过程,但不够完善。如“减薄边界层”无法解释俞接成等^[21]证明的脉动流对圆管不能强化换热的结论存在分歧;“回流”机理很难解释频率与传热间存在最佳值的现象;“流体共振”分析了频率对脉动传热的影响,却无法应用于大幅度脉动换热问题。由此可见,脉动流对换热的影响尚未清晰,已有的机理缺乏普遍性和相互间的关联性,不利于学术研究和工程设计。

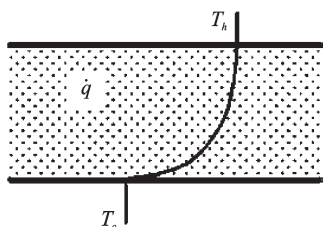
2 场协同理论

我国学者过增元等^[22]从速度场和温度场相互配合的角度重新审视对流换热的物理机制,将对流换热看成是具有内热源的导热,在此基础上提出了对流传热优化的场协同理论。

以二维平板层流边界层流动问题为例,平板边界层流动示意图如图1(a)所示,具有内热源的两平行平板间导热示意图如图1(b)所示。流体流经边界层中一元体时,将把热量留在元体中,起着热源的作用,所以它们的温度剖面形状很相似。



(a) 平板边界层流动示意图



(b) 具有内热源两平行平板间导热示意图

图1 平板边界层流动和具有内热源的两平行平板间导热示意图

将两种传热方式的能量方程进行比较:

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$-\dot{q} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2)$$

式(1)为层流边界层的能量守恒方程,式(2)为导热的能量守恒方程。从温度剖面的形状和能量方程的对比中发现,对流项可以看作源项,对流传热可以

比拟为具有内热源的导热问题。

将方程两边积分后得:

$$\int_0^{\delta_{t,x}} \rho c_p (U \cdot \nabla T) dy = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q_w(x) \quad (3)$$

把方程改写为矢量形式,然后再引入无因次变量,进行整理后可得无因次关系式:

$$Re_x Pr \int_0^1 (U \cdot \nabla T) dy = Nu_x \quad (4)$$

上述定性分析中可以看到,强化传热不仅与 Re 数、流体介质的物理特性有关,还与无因次积分值 $\int_0^1 (\vec{U} \cdot \nabla \vec{T}) dy$ 有关,说明减小速度矢量与温度梯度之间的夹角是强化对流换热的有效措施。这一思想被称为“场协同理论”。

王炯、陶文铨^[23]、田文喜^[24]等人对场协同理论进行了数值验证,结果表明:基于二维边界层流提出的场协同理论不仅适合于抛物型流动,同样适用于复杂的湍流回流流动。陶文铨等人^[25]指出,场协同理论可以将现有的关于强化单相对流换热的三种机理统一起来。针对这一观点,国内外学者对各种强化换热技术,如自旋流、振动圆管、脉冲流、混沌对流等进行了场协同分析,结果表明,强化单相对流换热就是要减小协同角,或者说要改善速度与温度梯度的协同程度。在速度场与温度场的基础上,何雅玲^[26]、Liu 等人^[27]进一步研究了速度场与压力场的协同,发现通过增大速度与压力梯度间的夹角,可以改善速度场与压力梯度场的协同性,减小压降的增大。研究结果表明,高效低阻强化换热技术的关键在于速度场、温度梯度场、压力梯度场之间的较好协同。

3 场协同理论在脉动流传热中的应用前景

现有脉动流强化传热机理源自各自具体的脉动传热问题,没有从全局角度关注脉动流各要素的内在联系,缺乏统一性,无法定量分析综合强化效果,对脉动传热技术的工程应用缺乏实际指导作用。强化换热应源自于整个对流换热域中各场参数以某种方式相互作用的结果,场协同理论是独立于具体强化技术之外的基本理论问题,对于发展新的强化换热技术具有理论指导意义。上文所述的研究表明,场协同理论不仅能用于统一地认识现有各种对流换热和传热强化现象的物理本质,还能指导发展新的传热强化技术,因此,从场及其协同的角度讨论和研究脉动流强化传热的机理是有必要的。

近些年来,学者们对脉动流的研究^[28-33]多为从脉动频率与脉动振幅等因素出发,研究一种或几种因素

变化对传热效果的影响,缺乏对各因素之间内在联系的研究。文献[19]对不同情况下脉动流进行的理论分析和数值计算表明,从周期平均的角度来看,稳态对流传热中的场协同关系式对脉动流换热仍然适用。吴艳阳等^[34]通过数值方法研究了螺旋槽管内的脉动流强化传热机理,其结果表明,脉动振幅对传热的影响跟速度场与温度梯度场之间的协同程度有关;李志信^[35]对带有内环肋的圆管内脉动流换热数值计算表明,最佳脉动频率下传热强化效果最好,此时速度场与温度场之间的协同性也最好。

研究结果表明,不管是脉动振幅还是脉动频率对脉动流换热的影响,都可以统一到速度场与温度梯度场之间的协同程度上。所以,研究者可以通过在不同流动参数(如不同脉动频率、脉动振幅等)下,测得流场内的速度与温度分布,研究区域内速度场与温度梯度场的协同程度,比较其与传热效果的关系,通过场协同理论来统一认识各因素对脉动流传热效果的影响,获得脉动流强化传热的统一理论。

4 结束语

鉴于对脉动流强化对流传热问题的认识不统一,本研究对脉动流传热有关文献进行了分析研究。其分析结果表明,现有脉动流强化机理多为针对某类特殊现象而提出,缺乏普遍性和相互间的关联性,并由此介绍了场协同理论。研究结果表明,场协同理论不仅能统一地认识现有各种对流换热和传热强化现象的物理本质,还能指导发展新的传热强化技术。

因此,从场的角度出发,可建立独立于具体强化传热技术之外的场协同关系式,在此基础上研究得到的脉动流传热强化机理将具有较好的普遍性,可以用于有效解释脉动流强化传热问题。

参考文献(References):

- [1] YAN B H, YU L, YANG Y H. Heat transfer with laminar pulsating flow in a channel or tube in rolling motion[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, 49(6): 1003-1009.
- [2] 过增元, 黄素逸. 场协同原理与强化传热新技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] RICHARDSON E G, TYLER E. The transverse velocity gradient near the mouths of pipes in which an alternating or continuous flow is established [J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1929, 42(1): 1-15.
- [4] UCHIDA S. The pulsating viscous flow superposed on the steady laminar motion of incompressible fluid in a circular pipe [J]. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, 1956, 7(5): 403-422.
- [5] SIEGEL R, PERLMUTTER M. Heat transfer for pulsating

- laminar duct flow [J]. *ASME Journal Heat Transfer*, 1962, 84(2): 111-123.
- [6] KIM S Y, KANG B H, HYUN J M. Forced convection heat transfer from two heated blocks in pulsating channel flow [J]. *Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(3): 625-634.
- [7] JIN D X, LEE Y P, LEE D Y. Effects of the pulsating flow agitation on the heat transfer in a triangular grooved channel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(15-16): 3062-3071.
- [8] NISHIMURA T, OKA N, YOSHINAKA Y, et al. Influence of imposed oscillatory on the mass transfer enhancement of grooved channels for pulsatile flow [J]. *Heat Mass Transfer*, 2000, 43(13): 4904-4913.
- [9] LEE B Y, KANG I S, LIM H C. Chaotic mixing and mass transfer enhancement by pulsatile flow in an axisymmetric wavy channel [J]. *Heat Mass Transfer*, 1999 (42): 2571-2581.
- [10] GHADDAR N K, MAGEN M, MIKIC B B, et al. Numerical investigation of incompressible flow in grooved channels. part 2: resonance and oscillatory heat transfer enhancement [J]. *Fluid Mechanical*, 1986(168): 541-567.
- [11] GREINER M. An experimental investigation of resonant heat transfer enhancement in grooved channels [J]. *Heat and Mass Transfer*, 1991, 34(6): 1383-1391.
- [12] 何雅玲, 杨卫卫, 赵春风, 等. 脉动流动强化换热的数值研究[J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(3): 495-497.
- [13] 刘建红, 商福民, 刘登瀛. 脉动热管间协同耦合强化传热特性实验分析[J]. *化工学报*, 2011, 62(6): 1549-1553.
- [14] 谢公南, 王秋旺, 曾 敏, 等. 渐扩渐缩波纹通道内脉动流的传热强化[J]. *高校化学工程学报*, 2006, 20(1): 31-35.
- [15] 贾宝菊, 孙发明, 卞永宁, 等. 波壁管内的脉动流动及传热强化的数值模拟[J]. *化工学报*, 2009, 60(1): 6-14.
- [16] 李 华. 脉动流强化传热规律实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2007: 60-78.
- [17] 高 虹, 刘娟芳. Helmholtz共振腔脉动流体强化换热的试验研究[J]. *节能技术*, 2009, 27(2): 18-21.
- [18] 俞接成. 脉冲流动和壁面振动传热研究[D]. 北京: 清华大学航空航天学院, 2005.
- [19] CHARREYRON P O. Convective heat transfer enhancement in unsteady channel flow—a review [J]. *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED*, 1984(15): 33-36.
- [20] DEC J E, KELLER J O, ARPACIV S. Heat transfer enhancement in the oscillating turbulent flow of a pluse combustor tail pipe [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1992, 35(9): 2311-2325.
- [21] 俞接成, 李志信. 环形内肋片圆管层流脉冲流动强化对流换热数值分析[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2005, 45(8): 1091-1094.
- [22] GUO Z Y, LI D Y, WANG B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement [J]. *Tsinghua University*, 1998, 41(14): 2221-2225.

为弹性模块,从而实现具有可变刚度特性的关节驱动系统。笔者通过分析平面扭簧的刚度特性,给出了其表达式,除偏转角度与预紧量以外,其余参数均与其自身结构有关,这样就为进一步对平面扭簧参数的优化以提高关节驱动系统整体性能提供了理论依据;分析结果表明,本研究所用平面扭簧偏转角度约为 7° ,刚度变化范围大,可满足机器人关节刚度需求。

参考文献(References):

- [1] TSAGARAKIS N G, LAFFRANCHI M, VANDERBORGHT B, et al. A Compact Soft Actuator Unit for Small Scale Human Friendly Robots[C]//International Conference on Robotics and Automation, 2009:1998-2004.
- [2] JAFARI A, TSAGARAKIS N G, VANDERBORGHT B, et al. A Novel Actuator with Adjustable Stiffness (AwAS) [C]// International Conference on Robotics and Automation, 2010:4201-4206.
- [3] JAFARI A, TSAGARAKIS N G, CALDWELL D G. AwAS-II: A new Actuator with Adjustable Stiffness based on the novel principle of adaptable pivot point and variable lever ratio [C]// International Conference on Robotics and Automation, 2011:4638-4643.
- [4] WOLF S, HIRZINGER G. A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation [C]. International Conference on Robotics and Automation, 2008: 1741-1746.
- [5] WOLF S, EIBERGER O, HIRZINGER G. The DLR FSJ: Energy based Design of a Variable Stiffness joint [C]//International Conference on Robotics and Automation, 2011: 5082-5089.
- [6] TONIETTI G, SCHIAVI R, BICCHI A. Design and Control of a Variable Stiffness Actuator for Safe and Fast Physical Human/Robot Interaction [C]//International Conference on Robotics and Automation, 2005:526-531.
- [7] VAN H R, VANDERBORGHT B, VAN DAMME M, et al. MACCEPA: the Mechanically Adjustable Compliance and Controllable Equilibrium Position Actuator for 'Controlled Passive Walking' Biped Veronica [C]//International Conference on Robotics and Automation, 2006:2195-2200.
- [8] VANDERBORGHT B, TSAGARAKIS N G, SEMINI C, et al. MACCEPA 2. 0: Adjustable Compliant Actuator with Stiffening Characteristic for Energy Efficient Hopping [C]// International Conference on Robotics and Automation, 2009:544-549.
- [9] BYEONG-SANG K, JAE-BOK S. Hybrid Dual Actuator Unit: a Design of a Variable Stiffness Actuator based on an Adjustable Moment Arm Mechanism [C]//International Conference on Robotics and Automation, 2010:1655-1660.
- [10] 刘鸿文. 材料力学-II [M]. 北京:高等教育出版社, 2004. [编辑:张 翔]

(上接第438页)

- [23] 王 娴, 宋富强, 屈治国, 等. 场协同理论在椭圆型流动中的数值验证[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(1): 59-62.
- [24] 田文喜, 余方伟, 秋穗正, 等. 场协同理论在平行通道内的数值验证[J]. 核动力工程, 2002, 26(3): 237-241.
- [25] TAO W Q, HE Y L, WANG Q W, et al. A unified analysis on enhancing single phase convective heat transfer with field synergy principle [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2002, 45(24): 4871-4879.
- [26] 何雅玲, 雷勇刚, 田丽亭, 等. 高效低阻强化换热技术的三场协同性探讨 [J]. 工程热物理学报, 2009, 30(11): 1904-1906.
- [27] LIU Wei, LIU Zhi-chun, MA Lei. Application of a multi-field synergy principle in the performance evaluation of convective heat transfer enhancement in a tube [J]. **Engineering Thermophysics**, 2012, 57(13): 1660-1667.
- [28] OLAYIWOLA B, WALZEL P. Cross-flow transport and heat transfer enhancement in laminar pulsed flow [J]. **Chemical Engineering and Processing**, 2008, 47(5): 929-937.
- [29] ELSAYED A M, SAFWAT M M, MANSOUR H, et al. Experimental study of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe [J]. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 2008, 29(4): 1029-1038.
- [30] TERHAAR S, VELAZQUEZ A, ARIAS J R, et al. Experimental study on the unsteady laminar heat transfer downstream of a backwards facing step [J]. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2010, 37(5): 457-462.
- [31] WANG Yuan, SEFIANE K. Effects of heat flux, vapour quality, channel hydraulic diameter on flow boiling heat transfer in variable aspect ratio micro-channels using transparent heating [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2012, 55(9-10): 2235 - 2243.
- [32] ABHISHEK G, SAHA A K. Fully developed flow and heat transfer characteristics in a wavy passage: effect of amplitude of waviness and Reynolds number [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2012, 55(9-10): 2494-2509.
- [33] MOHAMMED H L, MILOUD A, SID A L. Investigation of the mixed flow turbine performance under inlet pulsating flow conditions [J]. **Comptes Rendus Mecanique**, 2012, 340(3): 165-176.
- [34] 吴艳阳, 杨文灏, 喻九阳, 等. 螺旋槽管脉冲流传热数值及场协同分析 [J]. 石油化工设备, 2011, 40(5): 1-4.
- [35] 李志信, 过增元. 对流传热优化的场协同理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. [编辑:张 翔]