

# 基于正交实验的超声成像参数优化研究

顾海航<sup>1</sup>, 侯书豪<sup>2</sup>, 刘宇超<sup>1</sup>, 夏玉<sup>1</sup>, 李欣瑶<sup>1</sup>, 杨欣<sup>3</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学机械工程学院, 上海

<sup>2</sup>上海理工大学材料与化学学院, 上海

<sup>3</sup>上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2024年12月16日; 录用日期: 2025年1月9日; 发布日期: 2025年1月17日

## 摘要

超声成像作为一种常用的医学影像技术, 在临床诊断和治疗中具有广泛的应用。然而, 超声成像的图像质量和成像效果往往受到多种因素的影响, 其中包括超声探头参数的选择和超声成像系统的设置等。本研究旨在通过正交实验的方法, 对超声成像参数进行优化, 以提高超声成像的分辨率、灵敏度和对比度等关键指标。首先介绍了研究现状以及设计的试验需要的成像系统, 然后针对超声成像中常用的关键参数, 如频率、增益、成像深度、扫描速度, 设计了正交试验, 并对试验结果进行了统计分析和数据处理。通过对比不同参数组合下的超声成像效果, 确定了最优的参数组合方案。

## 关键词

超声成像, 成像系统, 正交试验

# Optimization of Ultrasonic Imaging Parameters Based on Orthogonal Experiments

Haihang Gu<sup>1</sup>, Shuhao Hou<sup>2</sup>, Yuchao Liu<sup>1</sup>, Yu Xia<sup>1</sup>, Xinyao Li<sup>1</sup>, Xin Yang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>School of Materials and Chemistry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>3</sup>School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 16<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 9<sup>th</sup>, 2025; published: Jan. 17<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

As a commonly used medical imaging technology, ultrasound imaging has been widely used in

文章引用: 顾海航, 侯书豪, 刘宇超, 夏玉, 李欣瑶, 杨欣. 基于正交实验的超声成像参数优化研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 593-599. DOI: 10.12677/mos.2025.141055

clinical diagnosis and treatment. However, the image quality and imaging effect of ultrasonic imaging are often affected by many factors, including the selection of ultrasonic probe parameters and the setting of ultrasonic imaging system. The aim of this study is to optimize ultrasonic imaging parameters by orthogonal experiment, so as to improve the resolution, sensitivity and contrast of ultrasonic imaging. Firstly, the research status and the imaging system needed for the designed test are introduced. Then, orthogonal tests are designed for the key parameters commonly used in ultrasonic imaging, such as frequency, gain, imaging depth and scanning speed, and statistical analysis and data processing are carried out on the test results. By comparing the ultrasonic imaging effect under different parameter combinations, the optimal parameter combination scheme is determined.

## Keywords

Ultrasonic Imaging, Imaging System, Orthogonal Test

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

### 1.1. 研究背景

超声成像是一种广泛应用于医学诊断和工业无损检测的技术，具有无创、实时和安全等优点，广泛应用于心脏病、肝病、胎儿发育等多个医学领域，以及材料缺陷检测等工业领域[1]。然而，超声成像质量受到诸多参数的影响，如频率、增益、焦距和声速等，合理的参数选择和优化对成像质量至关重要。优化这些参数可以显著提高图像的分辨率和对比度，从而提升诊断的准确性。

目前，超声成像参数的选择多依赖经验或试错法，这种方法不仅耗时费力，还难以找到最佳参数组合。为提高优化效率，研究者们引入了多种优化方法，如遗传算法和粒子群优化算法[2]。然而，这些方法通常计算复杂度较高，难以在实际应用中推广[3]。

### 1.2. 研究目的与意义

本研究旨在采用正交实验法对超声成像的关键参数进行优化。正交实验法是一种高效的实验设计方法，通过合理安排实验，可以在较少实验次数下，系统地考察多个因素对结果的影响，找出最优参数组合。与传统的单因素试验和全因素试验相比，正交实验法不仅大大减少了实验次数，还能全面分析各因素及其交互作用对成像质量的影响。

本研究的创新之处在于将正交实验法应用于超声成像参数优化，通过实验设计和数据分析，确定影响成像质量的主要参数及其最佳组合，从而提高超声成像的质量与效率。研究成果不仅为医学影像诊断提供技术支持，还为相关领域的超声成像技术发展提供新思路和方法。

本研究的意义在于：提高超声成像质量，通过优化参数提升图像分辨率和对比度，从而提高诊断准确性；节约实验资源，通过正交实验法减少实验次数，节省时间和成本；推广优化方法，为其他成像技术和参数优化提供借鉴，具有广泛的应用前景。我们期望通过本研究为超声成像参数优化提供高效、实用的方法，推动超声成像技术的发展与应用。

## 2. 实验系统的搭建

本超声成像系统利用 FPGA 和多个高性能硬件模块，如图 1 包含 TX7332 脉冲发射控制、AFE5818

接收处理、FPGA 数据处理与传输、USB 3.0 数据传输与上位机显示，构建了一个高效、实时的超声成像解决方案[4]。通过该系统，我们能够实现超声信号的精确发射与接收、实时信号处理和图像重建，并通过 USB 3.0 高速接口将成像数据传输到上位机，进行实时显示与分析。

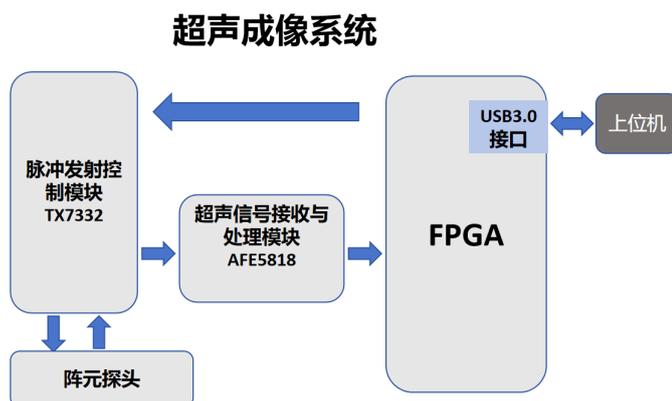


Figure 1. System block diagram  
图 1. 系统框图

### 2.1. 脉冲发射控制模块

脉冲发射控制模块采用 TX7332 进行脉冲发射，该模块的主要任务是生成用于激励超声探头的脉冲信号。该模块由 FPGA 控制，负责产生精确的脉冲波形并调整其频率、幅度和时序[5]。FPGA 内部使用定时器模块来控制脉冲的发射周期、宽度和间隔，确保每次脉冲信号的发射时机准确无误。根据不同的成像模式，FPGA 还需要动态调整脉冲的发射特性，如频率和脉冲间隔，以满足不同深度和分辨率的需求。此外，FPGA 控制系统还需要与 AFE5818 的接收部分保持时序同步，确保发射与接收之间的时间匹配，从而避免数据错乱或图像畸变。

### 2.2. 超声信号接收与处理模块

超声信号接收与处理模块由 AFE5818 负责，它是一个专为超声成像设计的模拟前端芯片。AFE5818 的主要功能是接收来自超声探头的回波信号，并对其初步的信号处理[6]。首先，它对接收到的模拟信号进行增益控制，以确保信号的幅度在可处理的范围内。然后，AFE5818 内置的高精度 ADC (模数转换器)将模拟信号转换为数字信号，以便进一步处理。为了去除不必要的噪声和干扰，AFE5818 还内建了一些滤波功能，如低通或带通滤波，优化信号的质量。在此阶段，回波信号的精度和质量被大大提高，准备好传送给 FPGA 进行后续的数据处理和图像重建。

### 2.3. 数据处理与传输模块

数据处理与传输模块是系统的核心，它接收来自 AFE5818 的数字信号并进行复杂的信号处理与图像重建。FPGA 执行时延聚焦(TDF)算法，将接收到的回波信号进行时间延迟补偿，确保来自不同深度和角度的回波信号能够准确聚焦，生成清晰的图像[7]。FPGA 还实现了基于回波信号强度的 B 模式成像算法，通过逐个处理每个接收到的信号点来构建超声图像。此外，FPGA 负责处理图像生成过程中的数据存储和计算，利用其强大的并行计算能力高效完成图像的重建。在图像生成后，FPGA 通过 USB 3.0 接口将处理后的成像数据高速传输到上位机。为了确保系统的实时性，FPGA 需要管理好各个处理模块的时序与同步，避免数据丢失或延迟。

## 2.4. 数据传输与显示模块

数据传输与显示模块的主要功能是通过 USB 3.0 高速接口将 FPGA 处理后的图像数据传输到上位机，并进行显示和进一步处理。FPGA 将图像数据通过 USB 3.0 控制器传输到计算机，确保数据传输的高速和稳定性。上位机通过 MATLAB 图像处理工具接收图像数据，并将其转化为可视化的超声图像。这些软件还可以进一步处理图像，此外，用户可以通过上位机的图形用户界面(GUI)调整成像参数，如增益、焦距、扫描速度、成像深度等，以适应不同的扫描需求。上位机还可将实时图像存储，供后续分析和比较使用。

## 3. 实验设计与结果分析

### 3.1. 实验设计

超声成像的图片质量受到多种因素的影响，主要有超声频率、增益、成像深度、扫描速度、焦距。本实验选以上五个因素作为主要因素进行实验，分别为 A、B、C、D、E，将每个因素设置成四个水平，采用标准正交表进行四水平五因素的正交实验[8]，于是可以列出本实验因素水平表 1。在每次实验后，对超声图像进行评估，以图像清晰度、信噪比和分辨率三个方面进行评分，每个方面均为满分 10 分，总分为 30 分，将三个方面的分数加在一起作为最后的结果。

**Table 1.** Level table of orthogonal experimental factors

**表 1.** 正交实验因素水平表

水平	因素				
	A 超声频率 (HZ)	B 增益 (dB)	C 成像深度 (mm)	D 扫描速度 (mm/s)	E 焦距 (mm)
1	2	40	10	10	8
2	4	45	15	15	12
3	6	50	20	20	16
4	8	55	25	25	20

### 3.2. 实验结果

按照表 2 的正交试验设计方案展开实验，得出的结果如表 2 所示。

**Table 2.** Test plan

**表 2.** 试验方案

所在列	1	2	3	4	5	
因素	A 超声频率	B 增益	C 成像深度	D 扫描速度	E 焦距	实验结果
实验 1	1	1	1	1	1	18
实验 2	1	2	2	2	2	20
实验 3	1	3	3	3	3	24
实验 4	1	4	4	4	4	23
实验 5	2	1	2	3	4	21
实验 6	2	2	1	4	3	25
实验 7	2	3	4	1	2	26
实验 8	2	4	3	2	1	29

续表

实验 9	3	1	3	4	2	28
实验 10	3	2	4	3	1	24
实验 11	3	3	1	2	4	29
实验 12	3	4	2	1	3	19
实验 13	4	1	4	2	3	27
实验 14	4	2	3	1	4	28
实验 15	4	3	2	4	1	20
实验 16	4	4	1	3	2	16

### 3.3. 结果处理

#### 3.3.1. 极差分析

通过极差分析,可以直观的知道因素对指标的影响,极差越大,说明该因素对指标的影响效果越明显。将数据导入 excel 进行求解,得出结果如表 3。

**Table 3.** Analysis of experimental results

**表 3.** 实验结果分析

所在列	1	2	3	4	5	
因素	A 超声频率	B 增益	C 成像深度	D 扫描速度	E 焦距	实验结果
实验 1	1	1	1	1	1	18
实验 2	1	2	2	2	2	20
实验 3	1	3	3	3	3	24
实验 4	1	4	4	4	4	23
实验 5	2	1	2	3	4	21
实验 6	2	2	1	4	3	25
实验 7	2	3	4	1	2	26
实验 8	2	4	3	2	1	29
实验 9	3	1	3	4	2	28
实验 10	3	2	4	3	1	24
实验 11	3	3	1	2	4	29
实验 12	3	4	2	1	3	19
实验 13	4	1	4	2	3	27
实验 14	4	2	3	1	4	28
实验 15	4	3	2	4	1	20
实验 16	4	4	1	3	2	16
K1	21.250	23.500	22.000	22.750	22.750	
K2	25.250	24.250	20.000	26.250	22.500	
K3	25.000	24.750	27.250	21.250	23.750	
K4	22.750	21.750	25.000	24.000	25.250	
极差 R	4.000	3.000	7.250	5.000	2.750	
主次因素	C > D > A > B > E					
最优组合	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub> E <sub>4</sub>					

由上表可知,得到了各因素对变形量的极差值,影响主次顺序为:成像深度 > 扫描速度 > 超声频率 > 增益 > 焦距。

### 3.3.2. 方差分析

方差分析是分类变量与定距变量之间的相关性分析,通过分析各因素引起的数据波动误差引起的数据波动的差异程度,来推断相应因素不同水平总体均值差异的显著性。所以我们有必要对试验数据进一步计算分析,见下表 4。

Table 4. Analysis of variance

表 4. 方差分析

因素	偏差平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A 超声频率	43.688	3	43.688	8.34	0.041
B 增益	20.688	3	20.688	3.95	0.101
C 成像深度	123.188	3	123.188	23.54	0.003
D 扫描速度	53.688	3	53.688	10.26	0.025
E 焦距	18.688	3	18.688	3.57	0.114
误差	31.300	3	5.217		

通过方差分析,计算得出 F 值和 P 值,用以判断各因素对实验结果的显著性水平。分析结果表明,成像深度、频率和扫描速度对成像质量的影响显著性最高,P 值均小于 0.05,说明这些因素对成像质量有显著影响。其他因素的 P 值大于 0.05,表明它们对成像质量的影响不显著。

根据极差分析和方差分析的结果,我们可以得出最优的超声成像参数组合为: A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>2</sub>E<sub>4</sub>,即超声频率为 4 MHz,增益为 50 dB,成像深度为 20 mm,扫描速度为 15 mm/s,焦距为 20 mm。

## 4. 结论与展望

在本研究中,我们通过正交实验法对超声成像参数进行了系统地优化。实验结果表明,成像深度、扫描速度和超声频率是影响超声成像质量的主要因素。通过极差分析和方差分析,我们确定了最佳的参数组合。正交实验法有效地减少了实验次数,提高了实验效率,为超声成像参数优化提供了一种高效、实用的方法。

通过本次实验,我们不仅找出了影响成像质量的关键因素,还为进一步优化和改进超声成像技术提供了重要依据。未来的研究可以在此基础上,进一步探索其他参数组合,或者引入更多的因素和水平,以不断提升超声成像的质量和效果。

## 参考文献

- [1] 李云舒,马宸,黄丽红,等. 高质量超声成像与重建研究综述[J]. 中国图象图形学报, 2024, 29(6): 1628-1645.
- [2] 郑海荣,邱维宝,王丛知,等. 超声成像与治疗技术进展与趋势[J]. 中国科学: 生命科学, 2020, 50(11): 1256-1267.
- [3] 陈秋华,王怀江. 基于多尺度超声成像的缺陷识别与量化分析[J]. 化工自动化及仪表, 2024, 51(5): 929-933+944.
- [4] 莫笑海,苏畅,孔超,等. 基于环形阵列的医学超声成像系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 198-207.
- [5] 刘子豪. 基于 FPGA 的数字超声成像系统关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2023.
- [6] 孙文凯,周浩. 基于超声换能器激励信号与接收信号的处理[J]. 信息技术与信息化, 2024(1): 145-149.

- [7] 王晓春, 刘新鸣, 杨军, 等. 高频超声射频回波信号高速数据传输系统的设计[J]. 医疗卫生装备, 2021, 42(4): 24-28.
- [8] 吴卫萍, 刘松, 刘旭. 正交实验设计优选 FDM\_3D 打印工艺参数[J]. 机电工程技术, 2024, 53(9): 271-274.