

# 场协同理论在椭圆型流动中的数值验证

王 娴 宋富强 屈治国 李明秀 王秋旺 陶文铨

(西安交通大学能动学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要** 本文用数值模拟的方法, 通过四个椭圆型流动传热的例子验证了场协同理论的正确性。结果表明, 场协同理论不仅适合于抛物型流动, 亦适合于复杂的有回流的椭圆型流动。

**关键词** 场协同理论; 数值模拟; 抛物型流动; 椭圆型流动

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2002)01-0059-04

## NUMERICAL VERIFICATION OF THE FIELD SYNERGY PRINCIPLE IN THE ELLIPTIC FLUID FLOW

WANG Xian SONG Fu-Qiang QU Zhi-Guo LI Ming-Xiu

WANG Qiu-Wang TAO Wen-Quan

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** The Field Synergy Principle was validated by four elliptic fluid flow and heat transfer examples, using numerical simulation method. The results show that the Field Synergy Principle can be applied not only to parabolic flow, but also to complex elliptic flow and heat transfer with recirculation.

**Key words** field synergy principle; numerical simulation; parabolic flow; elliptic flow

### 1 场协同理论及数值验证简介

过增元等在文献 [1] 中指出, 对流换热热边界层内壁面上传递的热量为:

$$q = \rho c_p \int_0^\delta (\vec{v} \cdot \text{grad}t) dy$$

由此可见, 如果在热边界层内能使两矢量的点积 ( $\vec{v} \cdot \text{grad}t$ ) 尽可能取大值, 则传热得到强化。这就要求  $\vec{v}$  与  $\text{grad}t$  的夹角越小越好。本文采用数值方法, 对四种二维复杂流道内的层流充分发展流动与换热进行了数值计算, 在得到速度场和温度场收敛的解之后, 将两矢量的点积 ( $\vec{v} \cdot \text{grad}t$ ) 在全场内作积分, 就得到相应的  $q/(\rho c_p)$  (该值以下均以  $Int$  表示), 并与相应的简单通道的结果作了对比。

### 2 四个计算实例

#### 2.1 顺排翅片通道与平行平板通道的比较

##### 2.1.1 所用的计算方法简述 对两种通道的比较

基于以下参数 (见图 1):

顺排翅片通道: 翅片长  $L_1=10$  mm, 厚  $H_1=4$  mm, 横向间距  $L_2=10$  mm, 纵向间距  $H_2=6$  mm。

平行平板通道: 板长  $L=10$  mm, 板间距  $H=6$  mm。

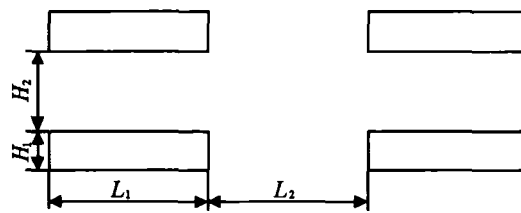


图 1 顺排通道示意图

假设流动与换热充分发展, 恒壁温加热, 采用 SIMPLER 算法、应用交错网格计算, 速度场和温度场进出口边界条件为周期性条件。

##### 2.1.2 结果简述 (1) 随 $Re$ 数的增加, 平行平板通

收稿日期: 2001-03-02; 修订日期: 2001-10-09

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (No.G2000026303)

作者简介: 王 娴 (1977-), 女, 吉林人, 硕士研究生, 主要从事传热强化和计算传热方面的研究。

道的  $Nu$  数保持不变 ( $Nu = 7.54$ ), 而顺排翅片通道的  $Nu$  数增加 (图 2)。

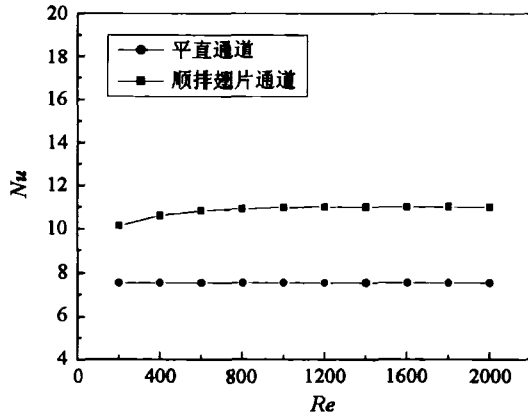


图 2 顺排翅片通道与平直通道  $Nu - Re$  比较

(2) 随  $Re$  数的增加, 平行平板通道和顺排翅片通道的积分值  $Int$  均增加, 在低  $Re$  数时顺排翅片通道的积分值  $Int$  增加得快 (如图 3 所示)。

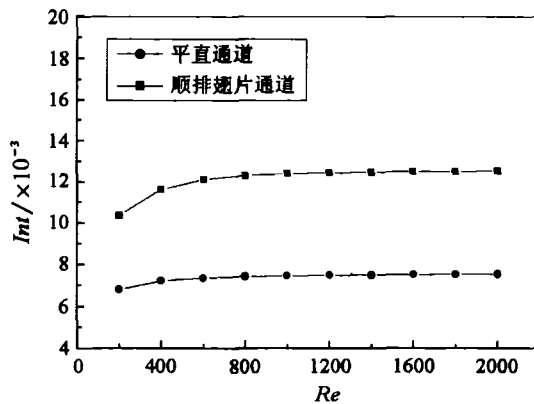


图 3 顺排翅片通道与平直通道  $Int - Re$  比较

(3) 综合图 2、3, 相同的  $Re$  数下, 顺排翅片通道比平行平板通道的  $Nu$  数大, 即换热增强, 相应的积分值  $Int$  也大, 与场协同理论相符。

## 2.2 二维叉排板换热器通道与平直通道的对比

### 2.2.1 所用的计算方法简述

对图 4 所示的叉排换热器通道有如下参数:  $H = L, t = H/3$ 。由于通道的对称性, 计算区域只取一个周期, 采用了区域扩充法, 把计算区域扩充到如图所示的矩形区域 (ABCDEF) 内。扩充区的导热系数和粘性系数取无穷大。速度场及温度场的进出口均为周期性边界条件。选取适当的入口流量, 使得  $Re$  的取值范围在层流范围内 (本文为  $100 \sim 2000$ ), 采用 SIMPLER 算法、应用交错网格进行计算。

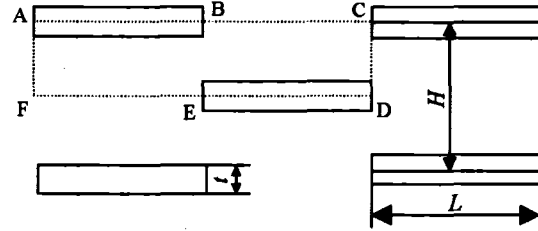


图 4 叉排换热器通道示意图

### 2.2.2 结果简述

计算所得的  $Nu - Re$ , 积分值  $Int - Re$  关系见图 5, 图 6。由图可以看出在同一  $Re$  下, 叉排通道比平直通道的  $Nu$  要大, 即换热增强, 相应的积分值也增加, 与场协同理论相符。

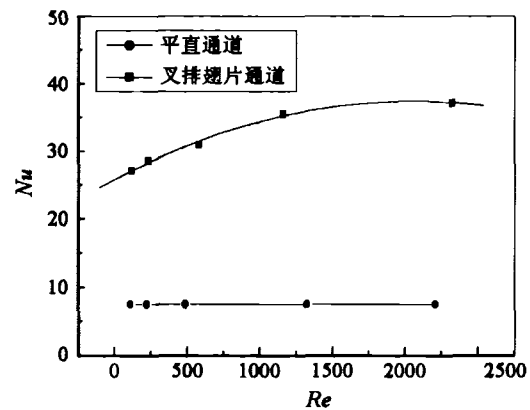


图 5 叉排翅片通道与平直通道  $Nu - Re$  比较

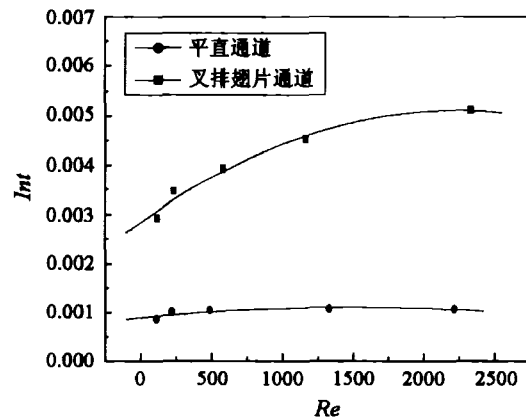


图 6 叉排翅片通道与平直通道  $Int - Re$  比较

## 2.3 波纹形通道与平直通道的对比

### 2.3.1 所用的计算方法简述

本文对两种通道所作比较基于以下参数:

$$\begin{aligned} \text{波纹通道: } Pr &= 0.707, & R_m/S &= 0.6 \\ L/S &= 1.84, & H/S &= 0.6 \end{aligned}$$

其中  $S$  为半个模块的实际长度 (即图 7 中虚线长度的一半),  $OA = OB = R_m, \theta = 60^\circ, L$  为整个模块在

X 方向的投影长度,  $H$  为通道度, 如图 7 所示。

平直通道:  $Pr, H, L$  均与波纹通道相同。

为使两个结果有可比性, 取相同的网格划分:  $48 \times 22$ 。网格不均匀分布, 靠近壁面处 Y 方向的网格越接近壁面越密。速度场及温度场的进出口均为周期性条件, 详细处理方法见文献 [2]。

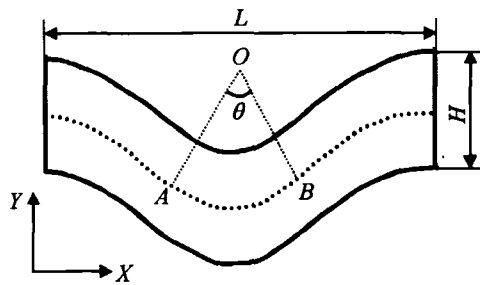


图 7 波纹通道示意图

**2.3.2 结果简述** (1) 平直通道的  $Nu$  数与  $Re$  数无关 ( $Nu = 7.541$ ), 波纹通道的  $Nu$  数随  $Re$  数的增加而增大 (图 8)。

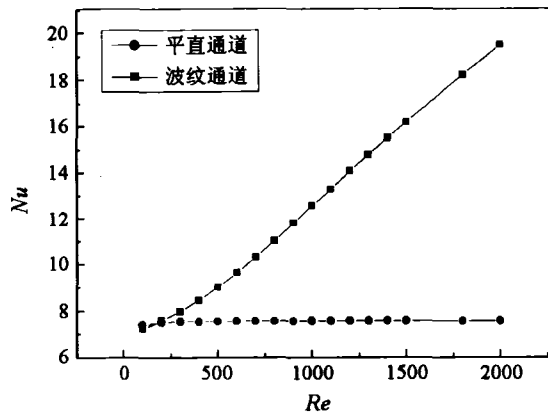


图 8 波纹形通道与平直通道  $Nu - Re$  比较

(2) 同一  $Re$  数下, 波纹通道的积分值  $Int$  比平直通道的大 (图 9), 而且随  $Re$  的增加比值有增加的趋势, 与换热增强相一致。

**2.4 二维渐扩渐缩通道和无限大平板的比较**

**2.4.1 所用的计算方法简述** 对图 10 所示的周期性渐扩渐缩通道内空气的充分发展流动与传热进行数值计算。其中  $H_{min} = 2.0 \text{ mm}$ ,  $H_{max} = 4.0 \text{ mm}$ ,  $L = 6.0 \text{ mm}$ 。

采用区域扩充法, 即把计算区域扩充到矩形区域内, 用阶梯网格去逼近周期通道的斜边, 扩充区的导热系数和粘性系数取无穷大。本题根据对称性, 对周期性渐缩渐扩通道的上半部分, 为计算的收敛,

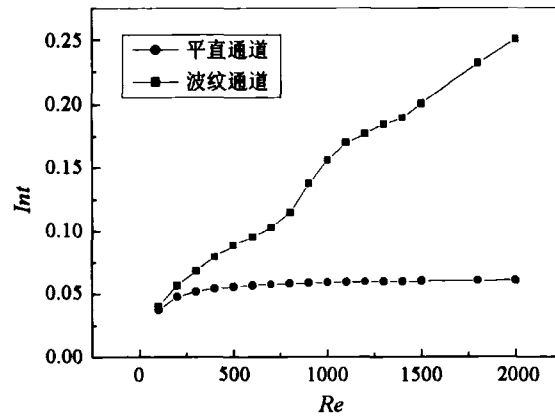


图 9 波纹形通道与平直通道  $Int - Re$  比较

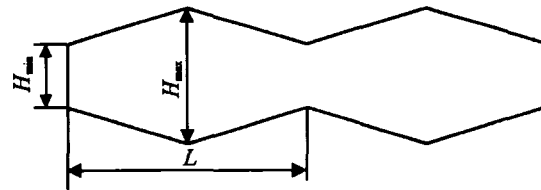


图 10 渐扩-渐缩周期性通道示意图

对区域延长了两个控制容积, 节点采用  $124 \times 42$ , X 方向有 122 个控制容积, Y 方向有 40 个控制容积。速度场及温度场的进出口均为周期性条件。

**2.4.2 结果简述** 周期性通道和平行平板都有相同的特征尺寸, 相同的质量流率, 比较的结果如下:

(1) 平行平板的  $Nu$  数不随  $Re$  数的增加而变化, 而周期通道的  $Nu$  数随  $Re$  数的增加而近似线性增加, 如图 11 所示。

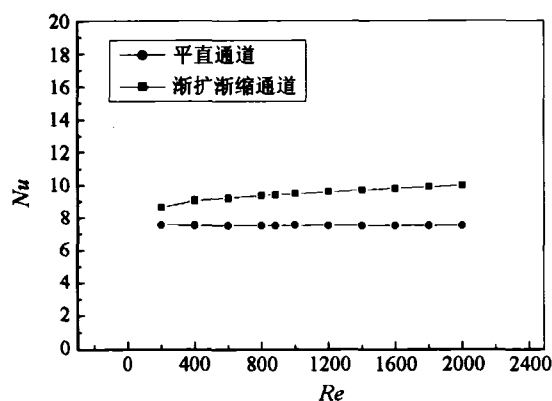


图 11 渐扩渐缩通道与平直通道  $Nu - Re$  比较

(2) 在相同的  $Re$  数下, 周期通道的  $Nu$  数及积分  $Int$  值均大于平行平板; 虽然  $Re$  数增加  $Int$  均增加, 但在低  $Re$  数时, 周期性通道增加得更快, 如图 12 所示。

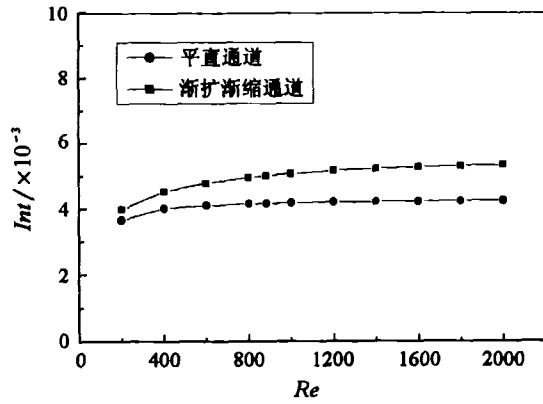


图 12 渐扩渐缩通道与平直通道  $Int - Re$  比较

### 3 结 论

四个算例的结果表明, 换热的强化与两矢量的

点积 ( $\vec{u} \cdot \text{grad}t$ ) 的大小密切相关; 同时, 四个算例均有回流发生, 其中第三及第四个算例在主流方向有回流, 但  $\vec{u}$  和  $\text{grad}t$  的点积积分仍然表现出随换热增强而增加的特性, 因此虽然文献 [1] 的理论分析是对边界层流动进行的, 然其结论可望有更普遍的意义。通过本文的验证, 可以说明, 场协同理论不仅适合于抛物型流动, 同样亦适合于椭圆型流动。

### 参 考 文 献

- [1] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A Novel Concept for Convective Heat Transfer Enhancement. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, 41: 2221-2225
- [2] 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988