基于激光点云的钢管拱肋制造质量数字检测方法

李信强[1] 王茜茜[2*] 范慧[1] 余宏刚[1]

1. 安徽职业技术大学建筑工程学院；2. 桂林理工大学测绘地理信息学院

摘 要：三维激光扫描技术为大型钢结构高精度几何采集提供了有效手段，但应用于钢管拱肋制造检测仍面临低重叠率配准精度不足、温度变形干扰及特征提取效率低等挑战。本文对钢管拱肋构建了完整数字检测体系：提出基于有限元模拟与自然邻点插值的基准点云温度变形修正方法；提出融合曲率相似度与法向夹角约束的改进 TrICP 精配准算法，提升低重叠率场景匹配可靠性；提出法兰盘平面、螺栓孔中心及曲圆管中轴线的自动化提取方法；形成基于修正基准的制造偏差检测与虚拟预拼装流程。该体系显著提升检测精度与效率，可为钢管拱肋质量控制及桥梁智能化建造提供技术支撑。

关键词：数字化检测；钢管拱肋；点云数据处理；温度变形修正；特征提取

DOI：10.65976/3078-8145.2026.02.016

引言

钢管混凝土拱桥凭借刚度大、变形控制优、经济性好及适应山区运输等优势，已成为跨越复杂地形的理想桥型，其中钢管拱肋作为核心受力构件，其制造精度直接决定成桥线形与结构安全。然而，拱肋多采用“分段制造、现场拼装”工艺，预制及运输中易因焊接变形、运输扰动等产生局部误差，若控制不当将增加拼装难度并埋下隐患[1]。当前检测仍以全站仪、水准仪等离散抽测为主,难以完整获取曲面连续形态，效率低且主观性强，难以满足现代工程对高精度、高效率的检测需求。三维激光扫描技术可快速获取高密度点云，实现复杂构件全覆盖几何采集，为数字化检测提供了新途径，但应用于大尺度钢管拱肋时仍面临突出挑战：现场多测站扫描重叠率低、遮挡严重，影响整体配准可靠性；钢结构对温度敏感，基于标准温度的设计基准点云未考虑环境温差引发的热胀冷缩，易将温度变形误判为制造误差；法兰盘平面、螺栓孔中心及曲圆管中轴线等关键特征自动化提取效率与稳定性不足。上述问题制约了从实测点云到偏差分析与虚拟预拼装的全流程检测效能。

本文以钢管拱肋为对象，系统开展点云数据获取与处理、考虑温度效应的基准点云修正、关键几何特征提取、制造偏差检测及虚拟预拼装等研究。理论层面，着力完善低重叠率点云配准、温度变形补偿及特征自动化提取方法；应用层面，形成面向实际工程的数字化检测技术流程，提升精度与效率，降低人工依赖，为现场拼装质量控制提供技术依据，推动桥梁建造向智能化、精细化方向发展。

1 钢管拱肋制造质量数字检测技术体系

三维激光扫描技术的发展为上述问题提供了有效解决路径，能够快速获取被测构件表面的高密度点云数据，实现复杂几何形态的全覆盖采集[2]。然而，将扫描技术直接应用于钢管拱肋制造质量检测仍面临三方面核心挑战：其一，大尺度构件现场扫描需多测站布设，受场地限制测站间重叠率偏低，传统 ICP 类配准算法精度与稳定性不足；其二，钢结构对温度变化敏感，基于标准温度设计模型生成的基准点云未考虑实际环境温差引发的热胀冷缩变形，温度效应易被误判为制造误差；其三，法兰盘平面、螺栓孔中心、曲圆管中轴线等关键几何特征的提取仍依赖人工交互，效率与稳定性有待提升。

针对上述问题，本文以工程中广泛应用的钢管拱肋为研究对象，构建了覆盖点云数据获取与处理、基准点云生成与温度修正、关键特征自动化提取、制造偏差分析及虚拟预拼装全流程的数字检测方法体系。该体系以 RIEGL-VZ-1000 地面三维激光扫描仪为主要数据采集手段，通过多测站布设获取构件完整点云；利用 Revit 参数化建模生成设计基准点云，利用有限元模拟与自然邻点插值实现温度变形修正；在点云处理环节，采用三棱锥标靶粗配准与改进的 TrICP 精配

基金项目：安徽省教育厅 2025年度高校科研重大项目（自然科学类）耦合数字孪生与机理 -AI模型的智慧流域快速响应系统研究（2025AHGXZK20073）。

作者简介：李信强（1999—），男，硕士，助教，研究方向为激光点云数据处理。

通信作者：王茜茜（1999—），女，硕士研究生，研究方向为激光点云数据处理。

准相结合的策略解决低重叠率配准难题；在特征提取环节，引入自适应阈值 MSAC 算法 [3]、Alpha-shape 边界提取与 Taubin 圆拟合 [4]、微圆柱拟合的方法实现关键几何参数的自动化获取；最终通过修正基准点云与实测点云的配准比对，完成节段制造偏差量化分析与相邻节段虚拟预拼装评估，为现场拼装质量控制提供数据支撑。

2　基于点云数据的数字化检测关键技术方法

2.1　基于有限元模拟的基准点云温度变形修正

钢结构材料对温度变化具有较高敏感性，当构件实际所处环境温度与设计基准温度存在显著偏差时，热胀冷缩效应将引发不可忽略的几何变形。若直接以原始设计点云作为检测基准，温度变形分量将与制造误差相互叠加，导致检测结果失真 [5]。为此，本文提出一种基于有限元数值模拟的基准点云修正方法，将温度荷载作用下的理论位移场映射至设计点云，获得考虑温度效应的柔性检测基准。

具体实施流程如下：首先依据设计图纸在 Revit 平台构建钢管拱肋三维基准模型，通过随机点采样法将模型表面离散化为设计基准点云；其次，采用 ABAQUS 建立与构件实际尺寸一致的壳单元有限元模型，输入 Q345 钢材热工性能参数，模拟从基准温度 20℃整体升温至实测环境温度的均匀温度工况，求解获得模型各节点的三维位移场数据；随后，通过特征线匹配与 ICP 精配准将基准点云与有限元节点集统一至同一坐标系，判定点云中与有限元节点距离小于阈值的重合点直接赋予节点位移值；对于其余非重合点，采用自然邻点插值算法，基于 Delaunay 三角剖分构建位移分量的插值函数，计算各待插值点的位移修正量。利用这方法能有效补偿温度变形对检测基准的干扰，为后续偏差分析提供了更为准确的参照依据。

2.2　融合曲率与法向约束的低重叠率点云精配准

大尺度钢管拱肋扫描中，受场地条件限制，测站间点云重叠率通常偏低，传统 ICP 类算法在有效重叠区域不足、可辨识几何特征匮乏的情况下易陷入局部最优，配准精度与收敛稳定性难以保证 [6]。TrICP 算法通过最小截断二乘准则动态剔除误差较大的匹配点对，在低重叠率场景下表现出相对更好的适应性，但其判别依据仍局限于欧氏距离，对因局部几何退化或结构重复引起的小误差错误对应缺乏足够的辨识能力。

针对上述问题，本文提出一种融合曲率相似度筛选与法向夹角加权的改进 TrICP 精配准算法。首先采用稳健估计方法获取点云的法向量与曲率特征，构建包含主曲率、高斯曲率及平均曲率的多维特征向量；在迭代建立点对对应关系后，引入皮尔逊相关系数量化源点与目标点曲率特征的一致性，仅保留相关系数满足阈值要求的候选点对；继而计算保留点对的法向夹角，依据夹角大小赋予连续权重系数，夹角越小赋予的权重越大，从而增强几何一致性较高的点对在空间变换求解中的贡献度。变换参数求解采用加权奇异值分解方法，在最小二乘框架下完成迭代优化。所提算法在低重叠率、含噪声等复杂工况下均表现出良好的配准性能，配准误差较传统 ICP 类方法显著降低，迭代收敛速度明显加快。在钢管拱肋实测点云精配准应用中，配准精度满足钢结构工程施工质量验收规范的相关要求，为大尺度钢构件的多站点点云精确拼接提供了可靠的技术手段。

2.3　拱肋关键几何特征的自动化提取

2.3.1　法兰盘平面特征提取

法兰盘是钢管拱肋节段间的关键连接部件，其平面姿态与螺栓孔空间位置直接决定相邻节段的对接精度。在点云数据采集过程中，受激光入射角较大等因素影响，法兰盘边缘易产生厚度方向的噪点，此类噪点难以通过常规统计滤波手段有效去除，对平面拟合的准确性构成明显干扰。为此，本文采用 MSAC 算法进行抗噪平面拟合，并引入基于内点标准差的自适应阈值更新策略：每轮迭代后计算当前最优内点集到拟合平面的距离标准差，以调节系数倍率动态更新距离阈值，使判别阈值能够随点云局部噪声水平自适应调整。获得的平面参数与专业点云处理软件提取结果高度一致，法向量夹角偏差极小，平面拟合精度能够满足工程检测需求。

2.3.2　螺栓孔特征提取

螺栓孔中心点的精确提取是虚拟预拼装中建立相邻节段约束关系的关键前置环节。由于螺栓孔分布于法兰盘表面，其空间位置受法兰盘整体姿态的直接制约，提取工作须以法兰盘平面拟合结果为基准。将法兰盘点云沿平面法向量方向垂直投影至最佳拟合平面，实现三维数据向二维平面的降维处理。投影操作简化了后续几何计算，使螺栓孔轮廓在二维平面上呈现为清晰的圆弧状点集。采用 Alpha-shape 算法提取螺栓孔边界二维点云。尺度参数 α 的选取对边界提取的精细程度具有决定性影响，需结合螺栓孔实际几何尺度与点云密度分布特征合理确定，以兼顾边界连续性与细节保持。在获取边界点云后，引入 Taubin 圆拟合方法求解圆心坐标与半径。该方法通过梯度约束将拟合问题转化为广义特征值求解，可在非迭代框架下获得稳定且高精度的圆参数解，尤其适用于螺栓孔这类局

部小圆弧点云的拟合任务。完成二维圆拟合后，将圆心坐标沿法向逆投影回三维空间，获得螺栓孔中心点的实际位置。提取结果与高精度量具实测值及理论设计尺寸均具有良好的一致性，验证了算法的精度与稳定性。

2.3.3 拱肋曲圆管中轴线提取

本文基于“以直代曲”思想的微圆柱拟合策略提取拱肋曲圆管中轴线：首先将空间点云经坐标变换调平至与坐标平面平行，采用多项式拟合获得平面投影曲线；按设定步长将拱肋切分为若干微圆柱段，逐段投影至横截面平面进行圆拟合求取圆心；最后通过逆变换将各圆心恢复至原始三维空间，生成连续中轴线，提取的中轴线能够有效反映结构的实际空间线形，可以用于精确检测空间曲线圆管的线形。

3 工程的实际应用

3.1 节段制造偏差量化分析方法

在开展基于修正基准点云的制造偏差检测时，首先以拱肋中轴线作为空间参照特征，实现基准点云与实测点云的初始对齐，进而采用改进的精配准算法将两者统一至同一坐标系下。通过逐点计算欧氏距离生成全域偏差色谱图，可直观呈现构件各部位的几何误差分布特征。在此基础上，对外直径、中心距及旁弯等关键尺寸指标进行系统统计。将曲圆管沿轴线方向划分为若干微圆柱段，逐段拟合外径尺寸并与基准值对比分析。当外直径偏差、中心距偏差及旁弯偏差均控制在《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》所规定的允许偏差范围内，则能反映出该节段整体制造精度良好。

3.2 相邻节段虚拟预拼装偏差预测方法

实体预拼装虽能直接检验节段匹配状态，但存在胎架成本高昂、场地占用大、施工周期长等现实局限。依托已获取的各节段实测点云数据及法兰盘螺栓孔中心坐标，可在数字空间中完成相邻节段的虚拟预拼装，从而实现对现场拼装精度的有效预判。具体实施过程中，以法兰盘螺栓孔中心作为拼装控制基准建立对应点集，采用高精度匹配算法确定节段间的相对空间位置关系，并从轴线端点偏移量、法兰盘平面法向夹角及螺栓孔中心点空间偏差等维度综合评估对接精度。若各项偏差指标均控制在相关规范允许范围内，则反映出节段制造精度良好，能够保证现场拼装时高强螺栓的顺利穿入与法兰盘的紧密贴合。当虚拟预拼装结果与实体拼装实测错边情况高度吻合，能表明该方法在预测拱肋对接精度方面的可行性与工程适用性，为大型钢结构桥梁的数字化安装控制提供了可靠的技术路径。

4 结语

本文针对钢管拱肋制造质量检测需求，构建了涵盖点云采集处理、温度变形修正、特征自动化提取及虚拟预拼装的全流程数字化检测方法。通过有限元模拟与自然邻点插值修正温度效应引起的基准偏差，改进 TrICP 算法提升低重叠率点云配准精度，采用自适应 MSAC、Alpha-shape 及微圆柱拟合实现关键几何特征稳定提取。工程应用表明，该方法可准确评估节段制造质量并预判拼装精度，检测效率与可靠性显著优于传统手段。后续研究可向多源数据融合、深度学习特征识别、多物理场耦合基准修正及全生命周期数字孪生管控方向拓展，以推动桥梁建造智能化发展。

参考文献：

[1] 郑皆连 . 我国大跨度钢管混凝土拱桥的发展与应用 [J]. 土木工程学报 ,2020,53(5):1-9.

[2] 齐亚辉 , 蔺鹏臻 . 点云技术在土木工程中的应用现状综述 [J]. 工程力学 ,2025,42(3):1-23.

[3] 杨少舟 , 龙东平 , 陈继尧 , 等 . 基于 M 估计算法的三维点云平面拟合方法研究 [J]. 电子测量技术 ,2024,47(05):70-76.

[4] 周米玉 , 孙海丽 , 杜黎明 , 等 . 移动激光扫描技术的盾构隧道收敛直径提取方法 [J]. 测绘科学 ,2021,46(05):112-117+125.

[5] 游颖 , 张泽涛 , 王君 , 等 . 考虑温度影响的空间钢结构应力及变形变化规律 [J]. 空间结构 ,2020,26(04):58-63.

[6] 张元 , 李晓燕 , 韩燮 . 一种低重叠率的三维点云配准方法 [J]. 激光与光电子学进展 ,2021,58(08):170-179.