

电容成像技术

董向元 郭淑青 著

及其应用

DIANRONG CHENGXIANG
JISHU JIQI YINGYONG



黄河水利出版社

电容成像技术及其应用

董向元 郭淑青 著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书介绍了过程层析成像技术,特别是电容层析成像技术及其在热物理领域里的应用。具体内容包括:图像重建算法、传感器的设计及测量中的特殊标定方法等。本书可作为高等院校热能工程、工程热物理等专业高年级本科生、研究生的教学参考书,也可供相关研究领域的科技人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电容成像技术及其应用/董向元,郭淑青著. —郑州:
黄河水利出版社,2008. 8

ISBN 978 - 7 - 80734 - 482 - 7

I. 电… II. ①董…②郭… III. 电容 - 成像 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 126432 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwp@126.com

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:黄委会设计院印刷厂

开本:850 mm × 1 168 mm 1/32

印张:3. 875

字数:120 千字

印数:1—1 500

版次:2008 年 8 月第 1 版

印次:2008 年 8 月第 1 次印刷

定价:15.00 元

前 言

电容层析成像技术是近年发展起来的一项基于电容敏感原理的过程成像技术,该技术具有非辐射、非侵入、响应速度快、结构简单、成本低、可获取二维/三维过程参数信息等优点,是一项极具发展潜力的测量技术。本书针对电容层析成像技术的图像重建、传感器设计及标定等关键技术进行了深入的研究,具体内容如下:

详细介绍了电容层析成像图像重建算法,将算法分为非迭代类、迭代类及智能优化类三大类,并对算法的各类准则加以总结。比较了四种不同正则化算法,并采用相关系数、空间图像误差及归一化均方距离等评价指标对常用的 ECT 图像重建算法进行了比较评价。介绍了一种采用均匀设计与最小二乘支持向量机相结合的电容层析成像传感器结构参数优化方法。该方法以敏感场均匀度为设计目标,采用均匀设计安排试验,并用因素轮换法进行寻优计算,从而得出优化的传感器结构参数。针对常规传感器无法满足微小尺度脉动热管流型测量的需要,分析设计了三种不同径向电极布置方法,并对电极间绝缘介质相对介电常数及屏蔽罩与电极外表面距离对电极对间电容的影响都进行了详细的探讨。根据代用炸药压制成型测量的特点,提出采用无径向电极的内置电极传感器布置方式,线性标定法,并对该方法进行了验证。针对通道型多孔介质的结构,经适当简化,推导出测量电容与被测物质相对介电常数的标定关系式,根据该关系式提出一种三点标定法,并将其应用于多孔介质燃烧的标定。

在本书编写的过程中作者曾得到同事和同行的鼓励和支持,借此机会向所有给予支持和帮助的同仁们表示衷心的感谢,另外,更要感谢刘石教授的指导、帮助。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏错误之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2008 年 6 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 过程参数检测的意义	(1)
1.2 过程成像技术的发展历史	(3)
1.3 过程成像技术的特点及分类	(5)
1.4 电容层析成像的研究热点与存在的问题及展望 ...	(14)
1.5 本书的主要内容	(19)
第 2 章 电容层析成像技术	(21)
2.1 拉冬(Radon)变换和拉冬逆变换的基本原理	(21)
2.2 电容层析成像系统构成	(23)
2.3 电容传感器的结构	(23)
2.4 电容测量电路	(25)
2.5 电容层析成像正问题	(26)
2.6 电容层析成像逆问题	(28)
2.7 本章小结	(45)
第 3 章 多相流流型的电容层析成像图像重建算法	(46)
3.1 Tikhonov 图像重建算法比较	(46)
3.2 图像重建算法比较与评价	(50)
3.3 基于模糊阈值分割的 ECT 图像重建方法	(54)
3.4 本章小结	(57)
第 4 章 电容层析成像传感器结构设计	(58)
4.1 电容层析成像传感器优化设计	(58)
4.2 小尺度电容层析成像传感器结构分析	(68)
4.3 本章小结	(79)

第 5 章 电容层析成像系统特殊标定方法研究与应用	····· (80)
5.1 内置电极标定法在代用炸药压制成型工艺中的 应用	····· (80)
5.2 通道型多孔介质火焰测量中的标定方法研究	····· (86)
5.3 本章小结	····· (99)
第 6 章 结论与展望	····· (101)
6.1 结 论	····· (101)
6.2 展 望	····· (103)
参考文献	····· (105)

第1章 绪论

1.1 过程参数检测的意义

多相分布现象广泛存在于石油、化工、能源以及环境监测等各个部门,研究其分布特性、分析其参量对于生产过程的安全经济运行具有十分重要的意义。

以两相流为例,气/固、气/液等两相及多相流现象广泛存在于工业领域。例如在化工和能源领域,流化床和循环流化床技术得到了普遍的应用,是典型的气/固多相流。气/固多相流动的特性是非常重要的参数,它决定着辅机的能耗、床内吸热量、温度分布、燃烧情况、床内载料量和磨损等。良好的综合流体动力特性是合理设计循环流化床锅炉的基础。但是,由于影响床内气/固多相流动的因素众多,同时气/固多相流动自身的复杂流动特点和恶劣的运行环境对测试手段又提出了苛刻的限制条件。因此,迄今为止对循环流化床内气/固多相流动的内在运动规律、气固混合和离析特性、颗粒团形成和破碎过程、炉内颗粒粒径分布及浓度分布等的研究工作仍有待进一步加深。不断寻求先进可行的测试手段对循环流化床内的气/固两相流动特性进行深入研究无疑是一个解决问题的重要途径^[1]。

而在石油工业中,油/气/水多相混输技术得到广泛应用,可以显著降低管路投资、减少运行费用、降低井口回压、提高油/气田的生产能力、增加老油田生产后期的产量^[2]。进行在线计量混输过程中各种组分含量,对抑制流动不稳定的产生、降低生产运营成本都有着极其重要的作用。

在冶金工业中,高炉煤粉喷吹是一项可提高燃烧效率、大量节约能源的重大技术措施。目前,虽然喷煤工艺比较成熟,并已在高炉冶炼中得到广泛应用,但是由于还不能可靠地、在线实时地检测各喷管内高压气流所携带的煤粉的质量流量,整个喷吹系统难以在合理的工况下运行,煤粉在高炉内的最佳燃烧也无法实现^[3]。这是多年来阻碍高炉煤粉喷吹技术获得最大经济效益的一个关键环节。

在电力行业,煤粉在气力输送过程中,必须保证煤粉和空气的最佳混合比,降低飞灰中未燃烧碳以提高锅炉燃烧效率;同时,要保证每个吹风管嘴的煤粉质量流量均匀分布,以避免燃烧熄火、过量的 NO_2 形成、燃烧波动和炉渣问题等;此外,煤粉速度必须保持高于最小安全值,避免引起管道堵塞从而发生爆炸等事故^[4]。凡此种种,都需要有可靠的监测手段。

总体说来,多相流动测量的量有许多,可以概括为流型、各相速度、各相物质份额和浓度、各相流量等。且多相流与单相流相比,多相流不仅流动特征复杂,而且各相间存在截面效应和相对速度,相界面在空间和时间上都存在随机可变性,导致多相流测量的难度很大。目前,多相流参数检测的发展水平还远未满足工业应用的要求,多相流检测技术,无论在国际还是在国内,均尚属一个急需发展的探索研究领域^[5]。迄今为止,现有的测试技术和方法大多处在实验室研究阶段,已商品化可广泛应用于在线检测的工业型仪表为数不多。随着工业生产水平的提高,对于计量、节能和控制等方面提出了更高的要求,对多相流的测量技术也提出了更高的要求。

多相流测量技术大致可以分为如下几类:

早期多相流测量多采用传统的单相流检测技术实现两相流测量。例如,利用孔板差压流量计建立的基于分相流模型或均相流模型的多种两相流模型和基于差压脉动噪声的两相流模型,使其

能应用于两相流测量领域;利用电导传感器测量井下油水两相流含水率等。将成熟的单相流检测方法应用于两相流参数测量仍是重要措施之一。

另一类方法是利用现代信号处理技术和现有检测技术相结合的软测量技术方法实现两相流检测^[6]。例如,运用参数估计法测量两相流流速;应用统计模式识别技术对气/液两相流的两相局部轴向压差信号进行统计分析,对水平管道气/液两相分层流和间隙流流型进行鉴别;应用希尔伯特-黄变换及神经网络,统计理论、分形理论及神经网络^[7,8]对两相流流型进行鉴别等。

还有一类是近现代新技术:如辐射线技术、激光多普勒技术、核磁共振技术、超声技术、微波技术、光纤技术、脉冲中子活性示踪技术、相关技术、流动过程成像技术等。其中,过程成像(Process Tomography,简称PT)技术是20世纪80年代兴起的一门新技术。该技术采用特殊设计的传感器,以非接触或非侵入方式获取被测对象的场信息,应用图像重建算法重现两相/多相流体在管道内或者反应装置内某一横截面上的分布情况,从而得到两相流中离散相浓度分布及随时间的变化情况,实现被测量流体流动情况在某一截面上的可视化。该技术由于具有传统检测技术无法相比的优点,近年来在多相流动检测等领域得到广泛应用。

1.2 过程成像技术的发展历史

过程层析成像技术是医学诊断中CT技术与工业要求相结合的产物。自从1972年英国人G. T. Hounsfield成功研制出第一台CT机后不久,就有人尝试将CT技术应用于工业现场的多相流参数测量中^[9]。

20世纪80年代以前,研究人员多采用X射线、 γ 射线以及核磁共振技术设计多相流过程层析成像系统。这类系统的优点是分

分辨率(即区分细节的程度)高,定位及尺寸精度高,可用于微观机理的研究;缺点是价格昂贵,机构复杂、庞大,实时性差,工业现场应用困难。

从80年代中期开始,英国曼彻斯特大学理工学院(UMIST) M. S. Beck 教授及其研究小组首次提出“流动成像(Flow Imaging)”的概念,开始研制以电学敏感原理为基础的过程层析成像系统,并于80年代后期研制成功了第一台应用于两相流检测的电容层析成像系统^[10],该系统为8电极电容层析成像系统。之后,其又于1990年进一步推出了12电极电容层析成像系统^[11],该系统采用了基于电荷转移原理的电容数据采集系统,并配备了高速并行处理器来对数据进行处理,以提高系统的实时性,并在流体实验装置上对油/气两相流进行了成像实验。同一时期,美国能源部摩根城实验室研制出16电极电容层析成像系统用于流化床中的空隙率分布的研究^[12]。此外,英国其他大学及一些公司,德国、挪威、荷兰及美国等国的大学及研究机构也纷纷开展相应的工作。

鉴于过程成像技术的快速发展,90年代初,受欧盟科技委员会支持,为期4年的“欧洲过程层析成像联合行动(The European Concerted Action on Process Tomography)”得以开展。并于1992~1995年,分别在英国、德国、葡萄牙和荷兰召开了4届学术会议。之后,在美国工程基金会支持下,1996年和1997年又分别在美国和荷兰召开了过程层析成像前沿技术(Frontier in Industrial Process Tomography)会议。1996年7月,受英国政府资助,由曼彻斯特大学理工学院(UMIST)、利兹大学(University of Leeds)、埃克塞特(University of Exeter)和 March Consulting Group 组成的“工业过程层析成像虚拟中心(The Virtual Center for Industrial Process Tomography)”成立,该中心于1999年4月主持召开了“第一届世界工业过程层析成像技术大会(The First World Congress on

Industrial Process Tomography)”,这一时期的过程层析成像研究已相当深入,并且不仅限于两相管流流动参数的在线检测,而且已扩展到两相流或多相流的反应、分离等过程系统的在线监测。迄今为止,该会议已经连续于1999年、2001年、2003年、2005年在英国、德国、加拿大、日本召开了4届,极大地推动了过程成像技术的发展,一些新理论及应用研究成果得到及时探讨和交流。

在我国,包括各大学及科研院所在内的研究工作者,在过程成像硬件系统、原理、图像重建算法及应用等领域开展了广泛研究,并多次参加国际会议,取得了诸多成果。

1.3 过程成像技术的特点及分类

1.3.1 过程成像技术的特点

虽然过程成像技术(PT)是借鉴医学CT技术的经验而发展起来的,但是PT技术与医学CT技术相比有着许多特殊之处:

(1)PT技术所检测的物场常常具有强非线性和复杂性,造成PT技术的图像重建比医学CT技术的图像重建困难得多。

(2)PT系统所能采集的投影数据有限,进一步增加了图像重建的难度。

(3)PT系统所检测的物场往往处于高速变化状态,为做到实时动态成像,数据采集要求比医学CT技术快得多,图像重建算法的实时性要求也高得多。

(4)PT系统中的传感器及数据采集系统要安装在工业现场,这要求其不仅要与检测对象的几何、机械、物理特性相适应,而且还要适应恶劣的现场环境(如静电、电磁干扰、振动以及电压波动等)。

(5)PT技术一般还要求能够通过所采集的数据以及重建的图

像进行有关物场特征参数的提取,如流型辨识、空隙率计算、流速流量测量等。可以说,PT 系统是适应工业现场应用的智能化过程参数在线实时监测系统。

1.3.2 过程成像技术的分类

针对 PT 技术的特点,近年来出现了多种基于不同原理的 PT 系统^[13],已见报道的主要包括:光学成像(Optical Tomography)、X 射线成像、 γ 射线成像、核磁共振成像(Nuclear Magnetic Resonance Imaging,简称 NMRI,其又称磁共振成像(MRI))、超声成像(Ultrasonic Tomography)、阻抗成像(Electrical Impedance Tomography,简称 EIT)、电阻成像(Electrical Resistance Tomography,简称 ERT)、电容成像(Electrical Capacitance Tomography,简称 ECT)、电感成像(Electrical Inductance Tomography)和电磁成像(Electromagnetic Tomography,简称 EMT)等。

对于不同的过程层析成像系统,由于采用不同的传感器构成空间敏感器阵列,形成的敏感场空间分布也各有其特点,但总的来说,传感器的敏感场分布可以分为两大类,即“硬场”和“软场”。所谓“硬场”是指传感器的敏感场分布不随传感器区域内介质分布的变化而变化,典型的如 X 射线场等;而“软场”是指传感器的敏感场分布受传感器区域内的介质分布的影响而会发生变化,如电容层析成像技术中的静电场等。针对不同的传感器敏感场类型,在进行图像重建时应照顾到其不同特点,采取与其相适应的图像重建算法。按传感器的基本原理,过程层析成像系统可以分为光学式、电磁辐射式、声学式和电学式四大类。

1.3.2.1 光学式层析成像技术

光学式层析成像技术^[14-16]是基于两相介质对光的吸收、反射、衍射和折射等现象实现对介质分布检测的,主要可分为体光学器件方式与光纤光学器件方式,具有成本低、实时性好、抗电磁干

扰、可进行分布式测量、灵敏场近似为“硬场”,以及数据采集系统简单等优点,但它要求过程对象为透明或半透明,并且要求光路不受污染,这些要求的存在一定程度上限制了其应用领域。光学式层析成像技术主要应用于气/液/固多相流测量^[17]、火焰燃烧检测^[18]、喷射气流测量^[19]等方面。

1.3.2.2 电磁辐射式层析成像技术

电磁辐射式层析成像系统是利用不同物质对射线的不同作用来获得物质断面分布信息的,主要包括 X 射线、 γ 射线、核磁共振成像等。其测量基本原理是:从 X 射线源或 γ 射线源发出的射线通过多相流体时,射线被流体吸收,辐射强度将减弱,其衰减与沿此射线的多相流体各组分的分相含率和相分布有关。利用 X 射线或 γ 射线对管道或过程容器内的多相流体进行不同角度的扫描,用射线探测器检测出射线穿过多相流体前、后辐射强度的变化,获得关于管道或过程容器截面的多个测量数据(即投影数据)。采用图像重建算法可重建出该截面的各相分布图像。

X 射线和 γ 射线层析成像技术的应用领域较为广泛,主要包括:流化床的检测和流动成像^[20,21],油/气/水多相流的研究^[22,23],气体喷射水力旋流器浮选工艺研究^[24],气/液两相流在不规则结构体内流型的辨识^[25],高压汽-水两相流测量^[26]等。

X 射线和 γ 射线层析成像技术的优点在于^[27]:

(1)适用范围广。由于它们是对吸收系数敏感的方法,因此只要被测介质的各相有不同的吸收系数即可使用,且它不受被测物质组分透明与否、导电与否的影响。对于大多数被检测的工业对象都可满足该要求。

(2)重建图像精度高。一方面是由于它们的敏感场不受被测介质分布的影响;另一方面,X 射线和 γ 射线断层成像技术比其他 PT 技术可获得更多投影数据,并可借鉴医学 CT 技术中成熟的高精度图像重建算法,图像重建相对简单。以 X 射线为例,英国的

利兹大学使用 Skyscan 1072 系统无损测量了矿石、玻璃纤维垫、金属粉末、食物等物质的微结构^[28,29],清晰地构建了毫米级的物质结构。

而 X 射线、 γ 射线层析成像技术的缺点在于:

(1) 成本高。

(2) 安全性能差,操作维护要求高。由于采用的传感源是辐射线,对人体有害,因此安全性差,需要昂贵、复杂的安全保障设备。整个系统是一个复杂而精密的测量系统,对操作人员的素质要求较高,使用、维护和管理要求很苛刻。

磁共振成像(MRI)技术与 X 射线、 γ 射线成像技术相似,其具有较高精度。Sederman^[30]等报道了运用超快速 MRI 技术进行固定床成像,获得二维图像可达到每秒 50 幅,结果令人鼓舞。但 MRI 的昂贵价格及安全性是其工业应用的最大障碍。

1.3.2.3 声学式层析成像技术

声学式层析成像系统中最常见的是超声层析成像(Ultrasonic Tomography)系统^[31],它又可以分为透射式、反射式和 TOF(Time of Flight)方式。透射式成像系统是通过探测不同介质对超声波衰减系数的分布来得到管道的截面图像的;反射式成像系统是通过测定反向散射波从而获得待测截面的反射率分布的;TOF 方法则是通过测定超声波从发射源到接收器的传播时间得到被测介质密度分布及被测介质径向流速分布的。超声层析成像的成像精度比电学式成像系统要高,成本也能被工业应用所接受,同时它又是一种非辐射的测量方法,安全性能好。目前主要应用于工业上的气液两相流截面含气率测量、流型识别,气/固两相流流型识别^[32,33]等领域。除此之外,声学式层析法还被用来测量大尺寸炉膛内的二维速度场,用于重建炉膛内的温度场等^[34-36]。

但声学式层析成像系统还存在以下问题^[27]:

(1) 实时性差。超声波是一种机械波,与电磁波、光波相比,

超声波在介质中的传播速度较慢,而为了避免多次反射对数据测量精度的不良影响,超声波传感器每一次发射和完成一次测量后,要待声波在介质中衰减到足够微弱时才能进行下一次检测,因此产生一幅图像所需要的数据采集时间较长,系统实时性较差。为保证实时性而减少观测角度又会引起投影数据的减少,降低系统分辨率和成像精度。

(2)过程对象的强非均匀性。超声层析成像系统的基本方程一般是建立在对象为弱非均匀性的前提下的,超声层析成像系统在医学领域已有许多成功的应用,但都是以被测对象为弱非均匀性为前提的,即使存在强非均匀性的物体,也有许多先验知识可以利用。而过程对象往往表现出随机的强非均匀性,从而给成像造成很多困难。

(3)传感器的设计和安装。超声层析成像系统虽然具有非侵入的特点,但这些并不容易实现。如将传感器安装在管壁外侧,则传感器与管壁之间的耦合效应、扇形波束或窄束声波的引入、如何能得到最多的投影数据等都需要仔细考虑。

1.3.2.4 电学式层析成像技术

电学式层析成像系统是利用流体的电特性来测量流体的分布情况,主要包括电磁层析成像系统、电容层析成像系统和电阻层析成像系统等。电学式层析成像技术是近年来应用最为广泛、发展速度最快的过程成像技术之一。

1) 电磁层析成像技术

电磁层析成像技术是基于电磁感应原理的过程层析成像技术,其工作原理是:激励线圈中通入的交流电流在空间产生一个交变的磁场,检测线圈以感应的方式得到物场空间边界处磁场的分布信息,即获得一个观测角度的投影信号,通过对激励电路的控制可得到多个不同观测角度下的投影数据。当物场空间存在导电性物质和(或)导磁性物质时,磁场的分布遂被测量区域内导电率和

导磁率分布改变,此时获得的投影数据反映了被测区域内的介质分布情况,经处理后,由定性或定量的图像重建算法重建出介质分布图像,并进行图像显示^[27]。

电磁层析成像技术可适用于被测对象的分布可由导电率和(或)导磁率确定的场合,如金属矿石的输送和精选、化工过程分离、食品和药物生产过程中的异物检测、高速旋转机械在线安全检测,以及两相流或多相流中具有导电性组分的检测。

2) 电阻层析成像技术

电阻层析成像技术是根据敏感场的电导率(或电阻率)分布获得物场的分布信息,通过给激励电极施加激励电流,在被测区域内建立敏感场,当场内电导率分布变化导致场内电势分布变化时,使场域边界上的测量电压发生变化,通过一定的图像重建算法,可以重建出场内的电导率分布^[37]。

电阻层析成像技术应用领域较为广泛。目前,电阻层析成像技术已应用于气/液两相流空隙率测量及流型识别、气液混合过程、环境监测等多领域,主要包括:

在地质勘探研究与环境工程方面,美国劳伦斯·利弗摩尔国家实验室,在拉斯维加斯 Yucca 山脉的现场条件下,运用 ERT 技术监测在加热状态下水分在多孔性岩石材料中的转移(运输)现象,从而为证实 Yucca 山脉作为核废料贮存场所的超长期安全性计算机仿真模型的正确性提供依据^[38]。

在气液混合过程的研究方面,英国利兹大学的学者采用 ERT 技术对水力旋流分离器的运行工况进行了监测研究,前几年的研究工作都是在大学实验室进行的,取得了令人鼓舞的成果。在实验室研究获得成功之后,他们将 ERT 安装在英国陶瓷黏土公司的精制工厂的水力旋流分离器上,进行了现场测试,实现了工业环境下的正常监测。测试结果证实了 ERT 对水力旋流分离器运行状况在线测量和控制的可行性。并利用 ERT 系统获得了分离器内