

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209849

## 木材缺陷双机械手空气耦合超声检测方法\*

郭灿志<sup>1</sup> 潘琛<sup>2</sup> 孙万<sup>1</sup> 王晓东<sup>1</sup> 程广贵<sup>1</sup>

(1. 江苏大学智能柔性机械电子研究院 镇江 212013; 2. 上海航天化工应用研究所 湖州 313000)

**摘要:** 为了充分利用森林资源、切实提高木材利用率,基于工业机械手技术及空气耦合超声检测技术构建了一种双机械手空气耦合超声检测系统,针对系统缺陷检测分辨力、缺陷复形能力设计验证试验,并进行实验验证。实验结果表明:利用100 kHz聚焦换能器进行木材样件缺陷检测时,双机械手空气耦合超声检测系统对厚度为15 mm的木材中 $\geq 5$  mm的节子等缺陷有较好的检出能力,并且对不同形状的缺陷具有较强的复形能力,对复杂曲面构件的缺陷也具有较好的检出能力,检测方法的提出为木材的完整性评估和可用性评价提供了强有力的科学依据。

**关键词:** 超声检测;空气耦合超声;木材检测;缺陷检测;工业机械手

**中图分类号:** TP241 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

## Dual-robot air-coupled ultrasonic testing method for wood defects

Guo Canzhi<sup>1</sup> Pan Chen<sup>2</sup> Sun Wan<sup>1</sup> Wang Xiaodong<sup>1</sup> Cheng Guanggui<sup>1</sup>

(1. Institute of Intelligent Flexible Mechatronics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Shanghai Aerospace Chemical Engineering Institute, Huzhou 313000, China)

**Abstract:** In order to make full use of forest resources and effectively improve the utilization rate of wood, a dual-manipulator air-coupled ultrasonic testing system was constructed based on industrial manipulator technology and air-coupled ultrasonic testing technology, and the verification experiments were designed and carried out for the system defects inspection resolution and defects reproduction ability. The experimental results show that when the 100 kHz focusing probe is used for defect inspection of wood samples, the dual-manipulator air-coupled ultrasonic testing system has a good capacity to detect defects such as knots larger than 5 mm in wood with a thickness of 15 mm, and has a strong capacity to reproduce the shape of the defects of complex shapes and to inspect defects in parts with complex-curved surfaces. The successful implementation of the testing method can provide a scientific basis for the integrity and usability assessment of wood.

**Keywords:** ultrasonic testing; air-coupled ultrasound; wood inspection; defects inspection; industrial manipulator

## 0 引言

节子是木材中常见的缺陷类型,其对木材的力学性能产生严重的负面影响,如在抗弯试验中,95%的破坏点都发生在节子或节子附近<sup>[1]</sup>。超声检测是实现木材资源高效使用的重要手段之一,是规避木材缺陷、制定木材制材加工方案的关键依据,可以有效提高木材的出材率、降低返工率和生产成本,提高生产效率和产品质量,具有显著的社会效益和经济效益<sup>[2-4]</sup>。

近年来,空气耦合超声检测被认为是木材构件无损检测的一种有效手段<sup>[5-6]</sup>。空气耦合超声检测技术是一种以空气作为耦合介质,利用空气耦合超声换能器激励和接收超声波,进而检测材料或结构中缺陷的无损检测技术,具有

完全无损和非接触的特点,有利于实现构件的自动化检测,使得该技术有着很好的应用前景。空气耦合超声检测打破了传统超声检测需要使用专门耦合剂来提升透射到构件内部超声波能量的技术瓶颈,使得空气耦合超声不仅可以适用于部分金属构件,如铝板,的超声检测<sup>[7]</sup>,还进一步扩大了超声检测的应用范围,如多孔渗水材料、木制品、食品、药品及其他不能利用液体耦合剂的检测场合<sup>[8-11]</sup>。

随着生产现代化、智能化需求的提升,超声检测也从人工手动检测方式向自动化、智能化检测转变。但是,目前空气耦合超声检测设备多数还是2自由度或3自由度的笛卡尔坐标式检测系统,这类系统将超声换能器固定在龙门式(框架式)运动机构上,运动机构带动超声换能器运动完成

收稿日期:2022-05-05

\* 基金项目:国家自然科学基金(52105101)项目资助

对工件的检测<sup>[12]</sup>。由于超声检测一般要求超声换能器轴线垂直于被检测工件表面,而龙门式运动机构受限于其3个方向的平移运动模式,曲面构件的超声检测对其形成了巨大的挑战。工业机械手技术的日渐成熟为多自由度超声检测系统的开发提供了新的思路,鉴于空气耦合超声通常以一发一收的透射式检测方式来完成构件的超声检测<sup>[13-14]</sup>,因而,本文拟面向木材构件及复杂曲面构件的超声无损检测需求,基于超声透射检测法提出一种多自由度柔性空气耦合超声检测方法,开发一种基于工业机械手技术的双机械手空气耦合超声检测系统,以提升自动化空气耦合超声检测系统的检测性能,扩大系统的应用范围。

## 1 空气耦合超声波检测技术基础

多年来,空气耦合超声无损检测一直是国内外学者的主要研究方向<sup>[12-15]</sup>。超声波从介质1入射到介质2的过程中,会在两种介质的界面发生反射及透射,界面往返透射系数 $T_p$ 可由下式表示:

$$T_p = \frac{4z_1z_2}{(z_1+z_2)^2} \quad (1)$$

式中: $z_1$ 为介质1的声阻抗; $z_2$ 为介质2的声阻抗。

由式(1)可知,声压往返透射率只与界面两侧介质的声阻抗相关,界面两侧的声阻抗相差越小,声压往返透射率越高,反之就越低。声阻抗的大小等于介质密度 $\rho$ 与声速 $c$ 的乘积,当被检测的木材构件中存在节子缺陷时,节子中树脂含量高、材质紧密,硬度和密度明显高于其他正常区域,即在同一被检测木材构件中,节子位置的声阻抗 $z_2'$ 会明显大于正常区域的声阻抗 $z_2$ ,由式(1)易得,超声波在节子处的透射系数 $T_p$ 会显著小于周围区域。因此,可以根据接收到的超声波信号幅度,来判断节子是否存在。基于透射法的空气耦合超声检测原理示意如图1所示。

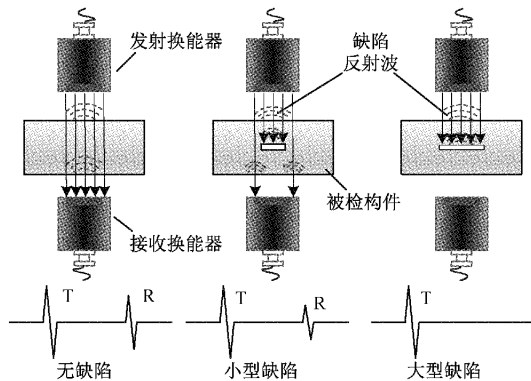


图1 透射法超声检测原理

由介质声阻抗计算公式可知,空气和固体被检测构件之间的声阻抗差异巨大,一般相差约5个数量级,由式(1)可知空气与被检测构件表面的透射系数极小,其界面间的声能损失巨大。因此,在实际工程中,空气耦合超声检测采用的频率通常在1 MHz以内,并且为了使接收换能器接收

到足够的有效信号,空气耦合超声检测系统一般会配置与空气耦合超声换能器相匹配的专用功率放大器和超低噪声前置信号放大器,以提高空气耦合超声信号的接收强度和信噪比。

## 2 多自由度柔性空气耦合检测系统

### 2.1 系统基本组成

木材在家具、建筑中有着广泛的应用,如果对木材质量检测不准确、不全面,可能造成产品不合格,甚至存在重大的安全隐患。为提升自动化超声检测系统的检测能力,解决木材构件、复杂曲面构件的自动化检测问题,多自由度柔性空气耦合超声无损检测系统的开发势在必行。

本文基于工业机械手,研究双机械手同步运动与空气耦合超声检测融合技术,开发了一种多自由度柔性化的自动化超声无损检测系统,可以实现曲面工件的轮廓跟踪运动,并且可以实时保持空气耦合换能器轴线垂直于被检测构件表面,能够满足超声检测的约束条件<sup>[1]</sup>,系统构成原理如图2所示。

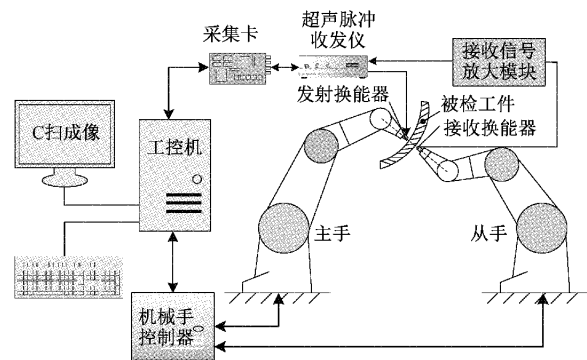


图2 双机械手空气耦合检测系统构成原理

系统硬件部分主要由六自由度机械手运动模块(主手、从手)、空气耦合超声检测模块(采集卡、超声脉冲收发仪、超声换能器)、工业计算机控制模块等组成;其软件部分主要由机械手运动控制软件、轨迹规划软件及上位机控制软件构成。

### 2.2 同步运动原理

对于该系统,双机械手的同步运动控制是系统的核心技术之一,是检测任务正常进行的关键。机械手能够严格的同步运动,主要是因为两点:

1) 两台机械手具有相同工件坐标系

两机械手相同工件坐标系的标定方法为:首先,设定工件坐标系为 $\{w\}$ ;其次,将工件固定在支架上;然后,两台机械手夹持标定工具,同时测量工件坐标系 $\{w\}$ 的原点 $O_w(x_{ori}, y_{ori}, z_{ori})$ 、X轴正方向上一点 $X_w(x_{wx}, y_{wx}, z_{wx})$ 、Y轴正方向上一点 $Y_w(x_{wy}, y_{wy}, z_{wy})$ 。根据右手法则,工件坐标系在两个机械手坐标系系统的描述可以由式(2)确定:

$$\begin{cases} X_w = \frac{(x_{wx} - x_{ori}, y_{wx} - y_{ori}, z_{wx} - z_{ori})}{\sqrt{(x_{wx} - x_{ori})^2 + (y_{wx} - y_{ori})^2 + (z_{wx} - z_{ori})^2}} \\ Y_w = \frac{(x_{wy} - x_{ori}, y_{wy} - y_{ori}, z_{wy} - z_{ori})}{\sqrt{(x_{wy} - x_{ori})^2 + (y_{wy} - y_{ori})^2 + (z_{wy} - z_{ori})^2}} \\ Z_w = X_w \times Y_w \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $X_w, Y_w, Z_w$  来表示工件坐标系  $\{w\}$  主轴方向的单位矢量。根据两台机器人各自记录的 3 个点的坐标值及式(2), 即可以计算出工件坐标系相对于两台机械手各自世界坐标系的映射关系(位置和姿态)。工件坐标系标定过程如图 3 所示, 工件短边方向为工件坐标系  $x$  轴, 长边方向为工件坐标系  $y$  轴。

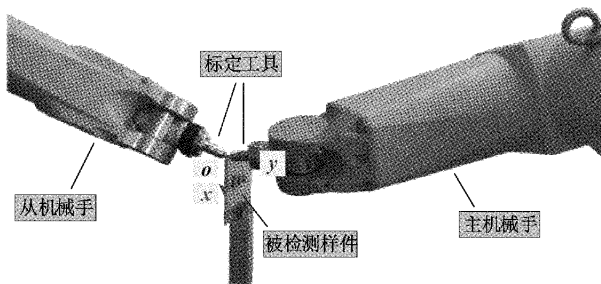


图 3 双机械手标定工件坐标系示意图

2) 两台机械手具有相同的运动轨迹、相同的运动速度

为了控制两个机械手同步运动, 基于 Open CASCADE (OCC) 开发了双机械手轨迹规划软件。轨迹规划软件能够给出每个轨迹点空间的六个自由度信息(3 个平移信息和 3 个转动信息), 通过每个点的参数信息能够保证机械手按照预定义的位姿运动到每一个检测点, 并且机械手所夹持的超声换能器都严格的与该点的法线重合。路径规划流程为导入 CAD 模型、确定模型的坐标系、设置检测区域和检测起始方向、计算主、从机械手轨迹、轨迹文件声明等步骤。

### 2.3 空气耦合超声检测模块

在空气耦合超声检测模块, 本系统选用的脉冲收发仪为苏州博昇科技 PRACUT111 超声收发仪, 该收发仪支持外触发模式, 该功能为双机械手空气耦合超声检测系统将超声信号和检测位置信号一一对应提供了硬件基础。在进行自动化扫查时, 一般需要对空气耦合超声脉冲收发仪的激励电压、接收增益等参数进行设置, 以便调整超声 A 扫信号至最优。

### 2.4 上位机控制软件模块

为便于对整个系统的控制, 考虑机械手控制器、超声数据采集卡等模块支持的 API 接口情况, 基于 .NET Framework 4.0 框架以 C# 编程语言开发了界面美观、操作简单、功能丰富的双机械手超声检测系统上位机控制软件, 如图 4 所示。

上位机控制软件主要包含超声 A 扫信号显示窗口、超声检测参数设置模块、超声 C 扫结果显示窗口和机械手运

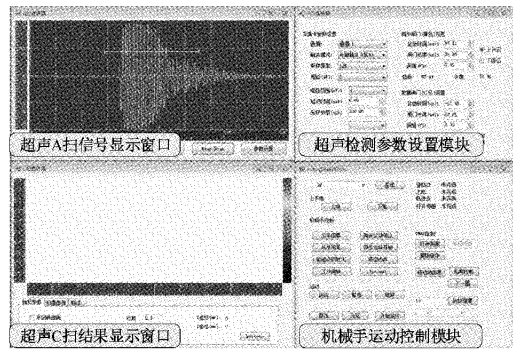


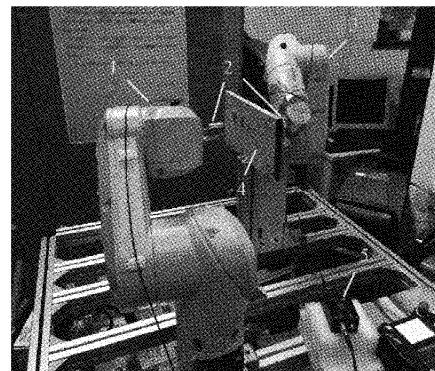
图 4 系统控制软件人机交互界面

动控制模块。其中超声 C 扫结果图像的成像原理是通过将 A 扫信号幅值转换为对应颜色, 以此来直观的显示检测位置是否存在缺陷。

## 3 验证实验

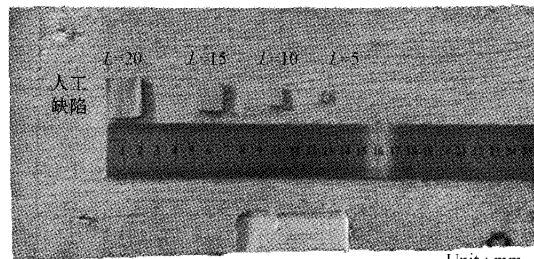
### 3.1 缺陷分辨力验证实验

为验证所构建双机械手空气耦合超声检测系统的缺陷检测分辨力, 选取一块长、宽、厚分别为 315、150、15 mm 的松木构件作为被检测样件, 样件表面用隔声材料制作边长分别为 20、15、10、5 mm 的正方形人工缺陷来模拟木材中的节子等缺陷, 采用频率为 100 kHz、焦距长度为 40 mm 的聚焦换能器对人工缺陷样件进行检测实验。检测实验方案及含人工缺陷的木材样件如图 5(a) 和 (b) 所示。



(a) 检测实验设置方案

1-主机机械手, 2-发射、接收超声换能器, 3-从机械手, 4-被检测木板样件, 5-前置放大器



(b) 人工缺陷样件

图 5 检测实验设置方案及含有人工缺陷的木材样件



超声检测模块参数设置为激励电压为 400 V、接收增益为 13 dB,对木板进行扫查,得到超声 C 扫结果,如图 6 所示(蓝色为正常部分,红色为缺陷部分)。

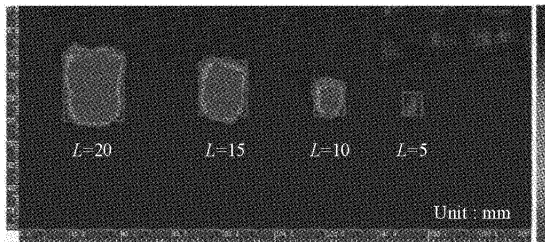
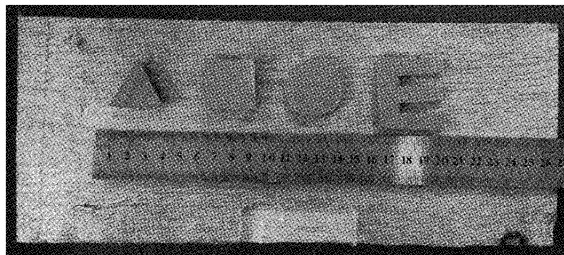


图 6 缺陷检测分辨率验证实验检测结果

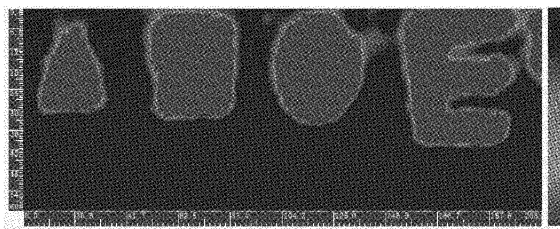
从 C 扫图中可以看出边长为 20、15、10、5 mm 的缺陷均可以被检出,但是边长 5 mm 缺陷的 C 扫描结果对比度稍差。

### 3.2 缺陷复形能力验证实验

为检验双机械手空气耦合超声检测系统对复杂形状缺陷的检出能力及对形状的复原能力,用同样的隔声材料、同样的方法制作了三角形、四边形、圆形、不规则形四种形状,对系统的缺陷复形能力进行验证。人工缺陷样品及检测结果分别如图 7(a)、(b)所示。



(a) 人工缺陷样品



(b) 检测结果

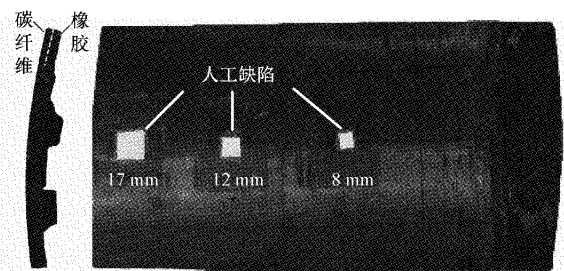
图 7 不同形状人工缺陷检测验证实验

从图 7(b)检测结果中可清楚的观察到三角形、四边形、圆形、不规则形四种缺陷均被检出,结果表明双机械手空气耦合超声检测系统对不同形状的缺陷具有较好的检出及复形能力。由上述两组实验可知,在使用 100 kHz 聚焦换能器的情况下,双机械手空气耦合超声检测方法对厚度为 15 mm 的木材中  $\geq 5$  mm 的节子等缺陷有较好的检出能力,并且对不同形状的缺陷具有较强的复形能力。

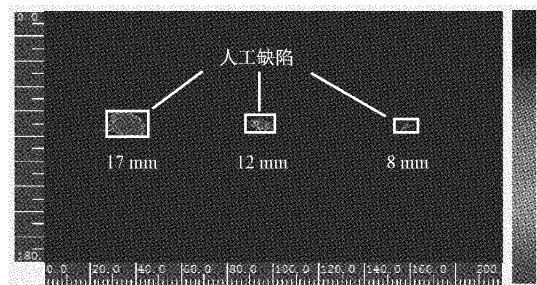
### 3.3 复杂曲面构件缺陷检测能力验证实验

执行复杂曲面构件缺陷的无损检测是多自由度双机械

手空气耦合超声检测系统的特有优势,由于实验室无曲面木材样件,因此选择一块弧形的、碳纤维-橡胶粘接复合材料构件作为检测对象,其和木材类似,也为各向异性材料,并用隔声材料制作 3 个方形人工缺陷并粘贴在样件表面来表示样件中的缺陷,其边长分别为 17 mm、12 mm、8 mm,以此来检验系统对复杂曲面构件的检测能力。检测过程中机械手夹持超声换能器沿被检测构件表面运动,并保持超声换能器在检测全过程垂直于构件表面,人工缺陷样品及检测结果分别如图 8(a)、(b)所示。



(a) 人工缺陷样品



(b) 检测结果

图 8 复杂曲面构件缺陷检测能力验证实验

从图 8(b)检测结果中可清楚的观察到 3 种尺寸的人工缺陷均被检出,结果表明双机械手空气耦合超声检测系统对复杂曲面构件的缺陷也具有较强检出能力。

## 4 结 论

本文针对木材构件及复杂曲面构件的超声无损检测需求,构建了一种多自由度柔性化的双机械手空气耦合超声检测系统,并针对该系统的缺陷检测分辨率、缺陷复形能力及复杂曲面构件缺陷的检测能力进行了实验验证。实验结果表明,双机械手空气耦合超声检测系统可应用于木材结构缺陷的无损检测工程中;使用 100 kHz 聚焦换能器的情况下,双机械手空气耦合超声检测系统对厚度为 15 mm 的木材中  $\geq 5$  mm 的节子等缺陷有较好的检出能力,系统的检测精度可以满足工程要求;并且双机械手空气耦合超声检测系统对不同形状的缺陷具有较强的复形能力;同时,系统还对复杂曲面构件缺陷的无损检测也具有较好的检出能力。双机械手空气耦合超声检测系统的构建及其成功应用可为木材的完整性评估和可用性评价提供有力的科学依据。

对于超声检测系统来说,超声换能器频率、聚焦长度等参数是影响系统检测分辨力的关键,由于现有实验条件限制,未能对其进行充分论证,仅利用常用频率的超声换能器对系统各方面检测能力进行了验证实验。下一步工作将针对超声换能器参数特性对木材中缺陷检测能力的影响机制进行更深入的研究。

### 参考文献

- [1] 蒋昊, 蔺陆军, 郑红平, 等. 基于空气耦合式超声波的锯材节子缺陷检测[J]. 木材工业, 2019, 33(1): 46-49.
- [2] 杨佳彬, 武广涛, 张彬, 等. 超声波技术在林木无损检测中的应用[J]. 林业和草原机械, 2020, 1(4): 28-33.
- [3] 孙丽萍, 许述正, 魏喜雯, 等. 应力波木材无损检测技术应用及研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(6): 30-43.
- [4] KONRAD V, MATE G, ERNST N. Imaging wood defects using air coupled ferroelectret ultrasonic transducers in reflection mode[J]. Construction and Building Materials, 2020, 241:118032.
- [5] 方益明. 基于空气耦合式超声波的木材快速成像与缺陷检测方法[D]. 南京:南京农业大学, 2017.
- [6] TIITTA M, TIITTA V, GAAL M, et al. Air-coupled ultrasound detection of natural defects in wood using ferroelectret and piezoelectric sensors [J]. Wood Science and Technology, 2020, 54(4): 1051-1064.
- [7] 胡宸, 郭冠华, 罗文斌, 等. 噪声环境下空耦超声 Lamb 波铝板扫查成像定量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5):120-127.
- [8] 常俊杰, 罗文斌, 陈志恒, 等. 基于空气耦合超声对泡沫材料探伤的应用研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(11):1655-1660.
- [9] 王兴国, 刘红伟, 李晓高, 等. 双层粘接界面特性的空气耦合超声导波检测[J]. 振动. 测试与诊断, 2022, 42(1):16-22,191.
- [10] 史思琪, 李飞龙, 金士杰, 等. C/SiC 复合材料空气耦合超声检测数值模拟[J]. 复合材料学报, 2021, 38(11):3737-3746.
- [11] 张慧, 刘玉振, 于露, 等. 复合板缺陷的空耦 Lamb 波扫描仿真与成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1):150-157.
- [12] GUO B T, ZHANG Y F, LI Y R. Design of ultrasonic test and control system for truss robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(24): 57-61.
- [13] FANG Y M, LIN L J, FENG H L, et al. Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 137: 79-87.
- [14] 檀楨, 王明泉, 刘康驰, 等. 蜂窝夹芯结构脱粘的空气耦合超声检测技术研究[J]. 压电与声光, 2021, 43(6): 799-804.
- [15] 侯亚峰, 李光亚, 王艳玲, 等. 基于空气耦合超声的纸张粗化检测系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 120-124.

### 作者简介

郭灿志, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为机器人技术、检测技术与自动化装置等。  
E-mail: guocanzhi@sina.com