



Open Access

引用格式:侯鑫焱,张天龙,汤爱平,等. 基于 BIM 和点云重建的既有空间网架结构承载力自动化预测[J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(2): 217-227.

Citation:HOU Xinyan, ZHANG Tianlong, TANG Aiping, et al. Automated prediction of load-bearing capacity of existing spatial grid structures based on BIM and point cloud reconstruction[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(2): 217-227.

基于 BIM 和点云重建的既有空间网架 结构承载力自动化预测

侯鑫焱¹, 张天龙¹✉, 汤爱平¹, 胡安奎²

(1. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228; 2. 西华大学 能源与动力工程学院, 四川 成都 610039)

摘要:为实现大型体育馆空间网架结构承载力自动化预测,提出了一种基于建筑信息模型和三维点云重建的自动化预测算法。使用最小二乘法和 RANSAC 算法建立了焊接球节点的三维点云拟合算法,采用 RANSAC-PCA 联合算法建立了圆钢管杆件的三维点云拟合算法;以海南大学综合体育馆为例,结合 Dynamo 可视化编程重建网架结构的建筑信息模型和有限元模型,对比分析了设计模型和重建模型的静力承载力预测值。结果表明:该结构的焊接球节点竖向位置偏差为(-70~+60) mm,球节点外径拟合偏差为(-20~+10) mm,偏差率不超过 6.67%;杆件最大拟合偏差率为 21.19%,占比 0.51%,78.85%的杆件外径偏差集中在(-6~+6) mm 区间;同时考虑节点位置偏差和杆件弯曲挠度的既有网架结构承载力相较设计值下降了 13.00%,节点偏差缺陷对结构静力承载力的影响远大于杆件弯曲变形产生的影响。该结论可为既有网架结构的安全评估与加固设计提供关键参考。

关键词:既有网架结构; BIM; 点云重建; 承载力; 自动化预测

中图分类号: G232

文献标志码: A

文章编号: 1004-1729(2026)02-0217-11

DOI: 10.65658/j.hndk.2025090801

CSTR: 32403.14.hndk.2025090801

Automated prediction of load-bearing capacity of existing spatial grid structures based on BIM and point cloud reconstruction

HOU Xinyan¹, ZHANG Tianlong¹✉, TANG Aiping¹, HU Ankui²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: To enable automated prediction of the load-bearing capacity of large-span stadium spatial grid structures, this study proposes an algorithm integrating Building Information Modeling with 3D point cloud reconstruction. First, a 3D point cloud fitting algorithm for welded spherical joints is established using the least squares and RANSAC methods, while a combined RANSAC-PCA algorithm is developed for circular steel pipe members. Subsequently, taking the Hainan University Comprehensive Gymnasium as a case study, the BIM and finite element model of its grid structure are reconstructed via Dynamo visual programming. Finally, the static load-bearing capacities of the designed model and the reconstructed models are compared. The results

Received: 2025-09-08; **Revised:** 2025-11-10; **Accepted:** 2025-11-13.

✉ **Corresponding author(s):** ZHANG Tianlong, E-mail: ztl@hainanu.edu.cn.

show that the vertical position deviation of the welded spherical joints ranges from $(-70 \sim +60)$ mm, and the diameter fitting deviation ranges from $(-20 \sim +10)$ mm, with a maximum deviation rate of 6.67%. The maximum fitting deviation rate of members is 21.19%, accounting for 0.51% of all members, while 78.85% of member diameters fall within a deviation range of $(-6 \sim +6)$ mm. Considering both joint position deviations and member bending deflection, the actual load-bearing capacity of the existing grid structure is 13.00% lower than the design value. Furthermore, the influence of joint deviation defects on static load-bearing capacity of the structure is much greater than that of member bending deformation. This findings provide critical references for the safety assessment and reinforcement design of existing spatial grid structures.

Keywords: existing grid structure; building information modeling; point cloud reconstruction; bearing capacity; automatic prediction

0 引言

随着工程技术的发展,为突破传统建筑形式局限并实现功能与美学的统一,力学性能优良、造型美观的大跨空间网架结构已广泛应用于体育馆等大型公共建筑。然而,随着服役时间增长,受人为因素及气候等自然灾害影响,此类结构损伤问题日益突出,既有大跨钢结构坍塌事故频发,造成人员伤亡和财产损失,引发社会广泛关注,相关教训极为深刻。为此,开展既有网架结构三维模型重建及服役期结构预测研究,具有重要现实意义。

建筑信息模型 (building information modeling, BIM) 作为驱动土木工程行业数字化转型的核心技术,其在参数化表达与竣工信息精准存储方面的潜力已得到业内广泛认可,应用日益普及,而其数据应用的便捷性,进一步催生了对 3D 重建方法的需求^[1]。三维激光扫描技术借助三维激光扫描仪的高速旋转或移动,可捕获结构物数百万至数十亿个空间点的三维坐标,生成表征建筑几何形态的密集点云。随着计算机算力的提升与算法的飞速发展,对三维激光扫描所获海量点云数据的处理可行性正逐步增强^[2]。在点云数据处理领域,相关学者已开展诸多研究并取得一定成果。高连平等^[3]在三维扫描技术中引入 SFM 方法,针对数据颜色特征进行二次配准,增强了点云数据融合效果。宋小英等^[4]提出基于三维激光点云数据的多尺度去噪方法,有效削弱了邻域噪声对原始点云数据的干扰。Xie 等^[5]采用基于 DBSCAN 聚类的二次拟合方法,实现三维曲面的精准分割。从三维点云中精准提取表面信息,是实现离散点云数据重建、并将其转化为对应实体模型的关键环节。为获取构件拟合参数信息,童宇超等^[6]采用编程算法对空间网架结构焊接球节点的中心点坐标实现自动化批量提取。为提高杆件中心轴的获取精度, Jin 等^[7]开发滚球算法用于钢管中心轴估计。但目前研究对点云深度学习的应用延伸不足、应用场景受限^[8],现有成果多分散于点云去噪、分割、单一构件拟合研究,未形成“点云自动化拟合 BIM 模型重建-尺寸检测-有限元承载力预测”的全流程一体化技术方案。此外,在对网架结构失稳研究中,乐凤江等^[9]采用增量动力方法,研究节点缺陷与杆件缺陷综合作用下,网架结构在地震作用下的失效破坏规律。刘乐^[10]基于结构设计信息,利用 MIDAS Gen 软件采用拆除关键构件法对深圳科技馆进行抗连续性倒塌性能验证。综上,现有研究多依据网架结构设计信息和理论方法,针对包含大量球节点与杆件的大跨度网架结构,其自动化重建方法与结构承载力预测的相关研究仍较为匮乏。

本文依托海南大学多功能综合体育馆钢网架屋盖,形成从结构扫描入手,经点云处理与模型重建,最终开展模型承载力分析的全流程一体化技术流程。所用方法可用于包含大量球节点和钢管的网架结构自动化建模,所获三维 BIM 加上 FEM (finite element method) 重建模型整体性强、可视化程度高。

1 研究方法

1.1 网架结构点云数据预处理 使用地面三维激光扫描仪扫描整体结构获取点云数据,通过多站点的扫

描提高数据完整性。提取各测站测量信息后,采用 Leica Cyclone 和 Trimble Realworks 等专用软件对多测站原始三维激光点云数据开展配准及后续处理工作^[11]。初始以标靶坐标为强约束,结合重叠区域的点云数据,自动匹配不同测站中同一标靶的平面靶心,建立对应点对,通过最小二乘法求解使得同名标靶匹配误差最小化。再进一步通过运行改进的 ICP 算法优化配准,检查残差小于 1 mm 时完成拼接。点云数据拼接完成后,为使研究主体更清晰体现,在不降低精度的前提下,通过人工干预与机器结合的方式筛选去除人物和周围墙壁等冗余部分,减少数据的存储量,提高数据处理效率。

针对完整钢结构剔除噪声点和粗差点,基于欧几里得聚类结合主成分分析(PCA)云滤波优化方法对目标点云杆件进行去噪和滤波。针对点云数据少的球形节点和产生明显屈曲变形的杆件,分别提出稀疏点云节点拟合优化算法和直线段分割法,提取每段拟合的圆柱体中心截面的中心坐标信息,采用三次样条插值法近似拟合为弯曲杆件的中心轴线,计算杆件变形程度。最后借助 Revit 钢结构二次开发插件,将拟合圆柱体的几何信息转换为 Revit 中的钢管参数信息,依托 Dynamo 实现智能化 BIM+FEM 模型重建。

1.2 网架结构承载力自动化预测 为探究节点位置偏差和杆件弯曲对网架结构稳定承载力的影响,采用 ABAQUS 有限元软件,建立网架设计模型和既有网架模型(有节点偏差以及同时有节点偏差和杆件弯曲)3 种有限元模型,开展非线性稳定极限承载力分析,获取各模型对应的极限承载力值及最大竖向位移量。绘制荷载-位移曲线,探究网架结构在受力过程中的极限承载性能与力学响应特征^[12]。

2 网架结构点云自动化重建算法

2.1 球节点点云自动化拟合算法

2.1.1 球节点密集点云拟合 基于 Trimble Realworks 软件,结合最小二乘法的精确性和 RANSAC 算法的鲁棒性,通过分割-拟合-验证的流程,将点云数据转化为参数化几何实体,并计算拟合误差即残差。最小二乘法通过对初步分割的点云进一步优化参数,减少误差。RANSAC 通过迭代随机采样最小数据集计算模型参数,并根据内点数量评估模型质量,最终选择内点最多的模型作为最优解。

$$(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 + (z_i - c)^2 = r_s^2 \quad (1)$$

其中, $(x_i, y_i, z_i) (i=0, 1, 2, \dots)$ 为空间点坐标, (a, b, c) 为球心, r_s 为半径。

$$d_s = \left| \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 + (z_i - c)^2} - r_s \right| \quad (2)$$

其中, d_s 为点到球面的距离。

每次迭代随机选取至少 4 个不共面的点,代入式(1)构建线性方程组求解出 (a, b, c, r_s) , 计算所有点到此球面的距离如式(2)所示,将所有满足 $d_s < \varepsilon$ 的点标记为内点(ε 为预设阈值)。记录当前模型的内点数量,当达到最大迭代次数或内点比例超过了 95%,则可停止迭代。每次迭代后的结果自动更新几何参数进行下一次迭代,逐步逼近最优解得到最终拟合结果,迭代拟合结果如图 1 所示。

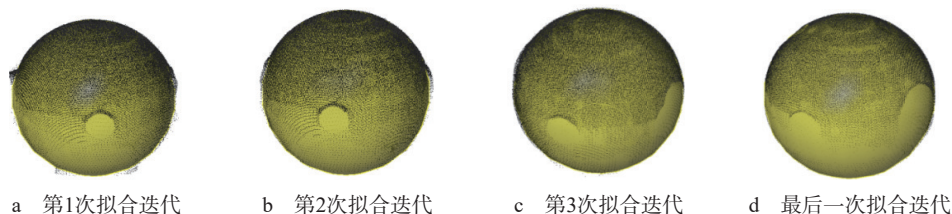


图 1 球节点拟合结果

2.1.2 球节点稀疏点云拟合 由于体育馆跨度较大,部分球节点在三维扫描过程中点云数据稀疏,无法通过式(1)和式(2)直接拟合生成。《空间网格结构技术规程: JGJ7—2010》要求,当空心球外径过大且连接杆件较多时,所有汇交杆件的轴线必须通过球中心线^[13]。事实上,由于存在微小的偏差,不同杆件的轴

线未必是共面的,导致交点可能不存在^[14]。因此,提出利用几何先验知识优化距离多直线最近点算法以确定拟合节点中心坐标,并通过拟合节点连接杆件边缘获取球节点外径,如图2所示。

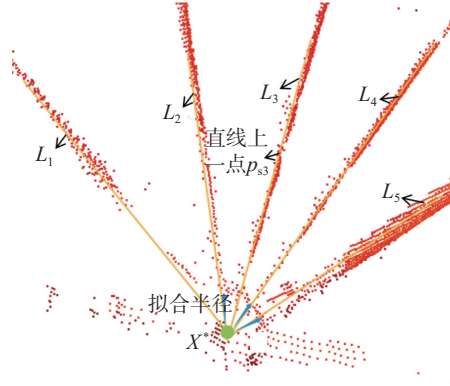


图2 球节点稀疏点云拟合算法示意图

式(3)为直线参数化公式,空间中点 X 到直线 L_i 的距离及距离平方分别为

$$L_i: r_i(u) = p_{si} + un \quad (3)$$

$$D_i(X, L_i) = \|(X - p_{si}) \times n\| \quad (4)$$

$$D^2 = \|(X - p_{si})\|^2 - [(X - p_{si}) \cdot n]^2 \quad (5)$$

其中, L_i 表示第 i 条直线 ($i=0,1,2,\dots$), $r_i(u)$ 表示直线 L_i 的参数方程, p_{si} 为直线上一点, n 为单位方向向量, 参数 u 表示从点 p_{si} 沿方向 n 移动的距离, $D_i(X, L_i)$ 为点 X 到直线 L_i 的距离, D^2 为距离平方。

采用非线性最小二乘优化求解存在点 X^* 使得它到所有直线的距离平方和最小, 即

$$X^* = \arg \min_X \sum_{i=1}^{N_L} D_i(X, L_i)^2 \quad (6)$$

$$f(X) = \sum_{i=1}^{N_L} \left(\|X - p_{si}\|^2 - [(X - p_{si}) \cdot n]^2 \right) \quad (7)$$

其中, N_L 表示相交于该节点的直线数量, $f(X)$ 是非线性函数, X^* 为拟估的节点中心坐标。

2.2 圆钢管杆件点云自动化拟合算法

2.2.1 直线型圆钢管杆件点云拟合 针对直线型的圆钢管杆件, 基于欧几里得聚类对杆件和节点点云进行分割。欧几里得聚类是一种基于点云数据中点的欧几里得距离进行分组的无监督学习算法, 将空间中距离相近的点划分为同一簇, 远离的点归为不同簇。该方法对参数具有敏感性, 需要依据点云局部密度合理选取距离阈值, 以兼顾分割完整性与精度。本文基于 EdgeWise 点云几何分析软件和 RANSAC-PCA 联合算法优化实现对网架结构钢管开展自动拟合, 提取管道圆柱体的中心轴和外径等拟合参数。所采用的 RANSAC 算法和主成分分析 PCA 如式(8)~式(13)所示。

空间某点 $p_i(i=0,1,2,\dots)$ 到圆柱表面的距离 d_c 为

$$d_c = \|\|p_i - q_i\| - r_c\| \quad (8)$$

其中, q_i 是点 p_i 在圆柱轴线上的投影点, r_c 为圆柱体半径。最小化所有点到圆柱表面的距离平方和, 即

$$\min_{a, n, r_c} \sum_{i=1}^N (\|p_i - q_i\| - r_c)^2 \quad (9)$$

其中, N 表示属于该杆件的点云数量, $a=[a_x, a_y, a_z]^T$ 为圆柱轴线上一点, $n=[n_x, n_y, n_z]^T$ 为轴线单位方向向量, 满足 $\|n\|=1$ 。

随机采样一致算法(RANSAC)用于从包含大量噪声和异常值的数据中通过迭代的方式估计数学模型参数,鲁棒性强,可以稳健处理包含 50% 以上的离群点数据。从随机采样选取不少于 7 个非共面点,用最小二乘法计算参数拟合候选圆柱体,再计算所有点到圆柱的距离,标记距离小于阈值的点为内点。在一定的置信度下,不断迭代优化保留内点最多的模型,重复至收敛。

根据点云精度设定内点阈值 ε , 计算所有点到圆柱的距离, 如式(10)所示, 并标记距离 $d_i < \varepsilon$ 的点为内点, 记录下内点数量最多的模型, 当内点数量比例不小于 $\omega_{\min}$ (最小内点比例) 或达到 $T_{\max}$ (最大迭代次数) 停止迭代。

$$d_i = |||(p_i - a) \times n| - r_c| \quad (10)$$

其中, d_i 表示点 p_i 到圆柱表面的距离。

协方差矩阵 C 描述了采样点关于质心 $\bar{p}$ 的欧氏距离平方差的偏离程度, 对 C 进行特征分解得到特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和相对应的特征向量 $\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \mathbf{l}_3$, 因为轴线方向方差最小, 最小特征值 λ_3 对应的特征向量 $\mathbf{l}_3$ 即为圆柱轴线方向。计算协方差矩阵 C 公式为

$$C = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (p_i - \bar{p})(p_i - \bar{p})^T \quad (11)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k p_i = \left[\frac{\sum x_i}{k}, \frac{\sum y_i}{k}, \frac{\sum z_i}{k} \right]^T \quad (12)$$

其中, k 为采样点数且不小于 7, $\bar{p}$ 为 k 点质心。

将 k 点投影到垂直于 $\mathbf{n}$ 的平面, 拟合投影圆的半径 r , 公式为

$$r = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \|(p_i - \bar{p}) - [(p_i - \bar{p}) \cdot \mathbf{n}] \mathbf{n}\| \quad (13)$$

其中, $(x_i, y_i, z_i) (i=0, 1, 2, \dots)$ 为空间点坐标。

图 3 为杆件与球节点点云分割结果呈现, 图 4 为对于直线型杆件拟合结果实例。

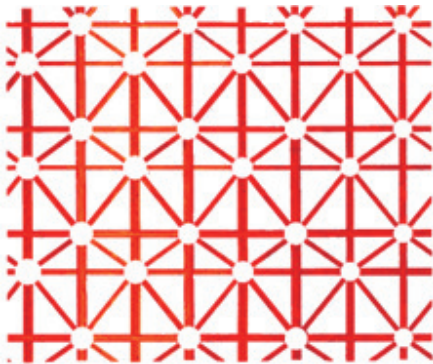


图 3 杆件与球节点点云分割结果

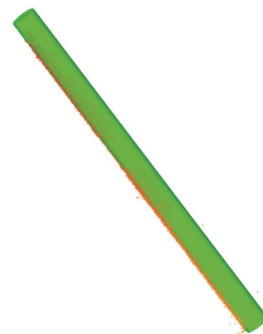


图 4 直线型杆件点云拟合实例

2.2.2 弯曲型圆钢管杆件点云拟合 针对弯曲型的圆钢管杆件, 采用直线段分割的方法进行多段线拟合。每段直线拟合圆柱体中心点形成一组空间点 $p_{ci} = (x_i, y_i, z_i) (i=0, 1, \dots, m)$ (m 为分段数量), 构造一条光滑的空间曲线 $S(t) = (S_x(t), S_y(t), S_z(t))$, 使得 $S(t_i) = p_{ci}$ 。为使三维问题分解为 3 个独立的一维插值问题, 引入辅助变量参数 t , 将三维曲线分解为 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 3 个分量, 分别进行三次样条插值。构造三次样条函数 $S_x(t)$ 、 $S_y(t)$ 和 $S_z(t)$, 分别满足 $S_x(t_i) = x_i$, $S_y(t_i) = y_i$, $S_z(t_i) = z_i$, 以 $S_x(t)$ 为例, 类似构造 $S_y(t)$ 和 $S_z(t)$ 。在区间 $[t_i, t_{i+1}]$ 上, 构造三次多项式 $S_x(t)$ 为

$$S_x(t) = a_i + b_i(t - t_i) + c_i(t - t_i)^2 + d_i(t - t_i)^3 \quad (14)$$

其中, a_i 、 b_i 、 c_i 和 d_i 为求解系数, 连续条件式(15)和边界条件式(16)为

$$\begin{cases} S_x(t_i) = x_i \Rightarrow a_i = x_i \\ S_x(t_{i+1}) = x_{i+1} \Rightarrow a_i + b_i h_i + c_i h_i^2 + d_i h_i^3 = x_{i+1} \end{cases} \quad (15)$$

其中, 参数间隔 $h_i = t_{i+1} - t_i$ 。

$$\begin{cases} S'_x(t_{i+1}^-) = S'_x(t_{i+1}^+) \\ S''_x(t_{i+1}^-) = S''_x(t_{i+1}^+) \\ S''_x(t_0) = S''_x(t_m) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

在式(17)中引入二阶导数 $M_i = S''_x(t_i)$ 则有

$$\begin{cases} c_i = M_i/2 \\ d_i = (M_{i+1} - M_i)/6h_i \\ b_i = (x_{i+1} - x_i)/h_i - h_i(2M_i + M_{i+1})/6 \end{cases} \quad (17)$$

如式(18), 最后将 3 个分量的插值结果合并为空间曲线, 即

$$S(t) = (S_x(t), S_y(t), S_z(t)) \quad (18)$$

2.3 BIM 模型与有限元模型自动化重建 根据拟合后的球节点中心坐标和外径值, 以及拟合后的直线型、弯曲型杆件外径值和中心轴线空间曲线, 结合 Dynamo 可视化编程实现 Revit 模型和 ABAQUS 有限元模型的自动化建立, 技术路线如图 5 所示。在完成网架结构焊接球节点拟合后, 获取球节点编号、中心点坐标(x, y, z)、外径等关键几何参数, 借助 Revit 钢结构二次开发插件, 创建适配的焊接球节点几何体族库, 并添加坐标、外径、壁厚等参数化几何信息进行关联匹配, 最后利用 Dynamo 参数化工具中开展球节点 BIM 模型自动化建模。对于钢管建模, 先将圆钢管的点云进行拟合, 再导出 EdgeWise 软件中生成的圆柱体几何信息, 依托 Revit 钢结构二次插件创建钢管族库, 通过修改圆钢管的材料属性与壁厚参数生成钢管三维模型, 最后利用 Dynamo 参数化工具将钢管 BIM 模型和球节点 BIM 模型进行构件几何体剪切与连接。Dynamo 逻辑处理如图 6 所示。

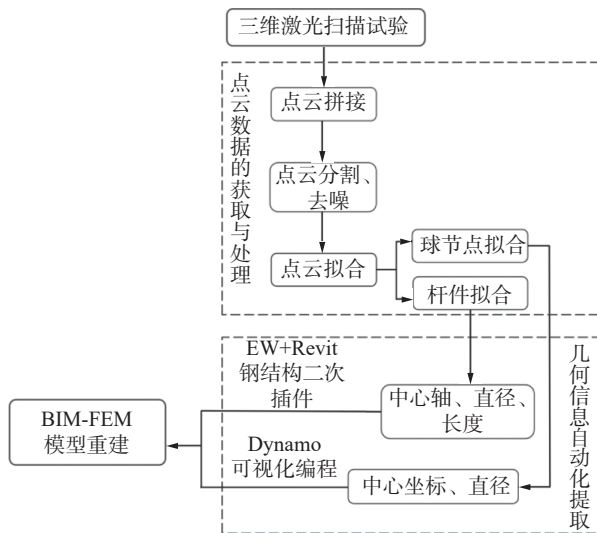


图5 三维网架模型重建技术路线

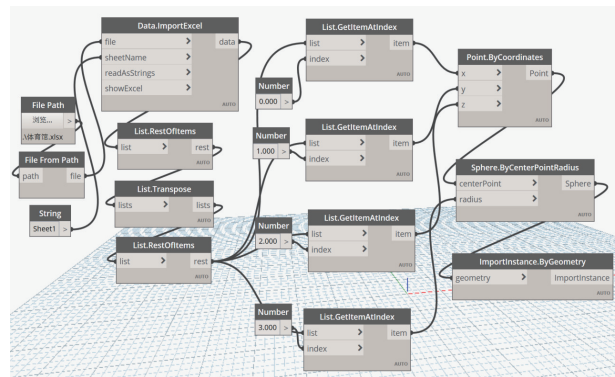


图6 Dynamo实现节点拟合参数模型重建示例

3 体育馆案例分析

3.1 点云数据的处理与自动化拟合 选取海南大学综合体育馆网架结构为试验对象, 该体育馆屋盖采用

弧形钢网架结构,网架形式为焊接球节点正放四角锥网架,支承形式为下弦多点支承。本次试验使用仪器为徕卡 P40 地面式三维激光扫描仪,扫描位置距离屋盖网架底部高度在 15.00~17.35 m 间,仪器精度可达 1 mm,测程达 270 m,扫描速度高达 $1\,000\,000$ 点 $\cdot$ s $^{-1}$ 。为确保所有待测区域无遗漏,最大避免死角和遮挡处,确保点云数据精确性,在正式试验开始前,提前踏勘规划科学架站路径。仪器分辨率设置为 3.1 mm@10 m,满足高精度需求。本次扫描现场共布设 18 处标靶纸,设置了 16 处数据采集点,其中一楼长方形场地均匀布设站点 9 处,二楼沿看台周边布设站点 7 处,确保相邻架站至少有 3 个公共标靶用于配准。点云数据拼接情况如图 7 所示,拼接后的点云数据共包含 1 136 049 922 个点,进行去噪后的点云数据情况如图 8 所示,包含 202 207 872 个点。

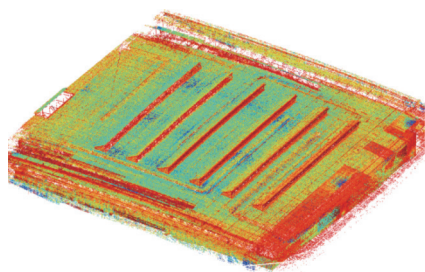


图 7 拼接后的体育馆点云数据

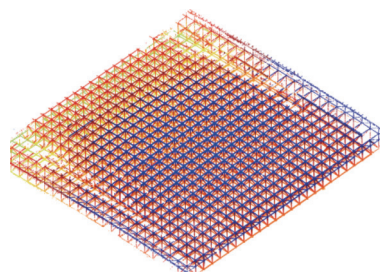


图 8 去噪后的网架结构点云数据

本研究共拟合出该体育馆网架 1 324 个球节点,其中有 111 个球节点按照 2.1.2 节中的球节点稀疏点云算法处理,1 213 个节点按照 2.1.1 节中的球节点密集点云算法处理。如图 9 所示为球节点拟合结果。本研究共拟合杆件 5 091 根,其中有 11 根杆件有明显屈曲变形。如图 10 所示为杆件拟合结果,其中选取 4394 号和 4615 号有明显弯曲的杆件拟合示例如图 11 所示。与人工手动处理杆件拟合方法相比,本方法的处理效率提升约 16.7 倍,显著缩短了数据处理周期。最后,基于 EdgeWise 与 Dynamo 在 Revit 与 ABAQUS 中实现可视化编程自动化,构建并生成既有网架结构的整体三维 BIM 模型和有限元模型。

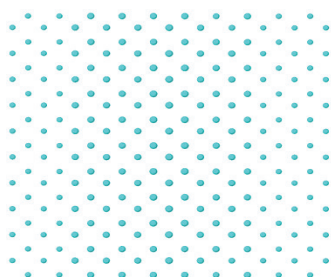


图 9 球体拟合重建结果

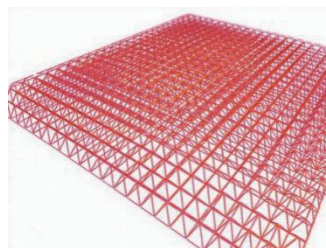


图 10 杆件拟合重建结果



a 4394号弯曲杆件点云及拟合结果



b 4617号弯曲杆件点云及拟合结果

图 11 部分弯曲杆件拟合重建示例

3.2 基于 BIM 模型的尺寸检测

3.2.1 球节点尺寸偏差检测 该网架结构共有 WS300 mm $\times$ 10 mm、WSR400 mm $\times$ 10 mm、WS500 mm $\times$ 14 mm、WSR500 mm $\times$ 20 mm 和 WSR600 mm $\times$ 25 mm 等 5 种焊接球节点使用规格,因此针对既有重建结构与设计 BIM 模型,将球节点按照外径划分为 4 种类型进行外径偏差评估,如图 12 所示。由图 12 可知,球节点外径偏差在(-20~+10) mm 范围之间,最大偏差值-20 mm 存在于 WS300 mm $\times$ 10 mm 焊接球类型中,偏差率不超过 6.67%,表明球节点外径拟合接近标准值。

3.2.2 球节点位置偏差检测 通过点云重建模型与设计 BIM 模型对比发现,该网架存在节点位置偏移现象,并且位移偏差在竖直 Z 轴方向明显,以 Z 轴竖直向下为正方向,由图 13 可知,球节点竖向位置偏差在 $(-70 \sim +60)$ mm 范围之间,图 14 呈现出网架整体结构中间区域 Z 轴正向偏差相对显著,边缘区域负偏差更突出的规律,表明结构中心区域受荷载作用产生向下的挠度,边缘区域因结构整体受弯,产生向上的反拱。同时可以发现与柱子连接的支座处节点偏移量较小,说明下部混凝土结构沉降可忽略不计。

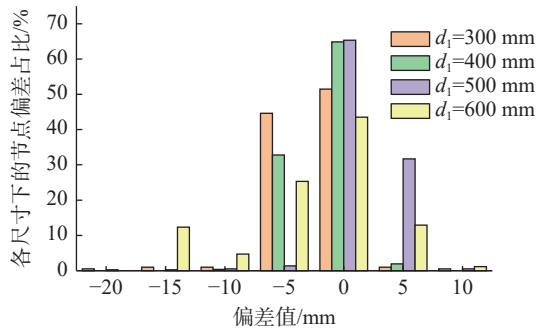


图 12 球节点外径尺寸偏差占比

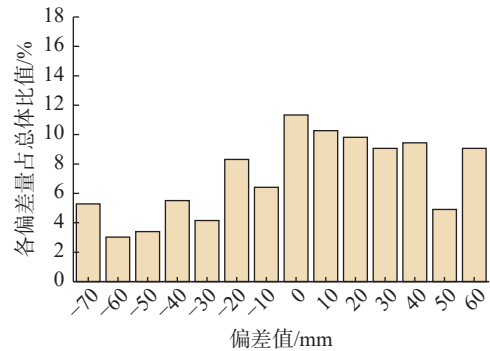


图 13 球节点 Z 轴方向位置偏差占比

3.2.3 圆钢管尺寸偏差检测 该网架结构共有 $\Phi 75.5 \text{ mm} \times 3.75 \text{ mm}$ 、 $\Phi 88.5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 、 $\Phi 114 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 、 $\Phi 140 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 、 $\Phi 159 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 、 $\Phi 159 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 、 $\Phi 180 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 和 $\Phi 219 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 八种钢管规格,因此针对既有重建结构与设计 BIM 模型,将圆管杆件按照外径划分为 7 种类型进行偏差评估,如图 15 所示。由图 15 可知,圆钢管外径偏差为 $(-16 \sim +16)$ mm,其中杆件最大偏差值 -15.20 mm 存在于 $\Phi 75.5 \text{ mm} \times 3.75 \text{ mm}$ 规格的钢管中,计算得到最大偏差率为 20.13%。对 5 091 根杆件的拟合结果统计显示,拟合偏差率较大的杆件共 26 根,占总杆件数量的比例约为 0.51%;而 78.85% 的杆件外径偏差集中在 $(-6 \sim +6)$ mm,整体偏差控制效果较好。

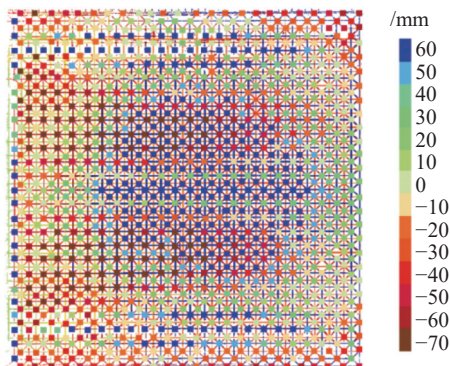


图 14 球节点 Z 轴方向位置偏差分布

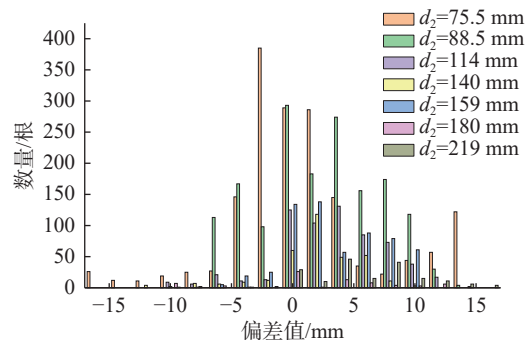


图 15 圆钢管杆件外径尺寸偏差占比

3.2.4 圆钢管弯曲偏差检测 基于 Python 编程运算重建模型的杆件弯曲挠度值,对于弯曲挠度值超过规范限值的杆件整理结果如下表 1 所示。图 16 呈现了 3.1 节中 4394 号和 4617 号杆件弯曲挠度计算结果,该网架共有 11 根杆件的弯曲挠度值超过 $L/1\ 000$ 规范限值,其中最大值为弯曲方向竖直向下 0.077 m ,超过规范限值 24.6 倍。上、下弦杆中发生弯曲的挠度方向为竖向正负交替出现。

3.3 既有网架结构承载力预测 在 ABAQUS 有限元软件中分别建立网架结构设计模型(简称“模型 1”)、只考虑节点偏差的既有网架模型(简称“模型 2”)、同时考虑节点偏差和杆件弯曲的既有网架模型(简称“模型 3”)。所有杆件材料均为 Q235B 钢材,采用 B31 梁单元进行模拟,焊接球和网架支座均采用刚接节点模拟。3 种模型在均布荷载作用下的荷载-位移曲线如图 17 所示。由图 17 可知,模型 1、模型 2 和模型 3 的静力极限承载力分别为 4.08 、 3.47 和 $3.55 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,模型 2 和模型 3 的极限承载力较模型 1 相比分别下降了 14.95% 和 13.00%。这表明结构节点偏差对结构静力承载力影响更大,而杆件弯曲变

形对结构静力承载力影响远远小于节点位置偏差缺陷的影响。这是因为该结构中发生明显弯曲变形的杆件数量有 11 根, 占比仅为 0.20%, 另外该网架结构为超静定体系, 在局部少量杆件失稳弯曲退出工作后网架结构发生内力重分布, 结构受力体系达到新的平衡状态。

表 1 部分杆件弯曲挠度偏差检测

杆件编号	杆件类型	弯曲方向	弯曲挠度值/m	允许最大挠度值/m
250	上弦杆	竖直向上	0.041	0.003
399	上弦杆	竖直向上	0.043	0.003
477	上弦杆	竖直向下	-0.042	0.003
2850	上弦杆	竖直向上	0.055	0.003
3350	上弦杆	竖直向下	-0.072	0.003
3362	上弦杆	竖直向下	-0.077	0.003
4362	下弦杆	竖直向下	-0.020	0.003
4394	下弦杆	竖直向下	-0.059	0.003
4413	下弦杆	竖直向上	0.046	0.003
4562	下弦杆	竖直向下	-0.046	0.003
4617	下弦杆	竖直向上	0.050	0.003

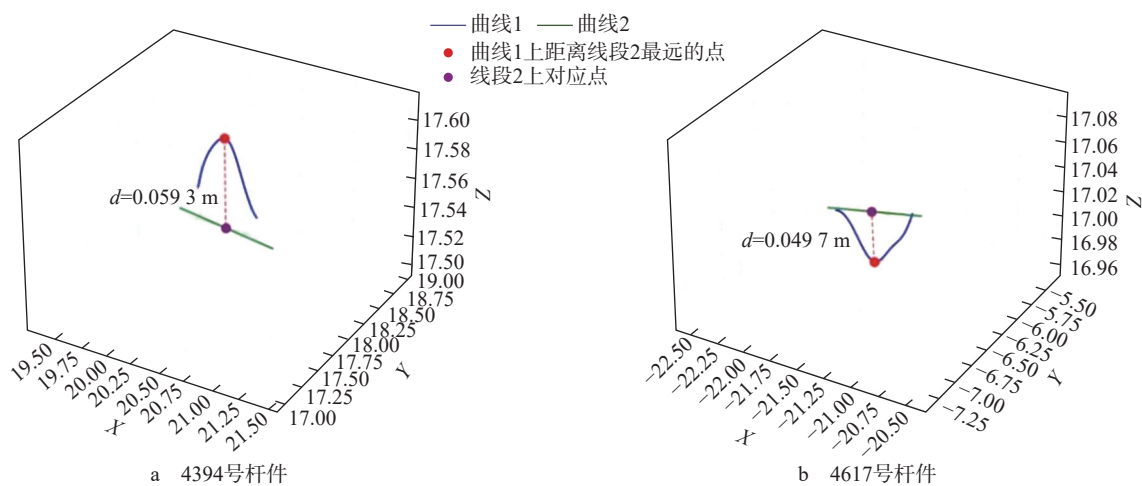


图 16 部分杆件弯曲挠度计算示例

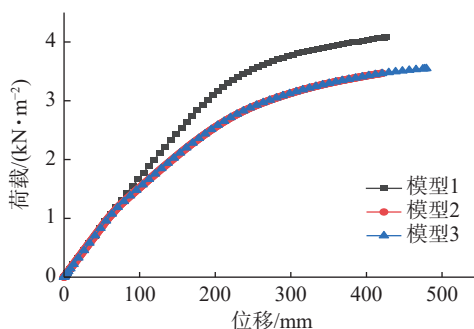


图 17 不同缺陷状态下的网架荷载-位移曲线

4 结 论

(1) 提出球形节点点云自动分割与拟合算法并评估偏差精度。球节点拟合外径偏差在 $(-20 \sim +10)$ mm

范围之间,偏差率不超过6.67%,拟合接近标准值。球节点竖向位置偏差在 $(-70 \sim +60)$ mm 范围之内,网架整体结构呈现出中间区域Z向正偏差相对显著,边缘区域负偏差更突出的规律。

(2)提出圆钢管点云自动分割与拟合算法并评估偏差精度。圆钢管拟合外径偏差为 $(-16 \sim +16)$ mm,最大拟合偏差率21.19%,占比约为0.51%。而78.85%的杆件外径偏差集中在 $(-6 \sim +6)$ mm,多数圆钢管拟合接近标准值。网架有11根杆件的弯曲挠度值超过规范限值 $L/1\ 000$,其中最大值为弯曲方向向下0.077 m,超过规范限值24.6倍。

(3)分别建立网架设计模型、考虑节点偏差的既有模型、同时考虑节点偏差和杆件弯曲的既有模型3种有限元模型开展数值模拟。模型2和模型3的极限承载力较模型1分别下降了14.95%和13.00%。表明既有网架结构节点偏差对结构静力承载力影响更大,而杆件弯曲变形对结构静力承载力影响远远小于节点位置偏差。

参考文献:

- [1] JARZĄBEK-RYCHARD M, MAAS H G. Modeling of 3D geometry uncertainty in scan-to-BIM automatic indoor reconstruction[J]. *Automation in Construction*, 2023, 154: 105002.
- [2] ZHANG H S, FAN J S, DUAN X J, et al. Point cloud segmentation and construction verification for large-span modular steel structures[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025, 226: 109288.
- [3] 高连平,宋培娟,王庄.基于三维激光特征二次匹配的室外景观建模方法[J]. *应用激光*, 2022, 42(3): 147-153.
GAO L P, SONG P J, WANG Z. Outdoor landscape modeling method based on three-dimensional laser feature secondary matching[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(3): 147-153.
- [4] 宋小英,徐征,于长龙.三维激光点云数据去噪方法研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2025, 48(5): 202-204, 211.
SONG X Y, XU Z, YU C L. Research on the denoising method of 3D laser point cloud data[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2025, 48(5): 202-204, 211.
- [5] XIE T T, CHEN H, LIU W Q, et al. 3D surface segmentation from point clouds via quadric fits based on DBSCAN clustering[J]. *Pattern Recognition*, 2024, 154: 110589.
- [6] 童宇超,姚绪辉,邹海涛,等.基于激光点云的网架球节点中心点坐标提取方法[J]. *建筑钢结构进展*, 2024, 26(9): 93-99.
TONG Y C, YAO X H, ZOU H T, et al. A method for extracting the center point coordinates of grid spherical joints based on laser point cloud[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2024, 26(9): 93-99.
- [7] JIN Y H, LEE W H. Fast cylinder shape matching using random sample consensus in large scale point cloud[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(5): 974.
- [8] YUE H Z, WANG Q, ZHAO H X, et al. Deep learning applications for point clouds in the construction industry[J]. *Automation in Construction*, 2024, 168: 105769.
- [9] 乐风江,陈崧,杨富儒,等.地震作用下网架结构失效模式的判定方法[J]. *工程抗震与加固改造*, 2024, 46(3): 64-71.
YUE F J, CHEN S, YANG F R, et al. Determination method of failure mode of grid structures under earthquake actions[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2024, 46(3): 64-71.
- [10] 刘乐.深圳科技馆(新馆)大跨度悬挑桁架和吊挂结构设计与抗连续性倒塌分析[J]. *建筑结构*, 2023, 53(增刊2): 290-294.
LIU L. Structural design and progressive collapse analysis of large span cantilevered truss and suspension structure in Shenzhen Science and Technology Museum (New Hall)[J]. *Building Structure*, 2023, 53(S2): 290-294.
- [11] 宋玉喜.三维激光扫描技术在室内三维实景模型重建中的应用[J]. *科技创新与应用*, 2025, 15(15): 165-168.
- [12] 秦元昊.基于杆件损伤的平面网架结构承载力评估与加固研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for space frame structures: JGJ 7—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [14] 邹亚坤,陈贤川,谭毅,等.基于BIM和三维激光扫描的桁架几何质量自动化检测研究[J]. *图学学报*, 2024, 45(4):

侯鑫焱等.基于BIM和点云重建的既有空间网架结构承载力自动化预测

Natural Science of Hainan University (ISSN 1004-1729)

<https://hndk.hainanu.edu.cn>

845–855.

ZOU Y K, CHEN X C, TAN Y, et al. Automated detection of truss geometric quality based on BIM and 3D laser scanning[J]. *Journal of Graphics*, 2024, 45(4): 845–855.

作者贡献声明

本声明旨在明确各作者对本论文的具体贡献, 确保学术成果署名的规范性和公平性, 各作者贡献如下: 侯鑫焱负责论文数据整理、初稿撰写。张天龙提供经费支持和论文构思, 负责修订稿件。汤爱平参与论文构思。胡安奎参与稿件的修改与讨论。

利益冲突声明

作者声明, 不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文未使用人工智能(AI)协助撰写。

伦理声明

本文不涉及人类或动物研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 <https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025090801>。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件中。如需获取与本文相关的其他数据, 可向通信作者提出申请。

致谢/Acknowledgements

本文得到海南省自然科学基金项目(520QN232)、天津大学-海南大学自主创新基金项目(RZ2100003553)和横向项目(HD-KYH-2024061)的支持。

This study was supported by the Hainan Provincial Natural Science Foundation (520QN232), the Tianjin University-Hainan University Independent Innovation Foundation Project(RZ2100003553), and the Hainan University Horizontal Project (HD-KYH-2024061).

作者简介

侯鑫焱(2000—), 女, 河北邯郸人, 海南大学土木水利专业 2023 级硕士研究生。E-mail: 23220859000061@hainanu.edu.cn。

汤爱平(1968—), 湖南醴陵人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 地震工程与防灾, 岩土工程灾害风险管理。Email: tangap@hit.edu.cn。

胡安奎(1988—), 男, 博士研究生, 副教授/硕导, 研究方向: 结构静动力分析、工程风险评价与管理等。E-mail: stefanhu2016@mail.xhu.edu.cn。

张天龙(1988—), 男, 山西太原人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 土木工程数字建造和防灾减灾。E-mail: ztl@hainanu.edu.cn。

(责任编辑: 张秀梅, 英文校对: 张海滨)



This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.