



信息化与工业化 两化融合

研究与应用丛书

# 电学层析成像

王化祥 等 著

 科学出版社

013031350

0441  
141

国家科学技术学术著作出版基金资助出版  
信息化与工业化两化融合研究与应用丛书

# 电学层析成像

王化祥等 著



科学出版社  
北京

0441/141



北航

C1636813

## 内 容 简 介

本书第1章综述各种电学层析成像技术的发展历程及工作原理。第2章介绍电磁场理论基础,包括麦克斯韦方程组及边界条件、定解条件及电磁场的几个基本定理。第3~4章主要介绍电学层析成像的正问题和逆问题。这一部分结合作者多年的研究成果,总结各种电学成像技术中正问题和逆问题的数学模型及求解方法,包括各类不同的图像重建算法及其实验研究。第5章主要介绍三种电学成像系统(ECT、ERT、EMT),在介绍系统原理的基础上,讨论系统中各功能模块的设计及优化,并展示了图像重建实验。第6章主要讨论该领域最新的研究方向——双模态成像技术以及电学成像技术应用。

本书可作为自动控制专业研究生的教学参考书,同时对从事电学层析成像技术研究、设计、开发及应用的广大工程技术人员具有较高的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

电学层析成像 / 王化祥等著. —北京: 科学出版社, 2013  
(信息化与工业化两化融合研究与应用丛书)

ISBN 978-7-03-036977-2

I. 电… II. 王… III. 电学-层析成像-研究 IV. TE319

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 044467 号

责任编辑:姚庆爽 / 责任校对:刘亚琦  
责任印制:张 倩 / 封面设计:黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年3月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:268 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》序

传统的工业化道路,在发展生产力的同时付出了过量消耗资源的代价:产业革命 200 多年以来,占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化,在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的,而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程,从中国共产党的十五大提出“改造和提高传统产业,发展新兴产业和高技术产业,推进国民经济信息化”,到党的十六大提出“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”,再到党的十七大明确提出,“坚持走中国特色新型工业化道路,大力推进信息化与工业化融合”。这充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识在不断深化。

工业信息化是“两化融合”的主要内容,它主要包括生产设备、过程、装置、企业的信息化,产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化,其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系,大幅度降低资源消耗;在保持经济高速增长和社会发展过程中,有效地解决发展与生态环境之间的矛盾,积极发展循环经济,这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求,特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里,实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路,也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此,中国自动化学会与科学出版社共同策划出版《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》,旨在展示两化融合领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向,也可以是至今仍然活跃的传统方向;既注意横向的共性技术的应用研究,又注意纵向的行业技术的应用研究;既重视“两化融合”的软件技术,也关注相关的硬件技术;特别强调那些有助于将科学技术转化为生产力以

及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委的共同努力,本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后,衷心感谢所有关心本丛书并为丛书出版提供帮助的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对本丛书的厚爱。

A handwritten signature in black ink, reading '孙依芳' (Sun Yifang), written in a cursive style.

中国自动化学会理事长

2010年11月

## 前 言

电学层析成像技术是 20 世纪 80 年代发展起来的一种基于电磁场敏感机理的层析成像技术,具有无辐射、非侵入、响应速度快以及可视化等优点,自问世以来便受到国内外研究人员的广泛关注。

电学层析成像系统采用特殊设计的敏感空间阵列电极,以非接触或非侵入方式获取被测敏感场信息,利用图像重建算法再现多相流体在管道内或反应装置内部某一截面上的分布状态,从而获得多相流中离散相浓度分布及其随时间的变化规律。电学成像技术的出现标志着过程参数的检测技术发展到了一个崭新阶段,从传统的局部空间单点测量模式发展成为对过程参数二维/三维空间分布状况的在线、实时监测,极大提高了人们对生产过程信息的获取和分析能力,为过程参数在线检测提供了一种全新的手段。

电学成像技术可广泛应用于石油、化工、电力、冶金、建材、食品等工业(如石油工业中油/气/水混输过程),冶金、电力工业中各种气力物料输送过程,以及化工、医药、能源等领域中的干燥过程、混合过程、流态化过程、扩散过程、反应过程等普遍涉及多相流测量问题。

作者的研究小组多年来一直从事过程成像技术研究,包括射线扫描成像,本书是多年来研究成果的结晶。这里主要介绍电学成像技术的有关内容,包括各种电学层析成像技术的发展历程及工作原理;电学成像技术中正问题和逆问题的数学模型及求解算法;电学成像系统设计及优化,以及该技术的最新发展及其应用。全书共 6 章,其中,清华大学彭黎辉教授撰写了“5.1 电容成像技术”并提供有关的应用材料,浙江大学黄志尧教授、王保良副教授提供了相应材料,华北电力大学刘石教授和中国科学院工程热物理研究所王海刚研究员提供电容成像系统的应用材料;北京交通大学刘泽副教授撰写“5.3 电磁层析成像系统”;北京航空航天大学曹章博士撰写了“第 1 章绪论”并参与撰写“第 3 章电学层析成像的正问题”及“第 4 章电学层析成像的逆问题”;作者的研究小组中王超教授、何永勃副教授,许燕斌、崔自强、范文茹、徐遥远、王琦、薛倩等博士均做出了相应贡献,在此一并致以谢意。

本书的研究工作得到国家自然科学基金重点资助项目“多模态过程成像关键技术研究”(60532020);国际重大合作项目“基于 ECT/ERT 双模成像技术多相管流测量研究”(60820106002);面上项目“集成式电磁层析成像关键技术研究”(60672076),“基于双模成像技术多相管流检测机理与数据融合研究”(60472077),青年基金“基于阻抗频谱的双模态电学层析成像关键技术研究”(61001135),“场聚

焦电容/电阻双模态成像方法研究”(61201350)等大力支持,以及天津市自然科学基金面上项目“基于电学层析成像技术的两相流参数测量研究”(11JCYBJ C06900)的支持,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者不吝赐教。

# 目 录

《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 层析成像技术的历史发展	1
1.2 电学层析成像技术的发展历程	3
1.3 电学层析成像的分类及工作原理	9
参考文献	10
第 2 章 电磁场理论基础	21
2.1 麦克斯韦方程组及边界条件	21
2.1.1 麦克斯韦方程组的微分形式	21
2.1.2 电磁性质的本构关系	22
2.1.3 麦克斯韦方程组的积分形式和边界条件	23
2.2 定解条件	24
2.3 电磁场的几个基本定理	25
2.3.1 叠加定理	25
2.3.2 电磁场基本方程组的自洽性与完备性	25
2.3.3 镜像定理	27
2.3.4 等效原理	27
2.3.5 对偶定理	28
2.3.6 互易定理	29
参考文献	32
第 3 章 电学层析成像的正问题	33
3.1 概述	33
3.2 ECT、ERT 数学模型	33
3.2.1 ERT 的数学模型	34
3.2.2 ECT 的数学模型	34
3.2.3 EIT 的数学模型	34
3.2.4 边界条件	35
3.3 EMT 数学模型	36
3.4 正问题求解	38
3.4.1 有限差分法	38



3.4.2	有限单元法	38
3.4.3	边界元法	40
3.4.4	无网格法	48
	参考文献	52
<b>第4章</b>	<b>电学层析成像的逆问题</b>	<b>54</b>
4.1	适定问题与不适定问题	54
4.1.1	问题适定性	54
4.1.2	反问题和不适定问题	54
4.1.3	良态与病态问题	55
4.1.4	良条件与病条件的概念	55
4.2	电学成像逆问题概述	56
4.2.1	数学模型	57
4.2.2	灵敏度理论	59
4.2.3	基于灵敏度理论的求解方法	60
4.3	非迭代算法	62
4.3.1	反投影类算法	62
4.3.2	改进灵敏度系数法	65
4.3.3	截断奇异值分解(TSVD)	65
4.3.4	Calderon 方法	66
4.3.5	D-bar 方法	73
4.4	迭代求解算法	78
4.4.1	Landweber 算法	78
4.4.2	Newton-Raphson 算法	81
4.4.3	共轭梯度算法	83
4.4.4	Kalman 滤波算法	84
4.4.5	基于自适应网格细分的总变差正则化算法	86
4.5	其他方法	93
4.5.1	组合算法	93
4.5.2	最大熵正则化算法	99
	参考文献	108
<b>第5章</b>	<b>电学成像系统</b>	<b>110</b>
5.1	电容成像技术	110
5.1.1	引言	110
5.1.2	电容成像基本原理	110
5.1.3	微小电容检测技术	112

---

5.2 ERT 成像技术 .....	133
5.2.1 ERT 敏感电极阵列 .....	134
5.2.2 数据采集系统 .....	137
5.2.3 激励模式的正问题仿真及图像重建 .....	142
5.3 电磁层析成像系统 .....	145
5.3.1 电磁层析成像的正问题和逆问题 .....	146
5.3.2 电磁激励场与被测介质的相互作用 .....	146
5.3.3 电磁层析成像系统 .....	151
5.3.4 TEMT-2 系统图像重建实验 .....	155
参考文献 .....	157
<b>第 6 章 电学成像技术发展及应用</b> .....	<b>168</b>
6.1 电学成像技术发展 .....	168
6.1.1 ERT/ECT 双模态复合传感器结构设计 .....	168
6.1.2 ERT/ECT 双模态单电极传感器结构设计 .....	170
6.1.3 集成式有源电极的双模态系统 .....	172
6.2 电学成像技术应用 .....	175
6.2.1 电容成像技术(ECT)应用 .....	175
6.2.2 电阻成像技术(ERT)应用 .....	182
6.2.3 电磁成像技术(EMT)应用 .....	194
参考文献 .....	203

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 层析成像技术的历史发展

著名科学家门捷列夫指出“科学是从测量开始的”。层析成像技术的出现为科学研究与工业生产提供了新的可视化的无损测量手段。层析(tomography)的含义源于希腊语 tomos,意思是切片,层析成像意味着分层(片)式的成像技术。最初的可视化测量手段是基于光学原理的。早在公元前一世纪,人们就已发现通过球形透明物体去观察微小物体时,可以使其放大成像。后来逐渐对球形玻璃表面能使物体放大成像的规律有了认识。1590年,荷兰和意大利的眼镜制造者已经造出类似显微镜的放大仪器,1674年,列文虎克(Leeuwenhoek)利用显微镜成为首位发现“细菌”存在的人。光学方法一般只能观测透明的对象,无法获取不透明物体的内部信息,不能实现层析成像。

一切伴随着德国物理学家伦琴(Röntgen)的发现而有了彻底的改变。1895年,已经50岁的德国物理学家伦琴,在实验室发现了具有特别强的穿透力的一种新的射线,即X射线,并拍下了人类的第一张X射线照片。为此获1901年诺贝尔物理学奖,开创了无损成像的新时代。半个多世纪后,美国物理学家 Cormack 和英国工程师 Hounsfield 在1969年构造出第一台CT样机。从此把人类的可视化测量技术提高到计算断层成像的水平。两人分享了1979年的诺贝尔医学奖。CT技术所处理的区域属于硬场,即探测信号的分布(如射线指向)与被测区域的物质分布不存在复杂的非线性关系,被测区域的物质分布不影响射线的指向,且与检测信号的强度存在较为简单的对应关系。其图像重建的数学基础为奥地利数学家 Radon 于1917年建立的 Radon 变换理论。CT对应的测量信号可以认为与时间无关,图像重建只涉及空间域的变换。

随后,层析成像技术得到迅速发展,产生的图像重建方法类似于CT的超声波CT(ultrasound CT)、正电子发射(positron emission tomography, PET)CT,单光子发射CT(single photon emission computed tomography, SPECT)、光学相干层析等。

1973年,纽约州立大学石溪分校的 Lauterbur 采用线性梯度磁场进行空间编码,首次从实验中获得了核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)图像,随之核磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)学科正式诞生。核磁共振成像是继CT后医学影像学的又一重大进步。自20世纪80年代应用以来,它以

极快的速度得到发展。其基本原理是将人体置于特殊的磁场中,用无线电射频脉冲激发人体内氢原子核,引起氢原子核共振,并吸收能量。在停止射频脉冲后,氢原子核按特定频率发出射电信号,并将吸收的能量释放出来,被体外的接收器收录,经电子计算机处理获得图像,即为核磁共振成像。核磁共振是一种物理现象,作为一种分析手段广泛应用于物理、化学、生物等领域,到 1973 年才将它用于医学临床检测。为了避免与核医学中放射成像混淆,将其称为核磁共振成像术。MRI 虽然采用电磁波激发共振,但其信号载体是水质子磁矩,由于水质子有一个弛豫过程,时间为几十毫秒到秒的量级,这就决定了 NMR 信号是个时间域信号。在 MRI 中,梯度磁场构建了时间与空间的线性关系,从而空间信号在本质上为时间信号。同时梯度磁场也构建了 Larmor 频率与空间的线性关系,于是,反映原子核常数的磁旋比便与时间域的 MRI 信号建立了线性关系,这就决定了 MRI 图像重建问题采用 Fourier 变换方法的必然性。尽管 MRI 的图像重建亦可以采用 CT 中的 Radon 变换,但是 Fourier 变换则更为直接,被目前 MRI 系统所采用。

近年来,波长介于 0.1~10 THz 的太赫兹波,由于其占据了电磁波谱红外与微波的大部分频段,有望用于新一代的成像技术。与已有的微波与光学波段的医学成像技术相比,太赫兹波的基础研究进展相当有限。与临近波段(如微波及光学)相比,太赫兹波的发生器与接收器尚未完备,可谓是科研前景广阔但技术应用有限。太赫兹波已被用来表征固、液、气等物质的电、振动以及组分等特性。公认的突破领域在于医学成像。通常光谱分析只能获得特定频率的光强,而太赫兹波的时域频谱分析技术可以获得其暂态电场信息,时域数据的 Fourier 变换可以给出太赫兹波脉冲的幅值和相位,进而给出介电常数的实部与虚部,不再需要采用 Kramers-Kronig 关系获得,可以精确获得样品在太赫兹波的折射率与吸收系数。许多液相气相分子的旋转与振动谱线在太赫兹波的频段内,可根据共振线确定其分子结构。Raman 波谱采用频域信息对晶格振动进行判别,类似的,太赫兹波技术可根据时域信息获得介电常数函数的实部与虚部,以描述分子的旋转与振动,目前的光学与微波技术尚无法实现。由于衍射现象的存在,1THz 下标准的成像分辨率不低于  $300\mu\text{m}$ ,无法实现细胞级的分辨,一般可采用近场太赫兹技术,将光波聚焦至一个电光晶体,通过光学检波产生并以电光效应检测,以达到亚微米级的精度,成像区域的组织与聚焦点尺寸相当,与波长无关,如此可达到  $1/1000$  波长的分辨率,如 0.5THz 时分辨率为  $0.5\mu\text{m}$ 。

近 20 余年发展起来的电学层析成像技术(electrical tomography, ET),以其非侵入性、便携性、价格低廉、响应快速等技术优势,作为一种多相流可视化测量手段,受到广泛关注。与 CT 及 MRI 技术所不同的是,电学层析成像所处理的区域属于“软场”,即探测信号的分布(如指向)与被测区域的物质分布存在复杂的非线性关系,被测区域的物质分布影响电场线的指向,且与检测信号的强度存在复杂的

非线性对应关系。其图像重建的数学基础分别参考了CT的Radon变换技术与MRI的变换技术,属于非常典型的欠定、病态的非线性逆问题求解。

伴随着工业生产与生活水平不断提高,人们对测量的需求不再满足于单一参数信息的获取,日渐体现在复杂参数的分布测量上,进而结合现代计算技术实现可视化测量。以多相流测量为例,多相流测量反映的是工程技术发展中存在的共性问题,具有明显的工业背景,如气液两相流等流动现象广泛存在于工业中广为使用的锅炉、汽轮机、冷凝器、蒸发器、核反应堆、精馏塔及其他化工反应设备中,如对核反应堆热工水力特性进行监测,可以弥补目前由于对堆内热工水力特性认识上的不足,加强反应堆的实时场分布测量,对于提高反应堆运行安全无疑有着积极的意义。在多相流系统中,由于各分相之间存在相互作用,其相界面在时间上和空间上具有可变性和随机性,流动特性远比单相系统复杂。因此,描述多相流动的参数测量也比单相流动复杂,不仅有比单相流动多的常规参数,而且有多相流系统本身特有的区别于单相流的参数(如流型、相含率等),所以增加了参数检测的难度,且由于多相流中一些相界面相互作用变化很快,常规接触式传感器因其本身惰性和对流场的干扰,已不能满足某些测量(如流型)需要。并且常规式的过程参数测量基本为离散点测量,无法反映被测区域的二维/三维场分布信息,高速数据采集与信息处理技术的进步,使电磁学、光学、声学、X射线、核辐射技术的非侵入式可视化测量技术进入多相流检测领域,并得到迅速发展。

电学层析成像等可视化技术可使测量信息二维化、立体化、四维化(包含时间项),界面更加友好,进一步促进了过程参数检测技术的发展。而人体也是复杂的多相流系统,作为非侵入式、无损伤的多相流可视化测量技术,电学层析成像可望成为新一代的生物参数测量手段。

## 1.2 电学层析成像技术的发展历程

电学层析成像技术自诞生以来,得到工程界和数学界的广泛关注。这里对电学层析成像技术的发展历程进行简要回顾。

1978年,Henderson和Webster构建了一台描述人体胸腔电学参数的“阻抗照相机”,该系统由一个大电极和12个小电极组成的电极阵列构成,采用电压激励、电流测量的方式,测得144组数据,重构得到具有100个像素点的图像,成像速度为32幅/s。

1980年,Calderón给出了电学层析成像技术的数学模型,俗称Calderón问题,证明了从内部分布到边界值的映射为单射,理论上论证了从边界值估计内部分布的可能性,但其要求电导率有一定的光滑性。2006年,Astala和Päivärinta证明该结论在任意电导率分布下均成立。

1983年, Seagar 给出了电极的最优配置方法, 以最大化一个圆形子区域的变化引起的测量变化, 即如何最优化分辨率。随后, Isaacson 和 Gisser 等给出了空间分辨能力的计算方法, 即在同一电流激励下, 应使两种分布对应的电压差的  $L^2$  范数最大, 为电极优化提供了准则。

1987年, Seagar 等对电学层析成像技术的灵敏度和分辨率的界限进行了初步的理论分析, 指出空间分辨率与噪声水平、介质分布、电极数目相关, 无法得出电极数目和空间分辨率的单一关系, 必须考虑其他因素的影响。1991年, Isaacson 和 Cheney 证明对于精确的测量和电极间间隙很小的情形, 采用有限电极获取的信息对物质的分布进行重构, 结果收敛到 Calderón 给出的近似估计。此后, 针对不同的实际约束, 不断有学者对电极配置和激励模式进行研究。1983到1984年间, Barber 和 Brown 对初步的电学层析成像技术进行综述, 并引入至今仍广泛使用的反投影图像重建算法。1990年, Santosa 和 Vogelius 指出, 反投影方法可视为广义 Radon 变换的近似逆, 并给出一种基于 Krylov 空间的共轭残差方法。

1985年, 基于 Geselowitz 和 Lehr 给出的灵敏度定理, Murai 和 Kagawa 采用有限元方法进行电导率分布图像重建。2005年, Soleimani 等采用变分的方法重新推导出灵敏度定理, 但离散后的矩阵被称为 Jacobian 矩阵, 即灵敏度矩阵。

1987年, Sylvester 和 Uhlmann 证明各向同性的电导率分布可以由精确的边界测量值重建。1988年, Nachman 给出由边界值估计内部分布的推导步骤, 并于1995年构造性地证明了 Dirichlet-to-Neumann 映射可以唯一确定  $C^2$  空间的电导率分布, 但要求电导率具有二阶导数。1997年, Brown 和 Uhlmann 将电导率条件弱化为仅要求一阶导数, 且为 Hölder 连续。2000年, Siltanen 等给出了该构造性证明的算法实现, 并以轴向对称的分布进行了算例说明。2001年, Siltanen 等对高对比度的轴向对称电导率分布采用 D-bar 方法进行图像重建。2002年, Mueller 和 Siltanen 等将 Nachman 的构造性证明改造成基于求解 D-bar 方程的直接图像重建算法, 无需迭代求解正问题, 求解过程采用了正则化方法。2003年, Knudsen 根据 Brown 和 Uhlmann 的唯一性证明, 给出各向同性的电导率分布的图像重建直接算法, 仅要求一阶导数, 并对轴向对称的分布给出了算例。同年, Mueller 和 Siltanen 采用一种新的正则化手段, 利用带噪声的仿真数据, 同时对轴向对称和非轴向对称的分布进行了研究。2004年, Knudsen, Mueller 和 Siltanen 等给出了平面内求解 D-bar 方程的算法。同年, Isaacson 和 Mueller 等采用 D-bar 方法对胸腔模型进行了图像重建, 并与 NOSER (Newton's one-step error reconstructor) 算法进行了对比。2006年, Isaacson 和 Mueller 等采用 D-bar 方法对心跳过程进行了检测。同年, Astala 等将条件弱化为不要求电导率可导, 数学上证明了 Calderón 问题的可行性。而 Cornean, Knudsen 和 Siltanen 尝试将 D-bar 方法推广到三维情形。2007年, 根据 Nachman 的构造性证明, 尽管其要求二阶导数, 但由于正则

化处理的平滑效应,Knudsen 等给出针对不连续电导率分布的 D-bar 方法,并得到实验数据的图像重建结果,指出采用 D-bar 方法对不连续电导率进行图像重建,会产生振铃效应。同年,Murphy 和 Mueller 等人给出 D-bar 方法对椭圆形区域的图像重建结果。从 D-bar 方法的原理分析,可以进行绝对成像,但对边界要求很高。因为其理论依据为从空间  $H^{1/2}$  到空间  $H^{-1/2}$  的完全 Dirichlet-to-Neumann 映射,但对于实际系统,只能获取从空间  $H^{1/2}$  到空间  $H^{-1/2}$  的局部映射,既不是 Dirichlet-to-Neumann 映射,又不完备。

1987 年,Yorkey 等改进了 Newton-Raphson 迭代法,并给出 Jacobian 矩阵(即灵敏度矩阵)的两种计算方法,一种为直接计算,另一种为基于补偿理论的计算。但后来发现,两种方法在数学上等价。

1988 年,Alessandrini 研究了 Calderón 问题的稳定性,给出其 log 形式的稳定性估计。2001 年,Mandache 证明这种估计是最优的。而对于部分 Dirichlet-to-Neumann 映射,直观上讲,稳定性更差,2006 年,Heck 和 Wang 给出 log-log 形式的稳定性估计。2007 年,Heck 和 Wang 对于未知边界为齐次的部分边界条件给出 log 形式的稳定性估计,同时猜测部分边界条件,最优的稳定性估计也为 log 形式。但无论怎样,这些稳定性估计结果均表明电学成像技术面临的是严重病态性问题,对测量精度和正则化方法均具有挑战。

1989 年,Clarke 和 Janday 提出生物电磁逆问题的最大熵估计方法,随后,Bayesian 多层感知网络(Bayesian multi layer perception, BMLP)、模拟退火(simulated annealing, SA)、遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子滤波(particle filtering, PF)等基于随机理论的方法被引入电学层析成像技术。

1991 年,Somersalo 等给出用于阻抗成像的层剥方法(layer stripping)的理论依据和算例。属于直接重建算法,但其对噪声敏感,尚未见其在噪声环境下的成功算例。在 1991~1994 年,工业界对离散化后的法线方程的求解进行了研究。Woo 等采用 Hachtel 增量矩阵法,重建图像的边界和中心分辨率分别为 5% 和 7%。Artola 和 Dell 给出超线性收敛的拟牛顿算法。

1995 年,Morucci 等针对球形区域给出三维的图像重建结果。同年,Berg 等将 total variation 方法引入电学层析成像技术。电学层析成像技术从二维向三维发展的同时,研究者尝试进行多模态系统的研究。Johansen 等将  $\gamma$  射线与 ECT (electrical capacitance tomography) 构成双模态测量系统,以利用两种不同的测量机理,获取同一流体的不同物理性质,其系统中 ECT 传感器为 8 电极,而配置 5 个 Cs 源,85 个集成 CdZnTe 半导体传感器,当时希望成像速度达到 10 帧/s。1996 年,Johansen 等将其系统的成像速度提高到了 30 帧/s。1998 年,Hjertaker 给出该双模态系统的静态标定结果。但是,电容成像的效果不理想,Cs 源成像效果较好,同时由于水连续相以及矿化度分别对电容传感器和  $\gamma$  射线探测有影响,2005 年,



Hjertaker 等改进了其系统,采用高频电磁流量计测量含水率。

1996 年, Metherall 等在 *Nature* 上发表文章,描述了一套 64 电极的三维电学层析成像系统,对圆桶区域给出了比较好的三维图像重建结果。

在进行传统尺寸测量的同时,研究人员开始考虑微小尺度的可视化测量。1996 年, Griffiths 等报道了一套电极直径为 0.9 mm 的微型成像系统,激励频率为 85kHz,在食盐溶液中,获得铜丝和头发的静态图像以及玻璃丝移动的动态图像。2004 年, York 等报道了一套 8 电极的超微型传感器,直径仅为 300 μm,采用 LCR 仪表(Hewlett-Packard4284A),通过切换电路获取测量信息,获得直径为 80 μm 线的静态图像。2006 年, York 等给出一套 8 电极的传感器,直径为 0.75mm,数据采集速度可达 6000 帧/s, PC 采用 RS232 接口通信,并获取了直径为 200 μm 的棒的静态图像。

1997 年, Cohen-Bacrie 等阐述了电学层析成像技术中的线性化方法,包括:①积分方法,属于一种局部解析近似;②基于 Geselowitz 灵敏度定理的灵敏度矩阵方法;③基于有限元方法的一阶微分 Jacobian 矩阵方法;④基于 Fourier 系数的梯度估计方法。局部线性化的处理方法为处理复杂的非线性问题提供了很好的近似手段。

1999 年, Yang 等给出一种改进的 Landweber 迭代算法,并提供实验结果,但迭代过程中假定灵敏度矩阵未变化。基于这种“一阶近似的多次迭代”思想,一些迭代格式和加速收敛技术被应用到电学层析成像技术中。

对于工程界而言,处理电学层析成像技术中的非线性问题,通常采用局部线性化的处理方法,因此采用的方法可统一为如图 1.2.1 所示的控制框图。

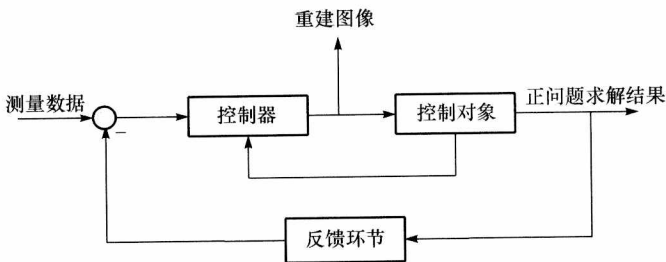


图 1.2.1 电学层析成像系统图像重建过程基本框图

其中:

(1) 控制器,即图像重建算法,根据重建值与测量值之间的偏差,对被测物场的电磁参数(电导率  $\sigma$ 、电容率  $\epsilon$ 、磁导率  $\mu$  等)的重建结果不断进行修正,通常修正的标准是“方差最小”原则。



(2) 控制对象,即根据物质分布的电磁参数分布求解前向问题,获得重建值,具体为拉普拉斯(Laplace)方程的求解,其求解方式相对固定。

(3) 反馈环节,通常为单位反馈,也可以采用带投影因子的反馈,但根据不动点理论,投影因子具有强制收敛的作用,收敛结果往往偏离正确值,即以牺牲精度换取速度。

基于局部线性化的思想,电学层析成像技术的图像重建问题转化为一种优化问题或者控制问题。

1998年,Vauhkonen等结合随机游走模型,将Kalman滤波方法引入电学层析成像的动态成像技术中,用于跟踪快速变化的物场分布。2001年,Kim等引入扩展Kalman滤波方法,以弥补“一阶近似的多次迭代”处理方式带来的模型偏差。同年,Seppänen等结合Navier-Stokes方程和convection-diffusion(CD)方程,由得到的演化方程和电学层析成像的输出方程共同构成系统的状态空间表达,将图像重建转换为状态空间估计问题,为流程工业测量引入新的思路。2002年,Kim等考虑物场电导率或者分布形状已知的情形,针对仿真数据进行基于扩展Kalman滤波方法的动态成像。2004年,Trigo等采用扩展Kalman滤波方法,对胸腔模型进行仿真研究。2006年,Pikkarainen针对逆问题的状态空间描述,对其演化和输出方程的离散化进行分析。同年,Kim等采用扩展Kalman滤波方法针对胸腔模型,进行模型实验研究。2007年,Seppänen等结合由流体力学方程得到的状态空间求解方法,进行了实验研究,指出该方法不仅适用于动态监测,对静态分布同样有效。同年,Kim等采用扩展Kalman滤波方法,对层流的非混合两相流进行界面识别的仿真研究。

1999年,Cheney等从数学模型、系统设计以及重建算法等方面,对其课题组的工作进行回顾总结,并给出采用32电极成像系统获取的人体胸部重建图像。

2000年,Vauhkonen等发布了用于二维电学和光学成像的MATLAB软件包EIDORS。2002年,Polydorides等发布了用于三维电学和光学成像的MATLAB软件包EIDORS。

2000年,Brühl和Hanke给出一种基于采样原理的直接重建算法,通过检验某点是否在一个特定的集合里求解电学层析成像问题,因此,具有某一电导率的子区域,可以通过区域内点的判断进行重建,该方法不需要最小化某一泛函,也不需要求解正问题,并且在1%噪声水平下给出了合理的结果。随后,2003年,Brühl等又应用该方法寻找导电区域不均匀小子区域,并用仿真结果验证了可行性。

2001年,Deng等对采用双截面ERT(electrical resistance tomography)系统像素相关测速进行研究,并给出针对泡状气液两相流的初步实验结果。2005年,Dong等报道了气液两相流垂直管段的相关测速结果。2006年,Wang等给出一种基于“最优像素点”双截面相关测速结果,并和由4电极流速传感探头获取的数据