

过程成象技术现状与展望

夏靖波, 赵一心

(空军工程大学 电讯工程学院网络工程系, 陕西 西安 710077)

摘要: 对过程成象(PT)系统的基本原理及系统组成、基本特点和应用进行了分析。简要分析了各类 PT 技术的发展现状和存在的问题。阐述了其优点和工业应用前景。

关键词: 过程成象; 原理; 组成; 前景

分类号: TP202 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2000)01-0086-04

20 世纪 70 年代初, 计算机断层成象(Computerized Tomography)技术^[1], 简称 CT 技术, 在医学上得以成功应用并蓬勃发展起来。它的出现, 不仅是医学技术上的一次革命, 同时也促进了计算机技术在其它领域中的应用。正是在医学 CT 发展日臻完善的情况下, 一些专家和学者将 CT 技术引入工业生产过程中, 采用非侵入式传感器系统对输送管道、过程容器、反应器内快速变化的流动与反应进行非破坏性的检查, 形成和发展了过程成象技术(Process Tomography), 简称 PT。PT 技术是 20 世纪 80 年代中后期正式形成并得到迅速发展的, 一种以两相流或多相流为主要对象的过程参数二维或三维分布状况的在线实时检测技术。PT 系统利用围绕被测对象安装的传感器阵列来获取被测物场在不同观测角度下的投影数据, 由计算机利用某种图象重建算法给出被测对象的断层图。通过关联上、下游的两个相邻成象截面上对应的象素信息, 还可获得相速度的分布廓形^[2,4,5]。

1 过程成像原理和系统构成

PT 技术的数学基础与医学工程中的 CT 技术的数学基础相同, 都是基于 Radon 变换与 Radon 逆变换^[1,4]。

定义在 Ω 域上的连续有界函数 $f(r, \varphi)$ 沿直线 g 的线积分:

$$F(l, \theta) = \int_g f(r, \varphi) ds = \int_g f(\sqrt{l^2 + s^2}, \theta + \tan^{-1}(s/l)) ds \quad (1)$$

被称为函数 $f(r, \varphi)$ 的 Radon 变换。

而函数 $f(r, \varphi)$ 的定义域 Ω 中的任一点 (r, φ) 的值可由 $f(r, \varphi)$ 沿通过该点的线簇积分 $F(l, \theta)$ 按下式唯一地确定:

$$f(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{r \cos(\theta - \varphi) - l} F'(l, \theta) dl d\theta \quad (2)$$

这就是 Radon 逆变换。式中, $F'(l, \theta)$ 是 $F(l, \theta)$ 相对于 l 的一阶偏导数。

过程成象技术的实质, 就是运用一个物理可实现的系统完成对被测物场特性分布函数 $f(r, \varphi)$ 的变换与逆变换。虽然大多数的过程成象技术中所涉及的变换不是线积分, 即失去了“投影”的本意, 但通常人们仍将变换得到的数据称为“投影数据”。成象技术就是根据物体横断面的一组投影数据, 经过计算机处理后得到物体该横断面的图象, 是一种由数据到图象的处理技术, 在图象处理中称为图象重建^[3]。

过程成象系统(如图 1 所示)由以下几个部分组成^[3,4]

收稿日期: 1999-12-17

作者简介: 夏靖波(1963-), 男, 副教授(博士)

1) 传感器阵列, 它包括特殊设计的传感器空间阵列及其激励电路, 其作用是以非接触或非插入方式获取被测物场在不同观测角度下的投影数据, 其性能的优劣在很大程度上决定了过程层析成像系统的品质。

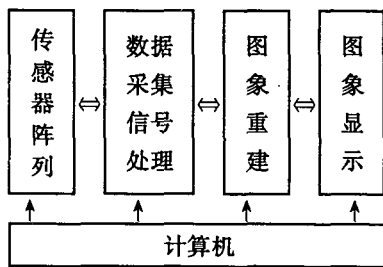


图 1 过程成像系统的构成

图象重建获得过程截面各局部的原始信息, 通过分析和处理, 用各象素上的灰度值, 在计算机屏幕上表示参数分布及相关信息, 并根据测量要求提取被测物场的特征参数。

2 过程成像技术的特点

虽然 PT 的基本原理与 CT 是相同的, 但是, 由于测量对象、测量目的以及运行环境条件的不同, 使得 PT 技术相对于 CT 技术来说, 无论是在信息的获取方式和处理方法上, 还是在测量结果的解释和应用上都有显著的不同之处。与 CT 技术相比较, PT 技术具有以下特点^[4,5]

1) 被测物场始终处于剧烈运动、变化的状态, 要求 PT 系统不仅应具备非接触或非侵入方式的在线获取物场信息的能力, 还应具备良好的信息实时处理功能。

2) 被测物场往往具有很强的非均匀性, 所采用的敏感场多具有软场(soft field)性质, 二者之间相互作用情况复杂, PT 系统的投影及测量数据又远少于 CT 系统, 所以 PT 系统的数据处理和图象重建困难很大。

3) 环境适应性是系统必须满足的基本要求。传感器空间阵列的设计和选择, 不仅要考虑与被测对象的几何形状、机械、物理特性相匹配, 还要考虑对工作环境、条件的适应性问题。信号的远距离传输能力也是必须具备的。

此外, 被测物场的图象重建及显示并不是 PT 系统的主要目的, 或者说, 不是最终目的。重建图象的物理意义阐明; 从重建图象信息中提取被测物场及其运动变化的特征参数; 对被测物场作出定性和定量的评估, 输出相应的过程调节、控制的信号等等, 应是 PT 系统的一个重要功能。

经过近二十年理论和工业应用的深入研究, PT 技术已取得了初步的研究成果。目前可用于 PT 技术的敏感原理已超过 15 种, 且已经在实验室和工业现场中试验、应用, 获得了令人鼓舞的结果^[6,7]。同时 PT 技术的理论研究也日益深入。依据获得被测物场的投影信息所采用的检测方法的不同, PT 技术可大致分为核 PT、光学 PT、电学 PT、微波 PT、核磁共振 PT、声学 PT 和电荷 PT 等几类。不同的 PT 方法基于不同物理原理的空间传感器敏感阵列, 采用不同的信息处理系统及图象重建算法。

核 PT 的敏感场是硬场, 重建图象质量高, 但由于安全性和成本的原因, 不会成为 PT 技术研究发展的主流。光学 PT 技术具有成本低、实时性好、非辐射、无安全防护问题、重建图象质量高等优点, 但它要求过程对象为透明或半透明, 并且光路不能受到污染, 所以其应用领域极为有限。超声 PT 技术成本较低、非辐射无安全防护问题, 实时性也较好、重建图象质量又高于一般的电学 PT, 因此该技术的工业应用前景乐观。但该技术是基于超声波的扫描测量, 系统响应速度慢, 不适合较高流速的两相流参数在线测量, 而且对每一个具体应用, 传感器的设计和安装都需要经过精心的工程设计以避免虚假信号的影响, 使用装置复杂, 系统的适应范围将受一定限制。电荷 PT 成本低、实时性好, 但它仅适用于流体带有电荷的对象, 而且影响流体带电的因素很多。电学(电磁、电阻、电容)PT(EMT、ERT、ECT)具有成本低、实时性好、系统结构简单、非辐射安全可靠等优点。但电学 PT 为软场检测, 所以重建图象精度较低。EMT 技术目前尚处于研制开发阶段, 其独特之处在于它的双模性, 即可同时获得电导率和电磁率的分布, 这将有助于消除单模系统中图象重建误差引起的不确定性。但对于单纯电阻率的测量来说, 与 ERT 技术相比并无多少优势, 因此其主要应用领域是导磁介质的测量, 这在一定程度上限制了它的应用范围。ERT 技术是 PT 研究发展的主流之一, 适用于各相介质具有不同电导率的场合, 它的许多技术是从医学 CT 中移植过来的, 研究历史相对较长并已取得了许多令人鼓舞的成果, 预示了该技术广泛的工业应用前景。在所有 PT 系统中 ECT 系统的成本最低。ECT 技术的非

侵入测量方式、简单牢固的系统结构、广泛的适用范围以及快速的响应速度为其提供了十分广阔的应用前景。随着微电子技术、并行处理、计算机技术和图象处理技术的发展,电容层析成像技术目前存在的问题可望逐步得到解决。ECT技术不仅是PT技术的主流之一,而且是可望最早在工业中获得广泛应用的技术^[10~13]。

3 研究现状和发展前景

随着科学研究及工程应用对两相流过程内部信息的迫切需求,工业过程成像技术的研究愈来愈受到重视。在一些发达国家中已形成了一支专业从事PT技术研究的队伍,而且这支队伍还在迅速地扩大。从1992年由欧共体(EC)资助,在英国曼彻斯特大学理工学院(UMIST)召开了“欧洲过程成像协调行动”(European Concerted Action on Process Tomography 简称 ECAPT)学术会议,后在欧洲连续举行4年,交流和探讨PT系统开发和应用中的理论和实际问题,极大地推动了过程层析成像研究工作,使之越来越受到关注。1995年、1997年由美国工程基金会(Engineering Foundation)和 ECAPT 联合组织,分别在美国和荷兰举行过程成像技术的国际学术会议“工业过程成像前沿”(Frontiers in Industrial Process Tomography)。1996年由英国政府出资,由英国的 Exeter 大学、Leeds 大学和 UMIST 共同组建了工业过程成像虚拟中心(Virtual Centre for Industrial Process Tomography, 简称 VCIPT),并与电气工程师学会、化学工程师学会、测量与控制学会和美国工程基金会一起联合承办了1999年的“第一届工业过程成像世界大会”。在国外,PT技术已从各大学中原理性的研究探讨阶段,向有工业界支持和参与的应用研究过渡,从事PT技术研究的 research 小组和人员迅速增加^[4,8,9,11,12,14]。

我国的一些高等院校和科研院所,如天津大学、浙江大学、清华大学、东北大学和中国农业大学等单位也相继开始了对过程成像技术的理论和应用研究^[4,10]。已研制出或正在研制超声成像系统、电容成像(ECT)系统、电阻成像(ERT)系统和电磁层析成像(EMT)系统等实验装置,并取得了长足进展,为今后的工业应用做了大量准备工作。

从越来越扩大的研究领域和研究群体来看,PT这一多学科交叉的高新技术定会迅速地发展和完善。

4 结束语

过程成像技术在解决工业过程设备(如反应器,过程容器及分离器等)内部动态参数的在线测量,定性、定量地分析物体内部不可知组分分布及结构,具有其独特的优点,从原理上讲,过程成像技术可以应用于各类两相流动参数的检测。但是,作为一种新兴的过程参数在线实时检测手段,PT技术的评价应从测量精度、重建图象质量、对工业现场的适应性、安全可靠、实时性、成本等几方面来考虑。过程成像技术还远未完善,还有许多理论问题和工程应用问题尚待解决。诸如:电学成像系统的软场效应,导致求逆问题非线性,使得快速、定量、高精度的图象重建非常困难。在X射线 γ 射线成像系统中,存在实时性差、结构复杂、安全防护要求高等问题。PT静态和动态特性的标定等一系列问题必须得到深入的探讨和研究。

参 考 文 献

- [1] Herman G T. Image reconstruction from projections; the fundamentals of computerized tomography[M]. New York: Academic Press, INC, 1980.
- [2] Heyes D G, Gregory I A. Velocity profile measurement in two-phase flows. Proceedings of ECAPT'92, Manchester, UK, 1992.
- [3] Demoment G. Image reconstruction and restoration: Overview of common estimation structures and problems [J]. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, 1989, 37(12): 2024~2036.
- [4] Xu L A, Xu L J, Dong Y T, et al. Process tomography technique and its application to two-phase flow measurement. Proceedings of the International Symposium on Measuring Techniques for Multiphase Flows, Nanjing, China, 1995.
- [5] Dickin F J, Beck M S. Tomography imaging of industrial process equipment: techniques and applications [J]. IEE Proceedings-G, 1992, 139(1): 72~82.

- [6] Shanley Agnes. Process tomography; seeing is believing[J]. Chemical Engineering, 1995, (10): 30~33.
- [7] Beck M S, Williams R A. Process tomography; a European innovation and its applications Meas[J]. Sci. Technol, 1996, 7: 215~224.
- [8] Simons S J R, Morton E J. The role of process tomography in process control. Proceedings of ECAPT'95, Bergen, Norway, 1995.
- [9] Daily W, Ramirez A. Environmental process tomography in the United States. Proceedings of ECAPT'94, Oporto, Portugal, 1994.
- [10] Zhang B F, Yao D Y, Peng L H, et al. Capacitance tomography system. in Proceedings of ISMMTTF'95, Nanjing, China, 1995: 243~247.
- [11] Simons S J R. Morton E J. The role of process tomography in process control Proc. 4th ECAPT Conf. Bergen, 1995.
- [12] Brown G J, Reilly D, Mills D. Development of an ultrasonic tomography system for application in pneumatic conveying Meas. Sci. Technol. 1996, 7: 396~405.
- [13] Dickin F, Wang M. Electrical resistance tomography for process applications Meas. Sci. Technol. 1996, 7: 247~260.
- [14] Trevor York Proc. 1th World Congress on Industrial Process Tomography Buxton. Greater Manchester, UK, 1999.

Status Quo and Prospect of Process Tomography

XIA Jing-bo, ZHAO Yi-xin

(Dept. of Network Engineering of the Telecommunication Engineering Institute, AFEU., Xi'an 710077, China)

Abstract. The basic principle, system structure, characteristics and applications of process tomography (PT) are analyzed in detail. The progresses and problems of various PT techniques are systematically reviewed. The unique advantage and industrial application prospects of are discussed.

Key words: Process tomography; Principle; Structure; Prospect