

# 矩形小翼和三角形小翼纵向涡发生器流动换热的研究

曾卓雄<sup>1</sup>, 刘建全<sup>1</sup>, 王漳军<sup>2</sup>, 魏佳加<sup>2</sup>

(1. 上海电力学院 能源与机械工程学院, 上海 200090; 2. 南昌航空大学 飞行器工程学院, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 利用 SIMPLE 算法及  $k-\varepsilon$  湍流模型对加装矩形小翼和三角形小翼(攻角为  $45^\circ$ 、 $60^\circ$ ) 的单 H 形翅片的换热性能进行数值模拟。研究表明: 雷诺数相同时, 随着攻角的增大, 加装矩形小翼的单 H 形翅片的进出口温差、压力损失、努赛尔数、欧拉数、换热因子和综合性能评价标准  $JF$  的值都比加装三角形小翼要大。由于纵向涡发生器的存在, 使得管后回流区和纵向涡发生器附近的湍动能增大, 从而导致这些区域内的温度升高, 沿着径向方向, 湍动能大致呈“M”形分布, 温度大致呈“W”形分布。

**关键词:** H 形翅片, 纵向涡发生器, 对流换热, 流动特性

中图分类号: TK172 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.01.002

## 引言

纵向涡发生器通过改变二次流的分布能够以较小的阻力代价强化换热<sup>[1-2]</sup>; 文献[3]对渐缩式纵向涡发生器与椭圆支柱共同作用下矩形通道内的流动换热性能进行了研究, 与渐缩式纵向涡发生器、渐扩式纵向涡发生器和光通道的流动换热性能进行了对比; 文献[4]详细分析和研究了三角形翼和矩形翼纵向涡发生器对管翅式换热器传热流动的影响, 并对纵向涡发生器的关键参数(攻角、数目和摆放位置)进行了优化; 文献[5]研究了纵向涡发生器对矩形通道内流动换热的影响, 从涡量强度的角度对纵向涡发生器强化换热的机理进行了分析, 并与光通道进行了对比; 文献[6]实验研究了矩形通道内布置矩形翼、直角三角翼以及斜截半圆柱、半椭圆柱面纵向涡发生器的流动和换热特性; 文献[7]采用数值模拟的方法研究了三角小翼对翅片管换热器的影响, 发现三角小翼产生的纵向涡可以有效改善换热管尾迹区的换热情况; 文献[8]研究了带矩形小

翼和三角小翼纵向涡发生器的矩形翅片通道内的层流对流换热; 文献[9]数值分析了矩形纵向涡发生器的压力降和增强换热的机理; 文献[10]对纵向涡发生器的油浸式变压器散热片进行了数值模拟, 研究了三角锥形纵向涡发生器攻角、高度及排列方式对变压器散热片散热能力的影响, 并分析了影响机理。

本研究利用 SIMPLE 算法及可实现  $k-\varepsilon$  模型进一步系统地对加装矩形小翼和三角形小翼的单 H 形翅片, 在不同纵向涡发生器攻角 ( $45^\circ$ 、 $60^\circ$ ) 下的流场和温度场进行了数值模拟, 并对比了其换热性能及综合性能等。

## 1 计算对象几何结构及数值模拟方法

### 1.1 几何结构

加装矩形小翼和三角形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片结构如图 1、图 2 所示。

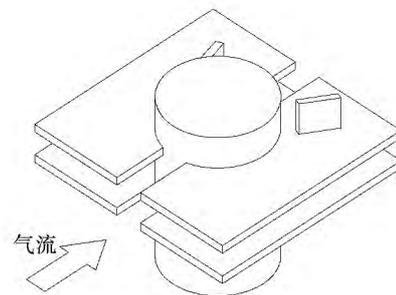


图 1 加装矩形小翼纵向涡发生器单 H 形翅片管结构示意图

Fig. 1 The schematic structure diagram of the single H-type finned tube with rectangular wing longitudinal vortex generator

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51066006; 51266013)

作者简介: 曾卓雄(1972-), 男, 江西新干人, 上海电力学院教授。

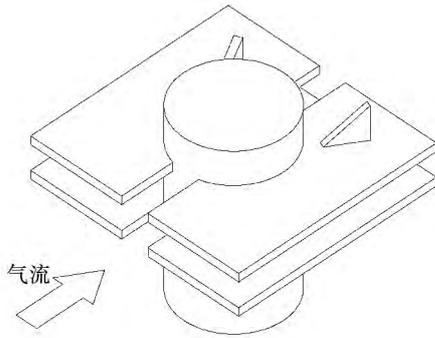


图 2 加装三角形小翼纵向涡发生器单 H 形翅片管结构示意图

Fig. 2 The schematic structure diagram of the single H - type finned tube with triangular wing longitudinal vortex generator

两种纵向涡发生器的结构参数如表 1 所示,其几何图形可参考文献[4],单 H 形翅片管结构尺寸如表 2 所示,其几何图形可参考文献[1]。沿流动方向的换热管排数为 2 排。

表 2 单 H 形翅片管的结构尺寸 (mm)

Tab. 2 The structure dimension of the single H - type finned tube (mm)

翅片参数					管子参数		
宽度 $H_1$	长度 $H_2$	厚度 $\delta$	开缝宽 $b$	节距 $P$	管子直径 $D_e$	横向间距 $S_1$	纵向间距 $S_2$
76	70	2.5	10	10	38	86	78

在数值模拟计算中,为避免空气进入时速度分布不均匀而导致的入口效应,满足均匀入口流速分布的条件,在实际计算中将计算区域从通道入口沿 X 方向向上游延长 2 倍的圆管外径长度;为了避免出口效应对计算结果的影响,在数值计算模型的选择时,将计算区域从通道出口沿 X 方向向下游延长 8 倍的圆管外径长度。

1.2.2 控制方程及边界条件

进口流速和温度 ( $T_0 = 623$  K) 均匀恒定;出口为压力出口边界;管子为恒定壁温 ( $T_1 = 529$  K) 且为无滑移边界条件;翅片表面为无滑移边界条件;计算器区域的前后边界(即侧面)为对称性边界条件;计算区域的上、下边界为周期性边界条件。

在计算中考虑到翅片厚度的影响以及翅片的固体表面与流体之间的耦合换热问题,对所有壁面附近的网格进行了加密处理,网格的划分已保证了数值解与网格数无关。

表 1 纵向涡发生器的结构尺寸

Tab. 1 The structure dimension of the longitudinal vortex generator

类 型	长度/(底边) $a_1$ /mm	宽度 $b_1$ /mm	高度 $c_1$ /mm	攻角 $\beta/(^\circ)$
矩形小翼	10	1.25	8.5	45、60
三角形小翼	10	1.25	8.5	45、60

1.2 数值模拟方法

1.2.1 计算区域

由于单 H 形翅片管结构的几何对称性,空气流过 H 形翅片区域的流动与换热沿管长方向周期性充分发展,因此数值计算选取其中对称部分的一个单元。坐标原点在计算区域进口中心,规定沿着流动的方向为 X 方向,翅片的横向为 Y 方向,沿着管子的方向为 Z 方向。翅片管模型沿着 Y 和 Z 方向是对称的,因此计算区域在 Y 方向上为一个翅片的流通区域,在 Z 方向为两个上下相邻翅片的中心线之间的区域<sup>[4]</sup>。

控制方程包括三维稳态不可压常物性的连续方程、动量方程和能量方程<sup>[11]</sup>。采用 SIMPLE 算法耦合速度与压力。采用可实现  $k - \epsilon$  模型进行模拟计算。对流项采用二阶迎风差分,扩散项采用二阶中心差分。

1.2.3 数据处理

$$Re = \rho u_m D_e / \eta \tag{1}$$

$$Eu = \Delta p / \rho u_m^2 \tag{2}$$

$$Nu = h D_e / \lambda \tag{3}$$

$$j = [h / \rho u_m c_p] P_r^{2/3} \tag{4}$$

$$JF = j / f^{(1/3)} \tag{5}$$

$$f = \frac{2 \Delta p}{\rho u_m^2} \frac{A_{min}}{A_H} \tag{6}$$

$$\varphi = \rho u A c_p \Delta T_1 \tag{7}$$

$$h = \varphi / A_H \Delta T \tag{8}$$

$$\Delta T_1 = T_{in} - T_{out} \tag{9}$$

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} \quad (10)$$

$$\Delta T = (T_{max} - T_{min}) / \ln(T_{max} / T_{min}) \quad (11)$$

式中:  $\rho$ —烟气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u$ —入口速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $u_{min}$ —流体流动最小截面处的平均流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $D_e$ —管径,  $\text{m}$ ;  $\eta$ —烟气动力粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $h$ —烟气与单 H 形翅片管的对流传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $A$ —入口面积,  $\text{m}^2$ ;  $A_H$ —单 H 形翅片管总的传热面积,  $\text{m}^2$ ;  $A_{min}$ —入口面积的最小值,  $\text{m}^2$ ;  $\lambda$ —烟气的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\Delta p$ —流动阻力,  $\text{Pa}$ ;  $p_{in}$ —入口压力,  $\text{Pa}$ ;  $p_{out}$ —出口压力,  $\text{Pa}$ ;  $z$ —管排数;  $j$ —换热因子;  $f$ —摩擦因子;  $JF$ —翅片传热和阻力综合性能的评价基准;  $T_{in}$ —入口温度;  $T_{out}$ —出口平均温度,  $\text{K}$ ;  $\Delta T_1$ —进、出口温差,  $\text{K}$ ;  $T_w$ —翅片的平均温度,  $\text{K}$ ;  $T_{max} = \max(T_{in} - T_w, T_{out} - T_w)$ ;  $T_{min} = \min(T_{in} - T_w, T_{out} - T_w)$ 。

## 2 计算结果对比分析

### 2.1 对流换热特征数

由分析可知<sup>[12-13]</sup>, 加装攻角为  $60^\circ$  矩形小翼 (JX $60^\circ$ ) 和  $45^\circ$  三角形小翼 (SJX $45^\circ$ ) 纵向涡发生器的单 H 形翅片的综合对流换热流动性能相对较佳, 因此分别选取加装攻角为  $45^\circ$  和  $60^\circ$  的矩形小翼 (JX $45^\circ$ 、JX $60^\circ$ )、三角形小翼 (SJX $45^\circ$ 、SJX $60^\circ$ ) 纵向涡发生器的单 H 形翅片的计算结果进行对比分析。

图 3—图 8 分别是加装攻角为  $45^\circ$  和  $60^\circ$  的矩形小翼、三角形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片与无纵向涡发生器的单 H 形翅片的进、出口温差  $\Delta T_1$ 、压力损失  $\Delta P$ 、努赛尔数  $Nu$ 、欧拉数  $Eu$ 、换热因子  $j$  和综合性能评价标准  $JF$  的对比图。

由图 3 可知: (1) 雷诺数相同时, 加装  $45^\circ$  和  $60^\circ$  三角形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片进、出口温差相差很小, 最大相差 1.37%; 加装  $45^\circ$  和  $60^\circ$  矩形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片的压力损失相差较大, 最小相差 2.86%, 最大相差 4.31%; (2) 攻角为  $45^\circ$  时, 加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的进、出口温度相差较小, 最大相差 7.96%; 攻角为  $60^\circ$  时, 加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的进、出口温度相差较大, 最大相差 11.2%。

由图 4 可知: (1) 雷诺数相同时, 加装  $45^\circ$  和

$60^\circ$  三角形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片的压力损失相差很小, 最大相差 7.5%; 加装  $45^\circ$  和  $60^\circ$  矩形小翼纵向涡发生器的压力损失相差较大, 最小相差 14.8%, 最大相差 18.3%; (2) 攻角为  $45^\circ$  时, 加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的压力损失相差较小, 最大相差 22.5%; 攻角为  $60^\circ$  时, 加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片的压力损失相差较大, 最小相差 28.9%, 最大相差 30.7%。

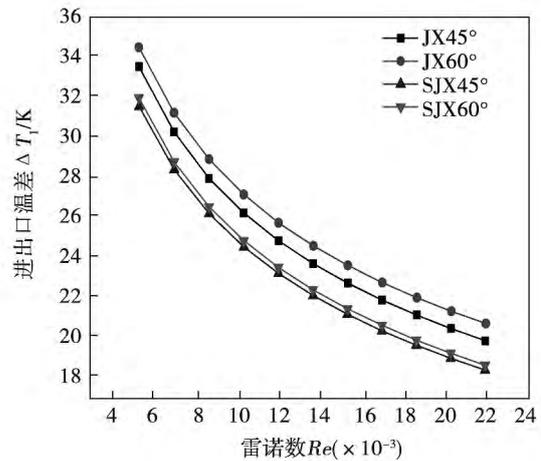


图 3 进、出口温差  $\Delta T_1$  对比

Fig. 3 The comparison of temperature difference  $\Delta T_1$  between inlet and outlet

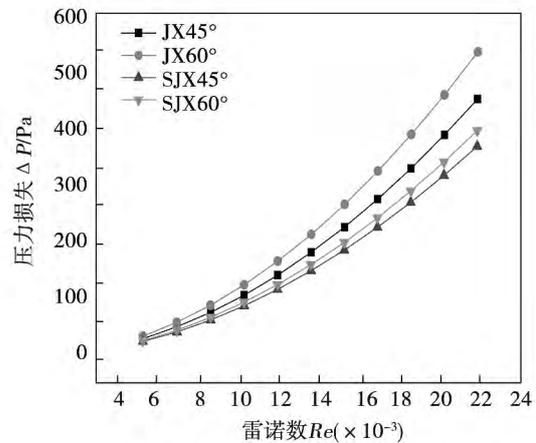


图 4 压力损失  $\Delta p$  对比

Fig. 4 The comparison of the pressure loss  $\Delta p$

由图 5 可知: (1) 雷诺数相同时, 加装  $45^\circ$  和  $60^\circ$  三角形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片  $Nu$  数

相差很小,最大相差 2.61%;加装 45°和 60°矩形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片  $Nu$  数相差较大,最小相差 4.19%,最大相差 6.62%;(2) 攻角为 45°时,加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的  $Nu$  数相差较小,最大相差 10.6%;攻角为 60°时,加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的  $Nu$  数相差较大,最小相差 9.95%,最大相差 14.9%。

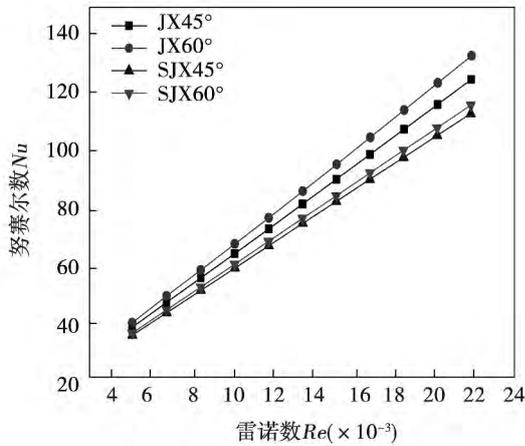


图 5 努赛尔数  $Nu$  对比

Fig. 5 The comparison of  $Nu$  number

由图 6 可知:(1) 雷诺数相同时,加装 45°和 60°三角形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片的  $Eu$  数相差很小,最大相差 7.49%;加装 45°和 60°矩形小翼纵向涡发生器的  $Eu$  数相差较大,最小相差 14.8%,最大相差 18.1%;(2) 攻角为 45°时,加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的  $Eu$  数相差较小,最大相差 22.3%;攻角为 60°时,加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的  $Eu$  数相差较大,最小相差 29.1%,最大相差 34.3%。

由图 7 可知:(1) 雷诺数相同时,加装 45°和 60°三角形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片的换热因子  $j$  相差很小,最大相差 2.53%;加装 45°和 60°矩形小翼纵向涡发生器的换热因子  $j$  相差较大,最小相差 4.16%,最大相差 6.41%;(2) 攻角为 45°时,加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的换热因子  $j$  相差较小,最大相差 10.4%;攻角为 60°时,加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的换热因子  $j$  相差较大,最小相差 10.3%,最大相差 14.6%。

由图 8 可知:(1) 雷诺数相同时,加装 45°和 60°三角形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片的综合

性能评价标准  $JF$  几乎相同,最大相差 0.48%;加装 45°和 60°矩形小翼纵向涡发生器的综合性能评价标准  $JF$  在低雷诺数时相差非常小,随着雷诺数的增大,差距增大,最大相差 0.81%;(2) 攻角为 45°时,加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的综合性能评价标准  $JF$  相差较小,最大相差 3.15%;攻角为 60°时,加装三角形小翼和矩形小翼纵向涡发生器的综合性能评价标准  $JF$  相差较大,最小相差 1.02%,最大相差 4.15%。

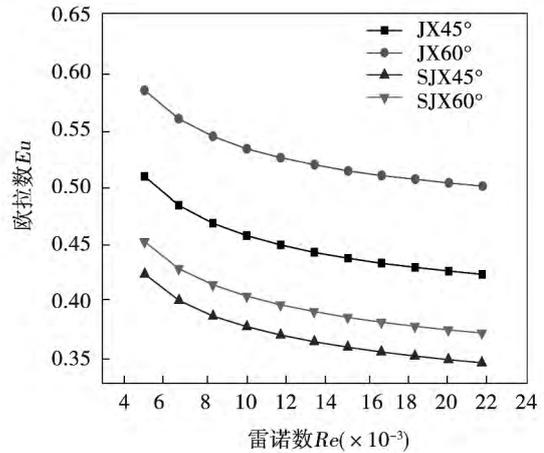


图 6 欧拉数  $Eu$  对比

Fig. 6 The comparison of  $Eu$  number

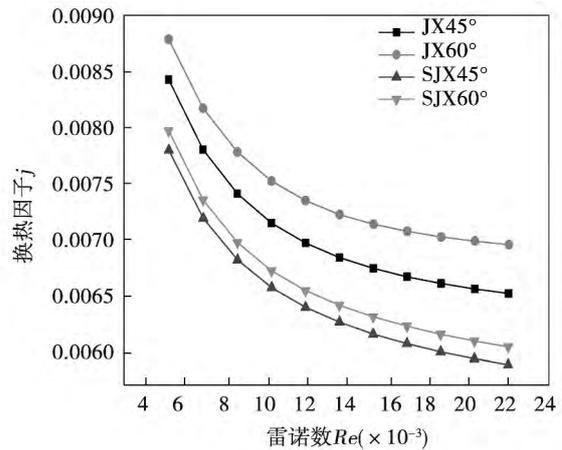


图 7 换热因子  $j$  对比

Fig. 7 The comparison of heat exchange factor  $j$

综上所述,雷诺数相同时,加装矩形小翼的单 H 形翅片的进、出口温差  $\Delta T_1$ 、压力损失  $\Delta P$ 、努赛尔数  $Nu$ 、欧拉数  $Eu$ 、换热因子  $j$  和综合性能评价标准  $JF$  的值都比加装三角形小翼要大,这主要是因为矩形小翼的换热面积比三角形小翼的大,从而使得换热

能力增大,阻力损失增大,进而导致各个特征量的增大。

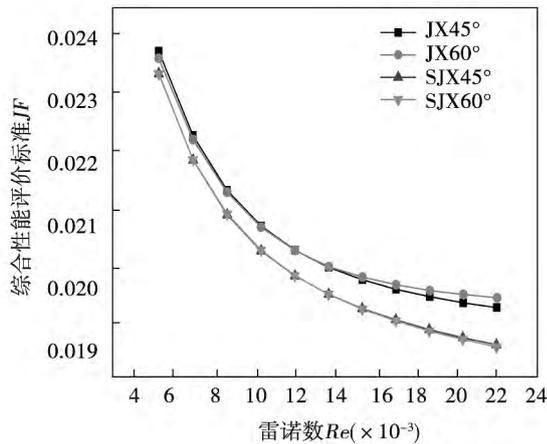


图 8 综合性能评价标准  $JF$  对比

Fig. 8 The comparison of the comprehensive performance assessment standard  $JF$

采用最小二乘法拟合原理,分别对加装  $45^\circ$ 、 $60^\circ$  的矩形小翼和三角形小翼的单 H 形翅片模拟得到的进出口温差  $\Delta T_1$ 、压力损失  $\Delta P$  和综合性能评价标准  $JF$  随迎面风速  $U$  的变化关系,拟合指数函数形式如表 3 所示。用雷诺数  $Re$  表示的加装  $45^\circ$ 、 $60^\circ$  的矩形小翼和三角形小翼的单 H 形翅片流动换热特征关联式如表 4 所示。

表 3 用进口速度表示的对流换热关联式

Tab. 3 The convective heat transfer correlations shown with Import speed

类 型	进口温差 $\Delta T_1$	压力损失 $\Delta P$	综合性能评价指标 $JF$
JX45°	$49.6176 U^{-0.3552}$	$3.8873 U^{1.8547}$	$0.0268 U^{-0.1284}$
JX60°	$50.5335 U^{-0.3461}$	$4.3875 U^{1.8731}$	$0.0264 U^{-0.12}$
SJX45°	$47.2083 U^{-0.3651}$	$3.3215 U^{1.8369}$	$0.0268 U^{-0.1382}$
SJX60°	$47.8735 U^{-0.3655}$	$3.5121 U^{1.8434}$	$0.0268 U^{-0.1396}$

表 4 用雷诺数表示的特征数关联式

Tab. 4 The characteristic numbers correlations shown with  $Re$  number

类 型	努赛尔数 $Nu$	欧拉数 $Eu$	综合性能评价指标 $JF$
JX45°	$0.0243 Re^{0.8542}$	$1.4784 Re^{-0.126}$	$0.0721 Re^{-0.1318}$
JX60°	$0.0217 Re^{0.8717}$	$1.4280 Re^{-0.1058}$	$0.0665 Re^{-0.1231}$
SJX45°	$0.0272 Re^{0.8328}$	$1.3638 Re^{-0.138}$	$0.0775 Re^{-0.1419}$
SJX60°	$0.0267 Re^{0.8372}$	$1.3948 Re^{-0.133}$	$0.0785 Re^{-0.1433}$

## 2.2 径向湍动能和温度的对比分析

选取位于第一排纵向涡发生器后面回流区中心  $X=0.15\text{ m}$  处来分析纵向涡发生器对湍动能和温度分布的影响。图 9 和图 10 分别是无纵向涡发生器 (WFSQ) 与加装攻角为  $45^\circ$  和  $60^\circ$  的矩形小翼、三角形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片在  $X=0.15\text{ m}$  处径向湍动能及温度分布。从图 9 可以看出: (1)  $X=0.15\text{ m}$  处沿着径向方向,湍动能大致呈“M”形分布,两个峰值出现在纵向涡发生器位置附近 ( $Y=-0.03\text{ m}$  和  $Y=0.03\text{ m}$ ); (2) 无纵向涡发生器时,湍动能值较低,最大值为  $12.3\text{ m}^2/\text{s}^2$ ; (3) 加装矩形小翼时,整体湍动能值增大,尤其是在换热管后回流区中心 ( $Y=0\text{ m}$ ) 和纵向涡发生器附近位置 ( $Y=-0.03\text{ m}$  和  $Y=0.03\text{ m}$ ) 明显增大,并且随着攻角的增大,在纵向涡发生器附近湍动能的两个峰值逐渐增大,攻角为  $60^\circ$  时最大,为  $34.5\text{ m}^2/\text{s}^2$ ,比攻角为  $45^\circ$  时增大  $19\%$ ; (3) 加装三角形小翼时,整体湍动能值增大,但增大幅度比加装矩形小翼的要小,并且在换热管后回流区中心处 ( $Y=0\text{ m}$ ) 变化很小,随着攻角的增大,纵向涡发生器附近湍动能的两个峰值逐渐增大,攻角为  $60^\circ$  时最大,为  $30.1\text{ m}^2/\text{s}^2$ ,比攻角为  $45^\circ$  时增大  $10.5\%$ ; (4) 攻角为  $60^\circ$  时,加装矩形小翼和三角形小翼的湍动能出现的峰值最大,并且加装矩形小翼时的湍动能要比三角形小翼大  $14.6\%$ 。

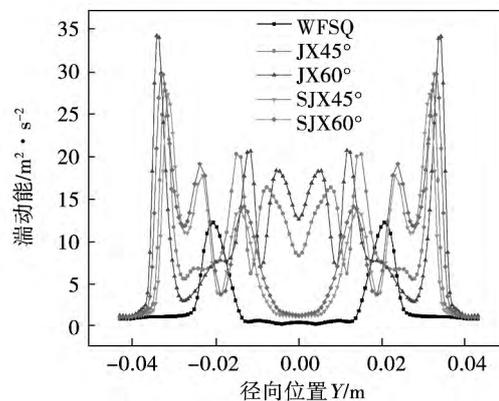


图 9  $X=0.15\text{ m}$  处径向湍动能分布

Fig. 9 Radial turbulence energy distribution at  $X=0.15\text{ m}$

由图 10 可知: (1) 在  $X=0.15\text{ m}$  处沿着径向方向,温度大致呈“W”形分布,两个低谷值出现在纵向涡发生器位置附近 ( $Y=-0.03\text{ m}$  和  $Y=0.03\text{ m}$ )。

m) ,同时在管后回流区中心( $Y=0\text{ m}$ ) 位置附近的温度也较低;(2) 加装纵向涡发生器之后,管后回流区中心( $Y=0\text{ m}$ ) 位置附近的温度明显增大,由 558 K 增加到 580 K;在纵向涡发生器附近出现两个低谷值,并且三角形小翼的低谷值比矩形小翼的高 10 K 左右。

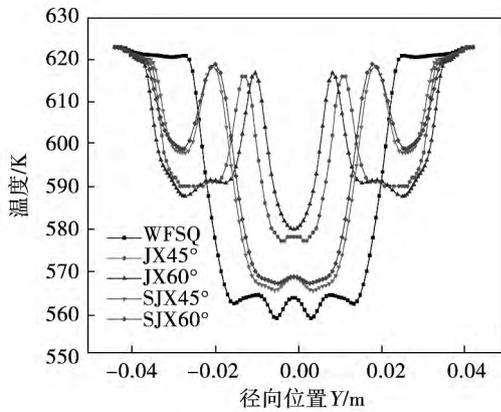


图 10  $X=0.15\text{ m}$  处径向温度分布

Fig. 10 Radial temperature distribution at  $X=0.15\text{ m}$

进一步分析位于第二排纵向涡发生器后面回流区中心  $X=0.25\text{ m}$  处的湍动能和温度分布,并且与  $X=0.15\text{ m}$  处的结果进行对比。图 11 和图 12 分别是无纵向涡发生器的单 H 形翅片与加装攻角为  $45^\circ$  和  $60^\circ$  的矩形小翼、三角形小翼纵向涡发生器的单 H 形翅片在  $X=0.25\text{ m}$  处径向湍动能和温度分布。

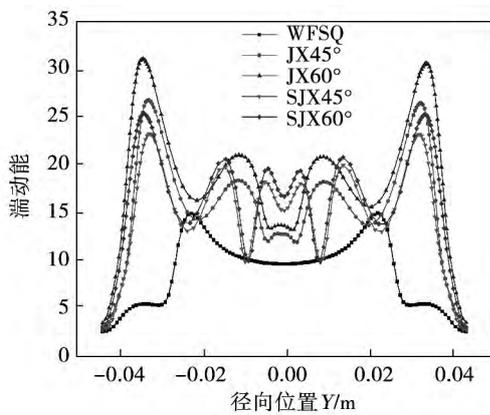


图 11  $X=0.25\text{ m}$  处径向湍动能分布

Fig. 11 Radial turbulence energy distribution at  $X=0.25\text{ m}$

对比图 9 和图 11 可以得出:(1) 沿着径向方

向,湍动能大致呈“M”形分布,两个峰值出现在纵向涡发生器位置附近( $Y=-0.03\text{ m}$  和  $Y=0.03\text{ m}$ );(2) 无纵向涡发生器时,第二排管后回流区中心( $Y=0\text{ m}$ ) 位置附近的湍动能要比第一排高,这是因为在第二排管后回流的速度变化梯度比较大;(3)  $X=0.25\text{ m}$  处沿着径向分布的湍动能没有  $X=0.15\text{ m}$  的震荡那么剧烈,即在纵向涡发生器左右出现两个很明显的峰值点,因为  $X=0.15\text{ m}$  是处在前后两翅片的中间位置,后面翅片和纵向涡发生器相互影响导致其湍流流场变复杂,进而湍动能变化剧烈;而在  $X=0.25\text{ m}$  处是在后面一排纵向涡发生器产生回流区的中心,其后面没有翅片对湍流流场的干扰,所以在  $X=0.25\text{ m}$  处沿径向分布的湍动能比较有规律。

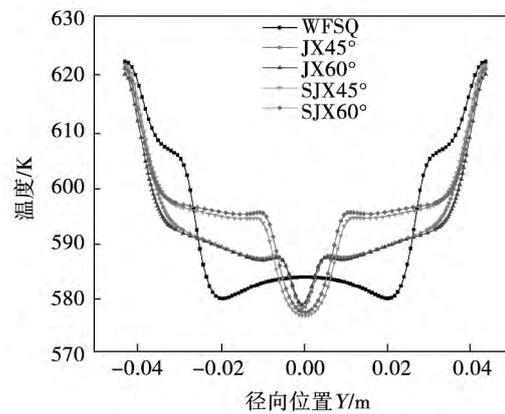


图 12  $X=0.25\text{ m}$  处径向温度分布

Fig. 12 Radial temperature distribution at  $X=0.25\text{ m}$

对比图 10 和图 12 可以看出:(1) 沿着径向方向,温度也大致呈“W”形分布,但是在纵向涡发生器位置附近( $Y=-0.03\text{ m}$  和  $Y=0.03\text{ m}$ ) 并没有出现两个明显的低谷值,而是在管后回流区中心位置( $Y=0\text{ m}$ ) 附近的温度变低,这是因为加装了纵向涡发生器之后单 H 形翅片的换热能力增强,使得进入回流区的气流温度降低;(2) 沿着径向方向,低温区的长度减小很大,这是由纵向涡发生器的加装使得管后回流区的面积减小导致的;(3)  $X=0.25\text{ m}$  处沿着径向分布的温度没有  $X=0.15\text{ m}$  的波动那么剧烈,这也是因为在  $X=0.25\text{ m}$  处后面没有翅片对其流场的干扰,所以分布规律比较一致。

综合上述分析可知,由于纵向涡发生器的存在,使得管后回流区和纵向涡发生器附近的湍动能增

大,从而导致这些区域内的温度升高,沿着径向方向,湍动能大致呈 M 形分布,温度大致呈 W 形分布,并且由于前后两翅片和纵向涡发生器三者之间的相互作用导致在  $X = 0.15 \text{ m}$  的湍动能和温度变化剧烈。

### 3 结 论

(1) 相同雷诺数时,随着攻角的增大,加装纵向涡发生器的单 H 形翅片的进口温差  $\Delta T_1$ 、压力损失  $\Delta P$ 、努赛尔数  $Nu$ 、欧拉数  $Eu$  和换热因子  $j$  都增大,且矩形小翼纵向涡发生器的增大幅度比三角形小翼要大;而综合性能  $JF$  先增大后减小,攻角为  $60^\circ$  时矩形小翼纵向涡发生器的综合性能最好,攻角为  $45^\circ$  时三角形小翼纵向涡发生器的综合性能最好。

(2) 由于纵向涡发生器的存在,使得管后回流区和纵向涡发生器附近的湍动能增大,从而导致这些区域内的温度升高,沿着径向方向,湍动能大致呈“M”形分布,温度大致呈“W”形分布,并且由于前后两翅片和纵向涡发生器之间的相互作用导致在  $X = 0.15 \text{ m}$  的湍动能和温度变化剧烈。

#### 参考文献:

- [1] 王漳军,曾卓雄,徐义华,等. H 形翅片管传热和阻力特性数值研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(2): 187-192.  
WANG Zhang-jun, ZENG Zhuo-xiong, XU Yi-hua, et al. Numerical study on heat transfer and resistance characteristics of H-type finned tubes[J]. Computer Simulation, 2014, 31(2): 187-192.
- [2] Joardar A, Jacobi A M. heat transfer enhancement by winglet type vortex generator arrays in compact plain fin and tube heat exchangers[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(1): 87-97.
- [3] 唐凌虹,谭思超,高璞珍. 纵向涡发生器作用下矩形通道内流动换热性能研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(5): 812-817.  
TANG Ling-hong, TAN Si-chao, GAO Pu-zhen. Study on flow and heat transfer characteristic in rectangular channel with longitudinal vortex generator [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, 48(5): 812-817.
- [4] 何雅玲,楚攀,谢涛. 纵向涡发生器在管翅式换热器中的应用及优化[J]. 化工学报, 2012, 63(3): 746-760.  
HE Ya-ling, CHU Pan, XIE Tao. Application and optimization of fin-and-tube heat exchangers with longitudinal vortex generators [J]. Chinese journal of chemical and engineering, 2012, 63(3): 746-760.
- [5] 田林,柏巍,薛山虎,等. 纵向涡发生器对矩形通道内流动换热的影响研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(2): 324-327.  
TIAN Lin, BAI Wei, XUE Shan-hu, et al. Numerical study of influence of longitudinal vortex generator on flow and heat transfer in rectangular channel [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(2): 324-327.
- [6] 叶秋玲,周国兵,程金明. 矩形通道中不同涡流发生器对换热和压降的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(11): 86-91.  
YE Qiu-ling, ZHOU Guo-bing, CHENG Jin-ming. Influence of different vortex generators on heat transfer enhancement and pressure drop characteristics in a rectangular channel [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(11): 86-91.
- [7] Kannan K T, Kumar B S. Heat transfer and fluid flow analysis in plate fin and tube heat exchangers with different shaped vortex generators [J]. International Journal of Soft Computing and Engineering, 2011, 2(1): 2231-2307.
- [8] Wu J M, Tao W Q. Numerical study on laminar convection heat transfer in a rectangular channel with longitudinal vortex generator. Part A: Verification of field synergy principle [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(5/6): 1179-1191.
- [9] Gholami A A, Wahid M A, Mohammed H A. Heat transfer enhancement and pressure drop for fin-and-tube compact heat exchangers with wavy rectangular winglet-type vortex generators [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014, 54: 132-140.
- [10] 王强,于明志,陈汉翠. 三角锥型纵向涡发生器强化换热性能数值分析[J]. 山东建筑大学学报, 2013, 28(2): 106-110.  
WANG Qiang, YU Ming-zhi, CHEN Han-cui. Numerical analysis of heat transfer enhancement performance of pyramidal longitudinal vortex generator [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2013, 28(2): 106-110.
- [11] Chu P, He Y L, Lei Y G, et al. Three-dimensional numerical study on fin-and-oval-tube heat exchanger with longitudinal vortex generators [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5/6): 859-876.
- [12] Yang J S, Hong C H, Choi G M. Heat transfer measurement using thermochromatic liquid crystal [J]. Current Applied Physics, 2007, 7: 413-420.
- [13] 吕静,马济成,杜雅萍. 纵向涡旋发生元 LVG 强化换热的实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2001, 23(3): 283-285.  
LV Jing, MA Ji-cheng, DU Ya-ping. Experimental study on heat transfer enhancement by using delta-winglet longitudinal vortex generators [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2001, 23(3): 283-285.

(丛敏编辑)

离网型风光互补系统控制策略探讨 = **Exploratory Investigation of the Tactics for Controlling an Off-grid Type Wind-power-photovoltaic Complementary System** [刊 汉] MA Yan , XU Li-jun ( Department of Electrical and Information Engineering , Xinjiang Engineering College , Urumqi , China , Post Code: 830023) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(1) . -1 -12

Analyzed were the working principles and characteristics of solar power cells and wind power generator units and established was a model for simulating solar energy photovoltaic cells and wind power generators. The perturbation observation method was used to perform a tracking and control of their maximum powers. In the light of the problem that it is difficult to choose the step length for the perturbation observation method , corresponding fuzzy controllers were designed for a solar energy photovoltaic power generation system and a wind power generation system respectively. The simulation results show that the control tactics adopted can exercise a real-time tracking and control with changes in operating conditions. Finally , the working principles and characteristics of an accumulator battery was analyzed and the four-phase charging management of the accumulator battery was adopted , i. e. activated charging , main charging , average charging and floating charging. The simulation results indicate that the method in question is feasible. **Key words:** photovoltaic power generation , wind power generation , maximum power tracking , perturbation observation method , fuzzy control , accumulator battery

矩形小翼和三角形小翼纵向涡发生器流动换热的研究 = **Study of the Flow and Heat Exchange in a Longitudinal Vortex Generator Installed with Rectangular and Triangular Winglets** [刊 汉] ZENG Zuo-xiong , LIU Jian-quan , WANG Zhang-jun ( College of Energy Source and Mechanical Engineering , Shanghai University of Electric Power , Shanghai , China , Post Code: 200090) , WEI Jia-jia ( College of Aircraft Engineering , Nanchang University of Aeronautics , Nanchang , China , Post Code: 330063) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(1) . -13 -19

By making use of the SIMPLE algorithm and the  $k - \varepsilon$  turbulent flow model , the heat exchange performance of a H-shaped finned tube installed with a rectangular winglet or a triangular winglet was numerically simulated. It has been found that when the Reynolds number is kept unchanged , with an increase of the attack angle , the temperature difference and pressure loss between the inlet and outlet of a H-shaped finned tube installed with a rectangular winglet and its Nusselt number , Euler number and heat exchange factor as well as comprehensive performance evaluation criterion JF are all greater than those of the H-shaped finned tube installed with a triangular winglet. In the

presence of a longitudinal vortex generator ,the return flow zone behind the tube and the turbulent kinetic energy close to the longitudinal vortex generator will become bigger ,thus leading to an increase of the temperature in the zones around the tube ,the turbulent kinetic energy approximately assuming a M-shaped distribution and the temperature roughly taking on a W-shaped distribution along the radial direction. **Key words:** H-shaped fin ,longitudinal vortex generator ,convective heat exchange flow characteristics

PSO 用于优化换热网络时对全局搜索能力的研究 = **Study of the Overall Searching Ability of the Particle Swarm Optimization Algorithm When It Is Being Applied in Optimizing a Heat Exchange Network** [刊 汉]

XIAO Yuan ,CUI Guo-min ,PENG Fu-yu ,ZHOU Jing ,CHEN Shang ( College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 1) . -20 -26

When the particle swarm optimization algorithm is used to optimize a heat exchange network ,it can quickly find out the optimum zone in all zones ,however ,in the meantime ,it may produce a local extremum value problem ,which arises from its premature convergence and deterioration in its overall searching ability. The mechanism governing such a deterioration phenomenon was analyzed in depth and the essence of the premature convergence happened when using the particle swarm optimization algorithm was found. To solve this problem ,a forced jump-out strategy was proposed. Through activating the particles involved in the local extremum value problem ,the population diversity was restored and the overall optimum solution was continuously searched. The case calculation results show that the improved searching strategy for the particle swarm optimization algorithm can be suited for a continuous variable optimization of a heat exchange network. When the improved searching strategy for the particle swarm optimization algorithm was applied to the calculation example 10SP2 in the literature No. 16 ,the annual comprehensive expenses thus obtained decreased by 205 \$ /a as compared with that in the literature No. 14. When the improved searching strategy for the particle swarm optimization algorithm was applied to the calculation example 8SP1 in the literature No. 18 ,a currently smallest annual comprehensive expense of 30793 \$ /a was obtained. The annual comprehensive expense calculated by using the improved particle swarm optimization algorithm invariably decreased as compared with those calculated by using the standard particle swarm optimization algorithm and the cultural genetic particle swarm optimization algorithm. **Key words:** optimization of a heat exchange network ,particle swarm optimization algorithm ,local deterioration ,forced jump-out