

基于 BIM 技术的悬索桥钢桁梁吊装施工

荆梦瑶^{1,2}, 李 阳¹, 吴廷尧¹

(1. 中建桥梁有限公司, 重庆 402260; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

[摘要] 悬索桥钢桁梁是承受和传递荷载的主要构件, 由于其梁高高、长度大、自重大、节点构造复杂、杆件多、施工精度要求高、吊装受水位影响大、高空施工拼接次数多等特点, 吊装过程中存在杆件位置交错、高空连接受力不佳、施工组织困难、工期紧、安全风险大等问题。鉴于此, 以某悬索桥钢桁梁安装为工程背景, 利用 BIM 技术建立悬索桥高精度三维模型, 对吊装过程进行了详细施工模拟, 对比分析不同施工顺序, 协调起吊过程中冲突部分, 制订高效可行的施工方案, 达到了钢桁梁吊装无碰撞、连接易操作、施工效率提高、安全与工期有保障的目的。

[关键词] 桥梁工程; 悬索桥; 建筑信息模型; 钢桁梁; 吊装; 施工技术; 数值模拟

[中图分类号] U448.25; U445.4 [文献标识码] A [文章编号]

Hoisting Construction of Steel Truss Girder of Suspension Bridge Based on BIM Technology

JING Mengyao^{1,2}, LI Yang¹, WU Tingyao¹

(1. China State Construction Bridge Co., Ltd., Chongqing 402260, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Steel truss girder of suspension bridge is the main component to bear and transfer loads. Due to its characteristics such as high girder height, large length, heavy load, complex joint, large number of rods, high construction accuracy requirements, heavy lifting affected by water level, and many times of high-altitude construction splicing, there are some problems in the lifting process, such as staggered position of rods, poor high-altitude connection force, difficult construction organization, tight construction period, and large safety risks. In view of this, taking the installation of steel girder of a suspension bridge as the engineering background, BIM technology is used to establish a high-precision digital twin three-dimensional model of the suspension bridge, carrying out detailed construction simulation of the lifting process, comparing and analyzing different construction sequences, coordinating the conflicting parts in the lifting process, and developing an efficient and feasible construction plan. The purpose of lifting steel girder without collision, easy operation of connection, improvement of construction efficiency, safety and guarantee of construction period is realized.

Keywords: bridges; suspension bridges; building information modeling(BIM); steel truss girders; hoisting; construction; simulation

0 引言

悬索桥加劲梁作为桥面传力体系的补

[作者简介] 荆梦瑶, 硕士, 工程师, 国家一级注册建造师, 国家二级注册结构工程师, E-mail: mengyaojing@stu.cqu.edu.cn

[收稿日期] 2023-10-16

充, 主要承受和传递竖向荷载, 一般设计为简支梁或连续梁体系, 使用钢材或钢筋混凝土制成, 结构形式通常为桁架式和箱钢梁式^[1]。桁架式结构在悬索桥设计中得到广泛应用, 特别适用于交通量较大的双层桥面或公铁两用桥。通常悬索桥的钢桁架分节段在工厂预制后, 再通过船舶运输至现场拼装成为

加劲梁。悬索桥总体施工流程为：主塔、锚碇施工→主缆安装→吊索索夹安装→钢梁节段吊装架设→钢梁节段间环向焊接→轨道铺设及附属工程施工。其中，钢梁节段吊装架设是从跨中开始，逐段吊装连接。已架设好的梁段立即与相应吊索连接，将梁段自重传递给主缆。值得注意的是，最先架设的梁段并不承受随后架设梁段自重。在吊装过程中，由于钢桁梁的稳定性、安全性和施工效率受环境影响较大，如风速、天气、地形、流速等，且钢桁梁具有复杂的几何形状和结构，存在潜在碰撞风险和重复拆除、安装的可能性，因此引入BIM技术提前模拟各种施工吊装方案，综合考虑桥梁结构、吊装方案、设备、施工环境、碰撞检测、实时仿真和安全评估等多个方面的技术难点，评估可行性和安装效果，模拟实时动态，提前部署安全防控和危险预防措施以确保吊装施工的安全性、高效性和可行性。

桥梁构件较复杂，曲线、曲面较多，建模精度难以控制，且桥梁工程施工过程中控制变量多，BIM (building information model, 建筑信息模型) 技术目前在房建中的应用趋于成熟，但桥梁中的应用不多。IFC (industry foundation class, 工业基础类) 标准发布的最新版的标准号为ISO 16739-1:2018，该标准作为建筑信息模型 (BIM) 数据的开放国际标准，涵盖建筑物在其生命周期所需数据的定义，能使数据在建筑或设施管理行业的各参与者使用的软件应用程序间进行交换和共享^[2]。IFC标准广泛用于建筑物建模，但也正在扩展到民用基础设施。FHWA (联邦公路管理局) 发布了 BrIM (bridge information modeling, 桥梁信息建模) 标准化，提出一种额外的数据结构和现有数据结构的几种新用法，对IFC数据结构无法充分描述桥梁结构的所有细节问题进行了修正^[3]。基于统一数据格式和通用国际标准的参数化桥梁模型建立将有助于BIM技术的深度应用，使不同的BIM模型数据能在各主流BIM软件间进行交换和流通，充分挖掘BIM模型的扩展应用潜力^[4]，使模型融合时间轴的4D施工模拟精度符合需求。

彭强等^[5]建立了成桥状态的BIM模型，并在此基础上对预制梁段施工过程展开了动画模拟；张勇^[6]建立了重庆长寿长江二桥钢箱梁BIM可视化模型，开发了钢箱梁吊装施工过程的监测与管理系统；周亮等^[7]通过三维模型和人机交互技术模拟了缆索吊装施工过程；郭聚富等^[8]利用BIM技术对钢桁梁进行了结构设计深化并融合进施工阶段进行数字化建设；庄珠海^[9]通过BIM技术仿真计算钢网架吊装变形量，论证优化了吊绳设置与吊点位置；Eastman等^[10]通过将预定活动，将施工过程的仿真连接到BIM3D模型，在多个细节级别生成4D模型；Ciribini等^[11]基于BIM4D模型快速生成替代场景，比较和同时查看构建不同的活动序列与速度下的方案。Chavada等^[12]分析了使用构建“调度4D可视化功能”检测工作空间之间的冲突。

上述学者已应用BIM仿真模拟技术辅助结构施工过程，提高了施工效率和精度，对传统施工方案起到了优化作用，但在钢桁梁荡移法和滑移法吊装的可视化模拟中仍需进一步提高建模和可视化技术、完善吊装方案设计与仿真、改进设备模拟与交互、提升实时仿真与交互性、加强安全评估与风险控制等方面的研究。本文综合考虑了长江水位和吊装时长限制的影响，采用Revit软件对钢桁梁进行精确的可视化3D建模，再通过Fuzor软件进行4D施工顺序模拟，通过动画对比分析不同的施工方案，提出了优化方法，且考虑了钢栈桥和停泊船等设施的布置，对荡移角度、距离等给出了定量解决方案，为项目施工缩短了工期、提高了安全性，也为BIM钢桁梁吊装模拟提供了参考。

1 工程概况

某长江大桥工程为一座上层服务城市道路交通、下层服务轨道交通的双层悬索桥。其主体结构采用单孔悬吊双塔三跨连续钢桁梁悬索桥，以确保桥梁的稳定性和承载能力。该桥的主要参数为：全长862.5m，其中北跨为67.5m，南跨为75m，而主跨则达到720m，成桥效果如图1所示。这座桥梁工程综合了多种结构设计，包括悬索桥、

混凝土箱梁、钢箱梁等，以实现双层公轨两用功能。这种综合设计旨在确保桥梁在城市交通中的高效运行，同时提供可靠结构支持，以满足不同交通工具的需求。



图1 某悬索桥效果

Fig.1 Effect of a suspension bridge

钢桁梁为正交异性钢桥面板的板桁结合钢桁梁，采用倒梯形断面，主跨区域采用横桥向 39m 宽度，边跨区采用 37m 宽度。钢桁梁全桥共分为 58 个节段，北岸过渡墩 P4 至跨中段为北 S01~北 S30 段，跨中至南岸过渡墩 P7 为南 S28~南 S01 段。节段布置如图 2 所示。

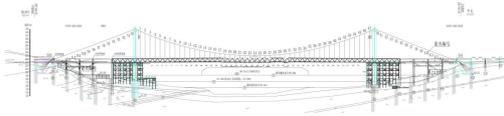


图2 钢桁梁节段布置

Fig.2 Layout of steel girder segment

在设计中，主桁架采用三角形桁架结构，高 12.7m，2 片主桁间中心距为 17.0m，具备良好的结构强度和稳定性，可应对复杂荷载条件。为了增强连接部位刚性、减小结构变形，箱形截面杆件采用了四面拼接的设计，而工字形截面杆件则考虑受力分布和整体结构的均匀性，采用双面拼接设计。为了满足设计需求，标准段的长度被设置为 15m，横断面如图 3 所示，其中钢材用量约为 440t。而在主桁中部，节段长度增至 20.5m，相应的钢材用量也增至约 661.47t。在主桁节点设计中采用了整体节点方案，以提高节点的连接强度和稳定性。节点板在索塔支座处的最大厚度达到 60mm，而最大规格则为 5 590mm×2 700mm，确保节点在各方面具备足够的承载力和结构刚度。

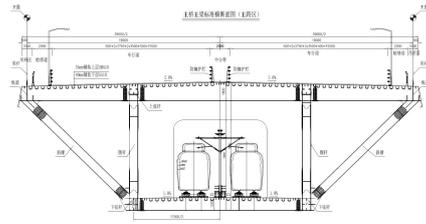


图3 主梁标准横断面

Fig.3 Standard cross section of the main girder

本工程的钢桁梁采用了一种分段预制+现场拼装的工艺流程，包括制造、运输和安装阶段。每根钢桁梁的节段主要由主桁架、上层公路桥面板和下层轨道交通桥面板组成。在同一节段内，所有构件都在工厂进行焊接连接。而节段间的连接方式有所不同，其中上、下层钢桥面板顶板和弦杆顶板采用焊接，而其他部分（如上、下层钢面板的 U 肋及板肋、弦杆腹板和底板、斜腹杆）则采用高强螺栓连接。抗风稳定板的连接则在工地上使用普通螺栓。这一工艺组合旨在实现高质量制造和简化现场安装过程。

由于钢桁梁节段自重大、桁架杆件高、幅面宽、节段重，中跨采用缆索式起重机法进行施工。在节段拼装过程中，需注意合理采用临时铰接技术，确保连接灵活性和合适时机，以便更顺利地整个桁架安装工作。边跨支架吊装钢桁梁时，采用荡移法与支架滑移法进行施工。主跨的整个节段钢桁梁通过起重机提升，荡移至支架上安装。在钢桁梁安装过程中，由于刚接时采用高强螺栓安装，控制难度较大，且需通过调整边跨钢梁位移，将合龙口尺寸调整至理论尺寸，以满足边、主跨主梁间较大间隙要求。

由于长江水位影响，冬季蓄水期成为完成钢桁梁架设时机。在桥址处，每次断航时间必须控制在 4h 内，考虑到现场水流紊乱和船只定位困难情况。在此挑战性环境下，需精确计划和协调架设工作，确保在规定时间内完成钢桁梁安装。同时，南岸梁段转运船舶需进行牵引或拖轮顶推，时间紧、任务重，因此现场施工组织难度较大。

2 桥梁 BIM 模型

继英国标准 ISO 19650 后，BIM 开发水

平、细节水平和信息水平统称为LOD (level of detail, 细节水平) [13]。明确定义了根据不同级别的属性信息对BIM的精细程度。例如, LOD200 仅包括关于“类别”的一般信息, 如结构类型、位置和近似维度; 而LOD300 则包括有关“单个构件”的许多关键特征; LOD400 的要求包括所有构件详细维度, 模型需提供完整的构建细节, 如构件大小、形状、位置、数量、方向及详细图纸、制造、组合和安装信息, 确保工程人员进行施工和安装时能准确理解与执行设计意图。

在本工程中, 基于BrIM标准的悬索桥设计要求, 对信息系统进行了明确的工作细分结构。按标准化的数据模式过程, 包括结构类型分类、库存系统、ID系统、公共数据环境的定义及信息需求级别的定义。

采用 LOD400 的模型精度要求与 BrIM 标准对桥梁信息模型的补充相匹配。在设计图纸的基础上, 本工程的设计模型对钢桁梁的每个节段进行了细致拆分。每个模型构件都具有唯一的身份识别码和相关参数信息。根据施工方案和现场施工需求, 对桥梁主体构件及施工措施进行了模型深化。最终的模型精度超过了 LOD400 级别, 如图 4 所示, 可直接用于与构件加工厂商对接, 并指导现场生产和加工。这确保了钢桁梁从设计、制作到施工安装的整个过程的精确性, 提高了工程效率, 并确保了质量和安全性。

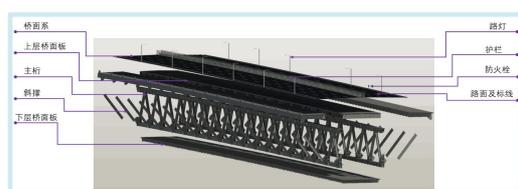


图 4 LOD400 节段模型

Fig.4 LOD400 segment model

悬索桥的钢桁梁是由多种构件组成, 对这些构件的拼装精度有极高要求。在施工过程中, 构件的位置关系和几何参数对一级施工所用设备和设施的参数都至关重要。建模的第1步是基于常规模型建立相应的样板文件, 并根据已有资料确定项目的施工计划和流程。通过依托二维图纸建立模型, 将位置关系和几何参数写入所建立的文件。通过关

联标签进一步细化模型并获得参数模板, 将模板内容写入相应数据库。

本工程 BrIM 模型按结构、土建、机电、施工 4 个专业划分, 其中结构专业对悬索桥的主要结构部件进行建模, 包括主塔、桥面、桥墩、钢桁梁、主缆、吊索、索夹。在此专业中, 需准确捕捉桥梁几何形状、结构特征和材料属性, 并确保模型的结构设计符合相关标准和规范要求。土建专业负责悬索桥的土木工程部分, 包括桥墩基础、支撑结构、路基、地形、锚碇等。土建与结构专业的建模内容有所重叠, 但土建专业更侧重于下部结构的细节和特点。机电专业对机电设备和系统进行建模, 如照明设备、通风设备、监控系统等。施工专业则负责场地、设备、钢栈桥、支架等模型。首先在 Revit 软件中建立统一坐标系, 各专业基于此坐标系同步进行模型创建, 土建专业通过勘察的地形数据和无人机倾斜摄影的点云数据在 Civil 3D 软件中建立并处理地形模型后导入 Revit 软件进行锚碇模型和基础模型建立, 结构专业依据设计图纸对上部结构进行模型创建, 其中钢桁梁部分采用 Tekla 软件进行创建, 而预应力筋部分由 Dynamo 可视化编程创建。土建和结构专业涉及大量非标构件, 因此团队通过体量和内建模型等参数化建模方式进行参数化建模, 并形成企业构件库。机电专业则根据设计图纸, 应用 Revit 软件中已有的族进行创建。施工专业的模型通过对施工方案 MIDAS Civil 软件有限元计算支架受力的模型进行数据转换为 Revit 可使用的模型, 再结合已有的成套族库进行放置。在整个项目中, 按施工步骤和工业化生产构件的思路, 将整体桥梁模型细分为各构件。将现场记录的施工数据和台账逐一录入这些细分构件, 以便实时查阅相关部位的施工信息, 为项目的顺利进行创造条件。

在设计和生产制造阶段, 根据建筑信息模型进行施工阶段的深化设计。将 BIM 精细化模型与实际的施工进度和组织设计相结合, 以实现实时更新 BIM 模型并进行专门的施工方案模拟。在施工过程中, 逐步完善建筑信息模型的安装信息。最终, 将悬索

桥各构件的空间信息、桥梁使用的设备信息、施工过程中的信息整合录入，形成一个全面的、完整的、综合的项目竣工模型，如图 5 所示。该竣工模型集成了项目施工阶段的管理过程信息，为电子化竣工交付和运维阶段的 BIM 应用提供了坚实的数据基础，为未来悬索桥的维护、管理工作提供参考。



图 5 模型信息录入

Fig.5 Model information entry

3 BIM 钢桁梁吊装模拟

吊装钢桁梁是悬索桥施工中的关键工序之一。在本工程中，根据设计方案，钢桁梁采用 Z 字形设计，这种结构提高了整体稳定性和承载力，同时减小了自重，但在吊装过程中会出现位置交错问题。另外，合龙段受水位、Z 字形节段、边跨支架限制等因素影响导致合龙过程复杂，需综合考虑多个因素。最后，采用荡移法进行吊装时可能存在的问题。

针对这些难题，采用 BIM 精确建模和施工模拟是一种有效的解决方法。它能优化施工方案，确保施工安全与工期。基于 BIM 技术和三维仿真模拟分析，可建立实际施工现场的三维模型，采用数据采集与边缘智能关联实现施工现场控制信号的驱动系统中的三维可视化模型动态仿真。基于已有的精细化 BIM 模型，模拟过程中还需使用的关键技术参数包括跨缆吊机、水位和运输船。跨缆吊机和水位的关键技术参数如表 1、图 6 所示。所使用的运输船总长 112m、宽 23.1m，空载吃水 1.388m，满载吃水 2.8m。

表 1 单台跨缆吊机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of single cross-cable crane

项目名称	参数
缆索式起重机整体提	800t

升能力（含吊具）	
提升千斤顶	2×400t
牵引千斤顶	2×100t
负载转换顶	8×80t
主缆中心距	38m
临时吊点中心线与主缆中心线间距	3m
平均提升速度	30m/h
平均行走度	30m/h
动力收线装置容绳量	200m
最大自重（不含吊具）	256.2t
最大主缆水平倾角	30°
最大荡移角度	15°
行走机构最大跨索夹能力	3 800mm×220mm(索夹长度×主缆到索夹顶点高度)
动力源总功率	2×97kW
最低工作温度	-10℃
工作状态最大风速	25m/s(起重机平面处于 3s 阵风)
非工作状态最大风速	55m/s(起重机平面处于 3s 阵风)
防护等级	IP55

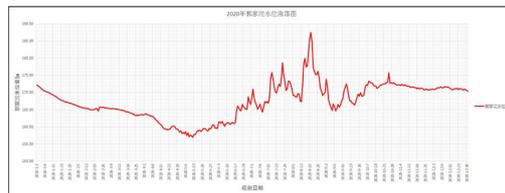


图 6 水位涨落

Fig.6 Water-level fluctuation

在钢桁梁吊装前，结合施工现场条件、钢桁梁类型、机械设备吊装能力及钢桁梁安放位置，进行施工吊装虚拟仿真模拟和对比分析。此过程有助于确定最佳吊运方法和顺序及临时支撑设置等。同时，现场作业人员可借助调试主机进行虚实结合的操作训练，确保吊装施工安全且精准到位。

这种基于 BIM 技术的精确建模和仿真分析能在实际施工前预见潜在问题，并通过模拟找到最优解决方案，从而提高施工效率、保障安全，同时也降低了成本和缩短了时间。

4.1 主跨深水区梁段吊装

通过可视化编程进行参数化建模，自动计算每个节段的重心位置，如图 7 所示，确定重点顺桥向、横桥向和高差的位置数据，可确定本桥节段左、右 2 吊耳不通过节段重心，吊装到位后及时完成与吊索间销接。因此，在缆索式起重机卸力前须先完成吊装节段与已吊装节段的临时铰接，采用在上弦杆设置临时铰接、下弦杆断开的连接方式，后续中跨钢桁梁 S07~S30 梁段从中间往两边按监控指令依次刚接。

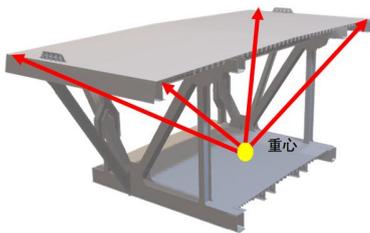


图 7 钢桁梁重心位置

Fig.7 The center of gravity position of steel truss girder

钢桁梁吊装过程中其线形将从开始时的“凹”形慢慢转变为“凸”形，在钢桁梁线形平顺时，依据监控指令按从跨中向两侧顺序依次拆除临时连接，进行梁段永久连接，同时进行桥面板节段间全断面焊接，逐步完成较固转换。

深水区采用垂直起吊的节段为 S11~S30。BIM 施工模拟如图 8 所示，在 S26~S29 节段的钢桁梁吊装过程中，面临的一个挑战是主缆长度相对较短，导致荡移角度 $>15^\circ$ ，进而使得起重机荡移的安全角度达到 550t 缆载上限，只能采用垂直起吊；钢桁梁 S26~S29 节段吊装时，垂直起吊斜腹杆和下弦杆会产生碰撞，已安装的梁段斜腹杆会挡住吊装梁段的上升路线，交错部分长 1.94m；S11 节段安装后，采用荡移法起吊的无水（浅水）区 S01~S07 节段有缺少足够施工空间的风险。

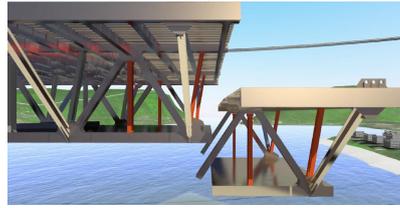


图 8 BIM 跨中节段吊装碰撞检测

Fig.8 Hoisting collision detection in BIM mid-span section

根据推演结果进行施工方案优化，施工顺序调整为：S30~S10→S01~S06→S11→S08~S10→S07（合龙段），即跨中节段 S11 需在边跨 S01~S06 节段移动到位后再垂直吊装；通过拆斜腹杆方式将待安装斜腹杆临时固定在主桁架下桥面板上，随着吊装梁段一起起吊至既定位置，待节段拼装完毕后再进行斜腹杆安装；安装时，在斜腹杆下布置 2 个四氟板滑动支座，将斜腹杆滑移至待安装节间，荡移距离缩小至 15cm，垂直起吊过程更安全，如图 9 所示。

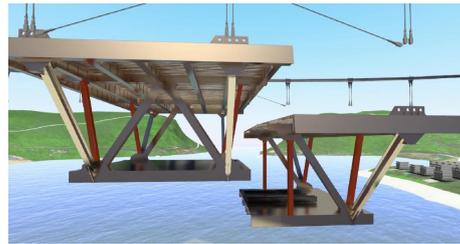


图 9 BIM 模拟优化后吊装方案

Fig.9 Hoisting scheme after BIM simulation optimization

4.2 边跨梁段吊装

钢桁架支架靠长江侧延伸距离根据吊装时水位和合龙段位置确立，北岸边跨梁段包含 S01~S06 节段、浅水区段 S07~S10 节段。北岸边跨及浅水区吊装顺序为：S01~S06→S08~S09→S07（合龙段）。其中，S02 节段共 20.8m、重 661t，分成 2 段制造和安装，先吊装 S02 支座节段，再吊装 S02 标准节段，到达设计位后再在节段板处进行栓接和焊接；S03~S10 标准节段长 15m。

通过模型反复推演，由于一次荡移高度超过规定，需增加一级平台，通过高矮栈桥结合、2 次荡移的方式完成吊装，如图 10 所示。第 1 次首先由运输船荡移到栈桥，然后由运输船荡移到矮栈桥，后采用引桥卷扬

机牵引就位；第 2 次移动缆索式起重机荡移至高栈桥，最后采用引桥卷扬机牵引就位。

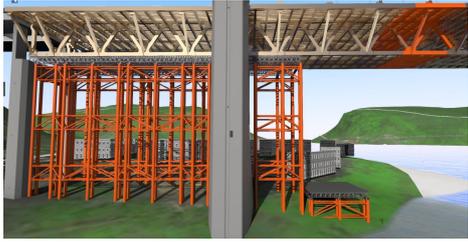


图 10 BIM 模拟北岸两级边跨滑移支架
Fig.10 Two-stage side-span sliding supports on the north shore by BIM simulation

从驳船上吊装 S02 节段至矮栈桥上，荡移角度 11.8°，采用 10t 卷扬机水平牵引，移动长度 27m，缆索式起重机行走至对应吊装位置，抱箍夹紧索夹主缆，起吊 S02 节段至高栈桥上，提升高度约 43m，荡移角度 14.2°，完成第 2 次荡移作业；通过滑道梁进行液压滑移装置水平滑移，滑移至 P4 墩，为满足后期合龙段安装，S02~S7 节段往 P4 墩移动 30~50cm；待 S10，S09，S08 节段依次吊装完成后，S07 节段滑移与 S08 节段刚接；S06 节段先与 S07 节段初步对接，待 S01~S05 与 S06 节段连接成整体后，调整 S06 节段与 S07 节段刚接合龙。

南岸边跨梁段包含 S01~S07 节段，均为标准节段，浅水区段 S07 节段，各节段通过栈桥荡移的方式完成吊装，到达设计位后再在节段板处进行栓接和焊接；南岸边跨及浅水区吊装顺序为：S01~S06→S07（合龙段），BIM 模拟推演如图 11 所示。

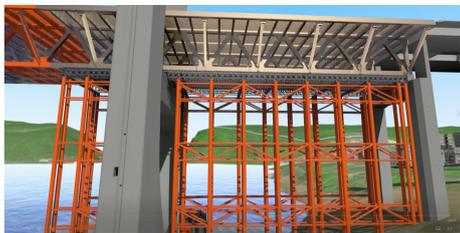


图 11 BIM 模拟南岸边跨滑移支架
Fig.11 South bank side span sliding support by BIM simulation

经过 BIM 模型模拟，详细计算起吊位置和吊绳偏摆角，施工方案调整为：S07 节段合龙时，S07，S08，S09 节段均有干涉，

钢桁梁仅有 15m 空间合龙，限制较大，S08，S09 节段斜腹杆均需拆除，如图 12 所示；南岸南侧可减少 2 排支架钻孔灌注桩，从运输船上起吊节段，荡移到栈桥，后采用引桥卷扬机牵引就位；运输驳船到达指定位置精确定位，吊装 S01 节段至栈桥上，荡移角度 13.4°，在 H 型钢上设置反力架，通过液压滑移桩基在滑道上进行水平滑移，采用 10t 卷扬机水平牵引至桥墩，移动长度 88.9m；由于合龙受温度影响较大，现场合龙施工时间较短，S01~S07 节段需往跨中移动 30~50cm；合龙段安装后，再将边跨段回移到设计位置。



图 12 BIM 模拟发现合龙段斜腹杆碰撞
Fig.12 Collision of oblique web rod in closure section in BIM simulation

4 结语

本文以某大跨悬索桥钢桁梁为研究对象，精细化、参数化、可视化建立从设计阶段到施工阶段的深化 BIM 模型，对原技术方案中钢桁梁吊装形式进行绘制并进行动画模拟，发现原技术方案中垂直起吊时缺少足够的施工空间、钢桁斜腹杆会产生碰撞、荡移角度超过允许范围、荡移高度不足、合龙段空间过大、滑移支架灌注桩设置过多等问题，通过优化，确定了更合理的垂直吊装和荡移施工顺序，北岸增加了一级滑移平台，南岸减少了 2 排灌注桩，确定了斜腹杆拆装起吊方式、合龙段偏移距离，保证了蓄水期施工的充足工期，最终制订了高效可行的专项方案，通过 BIM 技术已顺利指导项目现场吊装。相对于传统方式，本吊装方案通过 BIM 技术进行提前模拟和优化，使得现场进度、质量、安全管理得到有效控制，提高施工作业水平，规避传统吊装作业中的弊端，在助力轨道悬索桥施工技术领域建设

方面发挥积极作用。

参考文献:

[1] 严国敏. 现代悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

YAN G M.Modern suspension bridges [M] Beijing: China Communications Press, 2002.

[2] International Organization for Standardization.Industry foundation classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries:ISO 16739-1:2018[S]. 2018.

[3] BARTHOLOMEW M,BLASSEN B,KOC A. Bridge information modeling (BrIM) using open parametric objects[R]. 2015.

[4] 曾远,古佩胜,卢俊,等.基于 BIM 技术的大跨公轨两用悬索桥施工管理平台研发与应用[J].施工技术(中英文),2022,51(11):37-41.

ZENG Y, GU P S, LU J, et al. Development and application of a construction management platform for large-span public rail dual-use suspension bridges based on BIM technology [J]. Construction technology , 2022, 51(11): 37-41.

[5] 彭强,王奇锐.大跨径钢桁梁悬索桥加劲梁吊装过程的关键技术研究[J].公路,2020,65(12):1-5.

PENG Q, WANG Q R. Key Technology research on the lifting process of stiffening beams in long span steel truss suspension bridges [J]. Highway, 2020, 65(12): 1-5.

[6] 张勇.重庆长寿长江二桥钢箱梁吊装关键技术[J].世界桥梁,2023,51(2):34-38.

ZHANG Y. Key technology for lifting steel box girders of Chongqing Changshou Yangtze River Second Bridge [J]. World bridges, 2023, 51(2): 34-38.

[7] 周亮,陈茂林,邱治国.BIM 技术在钢箱梁缆索吊装中的应用研究[J].重庆建筑,2023,22(6):45-48.

ZHOU L, CHEN M L, QIU Z G.Research on the application of BIM technology in cable hoisting of steel box girders [J]. Chongqing architecture, 2023, 22(6): 45-48.

[8] 郭聚富,任有保.BIM 技术在跨海大桥设计与施工中的应用研究[J].铁道建筑技术,2023(5):85-89.

GUO J F, REN Y B.Research on the application of BIM technology in the design and construction of cross sea bridges [J].

Railway construction technology, 2023(5): 85-89.

[9] 庄珠海.BIM 技术在某改造项目中的吊装应用[J].山西建筑,2023,49(17):127-129.

ZHUANG Z H.The application of BIM technology in the hoisting of a renovation project [J]. Shanxi architecture, 2023, 49(17): 127-129.

[10] EASTMAN C, TEICHOLZ P, SACKS R, et al. BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors[M]. USA: :John Wiley & Sons, Inc., 2011.

[11] CIRIBINI A L C, MASTROLEMBO VENTURA S, PANERONI M. Implementation of an interoperable process to optimize design and construction phases of a residential building: a BIM pilot project[J]. Autom. Constr., 2016, 71: 62-73.

[12] CHAVADA R, DAWOOD N, KASSEM M. Construction workspace management: the development and application of a novel nD planning approach and tool[J]. J. Inf. Technol. Constr., 2012, 17: 213-236.

[13] International Organization for Standardization.Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — information management using building information modelling:ISO 19650:2018[S]. 2018.
