

# 药柱产品缺陷的激光错位散斑自动检测

李光保, 孙建宇, 陈浩, 平昊, 郑学鹏

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

**摘要:** 针对包覆药柱和低燃温药柱的脱黏、气泡等缺陷, 目前主要通过传统人工方式进行检测, 存在检测效率低、主观经验依赖性强、质量稳定性差等问题。为了实现包覆药柱和低燃温药柱的高效检测, 满足常态化高强度、高密度发射形势下包覆药柱和低燃温药柱快速、批量研制需求, 研发了一种基于双轴运动的激光散斑检测系统, 该检测系统可完成缺陷检测、激光远程启动、伺服电机驱动、自动定位并在上位机上实现数据通讯等功能。对缺陷的检测试验结果表明, 所开发的激光散斑检测系统可兼容检测多种型号的包覆药柱和低燃温药柱, 检测效率高, 精度高。

**关键词:** 激光散斑; 缺陷检测; PLC; 伺服驱动

**中图分类号:** TP23; TG115.28

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6656(2022)10-0006-05

## Laser shearographic speckle automatic detection of grain product defect detection

LI Guangbao, SUN Jianyu, CHEN Hao, PING Hao, ZHENG Xuepeng

(Shanghai Aerospace Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600, China)

**Abstract:** For the defect detection of coated grain and low burning temperature grain, such as debonding, bubbles, etc., at present, the traditional manual detection method is mainly used, which has some problems, such as low detection efficiency, strong dependence on subjective experience and poor quality stability. In order to realize the efficient detection of coated grain and low burning temperature grain, and meet the rapid and batch development requirements of coated grain and low burning temperature grain under the situation of normalized high-density emission, a laser shearographic detection system based on biaxial motion is developed. The detection system mainly completes defect detection, the remote starting of the laser, the driving of the servo motor, the automatic positioning and realizing the data communication in the terminal computer. The experimental results show that the developed laser speckle detection system can be compatible with many types of coated grain and low burning temperature grain, with high detection efficiency and high precision.

**Key words:** laser speckle; defect detection; PLC; servo drive

无损检测技术<sup>[1]</sup>在航空航天、军工等领域的缺陷检测中发挥着重要作用<sup>[2]</sup>, 其中激光错位散斑干涉技术因具有全场性、非接触、无污染、高精度和高灵敏度等优势, 在军工产品检测中得到了较多的应用<sup>[3]</sup>。固体火箭发动机作为导弹的重要部件, 其发动机装药的性能决定了发动机工作时的安全性<sup>[4-5]</sup>, 为了保证发动机装药的正常工作, 必须要求推进剂

与包覆层紧密黏接。文章设计了一种激光错位散斑自动检测系统, 对具有脱黏缺陷的某型包覆药柱进行无损检测<sup>[6]</sup>, 试验结果表明, 激光错位散斑干涉技术相对于其他常规无损检测手段, 在复合材料的无损检测方面具有独特的优势, 能更准确、有效地检测出包覆层药柱的脱黏缺陷, 并能精确测量缺陷大小、位置, 适用于复合材料结构的快速检测。

### 1 总体方案

激光错位散斑自动检测系统组成如图 1 所示, 主要包括负载加压装置、升降机构、控制台、稳压电源、真空泵等模块。控制部分主要由伺服电机、PLC

收稿日期: 2022-04-18  
作者简介: 李光保(1995—), 男, 工程师, 主要从事机电一体化控制、智能检测的研究工作  
通信作者: 李光保, 18363998150@163.com

(可编程逻辑控制器)<sup>[7]</sup>、真空气压计<sup>[8]</sup>、电磁阀及限位开关等组成。检测部分主要由工业计算机、激光散斑探伤器及检测软件<sup>[9]</sup>等组成，系统检测状态如图 2 所示。

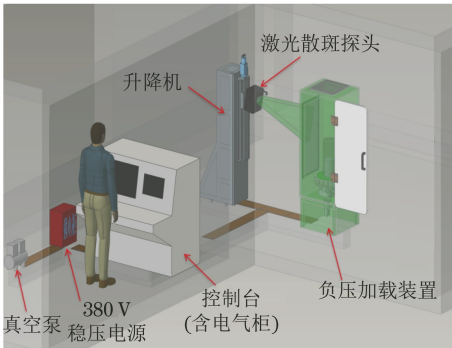


图 1 激光错位散斑自动检测系统组成

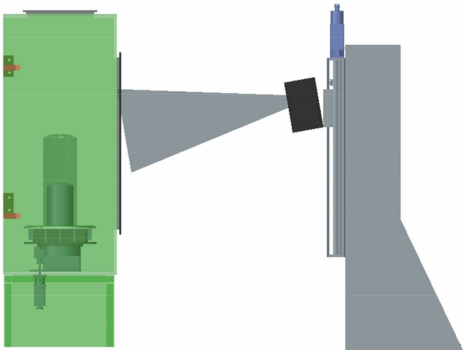


图 2 系统检测状态示意

## 2 结构设计

### 2.1 负载加压装置

负载加压装置主要由负压柜、真空泵、气缸、压缩机、转台组件等部件组成。负压柜配合真空泵为待测产品提供真空环境；压缩机和气缸用于为负压柜泄压(检测结束后)；真空气压计用于测量负压柜内实时气压并反馈至控制终端；转台组件用于装卸、安放检测产品并在负压柜真空状态下带动检测产品旋转。负载加压装置结构如图 3 所示，转台组件结构如图 4 所示。

### 2.2 升降机构

升降机构主要由机架、直线模组、激光散斑探伤器、伺服电机等部件组成，其结构示意图如图 5 所示。机架材料为 Q235B，框架由方管焊接而成，底板、机架底部通过调节地脚调平，采用螺栓固定；直线模组安装在机架前面板上，搭配伺服电机带动激光散斑探伤器上下运动。激光散斑探伤器由激光器、方向调节器、迈克尔逊干涉光路等组成，用于检测产品缺陷。

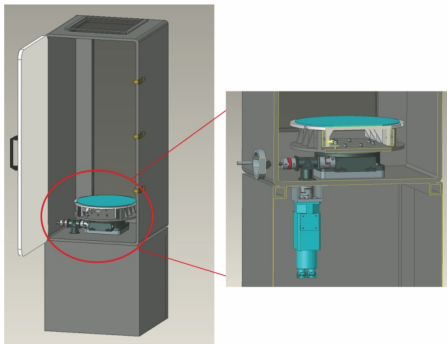


图 3 负载加压装置结构示意图

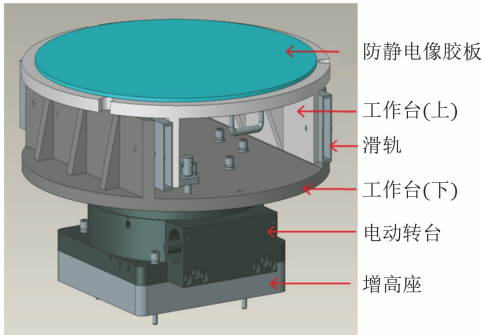


图 4 转台组件结构示意图

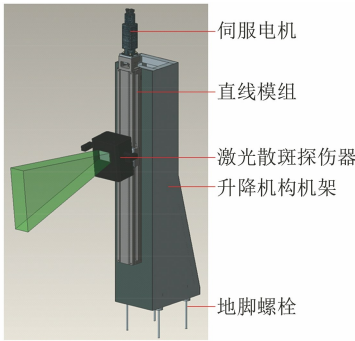


图 5 升降机构结构示意图

## 3 控制系统设计

控制系统包含 3 个层次：设备层、控制层和操作层。其整体架构如图 6 所示，其中，两台伺服电机分别带动升降机构(携带激光探头)和负压柜(带动检测转台)，配合激光散斑探伤器和真空泵完成检测工艺流程，其中通过伺服电机驱动器和西门子 PLC(可编程逻辑控制器)完成通信<sup>[10]</sup>，升降机构、转台可以由触摸屏和手轮来控制，真空气压计负责采集负压柜真空度示数并反馈到触摸屏，真空泵的驱动和激光散斑探伤器的驱动也由西门子 PLC 控制，最终将所有信息显示到触摸屏上，并通过缺陷检测软件将采集到的图像信息显示到工业计算机上。

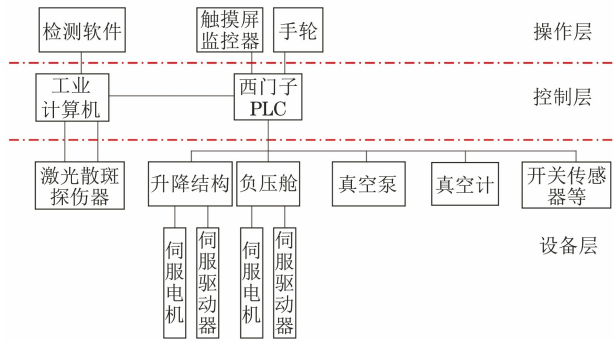


图 6 控制系统总体架构

3.1 控制系统 PLC

西门子控制器 PLC 的作用为接收各子系统发送的数据,并向子系统发送控制指令。控制器采用西门子 S7-1200 系列 PLC,除 PLC CPU 外,主要包括扩展 I/O 模块、模拟量输入模块等。扩展 I/O 模块主要完成开关量输入信号的采集以及开关量控制信号的输出,模拟量输入模块主要采集真空气压计的模拟量信号。PLC 控制系统框图如图 7 所示。

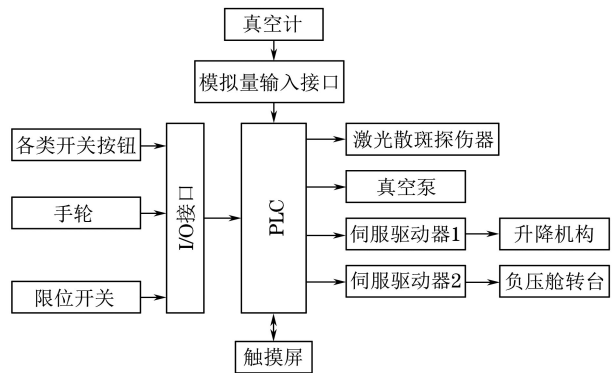


图 7 PLC 控制系统框图

3.2 伺服电机控制

在待检测产品,沿其圆周和高度方向均匀划分出 6 个区域,为提高检测效率,需把待检测产品固定在负压柜转台上,升降机构分为两个检测位置,转台分为 3 个检测位置,升降机构固定时,按工艺流程完成其中一个区域的检测后,通过转台伺服电机驱动,完成转台的 120°旋转,然后重复该工艺流程 3 次(完成 3 个转台位置的检测),再驱动升降机构移动到下一位置重复转台的操作,最终完成待检测产品的全部检测。为了满足旋转精度的要求,转台的控制中采用了交流伺服控制系统,以实现位置的精准控制。

伺服电机的位置控制方式是采用 PLC 控制器输入伺服驱动器脉冲的频率,从而实现对伺服系统转动速度的控制。在实际运行过程中,PLC 控制器通过控制脉冲个数实现电机不同角度的转

动,从而确定驱动设备运动的实际位置,所涉及的伺服驱动系统采用半闭环方式,伺服电机控制方式如图 8 所示。

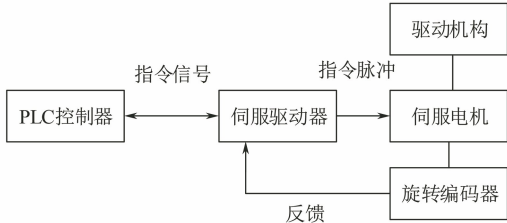


图 8 伺服电机控制方式

3.3 程序设计

3.3.1 PLC 程序流程

整个检测系统中的伺服电机控制、激光散斑探测器驱动、真空泵驱动、压缩机驱动、真空计读数等都是由 PLC 控制器程序进行控制,PLC 控制系统控制流程如图 9 所示。

3.3.2 触摸屏程序

触摸屏程序设计主要包括界面设计和按钮及数值输入等控件的逻辑编写,其基于检测系统的工艺要求进行编写,可满足下位机的数据采集和显示,触摸屏界面如图 10 所示。

4 缺陷检测功能实现

缺陷检测功能是激光错位散斑自动检测系统的核心功能<sup>[11-12]</sup>,检测软件主程序界面如图 11 所示。软件界面包含控制部分、视频窗口、冻结图像显示窗口、操作日志文件等。软件功能主要包括视频显示、图像处理、缺陷测量和定位、系统设置等。

4.1 图像处理

检测软件的图像处理功能主要有平滑滤波、去背景和对比度拉伸。

4.1.1 平滑

图像平滑采用线性平滑处理方式,能使得采集的检测图像亮度渐变,减小突变梯度,实现图像的平滑去噪声。某图像平滑处理前后效果如图 12 所示。

4.1.2 去背景

检测图像不可避免地会产生整体变形,而整体变形会导致背景图出现条纹,对检测结果产生影响,系统则可采用去背景方式对图像进行处理。

4.1.3 对比度拉伸

若处理后得到的图像缺陷特征比较模糊,不易分辨,则可以通过对比度拉伸来调整图像的对比度。

4.2 缺陷测量

图像初始标定后,将检测图像与标准试块对

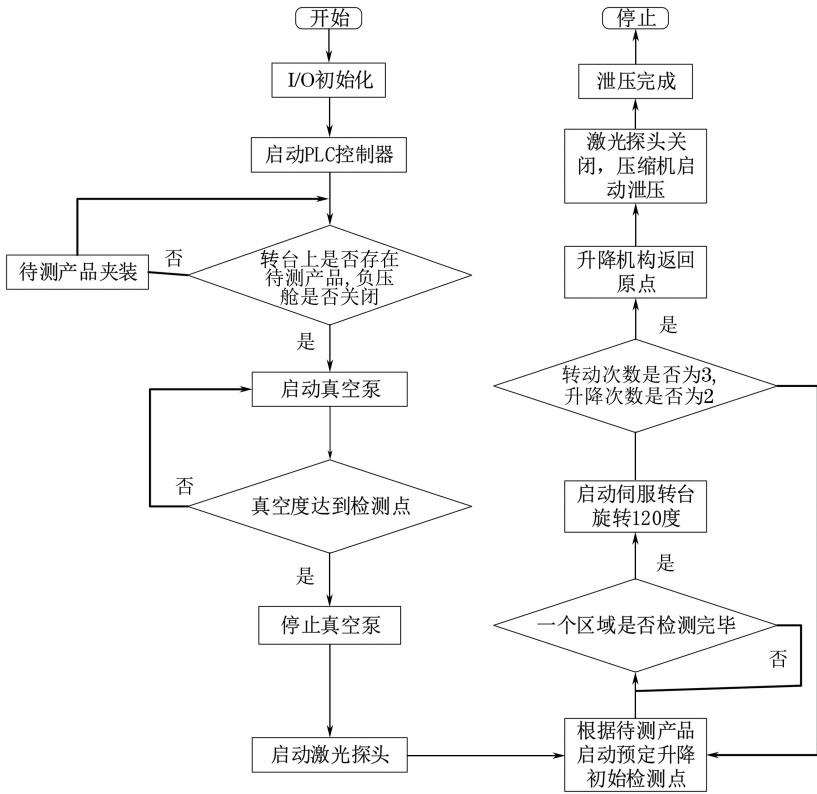
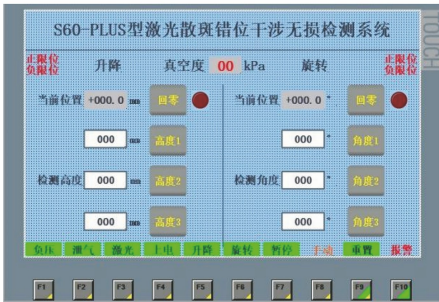


图 9 PLC 控制系统控制流程



(a) 界面一



(b) 界面二

图 10 触摸屏界面示例

比,判断缺陷边界,然后进行缺陷大小和面积测量,测量结果可同时显示在图像左侧标签栏和缺陷位相图上。

4.2.1 画缺陷

该功能会在图像上描绘出一块缺陷区域,测量

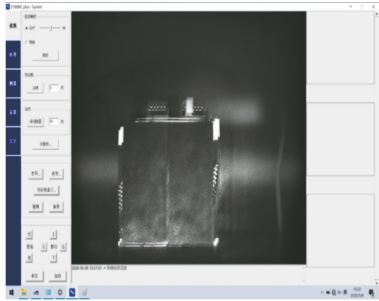


图 11 检测软件主程序界面示例

结果中会显示出描绘区域所代表缺陷的几何尺寸,可选择圆形或矩形方式用于描绘缺陷区域的形状。

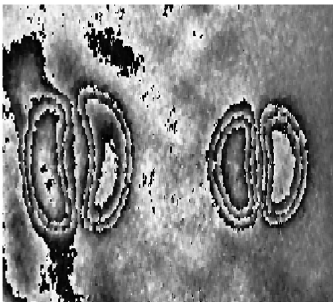
4.2.2 缺陷定位

缺陷自动定位功能可实现待测物体表面缺陷位置的精确标记,便于后续的分析、修复工作。

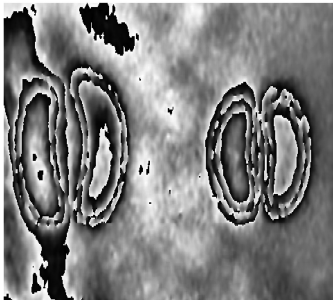
5 试验验证

为了验证激光错位散斑自动检测系统的功能,首先选用某型号含有缺陷的包覆药柱产品,将其固定于负载加压装置的检测转台上,设定真空度为 40 kPa,启动激光散斑探伤器,打开缺陷检测软件,观测该包覆药柱产品的检测图像,通过缺陷检测软件对检测图像进行平滑滤波、去背景、对比度拉伸和去包裹处理,得到的包覆药柱产品的检测位相图如图 13 所示,试



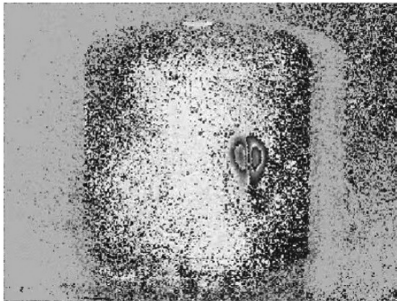


(a) 未平滑处理

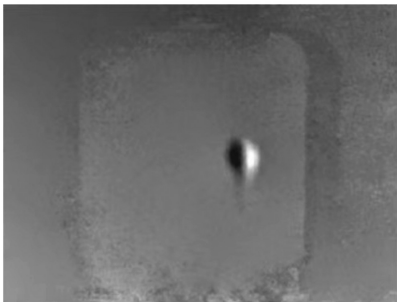


(b) 平滑处理后

图 12 某图像平滑处理前后效果



(a) 检测图像



(b) 处理后图像

图 13 某型包覆药柱产品的检测位相图

验结果表明设计的激光错位散斑自动检测系统能够有效地实现包覆药柱的缺陷检测。

为了验证检测系统的检测精度，首先制备含有不同大小缺陷的待测工件，制备的缺陷直径分别为 2.05, 3.15, 4.08 mm，胶层的厚度为 0.5 mm，待测工件实物如图 14 所示。

检测时，通过缺陷检测软件，观测到微小的气压变化即可得到高对比度的位相条纹图(见图 15)，经

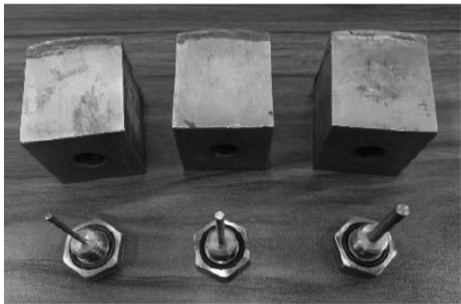
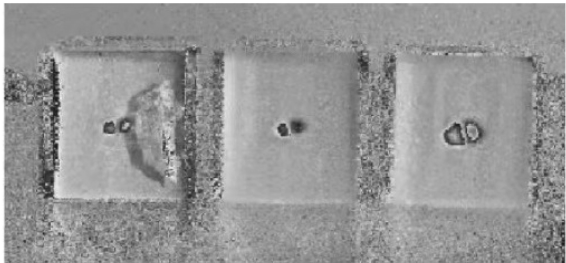
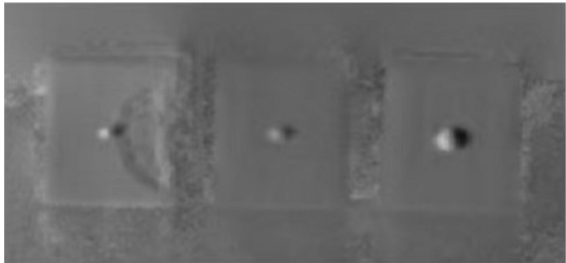


图 14 待测工件实物



(a) 检测图像



(b) 处理后图像

图 15 待测工件的缺陷检测结果

过一系列图像处理，可检测出直径 2 mm 左右的脱黏缺陷，该试验验证了所设计的激光错位散斑自动检测系统的可行性，表明其能满足实际工程中的检测要求。

## 6 结语

设计了一种激光错位散斑自动检测系统，并对某型包覆药柱进行缺陷检测试验。试验结果表明，所设计的系统能够有效地对包覆药柱进行缺陷检测，可检测出直径约 2 mm 的脱黏缺陷，并可快速准确地显示缺陷位置，测量出缺陷尺寸，满足实际工程中的要求。

## 参考文献：

- [1] 张丽涵,陈智群. 固体推进剂装药缺陷检测新技术[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(11): 41-44.
- [2] 郭兴旺,陈栋. 固体火箭发动机绝热层脱粘的脉冲热像检测分析[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(2): 169-175.

(下转第 77 页)

间留有间隙,在药头涂覆时,使得桥丝和玻璃间隙中充满点火药液,以增加桥丝和药剂的接触面积,提高点火药头的发火可靠性。

4.1.2 药头分步涂制

将点火药头涂制由多次点涂覆盖桥丝改为先用药液薄薄地在桥丝中间部位涂覆一层药剂,高倍显微镜检查后,确保桥丝和玻璃中间部位均覆盖有点火药剂且无明显空腔,然后再涂制成型药头。对分步涂制的点火药头进行微焦点工业 CT 成像检测,其结果如图 8 所示。

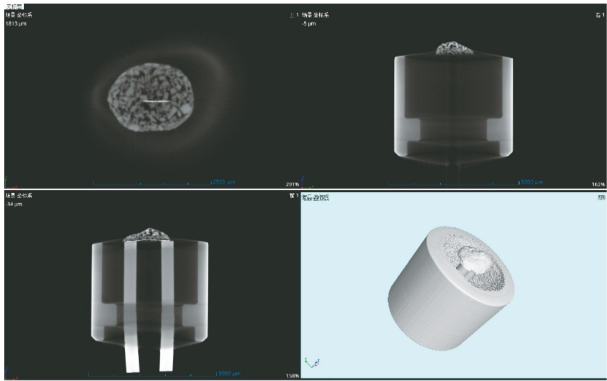


图 8 分步涂制点火药头的微焦点工业 CT 图像

由图 8 可以看出,电点火头桥丝区点火药分布均匀,且无大直径缩孔出现。

4.1.3 调整配制点火药药液的溶液

将药液由浓度为 5% 硝化棉溶液调整为 5% 硝

基软片溶液。硝基软片的成分 80%~86% 为硝化棉。经对比,点火药和硝基软片溶液配制的点火药药液在涂制第一遍药头时,点火药和桥丝的接触效果就优于硝化棉配制的药液,且不容易形成缩孔。

5 结语

采用微焦点工业 CT 成像检测技术对桥丝式电点火头桥丝区药剂出现的缩孔等缺陷进行检测,结果表明,该技术能够清晰分辨桥丝区药剂缩孔形态并测量缩孔尺寸,能够有效分辨出尺寸不小于 10 μm 的缺陷和缩孔,从而对电点火头涂覆工艺质量控制起到重要作用。

在采用微焦点工业 CT 成像检测技术的基础上,通过控制桥丝焊接弧度,改善药头涂覆工艺,改变点火药配比浓度,能够有效避免点火药头内部形成缩孔进而影响产品发火可靠性。

参考文献:

[1] 陈守文,成一,张赞峰,等. 涂覆式桥丝电点火头的研究[J]. 火工品,2002(3): 15-17.  
[2] 王鹏,杜志明. 桥丝式电火工品热点火理论[J]. 火工品,2007(4): 26-30.  
[3] 严楠. 桥丝式电点火头贮存失效敏感参量的研究[J]. 含能材料,2015(S2):370-372.

(上接第 10 页)

[3] 周伟武,任志忠,周杰. 基于错位散斑干涉的固体推进剂包覆层脱粘缺陷检测[J]. 新技术新工艺,2021,(11):75-77.  
[4] 程茶园,林鑫,葛丽,等. 航天泡沫材料的声激励激光错位散斑检测[J]. 无损检测,2020,42(9):74-76.  
[5] 李文强,黄刚,杨录,等. 超声透射时差法固体推进剂厚度及缺陷检测[J]. 火力与指挥控制,2014,(5):22-26.  
[6] 邵振荣,朱霖,黄建民. 浅议西门子 1200 系列 PLC 在高速精密压力机上的应用[J]. 锻压装备与制造技术,2020,55(4):76-79.  
[7] 武建平. 天馈线智能监测系统的应用[J]. 山西电子技

术,2021,(3):67-70.  
[8] 黄文君,王华忠,杨飞. MODBUS 实时数据采集系统测控技术[J]. 2014,(2):16-19.  
[9] 李宏策,柏友运,李文芳. 基于 RS232 的人机交互控制系统开发[J]. 测控技术,2015,34(3):75-78.  
[10] 耿荣生,郑勇. 航空无损检测技术发展动态及面临的挑战[J]. 无损检测,2002,24(1):1-5.  
[11] 白宝俊,等. 激光全息相位剪切照相轮胎无损检测系统在汽车轮胎检测中的应用[J]. 轮胎工业,2003,23(2):27-30.  
[12] 杨庆峰,孙金立,胡丑,等. 飞机铝蜂窝复合材料的典型缺陷检测[J]. 无损检测,2019,41(12):45-48.