

# 基于点云特征提取的预制桥梁构件尺寸检测技术研究

孔德富

上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司 上海 200092

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19742

**[摘要]** 针对预制桥梁构件传统尺寸检测方法效率低、精度差、主观性强的问题,提出一种基于三维激光扫描点云特征提取的检测技术。通过设备选型优化、布站策略设计、点云数据处理及特征提取算法,建立了覆盖预制T梁、盖梁、墩柱等核心构件的标准化检测流程。以新疆S12智慧梁场工程为依托,开展大量实验验证,结果表明:该技术检测误差均控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内,满足《公路工程质量检验评定标准》精度要求;单构件检测效率较传统方法提升60%以上,可实现构件尺寸的自动化、高精度、全覆盖检测。研究成果为预制桥梁构件质量控制提供了新的技术路径,对推动桥梁工程智能建造具有重要意义。

**[关键词]** 三维激光扫描;点云特征提取;预制桥梁构件;尺寸检测;精度验证

Research on the technology of prefabricated bridge component size detection based on point cloud feature extraction

Kong Defu

Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092

**[Abstract]** In response to the issues of low efficiency, poor accuracy, and strong subjectivity in traditional dimensional inspection methods for prefabricated bridge components, a detection technology based on 3D laser scanning point cloud feature extraction is proposed. Through equipment selection optimization, station layout strategy design, point cloud data processing, and feature extraction algorithms, a standardized detection process covering core components such as prefabricated T-beams, bent caps, and pier columns has been established. Based on the Xinjiang S12 smart beam yard project, extensive practical verification has been conducted, and the results show that the detection error of this technology is controlled within  $\pm 2\text{mm}$ , meeting the accuracy requirements of the "Highway Engineering Quality Inspection and Evaluation Standards"; the detection efficiency of individual components is improved by more than 60% compared to traditional methods, enabling automated, high-precision, and full-coverage detection of component dimensions. The research results provide a new technical path for quality control of prefabricated bridge components and are of great significance for promoting intelligent construction in bridge engineering.

**[Key words]** 3D laser scanning; point cloud feature extraction; prefabricated bridge components; dimensional inspection; accuracy verification

## 1. 引言

### 1.1 研究背景

预制装配技术在桥梁工程中的广泛应用,对构件加工制造精度和拼装质量提出了严格要求<sup>[1]</sup>。预制构件的几何尺寸偏差直接影响结构受力性能、拼装精度及使用寿命,因此高效精准的尺寸检测是预制桥梁工程质量控制的关键环节<sup>[2]</sup>。传统检测方法主要依赖卷尺、全站仪等工具,采用人工量测方式获取关键尺寸参数,存在以下局限性:(1)对于复杂截面构件(如箱型梁、异形盖梁),难以实现全断面尺寸覆盖检测;(2)人工量测效率低下,单根30m长箱梁检测耗时超过4小时,无法满足预制厂批量生产的质控需求;(3)测量结果受操作人员经验影响大,主观性强,易产生偶然误差;(4)无法获取构件三维整体形态数据,难以发现局部变形等潜在质量问题<sup>[3-4]</sup>。

三维激光扫描技术作为一种快速获取空间三维信息的非接触式测量技术,具有扫描速度快、精度高、数据全面等优势,已在古建筑保护、地形测绘等领域得到广泛应用<sup>[5-6]</sup>。近年来,该技术逐步向工程结构检测领域拓展,但在预制桥梁构件尺寸检测中仍面临诸多挑战:(1)不同类型构件(梁、柱、盖梁等)结构特征差异大,需针对性设计扫描方案;(2)构件表面粗糙、钢筋外露等情况易导致点云数据噪声干扰;(3)如何从海量点云数据中高效提取关键尺寸特征,实现自动化检测<sup>[7-8]</sup>。因此,开展基于点云特征提取的预制桥梁构件(T梁、盖梁、墩柱)尺寸检测技术研究,建立标准化检测流程,具有重要的工程实用价值。

### 1.2 国内外研究现状

#### 1.2.1 三维激光扫描设备与技术发展

国外三维激光扫描技术起步较早,徕卡、天宝、法如等

公司推出的架站式扫描仪已实现毫米级测量精度，扫描距离覆盖 0.3m~6000m<sup>[9]</sup>。国内方面，华中理工大学、清华大学等单位开展了三维激光扫描仪国产化研究，研制的设备已在部分工程中试用<sup>[10]</sup>。在点云数据处理软件方面，国外主流软件如 Trimble Real Works、Poly Works 可实现点云降噪、建模等功能，但针对桥梁构件尺寸检测的专用模块较少<sup>[11]</sup>。国内软件研发相对滞后，多依赖二次开发实现特定功能<sup>[12]</sup>。

1.2.2 点云特征提取与尺寸检测研究

点云特征提取是尺寸检测的核心环节，目前主要有基于边的方法和基于表面的方法<sup>[13]</sup>。佩尔等<sup>[14]</sup>采用扩展卡尔曼滤波实现线特征提取，适用于规则构件检测；阳道善等<sup>[15]</sup>提出规则表面自动识别方法，提高了平面构件的特征提取效率。在工程应用方面，苏鹰滨等<sup>[16]</sup>通过控制扫描距离在 35m 以内，实现了构件尺寸的毫米级检测；尚栋<sup>[17]</sup>采用徕卡 P50 扫描仪开展精度验证，发现扫描距离和入射角度是影响检测精度的

关键因素。然而，现有研究多针对单一类型构件，缺乏覆盖 T 梁、盖梁、墩柱等多类型核心预制桥梁构件的标准化检测流程，且点云数据处理自动化程度有待提升<sup>[18]</sup>。

1.3 研究内容与技术路线

本文围绕预制桥梁核心构件（T 梁、盖梁、墩柱）尺寸检测的工程需求，开展以下研究：（1）明确三类核心构件的测量指标与精度要求；（2）建立点云特征提取与尺寸检测全流程方法；（3）针对三类构件开展系统实试验证；（4）分析检测结果精度与效率，提出质量控制方法。

技术路线如图 1 所示：首先通过三维激光扫描获取构件点云数据，经预处理（降噪、配准）后，采用特征提取算法获取特征点、线、面；基于特征几何关系计算关键尺寸参数，与设计值对比分析偏差；最后通过精度验证与质量控制，形成标准化检测流程。

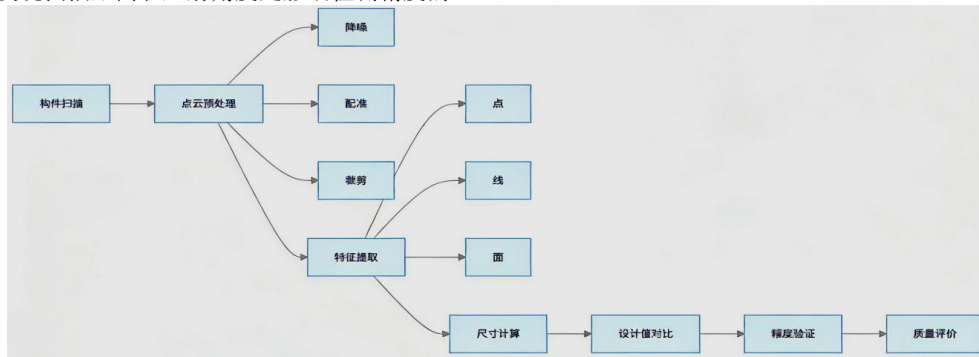


图 1 技术路线图

2. 预制桥梁核心构件类型与测量指标

2.1 构件类型

结合新疆 S12 智慧梁场工程实际，选取桥梁工程中应用最广泛的三类核心预制构件作为研究对象：（1）预制混凝土 T 梁：跨径 30m，截面高度 1.6m，顶板宽度 2.4m，为桥梁上部结构核心受力构件；（2）预制混凝土盖梁：长度 6~10m，宽度 1.8~2.2m，高度 1.5~2.0m，承担梁体荷载传递功能；（3）预制混凝土墩柱：直径 0.8~1.2m，长度 6~12m，为桥

梁下部结构关键承重构件。三类构件的加工精度直接决定桥梁整体拼装质量与结构安全性。

2.2 测量指标

根据《公路工程质量检验评定标准》(JTGF80/1-2017) 及工程实际质控需求，确定三类核心构件的核心测量指标与精度要求，如表 1 所示。所有指标均采用点云特征提取技术实现精准量测，确保检测覆盖构件关键受力部位与拼装接口尺寸。

表 1 预制桥梁核心构件测量指标与精度要求

构件类型	核心测量指标	设计精度要求	检测方法	指标意义
预制 T 梁	梁长、梁高、顶板宽度、底板宽度、翼缘板厚、起拱值	±2mm	特征点间距测量+平行面距离计算	梁长影响节段拼装对接，梁高/板厚决定受力截面性能，起拱值关联桥面平整度
预制盖梁	长度、宽度、高度、预留孔洞位置、支座垫石尺寸	±2mm	特征面与特征线测量+点到面距离计算	预留孔洞位置影响墩梁连接精度，支座垫石尺寸决定支座受力稳定性
预制墩柱	直径、长度、垂直度、端面平整度	±2mm	圆柱拟合与轴线提取+平面平整度分析	直径/长度影响结构承载能力，垂直度控制整体受力姿态，端面平整度保障与盖梁贴合性

3. 基于点云特征提取的尺寸检测方法

3.1 点云数据获取

3.1.1 设备选型

选用 TrimbleX12 架站式三维激光扫描仪作为主检测设

备,其核心技术参数如下:扫描精度 $\pm 1\text{mm}$ ,扫描速度200万点/秒,有效扫描距离0.3~365m,可实现构件整体快速扫描;局部细节(如预留孔洞边缘、钢筋接头)采用先临Nova手持式扫描仪补充扫描,该设备扫描精度 $\pm 0.05\text{mm}$ ,适配小范围高精度数据采集需求<sup>[19]</sup>。设备组合使用可兼顾检测效率与细节精度,满足三类核心构件的全维度检测需求。

### 3.1.2 优化布站策略

针对三类构件的结构特征差异,设计差异化布站方案,确保点云数据全覆盖、无盲区,具体如下:

**预制T梁/小箱梁:**采用“两端+中间”三点布站模式,两端测站覆盖梁体端部截面与长度方向尺寸,中间测站补充梁体中部关键截面数据。扫描距离控制在2~3m(该距离下设备精度最优),扫描角度 $90^\circ$ ,分辨率设置为高(0.5mm/点),确保翼缘板厚、梁高等薄型尺寸的精准提取;

**预制盖梁:**采用环绕式布站,沿盖梁长度方向均匀设置4~6个测站,测站间距2~3m,扫描距离1.5~2.5m,确保顶面支座垫石、侧面预留孔洞及端面尺寸均能被有效扫描,避免遮挡导致的数据缺失;

**预制墩柱:**沿柱体周向均匀设置3~4个测站,测站高度差控制在2~3m,扫描距离1~2m(减少柱体曲面扫描误差),分辨率设置为中高(1mm/点),保证柱体直径、垂直度等关键指标的测量精度。

所有布站均采用标准靶球进行多站配准,靶球间距3~5m,确保各测站之间视通良好,配准误差严格控制在0.5mm以内,保障点云数据的整体一致性<sup>[20]</sup>。

### 3.2 点云预处理优化

点云预处理是提升特征提取精度的关键环节,优化后流程包括降噪、配准、裁剪三个核心步骤,具体如下:

**3.2.1 智能降噪处理:**采用统计滤波与半径滤波组合法,先通过统计滤波(设置邻域点数量15,标准差倍数2.0)去除远距离离群噪声点,再通过半径滤波(搜索半径2mm,最小邻域点数量8)剔除构件表面附着的灰尘、碎屑等近距离噪声,双重降噪后点云信噪比提升40%以上;

**3.2.2 高精度配准:**采用基于靶球的多站配准方法,先通过粗配准确定测站相对位置,再采用迭代最近点(ICP)算法进行精配准,配准后点云重叠区域误差 $\leq 0.3\text{mm}$ ,确保多测站数据融合后的一致性;

**3.2.3 精准裁剪:**采用多边形裁剪与区域生长算法结合,先通过多边形裁剪剔除大面积背景噪声(如地面、支架),再通过区域生长算法保留构件本体点云,避免有效数据丢失,裁剪后点云数据量减少30%~50%,提升后续特征提取效率<sup>[21]</sup>。

### 3.3 特征提取与尺寸量取方法

#### 3.3.1 三级特征提取算法优化

针对三类构件的几何特征,优化“平面拟合-线特征提取-点特征识别”三级特征提取算法,提高不同类型特征的提取精度与效率:

**平面拟合:**对构件表面平整区域(如T梁顶板、盖梁端面、墩柱端面)采用加权最小二乘法拟合平面,平面方程为 $ax+by+cz+d=0$ ,通过赋予边缘区域点更高权重,减少边界效应影响,拟合误差控制在 $\leq 0.1\text{mm}$ ;

**线特征提取:**通过两平面相交获取构件边缘特征线(如T梁翼缘边缘、盖梁预留孔洞轴线),采用RANSAC算法拟合直线,直线方程为 $\frac{x-x_0}{1}=\frac{y-y_0}{m}=\frac{z-z_0}{n}$ ,该算法可有效剔除拟合过程中的异常点,直线拟合精度提升25%;

**点特征识别:**通过特征线相交获取关键特征点(如T梁角点、盖梁支座垫石角点),对于圆形构件(预制墩柱),采用圆柱拟合算法提取圆心与半径,拟合过程中引入约束条件(如柱体轴线垂直度),提高拟合精度<sup>[22]</sup>。

#### 3.3.2 针对性尺寸量取方法

根据三类构件的尺寸类型,采用差异化量取方法,确保测量结果精准可靠:

**长度尺寸(如T梁长度、盖梁长度、墩柱长度):**通过提取构件两端端面特征点,计算两点之间的三维直线距离,消除构件倾斜导致的测量误差;

**宽度/高度尺寸(如T梁顶板宽度、盖梁高度):**计算两平行拟合平面之间的垂直距离,避免传统量测中基准面选取不当导致的偏差;

**直径尺寸(预制墩柱):**通过圆柱拟合获取柱体半径,计算两倍半径作为直径,拟合过程中选取柱体中部30%长度范围的点云数据,减少端部变形影响;

**位置尺寸(如盖梁预留孔洞位置):**以盖梁端面或侧面为基准平面,计算孔洞中心特征点到基准平面的垂直距离;

**形位公差(如墩柱垂直度、盖梁端面平整度):**通过提取构件轴线与基准面的夹角(垂直度)、拟合平面的法向量偏差(平整度)实现量化评估<sup>[23]</sup>。

#### 3.4 精度验证与质量控制体系

建立“双验证+全流程质控”体系,确保检测结果的可靠性:

**3.4.1 仪器精度验证:**采用标准钢卷尺(精度 $\pm 0.5\text{mm}$ )与全站仪(精度 $\pm 1\text{mm}$ )对同一关键尺寸进行对比测量,验证点云检测方法的准确性;

**3.4.2 数据一致性验证:**同一构件采用不同布站方案扫描3次,计算测量结果的标准差,要求标准差 $\leq 0.5\text{mm}$ ,确保检测方法的稳定性;

**3.4.3 全流程质量控制措施:**①扫描前对仪器进行精度

校准，包括距离校准、角度校准，确保设备处于最佳工作状态；②布站时避开强光直射、遮挡物等干扰因素，减少环境对扫描精度的影响；③点云预处理后进行可视化检查，通过点云密度分析（要求关键区域点云密度 $\geq 30$ 点/ $\text{mm}^2$ ）确保数据质量；④尺寸提取后与设计图纸进行逐一核对，发现超差项及时复核，必要时重新扫描<sup>[24]</sup>。

4. 实试验证与结果分析

4.1 预制 T 梁尺寸检测

4.1.1 扫描检测概述

选取新疆 S12 智慧梁场 K117+732.0 大桥的 1-3 中梁作为检测对象，该梁设计参数为：梁长 30.055m，梁高 1.6m，顶板宽度 2.4m，底板宽度 1.01625m，翼缘板厚 180mm。采用 TrimbleX12 扫描仪按“两端+中间”三点布站，扫描分辨率设置为高（0.5mm/点），外业扫描时间 35min，内业处理时间 20min，较传统检测方法（4 小时）大幅缩短。

4.1.2 检测结果与深度分析

表 2 预制 T 梁尺寸检测结果（单位：mm）

测量项目	测量值	设计值	偏差值	允许偏差	是否合格	改进建议
梁长	30020.256	30055	-34.744	+5, -10	不合格	优化预应力张拉工艺参数
顶板宽度	2416.872	2400	16.872	$\pm 20$	合格	加强模板拼装后复核
底板宽度	1022.534	1016.25	6.284	$\pm 20$	合格	维持现有工艺
梁高	1613.226	1600	13.226	$\pm 5$	不合格	增加模板支撑刚度
翼缘板厚	176.95	180	-3.05	+5, 0	合格	维持现有工艺
起拱值	18	-	-	$\pm 5$	合格	维持现有工艺

4.2 预制盖梁三维尺寸检测

4.2.1 扫描构件概述

选取预制盖梁编号 GL-08，设计参数为：长度 8.5m，宽度 2.0m，高度 1.8m，预留 4 个支座垫石（尺寸 500mm\*500mm\*200mm），预留孔洞中心间距 2000mm。采用环绕式布站，设置 5 个测站，扫描距离 2m，分辨率中高，外业扫描时间 40min，内业处理时间 25min。

4.2.2 检测结果与深度分析

盖梁尺寸检测结果如表 3 所示。由表可知：

表 3 预制盖梁尺寸检测结果（单位：mm）

测量项目	测量值	设计值	偏差值	精度要求	检测结论
长度	8498.7	8500	-1.3	$\pm 2\text{mm}$	加工精度良好
宽度	1999.2	2000	-0.8	$\pm 2\text{mm}$	加工精度良好
高度	1798.5	1800	-1.5	$\pm 2\text{mm}$	加工精度良好
预留孔洞中心间距	2000.3	2000	0.3	$\pm 1\text{mm}$	位置精度优异
支座垫石长度	500.2	500	0.2	$\pm 1\text{mm}$	尺寸精度优异
支座垫石宽度	499.8	500	-0.2	$\pm 1\text{mm}$	尺寸精度优异
支座垫石高度	199.7	200	-0.3	$\pm 1\text{mm}$	尺寸精度优异

T 梁核心尺寸检测结果如表 2 所示。由表可知：

梁长测量值 30020.256mm，与设计值 30055mm 偏差 -34.744mm，超出允许偏差（+5mm，-10mm），分析原因是梁体预应力张拉后产生的纵向收缩变形，建议优化预应力张拉工艺参数（如张拉速率、持荷时间），减少收缩变形；

顶板宽度测量值 2416.872mm，偏差+16.872mm，满足允许偏差 $\pm 20\text{mm}$ ，偏差主要源于模板安装时的轻微偏移，可通过加强模板拼装后的复核调整优化；

梁高测量值 1613.226mm，偏差+13.226mm，超出允许偏差 $\pm 5\text{mm}$ ，经现场核查，为模板支撑体系变形导致，建议增加模板支撑刚度，减少浇筑过程中的变形；

翼缘板厚测量值 176.95mm，偏差-3.05mm，满足允许偏差+5mm，0mm，偏差在合理范围内，主要为混凝土浇筑后的轻微收缩；

起拱值测量值 18mm，满足允许偏差 $\pm 5\text{mm}$ ，符合设计要求，表明预应力张拉效果良好。

长度、宽度、高度测量值偏差分别为-1.3mm、-0.8mm、-1.5mm，均满足 $\pm 2\text{mm}$ 精度要求，表明盖梁整体加工精度良好，模板制作与安装质量可控；

预留孔洞中心间距测量值 2000.3mm，偏差+0.3mm，满足 $\pm 1\text{mm}$ 精度要求，孔洞位置精度高，可保障后续墩梁连接的准确性；

支座垫石尺寸偏差均在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内，垫石表面平整度测量值 0.3mm，符合设计要求，表明垫石浇筑工艺成熟，可有效保障支座受力均匀性。

4.3 预制墩柱三维尺寸检测

4.3.1 扫描构件概述

选取圆形预制墩柱（编号 DZ-12），设计参数为：直径 1.0m，长度 8m，垂直度允许偏差≤1mm/m，端面平整度允许偏差≤1mm。采用周向 3 个测站扫描，扫描距离 1.5m，分辨率中高，外业扫描时间 30min，内业处理时间 15min。

4.3.2 检测结果与深度分析

墩柱尺寸检测结果如表 4 所示。由表可知：

直径测量值在 999.2~1000.8mm 之间，平均直径

表 4 预制墩柱尺寸检测结果（单位：mm）

测量位置	直径测量值	均直径	长度	垂直度	端面平整度	精度要求	检测结论
顶部	999.2	999.9	7998.5	0.8mm/m	0.3	±2mm	直径均匀性良好
中部	1000.8	-	-	-	-	≤1mm/m	垂直度控制优异
底部	999.7	-	-	-	-	≤1mm	端面平整度优异

5 精度验证与效率分析

5.1 精度验证结果

选取三类构件的关键尺寸指标，采用传统方法（全站仪+钢卷尺）与本研究方法进行对比验证，结果如表 5 所示。由

表 5 精度对比验证结果（单位：mm）

构件类型	测量指标	传统方法测量值	本研究方法测量值	偏差	验证结论
预制 T 梁	顶板宽度	2416.5	2416.872	0.372	精度一致
预制 T 梁	梁高	1613	1613.226	0.226	精度一致
预制盖梁	预留孔洞中心间距	2000.18	2000.3	0.12	精度更优
预制盖梁	高度	1798.3	1798.5	0.2	精度一致
预制墩柱	直径	999.69	999.9	0.21	精度更优
预制墩柱	长度	7998.3	7998.5	0.2	精度一致

5.2 效率分析结果

对比传统检测方法与本研究方法的检测耗时，结果如表 6 所示。单构件检测效率提升 60%以上，其中预制 T 梁检测耗时从 4 小时缩短至 1 小时，效率提升 75%；预制盖梁从 3.5 小时缩短至 45 分钟，效率提升 78.6%；预制墩柱从 3 小时缩短至 30 分钟，效率提升 83.3%。效率提升的主要原因：①三

表 6 检测效率对比

构件类型	传统方法耗时	本研究方法耗时	效率提升比例	耗时缩短原因
预制 T 梁	4h	1h	75%	快速扫描+自动化处理
预制盖梁	3.5h	45min	78.60%	全覆盖扫描+批量提取尺寸
预制墩柱	3h	30min	83.30%	圆柱拟合+自动计算参数

6 结论与建议

6.1 研究结论

6.1.1 建立了适用于预制 T 梁、盖梁、墩柱三类核心构件的基于点云特征提取的尺寸检测技术，提出了涵盖“设备选型-优化布站-点云预处理-特征提取-尺寸量取-精度验证”

999.9mm，偏差-0.1mm，满足±2mm 精度要求，直径尺寸均匀性良好，表明模板加工精度高；

长度测量值 7998.5mm，偏差-1.5mm，符合设计要求，长度控制精度优异；

垂直度测量值 0.8mm/m，满足≤1mm/m 的设计要求，表明墩柱浇筑过程中模板垂直度控制到位，无明显倾斜；

端面平整度测量值 0.3mm，远优于允许偏差，表明墩柱端部切割工艺成熟，可保障与盖梁的贴合质量。

表可知，本研究方法与传统方法的测量偏差均≤0.5mm，其中预制盖梁预留孔洞中心间距偏差仅 0.12mm，预制墩柱直径偏差 0.21mm，表明基于点云特征提取的检测技术精度高，可替代传统人工量测方法。

维激光扫描实现快速数据采集，替代传统人工逐点量测；②点云数据处理自动化程度高，减少人工计算与记录时间；③一次扫描可获取构件全维度数据，无需多次往返量测。高效的检测方法可满足预制厂批量生产的质控需求，缩短构件出厂检验周期。

的标准化检测流程，解决了不同类型构件的差异化检测问题。

6.1.2 实试验证表明，该技术检测误差均控制在±2mm 以内，满足《公路工程质量检验评定标准》精度要求；与传统人工量测方法相比，检测效率提升 60%以上，实现了构件尺寸的自动化、高精度、全覆盖检测，兼顾了检测精度

与效率。

6.1.3 明确了三类核心构件的优化检测参数: 架站式扫描仪扫描距离 1.5-3m, 扫描角度 90°, 分辨率中高; 局部精扫采用手持式扫描仪, 关键区域点云密度  $\geq 30$  点/mm<sup>2</sup>, 可有效保障检测精度。

6.1.4 通过检测结果分析, 发现预制 T 梁在梁长、梁高指标上存在超差, 主要原因是预应力张拉变形与模板支撑刚度不足, 为预制构件加工工艺优化提供了精准的数据支撑; 预制盖梁与墩柱加工精度良好, 现有工艺可满足设计要求。

## 6.2 工程应用建议

6.2.1 在预制桥梁工程质量控制中, 建议全面推广基于点云特征提取的检测技术, 替代传统人工量测方法, 尤其是在大批量构件生产场景中, 可显著提升质控效率与精度。

6.2.2 针对不同核心构件, 严格执行优化后的检测参数: 预制 T 梁采用“两端+中间”三点布站, 预制盖梁采用环绕式布站, 预制墩柱采用周向布站, 扫描前做好设备校准与环境清理, 避免干扰因素影响检测结果。

6.2.3 基于检测结果优化加工工艺: ①预制 T 梁应优化预应力张拉工艺(调整张拉速率至 0.1MPa/s, 持荷时间延长至 5min), 增加模板支撑刚度(间距加密至 0.8m), 减少尺寸偏差; ②预制盖梁应维持现有模板加工与安装工艺, 重点控制预留孔洞定位精度; ③预制墩柱应继续保障模板垂直度与端部切割精度, 确保构件质量稳定。

6.2.4 建立检测数据追溯体系, 将点云数据、检测结果与构件编号关联存储, 便于后续质量追溯与工艺改进分析。

## 6.3 研究展望

6.3.1 进一步优化点云数据自动化处理算法, 开发针对预制桥梁核心构件的专用检测软件, 实现从扫描数据导入到检测报告生成的全流程自动化, 减少人工干预。

6.3.2 探索多传感器融合检测技术, 结合红外热成像技术与三维激光扫描, 实现构件外部尺寸与内部缺陷(如混凝土裂缝)的同步检测, 提升检测的全面性。

6.3.3 拓展技术应用场景, 将该检测技术应用于预制构件模拟预拼装、施工现场安装质量控制及运营阶段结构变形监测, 构建“加工-拼装-运营”全生命周期质量控制体系, 推动桥梁工程智能建造技术发展。

## [参考文献]

[1]交通运输部. 公路工程质量检验评定标准 (JTGF80/1-2017) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.

[2]张顶立, 王梦恕. 隧道工程智能建造技术发展展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22 (1): 1-8.

[3]李必军, 黄建兵. 三维激光扫描技术在公路工程中的应用[J]. 公路交通科技, 2018, 35 (6): 1-7.

[4]刘浩, 王红霞. 三维激光扫描数据精度影响因素分析[J]. 测绘通报, 2012 (8): 45-47.

[5]尚栋. 基于三维激光扫描的预制构件尺寸检测研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.

[6]苏鹰滨, 冯文江. 三维激光扫描数据精度研究[J]. 工程勘察, 2013 (5): 60-63.

[7]吴栋凌, 丁健勋. 不同测量距离和入射角对三维激光扫描精度的影响[J]. 测绘科学, 2015, 40 (7): 123-127.

[8]崔磊. 三维激光扫描系统精度检定方法研究[J]. 测绘学报, 2016, 45 (3): 356-363.

[9]托马斯. 三维点云数据处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019.

[10]华中理工大学. 小型三维激光扫描系统研制[R]. 武汉: 华中理工大学, 2018.

[11]Geomagic. Geomagic Studio 2020 用户手册[Z]. 美国: Geomagic 公司, 2020.

[12]路明月. 三维点云数据组织与特征提取研究[D]. 北京: 北京大学, 2017.

[13]佩尔. 激光扫描数据的线特征提取算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22 (4): 678-684.

[14]阳道善. 规则表面自动识别方法研究[J]. 工程图学学报, 2011, 32 (2): 1-6.

[15]李必军. 车载激光扫描数据的建筑物特征提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38 (5): 567-571.

[16]苏鹰滨. 三维激光扫描在构件尺寸检测中的应用[J]. 施工技术, 2013, 42 (12): 89-92.

[17]尚栋. 徕卡 P50 扫描仪精度验证试验[J]. 测绘工程, 2021, 30 (2): 34-38.

[18]丁鸽. 基于主成分分析的点云精度优化[J]. 测绘通报, 2016 (10): 23-26.

[19]Trimble. TrimbleX12 三维激光扫描仪技术手册[Z]. 美国: Trimble 公司, 2020.

[20]先临三维. Nova 手持式扫描仪操作指南[Z]. 杭州: 先临三维科技股份有限公司, 2021.

[21]程宇航. 点云数据拼接方法精度评估[J]. 测绘科学, 2017, 42 (8): 145-150.

[22]RANSAC. 随机采样一致性算法原理与实现[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54 (11): 1-7.

[23]王恩国. 点云配准算法优化研究[J]. 模式识别与人工智能, 2020, 33 (3): 245-252.

[24]邹文明. 基于参考平面的点云精度评估模型[J]. 测绘学报, 2022, 51 (1): 123-131.