DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2022.11.10

# 钢混组合梁多尺度 BIM 正向设计研究

曹炳勇,施新欣,陈莎莎,董 冰,崔小建

(同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海 200092)

**摘要**:首先,针对钢混组合梁正向设计的具体需求,引入多尺度 BIM 建模方法,提出了基于模型精细度(level of development, LOD)的钢混组合梁模型分级方案,并通过结构树框架和命名规则建立分级模型的衔接机制,实现不同精细度下模型数据的有效传递;其次,基于 BIM 平台提出了钢混组合梁多尺度 BIM 正向设计的基本流程,通过内嵌设计逻辑和构造原则的方式实现钢混组合梁立面、断面和平面半自动设计,并利用决策表解决了多逻辑条件组合下的理解偏差和工况遗漏问题;最后,按照不同模型精细度等级生成对应的 BIM 模型,并测试模型实例化效率。结果表明:多尺度 BIM 正向设计方法应用于钢混组合梁设计中,能够有效提高正向设计的工作效率和三维模型的复用性。

**关 键 词**:桥梁工程;钢混组合梁;多尺度;模型精细度;建筑信息模型;正向设计

**中图分类号**:U442.5;TU201.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-0696(2022)11-072-09

# Multi-scale BIM Forward Design of Steel-Concrete Composite Beam

CAO Bingyong, SHI Xinxin, CHEN Shasha, DONG Bing, CUI Xiaojian

(Tongji University Architecture Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract**: Firstly, aiming at the specific requirements of forward design for the steel-concrete composite beam, a multiscale BIM modeling method was introduced, and a model grading scheme based on level of development (LOD) was proposed. Firstly, through the structure tree framework and naming rules, the linkage mechanism of hierarchical models was established to achieve effective transfer of model data at different levels of granularity. Secondly, the basic process of multiscale BIM forward design for steel-concrete composite beam was proposed on the basis of BIM platform, which realized the semi-automatic design of elevation, section and plane of the steel-concrete composite beam by the embedded design logic and construction principles. And the decision table was used to solve the problems of understanding deviation and condition omission under the combination of multiple logic conditions. Finally, the corresponding BIM models according to different LOD were generated, and the model instantiation efficiency was tested. The results show that the application of multi-scale BIM forward design method in the design of steel-concrete composite beams can effectively improve the efficiency of forward design and the reusability of three-dimensional models.

**Key words**: bridge engineering; steel-concrete composite beam; multi-scale; level of development; building information modeling (BIM); forward design

## 0 引 言

钢混组合梁是将钢梁与混凝土板通过连接件连成整体共同工作的受弯结构,它能最大限度地发挥钢材和混凝土各自的材料性能,具有自重轻、承载能力高、环境友好、施工周期短等显著优势[1],被广泛应用于城市高架桥梁建设中。对于钢混组合结构桥梁而言,以二维图纸为信息载体的传统交付方式难以满足设计意图的精准表达及工厂数字化预制、现场智能拼装的要求,桥梁建设项目的各参与方对钢

**收稿日期**:2021-04-13;**修订日期**:2022-03-22

**第一作者**:曹炳勇(1994—),男,江苏高邮人,助理工程师,主要从事建筑信息化方面的研究。E-mail:caobingyong@ tjad.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

混组合梁三维 BIM(building information modeling)模型的需求强烈。然而,钢混组合梁构造形式复杂、构件种类和连接方式多样,常规混凝土桥梁的建模方法不能完全适用,存在着建模困难、模型精度低等问题。王继红等[2]、齐成龙[3]利用“骨架+模板”的建模理念优化线性工程的三维设计过程,可有效提高建模的精度,但软件现有功能自动化程度低,难以高效地创建钢混组合梁模型。此外,现有的桥梁 BIM 正向设计系统以混凝土桥梁为主[4-16],钢混组合梁相关研究相对匮乏,存在以下主要问题:

1)脱离实际的设计流程。不同设计阶段的侧重点和设计信息的细度不尽相同,过度参数化的桥梁构件模型在设计初期往往使得设计人员无从入手。

2)模型复用率低。在实际项目中,最终的设计方案是经过多方协调并反复修改后的结果,一键生成精细化模型的建模方式不仅大量占用计算机硬件资源,而且一旦出现模型参数化以外的设计变更则意味着整体模型的重建,这是当前正向设计效率低下的主要原因之一。

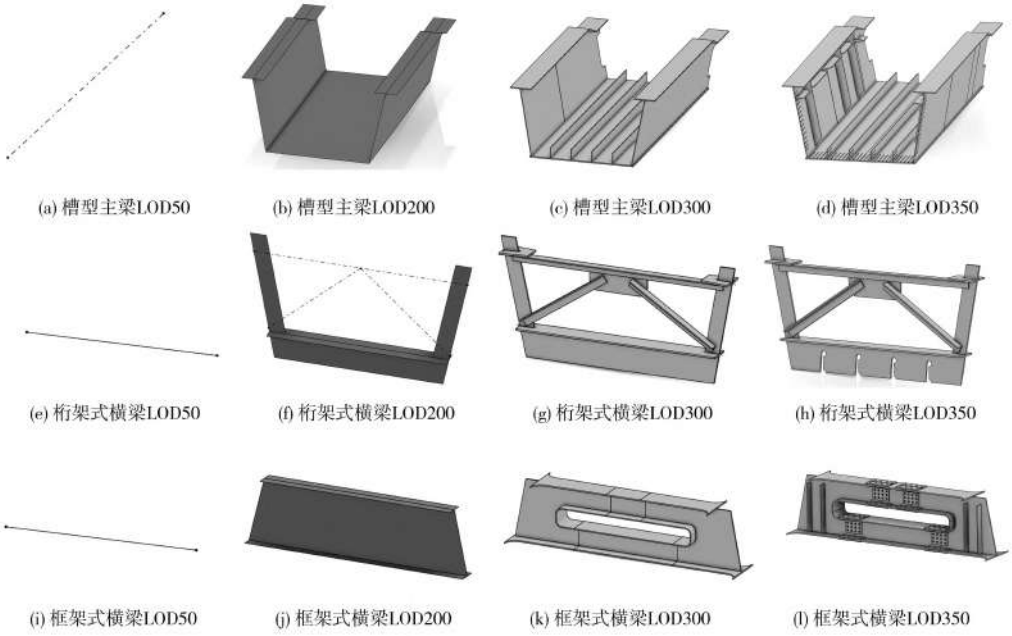
3)模型数据缺乏可操作性。对于设计人员而言,三维模型虽有利于提升构造细节上的直观感知,但牺牲了扁平化设计所具备的清晰、高效的信息传递,而以抽象的二维线元来表达的结构特征则更具可观测性和可测量性,因此正向设计中二维线元的缺失给桥梁设计带来了诸多不便。

引入多尺度建模理念,依托 BIM 核心建模软件平台,可以解决不同设计阶段模型差异化需求的问题,这已经在隧道工程中得到了验证[17-18]。笔者首先将多尺度 BIM 建模方法引入钢混组合梁正向设计领域,依据桥梁工程不同设计阶段的信息需求,提出钢混组合梁模型精细度(level of development, LOD)分级方案,建立了分级模型复用的衔接机制;然后,基于 3D Experience 平台提出了钢混组合梁多尺度 BIM 正向设计的基本流程,并针对 LOD 50 结构骨架模型,提出了一种半自动设计方法;最后,通过建立的钢混组合梁多尺度模型验证了该设计方法的可行性。

## 1　钢混组合梁 BIM 模型分级

### 1.1　模型精细度(LOD)分级

模型精细度(LOD)是建筑信息模型中所容纳的模型单元丰富程度的衡量指标。考虑计算机硬件性能的限制以及不同设计阶段的信息颗粒度差异,笔者引入 LOD 理念,参考美国建筑师学会的 *Level of Development Specification*[19] 和 GB/T 51301—2018《建筑信息模型设计交付标准》两种分级机制,结合钢混组合梁的实际构成,制定了一套符合钢混组合梁 BIM 正向设计流程的模型划分方案。将钢混组合梁的 LOD 从低到高分为 4 个等级:LOD50,LOD200,LOD300,LOD350,各等级的典型构件模型如图 1。




(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

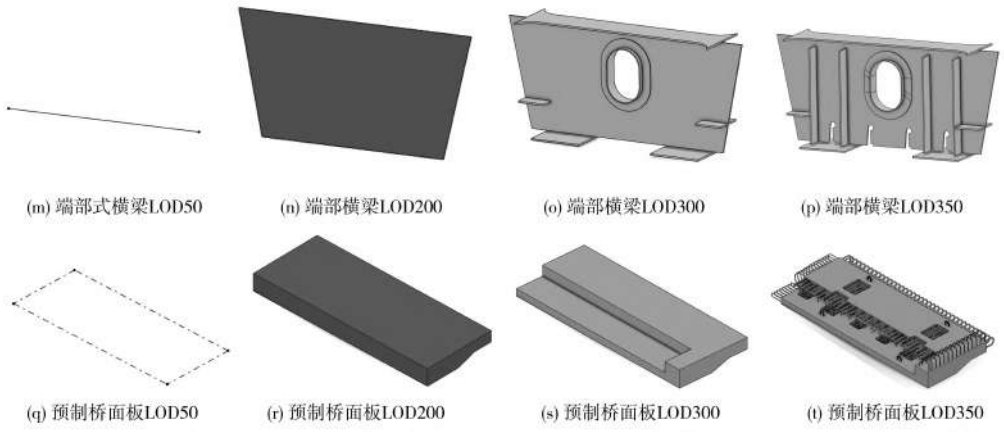



**图1 典型构件的多尺度模型**

**Fig. 1 Multi-scale models of typical components**

图1中:LOD50仅作为前置定位条件,主要由点、线二维元素构成,为接下来的模型实例化提供坐标定位、构件类型等信息。桥梁工程方案设计阶段侧重于结构型式的比选,采用LOD200级别,构件的几何表达以面为主,模型不仅具有大致的轮廓,而且能够保证关键尺寸的准确性。以槽型主梁为例,主梁高度、腹板长度等尺寸信息在该等级下可以被精确表达;LOD300用于定义初步设计阶段,与LOD200的曲面模型不同,其模型为实体单元,忽略了部分构造细节,如加劲肋、过焊孔、剪力钉等,能够满足结构受力分析和投资概算的应用需求;施工图设计阶段采用LOD350,以二维出图、工程计量和施工仿真为目标,涵盖了钢板厚度、加劲肋布置、对齐方式等更深层次的设计信息。详见表1。

**表1 钢混组合梁BIM模型精细度等级划分**

**Table 1 LOD classification of BIM model of steel-concrete composite beam**

| 模型分级 | 设计阶段 | 说明 |
|---|---|---|
| LOD50 | — | 满足二维化或者符号化识别需求的几何表达精度; |
| LOD200 | 方案设计 | 满足空间占位、基本轮廓及尺寸的几何表达精度; |
| LOD300 | 初步设计 | 满足结构受力计算、投资概算的几何表达精度; |
| LOD350 | 施工图设计 | 满足出图、工程计量及施工仿真的几何表达精度 |

## 1.2 分级模型衔接机制

为了获得结构化的几何定位元素,并使钢混组合梁LOD50模型与LOD200、LOD300和LOD350模型之间的迭代具有自动化能力,笔者提出了钢混组合梁模型结构树框架以及几何元素命名规则。

### 1.2.1 钢混组合梁模型结构树框架

按照城市高架桥梁的结构特点,将钢混组合梁LOD50模型的结构树划分为3个层次,从高至低分别为上部、联和跨。如图2。

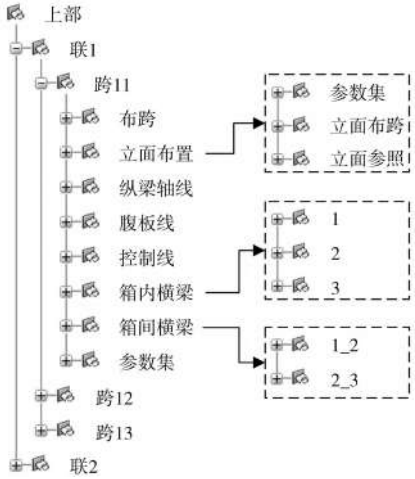



**图2 模型结构树框架**

**Fig. 2 Model structure tree framework**

“跨”节点内具有完整的几何表达元素,包含了从路线布跨到总体布置所需的所有定位元素。考虑到路口段大跨径组合梁特殊节段的存在,单个标准跨参数集难以满足城市高架多联多跨的差异化需求,因此每个“跨”节点中均存储了一套适用于该跨的配置参数集,以便后续迭代过程中参数复用。除了图2的上部-联-跨总体结构层次,根据几何定位元素功能的不同,“跨”节点内部进行了结构树深化。其中“箱内横梁”节点内部按照所属主梁的原则进一步增设子节点来管理其定位元素;“箱间横梁”节点内部则根据两侧所连接主梁的不同进一步扩展了子节点。

### 1.2.2 几何元素命名规则

除了一些固定的基本定位元素以外,例如道路

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中心线、边线、分孔线等,其他几何元素应严格遵循特定的命名规则,以满足程序自动判别并捕获的要求。为了便于从“跨”节点中直接获取相应的几何元素,命名的“跨”名称应在“跨”节点内具有唯一性。因此,笔者结合各要素的信息表达需求设计了命名规则。详见表 2。

**表 2　LOD50 几何元素命名规则**

**Table 2　Naming rules of geometric elements in LOD50**

| 类别 | 命名对象 | 命名规则 | 示例 |
|---|---|---|---|
| 纵梁轴线 | 几何元素 | 纵梁编号_位置_类型 | 1_L_C |
| 腹板线 | 几何元素 | 纵梁编号_相对位置 | 1_R |
| 箱内横梁 | 子节点 | 纵梁编号 | 1 |
| | 几何元素 | I_横梁类型_序号 | I_H_1 |
| 箱间横梁 | 子节点 | 纵梁编号_纵梁编号 | 2_3 |
| | 几何元素 | O_横梁类型_序号 | O_S_1 |

注:①“纵梁编号”即纵梁由小桩号至大桩号从左至右依次编的号;②“位置”即以结构中心线为基准的相对位置,字符 L、C、R 分别代表左侧、中心和右侧;③“类型”即主梁类型,分别用符号 C 和 G 表示槽型梁和钢板梁;④“相对位置”即相对于纵梁轴线的位置,分别用符号 L、R、C 表示左腹板、右腹板和中心腹板;⑤“I”表示箱内横梁;⑥“O”表示箱间横梁;⑦“横梁类型”有实腹式、框架式和桁架式 3 种,用符号 S、K、H 表示;⑧“序号”指箱内或箱间横梁由小桩号至大桩号依次编的号码。

表 2 的命名规则经过了实际应用的反复优化,充分考虑了模型迭代的信息需求并去除了冗余信息。以“箱间横梁”的子节点为例,其名称为“2_3”,分别对应箱间横梁所连接 2 根纵梁的编号,通过纵梁编号“2”“3”,可以从“纵梁轴线”节点中获取对应的纵梁轴线,再根据纵梁轴线的类型在“腹板线”节点中获取对应的腹板线。若纵梁轴线类型为槽型梁,腹板线名称分别为“2_R”和“3_L”;若纵梁轴线类型为钢板梁,腹板线名称分别为“2_C”和“3_C”。因此,在仅有两侧纵梁编号的条件下,程序足以自动捕获到两侧对应的主梁轴线和腹板线。

## 2　钢混组合梁模型正向设计

### 2.1　正向设计流程

结合 LOD 分级体系和衔接机制,笔者提出了钢混组合梁多尺度正向设计方法。通过对比目前市面上的 BIM 核心建模软件解决方案,综合考虑软件的参数化水平、曲面造型能力和接口开放程度等,最终确定以达索 3D Experience 平台为基本框架的正向设计方案。软件工作流程主要包括总体骨架、结构骨架和用户自定义特征(user defined feature,UDF)实例化这 3 个过程,如图 3。

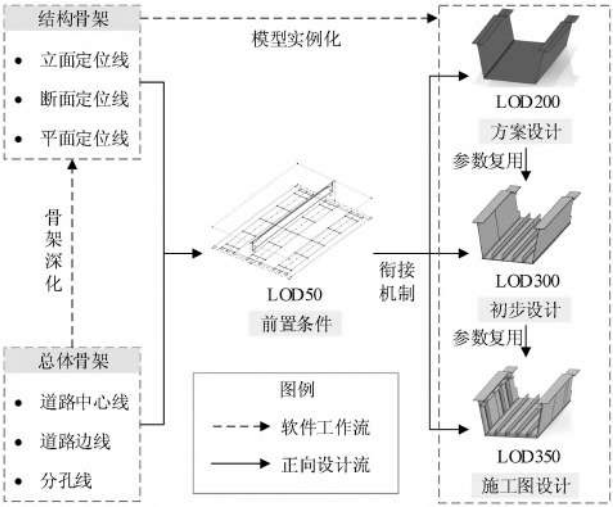



**图 3　基于 3D Experience 平台的正向设计流程**

**Fig. 3　Forward design process based on 3D Experience platform**

图 3 中,城市高架的布跨设计,即软件工作流程中的分孔线布置,是一项极其依赖设计经验的复杂过程,需要对桥下通行、布墩条件、结构受力等进行综合评估,其正向设计采用输入既有的布跨信息并自动创建布跨关键要素的方式来完成。对于结构骨架的正向设计,笔者通过梳理其设计逻辑,整合构造原则,提出了一种半自动设计方法,能够有效提高设计效率。

### 2.2　结构骨架的半自动设计

钢混组合梁结构骨架的创建是多尺度正向设计流程中至关重要的环节,对后续 UDF 模板的正确调用和空间定位起着决定性作用。根据钢混组合梁的结构特点,笔者对结构骨架进行设计流程分解,大致可拆分为立面设计、断面设计和平面设计 3 个基本流程,而每一个设计流程都是一个具有经验性的复杂过程。传统的依靠设计人员经验知识的设计模式效率较低,难以满足多联多跨城市高架钢混组合梁快速化设计的需求。因此,笔者对 3D Experience 平台进行二次开发,通过内嵌设计逻辑和构造原则的方式实现结构骨架的半自动设计,其半自动能力主要表现为在给定布跨和标准设计参数后可自动完成多联多跨钢混组合梁结构骨架的设计,同时也适用于变宽段主梁增设时的复杂情况。此外,引入决策表以解决设计过程中条件判断多、组合情况复杂的逻辑判断问题,从而有效降低了设计人员和开发人员的沟通成本,减少了因理解偏差和条件组合工况遗漏所导致的逻辑错误。

#### 2.2.1　立面半自动设计

立面设计中的结构骨架主要用于控制混凝土桥面板和主梁梁底的线型,其半自动化设计步骤如下:

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

**Step 1** 获取节段跨径。利用总体骨架中分孔线分割道路中心线,从而获得当前节段的中心线,测量该曲线的平面投影长度得到当前节段的跨径 $L$。

**Step 2** 判断主梁立面形式。若 $L > L_1$,则采用变高梁,进入**Step 3**;若 $L \leqslant L_1$,则采用等高梁,并跳转至**Step 4**。

**Step 3** 判断梁底变高线型。若 $L \leqslant L_2$,则梁底采用折线型变高;反之,采用二次抛物线变高。

**Step 4** 确定梁高值。归纳跨径与梁高的对应关系,并嵌入程序内部进行自动判断。

**Step 5** 输入立面布置尺寸参数。参数包括梁端及支座定位尺寸和桥面板的几何尺寸。

**Step 6** 生成立面布置定位线。调用应用程序接口(application programming interface,API)中的线框元素工厂对象生成对应的立面结构骨架。

**Step 7** 按指定命名规则进行重命名。

$L_1$、$L_2$ 分别为采用等高梁、折线型变高梁的最高跨径值,需根据实际设计需求确定。表 3 为某桥立面设计参数经验总结,其中 $L_1 = 40$ m,$L_2 = 50$ m。

**表 3 某桥立面设计参数经验总结**

**Table 3 Experience summary of elevation design parameters of a bridge**

| 跨径/m | 变高线型 | 梁高/m | |
|---|---|---|---|
| | | 端部 | 跨中 |
| 0~30 | — | 1.6 | 1.6 |
| 31~35 | | 1.8 | 1.8 |
| 36~40 | | 2.0 | 2.0 |
| 41~45 | 折线型 | 与相邻跨端部梁高一致 | 2.2 |
| 46~50 | | | 2.4 |
| 51~55 | 抛物线型 | | 2.6 |
| 56~60 | | | 2.8 |

### 2.2.2 断面半自动设计

钢混组合梁的断面设计是在给定的桥梁两侧边线范围内进行合理的纵梁排布。半自动设计具体表现为:能在标准断面设计的基础上进行自动增设,以适应桥宽变化。以槽型梁为例,其设计流程如图 4,具体步骤如下:

**Step 1** 确定主梁类型。笔者选择槽型梁和钢板梁 2 种主梁类型。

**Step 2** 标准布梁。根据用户输入的标准布梁数据,对所有节段按标准类型进行布梁,生成标准主梁轴线。结构骨架中的断面设计即确定纵梁根数和其所在轴线的位置,输入的数据包括左边梁悬臂 $w_L$、右边梁悬臂 $w_R$、主梁根数 $n$、主梁间距 $w$ 和结构偏移值 $w_o$,其中结构偏移值是指结构中心线相对于道路中心线的距离,左负右正。此外,当主梁为不等距布置时,各个主梁间距需单独给出。

**Step 3** 自动增设。主梁增设是以边梁轴线和次边梁轴线间的距离为判断依据,在**Step 2** 的基础上按照构造要求进行纵梁的补充设计,以满足桥梁变宽等复杂情况的布梁任务。自动增设的前提条件是主梁根数 $n \geqslant 2$。如图 4,笔者利用递归思想,将增设类型简化为增设 1 根钢板梁和增设 1 根槽型梁 2 种基本类型,以 $d_{max} \leqslant w_{max} + b_k$ 为递归终止条件,不断更新边梁和次边梁轴线间的距离,并迭代增设类型的判断,直到满足终止条件为止。而当主梁类型为钢板梁时,取 $b_k = 0$。

**Step 4** 按指定命名规则进行重命名。

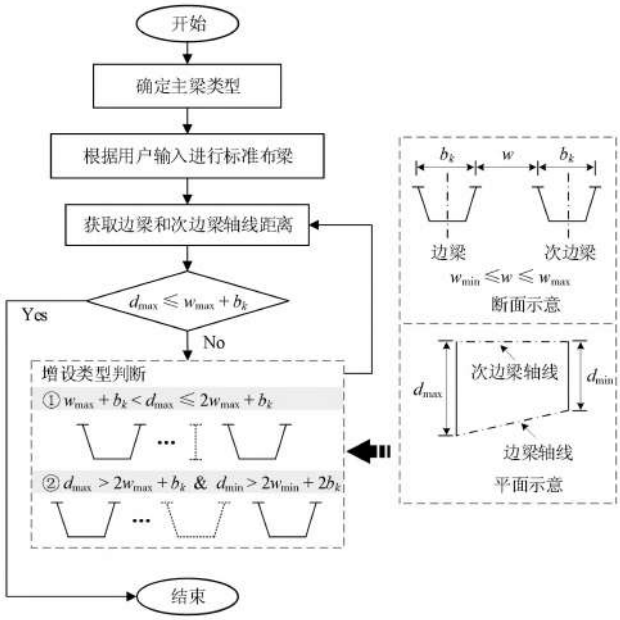



**图 4 槽型梁断面半自动设计流程**

**Fig. 4 Semi-automatic design process of take groove beam section**

### 2.2.3 平面半自动设计

钢混组合梁平面设计即在断面设计的基础上进行横梁排布,如图 5。

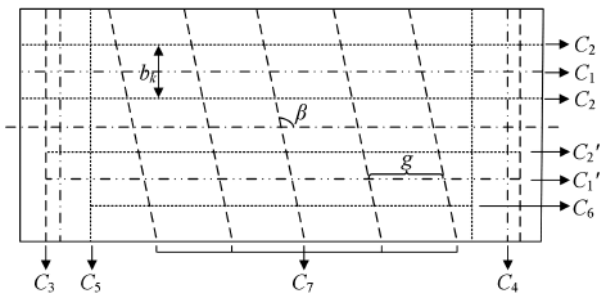



**图 5 平面设计线元示意**

**Fig. 5 Schematic diagram of line elements in plane design**

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

具体步骤如下：

**Step 1**　生成腹板线。将主梁轴线 $C_1$ 按 $b_k/2$ 值偏移出主梁腹板线，记作 $C_2$。

**Step 2**　生成梁端控制线。从立面设计中获取梁端及支座定位参数，生成梁端线 $C_3$ 和支座定位线 $C_4$，并设定横梁最小间距 $h_{\min}$，根据该值偏移 $C_4$ 得到两侧横梁控制线 $C_5$，以保证端部横梁与其他横梁间的最小间距要求。

**Step 3**　获得实际的主梁定位线。利用**Step 2** 中的 $C_3$ 裁剪主梁轴线 $C_1$ 和主梁腹板线 $C_2$，从而得到实际的主梁轴线 $C_1'$ 和腹板线 $C_2'$。

**Step 4**　判断横梁布设的平面角度 $\beta$。横梁布设角度分为正交和斜交，设定角度阈值，根据分孔线与道路中心线的角度进行自动判别。

**Step 5**　生成箱内横梁结构骨架，主梁类型为钢板梁时，忽略本步骤。由于斜交桥的存在，单跨中不同主梁的箱内横梁布置可能会有所差异，因此需从几何关系层面给定逻辑判断。利用 $C_5$ 裁剪 $C_2$ 得到箱内横梁布置的边界线 $C_6$，沿该跨所在的道路中心线按横梁间隔 $g$ 分配横梁定位点，在横梁定位点上向 $\beta$ 方向作足够覆盖整个桥宽的辅助线 $C_7$，若 $C_7$ 与该主梁所对应的 $C_6$ 均有交点，则判定该主梁在 $C_7$ 位置处存在箱内横梁。

**Step 6**　裁剪增设的钢板梁轴线。如图 4，当增设的主梁为钢板梁时，未对 $d_{\min}$ 进行限定；待横梁辅助线 $C_7$ 确定后，利用 $C_7$ 对增设钢板梁进行裁剪，以达到满足构造要求的目的。

**Step 7**　判断箱间横梁布设类型。文中所涉及的钢混组合梁具有多种横梁类型和布置方式（图 6），且影响因素众多，横梁的布设是一个多逻辑条件下执行不同操作的复杂问题。因此，笔者基于决策表法对各种可能的情况进行列举，并进一步聚合，最后由开发人员形成 if-then-else 或者 switch-case 的逻辑代码。

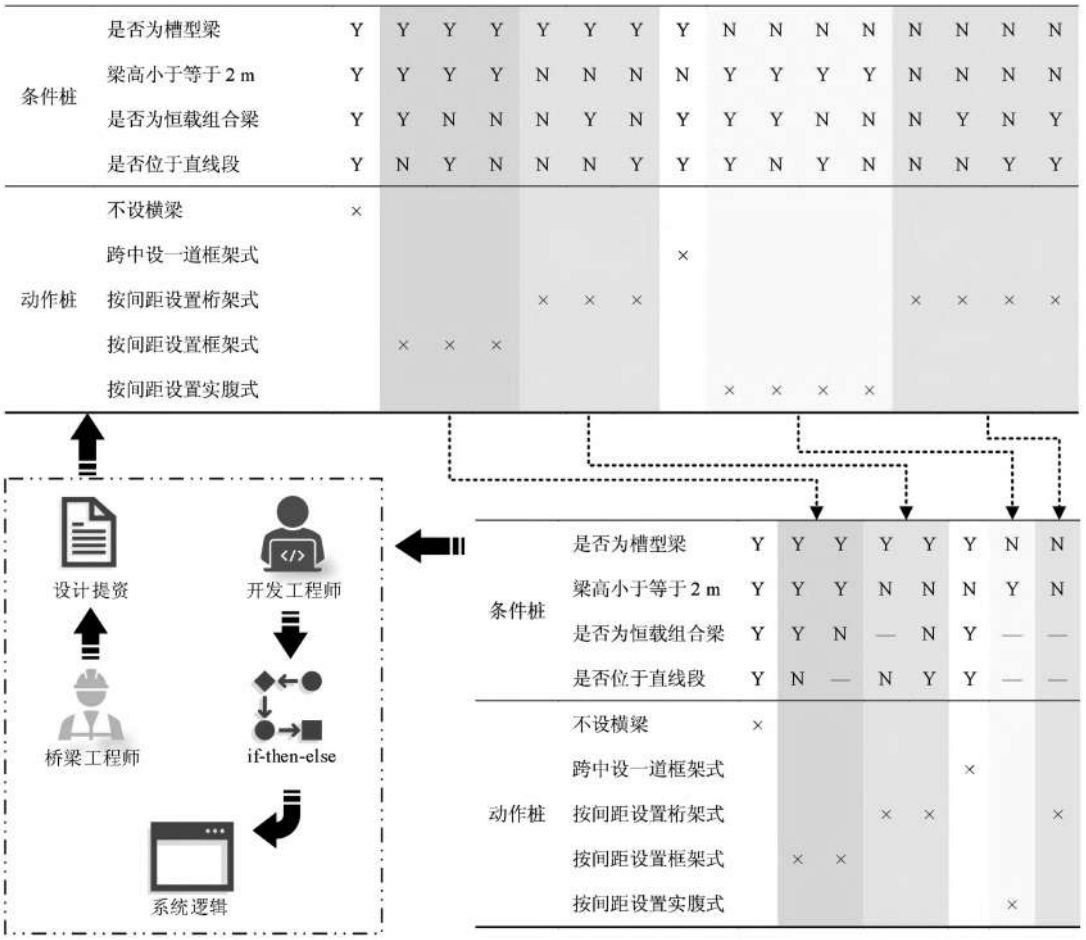



**图 6　基于决策表的箱间横梁布置逻辑**

**Fig. 6　Layout logic of crossbeam between boxes based on decision table**

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

**Step 8** 生成箱间横梁结构骨架。当主梁类型为钢板梁时,可参照**Step 5** 中槽型梁的箱内横梁布置逻辑进行箱间横梁的布设;当主梁类型为槽型梁时,由于可能存在槽型梁和钢板梁的混合,因此其布设逻辑按以下步骤考虑:

1)剔除增设的钢板梁;

2)若当前 $C_7$ 位置的箱间横梁所连接的两根主梁在对应的 $C_7$ 位置均具有箱内横梁,则此处应设置箱间横梁,反之不设;

3)除钢板梁裁断处的箱间横梁以外,使用钢板梁轴线对初步形成箱间横梁进行分割,从而形成最终的箱间横梁定位线。

**Step 9** 按指定命名规则进行重命名。

图7为任一变宽情况下的结构骨架半自动设计结果。可见涵盖了曲线布梁、主梁增设、横梁斜交、钢板梁截断以及主梁变高等多种复杂情况,结果证明半自动设计方法具有较高的鲁棒性。

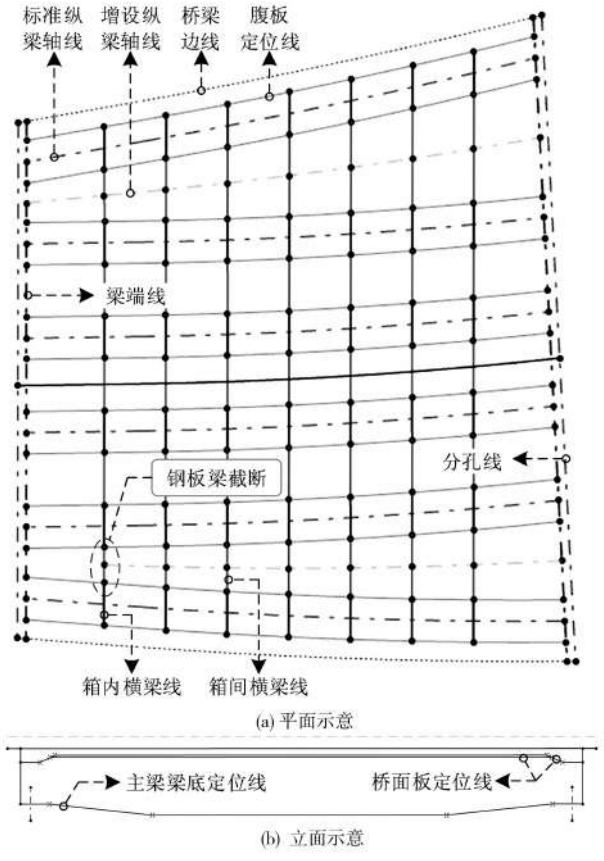



**图7 结构骨架半自动设计**

**Fig. 7 Semi-automatic design of skeleton**

## 3 多尺度模型创建

多尺度模型创建的本质是基于结构骨架进行UDF模板实例化的过程,如图8。




**图8 模型实例化流程**

**Fig. 8 Flow chart of model instantiation**

根据命名规则,逆向提取关键信息,并通过类型信息与模板之间的对应关系,从服务器端检索UDF模板,获取结构骨架和用户输入的模型参数,并在实例化过程中修改UDF模板参数,最终生成对应的钢混组合梁BIM模型。为了适应多尺度建模的需求,每个类型信息应对应3个不同LOD等级的UDF模板,按照当前所在设计阶段进行自动调用。

为了验证基于3D Experience平台钢混组合梁多尺度正向设计的可行性,笔者采用i7-9700 @ 3.00 GHz八核处理器,32 GB RAM和Nvidia Geforce GTX 1660显卡的计算机,根据图8的流程,在曲线路段上生成单跨钢混组合梁多尺度模型(图9),并记录生成各部件所消耗的时长 $T$,见表4。

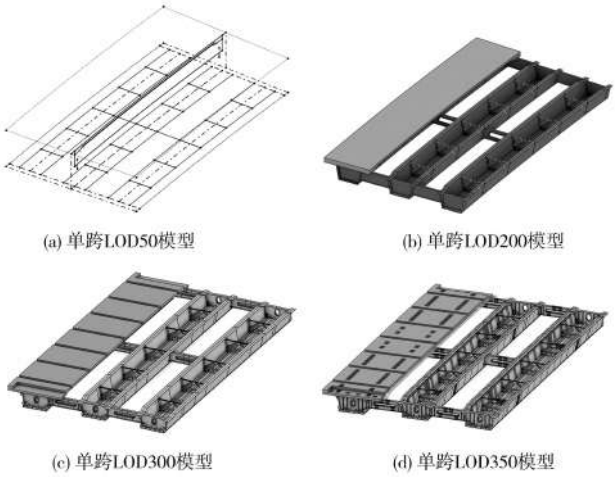



**图9 单跨LOD50、LOD200、LOD300、LOD350模型**

**Fig. 9 Single-span LOD50, LOD200, LOD300, LOD350 model**

**表4 LOD模型实例耗时测试结果**

**Table 4 Time consuming test results of LOD model examples**

| 类型 | $T$/s | | | |
|---|---|---|---|---|
| | LOD50 | LOD200 | LOD300 | LOD350 |
| 槽型梁 | 0.2 | 5 | 42 | 86 |
| 钢板梁 | 0.2 | 4 | 16 | 55 |
| 箱内横梁 | 0.1 | 2 | 10 | 16 |
| 箱间横梁 | 0.1 | 3 | 15 | 38 |
| 桥面板 | 0.1 | 7 | 12 | 57 |
| 单跨合计 | 5.7 | 96 | 462 | 993 |

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由表 4 可知:

1)模型实例化效率由高至低依次为 LOD50,LOD200,LOD300,LOD350,二维 LOD 模型的生成效率明显优于其他三维 LOD 模型,运行时长呈指数型增长。

2)不同构件的 UDF 模板因其内部几何逻辑的复杂度不同也存在生成效率上的差异。

因此在实际设计过程中,应避免直接生成高精度 BIM 模型,而是采用递进式的设计方式[20],模型由低 LOD 等级向高 LOD 等级不断迭代,一方面能够在设计初期实现低维度下的高效设计反馈;另一方面可以大大增加模型和参数的复用性,从而提高设计效率。

## 4　结　语

笔者根据钢混组合梁正向设计的具体需求,提出了一种多尺度 BIM 正向设计方法。首先,参照国内外 LOD 相关规范,提出了基于模型精细度的钢混组合梁模型分级方案,将钢混组合梁划分为 4 种 LOD 等级,并通过结构树框架和命名规则建立不同 LOD 模型的衔接机制,实现不同精细度下模型数据的有效传递。其次,基于 3D Experience 平台提出了适应钢混组合梁多尺度建模的软件工作流程,在既有功能的基础上进行二次开发实现对钢混组合梁正向设计的扩展,通过集成设计逻辑和构造原则实现了结构骨架的半自动设计,并借助决策表解决了复杂设计逻辑下的理解偏差和工况遗漏问题。最后,按照不同的模型精细度等级分别创建钢混组合梁 BIM 模型。研究结果表明:多尺度 BIM 正向设计方法能够在低 LOD 等级下实现高效的设计反馈,提高了模型的复用性。

**参考文献(References):**


[1] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构:试验、理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.
NIE Jianguo. *Steel-Concrete Composite Girder Structures: Experiment, Theory and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2005.

[2] 王继红,卢禹.基于 CATIA 的梁桥快速建模的二次开发技术[J].中外公路, 2017, 37(4): 203-205.
WANG Jihong, LU Yu. Secondary development technology of rapid modeling of beam bridge based on CATIA[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2017, 37(4): 215-217.

[3] 齐成龙. 基于达索 CAA 架构的桥梁缺口 BIM 设计程序开发[J]. 结构工程师, 2020, 36(5): 180-185.
QI Chenglong. BIM design program development for bridge boundaries based on Dassault CAA architecture [J]. *Structural Engineers*, 2020, 36(5): 180-185.

[4] 张宜洛, 邓展伟, 郭创. 基于 BIM 技术的公路工程正向设计应用探究 [J]. 公路, 2020, 65(9): 176-183.
ZHANG Yiluo, DENG Zhanwei, GUO Chuang. Research on the forward design based on BIM for highway project [J]. *Highway*, 2020, 65(9): 176-183.

[5] 秦海洋, 汤永净, 陈智远. 基于 CATIA 的 BIM 技术在隧道设计中的应用 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(7): 82-87.
QIN Haiyang, TANG Yongjing, CHEN Zhiyuan. Application of BIM technology in tunnel design based on CATIA [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University* (*Natural Science*), 2021, 40(7): 82-87.

[6] 杜一丛, 王亮. 基于 BIM 参数化在桥梁工程设计阶段应用初探[J]. 建筑结构, 2019, 49(增刊 2): 972-978.
DU Yicong, WANG Liang. Preliminary exploration on the application of BIM parameterization in bridge engineering design stage [J]. *Building Structure*, 2019, 49(Sup 2): 972- 978.

[7] 孙建诚, 蒋浩鹏, 杨文伟, 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.
SUN Jiancheng, JIANG Haopeng, YANG Wenwei, et al. Method of three-dimensional parametric bridge standard modeling based on BIM technology [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University* (*Natural Science*), 2019, 38(10): 19-24.

[8] 李红豫, 李恒, 吴悦, 等. 基于 BIM 的东洲湘江大桥参数化设计应用研究[J]. 公路, 2020, 65(11): 173-178.
LI Hongyu, LI Heng, WU Yue, et al. Application study of BIM-based parametric design of the Dongzhou Xiangjiang Bridge [J]. *Highway*, 2020, 65(11): 173-178.

[9] 傅战工, 张金涛, 张锐. 基于 Inventor 的常泰长江大桥主塔 BIM 正向设计[J].铁道标准设计, 2020, 64(增刊 1): 190- 194.
FU Zhangong, ZHANG Jintao, ZHANG Rui. BIM forward design of main tower of Changtai Yangtze river bridge based on Inventor [J]. *Railway Standard Design*, 2020, 64(Sup 1): 190-194.

[10] 张秋信, 刘天成. BIM 技术在平塘特大桥设计中的应用 [J]. 公路, 2019, 64(9): 27-31.
ZHANG Qiuxin, LIU Tiancheng. Application of BIM technology in Pingtang Bridge [J]. *Highway*, 2019, 64(9): 27-31.

[11] 陈洪春, 黄武, 陈航. BIM 技术在宁淮铁路桥梁设计中的应用 [J]. 铁道标准设计, 2020, 64(增刊 1): 187-190.
CHEN Hongchun, HUANG Wu, CHEN Hang. Application of BIM technology in Nanjing-Huai'an railway bridges design [J]. *Railway Standard Design*, 2020, 64(Sup 1): 187-190.

[12] 韩广晖, 宋浩. 轨道交通梁式桥 BIM 辅助设计软件开发研究 [J]. 铁道勘察, 2020, 46(1): 156-161.
HANG uanghui, SONG Hao. Development of aided BIM design software for rail transit girder bridge [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2020, 46(1): 156-161.

[13] 王继红, 卢禹. BIM 技术在钢桁架梁桥设计阶段的应用 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2017, 9(4): 106-110.
WANG Jihong, LU Yu. Application of BIM technology in design phase


(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

of steel trussed girder bridge [J]. *Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture*, 2017, 9(4): 106-110.

[14] 黄俊炫, 张磊, 叶艺. 基于 CATIA 的大型桥梁三维建模方法[J]. 土木建筑工程信息技术, 2012, 4(4): 51-55.
HUANG Junxuan, ZHANG Lei, YE Yi. A 3D modeling method of large bridge based on CATIA [J]. *Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture*, 2012, 4(4): 51-55.

[15] 李兴, 王毅娟, 王健. 基于 CATIA 的 BIM 技术在桥梁设计中的应用 [J]. 北京建筑大学学报, 2016, 32(4): 13-17.
LI Xing, WANG Yijuan, WANG Jian. Application of BIM technology in bridge design based on CATIA [J]. *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 2016, 32(4): 13-17.

[16] 陈旺, 戴建国. 基于程序开发的桥梁工程 BIM 正向设计研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12(6): 6-11.
CHEN Wang, DAI Jianguo. Study on BIM forward design of bridge engineering based on program development [J]. *Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture*, 2020, 12(6): 6-11.

[17] BORRMANN A, KOLBE T H, DONAUBAUER A, et al. Multi-scale geometric-semantic modeling of shield tunnels for GIS and BIM applications [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2015, 30(4): 263-281.

[18] 李晓军, 田吟雪, 唐立, 等. 山岭隧道结构 BIM 多尺度建模与自适应拼接方法及工程应用 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 126-134.
LI Xiaojun, TIAN Yinxue, TANG Li, et al. Multiscale BIM modeling and adaptive splicing method of mountain tunnel structure for engineering application [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(2): 126-134.

[19] BIM Forum. *Level of Development Specification* [EB/OL]. (2020-12-10) [2021-03-24]. https://bimforum.org/LOD.

[20] 胡振中, 陈祥祥, 王亮, 等. 基于 BIM 的管道预制构件设计技术与系统研发 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(12): 1269-1275.
HU Zhenzhong, CHEN Xiangxiang, WANG Liang, et al. BIM-based design method for prefabricated pipeline components [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, 55(12): 1269-1275.

(责任编辑:田文玉)

(上接第 40 页)

[20] 张波, 隽志才, 林徐勋.基于累积前景理论的随机用户均衡交通分配模型[J].西南交通大学学报,2011,46(5):868-874.
ZHANG Bo, JUAN Zhicai, LIN Xuxun. Stochastic user equilibrium model based on cumulative prospect theory[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2011, 46(5): 868-874.

[21] 张波,隽志才,林徐勋.基于有限理性的弹性需求随机用户均衡交通分配模型[J].计算机应用研究,2011,28(9):3268-3271.
ZHANG Bo, JUAN Zhicai, LIN Xuxun. Stochastic user equilibrium model with elastic demand based on bounded rationality[J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(9): 3268-3271.

[22] 任其亮,张丽莉,吴玲玲.城市组团间居民出行方式选择决策方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(1):36-43.
REN Qiliang, ZHANG Lili, WU Lingling. Decision-making method for travel mode selection of residents in city groups[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2021, 40(1): 36-43.

[23] 张奕源,李进龙,罗霞,等.考虑决策过程与潜在异质性的居民通勤选择行为研究[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(3):221-228.
ZHANG Yiyuan, LI Jinlong, LUO Xia, et al. Commuting mode choice behavior incorporating decision-making process and latent heterogeneity [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(3): 221-228.

[24] 朱成娟.考虑停车换乘的多方式交通网络出行行为分析[D].北京:北京交通大学,2015.
ZHU Chengjuan. *The Analysis of the Travel Behavior on Multi-modal Traffic Network Considering Park-and-Ride*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

[25] LO H K, TUNG Y. Network with degradable links: Capacity analysis and design[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2003, 37(4): 345-363.

[26] 卢晓珊,黄海军,刘天亮,等.考虑早晚高峰出行链的出行方式选择均衡与定价机制[J].系统工程理论与实践,2013,33(1):167-174.
LU Xiaoshan, HUANG Haijun, LIU Tianliang, et al. Mode choice equilibrium and pricing mechanisms considering peak trip chain [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 33(1): 167-174.

(责任编辑:刘 韬)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net