

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.02.022

## BIM 技术在钢—混组合连续梁桥顶推施工中的应用\*

王金国<sup>1</sup>, 任晚晚<sup>2</sup>, 丛培<sup>3</sup>, 彭学军<sup>3</sup>, 鲁新<sup>3</sup>

(1.宁夏交投工程建设管理有限公司, 宁夏 银川 750000; 2.长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114; 3.中铁五局集团 第一工程有限责任公司, 湖南 长沙 410117)

**摘要:**桥梁工程建设环境复杂,传统施工工艺、施工方法越来越难以满足现代施工质量管理要求。文中以乌玛(乌海—玛沁)公路宁夏段(青铜峡—中卫)镇罗黄河特大桥为背景,研究 BIM(建筑信息模型)技术在钢—混组合连续梁桥顶推施工中的应用,阐述基于 BIM 技术的钢筋与钢构件智能加工技术、基于 BIM 和 3D 扫描技术的半成品构件的智能复核及质量控制方法、基于 BIM 技术的钢箱梁顶推施工方案设计及全过程监控等关键技术及其应用。

**关键词:**桥梁;钢—混组合连续梁桥;BIM(建筑信息模型);顶推施工

**中图分类号:**U445.462

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2023)02-0098-05

钢—混组合连续梁桥以其结构刚度大、桥面变形小、跨越能力强、工程造价低、线形美观等特点在中国桥梁建设中得到广泛应用。无论是作为城市立交桥、公路/铁路桥,还是作为山区高架栈桥,甚至是跨江跨海大桥,钢—混组合连续梁桥都是富有竞争力的桥型<sup>[1-2]</sup>。箱形截面具有较大的抗弯和抗扭刚度,且承受偏载时受力分布均匀,能有效抵抗正弯矩和负弯矩,增强桥梁施工与使用过程中的稳定性;箱形截面有利于预应力钢筋空间布置,充分利用截面,有效降低成本;箱梁具有良好的空间适用性,适用于截面宽度较大的桥梁,也适用于曲线桥<sup>[3]</sup>;箱梁具备较厚的混凝土底板,满足现代施工工艺(如顶推法)要求。因此,钢—混组合连续梁桥的截面大多采用箱形<sup>[4]</sup>。顶推施工法具有安全、经济、快速、优质、不需要支架、无干扰、占用场地少等优点,但在顶推过程中钢—混组合连续梁桥存在非匀质材料的不稳定特性,温度、湿度、时间等环境因素的不确定性,支座与主梁相对位置不断变化导致的主梁内力及变形不断变化,导致各节段的位移和内力随着施工过程的变化产生一定偏差,各节段偏差的累积会使桥梁线形偏离设计值,必须全面、严格地对整个桥梁施工过程进行控制,使实际施工状态尽可能贴近设计值<sup>[5-6]</sup>。

乌玛(乌海—玛沁)公路宁夏段(青铜峡—中卫)是贯穿宁夏中北部地区黄河西岸、贺兰山东麓的南

北交通主干线,工程安全质量要求高,科技示范引领效益显著,传统施工工艺、施工方法难以满足现代施工安全质量管理要求。该项目通过融合云计算、大数据、物联网等技术,研发基于 BIM(建筑信息模型)的数字化模型,通过提前模拟整个工程建造过程规避各类施工难题,复核各类工程清单,改善施工工艺,提高工程安全质量水平,实现工程产品全生命周期整体可控<sup>[7-8]</sup>。

## 1 工程概况

乌玛公路(宁夏境)青铜峡—中卫段工程第 A7 标段的路线起点(LK5+540)位于滨河大道北侧 380 m,于 LK6+324 处设置镇罗黄河特大桥跨越黄河,之后向南偏东先后跨越第九排水沟、七星渠、第六排水沟,穿越秦家下庄与徐庄村之间的农田后转向南,终点(LK9+625.781)以永康枢纽立交与定武(定边—武威)高速公路相接(桩号 K220+853),路线全长 4.086 km。

该标段内控制性工程为镇罗黄河特大桥,其起始桩号为 LK5+679,终点桩号为 LK6+968,全长 1 289m。孔跨布置为 3×40 m 引桥+(40+40+75+40) m 跨堤桥+(55+6×90+55) m 主桥+(40+40+75+40) m 跨堤桥+3×40 m 引桥,上部结构采用钢—混组合梁,下部结构为矩形实心片墩、钻孔灌注桩基础,采用肋板式桥台。

\* 基金项目:中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2020—重大专项—04—06)

## 2 BIM 技术应用

### 2.1 基于 BIM 技术的钢筋与钢构件智能加工方法

基于 BIM 技术对钢筋、钢构件进行智能加工,对焊接设备或原有设备进行智能化审计,最大程度保证构件精度和质量,基本消除各环节人为因素的影响,实现工程实体产品的 3D 打印。

#### 2.1.1 钢筋和钢构件的 BIM 建模

镇罗黄河特大桥为钢—混组合结构,上部结构钢箱梁复杂多变,种类繁多,对加工进度和精度要求高,且各节段的组成板互相不适用,容易因加工尺寸不准确导致材料浪费。采用基于 BIM 技术的钢筋与钢构件建模方法,采用如下方法在三维阶段提前规避这类问题:

(1) 在 BIM 建模阶段,对设计图纸进行审核,将桥梁中各类跨径的钢箱梁分开绘制,分配至 BIM 小组成员,分工协作。

(2) BIM 建模人员根据任务划分,对每跨箱梁分节段绘制,命名规则与设计图纸保持一致(镇罗黄河大桥—主桥—55 m 跨—A 节段、N1 钢筋、N2 钢板)。

(3) 各节段模型采用嵌套族形式绘制,每块钢板采用构件大样图形式绘制,通常采用拉伸、空心剪切等命令完成绘制。在常规模型中对节段模型、钢板模型进行集成,形成钢箱梁模型。

(4) 为保证结构物的完整,按先整体后局部、先外侧板再肋板最后横隔板的方式逐一添加板件,完成钢构件的 BIM 模型(见图 1)。

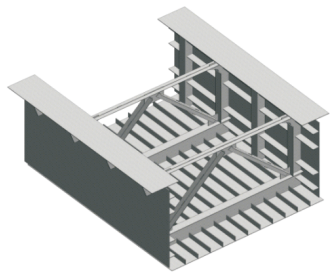


图 1 BIM 钢箱梁模型

#### 2.1.2 基于 BIM 模型的钢筋和钢构件工程量复核

在项目开展前,收集 BIM 相关规范,采用最新 BIM 行业规范制定统一的建模标准。建模阶段对结构尺寸进行约束,并设置共享参数(包括长、宽、高、密度、质量等)。在工程数量复核阶段,提取相关参数的字段,对字段通过分类组合出具明细表,方

便、快捷、准确地提取钢箱梁中钢材数量,并与设计图纸工程数量进行复核。

#### 2.1.3 基于 BIM 模型的数控钢筋和钢构件加工

基于 BIM 技术的模型精度决定最终加工质量。通过 BIM 技术对各节段进行分解,以树状图形式呈现至数控机床。将整体模型分解成若干块小板件,并以预先设定的名字分配至树状图下方流程框中,流程框中的模型尺寸与建模时所用各板块族一一对应。由于软件存在一定局限,对分解后的加工模型(树状图中流程框模型)尺寸与设计图纸进行复核,确保分解的正确性。

通过 BIM 模型的数据交互功能(通用的三维图形格式 IFC、OBJ、FBX 等),导入数控机床电脑控制系统,机床根据分解后的加工模型自动切割、焊接,批量、准确加工和组装各类构件,快捷、高效地完成预制构件加工,实现工程实体产品的 3D 打印(见图 2)。



图 2 钢箱梁智能加工

### 2.2 基于 BIM 与 3D 扫描技术的半成品构件智能复核及质量控制

将 BIM 技术集成在高精度的 3D 数字扫描设备中,通过提取实体构件的点云信息,将其与设计数字模型进行全角度比对,从而实时对精度要求高的精密构件进行复核,保证加工、焊接质量。

#### 2.2.1 3D 扫描模型建立

工厂化生成加工的构件大多属于标准构件,与理论模型一致。但随着加工数量的增加,机械设在反复高强度移动、转动过程中出现磨损,当磨损超过一定量时,会导致加工的构件出现尺寸偏差,在后期拼接中出现错缝、开缝等现象,严重影响钢箱梁的加工质量。同时钢箱梁在存放、运输、吊装过程中也易因受力不均匀而出现轻微变形。为保证钢箱梁在最终吊装时与理论模型一致,采用 3D 扫描仪对实物进行全方位扫描。3D 扫描仪通过获取某一视角中的点云坐标,将其转化成面片式模型,调整角度,再对钢箱梁进行扫描(需保证相邻两视角重叠或相

似部位面积占整个视角面积的 25% 或相邻两视角之间含有相同的 2~3 个特殊测量标记,便于两个视角的模型自动拼接),最后使用 Cyclone REGISTER 360 软件整合点云数据,形成整个钢箱梁实物模型(见图 3)。模型精度取决于 3D 扫描仪的测量精度。该项目采用的 3D 扫描仪的精度在最差情况(10 m, 14% 反射率)下能控制在 0.5 mm 以内,50 m 精度能控制在 3 mm 以内。



图 3 钢箱梁

### 2.2.2 BIM 模型与 3D 扫描模型偏差分析

在三维实物点云模型中,构件可作为一个实体模型,将标识构件的表面作为拟合特征面,一组特征面包含 X、Y、Z 3 个方向的平面,并将点云模型与 BIM 模型进行拟合。根据钢结构构件加工精度要求设置容许偏差,拟合后对加工精度不满足要求的位置显示为云彩图,有针对性地采取措施对不合格位置进行纠偏。通过使用该技术,该项目所有钢箱梁在顶推完成后严丝合缝,外观质量较好,安装质量可靠。

## 2.3 基于 BIM 技术的钢箱梁顶推施工方法

通过 BIM 技术对钢—混组合梁顶推工艺进行建模,确定步履式千斤顶布设及临时支墩结构,并对顶推过程进行全方位监控,得出监控数据及顶推过程钢梁应力变化,确保成桥质量。

### 2.3.1 基于 BIM 技术的钢箱梁建模

钢箱梁顶推过程中 BIM 建模主要根据不同时间段实际施工所需构件进行,钢箱梁及桥墩在成桥建模过程中完成,箱梁以节段形式单独存在,导梁结构根据设计图纸作为整体构件或结构成组存在于模型中,便于后期选择使用(见图 4、图 5)。

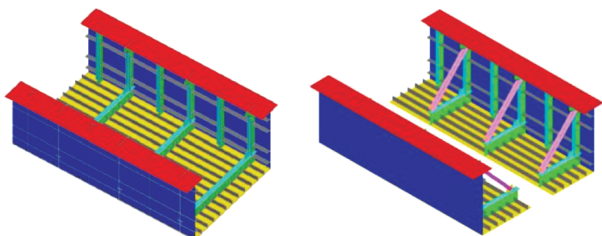


图 4 钢箱梁模型



图 5 导梁结构

### 2.3.2 基于 BIM 模型的顶推施工监控系统开发

钢箱梁顶推过程中需随时对其顶推形态进行监控,防止后期变化过大造成无法挽回的损失。主要通过布置各类传感器及摄像头实现钢箱梁顶推施工过程监控,主要监控位移及应力应变,包括平面位置、受力情况变化。

智能顶推系统采用电脑控制,同步顶推,保证顶推施工质量。智能顶推系统包括智能三维千斤顶液压系统、智能三维千斤顶电控系统。在智能三维千斤顶液压系统中,液压泵站为油缸提供动力,根据主控计算机的指令,执行规定动作。智能三维千斤顶电控系统的主控单元由西门子 S7-300 PLC、开关量扩展模块 EM222 和模拟量扩展模块 EM231、西门子触摸屏组成(见图 6、图 7)。



图 6 液压顶升系统及智能纠偏

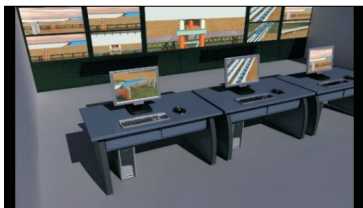


图 7 顶推施工监控操控室

### 2.3.3 顶推施工方案优化

镇罗黄河特大桥全桥位于竖曲线上,0#~10#墩区域的竖向线形为+2.7%纵坡,10#~22#墩区域的竖向线形为-1.9%纵坡,交点倒圆曲线半径为 18 695.652 m,主桥两端与中间最高处最大高差为 2 787 mm,形成人字坡。钢箱梁顶推至变坡点时存在较大幅度上扬,导致后续箱梁因重力影响自然下沉,钢箱梁出现应力集中现象,危及施工安全。为

此,将钢箱梁按设计预拱度整体上抬 20 mm,以钢箱梁顶推过永久墩为标准,增加临时墩并增大拼装支架高度、落梁高度,通过增减垫块高度实现主桥箱

梁纵坡调整(见表 1、图 8)。顶推完成后,利用三向步履式千斤顶对全桥主梁进行线形调整,使其符合设计及预拱度要求,完美落梁。

表 1 钢箱梁抄垫高度

步骤	顶推距离	临时墩及永久墩顶推抄垫尺寸/mm														
		临时墩 8	永久墩 8	临时墩 7	永久墩 9	临时墩 6	永久墩 10	临时墩 5	永久墩 11	临时墩 4	永久墩 12	临时墩 3	永久墩 13	临时墩 2	永久墩 14	临时墩 1
步骤 1	第一次 48 m 箱梁与导梁衔接	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0
步骤 2	顶推 10 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0
步骤 3	顶推 20 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	208	0	0
步骤 4	钢梁第二次接长 16 m,顶推 30 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	149	0	0
步骤 5	顶推 40 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	
步骤 6	顶推 50 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	
步骤 7	顶推 50 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	
步骤 8	第三次接长 10 m,顶推 70 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	518	0	79	0
步骤 9	顶推 80 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	478	0	0	
步骤 10	顶推 90 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	314	0	0	
步骤 11	顶推 50 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	158	0	0	
步骤 12	第四次接长 50 m,顶推 110 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	356	2	0	120	0
步骤 13	顶推 20 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	220	0	32	70	0
步骤 14	顶推 30 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	83	0	33	0	
步骤 15	顶推 40 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	37	89	0	
步骤 16	顶推 50 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	64	13	0	
步骤 17	第五次接长 40 m,顶推 160 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	462	0	109	2	49	0
步骤 18	顶推 70 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	297	0	165	0	131	
步骤 19	顶推 80 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	124	0	182	0	167	
步骤 20	顶推 95 m	—	—	—	—	—	—	—	—	—	46	0	123	0	130	
步骤 21	第六次接长 50 m,顶推 200 m	—	—	—	—	—	—	—	—	402	20	0	100	11	122	0
步骤 22	顶推 210 m	—	—	—	—	—	—	—	—	228	0	24	52	23	66	0
步骤 23	顶推 220 m	—	—	—	—	—	—	—	—	79	0	35	5	13	0	
步骤 24	顶推 230 m	—	—	—	—	—	—	—	—	0	43	35	15	23	0	
步骤 25	顶推 240 m	—	—	—	—	—	—	—	—	0	76	37	34	0	14	
步骤 26	第七次接长 40 m,顶推 250 m	—	—	—	—	—	—	—	449	0	123	25	67	0	76	35
步骤 27	顶推 260 m	—	—	—	—	—	—	—	294	0	169	14	140	0	135	
步骤 28	顶推 270 m	—	—	—	—	—	—	—	124	0	182	1	185	0	170	
步骤 29	顶推 280 m	—	—	—	—	—	—	—	73	0	149	0	139	0	148	
步骤 30	顶推 295 m	—	—	—	—	—	—	—	52	0	117	0	109	0	116	
步骤 31	第八次接长 50 m,顶推 300 m	—	—	—	—	—	—	412	25	0	85	0	105	24	168	0





图8 钢箱梁现场抄垫情况

### 3 结语

镇罗黄河特大桥主跨全长 650 m, 孔径布置为 55 m+6×90 m+55 m, 钢梁形式为开口式 U 形钢梁, 梁高由边墩处 2 m 变化为跨中 4 m, 对多点步履式顶推协调要求极高, 且顶推过程中各点线形控制难度较大。

通过引入 BIM 技术, 将顶推全过程工序分解后进行精细化建模模拟, 同时将力学监控+视频监控融合, 全过程对钢梁进行线形及力学监控, 逐帧进行对比分析, 及时调整力学及线形姿态, 确保施工线形与设计线形一致。

### 参考文献:

- [1] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [2] 徐岳, 邹存俊, 张丽芳, 等. 连续梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [3] 郭金琼. 箱形梁设计理论[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [4] 卜建清, 严战友. 道路桥梁工程施工[M]. 2 版. 重庆: 重庆大学出版社, 2014.
- [5] 许信. 大跨度转体悬臂施工铁路梁桥施工监控及其关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [6] 方美平, 陈欣韵, 王旭燚, 等. 不对称小半径曲线连续刚构桥合龙顶推效应分析[J]. 公路与汽运, 2021(3): 114—118.
- [7] 杨晓华, 胡海波, 许俊德, 等. 基于 BIM 的多塔斜拉桥管养信息化技术研究[J]. 公路与汽运, 2022(3): 167—169+174.
- [8] 张轶群. BIM 技术在桥梁工程设计中的应用[J]. 四川建材, 2021(12): 92—93.

收稿日期: 2022-04-10

\*\*\*\*\*

(上接第 97 页)

(2) 理想约束状态下该桥临界荷载系数为 1.374, 正常边界条件下临界荷载系数为 1.138, 正常边界条件下临界荷载系数为理想模型的 82.8%, 理想模型的计算结果与实际结果偏差较大, 若采用理想模型分析, 桥梁的横向稳定性会偏于不安全。

(3) 随着腹杆横向刚度的增加, 实际模型与理想模型的临界荷载系数比值呈下降趋势, 横向位移比值呈略微上升趋势, 说明随着腹杆横向刚度的增加, 腹杆横向刚度对临界荷载系数的影响逐渐减小。随着上弦杆宽跨比的增加, 实际模型与理想模型的临界荷载系数比值及横向位移比值均呈上升趋势, 说明随着上弦杆宽跨比的增加, 上弦杆宽跨比对临界荷载系数和横向位移的影响逐渐增强。上弦杆宽跨比对半穿式桁架桥整体横向稳定性的影响大于腹杆横向刚度的影响, 横向稳定性计算中应着重关注上弦杆宽跨比。

### 参考文献:

- [1] 何丕壮. 桥梁美学(桥梁工程专业用)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [2] 顾安邦, 范立础. 桥梁工程(下)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

- [3] 吴冲. 现代钢桥(上册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [4] 岳子翔, 温庆杰, 卓涛. 半开式桁架桥结构稳定性分析[J]. 工程力学, 2018, 35(增刊 1): 270—277.
- [5] 岳子翔. 半开式桁架桥平面外稳定性能与抗扭特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [6] 宋宁, 尹越, 邓楠. 铝合金桁架步行桥设计及侧向稳定性分析[J]. 沈阳理工大学学报, 2011, 30(4): 87—90.
- [7] 温庆杰, 岳子翔, 周牧, 等. 半开式桁架桥上弦杆平面外屈曲临界力研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 104—109.
- [8] 尚晓江, 肖从真, 张莉若. 无侧向支撑桁架弦杆出平面计算长度的探讨[J]. 建筑结构, 2008, 38(6): 93—95+98.
- [9] 王达, 姚型龙, 严伟飞, 等. 中承式提篮拱桥拱肋最优内倾角取值影响分析[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(4): 60—64+71.
- [10] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院. 公路钢管混凝土拱桥设计规范: JTG/T D65-06-2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

收稿日期: 2021-05-09