

探讨用于气固多相流检测的广义动态重建算法

王泽璞¹, 刘 石¹, 陈江涛², 周 磊¹

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院 北京 102206; 2. 中国天辰工程有限公司北京分公司 北京 100029)

摘 要: 通过监测气固两相流的流速和流量值, 明晰输送流体的流动特性, 确保气力输送过程顺利进行。电容层析成像技术作为气固多相流的检测技术之一, 关键是图像重建环节。通过选取恰当的图像重建算法, 反演被输送流体的截面分布特性。为了改善 ECT 系统的重建图像质量, 提高检测技术的精确性, 提出一种集合被测流体的空间约束、时间约束和流体的流动反演信息的广义动态图像重建算法。将数值试验与常规的图像重建算法分析比较发现, 该算法的重建图像结构最清晰。实验呈现用该算法反演的气力输送粉煤灰过程。两者明显体现了该动态重建算法的优势。

关 键 词: 电容层析成像; 广义动态重建算法; 气固两相流; 环状流; 泡状流

中图分类号: O359 文献标识码: A

引 言

气力输送技术被广泛应用于电力、石油、化工、冶金行业的管道输送系统。管道内气力输送过程即是多相流流动状态。多相流流动的流速和流量值是控制该流动过程的关键参数, 因此, 国内外研究者对此进行深入研究。如今, 成熟的多相流检测技术有激光法、超声波法、差压法等。但这些技术存在共性缺陷, 即干扰被测区域的流型, 流动检测偏差较大^[1~4]。为了弥补侵入式检测技术的不足, 提高多相流检测技术的精度, 提出电容层析成像技术, 具有非侵入式、成本低、快速采集、安全性能高等优点, 近年来在大量多相流流动系统检测上安装应用。

电容层析成像技术(ECT) 在流动管道外侧包络特制传感器。当管内多相流流动时, 采集传感器输出的电容值反馈到计算机, 运用相应的图像重建算法, 重现管道内横截面上多相流流动特性^[5~6]。显而易见, 图像重建算法直接影响 ECT 重建图像的质量。现在常用的 LBP 算法、Landweber 迭代法、标

准 Tikhonov 正则法, 只是单纯的依据采集电容值解决问题, 未考虑被测对象的流动动态性, 因此成像结果具有局部性、限制性。为了提高图像重建的质量, 本研究提出一种创新的广义动态图像重建算法(DR), 即集合被测对象的空间约束、时间约束及流动动态特性信息。

1 广义动态图像重建算法

电容层析成像技术的测量系统包括电容传感器阵列、测量数据采集系统和采集计算机 3 部分组成。一般地, 测量系统采集电容传感器阵列的电容数值, 经过滤波、变换和放大后传给计算机, 通过图像重建算法反演管道内的多相流流动图像^[7~9]。测量电容矩阵与被测流场内多相流介电常数分布矩阵的关系式为:

$$C = SG \quad (1)$$

式中: C —测量的电容矩阵, 是 $i \times 1$ 维数组, 其中 i 与电极阵列中的电极数量有关; G —多相流介电常数分布矩阵, 用 $j \times 1$ 数组表示, 其中 j 与成像像素数量有关; S —敏感场矩阵, 表示电容与介电常数之间的敏感程度, 用 $i \times j$ 维数组表示^[2]。

基于 ECT 成像原理, 综合考虑被测流体的空间约束、时间约束和流体的流动特性, 提出了广义动态图像重建算法的模型:

$$G_{k+1} = f(G_k, p_k) \quad (2)$$

$$y_k = h(G_k, n_k) \quad (3)$$

式中: G_k — k 时刻的未知量; $f(\cdot)$ —描述管道内介质的流动特性, 用多相流流动测量的偏微分方程组表示; $h(\cdot)$ —测量方程; y_k — k 时刻测量的电容数据; v_k —介质流动过程的不确定性, 此参数的实际

收稿日期: 2012 - 11 - 26; 修订日期: 2012 - 12 - 20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50736002, 51006106); 中央高校基本科研基金资助项目(10MG20); 长江学者和创新团队基金资助项目(IRT0952)

作者简介: 王泽璞(1983 -), 男, 北京人, 华北电力大学博士研究生。

意义在于突出简化的理论模型在实际应用中的重要性; n_k 一描述实际测量过程中 k 时刻的不确定性。

从优化角度出发,依据 Tikhonov 正则化理论和优化理论,该算法的广义函数为:

$$\min J = \| H_k G_{k|k} - y_k \|^2 + \alpha_1 \| W_1 G_{k|k} \|^2 + \alpha \| G_{k|k} - F_k G_{k-1|k-1} \|^2 + \alpha_2 \| W_2 (G_{k|k} - G_{k-1|k-1}) \|^2 \quad (4)$$

式中: H_k 一测量算子,在 ECT 图形重建过程中可称为敏感场矩阵; $\alpha > 0$ 、 $\alpha_1 > 0$ 、 $\alpha_2 > 0$ 是正则化参数, $\| \cdot \|$ 是 2-范数; W_1 和 W_2 一预确定矩阵。特别是正则参数的选取直接影响重建结果,但一般很难选取恰当的正则化参数,只能凭经验确定^[10~11]。

2 动态数值试验

前面讲述了广义动态重建算法的工作思想。本小节主要从数值模拟的方向展现由该动态算法重建的图像质量效果。并和一般的图像重建算法: LBP 算法、标准 Tikhonov 正则法、Landweber 预选代法

的重建图像相比较。数值模拟过程中,选用 12 电极的 ECT 方形传感器,12 个电极平均分布在方形管道的四面。ECT 系统的检测区域 80 mm × 80 mm,重建图像的像素值 32 × 32。首先分别对 3 种典型的两相泡状流进行模拟检测重建图像。图 1 展现了被测的 3 种泡状流流动特性。由于是数值模拟过程,因此把泡状流理想化,把不规则形状的泡状体简化为圆形的泡状体。图中黑色部分表示被输送的粉煤灰,介电常数为 2.6;白色部分表示气力输送的动力源,带压力的空气,介电常数为 1。图 1-1(a) 中的两小圆柱直径 20 mm,表示粉煤灰,重构区域内的其余部分介电常数值 1;图 1-1(b) 的单个小圆柱直径 30 mm,表示粉煤灰,其余的重建区域内是空气;图 1-1(c) 中四个小圆柱直径都是 20 mm,重建区域内其它区域表示物介电常数值是 1 的空气。

标准 Tikhonov 正则法的正则化参数设为 0.0003。Landweber 预选代法的初值由标准 Tikhonov 正则法计算提供,图 1(a) 中迭代 550 步,图 1(b) 中迭代 111 步,图 1(c) 中迭代 405 步。广义动态图像重建算法中,设定 $\alpha = 0$, $\alpha_2 = 0$, $\alpha_1 = 0.008$, $W_1 = \text{diag}(1/(|C_1^0|^3 + \varepsilon), \wedge, 1/(|C_n^0|^3 + \varepsilon))$ 。若 ε

= 10^{-10} , 则 G^0 即是标准 Tikhonov 正则法的解。图 1-2 ~ 图 1-5 分别展示了由 LBP 算法、Landweber 预选代法、标准 Tikhonov 正则法、和广义动态图像重建法

的重现图像质量。图 1 分别展现了由 LBP 算法、标准 Tikhonov 正则法、Landweber 预选代法图像重构的结果。结果表明,这 3 种应用较多的算法都可反演重现被测对象的分布,但是图像质量相差较大。LBP 算法失真程度最大,标准 Tikhonov 正则法可大致显现被测对象的分布特征, Landweber 预选代法的图像重建质量较高,清晰展现被测对象的流动分布,但是黑色圆柱周围的失真模糊度仍较大。为了提高图像重建的质量,减小被测对象的失真模糊度,尝试用广义动态图像重建算法重构图像,图 1 最后一行是广义动态重建算法的重建结果,跟上述 3 种算法的重构图像比较,广义动态算法的重构结果明显提高,其重构图像质量比 Landweber 预选代法的更加清晰,黑色圆柱周围的模糊失真度减弱,证明了广义动态重建算法在 ECT 图像重建问题上的有效性、可行性。

为了更加清晰的对比上述 4 种算法的图像重构结果,表 1 中列出它们各自对应不同介质分布时的成像偏差。针对同一种被测流体分布,横向比较不同算法的偏差值,广义动态算法的偏差值远远低于其它 3 种算法的数值。再次展现了有效集合被测对象空间约束、时间约束和流体流动特性的广义动态图像重建算法,未来在 ECT 逆问题领域内发挥出至关重要的作用。

表 1 图像偏差 (%)

Tab. 1 Image bias (%)

	算法名称			
	LBP 算法	标准 Tikhonov 正则法	Landweber 预选代法	广义动态重建算法
图 1(a)	31.32	20.06	15.91	9.72
图 1(b)	24.84	18.08	15.22	11.61
图 1(c)	43.21	25.55	18.84	14.14

图 2 展现了 4 种不同算法对气力输送过程常出现的环状流的重现结果。LBP 算法的结果是明显失真的,无法精确表明环状流的湍动程度;标准 Tikhonov 正则法和 Landweber 预选代法

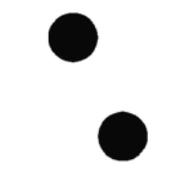
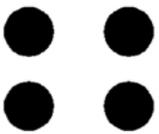
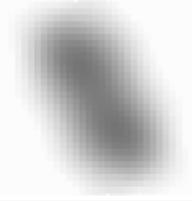
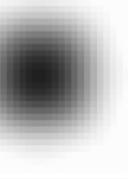
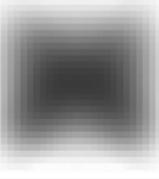
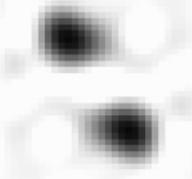
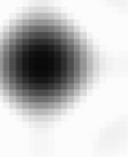
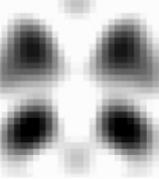
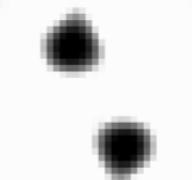
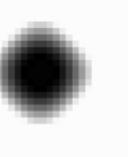
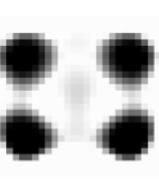
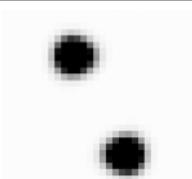
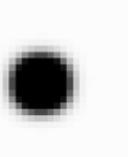
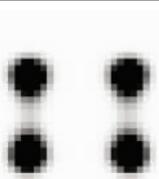
序号	算法名称	(a)	(b)	(c)
1	原始实物			
2	LBP 算法			
3	标准 Tikhonov 正则法			
4	Landweber 迭代法			
5	广义动态图像重建算法			

图 1 不同算法对泡状流的重建图像结果比较

Fig. 1 Comparison of the image results of the bubble shaped flow rebuilt by using various algorithms

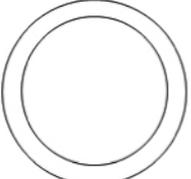
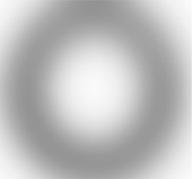
	算法名称				
	实际原物	LBP 算法	标准 Tikhonov 正则法	Landweber 迭代法	广义动态图像重建算法
图像重建结果					

图 2 不同算法对环状流的图像重建结果

Fig. 2 Image results of the bubble shaped flow rebuilt by using various algorithms

3 实验验证

为了全面验证广义动态图像重建算法在解决

ECT 逆问题的高效性, 本章节从实验验证的角度出发, 展示动态算法处理实验采集电容数据得到的重建图像效果图。

研究选用广义动态图像重建算法处理 ECT 系

统在线监测密相气力输运粉煤灰的采集数据。采集到的电容数据通过放大、滤波等处理后被传送到终端计算机应用软件中。通过后处理软件运用广义动态图像重建算法反演出实验过程中输送管道内粉煤灰的流动状态。ECT 系统采集的电容数据变化如图 3 所示。

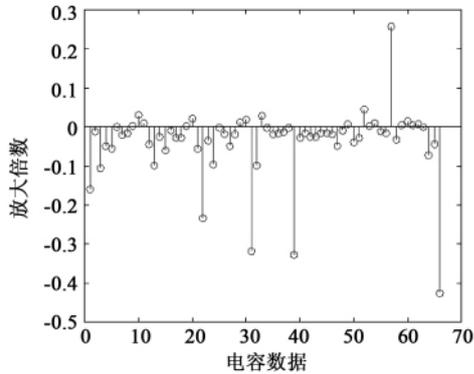


图 3 ECT 系统采集的电容值

Fig. 3 Capacitance value acquired by using an ECT system

密相气力输运粉煤灰的实验系统包括有空气压缩系统、物料循环系统、鼓风系统。ECT 在线检测系统被安装在循环物料的提升管道部分,管道直径 0.25 m,高 10 m。

(1) 空气流速 6m/s。空气的流速是区别稀相

和密相气力输送的关键因素。空气流速太低,粉煤灰很难被吹动;空气流速增大,粉煤灰被输送的粉煤灰量极大地增加。空气流速较低时,输送管道内的气固两相流是泡状流;当空气流速超过某一临界值,气固两相流变为环状流。本章节首先讨论空气流速较低时,ECT 系统在线采集的泡状流结果。图 4 展现了输送空气流速为 6m/s 时,输送管道内的泡状流特性。

图 4 展现了低流速输送粉煤灰时,DR 算法重构的管道内气力输送粉煤灰的流动状态。该重构图像质量很高,清晰地展现出气力输送管道内各相介质的分布特性,当空气流速为 6 m/s 时,输送管道内的气固两相流呈现泡状流。重现图像中的深色部分代表空气,其它部分表示被输送的粉煤灰气流团。

(2) 空气流速 15 m/s。当压缩空气流速升到 15 m/s 时,气力输送管道内的流动状态已逐渐演变成环状流。由 DR 算法重构反演的密相输送气固两相流过程由图 5 显示。图 5 中清晰地展现流动的中心环状结构。由于空气流速和粉煤灰介质的聚集效应,使得粉煤灰贴近壁面区域流动,中间浓度极低。而且,密相气力输送粉煤灰的环状流流动过程具有实时性,粉煤灰分布特性随着时间的转移而变化,ECT 系统可以在线检测记录气固两相流的流动过程及识别流型。

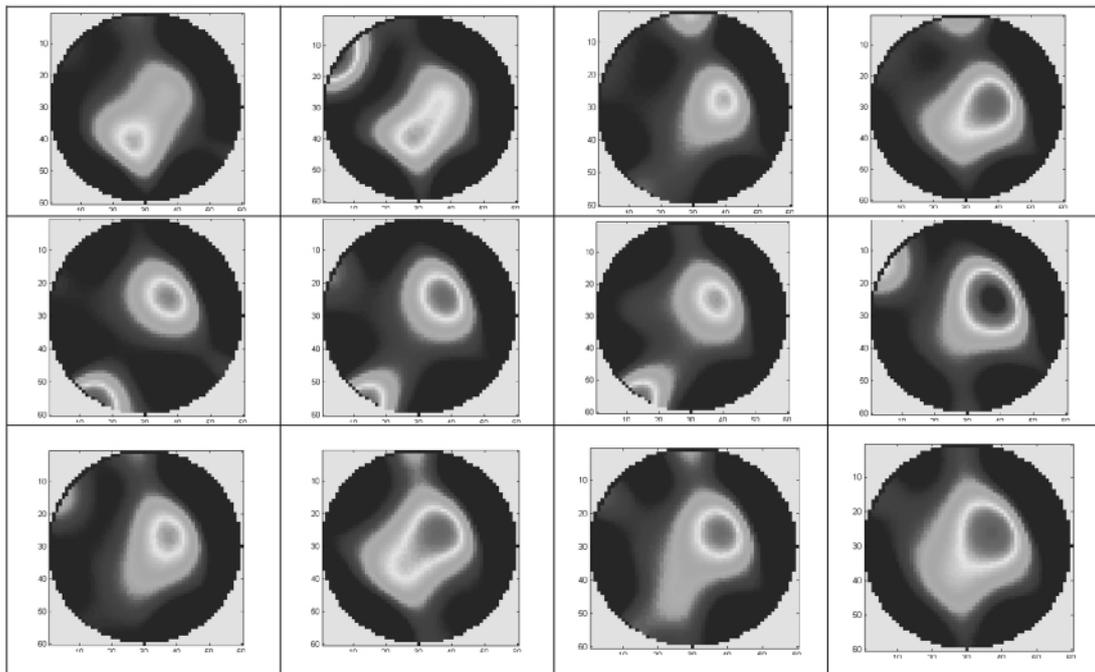


图 4 空气流速 6 m/s 时,DR 算法的重建图像

Fig. 4 Images rebuilt by using the DR algorithm when the air flow speed is 6 m/s

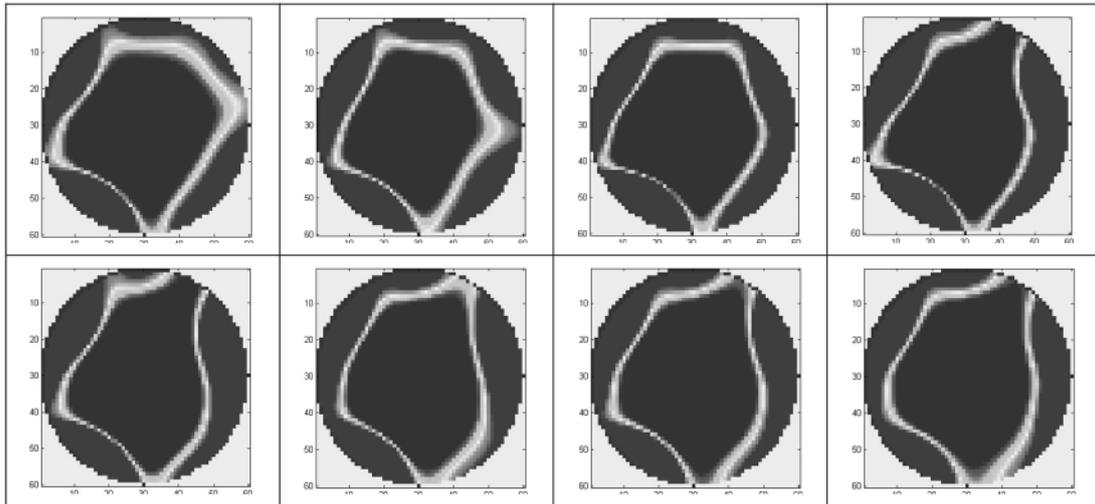


图 5 空气流速 15 m/s 时, DR 算法的重建图像

Fig. 5 Images rebuilt by using the DR algorithm when the air flow speed is 15 m/s

4 结 论

电容层析成像技术是发展应用最广的过程层析成像技术之一,被大力推广运用于在线检测气液或气固两相流流动。本研究提出一种综合考虑被测多相流的空间约束、时间约束和流动特性的广义动态算法。从理论数值模拟角度出发,用该动态重建算法展现了泡状流和环状流特性,并和常规 LBP、Landerwer 迭代法、标准 Tikhonov 正则法的结果比较,动态重建算法的结果明显清晰。再者,运用此动态重建算法再现反演气力输送粉煤灰过程,展现粉煤灰输送过程的截面分布。数值模拟和实验结果充分正面此广义动态图像重建算法的优越性,使得 ECT 逆问题向前进一步。

参考文献:

- [1] ZHENG Y, LIU Q. Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids [J]. Measurement, 2011, 44: 589–604.
- [2] 陈甘棠, 王樟茂. 流态化技术的理论和应用 [M]. 北京: 中国石化出版社, 1996.
CHEN Gan-tang, WANG Zhang-mao. Theory and application of the fluidization technology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 1996.
- [3] Werther J. Measurement techniques in fluidized beds [J]. Powder Technology, 1999, 102: 15–36.
- [4] 李海青. 两相流参数检测及应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.
LI Hai-qing. Two-phase flow parameter testing and applications [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1991.
- [5] Beck M S, Ba Yars M, Dya Kow Sk I T, et al. Principles and industrial applications of electrical capacitance tomography [J]. Measurement & Control, 1997, 30: 97–200.
- [6] Wars Ito W, Fan L S. Measurement of real 2-time flow structures in gas-liquid and gas-liquid-solid flow systems using electrical capacitance tomography (ECT) [J]. Chem Eng Sci, 2001, 56: 6455–6462.
- [7] 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.
LI Hai-qing, HUANG Zhi-rao. Special detection technology and applications [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2000.
- [8] Nakamura K, Capes C E. Vertical pneumatic conveying: a theoretical study of uniform and annular particle flow models [J]. Can J of Chem Eng Sci, 1973, 51: 39–46.
- [9] Zhang W, Tung Y, Johnsson J E. Radial voidage profiles in fast fluidized beds of different diameters [J]. Chem Eng Sci, 1991, 46: 3045–3052.
- [10] Issangya A S, Grace J R, Bai D, Zhu J X. Radial voidage variation in CFB risers [J]. Can J of Chem Eng, 2001, 79: 279–286.
- [11] Schmitt U, Louis AK. Efficient algorithms for the regularization of dynamic inverse problems: I. Theory [J]. Inverse Probl, 2002, 18: 645–658.

(辉 编辑)

law governing the influence of the pyrolytic temperature on the coal tar productivity ,coal gas constituents ,coal tar constituents was obtained respectively: the temperatures corresponding to the highest yields of coal tar from the above-mentioned three types of coal were 481 °C ,519 °C and 514 °C respectively and the coal tar yields were 13.58% ,12.54% and 4.23% respectively. The H₂ and CH₄ productivities of the three types of coal increased with an increase of the temperature while the CO productivity of the oil shale rock attained its maximum at 490 °C and then decreased with an increase of the temperature. The carbon dioxide productivities of the three types of coal were all influenced little by the temperature. At various pyrolytic temperatures ,Grade No. 6 coal had relatively high productivities of hydroxybenzene and benzene derivatives. When the temperature was 440 °C ,the long chain hydrocarbons of the coal fed into the furnace for coal gas production approximately took up 50% of the coal tar in weight.

Key words: coal pyrolysis ,pyrolytic temperature ,coal tar ,coal gas

探讨用于气固多相流检测的广义动态重建算法 = **Exploratory Study of the Generalized Dynamic Rebuilding Algorithm for Testing and Measuring a Gas-solid Multi-phase Flow** [刊 ,汉] WANG Ze-pu ,LIU Shi ,ZHOU Lei (College of Energy Power and Engineering ,North China University of Electric Power ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) ,CHEN Jiang-tao (Beijing Subcompany ,China Tianchen Engineering Co. Ltd. ,Beijing ,China ,Post Code: 100029) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(2) . - 177 ~ 181

Through monitoring the flow speed and rate of a gas-solid two phase flow ,the flow characteristics of the fluid transmitted was clarified and the pneumatic transmission process was successfully performed. The capacitance topography technology is regarded as one of technologies for detecting a gas-solid two phase flow and the key lies in its image rebuilding link. Through choosing a proper image rebuilding algorithm ,one can reversely deduct the distribution characteristics of the fluid transmitted in a section. To improve the rebuilding image quality of the ECT system and enhance the accuracy of the detection technology ,presented was a generalized dynamic image rebuilding algorithm integrating the space restriction ,time restriction and reverse deduction information of the fluid flow. By analyzing and comparing the numerical test and the conventional image rebuilding algorithm ,the authors believe that the image structure rebuilt by using the algorithm in question should be clearest. The test showed the pulverized coal and ash pneumatic transmission process as reversely deducted by using the algorithm in question. Both coal and ash obviously embodied the advantage of the dynamic rebuilding algorithm. **Key words:** electric capacitance topography (ECT) ,generalized dynamic rebuilding algorithm ,gas-solid two-phase flow ,annular flow ,bubble flow

粒子群优化 BP 神经网络飞灰可燃物预测建模 = **Modeling for Predicting the Flammable Content of Fly Ash Base on a Particle Swarm Optimized Back Propagation Neural Network** [刊 ,汉] LU Tai ,GUO Zhi-qing(College of Energy Power and Engineering ,Northeast University of Electric Power ,Jilin ,China ,Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(2) . - 182 ~ 186