

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.019

# 胶合模板支撑体系优化设计与 BIM 研发

易 成, 季 璇, 朱红光, 张晓迪, 董龙峰

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为达到优化胶合模板支撑体系, 节约胶合模板施工成本的目的, 根据胶合模板支撑体系特点, 结合优化理论提出胶合模板体系优化模型, 以施工成本最低为目标, 各支撑杆件承载力为约束条件, 根据楼板尺寸, 合理计算主、次肋及支撑间距. 优化结果表明: 传统的模板支撑体系设计过于保守, 且没有考虑楼板尺寸对支撑体系设计的影响, 胶合模板体系优化模型可以根据实际情况, 合理选择支撑类型、优化设计支撑间距, 可达到节约施工成本的目的. 同时, 开发了模板优化设计软件, 使复杂的模板优化设计过程变得简单易操作, 大大提高了设计者的工作效率, 并与 BIM 技术相结合, 利用 BIM 技术 3D 可视化、施工模拟等优势解决了设计图纸复杂, 设计交底困难等问题, 实现胶合模板设计、施工、管理的一体化.

**关键词:** 胶合模板; 优化设计; BIM; 遗传算法; 模板支撑体系

**中图分类号:** TU755.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2016)09-0107-06

## Plybamboo formwork supporting system optimization design and BIM research and development

YI Cheng, JI Xuan, ZHU Hongguang, ZHANG Xiaodi, DONG Longfeng

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** On the purpose of optimizing plybamboo formwork supporting system, saving the construction cost of plybamboo formwork, according to characteristics of plybamboo formwork supporting system, plybamboo formwork system optimal model is put forward in combination with optimization theory, which could reasonably calculate the space of stringers, joists and shores, in order to reach the aim of meeting the requirement of saving construction cost under the condition of bearing capacity. Optimization result shows that the traditional design method is more conservative, it ignores the influence of floor size on support system. The optimization model that built in this paper could select the type of support and design the space of support reasonably, so that the construction cost could be saved. The optimization design software is developed to make the complex design optimal process become easy to operate, greatly improving the efficiency of the designers' work, and combined with BIM technology, which has the advantages of 3D visualization and simulation of construction, to solve the problem of complex design drawings and design clarifying difficultly, finally realize the integration of formwork design, construction and management.

**Keywords:** plybamboo formwork; optimization; BIM; genetic algorithm; formwork support system

胶合模板是由木段旋切成单板或由木方刨切成薄木,再用胶粘剂胶合而成的3层或多层的板状材料,在工程中,其以质量轻、表面光滑、裁切方便、造价低等优点,常被用作楼板模板. 由于工程模板属于周转性材料,胶合模板的选取及使用直接影响模板工程的施工质量及成本,而模板工程完成的好坏又直接影响整个工程的质量、工期和成本. 因此,如何在保证模板工程质量的前提下尽可能地降低造

价,一直是施工企业追求的目标. 然而,由于模板板面、肋类型多种多样,选择不同尺寸的板面及肋,模板的支模费用是不同的,现有的模板设计软件大多是依靠施工人员根据经验在软件提供的几个方案里进行选择,没有一个系统的优化过程,造成了大量的浪费,无形中也增加了施工成本的负担. 因此,模板设计方法的优化对于降低施工成本是非常必要的. 然而,优化理论在土木工程实践中长期被忽视,分析原因有以下几个方面: 1) 优化理论相对复杂,长期只能在设计领域应用,施工领域难以涉及,让施工人员掌握并运用优化理论有一定的困难<sup>[1-2]</sup>. 2) 目标函数选取不合理,得不到正确的结果. 设计人员通

收稿日期: 2015-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(51578539)

作者简介: 易 成(1962—),男,教授,博士生导师

通信作者: 季 璇, rainbow6116@yeah.net

常以工程整体造价及承载力要求为目标进行设计, 目标函数中包含的影响因素太多, 导致优化设计难以真正实现. 3) 优化结果相对复杂, 施工人员不能充分理解文字性的设计交底书, 施工时常出现施工与设计分离的情况<sup>[3]</sup>.

而近年来新出现的 BIM 技术给优化理论的合理应用提供了一个新的契机. BIM 技术运用计算机为建筑设计、结构设计、施工设计构筑了一个统一的工作平台<sup>[4-5]</sup>, 可以为施工的某一工序单独提供相对简单又正确的目标函数从而实现该工序的优化设计, 只要有适合的设计软件, 施工技术人员就可以操作计算机实现<sup>[6-7]</sup>. 此外, BIM 独有的演示功能, 可以很好地实现将优化结果向现场施工人员技术交底, 因此, 优化设计理论有了理想的用武之地. 本文就是针对施工阶段胶合模板支模问题, 提出将优化理论与 BIM 技术相结合, 介绍以模板支模费用最低为目标, 通过编写软件实现胶合模板体系的优化设计, 并运用 BIM 技术将优化后的支撑结构展现出来, 使设计交底更加直观, 提高工人工作效率, 减少不必要的浪费.

## 1 胶合模板体系优化

胶合模板体系由板面、次肋、主肋以及支撑 4 部分组成. 模板板面的材质及自身强度决定次肋间距大小, 次肋间距及截面尺寸决定主肋间距大小, 主肋间距大小及截面类型决定支撑间距<sup>[8-10]</sup>. 模板体系是由板面、次肋、主肋及支撑相互作用形成的能够承载现浇混凝土荷载的稳定性结构. 模板体系优化就是要在给定的房间内, 在满足所承受的上部荷载的情况下, 以最少的费用, 使用最少的材料, 完成楼板模板的支护.

### 1.1 优化模型描述

本文以模板支撑体系费用最低为优化目标函数, 构建模板支撑体系优化模型, 在给定楼板尺寸的情况下, 求得主、次肋及支撑的合理间距. 其中, 各组成部分的费用为材料的购置费(包括购买前的人工加工及机械使用费), 但不包括支模时的人工费用, 支模时的人工费用另行计算, 不在公式中体现. 支撑体系优化模型目标函数描述为

$$\begin{aligned} \min C = & A \times B \times C_1 \times \lambda + \frac{A}{l_1} \times C_2 + \frac{B}{l_2} \times C_3 + \\ & \frac{A}{l_3} \times \frac{B}{l_2} \times C_4 + \left( \frac{A}{l_3} \times B + \frac{B}{l_2} \times A \right) \times \\ & C_5 \times n. \end{aligned} \quad (1)$$

由于模板体系中的每个组成部分都需要满足强度、刚度、稳定性的要求, 因此, 将板面、次肋、主肋及

支撑的抗弯强度及稳定性验算作为目标函数的约束条件. 根据文献<sup>[11]</sup>的规定, 胶合模板各组成部分抗弯强度应按简支跨计算, 主、次肋抗剪强度按三跨连续梁计算, 因此, 优化函数的约束条件为

$$\begin{cases} \sigma_i = \frac{k_m q l_{i-1} l_i^2}{w_i} \leq [\sigma], \\ \tau_i = \frac{3}{2 b_i h_i} \times k_\tau \times q l_{i-1} \times l_i < [\tau], \\ f_i = k_f \cdot \frac{q l_{i-1} l_i^4}{100 E_i I_i} < \frac{l_i}{400}, \\ f_4 = \frac{M}{w_4} + \frac{N}{\varphi A} < [f]. \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $C$  为浇筑一块楼板所需要的费用;  $A$  为所需浇筑的楼板的长度;  $B$  为楼板的宽度;  $C_i$  分别代表各组成部分(依次为板面、次肋、主肋、竖向支撑及横向支撑)的单位费用,  $i = 1, 2, \dots, 5$ ;  $l_i$  为组成部分的间距;  $k_m$  为三跨连续梁弯矩系数;  $k_f$  为三跨连续梁挠度系数;  $k_\tau$  为三跨连续梁剪力系数(可由静力计算手册<sup>[12]</sup>查询);  $b_i \times h_i$  代表各组成部分截面面积;  $M$  为风荷载产生的弯矩值,  $M = 0.9 \times 1.4 M_{wk} = 0.9 \times 1.4 w_k l_3 h^2$ , 其中  $w_k$  为风荷载标准值,  $h$  为立杆

纵距;  $N$  为立杆段轴力,  $N = 1.2(N_{G1k} + N_{G2k}) + 0.9 \times 1.4 \sum N_{Qk}$ , 其中  $N_{G1k}$  为支撑结构自重产生的轴向力标准值,  $N_{G2k}$  为构件自重产生的轴向力标准值,  $N_{Qk}$  为施工荷载产生的轴向力标准值.

### 1.2 参数的确定

1) 胶合模板板面损失系数  $\lambda$ . 模板板面损失系数包括如下损失: 切口锯缝宽度, 错切、错割导致的废料. 在支模过程中板面损失部分在建筑工程定额中被称为模板锯材. 以山西省为例, 根据 2011 年山西省建筑工程预算定额<sup>[13]</sup>可知, 模板锯材单价为 1 670 元/ $m^2$ , 每 100  $m^2$  需锯材 0.012  $m^2$ , 因此单位面积支模所需的锯材费用约为 0.2 元/ $m^2$ , 即板面损失系数  $\lambda$  可取 1.2.

2) 单位面积胶合模板费用  $C_1$ . 根据 2011 年山西省建筑工程预算定额, 胶合模板(10 mm 厚) 单价为 33 元/ $m^2$ , 每 100  $m^2$  消耗 16.41  $m^2$ , 根据定额反算模板周转次数为 6 次左右, 因此每平方米胶合模板一次使用费用为 5.5 元/ $m^2$ .

3) 次肋、主肋费用  $C_2, C_3$ . 方木支撑价格为 1 610 元/ $m^3$ , 周转次数为 10~15 次, 计算单根方木支撑费用如下: 如 5 m 长的 0.06 m $\times$ 0.08 m 单根方木支撑价格为 38.64 元, 取单根方木周转次数为 10 次, 每周转一次所需支撑费用为 3.86 元.

4) 竖向、横向钢支撑费用  $C_4$ 、 $C_5$ 。钢支撑通常选用  $\phi 48 \times 3.5$  钢管, 根据文献[11],  $\phi 48 \times 3.5$  圆形钢管单件质量为  $3.87 \text{ kg/m}$ , 市场价为  $3\,430 \text{ 元/t}$ , 可得每米  $\phi 48$  钢管价格为  $13.27 \text{ 元}$ , 钢支撑周转次数为  $100 \sim 120$  次, 即每周转一次所需的单件竖向支撑费用为 (取周转次数为  $100$  次)  $13.27 \text{ 元/m} \times 3 \text{ m}$  (举架高度)  $/100 = 0.4 \text{ 元}$ , 单位长度横向支撑的费用约为  $0.13 \text{ 元/m}$ 。

5) 水平横杆层数  $n$ 。水平横杆层数可根据房屋举架设计高度由文献[11]查询得到。如  $3 \text{ m}$  高的房屋需要设置  $3$  层水平横杆。

1.3 优化问题的求解

传统搜索最优解的方法都是单点搜索, 如图 1 所示, 这种点对点的搜索方法, 对于多峰分布的搜索空间常常会陷入局部的某个单峰极值点, 而无法搜索到全局最优解。而遗传算法与传统算法相比具有以下优势: 1) 群体搜索特性, 遗传算法是从可行解中随机抽取一些解作为初始解群搜索最优解, 可有效地避免出现局部收敛情况, 使搜索过程具有较好的全局性; 2) 采用自然进化机制来表现迭代过程, 能够快速可靠地找到最优解; 3) 约束性小, 遗传算法用自身的目标函数作为适应度函数来评估每个基因个体, 而适应度函数不受连续可微的约束, 且定义域可以任意设定<sup>[14]</sup>。

问题的最优解。由于本文提出的模板支撑结构优化函数属于复杂的系统问题, 因此, 采用遗传算法来求解可以更加准确、快速的寻找最优解, 避免陷入局部最优。

2 实例分析

利用上述模型分别计算在楼板尺寸不同的情况下胶合模板体系优化布置方案。在满足模板各组成部分的刚度、强度及稳定性的条件下, 以所花费的费用最少为目标, 对模板支撑结构的优化设计, 以达到节省费用、降低成本的目的。利用 MATLAB 遗传算法工具箱, 分别计算不同尺寸楼板及选用不同尺寸主肋、次肋的条件下的胶合模板体系优化配板方案结果。计算参数选择如下: 取种群数量  $\text{PopulationSize} = 20$ ; 子代数量  $\text{Generation} = 50$ ; 每代精英数  $\text{EliteCount} = 5$ ; 交叉率  $\text{Pcross} = 0.8$ ; 变异率  $\text{Pmutation} = 0.1$ <sup>[15]</sup>。

楼板尺寸相同主次肋不同情况下模板支撑结构优化对比结果见表 1, 当所浇筑楼板尺寸不变 ( $10 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ ) 仅改变次肋、主肋的截面尺寸时, 所需的支模费用大不相同。顶板面积相同主次肋不同情况下支模费用变化曲线见图 2, 当次肋惯性矩  $I_1$  不变, 主肋变化时, 主肋的惯性矩  $I_2$  选择越大, 支模费用越低, 因此, 选择适合的主、次肋可有效地降低模板支模费用。

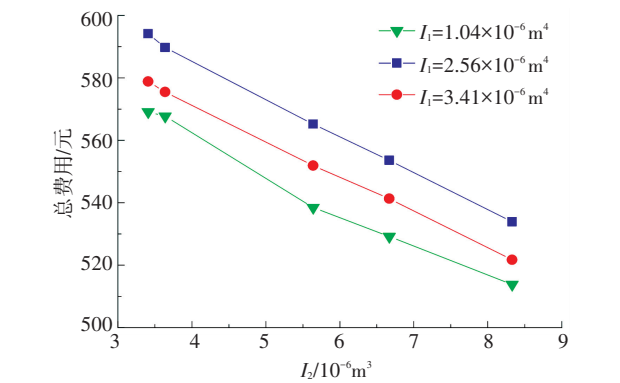


图 2 顶板相同主次肋不同情况下支模费用变化曲线  
Fig.2 Formwork supporting cost changing under same floor slab and different joists and stringers

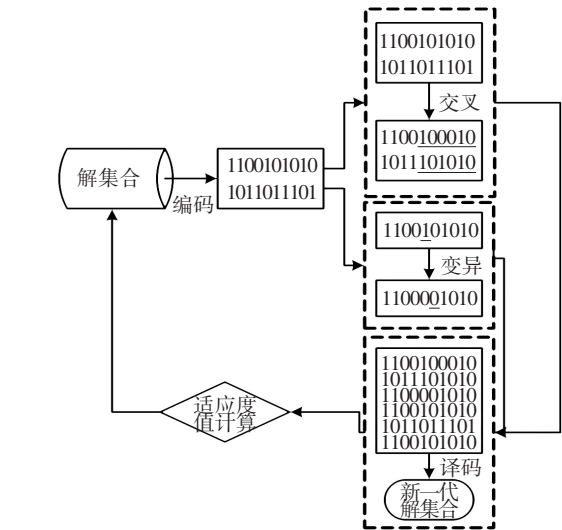


图 1 遗传算法求解步骤  
Fig.1 Genetic algorithm solving steps

遗传算法随机抽取若干可行解并转化为二进制编码作为初始种群进行交叉、变异后重新获得新种群, 将新种群中的每个个体代入目标函数计算相应的适应度值, 保留适应度高的个体作为父代进入下一轮的繁衍, 淘汰适应度低的个体, 这样一代一代繁衍进化, 最后收敛到一群最能适应环境的个体, 求得

楼板面积相同 (以顶板面积为  $48 \text{ m}^2$ , 次肋选择  $0.06 \text{ m} \times 0.08 \text{ m}$ , 主肋选择  $0.10 \text{ m} \times 0.10 \text{ m}$  为例) 时支模费用随楼板长宽比的变化曲线见图 3, 虽然楼板面积相同, 但模板支模费用也会随着楼板长宽比的变化而变化, 因此, 仅用面积来计算模板支模费用是不科学的, 楼板的长宽比也是支模费用的一个重要影响因素。相同面积下, 楼板长宽比越大, 模板费用越高。

表 1 楼板尺寸相同主次肋不同情况下模板支撑结构优化对比结果

| Tab.1 Formwork supporting system optimal comparison result under same floor slab and different joists and stringers |                                                        |                            |                                                        |            |            |            |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| 次肋横断面面积/<br>m <sup>2</sup>                                                                                          | I <sub>1</sub> /<br>(10 <sup>-6</sup> m <sup>4</sup> ) | 主肋横断面面积/<br>m <sup>2</sup> | I <sub>2</sub> /<br>(10 <sup>-6</sup> m <sup>4</sup> ) | 次肋间距/<br>m | 主肋间距/<br>m | 支撑间距/<br>m | 支撑费用/<br>元 |
| 0.05×0.10                                                                                                           | 1.04                                                   | 0.08×0.08                  | 3.41                                                   | 0.362      | 1.412      | 0.841      | 569.1      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.06×0.09                  | 3.64                                                   | 0.440      | 1.324      | 0.869      | 567.7      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.09×0.09                  | 5.64                                                   | 0.382      | 1.401      | 0.902      | 538.5      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.08×0.10                  | 6.67                                                   | 0.339      | 1.331      | 1.120      | 529.2      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.10×0.10                  | 8.33                                                   | 0.440      | 1.324      | 1.155      | 513.8      |
| 0.06×0.08                                                                                                           | 2.56                                                   | 0.08×0.08                  | 3.41                                                   | 0.331      | 1.239      | 0.878      | 594.1      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.06×0.09                  | 3.64                                                   | 0.336      | 1.233      | 0.897      | 589.7      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.09×0.09                  | 5.64                                                   | 0.338      | 1.216      | 0.965      | 565.2      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.08×0.10                  | 6.67                                                   | 0.404      | 1.126      | 1.160      | 553.6      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.10×0.10                  | 8.33                                                   | 0.414      | 1.095      | 1.272      | 533.9      |
| 0.08×0.08                                                                                                           | 3.41                                                   | 0.08×0.08                  | 3.41                                                   | 0.349      | 1.340      | 0.856      | 578.8      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.06×0.09                  | 3.64                                                   | 0.418      | 1.263      | 0.890      | 575.5      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.09×0.09                  | 5.64                                                   | 0.420      | 1.352      | 0.962      | 551.9      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.08×0.10                  | 6.67                                                   | 0.440      | 1.225      | 1.036      | 541.3      |
|                                                                                                                     |                                                        | 0.10×0.10                  | 8.33                                                   | 0.437      | 1.244      | 1.179      | 521.7      |

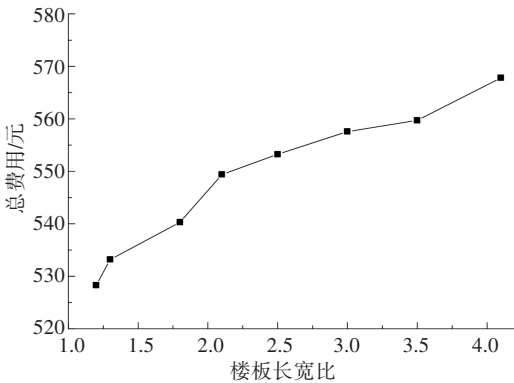


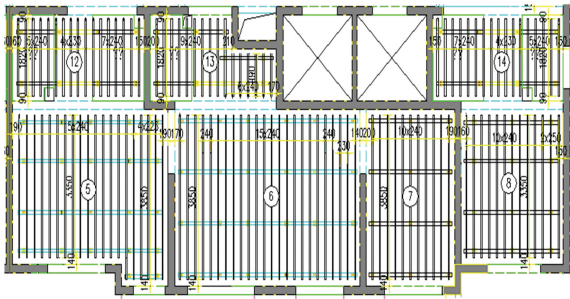
图 3 楼板面积相同时支模费用随楼板长宽比的变化曲线

Fig.3 Supporting cost changing condition with aspect ratio changing under the same slab floor

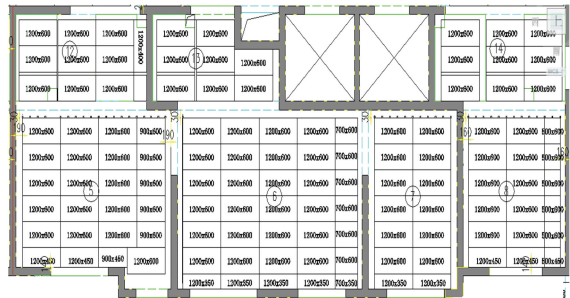
本文以中建一局承接御景园项目为例,利用优化模型对模板支模费用进行优化,优化后的支模费用与实际工程费用对比见表 3(以次肋选择 0.04 m×0.09 m,间距 0.392 m,主肋选择 0.10 m×0.10 m,间距 1.141 m 为例),优化后的费用比实际费用少,并且顶板面积越大,支模费用节约效果越明显,若顶板面积较小,则没有明显的优化效果。

应用传统模板设计软件输出的支撑结构及模板配板平面图如图 4 所示,该设计图纸过于复杂,墙、梁、板及支撑线混杂在一起,难以区分,工人不容易识别,不利于现场施工交底,而且设计方案需要设计者人工优化并且手动绘制,不仅智能性差、费时费力、更无法保证设计质量、也无法控制施工成本。

因此,本文根据现有模板设计软件存在的问题,结合前文提出的优化设计模型,基于 C#语言,开发智能的模板优化设计系统,该系统利用计算机实现模板优化设计过程,并可自动输出模板优化后的效果图,使模板设计工作更加科学化、智能化。



(a) 支撑结构平面布置



(b) 模板配板

图 4 御景园项目传统模板设计方案

Fig.4 Traditional formwork supporting structure design drawing of Yujingyuan project

表 2 顶板(0.10 m 厚)面积相同尺寸不同的情况下支撑结构优化对比结果

Tab.2 Formwork supporting system optimal comparison result under the same floor slab area (0.10 m) and different size

| 楼板长/m | 楼板宽/m | 长宽比  | 次肋间距/m | 主肋间距/m | 支撑间距/m | 支模费用/元 |
|-------|-------|------|--------|--------|--------|--------|
| 7     | 6.8   | 1.03 | 0.318  | 1.157  | 1.109  | 528.3  |
| 8     | 6.0   | 1.33 | 0.284  | 1.202  | 1.098  | 533.2  |
| 9     | 5.3   | 1.70 | 0.433  | 1.036  | 1.152  | 540.2  |
| 10    | 4.8   | 2.08 | 0.362  | 1.102  | 1.074  | 549.4  |
| 11    | 4.4   | 2.50 | 0.409  | 1.063  | 1.116  | 553.2  |
| 12    | 4.0   | 3.00 | 0.362  | 1.002  | 1.196  | 557.6  |
| 13    | 3.7   | 3.51 | 0.428  | 1.032  | 1.123  | 559.7  |
| 14    | 3.4   | 4.12 | 0.418  | 1.056  | 1.141  | 567.8  |

表 3 御景园项目不同尺寸楼板模板体系优化结果

Tab.3 Formwork system optimal result of different slab floor in Yujingyuan project

| 楼板长/m | 楼板宽/m | 楼板面积/m <sup>2</sup> | 优化后支模费用/元 | 实际费用/元 |
|-------|-------|---------------------|-----------|--------|
| 4.1   | 2.0   | 8.20                | 103.7     | 104.6  |
| 4.1   | 2.8   | 11.48               | 138.3     | 152.5  |
| 3.6   | 3.2   | 11.52               | 138.9     | 156.2  |
| 4.8   | 3.6   | 17.28               | 206.5     | 228.2  |
| 7.9   | 1.8   | 14.22               | 202.2     | 250.2  |
| 5.8   | 4.1   | 23.78               | 273.7     | 310.8  |

3 基于 BIM 的模板工程优化系统构建

本文开发的模板优化设计系统主要由数据输入、数据处理、智能优化、结果输出 4 部分组成。利用设计阶段得到的御景园某楼层结构图,见图 5。

图 9,红色(标有 A 记号的模板)代表尺寸为 2 440×1 220的模板,棕色(标有 B 记号的模板)代表尺寸为2 135×915 的模板,其余部分为“破尺寸”部分,通过颜色区分不同尺寸的模板可使工人一目了然的了解设计方案,并可通过 Revit 独有的施工模拟演示功能为工人做设计交底,减少工人施工时的失误,有效的解决设计与施工脱节的问题。

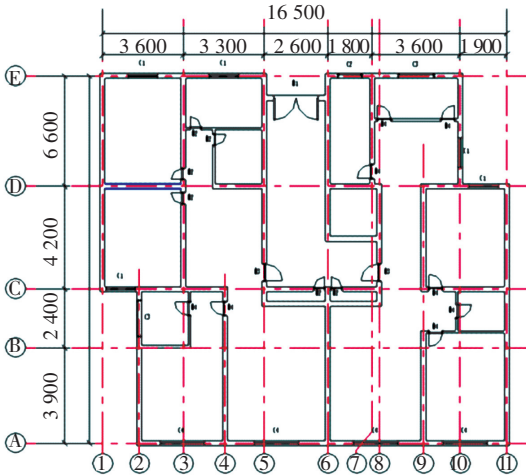


图 5 御景园项目某楼层结构设计图

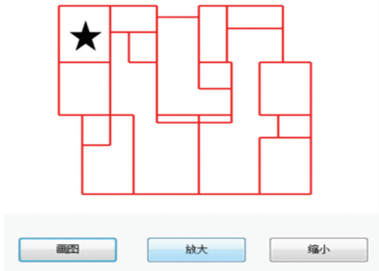


图 6 模板优化软件提取结构图后的效果图

从图 5 中提取墙、梁、柱等数据并导入模板优化设计系统中,导入结果见图 6,点击图 6 中需要配置模板的房间,系统会自动调出优化函数,通过计算机对模板支撑结构进行设计,例如:当选择图 6 中的星号房间,系统会自动给出配板方案,即混合配板,如图 7 所示,并根据所选择的配板方案布置输出配板结果,如图 8 所示。同时,在 Revit 中开发模板“族”模块,并开发数据接口,将模板优化系统得到的方案数据导回 Revit 中,实现立体式的模板支模方案,见

Fig.6 Effect drawing of being extracted by formwork optimization software

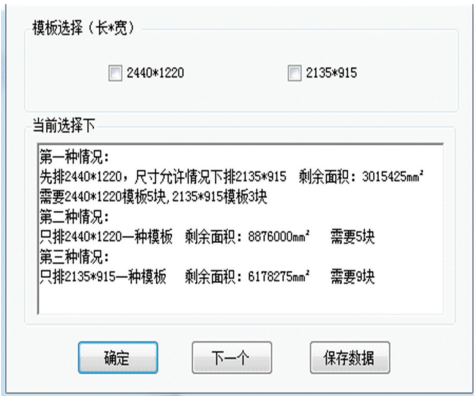


图 7 胶合模板优化配板系统

Fig.7 Formwork optimal layout system

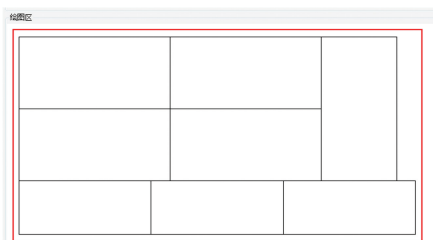
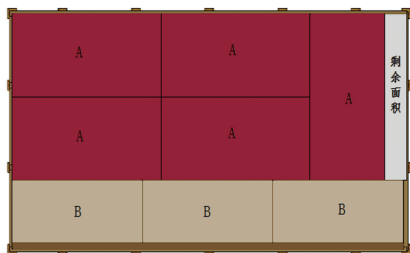
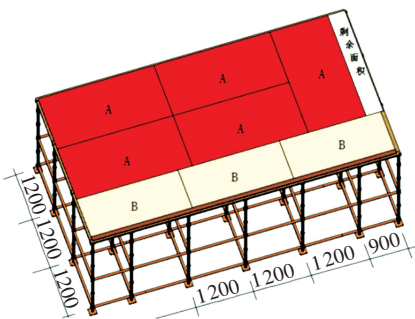


图 8 胶合模板板面优化配板结果

Fig.8 Formwork optimal layout result



(a) 板面优化配板



(b) 支撑结构优化设计

图 9 模板优化设计图

Fig.9 Formwork design optimal result

## 4 结 论

1) 根据模板支撑体系的构造,建立了胶合模板支撑体系优化模型,并以中建一局御景园项目为例,说明如何应用优化模型对胶合模板进行优化设计,分析结果表明,优化后的支模费用比实际费用少,证明所提出的模板优化设计模型能够较好地应用于工程实际当中。

2) 根据模板优化模型,通过选取不同尺寸主、次肋及房间进行对比表明:当所浇筑楼板尺寸不变时,模板支模费用与主、次肋的选择有关,当次肋不变时,模板支模费用与主肋截面尺寸成反比;楼板面积相同但长宽比不同时,模板支模费用随楼板长宽比的增加而增大。可见,楼板的长宽比是支模费用的一个重要影响因素。

3) 结合所构建的优化模型,基于 C#语言开发模板优化设计软件,通过程序实现模型优化过程,便于模板设计者应用此模型优化模板设计方案,减少模板施工费用,同时,也提高了设计者的工作效率。

## 参考文献

[1] HANNA A S, SENOUCI A B. Design optimization of concrete-slab

forms[J]. Construction Engineering Management, 1995; 121(2): 215-221.

[2] KARSHENAS S, HEINRICH S M. Dynamic modeling of slab formwork during concrete placement[J]. Structure Engineering, 1994; 120(7): 2199-2218.

[3] 何清华,钱丽丽,段运峰,等. BIM 在国内外应用的现状及障碍研究[J]. 工程管理学报, 2012, 26(1): 12-16.

HE Qinghua, QIAN Lili, DUAN Yunfeng, et al. Current situation and barriers of BIM implementation[J]. Journal of Engineering Management, 2012, 26(1): 12-16.

[4] 何关培.《中国工程建设 BIM 应用研究报告 2011》解析[J]. 土木建筑工程信息技术, 2012, 4(1): 15-22.

HE Guanpei. "China construction industry BIM survey report 2011" analysis[J]. Information Technology in Civil Engineering and Construction, 2012, 4(1): 15-22.

[5] 孙悦. 基于 BIM 的建设项目全生命周期信息管理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 24-30.

SUN Yue. Research on lifecycle information management of construction projects based on BIM[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 24-30.

[6] 王裙. BIM 理念及 BIM 软件在建设项目中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 17-57.

WANG Qun. Study on the application of BIM principle and BIM software in construction projects[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011: 17-57.

[7] 赵鸣, 张方超, 张国锋. 建筑施工模板计算机辅助设计系统[J]. 计算机辅助工程, 2007, 16(3): 52-57.

ZHAO Ming, ZHANG Fangchao, ZHANG Guofeng. Computer aided design system for formwork[J]. Computer Aided Engineering, 2007, 16(3): 52-57.

[8] SINGH V, GU N, WANG X. A theoretical framework of a BIM based multi-disciplinary collaboration platform[J]. Automation in construction, 2011, 20(2): 134-144.

[9] SACKS R, RADOSAVLJEVIC M, BARAK R. Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction[J]. Automation in Construction, 2010, 19(5): 641-655.

[10] LIU Zhaoqiu, LI Yungui. The development of BIM and its application in design of project[J]. Building Science, 2008, 25: 96-99.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范: JGJ 130—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for safety of steel tubular scaffold with couplers in construction: JGJ130—2011[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.

[12] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 143-206.

LEI Yingjie, ZHANG Shanwen. The genetic algorithm toolbox and application based on MATLAB[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2014: 143-206.

[13] 陕西省工程建设标准定额站. 2011 山西省建设工程预算定额[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2011: 424-425.

Engineering construction standard quota station of Shanxi province. 2011 Construction engineering budget ration of Shanxi[M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 2011: 424-425.

[14] LU W W S, LI H. Building information modeling and changing construction practices[J]. Automation in Construction, 2011, 9(20): 99-100.

[15] 姚谏. 建筑结构静力计算实用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 36-52.

YAO Jian. Static calculation Handbook for practical structure[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2014: 36-52.

(编辑 魏希柱)