

气液两相流流型图像信息熵递归特性分析

洪文鹏, 刘 燕, 周云龙

(东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘 要: 利用高速摄像机采集了节距比分别为 1.3 和 1.8 排序为 10 排 × 4 列和 10 排 × 6 列两种管束间的不同流型的流动图像, 并针对泡状流、间歇流、雾状流三种典型流动图像, 提取流型图像的信息熵序列, 采用递归分析法研究了气液两相流不同流型以及过渡流型熵序列的动力学特性。研究结果表明: 不同流型图像的熵序列的递归结构不同。泡状流图像的信息熵序列递归图为点状结构; 间歇流为点和块相结合结构, 而雾状流对角线结构最清晰。过渡流型图像的熵序列递归结构清晰的演化了流型转变过程。信息熵序列的递归结构图能够较好地反映流型演化机理, 且递归特征量随气相折算流速变化敏感, 为研究气液两相流流型机理提供了一种较有效方法。

关 键 词: 气液两相流; 管束; 流型; 信息熵; 递归图

中图分类号: O359 文献标识码: A

引 言

管束间的气液两相流型对其绕流流动特性和传热规律有着重要的影响^[1-3]。近年来, 基于混沌及分形时间序列分析的流型识别及机理研究成果日益增多^[4]。金宁德等人对管内气液两相流电导波动信号的混沌递归特性进行分析^[5], 利用递归图和递归定量分析较好地表征了气液两相流流型的变化。周云龙等人对管内气液两相压差波动信号进行混沌特征分析^[6-7], 重点应用 Hurst 指数对两相流动变化进行了分析, 取得了较好的效果。李洪伟等人提取了管内水平气液两相流流型图像的信息熵序列^[8], 结合非线性混沌递归图和递归特征量对气液两相流型的流动机理进行了研究。

图像的信息熵能够反映图像的纹理结构变化特征^[8], 应用递归特性研究流型图像的混沌特性具有直观特点。本研究应用高速摄像机采集了气液两相流体垂直向上流过两种节距比管束的流型及过渡流型图像, 提取每一帧流型图像的信息熵, 组成一个时

间序列(信息熵序列), 进而对熵时间序列进行递归特征分析, 研究流型的混沌递归特征。

1 实验装置及方法

实验是在空气-水两相流系统上完成的。实验装置如图 1 所示。该实验装置包括两部分, 流体控制系统和动态数据采集系统。流体控制系统主要由空气压缩机、两相混合器、水泵、旋风分离器、水箱及实验段组成。水由水泵抽出, 经电磁流量计计量后进入混合器。空气经空气压缩机和气体孔板流量计计量后进入混合器。从混合器流出的气水混合物, 流经实验段, 进行压差信号采集后进入旋风分离器, 将空气分离出来并排入大气, 分离出的水流回水箱循环使用。

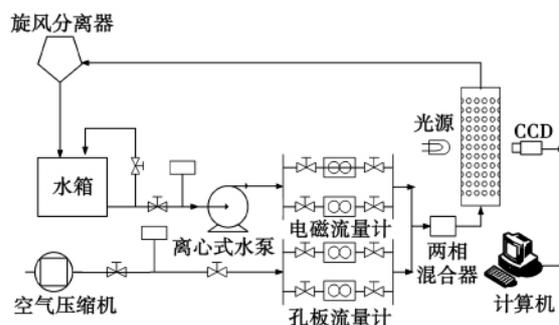


图 1 实验装置系统图

Fig. 1 Systematic drawing of the test device

图像采集系统采用瑞士 WEINBERGER 公司生产的 SpeedCam Visario 高速摄像机系统, 其最大分辨率为 1 536 × 1 024 像素, 最大帧频为 10 000 帧/s。高速摄像机对光线的亮度有较高的要求, 实验中使用 500 W 的卤素灯进行逆光照明, 为了使光线分布均匀, 在实验段后侧放置两层绘图用硫酸纸, 可获得满意的图像质量。

收稿日期: 2010-08-30; 修订日期: 2010-10-27

作者简介: 洪文鹏(1970-), 男, 辽宁绥中人, 东北电力大学教授、博士。

图 2 为实验测试段的管束布置。测试段是由 10 mm 厚的有机玻璃板制成的长度为 700 mm, 截面为 180 mm × 65 mm 的矩形通道, 分别布置节距比 P/D 为 1.3 和 1.8 的 10 排 × 4 列和 10 排 × 6 列两种管束。管直径 20 mm, 长 65 mm, 顺列布置。

实验中, 先调节水流量调节阀, 把水流调到某一流量点, 再通过调节气体流量来改变流经试验段的总流量和含气率。重复上述步骤直到实验结束。实验参数范围: 压力 0.1 ~ 0.3 MPa, 温度 10 ~ 25 °C, 水流量 2 ~ 15 m³/h, 气流量 0.01 ~ 48 m³/h。

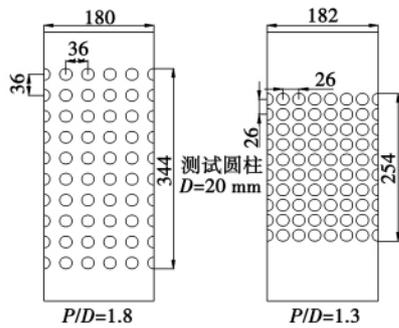


图 2 测试段管束布置

Fig. 2 Tube bundle arrangement in the testing section

2 混沌递归分析方法

递归图包含了相空间轨迹随时间变化的规律和趋势^[10], 对于确定性动力学系统, 包括混沌系统和非线性系统在内, 都可以定义为递归状态。递归图以像素点 0 和 1 的方式将一维时间序列扩展到二维平面空间来显示时间序列内部的结构特征。递归图以 $N \times N$ 矩阵为基础:

$$R_{ij} = \Theta(\varepsilon - \|x_i - x_j\|) \quad i, j = 1, \dots, N \quad (1)$$

式中: $\Theta(\cdot)$ —Heaviside 函数; $\|x_i - x_j\|$ —一种范数; ε —预定义阈值。

对于一维的序列 x_i , 根据 Takens 嵌入定理, 应用时间延迟法重建相空间向量, 即:

$$X_i = (x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}) \quad (2)$$

由预定义阈值 ε 定义一个以 X_i 为中心的球, 如果 X_j 落入球内, 说明该状态接近于 X_i , 即 $R_{ij} = 1$ 。在 $N \times N$ 的坐标平面上 (i, j) 位置处描点 (递归点), 这样就得到时间序列经过相空间重建后的递归图。Zbilut 等人提出了递归定量分析的特征量^[11], 如递归率, 熵以及平均对角线长度等。本研究结合平均对角线长度和熵对气液两相流动特性分析说明。

平均对角线长度^[12], 定义为对角线方向线段长度的加权平均值, 即:

$$L_{\text{mean}} = \sum_{l=l_{\min}}^{N-1} lp(l) / \sum_{l=l_{\min}}^{N-1} p(l) \quad (3)$$

式中: N —序列长度; l —对角线长度; $p(l)$ —长度值 l 在对角线长度值中出现的概率; l_{\min} —最小对角线长度值。

平均对角线表示系统的确定性, 即对角线长度越大, 系统的确定性越强。

由递归点构成不同长度沿对角线方向线段分布的熵为^[13]:

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^{N-1} P(l) \ln P(l) \quad (4)$$

其中 $P(l) = p(l) / \sum_{l=l_{\min}}^{N-1} p(l)$, 熵反映递归结构的复杂性, 结构越复杂, 熵值越大。实验中经过反复计算, 取嵌入维数维 3, 延迟为 2, 阈值系数为 0.2。

3 气液两相流型的递归分析

图 3 和图 4 分别为采集的两种管束的不同流型的局部流动图像和过渡流型图像。对每一流型的 256 帧图像提取熵值, 组成一序列。

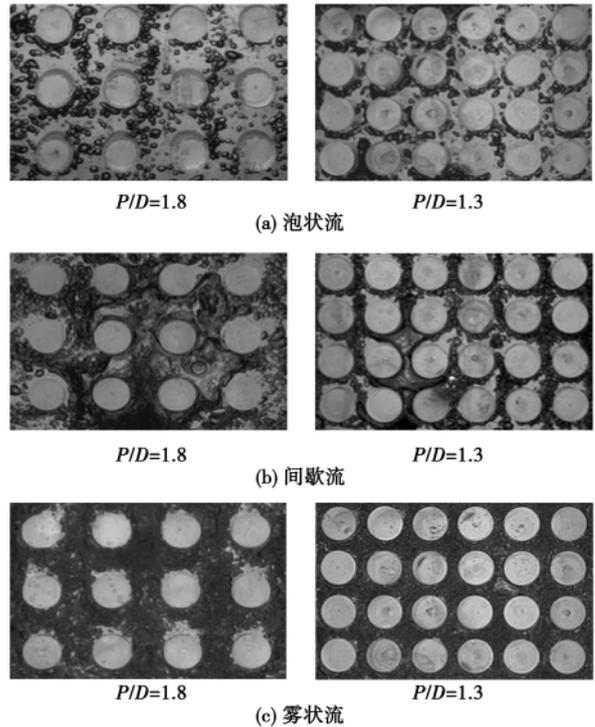


图 3 不同流型的流动图像

Fig. 3 Flow images in various flow patterns

图 5 为提取的某一工况下 $P/D = 1.3$ 节距比管

束的不同流型图像的熵序列及其相对应的递归纹理结构。两种结距比管束的流型递归纹理结构相似。递归结构纹理能够表现非线性时间序列的周期性、随机性和混沌等特性。对于泡状流熵序列,由于气泡运动轨迹随机可变,泡状流产生的熵序列类似于随机信号,所以,泡状流熵序列递归图呈现孤立分散的点状结构,随机性特征明显,泡状流沿对角线方向的结构发育最差。随着气相速度的增加,流动状态向间歇流转变,间歇流递归图结构随机性减弱,周期性增强,沿对角线方向纹理结构发育较泡状流明显,具体流动状态表现为间歇流时气泡聚合形成气团,气团在向上流动过程中与圆柱碰撞分散成气泡,流动具有一定的混沌特性。

雾状流递归图对角线方向出现了黑色的块状结构,沿对角线方向纹理发育较泡状流和间歇流程度高,周期性突出,表现为时间序列较好的相似性。出现这种结构的主要原因是雾状流在气相速度较高时发生,此时除了小部分液体粘在管壁或在管束表面形成一层液膜,大部分液体以液滴方式随气流一起流动,流动过程中液膜呈周期性脱落。

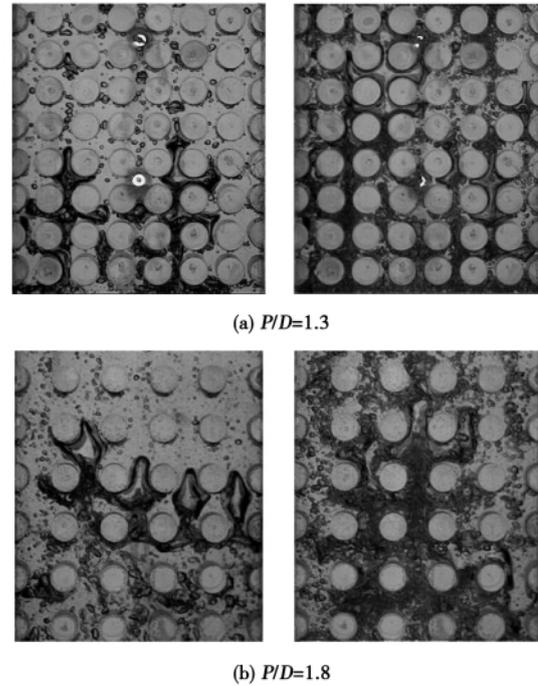


图 4 过渡流型图像

Fig. 4 Transient flow pattern images

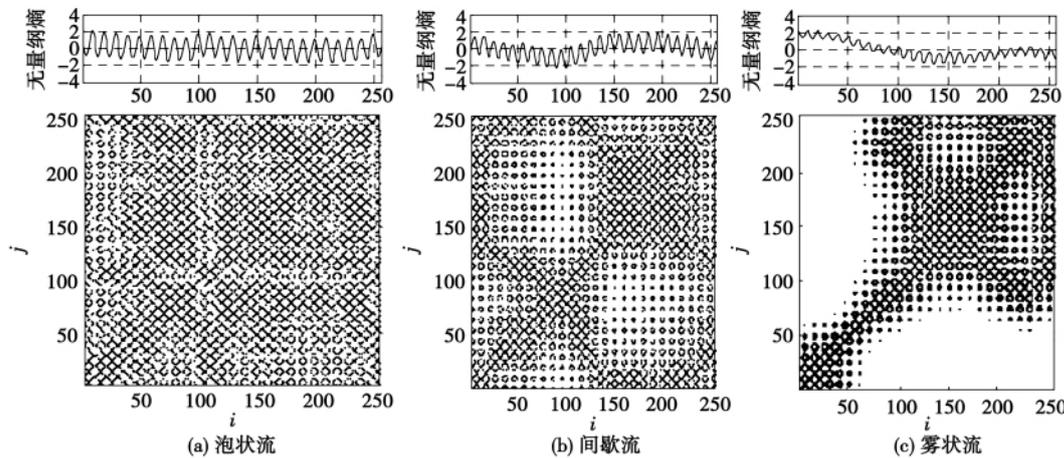


图 5 不同流型的熵序列及其递归纹理结构($P/D = 1.3$)

Fig. 5 Entropy sequence and its recurrence texture in various flow patterns

图 6 为两种管束不同流型过渡时的熵序列的递归结构。从泡状流向间歇流过渡时,递归图结构类似于漂移模型^[10],动力学特性主要在沿对角线方向发育,混沌特性明显,主要是泡状流向间歇流转变由系统参数(气相速度等)缓慢变化引起的。由间歇流向雾状流过渡时,由于气相速度的急剧增加,引起两相流动力学系统急剧变化,导致结构突变,递归图表现为大的白色区域和大的黑色块状结构。以上分析表明,混沌递归结构能清晰的映射流型的混沌特

性,可以较好的表征流型演化机理。

图 7 为熵和平均对角线长度随气相折算速度的关系。从图中可以看出,总体上两个特征量随气相折算速度的变化趋势是一致的,即随气相速度的增加,递归特性由强到弱变化。泡状流时确定性最强,结构清晰,流动状态最稳定。间歇流时由于气团的形成和发展使得不稳定性增加,递归特性减弱,随气相速度增加,雾状流呈现极不稳定的振荡特性,递归特性进一步减弱。

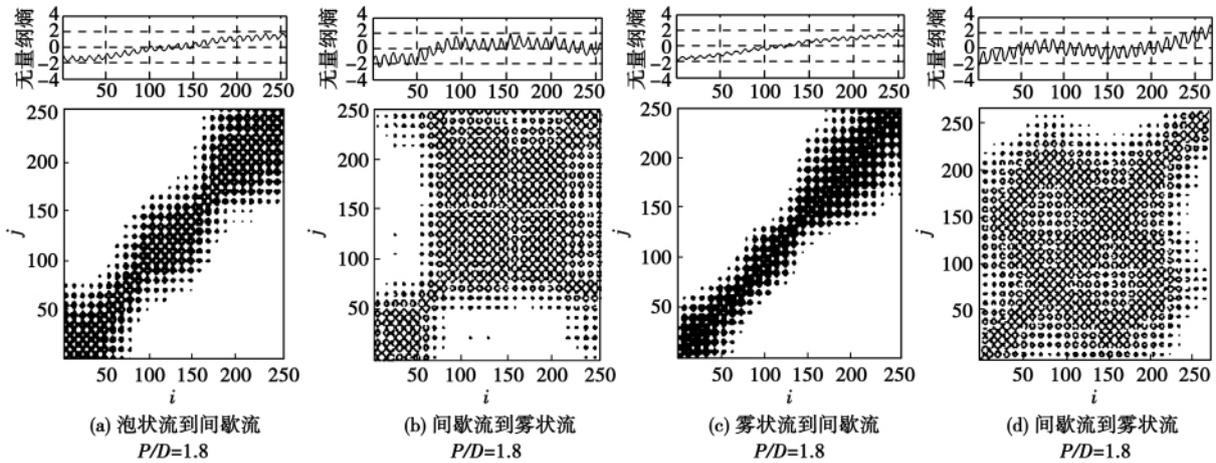
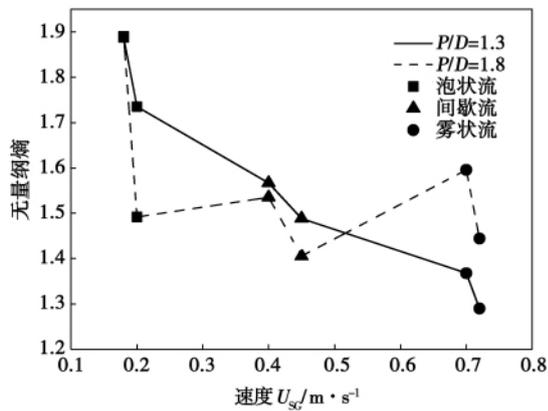
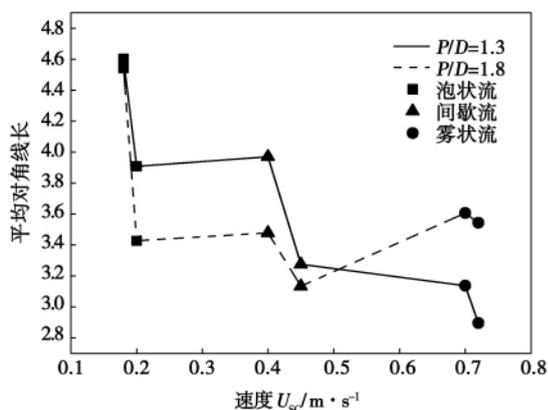


图 6 过渡流型的熵序列及其递归图纹理结构

Fig. 6 Transient flow pattern entropy sequence and its recurrence texture



(a) 熵随气相折算速度变化曲线



(b) 平均对角线长度随气相折算速度变化曲线

图 7 递归特征量与气相折算速度关系
Fig. 7 Relationship between the recurrence characteristic variable and the gas-phase converted speed

比较两种管束的熵和平均对角线两特征量,发现大节距比管束的特征量变化趋势较小节距比管束存在差异,主要表现在雾状流较间歇流动力学特性复杂,主要原因是:雾状流时,大节距比管束间容易形成旋涡,旋涡的形成和发展导致混沌特性增强,动力学特性变得复杂。由此可见,递归特征量随气相速度变化是敏感的,并且能较好的表征其流动演化机理。

4 结论

(1) 对管束间气液两相流型图像的熵序列递归分析。泡状流混沌递归结构呈现随机分散的孤立点状结构特征;间歇流呈现孤立点与块状结构相结合的结构特征;雾状流呈现沿对角线方向较发育的纹理和周期性的块状结构。

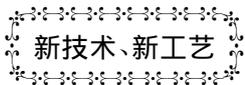
(2) 递归特征量对气相参数的变化是敏感的,随气相折算速度的增加,平均对角线长度和熵总体呈减小趋势。熵序列的混沌递归图清晰、直观的描述了气液两相流的混沌动力学特性,并且能够对气液两相流型转化机理进行很好的表征,为更好的理解和分析气液两相流动力学特性提供了有用的分析工具。

参考文献:

[1] KHALID B ,DAVID A M. Experimental and numerical investigation of two-phase pressure drop in vertical cross-flow over a horizontal tube bundle[J]. Applied Thermal Engineering 2009 29: 1536 - 1365.

- [2] YOSHITAKA M, AKIO T. Two-phase flow patterns in a four by four rod bundle[J]. Journal of Nuclear and Technology, 2007, 44(6): 894-901.
- [3] 陈斌, 郭烈锦, 张西民. 管束间气液两相流动特性研究进展[J]. 化工机械, 1999, 26(2): 105-109.
CHEN Bin, GUO Lie-jin, ZHANG Xi-ming. Advances in the study of gas-liquid two-phase flow characteristics in tube bundles[J]. Journal of Chemical Machinery, 1999, 26(2): 105-109.
- [4] 金宁德, 陈万鹏. 混沌递归分析在油水两相流流型识别中的应用[J]. 化工学报, 2006, 57(2): 274-280.
JIN Ning-de, CHEN Wan-peng. Application of chaotic recurrence analysis in identification of oil-water two-phase flow patterns[J]. Journal of Chemical Industry, 2006, 57(2): 274-280.
- [5] 金宁德, 郑桂波, 陈万鹏. 气液两相流电导波动信号的混沌递归特性分析[J]. 化工学报, 2007, 58(5): 1172-1179.
JIN Ning-de, ZHENG Gui-bo, CHEN Wan-peng. Chaotic recurrence characteristic analysis of conductivity fluctuation signals of gas-liquid two-phase flow[J]. Journal of Chemical Industry, 2007, 58(5): 1172-1179.
- [6] 周云龙, 陈飞. 水平气液两相流流型空间图像信息复杂度分析[J]. 化工学报, 2008, 59(1): 64-68.
ZHOU Yun-long, CHEN Fei. Analysis of the complexity measurements of space image information of flow patterns in a horizontal gas-liquid two-phase flow[J]. Journal of Chemical Industry, 2008, 59(1): 64-68.
- [7] 周云龙, 李洪伟, 何强勇. 基于动态图像灰度波动信号垂直上升管中油气水三相流型的混沌特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(35): 49-56.
ZHOU Yun-long, LI Hong-wei, HE Qiang-yong. Analysis of the chaotic characteristics of oil-air-water three-phase flow patterns in a vertical riser based on dynamic image darkness fluctuation signals[J]. Journal of China Electric Machinery Engineering, 2008, 28(35): 49-56.
- [8] 李洪伟, 周云龙, 孙斌. 水平气液两相流流型图像信息递归特性分析[J]. 化工学报, 2010, 61(6): 1431-1436.
LI Hong-wei, ZHOU Yong-long, SUN Bin, et al. Analysis of the recurrence characteristics of the flow pattern image information of a horizontal gas-liquid two-phase flow[J]. Journal of Chemical Engineering, 2010, 61(6): 1431-1436.
- [9] 白博峰, 郭烈锦, 陈学俊. 空气-水两相流压差波动研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 22-26.
BAI Bo-feng, GUO Lie-jin, CHEN Xue-jun. Study of the pressure difference fluctuation of an air-water two-phase flow[J]. Journal of China Electric Machinery Engineering, 2002, 22(3): 22-26.
- [10] 王春华, 仲兆平, 李睿, 等. 气-固流化床压力脉动递归图分析[J]. 化工学报, 2010, 61(3): 557-564.
WANG Chun-hua, ZHONG Zhao-ping, LI Rui, et al. Analysis of the recurrence atlas of the pressure fluctuation of a gas-solid fluidized bed[J]. Journal of Chemical Industry, 2010, 61(3): 557-564.
- [11] ZBILUT J P, WEBBER C L. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots[J]. Phys. Lett. A, 1992, 171(3/4): 199-203.
- [12] CHIARA M, ANGELO F, ANTONIO V. Comparison of recurrence quantification methods for the analysis of temporal and spatial chaos[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 3: 1123-1144.
- [13] MARCH T K, CHAPMAN S C, DENDY R O. Recurrence plot statistics and the effect of embedding[J]. Physica D, 2005, 200(1-2): 171-184.

(陈滨 编辑)



新技术、新工艺

电站水回收

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2011年3月报道,意大利 Ansaldo Energia 能源公司推出 Crios 系统,通过不同的处理过程,可以回收排放的液体废物。

该系统已安装在位于意大利南部的一个 2×400 MW 联合循环电站中,在该地区,水是特别珍贵的资源。

Crios 污水处理过程由中和部分、除油部分、氧化和初级过滤级、精细过滤级、反向渗透和电消电离作用部分、来自反向渗透过程的盐水结晶过程组成。

Ansaldo Energia 公司声称,如果需要,可把雨水或井水用作为该系统的补充水。

(学牛 摘译)

engine with the maximal power output of the cycle serving as the optimization target and the heat conduction between the working medium and the external heat channel abiding by the law of radiation-based heat conduction [$q \propto \Delta(T^n)$]. A numerical calculation case was given under the law of radiation-based heat conduction and compared with the results obtained under the Newton's heat law. The results of the numerical calculation case show that with an increase of the heat conductivity, the power output and efficiency of the optimal full and semi cycle will decrease. Compared with the full cycle, the compression ratio, power output and efficiency of the optimal semi-cycle are relatively big. Although the Euler-Lagrange ($E-L$) arc sections and the curves showing the change of the volume of the working medium with time are all similar to sine curves and composed of three sections under both heat conduction laws, the curves showing the change of the volume of the working medium under different heat conduction laws are not a same one. **Key words:** finite-time thermodynamics, law of radiation-based heat conduction, maximal power output, external combustion engine

气液两相流流型图像信息熵递归特性分析 = **Analysis of the Image Information Entropy Recurrence Characteristics of a Gas-liquid Two-phase Flow Pattern** [刊 汉] HONG Wen-peng, LIU Yan, ZHOU Yun-long (College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(5). - 538 ~ 542

By using a high speed video camera, acquired were the flow images of various flow patterns of two kinds of tube bundle in 10 rows and 4 columns with a pitch of 1.3 and 1.8 respectively. In the light of the typical flow images in three types, namely bubble-shaped flow, intermittent flow and mist flow, the information entropy sequence of the various flow pattern images was extracted and the dynamic characteristics of various flow patterns of the gas-liquid two-phase flow and the entropy sequence of the transit flow patterns were studied by using the recurrence analytic method. The research results show that the recurrence structures of the entropy sequences of different flow pattern images are different. The recurrence chart of the information entropy sequence of the bubble-shaped flow images is of a dot-shaped structure, that of the intermittent flow images is of a dot-block-shaped structure while that of the mist flow is of a clearest diagonal structure. The recurrence structures of the entropy sequences of transit flow pattern images can clearly show the evolvement of the transition process of the flow patterns. The recurrence structure chart of information entropy sequence can reflect relatively well the evolvement mechanism of the flow patterns and the recurrence characteristic variable is susceptible to the change of converted flow speed, thus providing a relatively effective method for studying the mechanism governing the flow patterns of gas-liquid two-phase flow. **Key words:** gas-liquid two-phase flow, tube bundle, flow pattern, information entropy, recurrence chart

带肋矩形直通道内的冷却空气换热特性研究 = **Study of the Heat Exchange Characteristics of the Cooling Air Inside a Straight Ribbed Rectangular Channel** [刊 汉] LIU Rui, SHUI Lin-qi, WANG Xin-jun, BAI Xiao-wei (Turbo-machinery Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(5). - 543 ~ 546