

文章编号:1007-6735(2013)05-0425-05

圆内开缝圆不同开缝方向自然对流换热

申春赞¹, 杨 茉¹, 王 津¹, 张 昆¹, 张玉文²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 密苏里大学 机械与航空航天工程学院, 哥伦比亚 65211)

摘要: 采用 SIMPLE 方法对圆内开缝圆在不同开缝方向时的自然对流换热进行了数值模拟, 根据数值结果, 分析了开缝圆不同开缝方向的自然对流换热规律和特性. 数值结果表明: 采用 SIMPLE 方法的计算结果与已有文献相同工况的实验结果相吻合; 同一开缝方向, 平均当量导热系数 $Keqs$ 随着瑞利数 Ra 的增加而增大. 当 Ra 较小时, $Keqs$ 基本不随开缝方向的变化而变化; 当 Ra 继续增大, 同一 Ra 下开缝方向从竖直到水平随角度 φ 增大 $Keqs$ 值变小; 当 Ra 超过一个临界值时, $Keqs$ 数值结果出现了振荡, 且这个临界值与开缝方向相关; 研究水平开缝的圆内开缝圆自然对流换热, 随着 Ra 的增加, 能够获得稳定解、周期性振荡解及非周期振荡解, 最终为混沌.

关键词: 自然对流; 数值模拟; 开缝圆; 非线性特性

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Natural Convection Heat Transfer Characteristics of a Circle with an Internal Concentric Round Slotted in Different Direction

SHEN Chun-yun¹, YANG Mo¹, WANG Jin¹, ZHANG Kun¹, ZHANG Yu-wen²(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Missouri, Columbia, 65211)

Abstract: Using the SIMPLE method the natural convection transfer problem of a circle with an internal slotted circle was numerically simulated under different slotting directions. The natural convection heat transfer characteristics of the slotted circle were analysed under different slotting directions according to the numerical results, which coincide well with the experimental results of an existing literature under the same working conditions. In the same slotting direction, the average equivalent thermal conductivity $Keqs$ increases with the increase of Ra . When Ra is small, $Keqs$ does not change basically with the change of slotting direction. When Ra continues to increase, under a same Ra , with the slotting direction changing from vertical to horizontal, $Keqs$ becomes smaller. When Ra exceeds a critical value, the numerical result of $Keqs$ begins to fluctuate, and the critical value is related to the slotting direction. The natural convection heat transfer of a horizontally slotted round within the circle was studied. It is concluded that with the increase of Ra it is possible to obtain stable solution, periodically oscillating solutions, non-periodic oscillation solution and ultimately reach a chaos state.

收稿日期: 2013-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076105); 上海市科委振兴东北科技合作资助项目(11195820500), 上海市质量技术监督局公益科研资助项目(2012-12)

第一作者: 申春赞(1990-), 女, 博士研究生. 研究方向: 传热及数值技术. E-mail: chunyunshen@126.com

通讯作者: 杨 茉(1958-), 男, 教授. 研究方向: 传热及数值技术. E-mail: yangm@usst.edu.cn

Key words: *natural convection; numerical simulation; slotted circle; nonlinear characteristics*

封闭圆内开缝圆自然对流换热是从发电厂采用的离相封闭电流母线散热问题中抽象出来的理论研究模型. 由于封闭电流母线的热效应可能引起母线局部过热, 从而导致母线短路等问题, 会严重影响母线的正常安全运行, 因此, 必须对母线采取可靠而有效的散热措施. 对于自然冷却的封闭电流母线, 为了强化内筒电流母线自然对流换热, 常常将内筒开缝, 其抽象的换热模型即本文研究的封闭圆内开缝圆的自然对流换热问题.

最早研究圆内开缝圆自然对流换热的是 Kuleek^[1], 其首次提出了一个近似计算公式, 说明了开缝结构下的换热量可以比不开缝结构下的换热量提高 30%~40%. 王国祥等^[2]则对圆内开缝圆自然对流换热进行了实验研究, 发现 Kuleek 的近似公式与实验结果之间存在较大的误差, 并提出开缝结构下的换热量最大可以比不开缝结构下的换热量提高 50% 以上. Yang 等^[3]采用 SIMPLE 算法和稳态对称模型首次成功地对圆内开缝圆自然对流换热问题进行了数值模拟, 所获得的数值结果与王国祥^[2]的实验结果吻合. Yang、黄夫泉、Zhang 等^[4-6]对圆内开缝圆自然对流换热问题进行了更深入的研究, 他们发现, 对这种几何和物理条件都是对称的和不随时间变化的自然对流换热问题, 由于问题是非线性的, 除了存在稳态的和对称的解外, 在满足一定条件时, 还存在非对称的和振荡的解, 对这种问题进行数值模拟需要采用完整的计算区域和非稳态模型. 然而国际上的关于这方面的研究主要针对于封闭圆内自然对流换热, Bishop、Powe 等^[7-8]先后由实验研究了低温下两个同心圆筒所构成的环形封闭空间内氦气的自然对流换热, 给出了 Keq_s 与 Ra 的实验关联式. Farouk、Guceri 和 Saitoh 等^[9-11]均采用数值方法研究了这种环形空间内自然对流换热问题, Fant 等^[12-13]研究了二维狭小环形空间中的流动与换热问题, 同时 Yoo^[14-15]研究了不同参数下狭小圆环内出现的非线性现象. 但是如果对封闭圆进行开缝, 其流场和温度场都会发生很大变化, 因此, 本文在前人研究基础上进一步对圆内开缝圆自然对流进行研究.

到目前为止, 所见到的对于圆内开缝圆自然对流换热的研究, 都是针对竖直开缝圆的. 对于圆内水平开缝圆和开缝有一定角度的开缝圆自然对流换热, 未见有公开发表出来的研究成果. 由于自然对流

换热受几何结构和几何位置的影响较大, 特别是一些非线性特性对几何结构和几何位置变化较为敏感, 因此, 需要展开对各种开缝方向的圆内开缝圆自然对流换热的研究.

笔者采用非稳态的换热模型, 对不同开缝方向的圆内开缝圆全区域的自然对流换热进行了数值模拟, 根据数值结果, 探讨了不同开缝方向及特征参数下对这种模型的换热规律及其中存在的非线性特性.

1 研究模型及计算方法

在极坐标下研究的理论模型如图 1 所示, 假设其中的自然对流换热问题是二维的, 其内外圆分别为恒温 T_i 和 T_o , $T_i > T_o$. φ 为开缝圆开缝与竖直铅垂线所成的角度, $\varphi = 90^\circ$ 时为水平开缝. 当计算中所采用的半径比 $\eta = r_i/r_o = 5/13$ 、开缝度 $S = 2\alpha/\pi = 0.1$ 、环形空间宽度 $L = 1$ 、内部圆环厚度 $\delta = 0.1125$ 时, 流体满足 Boussinesq 假设及流体在固壁上无滑移.

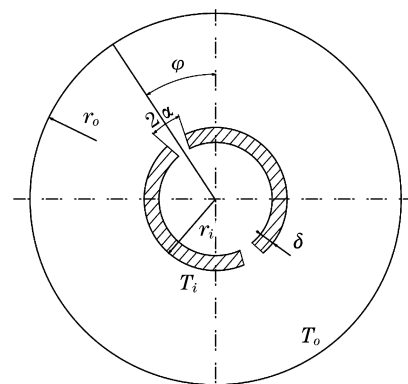


图 1 封闭圆内开缝圆自然对流换热模型

Fig.1 Closed circle within a slotted round natural convection heat transfer model

在极坐标系下, 描述上述二维模型的无量纲化控制方程为

$$\frac{\partial U}{\partial F} + V \frac{\partial U}{\partial R} + \frac{U}{R} \frac{\partial U}{\partial \theta} = -\frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{Pr}{(RaPr)^{1/2}} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial U}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} \right] + S_\theta \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial F} + V \frac{\partial V}{\partial R} + \frac{U}{R} \frac{\partial V}{\partial \theta} = -\frac{\partial P}{\partial R} +$$

$$\frac{Pr}{(RaPr)^{1/2}} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial V}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} \right] + S_R \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial F} + V \frac{\partial \Theta}{\partial R} + \frac{U}{R} \frac{\partial \Theta}{\partial \theta} = \frac{1}{(RaPr)^{1/2}} \cdot \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \Theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \theta^2} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial R} + \frac{V}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial \theta} = 0 \quad (4)$$

其中,方程(1)和方程(2)的源项分别为

$$S_\theta = -\frac{UV}{R} + \frac{Pr}{(RaPr)^{1/2}} \left(-\frac{U}{R^2} + \frac{2}{R^2} \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) - \Theta \sin \theta \quad (5)$$

$$S_R = -\frac{U^2}{R} + \frac{Pr}{(RaPr)^{1/2}} \left(-\frac{V}{R^2} + \frac{2}{R^2} \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \Theta \cos \theta \quad (6)$$

方程中无量纲参数和参考值 U_R 定义为

$$U = \frac{u_\theta}{U_R} \quad V = \frac{v_r}{U_R} \quad R = \frac{r}{L} \quad F = \frac{U_R \tau}{L} \quad \Theta = \frac{T - T_o}{T_i - T_o} \quad P = \frac{p}{\rho U_R^2} \quad Pr = \frac{\nu}{a}$$

$$Ra = \frac{\beta g L^3 (T_i - T_o)}{a \nu} \quad U_R = (RaPr)^{1/2} \frac{a}{L}$$

式中, ρ 为流体密度; g 为重力加速度; β 为热膨胀系数; a 为热扩散率; ν 为运动粘度系数.

描述图 1 问题的边界条件为

$$R = R_i, U = V = 0, \Theta = 1, \\ R = R_o, U = V = 0, \Theta = 0 \quad (7)$$

初始条件为

$$F = 0, U = V = \Theta = 0 \quad (8)$$

为了探讨不同 Ra 下整体的换热效果,定义整个圆的平均导热系数为

$$Keq = \frac{Q}{2\pi(T_i - T_o)} \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (9)$$

式中, Q 为整个圆的换热量.

为了与文献[2]实验结果相对比,定义修正后的整体平均当量导热系数为

$$Keqs = \frac{Keq}{1 - S} \quad (10)$$

2 数值模拟及分析

2.1 模拟结果与王国祥实验结果对比

采用具有 QUICK 差分方法的 SIMPLE 方法对文献[2]实验所采用的封闭圆内竖直开缝圆模型进行计算. 实验物理模型的几何尺寸为 $r_o = 130$, $r_i = 49$, $\delta = 4.5$, $S = 0.1$. 实验所得关联式为

$$Keqs = [1 + (0.0894 Ra^{0.3478})^{7.884}]^{\frac{1}{7.884}}, \\ 10^2 < Ra \leq 4.5 \times 10^4 \quad (11)$$

$$Keqs = 0.181 Ra^{0.281}, 4.5 \times 10^4 < Ra \leq 10^6 \quad (12)$$

图 2 给出了具有 QUICK 差分方法的 SIMPLE 方法的数值与实验结果对比. 由图可知,本文所构造的数值结果与实验结果吻合良好,能够有效地反映封闭圆内开缝圆的自然对流换热情况. 当 Ra 较小时,两者几乎完全吻合,当 $Ra = 3 \times 10^5$ 时,两者的误差为 6%.

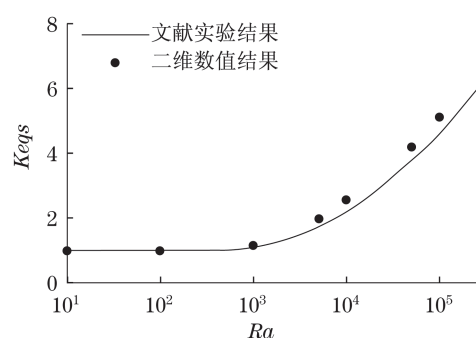


图 2 二维数值与文献[2]实验结果对比

Fig.2 Comparison of two-dimensional numerical and literature[2] experiment results

2.2 不同开缝方向下流场和温度场的变化

图 3(见下页)给出了 $Ra = 1 \times 10^4$ 时不同开缝方向下自然对流换热速度矢量场和温度场. 与不开缝的结构相比,开缝圆的内部存在流体流动,内外两个表面均参与换热. 流体沿开缝圆热壁面上升,至顶部开缝处后,沿外圆的冷壁面下降,最终形成两个较大涡卷. 该流动结构下的流体在开缝圆正上方向上流动,这种流动称为上升流. 该流场下对应温度条纹在开缝圆上方呈 T 字型,所以称为 T 字型温度场. 从图中模拟结果可以看出,在环形区域的中上部出现了“肾状涡”,数值计算中在开缝圆内的下部出现了类似于“猫眼”的二次涡.

当 $\varphi = 10^\circ$ 时,温度分布不再沿着开缝方向而对称,对应的温度场在内部开缝圆上方区域呈现非对称的 T 字型,称为非对称 T 字型温度场. 原来开缝圆内部较平直的等温线发生了偏斜.

当 $\varphi = 60^\circ$ 时,随着开缝方向的继续增加,高温区域逐渐开始收缩,不再呈现扩散的形式,高温区域开始向上运动,开缝环内的温度慢慢由低温区域变化为高温区域.

当 $\varphi = 90^\circ$ 时,流体沿开缝圆热壁面上升,一部分流体沿水平开缝处流入开缝圆内部,另一部分流

体继续上升,到达开缝圆上方后,沿外圆筒冷壁面下降,圆内左右两侧形成了大小不同的两涡卷,该流型对应的温度场沿纵轴线不对称,在开缝圆上方呈现 T 字型,对应的 T 型温度场向右偏斜,称为非对称的两涡基本流型及 T 型温度场.

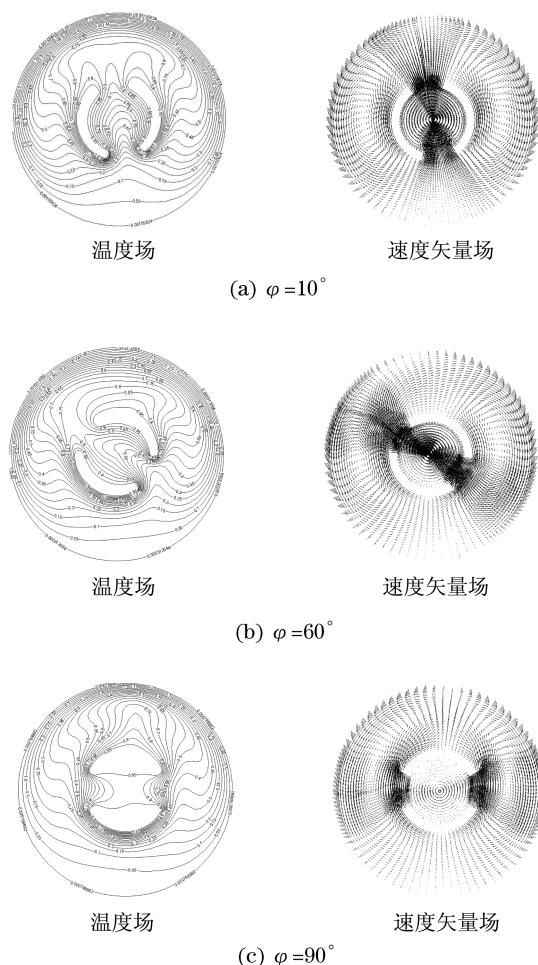


图3 不同开缝方向下对应的温度场和速度矢量场
Fig.3 Temperature field and velocity field in different slotted direction

2.3 不同开缝方向 $Keqs$ 的变化

图4所示为采用二维 QUICK 格式计算不同开缝方向 $Keqs$ 的变化.

由图4(a)得知,当 φ 不变时, $Keqs$ 随着 Ra 的增加不断增大,而且不同开缝方向处 $Keqs$ 随 Ra 的变化趋势一致.当 Ra 取 $10 \sim 10^2$ 时, $Keqs$ 随着 φ 增大基本不发生变化,因为低 Ra 下对流与热传导相比,热传导占据主要地位,而开缝方向变化时热传导热量变化不大,因此 $Keqs$ 基本不变.当 Ra 为 $10^2 \sim 10^5$ 之间时,随着 Ra 的增加 $Keqs$ 不断增大,相同 Ra 下 φ 越大 $Keqs$ 越低.因为 Ra 的增加表明对流换热起到的作用越来越大,随着开缝方向的变化,由

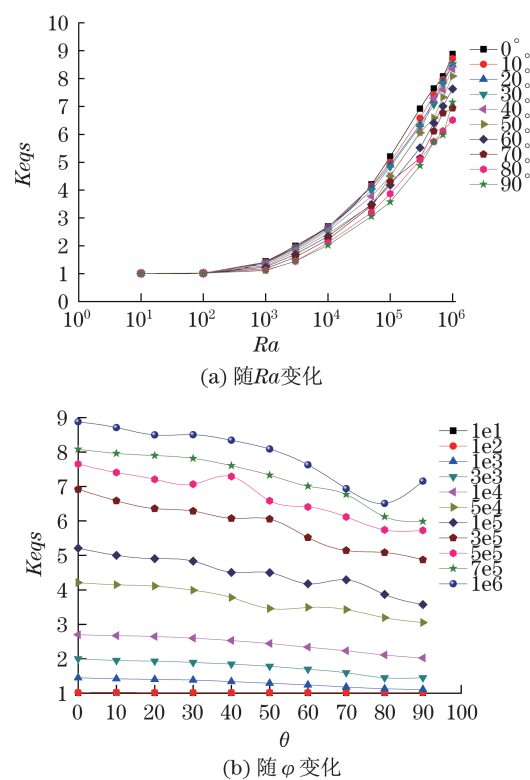


图4 不同开缝方向时 $Keqs$ 的变化

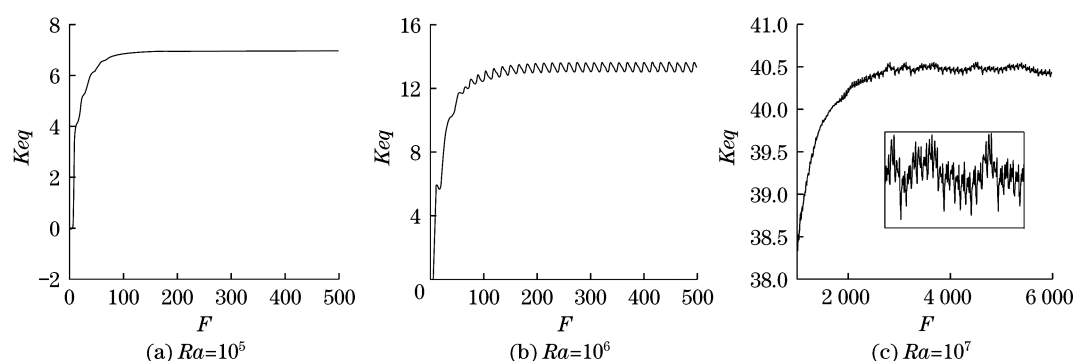
Fig.4 Comparison of $Keqs$ in different slotted directions
竖直偏斜慢慢变缓,由重力引起的自然对流换热逐渐减弱,导致 $Keqs$ 降低.

由图4(b)所示,当 Ra 不变时,随着 φ 的增大, $Keqs$ 逐渐减小.随着 Ra 继续增大, $Keqs$ 出现了波动,结果无法收敛,说明此时对流换热无法达到稳定,出现了振荡.

2.4 圆内开缝圆的非线性特性

当选择水平开缝圆几何尺寸为 $S = 0.4$, $Pr = 0.7$, $\delta = 0.1125$ 时,采用 SIMPLE 方法计算不同 Ra 下自然对流换热问题.采用零初场,在几何尺寸不变时计算不同 Ra 下 Keq 随时间的变化,结果表明随着 Ra 不断增大,系统出现了不同的数值解,分别为稳态解、周期性振荡解及混沌解.当 $Ra = 10^5$ 时,流动与换热处于稳定状态, Keq 随时间趋于定值,如图5(a)(见下页).当 $Ra = 10^6$ 时, Keq 随时间的发展不能够稳定于某一定值,经过足够长的时间后,随时间呈周期性振荡状态,如图5(b)(见下页).当 $Ra = 10^7$ 时,经过足够长的时间后, Keq 随时间做非周期性振荡运动,流动与换热表现较强的非线性特性,如图5(c)(见下页).

以上为水平开缝方向模拟的非线性现象,其它开缝方向也会出现类似的非线性特性,只是出现稳定解、周期性振荡解、非周期性振荡解的临界值有所不同,本文这里不再叙述.

图5 不同 Ra 下 Keq 随时间变化Fig.5 Keq changes with time in different Ra

3 结 论

a. 基于 SIMPLE 方法的计算结果能够与文献[2]的实验结果相吻合;

b. 在本文模拟的水平开缝特定几何尺寸下,当 Ra 较小时,不同 φ 时 $Keqs$ 基本保持不变,随着 Ra 增加,随着 φ 从竖直到水平角度变化时 $Keqs$ 变小,而在同一开缝方向下 Ra 越大 $Keqs$ 值越大,当 Ra 超过某一临界值时, $Keqs$ 出现波动,数值结果发生了振荡;

c. 不同 Ra 下 Keq 随时间的变化,结果表明随着 Ra 不断增大,系统出现了不同的数值解,分别为稳态解、周期性振荡解及混沌解,圆内开缝圆自然对流换热表现出非线性现象。

参考文献:

- [1] Kuleek P V. Heating and cooling of bus bars for large power generators[J]. Electric Power Plant, 1964(10): 39-43.
- [2] 王国祥. 双半圆大电流封闭母线自然对流换热实验研究[C]//工程热物理论文集. 北京. 1986: 235-240.
- [3] Yang M, Tao W Q. A numerical study of nature convective heat transfer in an cylindrical enclosure with internal concentric slotted hollow cylinder[J]. Numerical Heat Transfer, 1992, 22(3): 289-306.
- [4] Yang M, Zhang B W, Huang F Q, et al. Numerical simulation for nonlinear characters of natural convection in an annulus with an internal concentric slotted cylinder[C]//13th International Heat Transfer Conference, Sydney Convention and Exhibition Centre, 2006.
- [5] 黄夫泉, 杨莱, 余敏, 等. 封闭圆内开缝圆自然对流换热的振荡特性[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 286-288.
- [6] Zhang K, Yang M, Zhang Y W. Numerical analysis of

natural convection in a cylindrical envelope with an internal concentric cylinder with slots[J]. Numerical Heat Transfer Part A, 2011, 59(10): 739-754.

- [7] Bishop E H, Carley C T. Photographic studies of natural convection between concentric cylinders[C]//Proceedings of the 1966 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute. Stanford, 1966.
- [8] Powe R E, Bishop E H, Carley C T. Free convective flow patterns in cylindrical annuli[J]. Journal of Heat Transfer, 1969, 91(3): 310-314.
- [9] Farouk B, Guceri S I. Natural convection from a horizontal cylinder-laminar regime[J]. Journal of Heat Transfer, 1981, 103(3): 522-527.
- [10] Farouk B, Guceri S I. Laminar and turbulent natural convection in the annulus between horizontal concentric cylinders[J]. Journal of Heat Transfer, 1982, 104(4): 631-636.
- [11] Saitoh T, Sajiki T, Maruhara K. Bench mark solutions to natural convection heat transfer problem around a horizontal circular cylinder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, 36(5): 1251-1259.
- [12] Fant D B, Prusa J, Rothmayer A. Unsteady multicellular natural convection in a narrow horizontal cylindrical annulus[J]. Journal of Heat Transfer, 1990, 112(2): 379-387.
- [13] Fant D B, Rothmayer A, Prusa J. Natural convective flow instability between horizontal concentric cylinders[J]. Journal of Thermophysics, 1991, 5(3): 407-414.
- [14] Yoo J S. Prandtl number effect on bifurcation and dual solutions in natural convection in a horizontal annulus[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(17): 3279-3290.
- [15] Yoo J S. Dual free-convective flows in a horizontal annulus with a constant heat flux wall [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(13): 2499-2503.

(编辑:金 虹)