

双机械手复杂曲面超声检测方法^{*}

赵新玉^{1,2}, 吴宇非¹, 张佳莹¹, 李正光²

(1. 大连交通大学材料科学与工程学院 大连, 116028)

(2. 大连瑞迪声光科技有限公司 大连, 116028)

摘要 穿透式空气耦合超声在复合材料部件的检测中应用广泛,但对于复杂曲面的复合材料,在进行穿透式超声检测时,难以保证激励与接收探头的中心连线与工件的法线处于同一直线上。针对此问题,提出了基于复杂曲面三维数学模型的多轴机械手轨迹规划算法,实现14轴联动的双机械手同步穿透检测。首先,对于复杂曲面工件使用光学传感器,配合机械手等运动模块,采集得到复杂曲面轮廓数据;其次,拟合获得了工件的三维数学模型;然后,运用三维数学模型以及梯形插值进行运动的加减速规划与插补,分别计算2个机械手的运动姿态,并分解到2个机械手上进行反解,得到完整的运动轨迹;最后,采用双机械手分别夹持空气耦合激励与接收探头对复杂曲面工件进行穿透式超声C扫描检测,进而评价复杂曲面工件内部结构的完整性。实验结果表明:该系统实现了对复杂曲面的自动化穿透超声检测,检测速度最高可达50 mm/s,检测精度最高为0.5 mm;在预制有直径3 mm圆形贴片和边长5 mm直角三角形贴片的复合材料工件上,生成的C扫描图像清晰显示出圆形和三角形缺陷,位置与实际工件一致,验证了所提方法的有效性和准确性。

关键词 复合材料;双机械手;光学传感器;穿透超声检测

中图分类号 TH878

0 引言

复合材料^[1]在生产过程中存在分层、孔洞及纤维不均匀分布等缺陷^[2],有些缺陷对复合材料的力学性能有较为严重的影响^[3]。对复合材料的常用检测方法^[4-6]有热成像法、高频涡流检测法、超声波检测法以及X射线检测法等。本研究使用超声波检测法^[7]对复合材料进行自动化检测。常规超声检测方法分为反射法和穿透法^[8-9]。超声波反射法通过超声探头发射超声信号进入试件内部,根据反射波情况来确定缺陷,探头自发自收。穿透法根据脉冲波穿透试件后能量的先后变化来判断缺陷^[10]。穿透法采用2个探头分别置于工件两侧,一发一收进行检测。

复合材料由于其本身的复杂结构及材料内部的非连续性,声波在内部传播时易发生散射,因此声波的衰减较为明显。常用的反射法检测中,声波需要在工件内往返,又会造成更大程度的衰减,影响检测结果。穿透法采用一发一收的形式,只穿过工件一次后被接收,可以更容易检测到材料内部结构的差异^[11]。对于现实中的大多数材料,其表面轮廓并非

平面或规则形状,而目前针对复合材料的检测方法大多为平面工件或规则形状固定曲率的曲面,检测方式局限于简单的直线运动或回转运动检测,受制于工件外轮廓的影响。对复杂曲面使用传统平动手段进行检测时,由于工件表面轮廓存在变化的曲率,声波在接触工件表面时会产生折射和反射,且无法保证探头相对于工件表面保持固定的距离。上述因素都会使探头无法准确接收到穿过工件内部的信号,影响采集的精确度。

为了保证数据的准确性^[12],尽量在采集过程中确保发射的声束与工件表面垂直,收发声束的距离保持恒定,以此方式进行检测。徐春广等^[13]使用三维仿真技术计算获得轨迹路径并构造了位姿矩阵,分解得到机器人的扫描路径,进行了复杂曲面的缺陷识别定位,但仿真模型本身和实际场景存在一定的误差,获得的检测路径精度具有一定的局限性。吴思源等^[14]对非规则曲面的超声检测进行了研究分析,使用超声反射法获得了工件的内部成像,但对于复合材料,采用反射法会由于材料本身的原因对检测结果造成影响。为获得与现实工件场景完全符合的相对位置,

^{*} 辽宁省教育厅基本科研资助项目(LJ212510150014);辽宁省普通高等教育本科教学改革研究资助项目(2025YBXM1352, 2025YBXM1350)

收稿日期:2024-03-26;修回日期:2024-05-21

Brosed等^[15]使用激光传感仪器测量了复杂曲面工件的三维数学模型,并转化为点云进行存储分析。汪洋等^[16]使用激光传感器得到工件表面轮廓并进行模型重建,确立了与其他部件之间的相对位置。赵新玉等^[17]计算了机械手的插补方法,并运用机械手的正逆解^[18]获得了机械手的稳定运动轨迹。本研究将光学传感器运用至机械手的自动化超声检测中,获取工件的精确位置及轮廓后,结合2个机械手运动插补以及正逆解规划出超声检测的轨迹,通过一发一收2个探头,超声信号可透过工件并接收,满足超声检测的条件,最终完成对工件内部的超声成像。

1 双机械手复杂曲面穿透检测系统

1.1 系统简介

实验中针对复杂曲面和穿透空气耦合超声C扫描要求,设计了14轴双机械手联动检测系统。基于双机械手的复杂曲面自动超声检测系统如图1所示。待检工件固定在系统中间位置竖直摆放,2个6轴机械手竖立在工件两侧,机械手基座可以随着图示y方向进行平移。检测时,一侧6轴机械手夹持

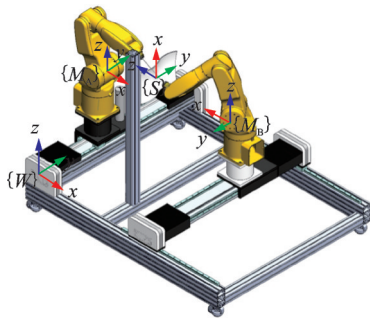


图1 基于双机械手的复杂曲面自动超声检测系统

Fig.1 Automatic ultrasonic detection system of complex surface based on double manipulator

空气耦合发射探头沿着工件表面法向垂直入射,另一侧6轴机械手夹持空气耦合接收探头沿着入射轴向接收超声信号,且机械手与工件表面的距离保持不变。2个机械手联动实现仿形扫描,同时沿着滑块轨道步进,再进行下一行的扫描检测,如此循环往复扫描。整个检测过程中,2个机械手的12个轴与机械手基座底部齿轮齿条滑块共14轴配合联动,从而实现整个曲面的穿透超声检测。

1.2 双机械手穿透超声检测系统中的坐标系变换

系统中的坐标系关系见图1。世界坐标系为 $\{W\}$,其原点在系统的左上角,与机械手A在轨道原点的位置重合。机械手坐标系为 $\{M\}$,由于存在2个机械手,所以分别表示为 $\{M_A\}$ 、 $\{M_B\}$,机械手基座坐标系的原点选择为机械手(Denavit-Hartenberg,简称DH)参数原点。工件坐标系为 $\{S\}$,由于工件竖直摆放,为方便计算,工件坐标系设置为和世界坐标系垂直。

${}^W_M R$ 为机械手坐标系到世界坐标系之间的变换矩阵,在双机械手穿透超声检测系统中,如果在机器人坐标系下的点表示为 ${}^M P$,那么将机器人坐标系下的点转换为世界坐标系下的点 ${}^W P$,有如下变换关系

$${}^W P = {}^W_M R {}^M P \quad (1)$$

如果将工件坐标系的点表示为 ${}^S P$,且 ${}^W_S R$ 为工件坐标系于世界坐标系之间的变化矩阵,那么工件坐标系下的点转换为世界坐标系下的点,有如下变换关系

$${}^W P = {}^W_S R {}^S P \quad (2)$$

根据式(1)和式(2),可将工件坐标系下的点直接转换为机械手坐标系下进行计算,其变换关系为

$${}^M P = ({}^W_M R)^{-1} {}^W_S R {}^S P \quad (3)$$

上述坐标系变换遵循xyz欧拉角旋转规律,即先后绕当前状态下的z、y、x三轴分别旋转 α 、 β 、 γ 角度,如果使用欧拉角表示上述姿态变换矩阵,从左往右依次相乘后得到

$$R = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

2 工件轮廓的三维数学模型

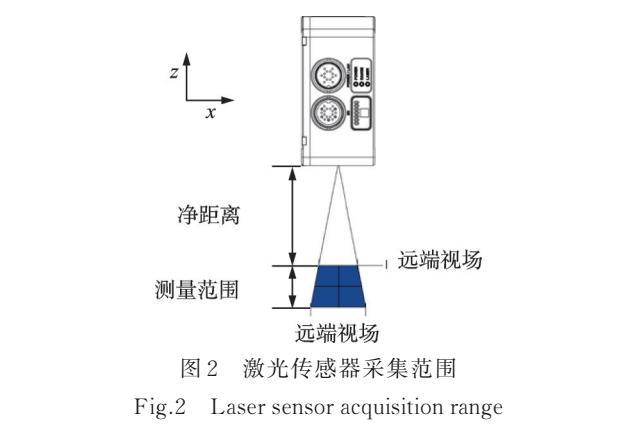
2.1 工件的点云数据扫描采集

在实现双机械手联动的穿透超声检测之前,需要获得工件轮廓的三维数学模型,以此为基础设计空气耦合自动超声检测轨迹的算法。三维数学模型的获取同样在上述系统中进行,要获取曲面的轮廓,

需在一侧机械手上安装激光传感器,机械手与传感器保持相对静止,底部滑块带动机械手沿着轨道方向移动进行扫描,扫描时尽可能使测量线保持竖直。在曲面较大的情况下,需要多次扫描以及数据的拼接。本系统所使用的光学传感器为激光传感器,采用无接触测量方式,扫描速度快,传感精度高。激光传感器参数见表1。

表 1 激光传感器参数		
Tab.1 Laser sensor parameters		
轴	范围/mm	分辨率/mm
<i>x</i>	158~365	0.15~0.30
<i>z</i>	300~700	0.019~0.060

复合材料工件的轮廓为 470 mm×500 mm 的弧形曲面。激光传感器采集范围如图 2 所示。扫查宽度最大为 365 mm,如有需要,可选择多次扫描并对点云数据进行拼接,以保证待检测部分处在激光传感器的覆盖范围内。



2.2 工件点云的数据处理

2.2.1 编码器位置触发激光采集

由于工件垂直于地面摆放,因此激光线也需垂直于地面。使用单侧机械手竖直夹持激光传感器,机械手基座沿着 *y* 轴方向的滑块平行移动。*y* 轴滑块装有编码器读数头与光栅磁条,在滑块运动时编码器等间距触发激光传感器来采集工件点云数据。本系统的激光触发间隔为 0.5 mm。激光扫描过程中,另一侧机械手保持静止,从首点运行至尾点结束后,激光覆盖整个工件。图 3 为机械手夹持激光传感器采集工件点云过程。

激光扫描工件轮廓的三维点云如图 4 所示。所有数据为工件坐标系下的点云数据,本研究以此数据为基础进行后续计算。

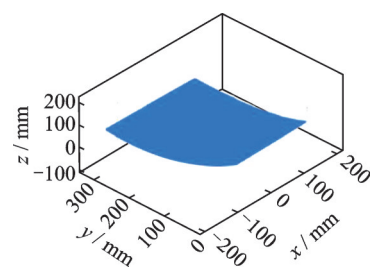


图 4 激光扫描工件轮廓的三维点云

Fig.4 Three-dimensional point cloud of workpiece scanned by laser sensor

2.2.2 三维数学模型的数据拟合计算

激光传感器采集到三维点云后,首先需求解工件的三维数学模型,即对点云进行拟合以用于后续计算。本系统采用曲面拟合方法,以等距间隔取点的方式提取点云的数据作为拟合的原始数据,随后根据点云的形状,即 *x* 方向近似为一条空间内的直线,*y* 方向为二次函数,按照曲面逼近的方法,将 *z* 作为因变量,*x*、*y* 作为自变量,将整个曲面拟合为 $z=F(x,y)$ 的二元二次函数形式。拟合后的函数为

$$z=F(x,y)=a+bx+cy+dx^2+exy+fy^2=206.1+1.496\times10^{-2}x-3.303y+1.006\times10^{-6}x^2+3.412\times10^{-5}xy+1.194\times10^{-3}y^2\quad(5)$$

拟合后的曲面如图 5 所示。为验证拟合的准确性,将拟合平面与原始点云叠放。拟合曲面与原始点云比较如图 6 所示,可以看出拟合平面与原始点云完全重合。

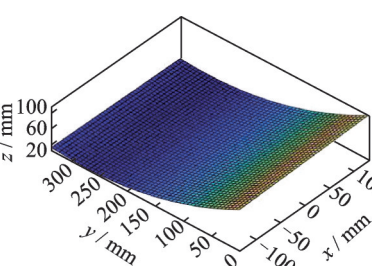


图 5 拟合后的曲面

Fig.5 The fitted surface

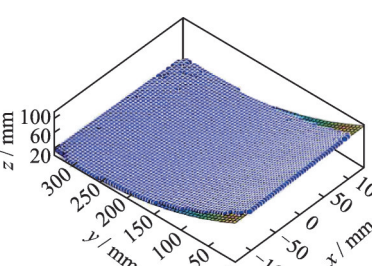


图 6 拟合曲面与原始点云比较

Fig.6 The fitted surface is compared with the original point cloud

3 双机械手运动轨迹规划

3.1 轨迹点的位置姿态计算

根据穿透超声检测的工艺要求,扫描时应满足以下条件:①探头与工件表面的距离保持不变;②探头发射的超声波入射方向应与工件平面垂直。因此,机械手夹持超声探头时应控制其末端工具的位置和姿态,每一个轨迹点都应准确计算得出。笔者研发的双机械手的复杂曲面自动超声检测系统,需要同时对2个机械手的运动进行规划,以达到穿透检测的目的。检测时,探头的最大扫描速度设为50 mm/s,加速度为20 mm/s²,运动的插补周期为1 ms。

3.1.1 轨迹点的插补

由于运动中的所有轨迹点都要计算得出,所以对机器人运动的加速、匀速、减速等各段进行运动的插补。由于 x 方向曲率较小,因此规定沿 x 方向为扫描行方向,以 y 方向为索引行方向。根据上述步骤拟合出二元函数,重新计算所有扫描行的数据,再分别对每行的数据进行轨迹点插补。根据梯形插补的结果,每行插补点呈现由密到疏再到密的规律,对应加速、匀速及减速阶段。轨迹点插补效果如图7所示。

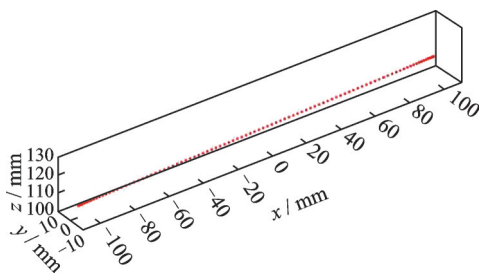


图7 轨迹点插补效果

Fig.7 Track point interpolation effect

3.1.2 各点姿态计算

为保证探头触发的声束垂直入射,需使每一点的姿态中 z 方向的矢量与工件表面的法向量同向,且指向工件。由于每一个插补点的法向量都不相同,因此需要精确计算每一点的法向量,同时计算 x 、 y 向量方向,与插补点共同构造位姿,且姿态的计算应与插补点一一对应。

平面上任意一点的法向量即为拟合曲面任意一点的法线方向,可根据曲面拟合系数进行计算。法向量的计算公式为

$$Z = \left[\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}, -1 \right] \quad (6)$$

此外,还需计算 x 与 y 方向的向量, X 向量是当前点沿着 x 方向对于此平面的切向量,即使用拟合函数对 x 求偏导;同理, Y 向量为拟合函数对 y 求偏导。得到的结果分别为

$$X = \left[1, 0, \frac{\partial z}{\partial x} \right] \quad (7)$$

$$Y = \left[0, 1, \frac{\partial z}{\partial y} \right] \quad (8)$$

由于法向量需指向工件,因此构造 Z 向量时第3项为的值-1。循环计算当前行所有点的姿态,轨迹点方向矢量如图8所示。法向量 Z 与工件表面垂直, X 向量与 Y 向量分别指向扫描方向与索引方向,且3个方向向量需两两正交。

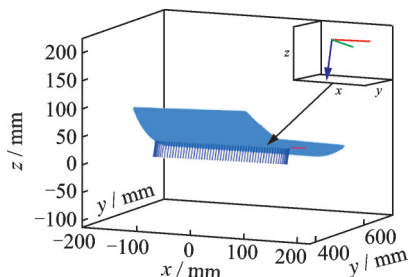


图8 轨迹点方向矢量

Fig.8 Trajectory point direction vector

3.1.3 双机械手的同步位姿计算

上述得出的位姿为工件单侧的姿态计算,得到工件一侧机械人的位姿后,还需计算另一侧机械手的轨迹点位姿。双机械手末端方向矢量如图9所示。根据工艺要求,双机械手行进时保持同步运动,末端法兰轴心处于同一条直线上,且与工件距离一致。考虑到工件的厚度,将一侧姿态沿着自身 z 轴旋转180°后,再将位姿沿着轴线方向偏移一定距离,可得到轨迹任意一点另一侧的位姿。

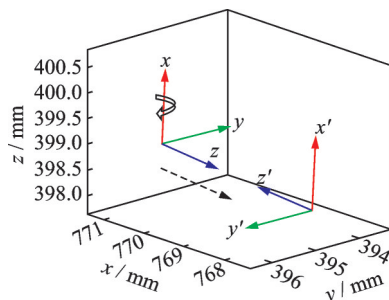


图9 双机械手末端方向矢量

Fig.9 Double manipulator end direction vector

所有轨迹点都需要进行此变换,得到另一侧机械手的位姿。变换前的位姿 ${}^M P$ 可以表示为

$${}^{M_A}P = \begin{Bmatrix} r_{A11} & r_{A12} & r_{A13} & x_A \\ r_{A21} & r_{A22} & r_{A23} & y_A \\ r_{A31} & r_{A32} & r_{A33} & z_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

${}^{M_{A,B}}P$ 经过变换后的位姿为

$${}^{M_{B,A}}P = \begin{Bmatrix} r_{A11} & -r_{A12} & -r_{A13} & x_A + \delta r_{A13} \\ r_{A21} & -r_{A22} & -r_{A23} & y_A + \delta r_{A13} \\ r_{A31} & -r_{A32} & -r_{A33} & z_A + \delta r_{A13} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

3.1.4 双机械手14轴运动分解

由于前文所有点的位姿都是基于工件坐标系,因此需求出所有位姿于两侧机械手坐标系下相对关系的表达。将所有求得的位姿从工件坐标系转换到世界坐标系下,已知机械手A基座坐标系和世界坐标系的变换,可将所有点都转为工件坐标在机械手A下的表达。由于2个机械手的相对关系已知,因此可以求出机械手B的工件坐标位姿。根据式(2)和式(3),可将世界坐标系的轨迹点转换到机械手A坐标系下,即

$${}^{M_A}P = ({}^W_{M_A}R)^{-W}P \quad (11)$$

同理,将世界坐标系下的点转换到机械手B坐标系下,即

$${}^{M_B}P = ({}^W_{M_B}R)^{-W}P \quad (12)$$

求出两侧工具在两侧机械手下的位姿矩阵后,即可根据机械手反解,分别求出2个机械手的角度轨迹。在扫描的同时需配合2个机器人基座固定的y方向的步进滑块进行步进,由于2个机器人分别位于工件两侧且相对布置,所以步进方向根据实际情况而定。双机械手运动角度变化如图10所示。可以看出,角度变换图像为平滑曲线,没有角度突变点,说明机械手运动平滑稳定,符合检测的运动要求。

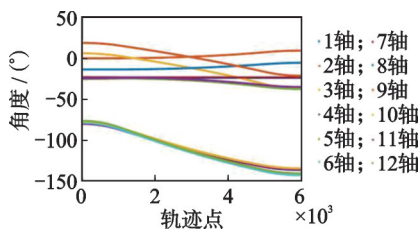


图10 双机械手运动角度变化图

Fig.10 Double manipulator motion angle variation diagram

上述方法可以实现双机械手的穿透运动,进行14轴联动检测,扫描轨迹为2个6轴机械手的角度以及2个滑块的位置。

4 双机械手穿透超声检测实验

4.1 实验结果

利用2个6轴机械手配合2个步进轴,实现空气耦合穿透超声检测。双机械手穿透超声检测系统如图11所示。



图11 双机械手穿透超声检测系统

Fig.11 Dual manipulator penetration ultrasonic inspection system

图12为系统流程示意图。首先,用户向计算机软件界面下达开始采集的指令,计算机将控制指令下发至运动控制器,运动控制器对机械手步进轴等运动模块传达运动指令并开始运动;其次,运动控制器会发出一个触发信号给函数发生器,函数发生器产生一定频率的激励信号,经过功率放大器放大后通过激励探头产生超声波;然后,超声波信号穿过工件内部,由接收探头接收信号,将回波信号传至脉冲收发仪,脉冲收发仪将模拟信号传输至数据采集卡;最后,数据采集卡处理数据后将信号数据返回到计算机进行信号的成像。整个过程中,所有部件都会协调同步运行,每一个触发点的位置都与信号一一对应。将所有过程结合起来,得到每个点的A扫描信号,循环这个过程并拼接可完成工件C扫描成像。

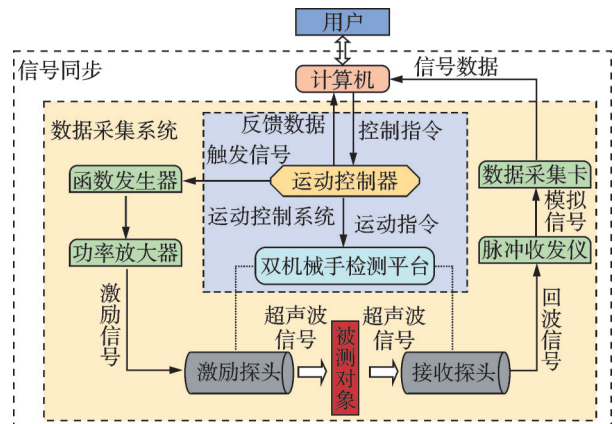


图12 系统流程示意图

Fig.12 System flow diagram

为验证系统的有效性,在工件表面预制一个直径为 3 mm 的圆形贴片和一个斜边为 5 mm 的直角三角形贴片,用来模拟缺陷。复合材料工件实物图如图 13 所示。

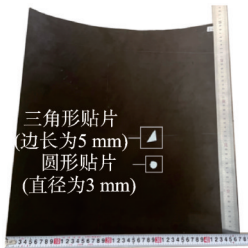


图 13 复合材料工件实物图

Fig.13 Composite workpiece physical diagram

4.2 检测结果

在检测过程中,双机械手同步进行上下往复运动,完成一行扫描后,机器人底座的步进轴前进 0.5 mm 进行下一行扫描。轨迹运行路径示意图如图 14 所示。其中:扫描方向为扫描行;步进方向为索引行。扫描行超声触发间隔为 0.5 mm,索引行行距为 0.5 mm,因此 C 扫描图像为均匀点阵成像,最高精度为 0.5 mm。

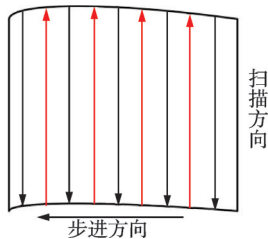


图 14 轨迹运行路径示意

Fig.14 Track Indicates the running path

工件的扫描宽度为 200 mm,其超声 C 扫描图像如图 15 所示。图中右上角图像为缺陷处的超声 A 扫描信号,由于缺陷对超声信号的吸收与散射,使透

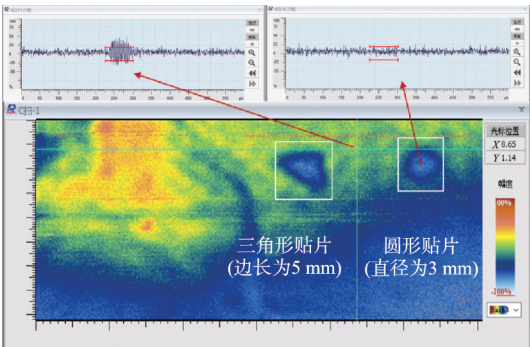


图 15 工件的超声 C 扫描图像

Fig.15 Ultrasonic C-scan image of the workpiece

过的超声信号较弱,A 扫描信号波峰相对较低;图中左上角图像为无缺陷处的超声 A 扫描信号,超声波信号易透过工件,A 扫描信号波峰相对较强,与缺陷处的 A 扫描信号对比明显。由 C 扫描图像可以看到明显的缺陷,分别为一个圆形缺陷和一个三角缺陷,位置与实际工件中一致。

5 结 论

1) 使用激光传感器与机械手配合获得工件的三维轮廓数据,根据所获得的模型进行曲面拟合及轨迹插补,并以求曲面法向量的方式计算姿态,避免了姿态发生突变。

2) 规划出 2 个机械手配合双步进滑块的 14 轴联动穿透式检测运动轨迹,运动过程平滑稳定,检测速度最高为 50 mm/s,检测精度最高为 0.5 mm。

3) 实现了对复杂曲面的空气耦合穿透式超声自动化检测。在机械手运动的同时,激励探头与接收探头分别搭载于 2 个机械手上。检测过程中,两探头时刻保持与工件垂直,探头中心处于同一轴线上,且探头与工件的距离保持恒定。检测后生成的 C 扫描图像与实际工件贴合,内部缺陷清晰可见。

参 考 文 献

[1] SEALY C. Smart composite detects different types of damage[J]. Materials Today, 2023, 68: 6.

[2] LI C J, CROSKY A. The effect of carbon fabric treatment on delamination of 2D-C/C composites[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(15): 2633-2638.

[3] GE J, CHENG X J, WU X N, et al. Research on the defect detection of carbon fiber reinforced polymer based on pulse laser ultrasound[J]. Optik, 2022, 268: 169810.

[4] 刘松平,刘菲菲,史俊伟,等. 复合材料冲击损伤高分辨率超声成像检测与损伤行为分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 16-23.

LIU Songping, LIU Feifei, SHI Junwei, et al. High-resolution ultrasonic imaging evaluation and behavior analysis of impact damages in composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 16-23.(in Chinese)

[5] 卢明辉,丁雷,颜学俊,等. 激光超声技术在工业检测中的应用与展望[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(4): 631-643.

LU Minghui, DING Lei, YAN Xuejun, et al. Application and prospect of laser ultrasound technology in indus-

- trial testing[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(4): 631-643.(in Chinese)
- [6] MIAO C J, GUO W C, LING Z W, et al. Inner detection of corrosion by ultrasonic phased array in underground compressed natural gas storage well[C]// Rudy Scavuzzo Student Paper Symposium and 24th Annual Student Paper Competition. [S.l.]: ASME, 2016: 1-8.
- [7] 王鹏, 王志强, 蔡晖, 等. 基于全聚焦相控阵超声的叶根槽裂纹检测[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(6): 1172-1177.
- WANG Peng, WANG Zhiqiang, CAI Hui, et al. Research on crack detection of root groove based on total focusing phased array ultrasonic[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(6): 1172-1177.(in Chinese)
- [8] 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.
- WANG Xingguo, LIU Hongwei, LI Xiaogao, et al. Air-coupled ultrasonic guided wave detection of double-layer bonding interface characteristics[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(1): 16-22.(in Chinese)
- [9] 杨帆, 刘春秘, 辛运涛, 等. 复合材料零件的自动化相控阵穿透法超声检测[J]. 无损探伤, 2022, 46(4): 38-41.
- YANG Fan, LIU Chunmi, XIN Yuntao, et al. Automatic through transmission phased array ultrasonic detecting of composite parts[J]. Nondestructive Inspection, 2022, 46(4): 38-41.(in Chinese)
- [10] 史俊伟, 刘松平, 荀国立. 复合材料孔隙超声反射法和穿透法检测对比分析[J]. 航空材料学报, 2020, 40(2): 88-89.
- SHI Junwei, LIU Songping, XUN Guoli. Comparative analysis of pore detection of composite materials by ultrasonic reflection method and penetration method[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(2): 88-89.(in Chinese)
- [11] 徐春广, 王洪博, 肖定国. 大型曲面复合材料超声检测技术[J]. 纤维复合材料, 2013, 30(3): 33-38.
- XU Chunguang, WANG Hongbo, XIAO Dingguo. Ultrasonic transmission detection techniques for large complex curved surface of composite material[J]. Fiber Composites, 2013, 30(3): 33-38.(in Chinese)
- [12] 赵新玉, 李鹏飞, 段晓敏, 等. 曲面工件自动超声检测轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 41-48.
- ZHAO Xinyu, LI Pengfei, DUAN Xiaomin, et al. Motion planning of curved surface for automatic ultrasonic testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 41-48.(in Chinese)
- [13] 徐春广, 马朋志, 肖定国, 等. 航空发动机叶片机械手无损检测技术[J]. 航空制造技术, 2019, 62(14): 40-48.
- XU Chunguang, MA Pengzhi, XIAO Dingguo, et al. Robotic nondestructive testing technology for aero-engine blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(14): 40-48.(in Chinese)
- [14] 吴思源, 周晓军, 杨辰龙, 等. 曲面工件超声检测路径规划方法研究[J]. 传感技术学报, 2006, 19(2): 388-392.
- WU Siyuan, ZHOU Xiaojun, YANG Chenlong, et al. Study on path generation method of curved surface part for ultrasonic inspection[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(2): 388-392.(in Chinese)
- [15] BROSED F J, AGUILAR J J, GUILLOMÍA D, et al. 3D geometrical inspection of complex geometry parts using a novel laser triangulation sensor and a robot[J]. Sensors, 2011, 11(1): 90-110.
- [16] 汪洋, 马孜, 胡英, 等. 新型自由曲面三维激光扫描系统[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 260-265, 270.
- WANG Yang, MA Zi, HU Ying, et al. Novel free-form surface 3D laser scanning system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 260-265, 270.(in Chinese)
- [17] 赵新玉, 温欣, 段晓敏. 检测机械手轨迹突变点识别方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(18): 15-21.
- ZHAO Xinyu, WEN Xin, DUAN Xiaomin. Recognition method for testing manipulator trajectory change-point[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(18): 15-21.(in Chinese)
- [18] 马建伟, 孙赫辰, 闫惠腾, 等. 一种串联机械臂关节空间刚度最优路径求解方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(14): 54-61.
- MA Jianwei, SUN Hechen, YAN Huiteng, et al. A solution method for optimal stiffness path in joint space of serial manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14): 54-61.(in Chinese)



第一作者简介:赵新玉,男,1979年1月生,博士、副教授。主要研究方向为超声无损检测方法与设备。
E-mail:xyz@djtu.edu.cn

通信作者简介:张佳莹,女,1988年4月生,博士、副教授。主要研究方向为焊接结构的无损检测与评价。
E-mail:zjy@djtu.edu.cn