

相控阵超声螺纹缺陷检测成像方法研究与实现

测卓2101班：于平洋 指导教师：燕并男 论文类型：毕业论文

摘要：本文针对相控阵超声扇扫成像存在数据量大，实时成像效果差的问题，提出了一种基于GPU的并行计算方法，并基于Qt平台开发了相控阵超声检测成像系统，集成了检测参数设置、二维成像和远程通信等功能。实验结果表明，基于GPU的并行计算方法在保证成像质量的同时，能够显著提升扇扫成像速度，针对 36×512 的A扫数据到 1024×960 的扇扫图像转换，帧率可达60fps，与基于CPU串行计算方式相比，加速比达到45倍。最后，通过搭建实验平台，对0.5mm深度的钻杆螺纹裂纹缺陷开展灵敏度检测实验，验证了相控阵超声检测成像系统具有良好的二维成像质量与实时检测能力，可实现对0.5mm钻杆螺纹裂纹缺陷的有效检出。

关键词：相控阵超声检测；钻杆螺纹；缺陷检测；并行计算；扇形扫描成像

1 研究背景

随着钻井向超深井发展，作业难度提升，对钻杆性能要求更高。钻杆通过螺纹接头连接，在长期服役过程中易受高温、腐蚀、磨损及拉伸应力影响，接头螺纹连接处易产生裂纹等缺陷，导致钻杆螺纹失效甚至断裂，带来安全和经济风险。因此，开展钻杆螺纹无损检测对钻井作业具有重要意义。

相控阵超声无损检测具有检测精度高、灵敏度高、成像清晰可观、检测效率高等优势，适用于钻杆螺纹的微小裂纹缺陷的快速检测。由于钻杆螺纹的裂纹缺陷通常沿螺旋方向延伸，常采用相控阵超声扇扫检测方法，其中扇扫成像方法的分辨率与实时性影响着系统的缺陷检出能力，成像结果差会导致图像中缺陷特征不突出，产生漏检等问题。

综上所述，本论文设计一种钻杆螺纹裂纹缺陷检测方案，通过实验采集超声信号，研究基于超声信号的二维成像方法，得到一种成像质量高、实时性好的二维成像算法，为相控阵超声钻杆螺纹缺陷检测系统设计提供算法实现。

2 发展现状

相控阵超声扇扫成像方法影响着相控阵超声技术在微小缺陷、复杂工件等方面的检测能力，近年来，许多研究者在成像分辨率提升、缺陷定位精度以及成像速度的提高方面做了大量研究。提出了最邻近插值与查找表法、双缓冲技术与多线程开发、选择抽样技术与图像后处理方法等来改进扇扫成像算法，但往往难以兼顾成像质量与速度这一对矛盾的指标。

2.1 成像实时性差问题分析

当扇形扫查的扫查角度为 $35^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ，步进角度为 1° ，采样点数为512点时，一幅扇扫图像包含18432个采样点数据，B扫成像结果如图2.1（a）所示；然后，对B扫成像进行坐标转换处理，实现图像校正效果，结果如图2.1（b）所示；最后，对坐标转换后的图像插值处理，提升成像质量，在这一步中需要对扇扫区域中的所有黑色像素点（约50万个像素点）完成插值操作，如图2.1（c）所示。由此可见，采用常规扫描转换方法进行扇扫成像的计算量巨大，实时成像效果较差。

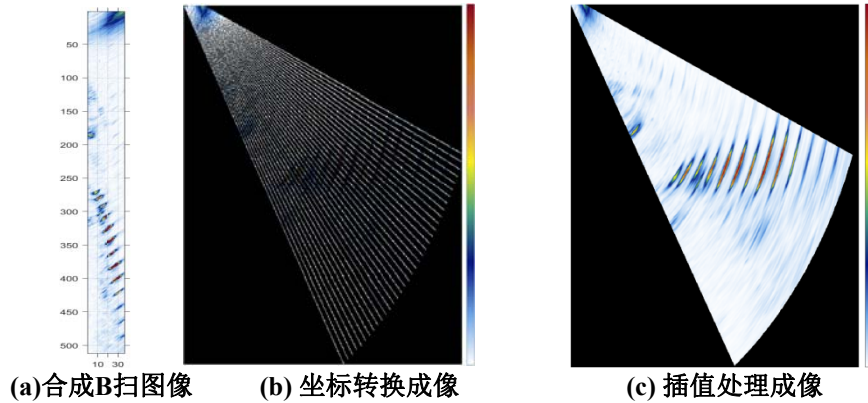


图 2.1 扇形扫描转换过程图

2.2 成像质量低问题分析

扇形扫描转换算法经过坐标转换后，原B扫图像中的像素点被映射到扇扫图中的对应位置，为了依然保持线性插值理念，提升插值后的图像质量，采用适用于非矩形空间的插值方法，首先确定待插值点邻近的四个或者十六个参考点，接着建立声程方向与相邻采样点之间的直线方程，构造等效矩形空间，最后依据重新计算的距离权重系数对邻近点的像素值进行加权计算，完成图像插值。但是这种算法需要预先计算并存储大量直线方程，占用较多存储资源，对应直线方程的查询过程也较为复杂，算法计算量较高。

3 改进的扇扫成像算法及实验验证

为解决常规扇扫成像算法难以兼顾成像质量与成像速度的问题，本章提出了一种基于GPU的并行扫描成像算法，并基于QT开发了上位机成像软件，最后通过实验验证了本文方法的有效性。

3.1 扇扫成像算法改进及成像软件设计

3.1.1 改进的并行扫描扇扫成像算法

扇扫图像由阵列换能器接收的多条A扫信号组成，形成一个二维B扫矩阵，横轴为扇扫步进角度值，纵轴为采样点时间间隔。通过提高采样率和减小步进角可提升成像分辨率。通过纵向和横向线性插值，可以提升采样率与角度分辨率。经实测，当等效采样率达100MHz，角度分辨率减小至 0.05° 时，经坐标转换后可完整覆盖扇形

区域。该方法在矩形空间内处理，计算更高效，快速并行算法显著降低了复杂度，提高了实时成像能力。

3.1.2 基于GPU的并行计算方法实现

为进一步提升成像实时性，本论文提出了一种基于CUDA架构的 GPU 并行计算方法，通过异构计算系统实现算法部署，充分发挥CPU与GPU协同处理的优势。CPU负责调度和管理，GPU承担核心计算模块，实现任务划分与并行优化，从而显著提升成像效率。

快速并行扫描优化算法主要包含轴向和横向的线性插值，坐标转换运算，这些运算都是高度并行的模块，可以将其放到GPU上运行，充分利用GPU的计算资源进行加速运算。而CPU负责读取原始A扫数据、计算插值系数以及图像显示等低计算密度的任务。设计基于GPU的快速并行扫描优化算法流程图如图3.1所示。主要包括初始化阶段、扫描转换、成像显示这三部分。

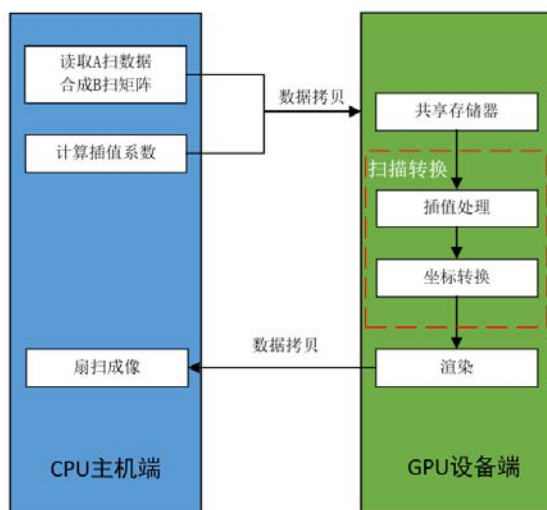


图 3.1 基于 GPU 的并行计算方法流程图

3.1.3 基于Qt的实时成像软件开发

本节基于前述GPU加速的并行计算方法，在Qt平台上开发了实时成像软件，软件具备远程通信、参数设置、二维成像以及数据存储与导出等功能。以某公司相控阵超声检测仪器作为下位机，构建了相控阵超声检测实时成像系统，为钻杆螺纹缺陷实时检测提供了实现方案。

3.2 实验结果分析

3.2.1 成像实时性实验结果分析

为分析成像实时性，分别采用CPU顺序执行、多线程执行和GPU并行计算三种方法实现并行扫描成像算法，对规模为 36×512 的数据进行成像，实验耗时结果见表3.1。由表中数据可见，基于GPU并行计算方法在处理 36×512 规模数据的帧频可达到60FPS，相较于CPU顺序执行的加速比可达到45倍。

表 3.1 数据规模为 36*512 成像平均耗时

CPU顺序执行处理成像 耗时/ms	基于 CPU多线程处理 成像耗时/ms	基于 GPU并行计算处理成 像耗时/ms
712.875	215.85	15.875

3.2.2 螺纹缺陷检测实验结果分析

采用上位机软件结合相控阵超声仪器对人工螺纹缺陷进行扇扫检测，裂纹缺陷如图3.2所示，缺陷尺寸为长20mm，宽1mm，深0.5mm。

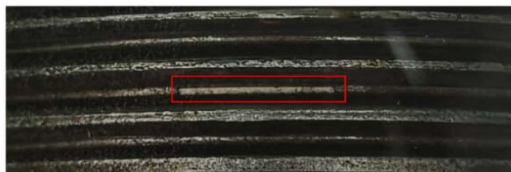


图 3.2 人工裂纹缺陷

检测成像结果如图3.3所示。图3.3(a)为无缺陷时的成像结果，图3.3(b)为检测到该裂纹缺陷的成像结果，观察图中S扫成像发现，在第二根与第三根螺纹中间存在一条横向分布的裂纹缺陷，缺陷位置与形状与实际缺陷相符；观察图中A扫成像发现，缺陷回波幅值达到40%~50%，实现了对该裂纹缺陷的有效检出。

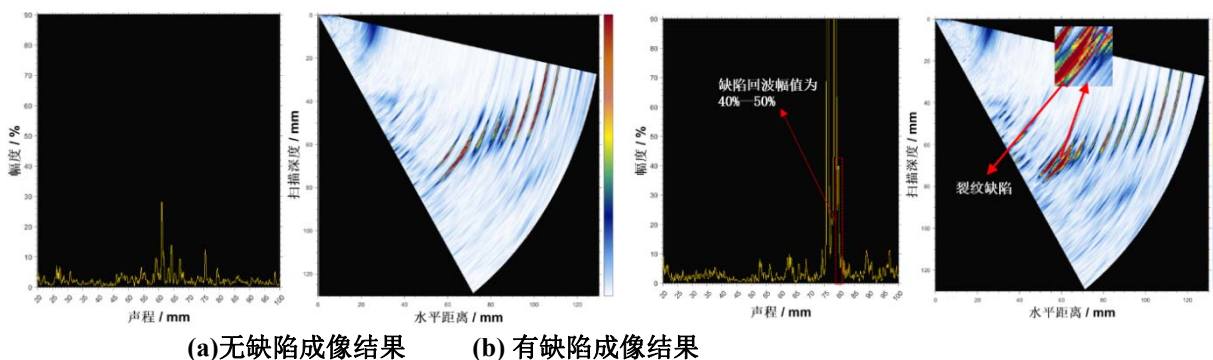


图 3.3 检测成像结果

4 研究结论及对策建议

4.1 研究结论

本论文提出了并行扫描成像算法并基于GPU完成其实现，经实验验证，在保证成像质量的前提下，成像帧频可达到60fps，加速比达到45倍。基于QT开发了上位机成像软件，具有通信、参数设置与二维成像等功能。设计了相控阵超声实时成像系统，通过灵敏度验证，该系统能够实现对0.5mm深度裂纹缺陷的有效检出。

4.2 对策与建议

为进一步提升系统在缺陷检出与定量方面的能力，后续将开展基于扇扫模式的C扫成像、全聚焦成像及三维成像等研究。