



ERT 成像算法在管道泥浆浓度测量中的应用

程书凤^{1,2}, 邢 津^{1,2}, 王费新^{1,2}, 施绍刚¹

(1. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 201028;

2. 航道疏浚技术交通行业重点实验室, 上海 201028)

摘要: 电阻层析成像(ERT)技术的非侵入性和可视化特点在管道泥浆浓度检测中具有独特的优势, 作为ERT技术的核心, 成像算法的选择对于检测水平有很大影响。采用LBP算法、Newton-Raphson迭代算法和Landweber迭代算法对3种管道泥浆流型进行反演成像, 并从成像精度、成像速度和抗噪声能力3个指标定量评价了3种算法的适用性。计算结果表明, LBP算法具有最快的成像速度和最强的抗噪声能力; Newton-Raphson算法具有最高的成像精度。根据成像实时性的要求确定选用何种算法。

关键词: 管道流型; 泥浆浓度; ERT; 成像算法

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0221-05

Application of ERT imaging algorithm in pipeline mud concentration measurement

CHENG Shu-feng^{1,2}, XING Jin^{1,2}, WANG Fei-xin^{1,2}, SHI Shao-gang¹

(1.CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 201028, China;

2.Key Laboratory of Waterway Dredging Technology and Transportation Industry, Shanghai 201208, China)

Abstract: The non-invasive and visual characteristics of electrical resistance tomography (ERT) technology have unique advantages in pipe slurry concentration detection. As the core of ERT technology, the choice of imaging algorithm has a great impact on the detection level. LBP algorithm, Newton-Raphson iterative algorithm, and Landweber iterative algorithm are used to inversely image the three pipe slurry flow regimes, and the applicability of the three algorithms is quantitatively evaluated from three indicators including the imaging accuracy, imaging speed and anti-noise ability. The calculation results show that the LBP algorithm has the fastest imaging speed and the strongest anti-noise ability; the Newton-Raphson algorithm has the highest imaging accuracy. The real-time imaging requirements determine which algorithm shall be chosen.

Keywords: pipe flow regime; slurry concentration; electrical resistance tomography(ERT); imaging algorithm

管道输送是疏浚吹填施工的核心手段, 而管道泥浆浓度是管道输送工艺的一个核心参数。提升管道泥浆浓度的检测水平, 获得更加全面而精准的管道泥浆浓度参数信息, 对于管道输送工艺的优化具有重要意义。目前常用的管道泥浆检测手段有超声波法和放射线法等^[1]。这些方法存在以下缺点: 1) 只能单点检测; 2) 超声波法检测较大管径时受功率的限制; 3) 放射线法由于放射线

物质的核辐射, 其使用存在环境、职业健康、安装运输、政府监管、维修维护等方面的不便。另外, 堵管是管道输送过程中经常遇到的一个问题^[2-3], 上述检测手段均不能识别管道泥浆的沉积形态, 难以在解决堵管问题上发挥作用。

电阻层析成像(ERT)技术是一种新型的在线实时检测技术, 具有非侵入性、可视化等优点, 已被广泛应用于多相流检测^[4]。与传统的单点检

测相比，该检测手段能够获得整个管道断面的浓度信息，对于解决堵管问题能发挥重要作用。目前，电阻层析成像技术在管道泥浆浓度检测中的应用较少，而成像计算是电阻层析成像技术的核心，成像算法的选取对于检测水平有很大影响。ERT 成像算法分为非迭代算法和迭代算法两类，其中非迭代算法有线性反投影法 (LBP)^[5]、灵敏度法等；迭代算法包括 Newton-Raphson 算法、Landweber 算法^[6]和 Tikhonov 算法等。本文以成像算法为出发点，基于管道泥浆的实际流动形态，设定 3 种泥浆流型；由于灵敏度法和线性反投影法类似，Tikhonov 迭代算法为 Newton-Raphson 算法的简化^[7]，本文采用 LBP 算法、Newton-Raphson 算法和 Landweber 迭代算法进行计算成像，通过成像精度、成像速度和抗噪声能力分析 3 种算法在管道泥浆浓度检测中的适用性。

1 ERT 数学模型

电阻层析成像技术可以分为正问题和反问题 2 个部分。正问题即是建立电阻层析成像敏感场数学模型，根据敏感场内电导率分布，通过解析计算或者数值计算求出敏感场内的电势分布。根据恒定场理论的麦克斯韦方程，可以推导出电阻层析成像敏感场数学模型方程^[8]：

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (1)$$

式中： σ 为敏感场内的电导率分布； φ 为敏感场内的电势分布。

采用有限元算法对正问题进行求解，管道圆形场域采用三角形网格进行剖分（图 1）。数值计算结果与解析解对比结果表明，数值解与解析解吻合良好（图 2）。

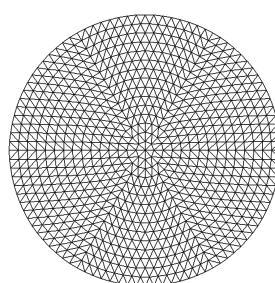


图 1 场域三角网格剖分

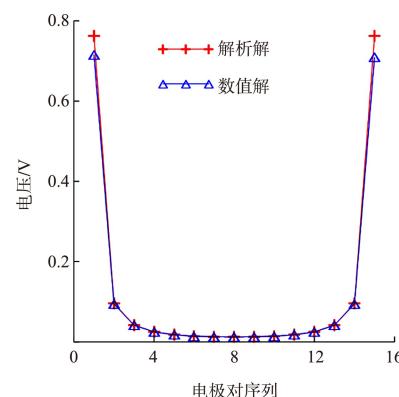


图 2 正问题数值解与解析解对比

ERT 反问题是已知边界测量电压，求解敏感场内的电导率分布。根据正问题的计算，可以求得 ERT 反问题的求解方程，该方程为非线性方程，具有严重的不适定性。图像重建算法，在数学上即是求解反问题的过程：

$$U = SG \quad (2)$$

式中： U 为边界电压矩阵； S 为灵敏度矩阵； G 为所要求的电导率分布。

LBP 算法是最常用的非迭代算法，其先通过正问题计算，生成投影区域等位线覆盖，敏感场被划分为若干个等位线区域，然后通过反投影算法进行反投影。Newton-Raphson 算法^[9]是求解无约束问题最优方法之一；Landweber 算法的原理与最优化理论中的最速下降法相似，其本质是多次的线性反投影迭代。两算法均采用极小化目标函数的方法，其区别在于迭代方式的不同。

Newton-Raphson 算法迭代公式：

$$G_{k+1} = G_k - (S^T S + \gamma I)^{-1} S^T (U_k - U) \quad (3)$$

Landweber 算法迭代公式为：

$$G_{k+1} = G_k - \frac{\| S^T (U - SG_k) \|^2}{\| SS^T (U - SG_k) \|^2} S^T (SG_k - U) \quad (4)$$

式中： k 表示第 k 次迭代； S^T 为灵敏度矩阵的转置矩阵； I 为单位矩阵； γ 为保证求解稳定引入的正则化因子，该系数取值越大，求解越稳定，但所得解偏离实际值越大，本文中该值取 0.1。

2 数值试验设定

随着管道泥浆浓度与流速的不同，管道泥浆

流动可以分为均质流、伪均质流、非均质流和分层流4种流态。由于伪均质流沿管道断面浓度变化不大, 近似于均质流, 本文设定均质流、非均质流和分层流^[10-11]3种流型。均质流整个断面浓度为同一值, 非均质流分为4层, 从上到下浓度依次增大, 其浓度值的选取参考熊庭等人^[12]的相关研究。分层流设定为突出沉积边界, 设置为2层, 下层为沉积层。通过简化的麦克斯韦导电性-浓度模型方程^[13](公式5), 将各个流型分层浓度换算为电导率值, 完成流型设定(表1)。

表1 流型设定

流型	流型设定图	分层	分层浓度值/%	分层电导率值/(mS·cm ⁻¹)
均质流		1	5	27.8
非均质流		1	5	27.8
		2	10	25.7
		3	15	23.7
		4	20	21.8
分层流		1	10	25.7
		2	50	12.0

$$\alpha = \frac{2\sigma_1 - 2\sigma_{mc}}{\sigma_{mc} + 2\sigma_1} \quad (5)$$

式中: α 为浓度值; σ_1 为液相电导率值, 该值取 30 mS/cm, 固相为不导电项; σ_{mc} 为混合物电导率值。

根据每个流型的电导率分布求解出该流型场域的边界电压。通过求得的边界电压利用 LBP 算法、Newton-Raphson 算法和 Landweber 迭代算法分别反演出各个流型的电导率分布。

3 数值试验结果与分析

为验证网格数量对计算精度的影响, 针对分层流流型, 采用 316、744 和 1 512 共 3 种数量的网格对 3 种算法进行成像计算。引入相对图像误差^[14]这一评判指标定量对比不同网格数量下 3 种算法的成像精度。成像精度以图像相对误差来衡量, 相对图像误差定义公式为:

$$\varepsilon_{image} = \frac{\|\bar{g} - g\|}{\|g\|} \quad (6)$$

式中: \bar{g} 为由成像算法得到的电导率分布值; g 为被测场域内设定的电导率分布值。图像误差越小, 说明成像质量越好。对于 Newton-Raphson 算法和 Landweber 迭代算法, 以前后两次迭代计算结果的残差为收敛判定标准, 即 $\varepsilon = \left| \frac{g^{k+1}}{g^k} - 1 \right|$ 为收敛标准, 当 $\varepsilon < 1 \times 10^{-5}$ 时迭代终止。计算结果如表 2 所示。

表2 不同网格下的成像精度

网格数量	成像精度/%		
	LBP 算法	Newton-Raphson 算法	Landweber 算法
316	14.79	11.75	13.58
744	14.65	8.75	10.33
1 512	14.60	8.34	10.14

由表 2 可知: LBP 算法受网格数量影响较小, 这是因为 LBP 算法中等位线划分的区域远大于网格尺寸, 反投影结果受网格数量影响较小。当网格数量从 316 增加到 744 时, Newton-Raphson 算法和 Landweber 算法的成像精度分别提高 3.00% 和 3.25%; 当网格数量从 744 增加到 1 512 时, 2 种算法的精度分别提高 0.41% 和 0.19%。可见, 随着网格数量的增加, 对精度的影响减小。为此, 采用 1 512 网格的计算结果对 3 种算法的成像效果、成像精度和抗噪声能力进行分析。将 3 种算法求得的电导率分布以图像呈现, 成像效果如表 3 所示。由结果可知: 对于浓度值统一均质流流型, 3 种算法均能准确反演出实际浓度值; 对于非匀质流流型, 3 种算法均能定性地反演出浓度的梯度变化, 但由于相邻层之间的浓度相差较小, 无论迭代算法还是非迭代算法均难以清晰地反演出分层边界; 对于分层流流型, 3 种算法均能反演出较为明显的沉积层边界。LBP 算法和 Landweber 算法成像图中均出现了伪影, 且 LBP 算法的反演图像呈现“均值化”现象, 即各层的反演浓度趋于平均值, 这是其计算过程中的线性假定产生的影响。从本质上来说, Landweber 算法就是多次的 LBP 算法迭代, 从成像效果来看, 通过多次迭代一定程

度上消除了“均值化”效应, Newton-Raphson 算法成像则比较平滑。

表 3 成像效果

流型	流型设定	LBP 算法	Newton-Raphson 算法	Landweber 算法
均质流				
非均质流				
分层流				

根据相对图像误差定义公式(式 6)可以得出 3 种设定流型下各个算法的计算精度, 如表 4 所示。由表 4 可知, 3 种算法中, 2 种迭代算法的计算精度高于非迭代算法, Newton-Raphson 算法计算精度最高。3 种流型随着分层电导率值的梯度变大, 成像的精度下降, 即当场域浓度的分布梯度较大时, 对算法的要求更高。

表 4 成像精度

流型	成像精度%		
	LBP 算法	Newton-Raphson 算法	Landweber 算法
均质流	0.00	0.00	0.00
非均质流	3.19	1.69	2.18
分层流	14.60	8.34	10.14

实际管道泥浆浓度检测对成像有实时性的要求, 各成像算法达到稳定精度所需要的时间如表 5 所示。由表 5 可知, 非迭代算法的稳定成像所用时间要远远低于迭代算法。Newton-Raphson 算法收敛性好, 达到稳定计算精度只需要很少的步数; Landweber 收敛性差, 当成像电导率场域复杂时, 需要迭代较多步数才能达到稳定精度, 计算时长较长。值得注意的是, Newton-Raphson 算法在网格数量为 316 下仍有较高的精度, 此时该算法达到稳定精度所需要的时间为 0.21 s, Newton-Raphson 算法在实际运用时可以综合考虑成像时间和计算精度以选择合适的网格数量。

表 5 成像计算时长

流型	计算时长/s		
	LBP 算法	Newton-Raphson 算法	Landweber 算法
均质流	0.009	0.78 迭代 1 次	0.78 迭代 1 次
非均质流	0.009	1.32 迭代 2 次	14.14 迭代 50 次
分层流	0.009	1.32 迭代 2 次	139.50 迭代 493 次

实际检测工况下, 受各种因素的干扰, 管道边界测量电压会含有一定量的噪声, 因此算法的抗噪性能也是需要考虑的一个因素。本文针对设定的分层流流型, 在正问题计算得到的边界电压值加入 10%、20% 和 30% 以内的随机噪声。在噪声干扰下, 3 种算法的成像精度如表 6 所示。由表 6 可知在 30% 以内的噪声干扰下迭代算法的成像精度仍高于非迭代算法, 但随着噪声的加大, 优势减弱。为了定量评价各个算法的抗噪能力, 引入误差放大系数, 该系数即为噪声干扰下与无噪声时的成像精度的比值。该值越小, 说明该算法的抗噪性能越好。放大系数计算结果如表 7 所示。由表 7 可知, 3 种算法中 LBP 算法的抗干扰性能最好, 迭代算法中, 在 10% 噪声误差以内, Newton-Raphson 算法和 Landweber 算法抗噪性能接近, 在高于 10% 的噪声干扰下, Landweber 算法的成像精度优于 Newton-Raphson 算法。

表 6 不同噪声程度下计算精度

噪声大小/%	计算精度/%		
	LBP 算法	Newton-Raphson 算法	Landweber 算法
0	14.60	8.34	10.14
10	16.10	9.95	12.36
20	18.60	14.72	14.00
30	25.30	20.20	17.45

表 7 误差放大系数

噪声大小/%	放大系数		
	LBP 算法	Newton-Raphson 算法	Landweber 算法
10	1.10	1.19	1.21
20	1.27	1.76	1.38
30	1.73	2.40	1.72
均值	1.37	1.79	1.44

4 结论

1) 针对管道泥浆输送的特定流型, ERT 3 种成像算法中, LBP 算法成像速度最快, 抗噪能力最强, 但成像精度低于另外 2 种迭代算法; Newton-Raphson 算法计算精度最高, 收敛速度快, 且成像平滑; Landweber 算法收敛性差, 成像有伪影, 抗噪能力强于 Newton-Raphson 算法。

2) 管道泥浆输送过程中, 有沉积层出现, 泥浆以层流运动时, 浓度分布不连续性增强, 对算法的要求更高。在 30% 以内噪声干扰下, 迭代算法的计算精度高于非迭代算法, 如果检测成像无实时性的要求, 或者实时性要求较低, 建议选用 Newton-Raphson 算法; 如果检测成像实时性要求较高, 则建议选用 LBP 算法。

参考文献:

- [1] 闭治跃, 王庆丰, 唐建中. 基于径向基函数神经网络的挖泥船排泥管道泥浆浓度软测量模型研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(7): 1630-1634.
- [2] 郑岿立, 张海军, 陈飞飞. 避免输送黏土管线堵塞的设备和方法[J]. 水运工程, 2018(10): 194-196, 213.
- [3] 杨正军, 郑选斌, 郭志勇. 粗、砾砂水力输送特性试验[J]. 水运工程, 2018(S1): 66-69.
- [4] 陶芳芳, 宁尚雷, 靳海波. 电阻层析成像技术在气液(固)多相流动体系中的应用进展[J]. 过程工程学报, 2020, 20(4): 371-381.

(上接第 134 页)

- [14] 孟吉复, 惠鸿斌. 爆破测试技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [15] 唐海, 李海波. 反映高程放大效应的爆破振动公式研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 820-824.
- [16] 中国工程爆破协会, 广东宏大爆破股份有限公司, 浙江省高能爆破工程有限公司. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [17] 周同岭, 杨秀甫, 翁家杰. 爆破地震高程效应的实验研究[J]. 建井技术, 1997(S1): 31-35.

- [5] BARBER D C, BROWN B H. Applied potential tomography[J]. Journal of the British interplanetary society, 1989, 42(7): 391.
- [6] YANG W Q, SPINK D M, YORK T A, et al. An image-reconstruction algorithm based on Landweber's iteration method for electrical-capacitance tomography[J]. Measurement science & technology, 1999, 10(11): 1065.
- [7] 王涛建. 电阻层析成像(ERT)技术及其在两相流检测中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [8] 肖理庆. 电阻层析成像有限元模型优化与图像重建算法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [9] 张晓菊. 基于牛顿-拉弗逊正则化算法的开放式电阻抗成像研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [10] MATOUSEK V. Research developments in pipeline transport of settling slurries[J]. Powder technology, 2005, 156(1): 43-51.
- [11] GUER Y L, REGHEM P, PETIT I, et al. Experimental study of a buoyant particle dispersion in pipe flow[J]. Chemical engineering research & design, 2003, 81(9): 1136-1143.
- [12] 熊庭, 张梦达, 危卫, 等. 泥浆管道输送特性的 CFD 模拟[J]. 人民黄河, 2018, 40(4): 19-23.
- [13] WANG M, DICKIN J F, MANN R. Electrical resistance tomographic sensing systems for industrial applications[J]. Chemical engineering communications, 1999, 175(1): 49-70.
- [14] LI Y, YANG W Q. Virtual electrical capacitance tomography sensor[C]//Physics: conference series, 2005, 15: 183-188.

(本文编辑 郭雪珍)

- [18] 李春军, 吴立, 付海涛, 等. 基于 AHP-Fuzzy 法的水下爆破设计方案优选[J]. 爆破器材, 2015, 44(4): 45-50.
- [19] 李的林, 高振儒, 朱立新. 爆破震动危害中几个重要因素分析[J]. 工程爆破, 1999(3): 64-67.
- [20] 张志呈. 爆破地震参量与振动持续时间[J]. 四川冶金, 2002(3): 1-4.
- [21] 高富强, 侯爱军, 杨小林, 等. 基于量纲理论的爆破振动持续时间分析[J]. 金属矿山, 2010(9): 143-145.

(本文编辑 王璁)