

基于数值仿真的光学层析成像传感器结构研究

余善恩, 杨文东, 李华军*

杭州电子科技大学自动化学院, 浙江 杭州 310018

摘要 光学层析成像传感器结构设计对提高重建图像质量、降低结构成本、减少系统复杂度有着重要作用。对不同分布场景、不同传感器结构下的重建图像进行了研究, 研究结果表明: 分布场景与传感器结构对重建图像质量均有较大影响; 某种场景下变换传感器数量得到的参数曲线具有一致性的趋势; 30×30 的传感器结构在不同分布场景下的重建图像都有较好的表现。根据研究结果并考虑传感器尺寸、成本、可行性等因素, 设计了一套 30×30 的激光器-光电二极管光学层析成像硬件装置, 并利用该装置进行了不同分布截面状态的光学层析成像静态实验。实验结果表明, 该成像硬件装置可以较为准确地重建不同分布截面状态。

关键词 传感器; 传感器结构; 仿真; 光学层析成像; 投影

中图分类号 TH701

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2228001

Research on the Structure of an Optical Tomography Sensor Based on Numerical Simulations

Yu Shanen, Yang Wendong, Li Huajun*

School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China

Abstract The structural design of optical tomography sensors is crucial for enhancing the reconstructed image quality, reducing the structural cost, and reducing the system complexity. In this study, we investigate the reconstructed images under various distributed scenes and various sensor structures. The findings reveal that the scene's simultaneous interpreting and sensor structure have a significant effect on the reconstructed image quality. The parameter curves generated by changing the number of sensors in a scene follow a similar pattern; the sensor structure of 30×30 has good performance in the reconstructed images under various distribution scenes. According to the study findings and considering the factors, including sensor size, cost, and feasibility, a set of 30×30 laser photodiode optical tomography hardware devices is designed. The static experiments of optical tomography with various distribution cross-section states are conducted using the device. The findings demonstrate that the image hardware device can accurately reconstruct various distribution cross-section states.

Key words sensors; sensor structure; simulation; optical tomography; projection

1 引言

光学层析成像技术是一种光学测量技术, 现已应用到多种工业场景中, 例如燃烧流场监测、流体可视化、粉尘监测^[1-2]等。光学层析成像具有结构简单、硬场、采样率高、时空分辨率高等优点。一般的基于透射方法的光学层析成像主要利用激光器和光电检测元件, 测量待测截面多个角度的投影信息, 通过适当的图像重建算法, 重建出被测截面的介质吸收系数分布图

像。目前, 图像重建算法有 Landweber 迭代算法、正则化算法、有序子集期望值最大算法 (OSEM)、奇异值分解算法 (SVD)^[3-5]等。

多年来, 国内外学者针对光学过程层析成像进行了深入的研究, 提出了多种光学层析成像传感器结构。为测量气固两相流速度场, 岳洪伟^[6]提出了一种 5×5 激光-光电二极管结构的双层阵列式传感器, 并对石英砂颗粒流速度进行测量, 实验结果验证了该装置的可行性。为了检测气泡相关参数, Fadzil 等^[7]提出过一种

收稿日期: 2021-08-25; 修回日期: 2021-09-07; 录用日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51906053)

通信作者: *hjli@hdu.edu.cn

光学层析成像硬件系统,该系统将 16 个激光器和 16 个光电二极管阵列固定在一个围绕垂直管圆周的八角形夹具中,用以检测垂直管内的气泡信息。Schleicher 等^[8]提出过一种快速光学层析成像装置并对其进行了研究,该装置由 256 个发光二极管、32 个雪崩光电二极管组成,利用光纤技术进行光信号传输,将小尺寸光纤一端固定在圆形光学检测结构上用以代替尺寸较大的雪崩光电二极管,另一端集中输入圆形光学检测结构外的雪崩光电二极管阵列中,实现了传感器数量的扩充,作者对该装置进行了测试,重建了染料示踪剂的单相流动和低气压下的气泡两相流图像。

虽然国内外学者提出了多种结构的光学层析成像装置,并且取得了不错的成像效果,但是针对成像装置的发射-接收传感器的配比结构与重建图像的质量研究还比较少,缺乏结构设计的优化理论分析。鉴于此,本文利用 Comsol Multiphysics 与 MATLAB 仿真软件,研究了圆形管道下不同发射-接收传感器配比结构对重建图像质量的影响,并依据仿真分析结果,设计了一套光学层析成像硬件装置,实现了多种分布场景下的截面状态重建。

2 仿真实验

2.1 Comsol Multiphysics 仿真过程

利用 Comsol Multiphysics 与 MATLAB 仿真软件,构建了光学层析成像传感器结构模型,该模型由不同数量的发射-接收元件构成,并通过研究重建图像的误差与相关系数,探究不同传感器结构对重建图像质量的影响。Comsol Multiphysics 是一款耦合模拟仿真软件,可结合 MATLAB 求解复杂物理场模型,模拟物理过程^[9]。仿真过程流程框图如图 1 所示。首先设定圆形管道尺寸(30 cm)、激光器数量 M 、光电二极管数

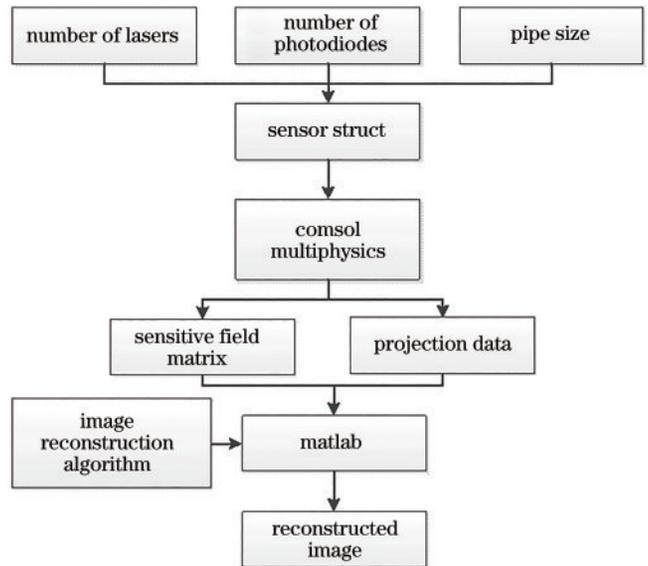


图 1 仿真过程流程框图

Fig. 1 Flow chart of simulation process

量 N ,通过 Comsol Multiphysics 构建该传感器结构的仿真模型;然后,采用 Comsol Multiphysics 软件计算该传感器结构的灵敏场,灵敏场采用正方形网格划分,边长设置为 8 mm,圆形目标区域像素个数为 1017。灵敏场数据获取的流程如下:像素点按照从上到下从左到右依次排序,从第 1 个像素点开始,激光器逆时针轮流点亮,同时 N 个光电二极管接收光信号,得到该像素点的空管信号,然后再对该像素点用高吸收系数的介质填充,激光器再次逆时针轮流点亮,同时 N 个光电二极管接收光信号,得到该像素点的投影信号,通过将空管信号与投影信号作差,并除以介质的吸收系数得到该像素点的灵敏值,然后依次遍历所有像素点重复此操作就可以得到所有像素点的灵敏值,最后将这些灵敏值组合得到整个区域的灵敏场。图 2 展示了几种不同结构的灵敏场。

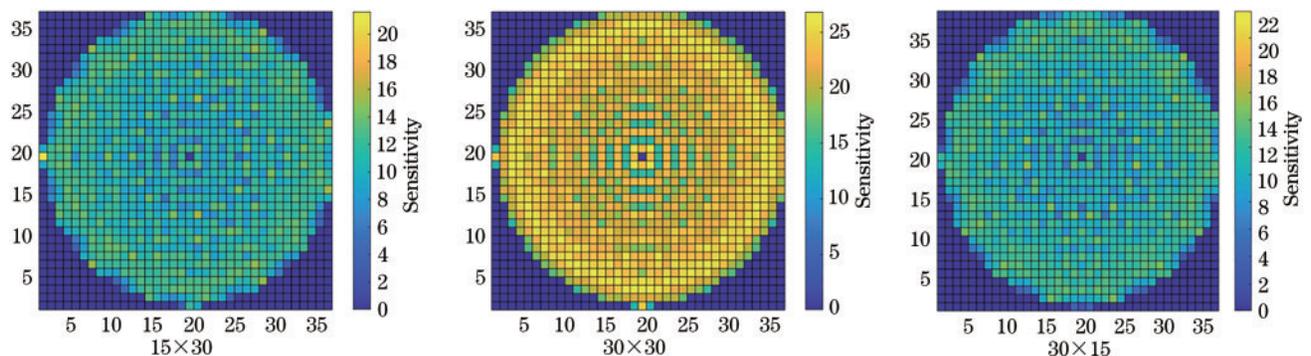


图 2 不同结构灵敏场

Fig. 2 Sensitive fields of different structures

本实验组共构建了 4 种分布场景来获取不同传感器结构下的投影数据,投影数据获取的工作流程如下:激光器逆时针依次单独点亮,同时 N 个光电二极管接收光信号,一次测量共获得 $M \times N$ 个投影值;最后再将

灵敏场、被测物投影数据与重建算法代入编写好的 MATLAB 程序中进行图像重建,并对图像进行处理分析。

构建的 4 种分布场景描述如下:

场景 1) 将直径 5 cm 的圆形被测物设置在传感器阵列圆心处位置;

场景 2) 将直径 5 cm 的圆形被测物设置在传感器阵列圆心处沿直径向外偏移 9 cm 处的位置;

场景 3) 沿传感器阵列直径放置两个直径 5 cm 的圆形被测物, 被测物距离圆心都为 9 cm;

场景 4) 将长 7.2 cm、宽 4 cm 的长方形被测物设置在传感器阵列圆心处沿直径向外偏移 9 cm 处的位置。

图 3 为光学层析结构在 4 种分布场景下单个激光器工作时的 Comsol Multiphysics 仿真光线轨迹图, 激光器可以发射散射角为 120° 的扇束光。仿真中用射线

模拟光线, 用可以发射射线的点来模拟激光器, 用可以吸收光线的壁来模拟光电二极管。因为只考虑不透光的被测物, 所以图中被测物都没有被光线穿透。

本实验组共构建 30×5、30×10、30×15、30×30、30×60 等 5 种激光器-光电二极管阵列结构研究改变光电二极管数量对重建结果的影响; 构建 5×30、10×30、15×30、30×30、60×30 等 5 种光电二极管-激光器阵列结构研究改变激光器数量对重建结果的影响。构建的光学层析成像传感器结构中激光器与光电二极管分别等距均匀分布在圆形管道上。图 4 展示了几种不同激光器-光电二极管数量配比(15×30、30×30、30×15)结构示意图。

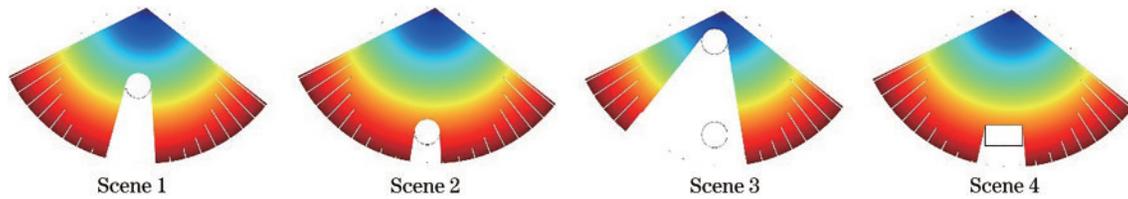


图 3 光线轨迹图(1号激光器工作)
Fig. 3 Light trace diagram (laser 1 working)

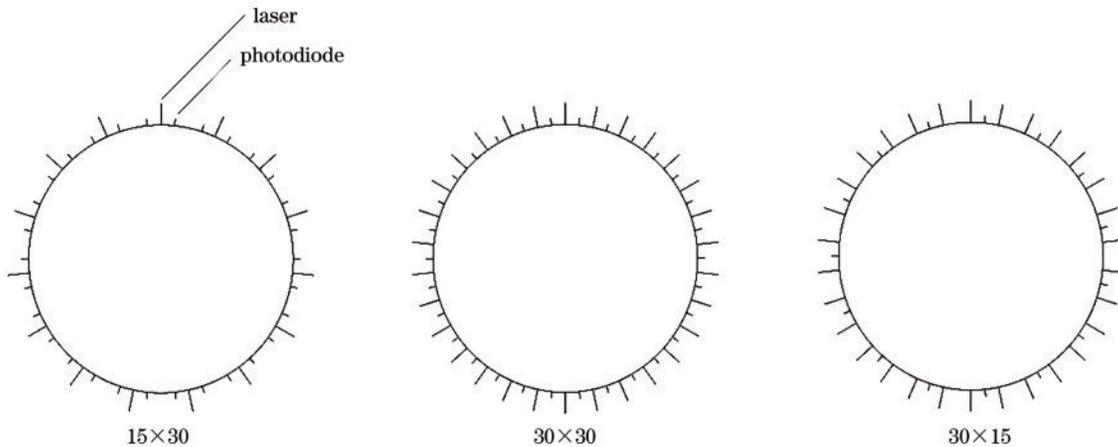


图 4 激光器-光电二极管配比阵列结构示意图
Fig. 4 Structure diagrams of laser photodiode matching array

2.2 图像重建算法

层析成像的实质是先用一定的信息载体(如光及各种传感器及各种射线等)扫描并提取被测对象的相关信息, 得到一定数量的投影数据, 再根据这些数据反向求解被测对象的信息。图像重建正问题可以用一个矩阵方程^[10-12]来表示:

$$T = DP, \quad (1)$$

式中: T 代表投影数据矩阵; D 代表灵敏场矩阵; P 表示待测图像灰度矩阵。对于投影的逆问题, 由于灵敏场的矩阵 D 不是方阵, 所以矩阵的逆实际上并不存在。对于式(1)而言, D 是一种非线性映射关系, 联通着待求区域信息和投影信息。代数迭代方法是处理该逆问题的一种常用方法。

采用的图像重建算法是线性反投影算法(LBP)与

Landweber 投影加速迭代算法结合的图像重建算法。首先采用 LBP 算法获得初步重建图像, LBP 算法将 D^T 当作投影信息到待求区域信息的一个伴随映射^[13], 即

$$P = D^T T. \quad (2)$$

然后将 LBP 算法输出结果作为 Landweber 投影加速迭代算法的初始值, 最终获得截面重建图像。Landweber 算法是一种迭代算法, 可以有效处理病态方程问题, 该算法使用极小化噪声数据的均方差作为目标函数, 通过提前设定好迭代的终止条件对问题进行求解^[14-15]。Landweber 算法的目标函数为

$$\begin{cases} \min \{ f(P) \} \\ f(P) = 1/2 \| DP - T \|_2^2, \end{cases} \quad (3)$$

$$\nabla f(P) = D^T(DP - T). \quad (4)$$

将式(4)代入最速下降法的公式中,有

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k+1} &= \mathbf{P}_k - \eta \nabla f(\mathbf{P}_k) = \mathbf{P}_k - \eta \mathbf{D}^T(\mathbf{D}\mathbf{P}_k - \mathbf{T}), \\ k &= 0, 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: η 代表步长; k 代表迭代次数。

在某些实际应用中,准确解是难以确定的,但是解的范围可以根据实际情况确定。因此,Piana等^[16]提出了一种新型 Landweber 成像策略,该策略规定在每一次迭代更新后,都需要对解进行投影运算,将解投影到某个特定值域内,对 \mathbf{P}_k 中某一元素 p_k 处理的数学表达式^[17]为

$$p_k = Q(p_k) = \begin{cases} b, & p_k > b \\ p_k, & a < p_k < b, \\ a, & p_k < a \end{cases} \quad (6)$$

式中: $Q(\cdot)$ 代表凸投影函数,可以将每次迭代更新的结果投影到值域内加速算法收敛; a 代表值域的下边界; b 代表值域的上边界。Landweber 投影加速算法是对 Landweber 算法的改进,该算法可以在一定程度上加快算法的收敛速度。Landweber 投影加速算法的步骤如下:

- 1) 初始化 \mathbf{P}_0 与 η ;
- 2) 进行迭代,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{k+1} &= \mathbf{P}_k - \eta \mathbf{D}^T(\mathbf{D}\mathbf{P}_k - \mathbf{T}), \\ p_{k+1} &= Q(p_{k+1}), \\ k &\leftarrow k + 1; \end{aligned}$$

- 3) 若满足停止条件则退出迭代,否则,继续运行。

Landweber 投影加速算法是对 Landweber 算法的改进,可以加速算法收敛,如果去掉凸投影函数,那么该算法即为 Landweber 算法。本研究所涉及的方法

中,输出的解代表像素灰度值。

2.4 评价指标

为衡量重建图像实际效果,采用相对图像误差与图像相关系数来对重建图像质量进行评价。相对图像误差 γ 的表达式为

$$\gamma = \frac{\|\hat{\mathbf{P}} - \mathbf{P}\|}{\|\mathbf{P}\|} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: $\hat{\mathbf{P}}$ 表示算法重建图像; \mathbf{P} 表示目标图像真实分布^[18-19]。相对图像误差越小,表明重建图像与目标图像之间误差越小。

采用的图像相关系数(C_{cc})为 Pearson 相关系数^[20]:

$$C_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^L (\hat{P}_i - \bar{\hat{P}})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^L (\hat{P}_i - \bar{\hat{P}})^2 \sum_{i=1}^L (P_i - \bar{P})^2}}, \quad (8)$$

式中: \hat{P}_i 表示重建图像中第 i 个像素的灰度值; $\bar{\hat{P}}$ 代表重建图像的平均灰度值; P_i 代表目标图像第 i 个像素的灰度值; \bar{P} 代表目标图像的平均灰度值。图像相关系数越大,表明重建图像与目标图像越相似。

2.5 仿真结果

根据以上图像重建算法,分别对 30×5 、 30×10 、 30×15 、 30×30 、 30×60 以及 5×30 、 10×30 、 15×30 、 30×30 、 60×30 这几种不同的光电二极管-激光器阵列结构进行了不同分布场景下的图像重建,并绘制了其重建图像、相对图像误差曲线和相关系数曲线。表 1 为不同分布场景下改变激光器数量得到的重建图像,表 2 给出了其对应的相对图像误差与图像相关系数,表 3 为不同分布场景下改变光电二极管数量得到的重建图像,表 4 给出了其对应的相对图像误差与图像相

表 1 改变激光器数量得到的重建图像

Table 1 Reconstructed images obtained by changing number of lasers

Target image	5×30	10×30	15×30	30×30	60×30

关系数。

从表 1~4 可以看出,当激光器或光电二极管数量较少时,对于不同分布场景,其重建图像质量噪点较多,与真实分布存在较为明显的差异,尤其是在 30×5 和 5×30 这两种结构下,重建图像存在明显伪影,重建效果较差。随着激光器或光电二极管数量的增加,重

建图像的噪点随之减少,重建图像质量有所改善。而当传感器数量大于 15 时,几种不同结构的成像传感器的成像效果较为接近。另外不同分布场景下的重建图像表明,对于不同分布场景,重建图像质量也有所不同。

图 5 为不同分布场景下,改变激光器与改变光电

表 2 与表 1 对应的相对图像误差与图像相关系数

Table 2 Relative image error and image correlation coefficient corresponding to table 1

Scene		5×30	10×30	15×30	30×30	60×30
Scene 1	γ	0.1999	0.2150	0.2178	0.2176	0.0689
	C_{cc}	0.9540	0.9607	0.9608	0.9615	0.9964
Scene 2	γ	0.1131	0.1022	0.1156	0.0974	0.1174
	C_{cc}	0.9744	0.9886	0.9894	0.9940	0.9908
Scene 3	γ	0.2058	0.1501	0.1824	0.1553	0.2086
	C_{cc}	0.9412	0.9723	0.9739	0.9848	0.9667
Scene 4	γ	0.2586	0.2243	0.2429	0.2412	0.2398
	C_{cc}	0.9439	0.9652	0.9671	0.9689	0.9634

表 3 改变光电二极管数量得到的重建图像

Table 3 Reconstructed images obtained by changing number of photodiodes

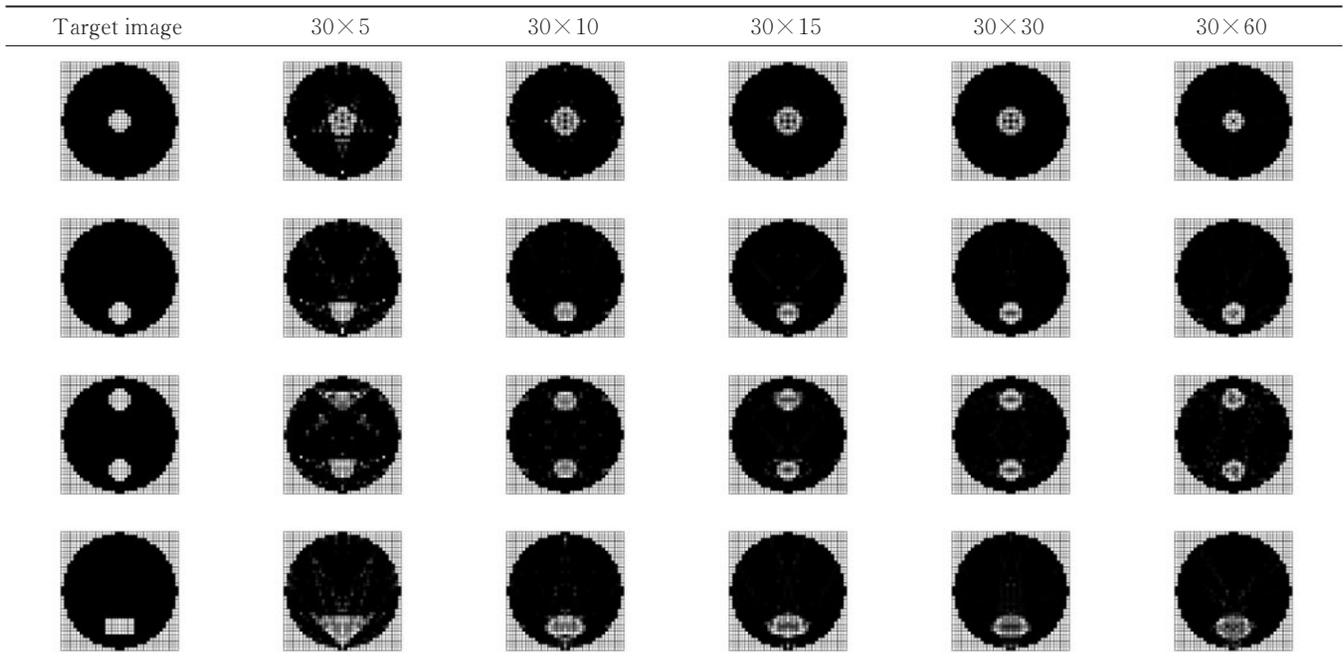


表 4 与表 3 对应的相对图像误差与图像相关系数

Table 4 Relative image error and image correlation coefficient corresponding to table 3

Scene		5×30	10×30	15×30	30×30	60×30
Scene 1	γ	0.2171	0.2142	0.2181	0.2176	0.1056
	C_{cc}	0.9473	0.9576	0.9609	0.9615	0.9922
Scene 2	γ	0.1410	0.1281	0.1137	0.0974	0.0868
	C_{cc}	0.9730	0.9867	0.9913	0.9940	0.9917
Scene 3	γ	0.2077	0.1938	0.1831	0.1553	0.1665
	C_{cc}	0.9346	0.9683	0.9760	0.9848	0.9763
Scene 4	γ	0.2488	0.2150	0.2409	0.2412	0.2521
	C_{cc}	0.9418	0.9644	0.9640	0.9689	0.9640

二极管数量得到的重建图像相对误差曲线。从图中可以看出,在不同场景下,改变激光器与改变光电二极管得到的误差曲线变化趋势较为一致。在场景 1 中,当传感器数量为 5, 10, 15 和 30 时,误差稳定保持在 21% 左右,变化幅度较小。当传感器数量达到 60 时,误差下降到 10% 左右,图像质量明显提升。在场景 2 中,误差曲线随着传感器数量增加而缓慢降低,

当传感器数量为 30 和 60 时,误差水平较为接近,稳定在 10% 左右。在场景 3 中,当传感器数量为 30 时,误差达到最小值,而当传感器数量增加或者减少时,误差都产生一定程度的增加。在场景 4 中,随着传感器数量的变化,误差曲线较为稳定,其数值保持在 22% 至 26% 之间。当传感器数量为 5 时,达到最大值。

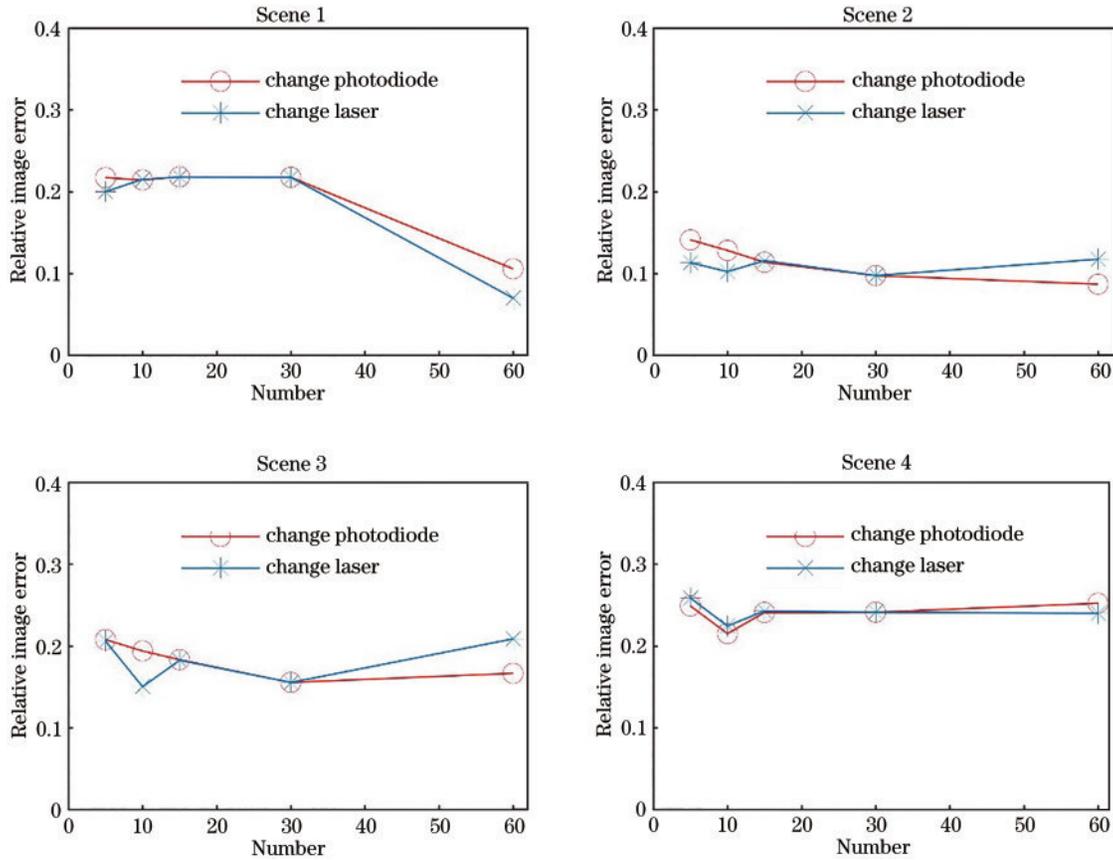


图 5 相对图像误差曲线

Fig. 5 Relative image curve

图 6 为不同分布场景下,改变激光器与改变光电二极管数量得到的重建图像相关系数变化曲线。与误差曲线类似,改变激光器和改变光电二极管得到的相关系数变化趋势较为一致。在场景 1 中,相关系数曲线随着传感器数量的增加而显著上升,当传感器数量为 5 时,相关系数仅为 0.95 左右,当传感器数量为 30 时,相关系数为 0.96 附近,而当传感器数量为 60 时,相关系数高达 0.99 以上。在场景 2 中,当传感器数量为 5 和 10 时,相关系数较低。而当传感器为 15、30 和 60 时,相关系数维持在 0.99 以上。在场景 3 中,相关系数在传感器到达 30 时达到最大值,为 0.9848。而当传感器数量增加或者减少时,相关系数都有一定程度的降低。当传感器数量为 5 时,相关系数低至 0.9346。在场景 4 中,当传感器数量为 5 时,相关系数仅为

0.9418。而当传感器数量为 10、15、30、60 时,相关系数较为稳定地维持在 0.96~0.97。

总体来看,不同传感器结构和分布场景对重建图像质量均有较大影响:当仿真分布场景不变时,变激光器与变光电二极管得到的相对图像误差曲线与图像相关系数曲线具有一致性的趋势,且图像相关系数曲线的一致性要好于相对图像误差曲线;对于不同仿真分布场景,不同结构下的相对图像误差曲线变化表现不同,而对于图像相关系数曲线,除场景 1 外,其余 3 种分布场景图像相关系数均有先上升后下降的变化;当激光器数量和光电二极管数量均为 30 时,在不同场景下,重建图像能够较为准确地反映截面分布,在相对误差和相关系数方面均有较为稳定的表现,图像质量较高。

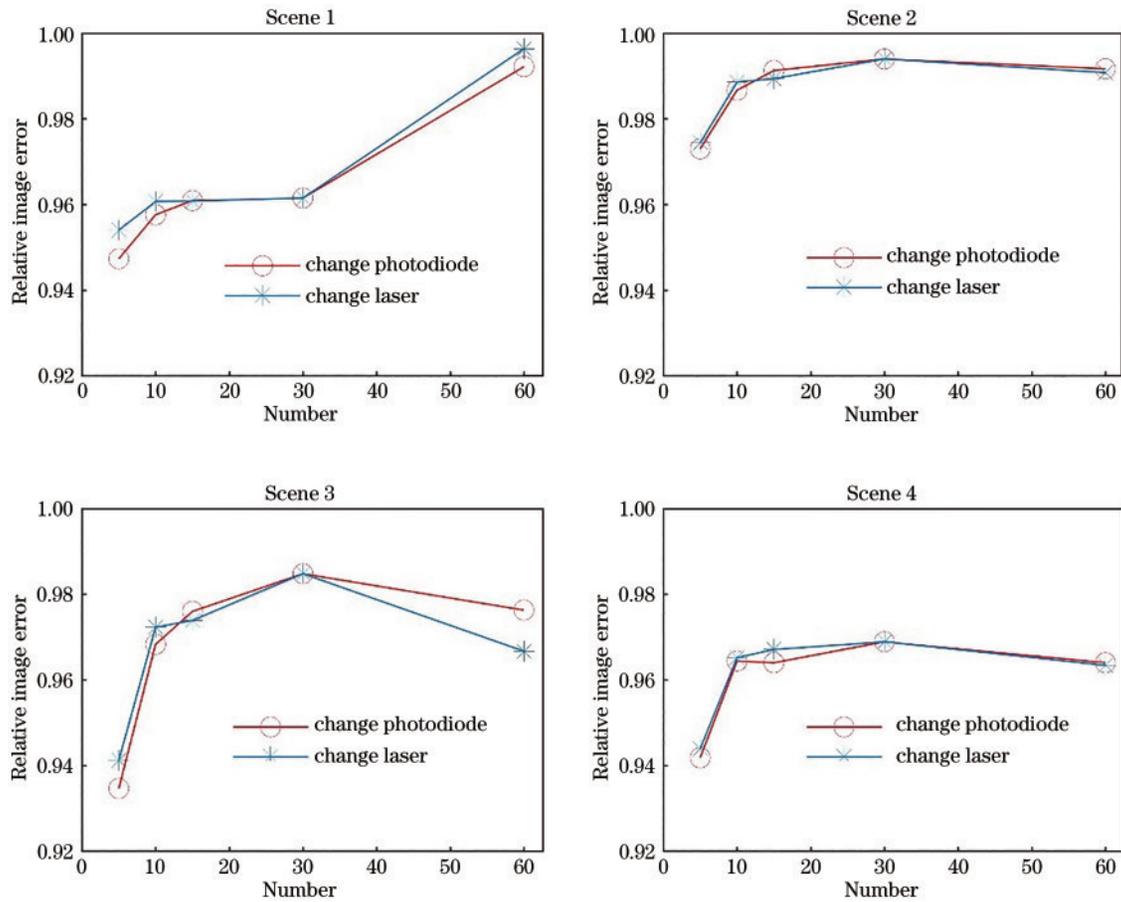


图 6 相关系数曲线

Fig. 6 Correlation coefficient curve

3 层析成像硬件装置

从仿真结果可知,激光器-光电二极管数量配比为 30×30 的结构在不同仿真分布场景下的相对图像误差和图像相关系数都有较好的表现,尤其在仿真场景 2、场景 3、场景 4 中,该结构的图像相关系数更是达到了最优,根据此结果并综合考量传感器尺寸硬件成本等信息设计并制作了一套激光器-光电二极管为 30×30 的光学层析成像硬件装置,如图 7 所示。该光学层析成像硬件装置组成包括控制采集电路、传感器阵列、计算机、电源。其中传感器阵列主要由激光器(型号 Anford T80L514)、光电二极管(型号 OSRAM BPW34)、外围电路构成,该单元主要功能为接收控制采集单元的控制采集信号,实现对传感器阵列内部被测截面的投影扫描。控制采集电路采用 STM32F103 ZET6 单片机作为控制芯片,该电路主要功能为控制传感器阵列中激光器激活和光电二极管传感器的投影数据采集,并将采集数据发送给计算机。计算机的主要功能为接收控制采集单元传输过来的投影数据,并将该数据代入算法实现图像重建。电源单元的主要功能为控制采集电路、给传感器阵列供电。

基于该层析成像硬件装置进行了光学层析成像的静态实验,实验的主要步骤如下:

- 1) 测量空管信号,获得背景噪声信号;
- 2) 激光器逆时针轮流开启关闭,直至所有激光器都开启关闭一次,获得空管下的投影数据;
- 3) 传感器阵列内部放置被测物,激光器逆时针轮流开启关闭,获得该状态下的投影数据;
- 4) 改变被测物位置,设定不同的截面分布状态,获得投影数据;
- 5) 将采集的信号值及灵敏场数据代入 MATLAB 图像重建算法进行图像重建。

为了减少外界光线干扰,光学层析成像静态实验均在暗室内进行,遮挡物直径为 5 cm。主要针对以下几种场景进行了光学层析成像实验:

- 场景 1) 将被测物放置在传感器阵列圆心处位置;
- 场景 2) 将被测物放置在传感器阵列圆心处沿直径向外偏移 3 cm 处的位置;
- 场景 3) 将被测物放置在传感器阵列圆心处沿直径向外偏移 9 cm 处的位置;
- 场景 4) 沿传感器阵列直径放置两个被测物,被测物距离圆心都为 9 cm。

该实验重建图像及对应的相对图像误差与图像相关系数如表 5 所示。从表 5 可以看出,对于静态实验中的几种场景,该光学层析成像硬件装置在一定程度上可以较为准确反映出被测物的形状与位置,重建图像

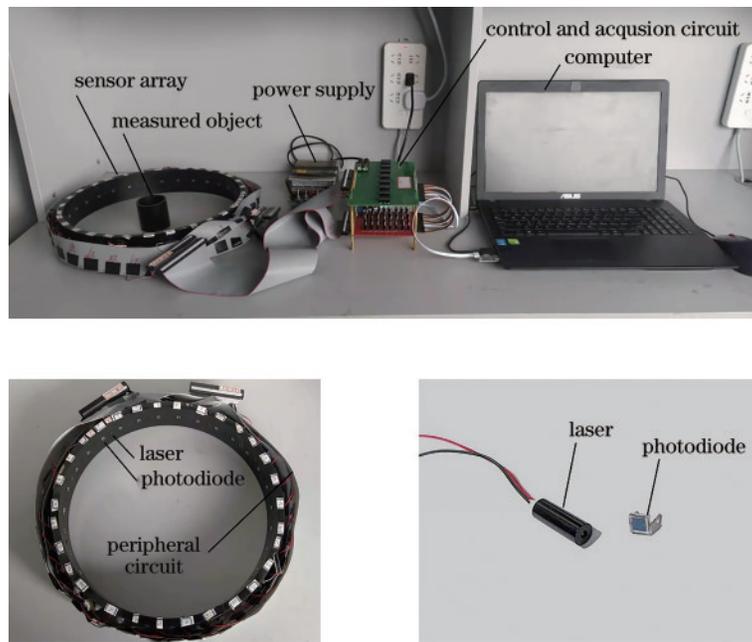


图 7 光学层析成像硬件装置
Fig. 7 Hardware of optical tomography

表 5 光学层析成像静态实验重建图像
Table 5 Image reconstruction of optical tomography static experiment

Scene	Target image	Reconstructed image	γ	C_{cc}
Scene 1			0.2192	0.9606
Scene 2			0.1798	0.9780
Scene 3			0.2023	0.9623
Scene 4			0.1696	0.9783

与目标图像之间的相对误差在 0.1696~0.2192 之间, 图像相关系数在 0.9606~0.9783 之间。

4 结 论

利用 Comsol Multiphysics 与 MATLAB 软件, 对圆形管道下不同激光器-光电二极管结构进行了分析, 研究了不同传感器配比结构下重建图像的相对图像误差与图像相关系数。并根据仿真分析结果构建了一套光学层析成像硬件装置。所获得结论主要包括: 1) 传感器结构和不同的截面分布场景对重建图像质量有很大影响。2) 在本实验仿真条件下, 改变激光器与改变光电二极管得到的相对图像误差曲线与图像相关系数曲线具有一致趋势。且在一定程度上, 这两个评价指标都随着传感器的数量增加而变优。3) 在本实验仿真条件下, 对于不同仿真分布场景, 不同结构下的相对图像误差和相关系数曲线变化表现不同。当激光器和光电二极管数量均为 30 时, 重建图像在多数场景下均有较高的成像质量和成像稳定性。4) 根据仿真结果并考虑传感器尺寸等因素, 研制了激光器-光电二极管结构为 30×30 的光学层析成像硬件装置, 并利用该装置进行了不同分布场景下的图像重建, 重建图像能够较为准确地反映被测截面的状态, 重建结果也表明该光学层析成像硬件装置是有效的。

参 考 文 献

- [1] 李扬, 汪仁煌, 郑莹娜, 等. 基于 ART 的光学过程层析成像扇束图像重建[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(5): 665-668.
Li Y, Wang R H, Zheng Y N, et al. Fan beam image reconstruction of optical process tomography based on

- algebra reconstruction technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(5): 665-668.
- [2] 王兴平, 彭冬, 李佳胜, 等. 基于波长调制吸收光谱的燃烧流场二维重建[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0711002. Wang X P, Peng D, Li J S, et al. Two-dimensional reconstruction of combustion flow field using wavelength-modulated absorption spectra[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0711002.
- [3] Yu T, Cai W W. Benchmark evaluation of inversion algorithms for tomographic absorption spectroscopy[J]. Applied Optics, 2017, 56(8): 2183-2194.
- [4] Sun B Y, Yue S H, Cui Z Q, et al. A new linear back projection algorithm to electrical tomography based on measuring data decomposition[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(12): 125402.
- [5] 沈康, 刘松德, 施钧辉, 等. 基于双域神经网络的稀疏视角光声图像重建[J]. 中国激光, 2022, 49(5): 0507208. Shen K, Liu S D, Shi J H, et al. Dual-domain neural network for sparse-view photoacoustic image reconstruction [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(5): 0507208.
- [6] 岳洪伟. 基于双层阵列式传感器的气固两相流速度场重建[D]. 广州: 广东工业大学, 2006. Yue H W. Reconstruction of velocity distribution in gas-solid two-phase flow based on two-layer array sensor[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2006.
- [7] Fadzil N S M, Rahim R A, Karis M S, et al. Hardware design of laser optical tomography system for detection of bubbles column[J]. Jurnal Teknologi, 2013, 64(5): 69-73.
- [8] Schleicher E, da Silva M J, Thiele S, et al. Design of an optical tomograph for the investigation of single- and two-phase pipe flows[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(9): 094006.
- [9] 于庆磊, 唐春安, 杨天鸿, 等. 煤层开采引起覆岩三带分布规律的数值模拟[C]//第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2006. Yu Q L, Tang C A, Yang T H, et al. Numerical simulation of the distribution law of overburden zone caused by coal seam mining[C]//Proceedings of the Ninth National Congress on Rock Mechanics and Engineering. Beijing: China Society of rock mechanics and engineering, 2006.
- [10] 薛平. 高性能光学相干层析成像的研究[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1517001. Xue P. Development of high-performance optical coherence tomography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1517001.
- [11] 庄天戈. CT原理与算法[J]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. Zhuang T G. CT principle and algorithm[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992.
- [12] 阎春生, 廖延彪, 田芊. 层析成像图像重建算法综述[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 617-632. Yan C S, Liao Y B, Tian Q. Overview of image reconstruction algorithms for tomography[J]. Optics of China, 2013, 6(5): 617-632.
- [13] 班晓征. 面向稀疏采样的图像重建算法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019. Ban X Z. Research on image reconstruction algorithm for sparse sampling[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [14] Landweber L. An iteration formula for fredholm integral equations of the first kind[J]. American Journal of Mathematics, 1951, 73(3): 615.
- [15] Real R, Jin Q N. A revisit on landweber iteration[J]. Inverse Problems, 2020, 36(7): 075011.
- [16] Piana M, Bertero M. Projected landweber method and preconditioning[J]. Inverse Problems, 1997, 13(2): 441-463.
- [17] 童国炜. 电容层析成像图像重建方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019. Tong G W. Study on imaging method in electrical capacitance tomography[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [18] 彭黎辉, 陆耿, 杨五强. 电容成像图像重建算法原理及评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(4): 478-484. Peng L H, Lu G, Yang W Q. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography: state of the art[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(4): 478-484.
- [19] Cai W W, Kaminski C F. Tomographic absorption spectroscopy for the study of gas dynamics and reactive flows[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2017, 59: 1-31.
- [20] 刘向龙, 刘泽, 朱盛. 电磁层析成像图像重建中的修正 Landweber 迭代算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3971-3980. Liu X L, Liu Z, Zhu S. The modified landweber iteration algorithm in the reconstruction of electromagnetic tomography image reconstruction[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3971-3980.