

DOI: 10.7672/sjgs2025070082

超大直径钢管桩结构质量智能化检测研究与应用

陈 韬,孟若轶,舒方法

(中交第三航务工程局有限公司,上海 200032)

[摘要] 海上风电建设是我国绿色低碳战略的重要组成部分,海上风电超大直径钢管桩作为一种主流的海上风电基础结构形式,其结构质量检测对海上风电基础结构安全有着至关重要的作用。以海上风电超大直径钢管桩为对象,进行钢管桩结构质量智能化检测的研究与应用,采用激光扫描仪获取成型钢管桩的点云数据,通过点云数据过滤与降噪、点云数据特征提取、点云数据配准与融合等步骤,将点云数据进行拟合生成三维数字模型,结合钢管桩 BIM 设计模型进行计算与分析,得出钢管桩直线度、管端平整度、管和桩顶法兰之间的垂直度等关键结构质量参数,为超大直径钢管桩生产质量控制提供重要支撑。

[关键词] 风电;基础;钢管桩;三维激光扫描;点云数据;数字模型;检测

[中图分类号] TU753.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0082-06

Research and Application of Intelligent Quality Inspection for Ultra Large Diameter Steel Pipe Structures

CHEN Tao, MENG Ruoyi, SHU Fangfa

(CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Offshore wind power construction is an important part of China's low-carbon green strategy. As a mainstream form of offshore wind power infrastructure, the structural quality inspection of offshore wind power super-large diameter steel pipe piles plays a vital role in the safety of offshore wind power infrastructure. Taking the super-large diameter steel pipe piles of offshore wind power as the object, the research and application of intelligent detection of steel pipe pile structure quality are implemented. The laser scanner was used to obtain the point cloud data of the formed steel pipe pile. Through the steps of point cloud data filtering and noise reduction, point cloud data feature extraction, point cloud data registration and fusion, etc., the point cloud data were fitted to generate a three-dimensional digital model. Combined with the BIM design model of steel pipe pile, the calculation and analysis were carried out, and the key structural quality parameters such as the straightness of the pipe pile, the flatness of the pipe end, and the verticality between pipe and pile top flange were obtained, which provides important support for the production quality control of super-large diameter steel pipe pile.

Keywords: wind power; foundations; steel pipe pile; 3D laser scanner; point cloud data; digital model; detection

0 引言

目前,对于大型钢结构产品的几何质量检测,结合三维激光扫描技术的研究相对较少,这种技术更多被应用于工程项目中的逆向建模进行虚拟预拼装^[1]。在虚拟预拼装过程中,可以对钢结构进行模拟组装,以预测实际拼装过程中可能遇到的问

题^[2]。通过研究一种基于 BIM 和三维激光扫描的质量检测技术,效率高、检测过程方便、结果稳定、能批量化地得到钢结构几何质量检测参数,满足大直径钢管桩成品质量检测的要求。

随着我国海上风电建设的快速增长,超大直径单桩基础成为海上风电基础的主流形式,这种超大规格钢管桩直径通常为 6~10m,壁厚为 60~80mm,单桩重 900~2 000t,生产难度大,对卷制、拼接及整桩焊接的制作工艺和质量控制等都提出更高的要

[作者简介] 陈 韬,技术总监,高级工程师,E-mail: mangofans@163.com

[收稿日期] 2024-10-19

求。同时,传统的钢管桩制作工艺通常采用人工测量的方式来获得质量数据,例如钢管桩的周长需要通过软皮尺绕管节旋转一圈,对数值进行读取。该方法不仅难度大,而且耗时长,在有限的数量积累下,数据误差更大,导致超大钢结构几何尺寸质量难以控制。通过将 BIM 与实景建模技术相结合,对钢管桩几何质量检测数据的快速获取进行智能检测技术研究和应用,实现自动化、智能化的数据采集、处理和比对,具有数据全面、精确度高、结果呈现直观等优点,在减少人为误差的同时,检测效率和精确度明显提高。

1 超大直径钢管桩质量检测方案设计

1.1 主要生产流程及质量检测内容

海上风电单桩基础采用大直径钢管桩结构,在工厂按照生产流程流水作业加工成型,每根单桩由壁厚不同、长度不同的管节组成,每根管节均采用钢板卷接成型。主要生产工艺:首先按照下料图要求进行下料切割,对于一些较重的管节,需要用 2 块钢板进行拼接,拼板做好后,再根据要求进行下料和坡面的制作;其次采用专用吊具将加工完成的钢板吊装到卷板机工位上进行钢板卷制,卷制时需要经常检查筒体的圆度,合口采用电焊定位,管节两端焊接引熄弧板;然后将卷制完成的管节吊装到纵缝焊接工位进行纵缝焊接,完成后,再将管节吊装到卷板机工位,使管节回圆;最后在胎架工装上装配法兰和管节并焊接固定,对管节组要严把错边量和直线度,纵缝要错开 90°。

钢管桩制作完成后,钢管桩的质量检验主要包括桩顶法兰平面度、管端椭圆度、总长等几何尺寸检验以及焊缝探伤、涂装质量检验等内容,由于超大钢管桩结构几何尺寸质量控制难度较大,本文主要针对钢管桩的几何质量检测方法进行研究。

1.1.1 钢管桩焊缝质量探伤

钢管桩焊缝质量探伤是确保钢管桩结构安全的重要步骤,主要以无损检测的方式进行,常用的无损检测方法有射线检测(RT)、超声检测(UT)、磁粉检测(MT)、液体渗透检测(PT)等。

1)射线检测(RT):通过 X 射线或伽马射线照射焊缝,根据影像判断焊缝内部有无气孔、未熔合等缺陷。

2)超声波检测(UT):利用反射和折射的高频超声波在焊缝中传播,对焊缝内部的缺陷进行检测,如裂缝、未熔融等。

3)磁粉检测(MT):通过磁粉在磁场作用下的吸附现象,检测焊缝表面和近表面的裂纹、夹渣等

缺陷。

4)液态渗透检测(PT):利用特殊的液态渗透剂渗透,使缺陷在焊缝表面的缺陷中通过显像剂显示出来,便于观察和检测。

根据相关规范和标准,对于不同类型和规格的钢管桩焊缝,需要进行不同等级的探伤检测,以确保其质量符合要求。探伤结果应由专业人员进行评估,并根据评估结果采取相应的处理措施,以确保钢管桩结构的安全性和可靠性。

1.1.2 钢管桩的涂装质量检验

涂装质量检验是确保钢管桩防腐性能的重要步骤,主要包括外观质量检查、涂层厚度测量和电火花检漏等 3 个环节。

1)外观质量检查:通过目视或放大镜检查涂层表面,确保涂层表面平整、色泽均匀,无气泡、开裂或缩孔等瑕疵。

2)涂层厚度测量:通过涂层测厚仪对涂层厚度进行测量,以保证涂层厚度达到设计要求。对于厚度达不到要求的部位,按要求进行重新涂装或补涂。

3)电火花检漏:采用电火花检漏仪对涂层进行全方位检查,发现并定位镀膜上存在的缺陷,如微小针孔等,再根据漏点的数量和面积决定钢管是否需要重新喷漆。

通过以上质量检测,确保钢管桩涂装符合相关规范要求,能够延缓腐蚀、提高使用寿命,确保钢管桩结构安全可靠。

1.1.3 钢管桩几何尺寸检测

包括对钢管桩总长度、直线度、钢管外周长、管端椭圆度、管端平整度等多种参数进行测量^[3],以保证符合以下质量控制标准:钢管桩总直线度误差不超过 30mm;允许钢管外周长偏差不大于 10mm;允许管端椭圆度偏差不大于 5mm;管端平整度允许偏差不大于 2mm 等。

针对海上风电大直径钢管桩构件体积大、生产质量检测难的问题,使用三维激光扫描来设计智能检测方案;但是常规三维激光扫描对于大型构件的质量检测存在扫描范围受限、数据精准度和稳定性偏低等问题,需要从扫描站点数量、数据处理、数据拼接、数据融合等方面进行设计。

1.2 钢管桩几何尺寸质量智能检测方案设计

海上风电超大直径钢管桩质量智能检测主要分为扫描获取钢管桩点云数据、建立钢管桩 BIM 模型、点云数据与 BIM 模型拟合、形成检测数据提取模板、调用模板自动生成检测报告等 5 个环节。

1.2.1 扫描获取钢管桩点云采样点

本文利用激光测距原理,将目标点 P 至扫描仪仪器中心(坐标原点)的斜距 S 记录下来,利用三维激光扫描仪获取钢管桩点云数据。利用精确的时钟控制编码器,可对每个激光脉冲进行横向扫描角度 α (水平角度)和纵向扫描角度 β (垂直角度)的测量。仪表自定义坐标系坐标原点位于仪表中心,通过仪表自身扫描脉冲确定 y 轴方向, z 轴指向竖直方向, x 轴方向通过直角坐标系确定,如图 1 所示。

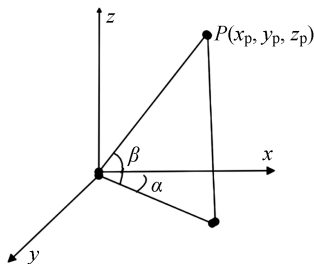


图 1 采样点坐标计算原理

Fig. 1 Calculation principle of sampling point coordinate

通过极坐标系公式,可以求出采样点三维空间坐标 $P(x_p, y_p, z_p)^{[4]}$:

$$\begin{cases} x_p = S \cos \beta \cos \alpha \\ y_p = S \cos \beta \sin \alpha \\ z_p = S \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

1.2.2 点云建模算法

三维场景建模技术在处理真实扫描场景时,主要涵盖点云特征提取、扫描点云配准与融合、场景理解与语义分割、扫描物体点云补全与细粒度重建等内容,建模的精准度和稳定性受到场景的复杂程度、扫描设备、角度、距离等影响^[5]。

因此,为保证数据的拼接精度,在扫描前,需规划多个站点,根据所需扫描的钢管桩长度和三维激光扫描仪单站扫描范围,保证站点间的距离不超过信号的衰减距离,并将适量标靶球放置在钢管桩表面,保证每两个站点间的扫描数据中至少包含 3 个公共位置的标靶球,而且操作前需对激光扫描仪进行调平操作。

点云建模的关键技术是特征提取和点云匹配,通过算法扫描得到的原始点云。

1) 点云特征提取:2D 激光定位和建图的单线激光雷达点云数比较少,通常是直接使用原始点云数据;而 3D 激光定位建图一般采用多相激光雷达,点云数量庞大,因此需要对点云数据进行特征提

取,从而减少点云参与操作的次数,达到节约计算资源的目的。

提取特征点的依据是曲率,重点就在于如何计算曲率。在计算某一点的曲率时,需要找到该点前后的边缘点和平面点,计算公式如下^[6]:

$$C = \frac{1}{|S| \|X_{k,i}^L\|} \left\| \sum_{j \in S, j \neq i} (X_{k,i}^L - X_{k,j}^L) \right\| \quad (2)$$

式中: C 为当前点 i 的曲率; S 为当前点以及周围前后边缘点和平面点的集合; $X_{k,i}^L$ 为当前点 i 的坐标; $X_{k,j}^L$ 为集合中其他点的坐标。

扫描中的点按 C 值排序,再选出 C 值最大的特征点,也就是边缘点,还有 C 值最小的特征点,也就是平面点。将一次扫描划分为 4 个相同的子区域,使特征点在环境中均匀分布。每个子区域可以提供最多 2 个边缘点和 4 个平面点。只有当 1 个点 i 的 C 值大于或小于 1 个阈值,并且被选中的点的数量小于等于最大值时,它才可被选择为 1 个边缘点或平面点。

依据激光点垂直方向的出射角来确定它在哪个扫描线上。第 i 个点所在的角度为:

$$\text{angle} = \arctan \left(\frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \right) \quad (3)$$

式中: $X_{k,i}^L = (x_i, y_i, z_i)$, 为第 i 个角的坐标。

通过软件算法遍历所有的点,并对每一个点的曲率根据阈值进行判断,最终获得特征点。

2) 点云配准融合:首先利用点云配准算法融合多个点云数据,将点云数据转化为环境模型,进一步生成包含环境中物体位置信息的 2D 平面图。通过利用点云配准算法 ICP (iterative closest point) 算法来实现,该计算方法能够计算两组点云之间的最优变换矩阵,从而实现点云数据的融合和对齐。

ICP 核心算法:通过所有对应点之间的欧式距离的平方和来确定最小化目标函数:

$$f(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \| \mathbf{p}_i^t - \mathbf{R} \mathbf{p}_i^s - \mathbf{t} \|^2 \quad (4)$$

式中: $\mathbf{P}_s$ 为源点云; $\mathbf{P}_t$ 为目标点云; $\mathbf{T}$ 为转换矩阵(即旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移矩阵 $\mathbf{t}$)。

1) 寻找对应点

通过源点云和初始目标点云的确定,可以构建一个初始点集合,计算初始旋转矩阵和平移向量,并用其对原始点云进行变换,得到 1 个变换后的点云。然后,对经过变换的点云与目标点云进行比对,只要发现两点之间的距离小于某一阈值,就把它们看成对应点,称为最邻近点对。

2)求解 R 和 t

利用对应点估计旋转矩阵 R 与平移矩阵 t ,其中 R 和 t 中有 6 个自由度,而对应点存在大量冗余观测值,导致数量相当庞大,对此可采用最小二乘法来求最优的旋转矩阵 R 和平移矩阵 t 。

3)迭代优化

基于优化后的 R 与 t 再次进行点云转换,可以发现部分点云在转换后的位置发生变化,而且部分最邻近点对也相应发生了变化,需要重复步骤 2) 和 3) 不断进行优化,直到满足以下任一条件时停止优化,生成 2D 平面图: R,t 的变化量小于一定值;目标函数的变化小于一定值;邻近点对不再变化。

扫描后,还要通过软件系统采用自动拼接方式完成多站数据的拼接和噪点处理,统一数据坐标系,并按一定格式输出点云数据^[7]。

1.2.3 建立钢管桩 BIM 模型

超大直径钢管桩的设计模型数据是进行产品生产质量检测的参照,每根桩都是 1 个独立的 BIM 模型,本文根据钢管桩 CAD 图纸,采用专业的 Inventor 三维机械类 BIM 软件快速建模,在建模过程中,将钢管桩管节、法兰等视作单个零件,通过装配约束将所有管节按照顺序进行拼接^[8],从而形成整桩 BIM 模型。考虑到所生产的大直径单桩结构相似度较高,且规格型号众多,为降低 BIM 建模的重复工作量,采用了参数化方式建模。

1.2.4 点云数据与 BIM 模型拟合

首先,使用专业软件将需要提取的钢管桩数据从点云数据中分离,删除与钢管桩无关的环境数据;其次,导入已建好的 BIM 模型,自动对齐点云数据与 BIM 模型。

1.2.5 形成检测数据提取模板

针对钢管桩生产过程中的单节管桩、多节管桩拼装、整桩等生产环节数据测量的需要,提取的直径、周长、椭圆度、垂直度等测量数据,在 BIM 模型上固化数据测量位置,分别创建数据提取模板,形成模板库。

1.2.6 调用模板自动生成检测报告

每次导入钢管桩点云数据、将点云数据和 BIM 模型自动对齐,选择相应的数据提取模版,可批量化生成钢管桩构件测量数据和数据分析报告,完成钢管桩自动质量检测。检测流程如图 2 所示。

2 超大直径钢管桩质量智能检测试验

本次试验扫描对象为已经生产完成的整桩,桩长超过 80m,采用上述方案进行钢管桩质量参数检测,验证系统方案的可行性和有效性。

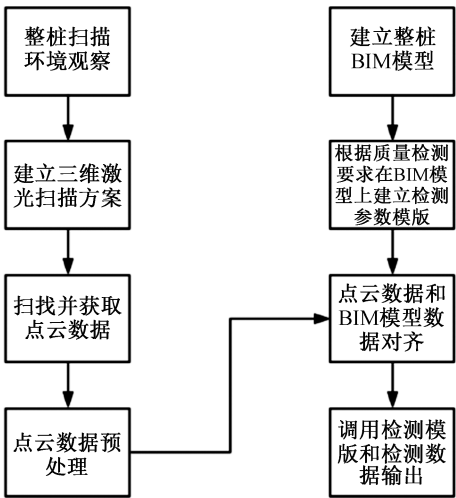


图 2 钢管桩质量检测流程

Fig. 2 Quality detection process for steel pile

2.1 钢管桩点云数据采集

本试验采用了多站扫描的方式,确保采集到足够的物体点云数据,来解决钢管桩长度超过激光扫描仪单次扫描范围的问题,通过在地面上放置 3 个球形靶标,用于进行全局校准,使得不同站点的测量坐标系得以统一,方便软件对特征点进行识别后,拼接不同站点收集的数据,以解决实物在数据采集过程中在某一角度下局部表面被遮挡的问题。

扫描完成后,通过自动检测对标靶来统一坐标系,使不同角度的数据融合于同一个坐标系中,经过对数据降噪和过滤等预处理后,可导出为通用的点云数据格式,如图 3 所示。以激光扫描仪的发射点为坐标原点, x 轴代表管节轴向方向, y 轴和 z 轴分别代表管节断面的横轴和纵轴,构建了一个相对坐标系,将预处理后的点云数据导入软件逆向工程软件中,对所有激光点云数据进行拟合处理,生成高精度三维模型,如图 4 所示。

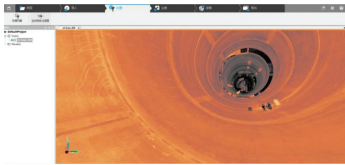


图 3 激光扫描数据预处理

Fig. 3 Preprocessing for laser scanning data

以完成组队的 6 节管节为例,编号为 C1~C6,分别对 6 节管节两侧端部进行切片,得到了 12 组数据,每组数据包含了端部的圆心坐标和管节轴向坐标,并通过坐标的差值计算,得出了管节的长度、直径(D)、中心线位置等测量数据(见表 1),通过扫描设备对管节外部进行扫描,得到了管节端部的内端

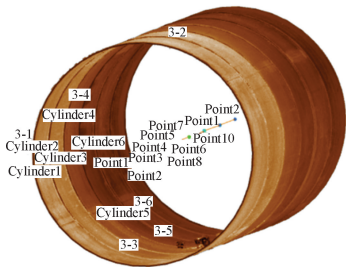


图 4 点云数据转化后的模型

Fig. 4 Model after point cloud data conversion

部形状和外径数据,可求得管节的椭圆度(见表 2)^[9]。

表 1 管节坐标数据和内径

Table 1 Coordinate data and inner diameter of pipe/mm

Code	<i>x</i> start	<i>y</i> start	<i>z</i> start	<i>x</i> end	<i>y</i> end	<i>D</i>
C1	1. 71	-0. 16	85. 72	4. 71	-0. 15	7. 33
C2	-1. 29	-0. 18	85. 72	1. 75	-0. 16	7. 35
C3	-4. 29	-0. 19	85. 71	-1. 25	-0. 18	7. 35
C4	-4. 23	-0. 18	85. 71	-7. 31	-0. 21	7. 35
C5	-10. 31	-0. 22	85. 69	-7. 24	-0. 21	7. 36
C6	-1. 26	-0. 24	85. 69	-10. 25	-0. 22	7. 36

表 2 管节端部数据

Table 2 Data of pipe end/mm

Circle	<i>x</i> center	<i>y</i> center	<i>z</i> center	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>D</i>
Inner	6. 69	0. 20	88. 22	1. 00	0. 01	0. 02	7. 36
Outer	6. 59	0. 20	88. 23	1. 00	0. 01	0. 01	7. 44

2.2 钢管桩 BIM 模型建立

在 inventor 中完成钢管桩的法兰、管节等均作为单个零件的建模,在完成零部件的制作后,逐一导入法兰和管节零件,使用面贴约束使相邻管节的表面重合,使用轴心约束使相邻管节圆心在一条直线上,通过使用装配约束来定义各零部件之间的相互关系,将零部件模型绑定在一起,同时使得零部件被改动后具备自动调整模型的能力,通过这种零件间的相互约束关系,实现了整根钢管桩的参数化 BIM 建模。

3 钢管桩质量参数检测

3.1 点云数据与 BIM 模型对齐

在完成钢管桩激光扫描及 BIM 建模之后,需要对三维激光点云数据与超大直径钢管桩 BIM 模型进行数据对齐。数据对齐的原理是通过优化的方法,将三维激光点云数据与超大直径钢管桩 BIM 模型进行最优化的匹配。匹配的目标是使点云数据尽可能地与 BIM 模型吻合,从而实现数据的一致性和准确性。目前,三维激光扫描和 BIM 模型的数据

对齐主要有特征点匹配、基于地标的对齐等方法,本文采用了特征点匹配的方法^[10],通过提取数据中的特征点或特征描述,根据它们的几何特征或相似性进行匹配,从而实现数据对齐。

3.2 检测参数提取

基于匹配点的对应关系,计算出三维激光扫描数据和大直径钢管桩 BIM 模型的长度、宽度、高度、直径等尺寸参数,进一步计算得到尺寸差异值,分析得到相应的公差数据,根据设计要求和质量检验标准设定公差限制范围,判断尺寸差异是否符合要求。在进行桩顶法兰和钢管桩管端椭圆度检测时,提取出上述截面的三维激光扫描数据,使用最小二乘法拟合椭圆曲线的方法来计算椭圆度^[11],通过拟合得到的椭圆曲线参数,如长轴、短轴和中心位置,计算得出椭圆度的指标。通过对点云数据进行处理和分析,可以拟合出一个平面,得到提取角度、曲率等量化特征,从而计算出法兰平面度、内倾度等检测数据,将提取的特征值和预设标准进行比对,可以判断法兰平面度、内倾度等检测数据是否满足设计要求。

3.3 结果输出

依托 BIM 模型建立检测参数模版,将钢管桩出厂验收时需要检测的各类指标要求定义于 BIM 模型上,并建立相应的映射关系,从而能够跟随 BIM 模型的参数变化,自适应调整检测位置,实现后续产品的检测结果自动输出。对于同种结构的大直径单桩,简化了检测过程,提升了检测的自动化程度。将 BIM 模型和点云数据进行自动对齐,使其完全重叠,通过点和 BIM 模型的相对位置关系,分析实际点和产品理论模型之间的偏差值,即公差,通过色彩变化反映其偏差的程度(见图 5),并通过在 BIM 模型上截取断面的方式提取实测数据(见图 6),根据定制化检测数据模版输出检测结果。

通过在预制厂进行应用和验证,运用本技术扫描检测精度达到毫米级,满足钢结构几何质量检测的要求,运用本技术进行大直径钢管桩质量检测并对生产过程进行控制,大直径钢管桩的测量精度从传统方式的±50mm 提升到±3mm,曲率半径测量精度从传统方式的±10mm 提升到±1mm,提高了大直径钢管桩生产质量,通过使用该技术能够严格控制单桩结构的几何质量参数,确保其符合设计要求和相关标准。检测数据有助于设计、施工等方面对大直径钢管桩的结构力学分析。

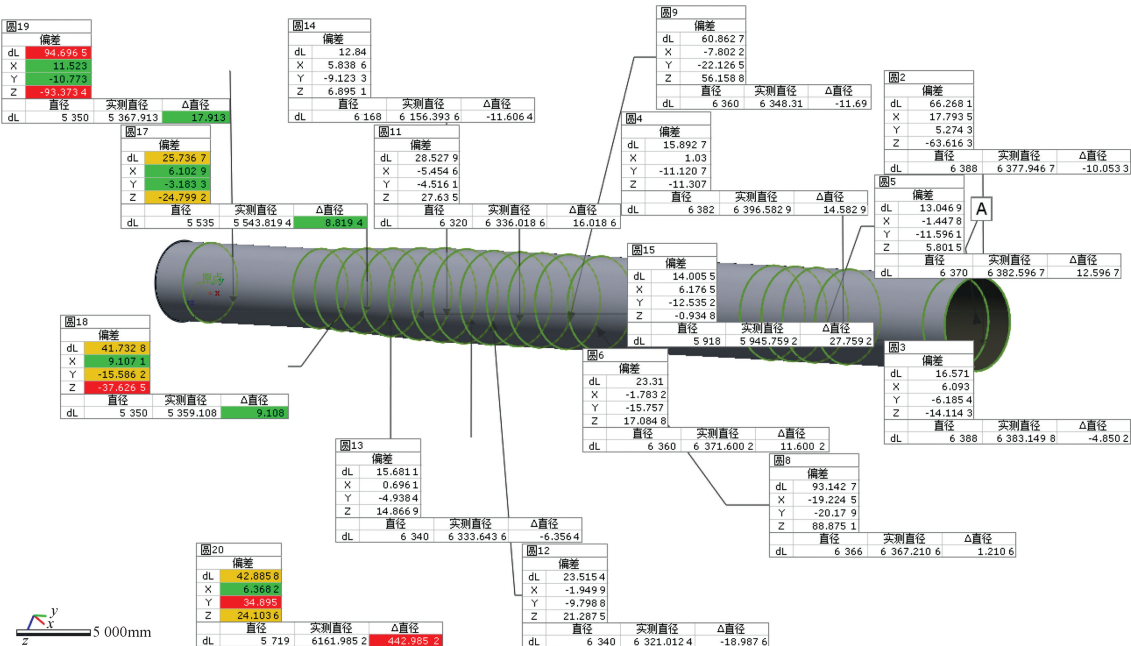


图 6 实测数据提取

Fig. 6 Extraction of measurement data

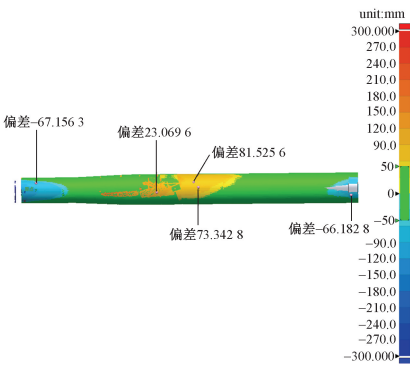


图 5 点云数据与 BIM 模型的公差分析

Fig. 5 Tolerance analysis of point cloud data and BIM model

4 结语

本文研究了三维激光实景建模与 BIM 结合的超大直径钢管桩质量智能化检测技术,本技术应用不仅适用于超大直径钢管桩的质量检测,也适用于海上风电导管架、桥梁工程钢箱梁、水运工程的钢圆筒等大型钢结构的质量检测。这一技术不仅为工程建设过程中的数据采集、传递、分析提供了更加准确、高效的手段,同时也有助于形成大数据,能够助力于优化产品生产工艺,提高产品的质量和性能。

当然,本技术应用也存在着技术门槛较高、数据获取和处理成本较高的问题,需要专业技术人员具备 BIM、实景建模等数据操作和维护的能力。通过提高该技术应用的自动化水平,建立常态化的实

施流程等措施,可以进一步推动该检测方法在生产中的应用和发展。

总之,本技术应用涉及多个学科的知识和技术,通过学科间的交叉融合,提供了新的检测思路,丰富了质量管理理论,将数字化技术应用于质量管理中,为质量检测数据在工程建设行业的应用提供了基础,为工程建设行业的质量检测提供了新的手段和工具。

参考文献:

[1] 李海鹏. 浅谈地面三维激光扫描技术的应用和发展方向[J]. 测绘通报, 2016(S2): 215-218.

LI H P. Application and development direction of ground 3D laser scanning technology [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2016(S2): 215-218.

[2] 周亚男, 乔勋. 基于逆向工程的三维激光扫描点云数据滤波方法[J]. 激光杂志, 2021, 42(9): 170-174.

ZHOU Y N, QIAO X. Filtering method for 3D laser scanning point cloud data based on reverse engineering[J]. Laser journal, 2021, 42(9): 170-174.

[3] 朱才科, 郑海洪, 王嘉定, 等. 大直径超长钢管桩制造技术[J]. 桥梁建设, 2006, 36(3): 47-50.

ZHU C K, ZHENG H H, WANG J D, et al. Manufacturing technology of large-diameter and ultra-long steel pipe piles[J]. Bridge construction, 2006, 36(3): 47-50.

[4] 陈孝哲. 三维激光扫描与 BIM 技术在道路工程质量检验中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(3): 1-3.

CHEN X Z. Application of 3D laser scanning and BIM technology in road engineering quality inspection[J]. Guangdong architecture civil engineering, 2021, 28(3): 1-3.