

# 基于多自由度机械臂的超声 C 扫描成像检测系统

赵宇<sup>1</sup>, 宋国荣<sup>2</sup>, 吕炎<sup>2</sup>

(1.北京工业大学材料与制造学院, 北京 100124; 2. 北京工业大学信息学部, 北京 100124)

**摘要:** 开发了一种喷水型的六自由度超声C扫描成像检测系统, 实现复杂曲面的自动扫查及仿形。其中运动机构主要由六自由度机械臂组成, 通过夹持超声聚焦换能器, 实时采集不同点位的声学信息。随后, 采用幅值成像方法对实验数据进行后处理, 实现复杂曲面工件典型缺陷的有效实时成像。此外, 该系统可为复杂曲面的可视化自动检测提供新的研究思路。

**关键词:** 六自由度; 喷水法; 机械臂; 复杂曲面; 幅值成像

## Ultrasonic C-scan Imaging Inspection System Based on a multi-freedom Robotic Arm

Zhao Yu<sup>1</sup>, Song Guorong<sup>2</sup>, Lyu Yan<sup>2</sup>

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of technology, Beijing 100124, China

2. Faculty of Information Technology, Beijing University of technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** A water-spraying six degrees of freedom ultrasound C-scan imaging detection system is developed to achieve automatic scanning and imitation of complex curved surfaces. The moving mechanism is mainly composed of a six degrees of freedom manipulator, which can capture the acoustic information at different points in real time by clamping the ultrasonic focusing transducer. Subsequently, the amplitude imaging method was used to post-process the experimental data, achieving effective real-time imaging of typical defects in complex curved workpieces. In addition, this system can provide new research ideas for visual automatic detection of complex surfaces.

**Keywords:** Six degrees of freedom; water jet method; robotic arm; complex curved surface; amplitude imaging

## 1 研究背景

随着高新科学技术的发展，复杂曲面工件逐渐成为航空航天等工业领域的关键结构部件。随着加工工艺复杂性的不断提高[1]，将致使工件表面以及近表面缺陷尤为严重。为保证工件服役的可靠性，研发适用于复杂曲面工件的检测设备极为关键。其中，超声成像检测因其具有检测成本低、缺陷检出效率高等优势，已成功应用于复杂形貌构件的无损检测[2, 3]。此外，考虑到工件独特的复杂曲面特性，可联合具有多关节或自由度的工业机械手系统的灵活性[4]，实现复杂曲面工件潜在缺陷的超声无损检测与评价。

基于六自由度工业机械臂和 C# 软件平台，形成了喷水型超声 C 扫描成像检测系统，以实现复杂曲面工件的仿形扫查及实时成像。主要检测流程：首先，根据机械臂轨迹规划得到运动点位信息，利用六自由度机械臂夹持超声换能器依次移动；其次，利用时域特征值信息进行超声 C 扫描的实时成像；最后对工件内部缺陷进行分析得到检测结果。

## 2 成像检测设备研制

本套检测设备针对复杂曲面的表面缺陷，选择超声脉冲回波法。采用自激自收的超声聚焦探头，成像特征值选择 A 扫回波信号幅值。通过对被测工件的扫查区域进行逐层扫查实现 C 扫成像，原理如图 1 所示。

硬件部分主要由机械臂运动控制子系统、超声信号激励接收子系统和喷水耦合循环子系统 3 个子系统组成，通过 Visual Studio 平台使用 C# 语言进行编写上位机软件。其中超声信号通过 DPR 500 激励超声探头得到，通过 PCIe 4619 采集卡采集回波信号。系统通过设备间的数据传输以及软件的智能化控制协同工作，完成检测任务，图 2 是本套设备的实物图。

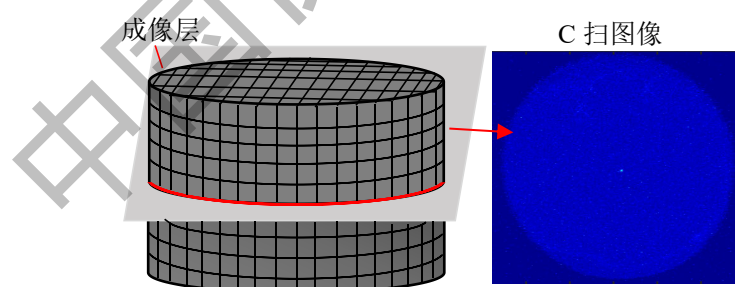


图1 超声成像原理

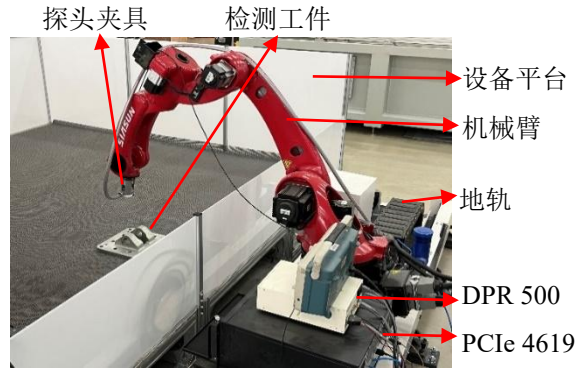


图2 设备实物图

为验证该系统对复杂曲面工件的扫描成像缺陷评定能力,需要对双曲面标准缺陷试样进行缺陷检测评定。首先设计检测所需的试块,绘制  $100\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的长方体,在上表面上构建切平面,偏移得到基准面,切除形成埋深为  $2\text{ mm}$  的平底孔。图3为试件的三维图和底面视图。

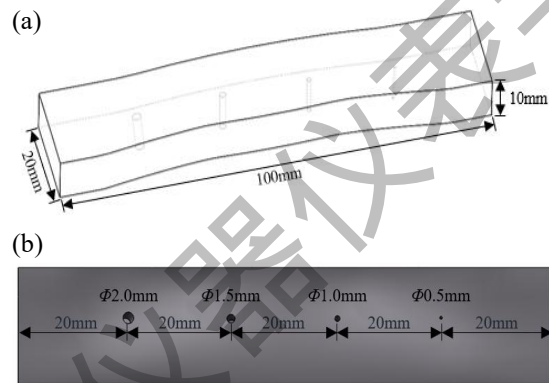


图3 检测实物图: (a)模型图; (b)底面视图

确定缺陷评定的超声检测参数,步进距离为  $0.15\text{ mm}$ ,设计40条B扫轨迹。聚焦换能器中心频率为  $15\text{ MHz}$ ,焦距  $30\text{ mm}$ 。图4为缺陷截面处的B扫图像以及缺陷层处的C扫图像,由图可以看到,对于直径为  $2\text{ mm}$  的平底孔,设备可以清晰的检出;对于直径为  $1.5\text{ mm}$  和  $1\text{ mm}$  的平底孔,设备仍然可以扫除其轮廓,但是由于声波接受面积的减少导致其回波幅值没有  $2\text{ mm}$  的幅值高;对于直径  $0.5\text{ mm}$  的平底孔检测,无法显示其具体轮廓,但是由突出的高亮区域也可以判断其大致位置。

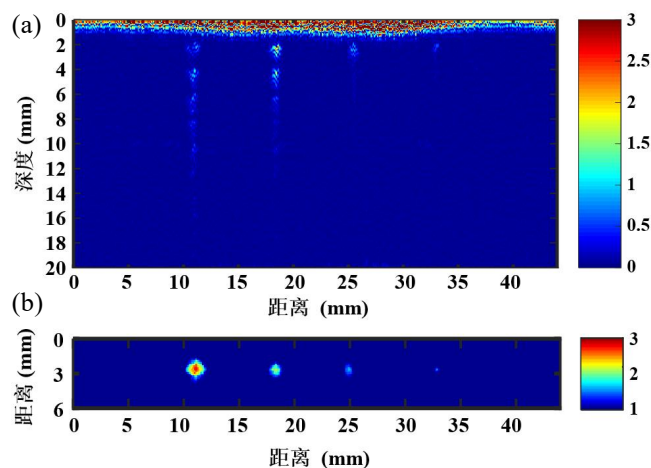


图4 结果图: (a)B扫图; (b)C扫图

### 3 结论

围绕工业生产中复杂曲面工件的检测需求,开发了基于六自由度机械臂的超声成像检测系统,采用喷水耦合的形式,并配合水循环模块,对复杂曲面工件进行超声检测,实现了双曲面标准试样中多尺寸缺陷的可视化检测。

#### 参考文献

- [1] Mateusz Waşik, Arkadiusz Kolka, "Machining Accuracy Improvement by Compensation of Machine and Workpiece Deformation," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, June 2017, pp. 2187–2194, doi:10.1016.
- [2] Chi-Tse Kuo, Yung-Chun Lee, "Non-immersive Ultrasound Scanning and Inspection of Internal Defects Using a Water Droplet Coupling Device," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 35, March 2016, pp. 26–32, doi:10.1007/s10921-016-0340-1.
- [3] LIN C Q, XIAO S P, YIN Z H, "How do industrial robots applications affect the quality upgrade of the Chinese export trade?" *Telecommunications Policy*, vol 46, November 2022, doi:10.1016/j.telpol.2022.102425.
- [4] PAN Z X, Joseph Polden, Nathan Larkin, Stephen Van Duin, John Norrish, "Recent progress on programming methods for industrial robots," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol 28, April 2012, pp. 87-94, doi:10.1016/j.rcim.2011.08.004.