

三种三角翼纵向涡翅片管换热器 流动传热特性对比研究

刘丹丹¹, 吴学红¹, 张林¹, 孟浩¹, 吕彦力¹, 李芳星²

(1. 郑州轻工业学院 机电工程学院, 河南 郑州 450002;

2. 广州埃昂环境技术有限公司, 广东 广州 510530)

摘要: 对三角翼圆形翅片管换热器、三角翼等径长椭圆形翅片管换热器和三角翼等周长椭圆形翅片管换热器的流动传热性能分别进行了数值研究。结果表明: 三角翼等周长椭圆形翅片管换热器温度场和速度场分布最为均匀, 换热效果最好; 三角翼等周长椭圆形翅片管换热器努塞尔数(Nu)最大, 比三角翼圆形翅片管换热器增大2.2%~6.1%, 比三角翼等径长椭圆形翅片管换热器增大6.5%~8.3%, 比平翅片管换热器增大29.1%~33.5%; 从综合传热性能分析, 三角翼纵向涡椭圆形翅片管换热器适合于中等及较大雷诺数(Re)工况。

关键词: 翅片管换热器; 三角翼纵向涡翅片; 流动性传热性能

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.2095-476X.2015.02.016

Comparative study of fluid flow and heat transfer characteristics on the three kinds of fin-tube heat exchanger with delta winglets longitudinal vortex

LIU Dan-dan¹, WU Xue-hong¹, ZHANG Lin¹, MENG Hao¹, LYU Yan-li¹, LI Fang-xing²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering Zhengzhou University of Light Industry Zhengzhou 450002, China;

2. Guangzhou AAON Environmental Technology Co., Ltd. Guangzhou 510530, China)

Abstract: In the present study, the heat transfer and fluid flow characteristics of fin-tube heat exchangers of circular-tube, equal-diameter elliptic-tube and equal-perimeter elliptic-tube with delta winglets longitudinal vortex was presented based on the numerical simulation. The result showed that the temperature and velocity field of equal-perimeter elliptic-tube fin heat exchanger more uniform, and its heat transfer performance was the best, and the Nu number of equal-diameter elliptic-tube fin heat exchanger was the largest, which was 2.2%~6.1% higher than that of circular-tube heat exchanger with delta winglets, 6.5%~8.3% higher than that of equal-radius elliptic-tube heat exchanger and with delta winglets and 29.1%~33.5% higher than that of flat fin-tube heat exchanger. Considering from the overall performance, the delta winglets longitudinal vortex oval fin-tube heat exchanger fit for moderate and high Reynolds numbers.

收稿日期: 2014-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(21076200); 河南省省院合作项目(092106000013); 郑州市领军人才项目(131PLJRC640)

作者简介: 刘丹丹(1988—), 女, 河南省舞阳县人, 郑州轻工业学院硕士研究生, 主要研究方向为换热器的优化。

通信作者: 吴学红(1978—), 男, 河南省固始县人, 郑州轻工业学院副教授, 博士, 主要研究方向为制冷与低温设备节能技术及传热与流动问题的高效数值计算方法。

Key words: fin-tube heat exchanger; delta winglets longitudinal vortex; fluid flow and heat transfer characteristics

0 引言

目前,翅片管换热器广泛应用于动力工程、石油化工和制冷空调中。换热时翅片管换热器在换热空气侧的流动阻力占总热阻的85%^[1],因此强化空气侧流动传热,能有效提高换热性能。研究者广泛探讨了开缝、百叶窗和三角翼等纵向涡发生器的强化传热特性^[2-4],也对一些基于缝翅片和纵向涡发生器的复合翅片进行了研究^[5-7]。

研究发现,添加纵向涡发生器后,传热因子提高70%~80%,阻力因子增加90%以上^[8],传热效果能够得到强化,但阻力也相应增大,因此研究者在纵向涡发生器的优化方面做了一定的探索。Y. G. Lei等^[9]研究了不同三角翼倾角和高宽比对翅片管换热器性能的影响,得出倾角为20°,高宽比为2时的综合传热因子最大。M. Zeng等^[10]对带三角翼翅片管换热器的翅片材料、厚度、间距、管纵横间距、三角翼长、高及倾角进行了优化研究。L. Sun等^[11]对椭圆形翅片管换热器的管排数、翅片间距、管纵横间距、空气流速和管中水的体积流量等进行了优化设计。

近年来,研究者提出了新型纵向涡半球凸开缝^[12-13]和圆弧形三角翼^[14]。前者综合换热性能比平翅片提高7.55%~23.88%,后者综合性能比直三角翼增加7.3%~11.5%。添加三角翼后,换热增强,但尾流区面积仍相对较大,前人的研究显示,椭圆管能在一定程度上减小尾流区。J. S. Leu等^[15]研究认为,添加矩形翼的翅片管换热器仅在低、中雷诺数(Re)工况下能有效增加换热。因此,本文拟对三角翼圆形翅片管换热器、三角翼等径长椭圆形翅片管换热器和三角翼等周长椭圆形翅片管换热器的流动传热性能进行数值计算,以研究三角翼椭圆管和三角翼圆管不同工况下的传热性能。

1 模型建立

1.1 物理模型

三角翼圆形翅片管换热器的局部结构如图1所示,在翅片换热管附近冲出三角翼,三角翼与流体流动方向成一定夹角,能有效增强换热。翅片管换热器几何参数如下:横向管间距 $P_t=25.4\text{ mm}$,纵向管间距 $P_l=22\text{ mm}$,翅片厚度 $\sigma=0.2\text{ mm}$,管径 $D_c=9.53\text{ mm}$,翅片间距 $F_p=2.5\text{ mm}$,三角翼倾角 $\alpha=45^\circ$ 。

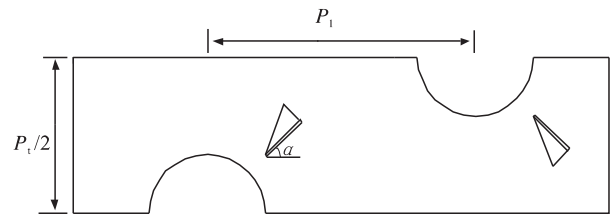


图1 三角翼圆形翅片管换热器局部结构图

三角翼等径长椭圆翅片管换热器与三角翼圆形翅片管换热器横向管间距、纵向管间距、翅片厚度、翅片间距和三角翼倾角均相等。不同之处在于:三角翼等径长椭圆形翅片管换热器的长轴径长和三角翼圆形翅片管换热器的直径相等。

三角翼等周长椭圆翅片管换热器与三角翼圆形翅片管换热器基础参数一致。管道与空气接触的周长相等,因翅片间距相等,其接触面积相等。

1.2 边界条件

为保证流体进入翅片区域有恒定的速度,入口区域向上游延长1.5倍翅片长,出口为自由流出口,计算区域向下游延长5倍翅片长。

入口为速度边界条件: $u = u_{in}, v = 0, w = 0, T = T_{in}$ 。

出口为自由流出口: $\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \frac{\partial w}{\partial x} = 0$ 。

平行于翅片的上下边界面(包括延长区域):设定为周期性边界条件。

垂直于翅片的左右边界面(包括延长区域):设定为对称边界条件。

换热管壁面:恒定壁温,无滑移边界条件, $T = T_{wall}, \mu = 0, \nu = 0, w = 0$ 。

空气沿流向物性变化很小,为了简化计算,假设流体为常物性,流动为稳态、不可压缩。计算中,忽略黏性耗散和热辐射,不考虑自然对流。采用二阶迎风格式对动量方程和能量方程进行离散。压力和速度的耦合计算选用Simple算法。当连续性方程和动量方程的残差 $< 10^{-8}$,能量方程的残差 $< 10^{-10}$ 时,判断为计算收敛。

2 网格独立性验证

计算区域分为:入口延长区域、翅片区域和出口延长区域三个部分。入口延长区域和出口延长区域为结构化网格,由于翅片上有三角翼,故将翅片上三角翼区域划为非结构化网格。为检验计算结果

的准确性,分别采取不同网格数对模型计算,网格数分别为 695 615, 1 245 741, 1 840 808. $Re = 979$ 时计算结果如图 2 所示, 1 245 741 网格比 695 615 网格得到的努塞尔数 Nu 小 1.12%, 1 840 808 网格比 1 245 741 网格得到的 Nu 小 1.21%, 故采用 1 245 741 网格对其进行计算.

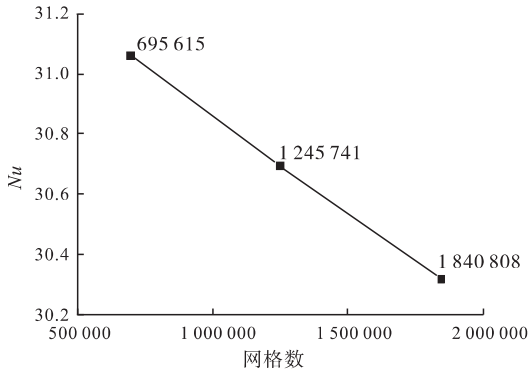


图 2 $Re = 979$ 时 Nu 随网格数的变化

3 结果分析

3.1 温度场分析

图 3 为 $Re = 1 958$ 时 4 种不同结构翅片管翅片的局部温度场分布. 由图 3 可以看出, 出入口处等温线分布较密, 沿着流动方向逐渐变稀疏. 说明翅片迎风面的换热效果好, 背风侧温度高, 换热相对较差. 故增强背风侧换热, 能有效强化翅片管整体传热性能. 图 3b) 与图 3a) 对比, 三角翼增加空气扰流, 从而对流换热增强. 图 3a) 和图 3b) 存在明显尾流区, 由于椭圆管换热器尾迹平滑, 图 3c) 和图 3d) 三角翼椭圆形翅片管换热器温度场比图 3a) 和图 3b) 圆形翅片管换热器温度场分布均匀, 尾流区范围减小, 温度降低, 换热增强.

3.2 速度场分析

图 4 为 $Re = 1 958$ 时, 不同结构翅片管翅片在 C_p 为定压比热容; $z = 0.5 \text{ mm}$ 截面处速度场和流线的分布. 由图 4a) 可见, 空气的最大速度集中在主流区, 空气流经换热管处时, 横截面积急剧减小, 空气的流动速度达到最大. 尾流区范围很大, 形成回流加热, 削弱换热. 增加三角翼后, 如图 4b) 所示, 尾流区减小, 但仍存在较大漩涡. 图 4c) 和图 4d) 三角翼椭圆形翅片管换热器与图 4a) 和图 4b) 三角翼圆形翅片管换热器相比, 尾流区明显减小, 换热管周围速度增大. 图 4d) 三角翼等周长椭圆形翅片管换热器比图 4c) 三角翼等径长椭圆形翅片管换热器尾

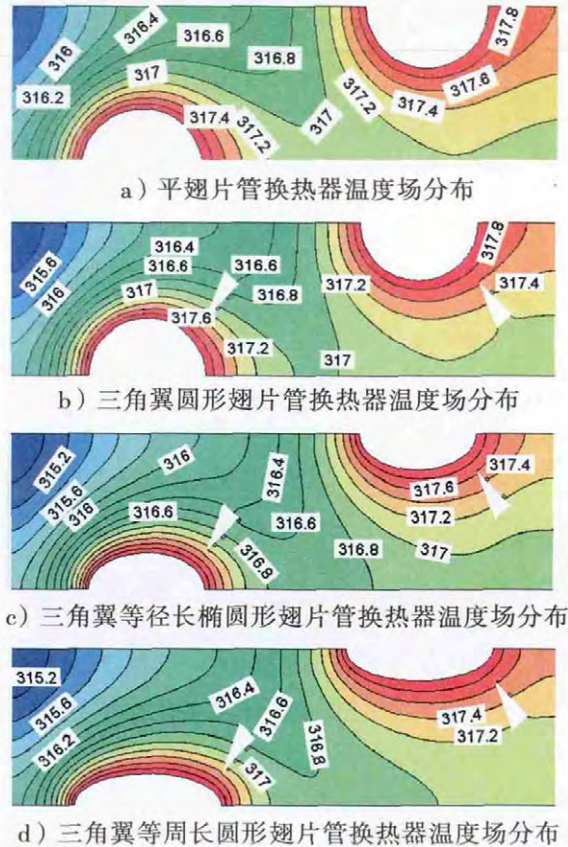


图 3 $Re = 1 958$ 时, 不同结构翅片管换热器局部温度场分布 / K

流区小, 速度分布更趋于均匀, 换热效果更好.

3.3 传热性能分析

用传热因子 j , 阻力因子 f , Nu 和综合换热因子 JF 来表征传热性能的优劣, 计算方法见文献 [7], 其定义式如下:

$$j = \frac{h}{\rho u_c c_p} \cdot P_r^{\frac{2}{3}}, f = \frac{\Delta P}{L} \frac{A_c}{\rho u_c^2 A_0}$$

$$Nu = \frac{h}{\lambda} D_c, JF = \frac{j/j_0}{(f/f_0)^{1/3}}$$

式中 h 为平均传热系数; u_c 为最小截面平均速度; C_p 为定压比热容; P_r 为普朗特数; ΔP 为进出口压力差; A_c 为最小截面面积; A_0 为总传热面积; j_0, f_0 分别为平翅片的传热因子和阻力因子.

图 5 为不同结构翅片 j 随 Re 的变化曲线. 由图 5 可以看出, 加三角翼翅片管换热器的 j 远大于平翅片管换热器, 带三角翼的翅片管换热器中, 等周长椭圆形翅片管换热器 j 最大, 相比圆形翅片管换热器 j 提高 2.2% ~ 6.1%, 比等径长椭圆形翅片管换热器增大 6.5% ~ 8.3%, 比平翅片管换热器增大 29.1% ~ 33.5%. 可见, 等周长椭圆形翅片管换热器

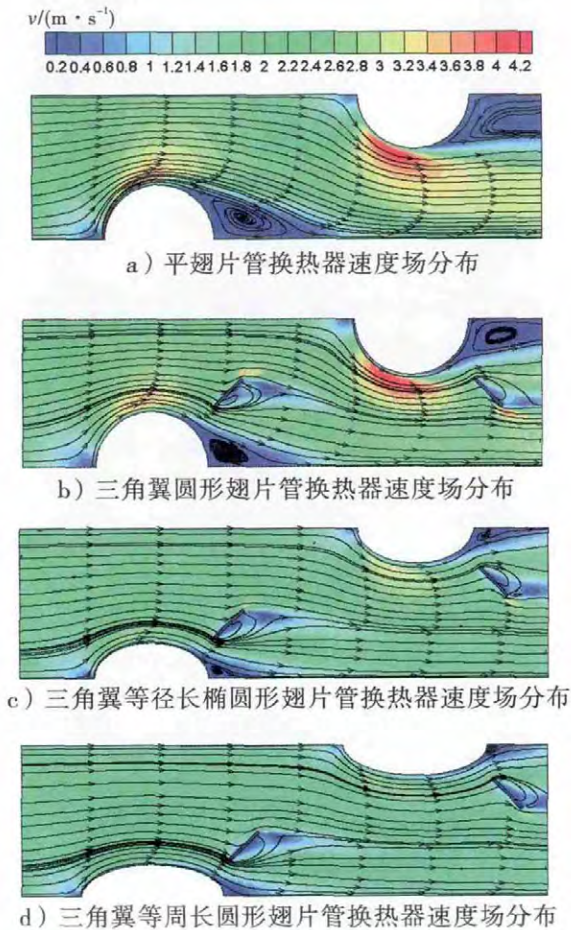


图 4 $Re = 1958$ 时 $z = 0.5 \text{ mm}$, 不同结构翅片管换热器速度场和流线的分布

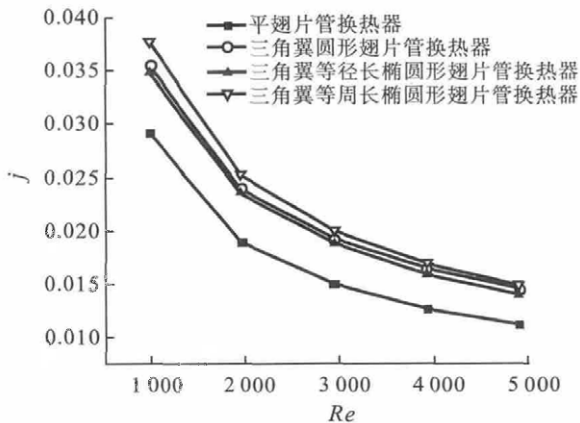


图 5 不同结构翅片 j 随 Re 的变化

换热效果最好,这与上述速度场分析的结论一致。

图 6 给出了不同结构翅片 f 随 Re 的变化。三角翼圆形翅片管换热器的 f 明显大于平翅片管换热器,可见三角翼增大空气扰流,增强换热的同时,增大了流动阻力。改变换热管的结构为椭圆形。由图 6 可见,当 $Re < 1500$ 时,三角翼圆形翅片管换热器的 f 小于三角翼等径长椭圆形翅片管换热器,而这时

前者的 j 大于后者,可见此时三角翼圆形翅片管换热器性能优于三角翼等径长椭圆形翅片管换热器。当 $Re > 4000$ 时,三角翼等径长椭圆形翅片管换热器 f 小于平翅片,远小于三角翼圆形翅片管换热器的 f ,而三角翼等径长椭圆形翅片管换热器换热远大于平翅片管换热器,与三角翼圆形翅片管换热器换热相差不多;此时,三角翼等周长椭圆管换热器 f 也小于三角翼圆形翅片管换热器的 f ,而换热性能略高于三角翼圆形翅片管换热器。由此可见, Re 较高时,三角翼椭圆形翅片管换热器得到的综合性能最优。

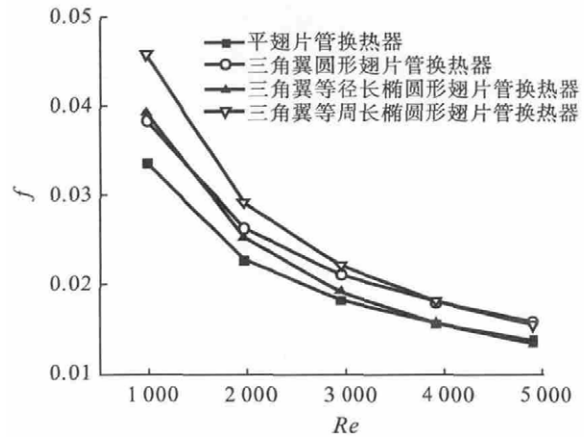


图 6 不同结构翅片 f 随 Re 的变化

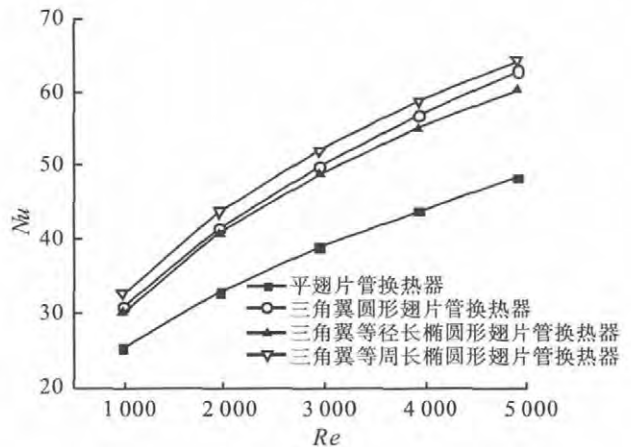


图 7 不同结构翅片 Nu 随 Re 的变化

图 7 为不同结构翅片 Nu 随 Re 的变化曲线。由图 7 可以看出,随着 Re 的增大,4 种不同结构翅片管换热器的 Nu 均逐渐增大,带三角翼的翅片管换热器 Nu 远大于平翅片管换热器。三角翼等周长椭圆形翅片管换热器 Nu 最大,比三角翼圆形翅片管换热器增大 2.2% ~ 6.1%,比三角翼等径长椭圆形翅片管换热器增大 6.5% ~ 8.3%,比平翅片管换热器增大 29.1% ~ 33.5%。

J. S. Leu 等^[15]的实验研究认为,带纵向涡的圆

型翅片管换热器在低 Re 工况下能有效增加换热. 本研究得出不同结构翅片 JF 随 Re 的变化如图 8 所示. 在计算时以平板作为计算参考依据, 由图 8 可以看出, 随着 Re 的增大, JF 开始增加很快, 随后变化缓慢. 当 $Re < 1000$ 时, 三角翼圆形翅片管换热器的综合换热性能最优; 当 $Re > 1000$ 时, 三角翼等周长椭圆形翅片管换热器综合换热性能最优, 分别比三角翼等径长椭圆形翅片管换热器提高 13.1% ~ 29.4%, 比三角翼圆形翅片管换热器提高 0.15% ~ 30.4%. 这说明纵向涡圆形翅片管换热器在低 Re 时的综合换热性能最优, 与文献 [15] 得出的结论一致, 能有效证实本研究的可信度. 当 $Re < 2300$ 时, 三角翼圆形翅片管换热器的 JF 优于三角翼等径长椭圆形翅片管换热器; 当 $Re > 2300$ 时, 三角翼等径长椭圆形翅片管换热器的 JF 优于三角翼圆形翅片管换热器. 这说明纵向涡椭圆形翅片管换热器适合中等、较大 Re 工况, 这与图 6 得出的结论一致.

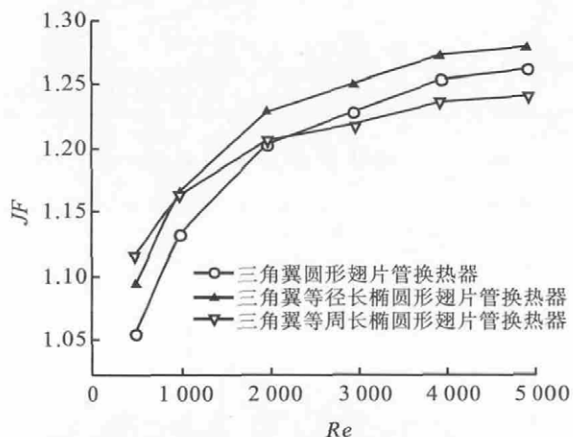


图 8 不同结构翅片 JF 随 Re 的变化

4 结论

本文对三角翼圆形翅片管换热器、三角翼等径长椭圆形翅片管换热器和三角翼等周长椭圆形翅片管换热器的流动传热性能分别进行了数值研究. 从中得出:

1) 三角翼圆形翅片管换热器存在较大尾流区; 三角翼等径长椭圆形翅片管换热器尾迹平滑, 尾流区范围减小; 三角翼等周长椭圆形翅片管换热器温度场和速度场分布最为均匀, 换热效果最好.

2) 三角翼等周长椭圆形翅片管换热器 Nu 最大, 分别比三角翼圆形翅片管换热器增大 2.2% ~ 6.1%, 比三角翼等径长椭圆形翅片管换热器增大 6.5% ~ 8.3%, 比平翅片管换热器增大 29.1% ~ 33.5%.

当 $Re > 1000$ 时, 三角翼等周长椭圆形翅片管换热器综合换热性能最优: 比三角翼等径长椭圆形翅片管换热器提高 13.1% ~ 29.4%, 比三角翼圆形翅片管换热器提高 0.15% ~ 30.4%. 当 $Re > 4000$ 时, 三角翼等周长椭圆形翅片管换热器的 f 远小于三角翼圆形翅片管换热器, 而换热性能略高于三角翼圆形翅片管换热器; 当 $Re < 2300$ 时, 三角翼等径长椭圆形翅片管换热器的 JF 低于三角翼圆形翅片管换热器; 当 $Re > 2300$ 时, 三角翼等径长椭圆形翅片管换热器的 JF 优于三角翼圆形翅片管换热器. 综上可得, 三角翼纵向涡椭圆形翅片管换热器在中等、较大 Re 工况下, 取得的综合换热性能最好.

参考文献:

- [1] Kundu B, Lee K S. Thermal design of an orthotropic flat fin in fin-and-tube heat exchangers operating in dry and wet environments [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(25/26): 5207.
- [2] Wang C C, Tao W H, Chang C J. An investigation of the airside performance of the slit fin-and-tube heat exchangers [J]. International Journal of Refrigeration, 1999, 22(8): 595.
- [3] Joardar A, Jacobi A M. Impact of leading edge delta-wing vortex generators on the thermal performance of a flat tube louvered-fin compact heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(8): 1480.
- [4] 钱力, 吴学红, 吕彦力. X 型开缝翅片传热与流动性能的数值模拟 [J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2011, 26(4): 45.
- [5] Tian L, He Y, Tao Y, et al. A comparative study on the air-side performance of wavy fin-and-tube heat exchanger with punched delta winglets in staggered and in-line arrangements [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(9): 1765.
- [6] 闵春华, 齐承英, 王恩宇, 等. 波纹翅片开设涡发生器强化传热数值模拟 [J]. 工程热物理学报, 2014(1): 119.
- [7] Wu X H, Zhang W H, Gou Q P, et al. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow characteristics of composite fin [J]. Journal of Heat and Mass Transfer, 2014(75): 414.
- [8] 吴学红, 罗志明, 吕彦力, 等. 小管径管翅式换热器空气侧的强化传热特征 [J]. 热科学与技术, 2012(4): 295.

(下转第 92 页)

- 的相位特性研究[J]. 电测与仪表 2012 49(1):8.
- [3] 李艳鹏,侯启方,刘承志. 非周期分量对电流互感器暂态饱和的影响[J]. 电力自动化设备 2006 26(8):15.
- [4] 景敏慧,孔霄迪,覃松涛,等. P类电流互感器饱和原因分析及对策[J]. 电力系统自动化 2007 31(21):94.
- [5] 张小鸣,费雨胜. 一种滤除衰减直流分量的电流估计新算法[J]. 电力系统保护与控制 2010 38(20):90.
- [6] 张秋丽,黄纯,贺建辉,等. 一种消除衰减直流分量影响的改进 DFT 递推算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010 38(24):1.
- [7] 陈奎,孙常青,张丽,等. 一种新方法在监视线保护中的应用[J]. 电力系统保护与控制 2010 38(6):76.
- [8] Abdulah A, Konjicija A S. Algorithm for elimination of DC component from fault current [C]// IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Benalmadena: IEEE, 2006: 1118 - 1121.
- [9] Musa O, Aksamovic A. Comparative analysis of algorithms for elimination of exponentially decaying DC component [C]//19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, Vienna: IEEE 2012: 362 - 367.
- [10] Cho Y S, Lee C K, Jang G, et al. An innovative decaying DC component estimation algorithm for digital relaying [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1):73.
- [11] 冯巧玲,牛月兰. 电力系统数字保护算法的仿真分析[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版, 2007, 22(4):49.
- [12] 唐建辉,吴在军,胡敏强. 一种精确滤除衰减非周期分量的新算法[J]. 继电器 2005 33(11):14.
- [13] 及洪泉,杨以涵,李岩松,等. 基于光学电流互感器的非周期分量线路纵差保护[J]. 中国电机工程学报, 2007 27(19):45.
- [14] 李岩松,郭志忠,杨以涵,等. 自适应光学电流互感器的基础理论研究[J]. 中国电机工程学报 2005 25(22):21.
- [15] 刘青,王增平,徐岩,等. 光学电流互感器对继电保护系统的影响研究[J]. 电网技术 2005 29(1):11-29.
- [16] 冯建勤,冯巧玲. 电气工程基础[M]. 北京:中国电力出版社 2010.
- [17] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,1995.

(上接第76页)

- [9] Lei Y G, He Y L, Tian L T, et al. Hydrodynamics and heat transfer characteristics of a novel heat exchanger with delta-winglet vortex generators [J]. Chemical Engineering Science 2010 65(5):1551.
- [10] Zeng M, Tang L H, Lin M, et al. Optimization of heat exchangers with vortex-generator fin by taguchi method [J]. Applied Thermal Engineering 2010 30(13):1775.
- [11] Sun L, Zhang C L. Evaluation of elliptical finned-tube heat exchanger performance using CFD and response surface methodology [J]. International Journal of Thermal Sciences 2014(75):45.
- [12] 吴学红,苟秋平,吕彦力,等. 半球突开缝翅片传热特性模拟及(火积)分析[J]. 工程热物理学报, 2013(1):153.
- [13] Wu X H, Zhang W H, Lu Y L, et al. Performance evaluation and optimization of semi-dimpled slit fin [J]. Heat and Mass Transfer 2014 50(9):1251.
- [14] 苏石川,李光琛,陈明华,等. 圆弧形三角翼翅片管换热器流动与传热特性的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2013(3):194.
- [15] Leu J S, Wu Y H, Jang J Y. Heat transfer and fluid flow analysis in plate-fin and tube heat exchangers with a pair of block shape vortex generators [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2004 47(19/20):4327.