

[文章编号] 1003-4684(2020)05-0102-05

复杂钢桁拱桥全参数化建模方法

邓 捷¹, 石峻峰¹, 王 波², 赵训刚²

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034)

[摘 要] 钢桁拱桥结构形式复杂、节点类型众多的特点,给传统参数化建模工作带来了极大的困扰。复杂钢桁拱桥梁的建模一直是 BIM 模型中难题。结合模型全参数化概念,从数据层、逻辑层、模型层三个层面依次建立模型,针对桥梁特点,详细论述全参数化模型建模过程,即采用“B-Rep 法”完成构件型建立,通过“R+GH+TS”协同设计平台完成构件体合模,完成数据与模型的结合,提高了全桥模型精度,解决了后期修模困难的问题,并结合江汉七桥项目实现了模型更高精度的实际应用,为同类桥梁的全参数化建模提供参考。

[关键词] 钢桁拱桥; 全参数化; BIM 建模; 桥梁结构; 建模方法

[中图分类号] U442.5 [文献标识码] A

我国基础设施建设水平不断提高,在桥梁工程结构形式复杂程度与施工难度普遍增加的挑战下,建筑信息模型(BIM)的信息化优势已为桥梁工程带来设计和施工水平的提高。近年来 BIM 参数化建模技术不断推动桥梁信息化模型的开拓与创新,但现如今在复杂钢桁拱桥建模应用中依然存在“参数化容易,全参数化难”的实际问题。

在已有相关文献中,孙建诚等^[1]、赵伟兰等^[2]通过 Autodesk 公司产品 Revit 软件,使用桥梁三维参数化方法,解决了多跨混凝土桥与互通立交桥建模问题;郝蕊等^[3]通过 CityEngine 软件与 CGA 规则结合,依据参数化驱动模型方法,完成铁路桥梁三维模型的构建;王茹等^[4]运用 Dynamo 插件对公路立交复杂桥体进行建模研究,提高建模效率。

以上文献中建模方法局限于参数化建模,模型精度停留在 LOD100-300 阶段,在此阶段模型仅能进行三维展示与方案设计方面的应用,而构件精细尺寸的技术需求与施工方案推演的应用需求均难以完成,此类参数化建模手段完成的模型仍需后期大量人工合模,作为达到竣工交付和运营维护的模型要求相差甚远。因此,这里提出全参数化概念,利用“B-Rep”建模方法以及“R+GH+TS”协同设计平台对复杂钢桁拱桥建立 LOD500 全参数化信息模型,解决复杂构件建模难、模型协同实际应用难、后期修改模型难等问题,提升设计效率,降低施工成本,实现模型从设计到施工全方位应用。

1 模型全参数化方法

现有参数化方法形成的模型存在 LOD 等级低、复杂构件建模难、模型协同应用难等实际问题,这里提出 BIM 模型全参数化概念,以数据层、逻辑层、模型层三个层面,通过边界表示法构建板形,结合协同设计平台全方位建立三维模型,并达到 LOD500 模型交付程度,实现 4D 模拟、输出构件清单表、查询构件吊装重心等实际应用。

1.1 全参数化概述

全参数化(Fully Parametric)是参数化(Parametric)概念的延申,自 20 世纪 60 年代起参数化建模概念被应用到数字化行业的各种领域^[5],至今参数化概念中逻辑与关联的特性使得形体与数据之间产生联系,并由数据驱动模型^[6];传统参数化方法常用来解决某异形构件特殊形体的建模问题,普遍使用构件结构参数而非利用空间几何数学关系建立模型,孤立模型信息中各构件之间的关联性,且在 BIM 技术领域,传统参数化难以满足其信息量大、数据关联性强的模型要求。在复杂钢桁拱桥中,传统参数化需逐步完成钢桁拱结构中各单一节点建模,并参考工序依次完成节点的拼接与合模,工作效率低且后期修改难度大;而全参数化基于图纸整体数据,分析模型中空间逻辑关系以及控制点定位关系,分类建立数学模型以适应各零件之间的数学联系与映射,提高模型数据性与关联性,通过其数据接

[收稿日期] 2020-05-08

[基金项目] 桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放项目(BHSL18-03-KF)

[第一作者] 邓 捷(1996-),男,湖北鄂州人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为桥梁结构,BIM 技术

[通信作者] 石峻峰(1974-),男,工学博士,湖北工业大学讲师,研究方向为损伤断裂力学,结构工程,BIM 技术,虚拟现实

口的连接提高了模型的协同性,实现高精度高效率数字化建模(表 1)。

表 1 传统参数化与全参数化对比

概念	特点	具体问题
传统参数化	局限性	导入模型信息丢失、模型协同效率低
	单一性	建模过程繁琐,重复性工作多,模型后处理困难
	准确性	LOD 级别 100—300,人工合模准确性有待提高
全参数化	关联性	参数关联全桥模型,数据列表即修改模型参数
	协同性	模型平台接入参数化,协同效率高
	数据性	保留核心数据与逻辑关系文件即可保留模型

1.2 “B-Rep”法编译模型

在解决全参数化模型问题的过程中,软件开发者基于 Rhino-GH 插件,普遍使用“构造几何实体法”(Constructive Solid Geometry ,CSG)和“边界表示法”(Boundary Representation ,BR)构建模型^[7]。其中全参数化建模基于数据层提取各构件参数信息,选择以“B-Rep”法完成构件的表面逻辑,通过定义空间边界面依次连接空间点,从 2D 线模型至 3D 体模型逐步实现实体对象的制作。

复杂钢桁拱桥节点板构造形式复杂,且构件形体间具有一定数学逻辑。以数据层为基础,完成图纸数据提取、EXCEL 构件类型数据分类;以逻辑层为建模核心,逐步完成基础桥墩桥台、主桁结构、桥面结构全参数化逻辑、空间定位点与结构线等建模准备工作;以模型层为应用重点,通过模型空间逻辑与拓补关系形成全参数化模型。结合全参数化建模思路,在数据层分析数据可执行性,提出分类数据方法;在逻辑层通过“B-Rep 法”完成数据到模型的转换,以关键点与关键线段形成模型构件边界,初步形成 2D 构件平面逻辑;并基于整体模型结构,通过放样、拉伸组合等模型拼装工作,在模型层结合 2D 平面逻辑与模型拓补关系,初步形成 3D 参数化模型(图 1)。形成的全参数化模型满足模型构件逻辑合理性,提升建模效率;基于真实的工程项目,通过“B-Rep 法”形成的全参数化模型更具有合法性,且 BIM 信息技术的现代化和隐含模型信息的广度决定了在复杂钢桁拱桥全参数化建模解决方案中的必要性与可行性。

1.3 “R+GH+TS”协同设计平台

为提高 BIM 模型精度、提升建模效率、充分发挥模型应用价值,基于全参数化理念与建模方法,结合相关专业软件,提出“R+GH+TS”协同设计平台。此模型平台的设计集成了建筑学专业领域强大

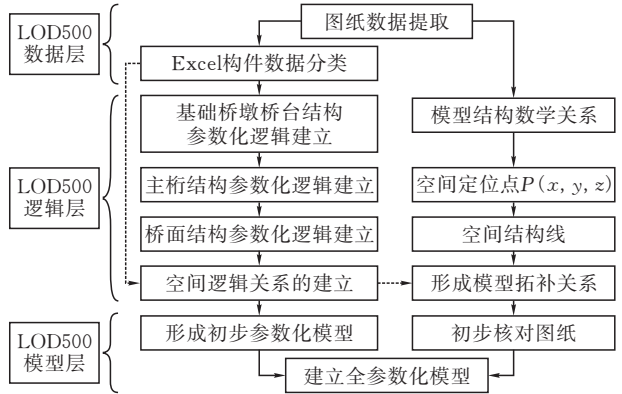


图 1 全参数化模型流程

的形体设计软件 Rhino、数据化设计方向的可视化编程语言 Grasshopper(简称 GH)、钢结构领域专业模型软件 Tekla Structure(简称 TS),即以 TS 为模型核心、“R+GH”为建模手段的全参数化协同设计平台。

在全球范围内,Trimble 公司旗下 TS 软件在钢结构领域的专业程度远远领先其他建模软件,对于以钢结构为主的 BIM 模型,TS 以清单化模型管理、全方位标准型钢构件库、开放的文件接口等优势,为钢结构项目提供快速、标准、多样的建模方式以及批量化、可视化的模型管理方式。在异形构件、空间结构复杂的钢桁拱结构桥体中,将 EXCEL 数据处理为 GH 数据列表与空间点坐标数据,形成以 GH 为基础的逻辑结构和以 Rhino 为基础的空间骨架,完成构件定位工作;结合 TS 软件与 GH 的数据互通原则,将构件型材的信息生成 CLB 数据文件并导入 TS 软件,形成全参数化模型;并基于其模型精度高、数据关联性强等特点,完成 LOD500 模型交付,将 4D 模拟、构件清单表、构件吊装重心应用于实际项目,实现平台的应用功能。此协同设计平台充分利用 TS 软件优势进行钢结构模型深化应用,并基于 GH 插件二次开发再次打通与 TS 软件无格式转化连接的技术瓶颈,保证模型从数据层到应用层的连续性,真正实现全参数化、全过程协同设计。协同设计平台如图 2 所示。

2 复杂钢桁拱桥全参数化建模应用

2.1 项目概况

1)工程概况 此项目为武汉市城市规划第七座跨汉江通道江汉七桥工程,全长约 2.754 km,主桥钢梁采用 132 m+408 m+132 m 三跨连续系杆拱桥,钢梁全长 674 m,主桥标准桁宽 34 m,标准桥面宽度 47 m,两侧边跨为变高度桁梁,中跨为钢桁系杆拱。主桁立面布置图如图 3 所示。

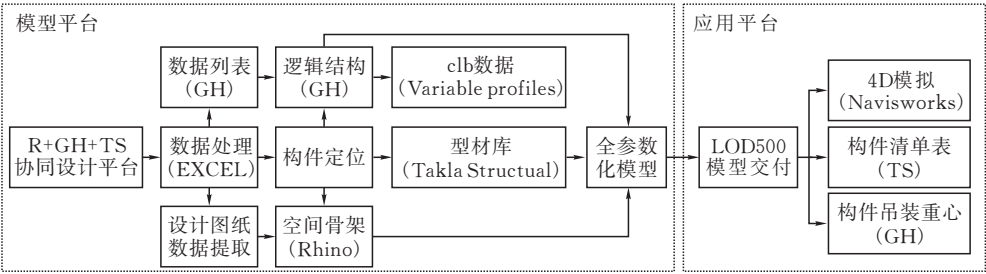


图 2 协同设计平台

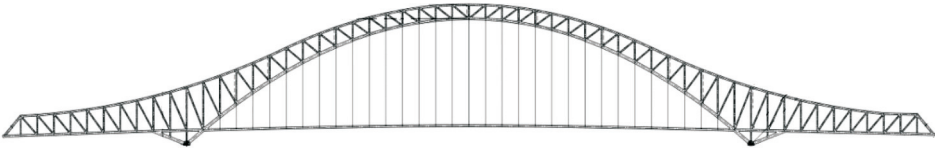


图 3 主桁立面布置图

2)工程特点 该项目主跨 408 m,属于国内同类型桥梁第二,单根拱肋桁架杆件吊重 100 t,单个钢桥面板阶段吊重 250 t,属于国内同类桥梁结构杆件最大吊重,拱肋上弦部分线形采用二次抛物线,并与边跨上弦之间采用圆曲线进行过渡。基于该桥梁项目跨度大、单个构件吊重大、钢结构节点连接形式具有数学逻辑性、施工工序繁多、多专业协调困难等特点,因此该工程利用全参数化 BIM 技术进行建模以及模型深化应用,从设计到施工全参数化把控钢结构出场、构件吊装以及相关工程数量核对工作。

2.2 全参数化建模

在复杂钢桁拱桥全参数化建模过程中,以钢桁拱桥结构特性将其分为钢桁拱与桥面板两部分建模,提取拱圈某节点与桥面板某特殊跨段,借助全参数化建模方法完成构件表面局部逻辑,由模型协作平台完成全桥建模。

2.2.1 钢桁拱结构形体全参数化 本项目钢桁拱结构中,拱圈上下弦杆为焊接箱型截面,主桁节点与上下弦主桁杆件构成整体结构,联结系拱肋上弦设置纵向通长的菱形桁式平纵联,各节点构造形式一致,借助全参数化工具完成此类局部映射整体的模型思路。

利用“B-Rep”法,通过分析典型下弦杆件立面图并建立如下数学关系(图 4):杆件中心点为原点 O,下弦杆五肢对应方向逆时针定义为长度参数 L_n (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5)与关键点标号 A、B、C、D、E,由各关键点与原点 O 连线的法向量方向分别定义模型边界点标号 A'、A''、B'、B''、C'、C''...,其长度参数为 $H(h_a, h_b, h_c, h_d, h_e)$,节点突出部分板截面斜率为 $a=1/4, b=1/2$,且两肢之间连接线相切得到的原切角半径为参数 $R=r$,此处 $r=600$ (不同节点部分下弦杆件半径不同,故定义为参数 R)。通过完整的闭合逻辑提取所有的控制点形成结构线,结

合空间坐标形成三维形体。边界表示法中所有数据均以参数表示, n 表示节点分支数与关键点个数,依照相同计算方式,亦能形成 n 肢节点的三维实体。

通过以上方式,生成联结系、肋板等所有同类型构件,且通过协同设计平台打开数据对接端口,给出数据即可生成全参数化钢桁拱结构部分模型。数据驱动主桁模型如图 5 所示。

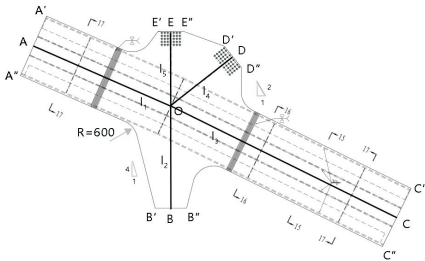


图 4 下弦杆立面

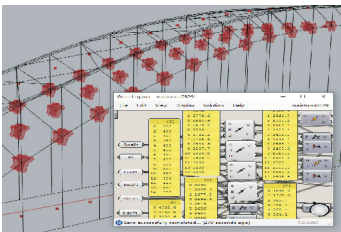


图 5 数据驱动主桁模型

2.2.2 桥面板结构形体全参数化 对于本桥桥面结构采用正交异性钢桥面板,顶面由道路中心线向外侧设置 2%横坡,底部采用纵向通长的 U 型闭口肋及 I 型肋加劲,结合桥面系面板构造形式相同、参数不一的特点,此处以全参数化方式生成桥面横隔板 Q1 至 Q5 共五跨桥面板结构。

Q1 桥面板结构部分由节点横梁、U 型加劲肋、I 型加劲肋、横梁、底板等构成,节点横梁部分结合数学关系以及边界表示法完成全参数化面板建立,U 型、I 型加劲肋沿基线长拉伸形成精准长度的标准构件,U 槽截面中心点 $O(x, y, z)$ 依次放置标准构

件至面板部分 $U_n(u_1、u_2、u_3 \cdots)$ ，和主桁部分 $I_n(i_1、i_2、i_3 \cdots)$ 。平面布置图如图 6 所示，节点横梁依据横梁顶点坐标 $P_n(x_1,y_1,z_1)$ 依次沿关键点坐标拼接并基于主桁中心线生成多个面板依次铺设 $Q_1、Q_2、Q_3$ 等。数据驱动桥面模型如图 7 所示。

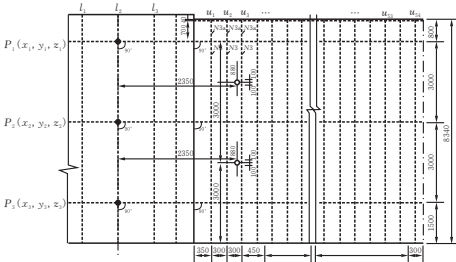


图 6 平面布置图

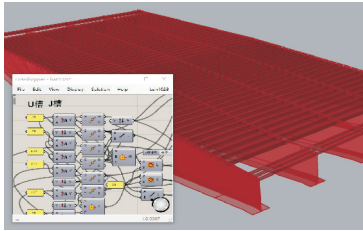


图 7 数据驱动桥面模型

2.2.3 全参数化平台模型 “R+GH+TS”全参数化平台是江汉七桥 BIM 模型的核心,实现模型的全参数化互通。本项目钢结构形式复杂、种类繁多,单靠参数化建模对模型进行后期修改与合模任务量大,此平台联通三个建模功能强大的软件,解决了特殊节点建模难的问题;通过“GH for Tekla”插件完美对接 Tekla 数据接口,基于钢桁拱结构与桥面板结构参数化建模,以“R+GH”为数据层和逻辑层核心生成 CLB 数据文件、Tekla 为模型层核心提取 CLB 数据,将多个分离的模型通过空间结构线联结形成完整全参数化模型,且模型互通过程中无数据丢失;其中 CLB 数据中包含钢桁拱结构和桥面结构等所有构件定位点信息以及构件尺寸参数信息,突破了模型后期设计变更以及修改模型任务量大的技术瓶颈。此平台的应用将江汉七桥建模项目从 60 d 周期缩短为 14 d 周期,建模人员从三位专业 BIM 技术员减少为一位,并极大提高模型应用效率,真正实现全参数化模型应用。“R+GH+TS”协同设计平台工作面板如图 8 所示。

2.3 应用效果

全参数化模型主要利用了数据化的方式将复杂结构模型与空间几何关系进行整合,通过“B-Rep”法则编译模型,提高模型数据准确性与关联性,且“R+GH+TS 协同设计平台”参数可提取、可修改等特性为模型带来更有价值的利用空间。其应用主要体现在以下方面。

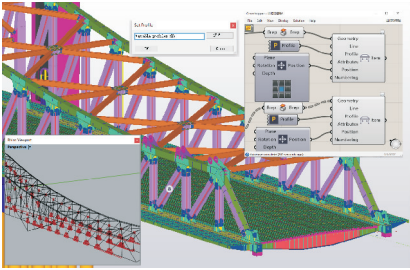


图 8 “R+GH+TS”协同设计平台工作面板

- 1)4D 模拟应用。基于此协同设计平台模型数据化,其导出模型格式众多的特点,将模型整体导出为 Navisworks 软件可接收的 FBX 文件,保留源模型数据结构,结合项目施工进度计划添加构件日期^[8-9],并输出视频格式文件进行可视化施工管理。
- 2)构件清单表。通过全参数化协作平台建立的模型,基于 Tekla 管理器模块有效地导出用户所需模型信息。管理器包含类别中包含属性类别、材质、位置信息、以及构件基本参数属性,本项目根据施工进度要求依次导出桥面板节点横梁、桥面加劲肋、主桁横隔板、主桁螺栓等构件参数信息(表 2),施工方依据表格数据与模型结合进行复核,复核无误后传至钢构加工厂进行构件加工与预拼装,提高施工方信息准确性,并促进钢构出厂效率的提升。

表 2 主桁螺栓信息参数表

序号	杆件名称	螺栓			位置
		型号	数量	长度	
1	下弦 E1E0	M30	248	150.5	竖向
2		M30	176	162.5	竖向
3		M30	336	138.5	斜向
4		M30	240	118.5	斜向
5		M22	36	81.5	人孔
6	下弦 E2E1	M30	248	142.5	竖向
7		M30	176	146.5	竖向
8		M30	208	146.5	斜向
9		M30	152	146.5	斜向
10		M22	36	81.5	人孔
11	下弦 E3E2	M30	144	134.5	竖向
12		M30	112	138.5	竖向
13		M30	208	146.5	斜向
14		M30	152	146.5	斜向
15		M22	36	81.5	人孔

- 3)构件吊装重心。基于本项目单个构件吊重大,运送吊装构件交通情况复杂的实际情况,构件抵达现场后大型器械姿态转体调整十分困难,所以构件出厂前需提前确定吊装点以及装车姿态,以保证其结构运输拼装等阶段一次完成。全参数化模型通过模型数据提取,精准的确定杆件重心位置,并自动生成相关尺寸标注,为设置构件合理吊点提供数据支持,极大提高钢构出厂吊装效率、减少施工周期以

及现场施工器械租赁成本。构件重心尺寸见图 9。

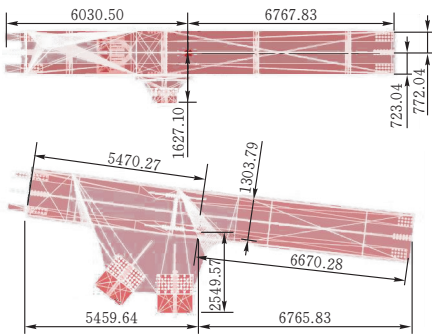


图 9 构件重心尺寸图 mm

3 结束语

桥梁工程建设周期长、施工难度大,钢桁拱桥结构形式复杂,构件种类繁多,对此类桥梁工程进行 BIM 全参数化建模的过程中,技术管理人员在设计、施工阶段通过模型与实际情况的融合进一步优化设计施工方案尤为重要。鉴于此,对比全参数化与传统参数化的不同,并提出基于全参数化的“B-Rep”法建模手段以及“R+GH+TS”协同设计平台,克服传统参数化模型局限性、单一性、精确性的问题,提高模型数据准确性,加强模型数据关联程度以及建模协同性,解决了复杂钢桁拱桥特殊节点、特殊构件建模难题,实现了模型指导施工的现场拼装应用方法,方便技术交底、减少施工周期、节约建设

成本,真正体现了 BIM 模型在复杂钢桁拱桥中全阶段、全参数化的协同与应用。

[参 考 文 献]

[1] 孙建诚,蒋浩鹏,等.基于 BIM 的三维参数化桥梁标准建模方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(10):19-24.

[2] 赵伟兰,李远富.某大桥基于 Revit 软件的桥梁 BIM 模型参数化设计探析[J].公路工程,2018,43(1):36-41.

[3] 郝蕊,张敬涵,王辉麟,等.参数化的铁路桥梁三维快速建模方法[J].铁道建筑,2017,57(8):33-35.

[4] 王茹,权超超.公路立交 BIM 参数化快速精确建模方法研究[J].图学学报,2019,40(4):766-770.

[5] 庞思雨,张弛.一种基于 BIM 技术的隧道参数化建模方法[J].隧道建设(中英文),2018,38(S2):239-246.

[6] 何则干,黄福杰,张为民.BIM 技术在大型立交工程的应用研究[J].公路,2019,64(2):174-179.

[7] 蓝贵文,陶彦好,庞立阳,等.基于 CSG 和 B-Rep 的三维地下管网参数化建模[J].地理与地理信息科学,2019,35(5):60-65.

[8] 马白虎,钟荣炼,刘天成,等.平塘特大桥施工 BIM 信息管理系统研发及应用[J].公路,2019,64(9):31-35.

[9] 吴福居,林金华.BIM 技术在地铁车站施工信息化中应用研究[J].公路,2019,64(1):193-196.

Research on Full Parametric Modeling Method of
Complex Steel Truss Arch Bridge

DENG Jie¹, SHI Junfeng¹, WANG Bo², ZHAO Xungang²

(1 School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China;
2 China Railway Bridge Science Research Institute, Ltd., Wuhan 430034, China)

Abstract: Due to the complex structure form and numerous node types of steel truss arch bridge, the traditional parametric modeling work has been greatly troubled. The modeling of complex steel truss arch bridge has always been a difficult challenge in BIM modeling. Based on the concept of model full parameterization, this paper built the model from three levels: data layer, logic layer and model layer. According to the characteristics of the bridge, the full parametric modeling process was discussed in detail. By using "B-Rep" method the component model was established in this paper. Through the "R+GH+TS" collaborative design platform, the components were assembled and data and model are combined, which improved the precision of the whole bridge model, solved the problem of the late repair die hard. Together with Jiangnan No. Seven bridge project higher precision of practical application was achieved, which provided reference for the parametric modeling of similar bridges.

Keywords: steel truss arch bridge; full parameterization; BIM modeling; bridge structure; modeling method

[责任编辑:裴 琴]