

嵌入式电容层析成像系统的成像加速方法研究

陆程程¹, 胡红利¹, 唐凯豪², 单宇杰¹, 黄敬轩¹, 董海健³

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 四川大学电气工程学院, 610065, 成都; 3. 西安西电电力电容器有限责任公司, 710082, 西安)

摘要: 为了提高嵌入式系统设计中电容层析成像(ECT)的图像重构速度, 研究了一种针对进阶精简指令集机器加上现场可编程门阵列(ARM+FPGA)硬件架构的图像重构算法加速技术。针对广泛应用且鲁棒的 Landweber 迭代算法(ILA), 首先分析算法结构, 然后基于 FPGA 的流水线特点, 改进 ILA 涉及的循环结构, 从而达到加速的效果。同时, 针对 ARM+FPGA 架构的特点, 讨论了 ARM 核与 FPGA 核各自的任务分配方式, 进一步优化了算法速度。为了验证算法的有效性, 分别在使用 MATLAB 编程和使用提出的加速方法搭建的 ZYNQ 平台进行了图像重构实验, 从图像重构耗时、图像相对误差和图像相关系数 3 个指标论证提出方法的有效性。实验结果显示, 使用搭建的 ZYNQ 平台进行 Landweber 算法成像时, 每个图像的运行时间比使用 MATLAB 编程的运行时间减少了 30%~40%。该研究在保持重构精度的同时有效提升了迭代算法的速度, 对于 ECT 系统的硬件加速具有一定适用性。

关键词: 电容层析成像; 图像重构算法; 硬件加速; 嵌入式系统

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubxb202403017 **文章编号:** 0253-987X(2024)03-0183-10

Research on an Imaging Acceleration Method for Embedded Systems of Electrical Capacitance Tomography

LU Chengcheng¹, HU Hongli¹, TANG Kaihao², SHAN Yujie¹,
HUANG Jingxuan¹, DONG Haijian³

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. Xi'an XD Power Capacitor Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: To increase the image reconstruction speed of electrical capacitance tomography (ECT) in embedded system design, this paper proposes an acceleration method for image reconstruction algorithm in the context of the ARM+FPGA hardware architecture. The structure of the widely-used and robust iterative Landweber algorithm (ILA) is analyzed and then the loop structure within the ILA is modified taking advantage of the FPGA's pipeline features to achieve acceleration. Furthermore, according to the characteristics of the ARM+FPGA architecture, the task allocation of ARM and FPGA cores is discussed to further optimize the speed of the algorithm.

收稿日期: 2023-06-20。 作者简介: 陆程程(2000—), 女, 硕士生; 胡红利(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177009); 四川省自然科学基金资助项目(2023NSFSC1426); 四川大学中央高校基本科研业务费项目(2023SCU12007)。

网络出版时间: 2023-10-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231025.1702.006>

To validate the effectiveness of the proposed algorithm, image reconstruction experiments are conducted on both a desktop computer (using MATLAB programming) and the ZYNQ platform (using the acceleration method proposed in this paper). The effectiveness of the proposed method is demonstrated using three parameters: image reconstruction time, relative error of the reconstructed image, and image correlation coefficient. The experimental results show that when using the platform built in this paper for imaging with ILA, the runtime for each image is reduced by 30%—40% compared with the time when using MATLAB programming on a PC. This study effectively increases the speed of iterative algorithm while maintaining reconstruction accuracy, demonstrating its applicability to hardware acceleration of ECT systems.

Keywords: electrical capacitance tomography; image reconstruction algorithm; hardware acceleration; embedded system

为了满足经济社会发展对清洁能源的需求、推动天然气对传统高碳化石能源进行替代,天然气行业得到了大力发展。在天然气运输过程中,气-水两相流是管道内常见的流动状态,监测并推断出管道内两相流流动特性不仅能保障输送过程中的安全,还能随时根据监测结果进行调控。因此,长久以来,工业生产中的气-水两相流检测问题一直都是国内外专家学者的研究重点与难点^[1-5]。

传统的电容层析成像(ECT)传感器由多个敏感电极组成,均匀贴附在被测管道上,通常电极数量为8、12或16个^[6],在敏感电极外部,采用屏蔽罩以抑制外界对传感器的电磁干扰。传感器工作时,敏感电极阵列接收激励信号,并由开关阵列电路控制成对工作,直至所有电极完成工作。如此,系统采集到的每一组电信号均包含了极板间电容的所有信息。随后,通过信号调制系统对采集到的电信号进行调制,以获得电极板间的电容。调制后的信号传递到信号处理系统进行图像重构,生成介质分布图像数据。最后,数据传输至显示系统中并显示。

这一重构过程又被称为 ECT 技术的逆问题,领域内对此进行过大量研究,其中使用的算法称为图像重构算法,目前的算法主要有迭代法与非迭代法两种。非迭代法即单步法,将图像重构近似为线性过程,具有运行速度快、易于实现、计算量小等优点。由于介电常数分布和电容本质上是非线性关系,几乎不可能通过任何简化的线性模型获得准确的解决方案^[6]。

应用于 ECT 的图像重构迭代算法包含代数重构法(ART)^[7]、同步迭代重构法(SIRT)^[8]、Landweber 迭代法^[9]、共轭梯度法(CG)^[10]等。目前,由于 Landweber 迭代法(ILA)相对于其他方法兼顾了时间成本与图像质量,所以基于 Landweber 的改进算

法^[11-12]一直是研究的热点问题并被广泛应用。

在传统的 ECT 系统中,图像重构算法一般通过计算机在通用处理器上运行,但这种方式存在性能限制。与通用处理器相比,可编程门阵列(FPGA)具有更高的计算效率和更低的功耗^[14-17]。此外,FPGA 还支持深度可变的流水线结构,具有大量的并行计算资源,在一个时钟周期之内就可以完成多种复杂的功能,具有很大的运算优势^[18-21],并增加了传感器的灵活性以及实时性。

为提升基于嵌入式硬件平台的 ECT 系统的成像速度,本文在 FPGA 与 ARM 架构的硬件平台上搭载了 Landweber 图像重构算法,并研究了算法加速策略,提高了嵌入式 ECT 系统的实时成像性能。

1 电容层析成像的原理与算法

1.1 电容层析成像原理

电容层析成像是一种电学层析成像技术,产生于 20 世纪 90 年代。ECT 传感器的结构及电极位置对测量结果精确性有很大影响,结合实际工业的嵌入式优化需要,本文研究的传感器模型结构为圆形 12 电极配置^[6],如图 1 所示。

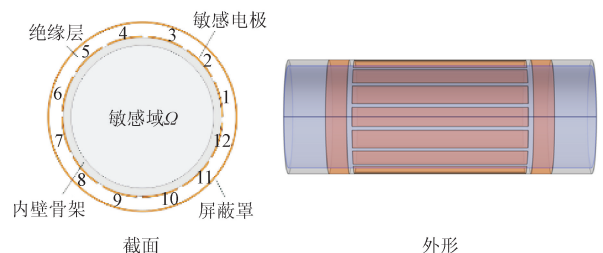


图 1 12 电极 ECT 传感器结构图

Fig. 1 12-electrode ECT sensor structure

图 1 中 ECT 传感器的数学模型可以描述为时谐形式、带有 Dirichlet 边界条件的方程

$$\begin{cases} \nabla^2 \dot{\varphi} = 0 \\ \dot{\varphi}|_{\partial\Omega_n} = \dot{V}_E \\ \dot{\varphi}|_{\partial\Omega \setminus \partial\Omega_n} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{\varphi}$ 为传感器腔体 Ω 电位分布函数; $\partial\Omega$ 为传感器腔体 Ω 的边界; $\partial\Omega_n$ 表示第 n 号 ($1 \leq n \leq 12, n$ 为整数) 电极覆盖的 $\partial\Omega$ 的边界; $\partial\Omega \setminus \partial\Omega_n$ 表示传感器腔体内未被当前激励的电极覆盖的边界; $\dot{V}_E$ 是激励电压。

目前, ECT 的主要原理是使用敏感电极板测量电容, 再利用图像重构算法显示敏感域内与电容相关的介电常数的分布情况, 最终得到不同介电常数的介质分布图像。依据 ECT 的灵敏度理论, 其测量值和介电常数离散分布存在一种线性关系

$$\mathbf{z} = \mathbf{S}\mathbf{g} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{z}$ 为归一化的电容向量; $\mathbf{S}$ 为系统的灵敏度矩阵; $\mathbf{g}$ 为图像的灰度向量。式(2)描述了 ECT 的测量过程。灵敏度矩阵 $\mathbf{S}$ 即可通过电磁场数值计算的方法求解, 电容向量 $\mathbf{z}$ 可以通过传感器电路测量, 于是 ECT 的成像的原理即已知 $\mathbf{S}$ 和 $\mathbf{z}$, 根据式(2) 逆推灰度向量 $\mathbf{g}$, 这一过程被称为 ECT 的逆问题。

图 1 结构的成像区域被均匀剖分成 1 961 个矩形单元, 因此灵敏度矩阵 $\mathbf{S}$ 的大小为 $66 \times 1\,961$, 待求的灰度向量 $\mathbf{g}$ 的大小为 $1\,961 \times 1$ 。

1.2 Landweber 迭代重构算法原理

本文拟对 ECT 领域内广泛使用的 Landweber 迭代算法(ILA)进行改进, 以实现嵌入式平台上的图像重构^[9]。ILA 是一种梯度下降算法, 其思想是用迭代的方式逼近式(2)中 $\mathbf{S}$ 的逆矩阵 $\mathbf{S}^{-1}$ 。ILA 常用于求解 ECT 逆问题中 L_2 范数优化模型, 基于此模型, 由式(2)逆推 $\mathbf{g}$ 的问题可以描述为

$$\mathbf{g}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{g}} \frac{1}{2} \|\mathbf{S}\mathbf{g} - \mathbf{z}\|_2^2 \quad (3)$$

令式(3)的目标函数为 f , 那么

$$f = \frac{1}{2} \|\mathbf{S}\mathbf{g} - \mathbf{z}\|_2^2 \quad (4)$$

则

$$\nabla_{\mathbf{g}} f = \mathbf{S}^T(\mathbf{S}\mathbf{g} - \mathbf{z}) \quad (5)$$

于是, 用梯度下降法求解式(3)的迭代格式可以表达为

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_{k+1} &= \mathbf{g}_k - \alpha \nabla_{\mathbf{g}} f(\mathbf{g}_k) = \\ &\mathbf{g}_k + \alpha \mathbf{S}^T(\mathbf{z} - \mathbf{S}\mathbf{g}_k) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)即为 ILA 的迭代格式。其中, α 为松弛因子, 通常取为

$$\alpha = \frac{2}{\max[\sigma(\mathbf{S})]} \quad (7)$$

式中: $\sigma(\mathbf{S})$ 为灵敏度矩阵 $\mathbf{S}$ 的奇异值。按式(7)的方式确定 α 可以保证迭代格式(6)最终收敛^[22]。

2 嵌入式 ECT 系统的硬件设计

本文设计的硬件系统面向油气开采规划和生产等过程的应用场景^[16]。在该场景中, 为了实现对象对象的可靠监测, 结合实验室采集的具体需求, 管道内流速约为 0.9 m/s, 因此本文采用的高速摄像机拍摄速度为 240 帧/s, 分辨率为 1 080 像素, 系统中算力可以满足每帧拍摄耗时小于等于 0.005 s 的工业需求。嵌入式 ECT 主要包含传感器、测量单元、控制与资料解释单元。其中, 传感器为团队自主设计制造的 12 电极 ECT 传感器^[22]; 测量单元为基于时谐电流法的微小阻抗测量电路^[23]; 控制与资料解释单元是基于 ZYNQ 平台实现的嵌入式上位机^[16], 用于控制 ECT 的轮巡测量、与测量单元通信和图像重构。

为了保证 ECT 传感器的几何参数具有较高的均一性, 本文采用柔性电极表贴工艺制造了 12 电极 ECT 传感器^[24]; 管壁材料为聚醚醚铜, 采用 3D 打印工艺制造; 电极是基于柔性印制电路(FPC)技术制造的。将 FPC 电极表贴在聚醚醚铜管壁上, 并焊接同轴线缆, 最终形成传感器。传感器的核心部件与传感器实物照片分布如图 2 和图 3 所示。

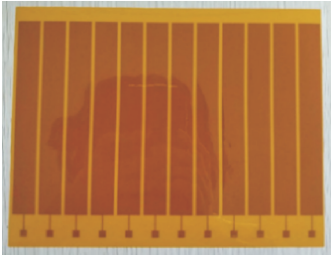


图 2 柔性印制电路板电极

Fig. 2 Flexible printed circuit board electrodes

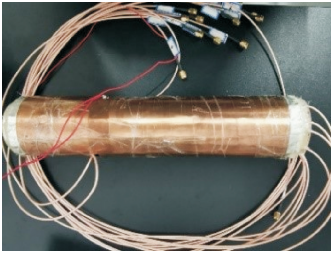


图 3 传感器实物图

Fig. 3 Sensor physical image

为满足高速轮巡测量的要求, 本文设计了多路复用开关阵列电路作为传感器的接口。具体采用模拟多路复用选择器 ADG1606, 开关时间为 ns 级, 导通电阻为 4.5 Ω , 其平坦度为 1.1 Ω , 可以满足数据采集的低失真要求。受控于控制与资料解释单元, 该接口可配置每个电极处于激励状态或检测状态。

接口电路的实物如图 4 所示。

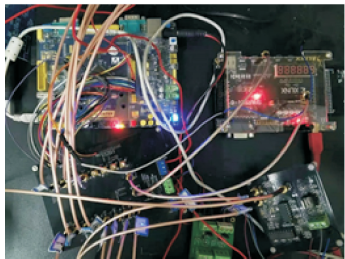


图 4 接口电路实物图

Fig. 4 Physical diagram of interface circuit

为实现可靠的微小电容测量,本文设计了基于时谐电流法原理^[23]的测量单元,原理如图 5 所示,其中 C_x 为待测电容, C_{s1} 、 C_{s2} 为引线对地的杂散电容。图 5 中,采用 MAX038 芯片设计了激励信号源,以产生高频精密的正弦信号,输出频率范围为 0.1 Hz~20 MHz。运算放大器型号为 AD8066,具有 145 MHz 工作带宽。

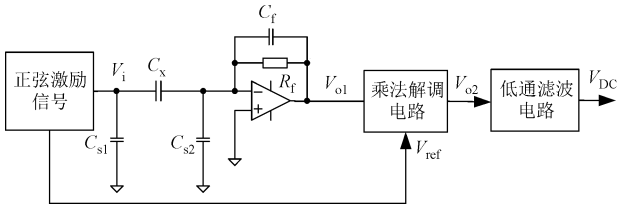


图 5 等效测量电路原理

Fig. 5 Schematic diagram of equivalent measuring circuit

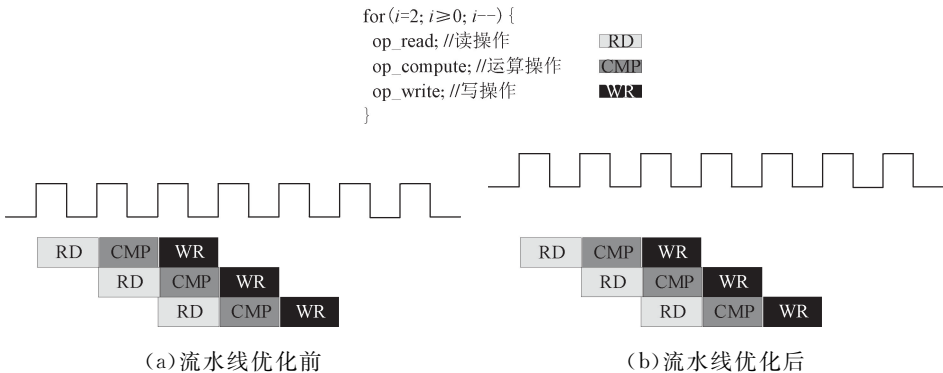


图 6 循环的流水线优化原理

Fig. 6 Pipeline optimization for loops

3.1 考虑依赖性的流水线加速

如果只将 ILA 图像重构算法中的一部分进行移植并使用硬件加速,就需要保证这一部分的程序所需的交互数据量少、加速前运行时间较长,这样才能保证获得足够的程序运行在时间方面的优化。如前文所述,ILA 可以分成两部分嵌套循环,其伪代码如表 1 所示。策略 1 的硬件加速部分伪代码如

图 5 中 C_f 、 R_f 以及运算放大器将经由待测电容流过的电流转换为电压输出 V_{ol} ,设激励信号为 $V_i = A\sin(\omega t + \theta)$,根据电路理论,该电路的电容-电压转换输出为

$$V_{ol} = -\frac{C_x}{C_f}V_i = -\frac{C_x}{C_f}A\sin(\omega t + \theta) \quad (8)$$

3 FPGA+ARM 硬件的加速策略

为进一步保证足够短的图像重构耗时,本文研究了针对硬件结构和 ILA 算法特点的硬件加速方法。图像重构算法加速本质是对大数据量矩阵运算的加速,在 C/C++ 语言中,矩阵运算是通过 for 语句的循环来完成的,因此对相关算法的加速关键在于对嵌套循环的优化。本文采取了展开与流水线优化组合的优化方法。流水线优化是在硬件资源充足时,在一次循环还未完成时就开始下一次的循环,使得吞吐量得到提升;展开则是把循环复制成几个电路使其同时运行,两种方法结合可以进一步提升算法加速的效率。

如图 6 所示,在设置了流水线之后,每个循环周期消耗的时钟周期并没有发生改变,但是在前一次循环执行结束之前下一次循环已经开始,增加了程序的并行性。

表 2 所示。

实验中注意到在循环 loop1_2 中对于浮点数的乘法和累加的运算分别需要 3、4 个时钟周期,而循环的流水线优化也被这一过程影响,无法实现并行化。实际上,造成这样一种现象的原因是由于浮点累加计算的程序中存在一种“反依赖关系”,具体解释为对变量进行读操作之后马上对其进行写操作。

表 1 Landweber 迭代算法伪代码

Table 1 Landweber iterative algorithm pseudocode

输入:Landweber 算法的迭代次数 iteration_time,归一化测量值 z	
输出:灰度列向量 g	
1 for $T \leftarrow 0$ to iteration_time	//按照迭代次数要求开始循环,loop1 表示此循环
2 loop1_1:	
3 for $N \leftarrow 0$ to 66	//第一次矩阵乘法运算的迭代,对图像灰度值的增量进行求解
4 $z_N \leftarrow 0$	
5 loop1_2:	
6 for $M \leftarrow 0$ to 1961	//对 S 中一行的每一个元素进行循环运算
7 $z_N \leftarrow z_N + S_N \times g$	//矩阵乘法乘法运算中的按行浮点累加运算
8 end for	
9 $Q_N \leftarrow z - z_N$	//得到图像灰度值增量
10 end for	
11 loop2_1:	
12 for $M \leftarrow 0$ to 1961	//此迭代对灰度阵列进行求解
13 $g_m \leftarrow 0$	
14 for $N \leftarrow 0$ to 66	
15 $g_m \leftarrow S_M \times Q_N$	//需要修正的灰度阵列值
16 end for	
17 $g_m \leftarrow \alpha g_m + g$	//引入松弛因子,迭代出新的图像灰度阵列
18 $g \leftarrow g_m$	
19 end for	
20 end for	

表 2 策略 1 硬件加速部分伪代码

Table 2 Strategy 1 hardware acceleration part pseudocode

输入:第 1 部分迭代结果 g_{k_in} , 电压信号均一化向 量 Z_{m_in}	
输出:灰度列向量 g_{out}	
1 loop1:	
2 for $N \leftarrow 0$ to 1961	
3 $g_{k_res} \leftarrow 0$	
4 loop1_2:	
5 for $M \leftarrow 0$ to 66	
6 $g_{k_res} \leftarrow g_{k_res} + S_N \times Z_{m_in}$ //矩阵乘法运算中的按行 浮点累加运算	
7 end for	
8 $g_{k_res} \leftarrow \alpha g_{k_res} + g_{k_in}$ //引入松弛因子,迭代出新的 图像灰度阵列	
9 $g_{out} \leftarrow g_{k_res}$	
10 end for	

上述将部分算法进行硬件加速运算的策略可以将特定的算法最大程度的并行化,进而获得快速的运算。但是,这种加速策略需要处理器系统(PS)端

与可编程逻辑(PL)端联合参与图像重构的运算,这就使得硬件加速的效果受制于数据交互的传输速率以及 PS 端程序的执行时间。因此,本文将 ILA 整体全部迁移至 PL 端并进行加速优化,本文这种方法称为策略 2。

一般情况下,需要加以关注的依赖关系可以分为循环内部的依赖关系和循环不同迭代间的依赖关系。针对于这种情况有一个有效的解决方案:使用一种分组的方式消除变量之间的反依赖关系,将同一个组内所用的寄存器通过存储器分割的方式完全展开,使得浮点数运算可以并行运行,在循环完毕后将所有组的元素累加,最终得到运算结果。本文称这种改进寄生关系的优化策略为策略 3。策略 3 的伪代码如表 3 所示。

这种方式进一步结合了数组优化与循环优化方式,在总的运算量不变、流水线优化延迟时间不变的情况下,单次循环所需运行周期的增加与计算量增加意味着并行度的进一步增加。因此,总的延迟时间减少。

表 3 解除反依赖关系 ILA 迭代伪代码

Table 3 ILA pseudocode for removing the dependency

输入:Landweber 算法迭代次数 iteration_time,电压信

号 $\mathbf{Z}_{m_in}$

输出:灰度列向量 $\mathbf{g}_{out}$

1	for $T \leftarrow 0$ to iteration_time
2	loop1:
3	for $N \leftarrow 0$ to 66
4	$temp_i \leftarrow 0$ //将浮点累加运算分组,每组有 i 个元素
5	loop1_1:
6	for $M \leftarrow 0$ to 1961 // $\mathbf{S}$ 中一行的每一个元素进行循环运算
7	loop1_2:
8	$temp_i \leftarrow temp_i + \mathbf{S}_N \times \mathbf{g}$
	//按行浮点累加运算
9	end for
10	loop1_3:
11	$temp \leftarrow temp_i$
	//保存 $temp_i$ 中各元素之和
12	$\mathbf{Q}_N \leftarrow \mathbf{Z}_{m_in} - temp$
	//得到图像灰度值增量
13	end for
14	loop2_1:
15	for $M \leftarrow 0$ to 1961
16	$\mathbf{g}_m \leftarrow 0$
17	loop2_2:
18	for $N \leftarrow 0$ to 66
19	$\mathbf{g}_m \leftarrow \mathbf{S}_M \times \mathbf{Q}_N$
20	end for
21	$\mathbf{g}_m \leftarrow \alpha \mathbf{g}_m + \mathbf{g}$
22	$\mathbf{g}_{out} \leftarrow \mathbf{g}_m$
23	end for
24	end for

3.2 结果分析

这些策略的流程优化首先在 Vivado 软件上进行测试,实际优化用时将在实验中实际测量。各优化策略所需的运算时间即时间复杂度如表 4 所示。

表 4 本文各优化策略时间复杂度的对比

Table 4 Comparison of time complexity of optimization

strategies

优化策略	时钟周期/ns	完成运算 所需周期数	时间/ms
策略 1	10	1 214	2 743
策略 2	10	166 238 521	2 329
策略 3	10	35 845 021	1 024

表 4 中,时间是指系统得到输入后与计算完毕后得到输出结果之间的时间差。结果表明,改进寄生关系的策略 3 优化效果在 3 种策略中所需的运算时间大幅下降。

4 实 验

基于 ZYNQ 平台的 ECT 系统原理和实验平台如图 7 和图 8 所示。

在传统的电学层析成像系统中,信息处理部分一般采用计算机通用处理器进行运算。使用通用处理器开发周期短,但它具有更大的体积、更高的功耗和成本。如果能够加入设计好的专用硬件则可以使用并行架构加速运算,减少拥有大计算量的图像重构运算的运算时间,提高系统的吞吐量,使系统能够在高动态要求的情况下得以应用。现场可编程门阵列(FPGA)具有极好的逻辑容量以及高度的使用灵活特性,是硬件并行计算器的理想平台。

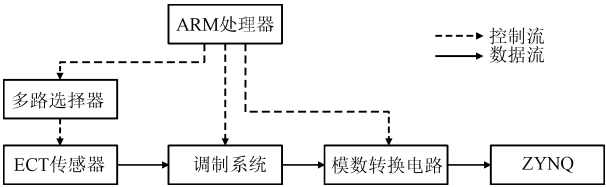


图 7 基于 ZYNQ 的 ECT 系统电路原理图

Fig. 7 Circuit diagram of ECT system based on ZYNQ

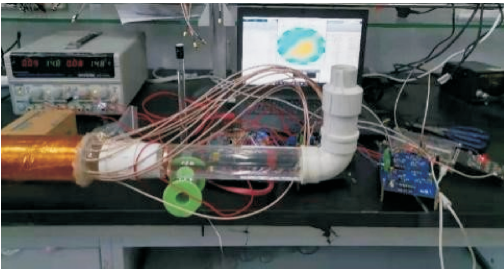


图 8 基于 ZYNQ 的系统实验平台

Fig. 8 System experiment base on ZYNQ platform

在 ZYNQ 中, 硬件部分在 ECT 系统中主要作用包含数据传输以及图像重构硬件加速算法的处理。使用 Vivado 来进行编译、综合以及实现, 该系统的整体框架如图 9 所示。

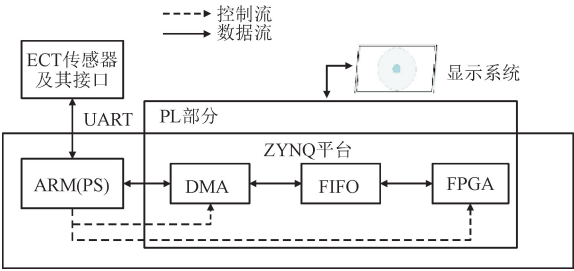


图 9 基于 ZYNQ 的 ECT 硬件加速处理部分框架
Fig. 9 ECT hardware acceleration processing based on ZYNQ

ECT 系统采集到的数据通过通用异步收发器 (UART) 串口传输到 ZYNQ 系统中, 而后使用其中 PS 部分的 ARM 处理器, 将数据通过 PL 端的直接内存访问 (DMA) 控制器传输到 FPGA 加速模块中进行处理。其中 FPGA 模块使用高层综合 (HLS) 搭建实现, 该部分主要对 ILA 中的大型矩阵运算进行循环优化。当加速模块运算结束后, 将处理结果传回 PS 端。在此过程中, 由 PS 部分的 ARM 处理器对整个流程进行控制, 除此之外, PS 端还负责图像重构计算过程的流程控制, 包括数据输入、DMA 与 FPGA 的配置以及数据的输出, 其流程如图 10 所示。

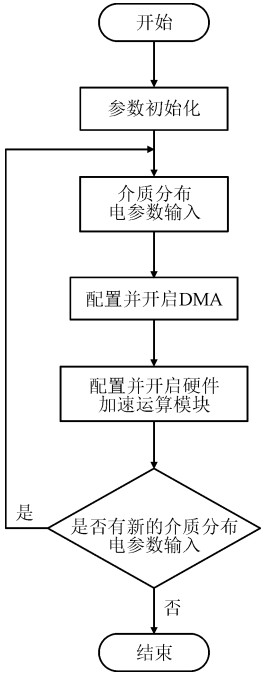


图 10 基于 ZYNQ 的 ECT 系统软件流程
Fig. 10 ZYNQ ECT system software flow chart

通过对气-水两相流进行相关参数的采集, 并将数据采集的结果交给 ZYNQ 进行硬件加速, 处理后的结果通过上位机显示出来, 并最终得到重构图像。本文测量的介质分布模型如图 11 所示。

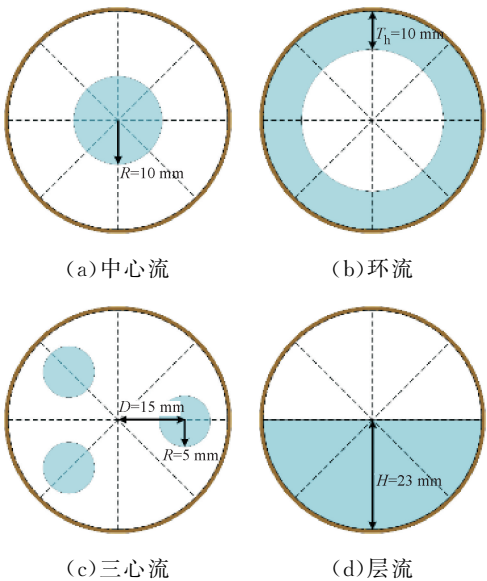


图 11 本文测量的介质分布模型
Fig. 11 Medium distribution model measured in this paper

实验中, 综合考虑图像质量, ILA 的迭代次数为 300 次; 进行图像重构的总用时在 230~360 ms, 而 ZYNQ 平台的总用时为 150~225 ms。以计算机的重构时间减去 ZYNQ 重构时间 Δt 在计算机重构用时所占比例来衡量硬件加速的加速效果。在 ZYNQ 以及在计算机进行数据处理后的各重构图像如表 5 所示。

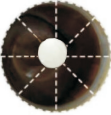
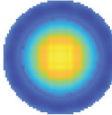
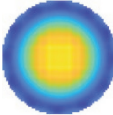
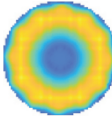
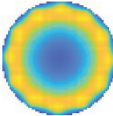
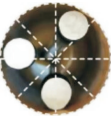
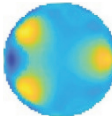
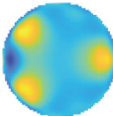
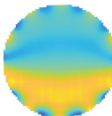
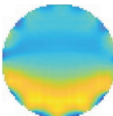
从表 5 可以看到, ZYNQ 和计算机重构出的图像有着一定的差距, 这主要是因为: 在 ZYNQ 中所参与运算的数据是 16 位的, 而计算机上参与运算的数据是 32 位的, 这就导致了图像重构算法运行过程中会产生截断误差, 进而影响了图像重构的效果; 其次在 ZYNQ 上固定的迭代因子 α 以及阈值的选取也对图像重构的结果造成影响。

为了评价生成图像的质量, 引入图像相关系数 c_{img} 、图像相对误差 e_{img} ^[23] 两种图像重构质量指标。图像相关系数主要用于评价两个图像之间的相似程度, 表达式为

$$c_{\text{img}} = \frac{\sum (g_i^{\text{reco}} - \bar{g}^{\text{reco}})(g_i^{\text{real}} - \bar{g}^{\text{real}})}{\sqrt{\sum (g_i^{\text{reco}} - \bar{g}^{\text{reco}})^2 \sum (g_i^{\text{real}} - \bar{g}^{\text{real}})^2}} \quad (9)$$

表 5 硬件加速实验结果对比

Table 5 Comparison of experimental results of hardware acceleration

介质分布状态	实验装置	计算机重构	ZYNQ 重构	$\Delta t/\text{ms}$	加速效果/%
中心流				82	35.3
环状流				127	35.8
三心流				108	37.1
层流				134	39.0

式中： $\bar{\mathbf{g}}^{\text{reco}}$ 和 $\bar{\mathbf{g}}^{\text{real}}$ 为重构灰度向量和真实灰度向量的均值； $\mathbf{g}_i^{\text{real}}$ 为真实灰度向量的第 i 个元素； $\mathbf{g}_i^{\text{reco}}$ 为重构真实灰度向量的第 i 个元素。当相关系数越高，证明重构的介质分布与理想的介质分布图像的相关性高、所重构的图像效果越好。

图像相对误差 e_{img} 可以衡量重构介质分布与原始的介质分布之间的差异，表达式为

$$e_{\text{img}} = \frac{\|\mathbf{g}^{\text{reco}} - \mathbf{g}^{\text{real}}\|}{\|\mathbf{g}^{\text{real}}\|}$$

(10)

式中： $\mathbf{g}^{\text{reco}}$ 和 $\mathbf{g}^{\text{real}}$ 分别为重构和真实灰度向量。在实际使用中，式(10)中的范数为向量的二范数。

通过这些评价指标对 ILA 重构图像和改进后重构图像的质量进行评价，结果如表 6 所示。可以看到，在数据评价上，除层流以外其他流型的图像相似度比较高，图像相对误差较低，证明了 ZYNQ 平台运行图像重构运算的可靠性。

表 6 ZYNQ 重构图像结果

Table 6 Results of ZYNQ reconstructed images

介质分布状态	图像相关系数	图像相对误差
中心流	0.963	0.040
环状流	0.941	0.105
三心流	0.972	0.013
层流	0.736	0.210

由于数据位宽和迭代系数等问题，使用 ZYNQ 进行图像重构仍然与计算机图像重构有一定差别，

但是根据结果可以看出误差尚在可接受范围内。在流型识别以及其他方面的应用中会大大缩减时间成本，提高效率。

需要说明的是，MATLAB 软件的求解器内置对矩阵求解的算法优化流程，相反嵌入式平台受限于芯片资源，只能通过自定义硬件电路来实现算法加速。本文 FPGA+ARM 的硬件加速方案经过实验对照，比使用 MATLAB 编程的优化效果更加显著。所以除了便携性外，在相似资源的使用下，FPGA+ARM 方案仍可以提供更高的计算性能和效率，这是由其深度定制的并行架构带来的优势，仍具有在特定应用场景下替代甚至超过目前通用方案的潜力。

5 结 论

本文设计了一种在 ARM+FPGA 构架上的图像重构加速技术和嵌入式 ECT 系统，并对该系统性能做出了评价，得到主要研究成果如下。

(1)在图像重构算法方面，本文沿用了经典的 Landweber 算法，在 FPGA 的协同下，对其循环结构进行了考虑依赖性的流水线加速，提出 3 种优化策略。结果表明，改进反依赖关系后的加速策略运算时间减少 50% 以上，优化效果比改进前得到很大提升。

(2)在硬件设计部分，本文针对 ECT 系统的图像重构算法运行时间较长的问题进行了改进，开发

了一种基于 ZYNQ 的 ECT 硬件加速系统。搭建了 ECT 气-水两相流型显示系统实验平台,并进行实验验证。实验结果表明,该硬件加速系统在使用 ILA 算法进行成像时每个图像所需运行时间比使用 MATLAB 编程运行的用时减少了 30%~40%。由此证明了利用 FPGA 进行大规模矩阵运算的高效性和快速性。

参考文献:

- [1] COSTA M G, LEITE J M, BECKEDORFF L, et al. Static pressure behavior of gas-liquid flows along a Venturi [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, 43(11): 498.
- [2] ABRAR U, YOUSAF A, JAFFRI N R, et al. Analysis of complex solid-gas flow under the influence of gravity through inclined channel and comparison with real-time dual-sensor system [J]. *Electronics*, 2021, 10(22): 2849.
- [3] JEANMEURE L F C, DYAKOWSKI T, ZIMMERMAN W B J, et al. Direct flow-pattern identification using electrical capacitance tomography [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 26(6/7): 763-773.
- [4] WANG Shengnan, YE Jiamin, YANG Yunjie. Quantitative measurement of two-phase flow by electrical capacitance tomography based on 3D coupling field simulation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(18): 20136-20144.
- [5] TIAN Wenbin, SUO Peng, LIU Dong, et al. Simultaneous shape and permittivity reconstruction in ECT with sparse representation: two-phase distribution imaging [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-14.
- [6] PENG Lihui, YE Jiamin, LU Geng, et al. Evaluation of effect of number of electrodes in ECT sensors on image quality [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(5): 1554-1565.
- [7] 张顺利, 张定华, 李明君, 等. 基于 SIMD 技术的锥束 ART 算法快速并行图像重建 [J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(3): 630-634.
ZHANG Shunli, ZHANG Dinghua, LI Mingjun, et al. Fast parallel image reconstruction with cone-beam ART algorithm based on SIMD technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(3): 630-634.
- [8] 颜华, 孙灿烽, 王伊凡. 基于改进 SIRT 算法的声学 CT 温度场重建 [J]. *沈阳工业大学学报*, 2021, 43(5): 550-556.
- YAN Hua, SUN Canfeng, WANG Yifan. Temperature field reconstruction of acoustic CT based on improved SIRT algorithm [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2021, 43(5): 550-556.
- [9] 王化祥, 王超, 陈磊. 基于 Landweber 迭代的图像重建算法 [J]. *信号处理*, 2000, 16(4): 354-356.
WANG Huaxiang, WANG Chao, CHEN Lei. An image reconstruction algorithm based on the Landweber iteration method [J]. *Journal of Signal Processing*, 2000, 16(4): 354-356.
- [10] 李秀艳, 韩倩, 汪剑鸣, 等. 基于改进共轭梯度法的 ERT 图像重建 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(7): 1673-1679.
LI Xiuyan, HAN Qian, WANG Jianming, et al. ERT image reconstruction based on improved CG method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(7): 1673-1679.
- [11] REAL R, JIN Qinian. A revisit on Landweber iteration [J]. *Inverse Problems*, 2020, 36(7): 075011.
- [12] 严春满, 穆哲, 张道亮, 等. 基于改进 Landweber 算法的 ECT 图像重建 [J]. *传感技术学报*, 2019, 32(10): 1522-1526.
YAN Chunman, MU Zhe, ZHANG Daoliang, et al. ECT image reconstruction based on improved Landweber algorithm [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(10): 1522-1526.
- [13] ZHANG Xuehui, WANG Huaxiang, CUI Ziqiang, et al. A novel ECT system based on FPGA and DSP [C]//Second International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC 2007). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 510.
- [14] CASTILLO E, MORALES D P, MARTINEZ-OLMOS A, et al. Parametrized ECT processing over FPGA for a reconfigurable application [C]//2015 Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1-6.
- [15] SHEHAZ F. An electrical capacitance tomography system for real-time process imaging [C]//Applications of Digital Image Processing XLIII. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2020: 1151036.
- [16] ALLAM A, DEABES W. Model-based hardware-software codesign of ECT digital processing unit [J]. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2021, 2021: 4757464.
- [17] DEABES W. FPGA implementation of ECT digital system for imaging conductive materials [J]. *Algorithms*, 2019, 12(2): 28.
- [18] MERIBOUT M, TENIOU S. A pipelined parallel

- hardware architecture for 2-D real-time electrical capacitance tomography imaging using interframe correlation [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2017, 25(4): 1320-1328.
- [19] MERIBOUT M, SAIED I M. Real-time two-dimensional imaging of solid contaminants in gas pipelines using an electrical capacitance tomography system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 3989-3996.
- [20] MA Min, YA Chaoqi. Analysis of gas/solid two-phase flow imaging system based on ECT technology [C]// 2017 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-6.
- [21] CHEN Dixiang, YANG Wuqiang, PAN Mengchun. Design of impedance measuring circuits based on phase-sensitive demodulation technique [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(4): 1276-1282.
- [22] 唐凯豪. 用于气水两相流可视化监测的电容层析成像技术关键问题研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2022.
- [23] 王化祥. 电学层析成像 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [24] 唐凯豪, 胡红利, 李林, 等. 利用场量旋转变换的电容层析成像灵敏度系数简易计算方法 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(3): 75-80.
- TANG Kaihao, HU Hongli, LI Lin, et al. Simplified method for electrical capacitance tomography sensitivity coefficient computation with specific-electrode-excited field quantities rotation transformation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(3): 75-80.

(编辑 杜秀杰)