

# 双基推进剂包覆层界面脱粘敲击检测系统设计

张兴成 李艳军 曹愈远 宋甫成 赵杨超

(南京航空航天大学, 南京 210016)

**文 摘** 双基推进剂橡胶包覆层界面脱粘降低了推进剂工作性能,使其运行存在潜在的安全隐患。针对此问题,设计并开发了一套由信号处理组件、自动化控制组件和智能诊断组件构成的敲击检测系统,旨在通过自动化控制与智能敲击诊断技术相结合,更加全面的获取待测件的状态,提高检测的准确性和可靠性。实验结果表明,敲击检测系统可以识别橡胶包覆层脱粘缺陷,并且当敲击检测分辨率为3~10 mm时,脱粘缺陷检测准确率 $\geq 87.5\%$ ;BP神经网络隐含层神经元数设置6或7时,故障识别效果良好,K-means聚类算法对敲击检测数据故障确诊率 $\geq 90\%$ 。综上所述,敲击检测系统具有较高的检测分辨率和准确率,可以实现对双基推进剂包覆层粘接质量的客观评价。

**关键词** 橡胶包覆层,敲击检测,界面脱粘,系统设计,自动控制,故障诊断算法

中图分类号:TP27

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.03.016

## The System Design of Interface Debonding Tap Detection in Double Base Propellant Coatings

ZHANG Xingcheng LI Yanjun CAO Yuyuan SONG Fucheng ZHAO Yangchao

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** The interface debonding of the double-base propellant rubber coatings reduces the working performance of the propellant and makes a potential safety hazard to its operation. To solve this problem, a set of tap detection systems composed of signal processing components, automated control components and intelligent diagnostic components was designed and developed, aiming to obtain a more comprehensive acquisition of devices under test through the combination of automated control and intelligent tap diagnosis technology, and it improves the accuracy and reliability of detection. The results show the tap detection system can identify the debonding defects of the rubber coating, and when the tap detection resolution is between 3 to 10 mm, the detection accuracy of debonding defects is more than 87.5%. When the number of neurons in the hidden layer of the back propagation neural network is set to 6 or 7, the fault recognition effect is good, and the fault diagnosis rate of K-means clustering algorithm to the tap detection data is more than 90%. In summary, the tap detection system has high detection resolution and accuracy, so it can realize the objective evaluation to the bonding quality of the double-base propellant coatings.

**Key words** Rubber coating, Tap detection, Interface debonding, System design, Automatic control, Fault diagnosis algorithm

### 0 引言

双基推进剂作为各类战略导弹、航天飞行器和运载火箭的主要推进剂之一<sup>[1]</sup>,对其进行安全性评估就显得尤为重要。从发生的各类推进故障来看,双

基推进剂橡胶包覆层脱粘是引起灾难的关键因素之一<sup>[2]</sup>。由于双基推进剂大都采用单件加工模式<sup>[3]</sup>,生产工艺复杂,胶粘可靠性难以得到保证,这间接增加了推进剂橡胶包覆层发生脱粘的概率。

收稿日期:2020-10-17

基金项目:国家自然科学基金(50705097);中国民航总局科技基金(MHRD07238);南京航空航天大学研究生开放基金(kfj20200725)

第一作者简介:张兴成,1996年出生,硕士研究生,主要从事故障诊断与健康监测研究工作。E-mail:zhangxc1996@nuaa.edu.cn

目前应用于推进剂橡胶包覆层脱粘检测的技术主要有人工敲击检测法、超声C扫技术<sup>[4]</sup>和激光电子散斑干涉法<sup>[5-6]</sup>等。但人工检测效率比较低,且易出现漏检情况;激光电子散斑对胶粘结构具有一定损伤,存在安全隐患,应用场景比较局限;超声波检测操作复杂,需要耦合介质,且橡胶内衬阻尼大,超声波会有较大的衰减,不适用于现场检测。针对上述检测技术在推进剂橡胶包覆层脱粘检测存在的不足,需要一套具备无损检测、高效准确、操作简单,并且可以适用不同生产需求、工作环境的双基推进剂界面脱粘检测系统。

双基推进剂装药制备一般流程及探伤检测工序如图1所示。基于对推进剂的现场检测和装药质量的评价,根据预制包覆层的检测探伤反馈,指导车药整形的特殊要求。本文在传统敲击检测基础上,融合智能诊断方法<sup>[7]</sup>、传感器技术<sup>[8]</sup>、信号处理技术<sup>[9]</sup>、自动化控制<sup>[10]</sup>和大数据处理等对敲击检测系统进行设计开发,拟实现对双基推进剂包覆层粘接质量的客观评价。

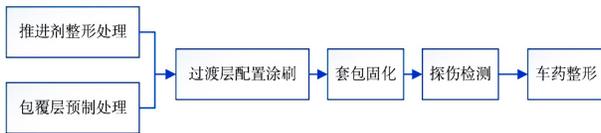


图1 推进剂一般制备流程与探伤检测工序

Fig. 1 The general preparation process and flaw detection process of propellant

## 1 局部敲击检测

局部敲击检测是一种对待测界面进行逐点检测的无损检测技术,常用于蜂窝结构、层压结构<sup>[11-12]</sup>和胶接结构的检测。现代局部敲击检测理论是由Cawley和Adams共同建立的<sup>[13]</sup>,他们发现敲击被测件的不同区域时,敲击力信号的时域和频域都有明显的差异,故可通过分析敲击不同区域的时域和频域差异判断局部结构的优劣;冷劲松等人<sup>[14]</sup>对CFRP(碳纤维增强塑料)层板脱粘区和无损区进行敲击检测获得时域曲线,并利用快速傅里叶变换(FFT)将时域曲线变换到频域,发现脱粘区域的结构模态低于无损区域;Ju-Won Kim等<sup>[15]</sup>人利用压电传感器的结构健康监测(SHM)技术来实时监测CFRP的脱胶缺陷;肖莉等<sup>[16]</sup>人对压电阻抗的界面脱粘结构进行无损检测和健康监测研究,为无损检测和传感器技术在局部敲击检测的实现提供了研究方向。

在敲击力作用下,局部被检结构可简化成一个脱粘界面层向信号响应层的映射关系模型,如图2所示。

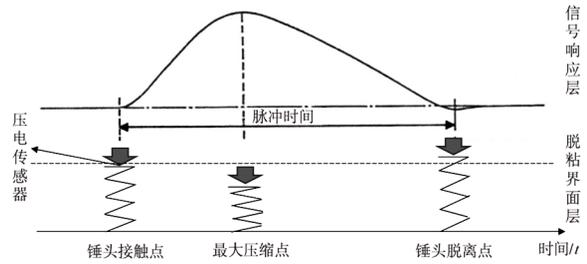


图2 局部敲击检测的映射关系模型

Fig. 2 The mapping relationship model of partial tap detection

从质量为 $m$ 敲击锤敲击待测结构表面上开始计时至敲击锤弹起脱离待测结构表面这一过程所经历的时间,称为敲击持续时间(敲击脉冲时间) $\tau$ ,即:

$$\tau = \frac{\pi}{\omega} \quad (1)$$

式(1)敲击频率 $\omega = \sqrt{\frac{m}{K}}$ ,这时局部所受压力为:

$$F = \frac{kv}{\omega} \sin \omega t \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

当结构出现脱粘缺陷时,可以简化为四周固定的支撑薄板结构,假设脱粘结构简化为一个直径为 $d$ 的圆,脱粘深度为 $h$ 局部接触刚度为 $K_c$ ,可以得到缺陷刚度为:

$$K_d = \frac{64\pi D}{d^3} \quad (3)$$

式中, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ , $E$ 为弹性模量, $\mu$ 为泊松比,这时局部有效接触刚度为:

$$K_e = \frac{K_c \cdot K_d}{K_c + K_d} \quad (4)$$

通过分析式(3)、(4)<sup>[17]</sup>可知,缺陷直径 $d$ 越大,缺陷深度 $h$ 越小,有效接触刚度也就越小,敲击力作用在局部位置的时间 $\tau$ 也就越长,即局部敲击持续时间越久,越容易产生结构脱粘缺陷。

敲击锤端部的压电传感器负责采集被测结构(脱粘界面层)所受的振动信号,并转化成数字电信号响应(信号响应层)。受压电元件两电极间的电容量为:

$$C_a = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{\delta} \quad (5)$$

式中, $\epsilon_r$ 为相对介电常数, $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $\delta$ 为压电元件厚度, $S$ 为极板面积。

## 2 敲击检测系统

### 2.1 系统架构层

敲击检测系统架构可分为信号采集与传输层、自动化集成控制层和信息处理与显示层。信号采集与

输层围绕敲击信号的采集、处理与传输展开敲击采集装置的电路优化设计;自动化集成控制层主要是配合工件模型和控制策略实现对整个敲击检测系统进行串

联控制;信息处理与显示层指示了敲击数据流的传输、存储与处理显示。系统架构层如图3所示。

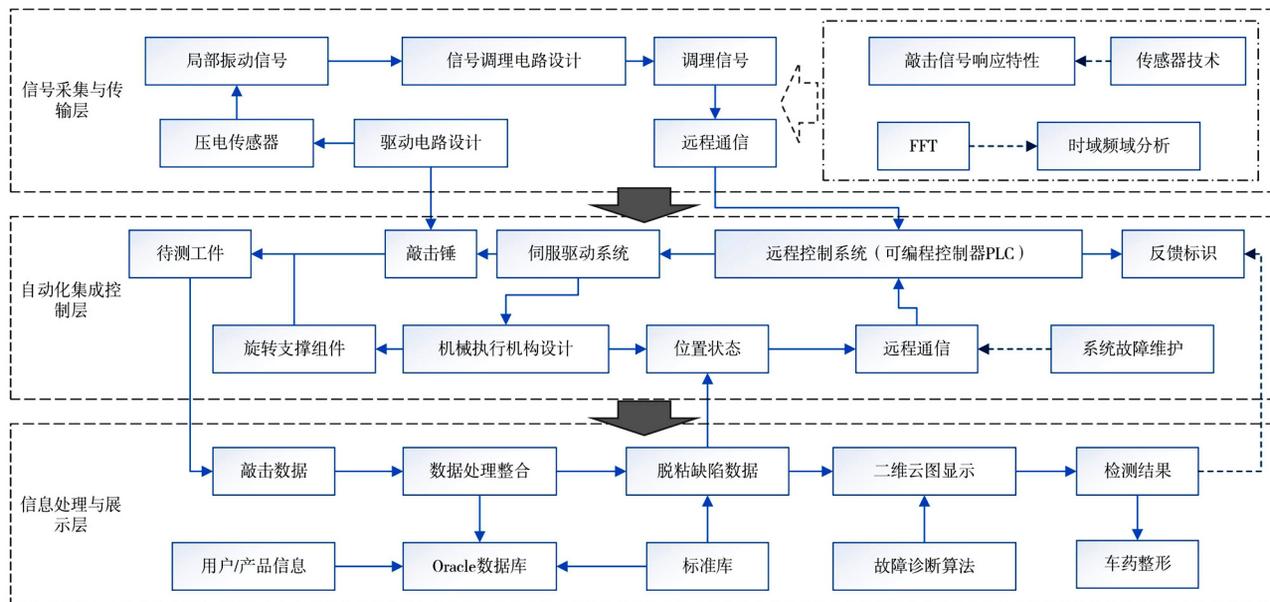


图3 界面敲击检测系统整体架构层

Fig. 3 The architecture layer of interface tap detection system

## 2.2 信号采集处理系统

信号采集与处理系统主要由敲击锤、驱动电路和信号调理电路组成,如图4所示。敲击锤内部由两个一定间距的通电螺线管构成,中间部分嵌入磁块,并通过滑杆结构固定敲击锤头,敲击锤头内部嵌入压电传感器拾取敲击作用力的持续时间。

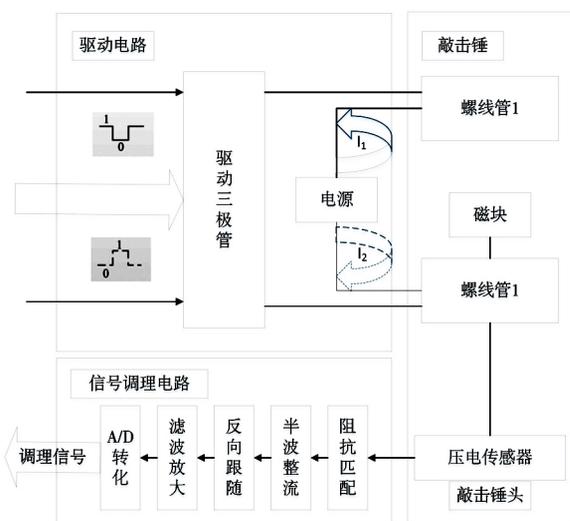


图4 敲击信号采集与处理系统

Fig. 4 The system of tap signal acquisition and processing

驱动电路通过三极管实现信号放大和开关电路设计,在控制信号的作用下,为两个螺线管提供交替导通驱动电流,进而产生电磁场,吸引磁块并带动敲击锤头循环往复运动,当出现局部敲击作用后,敲击

锤内部的压电传感器会将作用力转换为敲击电信号并传向信号调理电路。

由于敲击所得的信号微弱且受高频信号和噪声影响较大,需要进行滤波整流等信号调理,提高有用敲击信号的信噪比,保证敲击信号质量满足要求,使得最终采集到的信号能够实现对脱粘缺陷的评估。

## 2.3 自动化集成控制系统

自动化集成控制系统主要由远程控制组件和机械执行机构组成。远程控制组件主要由集成电气设备、集成控制按钮和人机界面组成。主要负责系统的控制指令的接收与反馈、状态显示与控制和维护等工作。机械执行结构则是由旋转支撑组件、机器人手臂和伺服电机等机构组成。

由于自适应控制系统面向待测试件,故对工件的关键尺寸参数进行定义,如表1所示。

表1 双基推进剂关键尺寸参数定义表<sup>1)</sup>

Tab. 1 The definition table of the double-base propellant key dimension parameter mm

工件长度	工件直径	球面半径	过渡曲面半径	检测偏移量
$L$	$D$	$R_1$	$R_2$	$h$

注:1)  $h$ 为 $z$ 轴电机轴心到工件表面的偏移量。

基于表1尺寸参数定义,建立工件的简化模型,并对敲击锤空间轨迹中的关键点进行标定(即敲击锤运动轨迹的关键坐标计算),如图5所示。

通过关键点的坐标值,能够确定执行机构状态

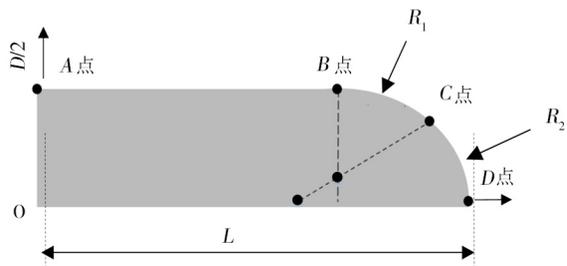


图5 敲击轨迹关键点坐标标定

Fig. 5 Key point coordinate calibration based on tap trajectory

转化的节点位置、转化时间,达到对不同尺寸工件表面的自适应。

$$\begin{cases} x_c = L - R_1 + (R_1 + h)/(R_1 - R_2) \sqrt{(R_1 - R_2)^2 - (D/2 - R_2)^2} \\ y_c = (D/2 - R_2)(R_1 + h)/(R_1 - R_2) \end{cases} \quad (8)$$

(4)D点:

$$\begin{cases} x_D = L + h \\ y_D = 0 \end{cases} \quad (9)$$

基于上述关键坐标值的计算,对自适应控制的四轴联动机构建立空间坐标系,将关键坐标的参数值映射到自适应控制系统,控制上表现为不同的脉冲输出,

计算四个关键点坐标,A点作为起始零点:

(1)A点:

$$\begin{cases} x_A = x_w \\ y_A = D/2 + h \end{cases} \quad (6)$$

式中, $x_w$ 表示距离起始零点的安全距离。

(2)B点:

$$\begin{cases} x_B = L - R_1 + \sqrt{(R_1 - R_2)^2 - (D/2 - R_2)^2} \\ y_B = D/2 + h \end{cases} \quad (7)$$

(3)C点:

机械执行机构(防爆伺服电机等)识别控制指令,完成敲击锤的姿态控制,并实现位置信息的闭环控制。

## 2.4 软件系统设计

软件系统主要分为五个模块进行设计开发,主要包括数据采集与预处理、运动控制、数据处理与成像、数据库与系统管理,如图6所示。

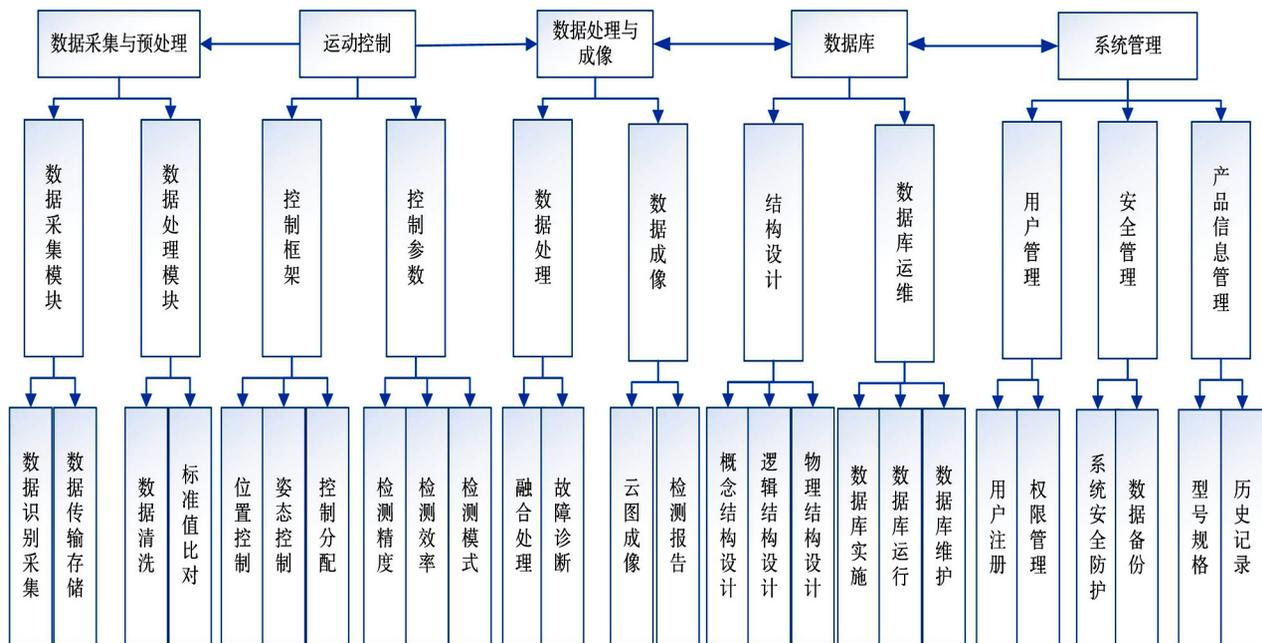


图6 界面脱粘敲击检测软件系统功能框图

Fig. 6 The functional block diagram of the interface debonding tap detection software system

通过对运动控制框架和控制参数进行分析,引入不同运动控制模式的设置,并实时对控制系统进行状态监测;数据采集与预处理模块实现对敲击锤采集信息的获取、传输与数据清洗,同时导入数据库;数据处

理与成像模块可以对检测数据进行融合诊断,输出二维云图、检测报告等;数据库模块主要针对数据库结构和运维进行设计与开发;系统管理模块实现对用户信息、产品信息和系统安全的监测等。

## 2.5 检测流程

敲击检测系统基于自动控制系统和敲击检测系

统,以人的干预指导为核心,通过软硬件系统相互配合实现智能敲击检测,敲击检测流程图如图7所示。

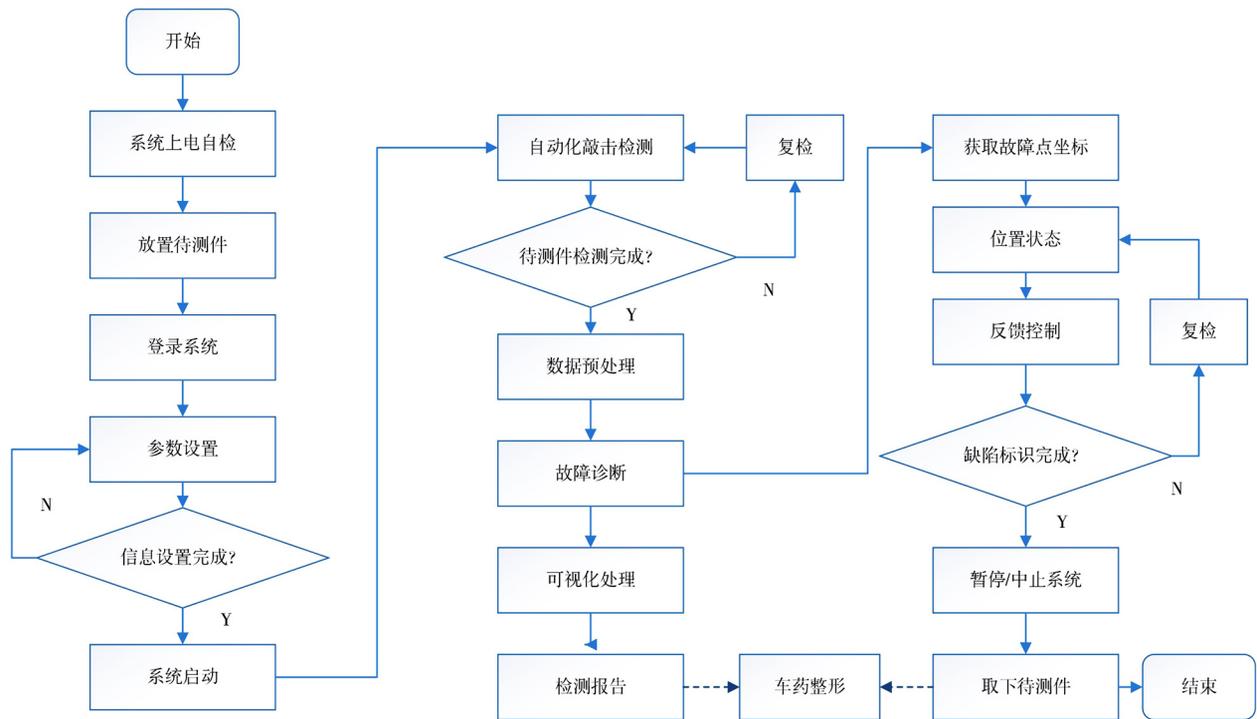


图7 界面脱粘敲击检测系统操作流程

Fig. 7 The operation flow chart of interface debonding tap detection system

## 2.6 实现框图

基于上述对敲击检测架构层的分析与设计,敲击检测系统实现了具备工件自适应、人机隔离、远程

通信、自动化控制、可视化人机交互、数据处理与存储以及智能诊断识别等功能,最终检测实物及系统关联如图8所示。

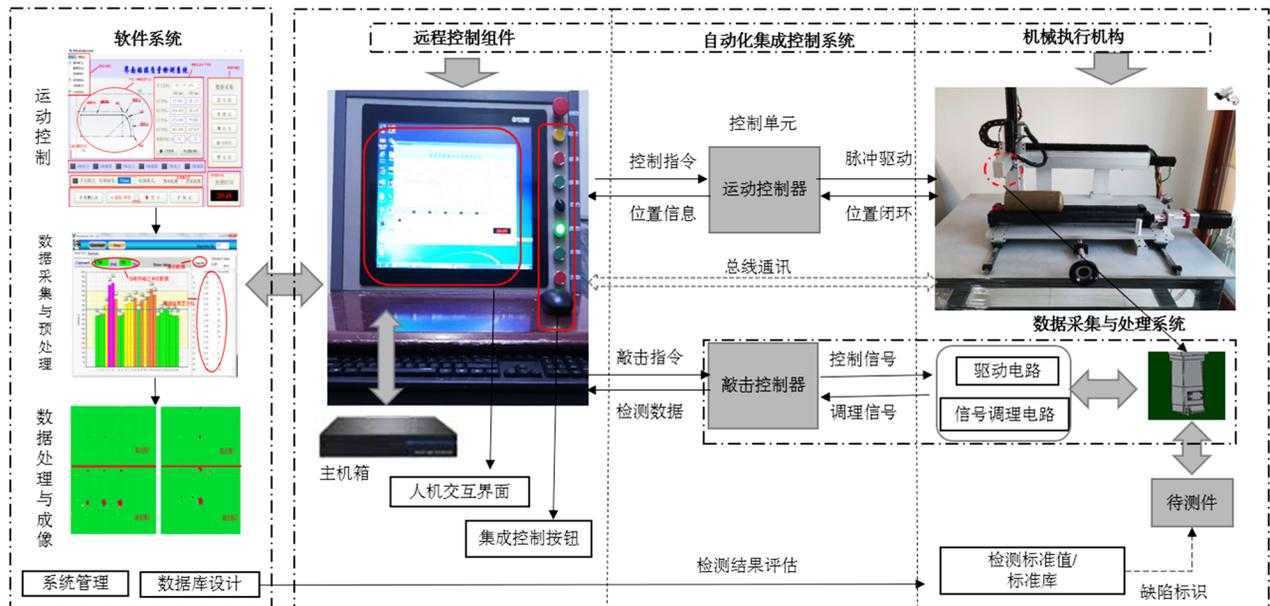


图8 界面脱粘敲击检测系统最终实现框图

Fig. 8 The final realization block diagram of the interface debonding tap detection system

## 3 实验

### 3.1 试验件设计

忽略待测推进剂药柱类球面,制备长度为225 mm,

直径 $\phi 127$  mm的圆柱体试验件,并将柱面沿轴向等分成四个区域,标号A/B/C/D,在四个分区交界位置的圆周方向上预埋2个 $\phi 10$  mm和2个 $\phi 5$  mm、蒙皮厚度为

2 mm、橡胶包覆层为1 mm的脱粘缺陷,药柱芯为实木材质(选用标准主要考虑安全性、工件制备的难易程度、固体柱芯采集信号的相似性)。待测试件如图9所示。

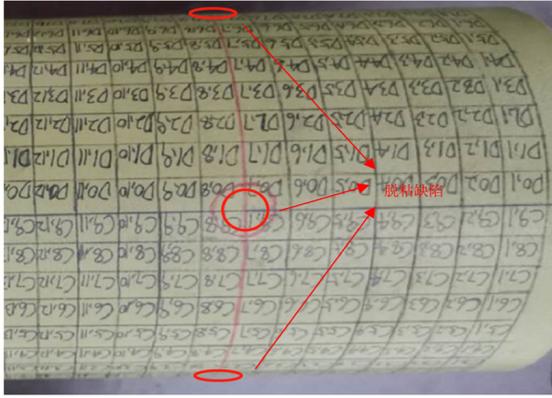


图9 预埋脱粘缺陷的试验件

Fig. 9 Test piece with embedded debonding defect

### 3.2 敲击检测实验

敲击检测参数需要根据实际检测需求进行设置,如表2所示。

表2 敲击检测实验参数设置

Tab. 2 The parameter settings tap detection experiment

敲击频率 /Hz	敲击分辨率 /mm	锤头直径 /mm	瞬时敲击力 /N	敲击间距 /mm
16	5	3	0.0675	2

#### 3.2.1 脱粘缺陷识别对比验证

由于检测现场噪声对超声C扫检测的影响较大,两组实验需在低噪声环境下进行检测,避免外界因素影响实验结果。

基于对大量敲击检测数据的分析,确定敲击阈值、敲击标准值和颜色标识(其中,初步认为大于敲击标准值50%为故障点,图10中标为红色的点),经过对噪声数据预处理(插值与脏数据剔除)与故障诊

断算法识别后对敲击数据进行颜色映射,然后根据对应坐标位置对网格进行排布,导出敲击检测结果如图10(a)所示。其中,图10(b)为超声C扫检测相同试验件的二维展开图。

#### 3.2.2 脱粘缺陷检测准确率验证

基于上述制备的试验件,设置4组不同分辨率(3~10 mm)的敲击检测实验,为了避免检测结果偶然性,每种分辨率分别进行10次,并统计敲击识别出的故障网格和实际划分的故障网格个数,计算每种分辨率的脱粘缺陷识别情况,即检测准确率。检测结果如表3所示。

表3 不同检测分辨率下的脱粘缺陷检测准确率

Tab. 3 Detection accuracy of debonding defects under different detection resolutions

检测分辨率 /mm	单次网格数 /个	实际总故障网格/个	识别总故障网格/个	检测准确率/%
3	17374	250	250	100
5	6300	80	78	97.5
8	2418	60	57	95
10	1550	40	35	87.5

#### 3.2.3 故障诊断算法测试分析

对上述5 mm检测分辨率的10组数据集(每组6 300个数据)分别进行随机抽取1 080个数据对两种故障诊断算法进行训练,表4展示了一种抽取结果。

表4 检测分辨率为5 mm采集的部分敲击数据及缺陷情况

Tab. 4 Part of the tap data and defects collected with 5 mm inspection resolution

网格坐标点	数据1	...	数据5	脱粘缺陷	平均值
A 0, 1	1179	...	1164	0	1176.1
A 0, 2	1181	...	1157	0	1172.5
...	...	...	...	...	...
C 9, 7	1256	...	1232	1	1245.8
C 9, 8	1234	...	1239	1	1243.6
...	...	...	...	...	...
D 7, 8	1220	...	1331	1	1233.8
D 7, 9	1352	...	1228	1	1227.1
...	...	...	...	...	...
D 9, 26	1170	...	1163	0	1160.5
D 9, 27	1165	...	1158	0	1168.1

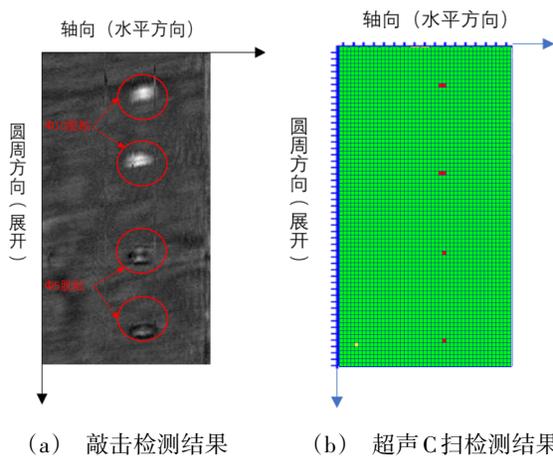


图10 敲击检测和超声检测实验结果对比

Fig. 10 The comparison of test results between tap testing and ultrasonic testing

#### 3.2.3.1 BP神经网络

BP神经网络中隐含层神经元数是决定网络效果优劣的关键,个数选择不当将导致网络学习能力不

够或者归纳能力差。根据经验公式设置隐含层神经元数  $h = \sqrt{1 + 2 + a}$ , 其中  $a$  常数, 学习率选择 0.01, 隐含层激活函数选择 logsig 函数。测试结果见图 11。

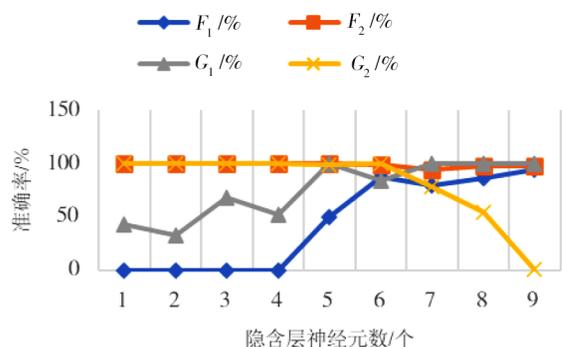


图 11 隐含层神经元数对识别准确率的影响

Fig. 11 The Influence of the number of neurons in hidden layer on the accuracy of recognition

其中:

$F_1$  为第一层数据中故障数据的识别正确率;  
 $F_2$  为第一层数据中正常数据的识别正确率;  
 $G_1$  为第二层数据中故障数据的识别正确率;  
 $G_2$  为第二层数据中正常数据的识别正确率。

由图 11 可知, 当隐含层神经元数在 [1, 9] 范围内时, 随着其个数的增加, 第一层数据的识别准确率整体偏好, 而第二层数据的识别准确率则由好到坏。

### 3.2.3.2 K-means 聚类

K-means 聚类算法通过对预处理数据集随机 K 个初始聚类中心, 计算各个聚类均值作为新的聚类中心重新聚类, 如果聚类中心不发生改变, 退出聚类算法, 否则, 反复这个过程。

为了避免 K-means 的初始中心是随机过程带来的偶然性, 设置 10 次测试试验, 3 次聚类确定聚类中心, 测试诊断结果如图 12 所示。

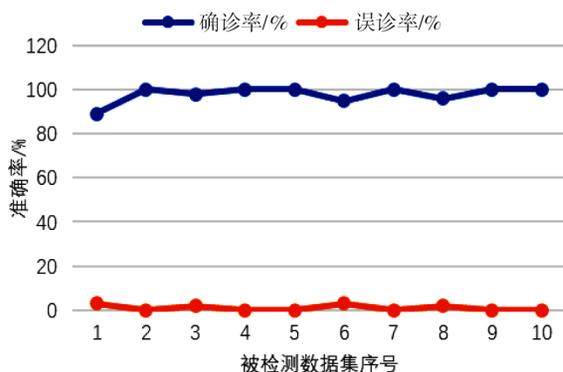


图 12 基于 K-means 聚类算法的敲击数据诊断结果

Fig. 12 The tap data diagnosis results based on K-means clustering algorithm

### 3.3 实验结果分析

(1) 从脱粘缺陷识别对比验证结果可以看出, 敲击检测和超声 C 扫检测对脱粘缺陷的检测结果基本吻合。

(2) 根据脱粘缺陷检测准确率验证结果分析表明, 不同检测分辨率 (3~10 mm) 的缺陷识别率  $\geq 87.5\%$ 。

(3) 由于检测分辨率和检测效率成反比, 但正比与缺陷识别率, 所以需要根据不同场景调整参数设置。

(4) 由 BP 神经网络测试结果可知, 当隐含层神经元数为 6 或 7 时, 整体识别准确率最佳; K-means 聚类诊断算法对敲击检测数据故障确诊率  $\geq 90\%$ , 误诊率  $\leq 5\%$ , 识别效果较好, 可以用于脱粘故障点的检测。

### 4 结论

(1) 该系统适用于双基推进剂界面脱粘检测, 并根据实际检测需求和应用场景不同, 设置不同的检测分辨率。

(2) 该系统解决了传统敲击检测效率不高、易漏检、安全性差等情况, 显著提高了双基推进剂界面脱粘检测的准确性、可靠性和安全性。

(3) 该系统能够对不同尺寸结构的双基推进剂的界面自适应, 保证敲击检测自动化的同时, 实现了产品的无损检测。

(4) 该系统可通过人机交互界面监测并反馈检测相关信息, 易实现流水线操作, 指导车药整形。

(5) 该系统操作简单, 不需要特殊耦合剂, 且不受噪声环境影响, 并且具备工业防爆等级, 可用于装药现场检测。

### 参考文献

[1] YILDINM H C, OEZUPEK S. Structural assessment of a solid propellant rocket motor: Effects of aging and damage [J]. Aerospace Science and Technology, 2011, 15(8): 635-641.

[2] 韩民圆, 王秀芳, 芦玉萍. 推进剂药柱粘接工艺研究 [J]. 化学推进剂与高分子材料, 2006(6): 57-60.

HAN Minyuan, WANG Xiufang, LU Yuping. Study on the bonding technology of propellant grain [J]. Chemical Propellant and Polymer Materials, 2006(6): 57-60.

[3] KIM W B, GANG J H, HONG J S, et al. Reliability analysis of solid rocket motor under bayesian framework [C]//Aiaa/asme/asc/ahs/asc Structures, Structural Dynamics & Materials Conference Aiaa/asme/ahs Adaptive Structures Conference Aiaa, 2012.

[4] 孙珞茗, 林莉, 马志远. 基于声压反射系数幅度谱特征的涂层脱粘超声 C 扫描成像检测研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 44-49.

SUN Luoming, LIN Li, MA Zhiyuan. Research on ultrasonic

C-scan imaging detection of coating debonding based on the amplitude spectrum characteristics of sound pressure reflection coefficient [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(12):44-49.

[5] VORONYAK T I, IVANYTS' KYI Y L, MURAVS' KYI L I, et al. Investigation of the deformation and fracture of composites with the help of electronic speckle interferometry [J]. *Materials Science*, 2013, 49(2):270-275.

[6] 邓兴峰,程茶园,王任达,等. 蜂窝夹层结构粘接质量电子散斑检测研究[J]. *量子电子学报*, 2000, 17(5):474.

DENG Xingfeng, CHENG Chayuan, WANG Renda, et al. Study on electronic speckle detection of bonding quality of honeycomb sandwich structure [J]. *Journal of Quantum Electronics*, 2000, 17(5):474.

[7] CHENG C S, SHANG Y M. A new K-means clustering based on genetic algorithm [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 203(10):94-98.

[8] 朱美蓝. 复合应力作用下混凝土强度与敲击机械阻抗值的数值模拟研究[D]. 北京交通大学, 2016.

ZHU Meilan. Numerical simulation study of concrete strength and percussive mechanical resistance under compound stress[D]. Beijing Jiaotong University, 2016.

[9] 任飞. 数字相关滤波法振动信号的处理技术分析[J]. *电子测试*, 2019(10):97-98.

REN Fei. Analysis of vibration signal processing technology based on digital correlation filtering method [J]. *Electronic Testing*, 2019(10):97-98.

[10] 代巍,韦庆恒,谢宁,等. 工业机器人超声波自动化焊点检测设备的设计研究[J]. *机电产品开发与创新*, 2020, 33(4):18-20.

DAI Wei, WEI Qingheng, XIE Ning, et al. Design and research of ultrasonic automatic solder joint inspection equipment for industrial robots [J]. *Development and Innovation of Mechanical and Electrical Products*, 2020, 33(4):18-20.

[11] 许振腾. 数字敲击检测在航空航天复合材料检测中

的应用技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2016.

XU Zhenteng. Research on the application technology of digital percussion detection in aerospace composite material detection [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[12] 詹绍正,宁宁,杨鹏飞,等. 复合材料夹芯结构的数字化敲击检测技术研究[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(3):90-94, 100.

ZHAN Shaozheng, NING Ning, YANG Pengfei, et al. Research on digital knock detection technology of composite sandwich structure [J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2018, 61(3):90-94, 100.

[13] CAWLEY P, ADAMS R D. The mechanics of the coin-tap method of non-destructive testing [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1988, 122(2):299-316.

[14] 冷劲松,杜善义,王殿富,等. 复合材料结构敲击法无损检测的灵敏度研究[J]. *复合材料学报*, 1995, 12(4):99-105.

LENG Jinsong, DU Shanyi, WANG Dianfu, et al. Sensitivity study of nondestructive testing of composite material structure percussion method [J]. *Journal of Composite Materials*, 1995, 12(4):99-105.

[15] JU-WON K, CHANGGIL L, SEUNGHEE P. Damage localization for CFRP-debonding defects using piezoelectric SHM techniques [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2012, 23(4):183-196.

[16] LI Xiao, CHEN Guofeng, CHEN Xiaoming, et al. Investigation of piezoelectric impedance-based health monitoring of structure interface debonding [P]. *SPIE Smart Structures and Materials+Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, 2016.

[17] 赵春梅,冯海燕,俞寿鹏. 蜂窝结构自动敲击无损检测技术研究[J]. *航空工艺技术*, 1993(2):20-23.

ZHAO Chunmei, FENG Haiyan, YU Shoupeng. Research on non-destructive testing technology for automatic knocking of honeycomb structure [J]. *Aeronautical Technology*, 1993(2):20-23.