

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.023

印刷电路板换热器流动换热特性仿真与试验研究

李伟豪, 侯庆栋

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 采用 CFD 模拟软件, 结合试验研究, 对菱形针肋印刷电路板换热器(PCHE)在不同热流密度和雷诺数下的流动换热性进行研究。结果表明: PCHE 通道的 h 和 Nu 均随热流密度和雷诺数的增大而增大, 但是增长率逐渐变小。PCHE 通道的 ΔP 和 f 均随雷诺数的增大而增大, 同时 ΔP 和 f 随热流密度的增大而减小。通过对比试验测量和仿真计算结果: 发现试验值与仿真值变化趋势一致, 试验测量值略高, 验证了仿真模型的准确性。

关键词: PCHE; 数值模拟; 试验研究

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0121-05

Simulation and Experimental Study on Flow Heat Transfer Characteristics of PCHE

LI Weihao, HOU Qingdong

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper, by adopting CFD software and combining experimental studies, investigates the flow and heat transfer properties of rhombic pin-ribbed PCHE at different heat flow densities and Reynolds numbers. The results show that both h and Nu of the PCHE channel increase with the increase of heat flow density and Reynolds number, yet the growth rate becomes smaller and smaller. ΔP and f of the PCHE channel increase with the increase of Reynolds number, while ΔP and f decrease with the increase of heat flow density. To compare the results of experimental measurements and simulation calculations, it is found that the experimental values have the same trend with the simulation values with slightly higher experimental measurements, which verifies the accuracy of the simulation model.

Keywords: PCHE; numerical simulation; experimental investigation

0 引言

近年航空航天、电子信息、微电子机械系统等领域的快速发展, 对换热设备提出了更严苛的要求^[1-3], 而印刷电路板换热器(printed circuit heat exchanger, PCHE)因其紧凑、高效、轻质等特点, 在这些领域具有广泛的应用前景, 并发展了换热效果更好的凸肋换热器^[4-7]。

周明正等^[8]利用 CFD 软件研究了方形针肋 PCHE 的流动及换热性能, 发现 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型更适应该模拟。张秀强等^[9]通过 CFD 软件, 结合试验研究, 对圆形、三角形和方形截面微针肋通道进行了研究。结果表明: f 随 Re 的增大而减小, 且低 Re 下, 三角形针肋的 f 最小, 高 Re 下, 方形针肋的 f 最小。 Nu 随 Re 的增加而增大, 3 种形状中, 圆形针肋的 Nu 数最大, 换热效果最好。XU 等^[10]对截面形状为圆形、方形、菱形和椭圆形的凸肋通道进行了试验研究, 发现肋片形状越接近

流线型时摩擦阻力越小。张高等^[11]研究了变密度凸肋通道的流动和换热特性。结果表明: 水滴型肋片换热性能优于圆形肋片并随尾翼长度增加而增强, 综合性能随肋片高度增加具有先增大后减小趋势, 并且随 Re 增大曲线趋于平缓。MA 等^[12]采用数值仿真的方法研究了不同横向和纵向间距下翼型针肋端壁倒角对 PCHE 流动换热性能的影响。结果发现: 针肋端部倒角的存在增加了换热和压降, 但是随着无量纲横向间距和纵向间距的增大, 端部倒角的影响将会减弱。

综上所述, PCHE 的流动换热性能会受到针肋形状、尺寸以及边界条件的影响, 需要结合试验和仿真计算来对 PCHE 的流动换热性能来进行研究。本文以菱形针肋 PCHE 为研究对象, 建立 PCHE 仿真模型, 研究不同雷诺数及热流密度下菱形针肋 PCHE 的流动换热特性, 为今后研究和工程应用提供指导。

1 数值计算方法

1.1 物理模型

根据表 1 的结构参数,采用 SolidWorks 2019 对 PCHE 进行几何建模,几何模型如图 1 所示

表 1 PCHE 模型主要结构参数 单位:mm

参数	数值
通道长度 L	202
通道宽度 W	26
通道高度 H	1.60
通道宽度 w_f	20
针肋长轴 a	1.50
针肋短轴 b	1
针肋高度 h_f	0.35
横向间距 S_w	2
纵向间距 S_L	3.40

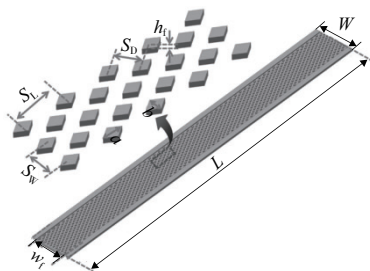


图 1 PCHE 结构示意图

1.2 网格划分及独立性验证

本文采用 ICEM 软件对计算域进行网格划分,考虑到针肋交错密集排布、结构复杂,因此采用了非结构化的网格类型。为了能够细致地捕捉流体流动的特征,同时满足近壁处理对 y^+ 的要求,在所有流固耦合面处设置了 5 层边界层网格,并采用小网格尺寸对针肋位置进行了局部加密。此外,由于 PCHE 通道的长高比悬殊,因此流体域最小网格尺寸的定义受到通道高度的限制,加之通道内部针肋数量较多,这造成计算域的网格数量较多。

比较了在雷诺数 600、热流密度 60 kW/m^2 的工况下,4 种不同数量的网格,对应的平均对流换热系数及进出口压降损失对网格数量的依附关系,当菱形针肋模型和圆形针肋模型的网格数量分别达到 2 541 万及 2 637 万时,上述所监测物理量的相对偏差均小于 1%。因此,综合计算精度和计算时间,选用 2 541 万的网格进行数值计算。

1.3 仿真模型边界条件

对于流动入口边界条件如式(1)所示,以入口雷诺数为变量,由此计算入口速度,具体工况如表 2 所示。

$$u_{in} = \frac{R_e \mu}{D_h \rho}, \quad v_{in} = w_{in} = 0 \quad (1)$$

式中: R_e 为雷诺数; μ 为去离子水黏性系数; D_h 为当量直径; ρ 为去离子水密度; u_{in} 、 v_{in} 、 w_{in} 分别为进口速度在 x 方向、 y 方向、 z 方向上的分量。

表 2 入口流速设置

雷诺数	入口速度/(m/s)
500	0.73
600	0.88
700	1.02
800	1.17
900	1.31
1 000	1.46
1 100	1.60
1 200	1.75
1 300	1.89

对于热边界条件:在上下加热面处施加恒热流密度边界,具体热边界设置如表 3 所示,仿真模型其余壁面均设置为绝热面。

表 3 热边界条件设置

热流密度/(kW/m ²)	功率/W	加载方式
40	420	面热源
60	630	面热源
80	840	面热源
100	1 050	面热源
120	1 260	面热源

本文使用 ANSYS Fluent 软件进行稳态仿真模拟,微通道下的转换雷诺数往往仅有几百^[13-16],因此采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型^[17],计算黏性底层中的流动换热时使用壁面处理^[18],能够较好地解析边界层并对流体流动给出较高精度的预测;定义环境温度为 293.15 K,进口流体温度为 293.15 K;流体入口设为流量入口,出口设为压力出口;速度和压力的耦合方式采用了 SIMPLEC 算法,松弛因子取默认值;动量、湍动能、湍流耗散比率和能量离散均为 2 阶迎风格式;求解过程中,观察了收敛残差曲线及进口压力、出口温度随迭代步数的变化,当残差曲线达到 10^{-4} 以下且

各物理量不随迭代步数而变化时计算收敛。

1.4 参数定义

数据参数定义如下:

$$1) \text{ 当量直径}^{[19]} \quad D_h = \frac{4w_f h_f}{2(w_f + h_f)} \quad (2)$$

式中: w_f 为通道宽度; h_f 为通道高度。

$$2) \text{ 平均对流换热系数}^{[20-22]} \quad h = \frac{Q}{S(T_{i,w} - T_{f,av})} \quad (3)$$

式中: $T_{i,w}$ 为内壁面平均温度; $T_{f,av}$ 为流体平均温度。

$$3) \text{ 努塞尔数}^{[23]} \quad Nu = \frac{hD_h}{\lambda_f} \quad (4)$$

式中 λ_f 为去离子水的导热系数。

$$4) \text{ 压降损失} \quad \Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (5)$$

$$5) \text{ 摩擦因子} \quad f = \frac{2\Delta P D_h}{\rho L u_{in}^2} \quad (6)$$

2 数值仿真结果与分析

本节研究了热流密度(q)40~120 kW/m²、雷诺数500~1 400的范围内,不同雷诺数及热流密度对菱形针肋 PCHE 通道流动、换热性能的影响。在不同 q 下, h 和 Nu 随 Re 的变化情况如图2及图3所示。

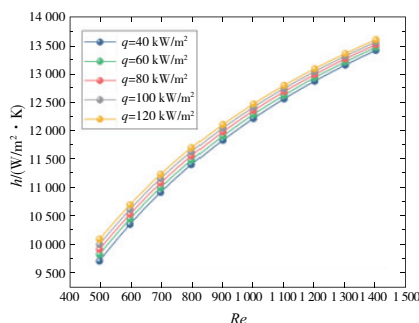


图2 不同 q 下, h 随 Re 的变化

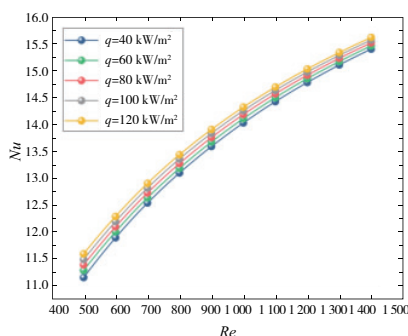


图3 不同 q 下, Nu 随 Re 的变化

由图2和图3可知, h 和 Nu 均随雷诺数的增大而增大,但是增长率逐渐变小。热流密度对 h

和 Nu 也有一定影响,随着热流密度的增加, h 和 Nu 有所提升,但提升比率较小,最高热流密度下的 h 和 Nu 比最低热流密度下的 h 和 Nu 提升均未超过4%。高热流密度下 PCHE 通道换热效果的改善主要与流体物性相关,热流密度升高使得流体温度升高,流体的动力黏度进而降低,这有利于增强通道内部的扰动并减薄边界层的厚度,从而强化换热效果。在不同 q 下, ΔP 和 f 随 Re 的变化情况如图4和图5所示。

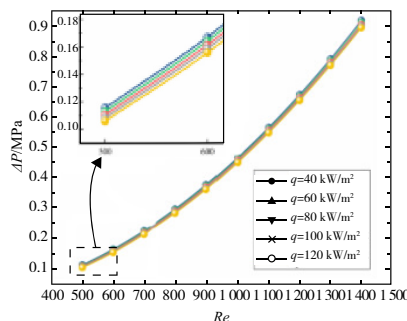


图4 不同 q 下, ΔP 随 Re 的变化

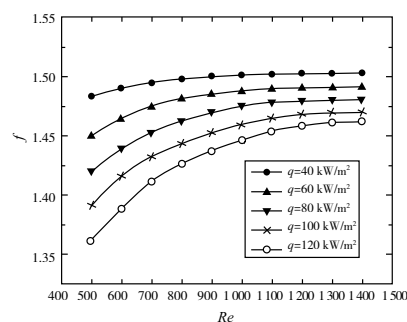


图5 不同 q 下, f 随 Re 的变化

由图4可知, ΔP 随雷诺数的增大而增大,且增长率逐渐变大。随着热流密度的增大,流体的黏性阻力减小, ΔP 随之减小,最高热流密度下的 ΔP 要比最低热流密度下的 ΔP 降低2.81%~9.03%。由图5可知, f 随雷诺数的增大而增加并逐渐趋于平缓,该变化趋势是由微通道尺度效应下转捩雷诺数减小所造成的。

3 试验验证

3.1 试验系统及装置

菱形 PCHE 通道单相流动换热试验系统如图6所示,试验系统主要由流动回路子系统、冷却回路子系统、加热子系统及数据采集和设备控制子系统4部分组成。

试验台各子系统具体介绍如下:1) 流动回路子系统包括了两个串联的齿轮泵、流量计、PCHE

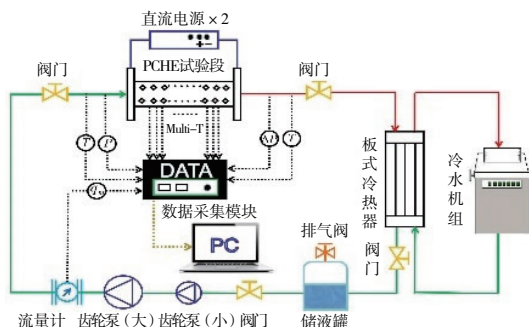


图6 PCHE 通道单相流动换热试验系统简图

试验件、板式换热器、储液罐、阀门、不锈钢管及转接头;2)冷却回路子系统包括了工业冷水机和板式换热器,其中工业冷水机制冷产生冷水并在板式换热器内与流动回路子系统的热热水进行逆流换热;3)加热系统包括了直流电源、蛇形加热片以及用于均热的紫铜块,PCHE 试验件上下两表面通过均热紫铜块与两个阻值相等的蛇形加热片连接,通过直流电源给予两壁面相同的加热量;4)数据采集及设备控制系统主要包括了压力传感器、压差传感器、热电偶、数据采集及控制模块、以及 Force Control 软件开发的界面,该系统主要用于采集实验数据以及实现设备的自动控制。

3.2 试验步骤

试验测量菱形 PCHE 在热流密度 $40 \sim 120 \text{ kW/m}^2$ 、雷诺数 $500 \sim 1400$ 的范围内的流动换热特性,将流量调节到预定值并稳定后,开启直流电源并调到既定的加热功率,同时开启冷水机将试验件入口温度维持在 293.15 K 。在达到目标工况时,记录试验数据,当温度浮动范围小于 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$,压力波动范围小于 0.01 MPa ,且持续时间超过 5 min 后,认为试验系统达到稳定状态。按照实验工况,改变系统流量设定值,重复上述步骤,完成不同雷诺数下的试验;调整直流电源的输出功率,重复上述步骤,完成不同热流密度下的试验。

3.3 试验数据结果及分析

由图7、图8可知,试验所得 h 和 Nu 的变化趋势与仿真一致, h 和 Nu 均随雷诺数与热流密度的增大而增大,热流密度对两者的影响比较微弱,试验所得的结果均高于仿真结果。

由图9、图10可知,试验所得 ΔP 与 f 的变化趋势与仿真一致, ΔP 与 f 均随雷诺数的增大而增大,而随热流密度的增大而减小,相比于仿真结果,两者的试验数值也偏高。

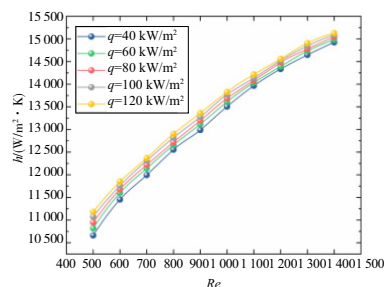
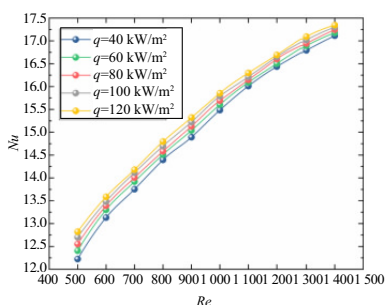
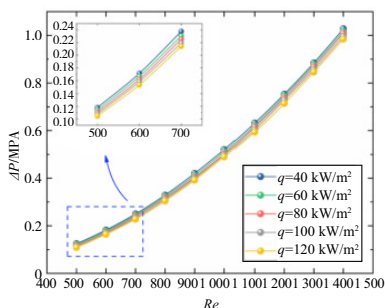
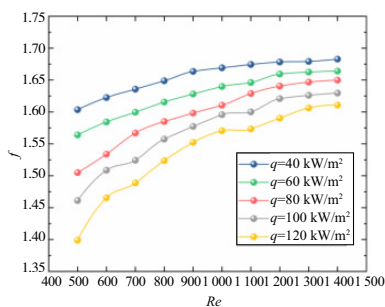
图7 试验不同 q 下, h 随 Re 的变化图8 试验不同 q 下, Nu 随 Re 的变化图9 试验不同 q 下, ΔP 随 Re 的变化图10 试验不同 q 下, f 随 Re 的变化

图11所示为热流密度 80 kW/m^2 时,平均努塞耳数及达西摩擦因子试验值与仿真值的对比情况。由图11可知,在研究的雷诺数范围内,试验值与仿真值变化趋势一致,两者吻合较好,而两者

的偏差可能是由于试验件加工精度、壁面粗糙度、和试验误差等因素所造成的。

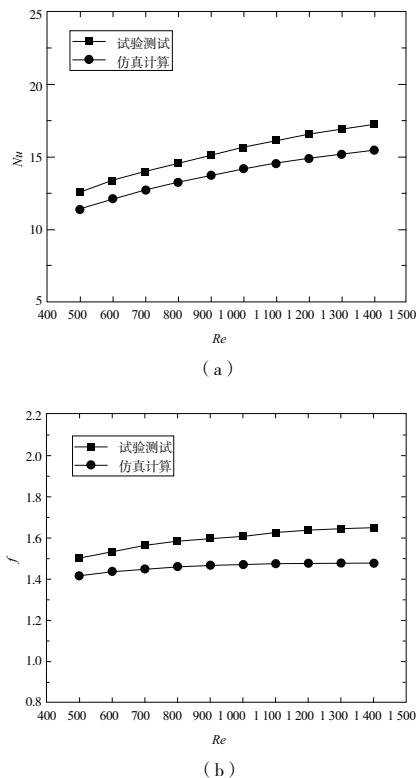


图 11 试验测试与仿真计算结果对比

4 结语

本文针对菱形针肋 PCHE,建立了 PCHE 的数值仿真计算模型,基于 PCHE 通道单相流动换热试验台研究了热流密度 $40 \sim 120 \text{ kW/m}^2$ 、雷诺数 $500 \sim 1400$ 的范围内,不同雷诺数及热流密度对菱形针肋 PCHE 通道流动换热性能的影响。研究发现, h 和 Nu 均随雷诺数与热流密度的增大而增大,热流密度对两者的影响比较微弱; ΔP 与 f 均随雷诺数的增大而增大,而随热流密度的增大而减小。对比仿真计算努塞尔数、摩擦因子和试验测量努塞尔数、摩擦因子。结果表明:试验值与仿真值变化趋势一致,两者吻合较好,试验测量结果比仿真计算结果略高,验证了 PCHE 的数值仿真计算模型的准确性。

参考文献:

- [1] LI H W, HUANG H R, XU G Q, et al. Performance analysis of a novel compact air-air heat exchanger for aircraft gas turbine engine using LMTD method [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 445-455.
- [2] NACKE R, NORTHCUTT B, MUDAWAR I. Theory and experimental validation of cross-flow micro-channel

heat exchanger module with reference to high Mach aircraft gas turbine engines [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54 (5/6): 1224-1235.

- [3] HUANG C Y, CAI W H, WANG Y, et al. Review on the characteristics of flow and heat transfer in printed circuit heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153: 190-205.
- [4] 李宴君. 流体横掠叉排微针肋热沉流动和传热特性研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- [5] CHEN Y P, CHENG P. Heat transfer and pressure drop in fractal tree-like microchannel nets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45 (13): 2643-2648.
- [6] GÜREL B, AKKAYA V R, GÖLTAŞ M, et al. Investigation on flow and heat transfer of compact brazed plate heat exchanger with lung pattern [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 175: 115309.
- [7] LI Y T, GONG L, XU M H, et al. Enhancing the performance of aluminum foam heat sinks through integrated pin fins [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 151: 119376.
- [8] 周明正, 夏国栋, 柴磊, 等. 微针肋热沉中流体流动及传热的数值模拟 [J]. 北京工业大学学报, 2011, 37 (7): 1052-1057.
- [9] 张秀强, 华君叶, 赵孝保, 等. 不同形状微针肋通道流动与换热性能影响研究 [J]. 南京师范大学学报 (工程技术版), 2018, 18 (1): 47-55.
- [10] XU F Y, WU H Y. Experimental study of water flow and heat transfer in silicon micro-pin-fin heat sinks [J]. Journal of Heat Transfer, 2018, 140 (12): 122401.
- [11] 张高高, 殷泽, 戴秋敏, 等. 变密度凸肋通道流动及换热特性研究 [J]. 管道技术与设备, 2020 (3): 34-39.
- [12] MA T, XIN F, LI L, et al. Effect of fin-endwall fillet on thermal hydraulic performance of airfoil printed circuit heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 1087-1095.
- [13] JIANG P X, FAN M H, SI G S, et al. Thermal - hydraulic performance of small scale micro-channel and porous - media heat - exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44 (5): 1039-1051.
- [14] 李东阳. 弯曲微通道内弹性湍流特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [15] WANG B X, PENG X F. Experimental investigation on liquid forced - convection heat transfer through microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37: 73-82.

(下转第 130 页)

大小的海上地图中该算法的平均路径长度比 SA 算法短了 19.44%, 平均耗时减少了 8.85%。该方法的平均总步数在 220 回合数时达到最多, 约为 400。600 回合数所提算法的平均总步数表现逐渐平稳, 说明该算法能有效提升路径规划效率。大约 500 回合数之后, 所提算法的平均奖励明显高于其余 3 种算法, 在 800 回合数时其平均奖励变化开始趋于稳定, 约为 600。该算法能够提供更好的路径规划结果和避障效果, 并且在较少的回合数内即能达到稳定的平均奖励和总步数, 显示出其高效性。该方法综合性能较好, 在复杂海域中可以更好地完成海上救援路径规划。但研究没有考虑风速、流速等环境因素的影响, 未来可以深入考虑这些因素的精细设计, 以便提高路径规划的决策质量。

参考文献:

- [1] 刘雅奇, 史誉洲, 曹石勇. 船舶航迹数据采集与可视化在海上搜救中的应用[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(18): 166-169.
- [2] 王伟, 杜旭洋, 杨志伟, 等. 基于无人艇的导航雷达目标检测跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(5): 1561-1572.
- [3] DVORAK M, DOLEZEL P, STURSA D, et al. Genetic algorithm-based task assignment for fleet of unmanned surface vehicles in dynamically changing environment[J]. Cybernetics and Systems, 2024, 55(6): 1314-1331.
- [4] 周治国, 余思雨, 于家宝, 等. 面向无人艇的 T-DQN 智能避障算法研究[J]. 自动化学报, 2023, 49(8): 1645-1655.
- [5] 贾薇, 王宁, 张富宇, 等. 基于多传感器融合 SLAM 的无人船靠泊技术[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(4): 65-75.
- [6] 徐茂竹, 李弘, 李亚光, 等. 单目视觉引导下的无人艇局部避障方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2023, 35(4): 732-741.
- [7] 夏家伟, 朱旭芳, 罗亚松, 等. 基于深度强化学习的无人艇轨迹跟踪算法研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 74-80.
- [8] 李子怡, 胡祥涛, 张勇乐, 等. 基于虚拟目标制导的自适应 Q 学习路径规划算法[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(2): 553-568.
- [9] 黄岩松, 姚锡凡, 景轩, 等. 基于深度 Q 网络的多起点多终点 AGV 路径规划[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(8): 2550-2562.
- [10] 洪涛清, 高雪芬. 改进 Q 学习下 3D 打印机器人路径生成方法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(10): 417-421.
- [11] 王典, 周阳, 宋毅, 等. 基于 Q 学习的生物启发式目标导向导航路径规划模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6): 68-76.
- [12] 凌琛. 考虑能耗的无人机路径规划及海洋捕食者算法求解[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1): 5-8, 13.
- [13] 梁华尘, 周稳, 倪旭东, 等. 面向多目标联合电力巡检的车载无人机协同巡检路径规划方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 138-147.
- [14] 郭兴华, 赵仓龙. 海上交通高峰航线船舶疏导路径规划仿真分析[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(22): 206-209.
- [15] 张立华, 周寅飞, 贾帅东, 等. 一种有效顾及复杂海域避碰的路径规划方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(1): 56-64.

收稿日期: 2024-09-30

(上接第 125 页)

- [16] 朱冬生, 罗小平, 钱颂文. 微小流道(槽道)传热强化与节能[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [17] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [18] 梁珍祥. 凹坑凸胞板式换热器性能的数值研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- [19] 黄建伟. 类卵形肋柱对微通道流动传热特性的影响[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
- [20] LI W M, LUO K, LI C, et al. A remarkable CHF of 345W/Cm² is achieved in a wicked-microchannel using HFE-7100[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 187: 122527.
- [21] 田若男. 微冷却系统结构优化及流动换热特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [22] MOHIT M K, GUPTA R. Numerical investigation of the performance of rectangular micro-channel equipped with micro-pin-fin[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 32: 101884.
- [23] 罗志宁, 张莹莹, 高磊, 等. 板壳式换热器壳程传热性能分析[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(2): 94-97, 129.

收稿日期: 2024-01-24