

# 场协同原理评价指标的定性分析和定量探讨

周俊杰<sup>1,2</sup>, 陶文铨<sup>2</sup>, 王定标<sup>1</sup>

(1. 郑州大学化工学院, 河南 郑州 450002; 2. 西安交通大学能源与动力学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 介绍了场协同原理, 对其评价指标进行了探讨, 分析了5种评价方式(简单算术平均角、体积加权平均角、矢量模平均角、模点积平均角及积分中值角), 以空调器强化表面为例, 进行了三维数值模拟, 分别按5种方式进行了协同角的计算比较, 计算结果表明: 5种协同角整体变化趋势相似, 能够反映速度场和温度场的协同性。定性分析表明, 模平均角不仅物理意义明确, 考虑因素全面。

**关键词:** 场协同; 指标; 协同角; 数值模拟

**中图分类号:** TK 124

**文献标识码:** A

## 0 引言

强化换热的研究一直是传热学研究的热点, 很多学者对强化换热原理做了大量探索。1998年我国学者过增元对边界层型的流动进行了能量方程的分析, 通过将该方程在热边界层内的积分, 证明了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<sup>[1~4]</sup>, 以后这一基本思想被称之为“场协同”原理。最近, 文献[5]对强化传热的场协同原理作了以下全面的表达: 速度与温度梯度之间的协同越好, 在其它条件的相同情况下, 换热就越强烈; 速度场与温度梯度两个矢量场的协同就意味着: ①速度与温度梯度间的夹角应尽可能地小, 两者应尽量平行; ②速度、温度梯度以及夹角余弦的局部值应该同时比较大; ③对于通道内部流动, 截面上的速度分布与温度分布应尽可能的平坦(饱满)。局部协同性好的地方局部 Nusselt 数就比较大。这一完整的表述是本文关于协同角的计算方法的基本依据。为了在强化传热的研究中更好地应用这一原理, 有必要对于场协同的“协同性”建立一个合理、方便的判别指标。在文献[6]中提出了作为评价整个过程协同程度的指标—协同数作为判别协同性的指标。

作者对其全场平均计算方法进行了深入的研究, 并且通过实例验证了协同角作为评价指标的可行性。

## 1 “场协同”原理协同性优劣的定量表述

根据上述场协同原理基本思想的第一点, 速度与温度梯度之间的局部夹角, 即协同角(SYN-ERGY ANGLE), 是表征局部协同程度的一个自然选择。

局部协同角的计算公式为

$$\theta_{\phi} = \arccos \left( \frac{u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}}{|\vec{U}| |\text{grad } T|} \right) \quad (1)$$

为了评价整体区域速度场和温度场的协同程度, 我们引进一个全场平均的协同角。对此曾经做过以下5种定义的尝试。

(1) 简单算术平均角, 也就是节点平均:

$$\theta_{\phi m} = \frac{\sum \theta_i}{N} \quad (2)$$

式中: 下标  $i$  表示所计算的局部地点,  $m$  表示全场平均,  $N$  为计算区域的控制容积总个数, 下同。

(2) 体积加权平均角:

$$\theta_{\phi m} = \sum \frac{dV_i}{\sum dV_i} \cdot \theta_i \quad (3)$$

这里  $dV_i$  数值计算中的控制容积的体积。

(3) 矢量模平均角:

$$\theta_{\phi m} = \sum \frac{|\vec{u}|_i \cdot |\text{grad } T|_i \cdot dV_i}{\sum |\vec{u}|_i \cdot |\text{grad } T|_i \cdot dV_i} \cdot \theta_i \quad (4)$$

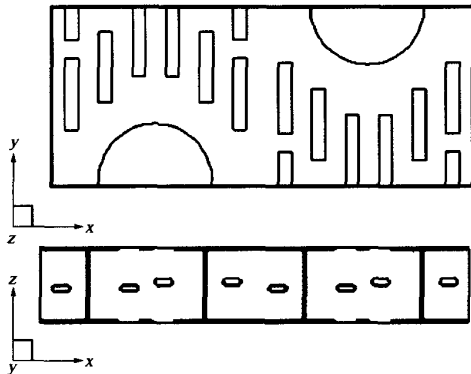
(4) 模点积平均角:

$$\theta_{\phi_m} = \sum \frac{|\vec{u}| \cdot |\text{grad} t| \cdot \cos \theta_i \cdot dV}{\sum |\vec{u}| \cdot |\text{grad} t| \cdot \cos \theta_i \cdot dV} \theta_i \quad (5)$$

(5) 积分中值角:

$$\theta_{\phi_m} = \arccos \frac{\sum |\vec{u}| \cdot |\text{grad} t| \cdot \cos \theta_i \cdot dV}{\sum |\vec{u}| \cdot |\text{grad} t| \cdot dV} \quad (6)$$

现在对上述5种平均方式简单加以分析说明.显然简单的算术平均对于非均分网格是不合理的,因此以下主要讨论后4种平均方式.体积加权平均考虑到了非均分网格的影响,但是按照上述场协同思想的全面表述,除了夹角以外,当地的矢量的模也应该加以考虑,模平均与模点积平均照顾到了这一层思想,其中模点积平均相当于以局部换热量作为权取平均;最后的积分中值角将全场平均的协同角看成是这样一个的角度,当全场局部协同角都取得该数值时,换热量等于实际情况的换热量,相当取与  $\cos \theta$  积分中值相对应的角作为平均角.根据上述分析表明模平均的物理



(a) 计算区域

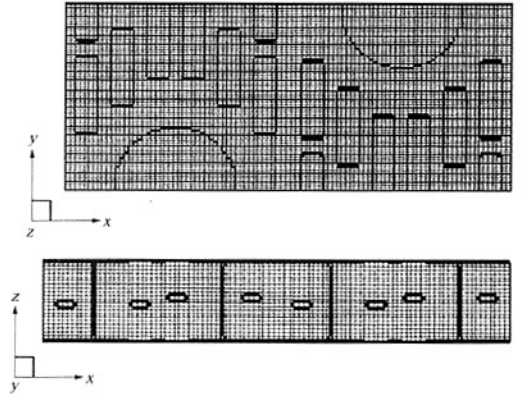
意义明确,考虑因素全面.

## 2 数学物理问题

### 2.1 计算区域和网格系统

计算区域取相邻两翅片之间的空间,进口延长翅片宽度的1.5倍,出口延长5倍,如图1所示.管子直径7.2 mm,垂直于流动方向管子间距21.0 mm,纵向管子间距25.4 mm,流动方向翅片长度25.4 mm,翅片间距1.4 mm,翅片厚度0.12 mm,迎面流速为0.5~5.0 m/s.

本文采用直角网格逼近圆管曲线边界.由于翅片开缝比较复杂,为了较准确的模拟翅片的位置和尺寸,采用非均分网格,主流方向上游延长区域划分9个网格,下游延长区域划分25个网格,中间翅片区域为100网格,高度方向划分为22网格,垂直主流的y方向布置88网格.由于是采用交错网格算法,所以总的节点数为  $136 \times 90 \times 24$ .



(b) 网格系统

图1 计算区域和翅片区域网格示意图

Fig.1 computation domain and grid configment for fin domain

### 2.2 控制方程和边界条件

控制方程为三维不可压、稳态、常物性、层流流动的质量、动量与能量守恒方程.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_{\phi} \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向流速;  $\rho$  为密度;  $\phi$  为通用变量;  $\Gamma_{\phi}$  为广义扩散系数;  $S_{\phi}$  广义源项.

边界条件简述如下:进口流速、温度给定;出口局部单向化;上下、前后面对称;翅片表面为无滑移边界条件;翅片上下开缝处流体为周期性边界条件;管子表面为无滑移边界条件,且给定壁

温.详细求解方法,见文献[8,9]

## 3 结果分析和讨论

图2给出了开缝片和平片不同计算方式的协同角随雷诺数的变化,图示结果表明:5种计算方式的协同角均随着雷诺数的增加而增大,最后趋近于常数.整体变化趋势基本相同,在相同的雷诺数下,模平均角和积分中值角较大,点积平均角最小,简单算术平均角和体积平均角介于中间.其中体积平均的协同角变化趋势与其它4种稍有差异.

## 4 结论

(1) 定性分析表明,协同角能够定性反映场协同,模平均角不仅考虑因素全面,而且物理意义明确,是比较理想的评价方式.

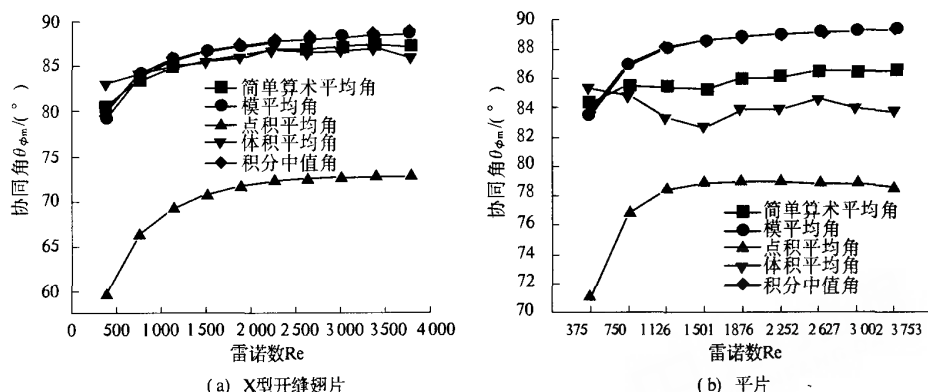


图2 雷诺数对5种计算方式的协同角的影响

Fig.2 Re influence on synergy angles for five computational method

(2) 计算结果表明5种计算方式的协同角整体变化趋势相似,均随雷诺数的增大而增大。

(3) 从复杂强化表面的研究出发,具体讨论了场协同原理的定量评价指标,使对场协同原理的认识更加深入,促进了场协同原理在工程方面的应用。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] WANG S, LI Z X, GUO Z Y. Novel concept and device of heat transfer augmentation[A]. Proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference of Heat transfer[C]. Philadelphia: Taylor Fancis, 1998. 405 ~ 408.
- [3] GUO Z Y, WANG S. Novel concept and approaches of heat transfer enhancement[A]. CHENG P. Proceedings of Symposium on Energy Engineering in the 21st Century [C]. New York: Begell House, 2002. 118 ~ 126.
- [4] 过增元. 对流换热的物理机制及其控制: 速度场与热流场的协同[J]. 科学通报, 2000, 45(19): 2118 ~ 2122.
- [5] TAO W Q, GUO Z Y, WANG B X. Field synergy principle for enhancing convective heat transfer - its extension and numerical verifications[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2002, 45(18): 3849 ~ 3856.
- [6] GUO Z Y, TAO W Q, SHAH R K. The field synergy (coordination) principle and its applications in enhancing single - phase convective heat transfer[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2005, 48(9): 1797 ~ 1807.
- [7] GUO Z Y. Coordination of velocity and heat flow in heat exchanger[A]. CELETA G P, THONON B, BENTEMPS A, et al. Compact Heat Exchangers: A Festschrift on the 60<sup>th</sup> Birthday of Ramesh K Shah[C]. PISA: Edizionario TTS, 2002. 177 ~ 182.
- [8] ZHOU J J, TAO W Q. Three dimension numerical simulation and Analysis of the air side performance of slotted fin surfaces with Radial strips[J]. Engineering Computations, 2005, 22(8): 940 ~ 957.

## Qualitative Analysis and Quantitative Discussion of Index for Field Synergy Principle

ZHOU Jun - jie<sup>1,2</sup>, TAO Wen - quan<sup>2</sup>, WANG Ding - biao<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Field synergy principle is introduced in the paper, of which the index is discussed, and several methods of field synergy angle are analysed, three dimension numerical simulation is conducted on heat exchanger surface, synergy angles are calculated and compared based on five methods. The result shows that their whole tendency is similar, and indicates the synergy between velocity field and temperature field qualitative analysis shows module average angle has not only the clear physical meaning but also has more considerations.

**Key words:** field synergy; index; synergy angle; numerical simulation