

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003654

基于 FPGA 的静电层析成像监测系统研究*

薛倩 王一虎

(中国民航大学 电子信息与自动化学院 天津 300300)

摘要: 滑油磨粒静电监测技术中,磨粒出现在不同的径向位置时,传感器感应到的电荷量不同,传统的静电传感器很难获得准确的磨粒的径向位置和数量。为此,在阵列式静电传感器的基础上,设计并实现了12路信号调理电路,搭建基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的静电层析成像(electrostatic tomography, EST)高速数据采集系统,通过对滑油中的带电小球进行监测实验验证系统的有效性和准确性。结果表明,基于FPGA的EST成像系统可以满足实际测量的要求,实验结果接近仿真结果,并能够准确判断滑油中的带电小球数目和位置,对不同位置的荷电磨粒均有较好的成像效果。数据采集速率达到10 Msps,为进一步研究滑油磨粒实时无损监测提供参考。

关键词: 静电层析成像;监测系统;FPGA;图像重建

中图分类号: V241.7; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30

Research on electrostatic tomography monitoring system based on FPGA

Xue Qian Wang Yihu

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In the electrostatic monitoring technology for abrasive particles in lubricating oil, the amount of induced charge measured by the sensor varies with the radial positions of the abrasive particles. The traditional electrostatic sensor is incapable of determining the accurate position and number of the abrasive particles. For this reason, this article designs an electrostatic tomography (EST) high-speed data collection system based on field programmable gate array (FPGA) and realizes 12-channel signal conditioning on the basis of the electrostatic sensor array. The effectiveness and accuracy of the EST system are verified by monitoring the charged metal balls in lubricating oil. The results show that the designed EST system can meet the practical measurement requirements and the experimental results are close to the simulation results. The amount and positions of the charged balls in the lubricating oil can be estimated correctly, and the imaging quality for charged balls in different positions is relatively good. The data collection rate reaches 10 MSPs, which provides a reference for the further study of real-time nondestructive monitoring of abrasive particles in lubricating oil.

Keywords: electrostatic tomography; monitoring system; FPGA; image reconstruction

0 引言

航空发动机的部件异常磨损是造成飞机事故的主要机械因素。滑油中的磨粒源于航空发动机的轴承、齿轮等部件磨损后进入到润滑系统,所以在线监测因设备磨损产生的磨粒并对发动机早期故障进行预警具有十分重要的意义。然而,由于磨粒尺寸的不规则性和分布的不

均匀性,极大地增加了精准检测和实时检测的难度。静电层析成像具有非侵入式、结构简单等优点^[1],是利用阵列传感器获取感应电荷信号,通过理论分析建立电荷信号和滑油内电荷分布之间的映射关系,经算法求解得到滑油管道内的电荷分布,在滑油磨粒的可视化在线监测方面具有潜在的应用价值。Thuku等^[2]对阵列式静电传感器进行二维建模研究,提高了电荷分布的识别精度。Jurjevic等^[3]设计了环状金属电极的EST传感器,具有

收稿日期:2020-11-13 Received Date: 2020-11-13

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(61871379)、中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122019052)资助

防干扰的能力且结构简单的特点。国内对静电监测技术研究发展相对缓慢。李绍成等^[4]优化设计了油液磨粒监测静电传感器尺寸,并监测到静电信号。陈志雄等^[5-6]使用自研的静电传感器进行了磨粒监测实验,可检测到金属和非金属材料的磨粒。又进行了滑动摩擦磨粒的监测实验,实现了静电传感器在全流量下的监测。张文彪^[7]研究了静电法在稀相气固两相流速测量中的应用,设计了静电信号调理电路,成功检测了流化床中固体颗粒速度和浓度的分布。殷逸冰等^[8]得到了传感器输出信号的数学表达式,并对其主要影响因素进行了分析和讨论。冒慧杰等^[9]研究了传感器输出信号与磨粒的关系,提出了通过信号脉冲宽度确定磨粒的径向位置并获得磨粒电荷量的测量方法。薛倩等^[10]基于压缩感知理论对 EST 进行图像重建,明显改进了成像质量,对不同位置的单个电荷可准确重建。钟志荣等^[11]提出一种基于 Tikhonov 正则化方法的颗粒带电空间分布求解算法,确定了单个颗粒所带电量及其空间位置。由于传统的静电层析成像系统采样速率不高,灵活性不足,不能满足实时监测的要求。随着半导体工艺的发展,现场可编程门阵列(FPGA)的应用使得硬件系统集成度更高、可靠性更强、功耗更低,大大提高了电路设计的灵活性,同时在体积和低成本方面有着显著的优势^[12],在通信、军工以及航天领域有着广泛的应用。郭永彩等^[13]搭建了以 FPGA 为核心的用于红外图像的实时采集系统。陈曦等^[14]使用 FPGA 搭建了静电测向系统,用于测量运动带电体的运动方向。詹从来等^[15]采用了 FPGA+ARM 作为主控芯片实现了多路并行数据采集和处理,系统运行稳定可靠,可满足仪器对数据采集和处理的要求。翟华等^[16]基于 FPGA 和传感器实现了对顶管机姿态的测量。何敏等^[17]基于 FPGA 的硬件电路实现了呼吸机质检数据的传输系统。赵佳等^[18]基于 FPGA 的数据采集和处理实现了示波记录仪显示功能的优化。

静电层析成像监测系统的难点在于滑油磨粒经过阵列传感器截面时产生的感应电荷大小和通过的时间较短,难以准确测量,同时要去除各种噪声干扰和保证在复杂工作条件下的可靠性,还要有足够快的采样速率和数据的高精度以保障成像效果和实际应用的需要。为此,本文选用了 FPGA 作为主控芯片,充分发挥 FPGA 的优势,搭建了基于 FPGA 的高速数据采集传输系统,与阵列式 EST 传感器和信号调理电路构成 EST 成像系统,为下一步研究实时成像系统奠定了基础。

1 静电层析成像原理及数学模型

静电层析成像系统由静电传感器阵列、数据采集与控制模块和上位机成像系统组成(图 1)。在滑油管道

中,当携带异常电荷的颗粒随着滑油流过静电传感器的电极阵列时,由静电感应原理,在电极上会产生相应的感应电荷,由于荷电颗粒通过电极阵列时的位置分布具有随机性,导致每个电极板产生的感应电荷量的大小不同。将各个电极上的感应电荷经过信号调理后采集到上位机,通过图像重建算法进行成像。

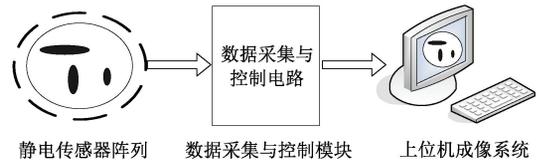
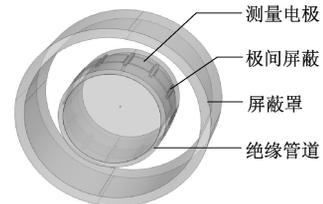


图 1 静电层析成像系统组成

Fig. 1 Composition of electrostatic tomography system

阵列式矩形传感器的典型结构如图 2(a)所示,因 EST 的独立测量值数目等于电极数目,但受限于管道尺寸,电极数增多导致电极面积减小从而感应电荷值减小,综合考虑两方面本文采用了 12 电极设计,并利用有限元仿真软件对电极尺寸进行优化,阵列电极均匀放置在管道外壁上,电极片轴向长度为 33 mm,占空比为 0.9。传感器实物如图 2(b)所示。



(a) 仿真图
(a) Model image



(b) 实物图
(b) Physical image

图 2 静电传感器模型及实物

Fig. 2 Electrostatic sensor model and physical image

带电颗粒经过阵列电极截面时,电极上会在极短时间内产生感应电荷,带电颗粒与传感器之间的相互作用可以用 Poisson 方程及其边界条件来描述^[19]:

$$\begin{cases} \nabla [\varepsilon_0 \varepsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = -\rho(x, y, z) \\ \varphi(x, y, z) |_{(x, y, z)} \tau_p = 0 \\ \varphi(x, y, z) |_{(x, y, z)} \tau_{ie} = \text{Const} \\ E_x = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： ϵ_0 为真空介电常数； $\epsilon(x, y, z)$ 为带点颗粒的介电常数； $\varphi(x, y, z)$ 为管道内的电势分布； $\rho(x, y, z)$ 为管道内的电荷密度函数； τ_p 为屏蔽罩的边界； τ_{ie} 为电极 i 的边界。

对式(1)采用有限元法求得数值解,再通过场强分布求得各个电极上的感应电量,EST 各电极上的感应电荷可表示为:

$$q_i = \int_D g(x, y) s_i(x, y) dx dy \quad (2)$$

式中： q_i 为电极 i 上的感应电荷量； D 为管道截面积； $g(x, y)$ 为重建图像中 (x, y) 点的灰度值； $s_i(x, y)$ 为电极 i 在 (x, y) 处的灵敏度。

$$s_i(x, y) = \left| \frac{q_i}{q(x, y)} \right| \quad (3)$$

式中： $q(x, y)$ 为设置于 (x, y) 处的点电荷的电荷量； q_i 为感应电荷量。

将式(2)离散化处理后得到如下矩阵:

$$Q = SG \quad (4)$$

式中： Q 为 $M \times 1$ 维的感应电荷值； S 为 $M \times N$ 维的灵敏度矩阵； G 是 $N \times 1$ 维的重建图像的灰度向量^[20]。EST 图像重建过程即是求解 G 的过程。

2 基于 FPGA 的 EST 数据采集系统设计

整套 EST 数据采集系统以 FPGA 作为主控部分,通过 FPGA 产生时钟控制信号完成 12 电极静电传感器信号的信号调理、模数转换、数据缓存和传输。将电极上的电荷信号经过信号调理电路调理为电压信号,再通过由 FPGA 控制的 16 选 1 数字开关进行通道选择,送到

FPGA 控制的 A/D 电路转换为数字信号,经过 FPGA 缓存后通过串口通信传输给上位机进行成像。系统示意图如图 3 所示。

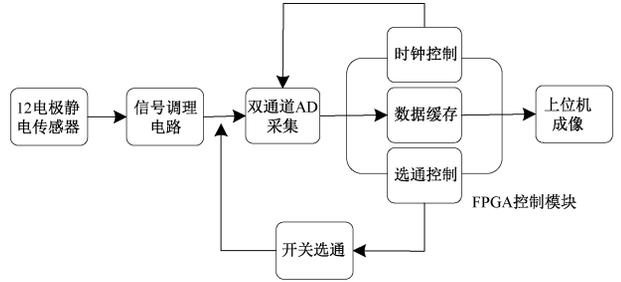


图 3 数据采集系统

Fig. 3 Data acquisition system

2.1 信号调理电路

当带电荷的颗粒物通过阵列式电极截面时,电极上就会感应出相应的电荷信号,一般情况下电荷信号的变化量非常小(大约 $10^{-7} \sim 10^{-3}$),并且夹杂着各类干扰信号,包括 50 Hz 工频干扰信号、高频噪声信号等,为信号的调理与检测带来了很大的挑战。为此,本文首先设计高精度的信号调理电路,具有高分辨率和较强的抗干扰能力,同时能将电极上感应到的微弱电荷调理为 A/D 电路所能接受的电压范围。其原理如图 4 所示。信号调理电路的第 1 级采用的是由 AD8601 构成的电荷转换电路,AD8601 是一款高阻抗、高增益的精密运算放大器,具有低偏置电流(最大 $750 \mu A$)、低偏置电压(最大 $500 \mu V$)、低温漂(最大 $2 \mu V/^\circ C$)的特点,适合对电荷信号进行测量。第 2 级采用由 OP07CS 构成的二阶低通滤波电路,截止频率为 20 Hz。第三级采用的是放大电路,对滤波后的信号进行再放大以匹配 A/D 的量程。

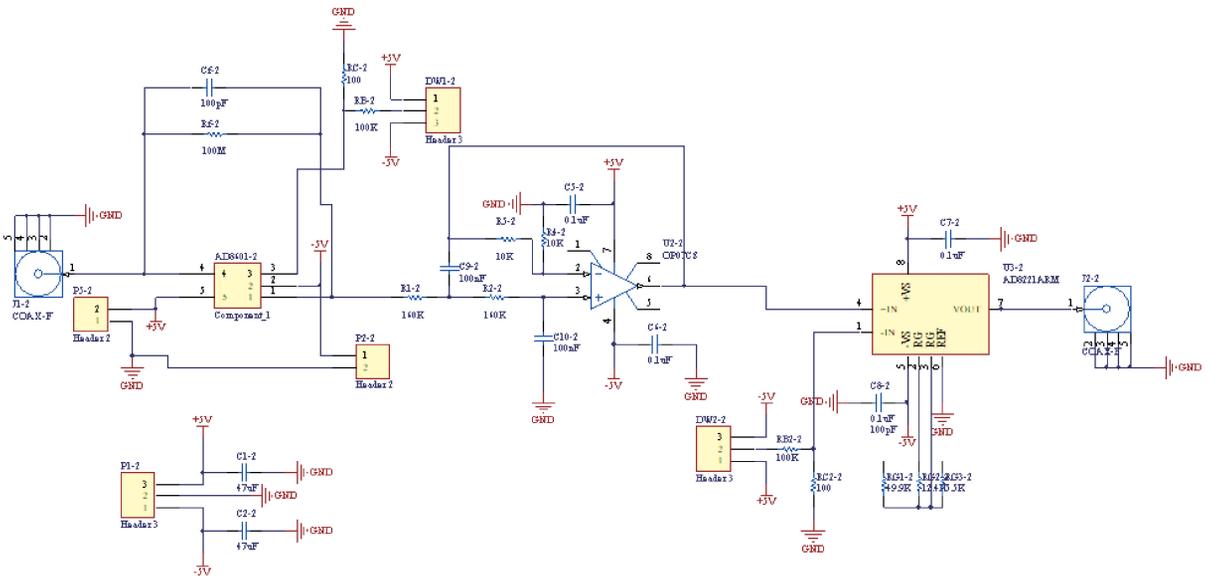


图 4 信号调理电路

Fig. 4 Signal conditioning circuit

2.2 数据采集模块设计

数据采集模块是由选通模块及 A/D 转换器组成,选通模块采用两片 CD74HC4067 高速 16 通道 CMOS 模拟多路复用器进行选通,该芯片切换速度快、导通电阻小,能够满足系统设计的要求。AD 转换器使用的是双通道 AD9266 模块,AD9266 芯片是一款 12 位模数转换器,数据速率最高可达 65 Msps,AD9266 采样控制电路结构简单,只需提供时钟采样信号即可进行数据采集,采样控制时序图如图 5 所示。

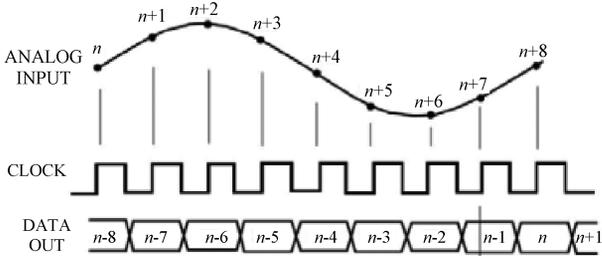


图 5 AD9266 时序图
Fig. 5 AD9266 timing diagram

数据采集时,将选通模块的 12 通道分别与 12 路信号调理电路的输出相连,通过 FPGA 输出不同的 $S0 \sim S3$ 电平控制各个通道的顺序导通,完成给定顺序下对信号调理电路输出的循环采样,将采集到的数据缓存到 FPGA 内部的存储单元再经串口发送到上位机中,如图 6 所示。

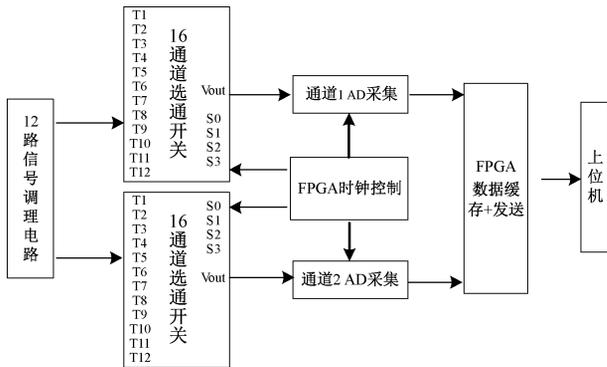


图 6 数据采集模块设计示意图

Fig. 6 Schematic diagram of data acquisition module design

为了满足实时性和准确性的监测要求,要求增大 A/D 的采样速率和数据传输速率,综合考虑采样速率和数据准确性,将双通道 A/D 采样速率设定为 10 Msps,通过 FPGA 分别产生频率为 10 MHz、相位相反的 A/D 采样时钟脉冲,作为双通道 A/D 采样的时钟信号。选通模块的 FPGA 的控制顺序按照电极编号顺序采集,即按照 1~12 电极的编号顺序采样。

2.3 FPGA 数据缓存和串口发送

由于 A/D 采样速率较快,为保证采集数据的完整性和发送的可靠性,通过 FPGA 将采集到的数字信号存储到 FIFO 中,缓存后经串口发送到上位机。

3 实验验证及分析

3.1 数据采集系统验证

系统测试时,由信号发生器产生的频率为 1 MHz、幅值为 0.5~2 V 的正弦信号作为输入,用 FPGA 编程软件 Vivado 编写控制程序并烧写到固件中进行测试,从上位机数据接收端口对数据进行保存和处理,测试时的原始信号和上位机接收信号如图 7 所示。



(a) 原始信号
(a) Original signal

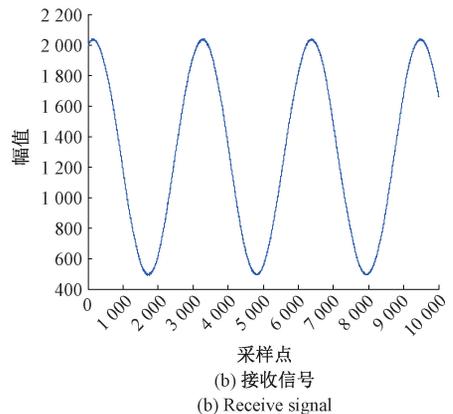


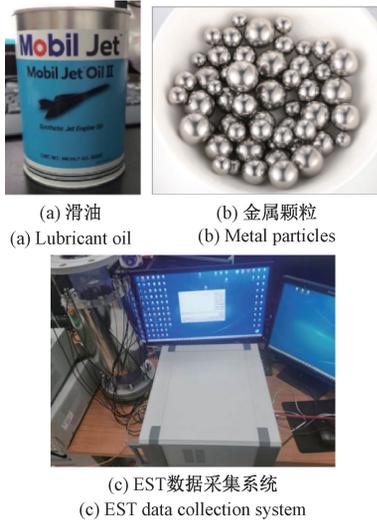
图 7 测试时的原始信号和接收信号

Fig. 7 Original signal and receive signal during experiment

由图 7 可见,原始测试信号在本数据采集系统的传输过程中保持了较好的信号完整性,还原出的波形未失真,没有毛刺,幅值为 500 和 2 000 mV,与信号发生器产生的原始信号一致,表明数据采集系统传输稳定、性能可靠,可以实现信号的采集与传输功能。

3.2 EST 系统验证

实验装置如图 8 所示,图 8(a)、(b)分别为试验所用的滑油和金属颗粒,图 8(c)为数据采集系统(用定制屏蔽机箱封装)。实验时先将滑油倒入 EST 传感器的管道内,再在不同的位置放入带有电荷的金属球以模拟带电颗粒在滑油管道内的位置分布情况。



(a) 滑油 (a) Lubricant oil
(b) 金属颗粒 (b) Metal particles

(c) EST 数据采集系统
(c) EST data collection system

图 8 实验用到的滑油和金属颗粒

Fig. 8 Lubricant oil and metal particles used in the experiment

实验采用的传感器管道直径为 10 cm,金属小球直径为管道直径的 1/10,在管道内分别放置 1、2、3 个相同大小、带同等电量的金属小球,记录每次放置金属球的个数和位置,同时在有限元仿真软件中建立同等模型并仿真计算,将仿真和实测到的 12 电极数据归一化后进行对比,以验证传感器、信号调理电路和数据采集系统的整体有效性。

第 1 次实验在靠近 1 号和 12 号电极的位置放置一个金属小球,第 2 次实验分别在靠近 8 号电极和 11 号电极的位置各放置一个金属小球,第三次实验在靠近 4 号电极、8 号电极和 11 号电极的位置各放置一个金属小球,通过有限元仿真软件在相同位置放置同等数量的金属小球得到仿真数据,与 EST 系统采集到的数据对比结果如图 9 所示。

由图 9 可见,放置不同数量的金属小球时,实际 EST 系统采集到的 12 电极数据与仿真数据变化趋势大致相同,与仿真数据之间存在合理实验误差,且电极编号与实际放置金属小球的位置相对应,验证了整个 EST 系统包括静电传感器、信号调理电路、数据采集的有效性。

在放置不同数量、不同位置的金属小球的情况下,采集到大量的实验数据,通过图像重建算法对采集到的数据做进一步验证,分别采用 Landweber 迭代法和原始对

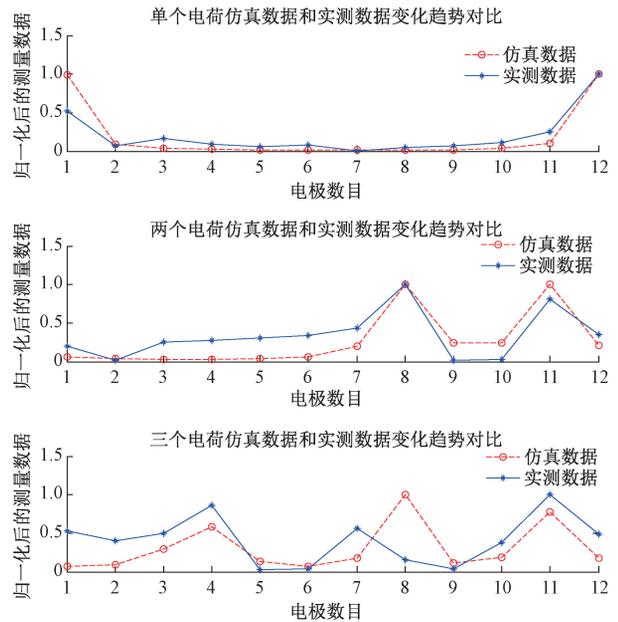


图 9 不同电荷数目时仿真与实测数据趋势对比

Fig. 9 Comparison of simulation and measured data trends with different charge numbers

偶内点法(PDIPA)进行成像,图像重建的结果如表 1~3 所示。

从表 1~3 可以看出, Landweber 算法和 PDIPA 算法重建出的图像可以大致分辨出电荷的位置情况,但是重建出的图像存在严重的伪影,当电荷的相对距离过近时不能准确分辨出电荷颗粒数目;使用相同的成像算法时,模型仿真出的数据和实际测量的数据图像重建出的图像差异不大,能基本反映出管道内电荷的分布情况;当管道内只有一个带电颗粒时,实测数据的重建图像能较好的反映出管道内的真实的电荷分布。当管道内有两个或 3 个带电颗粒时,受成像算法精度影响,如果颗粒间的间距比较小(小于 2 cm),成像效果不理想;如果颗粒间的间距比较大,可较清楚地反映管道内的真实的电荷分布。

在实验过程中,受金属小球大小和放置位置精确度的影响,金属小球的放置位置和仿真模型中的位置存在误差,不能完全与仿真模型中的位置相对应,导致成像显示时金属小球位置与仿真位置之间有所偏差,为了准确衡量系统有效性和成像效果,采用结构相似性(structural similarity, SSIM)和相关系数作为实验结果的评价指标,实际测量的 SSIM 结果如表 4~6 所示。

从表 4~6 可以看出,使用 Landweber 和 PDIPA 图像重建算法的重建图像的 SSIM 保持在 0.7 以上,可以基本反映出电荷的分布情况;实测数据的重建图像 SSIM 值略低于仿真数据的重建图像 SSIM 值,误差范围为 6%~15%,与实际情况相符。

表 1 单个带电小球时图像重建算法结果

Table 1 Results of image reconstruction algorithm for a single charged particle

电荷颗粒坐标	真实分布	仿真数据		实测数据	
		Landweber 算法	PDIPA 算法	Landweber 算法	PDIPA 算法
(4.5,0)					
(-1,-1)					
(-2,0)					
(-1,3)					
(1,2.5)					

表 2 两个带电小球时图像重建算法结果

Table 2 The result of image reconstruction algorithm with two charged particles

电荷颗粒坐标	真实分布	仿真数据		实测数据	
		Landweber 算法	PDIPA 算法	Landweber 算法	PDIPA 算法
(0.5,4) (-4,-0.5)					
(3,3) (-3,3)					
(1,4) (3,3)					
(0,0) (1,-1)					
(1.5,2.5) (4.5,-0.5)					

表 3 三个带电小球时图像重建算法结果

Table 3 The result of image reconstruction algorithm with three charged particles

电荷颗粒坐标	真实分布	仿真数据		实测数据	
		Landweber 算法	PDIPA 算法	Landweber 算法	PDIPA 算法
(-1,-4) (4,-1) (-1,4)					
(-3.5,-2.5) (1,4) (2.5,1)					
(-0.5,-4) (-3.5,3) (3,3)					
(-2,-1) (-2.5,3.5) (2,3)					
(1,-1) (-1,-1) (0,1)					

表 4 单个电荷颗粒两种图像重建算法图像的 SSIM

Table 4 SSIM of two image reconstruction algorithms for a single charged particle

电荷颗粒坐标	仿真数据		实测数据	
	Landweber 算法	PDIPA 算法	Landweber 算法	PDIPA 算法
(4.5,0)	0.879 9	0.993 5	0.890 4	0.872 9
(-1,-1)	0.806 0	0.886 3	0.806 3	0.847 6
(-2,0)	0.834 0	0.900 5	0.766 1	0.915 9
(-1,3)	0.849 4	0.940 0	0.849 6	0.897 4
(1,2.5)	0.846 9	0.916 8	0.853 1	0.954 5

表 5 两个电荷颗粒时两种图像重建算法图像的 SSIM

Table 5 SSIM of two image reconstruction algorithms for two charged particles

电荷颗粒坐标	仿真数据		实测数据	
	Landweber 算法	PDIPA 算法	Landweber 算法	PDIPA 算法
(0.5,4)	0.777 4	0.934 7	0.758 7	0.867 9
(-4,-0.5)	0.863 2	0.976 0	0.808 5	0.894 6
(3,3)	0.821 7	0.882 5	0.789 8	0.809 2
(-3,3)	0.881 1	0.936 1	0.788 5	0.814 1
(1,4)	0.826 4	0.968 5	0.837 5	0.860 6
(3,3)				
(0,0)				
(1,-1)				
(1.5,2.5)				
(4.5,-0.5)				

表 6 三个电荷颗粒时两种图像重建算法图像的 SSIM

Table 6 SSIM of two image reconstruction algorithms for three charged particles

电荷颗粒坐标	仿真数据		实测数据	
	Landweber 算法	PDIPA 算法	Landweber 算法	PDIPA 算法
(-1,-4)				
(4,-1)	0.826 1	0.975 4	0.797 4	0.813 4
(-1,4)				
(-3.5,-2.5)				
(1,4)	0.696 4	0.796 3	0.706 3	0.792 8
(2.5,1)				
(-0.5,-4)				
(-3.5,3)	0.788 7	0.988 4	0.733 7	0.768 6
(3,3)				
(-2,-1)				
(-2.5,3.5)	0.806 7	0.828 3	0.744 4	0.783 3
(2,3)				
(1,-1)				
(-1,-1)	0.816 5	0.863 9	0.816 7	0.802 7
(0,1)				

重建图像的相关系数如表 7 和 8 所示。由表 7、8 可以看出,PDIPA 算法的重建图像相关系数比 Landweber 算法的相关系数大,重建出的图像识别度更高。实测数据的重建图像相关系数略低于仿真数据的重建图像的相关系数,误差范围为 8%~15%,重建出的图像识别度较高,证实 EST 成像系统实测的数据真实有效。

表 7 单个电荷颗粒时两种图像重建算法相关系数

Table 7 Correlation coefficients of two image reconstruction algorithms for a single charged particle

电荷颗粒坐标	仿真数据		实测数据	
	Landweber	PDIPA	Landweber	PDIPA
	算法	算法	算法	算法
(4, 5, 0)	0.305 1	1.000 0	0.304 9	0.867 6
(0.5, -4.5)	0.355 2	0.995 6	0.346 7	0.995 6
(-4.5, 0)	0.351 7	0.999 6	0.350 7	0.995 5
(-0.5, 4.5)	0.562 6	0.996 9	0.538 8	0.943 3
(-1, -1)	0.356 5	1.000 0	0.357 6	0.963 9

表 8 两个和三个电荷颗粒时两种图像重建算法相关系数

Table 8 Correlation coefficients of two image reconstruction algorithms for two and three charged particles

仿真模型中电荷颗粒坐标	仿真数据		实测数据	
	Landweber	PDIPA	Landweber	PDIPA
	算法	算法	算法	算法
(0.5, 4)	0.228 7	0.975 4	0.228 6	0.663 9
(-4, -0.5)	0.252 4	0.998 2	0.253 5	0.950 8
(3, 3)	0.430 1	0.819 5	0.195 8	0.708 9
(-3, 3)	0.232 1	0.704 4	0.233 5	0.897 3
(0, 0)	0.207 8	0.847 2	0.204 5	0.898 6
(1, -1)	0.176 1	0.988 3	0.175 4	0.848 5
(-2, 2.5)	0.352 9	0.954 6	0.177 4	0.886 6
(4.5, 0.5)	0.349 2	0.949 7	0.168 6	0.638 6
(1.5, 2.5)				
(4.5, -0.5)				
(-1, -4)				
(4, -1)				
(-1, 4)				
(-3.5, -2.5)				
(1, 4)				
(2.5, 1)				
(-0.5, -4)				
(-3.5, 3)				
(3, 3)				

4 结 论

本文针对传统的静电传感器无法确定磨粒径向位置和磨粒数目的问题,设计了一套基于 FPGA 技术的 EST 成像系统,并进行滑油系统的带电磨粒静电监测实验,可有如下结论。搭建的基于 FPGA 的数据采集处理系统,包括 12 路信号调理电路、AD 模块和串口通信等,经测试证实各模块功能正常,可满足实际测量的需要。通过带电小球模拟滑油中荷电磨粒进行实验,证明本文搭建的 EST 滑油磨粒监测系统对不同位置的荷电颗粒均有较好的成像效果,可以实现对管道内电荷分布的监测。通过与有限元软件仿真数据的对比,在使用相同图像重建算法的条件下,实测数据的重建图像 SSIM 值略低于仿真数据的重建图像 SSIM 值,误差范围为 6%~15%;重建图像相关系

数与仿真数据重建重建相关系数接近,误差范围为 8%~15%,从而验证了 EST 成像系统采集数据的准确性。

参考文献

- [1] 薛倩,孙钦升,刘婧,等.基于 ECT/EST 双模信息融合的磨粒图像重建算法[J].润滑与密封,2019,44(5):51-56.
XUE Q, SUN Q SH, LIU J, et al. Abrasive image reconstruction algorithm based on ECT/EST dual mode information fusion [J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(5):51-56.
- [2] THUKU I T, RAHMAT M F, WAHAB N A, et al. 2-D finite element modeling of electrostatic sensor for tomography system [J]. Sensor Review, 2013, 33(2):104-113.
- [3] JURJEVICIC B, SENEGACNIK A, DROBNIC B, et al. The characterization of pulverized-coal pneumatic transport using an array of intrusive electrostatic sensors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(12):3434-3443.
- [4] 李绍成,左洪福.磨粒在线监测静电传感器设计[J].压电与声光,2010,32(2):325-328.
LI SH CH, ZUO H F. Design of electrostatic sensor for wear debris online monitoring [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(2):325-328.
- [5] 陈志雄,左洪福,詹志娟,等.滑油系统全流量在线磨粒静电监测技术研究[J].航空学报,2012,33(3):446-452.
CHEN ZH X, ZUO H F, ZHAN ZH J, et al. Study of oil system oil-line debris electrostatic monitoring technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3):446-452.
- [6] 陈志雄,左洪福,詹志娟,等.黄铜全流量在线磨粒静电监测实验研究[J].中国机械工程,2012,(15):1848-1854.
CHEN ZH X, ZUO H F, ZHAN ZH J, et al. Experiment study for oil-line debris electrostatic monitoring of brass [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, (15):1848-1854.
- [7] 张文彪.静电法稀相气固两相流测量机理研究[D].天津:天津大学,2014.
ZHANG W B. Research on the measurement mechanism of dilute gas-solid two-phase flow based on electrostatic sensor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [8] 殷逸冰,左洪福,冒慧杰,等.航空发动机进气道静电传感器空间模型解析及感应信号影响因素实验分析[J].仪器仪表学报,2015,36(4):795-803.
YIN Y B, ZUO H F, MAO H J, et al. Spatial alysis of inlet electrostatic sensor and experimental study on influence factors of charge-induced signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(4):

- 795-803.
- [9] 冒慧杰,左洪福,殷逸冰,等. 静电传感器对滑油系统磨粒电量测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1):40-47.
MAO H J, ZUO H F, YIN Y B, et al. Study on measurement method of Debris' change using the electrostatic sensor in the oil system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 40-47.
- [10] 薛倩,刘婧,马敏,等. 基于原始对偶内点法的 EST 图像重建[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(10): 1973-1981
XUE Q, LIU J, MA M, et al. EST image reconstruction based on primal dual interior point algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(10): 1973-1981.
- [11] 钟志荣,左洪福,郭家琛,等. 基于阵列式静电传感器的颗粒带电量估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7):80-90.
ZHONG ZH R, ZUO H F, GUO J CH, et al. An estimation method of particle charge based on array electrostatic sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 80-90.
- [12] 李博文. 基于 DSP 与 FPGA 的 ECT 数据采集系统研究与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2017.
LI B W. Research and design of ECT data acquisition system based on DSP and FPGA [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
- [13] 郭永彩,苏渝维,高潮. 基于 FPGA 的红外图像 实时采集系统设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 514-519.
GUO Y C, SU Y W, GAO CH. Design and implementation of real time infrared image collection system based on FPGA [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 514-519.
- [14] 陈曦,杨亮,李鹏斐,等. 基于 FPGA 的静电测向系统[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8):1901-1906.
CHEN X, YANG L, LI P F, et al. Design of electrostatic direction-finding system based on FPGA [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1901-1906.
- [15] 詹从来,龙伟,丁远超,等. 基于 FPGA 的多路数据采集与处理系统设计[J]. 深圳大学学报(理工版), 2016, 33(2): 127-133.
ZHAN C L, LONG W, DING Y CH, et al. Design of multi channel data collection and processing system based on FPGA [J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2016, 33(2): 127-133.
- [16] 翟华,闫梦飞,吕庆洲,等. 组合 FPGA 光电传感器阵列的顶管机激光姿态测量系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7):50-57.
ZHAI H, YAN M F, LV Q ZH, et al. Laser attitude measurement system of pipe jacking machine based on FPGA photoelectric sensor array [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7):50-57.
- [17] 何敏,王文静,王琼,等. 基于 FPGA 的呼吸机质检数据管理系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(6):102-105.
HE M, WANG W J, WANG Q, et al. Design of data management system for quality inspection of ventilator based on FPGA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(6): 102-105.
- [18] 赵佳,任伟,杨勇,等. 基于 FPGA 的示波记录仪采集模式设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(11):132-137.
ZHAO J, REN W, YANG Y, et al. Acquisition mode design of oscilloscope and recorder based on FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(11): 132-137.
- [19] 穆星达. 阵列式静电传感器成像系统研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
MU X D. Research on the array electrostatic sensor imaging system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [20] 刘婧. 基于机器学习的 EST 图像重建算法研究[D]. 天津:中国民航大学, 2020.
LIU J. Research of EST image reconstruction algorithm based on machine learning [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.

作者简介



薛倩, 2008 年于青岛农业大学获得学士学位, 2010 年于天津大学获得硕士学位, 2013 年于天津大学获得博士学位, 现为中国民航大学副教授, 主要研究方向为航空无损检测和电学层析成像。

E-mail:qxue@cauc.edu.cn

Xue Qian received her B. Sc. degree in 2018 from Qingdao Agricultural University, received her M. Sc. degree in 2010 from Tianjin University, received her Ph. D. degree in 2013 from Tianjin University. Now she is an associate professor at Civil Aviation University of China. Her main research interests include Aviation non-destructive testing and Electrical tomography.



王一虎, 2017 年于西安航空学院获得学士学位, 现为中国民航大学硕士研究生, 主要研究方向为航空无损检测和电学层析成像。

E-mail:18892082871@163.com

Wang Yihu received his B. Sc. degree in 2017 from Xi'an Aeronautical University. Now he is a M. Sc. candidate at Civil Aviation University of China. His main research interests include Aviation non-destructive testing and Electrical tomography.