

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.011



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于BIM技术与模拟退火算法的村镇轻钢框架 结构智能设计方法

周婷^a, 孙克肇^b, 陈志华^c, 刘红波^c

(天津大学 a. 建筑学院; b. 未来技术学院; c. 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:传统村镇住宅结构设计需要进行大量的人工试算与重复建模,而受制于建设成本,村镇住宅无法像城镇住宅一样通过设计师进行专业的结构与验算,其安全性与经济性均难以满足要求。为此,提出一种村镇轻钢框架结构智能设计方法,包括智能建模与智能优化两个环节。基于图层自动识别算法、光学字符识别技术、自适应分块算法提出村镇轻钢框架结构BIM智能建模方法,包括图层识别、轴文本数据提取、墙体轮廓提取等,智能建模结果基本满足实际工程要求。基于提出的两阶段模拟退火算法给出村镇轻钢框架结构的智能优化方法,优化速度较快,优化效果良好。通过实际工程案例对提出的智能设计方法进行验证,结果表明,提出的村镇轻钢框架结构智能设计方法具有可行性,与传统的人工设计方法相比,设计周期可缩短70%以上,材料用量、结构设计指标接近人工设计结果。

关键词:村镇住宅;轻钢框架结构;智能设计;BIM技术;模拟退火算法

中图分类号: TU241.4; TU318 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)01-0139-13

Intelligent design of rural light steel frame structure based on BIM and simulated annealing algorithm

ZHOU Ting^a, SUN Kezhao^b, CHEN Zhihua^c, LIU Hongbo^c

(a. School of Architecture; b. School of Future Technical; c. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: In the traditional structural design process, rural buildings require a lot of manual calculations and repeated modeling. However, due to the constraint of construction cost, they cannot be designed and checked professionally as urban types, and the safety and economy are difficult to meet the requirements. In this study, an intelligent design approach for structural design of rural light steel frame structure was proposed, including the intelligent modeling and optimization. Based on the automatic layer classification method (ALCM), optical character recognition technology (OCR) and adaptive block algorithm, BIM intelligent modeling method was

收稿日期: 2022-11-22

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1101005); 国家建筑工程技术研究中心开放基金(BSBE2022-13)

作者简介: 周婷(1984-), 女, 博士, 副教授, 主要从事钢结构研究, E-mail: zhouting1126@126.com。

陈志华(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhchen@tju.edu.cn。

Received: 2022-11-22

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFD1101005); National Construction Engineering Technology Research Center Open Fundation Project (No. BSBE2022-13)

Author brief: ZHOU Ting (1984-), PhD, associate professor, main research interest: steel structure, E-mail: zhouting1126@126.com.

CHEN Zhihua (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhchen@tju.edu.cn.

proposed where layer recognition, the extraction of axis text data and wall contour were included, and generated structural models satisfied the requirements of engineering practice. Based on the proposed two-stage simulated annealing algorithm, the intelligent optimization method was proposed and verified by case histories. Results showed that the proposed intelligent design method was feasible. Compared with the traditional method, its time use could be shortened by more than 70%, and the material consumption and structural design parameters were similar.

Keywords: rural buildings; light steel frame structure; intelligent design; BIM technology; simulated annealing algorithm

近年来,中国村镇经济的发展突飞猛进^[1],在住宅建设热潮的推动下,中国村镇住宅的发展从量的增加转变为质的提高,建设质量和居住条件的改善成为下一阶段村镇住宅发展的必然要求^[2]。中国传统的建筑结构设计多依赖于 YJK、PKPM 等结构软件的力学分析结果,凭借工程师的经验对建筑结构进行人为调整,包括较为合理的构件截面取值和布置,使其满足相关国家规范要求,在保证结构可靠性、安全性的同时降低建筑材料成本^[3]。然而,这种方法受工程师人为主观因素的影响较大,耗力耗时,无法满足中国建筑行业快速发展的需求。且在中国村镇住宅的结构设计中,受经济条件的制约,很难做到每一个村镇住宅都由工程师进行精确缜密的结构设计。村镇住宅的设计与施工普遍是直接采用网上的标准住宅图集,存在抗灾能力不足、资源浪费严重等共性问题,安全性与经济性不能得到充分验证^[4-5]。针对上述问题,探索一套符合中国国情、适用于村镇住宅的低成本结构设计流程就十分必要。

与中国村镇住宅应用较多混凝土结构、砌体结构相比,轻钢框架结构具有结构形式简单、轻质高强、延性好、施工方便等优点,应在村镇地区推广应用^[6]。以建筑结构智能设计技术实现结构模型的智能建模和结构方案的智能优化,能有效改善传统结构设计效率低下的问题,并保证优化后结构的安全性和经济性^[7-8]。因此,研究轻钢框架结构的智能设计方法对保证村镇建筑行业的快速发展具有重要意义。

结构计算模型的智能建模和结构方案的智能优化是建筑结构智能设计技术中最重要的两部分,其中智能建模是智能优化的先决条件^[9]。智能建模方面,目前研究多集中于多高层建筑图纸的 BIM 模型自动生成方法,少有涉及到结构计算模型的智能生成。建筑图纸包括图像和矢量文件两类。针对建筑图像,Zeng 等^[10]采用多任务网络方式,以房间边界为导向来识别图形基本原语;Zhao 等^[11-12]基于深度学习、图像处理和光学字符识别的混合方法从图像中提取墙和门洞;Liu 等^[13]基于卷积神经网络检

测图像中的墙连接点,从而完成墙壁的定位。针对建筑矢量文件,Domínguez 等^[14]引入墙邻接图、墙体分块算法的概念来检测墙体;Yin 等^[15-16]基于图层分类方法来识别文本、窗口、墙体。智能优化方面,许多学者已对钢筋设计、复杂高层结构设计等进行了大量的研究,Delyová 等^[17]将改进的遗传算法应用至钢桁架的优化设计中,实现了桁架尺寸和布置位置的拓扑优化;Baghdadi 等^[18]使用粒子群优化算法,结合 MATLAB 与有限元计算软件进行建筑平面布局优化,旨在实现不规则的墙壁与楼板布置下梁的最佳布局设计;Gholizadeh 等^[19-20]采用蝙蝠算法和海豚回声算法,研究了剪力墙位置的优化,以得到最优布局。对于村镇住宅的结构设计,相较于其他结构形式,其约束条件不同,体量规模较小,构件的种类和数量也较少;再考虑到村镇经济条件的制约,因此要求适用于村镇住宅的算法更加简便、通用。综上可见,目前针对村镇住宅的结构智能设计仍处于空白状态,如何实现高效、经济的村镇住宅结构设计仍有待研究。

为此,笔者以村镇住宅为研究对象,开展结构智能设计方法的研究。基于村镇住宅标准图集,智能生成所对应的轻钢框架结构模型,并应用智能优化算法自动迭代计算,直至得到满足安全性与经济性的结构布置方案。综合图层自动识别算法、光学字符识别技术、自适应分块算法,提出 BIM 智能建模方法;针对参数化的结构 BIM 模型,提出基于改正后的两阶段模拟退火算法的智能优化方法;结合实际工程案例,对所提出的智能设计方法进行应用,以验证方法的可行性与有效性。通过提出的智能建模和智能优化方法,可以为村镇住宅提供一套简便、经济、高效的智能设计方法。

1 BIM 结构智能建模

村镇住宅多为混凝土结构和砌体结构,其设计与施工多直接根据标准住宅图集进行,在保证整体户型设计不变的情况下,依照原建筑基本轴线,采用综合图层自动识别算法、光学字符识别技术、自

适应分块算法的混合方法,提取图层关键数据,重新进行轻钢框架结构构件布置,从而实现村镇住宅 BIM 结构智能建模。

1.1 图层识别

标准住宅图集对应的建筑图纸通常为矢量图形文件。因此,可采用图层自动识别算法(ALCM)^[15-16]完成轴文本、墙等关键图层信息的提取。

图层自动识别算法是由 Yin 等^[15-16]提出的矢量图形文件图层提取算法,可快速确定标准图纸的关键图层名称,进而有效提取图层数据。图层识别从搜索每个图层的特征元素(FE)开始,特征元素是结构对象或注释中最具区分性和代表性的元素。轴线的特征元素为线条,轴文本的特征元素为文字或者数字。其次,检查特征元素的属性(Attr)是否满足某些条件,如果特征元素的属性与目标类型的属性一致,则特征元素匹配该对象的可能性更大。除了特征元素的自身属性外,特征元素的邻近元素是决定其与目标类别匹配程度的另一个重要元素。这种对特征元素具有关系约束的邻近元素为相关元素(RE),与特征元素一样,相关元素的属性也需要检查。此外,特征元素和相关元素之间应该符合建筑图纸中要求的拓扑结构关系(Rel)。由于建筑图纸制图规定和建筑设计的多样性,用于判断特征元素和相关元素属性和拓扑关系的一些条件是必要的,而其余一些条件是非必要的。根据条件对识别结果的影响程度,将其划分为必要条件(NC)和充分条件(SC)。图层 FE-RE 结构如图 1 所示,在判断某个图层是否为目标层时,先检查图层的 FE 和 RE 的 NC 是否都满足,再检查 FE 和 RE 的 SC,按照式(1)计算单个得分,最后通过式(2)计算总得分,得分最高图层即为目标层。整个图层自动识别流程如图 2 所示,图 3(a)是建筑矢量图形源文件,图 3(b)是图层自动识别的结果。

$$Score = \begin{cases} 0 & (\exists NC == False) \\ \frac{N(SC == True) + 1}{N(SC) + 1} & (\nexists NC == False) \end{cases} \quad (1)$$

| | |
|------------------------|--|
| 特征因素 FE | 属性 Attr(必要条件 NC/充分条件 SC) |
| 相关因素 1 RE ₁ | 属性 Attr ₁ (必要条件 NC ₁ /充分条件 SC ₁) |
| | 拓扑结构关系 Attr ₁ (必要条件 NC ₁ /充分条件 SC ₁) |
| 相关因素 2 RE ₂ | 属性 Attr ₂ (必要条件 NC ₂ /充分条件 SC ₂) |
| | 拓扑结构关系 Attr ₂ (必要条件 NC ₂ /充分条件 SC ₂) |
| | |
| 相关因素 n RE _n | 属性 Attr _n (必要条件 NC _n /充分条件 SC _n) |
| | 拓扑结构关系 Attr _n (必要条件 NC _n /充分条件 SC _n) |

图 1 图层 FE-RE 结构

Fig. 1 FE-RE structure of layer

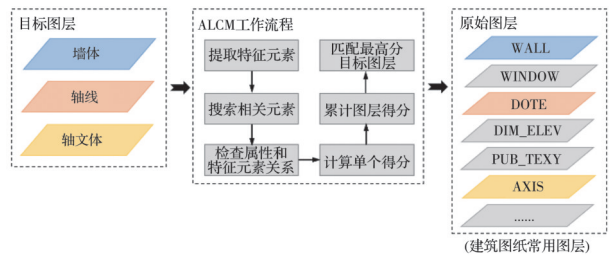
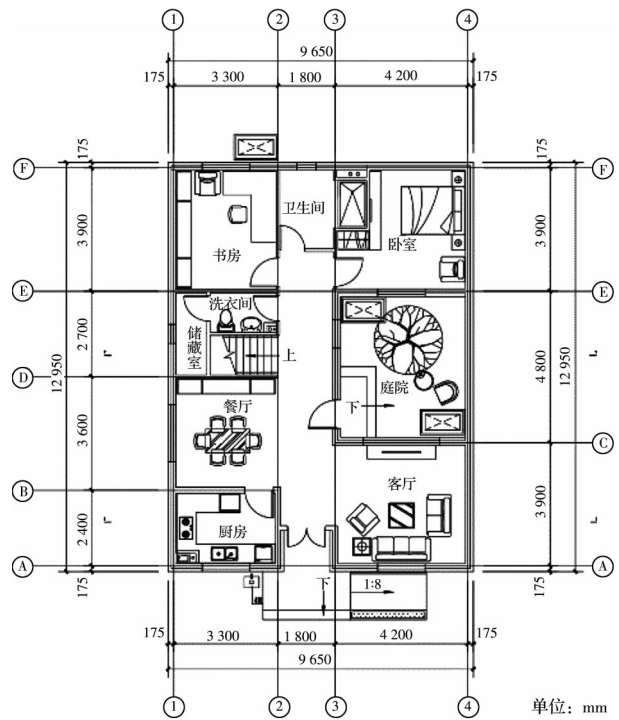
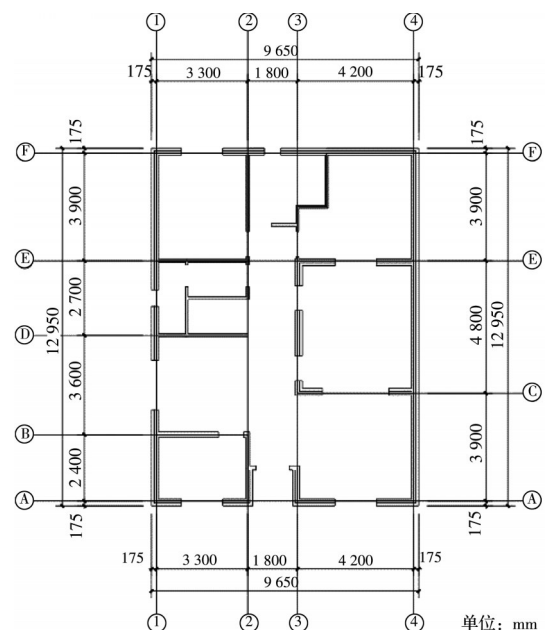


图 2 图层自动识别流程

Fig. 2 Automatic identification process of layer



(a) 标准图集矢量图形文件



(b) 关键图层信息提取

图 3 建筑图纸图层识别

Fig. 3 Layer recognition of architectural drawings

$$\text{Totalscore} = \text{Score}(\text{FE}) + \sum_{i=1}^n \text{Score}(\text{RE}_i) \quad (2)$$

式中:Score为每个图层的FE与目标图层的匹配度得分; $N(\text{SC} = \text{True})$ 为符合匹配条件的SC的数目; $N(\text{SC})$ 为识别某图层FE-RE结构的充分条件个数;Totalscore为总匹配度得分。

1.2 轴文本数据提取

通过图层自动识别算法可以获得到建筑图纸中有用的图层信息,在识别得到的图层基础上对轴文本的数据进行提取。采用光学字符识别(OCR)技术,将轴文本信息从原始建筑图纸中分离出来,为后续构件定位和构件初选提供数据支撑。为提升鲁棒性并保证所识别数据的准确性,将轴文本数据分成水平和垂直文本,依次逐块识别,如图4所示,并根据其在建筑图纸中的位置保存到两个Excel电子表格中,如图5所示。

| | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| 9 650 | 175 | 3 300 | 1 800 |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 4 200 | 175 | 175 | 3 300 |
| 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 800 | 4 200 | 175 | 9 650 |
| 9 | 10 | 11 | 12 |

(a) 水平文本

| | | | |
|--------|-------|-------|-------|
| 12 950 | 175 | 2 400 | 3 600 |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 2 700 | 3 900 | 175 | 175 |
| 5 | 6 | 7 | 8 |
| 3 900 | 4 800 | 3 900 | 175 |
| 9 | 10 | 11 | 12 |
| 12 950 | | | |
| 13 | | | |

(b) 垂直文本

图 4 采用OCR技术逐块提取轴文本数据

Fig. 4 Extraction of axial text data using OCR technology

1.3 墙体轮廓提取

对于村镇轻钢框架结构,可以采取框架柱布置于轴线交点上、框架梁布置于轴线上的布置方式。考虑到由于绘图的不规范性导致的部分建筑图纸定位轴线残缺或赘余情况,借助提取的轴文本数据,重新绘制建筑定位线。除此之外,为避免结构构件布置于建筑室内空间和建筑主体之外,需要通过建筑墙体来精确结构构件布置。利用图层自动识别算法对建筑平面图中的墙体进行识别,得到如图6(a)所示的墙体,部分墙体的线段被门窗断开。为此,采用自适应分块的墙体轮廓提取算法^[21],对已有墙体数据进行处理,从而提取墙体的完整轮廓。

自适应分块的墙体轮廓提取算法是李昌华等^[21]提出的墙体识别算法,解决了建筑平面图中坐标点

| | A | B | C | D | E | F |
|---|-------|-------|-------|-------|-----|---|
| 1 | 9 650 | | | | | |
| 2 | 175 | 3 300 | 1 800 | 4 200 | 175 | |
| 3 | 175 | 3 300 | 1 800 | 4 200 | 175 | |
| 4 | 9 650 | | | | | |
| 5 | | | | | | |

(a) 水平轴文本 excel 表格

| | A | B | C | D | E | F |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 1 | 12 950 | | | | | |
| 2 | 175 | 2 400 | 3 600 | 2 700 | 3 900 | 175 |
| 3 | 175 | 3 900 | 4 800 | 3 900 | 175 | |
| 4 | 12 950 | | | | | |
| 5 | | | | | | |

(b) 垂直轴文本 excel 表格

图 5 轴文本数据表格

Fig. 5 Table of axis text data

不均匀分布引起的轮廓误差问题。其基本思想是把离散点数据划分为大小相同的格网,离散点数据对应着图6(a)中所有墙壁线段的特征坐标点,如图6(b)所示,格网的大小为一个动态变化的值,与每个格网中的最佳平均坐标点数量M有关,可通过式(3)~式(6)进行计算。

$$\begin{cases} W = X_{\max} - X_{\min} \\ H = Y_{\max} - Y_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{n}{WH} \quad (4)$$

$$s = \frac{28A}{n\pi} \quad (5)$$

$$M = s\rho \quad (6)$$

式中: X_{\max} 、 X_{\min} 、 Y_{\max} 、 Y_{\min} 为给定点集中横坐标、纵坐标的最大值、最小值; W 、 H 为上述坐标围成矩形的宽和高; ρ 为坐标点的密度期望; n 为给定点集中所有的坐标点数量; s 为搜索圆外接正方形面积; A 为给定点集覆盖的区域面积。

计算所围矩形中墙体坐标点的各极值点,沿顺时针方向连接各极值点成有向线段,并划分矩形为5个区域I~V,如图6(c)所示。采用快速排序算法,按坐标递增方向进行排序,逐区域提取两侧端点连线,将整个点集划分为上下区域,依次判断点集内其余各点与有向线段的位置关系。将上区域中的点按坐标递增的顺序拟合连接,下区域中的点按坐标递减的顺序拟合连接,即可得到墙体完整轮廓,如图6(d)所示。

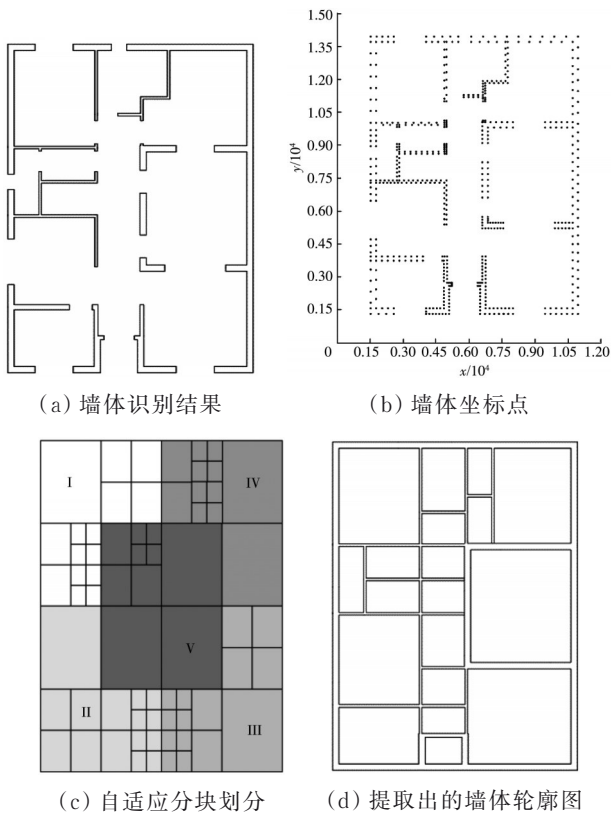


图 6 墙体轮廓提取

Fig. 6 Extraction of wall contour

1.4 结构构件初选与自动布置

对于村镇轻钢框架结构住宅,框架梁多采用高频焊接 H 型钢,框架柱多采用镀锌钢管。结合《钢结构住宅主要构件尺寸指南》^[22]和《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[23]确定村镇住宅常用框架梁、框架柱的截面尺寸,如表 1 所示。通过在 Revit 平台建立与之对应的各类族文件,形成装配式村镇住宅轻钢结构构件库。如图 7 所示,根据光学字符识别技术提取到的轴文本数据所对应的构件跨度,按照梁高跨比为 1/12、梁柱线刚度比为 4 的设计原则,计算框架梁柱的理论截面尺寸,并与装配式村镇住宅轻钢结构构件库里已有的梁柱截面类型进行匹配,选择村镇住宅的初始构件截面。

结构构件自动布置的操作借助可视化编程平

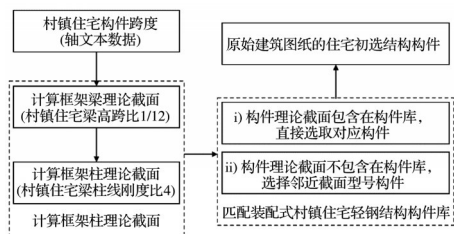


图 7 基于装配式村镇住宅轻钢结构构件库的构件初选

Fig. 7 Primary selection based on the light steel structural member library of prefabricated rural buildings

表 1 村镇轻钢框架结构部分常用构件截面尺寸
Table 1 Section types of common members of rural light steel frame structure

| 构件类型 | 截面尺寸 | |
|----------------------|------------------|----------------|
| 轻钢框架梁截面 高频焊接 H 型钢 | H100×50×3.2×4.5 | H100×100×4.5×6 |
| | H150×75×3.2×4.5 | H150×75×4.5×6 |
| | H150×100×3.2×4.5 | H150×100×4.5×6 |
| | H200×100×3.2×4.5 | H200×100×4.5×6 |
| | H200×150×3.2×4.5 | H200×150×4.5×6 |
| | H250×125×3.2×4.5 | H250×125×4.5×6 |
| 轻钢框架柱截面 镀锌钢管 | H250×150×3.2×4.5 | H250×150×4.5×6 |
| | □100×100×4×4 | □100×100×5×5 |
| | □100×120×4×4 | □100×120×5×5 |
| | □120×120×4×4 | □120×120×5×5 |
| | □100×150×4×4 | □100×150×5×5 |
| | □150×150×4×4 | □150×150×5×5 |
| | □100×200×4×4 | □100×200×5×5 |
| | □150×200×4×4 | □150×200×5×5 |

台 Dynamo 实现。设计师无须花费大量时间学习程序语言,只需调用内置节点,按照一定编程逻辑,用连接线将各节点的输入端与输出端相连,便可在 Revit 中实现结构构件自动布置,规避常规“积木式”建模方法,如图 8 所示。结构构件布置原则可归纳为:1)框架柱布置于轴线交点;2)框架梁布置于轴线上;3)框架梁柱避免出现在建筑室内空间和建筑主体之外;4)框架梁两端均搭接在框架柱之上,避免出现悬臂梁。1)和 2)的实现路径是借助于光学字符识别技术提取到的完整轴文本数据。3)和 4)的实现路径是对已生成的结构构件,包括框架梁和框架柱,与自适应分块算法提取到的墙体轮廓模型进行碰撞检测。

1.5 智能建模流程及适用范围

村镇轻钢框架结构智能建模包括图层识别、轴文本数据提取、墙体轮廓提取、结构构件初选与自动布置、数据文件生成 5 个模块,如图 9 所示。对于图层识别模块,模块输入是标准住宅图集对应的建筑矢量图形文件,模块输出是目标图层集合;轴文本提取模块输出的是建筑图形文件里的全部轴文本信息;墙体轮廓提取模块输出的是建筑图形文件里的建筑墙体完整轮廓;结构构件初选与自动布置模块输出的是结构构件初选参数与村镇住宅 BIM 结构模型。数据文件生成模块的功能是将 BIM 平台与 YJK 等结构计算软件进行联动,通过对 YJK API 接口的二次开发,设置内置程序自动进行荷载布置和楼层组装,生成村镇住宅 BIM 结构模型对应的 YDB 计算文件,从而完成村镇轻钢框架结构的智

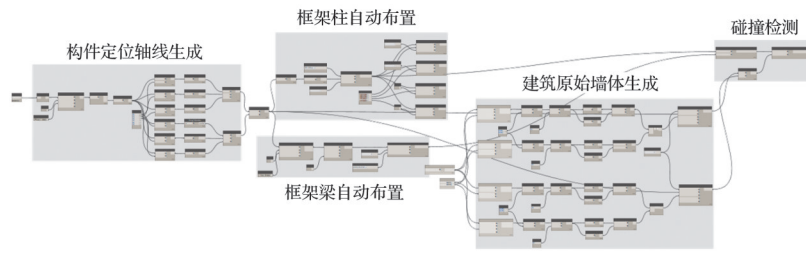


图 8 基于 Dynamo 的结构构件自动布置

Fig. 8 Automatic layout of structural members based on Dynamo

能建模。荷载布置包括结构构件自重、梁线荷载和楼板面荷载。结构构件自重和梁线荷载根据工程师输入的材料密度、墙芯容重、梁上墙的高度和宽度自动计算得到。楼板面荷载初始设置为恒 1.5、活 2 的固定值,后期由工程师进行适当调整。

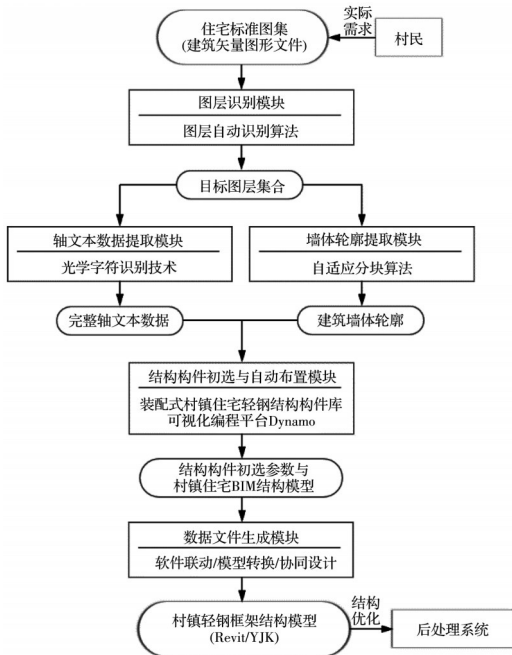


图 9 村镇轻钢框架结构智能建模流程

Fig. 9 Intelligent modeling process of rural light steel frame structure

目前,文中所提出的智能建模方法只适合低层轻钢框架结构的抗震设计。在未来的研究中,可进一步考虑村镇轻钢框架结构的节点设计、施工深化设计等,真正意义上实现全流程的村镇住宅智能设计。

2 结构智能优化

依照建筑矢量图形文件智能生成的村镇轻钢框架结构模型设计往往较为保守。受制于村镇地区的经济条件,需要对初选的村镇轻钢框架结构模型进行优化。模拟退火算法,作为一种元启发式优化技术,凭借实现方式简单、收敛速度较快的特点,在土木工程领域得到了广泛应用。相较于在结构

优化领域应用较多的粒子群和遗传算法,模拟退火算法不需要进行大量并行计算,每一迭代步的计算速度较快,更加适用于村镇住宅这种变量和维度较少的优化设计之中。基于Hasançebi等^[24]对模拟退火算法的改进,提出一种两阶段模拟退火算法,解决了由此产生的设计优化问题。

2.1 设计变量

村镇轻钢框架结构的结构行为受框架梁柱的布局方式和截面尺寸控制。因此,所采用的设计变量集由表示为 S (式 7)和 A (式 8)的两个设计变量组成。布局设计变量 S 包括用于更改村镇轻钢框架结构布局方式的所有拓扑变量,即定义初选的村镇轻钢框架结构模型各框架梁、框架柱的布尔值(存在和不存在)。尺寸设计变量 A 包括村镇轻钢框架结构模型所有结构构件的截面尺寸。由于结构构件是从装配式村镇住宅轻钢结构构件库中选择的,在该构件库中,以横截面积增加的顺序对离散钢构件截面进行分类和索引。因此,各构件截面尺寸可以用对应于构件库中所选钢构件截面的索引号整数代替。

$$S = [S_b^1, S_b^2 \cdots S_b^m, S_c^1, S_c^2 \cdots S_c^n]^T \quad (7)$$

$$A = [A_b^1, A_b^2 \cdots A_b^m, A_c^1, A_c^2 \cdots A_c^n]^T \quad (8)$$

式中: S 为布局设计变量; S_b^m 为第 m 个框架梁是否存在的布尔值; S_c^n 为第 n 个框架柱是否存在的布尔值; A 为尺寸设计变量; A_b^m 为第 m 个框架梁的截面尺寸对应于构件库中所选截面的索引号; A_c^n 为第 n 个框架柱的截面尺寸对应于构件库中所选截面的索引号。

2.2 目标函数

以结构总用钢量最小化为目标函数,包括所有的框架梁柱构件,其数学表达式为

$$C = \sum_{i=1}^n D_b^i l_i S_{A_b^i} + \sum_{j=1}^m D_c^j l_j S_{A_c^j} \quad (9)$$

$$(i = 1, 2 \cdots n; j = 1, 2 \cdots m)$$

式中: i 为第 i 个梁构件; l_i 为第 i 个梁构件的长度; j 为第 j 个柱构件; l_j 为第 j 个柱构件的长度; A_b^i 为第 i

个框架梁的截面尺寸对应于构件库中所选截面的索引号; A_c^j 为第 j 个框架柱的截面尺寸对应于构件库中所选截面的索引号; S_{A_c} 表示索引号为 A_c 的框架梁构件截面面积; $S_{A_c'}$ 表示索引号为 A_c' 的框架柱构件截面面积。

2.3 约束条件

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[25]和《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[26]规定,在村镇轻钢框架结构的优化设计中考虑以下结构约束条件:

正应力约束为

$$g_{s,k} = \frac{|\sigma_k|}{\sigma_u} \leq 1, k = 1, 2, \dots, n + m \quad (10)$$

整体稳定应力约束为

平面内

$$g_{\text{stax},k} = \frac{N_k}{\varphi_{xk} A_k f} + \frac{\beta_{mxk} M_{xk}}{\gamma_{xk} W_{xk} (1 - 0.8N_k/N'_{Exk}) f} + \frac{\eta_k \beta_{lyk} M_{yk}}{\varphi_{lyk} W_{yk} f} \leq 1, k = 1, 2, \dots, n + m \quad (11)$$

$$N'_{Exk} = \pi^2 E_k A_k / 1.1 \lambda_{xk}^2$$

平面外

$$g_{\text{stay},k} = \frac{N_k}{\varphi_{yk} A_k f} + \frac{\beta_{myk} M_{yk}}{\gamma_{yk} W_{yk} (1 - 0.8N_k/N'_{Eyk}) f} + \frac{\eta_k \beta_{lxk} M_{xk}}{\varphi_{lxk} W_{xk} f} \leq 1, k = 1, 2, \dots, n + m \quad (12)$$

$$N'_{Eyk} = \pi^2 E_k A_k / 1.1 \lambda_{yk}^2$$

最大层间位移角约束为

$$g_{\text{dr},\chi} = \frac{|\text{dr}_\chi|}{\text{dr}_u} \leq 1, \chi = 1, 2, \dots, \chi_s \quad (13)$$

周期比约束为

$$g_p = \frac{r_p}{r_u} \leq 1 \quad (14)$$

式中: σ_k 为第 k 个构件的最大应力; σ_u 为钢材的屈服强度; E_k 、 A_k 、 W_{xk} 、 W_{yk} 、 N_k 、 M_{xk} 、 M_{yk} 、 f 分别为构件 k 的弹性模量、截面面积、 x 向毛截面模量、 y 向毛截面模量、轴力、 x 向最大弯矩、 y 向最大弯矩、强度设计值; λ_{xk} 、 λ_{yk} 为构件 k 对 x 轴、 y 轴的长细比; γ_{xk} 、 γ_{yk} 为构件 k 对 x 轴、 y 轴的轴心受压整体稳定系数; β_{mxk} 、 β_{myk} 、 β_{lxk} 、 β_{lyk} 为构件 k 的平面内、外等效弯矩系数; η_k 为截面影响系数; dr_χ 为第 χ 层的层间位移角; dr_u 为层间位移角限值; r_p 为结构周期比; r_u 为结构周期比限值。

采用外部罚函数法计算惩罚后的结构总用钢量,构造辅助函数对约束条件进行处理,其表达式为

$$f(g_i) = \begin{cases} 0, & g_i \leq 1 \\ 1, & g_i > 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中: g_i 为约束条件值,可由式(10)~式(14)计算得到。

通过辅助函数,将约束条件考虑到目标函数中,得到惩罚后的伪目标函数,其数学表达式为

$$F = \left(C1 + \lambda_1 \sum_{i=1}^n f(g_i) \right), i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

式中: λ_1 为惩罚系数; n 为约束条件总数。

伪目标函数作为一种考虑结构总用钢量和所有约束条件的综合指标,可以将强约束结构优化设计问题简化为无约束问题。当结构不满足约束条件时,式(16)后一项将远大于0,伪目标函数大于结构总用钢量;当结构满足所有的约束条件时,式(16)后一项为0,伪目标函数等于结构总用钢量。因此,伪目标函数值越小,其对应的结构设计越好,既能实现经济性,又能满足所有的约束条件。

2.4 两阶段模拟退火算法

模拟退火算法与其他多数元启发式方法一样,只针对设计空间的部分随机搜索而工作,需要使用较长的计算时间来定位最优,是一种不确定的搜索技术。通过 Hasancebi 等^[24]改进的模拟退火算法对村镇轻钢框架结构进行布局 and 尺寸优化设计往往需要较长的计算时间和大量的精力,增加了结构设计成本。为此,提出一种两阶段模拟退火优化方法,从而在更短的时间内找到村镇轻钢框架结构的最佳设计方案。在该方法的第 1 阶段,仅通过模拟退火算法优化结构布局参数,基于完全应力设计的启发式方法对构件尺寸设计进行调整,在相对较少的迭代次数(冷却周期)中快速改进初始设计。在第 2 阶段,将先前获得的最佳设计用作初始解决方案,并在一组新的退火参数下,针对结构布局设计变量和构件尺寸设计变量进行迭代优化,直至得到安全性和经济性都满足的结构设计方案,从而实现智能优化目标。该算法的主要流程见图 10。

阶段 1:步骤为

Step1:冷却进度表初始化与设置。设定初始参数,包括初始温度 T_s 、终止温度 T_f 、冷却系数 η ,其数学表达式为

$$T_s = -\frac{1}{\ln(P_s)} \quad (17)$$

$$T_f = -\frac{1}{\ln(P_f)} \quad (18)$$

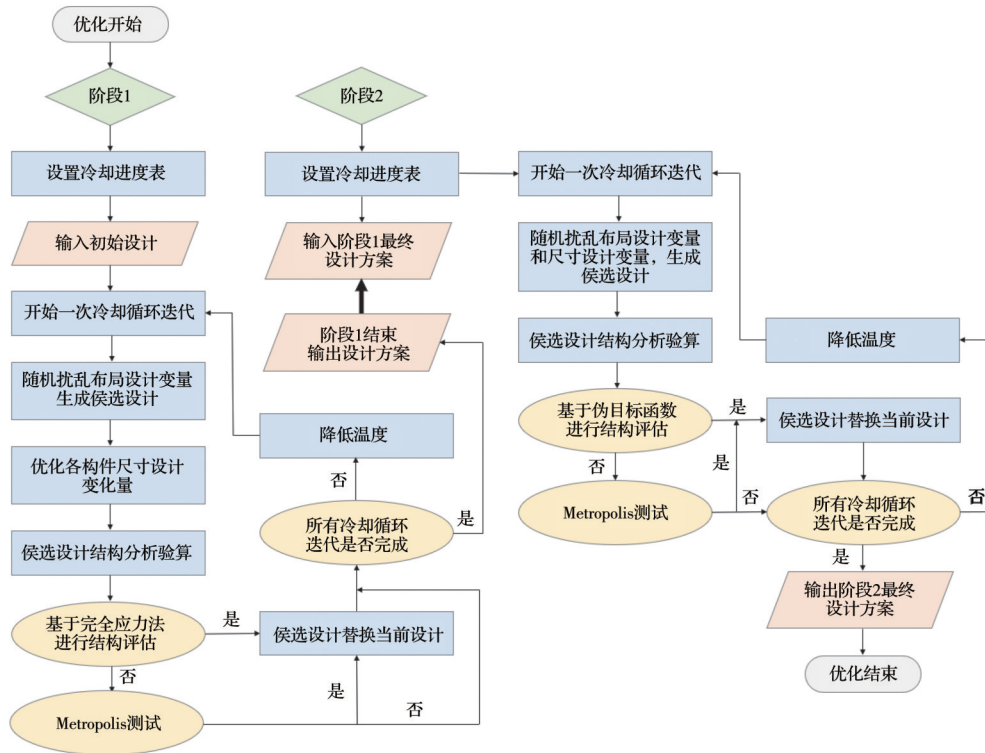


图 10 两阶段模拟退火主要流程

Fig. 10 Main process of two-stage simulated annealing optimization

$$\eta = \left[\frac{\ln(P_s)}{\ln(P_f)} \right]^{1/N_c - 1} \quad (19)$$

式中: P_s 为开始接受概率; P_f 为最终接受概率; N_c 为冷却循环次数。

Step2: 初始设计生成。设定 BIM 结构智能建模得到的村镇轻钢框架结构设计方案为初始设计, 通过 YJK 结构计算软件完成对初始设计的结构力学分析, 基于 Python 二次开发技术对结构的计算结果进行提取和整理, 使用式(16)计算初始设计的伪目标函数。

Step3: 候选设计的创建与调整。每组结构拓扑由村镇轻钢框架结构中的框架梁、框架柱对应的布局设计变量布尔值(即存在和不存在)组成, 通过随机扰动初始设计的一个或者多个布局设计变量布尔值来获得新的结构布局, 并基于完全应力设计的启发式方法在新的村镇轻钢框架结构设计方案下使用以下迭代算法调整所有构件的截面尺寸, 从而生成候选设计。

1) 设置所有构件的尺寸设计变量为 1。需要注意的是, 各构件的尺寸变量用对应于构件库中所选截面的索引号来表示。也就是说, 将所有框架梁、框架柱的截面设置为构件库中最小的截面型号。

2) 对每个候选设计进行结构分析。

3) 仅检查各构件的应力约束, 包括正应力约束和稳定应力约束。对于应力超限的构件, 通过增加

该构件的尺寸设计变量, 从构件库列表中选择更大的截面, 并使用等式保持其他变量不变。

4) 重复 2) 和 3), 直到所有构件均满足应力约束或所有构件的截面尺寸都设置为构件库中的最大截面。

Step4: 候选设计评估与 Metropolis 测试。每次生成候选设计时, 都会与当前设计的伪目标函数竞争。如果候选设计提供了更好的设计方案, 则自动接受并替换当前设计; 否则, 使用式(20)~式(22)确定的不良候选设计接受概率 P 进行 Metropolis 测试。Metropolis 是通过生成一个介于 0 和 1 之间的随机数 r 来完成的, 如果 $r \leq p$, 则接受该候选设计并替换当前设计。否则, 将拒绝该候选设计, 并保持当前设计。

$$\varphi^{(k)} = \varphi^{(k-1)} \sqrt[3]{\frac{\overline{P}_t^{(k-1)}}{\overline{P}_p^{(k-1)}}}, \quad 0.9 \leq \varphi \leq 1.1 \quad (20)$$

$$\Delta\phi_{tra} = \tanh\left(\frac{0.35\Delta\phi}{K}\right) \quad (21)$$

$$P = \varphi \exp\left(-\frac{\Delta\phi_{tra}}{KT^{(k)}}\right) \quad (22)$$

式中: φ 是保证实际平均接受概率遵循理论平均接受概率而引入的修正因子; $\overline{P}_t^{(k-1)}$ 和 $\overline{P}_p^{(k-1)}$ 是第 $k-1$ 次冷却循环时的理论和实际平均接受概率; $\Delta\phi$ 表示伪目标函数差; $\Delta\phi_{tra}$ 表示 $\Delta\phi$ 变化值; $T^{(k)}$ 是第 k 次冷却循环时的温度; K 为玻尔兹曼参数, 其值为 ϕ 值的

工作平均值。文献[24]给出了式(20)~式(22)的基本原理和更多细节,为了简洁起见,不再赘述。

Step5:冷却循环迭代。冷却循环迭代指的是所有布局设计变量被选择扰动一次且生成相应的候选设计的情况。通常相同方式冷却循环迭代一定次数,从而保证将伪目标函数降低到与冷却循环温度相关的合理值。冷却循环迭代次数 i_c 可通过式(23)得到。

$$i_c = i_f + (i_f - i_s) \left(\frac{T - T_f}{T_f - T_s} \right) \quad (23)$$

式中: i_f 为初始冷却循环迭代次数; i_s 为最终冷却循环迭代次数, T 为当前温度。

Step6:温度降低。当一个冷却循环迭代完成时,通过冷却系数 η 降低温度,并设置下一个冷却循环温度,如式(24)所示。

$$T^{(k+1)} = \eta T^{(k)} \quad (24)$$

Step7:终止标准。重复Step3~Step6,直到执行完整个冷却循环过程。

阶段2:在所提出方法的第2阶段,模拟退火算法针对结构布局和构件尺寸设计变量一起进行迭代优化,不再从BIM结构智能建模得到的村镇轻钢

框架结构设计方案随机生成的设计开始,而是将阶段1获得的最佳设计用作阶段2的初始设计。因此,与阶段1不同的是,阶段2的搜索是从一个较为合理的设计方案开始的,不再需要一个非常详细的冷却进度表。阶段2选用较为温和的冷却进度表,也就是较少的迭代次数和较快的冷却速率,并应用一组新的退火参数。案例结果表明,阶段2产生了与模拟退火算法相当的解决方案,但前者采用了较为温和的冷却进度表,因此,只需要更少的计算时间,从而降低设计成本。

3 实际工程案例

3.1 工程概况

以河北张家口某村镇轻钢框架结构住宅为例,对智能建模与优化方法进行验证。图11是2层村镇住宅的建筑平面图,平面尺寸是12.9 m×9.6 m,层高为6 m。该建筑的建筑类别为丙类,设计使用年限为50 a,抗震设防烈度为7度(0.1g),设计地震分组为第二组,场地类别为Ⅲ类,特征周期为0.55 s,场地粗糙度类别为B类,修正后的基本风压为0.55 m/s。荷载信息为:梁的线荷载取值2.8 kN/m;楼面板的恒载和活载分别取值1.5、2.0 kN/m²。

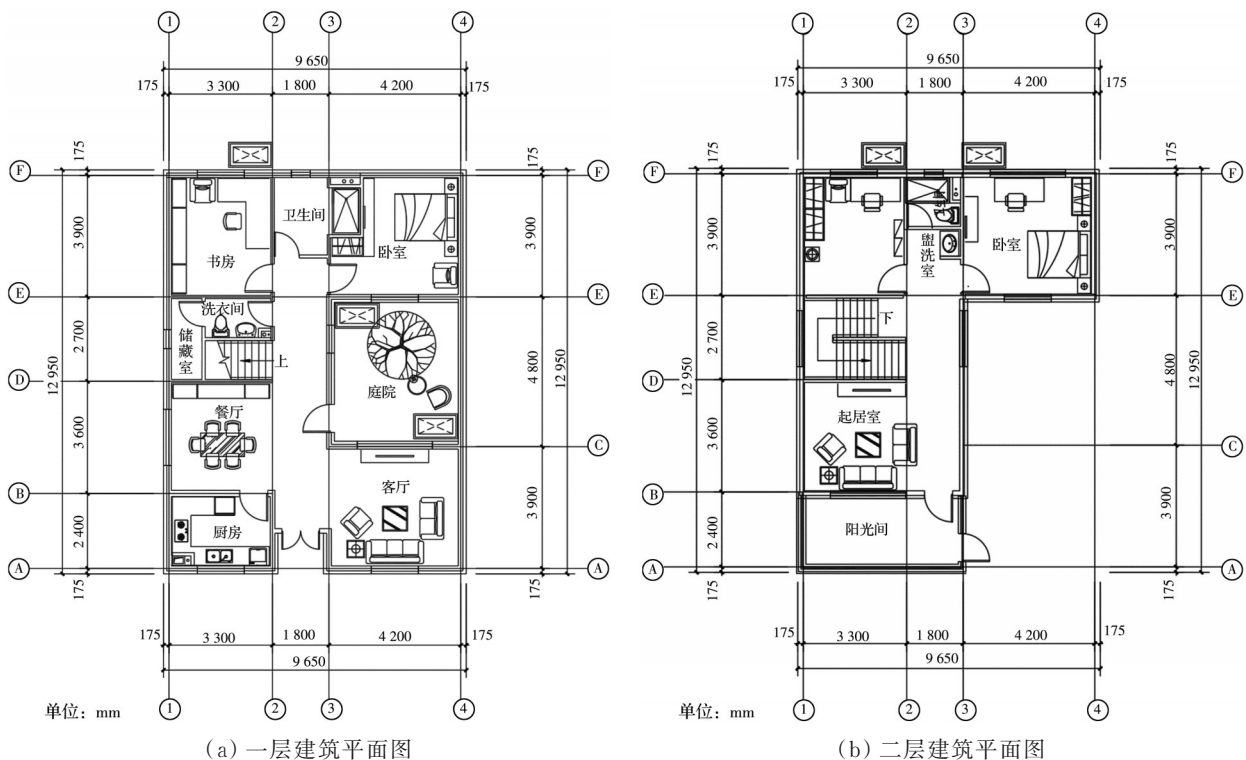


图11 案例建筑平面图

Fig. 11 Architectural layout of the case

3.2 智能建模效果评估

图12为BIM平台中自动生成的轻钢框架结构模型。从图中可以看出,轻钢框架结构构件的布置

符合布置原则。借助于BIM软件自带的接口,将自动生成的各层村镇轻钢框架结构BIM模型导入至YJK计算软件,并基于对YJK API接口的二次开

发,自动进行荷载布置和楼层组装。图 13 是最终导入至 YJK 软件的算例模型,各层分别与图 12 中各层的结构 BIM 模型相对应。结构计算的前处理参数仍需手动设置,输入完成后即可生成村镇轻钢框架结构模型对应的 YDB 计算文件,后续可基于 Python 二次开发技术对结构的计算结果进行提取和整理。整个村镇轻钢框架结构智能建模耗时约 6 min,有效提高了建模与设计效率。

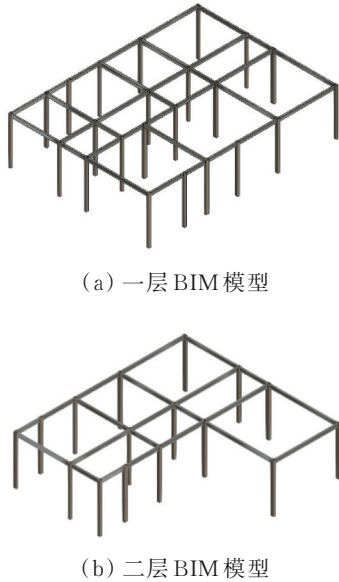


图 12 自动生成的各层轻钢框架结构 BIM 模型
Fig. 12 Automatically generated BIM structure model of each floor

3.3 优化效果评估

采用普通模拟退火算法和两阶段模拟退火算法对案例的 YJK 模型进行智能优化,每个算法各执行 3 次独立运算,表 2 和表 3 分别展示了两种算法每次运算后的结构总用钢量和计算时间。普通模拟退火算法 3 次结构优化的平均用钢量为 3 072.58

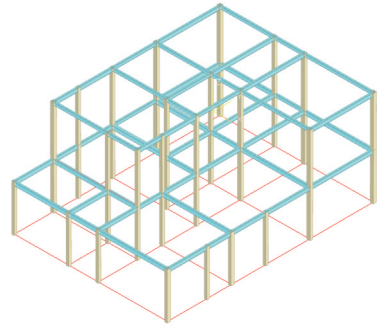


图 13 案例的 YJK 模型
Fig. 13 YJK Model of the case

kg,平均时间为 127 min,用钢量的标准差为 136.77 kg;而两阶段模拟退火算法 3 次结构优化的平均用钢量为 3 054.54 kg,平均时间为 95 min,用钢量的标准差为 56.61 kg。由此可见,两阶段模拟退火算法表现出比普通模拟退火算法较优的优化性能,收敛性较好,并且大大减少了迭代优化的时间。

表 4 为智能建模初始设计方案、结构工程师设计方案、智能优化设计方案的结构设计指标对比结果,图 14 为 3 种设计方案的结构布置图对比,图 15 为 3 种设计方案的各结构构件的应力比对比图。可以看出,与智能建模初始设计方案相比,智能优化设计方案的用钢量降低了 13.60%;与结构工程师设计方案相比,结果相差 2.67%。智能优化设计方案给出的结构布置与结构工程师设计方案较为类似,且在满足承载能力极限状态和正常使用极限状态的设计要求下,结构设计指标相当。对于一栋 2~3 层左右的村镇轻钢框架结构住宅,结构工程师通常需要花费 8~10 h 进行模型调整与优化,而智能建模与优化仅仅需要 2 h 左右,设计周期缩短了 77.8%。由此可见,所提出的村镇轻钢框架结构智能设计方法具有效率高、周期短、成本低等优点,仅需要工程师进行少量干预,即可完成结构建模、设计、优化工作,具

表 2 普通模拟退火算法优化结果

Table 2 Optimization results of ordinary simulated annealing algorithm

| 运算次数 | 优化后结构用钢量/kg | 时间/min | 平均值 | | 标准差 | |
|------|-------------|--------|----------|--------|--------|--------|
| | | | 用钢量/kg | 时间/min | 用钢量/kg | 时间/min |
| 1 | 3 079.82 | 127 | | | | |
| 2 | 3 074.36 | 133 | 3 072.58 | 127 | 136.77 | 51 |
| 3 | 3 063.57 | 124 | | | | |

表 3 两阶段模拟退火算法优化结果

Table 3 Optimization results of two-stage simulated annealing algorithm

| 运算次数 | 优化后结构用钢量/kg | | 时间/min | | 平均值 | | 标准差 | |
|------|-------------|----------|--------|------|----------|--------|--------|--------|
| | 阶段 1 | 阶段 2 | 阶段 1 | 阶段 2 | 用钢量/kg | 时间/min | 用钢量/kg | 时间/min |
| 1 | 3 220.38 | 3 049.25 | 18 | 74 | | | | |
| 2 | 3 215.47 | 3 054.49 | 21 | 72 | 3 054.54 | 95 | 56.61 | 38 |
| 3 | 3 198.72 | 3 059.89 | 23 | 77 | | | | |

有一定的推广价值与应用前景。

表 4 结构设计指标对比

Table 4 Comparison of structural design indexes

| 设计方案 | 结构用钢量/kg | X向地震工况 | | Y向地震工况 | | 第 1 振型及周期 | 第 2 振型及周期 | 第 3 振型及周期 |
|------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|-------------------|----------------|-----------|-----------|
| | | 下的最大层间位移角 | 下的最大层间位移角 | 下的最大层间位移角 | 下的最大层间位移角 | | | |
| 智能建模初始设计方案 | 3 535. 11 | 1/323 | 1/385 | X方向侧振(0. 518 3 s) | Y方向侧振(0. 507 4 s) | 扭振(0. 434 2 s) | | |
| 结构工程师设计方案 | 2 959. 91 | 1/300 | 1/367 | X方向侧振(0. 547 3 s) | Y方向侧振(0. 533 4 s) | 扭振(0. 453 5 s) | | |
| 智能优化设计方案 | 3 054. 54 | 1/303 | 1/372 | X方向侧振(0. 539 2 s) | Y方向侧振(0. 531 0 s) | 扭振(0. 448 0 s) | | |

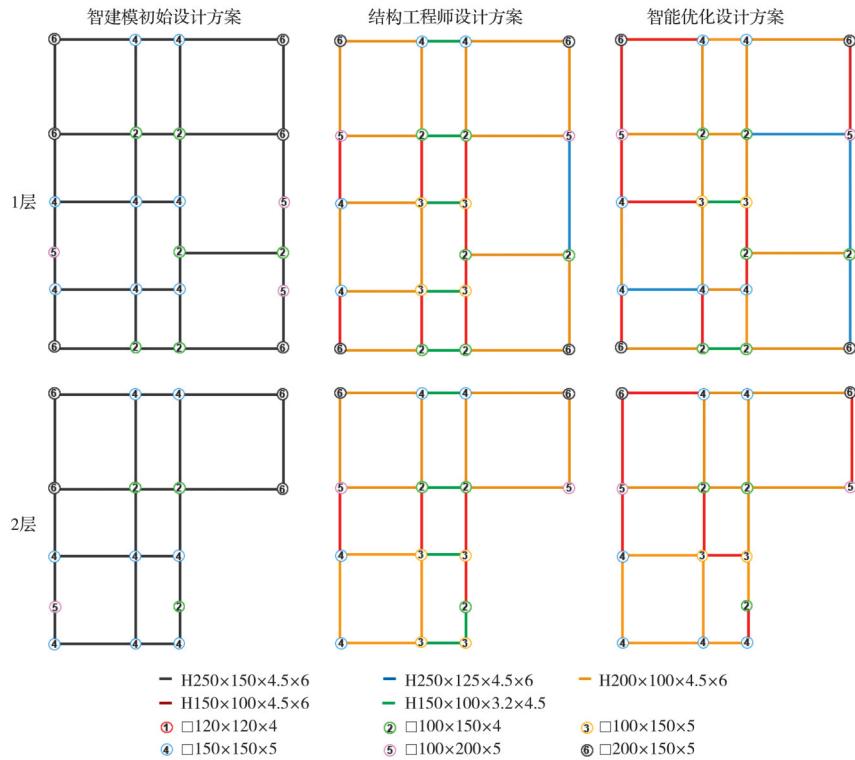


图 14 3种设计方案的结构布置图对比

Fig. 14 Comparison of structural layout of three design schemes

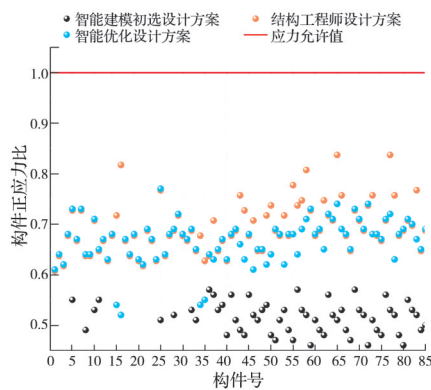


图 15 3种设计方案的构件应力比对比

Fig. 15 Comparison of member stress ratio of three design schemes

4 结论

针对传统村镇住宅受制于建设成本,多直接应用住宅标准图集进行设计与施工,缺乏结构设计与

验算的问题,提出一种村镇轻钢框架结构的智能设计方法,基本实现了村镇轻钢框架结构的模型智能生成与优化,并通过实际工程案例验证了该方法的可行性与有效性,主要结论如下:

1)提出了基于图层自动识别算法、光学字符识别技术、自适应分块算法的村镇轻钢框架结构 BIM 智能建模方法,智能建模结果可以满足实际工程要求,并可作为结构初始设计方案,以进行后续优化。

2)提出了基于两阶段模拟退火算法的村镇轻钢框架结构智能优化方法,减少了普通模拟退火算法寻找最优结果的迭代时间,方法收敛性好,优化性能较优。

3)实际工程案例表明,所提出的村镇轻钢框架结构智能设计方法具有可行性,结构设计周期可缩短 70% 以上,且智能优化设计方案的结构总用钢量和其他结构设计关键指标与结构工程师优化方案

相当。

4)提出的智能设计方法仍需工程师对数据输入和信息传递进行少量干预,且局限于轻钢框架结构,在未来的技术研究中,可进一步考虑其他结构类型在结构表达与生成、智能优化与评估等方面的研究,真正意义上实现村镇住宅全流程的智能化设计。

参考文献

- [1] ZHOU J, YU L, CHOGUILL C L. Co-evolution of technology and rural society: The blossoming of Taobao Villages in the information era, China [J]. *Journal of Rural Studies*, 2021, 83: 81-87.
- [2] WANG W X, GONG H L, YAO L Y, et al. Preference heterogeneity and payment willingness within rural households' participation in rural human settlement improvement [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312: 127529.
- [3] 周俊文, 刘界鹏. 基于多种群遗传算法的钢框架结构优化设计[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(1): 71-81.
ZHOU J W, LIU J P. Optimization design of steel frame structure based on multipopulation genetic algorithm [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(1): 71-81. (in Chinese)
- [4] 孙得璋, 黄勇, 杨振宇, 等. 九寨沟7.0级地震中典型非结构构件震害特征[J]. *地震工程与工程振动*, 2019, 39(1): 27-34.
SUN D Z, HUANG Y, YANG Z Y, et al. Seismic damages of typical nonstructural components in the M_s7.0 Jiuzhaigou earthquake [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2019, 39(1): 27-34. (in Chinese)
- [5] 潘毅, 陈建, 包韵雷, 等. 长宁6.0级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(Sup1): 297-306.
PAN Y, CHEN J, BAO Y L, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural buildings in M_s6.0 Changning earthquake [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(Sup1): 297-306. (in Chinese)
- [6] 李国强, 陈素文. 从汶川地震灾害看钢结构在震区的应用[J]. *建筑钢结构进展*, 2008, 10(4): 1-7, 62.
LI G Q, CHEN S W. From the damage by Wenchuan earthquake to the application of steel building in seismic zone [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2008, 10(4): 1-7, 62. (in Chinese)
- [7] 刘红波, 张帆, 陈志华, 等. 人工智能在土木工程领域的应用研究现状及展望[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(1): 14-32.
LIU H B, ZHANG F, CHEN Z H, et al. Applied research status and prospects of artificial intelligence in civil engineering field [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(1): 14-32. (in Chinese)
- [8] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(5): 1-11.
BAO Y Q, LI H. Artificial intelligence for civil engineering [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(5): 1-11. (in Chinese)
- [9] 程国忠, 周绪红, 刘界鹏, 等. 基于深度强化学习的高层剪力墙结构智能设计方法[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(9): 84-91.
CHENG G Z, ZHOU X H, LIU J P, et al. Intelligent design method of high-rise shear wall structures based on deep reinforcement learning [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(9): 84-91. (in Chinese)
- [10] ZENG Z L, LI X Z, YU Y K, et al. Deep floor plan recognition using a multi-task network with room-boundary-guided attention [C]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). October 27 - November 2, 2019, Seoul, Korea (South). IEEE, 2020: 9095-9103.
- [11] ZHAO Y F, DENG X Y, LAI H H. Reconstructing BIM from 2D structural drawings for existing buildings [J]. *Automation in Construction*, 2021, 128: 103750.
- [12] ZHAO Y F, DENG X Y, LAI H H. A deep learning-based method to detect components from scanned structural drawings for reconstructing 3D models [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(6): 2066.
- [13] LIU C, WU J J, KOHLI P, et al. Raster-to-vector: Revisiting floorplan transformation [C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). October 22-29, 2017, Venice, Italy. IEEE, 2017: 2214-2222.
- [14] DOMÍNGUEZ B, GARCÍA Á L, FEITO F R. Semiautomatic detection of floor topology from CAD architectural drawings [J]. *Computer-Aided Design*, 2012, 44(5): 367-378.
- [15] YIN M T, YE Z H, TANG L, et al. An automated layer classification method for converting CAD drawings to 3D BIM models [C]//MUTIS I, HARTMANN T. *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering*. Cham: Springer, 2019: 67-76.
- [16] YIN M T, TANG L, ZHOU T Y, et al. Automatic layer classification method-based elevation recognition in architectural drawings for reconstruction of 3D BIM models [J]. *Automation in Construction*, 2020, 113: 103082.
- [17] DELYOVÁ I, FRANKOVSKÝ P, BOCKO J, et al. Sizing and topology optimization of trusses using genetic algorithm [J]. *Materials*, 2021, 14(4): 715.

- [18] BAGHDADI A, HERISTCHIAN M, KLOFT H. Design of prefabricated wall-floor building systems using meta-heuristic optimization algorithms [J]. *Automation in Construction*, 2020, 114: 103156.
- [19] GHOLIZADEH S, SHAHREZAEI A M. Optimal placement of steel plate shear walls for steel frames by bat algorithm [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2015, 24(1): 1-18.
- [20] GHOLIZADEH S, POORHOSEINI H. Seismic layout optimization of steel braced frames by an improved dolphin echolocation algorithm [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 54(4): 1011-1029.
- [21] 李昌华, 田思敏, 周方晓. 自适应分块的BIM墙体轮廓提取及三维重建研究[J]. *计算机科学与探索*, 2018, 12(3): 452-461.
LI C H, TIAN S M, ZHOU F X. Extracting contour of BIM wall based on adaptive block and 3D reconstruction research [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2018, 12(3): 452-461. (in Chinese)
- [22] 住房和城乡建设部科技与产业化发展中心. 钢结构住宅主要构件尺寸指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
Technology and Industrialization Development Center of Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Guide for main component size of steel structure residences [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021. (in Chinese)
- [23] 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程: JGJ 227—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings: JGJ 227—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, , 2011. (in Chinese)
- [24] HASANÇEBİ O, ÇARBAŞ S, SAKA M P. Improving the performance of simulated annealing in structural optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, 41(2): 189-203.
- [25] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [26] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Standard for design of steel structures: GB 50017-2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)