

# 多管导流式气泡泵性能的实验研究

徐煌栋, 刘道平, 郑晓倩

(上海理工大学 制冷技术研究所, 上海 200093)

**摘 要:** 为研究多管导流式气泡泵性能, 搭建了多管导流式气泡泵性能实验系统, 以水为工质, 对大气压下的多管导流式气泡泵在不同实验工况下的性能进行了实验研究。结果表明, 保持沉浸比和提升管管径不变, 随着加热功率的增大, 液体提升量和提升效率值先增大后减小; 保持加热功率和提升管管径不变, 随着沉浸比的增大, 液体提升量和提升效率不断增大。提升管数量的倍增, 并不会带来提升量和提升效率呈相应倍数的增加。

**关 键 词:** 多管导流式气泡泵; 加热功率; 沉浸比; 吸收式制冷

中图分类号: TH38 文献标识码: A  
DOI: 10.16146/j.cnki.mdjgc.2016.07.006

## 引 言

气泡泵是单压吸收制冷系统的核心部件, 为整个单压吸收制冷系统的溶液循环提供动力。因此对气泡泵的性能研究有助于单压吸收制冷系统的系统设计以及性能优化, 并且可以扩大单压吸收式制冷技术的应用范围。

目前, 国内外学者对单管式气泡泵的研究主要集中在影响气泡泵性能的参数研究上, 主要研究了沉浸比(提升管液面初始高度  $H$  与提升管管长  $L$  之比)、加热功率、气泡泵的结构形式对气泡泵提升管性能的影响<sup>[1-6]</sup>; 对于多管式气泡泵的研究,  $N_{caters}$  和  $B_{nnet}$  为了提高扩散-吸收式制冷机的制冷能力<sup>[7]</sup>, 使用多管式气泡泵增加工质的流量以研究提升管数量的增加对制冷机性能的影响, 结果表明: 增加提升管数量提高制冷量的同时并没有引起 COP (性能系数) 的明显下降, 并得出流体的流量只与输入的热量多少有关的结论。

贾阳涛等设计了一台使用双提升管结构且精馏

器上多处设置阻流坑的扩散吸收制冷装置<sup>[8]</sup>, 实验研究了不同氨水充注浓度、不同充氢压力、不同加热功率对制冷系统的影响。结果表明: 采用双提升管后, 液体循环量增大, 循环周期缩短, 制冷量增加, 未对多管气泡泵的性能进行研究; 方甲闯等设计了一种多管弦月形通道气泡泵<sup>[9]</sup>, 对其提升性能进行了实验研究和分析; 但文献[9]只采用了一种多管结构, 并未对多管的性能进行分析。

综上所述, 目前对于多管导流式气泡泵的性能研究极少, 它的性能也更无从所知。本研究通过建立可视化多管导流式气泡泵实验装置, 以水作为实验工质, 采用控制变量法研究多管导流式气泡泵在不同的运行工况下的性能。

## 1 实验装置与实验方法

### 1.1 实验装置

以水为工质研究多管导流式气泡泵的提升性能与工作特性, 根据文献[10], 采用 45° 锥形导流结构的气泡泵, 有较好的性能提升。整个实验装置如图 1 所示。

实验装置主要由气泡发生器、竖直提升管、高位储液器以及储液箱等组成。提升管通过转接装置与导流结构和高位储液器连接, 通过此方法可以使用本装置完成对内径 8、10 和 12 mm, 高度为 600 mm 的提升管进行研究。其中提升管使用透明玻璃材质, 其余部分为不锈钢材料。此外在气泡发生器、储液器和提升管外部安装有隔热材料减少漏热损失。

为了控制气泡泵中的气体流量, 则需要控制电加热装置的加热功率, 系统的加热功率通过功率控制模块进行控制, 加热功率为 0 ~ 2 500 W 连续

收稿日期: 2015-08-12; 修订日期: 2015-12-29

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目资助(13ZZ117)

作者简介: 徐煌栋(1989-), 男, 浙江衢州人, 上海理工大学硕士研究生。

通讯作者: 刘道平(1963-), 男, 上海理工大学教授。

可调。

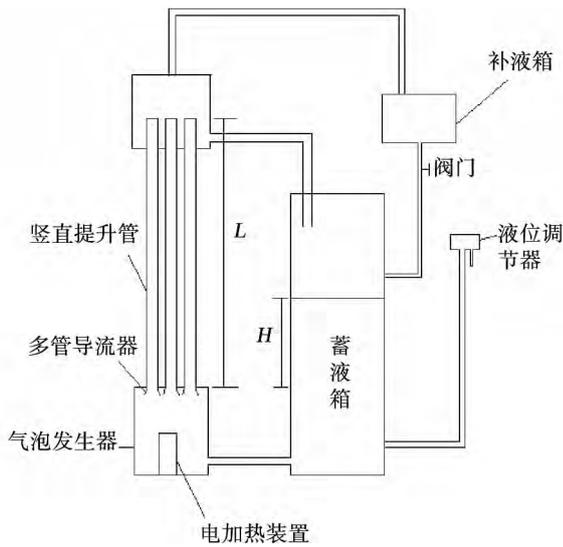


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

### 1.2 实验方案和实验方法

本实验对提升管管长为 600 mm,提升管内径为 8、10 和 12 mm,沉浸比为 0.3、0.4、0.5,加热功率为 100~2 000 W,提升管的数量为 1~5,采用控制变量法研究多管导流式气泡泵的提升性能。

实验过程如下:将水注入到系统中,通过调节液位控制器的水平高度使系统内液面达到液位高度  $H$ 。接通电源,加热装置开始工作。当系统中的水开始沸腾时,气泡泵开始提升液体,此时调节加热器的功率,使其达到所需各个工况,同时打开调节阀,令补水箱中的水流入储液器补充系统中因沸腾而损失的水,保证液位处于稳定状态。此时,提升管中的气液两相流上升进入到高位储液器中,高温水蒸气通过上方管道进入补液箱中冷凝,液体从下方排液口回流至储液器中。当系统在运行工况下运行稳定后,开始采样测量。

由于气泡泵中气液两相流的不稳定,无法采用流量计进行准确测量,所以采用从排液口取样的方法对流量进行称重测量,计算单位时间内的液体提升量,为了保证测量的准确性,多次测量取平均值。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 加热功率对提升量的影响

以提升管内径  $d = 10$  mm,沉浸比为 0.4 ( $H/L =$

0.4) 为例,进行变加热功率实验,不同提升管数量的实验结果如图 2 所示。

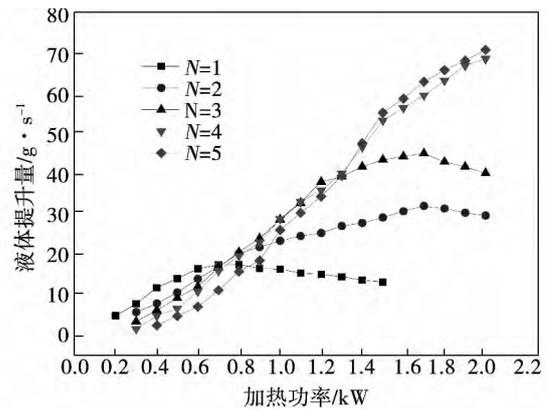


图 2 当  $H/L = 0.4$ ,  $d = 10$  mm 时各功率下不同提升管数量的液体提升量

Fig. 2 Liquid lifting capacity of various numbers of the lifting tube at different powers when  $H/L = 0.4$  and  $d = 10$  mm

从图 2 中可以看出,无论采用多少数量的提升管,气泡泵的整体提升规律都相似。提升管数量为 1~3 时,随着加热功率的增加,提升量先增加后减少。提升管数量为 4 和 5 时,从图中可以看出,提升量是一直增大的,由于考虑到了气泡泵的经济性和实验台的额定加热功率,所以实验的加热功率只做到了 2 000 W,结合前面的提升规律,加热功率继续增大的话,提升量也会相应的减少。

从两相流理论来分析,气泡泵提升管内的气液两相混合物在上升过程中,单位时间内的质量流量由重力压降和摩擦阻力损失决定。随着气体输入量的增加,汽液混合物中的含气率增加,同时重力压降减小,摩擦阻力增加。在气体输入量较小阶段,在气液上升阻力中起决定性作用的重力压降减小较多,所以总的阻力呈下降趋势,而总的循环推动力不变,即储液器液位高度不变,所以液体提升量随着气体输入量的增加而急速增加;当气体输入量到达一定程度后,摩擦阻力损失增加较大,在液体上升阻力中起决定性作用,所以总的阻力呈上升趋势,所以液体提升量的增量逐渐减小。这种关系在两相流运动现象中的表现就是竖直提升管两相流流型经历了泡状流-弹状流-块状流-环状流的变化。

不同数量的提升管具有不同的提升效果。随着

提升管数量的增加,在加热初始阶段,当管数较多时,其提升量反而不如管数较少的,如管数为4和3时与管数为2和1时比较,加热功率较小,产生气泡有限,分散到多根管中,提升力不足。原因是由于提升管数量越多,平均分配到每根提升管的加热功率较小,管内流型为泡状流,提升效果较差。随着加热功率的增加,提升管数量越多,平均到每根提升管的加热功率越大,管内流型越接近弹状流,提升量增大。随着加热量的继续增大,流型向块状流转变,提升量变小。由图也可容易看出提升管数量越多,提升量达到最大值所需要的加热功率越大。

1 根提升管的最大提升量为 800 W 时的 17.38 g/s; 2 根提升管的最大提升量为 1 700 W 时的 31.96 g/s; 3 根提升管的最大提升量为 1 700 W 时的 45.04 g/s; 最大提升量并不是随着提升管数量的增加也相应的成倍增加。

### 2.2 沉浸比对提升量的影响

以提升管内径  $d = 10 \text{ mm}$ , 提升管数量为 3 ( $N = 3$ ) 为例,进行变沉浸比实验,不同提升管数量的实验结果如图 3 所示。

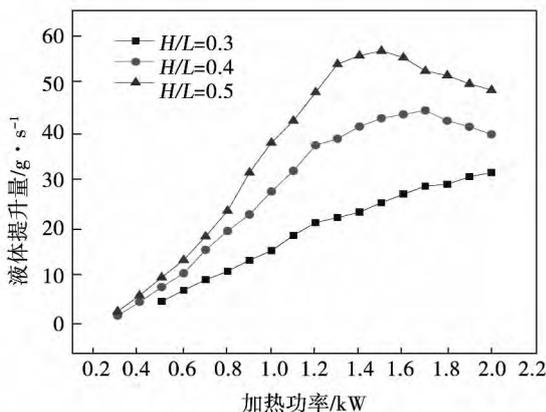


图3 当  $N = 3$ ,  $d = 10 \text{ mm}$  时各沉浸比下不同提升管数量的液体提升量

Fig. 3 Liquid lifting capacity of various numbers of the lifting tube at different immersion ratios when  $N = 3$  and  $d = 10 \text{ mm}$

从图中可以看出,随着沉浸比的增加,相同加热功率下的液体提升量不断增大。结合,不管多管还是单管,沉浸比对于气泡泵性能的提升都呈正相关。如图 4 所示,当沉浸比一定时,液体提升量随着加热

功率的增加而增加;当沉浸比较小时,液体提升量与加热功率近似呈线性关系;在沉浸比较大的情况下,只有在加热功率较小时,两者才呈现线性关系,且斜率较大,而加热功率越大,液体提升量增量越小,曲线越趋于平直。

原因是,当沉浸比较小时,总的循环推动力也较小,略大于提升阻力,所以曲线呈平缓的趋势上升;当沉浸比较大时,总的循环推动力也较大,加热功率较小阶段,推动力远远大于提升阻力,所以斜率较大,而在后续阶段,阻力开始增大,所以曲线趋于平缓。

### 2.3 多管与单管提升量的对比

为了更好的说明多管气泡泵的性能,现对多管中的每根提升管的提升量与单管进行对比(如 3 根管时,加热功率为 600 W,每根管的平均加热功率为 200 W,将此结果与单根管的 200 W 进行对比),以提升管内径  $d = 10 \text{ mm}$ ,沉浸比为 0.4 ( $H/L = 0.4$ ) 为例,结果如图 4 所示。

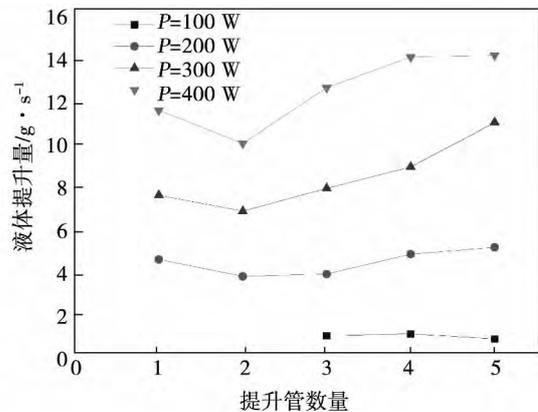


图4 当  $H/L = 0.4$ ,  $d = 10 \text{ mm}$  时不同提升管数量每份加热功率下的液体提升量

Fig. 4 Liquid lifting capacity of various numbers of the lifting tube at each share of the heating power when  $H/L = 0.4$  and  $d = 10 \text{ mm}$

为了更好的分析比较多管中每根提升管的提升效果,将多管中的加热功率根据提升管数量进行平均分配,与单管的 100 ~ 400 W 进行对比分析。从图 4 中可以发现,提升管数量为 1 和 2 时,每根管加热功率为 100 W 时,无法提升,液体提升量为零。当每根管加热功率为 200、300 和 400 W 时,随着提升管数量的增加,提升量先减少后增大,提升管数量

为 2 时的提升量最小。

## 2.4 多管气泡泵的效率分析

泵效率  $\eta$  的表达式如下:

$$\eta = \frac{P_{BP}}{P} = \frac{m_1 g (L - H)}{P} \quad (1)$$

式中:  $m_1$ —单位时间内的液体提升量  $g/s$ ;  $g$ —重力加速度  $m/s^2$ 。

以提升管内径  $d = 10 \text{ mm}$  沉浸比为 0.4 ( $H/L = 0.4$ ) 为例, 进行变加热功率实验, 不同提升管数量的气泡泵提升效率结果如图 5 所示。

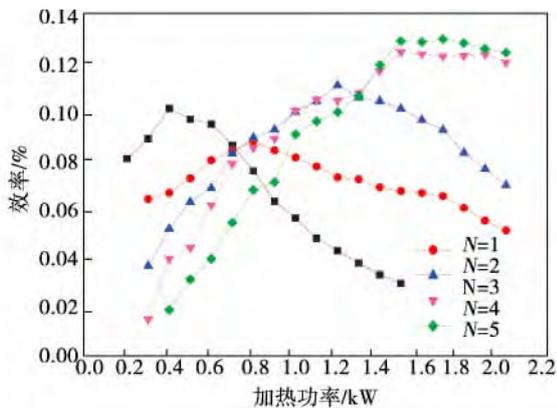


图 5 当  $H/L = 0.4$   $d = 10 \text{ mm}$  时各功率下不同提升管数量的效率

Fig. 5 Efficiencies under various numbers of the lifting tube at various powers when  $H/L = 0.4$  and  $d = 10 \text{ mm}$

从图 5 可以看出, 不管采用几根提升管, 效率曲线的趋势都是一致的, 保持沉浸比和提升管内径不变, 随着加热功率的增加, 气泡泵的提升效率先增大后减少。加热功率较小时, 提升管数量越多, 效率越小; 随着加热功率的增加, 提升管数量越多, 效率越大。当提升管数量增加时, 为了达到与单管相同的效率, 需要的加热功率越大, 如提升管数量为 1 时的最大效率为 400 W 时的 10.22%, 而提升管数量为 3 时为了达到 10.22% 的提升效率, 加热功率至少为 1 000 W。

## 3 结 论

为了研究多管导流式气泡泵的性能, 搭建了多管导流式气泡泵实验台, 以水为工质, 对提升管管长为 600 mm, 提升管内径为 8、10 和 12 mm, 沉浸比为

0.3、0.4 和 0.5, 加热功率为 100 ~ 2 000 W, 提升管的数量为 1 ~ 5 的导流式气泡泵进行实验, 得出以下结论:

(1) 和采用单一提升管的气泡泵一样, 保持沉浸比和提升管管径不变, 随着加热功率的增大, 液体提升量和提升效率先增大后减少; 保持加热功率和提升管管径不变, 随着沉浸比的增大, 液体提升量和提升效率不断增大;

(2) 采用多管的气泡泵和采用单管的气泡泵相比较, 提升管数量的倍增, 并不会带来提升量和提升效率呈相应倍数的增加;

(3) 保持沉浸比和提升管内径不变时, 较小加热功率时的液体提升量和提升效率随着提升管数量的增加, 越来越小; 当加热功率越来越大时, 液体提升量和提升效率随着提升管数量的增加, 越来越大;

(4) 因为提升管有一个最佳管径范围 11 ~ 13 mm<sup>[11]</sup>, 所以在单压吸收式制冷系统选择何种气泡泵时, 可以根据系统的需要选择单管或者多管, 一般所需提升量较小时可采用单管, 所需提升量较大时可采用多管; 在系统允许范围内, 也尽量增大沉浸比 ( $H/L$ )。这样可以确保气泡泵的提升性能最优化。

## 参考文献:

- [1] 平亚琴, 刘道平, 陈盛祥, 等. Einstein 循环制冷机导流式气泡泵的性能研究[J]. 热能动力工程, 2011, 26(6): 743-746.  
PING Ya-qin, LIU Dao-ping, CHEN Sheng-xiang. Study of the performance of a flow-guided type bubble pump in an Einstein refrigerating machine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(6): 743-746.
- [2] 汤成伟, 刘道平, 祁影霞, 等. 单压吸收式 Einstein 循环制冷机中气泡泵的性能分析[J]. 制冷学报, 2009, 30(03): 35-39.  
TANG Cheng-wei, LIU Dao-ping, QI Ying-xia, et al. Experimental investigation of a bubble pump in an Einstein refrigerating machine [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(03): 35-39.
- [3] 平亚琴, 刘道平, 陈盛祥, 等. 单压吸收式制冷系统气泡泵理论模型与实验研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(6): 46-50.  
PING Ya-qin, LIU Dao-ping, CHEN Sheng-xiang, et al. Theoretical model for and experimental study of a bubble pump in a single-pressure absorption type refrigeration system [J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(6): 46-50.
- [4] 冯丽娜, 刘道平, 陈翠云, 等. 气泡泵冷态实验研究及性能参数的无因次分析[J]. 制冷学报, 2013, 34(2): 44-48.  
FENG Li-na, LIU Dao-ping, CHEN Cui-yun, et al. Experimental study of a bubble pump in the cold state and non-dimensional anal-

ysis of its performance parameters [J]. Journal of Refrigeration , 2013 02: 44 - 48.

[5] 赵荣祥,刘道平,梁 侯 等.不同提升高度对气泡泵性能影响的理论与实验研究[J].制冷学报,2014,35(4):78-83.  
ZHAO Rong-xiang,LIU Dao-ping,LIANG Yu,et al.Theoretical and experimental research of the influence of various lifting heights on the performance of a bubble pump[J].Journal of Refrigeration , 2014,35(4):78-83.

[6] 陈永军,刘道平,王东昱 等.连续变截面直立管气泡泵工作特性试验研究[J].流体机械,2014,42(6):61-64.  
CHEN Yong-jun,LIU Dao-ping,WANG Dong-yu,et al.Experimental study of the working characteristics of an upright tube bubble pump with continuous variable cross-sections [J].Fluid Machinery 2014,42(6):61-64.

[7] Vicatos G,Bennett A. Multiple lift tube pumps boost refrigeration capacity in absorption plants [J]. Journal of Energy in Southern Africa 2007,18: 49 - 57.

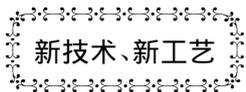
[8] 贾阳涛,朱跃钊,郭 巍 等.对使用双提升管结构的扩散吸收式制冷系统的性能实验 [J].低温与超导,2008,36(8):76-79.  
JIA Yang-tao,ZHU Yue-zhao,GUO Wei,et al.Performance experiment of a diffusion absorption type refrigeration system using the structure of double lifting tubes [J].Cryogenics and Superconduction 2008,08:76-79.

[9] 方甲闯,郑宏飞,李正良.小型太阳能吸收式空调多根弦月形通道溶液提升泵的性能研究 [J].太阳能学报,2007,28(3):291-295.  
FANG Jia-chuang,ZHENG Hong-fei,LI Zheng-liang.Study of the performance of a solution lifting pump with multi-lunate channels in a small-sized solar power absorption type air-conditioner [J].Acta Energeticae Solaris Sinica,2007,28(3):291-295.

[10] 杨 未.传统式与渐缩式气泡泵内流型数值模拟研究 [D].大连海事大学,2013.  
YANG Wei.Numerical simulation and study of the flow patterns inside a traditional and gradually converging type bubble pump [D].Dalian:Dalian Maritime University,2013.

[11] 赵荣祥,刘道平,郑晓倩.提升管管径对导流式气泡泵性能影响的理论与实验研究 [J].制冷学报,2014(6):90-95.  
ZHAO Rong-xiang,LIU Dao-ping,ZHENG Xiao-qian,Theoretical and experimental research of the influence of the inner diameter of the lifting tubes on the performance of a flow guided type bubble pump [J].Journal of Refrigeration,2014(6):90-95.

(刘 瑶 编辑)



## 首台燃气轮机交流发电机装上威尔士亲王号航空母舰

据《Warship Technology》2015年5月刊报道:在苏格兰巴布科克 Rosyth 造船厂,Royce-Royce 和 Aircraft Carrier Alliance 已将首台 Rolls-Royce MT30 船舶燃气轮机成功地装入皇家海军威尔士亲王号航空母舰。

安装仅用时 1 天,仅为伊丽莎白女王号航母安装所花时间的一半。36 MW 功率的 MT30 是世界上功率密度最高的船用燃气轮机。

2 台 MT30 将提供驱动 65 000 t 排水量航母所需 109 MW 的三分之二功率。每台燃气轮机发电机组由 1 台 Rolls-Royce MT30 燃气轮机和 1 台 GE 供货的交流发电机组成。

MT30 航改型船舶燃气轮机的技术规范和规定性能:

推出 年份	功率/kW	耗油率/ kJ · (kW · h) <sup>-1</sup>	效率/ %	压比	流量/ kg · s <sup>-1</sup>	涡轮转速/ r · min <sup>-1</sup>	排气温度/ ℃	约重/ kg	总体尺寸 长 × 宽 × 高/m
2001	36 013	0.212	39.9	24.0	116.6	3 300/3 600	474	5 985	26.5 × 4.6 × 183.9

(吉桂明 摘译)

多管导流式气泡泵性能的实验研究 = **Experimental Study of the Performance of a Multi-tube Flow Guiding Type Bubble Pump** [刊, 汉] XU Huang-dong, LIU Dao-ping, ZHENG Xiao-qian ( Refrigeration Technology Research Institute, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(7). -36~40

To investigate the performance of a multi-tube flow guiding type bubble pump, a system was set up for testing the performance of multi-tube flow guiding type bubble pumps. With water serving as the working medium, an experimental study was performed of the performance of a multi-tube flow guiding type bubble pump under the atmospheric pressure and various test conditions. It has been found that with the immersion ratio and the diameter of the lifting tube being kept unchanged, with an increase of the heating power, the liquid lifting capacity and efficiency will first increase and then decrease. With the heating power and the diameter of the lifting tube being kept unchanged, with an increase of the immersion ratio, the liquid lifting capacity and efficiency will continuously increase. The multiplication of the number of the lifting tubes will not bring about an increase of the lifting capacity and efficiency by the corresponding number of times. **Key words:** multi-tube, flow guiding type bubble pump, heating power, immersion ratio, absorption type refrigeration

基于工况辨识的风电机组齿轮箱状态监测 = **Monitoring of the State of the Gear Box of a Wind Power Generator Unit Based on the Operating Condition Identification** [刊, 汉] LIU Chang-liang ( National Key Laboratory on New Energy Source Electric Power Systems, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206), YAN Xiao ( College of Control and Computer Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(7). -41~46

In the light of the problem that the operating conditions of a large-sized wind power generator unit are complex and changeable and using a single fixed threshold value to evaluate the operating state of a wind power generator unit has a high false alarm rate, the standard fuzzy C mean clustering method was used to identify the operating condition. Under various operating conditions, the non-linear state estimation method was employed to establish a temperature model for gearboxes in the normal work order to estimate the temperature of the bearings and the sliding window remainder error statistical method was adopted to conduct an analysis of the remainder error to establish a remainder error alarm threshold value. Finally, the SCADA data of a wind power generator unit was used to conduct an applied study with a relatively satisfactory result being achieved. **Key words:** wind power generator unit, operating condition identification, state monitoring, non-linear state estimation (NSET)

高负荷风扇末级静叶气动特性试验研究 = **Experimental Study of the Aerodynamic Characteristics of the Stator Blades in the Last Stage of a Highly-loaded Fan** [刊, 汉] PAN Ruo-chi ( Shenyang Engine Design Research Institute, China Aviation Industry Group Corporation, Shenyang, China, Post Code: 110015), SUN Peng,