

水平管内两相流动网丝电容层析成像

黄善仿, 张修刚, 王 栋, 林宗虎

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 提出一种两相流相分布的网丝电容层析成像方法。应用表面带有绝缘膜的热偶丝作为电容传感器, 电容的电介质为绝缘膜, 两极分别为热偶丝的金属芯和覆盖在热偶丝表面的导电液膜。电容与导电液膜长度成正比, 与导电液膜分布和形状无关, 网丝平行均匀布置在管道截面上。实验管道内径 70 mm, 所用网丝每毫米电容值为 4.82 pF, 网丝间距 4 mm。利用水平和竖直二方向电容传感器进行测量, 根据流型知识, 无需重建算法即可得出相分布。静态试验表明, 该方法能实现流型重建, 计算得到的截面含水率误差最大为 3.9%。

关 键 词: 网丝电容层析成像; 相分布; 二方向测量; 含水率

中图分类号: O359 文献标识码: A

1 引 言

过程层析成像技术以两相流为主要研究对象^[1], 利用两相之间的物理性质的不同来确定两相流的相分布, 达到成像的目的。实际工业过程考虑到安全性、经济性及速度的要求, 电学层析成像技术成为首选方案, 主要包括电阻过程层析成像(ERT)及电容过程层析成像(ECT)。

非介入式的 ERT 和 ECT 技术存在明显的缺点^[2]: 由于传感器敏感阵列全部是布置在管道外部, 测量结果除受到流型变化影响外, 还受到外界环境的影响; 不同流型下的信号变化范围很小, 难以区分流型的微小变化, 系统的灵敏度不高; 系统的“软场”特性限制了工业现场的实际应用; 电极沿流动方向有一定的长度, 使得输出信号结果是电极所在轴线长度方向上的平均值, 而不是真正意义上管道截面上的“相分布”; 待测信号与相分布呈强烈的非线性关系, 通过复杂的电学和数学方法处理, 并采用一定的重建算法才能得到图像。鉴于非介入方法的“软

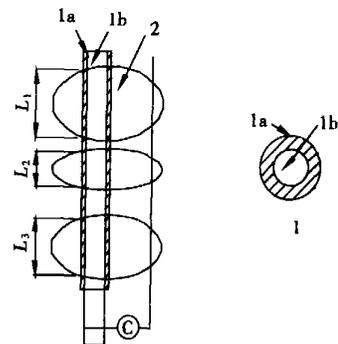
场”特性, 很多学者尝试具有“硬场”特性的方法对两相流进行成像, 提出了一系列介入式 ERT 方法^[3~4]。只要电极尺寸足够小, 扰流引起的测量误差就可以忽略^[5]。但该方法并未考虑待测敏感场之外周围流体对测量结果的影响。任何测量水的阻抗方法均受到水的电导率大小和水分布形状的影响。

结合流型特征和介入式成像的思想, 本文提出一种介入式网丝电容层析成像方法, 可以克服上述其它各种方法的缺点。对于管内水平两相流, 只需要水平和竖直两个方向的投影关系即可确定流型。

2 二维投影法电容层析成像方法

2.1 网丝电容法成像原理

网丝电容传感器结构如图 1 所示。电容传感器由热偶丝制成, 其结构为: 电容传感器的电介质为热偶丝表面的绝缘薄膜 1a, 电容传感器的一极为热偶丝的金属芯 1b, 另一极为覆盖在热偶丝 1 表面的导



1- 镍铬热偶丝; 1a- 表面绝缘层; 1b- 金属芯
2- 水膜; C- 电容测量仪

图 1 网丝电容传感器结构示意图

收稿日期: 2005-12-05; 修订日期: 2005-12-12

基金项目: 全国博士学位论文作者专项基金资助项目(200337)

作者简介: 黄善仿(1978-)男, 江苏泗洪人, 西安交通大学博士研究生

电液体 2, 导电液体通常为水。从导电液体 2 中引出电极作为接线极。电容测量公式:

$$C = \frac{2\pi\epsilon L_1}{\ln(d_2/d_1)} + \frac{2\pi\epsilon L_2}{\ln(d_2/d_1)} + \frac{2\pi\epsilon L_3}{\ln(d_2/d_1)}$$

$$= \frac{2\pi\epsilon}{\ln(d_2/d_1)} \sum_{i=1}^3 L_i \quad (1)$$

其中: $L_i (i = 1, 2, 3)$ —覆盖在热偶丝表面的液膜长度; ϵ —绝缘层 1a 的介电常数; d_1 —热偶丝金属芯的直径; d_2 —热偶丝外径。 ϵ, d_1, d_2 均保持不变, 故测量电容只与覆盖在热偶丝表面液膜总长度成正比, 与其电导率大小和分布无关, 只与导电性有关。

2.2 二维投影方法

由工程制图知识知道, 通过三个方向的投影, 可以确定三维物体的形状, 对二维物体只需要两个方向的投影就可确定物体形状。两相流截面相分布为二维结构, 所以可以根据两个方向投影关系来确定流型。根据张修刚等人提出的两相流电容式层析成像思想^[2], 本文提出了“两个方向投影”的层析成像方法, 对一种为导电相、另一种为非导电相的两相流体的流动进行成像, 只要两相分布在明显的两个区域, 就可以准确重建出断层面的相分布。布置水平和竖直两层传感器, 层间距离很小, 满足“凝固流动”假设^[9], 确保流体流过两层网丝电容传感器时流型保持不变。传感器布置如图 2 所示, 水平和竖直两方向热偶丝均匀布置。这种测量电路在原理上相当于 X 射线层析成像的工作原理: 每方向的传感器相当于一束 X 射线, 每根热偶丝相当于一束“投影射线”, 其“投影值”等于传感器的电容测量值。由不同网丝位置处的电容可以反算出覆盖在其表面导电相的长度, 通过全场求得导电相分布, 从而确定管道界面相分布。层析成像过程的流程图见图 3 所示。

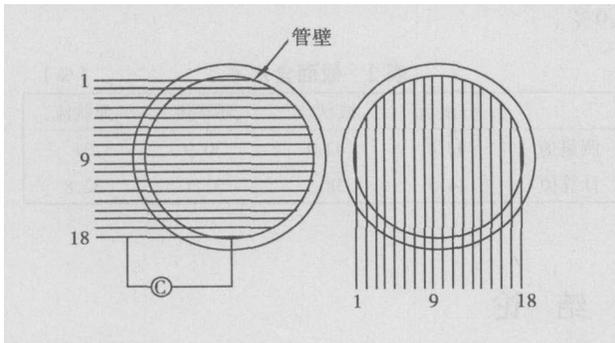


图 2 管道内电容传感器布置

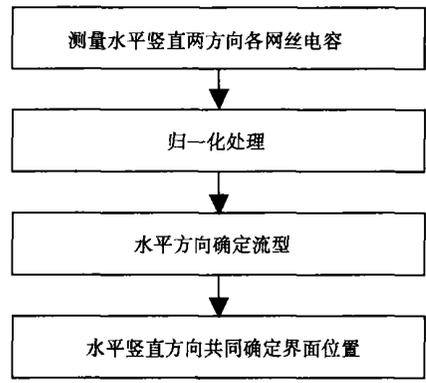


图 3 层析成像流程

3 实验研究

3.1 电容与水膜长度的关系

本文所用传感器为一种镍铬热偶丝, 直径 0.50 mm。电容测量仪精度为 0.1 pF。电容与导电液膜长度关系测量结果见图 4, 拟合出的公式:

$$C = 4.82 L \quad (2)$$

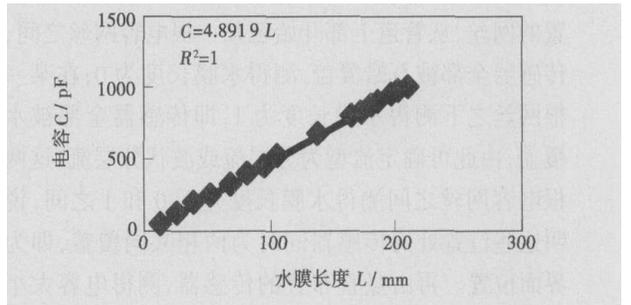


图 4 水膜长度与电容关系

3.2 静态试验

在内径为 70 mm, 外径为 80 mm 的水平有机玻璃管内模拟空气—水两相流的几种典型流型, 水为导电相, 石蜡模拟空气。布置水平竖直两个方向的网丝电容传感器, 在每个方向均匀平行布置 18 根电容网丝, 间距为 4 mm, 两侧网丝距离管壁 1 mm。对两相分布在明显两个区域的空气—水两相流, 典型流型有分层流、波状分层流、弹状流和环状流。

3.3 实验结果处理

实际测得电容值经过反算之后得出各自位置处的导电水膜长度, 对测量结果进行归一化处理, 把计算值和实际测量值用所在位置的电容传感器长度的百分比表示, 实验结果见表 1 所示。结合不同流型特征, 成像过程如下:

表 1 各种流型下电容反算长度与实际测量的比较

(%)

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|-------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 分 层 流 | 水 A | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 水 B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 67.9 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 竖 A | 50.5 | 55.2 | 54.8 | 54.6 | 54.4 | 54.1 | 54.2 | 53.8 | 54.2 | 54.1 | 53.8 | 54.2 | 54.1 | 54.4 | 54.6 | 54.8 | 55.2 | 50.5 |
| | 直 B | 45.6 | 54.9 | 55.5 | 54.4 | 53.5 | 54.1 | 51.6 | 53.9 | 54.9 | 55.1 | 53.6 | 54.6 | 56.4 | 51.7 | 56.6 | 56.8 | 55.7 | 45.6 |
| 波 状 流 | 水 A | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32.8 | 43.3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 水 B | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19.7 | 41.5 | 63.3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 竖 A | 21.5 | 49.5 | 52 | 50.5 | 49.8 | 48 | 48.5 | 48.4 | 49.6 | 54.5 | 62.3 | 62.7 | 65.9 | 65.6 | 66.5 | 63.3 | 59.2 | 30.3 |
| | 直 B | 18.5 | 52.9 | 57.6 | 48.1 | 50.9 | 51.9 | 48.5 | 53.3 | 53.9 | 59.8 | 65.6 | 65.1 | 67.8 | 67.9 | 71.1 | 65.5 | 65.6 | 23.7 |
| 环 状 流 | 水 A | 100 | 100 | 100 | 100 | 70.3 | 50 | 48.6 | 47 | 42.8 | 43.1 | 49.4 | 50 | 53.7 | 64.7 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 水 B | 100 | 100 | 100 | 100 | 71 | 52.2 | 47.6 | 47.8 | 43.9 | 44.9 | 47 | 48.7 | 55.9 | 65.9 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 竖 A | 100 | 100 | 100 | 100 | 76.3 | 53.5 | 46.7 | 46.9 | 43.1 | 42.8 | 44 | 46.5 | 53.4 | 76.2 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 直 B | 100 | 100 | 100 | 100 | 74.9 | 53.8 | 46.6 | 44 | 42.7 | 43 | 44.5 | 47.1 | 54.5 | 77.5 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 弹 状 流 | 水 A | 18.8 | 28.7 | 28.8 | 31.7 | 34.2 | 37.8 | 42.6 | 48.6 | 55.2 | 70 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 水 B | 20 | 30.8 | 30.8 | 35.7 | 34.3 | 39.6 | 35.5 | 52 | 56.4 | 71.5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 竖 A | 100 | 100 | 100 | 100 | 71.1 | 55.1 | 48.6 | 43.6 | 43.9 | 44.2 | 45.7 | 48.9 | 55.1 | 71.1 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | 直 B | 100 | 100 | 100 | 100 | 79 | 55.8 | 49.3 | 45.9 | 44.2 | 44.6 | 46 | 49.7 | 55.9 | 82.2 | 100 | 100 | 100 | 100 |

注: A—传感器所在位置处实际测量的导电液膜长度占传感器长度的比例; B—传感器所在位置处电容反算的导电液膜长度占传感器长度的比例。

3.3.1 分层流和波状分层流

相界面为一水平面或波浪式曲面。对于水平布置的网丝,从管道上部开始至某一根电容网丝之间,传感器全部被石蜡覆盖,测得水膜长度为 0;在某一根网丝之下测得水膜长度为 1,即传感器全部被水覆盖,由此可确定流型为分层流或波状分层流,这两根电容网丝之间测得水膜长度介于 0 和 1 之间,说明这些位置处的传感器同时为两相共同覆盖,即为界面位置。再由竖直布置的传感器,测得电容大小后反算出液膜高度,分别确定各位置处的具体界面位置。由于相界面不是突然变化,可以用平滑的曲线顺次连接各个高度的点,即可得到相界面,下面其它流型均采用这种方法处理。

3.3.2 环状流

对水平网丝,靠近管壁位置的水膜长度测量结果全部为 1,中间结果均介于 0 和 1 之间,由此判断出流型。水平方向的中间网丝为离散液膜覆盖,由测量电容反算出水膜长度,再确定各网丝位置处的石蜡长度。由竖直网丝确定石蜡所在位置,根据工程制图的思路,最终得出相界面。

3.3.3 弹状流

实际弹状流具有周期性的特点,管道截面上部会周期的被液弹和气弹占据。气弹通过管道截面时,近似相当于分层流;液弹通过时,近似相当于单相流,利用周期性可以判断出流型。类似 3.3.2 的处理方法得出相界面。

重建流型和实际流型如图 5 所示。

3.4 误差分析

石蜡覆盖电容器表面时,形成以石蜡作为电介质的电容器,因此电极之间存在一定电容。为了比较这种效应,本实验采取两种方式:波状分层流直接测量电容,经反算得出液膜长度再与实际测量值比较。结果表明,反算导电液膜长度整体上略大于实际测量值;其余三种流型先测量满管水时的电容,减去实际流型的电容,即以石蜡覆盖的长度作为计算对象,反算值略小于实际测量值,说明石蜡作为电介质引起的误差是存在的,但对测量结果影响不大。重建得出的流型和实际流型比较,并用 MATLAB 计算出各种流型下的截面含水率,结果如表 2 所示。波状分层流型时,截面含水率误差最大,误差值 3.9%。

表 2 截面含水率 (%)

| | 分层流 | 波状流 | 环状流 | 弹状流 |
|-----|------|------|------|------|
| 测量值 | 42.8 | 42.4 | 30.9 | 31 |
| 计算值 | 44.5 | 38.5 | 32.1 | 32.8 |

4 结 论

(1)采用介入式网丝电容传感器克服了“软场”特性,电容值只与覆盖在传感器表面的导电液膜有关,且与总长度成正比。

(2) 提出“两个方向投影”的层析成像方法, 通过均匀布置的水平和竖直两方向传感器, 结合流型特征, 可以重建出界面相分布。对两相分布为明显两

个区域的几种典型流型进行静态实验, 重建结果与实际吻合较好, 计算得到的截面含水率误差最大为 3.9%。

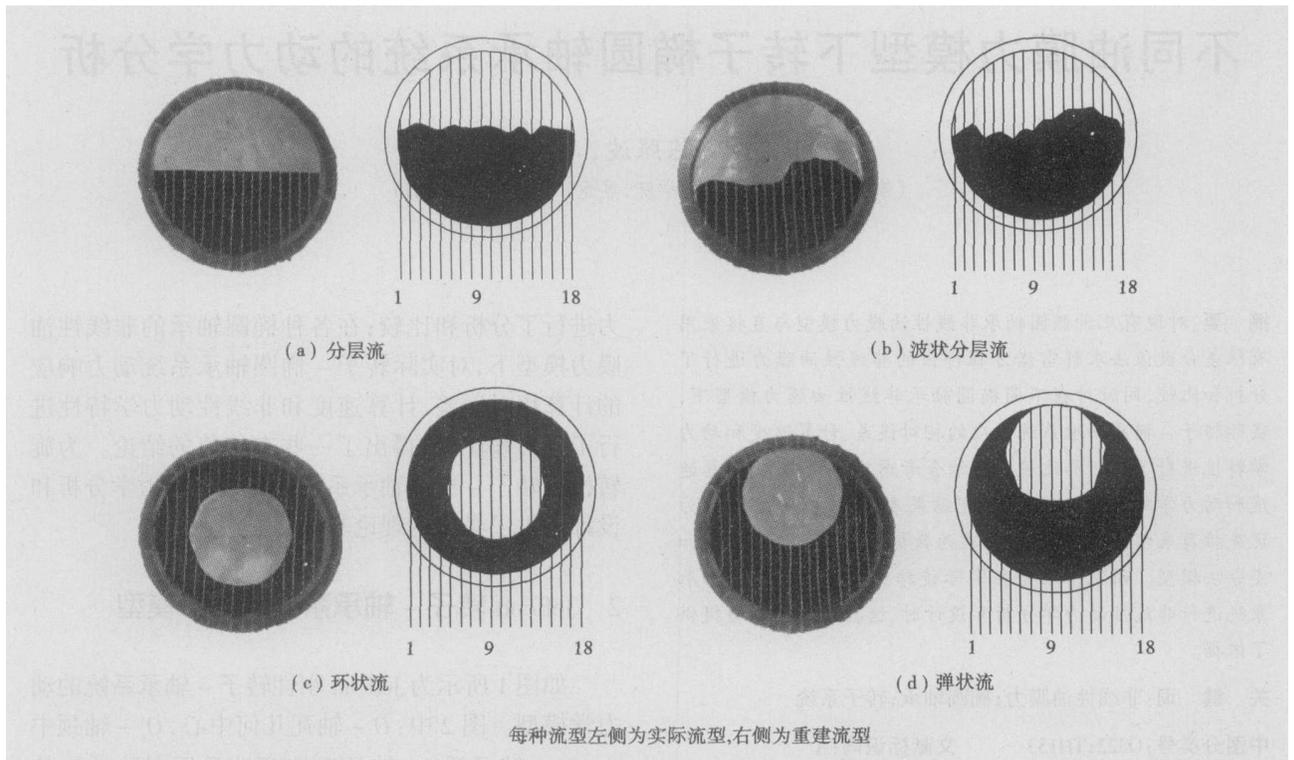


图5 重建流型与实际流型

参考文献:

- [1] DYAKOWSKI T. Process tomography applied to multi-phase flow measurement[J]. *Meas Sci Technol*, 1996, 7(3): 343-353.
- [2] 张修刚, 梁法春, 王 栋, 等. 一种网丝电容多相流层析成像方法[A]. 中国工程热物理学会多相流学术会议[C]. 上海: 中国工程热物理学会, 2004. 636-640.
- [3] REINECKE N, PETRITSCH G, BODDEM M, *et al.* Tomographic imaging of the phase distribution in two-phase slug flow[J]. *In J Multiphase Flow*, 1998, 24(4): 617-634.
- [4] PRASSER H M, BÖTTGER A, ZSCHAU J. A new electrode-mesh tomography for gas-liquid flows[J]. *Flow Meas and Instru*, 1998, 9(2): 111-119.
- [5] PRASSER H M, SCHOLZ D, ZIPPE C. Bubble size measurement using wire-mesh sensor[J]. *Flow Meas and Instru*, 2001, 12(4): 299-312.
- [6] 李海青, 黄志尧. 特种检测技术及应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.

(渠 源 编辑)

强度计算

高压锅炉汽包的脆性断裂

《Теплоэнергетика》2005年8月号报导了利用现代的线性和非线性断裂力学方法对保证高压锅炉汽包脆性强度问题进行分析的结果。

对于由22K和16ГНМ钢制造的最通用典型尺寸的汽包, 提供了根据材料实际性能和类似裂纹的缺陷尺寸绘制的脆性断裂温度边界和临界应力强度系数的列线图。同时还给出了实际应用的示例。

(吉桂明 供稿)

and a modularized design method. The software can operate at the rear platforms of DCS work stations and prepare operational interfaces with the help of DCS configuration tools. It can make full use of powerful functions of existing DCS and its operation methods are easy for operators to get acquainted with. Unified data pretreatment mechanism and monitoring of heart-beat signals can guarantee required safety. Multiple built-in communication mechanisms make it suitable for various on-site conditions. The algorithm module structure, which can be either independent or mutually cooperative, yields a flexible configuration with a good expandability. Two kinds of improved generalized prediction control algorithm and a kind of simplified self-adaptive on-line steady-state optimization algorithm have been realized. The use of this software for implementing the advanced-control of the flue gas oxygen-content of a utility boiler has markedly improved control effectiveness. It has been found that the software under discussion involved less investment outlays and has facilitated on-site applications, achieving good results in general. **Key words:** thermal power plant, advanced-control and optimization software, DCS, oxygen-content correction

基于多层 BP 神经网络的回转窑内物料传输模型研究 = **A Study of the Transmission Model of Materials in Rotary Kilns Based on a Multi-layer BP Neural Network** [刊, 汉] / LOU Bo, LUO Yu-he, MA Xiao-qian (Electric Power College under the South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 409 ~ 413

Through experiments conducted on a rotary-kiln test rig and under the circumstances of rotary kiln speed and inclination angle changes the following law governing the variation of MRT (mean residence time) of materials for five kinds of solid waste materials with different physical-property parameters has been revealed: with an increase in rotary-kiln rotating speed and inclination angle as well as an air speed increase inside the kiln, the MRT will decrease. Among the physical-property parameters of the materials, the repose angle has a relatively great impact on the MRT. A greater repose angle will lead to a shorter MRT. The change of density, however, has a relatively minor effect. The various influencing factors mentioned above will give rise to a relatively big difference in sensitivity to the MRT. The rotary kiln speed is comparatively sensitive to the MRT, while the sensitivity of the kiln inclination angle assumes a relatively uniform character. As regards air speed in the kiln, a combination of low kiln speed and low air speed in the kiln is rather sensitive to the MRT. Taking account of the characteristics that there exist numerous influencing factors in the transmission process of materials in the rotary kiln and an intense nonlinear mechanism, a multi-layer BP neural network has been used to simulate the mapping relationship between the MRT and the various factors, establishing a nonlinear transmission model. The results predicted for 40 groups of experimental data in the model show that the values predicted by the model are in relatively good agreement with experimental results with an average relative error being assessed at 4.1%. This indicates that the model can correctly reflect the material transmission process in the rotary kiln. **Key words:** rotary kiln, BP neural network, transmission model, mean residence time (MRT), nonlinear

水平管内两相流动网丝电容层析成像 = **Wire-Mesh Capacitance Tomography of Two-Phase Flows in a Horizontal Tube** [刊, 汉] / HUANG Shan-fang, ZHANG Xiu-gang, WANG Dong, et al (State Key Laboratory on Power Engineering Multi-Phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 414 ~ 417

A wire-mesh capacitance tomography of two-phase flow distribution is presented. Thermocouple wires with an insulation film on their surface are used as capacitive transducers. The electrolyte of the capacitor is an insulation film with the two poles being respectively metal cores of thermocouple wires and electroconductive fluid film covering the surface of thermocouple wires. The capacitance is directly proportional to the length of the electroconductive fluid film and independent of the latter's distribution and shape. The wire-meshes are parallel and uniformly arranged on a pipeline section. The inner diameter of the test pipeline is 70 mm and the capacitance of each mm long mesh wire being used is 4.82 pF with the spacing of mesh wires being 4 mm. The measurement was performed by use of horizontal and vertical two-direction capacitive transducers. On the basis of knowledge about flow patterns, it is not necessary to reestablish algorithm and the phase distribution can be readily obtained. The steady-state tests show that with this method one can realize the reestablishment of flow patterns, and the section water content as calculated based on the foregoing has a maximal error of 3.9%. **Key words:** wire-mesh capacitance tomography, phase distribution, dual directional measurement, rate of water content

不同油膜力模型下转子椭圆轴承系统的动力学分析 = **A Dynamic Analysis of a Rotor-Elliptic bearing System**