

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108999

复合材料曲面构件缺陷超声三维成像方法^{*}

赵志鹏,戴 宁,周 鑫,程筱胜,代洪庆

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘 要:针对目前复合材料曲面结构缺陷检测技术存在的检测结果不直观、效率低等问题,提出一种基于超声相控阵的缺陷三维成像方法。使用三维激光扫描仪获取曲面的点云模型,通过平行截面法规划检测路径,然后使用相控阵轮式探头采集超声图像数据。利用均匀三次 B 样条函数拟合检测路径与曲面,根据扫查步长和图像序列关系计算超声图像数据点的空间位置以生成超声点云集。最后利用体素化降采样方法对超声检测结果进行重建,实现复合材料内部缺陷的三维成像。实验结果表明,本文方法的缺陷成像结果与 CT 检测结果的平均误差为 1.14 mm,能够快速准确地重建缺陷的位置、形状与尺寸信息,实现复合材料曲面样件内部缺陷的精确表征。

关键词: 复合材料;缺陷检测;超声相控阵;体素化降采样;三维成像

中图分类号: TB553 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

A 3D ultrasonic imaging method for defects of composite curved components

Zhao Zhipeng, Dai Ning, Zhou Xin, Cheng Xiaosheng, Dai Hongqing

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The current technology for defect detection of composite curved components has problems of unintuitive detection results and low detection efficiency. To address these issues, a three-dimensional defect imaging method based on the phased array ultrasound is proposed. Three-dimensional scanning technology is used to obtain the surface model of the curved surface, and the parallel section method is used to design the detection trajectory. Then, the sequence of two-dimensional ultrasound data is collected by the phased array ultrasonic wheel probe. The polynomial method is used to fit the detection trajectory curve function. The normal vector and space coordinates of the two-dimensional ultrasound data are calculated according to the scan step length and the sequence relationship. The ultrasound point cloud set is generated. Finally, the voxelization down-sampling method is used to realize the three-dimensional imaging of the internal defects of the composite material. Experimental results show that the average error of defect imaging results between ultrasonic detection and CT detection is 1.14 mm, which proves that the proposed method can quickly reconstruct the location, shape and size information of the defects, and accurately characterize of the internal defects of the composite material curved sample.

Keywords: composite materials; defect detection; ultrasonic phased array; voxelization downsampling; three-dimensional imaging

0 引 言

随着复合材料在航空航天、汽车、船舶等领域的广泛应用,因其内部缺陷导致的结构安全性降低等问题愈发受到重视^[1-2]。缺陷对结构的影响程度取决于其尺寸、方向和形状,比如面积型缺陷(如裂纹、分层)比体积型缺陷(如孔隙)对结构的威胁程度更大,因为其边缘可能进

一步扩展导致构件失效。因此,有必要对缺陷进行三维检测成像以更准确地评估结构的安全性。目前应用较为成熟的红外热成像、声发射、涡流等无损检测技术^[3-5],能够通过一维或二维数据判别缺陷的存在,但无法给出缺陷在结构内部的空间分布特征。X 射线 CT 成像检测技术能够提供高分辨率的二维断层图像并进行三维重建,但其设备结构复杂,体积庞大,检测成本高且数据采集和图像重建的效率较低^[6],不适合复合材料的在位快速检

收稿日期:2021-12-09 Received Date: 2021-12-09

^{*} 基金项目:航空基金(2020Z049052002)、中国博士后科学基金(2021TQ0148)项目资助

测。与上述检测技术相比,超声检测成本低、效率高、便携性好,针对复合材料内部缺陷的三维成像具有很好的应用前景^[7]。

近年来,国内外学者针对超声检测三维成像技术进行了大量研究。最常见的超声三维成像方法是利用水浸式二轴/三轴装置搭载单阵元探头进行机械扫描,采集 A 扫信号并记录位置信息以实现三维成像。孙广开等^[8]采用三轴水浸式超声波系统检测 SiCp/Al 复合材料获取 A 扫信号,通过移动立方体(marching cubes, MC)算法重建了 SiCp 颗粒偏聚的空间位置和分布特征。Xu 等^[9]采用二维机械扫描装置结合单阵元探头获取三维体数据,基于 C 扫图像的连通性改进 MC 算法,实现了编织复合材料内部分层和断裂缺陷的精确三维成像。但水浸式扫查装置的结构特点限制了其在复杂曲面检测和在位检测场景中的应用。在此基础上,研制专用的多自由度机械臂对大型复杂曲面结构进行自动化检测与成像成为研究的热点。孙广开等^[10]建立了基于六轴关节型机器人的超声检测系统,通过回波信号的变化表征了复合材料中的分层缺陷,得到了分层的形状、尺寸及分布特征。王应焘等^[11]采用六自由度机械臂采集叶片的超声 C 扫点云,利用 Delaunay 三角剖分算法对数据进行三维重构,得到了良好的轮廓重建与缺陷可视化结果。该方法效率高,对复杂曲面的适应性好,但需要在检测前针对曲面路径规划进行大量准备工作以保证超声波声束垂直入射工件^[12]。

相较于单阵元探头,线阵与面阵探头具有检测范围大、声束可控等优点,可采集超声序列图像进行断层三维重建。张昊等^[13]在超声相控阵线阵探头的基础上利用全聚焦成像算法(total focusing method, TFM)获取 B 扫描图像序列,通过层间插值实现了孔模拟缺陷的体绘制成像。刘志浩等^[14]采用携带编码器的线性阵列探头采集带有位置信息的 B 扫图像,通过基于区域增长技术的混合绘制方法实现了竖孔缺陷的三维成像。Blandford 等^[15]针对复合材料的低速冲击损伤问题,在 B 扫序列图像的基础上,基于回波深度和幅值提取各铺层的缺陷轮廓并叠加,实现了内部损伤的三维成像。与一维线性探头相比,二维面阵探头可直接采集检测区域内的超声三维体数据进行成像与显示。施克仁等^[16]设计了 8×8 二维阵列探头,并利用该阵列实现了铝试块横通孔缺陷的三维体数据扫查与显示。周正干等^[17]提出了矩阵换能器的三维体数据融合算法并对铝样进行检测,利用面绘制和体绘制三维成像算法均得到了良好的缺陷三维成像效果。Mckee 等^[18]在水浸条件下使用二维相控阵探头对双曲面样件进行机械扫描,利用 TFM 算法对采集的体数据进行处理和拼接,实现了样件表面轮廓和内部缺陷的精确三维成像。尽管线阵与面阵探头提高了检测的精度

与效率,但是用于曲面结构时需要定制楔块保证耦合,且曲率变化时单一楔块无法满足需求,限制了其在曲面结构中的应用。

在此基础上,部分学者考虑通过柔性楔块和柔性探头解决耦合问题,采集回波数据的同时通过空间定位设备确定数据点的空间坐标实现三维成像。Roy 等^[19]设计了一种二维柔性触点相控阵探头用于检测具有不规则表面的样件,检测时使用轮廓仪将触点阵元压在样件表面,保证耦合的同时测量每个阵元位置的变形量,基于 MC 算法实现了圆柱形样件中侧孔缺陷的三维重构。Hu 等^[20]设计了一种可拉伸的柔性面阵超声探头,检测时将探头贴合样件表面,通过三维扫描仪确定每个阵元的精确坐标,实现了不规则曲面的内部斜孔缺陷的三维成像。除此之外,空耦超声、激光超声等先进超声检测技术在复合材料的检测中的应用也越来越广泛^[21-22],基于这些新的超声检测技术进行三维成像也成为下一步研究的方向。

本文以复合材料曲面构件为研究对象,提出一种基于相控阵超声检测技术的内部缺陷三维成像方法。规划检测轨迹并拟合其曲线函数,使用相控阵柔性探头采集超声序列图像数据。根据图像的序列关系计算超声数据点空间坐标获得超声点云集,最后通过体素化降采样处理实现检测结果的三维成像。

1 技术路线

本文目标是使用相控阵超声技术对复合材料曲面样件进行连续检测,根据检测位置计算还原超声数据的空间坐标,从而实现缺陷检测结果的三维成像,技术路线如图 1 所示。本文方法主要分为 3 个阶段:首先,使用三维激光扫描仪获取待检曲面样件的点云模型,利用平行截面法生成检测路径并基于三次 B 样条插值拟合路径与曲面方程,沿路径连续扫查获得超声序列图像。其次,分析检测位置处探头与曲面耦合的几何关系,计算二维图像中数据点的空间坐标,通过空间变换生成笛卡尔坐标系下的超声点云集。最后,通过体素化降采样对不规则分布的超声点云进行体素划分,利用体绘制技术实现超声检测结果的三维成像。

2 基本原理

2.1 检测路径规划与拟合

检测前需要根据复合材料曲面构件特点,合理规划检测路径。首先使用激光三维扫描仪获取待检构件的表面点云模型,然后采用平行截面法生成检测路径,即选用一组平行平面和曲面求交,由交线生成检测路径,如图 2 所示。该方法能够充分利用相控阵探头声束范围大的优

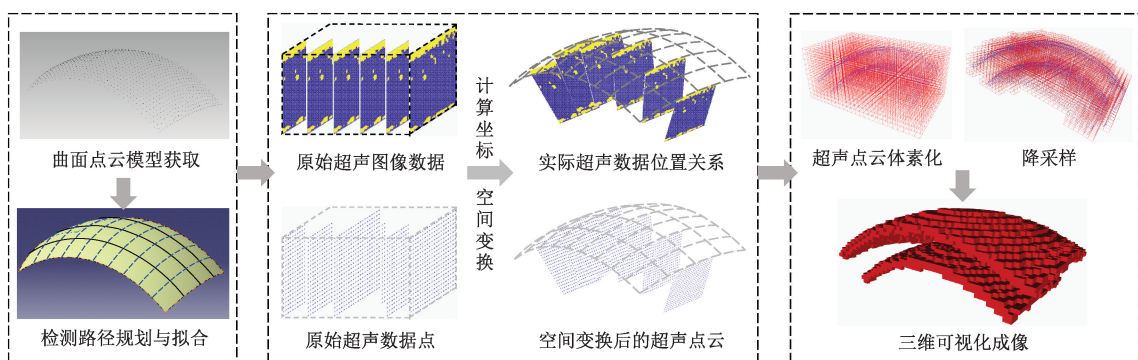


图 1 超声三维成像技术路线

Fig. 1 Overview of ultrasonic 3D imaging workflow

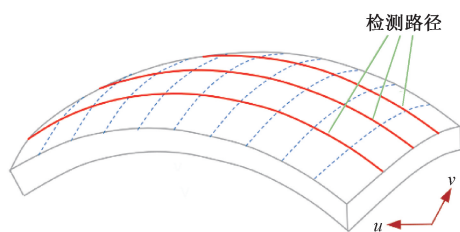


图 2 检测路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the detection trajectory

点。最后根据相对位置将检测路径映射到曲面样件表面,引导超声相控阵探头检测。

图 2 中实线为检测路径,称为 u 线,虚线为另一组垂直于平行截面的平行平面与检测曲面的交线,称为 v 线。对检测路径进行均匀采样获得采样点 $q_{i,j}$ ($i = 0, 1, \dots, n$; $j = 0, 1, \dots, m$), m 和 n 分别为实线与虚线的数目。通过插值反算得到检测路径的三次 B 样条曲线可表示为:

$$r(u) = \sum_{j=0}^3 V_{i,j} N_{j,3}(u) \quad (1)$$

式中: $V_{i,j}$ ($i = 0, 1, \dots, n+2$; $j = 0, 1, \dots, m-1$) 是 m 条检测路径上的控制顶点, $N_{j,3}(u)$ 为三次 B 样条基函数。

同样的,插值反算 n 条虚线上的控制顶点可得到三次 B 样条插值曲面上的全部控制顶点,待检曲面的双三次 B 样条插值结果为:

$$r(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 V_{i,j} N_{i,3}(u) N_{j,3}(v) \quad (2)$$

检测路径的间距大小取决于探头的声束范围,声束范围可通过探头参数计算:

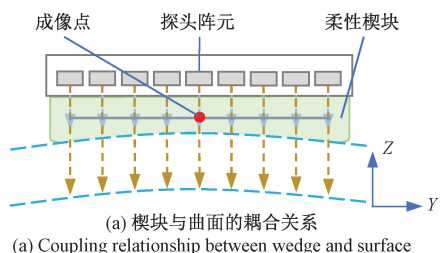
$$D = (N - n + 1)d \quad (3)$$

式中: N 为探头阵元数目, d 为阵元的中心间距, n 为同时激发阵元的数目。

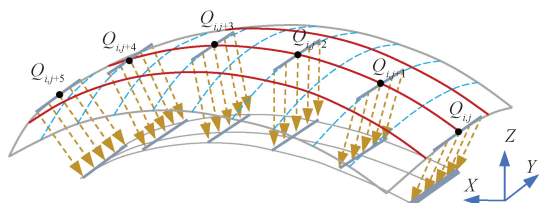
一般的,检测路径间距取 $0.8D \sim 0.9D$, 保证相邻检测路径的超声数据存在重叠部分以避免漏检,同时重叠部分数据不会过多而降低检测效率。

2.2 超声数据空间位置计算

传统相控阵探头与曲面无法完全贴合,空隙的存在会严重影响检测效果。本文选择以水为填充介质的柔性楔块解决这一问题,柔性楔块通过微小的变形保证与曲面的完全耦合,声束垂直入射工件,如图 3 所示。由于探头的声束宽度有限,楔块在声束方向的形变很小可以忽略不计,可将楔块与曲面的接触视为线接触,接触的中心位置记为成像点,如图 3(a) 所示。沿检测路径对曲面进行连续扫描,声束方向随曲面的曲率变化,如图 3(b) 所示。探头发射的全部声束互相平行,沿曲面在成像点 $Q_{i,j}$ 处的法向量方向传入样件, i 和 j 表示数据所在的检测路径序号和帧数字号。



(a) Coupling relationship between wedge and surface



(b) Geometric relation of sound beam and surface

图 3 声束方向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sound beam direction

沿检测路径连续扫描,采集的原始超声数据以图像序列的方式进行存储,如图 4 所示。相邻帧数据之间的全部数据点按蓝色箭头顺序保存,若二维超声数据的维度为 $M \times N$,表示其由 M 条 A 扫数据组成,沿深度方向的采样点数为 N 。

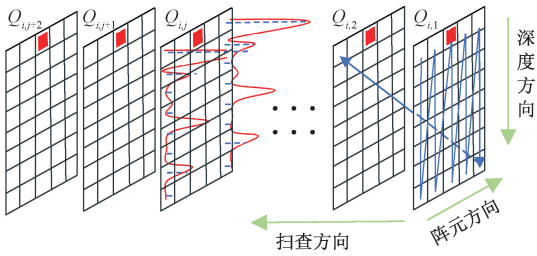


图 4 超声原始回波数据存储方式

Fig. 4 Storage manner of two-dimensional image data

超声数据的空间位置重建过程分为两步,首先确定成像点的空间坐标,然后通过曲面成像点处的法向量与切向量计算图像中全部数据点的空间坐标。

1) 成像点空间坐标计算

检测过程中超声数据的扫描步进,即相邻二维超声图像数据间的弧长为 S_{step} 。本文采用数值计算方法求取三次 B 样条曲线的弧长,首先确定起始点所在参数区间,然后通过二分法确定满足精度要求的起始点坐标。Gauss-Legendre 弧长积分公式为:

$$S(u_1, u_2) = \frac{u_2 - u_1}{2} \int_{-1}^1 \left| r' \left(\frac{u_2 - u_1}{2} t + \frac{u_2 + u_1}{2} \right) \right| dt \quad (4)$$

式中: u_1, u_2 为积分区间的端点值, $r'(u)$ 为三次 B 样条曲线的一阶导数, t 为积分变量。

设三次 B 样条曲线拟合的检测路径曲线有 $n+1$ 个控制顶点,则参数的定义域为 $[u_k, u_{n+1}]$ 。利用 B 样条曲线的分段插值的特点,首先按照分段节点进行积分确定起始点所在的参数区间,然后使用二分法在参数区间内确定成像点的空间坐标。设积分精度为 ε ,检测起始点坐标的计算步骤如下:

首先,确定起始点所在参数区间。

(1) 令 $i=1$, 通过式(4) 计算区间 $[u_k, u_{k+i}]$ 对应的路径弧长 S_i ;

(2) 若 $S_i \geq S_{step}$, 则确定搜索区间为 $[u_{k+i-1}, u_{k+i}]$, 否则转步骤(3);

(3) 令 $i=i+1$, 计算区间 $[u_k, u_{k+i}]$ 的路径弧长 S_i , 转步骤(2);

其次,二分法确定起始点坐标。

(4) 令 $u = (u_{k+i-1} + u_{k+i})/2$;

(5) 计算区间 $[u_k, u]$ 的路径弧长 S_{mid} ;

(6) 若 $|S_{mid} - S_{step}| \leq \varepsilon$, 则此时的 u 即为起始点坐标 $[x(u), y(u), z(u)]$ 对应的参数, 否则转步骤(7);

(7) 若 $S_{mid} < S_{step}$, 则 $u = (u + u_{k+i})/2$, 否则 $u = (u_{k+i-1} + u)/2$; 继续步骤(5)。

2) 图像点空间坐标计算

二维图像数据中任一数据点的空间坐标计算原理如

图 5 所示。首先,计算起始点 $Q_{i,j} = r(u_i, v_j)$ 在 v 向的切向量。

$$V = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{r(u_i, v_j + \Delta v) - r(u_i, v_j)}{\Delta v} = r_v(u_i, v_j) \quad (5)$$

同样的,计算得到 $Q_{i,j}$ 在 u 向的切向量 $U = r_u(u_i, v_j)$, 则该点的单位法向量为:

$$N = \frac{r_u(u_i, v_j) \times r_v(u_i, v_j)}{|r_u(u_i, v_j) \times r_v(u_i, v_j)|} \quad (6)$$

超声数据在深度方向的采样间隔为 L_D , 声束间隔为 L_S 。计算每个数据点的空间坐标

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + (m - i) \cdot \frac{L_S}{|V|} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} - n \cdot L_D \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: m 为数据点所在声束的序号, n 为数据点深度方向的序号, i 为起始点 $Q_{i,j}$ 所在声束的序号。

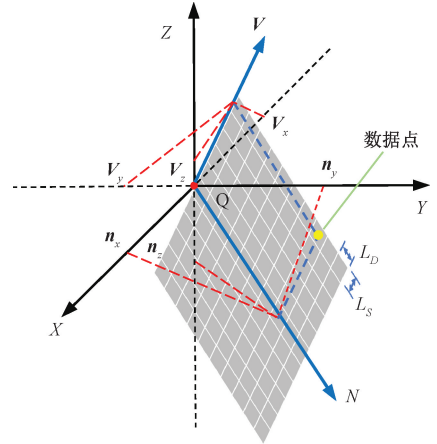


图 5 数据点空间坐标示意图

Fig. 5 Schematic diagram of data point spatial coordinates

计算后的全部超声数据记为超声点云集 V_p , 每个数据点包含 4 个维度的信息 $[x, y, z, intensity]$, 即空间坐标和强度值共 4 个属性。

2.3 体素化降采样

计算超声点云数据在 X, Y, Z 方向的最大值与最小值, 记为 $X_{max}, X_{min}, Y_{max}, Y_{min}, Z_{max}, Z_{min}$, 建立点云群的包围盒, 如图 6 所示。参考点云一环邻域半径的最小值确定体素的空间分辨率 $x_{res}, y_{res}, z_{res}$, 计算划分的体素数量为:

$$\begin{cases} x_{size} = \frac{X_{max} - X_{min}}{x_{res}} \\ y_{size} = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{y_{res}} \\ z_{size} = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{z_{res}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: x_{size} 、 y_{size} 、 z_{size} 为 X 、 Y 、 Z 方向的体素数量。

在给定的空间分辨率下,包围盒被划分为 $x_{size}y_{size}z_{size}$ 个体素。遍历点云数据,根据点云的空间坐标 $[x, y, z]$ 计算与其对应的体素标签为:

$$\begin{cases} x_{index} = \frac{X_i - X_{min}}{x_{res}} + x_{res} \\ y_{index} = \frac{Y_i - Y_{min}}{y_{res}} + y_{res} \\ z_{index} = \frac{Z_i - Z_{min}}{z_{res}} + z_{res} \end{cases} \quad (9)$$

$voxel_{index} = z_{index}x_{size}y_{size} + y_{index}x_{size} + x_{index}$ (10)

式中: x_{index} 、 y_{index} 、 z_{index} 分别为点云在 X 、 Y 、 Z 方向的体素序号, $voxel_{index}$ 为点云的体素标签值。

记录每个体素所包含点云的索引,遍历体素,根据每个体素内点云的索引取点云强度值赋给该体素。若体素内无点云,则体素灰度值为 0;若体素内含一个及以上点云,取其强度值的均值作为该体素的灰度值。按照 X 、 Y 、 Z 的顺序依次将体素灰度值存储并读取,最终实现超声检测数据的三维体素化成像,如图 6 所示。

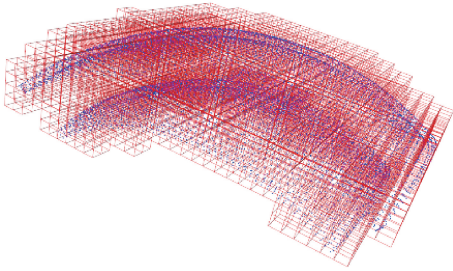


图 6 超声点云的体素化降采样

Fig. 6 Voxelized downsampling of ultrasound point cloud

3 实验研究

3.1 实验平台

在实验室搭建了如图 7 所示的检测实验平台,包括计算机、超声相控阵探伤仪(MagicScan-MS,南通友联)、相控阵轮式扫查器和 CFRP 曲面构件。

被检曲面样件为碳纤维增强环氧树脂复合材料,经热压罐工艺固化成型,大小为 760 mm×270 mm×15 mm。由于成型过程中温度、压力以及人工等不稳定性因素的影响,样件内部存在位置和深度不等的分层以及夹杂等缺陷。

超声相控阵探伤仪支持二次开发,能够实现声束的控制与原始数据的导出。轮式扫查器的阵元布置在滚轮轴心处,轮胎由特殊材料制成,内部充满水作为声传播介质。检测时,滚轮能够产生小尺寸的形变保证与曲面的

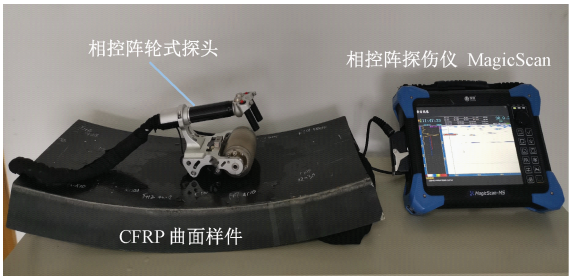


图 7 实验平台

Fig. 7 Experiment platform

耦合效果(见图 3(a)),实现与水浸检测相近的检测效果。超声相控阵具体参数配置如表 1 所示。

表 1 超声相控阵参数配置

Table 1 Parameter configuration for ultrasonic phased array

参数	数值
探头阵元数目	64
激活孔径	16
阵元间距/mm	0.8
中心频率/MHz	5
采样频率/Hz	5 000

本文所用的三维激光扫描仪型号为 EinScan Pro 2X,快速扫描模式下的最高扫描精度为 0.1 mm。测得的曲面点云模型长度和宽度分别为 758.93、269.41 mm,满足本文检测路径规划的精度要求。

3.2 复合材料曲面构件 CT 检测

为了与超声检测结果形成对照,采用 X 射线 CT 检测对缺陷进行检测,结果如图 8 所示。由于本文选取的复合材料构件尺寸较大,将构件分为 3 部分进行检测并通过拼接实现整体成像,整个检测过程耗时 3.5 h。被检曲面件的截面型为 U 型,本文仅针对其曲面部分进行检测与成像实验,因此在重建结果中未对两侧进行显示。

图 8(a)为 CT 某位置的切片图像,可以看出缺陷的灰度值高于实体,且具有向两侧的扩展的趋势。利用 CT 分析软件对缺陷进行自动分割处理,结果如图 8(b)所示,轮廓清晰完整,基本还原了缺陷的形貌特征。图 8(c)为(a)的相邻切片图像,由于复合材料的编织结构影响射线穿透效果,导致缺陷灰度值接近甚至低于实体部分,造成 CT 序列图像中同一缺陷的成像不连续的现象。在此基础上,对 CT 序列图像进行三维重建,结果如图 8(d)所示。缺陷主要分布在构件内 4 个位置,局部以线状或面状呈离散分布,整体上可分辨缺陷的位置和形状特征。

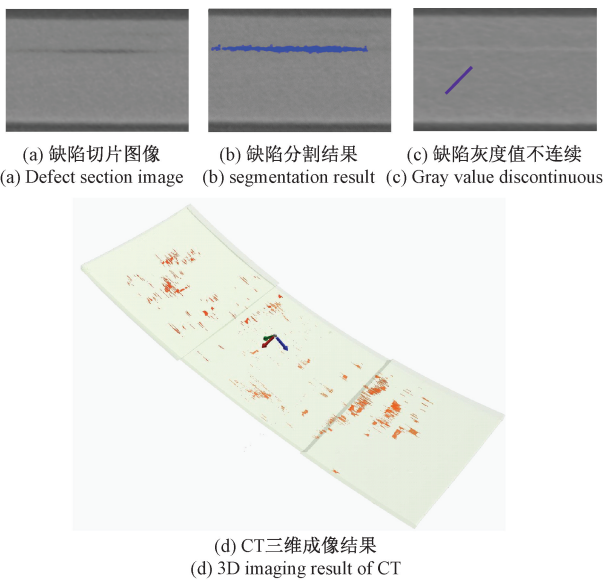


图 8 X 射线 CT 检测结果

Fig. 8 Imaging results based on X-ray CT inspection

4 结果分析与讨论

4.1 整体成像结果分析

超声相控阵检测的参数配置如表 1 所示。由式(3)可得相控阵探头的检测宽度为 39.6 mm,检测路径间距设为 3 mm,扫描步进设为 1.5 mm,最终采集到 430×8 帧维度为 50×1146 的超声图像序列数据。使用本文方法处理原始回波数据,降采样体素的空间分辨率取 1.1 mm×0.05 mm×0.9 mm,成像结果如图 9 所示。本文数据采集过程的平均用时约为 5 min,数据处理与成像平均时间为 97 s,远小于 CT 检测时间。

从图 9(a)可以看出,超声三维成像结果得表面均匀连续,还原了被检样件的曲面特征。图 9(b)中沿厚度方向可见,样件内部存在 4 处明显的缺陷。为了更好的观察内部缺陷,过滤掉构件得上下表面信号,结果如图 9(c)所示。缺陷集中分布在 4 个区域,位置与图 9(b)中一一对应。其中,两端的缺陷面积较大但分布离散,中间两处缺陷面积较小,集中分布在样件中部边缘。

在此基础上,为了验证超声三维重建结果的精度,本文利用模型配准的方法实现了超声数据与 CT 数据的融合显示。首先,利用 MarchingCubes 算法将超声三维成像结果与 CT 三维成像结果转化为网格模型;其次,以 CT 三维重建模型为基准,选取曲面端面的特征点计算空间变换矩阵,实现超声与 CT 三维重建模型的融合显示;最后,将 CT 数据和超声数据赋以不同的权重值,使其以不

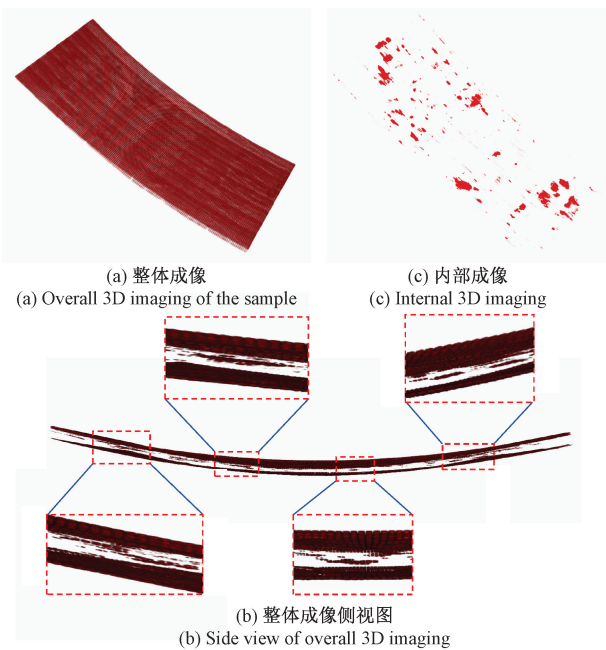


图 9 超声三维成像结果

Fig. 9 3D imaging results based on ultrasonic inspection

同的颜色进行可视化渲染。融合后的可视化结果如图 10 所示。

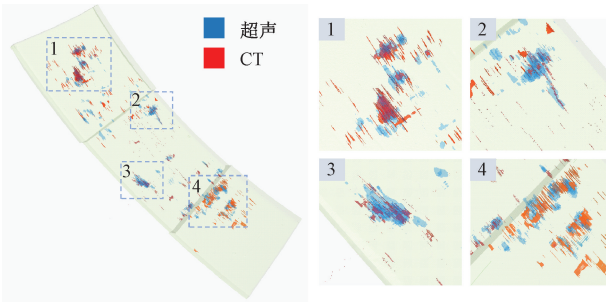


图 10 超声数据与 CT 数据融合视图

Fig. 10 Views of fusion of ultrasonic data and CT data

由图 10 中可以看出,超声重建结果与 CT 重建模型的外形一致,内部缺陷一一对应。以-6 dB 法对超声三维成像结果的边界进行定量测量,得到其尺寸为 755.3 mm×269.1 mm×14.8 mm,误差小于 1%,对样件曲面的外形具有较好的拟合精度。结合图 8(d)与 9(c)可以看出,超声三维成像结果与 CT 重建结果中的缺陷分布情况结果完全一致,集中在 4 个区域,且每各部分的缺陷都能一一对应。从局部结果可以看出,超声与 CT 重建结果中对应的缺陷在任意位置准确重叠,超声成像所得缺陷的轮廓均大于对应的 CT 成像结果。可见,在超声相控阵检测的基础上,本文方法能够准确重建出缺陷在曲面构件内部得分布情况,但缺陷的成像精度仍需进一步分析。

4.2 局部缺陷成像结果分析

为进一步验证超声三维成像结果的精度,分割并提取融合模型中的局部缺陷进行定量分析,结果如图 11~13 所示。以缺陷 3 为例,图 13(a)为缺陷融合的空间视图,图 13(b)~(d)分别为缺陷的三视图。从局部成像结果可以看出,CT 数据三维重建获得的缺陷是不连续的(切片图像中缺陷的灰度值不稳定,

如图 9 所示),部分缺陷呈条状离散分布,无法精确给出缺陷面积,但它对缺陷的位置和深度表征是准确的,且能够给出缺陷的整体外形特征。超声三维成像中缺陷完整且连续,其位置和深度信息与 CT 成像结果完全一致,但轮廓明显大于 CT 结果。这是由于超声在介质内传播存在折射与散射,缺陷的轮廓回波信号发生偏移所造成的。

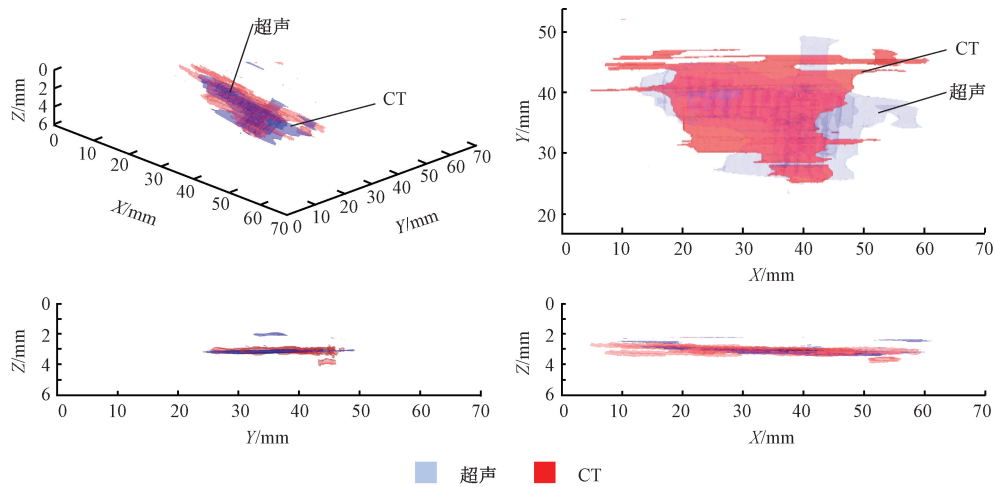


图 11 缺陷 1 的超声检测与 CT 检测融合视图
Fig. 11 Views of fused damage detected in the X-ray CT scans and the ultrasonic scans for defect No. 1

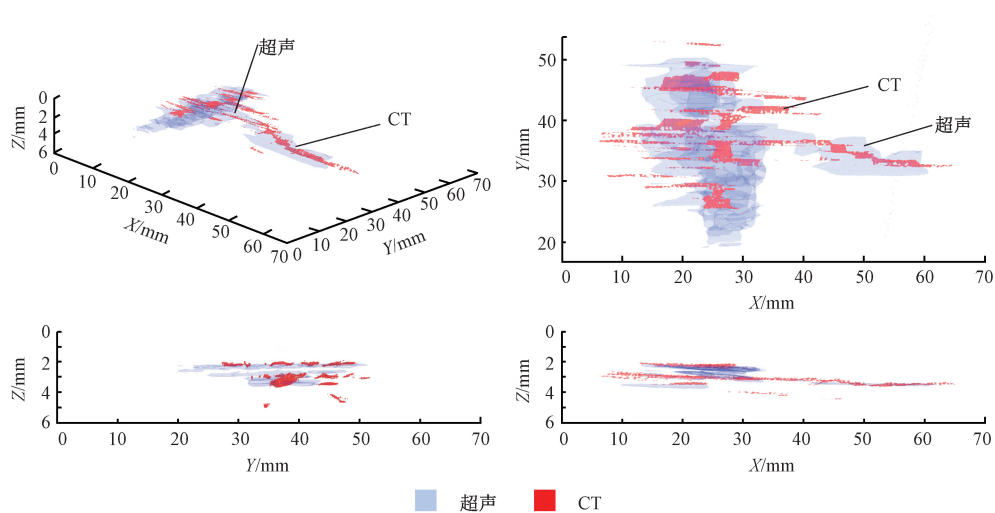


图 12 缺陷 2 的超声检测与 CT 检测融合视图
Fig. 12 Views of fused damage detected in the X-ray CT scans and the ultrasonic scans for defect No. 2

在缺陷分割的基础上,本文通过缺陷的轮廓间距对超声成像结果的精度进行计算分析。首先,提取超声和 CT 三维重建结果中缺陷在 X-Y 视图中的轮廓,计算 CT 结果中缺陷的质心。然后,从质心处作射线与两种方法所得缺陷的轮廓相交,计算交点之间的距离。

若射线与轮廓有多个交点,则取最外围一点计算。以缺陷 3 为例,结果如图 14 所示。显然,间距值越集中,表明超声重建结果对缺陷形状的特征越准确;间距值越小,表明超声重建结果与 CT 结果越接近,缺陷的检测精度越高。

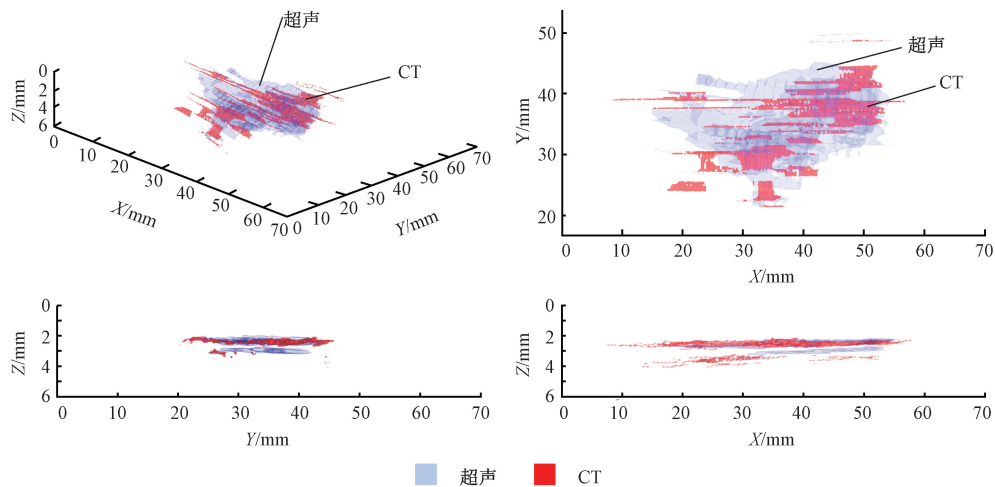


图 13 缺陷 3 的超声检测与 CT 检测融合视图

Fig. 13 Views of fused damage detected in the X-ray CT scans and the ultrasonic scans for defect No. 3

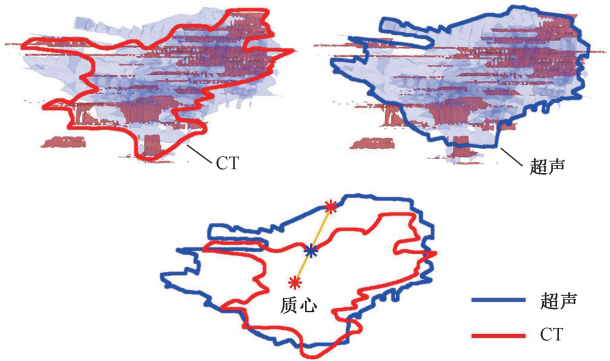


图 14 超声检测与 CT 检测的轮廓间距计算示意图

Fig. 14 Schematic diagram of contour comparison based on ultrasonic detection and X-ray CT detection

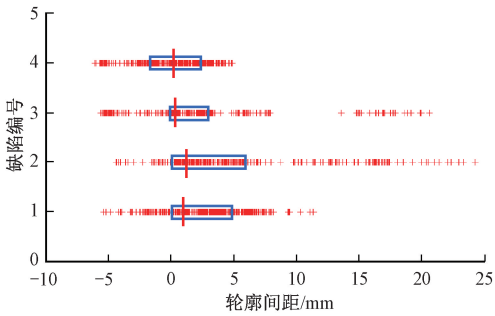


图 15 缺陷轮廓的距离差值统计图

Fig. 15 Statistics of the distances between defect boundaries

以质心为原点,顺时针间隔 0.5° 依次做射线与轮廓求交,缺陷 1~4 的轮廓间距值分布如图 15 所示。“+”标记为轮廓间距的统计值,竖线为平均值,矩形框的左右边界为 10% 和 90% 的间距值。图 15 中轮廓间距值主要分布在 $[-5\text{ mm}, 10\text{ mm}]$ 区间内,其中缺陷 2 和 3 存在部分偏大间距值,这与缺陷外形存在明显突出有关。缺陷 2 的间距偏大值出现在树枝状突出部分,缺陷 3 的间距偏大值出现在 X 方向突出部分。计算后发现两处缺陷的间距偏大值在全部间距值中的占比非常小,对间距值排序,忽略各 10% 的偏大值与偏小值,结果如图 15 中矩形框所示。可以看到,80% 的间距值集中分布在 $[-2\text{ mm}, 6\text{ mm}]$ 区间内,表明超声三维重建能够对缺陷外形进行准确的表征;其次,缺陷 1~4 的间距值的平均值分别为 0.93 mm 、 1.14 mm 、 0.30 mm 、 0.14 mm ,表明超声重建缺陷与 CT 重建缺陷尺寸非常接近,能够精确给出缺陷的尺寸大小。

缺陷尺寸的差异与影响相控阵超声检测技术测量不确定度的多个因素有关,如超声换能器频率、激活孔径等。除此之外,本文方法中的扫查步长、降采样体素分辨率等也对缺陷的成像精度存在影响。扫查步长即序列二维图像的间距越小,连续扫查过程中丢失的细节越少,检测精度越高。降采样体素分辨率决定了超声点云的采样精度,分辨率越小,缺陷点云的空间位置还原精度越高,但这也增加数据的处理时间降低检测效率。同时,后续将建立轮廓的误差模型,尝试对超声成像结果进行修正以获得更高的精度。

5 结 论

针对复合材料曲面结构缺陷检测结果不直观、效率低等问题,提出了基于超声相控线阵的缺陷三维成像方法,规划检测路径并利用三次 B 样条曲线进行拟合,计算超声数据点的空间坐标生成超声点云集,最后利用体素化降采样实现了缺陷的三维可视化。

基于本文超声三维成像方法获得的缺陷成像结果与CT成像结果完全吻合,内部缺陷的平均尺寸误差为1.14 mm,准确表征了内部缺陷的位置、形状和尺寸特征。

基于超声相控阵的三维成像方法检测精度有限,后续本文将会在当前工作的基础上,探究超声激励频率、激励孔径、体素分辨率等参数对三维成像结果的影响,应用全聚焦等先进的处理算法提高成像精度,同时引入层间插值算法,以进一步提高缺陷三维成像结果的准确性。

参考文献

- [1] HELENA R, CHRISTOPHER S, JOÃO P N. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites [J]. *Engineering Structures*, 2021, 237: 1-18.
- [2] 马保全,周正干. 航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势[J]. *航空学报*, 2014, 35(7): 1787-1803.
- MA B Q, ZHOU ZH G. Progress and development trends of composite structure evaluation using noncontact nondestructive testing techniques in aviation and aerospace industries[J]. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2014, 35(7): 1787-1803.
- [3] RELLINGER T, UNDERHILL P R, KRAUSE T W, et al. Combining eddy current, thermography and laser scanning to characterize low-velocity impact damage in aerospace composite sandwich panels [J]. *NDT & E International*, 2021, 120: 1-13.
- [4] BARILE C, CASAVOLA C, PAPPALITTERA G, et al. Damage characterization in composite materials using acoustic emission signal-based and parameter-based data[J]. *Composites Part B*, 2019, 178: 1-9.
- [5] WANG Z J, ZHU J ZH, TIAN G Y, et al. Comparative analysis of eddy current pulsed thermography and long pulse thermography for damage detection in metals and composites [J]. *NDT & E International*, 2019, 107: 1-10.
- [6] GARCEA S C, WANG Y, WITHERS P J. X-ray computed tomography of polymer composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 156: 305-319.
- [7] 周正干,孙广开. 先进超声检测技术的研究应用进展[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(22): 1-10.
- ZHOU ZH G, SUN G K. New progress of the study and application of advanced ultrasonic testing technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(22): 1-10.
- [8] 孙广开,周正干,陈曦. SiCp/Al 复合材料增强体偏聚超声三维成像方法[J]. *南昌航空大学学报*, 2016, 30(3): 91-96.
- SUN G K, ZHOU ZH G, CHEN X. 3D ultrasonic imaging method for particle segregation of reinforcement in SiCp/Al composites [J]. *Journal of Nanchang Hangkong University: Natural Sciences*, 2016, 30(3): 91-96.
- [9] XU W J, XU Y, FRANK L, et al. Nondestructive evaluation of delamination cracks in textile composites by using 3-dimensional reconstruction from acoustical imaging [J]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2019, 38: 1-6.
- [10] 孙广开,曲道明,周正干. 机器人辅助激光超声检测系统及参量匹配方法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1961-1969.
- SUN G K, QU D M, ZHOU ZH G. Robot assistant laser ultrasonic test system and its parameter matching method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1961-1969.
- [11] 王应焄,李彦军,芮执元,等. 超声检测缺陷三维成像技术[J]. *无损检测*, 2019, 41(12): 7-11.
- WANG Y T, LI Y J, RUI ZH Y, et al. 3D imaging technology of ultrasound defect detection [J]. *Nondestructive Testing*, 2019, 41(12): 7-11.
- [12] 胡宏伟,李雄兵,倪培君,等. 复杂型面工件超声自动检测中的匹配定位方法[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(2): 195-199.
- HU H W, LI X B, NI P J, et al. Matching and localization method in automatic ultrasonic testing for complex surfaceparts [J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(2): 195-199.
- [13] 张昊,陈世利,贾乐成. 基于超声相控阵的缺陷全聚焦三维成像[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(7): 992-999.
- ZHANG H, CHEN SH L, JIA L CH. Three-dimensional total-focus imaging based on ultrasonic linear phased array [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(7): 992-999.
- [14] 刘志浩,陈振华,陈果,等. 基于线阵列超声相控阵三维成像的实现研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(3): 400-406.
- LIU ZH H, CHEN ZH H, CHEN G, et al. Research on 3D imaging based on linear ultrasonic phased array[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(3): 400-406.
- [15] BLANDFORD B M, JACK D A. High resolution depth and area measurements of low velocity impact damage in carbon fiber laminates via an ultrasonic technique [J]. *Composites Part B*, 2020, 188: 1-14.

- [16] 施克仁, 杨平, 陈斌. 基于二维阵列的相控阵超声三维成像实现[J]. 清华大学学报, 2006(11): 1805-1808.
- SHI K R, YANG P, CHEN B. 3-D imaging by a 2-D ultrasonic phased array [J]. Journal of Tsinghua University, 2006(11): 1805-1808.
- [17] 周正干, 李洋, 陈芳浩, 等. 矩阵换能器超声三维成像方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 371-378.
- ZHOU ZH G, LI Y, CHEN F H, et al. Research on three dimensional imaging method using ultrasonic matrix array transducer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 371-378.
- [18] MCKEE J G, BEVAN R, WILCOX P D, et al. Volumetric imaging through a doubly-curved surface using a 2D phased array[J]. NDT & E International, 2020, 113: 1-8.
- [19] ROY O, MAHAUT S, CASULA O. Control of the ultrasonic beam transmitted through an irregular profile using a smart flexible transducer: Modelling and application[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1-8): 243-246.
- [20] HU H, ZHU X, WANG C, et al. Stretchable ultrasonic transducer arrays for three-dimensional imaging on complex surfaces[J]. Science Advances, 2018, 4(3): 1-12.
- [21] 张振振, 杨爱玲, 赵扬, 等. 人工缺陷铝块试样的激光超声三维成像[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S1): 57-62.
- ZHANG ZH ZH, YANG AI L, ZHAO Y, et al. Laser ultrasonic three-dimensional imaging of aluminum block with artificial defects [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(S1): 57-62.

- [22] 刘旭, 吴俊伟, 何勇, 等. 基于空耦换能器的碳纤维增强环氧树脂编织复合材料激光超声检测技术[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 2829-2838.

LIU X, WU J W, HE Y, et al. Laser ultrasonic testing technology for carbon fiber reinforced resin braided composites based on air-coupled transducer [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 2829-2838.

作者简介



赵志鹏, 2019 年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为超声检测与三维重建。

E-mail: zhao_zhipeng@nuaa.edu.cn

Zhao Zhipeng received his B.Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2019. He is currently a master student at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include ultrasonic detection and 3D reconstruction.



戴宁(通信作者), 2006 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 CAD/CAM 和无损检测技术。

E-mail: dai_ning@nuaa.edu.cn

Dai Ning (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2006. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interests include CAD/CAM and nondestructive testing.