

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023110223121997

文章编号:1674-599X(2023)06-0033-07

引用格式:廖岳,刘界鹏,王文渊,等.基于点云数据的大型复杂箱梁智能虚拟预拼装技术[J].交通科学与工程,2023,39(6):33-39.

Citation:LIAO Yue, LIU Jiepeng, WANG Wenyuan, et al. Intelligent virtual trial assembly for large and complex box girders based on point cloud data[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 33-39.

基于点云数据的大型复杂箱梁智能虚拟预拼装技术

廖岳^{1,2}, 刘界鹏^{1,2}, 王文渊^{1,2}, 黄峰^{3,4}, 杨文树^{3,4}, 彭应川^{3,4}

(1. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

3. 中铁大桥局集团有限公司第六工程有限公司, 湖北 武汉 430101;

4. 中铁大桥局集团有限公司丰城分公司, 江西 丰城 331104)

摘 要:为解决桥梁建造过程中,实体预拼装场地占用过大和施工周期过长的问题,基于点云技术,提出一种大型复杂箱梁的智能虚拟预拼装方法。通过对箱梁连接方式进行分析,建立虚拟预拼装的技术框架和虚拟预拼装流程。考虑到箱梁节段加工的质量精度,开发基于特征平面的梁轴线方向向量提取算法。本研究还对点云数据匹配方法进行了分析,并根据先验知识降低其计算复杂度。以江西省丰城市紫云大桥为工程背景,对本虚拟预拼装技术进行验证。研究结果表明:本虚拟预拼装方法具备自动化程度高,且不依赖于三维模型,并能有效指导相邻钢梁对接截面的错位修正,提高施工效率,为类似结构的数字化建造提供理论支撑和技术参考。

关键词:桥梁工程;大型复杂箱梁;虚拟预拼装;点云

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

Intelligent virtual trial assembly for large and complex box girders based on point cloud data

LIAO Yue^{1,2}, LIU Jiepeng^{1,2}, WANG Wenyuan^{1,2}, HUANG Feng^{3,4}, YANG Wenshu^{3,4}, PENG Yingchuan^{3,4}

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. The sixth Engineering Co., Ltd., China Railway Major Bridge Engineering Group Co., Ltd., Wuhan 430101, China;

4. Fengcheng Branch, China Railway Major Bridge Engineering Group Co., Ltd., Fengcheng 331104, China)

Abstract: To solve the problems of site occupation and long construction cycles of physical trial assembly (PTA) during bridge construction, the intelligent virtual trial assembly (VTA) method for large and complex box girders was proposed based on point cloud data (PCD). The connection pattern of the box girder was analyzed to establish the technical framework and the flow of methods for the VTA. Considering the quality control accuracy of box girder segment machining, the algorithm for beam axis direction vector extraction was developed based on the characteristic plane. The PCD matching methods was also analyzed, and the computational complexity was reduced based on prior knowledge. Taking the Ziyun Bridge in Fengcheng City, Jiangxi Province as the engineering

收稿日期:2023-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目联合基金项目(U20A20312)

作者简介:廖岳(1997—),男,重庆大学博士生。Email: 20221601068@stu.cqu.edu.cn

background, the virtual pre assembly technology was verified. the research results show that the intelligent VTA method proposed in this paper is charactered as high degree of automation. That does not depend on the 3D model. The proposed method can effectively guide the correction of dislocation in the butt joint section of adjacent steel box girders, improving the construction efficiency. This study can provide theoretical support and technical reference for the digital construction of similar structures.

Key words: bridge engineering; large and complex box girder; virtual trial assembly; point cloud data

桥梁作为一个地方的标志性建筑之一,不仅承担了交通通行作用,在树立城市形象,推动城市经济发展中也具有不可替代的作用^[1-2]。随着中国钢结构的发展,质量更轻、跨越能力更强、造型更美的钢桥、钢-混凝土组合桥梁在中国桥梁中的占比越来越大^[3-4]。钢桥主梁、桥塔等大型结构在建造过程中,受场地、运输、吊装等限制,往往被拆分为若干节段分别进行加工^[4-6],这带来了节段连接问题^[7]。在实际施工中,实体预拼装是解决该问题最有效的手段^[8],在桥梁建造中被广泛运用,相关规范也对实体预拼装做出明确规定^[9-10]。然而,实体预拼装存在场地占用大、胎架成本高、机具投入大及施工周期长等问题,在追求绿色低碳、高质量发展的大趋势下,这些问题尤显尖锐。随着计算机技术及信息技术的发展,虚拟预拼装正逐渐取代实体预拼装。周绪红等^[11]以重庆两江新区寨子路大桥为依托,开展了基于点云的大型复杂钢拱桥虚拟预拼装方法研究,通过提取拱肋节段角点,实现了拱肋牛腿-拱间横梁节段及拱肋节段与节段之间的虚拟预拼装。CHENG等^[12]以郭家沱长江大桥为工程背景,提出了基于点云数据的螺栓孔高效提取算法,通过粒子群算法,生成了螺栓孔最优修整方案。刘界鹏等^[13]为推动虚拟预拼装技术在工程中的应用,编写了对工程具有指导作用的数字化预拼装教材。然而,相较于实体预拼装而言,虚拟预拼装在中国起步较晚,现有的大多数工程中暂时无法支撑虚拟预拼装的需求,且暂时没有成熟的规范标准或技术指南^[9-10],亟待收集更多结构形式的虚拟预拼装实例案例。因此,本研究拟以江西丰城紫云大桥为工程背景,基于点云数据,对桥梁钢结构数字虚拟预拼装技术进行研究。依据现有工程资料和结构特征,建立不依赖于三维模型的钢箱梁虚拟预拼装技术路线。针对连接截面的提取,提出基于特征平面的梁段轴线方向的向量提

取方法。通过截面特征简化特征点,降低基于基准点全排列的点云配准计算复杂度。并在实际工程中,对本虚拟预拼装方法进行了验证。以期类似结构桥梁的数字化建造提供理论支撑和技术参考。

1 工程背景

丰城紫云大桥(如图1所示)是连接丰城市南北方向交通脊梁的重要桥梁,是丰城市“一江两岸三区”协同发展的需要,更是加快丰城市融入南昌半小时经济圈的重要交通要道。紫云大桥主桥为自锚式悬索桥,总长460.0 m。上层箱型钢截面由两个箱梁连接而成,标准结构宽度为28.5 m,节段之间采用焊接连接,连梁布置有多个U形加劲肋,梁截面大且形状复杂,如图2所示。



图1 丰城紫云大桥效果图

Fig. 1 Preview of the Ziyun Bridge in Fengcheng City

2 技术路线及方法

2.1 技术路线

钢箱梁预拼装时为修整相邻节段连接错缝。桥梁设计三维模型可作为扫描点云的数字胎架,调整不同坐标系下梁段点云位置,然后提取连接截面特征^[14]。然而,并非所有工程项目都能提供精细的

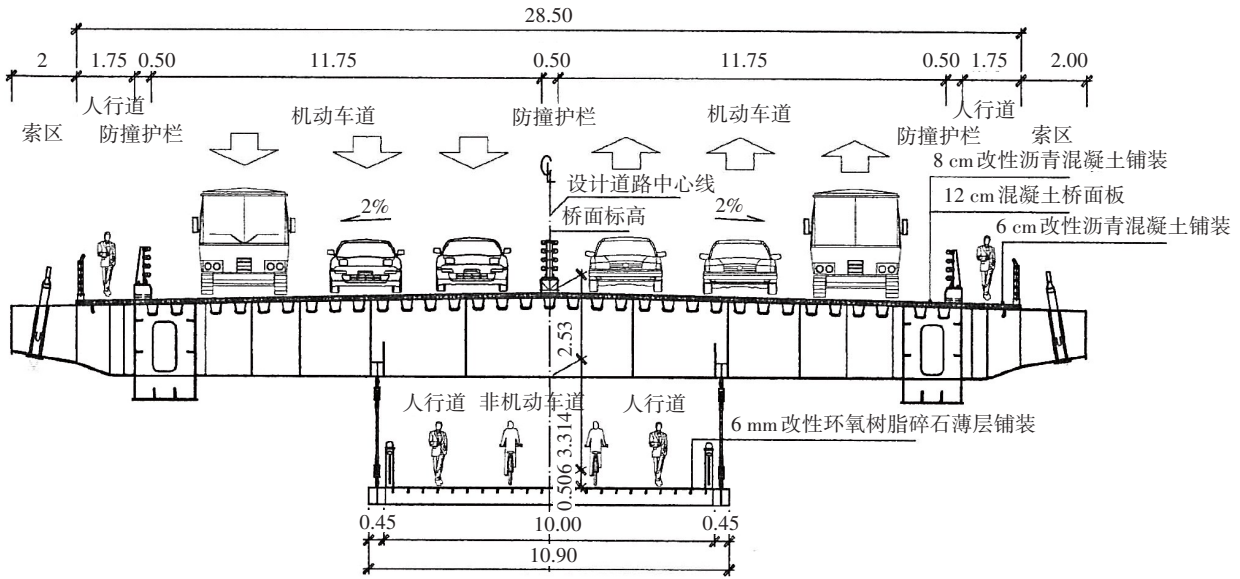


图2 主梁标准截面示意(单位:m)

Fig. 2 Sketch of typical cross section of main beam(unit:m)

三维模型,在不依赖于三维模型的基础上,本研究提出的钢箱梁虚拟预拼装技术路线,如图3所示。

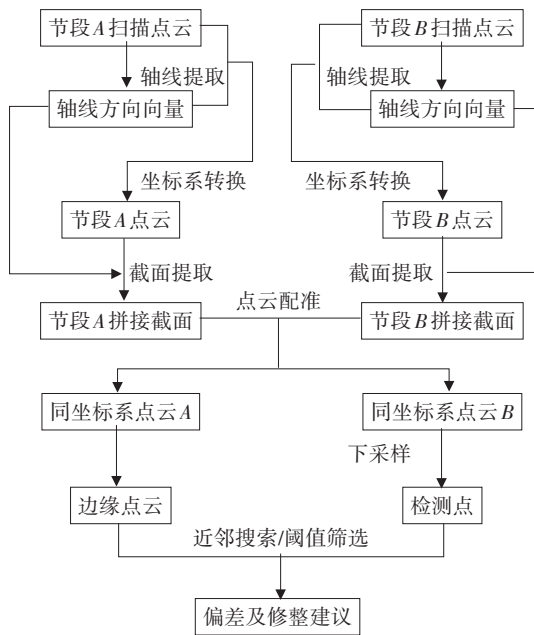


图3 钢箱梁虚拟预拼装技术路线

Fig. 3 Process for VTA of box girders

其技术路线为:①先输入需要拼装节段的扫描点云;②采用基于特征平面的梁轴线方向向量提取算法,求解梁段轴线方向向量;③以梁轴线方向向量为Y轴,以箱梁下翼缘平面法向量为Z轴,以梁轴线与箱梁下翼缘平面法向量叉乘后得到的向量为X

轴,分别构建每个扫描点云的三维坐标系,将输入点云转换至新坐标系;④根据轴线方向提取相邻节段的拼接截面点云,并提取对接截面同名特征点,采用基准点全排列配准算法^[12]对接截面点云配准;⑤依此获取外边缘点云,排除壁厚的影响;⑥采用最近邻KD树搜索算法^[15],获取检测点错位偏差,通过偏差阈值筛选后,提出工程意见。

2.2 基于特征平面的梁轴线方向向量的提取

确定梁轴线方向,有利于提取梁的几何特征,提高本研究提出的虚拟预拼装的自动化程度。对于截面形状复杂的梁节段,由于点云密度不均匀、数据缺失、环境点云干扰等因素,梁轴线方向提取较为困难。因此,提出基于特征平面的梁轴线方向的提取方法:选择设计上与梁轴线方向空间关系的已知的平面作为特征平面;考虑施工偏差,引入平面重要性系数,赋予各特征平面权重,施工控制精度越高,重要性系数越大;根据特征平面法向量与梁轴线的几何关系,求解梁段轴线方向的向量。梁段轴线单位方向的向量理论上应使式(1)成立。由于施工偏差,式(1)可采用最小二乘法求解。

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i |\vec{n}_{\text{aix}} \cdot \vec{n}_i| + \sum_{j=1}^m \gamma_j |\vec{n}_{\text{aix}} \times \vec{n}_j| = 0 \quad (1)$$

式中: γ_i 、 γ_j 分别为平面重要性系数;

\vec{n}_{aix} 为梁轴线方向的向量;

\vec{n}_i 为第*i*个与梁轴线方向向量垂直的平面法

向量, $i=1,2,\dots,n$, n 为特征平面数量;

\vec{n}_j 为第 j 个与梁段轴线方向向量平行的平面法向量, $j=1,2,\dots,m$, m 为特征平面数量。

2.3 拼接截面点云提取

拼接截面点云自动提取方法如图4所示。先获取构件轴线后,沿轴线方向截取构件端部点云,如图4(a)所示;再以构件端部外侧,垂直于构件轴线的平面作为投影面,截取的点云投影,如图4(b)所示;最后,采用最近邻KD树搜索算法,在节段点云中提取每个投影点的最近点,即端面点云如图4(c)所示。

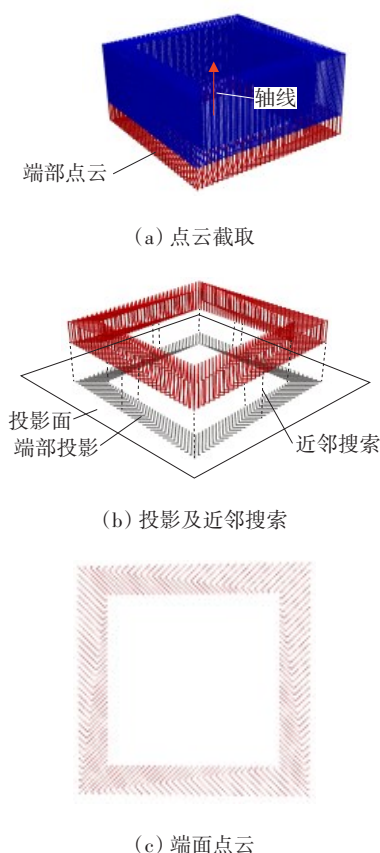


图4 端面点云提取流程示意

Fig. 4 Extraction process of end point cloud

2.4 基准点全排列配准算法

采用基准点全排列配准算法将不同坐标系下的点云注册至相同坐标系^[13]。首先,在待配准点云和目标点云中,提取若干相同位置的特征点作为基准点;然后,在基准点中,筛选出匹配度最高的点,对待配准点云进行坐标变换;最后,采用迭代最近邻算法进行调整。空间坐标系的变换最少需要三组非共线的基准点,因此,以3个基准点为一组,考虑所有组合情况。将待配准坐标系中的特征点转

换至目标坐标系中,计算坐标转换后待配准点云基准点与目标点云基准点的直线距离和 D , 见式(2), 以距离和最小的特征点组合方式作为最佳匹配。当待配准点云基准点数量为 s , 目标点云基准点数量为 t 时, 变换矩阵计算次数 N , 见式(3)。该方法适用于基准点数量较少的情况, 当点数较多时, 应对其进行简化。

$$D = \sum_i^3 \|P_{si} - P_{ti}\|_2 \quad (2)$$

式中: P_{si} 为第 i 个待配准点云的基准点转换坐标系后的坐标;

P_{ti} 为第 i 个目标点云的基准点坐标。

$$N = C_s^3 C_t^3 \quad (3)$$

式中: C 为组合数符号。

3 工程验证

3.1 点云输入

在丰城市紫云大桥上相邻梁节段上验证本方法的应用效果。数据采集设备为 Trimble TX8, 120 m 范围内测程噪声小于 2 mm。各站数据采集时布置标靶球, 以标靶球心为基准点, 采用基准点全排列匹配算法进行各站数据配准, 配准后的数据如图5所示。其中, 图5(a)为A节段, 数据采集时节段放置在胎架上, 仅采集了拼接截面数据。图5(b)为B节段, 数据采集时, 未与节段A相邻摆放, 采集了较为完整的表面点云。

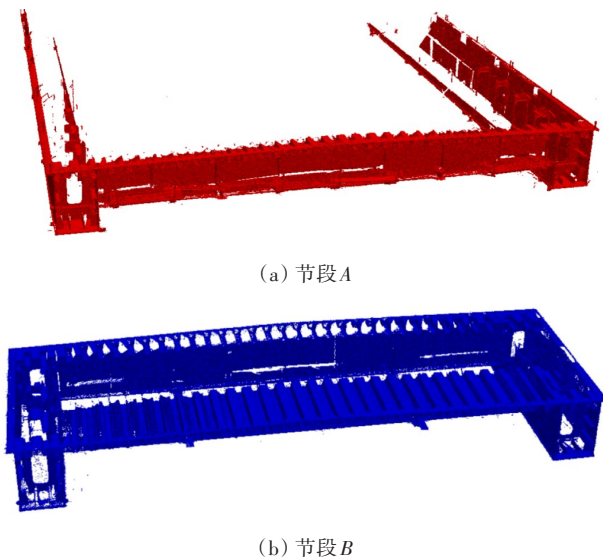


图5 输入点云

Fig. 5 Imported PCD

3.2 拼接截面提取

以箱梁腹板、下翼缘、横隔板及连梁腹板作为特征平面,采用基于特征平面的梁轴线方向的向量提取方法,计算梁轴线方向的向量,以此作为 Y 轴方向。根据施工控制精度,横隔板平面重要性系数取为0.8,其余特征平面重要性系数取为1.0。通过随机采样一致性算法拟合箱梁下翼缘点云平面,以拟合平面法向量作为 Z 轴方向,以垂直 Y 、 Z 轴方向作为 X 轴方向,将节段A、B的点云转换至新构建的坐标系中。根据 Y 轴坐标值大小,截取对接面5 cm范围内的点云数据。采用等截面构件端面点云提取方法,提取各节段拼接截面点云,经统计滤波算法去噪后如图6所示。

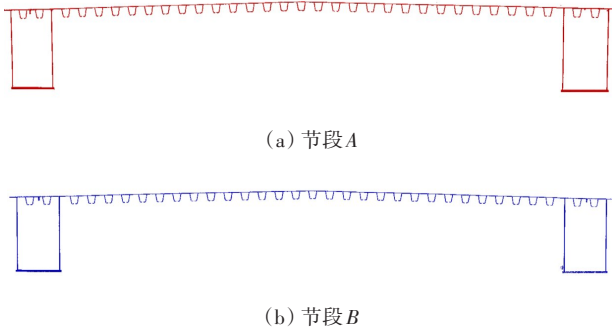


图6 拼接截面

Fig. 6 Section to be spliced

3.3 拼接截面匹配

拼接截面的角点是典型的基准点,然而拼接截面形状较为复杂,角点数量过多,采用基准点全排列算法对拼接截面配准会造成组合数爆炸。因此对角点进行简化,取 Z 轴最大值(截面跨中顶部), X 轴最值(箱梁上翼缘最外侧)对应的点云作为上部基准点,取 Z 轴坐标值在中位数以下, X 轴的最大值和最小值(箱梁下翼缘最外侧)对应的点云作为截面下部基准点,可有效减少配准计算量,并实现特征点自动提取。每个截面提取基准点5个,如图7所示。只需计算变换矩阵100次,随后采用迭代最近邻算法进行配准精度调整。完成配准的拼接截面外轮廓点如图8所示。从图8可以看出,U形加劲肋有明显错缝,需进一步分析错缝大小。



图7 节段A拼接截面特征点

Fig. 7 Key points of the section to be spliced in part A

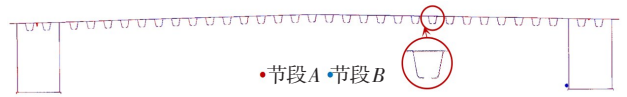


图8 匹配后的拼接截面外轮廓

Fig. 8 Profile of the registered splicing section

3.4 拼接截面偏差输出

由于拼接截面点云密度大,提取每个点云的错位大小不便于修整定位。因此,按照10 cm为网格大小,对节段B拼接截面的点云进行网格划分,以距每个网格中心点最近的点云作为检测点,实现检测点的下采样。共选择检测点696个,如图9所示。采用最近邻KD树搜索算法,搜索节段A拼接截面点云中检测点的最近点,计算二者距离作为错位偏差,如图10所示。

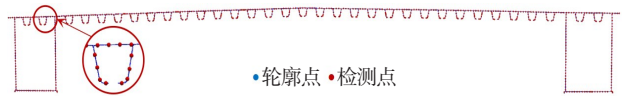


图9 检测点及节段B拼接截面点云

Fig. 9 Check points and splicing section PCD of segment B

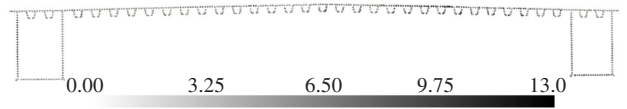


图10 错位偏差(单位:mm)

Fig. 10 Misalignment deviation(unit:mm)

根据拼接截面控制要求,超过5 mm的错缝需进行修整。因此,根据偏差阈值进一步筛选检测结果,节段B拼接截面点云及其待修整点如图11所示。其中,错缝大小超过了限值部分进行了点云的加粗。可见,节段B连接钢梁右侧第9~12个U形肋及顶部翼缘,右侧箱梁下翼缘及左侧钢梁外侧腹板位置需要进行复尺并修整。

为便于修整定位,以左侧箱梁外侧腹板与下翼缘交点为原点,计算每个待修整点至原点距离,并给出每个修整点修整大小,见表1。其中,偏差正值代表应沿垂直于腹板方向指向截面内进行修整。同理,计算修整部位位置及错缝大小。根据修整参数进行复尺,复尺结果表明,左侧箱梁腹板与U形肋存在错缝,而右侧箱梁下翼缘是由防锈喷漆时表面

粘贴的防护胶带松动造成的虚假错缝。这表明:本方法检测的钢箱梁节段虚拟预拼装错缝是准确的。

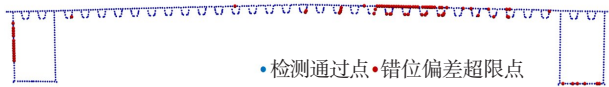


图11 待修整部位示意

Fig. 11 Points with misalignment deviation exceeding the limit

表1 左侧箱截面修整点偏差

Table 1 Deviation of adjustment points on the section of the left box girder mm

距原点距离	偏差大小	距原点距离	偏差大小
2 334	5	1 430	6
2 138	5	1 331	6
2 028	5	1 231	6
1 929	6	1 131	6
1 832	6	1 031	6
1 633	5	929	6
1 528	5	830	5

4 结论

1) 提出了一种不依赖于三维模型的大型复杂箱梁虚拟预拼装方法,该方法自动化程度高、鲁棒性强;

2) 提出了基于特征平面的梁轴线提取方法,该方法考虑了施工控制精度,灵活性较高,有利于截面特征的自动提取;

3) 引入先验知识,通过截面特征筛选,在保持基准点自动提取的同时降低了配准计算复杂度;

4) 以实际工程为例,验证了本研究提出的钢箱梁虚拟拼装技术路线的有效性,研究成果可为类似工程提供参考。

参考文献(References):

[1] 王鹏举,董辉. 基于文化生态学的城市桥梁景观设计[J]. 城市道桥与防洪, 2023 (7): 121-123, 18. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyf.2023.07.028.

10.16799/j.cnki.csdqyf.2023.07.028.

WANG Pengju, DONG Hui. Design of urban landscape bridge based on cultural ecology [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2023 (7): 121-123, 18. DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyf.2023.07.028.

[2] 张晓旭,梁小珍,胡毅,等. 港珠澳大桥建成对香港经济的影响研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36 (12): 3026-3033. DOI: 10.12011/1000-6788 (2016) 12-3026-08.

ZHANG Xiaoxu, LIANG Xiaozhen, HU Yi, et al. Analysis of the impact on Hong Kong's economy due to the establishment of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36 (12): 3026-3033. DOI: 10.12011/1000-6788 (2016) 12-3026-08.

[3] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (02): 1-97. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.001.

Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's Bridge Engineering Research; 2021 [J]. China J. Highw. Transp., 2021, 34 (2): 1-97. DOI: 10.19721/j.cnki. 1001-7372. 2021. 02. 001.

[4] 陈平,华乐. 南京长江第五大桥钢混组合塔钢壳制造关键技术[J]. 世界桥梁, 2019, 47 (3): 20-25. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2019.03.005.

CHEN Ping, HUA Le. Key manufacturing techniques for steel shells of steel-concrete composite pylons of fifth Nanjing Changjiang River bridge [J]. World Bridges, 2019, 47 (3): 20-25. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-7767.2019.03.005.

[5] 李湘龙,黄飞鸿,欧阳星,等. 宽幅钢箱梁斜拉桥合龙技术与影响因素分析[J]. 交通科学与工程, 2023, 39 (04): 80-87. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u.20211104001.

LI Xianglong, HUANG Feihong, OUYANG Xing, et al. Closure technology of wide steel box girder cable-stayed bridge and analysis of influencing factors [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (4): 80-87. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211104001.

[6] 冯燕平,肖广生,陈诗泉,等. 500 m级上承式CFST拱桥施工挑战及创新[J]. 公路, 2023, 68(10): 1-5.

FENG Yanping, XIAO Guangsheng, CHEN Shiquan, et

- al. Construction challenges and innovations of 500-meter level CFST deck arch bridge [J]. Highway, 2023, 68 (10): 1-5.
- [7] 王达,黎峥.大跨径混合式叠合梁斜拉桥合龙方案研究[J].交通科学与工程,2023,39(3):67-73. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210908001.
- WANG Da, LI Zheng. Research on the closing scheme of a long-span hybrid composite girder cable-stayed bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (3) : 67-73. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/ u.20210908001
- [8] 陈振明,隋小东,李立洪,等.钢结构预拼装技术研究与应用[J].施工技术,2019,48(8):100-103. DOI: 10.7672/sgjs2019080100.
- CHEN Zhenming, SUI Xiaodong, LI Lihong, et al. Research and application of pre-assembling technology for steel structures [J]. Construction Technology, 2019, 48(8): 100-103. DOI: 10.7672/ sgjs2019080100.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构工程施工规范:GB 50755—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for construction of steel structures: GB 50755—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [10] 中交一公局集团有限公司.公路桥涵施工技术规范:JTG/T 3650—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.
- China First Highway Engineering Co., Ltd., Technical specifications for construction of highway bridges and culvertes: JTG/T 3650—2020 [S]. Beijing: China Communication Press, 2020.
- [11] 周绪红,刘界鹏,程国忠,等.基于点云数据的大型复杂钢拱桥智能虚拟预拼装方法[J].中国公路学报,2021,34(11):1-9. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2021.11.001.
- ZHOU Xuhong, LIU Jiepeng, CHENG Guozhong, et al. Intelligent virtual trial assembly of large and complex steel arch bridges based on point cloud data [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (11) : 1-9. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.11.001.
- [12] CHENG G Z, LIU J P, CUI N, et al. Virtual trial assembly of large steel members with bolted connections based on point cloud data [J]. Automation in Construction, 2023, 151: 104866. DOI: 10.1016/j. autcon.2023.104866.
- [13] 刘界鹏,程国忠,周绪红.大型复杂钢结构智能数字化尺寸检测和预拼装技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2023.
- LIU Jiepeng, CHENG Guozhong, ZHOU Xuhong. Intelligent digital dimension detection and pre-assembly technology for large complex steel structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023.
- [14] LIU J P, CUI N, CHENG G Z, et al. Towards the automated virtual trial assembly of large and complex steel members using terrestrial laser scanning and BIM [J]. Engineering Structures, 2023, 291: 116448. DOI: 10.1016/j. engstruct.2023.116448.
- [15] BENTLEY J L. Multidimensional binary search trees used for associative searching [J]. Communications of the ACM, 1975, 18 (9) : 509-517. DOI: 10.1145/361002.361007.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:罗容;英文编辑:陈璐)