

一种识别气液两相流流型的新方法

周云龙, 李洪伟, 袁俊文

(东北电力大学 能源与机械工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘 要: 根据图像灰度直方图统计特征, 提出了一种基于图像处理和改进支持向量机相结合的气液两相流流型识别的新方法。该方法是应用高速摄像机在气液两相流试验台上获取 7 种典型流型的图像, 经过图像处理, 对图像进行灰度直方图统计特征提取构成特征矢量, 作为流型样本对改进支持向量机进行训练与识别。实验结果表明: 图像灰度直方图特征可以很好地反映各流型之间的差异; 改进的支持向量机与原始的支持向量机相比分类性能好, 运算时间短, 网络识别率高达 99.04%, 为流型在线识别提供一种新的有效方法。

关 键 词: 流型识别; 图像处理; 灰度直方图统计特征; 改进支持向量机

中图分类号: O359.1 文献标识码: A

引 言

两相流动现象广泛存在于化学、石油、动力工程以及各种加工工业的换热设备中, 如蒸发器、冷凝器、锅炉以及油气输送等。流型在两相流的流动和传热特性的研究中是非常关键的, 它虽然没有定量的描述, 但它是决定传热与流动的计算依据, 不同流型, 有其独特的传热与流动机理。流道中流型的变化往往会引发流阻、流动的稳定性的改变以及出现不良的传热危机。因此, 在气液两相流动中, 流型的研究与确定是首要任务^[1]。

两相流流型及其转变特性的研究, 是两相流研究中最基本也是最重要的问题之一^[2]。流型识别方法可以分为两类: 一类是根据两相流流动图像的形式直接确定流型, 如目测法、高速摄影法、过程层析成像法等; 另一类是间接方法, 即通过对反映两相流流动特性的波动信号进行处理分析, 提取流型特征, 进而识别流型^[3]。孙斌等人利用小波包分解对流型的动态压差波动信号进行分析提取特征^[4], 然后将小波包能量特征与 BP 神经网络结合进行流型识别。王强等人同样利用压差波动信号对特征进行提

取^[5-9], 应用小波与希尔伯特-黄变换的方法进行流型识别。利用压差法对流型识别的优点是信息量比较大, 容易处理, 识别的正确率比较高。然而有一点不容忽视, 就是不论是利用压差波动信号的提取还是对电导波动信号的提取都存在干扰流场的问题。数字图像处理作为一种现代化的信息处理技术, 已被应用于两相流的实验研究中, 它与其它方法相比最大的优点就是无需干扰流场就能对流型的特征进行提取。施丽莲等人利用图像处理技术^[7], 提取气液两相流流动图像中的气泡特征, 结合模糊推理方法对流动图像进行流型识别, 对各种流型的整体识别率达到 93.4%。从目前的文献上来看, 利用图像处理技术来进行流型识别还比较少, 还有很多工作要做, 因此利用图像处理方法, 对气液两相流流型进行识别的研究具有重要的学术价值和实际意义。

1 实验装置及实验方法

实验是在空气-水两相流系统上完成的, 如图 1 所示。

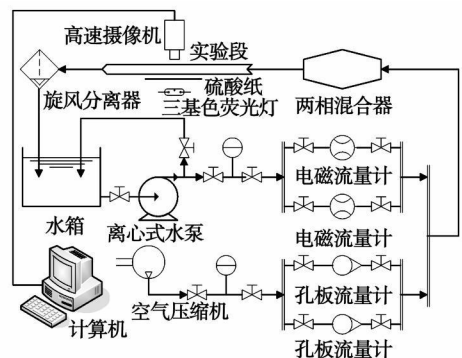


图 1 空气-水两相流实验系统

该实验装置主要包括两部分, 即流体控制系统

和图像采集系统。流体控制系统主要是: 空气经空压机升压和孔板流量计计量后进入气液两相混合器, 水由水泵抽出, 用电磁流量计计量后到气液两相混合器, 从气液两相混合器出来的气水混合物, 流经透明测试管进行流动图像的采集后, 进入旋风分离器, 将空气分离出来并排入大气, 剩下的水流回水箱供循环使用。图像采集系统主要包括照明系统和高速摄影系统。高速摄影机对光线的亮度有较高的要求, 照明系统的光源使用 6 400 K 色温的三基色光管, 光线明亮无闪烁。由于两相流流型变化复杂, 高速摄影系统采用瑞士公司研发的 SpeedCam Visario 系统, 其最大分辨率为 1 536×1 024, 最大帧频达到 10 000 帧/s, 能够清晰的抓拍各种流型的瞬变图像。

在图像摄取过程中由于液体和气体均是透明的, 可采用逆光照明^[8], 拍摄各种流态的阴影。为了使光线分布均匀, 可在流动图像的后侧有机玻璃管

上, 蒙上两层绘图用的硫酸纸, 可获得满意的拍摄图像。本实验选用内径 50 mm, 长为 2 m 的透明有机玻璃管。在水平测试管中采集到大小为 512×192, 帧频为 125 帧/s 的典型流型图像, 如图 2 所示。在图像的拍摄过程中, 透明有机玻璃管的洁净度和照明条件都会对拍摄图像的质量产生影响。为了提高图像识别的准确率, 需要对图像进行预处理, 以去除这些噪声^[9]。气液两相流动中会有少量杂质颗粒吸附到管内壁上, 对拍摄的图像质量产生影响, 而中值滤波对滤除脉冲干扰及图像的盐粒噪声有较好的效果, 因此先对拍摄到的流动图像进行中值滤波。受照明条件的限制, 拍摄的流动图像灰度集中在较暗的区域, 从而导致图像偏暗, 不利于图像识别。实验中用灰度拉伸功能来拉伸灰度区域, 以改善图像质量。然后对图像进行腐蚀处理, 最后进行平滑滤波。经过预处理后的流动图像如图 2 所示。

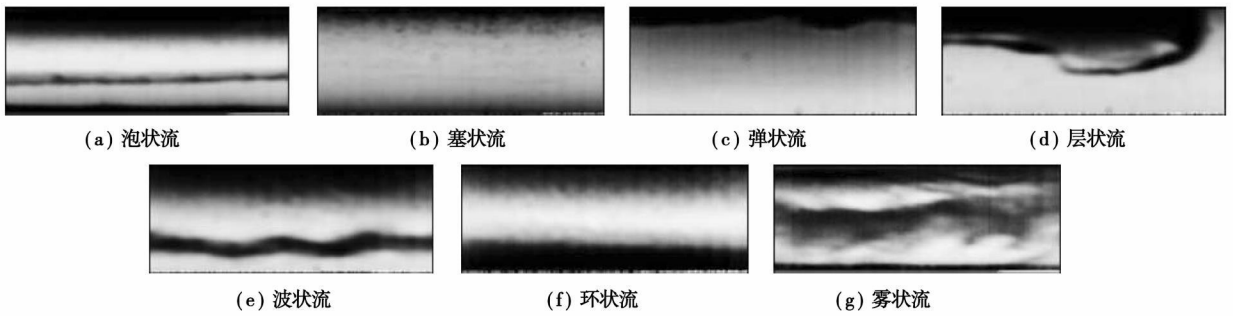


图 2 图像处理后的气液两相流流动图像

2 特征提取

灰度直方图是图像窗口中多种不同像素分布的概率统计。视觉系统中所观测到的灰度图像必然对应于一定概率分布的灰度直方图, 因此可以通过比较两副图像的灰度直方图的相似性来区分不同图

像。实验中采集到的 7 种典型流型图像的灰度直方图如图 3 所示。流型图像的灰度直方图相似性, 可用表 1 中所列出的统计特征量进行度量^[10]。实验表明, 这些统计特征能够较好区分不同的灰度直方图, 从而区分流型图像, 可用来构成流型图像的特征向量。其中: z_i 表示灰度的一个随机变量; $p(z_i)$ 表示 z_i 灰度级图像像素的个数; L 表示灰度级数。

表 1 灰度直方图统计特征

特征值	表达式	纹理相似性度量
均值	$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i)$	平均灰度度量
标准偏差	$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 p(z_i)}$	平均对比度度量
平滑度	$R = 1 - 1/(1 + \sigma^2)$	区域中灰度的相对平滑度度量。对于灰度区域, $R = 0$; 对于灰度级的值有较大偏移的区域 $R = 1$
三阶矩	$u_3 = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^3 p(z_i)$	度量直方图的偏斜。若直方图是对称, 则度量为零; 若度量为正值, 则方图向右偏斜; 若度量为负值, 则直方图向左偏斜
一致性	$U = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(z_i)$	度量一致性。当所有灰度值相等时, 该度量最大并从此处开始减小
熵	$e = -\sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \log_2 p(z_i)$	随机性度量

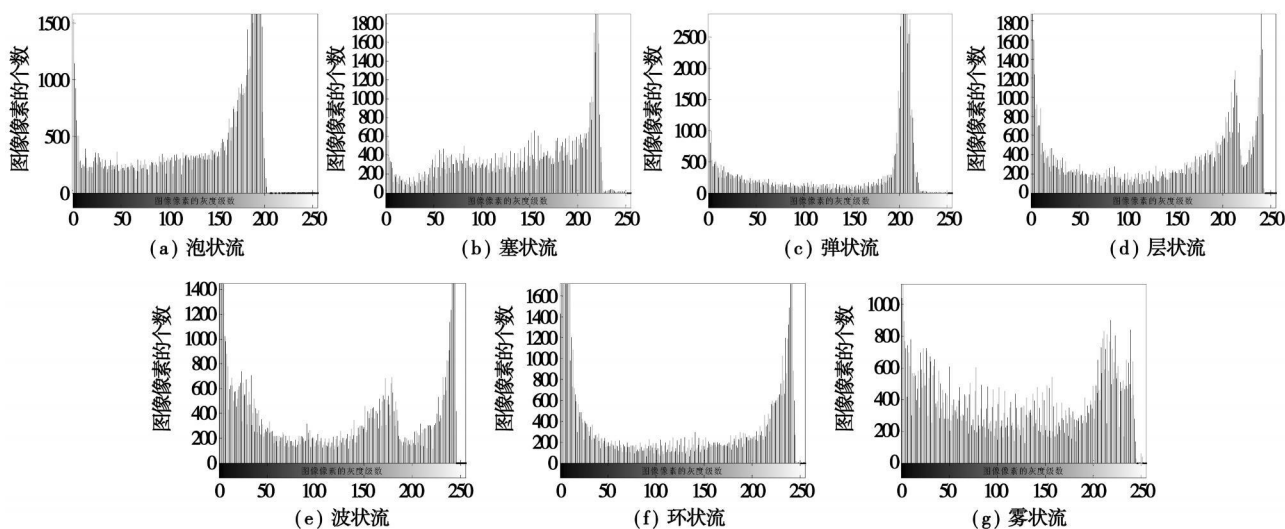


图 3 气液两相流流型图像的灰度直方图

3 改进的支持向量机

SVM 理论正是在这一基础上发展而来的, 经过十几年的研究和发展, 已开始逐步应用于一些领域。支持向量机不仅克服了传统方法的大样本要求, 还有效地克服了维数灾难及局部极小问题, 并在处理非线性问题时显示了其突出的优越性能。

对于各种流型图像变化复杂的辨识困难, 所能获取的准确训练样本比较有限等问题, SVM 将发挥它小样本训练的优势。其提供的是与问题维数无关的复杂性的刻画, 从而避免了在处理高维数据时存在的难以收敛, 计算复杂和结果难以解释等问题。因此, 可以在高维特征空间中构造线性决策边界来对应于输入空间的非线性决策。目前有很多关于改进支持向量机的研究, 本文应用的是在核函数上增加一个大于 1 的系数的方法^[1], 来减少支持向量的个数, 进而提高识别性能。

3.1 支持向量机分类算法

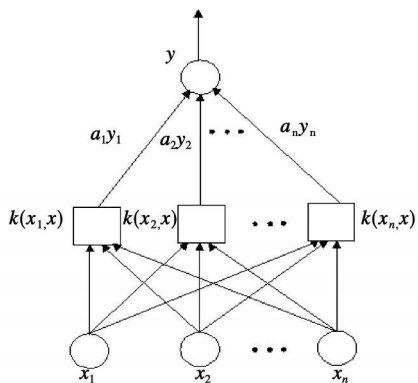


图 4 支持向量机示意图

支持向量机通过事先选择好的非线性映射将输入向量 x 映射到一个高维特征空间 Z , 在这个空间构造最优分类超平面, 其结构如图 4 所示。从图中可知, 支持向量机由两层构成: 在学习过程中, 第一层由核定义的给定基的集合中选择基 $k(x_i, x), i=1, 2, \dots, n$; 第二层在这一空间中构造一个线性函数; a_i 为权值。

对于给定的样本集 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, N, x_i \in R^d, y_i \in \{-1, 1\})$ 是类别标号), 支持向量机首先通过非线性映射 $\Phi: R^d \rightarrow R^n$, 将输入向量映射到高维空间, 当数据在高维空间可分时, 支持向量机便在高维空间 R^n 构造最大间隔分类超平面:

$$w \circ \Phi(x) + b \tag{1}$$

可以证明, w 写成 Φ 的线性组合:

$$w = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \Phi(x_i) \tag{2}$$

其中 α_i 可由求解下面的二次规划问题得到:

$$\begin{aligned} \max Q(\alpha) &= \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\Phi(x_i) \circ \Phi(x_j)) \\ \text{st: } &\begin{cases} \alpha_i \geq 0 \\ \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \end{cases} \end{aligned} \tag{3}$$

式中: y —类别标号; x_i —第 i 个样本; α_i —与每个样本对应的 Lagrange 乘子; $Q(\alpha)$ — α 的目标函数。

由 Mercer 条件知, 在高维空间的内积 $(\Phi(x_i) \circ \Phi(x_j))$ 总可以在输入空间找到一个核函数满足 $K(x_i, x_j) = (\Phi(x_i) \circ \Phi(x_j))$, 因此不需要知道非线性映射的具体形式。式(3)可以改为:

$$\max Q(\alpha) = \sum_{i=1}^N \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j)$$

$$st: \begin{cases} \alpha_i \geq 0 \\ \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \end{cases} \quad (4)$$

对于线性不可分的情况, SVM 引入松弛变量 ξ_i ≥ 0 和惩罚因子 C , 使条件变为:

$$y_i[(\omega \circ x_i) + b] - 1 \geq \xi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

则目标函数变为:

$$\phi(\omega, \xi) = \frac{1}{2}(\omega \circ \omega^*) + C(\sum_i \xi_i) \quad (6)$$

通过控制 C 和 ξ 两个参数, 就可以控制 SVM 的泛化能力。其中 ξ 称为管子尺度, 它决定了对训练样本拟合的精确程度。 ξ 值越大, 支持向量数目就减少, 解的表达就越稀疏。

目前常用的核函数有 3 种:

(1) 多项式核 $K(x, x_i) = (1 + (x \circ x_i))^c$, $c = 1, 2, \dots, n$; (2) 高斯径向基函数核 $K(x, y) = \exp(-\|x - x_i\|^2 / 2\sigma^2)$; (3) 两层前馈神经网络核 $K(x, y) = \tanh(v(x, x_i) - \theta)$ 。

3.2 支持向量机分类算法的改进

核函数的选择是 SVM 中尚未解决的问题, 目前在目标识别中最常用的是径向基核函数。根据支持向量机期望风险的上界为^[12]:

$$E[Pr(\text{error})] \leq E(N_a) / (N_x - 1) \quad (7)$$

式中: N_a —支持向量机的个数; N_x —训练矢量的个数。可见, 减少支持向量个数可以提高 SVM 的推广能力, 即提高目标识别的性能。

根据这个原理, 应用了一种在径向基核函数中引入一个系数的改进方法:

$$k(x, x_i) = X \cdot \exp\{-\|x - x_i\|^2 / 2\sigma^2\} \quad (8)$$

这样式(4)就可写成:

$$\max Q(\alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - 0.5X \sum_{i,j=1}^n \alpha_i y_i \alpha_j y_j (x_i \circ x_j) - \sum_{i=1}^n \alpha_i - 0.5X \sum_{i,j=1}^n \sqrt{X} \alpha_i y_i \sqrt{X} \alpha_j y_j (x_i \circ x_j) \quad (9)$$

又因为在上述二次规划中, 起主要作用的是二次项, 增加一个大于 1 的系数 X 可以增大式(4)中二次规划函数的二次项系数的绝对值, 减小最优值 α 的值, 从而减少了支持向量的个数, 最终可以达到提高识别性能的目的。

SVM 是解决二类目标分类的方法, 对于本文中遇到的 7 种流型的分类问题可以将其转化为 6 个两类问题^[13]。

4 实验结果与分析

对实验中采集到的泡状流, 塞状流, 弹状流, 层

状流、波状流、环状流、雾状流等典型流型图像, 分别提取其灰度直方图统计特征, 部分特征数据如表 2 所示。

表 2 部分典型流型的图像特征数据

典型流型	均值	标准偏差	平滑度	三阶矩	一致性	熵
泡状流	0.502 9	0.263 4	0.063 9	-3.318 4	0.010 7	7.112 7
泡状流	0.502 5	0.263 2	0.064 1	-3.294 6	0.011 0	7.121 3
塞状流	0.492 1	0.304 2	0.085 1	-2.510 1	0.015 0	7.228 2
塞状流	0.491 8	0.305 1	0.084 9	-2.493 8	0.015 1	7.227 0
弹状流	0.516 5	0.316 0	0.091 1	-5.772 5	0.026 3	6.416 0
弹状流	0.517 0	0.317 1	0.092 4	-5.808 7	0.021 5	6.408 9
层状流	0.458 5	0.356 9	0.112 9	-0.311 0	0.013 4	7.262 7
层状流	0.459 7	0.357 3	0.113 5	-0.268 2	0.013 2	7.263 7
波状流	0.437 8	0.353 4	0.111 2	1.664 1	0.009 0	7.446 0
波状流	0.440 1	0.351 5	0.110 7	1.313 4	0.008 8	7.451 3
环状流	0.431 8	0.390 5	0.132 7	3.025 6	0.030 1	6.772 4
环状流	0.431 2	0.388 9	0.131 4	2.957 7	0.029 2	6.821 0
雾状流	0.435 8	0.337 1	0.101 7	2.224 1	0.007 9	7.518 5
雾状流	0.434 2	0.336 1	0.099 4	2.352 7	0.008 0	7.520 4

实验中, 对 7 种典型流型图像共提取 350 个样本, 每种流型图像为 50 个样本, 在每种流型图像中选取 20 幅图像, 共 140 幅图像作为学习样本, 剩余 210 幅图像作为测试样本, 使用前面介绍的改进的径向基支持向量机进行分类, 取 $\sigma = 1.1$, $C = 10$, $X = 13$, 这些参数都是根据实验优化得到的。在 CPU 为 Pentium2.4 和 512MB 内存的计算机上, 分类软件为 matlab7.0, 改进后的 SVM 与没有改进的 SVM 的一些数据对比如表 3 所示。

表 3 改进前、后的 SVM 识别性能对比

	图像处理 部分耗时/s	分类耗时/s	正确率/%
SVM	1.1	0.09	95.00
改进 SVM	1.1	0.03	99.04

从实验结果可以看出: 改进的径向基支持向量机表现出了良好的分类性能, 其最小错分率不到 1%。其识别时间也较没有改进的 SVM 要短。

分析实验的结果, 之所以能达到如此高的识别率, 原因有两个方面: 一方面图像灰度直方图统计提取的特征对水平管内 7 种典型流型有着很好的分辨能力, 改进的径向基 SVM 能有很高的识别率; 另一方面改进的径向基 SVM 在识别精度、训练速度和泛化能力方面有着出色表现, 适合在线识别。

本实验方法对气液两相流流型图像进行了非接触的获取,在不干扰流场的情况下获得了比较清晰的两相流流型图像,是一个两相流流型识别的新方法,较以往的流型识别方法存在的不足之处就是发展还不是很成熟,很多地方需要改进,如何将其尽快应用到实际工程的流型在线识别中是作者正在研究的工作。

5 结 论

(1) 图像灰度直方图统计特征,通过图像中像素的灰度级分布,建立了灰度直方图与灰度图像之间的对应关系,反映了图像本身的属性,是一种有效的图像识别度量标准。

(2) 支持向量机用于模式识别的实现步骤比较简单,不需要长时间的训练过程,只需根据初始样本求解最优超平面,进而确定决策函数,然后即可泛化推广识别其它待识别的样本。改进的径向基支持向量机在小样本数据下,较没有改进的支持向量机所需运算时间更短,识别率更高,且比较易于实现。

(3) 实验证明,基于图像灰度直方图统计特征与改进支持向量机相结合的气液两相流流型识别方法是可靠的。但必须指出的是,上述实验是在小样本情况下得到的,随着样本数的增加训练难度会迅速增大,SVM 分类器性能会明显下降,如何提高在大样本情况下的 SVM 分类器性能还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] LOWE D C, REZKALLAH K S. Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void fraction signals [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25: 433-457.
- [2] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [3] 白博峰, 郭烈锦, 赵 亮. 汽(气)液两相流流型在线识别的研究进展[J]. 力学进展, 2001, 31(3): 437-446.
- [4] 孙 斌, 周云龙. 基于小波包能量特征的气液两相流流型识别方法[J]. 化学工程, 2006, 34(2): 33-36.
- [5] 王 强, 周云龙. 基于小波能量特征的气液两相流流型识别方法[J]. 水利电力机械, 2006, 28(10): 66-70.
- [6] 王 强, 周云龙, 孙 斌 等. EMD 与神经网络在气液两相流流型识别中的应用[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(3): 442-444.
- [7] 施丽莲, 蔡晋辉, 周泽魁. 基于图像处理的气液两相流流型识别[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(8): 1128-1131.
- [8] HA Y J, LITU Z G, HANRATTY T J. A backlighted imaging technique for particle size measurements in two phase flows[J]. Experiments in Fluids, 1998, 25: 226-232.
- [9] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [10] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital Image Processing [M]. 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [11] 姜 斌, 和 湘, 孙月光, 等. 一种改进的支持向量机模式分类方法[J]. 电光与控制, 2007, 14(4): 24-26.
- [12] 许秀英, 盛卫星. 用改进核函数提高 SVM 的雷达目标识别率[J]. 现代雷达, 2005, 27(10): 53-56.
- [13] 黄景涛, 马龙华, 钱积新, 等. 一种用于多分类问题的改进支持向量机[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(12): 1633-1636.

(编辑 滨)

新技术、新产品

煤转换成液体燃料的工业装置

据《Gas Turbine World》2008 年 7~8 月号报道,神华(音译)集团—世界最大的煤生产者之一,将投资达 15 亿美元,在 2008 年底完成煤转换成液体燃料加工装置的建造。

在内蒙古自治区内,神华集团将建造一个新的工业规模的煤到液体燃料的转换装置。

该装置每天将原煤转换成约 3 600 300 L 原油状的液体,其中 70% 将是纯柴油。

神华项目是目前在中国西部正在开发的 7 个煤转换成液体燃料的示范装置中的一个装置,估计这 7 个装置总的投资费用约为 120 亿美元。

(吉桂明 供稿)

was analyzed in a comprehensive way. On this basis, a study was conducted of the conversion of a high power simple-cycle marine gas turbine (MGT-33) to an intercooled cycle one. The precondition of the conversion is to keep the majority of the flow path and structure of the original engine gas generator unchanged to inherit the reliability of the prototype machine. The results of the study indicate that after the adoption of the IC cycle, under the precondition of minimum structure modification and retaining the compactness of the whole machine, the overall performance of the gas turbine still secures a conspicuous enhancement, with its power output being increased by about 34% and the efficiency, enhanced by approximately 4.1%, thus demonstrating the merits of the relevant engineering modifications. **Key words:** marine gas turbine, IC (Intercooled Cycle) cycle

汽轮机热力性能考核指标的通用方程 = **A General Equation of Indexes for Appraising the Thermodynamic Performance of a Steam Turbine**[刊,汉]/ YAN Shun-lin, GUO Jia-lei (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(1). - 65 ~ 67

For the safe and cost-effective operation of a whole thermal power plant, it is of the utmost importance to grasp and know well the thermodynamic performance of steam turbine units. Currently, only a definition and basic calculation formulae of various indexes are given in the technical specification for thermodynamic performance tests of a steam turbine. If for different steam turbine units, calculation formulae are to be listed separately, a relatively poor generalization will result and this is not conducive to the development of general-purpose computer programs. On the basis of a long-time analysis and observation, a unified physical model of thermal power plants was established, and a general-purpose equation of indexes for appraising the thermodynamic performance of a steam turbine, proposed. This not only provides an underlying basis for preparing the calculation indexes of steam turbine thermodynamic tests, but also lays a foundation for a further refinement of the test specification. **Key words:** thermodynamic performance, indexes for appraisal, general equation

一种识别气液两相流流型的新方法 = **A New Approach for Identifying Gas-liquid Two-phase Flow Patterns** [刊,汉]/ ZHOU Yun-long, LI Hong-wei, YUAN Jun-wen (College of Energy Source and Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, China, Post Code: 132012)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(1). - 68 ~ 72

In the light of the statistical characteristics of image grey-scale histograms, proposed was a new method for identifying gas-liquid two-phase flow patterns by combining an image processing with an ameliorated supportive vector machine. The method in question is to use a high-speed video camera to acquire an image of 7 typical flow patterns on a gas-liquid two-phase flow test rig. Through the image processing, the statistical characteristics of the image grey-scale histograms were extracted to form an eigenvector, which serves as a flow pattern specimen to perform a training for and identification of the ameliorated supportive vector machine. The test results show that the characteristics of the image grey-scale histograms can very well reflect the difference of various flow patterns. Compared with the original supportive vector machine, the ameliorated one provides a good classification performance, a short operation time and a network identification rate as high as 99.04%, thus providing a new effective approach for an on-line discrimination of flow patterns. **Key words:** flow pattern identification, image processing, statistical characteristics of grey-scale histograms, ameliorated supportive vector machine

直接空冷凝汽器单元样机流动和传热性能研究 = **A Study of the Flow and Heat Transfer Performance of a Direct Air-cooled Condenser Sample Unit**[刊,汉]/ SHI Lei (College of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, Post Code: 100044), SHI Cheng (China Electric Power Engineering Consultant Group Corporation, Bei-