

DOI: 10.11918/202406059

节段预制桥梁施工线形近景摄影测量检测方法

高庭辉, 张城华, 赵章焰, 贺 宾, 尉宇晖

(武汉理工大学 交通与物流工程学院, 武汉 430063)

摘要: 为解决节段预制桥梁施工过程中拼装线形检测依赖人工和效率低下的问题, 文中提出了一种基于近景摄影测量的桥梁施工过程中拼装线形检测方法。该方法结合近景摄影测量原理, 运用前方交会严密解法和光束法平差算法, 提升桥梁施工中线形检测的精度和效率。根据实际工程场景, 采用仿真软件及搭设室内实验场进行仿真试验和室内真实实验, 探究该方法的可行性以及拍摄距离、节段梁片数量对测量精度的影响。实验结果表明: 该方法能够实时计算捕获的图像数据并获取桥梁的线形数据, 通过光束法平差方法, 能显著将待测点的测量精度提高至 2 mm 以内, 并基于此精度测得的桥梁线形精度表现在 1 mm 以内, 验证了该技术的有效性。同时, 在不同的拍摄距离下, 该方法仍然能够通过足够的像素数据精确识别标志点, 并保持测量精度的一致性, 确保了桥梁线形检测结果的可靠性和稳定性。研究表明, 该方法不仅提高了桥梁施工的可靠性, 还大幅提升了桥梁线形检测的效率, 为桥梁建设项目的顺利进行提供了有力支持。

关键词: 近景摄影测量; 桥梁线形; 光束法平差; 线形检测; 桥梁工程

中图分类号: TB22

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)06-0026-09

Alignment detection of segmental precast bridges via close-range photogrammetry

GAO Tinghui, ZHANG Chenghua, ZHAO Zhangyan, HE Bin, YU Yuhui

(School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: To address the reliance on manual inspection and the low efficiency of alignment detection during the segmental precast bridge construction process, a method for detecting assembly alignment is proposed based on close-range photogrammetry. The principles of close-range photogrammetry are integrated and the rigorous forward intersection and bundle adjustment algorithms are employed to enhance the accuracy and efficiency of alignment detection in bridge construction. According to actual engineering scenarios, simulation software and an indoor experimental setup were used to conduct both simulated and real indoor experiments, exploring the feasibility of the proposed method and the influence of shooting distance and the number of segmental beams on measurement accuracy. Experimental results show that the method can process captured image data in real time to obtain the bridge's alignment data. Using bundle adjustment, the measurement accuracy of target points can be significantly improved to within 2 mm, and the resulting bridge alignment accuracy reaches within 1 mm, which verifies the effectiveness of the technique. Additionally, under various shooting distances, the method can still accurately identify marker points through sufficient pixel data while maintaining consistent measurement accuracy, ensuring the reliability and stability of the alignment detection results. The study demonstrates that this method not only improves the reliability of bridge construction but also significantly enhances the efficiency of alignment detection, providing strong support for the successful implementation of bridge construction projects.

Keywords: close-range photogrammetry; bridge alignment; bundle adjustment; alignment detection; bridge engineering

得益于基础设施建设的迅猛发展, 中国已经拥有众多大跨度公路和铁路桥梁^[1]。常用的桥梁施工方法有节段预制悬臂施工法、支架现浇法、预制安装法、横移施工法等。节段预制悬臂施工方法

具有突出的优势, 是主流的大跨径桥梁施工方法。施工中, 技术人员将梁体沿纵向划分为若干节段, 在预制场完成预制, 然后运至施工处拼接。该技术对节段拼装时的线形控制、安装定位和连接技术等

收稿日期: 2024-06-24; 录用日期: 2024-09-02; 网络首发日期: 2025-06-19

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250619.1013.002>

作者简介: 高庭辉(1999-), 男, 硕士研究生; 赵章焰(1963-), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 赵章焰, 13871001982@163.com

较高要求^[2-3],因此施工中的桥梁拼装线形检测对桥梁安全评价至关重要。

传统的桥梁线形测量方法有:挠度计法、全站仪法、水准仪法、三维激光法、地面雷达等。其中挠度计法存在准备工作时间长、布设繁杂、精度依赖人工且无法适用于桥下有水或跨越峡谷等高桥。全站仪法、水准仪法操作简单、布设方便、精度可靠,但耗时耗力,且受各种环境因素影响大,不能对所有安装节段进行全面测控。三维激光法,测量信息丰富,但是扫描周期长、处理点云的方式复杂。地面雷达测量利用合成孔径雷达,测量反射微波的信号相位差,得到桥梁线形的形变。该方法测量精度高,但设备昂贵,且测量距离有限^[4-8]。鉴于目前大量的桥梁建设工程,高效便捷的桥梁线形测量方法亟需研究。

随着图像传感器的发展,基于视觉的测量方法不断涌现,为桥梁工程提供新的解决方案。其中摄影测量技术利用相机获取的图像数据,进行特征点的像素坐标提取及匹配,基于成像、视差原理解算还原特征点的三维坐标值,获得位置信息。广泛应用于地理测绘、工业制造、三维建模、虚拟现实、工程测量等^[9-10]。大量学者致力于将摄影测量技术与桥梁工程结合,以提高桥梁工程的效率、安全性。李萍等^[11]通过摄影测量技术和曲率模态法,提高了桥梁损伤检测的精度和效率,对于桥梁工程的安全性评估和维护具有实际应用价值。Košćak等^[12]利用立体摄影测量对钢筋混凝土的抗剪承载能力及临界剪切裂纹运动学进行研究,通过对剪切传递机制的深入理解,可以更准确地预测这类构件的剪切行为,从而提高结构设计的可靠性。姜欣等^[13]将摄影测量和图像处理结合,针对桥梁边缘轮廓线的结构变形进行测量,验证了方法的可行性和有效性,为桥梁和其他大型结构的变形监测提供了一种新的技术手段。Keizer等^[14]结合摄影测量技术,用于桥梁结构检查中的垂直净空和梁几何形状的测量。研究表明,采用摄影测量技术的测量方法具有更高的经济效益。

综上所述,摄影测量具有高精度、低成本、非接触等特点,可解决桥梁施工过程中的线形通测问题。基于节段预制桥梁施工的特点,本文提出了一种基于摄影测量的桥梁施工拼接线形检测方法,利用双

目摄影测量系统拍摄桥段标志点,结合光束法平差得到精确数学模型以减小数据解算误差,获取桥梁的线形数据,并研制了相应的测量设备及室内实验装置。结果表明,该方法能够实现对多节段桥梁线形的快速、高精度测量。

1 桥梁线形摄影测量方法

1.1 摄影测量原理

摄影测量利用摄影图像获取物体特征和三维信息。其过程涉及多种坐标系统和描述像片位置与朝向的参数,这些参数称为内方位元素和外方位元素,是摄影测量计算的关键参数。

像片内方位元素为恢复光束形状的参数,是确定摄影中心 S 与像片相对位置的关键要素,如图 1 所示,像点位于图像坐标系的位置 (x_0, y_0) 即为像片的内方位元素。像片外方位元素表征光束在物方坐标系中的位置与朝向的参数,外方位元素由 3 个直线元素 (X_s, Y_s, Z_s) 和 3 个角元素 $(\varphi, \omega, \kappa)$ 组成。

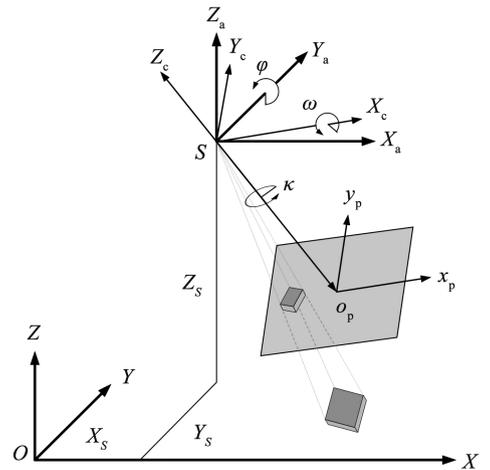


图 1 摄影测量坐标系及内、外方位元素

Fig. 1 Photogrammetric coordinate system and interior/exterior orientation elements

图中: $S - X_c Y_c Z_c$ 为像空间坐标系、 $S - X_a Y_a Z_a$ 为像空间辅助坐标系、 $o_p - x_p y_p$ 为图像坐标系以及 $O - XYZ$ 为物方空间坐标系; X_s, Y_s, Z_s 为光束顶点 S 在物方空间坐标系 $O - XYZ$ 中的位置,角度元素 φ, ω 分别为光束绕相对于空间坐标系 Y_a, X_a 的转角, κ 为形容光束相对主光线 $S o_p$ 所转的角度。

在双目摄影测量中,相机的内、外方位元素通过相机标定量化,对测量结果至关重要,相机标定过程需要基于共线条件方程式^[15],其可以由经典的针孔成像模型及其矩阵形式分别为:

$$\begin{cases} x - x_0 + \Delta x = -f_x \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 + \Delta y = -f_y \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_x & 0 & x_0 - \Delta x \\ 0 & -f_y & y_0 - \Delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 - X_s \\ a_2 & b_2 & c_2 - Y_s \\ a_3 & b_3 & c_3 - Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: (X, Y, Z) 为物体点在物方坐标系中的坐标, (X_s, Y_s, Z_s) 为相机透视中心在物方坐标系中的坐标, $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$ 分别为相机的 3 个外部方位元素 $(\varphi, \omega, \kappa)$ 的 9 个方向余弦 (即 3 个旋转的方向余弦), (x, y) 为图像坐标系中像点的坐标, (x_0, y_0) 为相机主点坐标, $(\Delta x, \Delta y)$ 为镜头畸变, f_x, f_y 分别为 x 方向和 y 方向的焦距^[16], λ 为尺度因子, \mathbf{P} 为相机的投影矩阵, \mathbf{K} 为相机的内参矩阵, $[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}]$ 为像空间坐标系变换到物方坐标系旋转矩阵和平移向量。

1.2 立体像对的空间前方交会严密解法

前方交会是摄影测量学中的重要概念, 在近景摄影测量中广泛应用。基于共线条件方程的近景摄影测量前方空间交会解法, 根据已知的内、外方位元素的两张或以上照片, 把待定点的像点坐标作为观测值, 逐点求解待定点物方空间坐标, 见图 2。

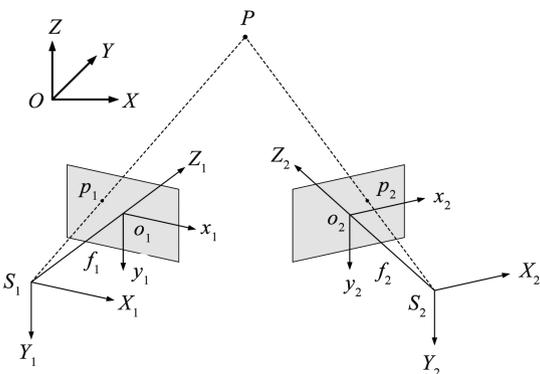


图 2 立体视觉原理解算空间点的坐标

Fig. 2 Principles of stereoscopic vision are employed to compute the coordinates of spatial points

图中: $S_1 - X_1 Y_1 Z_1, S_2 - X_2 Y_2 Z_2$ 分别为两张像片的像辅助空间坐标系, $O - XYZ$ 为物方空间坐标系, $o_1 - x_1 y_1, o_2 - x_2 y_2$ 分别为两张像片的图片坐标系, f_1, f_2 分别为相机的焦距, P 点为同名点坐标。

本文所用的待测点解算方法为前方交会的严密解法, 相较于传统的前方交会方法, 可以有效提高测量的待测点三维坐标的精度, 依据共线方程可推导出前方交会的严密解法, 由式 (1) 推导可得

$$\begin{cases} l_1 X + l_2 Y + l_3 Z - l_x = 0 \\ l_4 X + l_5 Y + l_6 Z - l_y = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} l_1 = fa_1 + (x - x_0)a_3 \\ l_2 = fb_1 + (x - x_0)b_3 \\ l_3 = fc_1 + (x - x_0)c_3 \\ l_4 = fa_2 + (y - y_0)a_3 \\ l_5 = fb_2 + (y - y_0)b_3 \\ l_6 = fc_2 + (y - y_0)c_3 \\ l_x = fa_1 X_s + fb_1 Y_s + fc_1 Z_s + (x - x_0)a_3 X_s + (x - x_0)b_3 X_s + (x - x_0)c_3 X_s \\ l_y = fa_2 X_s + fb_2 Y_s + fc_2 Z_s + (y - y_0)a_3 X_s + (y - y_0)b_3 X_s + (y - y_0)c_3 X_s \end{cases}$$

设系数矩阵 \mathbf{B} 和 \mathbf{L} , 可以得到:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ l_4 & l_5 & l_6 \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{L} \quad (5)$$

式中: X, Y, Z 为物方点的空间坐标, \mathbf{B}, \mathbf{L} 为系数矩阵。

对于左、右像片的一个同名点, 可以列出两组线性方程式, 从而对待测点的物方空间坐标进行求解。

1.3 光束法平差

光束法平差是一种以控制点的像点坐标、未确定点的像点坐标等数据为观测值, 通过整体迭代求解的方法。该方法利用多个图像数据进行连续迭代分析, 可以有效降低测量误差。从共线方程的误差方程出发, 得到如下控制点的像点坐标和未确定点的像点坐标的误差方程, 如下式所示。通过设置初始值和通过设置初始值并执行多次迭代来求解未知对象空间坐标 \mathbf{X} , 这种求解方法可以在全局意义上减少图像上真实像素点和重投影像素点之间的误差。

$$\begin{cases} \mathbf{V}_1 = \mathbf{A}_c \mathbf{t} - \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{V}_2 = \mathbf{A}_u \mathbf{t} + \mathbf{B}_u \mathbf{X}_u - \mathbf{L}_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{2 \times 1} = [v_x \quad v_y]^T \\ \mathbf{A}_{2 \times 6} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{bmatrix} \\ \mathbf{t}_{6 \times 1} = [\Delta X_S \quad \Delta Y_S \quad \Delta Z_S \quad \Delta\varphi \quad \Delta\omega \quad \Delta\kappa]^T \\ \mathbf{B}_{2 \times 3} = \begin{bmatrix} -a_{11} & -a_{12} & -a_{13} \\ -a_{21} & -a_{22} & -a_{23} \end{bmatrix} \\ \mathbf{X}_{3 \times 1} = [\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T \\ \mathbf{L}_{2 \times 1} = [l_x \quad l_y]^T = [x - (x) \quad y - (y)]^T \end{cases} \quad (7)$$

1.4 平面中心拟合方法

在线形测量中需根据待测点的三维坐标拟合桥梁平面,得到桥梁平面中心从而作出线形,依据节段预制梁施工实际,将每片梁平面中心的标高方向拟合曲线作为线形对象进行研究。

本文使用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)方法拟合梁片平面,同时利用随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法去除待拟合点中的离群值,优化拟合结果。

其具体方法为:首先设置内点判断条件 $\varepsilon = \varepsilon_{\min}$,并使用若干待拟合点 (x_i, y_i, z_i) 来构建数据矩阵,即:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x} & y_1 - \bar{y} & z_1 - \bar{z} \\ x_2 - \bar{x} & y_2 - \bar{y} & z_2 - \bar{z} \\ x_3 - \bar{x} & y_3 - \bar{y} & z_3 - \bar{z} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n - \bar{x} & y_n - \bar{y} & z_n - \bar{z} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{X}_p = [a \quad b \quad c]^T \quad (9)$$

通过对方程(8)中的矩阵 \mathbf{E} 进行 SVD 变换,可以得到:

$$\mathbf{E} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T \quad (10)$$

$$\mathbf{X}_p = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} = [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad \dots \quad v_n] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} = v_n \quad (11)$$

式中: \mathbf{D} 为对角矩阵, \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 为酉矩阵。

当最小奇异值对应的特征向量就是拟合平面的系数向量,即式(12)。以此得到若干三维点拟合的

平面方程,求得待拟合点群中各点与此平面的距离 d_i ,当 $d_i < \varepsilon_{\min}$ 时,该点即为内点,依据内点个数拟合最优平面。

$$\mathbf{X}_p = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{n,1} \\ v_{n,2} \\ v_{n,3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

1.5 线形测量方法

实际工程中,双目相机设置在架桥机起重天车底部,确保视场部分重合并完整观察一片预制梁以上的标志点。确定拍摄距离并适当调整标志点大小,确保其在图像中占据足够像素以保证标志点识别成功率及测量稳定性,见图3。

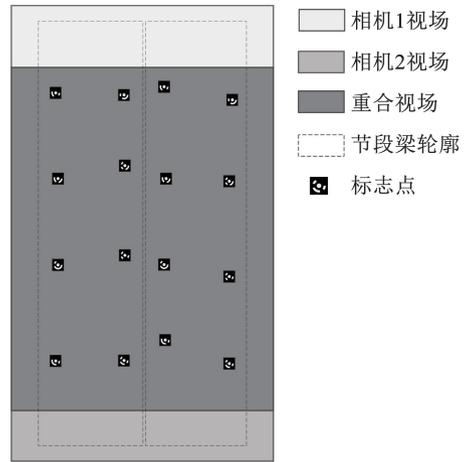


图3 视场布局示意

Fig.3 Field of view layout diagram

该段桥梁架设完成后,驱动吊具并依次获取各节段的图像数据。在进行畸变矫正后的图像数据中获取各标志点位于图像坐标系的各点像素坐标 (x_i, y_i) ,利用前方交会严密解法还原各待测点的三维坐标,由于在大量测量点的情况下,观测误差会大量累计,为减少在测量过程中的误差影响,利用所得的三维坐标构建误差矩阵,对其做光束法平差解算,获得各待测点的精确三维坐标值 (x_n, y_n, z_n) ,将待测点按梁片进行分组,拟合每片节段梁的空间平面 $a_m x + b_m y + c_m z = d_m$,以墩顶块为起点并以横向墩顶块中心线为基准,设定梁片中心 (x_{cm}, y_{cm}) ,将所得的梁片姿态作空间欧几里德变换,获取每片梁片的标高数据 H_m ,从而绘制测得的桥梁线形。其中: i 为单张像片中的标志点个数, n 为待测桥梁的标志点个数, m 为测量的梁片个数。

整体测量方法示意图及方法路线见图4、5。

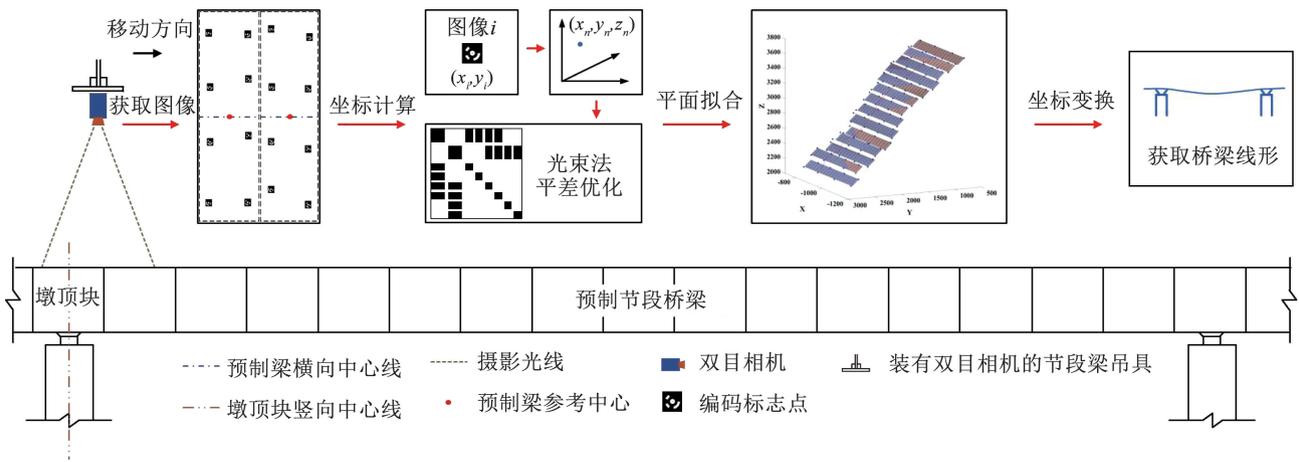


图 4 桥梁线形摄影测量方法原理图

Fig. 4 Principle diagram of bridge alignment photogrammetry method

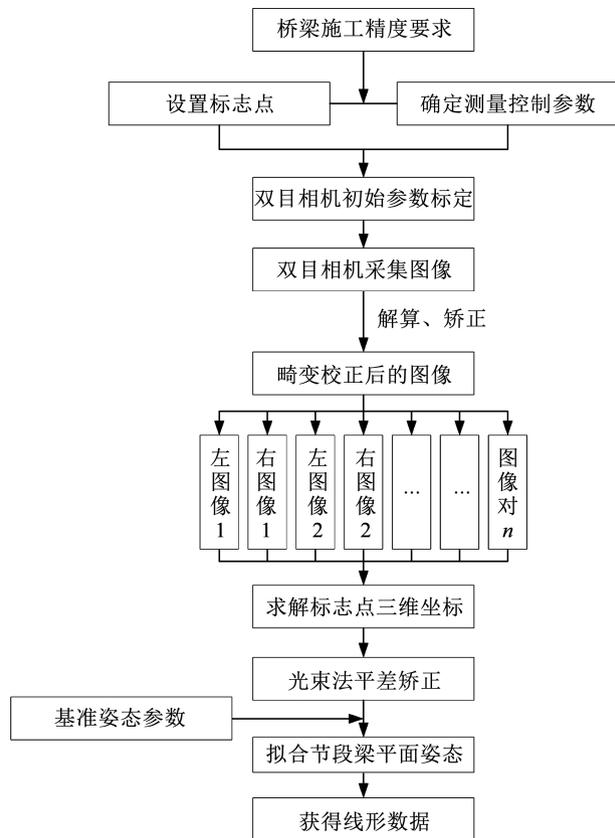


图 5 桥梁线形测量方法路线图

Fig. 5 Bridge alignment measurement method roadmap

通过上述步骤能有效获取梁片姿态信息,获得每段预制梁片的标高,得到线形数据。在桥梁施工后或后续桥梁维护时获取桥梁的线形信息,从而实现桥梁线形的高精度非接触测量。

2 实验验证分析

2.1 仿真试验

2.1.1 仿真试验模型

为验证方法的有效性,运用软件模拟进行仿真

试验。利用 MATLAB 数值分析软件,本文建立了一个仿真试验模型,用于生成梁片上的模拟待测点和相机的三维坐标。在预制梁片设计阶段,通常将阶段分割单元长度设置在 4.0 ~ 6.0 m 之间^[17-18]。考虑标准的 50 m 跨度连续梁配置,本文设置了 14 个模拟梁片。在仿真过程中,每 8 个三维点代表实际梁片上的待测点。仿真模型包含 14 个模拟梁片,共 112 个待测点,以及 26 个相机位置。同时,为模拟真实情况下的误差,向每个待测点位置添加高斯噪声,以考虑实际测量中的不确定性。添加的噪声误差如下:

$$E = x_p \quad (13)$$

式中: x_p 的取值范围为 -40 ~ 40 mm, E 为对待测点位置噪声误差,其误差被随机地添加至待测点的空间坐标中。

仿真模型及仿真试验模型具体参数见图 6、表 1。

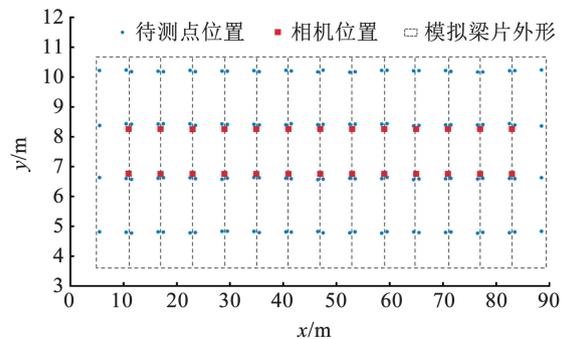


图 6 仿真模型设置

Fig. 6 Simulation model setup

表 1 仿真试验模型参数

Tab. 1 Simulation model parameters

模型参数项	模拟场地大小/m	模拟梁片平面尺寸/m	模拟梁片数量/片	控制点数量/个	待测点数量/个	双目相机拍摄位置个数/个
数值	100 × 15	10 × 6	14	16	96	26

2.1.2 仿真试验分析

将每片模拟梁的待测点解算值作平面拟合,通过拟合出的平面方程求解 14 片模拟梁片的线形数据,从而与原始线形数据比对以得到桥梁线形的最大绝对误差均值及 RMS 误差均值表征试验理论精度。

最大绝对误差均值分别表述为:

$$\varepsilon_i = \frac{\sum_{j=1}^{14} |H_j - h_j|}{n} \quad (14)$$

$$\varepsilon = \max[\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_{50}] \quad (15)$$

式中: ε_i 为单组线形数据对误差均值, H_j 为解算所得线形数据, h_j 为原始线形数据, n 为单组试验梁片数目, $\max[\]$ 为取其中数据的最大值, ε 为最大绝对误差均值。

RMS 误差均值表述为

$$\varepsilon_{RMS} = \frac{\sum \left(\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{14} (H_j - \varepsilon_i)^2}{n}} \right)_i}{m} \quad (16)$$

式中: ε_i 为单组线形数据对误差均值, m 为试验组数, ε_{RMS} 为 RMS 误差均值。

根据上述仿真试验方案,取单组数据观察线形曲线(见图 7),并随机生成 50 组仿真试验数据进行解算,对其数据进行验证分析,所得结果见图 8。

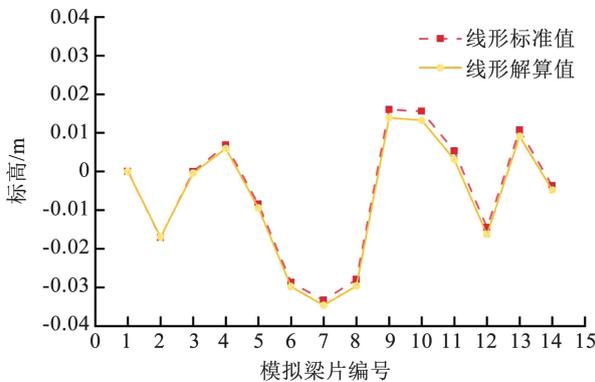


图 7 单组模拟线形曲线示意

Fig. 7 Single set of simulated alignment curves

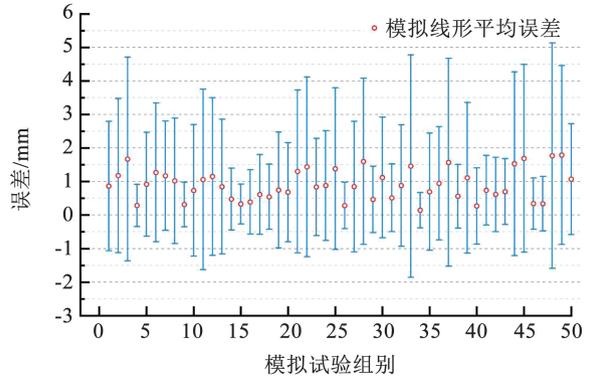


图 8 多组模拟线形平均误差图

Fig. 8 Alignment error diagrams calculated from multiple simulation tests

2.2 室内真实实验

2.2.1 室内实验设置

为验证桥梁施工拼装线形近景摄影测量检测方法的适用性,在室内进行了模拟实验。实际工程中节段梁尺寸约为 16 000 mm × 3 000 mm,双目相机拍摄高度约为 15 m。因此,本文在室内采用了缩尺模型进行实验,模型缩小比例为 15:1。缩尺模型保留了关键几何特征和物理属性,以确保实验结果的代表性和可靠性,同时兼顾实验的可操作性和数据的有效性。

室内实验采用铝型材模拟节段梁的平面,每两根铝型材模拟一片节段梁模型。在模拟梁片上设置了编码环段和中心圆点标志点,以识别物体轮廓和特殊位置。在桥梁施工等复杂环境下,节段梁上的标志点提升识别精度和稳定性,适应光线和背景变化。

依据模型尺度及特征,室内摄影测量标志点的布置方式为每片梁片上 8 个标志点,见图 9、10。



图 9 室内实验示意

Fig. 9 Indoor test scene

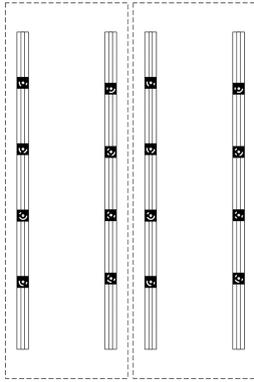


图 10 模拟梁片示意

Fig. 10 Schematic of simulated beam sheet

在节段预制桥梁中,每两个桥墩之间的预制梁片数量取决于桥梁总长度、单个预制梁片长度、桥墩布局及设计和施工要求。通常,桥梁根据跨度和结构类型分为多个节段进行预制和安装^[17-18]。为模拟拍摄距离对测量精度的影响,室内实验设置了 5 种测量方案,探究该方法对不同跨度及拍摄距离预制梁节段线形测量精度的影响(见表 2)。

表 2 各实验组方案

Tab.2 Experimental group schemes

实验组	拍摄距离/m	模拟梁片数量/片	控制点数量/个	待测点数量/个
1	1.5	3	8	16
2	1.5	8	16	48
3	1.5	14	16	96
4	1.0	14	16	96
5	2.0	14	16	96

实验中采用的双目采集装置由两个型号为海康 MV-CH120-10GC 的传感器及配套件组成,见图 11。为确保双目相机拍摄同步精度,采用软同步方式,实现双目相机图片数据的同时抓取。在实验中,确保每个相机同时获取两片及以上的模拟梁片,随后进行标志点的解算。

依据近景摄影测量原理,控制其他变量不变。使用全站仪测取模拟梁片上标志点的空间相对坐标作为真值。计算每片模拟梁片上标志点与真值间的欧氏距离平均值作为待测点的测量结果,使用解算的标志点坐标值拟合线形,获得标高。



图 11 双目相机示意

Fig. 11 Binocular camera

2.2.2 室内实验分析

使用上述实验方法,根据不同实验组设置进行拍摄,解算待测点坐标并评估精度指标。使用待测点测量结果拟合模拟梁片平面,设置基准值获取拟合平面中心,以此为基准绘制桥梁线形曲线。线形拟合示意图及 5 组实验的测量结果见图 12、13。

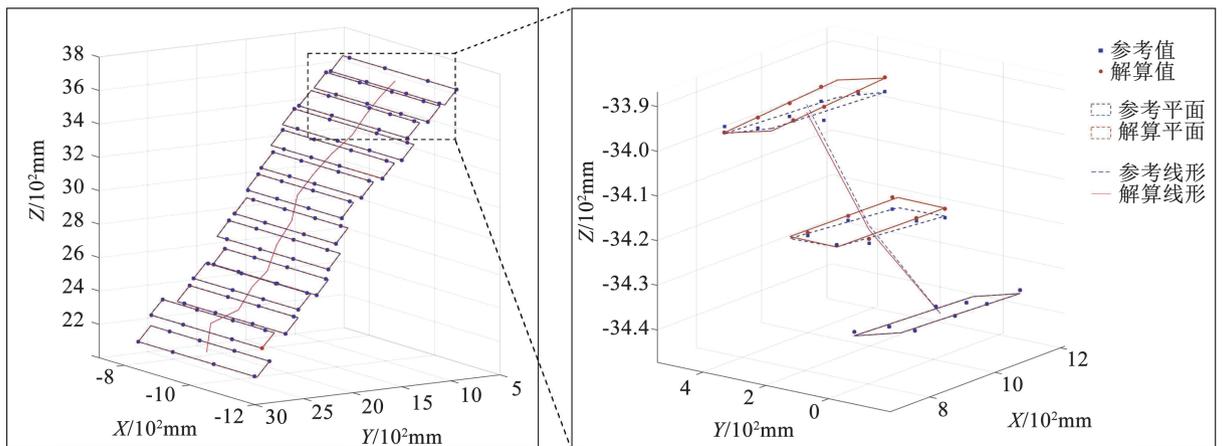


图 12 模拟梁片解算线形示意

Fig. 12 Diagram of the calculated alignment for simulated beam segments

从实验结果中可知,使用前方交会严密解法所得表征测量精度的指标显示误差均不稳定,且每片模拟梁上标志点的平均误差较大。引入光束法平差优化后的各测量指标均大幅降低,其最大绝对误差

均在 3.0 mm 左右,RMS 误差在 2.0 mm 左右,误差趋于稳定,结果见表 3。同时在照片数量增加时,待测点重构的成功率及精度也在提高,在 14 片模拟梁片的测量实验中,RMS 误差能控制在 1.5 mm 以内。

所拟合的线形与原始标准线形较为一致, 每组实验误差均能控制在 2.0 mm 以内, 精度良好, 同时随着测量的模拟梁片数量增多, 误差值趋于稳定, 不

同实验组平均误差最大值为 0.867 mm, RMS 误差为 1.044 mm, 满足工程需要, 具体结果见表 4。

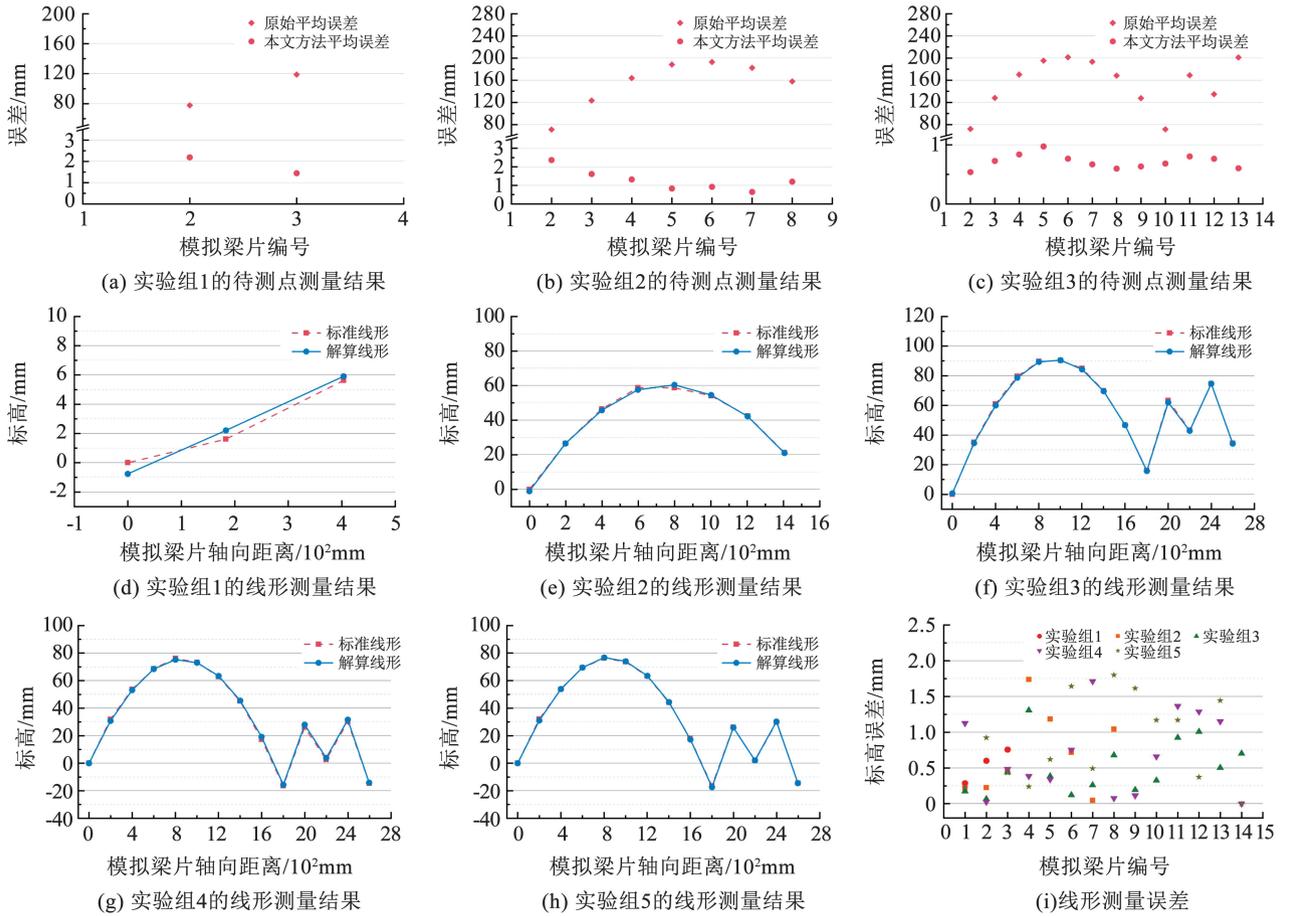


图 13 待测点及线形测量结果

Fig. 13 Measurement results of test points and alignment measurement results

表 3 空间点测量结果

Tab. 3 Spatial point measurement results

测量结果	实验组	拍摄距离/m	模拟梁片数量/片	像片数量	最大绝对误差/mm	ϵ_{RMS}/mm
原始测量结果	1	1.5	3	2	138.062	97.558
	2	1.5	8	7	196.644	159.144
	3	1.5	14	14	211.293	159.095
	4	1.0	14	14	120.778	50.035
	5	2.0	14	14	53.565	26.347
优化后测量结果	1	1.5	3	2	3.247	2.031
	2	1.5	8	7	4.239	1.538
	3	1.5	14	14	1.651	0.782
	4	1.0	14	14	1.748	0.941
	5	2.0	14	14	2.635	1.261

表 4 室内实验线形测量结果

Tab. 4 Indoor test profile measurement results

实验组	拍摄距离/m	模拟梁片数量/片	像片数量	最大绝对误差/mm	平均误差/mm	ϵ_{RMS}/mm
1	1.5	3	2	0.757	0.548	0.582
2	1.5	8	7	1.736	0.703	0.889
3	1.5	14	14	1.307	0.506	0.620
4	1.0	14	14	1.712	0.677	0.868
5	2.0	14	14	1.641	0.867	1.044

3 结 论

1) 本文提出一种结合近景摄影测量原理的桥梁线形检测方法,适用于节段拼装桥梁施工过程中,并通过仿真试验与室内实验验证了其在实际工程中的可行性和有效性。

2) 该方法能够实时处理图像数据,并通过光束法平差算法显著提高测量精度,将待测点的精度提升至 2 mm 以内,桥梁线形的测量精度达到 1 mm 以内,检测结果具有精确性。

3) 在不同的拍摄距离时,系统仍然能够通过足够的像素数据精确识别标志点,并保持测量精度的一致性。

4) 该方法在标志点的识别和图像定向方面表现出了较高的成功率,不仅提高了桥梁施工的可靠性,还大幅提升了桥梁检测的效率,为桥梁建设项目的顺利进行提供了有力支持。

参 考 文 献

- [1] 曾德礼. 大跨度桥梁承载能力鉴定研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 43
ZENG Deli. Study on identification of load bearing capacity of long span bridge[J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 43. DOI: 10.3969/j. issn. 1003-4722. 2018. 05. 009
- [2] 魏雪萍, 郝伟, 王伟, 等. 节段预制悬臂拼装梁施工安全风险评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(7): 131
WEI Xueping, HAO Wei, WANG Wei, et al. Safety risk assessment on construction of segmental prefabricating cantilever assembling beams[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(7): 131. DOI: 10.11731/j. issn. 1673-193x. 2020. 07. 021
- [3] 刘超, 魏周春, 张岷, 等. 高速铁路 300 m 以上跨度桥梁线形评价标准研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(9): 62
LIU Chao, WEI Zhouchun, ZHANG Min, et al. Research on the evaluation standard of the profile of high speed railway bridges of over 300 m span[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(9): 62. DOI: 10.13238/j. issn. 1004-2954. 202008030003
- [4] 张松雷. 近景摄影测量方法在桥梁线形监测上的应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(12): 53
ZHANG Songlei. The Applications of close-range photogrammetry in linear bridge monitoring[J]. Automation & Instrumentation, 2016(12): 53. DOI: 10.14016/j. cnki. 1001-9227. 2016. 12. 053
- [5] 李清泉, 陈睿哲, 涂伟, 等. 基于惯性相机的大跨度桥梁线形形变实时测量方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1834
LI Qingquan, CHEN Ruizhe, TU Wei, et al. Real-time vision-based deformation measurement of long-span bridge with inertial sensors[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(11): 1834. DOI: 10.13203/j. whugis. 20230006
- [6] ABU DABOUS S, FEROUZ S. Condition monitoring of bridges with non-contact testing technologies[J]. Automation in Construction, 2020, 116: 103224. DOI: 10.1016/j. autcon. 2020. 103224
- [7] 甘维兵, 胡文彬, 张瑶, 等. 基于光纤陀螺的桥梁微小形变检测技术[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(3): 415
GAN Weibing, HU Wenbin, ZHANG Yao, et al. Detection technique for bridge's micro-deformation based on FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(3): 415. DOI: 10.13695/j. cnki. 12-1222/o3. 2016. 03. 025
- [8] 张辰, 吴兆福, 黄建伟, 等. 基于频谱融合的近景摄影影像灰度质量分析[J]. 测绘通报, 2023(4): 154
ZHANG Chen, WU Zhaofu, HUANG Jianwei, et al. Quality analysis on the image greyscale for the close-range photogrammetry based on the spectrum fusion method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(4): 154. DOI: 10.13474/j. cnki. 11-2246. 2023. 0121
- [9] KIM M K, WANG Qian, LI Heng. Non-contact sensing based geometric quality assessment of buildings and civil structures: a review[J]. Automation in Construction, 2019, 100: 163. DOI: 10.1016/j. autcon. 2019. 01. 002
- [10] 赵桐远, 解玄, 刘银, 等. 基于数字近景摄影测量的隧道围岩结构面产状自动提取方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(7): 885
ZHAO Tongyuan, XIE Xuan, LIU Yin, et al. Study on automatic extraction method of structural plane orientation of tunnel surrounding rock based on digital close-range photogrammetry[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(7): 885. DOI: 10.14188/j. 1671-8844. 2023-07-014
- [11] 李萍, 张劲泉, 王磊, 等. 基于摄影测量的简支梁桥损伤识别[J]. 公路交通科技, 2022, 39(8): 1
LI Ping, ZHANG Jinquan, WANG Lei, et al. Damage identification for simple supported beam bridge based on photogrammetry[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(8): 1. DOI: 10.3969/j. issn. 1002-0268. 2022. 08. 001
- [12] KOŠČAK J, DAMJANOVIĆ D, BARTOLAC M, et al. Shear behavior of RC beams without transverse reinforcement: an analysis of crack kinematics and transfer mechanisms based on stereophotogrammetric measurements[J]. Engineering Structures, 2022, 255: 113886. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2022. 113886
- [13] 姜欣, 张晓艳, 唐亮, 等. 基于摄影测量获取边缘轮廓线的结构变形监测方法研究[J]. 公路工程, 2021, 46(6): 47
JIANG Xin, ZHANG Xiaoyan, TANG Liang, et al. Research on the method of structural deformation monitoring based on the edge contour obtained by photogrammetry[J]. Highway Engineering, 2021, 46(6): 47. DOI: 10.19782/j. cnki. 1674-0610. 2021. 06. 008
- [14] KEIZER R, DUBAY R, WAUGH L, et al. Architecture for a mobile robotic camera positioning system for photogrammetric data acquisition in hydroelectric tunnels[J]. Sensors, 2023, 23(16): 7079. DOI: 10.3390/s23167079
- [15] YE Meitu, LIANG Jin, LI Leigang, et al. Simultaneous measurement of external and internal surface shape and deformation based on photogrammetry and stereo-DIC[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 158: 107179. DOI: 10.1016/j. optlaseng. 2022. 107179
- [16] ZHANG Chenghua, ZHAO Zhanqian, LIU Yang, et al. Data snooping for pose estimation based on generalized errors-in-variables model[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(4): 4851. DOI: 10.1109/JSEN. 2023. 3346400
- [17] 黄双龙. 预制节段拼装方案选择及应用分析[J]. 价值工程, 2022, 41(8): 59
HUANG Shuanglong. Selection and application analysis of precast segment assembly method[J]. Value Engineering, 2022, 41(8): 59. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-4311. 2022. 08. 020
- [18] 张爱平. 钢箱梁节段施工受力性能分析[J]. 公路, 2021, 66(1): 157
ZHANG Aiping. Mechanical performance analysis of steel box girder segment construction[J]. Highway, 2021, 66(1): 157