

•绿色建筑与智能建造•

DOI:10.12454/j.jsuese.202300661



基于生成对抗网络的框架结构平面整体布置方法

钟 燕¹,雷 昕¹,龙丹冰^{1*},方长建²,康永君²

(1.西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031;2.中国建筑西南设计研究院有限公司,四川 成都 610041)

摘 要:建筑改建或增建时的结构设计是房屋结构设计中不容忽视的内容。本文面向建筑初步设计阶段,针对部分结构已确定的情况提出了基于生成对抗网络的框架结构平面整体布置方法,在建筑和部分结构双重约束条件下进行框架结构设计。该方法的核心为框架结构平面整体布置模型。在有限数据样本下,为减少模型训练参数,凝练样本特征,达到更好的模型训练效果,提出了建筑信息表达方法用于表达与结构特征有强关联性的建筑特征;提出了框架梁信息表达方法用于在平面图形中表达梁截面特征;提出框架柱信息表达方法用于在平面图形中表达柱截面特征。通过叠加特征图、裁剪和增广等手段,构造了用于训练生成式算法模型的 5 120 对数据作为数据集。同时,除沿用交并比评价指标外,为更合理地评价模型的“设计”能力,基于框架结构设计规则提出了原柱率、不合理指数和综合指标,并依据指标确定了最佳的框架结构平面整体布置模型。使用时将建筑和部分结构特征图输入最佳模型,即可生成框架结构平面布置图。最后,通过案例分析论证了本文提出的框架结构平面整体布置方法能快速地生成布置合理且满足经验要求的结构设计。

关键词:框架结构;生成对抗网络;智能生成式设计

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2025)03-0072-10

随着中国进入城镇化中后期阶段,城市发展由大规模新建项目转向对既有建筑的提质改造。2020 年 11 月,国务院发布《实施城市更新行动》^[1-2]等文件,均对城市发展提出了以保留利用提升为主、加强修缮改造的要求。因此,建筑改建成为其中重要一环,建筑改建时的结构设计不容忽视。建筑设计师在初步完成方案设计后,往往需要考量建筑与结构的适配情况,结构方案设计的早期介入与即时响应十分必要。

当前的研究主要集中在深化设计与施工图设计阶段,主要采用深度强化学习^[3]和启发式优化算法^[4-7]。相比之下,方案设计阶段更侧重于通过对数据和经验的学习来辅助设计决策,因此具备自主学习能力的生成式人工智能技术在该阶段具有广阔的应用前景^[8]。生成式人工智能技术^[9]主要依托无监督模型、基于自编码器的模型、自回归模型、生成对抗网络(GAN)。以受限玻尔兹曼机和深度玻尔兹曼机为代表的无监督模型^[10-11]在生成手写文字方面表现良好,但

生成图像较模糊。基于自编码器的模型^[12-13]通过编码和解码来生成新图像,但清晰度欠佳,在使用上有局限。自回归模型^[14-15]逐像素生成图像,但存在训练难度较大、生成效率欠佳的缺点。GAN 通过生成器和判别器的博弈训练来生成新数据^[16],并且条件生成对抗网络(CGAN)可以根据约束条件定向生成符合条件的数据^[17]。CGAN 因具有定向生成的特点,所以更符合实际工程的需求。

CGAN 在建筑领域应用广泛。Nauata 等^[18]基于 CGAN 提出 House-GAN,在输入的建筑气泡图约束下生成建筑户型方案;Chaillou^[19]基于 CGAN 提出 Archi-GAN,在建筑空间布局的约束条件下生成公寓建筑设计;Zhang 等^[20]训练 CGAN 模型生成了多个平面图和剖面图,以构建受现代建筑和哥特式教堂启发的 3D 模型;Chang 等^[21]基于 CGAN 模型提出 Building-GAN,在输入的约束条件下生成建筑的 3 维体量设计方案;Zhao 等^[22]训练 CGAN 模型来生成医院平面图的简化

收稿日期:2023-08-24 修回日期:2023-11-13 网络出版日期:2024-06-04

基金项目:中国建筑西南设计研究院有限公司资助项目(CSCEC-2023-Z-12)

作者简介:钟 燕(2000—),女,硕士生.研究方向:建筑信息化. E-mail:2071965375@qq.com

*通信作者:龙丹冰,讲师, E-mail:85098285@qq.com

空间布局。

结构方案设计阶段有以下研究成果:Liao等^[23]提出 StructGAN,从建筑图纸中获取数据集,训练生成对抗网络在剪力墙建筑信息的约束下生成结构设计,首次实现了剪力墙结构方案的生成式设计;并提出 StructGAN-TXT^[24],在设计条件和建筑信息的约束下生成剪力墙结构设计。Lu等^[25]提出 StructGAN-PHY,在力学-数据耦合驱动下实现剪力墙结构设计。Zhao等^[26]提出 StructGAN-AE,引入自注意力机制,实现剪力墙结构方案设计的细节优化。已有研究大多关注剪力墙结构,不同于剪力墙结构,框架结构设计灵活度更高,结构和建筑密切相关,布置结构时要考虑建筑空间功能的影响,因此如何表达建筑和结构特征以及两者之间的关系成为了难点。

对于框架结构的方案设计,方长建等^[27]从图纸中凝练出建筑特征和结构特征,针对建筑完全已知、结构完全未知的场景,在建筑的约束条件下实现了

框架结构的自动布置。但建筑改建项目中建筑方案已知、部分结构已确定的设计场景存在建筑和部分结构双重约束条件,方长建等^[27]的方法不利于模型同时学习到建筑和结构特征。因此,在有限数据样本下,为了减少模型训练参数,如何更好地凝练与表达数据样本特征,以训练出适用的框架结构设计模型成为待解决的重点与难点。

基于此,面向建筑初步设计阶段,本文针对部分结构已确定的情况提出以新的框架结构平面整体布置模型为核心的智能设计方法(PF-structGAN),可以快速生成布置合理且满足经验要求的结构设计。

1 PF-structGAN 方法

PF-structGAN 方法架构见图 1,该方法的关键在于构建新的框架结构平面整体布置模型,主要包括数据集制作、模型训练与评价、模型应用 3 个步骤。

本文提出 3 种信息表达方法:1)建筑信息表达方

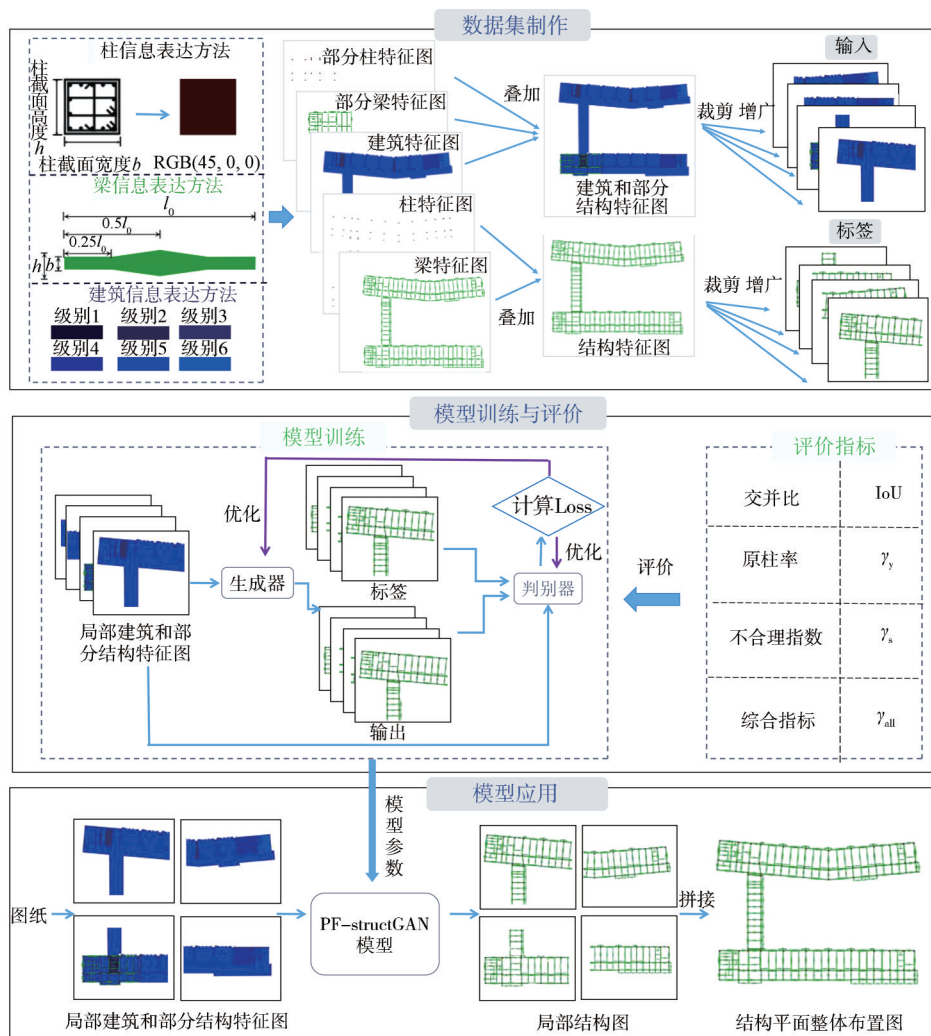


图 1 PF-structGAN 方法架构
Fig. 1 PF-structGAN Method framework

法,用于表达与结构特征具有强关联性的建筑特征; 2) 框架梁信息表达方法,用于在平面图形中表达梁截面特征; 3) 框架柱信息表达方法,用于在平面图形中表达柱截面特征。进一步通过不同颜色通道(RGB 通道)叠加特征图以充分保留不同信息。在此基础上,利用裁剪和增广等手段,构造用于训练生成式算法模型的 5 120 对数据集。此外,除沿用交并比(intersection over union, IoU)评价指标外,引入结构设计经验以更合理地评价模型的“设计”能力,基于框架结构设计规则提出了原柱率、不合理指数和综合指标。而后,在建筑和结构特征的双重约束条件下训练了 CGAN 模型,依据 4 个评级指标确定了最佳的框架结构平面整体布置模型。在使用 PF-structGAN 模型时,将局部建筑和部分结构特征图输入最佳模型,输出局部结构图,最后拼接为框架结构平面整体布置图。

2 制作数据集

PF-structGAN 方法与 Liao 等^[23]的剪力墙自动布置模型或方长建等^[27]的框架自动布置方法不同,必须建立新的数据集构造方法,重新构造数据集。

PF-structGAN 的特点如下。1) 在框架结构设计中,建筑功能与结构设计密切相关,但这种关联性在 CAD 图纸中是隐性的。2) 需要数据同时表达建筑和部分结构的约束特征,而文献[27-29]的方法仅适用于特征图中仅表达建筑空间信息的场景,若不加改造不利于模型同时学习建筑和结构特征。3) 柱特征是所需数据的关键特征之一,但在图像数据中的像素占比比较小。针对以上特点,本文数据集构建方法如图 2 所示。

3 种信息表达方法为数据集构建的核心,分别用

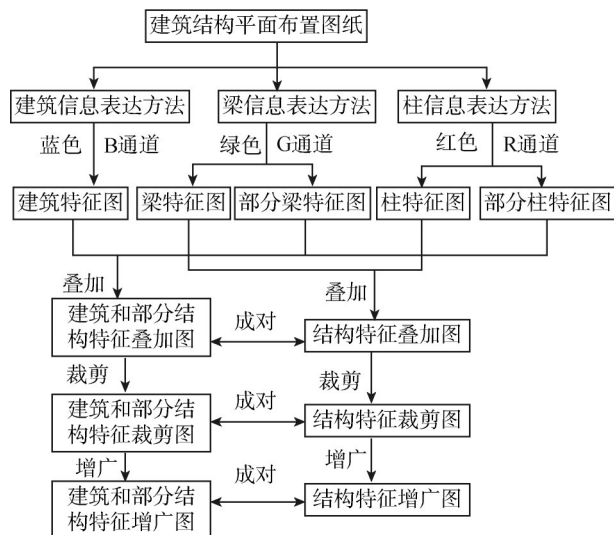


图2 数据集构建方法

Fig. 2 Dataset construction method

于提取建筑空间、梁信息、柱信息,建立建筑特征与结构特征之间的关联性,避免了特征重叠区域的特征覆盖问题。通过叠加特征图以融合建筑和结构特征,裁剪特征图以提高柱特征占比,最后引入增广技术扩增数据量。

2.1 建筑信息表达方法

本文提出的建筑信息表达方法如下:首先,从建筑平面布置图纸中归纳建筑构件和空间信息并进行图形定义;然后,基于它们对框架柱布置的接受度对不同类型的建筑构件和空间进行分级,并在 B 通道上进行颜色编码;最后,生成建筑特征图。

2.1.1 图形定义

建筑构件和空间与框架结构柱的布置密切相关,提取和表达建筑构件和空间信息方法如图 3 所示。定义建筑构件中墙体和窗洞口所在区域为其投影范围,门洞口所在区域为门洞口长和门宽形成的矩形范围;而后,定义建筑空间所在区域均为闭合空间,该闭合空间由墙体、门洞口和窗洞口围合而成。

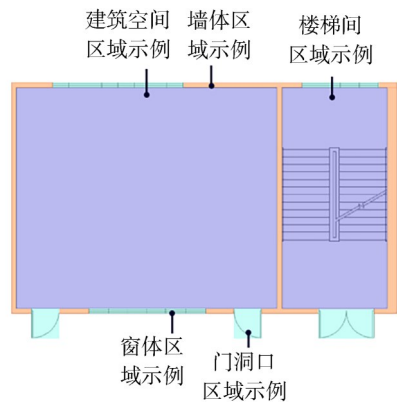


图3 提取建筑构件和空间方法

Fig. 3 Method of extracting building components and spaces

2.1.2 确定分级

依据建筑设计规则,建筑构件和空间可分为可布置框架柱和不可布置框架柱两大类,可布置框架柱分为内部可布置框架柱和内部不可布置框架柱两小类。按照对框架柱布置的接受度,本文定义了 6 个级别,从高到低分为极高、较高、一般、较低、低和 0,分级准则详见附录 A 表 A1。定义分级标准后,通过向合作设计院一线结构工程师发放问卷,根据调研得出主要常见建筑构件和空间分级的颜色编码赋值,结果见表 1。

2.1.3 确定 B 通道颜色编码值

采用不同的 B 通道颜色编码值表达不同的建筑构件和空间级别,级别为 i 的 RGB 值为 $(0, 0, A_i)$,各类别的 B 通道颜色编码值由式(1)确定。

$$A_i = \frac{A_6 - A_1}{5}(i - 1) + 45 \quad (1)$$

式中, i 为当前级别, A_i 为第 i 级别 B 通道颜色编码的数值。 A_1 与 A_6 需要预定义, 且 A_1 与 A_6 的差值为 5 的倍数, 本文将 A_1 设置为 45, A_6 设置为 255, 各级别的颜色编码赋值结果与图示见表 1。

表 1 建筑构件和空间分级的颜色编码赋值

Tab. 1 Building components and spaces are graded and color-coded

级别	建筑构件和空间	颜色编码	颜色展示
1	墙、避难间	(0, 0, 45)	
2	大厅	(0, 0, 87)	
3	设备间、医务室	(0, 0, 129)	
4	办公室、活动室	(0, 0, 171)	
5	楼梯、宿舍、厕所、教室、阳台	(0, 0, 213)	
6	开洞	(0, 0, 255)	

2.1.4 创建建筑特征图

由第 2.1.1 节定义建筑构件与空间信息提取规则, 依据第 2.1.3 节填充色块, 确定 1/25 作为由矢量图转为光栅图的转换比例, 即可由建筑平面矢量图得到建筑特征光栅图, 详见附录 A 图 A1。

2.2 梁与柱信息表达方法

2.2.1 梁信息矢量图形表达

由于梁截面高度 h 无法在传统 2 维图纸中以图形表达, 本文对梁中部进行纺锤形变形处理来表达梁高, 梁信息表达方法如图 4 所示。

首先, 从结构平面布置图纸中获取梁位置、梁跨度 l_0 、梁截面宽度 b 、梁截面高度 h 等梁设计信息。其次, 在梁跨中位置 ($0.5l_0$) 沿垂直梁轴线方对称向外增大以表达 1 个梁高 h , $0.25l_0$ 和 $0.75l_0$ 处图形恢复仍旧表达梁宽 b , 各转折点线性连接形成一个闭合空间。最后, 用 RGB 值为 (0, 140, 0) 的绿色进行色块填充。

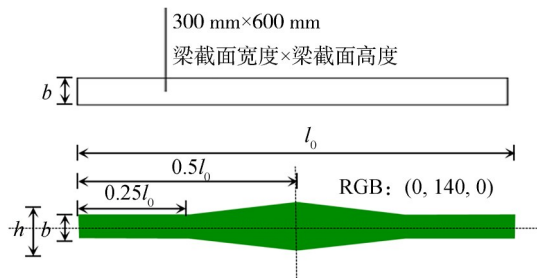


图 4 梁信息表达方法

Fig. 4 Beam information expression method

2.2.2 柱信息矢量图形表达

首先, 从结构平面布置图纸中获取柱截面宽度、

柱截面高度、柱位置等柱设计信息, 在柱平面布置图纸中相应柱的原始位置根据获取到的柱截面宽度和高度信息绘制闭合空间, 并用 RGB 值为 (45, 0, 0) 的红色填充该闭合空间, 得到如图 5 所示的柱信息表达方法。



图 5 柱信息表达方法

Fig. 5 Column information expression method

2.2.3 创建梁特征图与柱特征图

同样将 1/25 作为由矢量图转为光栅图的转换比例, 即可由结构平面矢量图得到梁特征光栅图及柱特征光栅图, 详见附录 A 图 A1。

2.3 特征图叠加与裁剪

为融合建筑和结构特征, 对特征图进行叠加。叠加建筑特征图、部分梁特征图、部分柱特征图, 获得如图 6(a) 所示的建筑和部分结构特征图。叠加梁特征图和柱特征图, 获得如图 6(b) 所示的结构特征图。

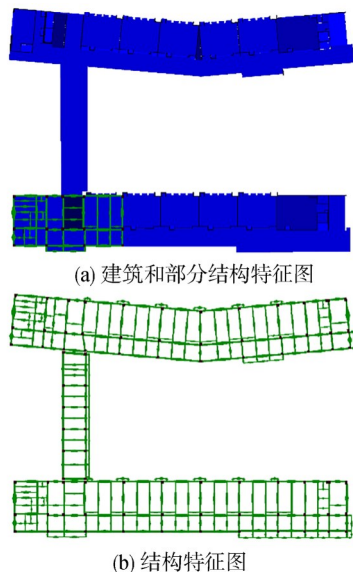


图 6 叠加特征图

Fig. 6 Superimposed feature maps

图 6 中, 两张特征图中都存在柱特征占比少的问题, 导致模型难以学习到柱特征。因此, 需通过裁剪的方式提高柱特征占比, 以帮助模型学习到柱特征。

2.4 数据集增广

建筑设计不存在开源数据库以供使用, 可用的图纸数量也有限, 但生成对抗网络方法十分依赖数据量。因此, 通过旋转的方式来增广原始成对数据集, 将原始成对数据集旋转 0° 、 90° 、 180° 、 270° , 有利于模

型更好地泛化到不同的角度,提高模型的鲁棒性。更多的数据可以帮助模型捕获数据分布、提高性能、降低过拟合的风险。

3 模型评价指标

IoU 是图生成模型最常用的评价指标,用于衡量模型生成的结构与结构工程师设计之间的图像相似性。但模型生成的结构布置与结构工程师设计的不一致并不代表结构不合理。因此,本文基于框架结构设计规则定义了原柱率与不合理指数,结合 IoU 来综合评价模型进行框架结构平面整体布置的能力。

3.1 交并比

IoU 采用通用的计算方法,如式(2)所示。IoU(记为 I_{ou})越大,表示生成的结构与工程师设计越相似。

$$I_{ou} = N_{S \cap G} / N_{S \cup G} \quad (2)$$

式中, $N_{S \cap G}$ 为生成的结构设计图像与工程师设计图像中所有 RGB 不为(0, 0, 0)的像素总量, $N_{S \cup G}$ 为生成的结构设计图像与工程师设计图像中在同一像素位置 RGB 相同且 RGB 不为(0, 0, 0)的像素总量。

3.2 原柱率

原柱率 γ_y 用于评估模型生成的框架柱在输入图像的框架柱位置处的原位存留情况,由式(3)定义。针对部分结构确定的设计场景,研究观察到柱在结构布置中起到决定性作用,模型应尽量保证生成设计中存在原框架柱且这些框架柱的位置不变,使得生成设计符合设计场景要求。因此,原柱率越大,生成设计中框架柱的原位存留情况越好,设计越符合需求。当输入图像中无框架柱,视原柱率为 1。

$$\gamma_y = n_g / n_i \quad (3)$$

式中, n_g 为生成设计中原位存留的框架柱数量, n_i 为输入图像中框架柱的数量。

3.3 不合理指数

不合理指数 γ_s 用于评估柱在不同建筑构件和空间中的分布情况。由本文定义的信息表达方法可知,柱布置在对柱接受度越高的区域,生成的结构设计越合理,柱的颜色编码数值与建筑构件空间的颜色编码数值越接近。令 S_{ij} 为柱的颜色编码数值, A_{ij} 为建筑构件空间的颜色编码数值。二者差值越小,则不合理指数越小,表示生成的结构设计中框架柱的位置布置越合理。计算公式如下:

$$\gamma_s = \sum_{i=0, j=0}^{L_{img}} |S_{ij} - A_{ij}| / L_{img}^2 \quad (4)$$

式中, L_{img} 为图片像素宽度(高度), i 为图片矩阵的行

号, j 为图片矩阵的列号, S_{ij} 为生成的结构设计图 R 通道的矩阵在第 i 行、第 j 列的数值, A_{ij} 为建筑设计图 B 通道的矩阵在第 i 行、第 j 列的数值。

3.4 综合指标

综合指标 γ_{all} 综合了交并比、原柱率、不合理指数 3 个指标,综合指标越大,表示生成的结构设计中框架柱的布置越合理。计算公式如下:

$$\gamma_{all} = (I_{ou} + \gamma_y) \gamma_s \quad (5)$$

4 实验与分析

4.1 实验环境

模型训练使用两台显存为 24 G 的 NVIDIA GeForce RTX 3090 设备,系统运行环境为 Ubuntu18.04,使用语言为 Python3.9,模型单次处理两张图片,学习率设置为 0.000 2。

4.2 实验数据集

筛选了来自中国著名建筑设计院的 32 套建筑和结构设计图纸,制作了 5 120 对数据,其中,4 320 对作为训练集,800 对作为测试集,数据尺寸为 1 024×1 024。

4.3 模型训练

CGAN 符合本文在建筑和部分结构特征双重约束条件下由建筑和部分结构特征图生成结构平面整体布置图像的场景。因此,将建筑和部分结构特征图作为约束条件,将真实结构特征图作为标签。生成器在该约束条件下生成结构特征图;判别器接收真实的结构特征图、生成的结构特征图和约束条件,并判别生成图像的真假。二者对抗训练,互相提升,直至达到纳什均衡。为获取高分辨率、高质量的结构平面整体布置图,选择 pix2pixHD^[30] 作为模型算法。

训练过程的 Loss 曲线如图 7 所示。由图 7 可知,生成器的损失总体呈现下降趋势,从 8.2 下降至 1.8,随着迭代次数的增加,生成器的损失无明显下降,判别

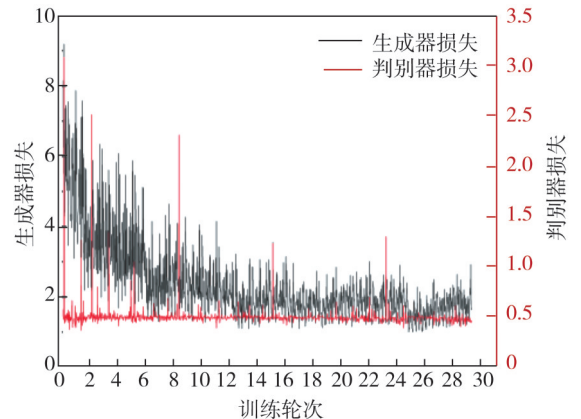


图 7 Loss 曲线图

Fig. 7 Loss oscillating curves

器的损失动态维持在0.5附近,意味着生成器和判别器的对抗训练已达到了纳什均衡,所以训练30轮后终止。

4.4 模型性能分析

使用测试集来分析各个训练轮次的模型性能,测试集包含多种项目,且均为框架结构。模型性能分析结果如图8所示。

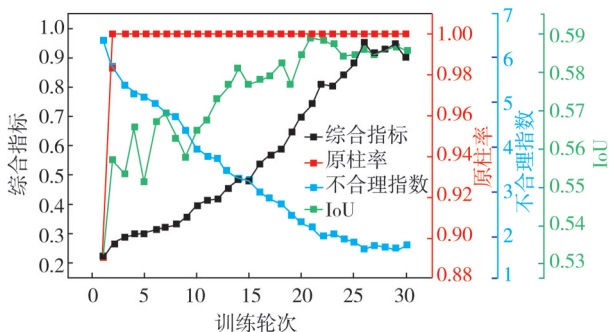


图8 模型性能分析结果

Fig. 8 Model performance analysis results

由图8可知:

1)随训练轮次增加,IoU总体呈现上升趋势,由最初的0.53上涨至0.58,上涨幅度较小,说明仅依靠IoU从图像相似性的角度来选择最佳模型的说服力较弱,需要结合其他指标一起使用。

2)模型在第1轮训练时原柱率为0.89,但第1轮后原柱率恒等于1.00,表明第1轮后模型设计都在已确定框架柱的位置生成了框架柱,生成框架柱与已确定框架柱之间的分布具有强相关性,模型设计的原位存留情况良好。

3)模型不合理指数总体呈下降趋势,由最初的6.4下降至1.6,意味着随着训练轮次的增加,柱更趋向于布置在对柱接受度越高的区域,柱的位置布置更加合理。在25~30轮时不合理指数变化幅度较小。

4)综合指标由最初的0.22上涨至0.95,尽管有波动,但总体呈曲折上升趋势。在第26轮时模型综合指标达到了最大值0.95。因此,模型在第26轮时性能最好,选取第26轮的模型为最佳模型。

4.5 验证与分析

4.5.1 项目概况

为验证本方法的结构设计能力,使用某教学楼项目进行实例分析。该教学楼为4层框架结构,建筑面积2550 m²,占地面积650 m²,建筑总高度12.8 m。

4.5.2 整体设计分析

假定该栋教学楼东部中间位置的结构为已确定结构,处理后得到4层共16张建筑和部分结构局部特征图,将其输到最佳模型,获得了16张局部结构图。用4个评价指标对其进行评价:1)IoU为0.56,大于0.5,表明生成的结构设计结构与结构工程师设计具有较高的相似性;2)原柱率为1,表明整栋教学楼的已确定结构柱的原位存留情况较好;3)不合理指数为1.78,表明生成的结构柱更趋向于布置在对柱接受度越高的区域,符合框架结构的设计规则;4)综合指标为0.88,处于较高水平,表明生成的结构设计效果良好。

拼接每层4张局部结构图得到每层的结构整体布置图。将其和结构工程师的设计进行对比,结果如图9所示。由图9可见,两者在柱的布局上基本一致,在梁的布局上相似度极高。叠加1至4层的建筑特征图

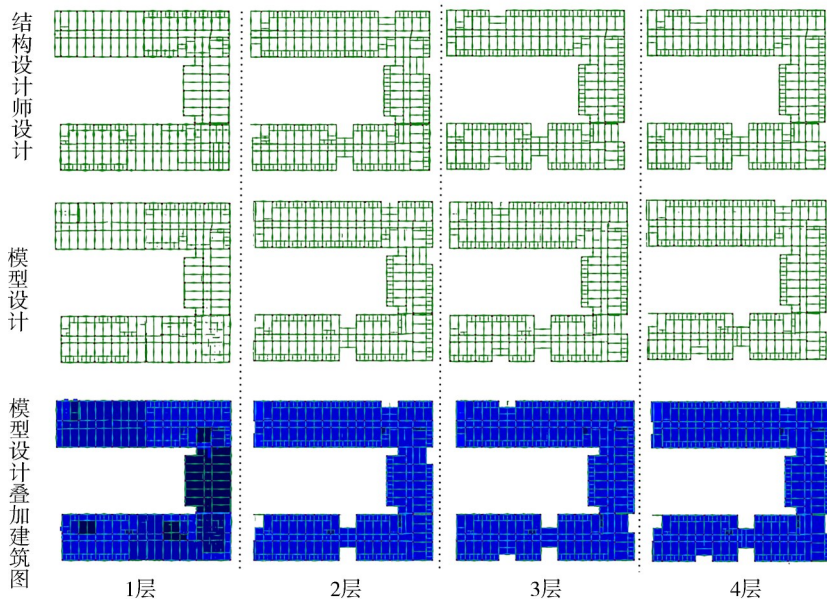


图9 整体设计分析

Fig. 9 Overall design analysis

与结构整体布置图,发现框架柱设计与建筑设计契合度良好。

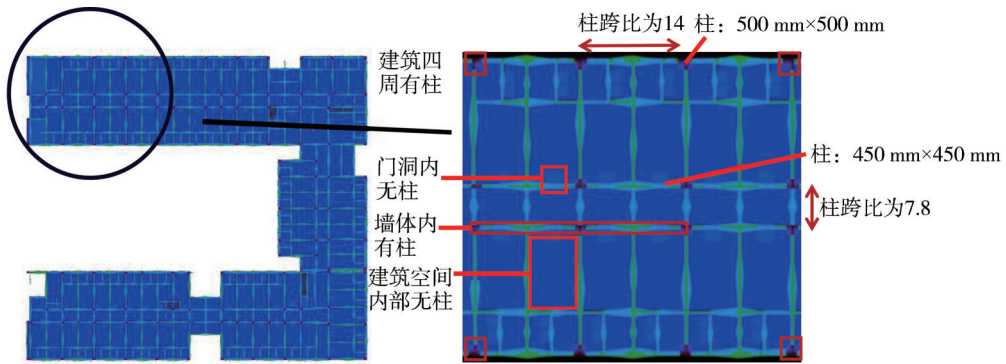


图 10 柱设计分析

Fig. 10 Column design analysis

通过以下指标判定柱的合理性。1)柱位置。框架柱倾向于布置在墙体这类对框架柱接受度高的位置,在建筑物四周基本都布置了框架柱,起到了支撑整个建筑结构的作用;没有布置在门洞这类不可布置框架柱的地方,不影响通行舒适性;没有布置在建筑空间中心位置,不影响室内布局和使用效果。2)柱尺寸。结构设计规范^[31]指出,抗震等级为二级,超过两层时,框架柱最小截面尺寸不应小于400 mm。模型设计中框架柱的截面长度和宽度的范围为450~500 mm,长宽比小于3,表明柱尺寸合理。3)柱密集程度。结构设计规范^[31]指出:柱跨比应在合理范围内,公共建筑的柱跨比不应大于15;柱跨比小于6或相邻框架柱间距小于3 m,即视为框架柱布置密集。模型设计中相邻框架柱间距均大于3 m,柱跨比均不小于6且不大于15,表明柱布置的密集程度合理。

生成的框架柱符合建筑功能的要求,能在适宜的位置布置,同时柱的尺寸和密集程度均在适宜范围内,由此验证了建筑信息表达方法和柱信息表达方法在建立建筑特征与柱特征的关联性方面具有重要作用。

5 结论与展望

本文提出了框架结构平面整体布置方法,并选取适宜的算法和合理的数据集构造方法,基于框架结构设计规则的指标获得了最佳模型,得到以下结论:

1)提出建筑信息表达方法,采用不同颜色区分不同建筑构件和空间来表达其对框架柱布置的接受度,建立了建筑特征与柱特征之间的关联性。

2)提出框架梁、柱信息表达方法,将3维尺寸信息等文字表达转换成图像表达,建立了一套结构平面布置图纸中文字信息的图像表达规则。

3)划分BGR这3个通道分别存储建筑空间信息、

4.5.3 柱设计分析

柱的设计分析如图10所示。

梁设计信息、柱设计信息,有利于模型同时学习建筑和结构特征。

4)通过裁剪特征图的方式,解决了柱特征占比小的问题,有利于模型学习柱特征。

5)评价模型时采用了IoU、原柱率、不合理指数和综合指标4个评价标准,在选择最佳模型时,不仅考虑了图像之间的相似性,还考虑了框架结构的设计规则。

利用本文方法可以智能快速地生成满足规范要求 and 经验习惯的结构设计,为建筑设计师提供参考。但方法采用的技术仅能完成在建筑平面和部分结构的约束下生成结构平面整体布置,而建筑结构设计是一个3维任务,在未来的研究中可进一步考虑以下方面:

1)考虑层高、上下结构的关系以及结构所受荷载分布的影响。

2)结构设计不是一个有唯一解的任务,未来的研究中应考虑增加输出方案的多样性从而为建筑师提供多元的结构参考。

3)在扩充数据集方面,考虑采用更多的数据增强方式,如镜像翻转、旋转随机角度、裁剪、随机组合等,来提高数据集的数量和多样性。

4)考虑引入图像信息提取技术,提取得到结构尺寸信息,从定量的角度提出评价指标,从而获取到更符合实际应用的框架结构布置模型。

附录见本刊网络版,扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

参考文献:

- [1] 王蒙徽.实施城市更新行动[EB/OL].(2020-12-29)[2025-04-10]. http://www.gov.cn/xin-wen/2020-12/29/content_5574417.htm.
- [2] 住房和城乡建设部.关于在实施城市更新行动中防止大拆大建问题的通知[EB/OL].(2021-08-31)[2025-04-10]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-08/31/conte>

- nt_5634560.htm.
- [3] Cheng Guozhong, Zhou Xuhong, Liu Jiepeng, 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. [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.]
- [4] Zhang Yu, Mueller C. Shear wall layout optimization for conceptual design of tall buildings[J]. *Engineering Structures*, 2017, 140: 225–240.
- [5] Tafrout S, Bourahla N, Bourahla Y, et al. Automatic structural design of RC wall-slab buildings using a genetic algorithm with application in BIM environment[J]. *Automation in Construction*, 2019, 106: 102901.
- [6] Zhou Xuhong, Wang Lufeng, Liu Jiepeng, et al. Automated structural design of shear wall structures based on modified genetic algorithm and prior knowledge[J]. *Automation in Construction*, 2022, 139: 104318.
- [7] Lou Haopeng, Gao Boqing, Jin Fengling, et al. Shear wall layout optimization strategy for high-rise buildings based on conceptual design and data-driven tabu search[J]. *Computers & Structures*, 2021, 250: 106546.
- [8] Lu Xinzhen, Liao Wenjie, Gu Donglian, et al. Research progress on building structural design methods: From simulation-based to artificial intelligence-based[J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(3): 1–17. [陆新征, 廖文杰, 顾栋炼, 等. 从基于模拟到基于人工智能的建筑结构设计方法研究进展[J]. *工程力学*, 2025, 42(3): 1–17.]
- [9] Turhan C G, Bilge H S. Recent trends in deep generative models: A review[C]//*Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*. Sarajevo: IEEE, 2018: 574–579.
- [10] Abdollahi B, Nasraoui O. Explainable restricted Boltzmann machines for collaborative filtering[EB/OL]. (2016–06–12) [2025–04–10]. <https://arxiv.org/abs/1606.07129v1>.
- [11] Salakhutdinov R, Larochelle H. Efficient learning of deep Boltzmann machines[C]//*Proceedings of the Thirteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. Cagliari: JMLR, 2010: 693–700.
- [12] Hinton G E, Zemel R. Autoencoders, minimum description length and Helmholtz free energy[C]//*NIPS'93: Proceedings of the 7th International Conference on Neural Information Processing Systems*. Denver: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993: 3–10.
- [13] Kingma D P, Welling M. Auto-encoding variational Bayes [EB/OL]. (2013–12–20) [2025–04–10]. <https://arxiv.org/abs/1312.6114v11>.
- [14] van den Oord A, Kalchbrenner N, Vinyals O, et al. Conditional image generation with PixelCNN decoders[C]//*NIPS'16: Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2016: 4797–4805.
- [15] van D O A, Kalchbrenner N, Kavukcuoglu K. Pixel recurrent neural networks[C]//*International Conference on Machine Learning*. New York: PMLR, 2016: 1747–1756.
- [16] Goodfellow I, Pouget–Abadie J, Mirza M, et al. Generative adversarial networks[J]. *Communications of the ACM*, 2020, 63(11): 139–144.
- [17] Mirza M, Osindero S. Conditional generative adversarial Nets[EB/OL]. (2014–11–06) [2025–04–10]. <https://arxiv.org/abs/1411.1784>.
- [18] Nauata N, Hosseini S, Chang K H, et al. House–GAN++: Generative adversarial layout refinement network towards intelligent computational agent for professional architects [C]//*Proceedings of the 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Nashville: IEEE, 2021: 13627–13636.
- [19] Chaillou S. ArchiGAN: Artificial intelligence x architecture [EB/OL]// (2020–09–03) [2025–04–10]. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6568-7_82020:117-127.
- [20] Zhang Hang, Blasetti E. 3D architectural form style transfer through machine learning[C]//*Proceedings of the CAADRIA*. Bangkok: CAADRIA, 2020: 659–668.
- [21] Chang K H, Cheng C Y, Luo Jieliang, et al. Building–GAN: Graph-conditioned architectural volumetric design generation[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Montreal: IEEE, 2021: 11936–1945.
- [22] Zhao Chaowang, Yang Jian, Xiong Wuyue, et al. Two generative design methods of hospital operating department layouts based on healthcare systematic layout planning and generative adversarial network[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2021, 26(1): 103–115.
- [23] Liao Wenjie, Lu Xinzhen, Huang Yuli, et al. Automated structural design of shear wall residential buildings using generative adversarial networks[J]. *Automation in Construction*, 2021, 132: 103931.
- [24] Liao Wenjie, Huang Yuli, Zheng Zhe, et al. Intelligent generative structural design method for shear wall building based on “fused-text-image-to-image” generative adversarial networks[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 210: 118530.
- [25] Lu Xinzhen, Liao Wenjie, Zhang Yu, et al. Intelligent structural design of shear wall residence using physics-enhanced generative adversarial networks[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2022, 51(7): 1657–1676.
- [26] Zhao Pengju, Liao Wenjie, Huang Yuli, et al. Intelligent de-

- sign of shear wall layout based on attention-enhanced generative adversarial network[J]. *Engineering Structures*, 2023,274:115170.
- [27] 方长建,康永君,龙丹冰,等. 建筑平面灰度图生成方法、装置、电子设备及存储介质:CN202310142430.6[P].2023-05-16.
- [28] 赵广坡,龙丹冰,唐军,等. 构件特征数据提取方法、装置、电子设备及存储介质:CN202310139985.5[P].2023-04-28.
- [29] 方长建,康永君,龙丹冰,等. 结构平面布置整体生成方法、装置、电子设备及存储介质:CN202310141368.9[P].2023-04-25.
- [30] Wang Tingchun, Liu Mingyu, Zhu Junyan, et al. High-resolution image synthesis and semantic manipulation with conditional GANs[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Salt Lake City:IEEE,2018:8798-8807.
- [31] 国家质检总局. 建筑结构可靠性设计统一标准:GB50068—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

Overall Layout Method of Frame Structure Plane Based on Generative Adversarial Network

ZHONG Yan¹, LEI Xin¹, LONG Danbing^{1*}, FANG Changjian², KANG Yongjun²

(1.School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2.China Southwest Architecture Design & Research Institute Company Limited, Chengdu 610041, China)

Abstract:

Objective In the process of architectural renovation or expansion, structural design is a crucial aspect of building design. After the initial completion of the scheme design, architects often need to consider the compatibility between the architecture and its structure. Therefore, early intervention and immediate response in the structural scheme design are urgently needed. In this paper, addressing the preliminary design phase of architecture and focusing on situations where parts of the structure have already been determined, we propose a framework for the overall layout of the structural plan based on a Generative Adversarial Network (GAN), termed PF-structGAN. This framework facilitates the design of the structural framework under the dual constraints of both architectural forms and predetermined structural elements. The core of this method involves constructing a model for the overall layout of the structural plan, which includes three main stages: constructing datasets, training and evaluating the model, and applying the model.

Methods In the dataset construction stage, due to the limited number of data samples, and to reduce model training parameters, refine sample features, and improve training outcomes, this paper proposes three information representation methods for architecture, beams, and columns. It utilizes RGB color channels to store information separately: architectural space information is stored in the blue channel (B), beam information in the green channel (G), and column information in the red channel (R), thereby avoiding feature overlap in overlapping regions. The architectural information representation method is used to express architectural features strongly correlated with structural features. The beam information representation method is designed to express beam cross-sectional features in planar graphics. The column information representation method is designed to express column cross-sectional features in planar graphics. These three methods establish correlations between architectural and structural features. To integrate architectural and structural features, the feature maps are superimposed. The architectural feature map, partial beam feature map, and partial column feature map are superimposed to obtain the architectural and partial structural feature map. The beam and column feature maps are superimposed to obtain the structural feature map. The architectural and partial structural feature map, along with the structural feature map, constitute a pair of feature superposition maps. To address the problem that column features occupy too few pixels in the image, and to help the model learn these features more effectively, the paired feature superposition maps are cropped into four parts to increase the column feature ratio. Further augmentation of the original dataset is achieved by rotating it at 0°, 90°, 180°, and 270°, resulting in an expanded dataset. In the model training phase, the architectural and partial structural feature maps are used as constraint conditions, and the real structural feature maps are used as labels. The generator produces structural feature maps under the given constraints. The discriminator determines whether the generated image is real or synthetic. Through adversarial training, the generator and discriminator iteratively improve until reaching a Nash equilibrium. In the model evaluation phase, to assess the model's design capability more reasonably, in addition to using the intersection over union (IoU) metric, this paper proposes the original column ratio index (γ_y), the irrationality index (γ_S), and the comprehensive index (γ_{all}) based on practical experience and frame structure design rules. These indicators comprehensively evaluate the model's capability to produce an overall frame structure layout. γ_y evaluates the retention of frame columns generated by the model at their original input positions—the higher the ratio, the better the design compliance. γ_S evaluates the distribution of columns across different building components and spaces—the lower the index, the more reasonable the arrangement. γ_{all} integrates the above indicators—the higher the value, the more reasonable the structural layout. The best-performing model is determined based on these four indicators. Once the PF-structGAN model is trained, the architectural and partial structure feature maps are input into the optimal model to generate a frame structure layout.

Results and Discussions A total of 5 120 dataset pairs were created for training the generative model—4 320 for training and 800 for testing. The training set was input into the pix2pixHD framework, and training was stopped once adversarial training reached a Nash equilibrium. Model performance was evaluated using the four indicators. The IoU curve showed a general upward trend as training epochs increased. After the first epoch, γ_y remained at 1. γ_s generally trended downward. γ_{all} peaked at epoch 26; therefore, the model from the 26th epoch was selected as the best layout model. To verify the model's structural design capability, an instance analysis was conducted using a teaching building project. The IoU between the model's design and the engineer's design was 0.56, indicating high similarity. γ_y was 1, showing full retention of original column positions. γ_s was 1.78, indicating a reasonable arrangement of columns. γ_{all} reached 0.88, suggesting that the generated structural layout was sound. The model's generated frame columns met functional requirements, were well-placed, and had appropriate size and density. The layout of columns and beams closely resembled the engineer's design.

Conclusions This method enables intelligent and rapid generation of structural designs that comply with regulatory standards and follow conventional design practices. It offers reference solutions for architects during the structural design process.

Key words: frame structure; generate adversarial network; intelligent generative design

(编辑 陈 雪)

引用格式:Zhong Yan,Lei Xin,Long Danbing,et al.Overall layout method of frame structure plane based on generative adversarial network[J].Advanced Engineering Sciences,2025,57(3):72–81.[钟燕,雷昕,龙丹冰,等.基于生成对抗网络的框架结构平面整体布置方法[J].工程科学与技术,2025,57(3):72–81.]