

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614911

基于线激光扫描的阵列复材管芯层厚度检测*

康仁科, 赵文彬, 王 炎, 董志刚, 鲍 岩

(大连理工大学高性能精密制造全国重点实验室 大连 116024)

摘 要:针对现有厚度测量方法难以实现对非连续阵列复合材料管(CFRP)芯层整体厚度进行高精度检测的问题,提出了一种基于线激光传感器双表面扫描与公共基准重建的厚度测量方法。该方法通过分别扫描获取阵列复材管芯层上下表面的三维轮廓点云,并引入预设公共基准实现工件厚度的统一重建。为解决上下表面点云中缺乏高精度几何配准特征、导致公共基准难以稳定获取的关键难点,设计了一种可内胀固定于复材管内部的标定块结构,从而保证公共基准在工件位姿翻转前后均能够被稳定、可靠地扫描获取。在数据处理方面,针对阵列复材管芯层点云数据非连续、噪声占比高且局部密度差异显著的特点,构建了一种基于统计特性与聚类特征的分阶段点云降噪策略,通过统计滤波剔除离群噪声点,并结合 K 均值聚类实现冗余数据的自适应筛选,从而提高了表面轮廓重建的稳定性与精度。为验证所提出方法的测量准确性,开展了小尺寸阵列复材管芯层的三坐标测量机对比试验,并以三坐标测量机测量结果作为厚度真值。试验结果表明,该方法的厚度测量精度可达 0.03 mm,相对误差控制在 0.1% 以内,满足阵列复材管芯层厚度检测的精度要求。进一步开展了大尺寸阵列复材管芯层的在机测量试验,验证了该厚度检测方法在实际工程应用中的可行性与有效性。

关键词: 阵列复材管;厚度检测;线激光传感器;在机测量;点云配准

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030 460.4020

Thickness detection of CFRP circular cell honeycomb core layer based on line laser scanning

Kang Renke, Zhao Wenbin, Wang Yan, Dong Zhigang, Bao Yan

(State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To address the challenge that existing thickness measurement methods struggle to achieve high-precision detection for the overall thickness of discontinuous carbon fiber reinforced polymer (CFRP) circular cell honeycomb core layers, a thickness measurement method based on dual-surface scanning with a line laser sensor and common reference reconstruction is proposed. This method obtains 3D profile point clouds of the upper and lower surfaces of the CFRP circular cell honeycomb core layer through separate scans and introduces a preset common reference to achieve unified thickness reconstruction of the workpiece. To resolve the key difficulty of unstable common reference acquisition caused by the lack of high-precision geometric registration features in the surface point clouds, an internal expansion calibration block is designed to be fixed inside the composite tube. This ensures that the common reference can be scanned stably and reliably before and after the workpiece pose is flipped. Regarding data processing, considering the discontinuous nature, high noise level, and significant local density variations of the CFRP circular cell honeycomb core layer point cloud, a staged denoising strategy based on statistical characteristics and clustering features is constructed. Statistical filtering is used to remove outliers, combined with K-means clustering for adaptive screening of redundant data, thereby improving the stability and accuracy of surface profile reconstruction. To verify the measurement accuracy of the proposed method, comparative tests are conducted on small-scale CFRP circular cell honeycomb core layers using a coordinate measuring machine, with the coordinate measuring machine results serving as the ground truth. The experimental results show that the thickness measurement accuracy reaches 0.03 mm, with a relative error controlled within 0.1%, meeting the precision requirements for thickness detection of CFRP circular cell honeycomb core layers. Furthermore, on-

收稿日期: 2026-01-29 Received Date: 2026-01-29

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFA0708902)、国家杰出青年科学基金项目(52325506)、“兴辽英才计划”项目(XLYC2403208)资助

machine measurements of large-scale CFRP circular cell honeycomb core layers are performed, validating the feasibility and effectiveness of the proposed thickness detection method in practical engineering applications.

Keywords: CFRP circular cell honeycomb; thickness detection; line laser sensor; on-machine measurement; point cloud registration

0 引言

天线反射面板作为空间探测系统的核心部件,通常采用由上下蒙皮与中间夹层胶接形成的夹层结构^[1-2]。其中,夹层的制造精度直接决定了反射面板的整体服役性能。传统铝蜂窝夹层在极端温差环境下易产生较大的热变形^[3],为满足严苛的服役要求,引入了一种由多个薄壁复合材料圆筒壳粘接而成的新型芯层结构,即阵列复材管^[4-5]。由于该芯层难以一次成型,必须通过双面磨削加工以保证厚度精度,而其厚度偏差将直接影响夹层结构的刚度、热稳定性及疲劳寿命。然而,目前尚缺乏针对此类阵列复材管芯层的成熟厚度检测手段,亟需借鉴蜂窝芯材及常规工件厚度检测领域的相关研究。

针对蜂窝类芯材的精度检测,目前主要有三坐标测量机测量法和机器视觉测量法。万谷^[6]利用龙门式气浮转台调整圆环蜂窝位置,以保证测量头与表面的垂直度;Ardebili等^[7]利用热成像图像处理技术识别复合蜂窝板的制造缺陷;Khademi等^[8]与Ren等^[9]分别通过无损检测和涡流检测技术对蜂窝结构的界面缺陷进行了量化研究。但与此同时,三坐标测量虽精度较高,但存在效率低、在大尺寸超薄结构上易产生接触变形等问题;机器视觉法虽在测量范围和速度上具有优势,但在高精度厚度测量领域的研究相对匮乏。

在通用厚度检测领域,超声波技术因穿透性强且无损而应用广泛^[10-11],但阵列复材管芯层表面极其稀疏,实体面积仅占1.5%,超声波难以在极小截面上形成稳定的回波信号。射线测量法^[12-13]虽可实现内部测量,但其稳定性受材料吸收系数影响较大,且对人体与环境存在辐射危害。涡流检测^[14-15]则受限于材料导电性,无法应用于非金属复合材料。相比之下,激光三角测量法具有非接触、高精度、实时性强等特点^[16-19],已在工件厚度在线测量中得到应用^[20-23]。然而,现有的激光测量研究多针对连续表面或简单几何体,对于大尺寸、低刚度、且具有复杂离散表面的阵列复材管,其厚度检测仍面临数据配准难、测量效率与精度平衡难等挑战^[24]。

线激光传感器具有采样频率高、抗干扰能力强及易于集成的优势^[25-27]。本文提出一种基于机床集成的线激光扫描测量方法,旨在解决阵列复材管芯层的高效厚度检测难题。通过在机床主轴集成传感器,并利用研制的内胀式高精度标定块作为空间基准,建立一种基于特征点匹配的点云配准模型。该方法通过扫描工件正反两面

及标定块特征位姿,实现离散点云数据的精确对齐,进而通过与理论模型比对计算出整体厚度分布。

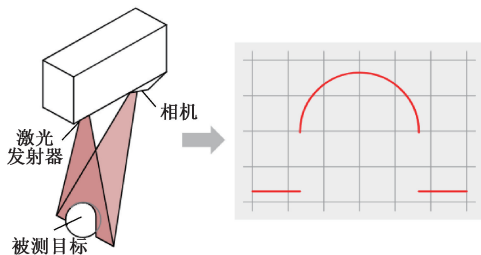
1 正反面相对位姿测量

针对现有厚度测量方法难以有效应用在非连续弱刚度工件上的问题,提出了采用线激光传感器扫描待测工件上下表面轮廓,获得其上下表面点云数据,并借助数据处理计算其厚度的方法。为高质高效获得加工后工件表面轮廓数据,基于线激光传感器搭建了在机测量平台,设计了可内胀固定的标定结构来提供两次扫描下用于统一坐标系的特征点。

1.1 在机测量系统的搭建

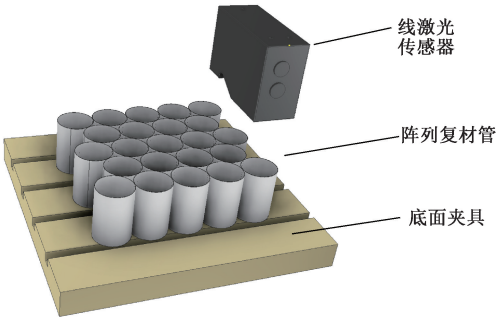
线激光传感器采用激光三角法测量原理,如图1(a)所示,通过发射线状激光束照射到工件表面,工件表面对激光产生漫反射,镜头接收反射激光束并成像,根据成像位置的变化可以计算高度信息,进而得到被测表面点云数据。

将线激光传感器集成在机床主轴上可以实现在线测量,测量系统如图1(b)和(c)所示。具体过程为,测量开始时通过个人计算机进行测量轨迹程序生成及线激光传感器相关参数设置,然后机床执行测量程序,在主轴的携带下线激光传感器在运动过程中不断采集数据,并通过网线将数据转移至PC端进行保存,最后在PC端将数据进行处理得到相应测量工件轮廓。线激光传感器相关硬件参数信息见表1。编码器物理分辨率为0.001 mm/tick,确保传感器采集频率与机床数控系统的物理位移反馈严格同步,避免运动方向的空间几何失真。 x 方向的扫描点距固定为0.013 mm,为该型传感器硬件支持的最小数据采样间隔,旨在最大限度保留阵列复材管薄壁边缘的面形特征。在 y 方向的点距设置为0.02 mm,在满足面形重构精度的同时,抑制了冗余数据量,旨在平衡数据密度与扫描效率。



(a) 线激光传感器光学原理

(a) Optical principle diagram of line laser sensor



(b) 在机测量系统布置
(b) Layout of on-machine measurement system



(c) 点云数据的获取
(c) Acquisition of point cloud data

图 1 在机测量系统

Fig. 1 On-machine measurement system

表 1 线激光传感器参数

Table 1 Parameters of line laser sensor

参数	数值
激光线轮廓点数/个	2 520
测量视野宽度/mm	25.0~32.5
x 方向分辨率/ μm	13~17
z 方向测量范围/mm	25
z 方向重复性/ μm	0.4
z 方向线性度/%	0.006

1.2 标定结构的设计

机床主轴搭载线激光传感器单次只能扫描阵列复材管一个表面,这导致两次测量下正反面的面形数据坐标系不统一。为将阵列复材管正反面测量数据统一到同一坐标系下,需引入两次测量下均可以扫描到的精确几何特征对面形数据进行标定。

设计了以圆柱端面为特征面的标定块及其内胀固定结构如图 2 所示,标定块上下端面可以提供一对相互位置精确的特征点。内胀固定结构包括上下压板、开口薄壁胀套、螺钉。上下压板之间放置相互配合的开口薄壁胀套,利用固定环将标定块与内胀固定结构连接起来。竖直方向上的螺钉通过压紧压板使胀套胀紧,从而将标定块固定在阵列复材管内部,保证标定块与阵列复材管保持相对位置稳定且不受工位变换的影响。

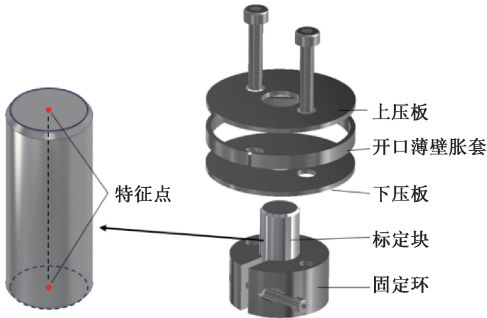


图 2 标定结构

Fig. 2 Calibration structure

由于求解点云配准中的六自由度变换矩阵,即 3 个平移分量与 3 个旋转分量,至少需获取 3 个不在同一直线上的特征点,因此,在小尺寸工件实验中采用 3 点布置方式,既满足了坐标系统一的最小解析条件,又最大限度减少了对弱刚度阵列复材管的物理干涉。

2 厚度检测的原理

2.1 点云数据的降噪

利用线激光传感器进行阵列复材管表面在机扫描时,受毛刺、切屑、工件倾斜等因素的影响,测量数据中会存在大量的噪声数据。这些噪声数据不仅增加了测量数据规模,还会影响拟合精度。因此采用点云降噪的方法以保留面形数据的同时减小数据量,提高拟合速度及精度。

对点云数据中的明显离群点采用统计滤波算法进行去除,其原理为对于点云中的每个点先确定一个邻域范围,即针对点云中的每一个点 p_i 找到其 k 个最近邻点,计算点 p_i 与其 k 个最近邻的距离的平均值 μ_i ,计算方式如式(1)所示。

$$\mu_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k d_{p_{ij}} \tag{1}$$

式中: $d_{p_{ij}}$ 代表在点 p_i 邻域内第 j 个点与点 p_i 的距离。

进一步,求出所有点在各自邻域的平均距离的均值 μ 及标准差 σ :

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i \tag{2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_i - \mu)^2} \tag{3}$$

式中: n 为点云中点的个数。

对于点云中某点 p_i ,当 p_i 不在阈值范围 $(\mu - \frac{3}{2}\sigma, \mu + \frac{3}{2}\sigma)$ 内时则将 p_i 视为离群点删除处理。然后进行非离群点无效轮廓数据的去除,主要包括扫描

到的夹具轮廓、管壁轮廓等,降噪前后效果对比如图3所示。

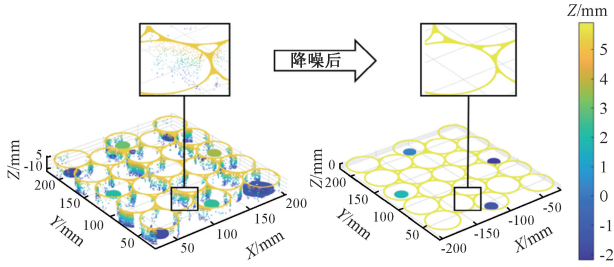
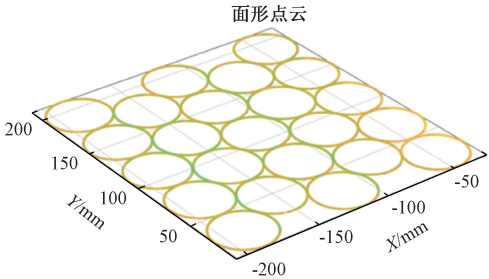


图3 数据降噪前后对比

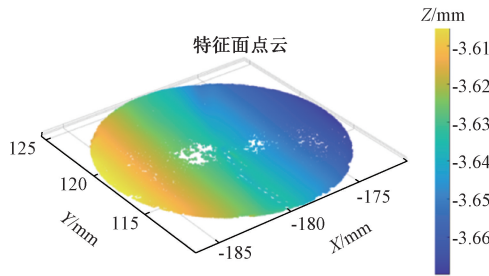
Fig. 3 Comparison before and after data denoising

2.2 标定面的提取及拟合计算

提取标定块端面数据以进行理论特征点的计算。线激光单次扫描的点云中面形数据与标定块端面数据处在同一坐标系下,导致进行拟合计算时不同特征的点云间会相互影响,从而降低拟合的精度。采用基于欧氏距离的点云聚类分割算法将同一坐标系下的不同类型点云进行分割提取。点云分割后,不同类型点云的耦合数据集被分离以方便进行后续多种特征的高精度拟合计算,点云的分割效果如图4所示。



(a) 分割后面形点云
(a) Segmented face-shape point cloud



(b) 分割后标定块特征面点云
(b) Segmented calibration block feature surface point cloud

图4 分割提取点云

Fig. 4 Segment and extract point cloud

为精确拟合空间圆面的圆心,提出一种多维度拟合方法,具体为对提取出的标定块端面点云数据进行二维椭圆拟合以及三维平面拟合。由于标定块放置在复材管

内会发生小角度倾斜,端面数据投影到 XOY 平面时三维圆面会转化为二维椭圆面,利用二维椭圆拟合可以得到实测特征点 xy 的坐标。精确 z 坐标的获得需利用标定块端面平面方程,采用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 法拟合平面,如图5所示。最后将特征点 xy 的坐标代入端面平面方程即可得到特征点精确 z 坐标。

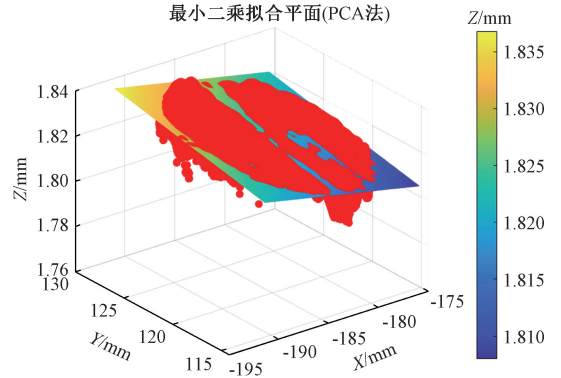


图5 PCA法拟合平面点云

Fig. 5 Fitting planar point clouds by the PCA method

PCA 法用于最小二乘拟合平面的步骤为:

1) 设用于拟合的点云数据中有 n 个点 $p_i = (x_i, y_i, z_i)$, 计算点云重心 $G = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, 其中 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 为各维度均值。

2) 将每个点进行中心化处理, 得到 $p'_i = (x'_i, y'_i, z'_i)$, 其中 $x'_i = x_i - \bar{x}, y'_i = y_i - \bar{y}, z'_i = z_i - \bar{z}$ 。

3) 构建协方差矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x'_i x'_i & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x'_i y'_i & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x'_i z'_i \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y'_i x'_i & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y'_i y'_i & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y'_i z'_i \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z'_i x'_i & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z'_i y'_i & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z'_i z'_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

对协方差矩阵 C 进行特征值分解, 得到 3 个特征值及其对应特征向量, 最小特征值对应特征向量即为拟合平面的单位法向量。对于标准平面方程 $ax+by+cz+d=0$, 其 3 个坐标的系数 a, b, c 即为对应平面单位法向量的值, 最后将步骤 1) 中重心坐标代入方程即可得到系数 d 。

获取实测特征点精确坐标后, 利用已知实测特征面的法向量及上下特征面间距离计算理论特征点位置。具体计算方式如式(5)所示。

$$P_1 = P_2 + L\delta \quad (5)$$

式中: 3 个矩阵均为 3 行 1 列矩阵; P_1 为理论点坐标; P_2 为实测坐标系下特征点坐标; L 为标定块上下特征面间距离; δ 为实际测量坐标系下特征面的法向量与三轴的夹角余弦值矩阵。

2.3 正反面数据的配准

在分别测得上下表面数据后,需将两组数据统一到同一坐标系下以重建阵列复材管正反面的三维模型,该过程通过点云配准实现。点云配准是将多个不同视角或者不同时间获取的点云数据集转换到一个统一的坐标系下的过程。

对于阵列复材管,其正反面点云数据中包含着标定块的端面点云数据,正反面点云的理论位置变换可以通过标定块特征的匹配来实现,即以标定块上下端面特征点对计算正反面点云统一的空间变换矩阵。以反面点云数据配准至正面坐标系为例,具体流程如图 6 所示。

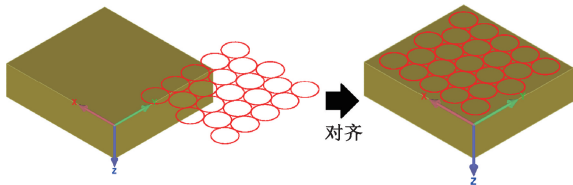


图 6 下表面测量数据与理论模型下表面对齐过程
Fig. 6 The alignment process of the lower surface measurement data with the lower surface of the theoretical model

设反面坐标系下标定块实测特征点集 $P = \{p_i\}$ 和与其对应的正面坐标系下理论点集 $Q = \{q_i\}$,其中 p_i 和 q_i 是对应匹配的点对。由于只进行空间刚性变换,需计算旋转矩阵 R 和平移向量 t ,使得 $q_i = R p_i + t$ 。由于对应点之间存在误差,通过最小化所有点对的误差函数 E ,可以得到最优的 R 和 t 。其中误差函数计算如式(6)所示。

$$E = \sum_1^n \| q_i - (R p_i + t) \|^2 \tag{6}$$

计算出的最优旋转矩阵 R 和平移向量 t 即为将反面数据配准至正面坐标系下的空间变换。

正反面点云数据的配准过程总结如下:首先分别从正面和反面点云数据中提取标定特征,并在拟合正面实测特征点的基础上计算出理论特征点,同时拟合出反面的实测特征点。随后利用正面的理论特征点与反面的实测特征点求解空间变换矩阵。最后将变换矩阵应用于原始数据,完成正反面点云的最终配准。

2.4 厚度分布的计算

阵列复材管芯层上下表面为非连续表面,为直观获得阵列复材管芯层的厚度分布,将工件上下表面配准模型以下表面为基准对齐至理论模型,通过计算工件上下表面配准模型与理论模型的偏差实现工件厚度分布的计算,该过程基于 Geomagic Wrap 软件实现。将配准模型下表面与理论模型下表面对齐后,下表面点云数据与理论模型下表面重合,计算上表面点云数据与理论模型上表面的偏差,该偏差即为工件实际厚度与理论厚度的偏差,利用该厚度偏差和理论模型的厚度可以获得阵列复

材管芯层的实际厚度分布,具体步骤为:
1) 将工件上下表面配准模型中的下表面点云数据对齐至理论模型下表面,如图 6 所示,使用 Geomagic Wrap 软件记录该过程的空间变换,软件记录的三轴空间变换参数如表 2 所示。

表 2 三轴空间变换参数

Table 2 Parameters of three-axis spatial transformation		
坐标轴	旋转/(°)	平移/mm
x	0.02	229.890 2
y	-0.01	215.867 6
z	90.36	53.337 5

2) 通过步骤 1) 中记录的空间变换将配准模型中的上表面测量数据进行转换,如图 7 所示。转换后,上下表面点云数据仍保持配准模型中的相互位置关系且下表面测量数据与理论模型下表面重合。

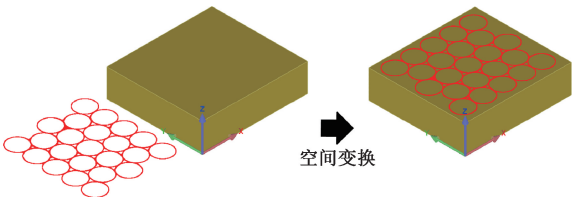


图 7 上表面测量数据转换过程
Fig. 7 Conversion process of upper surface measurement data

3) 通过 Geomagic Wrap 软件分析计算上表面点云数据与理论模型上表面的偏差,该偏差即为工件实际厚度与理论厚度的偏差,如图 8 所示。由于理论模型的厚度为定值,故阵列复材管芯层的厚度分布与计算所得的厚度偏差分布保持一致,数值上相差一个理论模型厚度值。

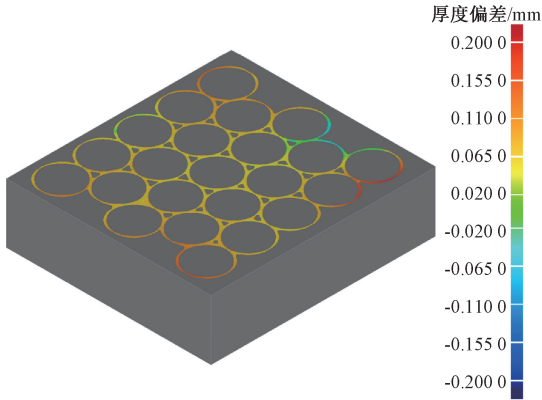


图 8 阵列复材管芯层厚度偏差分布
Fig. 8 Distribution of thickness deviation of the core layer of the CFRP circular cell honeycomb

3 实验验证

为验证本研究提出的厚度检测方法的准确性,对小尺寸阵列复材管芯层进行厚度检测试验。试验分为两部分,首先利用本研究提出的厚度检测方法给出待测工件的厚度分布,然后通过三坐标测量机进行工件局部的厚度测量,最后对比本研究检测方法获得的厚度结果与三坐标测量机的测厚结果,实现厚度检测方法的测量精度评价。为验证本研究提出的厚度检测方法在工程应用上的可行性和有效性,最后以大尺寸阵列复材管芯层为应用对象,进行测量系统的现场试验。

3.1 基于线激光扫描的阵列复材管芯层厚度检测试验

对长宽高为 200 mm×200 mm×60 mm 的阵列复材管芯层进行厚度检测,标定块分布如图 9 所示,其几何精度经检测如表 3 所示。线激光传感器测量时,沿 y 轴正向进行扫描运动,进给速度为 200 mm/min,沿 x 轴的不同扫描轨迹间距为 24 mm。实验测量流程如下:首先,将预置螺纹孔的底面夹具通过四爪压板稳固于机床工作台,并利用内胀式夹具将阵列复材管装夹于底座上,通过螺纹连接确保装夹刚性;同时将线激光传感器集成于机床主轴。随后,进行传感器的姿态校准。校准完成后,对工件上表面进行在机扫描采样。待首面测量结束,通过卸载与翻转工位,重复上述标定及扫描步骤,最终获取工件正反两面的高精度点云数据。

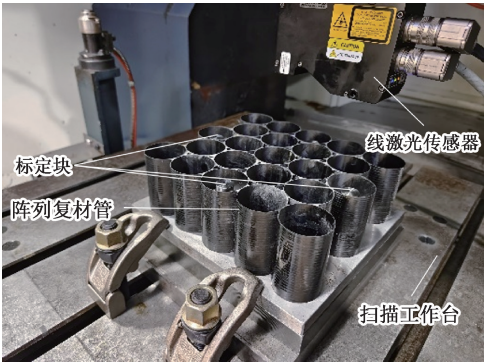


图 9 阵列复材管芯层厚度实验测试装置
Fig. 9 Experimental testing device for the thickness of the CFRP circular cell honeycomb

表 3 标定块几何精度

Table 3 The geometric accuracy of the calibration block (mm)				
标定块	圆柱度	垂直度	平行度	端面间距离
1	0.010 8	0.011 3	0.005 0	49.950 4
2	0.020 2	0.016 6	0.008 7	49.944 4
3	0.015 4	0.019 4	0.002 2	49.948 2

利用预处理后的上下表面点云数据进行工件的厚度检测,具体过程即第 2 章的计算流程,配准后的阵列复材管芯层上下表面点云如图 10 所示。

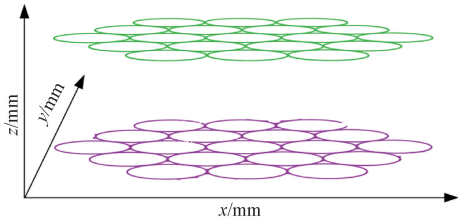


图 10 阵列复材管芯层上下表面配准结果
Fig. 10 Registration results of the upper and lower surfaces of the CFRP circular cell honeycomb

将配准后的处在同一坐标系下的上下表面点云数据以下表面为基准与理论模型进行对齐,然后计算上表面点云数据与理论模型的上表面偏差,该偏差即为工件实际厚度与理论厚度的偏差,如图 11 所示,在工件上选取 10 个区域计算厚度如表 4 所示。

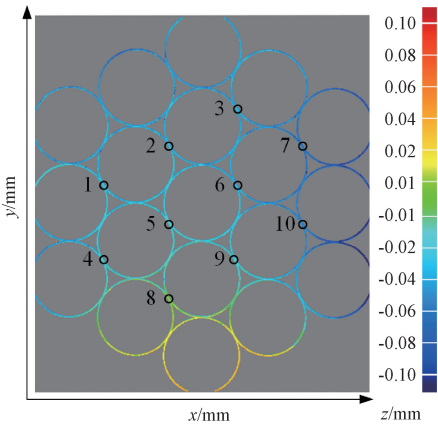


图 11 阵列复材管芯层厚度偏差
Fig. 11 Thickness deviation of the CFRP circular cell honeycomb

表 4 基于线激光扫描的阵列复材管芯层厚度计算
Table 4 Thickness calculation of CFRP circular cell honeycomb core layer based on line laser scanning (mm)

区域	厚度偏差	实测厚度
1	-0.035 4	59.964 6
2	-0.038 2	59.961 8
3	-0.044 7	59.955 3
4	-0.027 0	59.973 0
5	-0.026 1	59.973 9
6	-0.043 3	59.956 7
7	-0.065 8	59.934 2
8	-0.007 2	59.992 8
9	-0.025 1	59.974 9
10	-0.059 2	59.940 8

3.2 基于三坐标测量机测量的阵列复材管芯层厚度检测

采用三坐标测量机对阵列复材管芯层局部区域进行厚度测量,选用的三坐标测量机为德国蔡司生产的 PRISMO 系列。阵列复材管芯层厚度测量现场如图 12 所示,将待测工件用台虎钳固定在三坐标测量机平台,采用长探针在工件上选取 10 个位置测厚,通过三坐标测量机探头探取上表面测量点和沿复材管轴向下表面对应点的位置,计算两点间的距离,该距离即为选取的测厚区域的厚度。

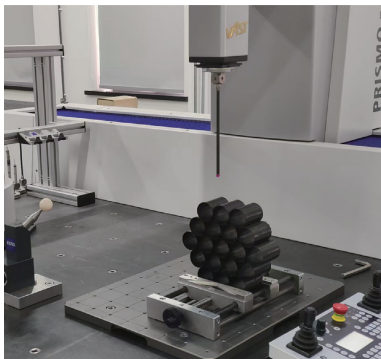


图 12 三坐标测量机测量阵列复材管芯层厚度示意图
Fig. 12 Schematic diagram of the thickness of the CFRP circular cell honeycomb measured by the three-coordinate measuring machine

阵列复材管芯层的 10 个厚度测量区域如图 13 所示,为便于分辨,将其从 1 到 10 进行编号,10 个厚度测量区域的测量结果如表 5 所示。

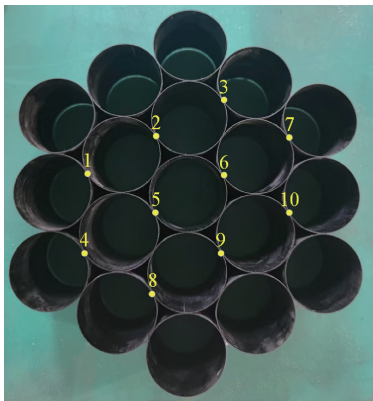


图 13 阵列复材管芯层厚度测量区域
Fig. 13 Thickness measurement area of the CFRP circular cell honeycomb core layer

3.3 厚度检测结果对比

对比两种不同方法的阵列复材管芯层厚度测量结果,以三坐标测量机的测量结果作为测量区域的厚度真值,两种测厚方法对比结果如图 14 所示,厚度检测精度可达 0.03 mm,相对误差控制在 0.1% 以内。

表 5 阵列复材管芯层测厚结果			
Table 5 Thickness measurement results of the CFRP circular cell honeycomb core layer (mm)			
区域	上表面测量点 z 轴坐标	下表面测量点 z 轴坐标	厚度/mm
1	394.422 4	454.365 6	59.943 2
2	394.428 3	454.360 7	59.932 4
3	394.426 5	454.350 6	59.924 1
4	394.416 4	454.342 2	59.925 8
5	394.428 6	454.348 2	59.919 6
6	394.454 7	454.378 3	59.923 6
7	394.451 5	454.379 3	59.927 9
8	394.420 7	454.370 4	59.949 7
9	394.443 7	454.393 7	59.950 0
10	394.501 4	454.409 0	59.907 5

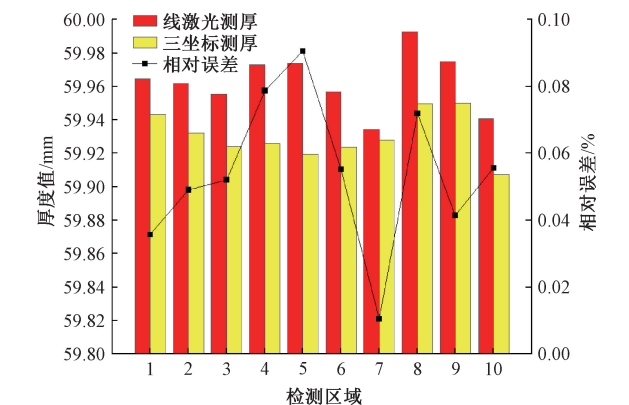


图 14 厚度检测结果对比
Fig. 14 Comparison of thickness detection results

3.4 厚度检测方法工程应用

为验证本研究提出的厚度检测方法在工程应用上的可行性和有效性,对项目涉及到的风云四号卫星天线反射面板中的大尺寸阵列复材管芯层进行了厚度检测,待测工件如图 15 所示,由于工件尺寸较大,为减少标定块的引入对工件的影响,采用了 4 个标定块均匀分布在工件上,4 个标定块在进行拟合计算时,选取其中 3 个标定块特征点计算配准上下表面点云数据的空间变换矩阵,额外的标定块特征点数据用来检验空间变换矩阵的精度。测量时,由数控位移平台搭载线激光传感器完成对阵列复材管芯层表面的轮廓采集,该数控位移平台的运动参数如表 6 所示。

将待测大尺寸阵列复材管芯层上下表面点云数据配准后,与理论模型进行对齐并计算厚度偏差,获得了工件实际厚度与理论模型厚度的偏差分布,如图 16 所示。

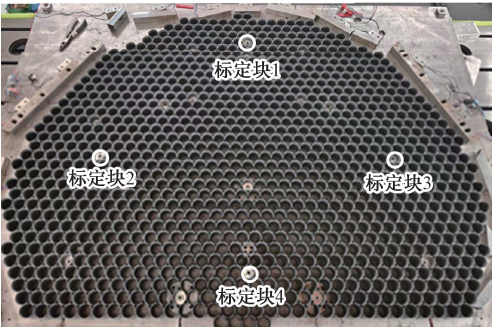


图 15 大尺寸阵列复材管芯层测量现场
Fig. 15 Measurement site of large-sized CFRP circular cell honeycomb core layer

表 6 数控位移平台运动参数

Table 6 Motion parameters of the numerical control displacement platform (mm)

项目	数值
x 轴行程	6 000
y 轴行程	2 600
z 轴行程	1 200
$x/y/z$ 轴定位精度	0.06/0.04/0.01
$x/y/z$ 轴重复定位精度	0.03/0.02/0.01
$x/y/z$ 轴最小分辨率	0.001

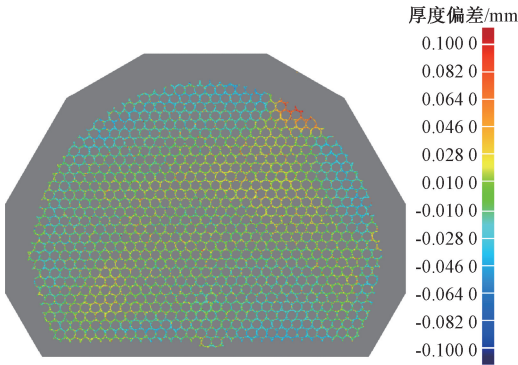


图 16 大尺寸阵列复材管芯层厚度偏差
Fig. 16 Thickness deviation of the core layer of large-sized CFRP circular cell honeycomb

4 结 论

1) 提出了利用阵列复材管芯层上下表面扫描轮廓数据进行厚度检测的原理,针对两次扫描下测量数据坐标系不统一的问题,设计了辅助配准上下表面测量数据的标定块及其固定结构。研究了测量数据的处理方法,提出了基于统计滤波和 K 均值聚类滤波结合的点云降噪

方法,降噪效果显著。

2) 制定了标定块辅助两坐标系下点云数据配准的流程。通过基于欧氏距离的点云聚类分割算法,实现了标定特征的提取。提出了一种多维度拟合标定块端面获取实测特征点的方法,包括二维椭圆拟合和三维平面拟合。研究了工件上下表面点云数据配准方法,实现了两坐标系下点云数据的配准。给出了基于 Geomagic Wrap 软件计算上下表面点云数据配准模型和理论模型间厚度偏差的具体步骤。

3) 开展了阵列复材管芯层厚度的三坐标测量机对比测量试验。对于 200 mm×200 mm×60 mm 的阵列复材管芯层,实现的厚度检测精度为 0.03 mm,相对误差可以控制在 0.1% 以内,满足厚度检测的基本要求。在工程应用方面,使用该厚度检测方法完成了大尺寸阵列复材管芯层厚度的在机检测,为工件的后续工艺提供了精度参考。

参考文献

[1] 史耀辉,郝旭峰,鞠博文,等. 一种复合材料管阵结构反射器及其制作方法: CN201810725224.7 [P]. 2018-12-07.

SHI Y H, HAO X F, JU B W, et al. A composite tube array structure reflector and its manufacturing method: CN201810725224.7 [P]. 2018-12-07.

[2] 史耀辉,沈峰,郝旭峰,等. 一种碳纤维管阵结构及其制作方法: CN201810813952.3 [P]. 2018-11-30.

SHI Y H, SHEN F, HAO X F, et al. A carbon fiber tube array structure and its manufacturing method: CN201810813952.3 [P]. 2018-11-30.

[3] FLORA F, PINTO F, MEO M. Manufacturing and characterisation of a new thermal pre-stressed carbon fibre-reinforced lattice core for sandwich panels [J]. Journal of Composite Materials, 2022, 56 (8) : 1233-1254.

[4] 田俊超,鲍岩,康仁科,等. 薄壁 CFRP 管端面磨削及铣削加工质量对比 [J]. 复合材料学报, 2024, 41 (5) : 2503-2519.

TIAN J CH, BAO Y, KANG R K, et al. Comparative study on the machining quality of thin-walled CFRP circular cell in end face grinding and milling [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41 (5) : 2503-2519.

[5] DONG ZH G, WANG ZH J, TIAN J CH, et al. Investigation on tearing damage of CFRP circular cell honeycomb in end-face grinding [J]. Composite Structures, 2023, 325 : 117616.

- [6] 万谷. 航空发动机蜂窝表面跳动和同轴度测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 13.
- WAN G. Research on the runout and coaxiality measurement technique of aero-engine honeycomb surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 13.
- [7] ARDEBILI A, KAVEH A, ALAEI M H, et al. Health monitoring of the composite honeycomb insulation panels using thermographic image processing [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2025, 40(10): 4619-4637.
- [8] KHADEMI M, PULIPATI D P, JACK D A. Nondestructive inspection and quantification of select interface defects in honeycomb sandwich panels [J]. Materials, 2024, 17(11): 2772.
- [9] REN Y T, ZENG ZH W, JIAO SH N. Eddy current testing of CFRP/aluminium honeycomb sandwich structure [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2024, 39(8): 2593-2605.
- [10] PAN L, SHI K S, HAN L, et al. Research on wireless passive ultrasonic thickness measurement technology based on pulse compression method[J]. Sensors, 2024, 24(24): 8023.
- [11] LIAN M, LIU H B, ZHANG T Y, et al. Ultrasonic on-machine scanning for thickness measurement of thin-walled parts: Modeling and experiments [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5): 2061-2072.
- [12] ORTEGA N, PLAZA S, PASCUAL A, et al. A methodology to obtain traceability for internal and external measurements of inconel 718 components by means of XRCT [J]. NDT & E International, 2021, 120: 102436.
- [13] WENG Q M, MA Y G. Gamma ray thickness measurement[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 237(3): 032072.
- [14] LIU J Y. Application of electronic technology in non-destructive testing of aerospace materials[J]. Highlights in Science, Engineering and Technology, 2025, 134: 228-233.
- [15] LUO M T, LI M X, WU Y L, et al. RTPC X pre-thickness control function on metal chemical mechanical polishing (CMP) process [C]. 2025 Conference of Science and Technology of Integrated Circuits (CSTIC), 2025: 1-2.
- [16] 宋华雄, 张云, 宋岚, 等. 激光在线测厚振动分析与精度优化[J]. 半导体光电, 2021, 42(1): 110-115.
- SONG H X, ZHANG Y, SONG L, et al. Vibration analysis and precision optimization of laser on-line thickness measurement [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(1): 110-115.
- [17] JIAO S CH, WANG SH X, GAO M, et al. Non-contact method of thickness measurement for thin-walled rotary shell parts based on chromatic confocal sensor [J]. Measurement, 2024, 224: 113794.
- [18] KRAUHAUSEN M, PRIEM R, CLASSEN R, et al. Sub-micron inline thickness measurement of cold-rolled metal strips by multi-wavelength interferometry and laser triangulation [J]. Optics Express, 2023, 31(26): 43804-43820.
- [19] 王成武, 陆惠宗, 吴俊杰, 等. 激光三角法位移测量多项式拟合及误差修正[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 1-8.
- WANG CH W, LU H Z, WU J J, et al. Study of polynomial fitting and error correction method for laser triangulation displacement measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 1-8.
- [20] 田又源. 基于激光三角法的工件厚度测量系统研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023: 9-13.
- TIAN Y Y. Research on workpiece thickness measurement system based on laser triangulation [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023: 9-13.
- [21] 李加福. 壳段厚度在位激光三角测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 23-26.
- LI J F. Research on in-situ measurement technology of shell thickness based on laser trigonometry[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 23-26.
- [22] WU CH X, CHEN B J, YE CH SH. Detecting defects on corrugated plate surfaces using a differential laser triangulation method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 129: 106064.
- [23] 罗哉, 赵洪楠, 江文松, 等. 基于线激光扫描的基准孔检测与定位方法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 184-190.
- LUO Z, ZHAO H N, JIANG W S, et al. A detection and positioning method for the base hole based on line laser scanning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

- 2021, 42(12): 184-190.
- [24] 孙炜, 苑河南, 刘乃铭, 等. 融合轮廓特征的线激光点云的快速配准算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 156-162.
- SUN W, YUAN H N, LIU N M, et al. Fast registration algorithm combining contour features for line laser point clouds [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 156-162.
- [25] 李津容, 葛广言, 冯晓冰, 等. 在机测量线激光传感器安装位姿的全局标定[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 158-165.
- LI J R, GE G Y, FENG X B, et al. Global position calibration of 2D laser profiler for on-machine measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 158-165.
- [26] 周亚罗, 章洁, 靳城楠, 等. 基于 PCA 的金属工件表面线激光中心提取算法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(18): 71-79.
- ZHOU Y L, ZHANG J, JIN CH N, et al. Laser center extraction algorithm of metal workpiece surface line based on principal component analysis [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(18): 71-79.
- [27] 金强, 董志刚, 杨国林, 等. 基于点云数据的大曲率工件表面法向计算方法研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(Z1): 124-130.
- JIN Q, DONG ZH G, YANG G L, et al. Research on surface normal calculation method of workpiece with large curvature based on point cloud data [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(Z1): 124-130.

作者简介



E-mail: kangrk@dlut.edu.cn

Kang Renke received his B.Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 1984, his M.Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 1987, his Ph.D. degree from Northwestern Polytechnical University in 1999. He is currently a professor at Dalian University of Technology. His main research interests include digital manufacturing equipment, special and hybrid machining, high-efficiency machining of difficult-to-cut materials, and precision and ultra-precision machining.



E-mail: baoy@dlut.edu.cn

Bao Yan (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Dalian University of Technology in 2009, his Ph.D. degree from Dalian University of Technology in 2018. He is currently a professor at Dalian University of Technology. His main research interests include performance-oriented ultra-precision machining, multi-energy field hybrid machining of difficult-to-cut materials, and precision machining of low-rigidity components.

康仁科, 1984 年于西北工业大学获得学士学位, 1987 年于西北工业大学获得硕士学位, 1999 年于西北工业大学获得博士学位, 现为大连理工大学教授, 主要研究方向为数字化制造装备、特种和复合加工、难加工材料高效加工、精密与超精密加工。

鲍岩 (通信作者), 2009 年于大连理工大学获得学士学位, 2018 年于大连理工大学获得博士学位, 现为大连理工大学教授, 主要研究方向为面向构件性能的超精密加工、难加工材料多能场复合加工、弱刚性构件精密加工。