

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.078



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 剪力墙结构智能化生成式设计方法： 从数据驱动到物理增强

廖文杰, 陆新征, 黄羽立, 赵鹏举, 费一凡, 郑哲

(清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室; 土木工程系, 北京 100084)

**摘要:** 建筑结构的智能化方案设计是智能建造的重要内容。既有研究提出了基于深度神经网络的剪力墙结构生成式设计方法框架、智能设计算法、设计性能评价方法等, 完成了从数据驱动到物理增强的智能化设计方法的发展, 但目前尚未有研究针对不同设计条件下数据驱动和物理增强方法的设计能力进行详细对比, 且基于计算机视觉与基于力学性能的评价方法尚未有明确的关系, 难以有效保证计算机视觉评价方法的合理性。基于深度生成式算法对比和算例分析, 开展数据驱动和物理增强数据驱动方法的详细对比, 并进一步验证基于计算机视觉评价与基于力学分析评价方法的正相关性。结果表明: 数据驱动的方法易受到数据质量与数量的约束, 而物理增强数据驱动的方法设计性能更加稳定, 基本摆脱数据质量和数量的约束; 基于计算机视觉综合评价指标  $S_{CV}$  的合理性阈值为 0.5, 对应力学性能差异约为 10%。

**关键词:** 智能化结构设计; 生成对抗网络; 数据驱动; 物理增强; 设计评价

中图分类号: TU318 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)01-0082-11

## Intelligent generative structural design methods for shear wall buildings: From data-driven to physics-enhanced

LIAO Wenjie, LU Xinzheng, HUANG Yuli, ZHAO Pengju, FEI Yifan, ZHENG Zhe

(Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Intelligent structural design in the scheme phase is an essential component of intelligent construction. Existing studies have proposed the deep neural network-based framework of intelligent generative structural design, intelligent design algorithms, and design performance evaluation methods for shear wall structures, which have developed intelligent structural design methods from data-driven to physics-enhanced data-driven. However, little detailed design performance comparison of data-driven and physics-enhanced methods under different design conditions is conducted. Furthermore, the relationship between the computer vision-based and

收稿日期: 2022-04-25

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0112800); 腾讯基金会(科学探索奖); 清华大学“水木学者”计划项目(2022SM005)

作者简介: 廖文杰(1995-), 男, 助理研究员, 主要从事建筑结构智能化设计研究, E-mail: liaowj17@tsinghua.org.cn。

陆新征(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn。

Received: 2022-04-25

**Foundation items:** National Key R & D Program of China (No. 2019YFE0112800); Tencent Foundation (XPLORER PRIZE); Shuimu Tsinghua Scholar Program (2022SM005)

**Author brief:** LIAO Wenjie (1995-), assistant researcher, main research interest: intelligent structural design of buildings, E-mail: liaowj17@tsinghua.org.cn.

LU Xinzheng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn.

mechanical analysis-based evaluation methods are still unclear, resulting in difficulties in effectively guaranteeing the rationality of the computer vision-based evaluation methods. Hence, in this study, the comparative analysis of data-driven and physics-enhanced intelligent design methods is conducted by algorithm comparison and case studies; and the consistent relationship between computer vision-based and mechanical analysis-based evaluation methods is validated. The comparison results reveal that data-driven methods are more prone to be limited by the quality and quantity of training data. In contrast, the physics-enhanced data-driven design method is more robust under different design conditions and is little affected by the data-caused limitation. Moreover, the rationality threshold of the computer vision-based evaluation index (SCV) is 0.5, corresponding to a difference in the mechanical performance of approximately 10%.

**Keywords:** intelligent structural design; generative adversarial networks; data-driven; physics-enhanced; design evaluation

人工智能的应用为土木工程领域的规划、设计、建造、维护和防灾技术带来了重大变革与重塑<sup>[1-4]</sup>,智能建造已成为土木领域的重点发展方向。建筑结构智能化设计则是智能建造的重要内容,不仅可以减少大量繁琐的人工设计流程,还能为设计人员提供更加多样的初始设计选择,最终达到更好的设计效果<sup>[5-14]</sup>。建筑结构设计主要包括方案设计、优化设计及施工图设计阶段,其中方案设计对后续设计影响关键,且对设计知识与经验的需求较高,并对设计速度有较高的要求。

智能化方案设计通常采用进化算法等对结构设计方案进行搜索和设计<sup>[15-17]</sup>,但是,进化算法难以有效学习结构设计数据与经验,迭代优化效率有限,难以满足快速完成结构方案设计的需求。相比之下,具备大数据特征提取与学习能力的深度生成算法快速进步,例如,基于卷积的生成神经网络、图(Graph)生成神经网络与生成对抗网络等,为建筑和结构智能化设计提供了新的可能性<sup>[18-27]</sup>。

生成对抗网络(Generative Adversarial Networks, GAN)可通过对既有设计图像和文本的学习,掌握设计数据中潜在的设计规律,实现新设计图像的生成。剪力墙结构是一种广泛应用的典型住宅建筑结构形式<sup>[28]</sup>,具备设计需求较大、结构相对规

则、图纸表达有效等特点,可作为智能设计的重要研究对象<sup>[12-14, 25-26]</sup>。笔者基于生成对抗网络开展了从数据驱动到物理增强数据驱动的剪力墙结构智能化生成式设计方法研究,基于生成对抗网络的剪力墙结构智能化设计方法包括 StructGAN<sup>[12]</sup>、txtimg2img<sup>[13]</sup>(后续改称为 StructGAN-TXT)、StructGAN-PHY<sup>[14]</sup>。但是,目前对于数据驱动及物理增强智能设计方法的对比研究相对缺乏,不同方法中,数据特征分析与数据集创建、智能设计算法开发、测试评估方法以及典型案例研究相对缺乏且不明确。笔者针对提出的3种智能化结构设计方法开展详细的对比分析研究,明确不同方法的性能及适用范围,并对相关评价指标进行合理性分析,为未来的智能化设计方法研究提供对比模型和评价方法及指标的参考。

## 1 剪力墙结构智能化设计方法

基于生成对抗网络的剪力墙结构智能化设计方法如图1所示,主要包括语义化模块、设计模块、结构建模模块<sup>[12-14]</sup>。目前,该方法主要应用于基于像素图表达的建築和结构设计中,对于可采用像素图表达的不同结构类型的智能设计,具备一定的可拓展性和通用性。

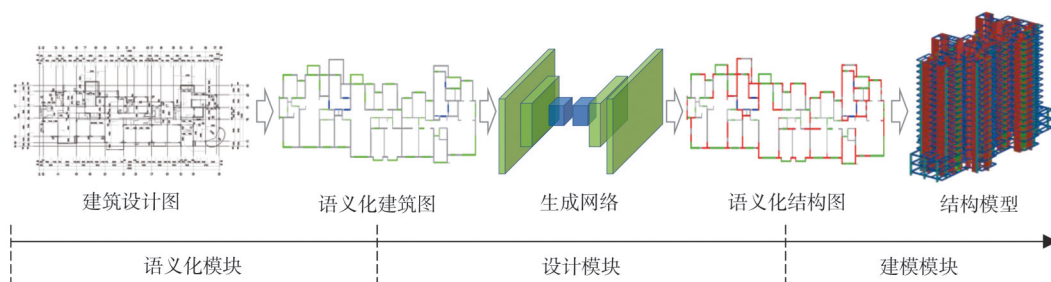


图 1 基于生成对抗网络的剪力墙结构智能化设计方法

Fig. 1 Intelligent structural design method for shear wall building using generative adversarial network

1) 语义化模块是指将复杂的原始 CAD 建筑图,通过对关键元素的提取,并采用颜色填充生成包含建筑设计初步特征的语义化图纸。语义化过程可有效排除复杂信息的干扰,有效提升深度生成网络的设计效果,更详细的语义化方法详见既有研究<sup>[12]</sup>。该过程可通过人工提取数据特征,精度高但效率较低,也可进一步研发基于 BIM (Building Information Modeling) 和 CAD 的数字化自动提取方法,效率高且精度可控。

2) 设计模块是指采用深度生成网络,根据输入的语义化建筑图智能地生成语义化结构设计图。深度生成网络是生成对抗网络模型的生成器,在采用生成网络进行设计前,需要采用构建的建筑-结构图纸数据集对生成对抗网络进行训练,使生成网络基本掌握剪力墙结构设计能力。

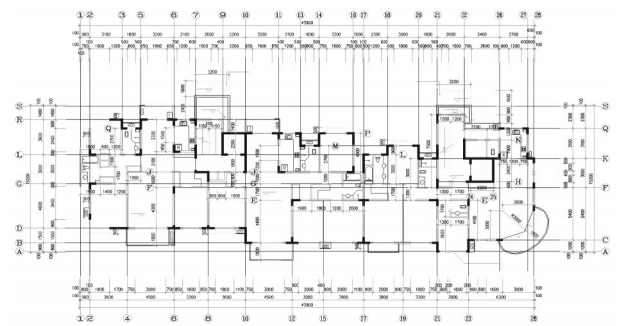
3) 建模模块是指基于生成的结构设计像素图建立对应的结构计算模型。通过像素图到矢量图的自动转化算法提取剪力墙构件的矢量坐标,并基于结构计算软件的应用程序接口 (Application Programming Interface, API) 建立对应的结构计算模型,完成整体结构的方案设计。

用于训练和测试的数据集构建方法如图 2 所示,即将 CAD 图纸数据进行语义化处理。在该数据集中,7 度设防且结构高度 50 m 以下(简称:7d-H1)数据 63 组、7 度设防且结构高度 50~150 m (7d-H2)数据 80 组、8 度设防(8d)数据 81 组<sup>[12]</sup>。

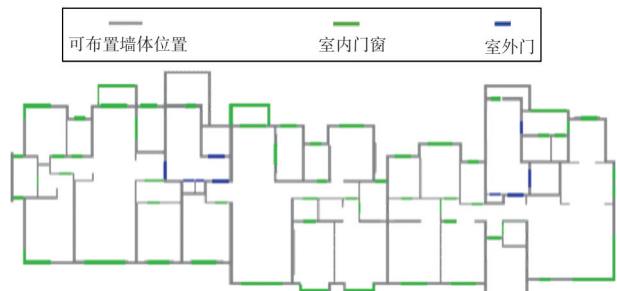
## 2 数据驱动和物理增强设计方法对比

StructGAN 采用的核心算法为图像合成生成对抗网络<sup>[12]</sup>, StructGAN-TXT 采用的核心算法为文本-图像特征融合生成对抗网络<sup>[13]</sup>,二者均为数据驱动方法; StructGAN-PHY 采用的核心算法为物理增强生成对抗网络<sup>[14]</sup>,是一种物理增强方法。3 种方法的核心差异在于设计模块,分别为 3 种不同的条件生成对抗网络模型,如图 3 所示。图 3(a)所示为 StructGAN 模型,由图像生成器与图像真假判别器构成,基于建筑图输入生成结构设计图纸。其对应数据集的输入为建筑设计图(图 2(b)),标签为结构设计图(图 2(c))。训练过程中,图像生成器不断生成结构设计图,判别器不断判断生成图的真假,判别器判断正确则提升生成器,判断错误则提升判别器;生成器与判别器对抗训练不断提升,直到二者性能均难以提升达到纳什均衡,完成训练获得结构设计能力,详细训练过程可见相关研究源代码<sup>[12,29]</sup>。训练时,7d-H1、7d-H2、8d 数据集分别训练 3 个 StructGAN 设计模型<sup>[12]</sup>。

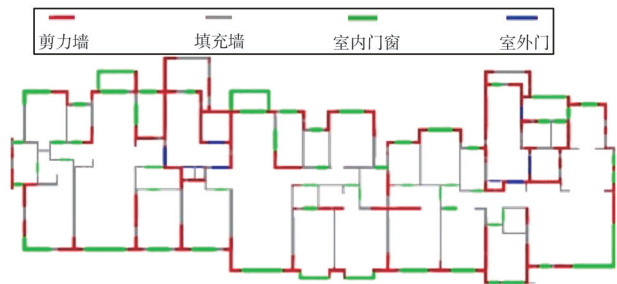
图 3(b)所示为 StructGAN-TXT 模型,基于建筑图 and 对应结构设计条件同时输入,生成满足建筑图



(a) 原始 CAD 图纸



(b) 建筑特征图纸(输入)



(c) 结构特征图纸(标签)

图 2 数据集构建

Fig. 2 Datasets construction

和设计条件约束的结构设计图纸。相比于 StructGAN, StructGAN-TXT 增加了文本输入,其对应数据集的输入为建筑设计图(图 2(b))和抗震设防烈度及结构高度文本,标签为结构设计图(图 2(c))。因此,其图像生成器需要同时对图像和文本特征进行提取和融合,进而基于文本-图像融合特征,生成结构设计图纸;判别器同样需要对真假图像真假文本进行判别;生成器和判别器对抗训练至性能稳定,进而具备结构设计生成能力。训练时,7d-H1、7d-H2、8d 所有图像数据混合,并对每个图像给予对应文本,创建数据集训练一个 StructGAN-TXT 设计模型<sup>[13]</sup>。

图 3(b)所示为 StructGAN-PHY 模型,由图像生成器、判别器、物理评估器构成,基于建筑图输入生成器,生成满足建筑图和相应设计条件的结构设计图纸。其对应数据集的输入为建筑设计图(图 2(b)),标签为结构设计图(图 2(c)),输入的抗震设防烈度和结构高度并不会输入生成器中,而是辅助

物理性能评估器进行力学性能评估。与 StructGAN 和 StructGAN-TXT 相比,其网络架构中新增了物理性能评估器。物理性能评估器为基于深度判别神经网络的代理模型,通过对结构平面图纸及其对应力学性能数据集的训练,物理性能掌握对结构设计对应力学性能的预测,进而有效指导生成器的结构设计。训练时,7d-H1、7d-H2、8d 所有图像数据混合,创建多个设计条件组合,设防烈度包括 6 度(0.05g)、7 度(0.10g)、7 度(0.15g)、8 度(0.20g)、8 度(0.30g),结构高度包括“<40 m”“40~60 m”“60~80 m”“80~100 m”“>100 m”,采用物理增强提升 StructGAN-PHY 设计性能,得到不同设计条件对应的智能设计模型。相比而言,当 StructGAN-TXT 和 StructGAN 没有特定设计条件下的数据时(例如 6 度 50 m),便无法开展对应的设计模型训练<sup>[14]</sup>。所以 StructGAN-PHY 是在数据驱动学习的基础上,由物理性能评估器进行增强的智能设计方法,能有效地保证设计结果尽可能满足设计规范要求,避免由于数据数量不足或质量不佳导致的设计效果降低。

整体而言,StructGAN 与 StructGAN-TXT 为数据驱动的方法,其设计能力与训练数据的数量和质量密切相关,而 StructGAN-PHY 则是物理增强

的方法,能通过 GAN 对结构力学性能学习,有效克服数据数量或质量的影响,并保证设计结果力学性能的稳定性。

### 3 典型案例分析与对比

采用 4 个实际工程案例进行设计,并开展性能分析、对比。需指出,由于设计资料的知识产权限制,将隐去工程项目的真实信息,以及真实的图纸和对应的结构设计模型,仅展示研究提出方法的设计结果。典型案例命名为“案例 1-7d83m”,其中,“1”代表案例编号、“7d”代表设防烈度为 7 度(0.1g)、“83m”代表结构高度 83 m。

#### 3.1 评价方法

图 4(a)为基于图像相似性的评价方法,将生成设计的剪力墙布置与工程师的设计逐像素对比以及逐构件轮廓对比,通过式(1)~式(4)所示的交并比计算相似性,以  $S_{CV}$  作为综合相似性指标<sup>[12-14]</sup>。图 4(b)为基于结构力学模型进行力学性能分析的评价,其中像素图剪力墙构件矢量提取方法见 Lu 等<sup>[14]</sup>的研究。

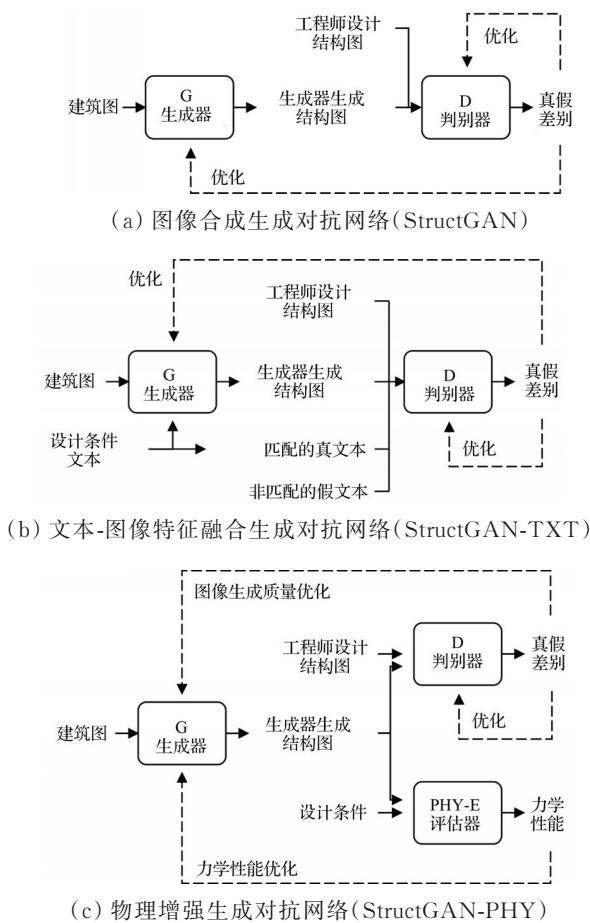


图 3 StructGAN 核心算法对比

Fig.3 Comparison on the critical algorithms of StructGAN

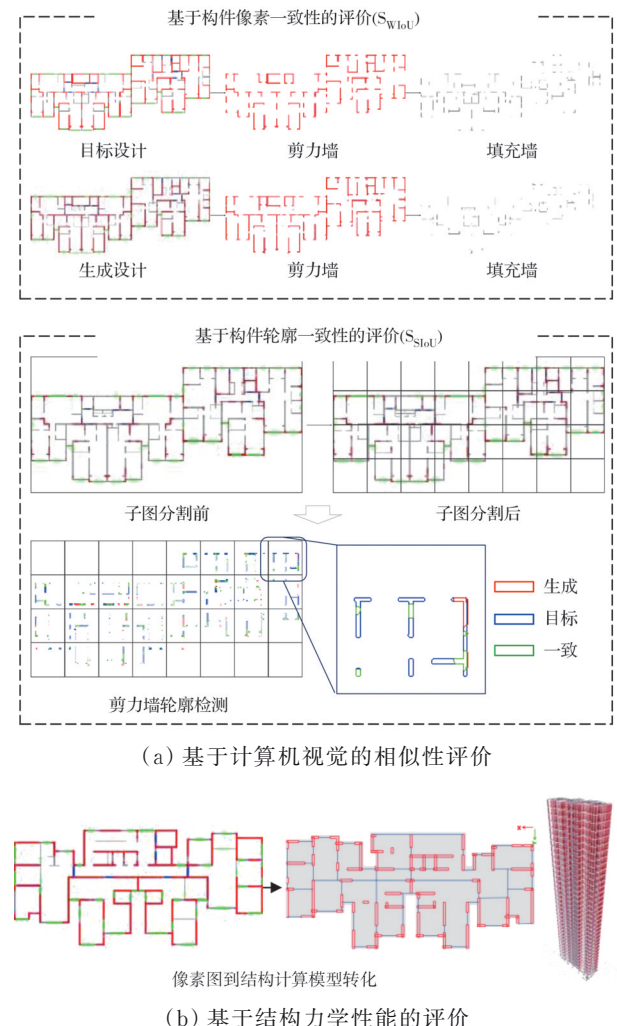


图 4 设计评价方法

Fig.4 Evaluation methods of design

$$S_{CV} = \eta_{SWratio} \times (\eta_{S_{IoU}} \times S_{S_{IoU}} + \eta_{W_{IoU}} \times S_{W_{IoU}}) \quad (1)$$

$$\eta_{SWratio} = 1 - \left( \left| R_{generate}^{SWratio} - R_{target}^{SWratio} \right| / R_{target}^{SWratio} \right),$$

$$R^{SWratio} = A_{swall} / (A_{swall} + A_{inwall}) \quad (2)$$

$$S_{S_{IoU}} = \frac{A_{inter}}{A_{union}} \quad (3)$$

$$S_{W_{IoU}} = \frac{\sum_{i=0}^k \omega_i p_{ii}}{\sum_{j=0}^k p_{ij} + \sum_{j=0}^k p_{ji} - p_{ii}} \quad (4)$$

式中： $S_{CV}$ 为生成设计与目标设计的综合相似性指标，该指标越大，代表相似性越高； $R^{SWratio}$ 为剪力墙占比率，即图像中剪力墙像素面积( $A_{swall}$ )占总墙体面积( $A_{swall} + A_{inwall}$ )的比例； $\eta_{SWratio}$ 为剪力墙占比率一致性指标，该指标越大，表明生成设计剪力墙率( $R_{generate}^{SWratio}$ )与目标设计剪力墙率( $R_{target}^{SWratio}$ )越一致； $S_{S_{IoU}}$ 为剪力墙轮廓交并比一致性指标，即生成与目标设计的剪力墙轮廓交集面积( $A_{inter}$ )与并集面积( $A_{union}$ )的比例； $S_{W_{IoU}}$ 为剪力墙像素一致性指标， $k$ 是总的像素类别(类别0是背景，类别1是剪力墙，类别2是填充墙，类别3是窗

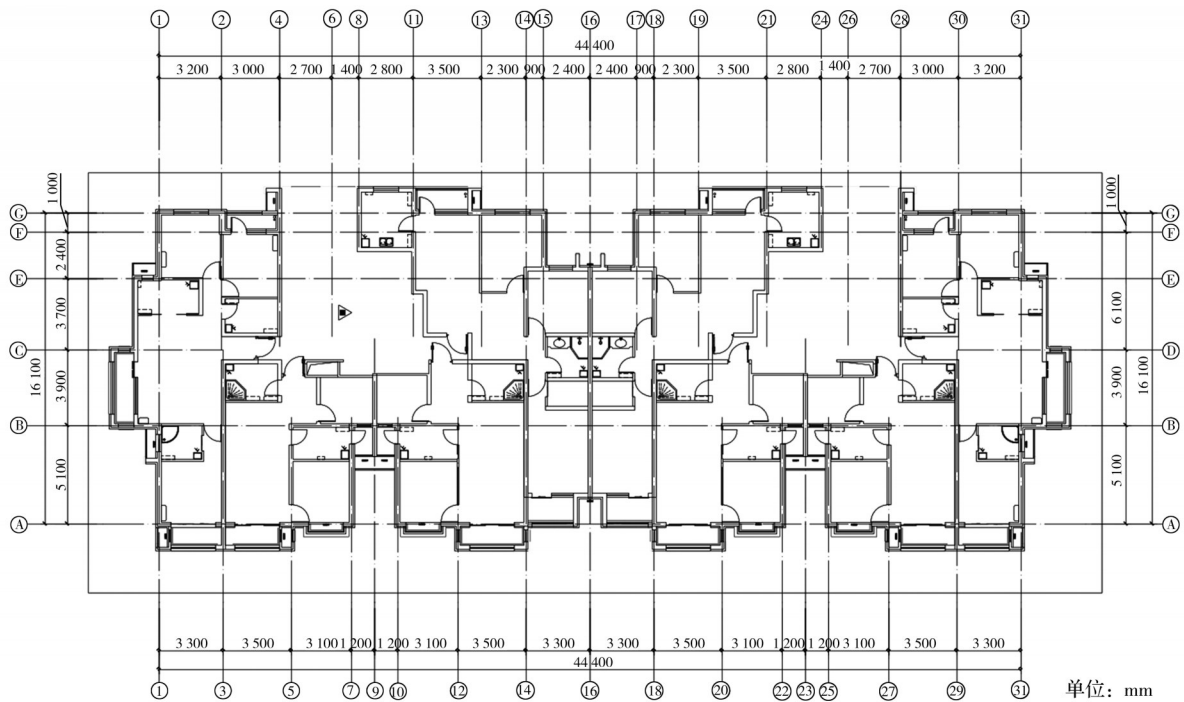
户，类别4是户外门洞)； $p_{ii}$ 是生成正确的像素点数量， $p_{ij}$ 和 $p_{ji}$ 则是生成错误的像素点数量。

需指出，平面设计结果的评价采用图4(a)所示的基于计算机视觉的评价方法，快速评价生成设计结果与工程师设计结果的一致性。整体结构设计评价采用图4(b)所示的基于结构力学性能的评价方法。整体结构模型构建就以工程师设计模型的参数为基准，剪力墙布置由像素到矢量的自动化程序转化，剪力墙厚度和材料参数以及沿结构高度的变化与工程师设计一致，梁构件设计则根据墙体布置进行适应性调整。基于上述设计和评价方法，保证3种方法对比条件尽可能一致，更加有效体现差异。

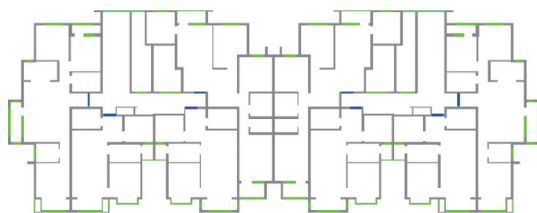
### 3.2 案例 1-7d83m 对比分析

#### 1) 案例 1-7d83m 基本信息

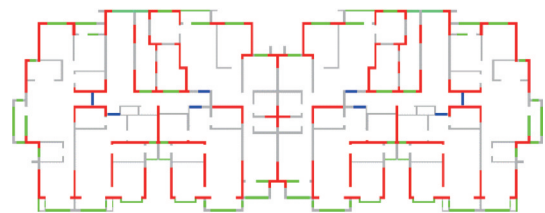
结构总高度 83 m，28 层，平面尺寸为：49.4 m × 18.7 m。抗震设防烈度 7 度(0.1g)，特征周期 0.55 s。工程师完成的建筑和结构平面设计 CAD 及其对应的语义化图纸如图 5 所示。



(a) 建筑设计 CAD 图



(b) 语义化建筑平面方案设计



(c) 工程师设计结构平面方案

图 5 案例 1-7d83m 建筑图和结构图

Fig. 5 Architectural and structural design drawings of Case 1-7d83m

2)案例 1-7d83m 平面设计结果对比

在该案例的平面设计中, StructGAN、-TXT、-PHY 三种方法的设计结果以及对应的工程师设计结果如图 6 所示。同时,基于  $S_{CV}$  指标评价的智能设计与工程师设计的相似性结果也如图 6 所示。在该案例中, StructGAN 和 StructGAN-PHY 两种方法的设计结果较好,与工程师设计相似性高(即量化  $S_{CV}$  指标较高,均为 0.47),而 StructGAN-TXT 的设计则差别较大(量化  $S_{CV}$  指标仅为 0.39)。具体分析, StructGAN 和 StructGAN-PHY 生成设计的  $\eta_{SWratio}$  指标接近 1,意味着在该案例中二者生成的剪力墙总像素数量与工程师设计的剪力墙像素量基本一致,而 StructGAN-TXT 生成设计的  $\eta_{SWratio}$  指标则偏低,代表剪力墙总量与工程差异较大;3 个案例的  $S_{WloU}$  和  $S_{SloU}$  指标则较为接近(均接近 0.5),表明剪力墙布置位置与工程师布置位置差异较小。

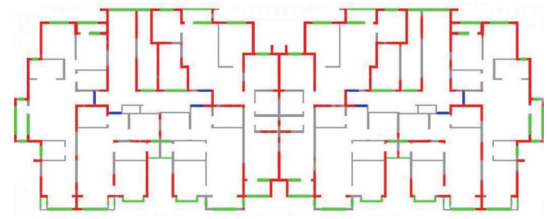
3)案例 1-7d83m 整体结构性能对比

整体结构案例分析的模型如图 7 所示,不同设计结果的剪力墙布置不同,但建模方法与工程师设计均一致。

开展结构动力特性分析以及基于振型分解反应谱法的结构力学响应分析,对应的结构动力特性和层间位移角的对比结果如表 1 和图 8 所示。 StructGAN-TXT 的设计结果与工程师设计差异较大,生成的剪力墙数量偏多,结构刚度偏大,导致动力特性差异 20% 左右,层间变形的最大差异达到了 30%;而 StructGAN 和 StructGAN-PHY 的设计与工程师差异则较小,最大性能差异约 10%。

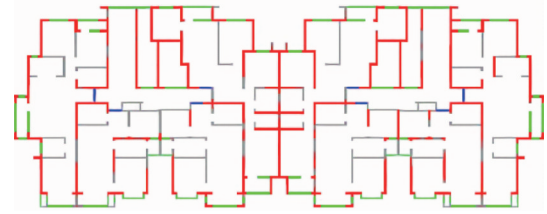
3.3 案例 2-8d96m、案例 3-7d77m、案例 4-7d41m 对比分析

案例 1-7d83m 的分析表明, StructGAN-PHY 与 StructGAN 的设计效果较好,为进一步研究不同智能设计方法的通用性和泛化性,进一步开展了案例 2-8d96m、案例 3-7d77m、案例 4-7d41m 的对比分析。



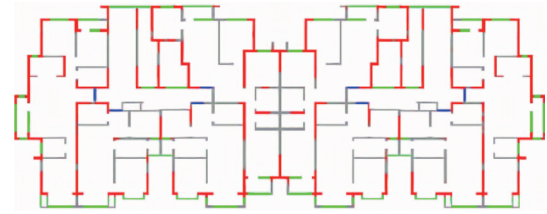
(a) StructGAN 结构设计, 7d-H2 模型

( $S_{CV}=0.47$ ;  $\eta_{SWratio}=0.98$ ;  $S_{WloU}=0.49$ ;  $S_{SloU}=0.47$ )



(b) StructGAN-TXT 结构设计

( $S_{CV}=0.39$ ;  $\eta_{SWratio}=0.78$ ;  $S_{WloU}=0.45$ ;  $S_{SloU}=0.55$ )



(c) StructGAN-PHY 结构设计, 7 度(0.1g) &

80~100 m 模型

( $S_{CV}=0.47$ ;  $\eta_{SWratio}=0.99$ ;  $S_{WloU}=0.46$ ;  $S_{SloU}=0.49$ )

图 6 案例 1-7d83m 的智能生成式结构方案设计图  
Fig. 6 Intelligent designed structural drawings of Case 1-7d83m

案例 2-8d96m 的抗震设防烈度 8 度(0.2g)、结构总高度 96 m(30 层);案例 3-7d77m 的抗震设防烈度 7 度(0.1g)、结构总高度 77 m(26 层);案例 4-7d41m 的抗震设防烈度 7 度(0.1g)、结构总高度 41 m(14 层)。

1)案例 2-8d96m 平面与整体设计结果对比

在该案例的平面设计中, StructGAN、-TXT、-PHY 三种方法的设计结果以及对应的工程师设计结果如图 9 所示。在该案例中,直观视觉判断 3 种

表 1 案例 1-7d83m 结构动力特性与最大层间变形对比

Table 1 Comparison on structural dynamic characteristics and maximum inter-story drift ratio of Case 1-7d83m

阶数	工程师周期/s	StructGAN		StructGAN-TXT		StructGAN-PHY	
		周期/s	对比工程师/%	周期/s	对比工程师/%	周期/s	对比工程师/%
1 阶	2.08	2.03	-2.59	1.52	-26.75	1.95	-6.23
2 阶	1.82	1.79	-1.70	1.45	-20.04	1.75	-3.90
绝对值均值			2.15		23.40		5.07
方向	工程师最大层间变形/rad	StructGAN		StructGAN-TXT		StructGAN-PHY	
		最大层间变形/rad	对比工程师/%	最大层间变形/rad	对比工程师/%	最大层间变形/rad	对比工程师/%
x 向	0.000 67	0.000 66	-1.63	0.000 46	-32.39	0.000 60	-11.44
y 向	0.000 57	0.000 64	11.21	0.000 58	1.93	0.000 59	3.50
绝对值均值			6.42		17.16		7.47

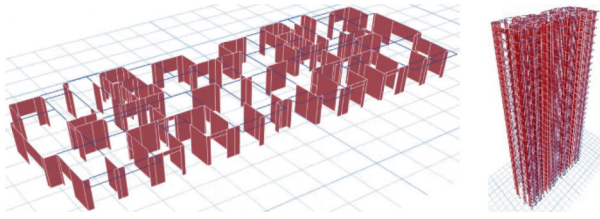
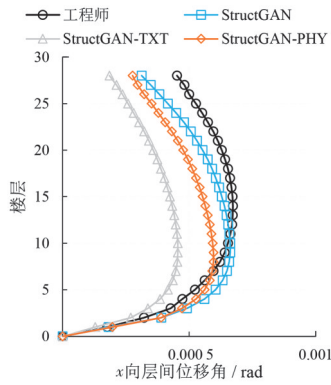
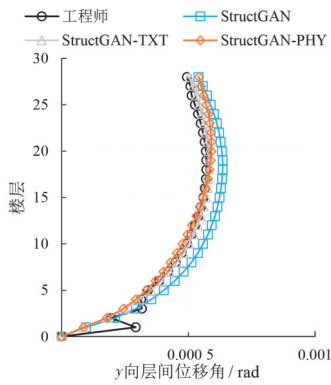


图 7 案例 1-7d83m 整体结构设计 ETABS 模型

Fig.7 Overall structural design of ETABS model of Case 1-7d83m



(a) x向层间位移角对比



(b) y向层间位移角对比

图 8 案例 1-7d83m 层间位移角性能对比

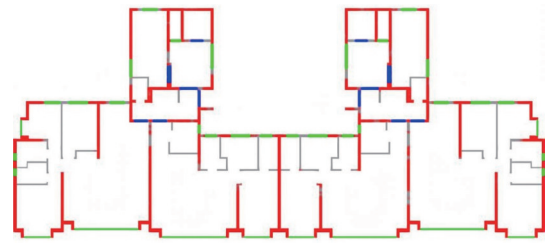
Fig. 8 Comparison on inter-story drift ratio of Case 1-7d83m

方法的设计均与工程师设计非常接近,且量化的  $S_{CV}$  指标较高( $>0.5$ )。其中,  $\eta_{SWratio}$  均较接近 1, 意味着生成设计的总剪力墙数量与工程设计的基本一致;且  $S_{WIoU}$  和  $S_{SIoU}$  均大于 0.5, 意味着剪力墙布置的位置一致性较高。

进一步开展整体结构设计的对比分析,结果如表 2 所示。3 种设计与工程师设计的结果差异均较小,动力特性差异在 3% 左右,最大层间变形在 15% 左右,且整体变形模式非常接近。其中, StructGAN-TXT 的差异最小(动力特性差异 1.00%,最大层间变形差异 3.79%)。

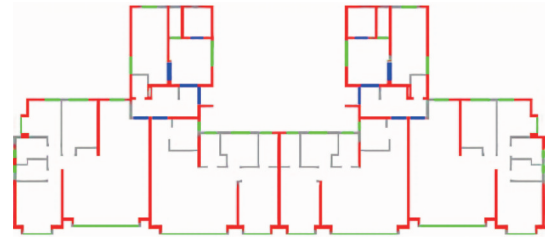
2) 案例 3-7d77m 平面设计结果对比

该案例的 3 种方法设计结果以及对应  $S_{CV}$  评价



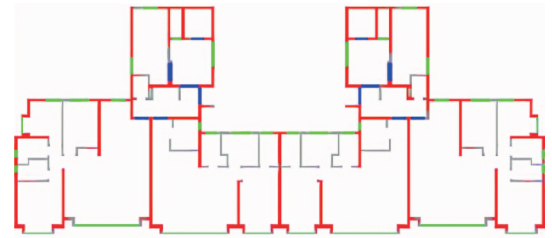
(a) StructGAN 结构设计, 8 d 模型

( $S_{CV}=0.67; \eta_{SWratio}=0.89; S_{WIoU}=0.70; S_{SIoU}=0.80$ )



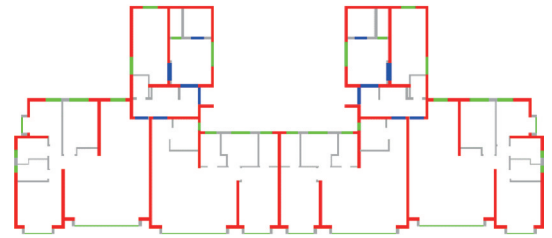
(b) StructGAN-TXT 结构设计

( $S_{CV}=0.68; \eta_{SWratio}=0.93; S_{WIoU}=0.66; S_{SIoU}=0.80$ )



(c) StructGAN-PHY 结构设计, 8 度(0.2g) & 80~100 m 模型

( $S_{CV}=0.66; \eta_{SWratio}=0.88; S_{WIoU}=0.66; S_{SIoU}=0.85$ )



(d) 工程师设计结构平面方案

图 9 案例 2-8d96m 的智能生成式结构方案设计图

Fig. 9 Intelligent designed structural drawings of Case 2-8d96m

结果如图 10 所示。可以看到, StructGAN 和 StructGAN-PHY 两种方法的设计结果较好,与工程师设计相似性高,而 StructGAN-TXT 的设计则差别较大。主要原因在于 StructGAN-TXT 设计的剪力墙墙体过多,  $\eta_{SWratio}$  指标偏小,仅 0.65。

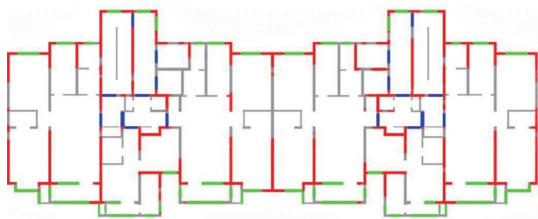
进一步分析整体结构案例对应的结构动力特性和层间位移角的对比结果如表 3 所示。与平面设计结果的对比类似, StructGAN-TXT 的设计结果与工程师设计结果差异较大,剪力墙布置偏多,导致性能差异 20% 左右,而 StructGAN 和 StructGAN-PHY 的设计与工程师差异则为 10% 左右。

表 2 案例 2-8d96m 结构动力特性与最大层间变形对比

Table 2 Comparison on structural dynamic characteristics and maximum inter-story drift ratio of Case 2-8d96m

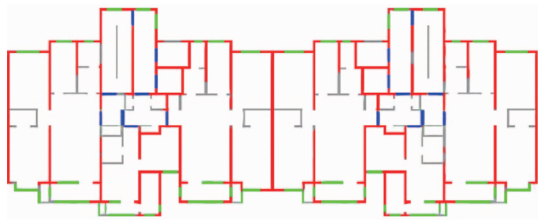
阶数	智能设计与工程师设计的结构周期差异/%		
	StructGAN	StructGAN-TXT	StructGAN-PHY
1 阶	-3.30	-1.20	-2.70
2 阶	-6.44	-0.80	-4.05
均值*	4.87	1.00	3.37
方向	智能设计与工程师设计的最大层间变形差异/%		
	StructGAN	StructGAN-TXT	StructGAN-PHY
x 向	-16.12	-8.58	-16.64
y 向	-7.73	0.99	-7.96
均值*	11.92	3.79	12.30

注:\*均值为差异绝对值的均值。



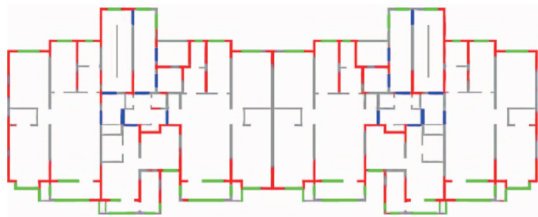
(a) StructGAN 结构设计, 7d-H2 模型

( $S_{CV}=0.48$ ;  $\eta_{SWratio}=0.87$ ;  $S_{WIoU}=0.56$ ;  $S_{SloU}=0.53$ )



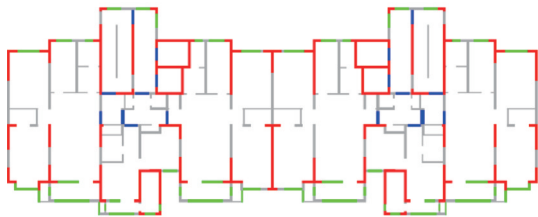
(b) StructGAN-TXT 结构设计

( $S_{CV}=0.35$ ;  $\eta_{SWratio}=0.65$ ;  $S_{WIoU}=0.51$ ;  $S_{SloU}=0.58$ )



(c) StructGAN-PHY 结构设计, 7 度(0.1g) & 60~80 m 模型

( $S_{CV}=0.50$ ;  $\eta_{SWratio}=0.98$ ;  $S_{WIoU}=0.53$ ;  $S_{SloU}=0.48$ )



(d) 工程师设计结构平面方案

图 10 案例 3-7d77m 的智能生成式结构方案设计图

Fig. 10 Intelligent designed structural drawings of Case

3-7d77m

表 3 案例 3-7d77m 结构动力特性与最大层间变形对比

Table 3 Comparison on structural dynamic characteristics and maximum inter-story drift ratio of Case 3-7d77m

阶数	智能设计与工程师设计的结构周期差异/%		
	StructGAN	StructGAN-TXT	StructGAN-PHY
1 阶	-7.80	-27.28	-5.20
2 阶	1.82	-15.50	5.93
均值*	4.81	21.39	5.57
方向	智能设计与工程师设计的最大层间变形差异/%		
	StructGAN	StructGAN-TXT	StructGAN-PHY
x 向	-8.59	-17.00	9.32
y 向	4.68	-19.97	2.34
均值*	6.64	18.49	5.83

注:\*均值为差异绝对值的均值。

3) 案例 4-7d41m 平面设计结果对比

该案例的 3 种方法设计结果以及对应  $S_{CV}$  评价结果如图 11 所示。可以看出, StructGAN-TXT 和 StructGAN-PHY 两种方法的设计结果较好, 与工程师设计相似性高, 而 StructGAN 的设计则差别较大。主要原因在于 StructGAN 设计的剪力墙墙体偏少,  $\eta_{SWratio}$ 、 $S_{WIoU}$ 、 $S_{SloU}$  指标均偏小。

整体结构案例分析对应的结构动力特性和层间位移角的对比结果如表 4 所示。与平面设计结果的对比类似, StructGAN 的设计结果与工程师差异较大, 其剪力墙布置偏少, 动力特性差异 20% 左右, 层间变形的最大差异达到了 40%; 而 StructGAN-TXT 和 StructGAN-PHY 的设计与工程师差异同样偏大, 动力特性差异 10% 左右, 层间变形最大差异达到了 20% 左右。主要原因是 7 度 41 m 设计条件下对应的剪力墙需求较少, 剪力墙布置的较小差异都容易引起较大的结构整体特性不同。

表 4 案例 4-7d41m 结构动力特性与最大层间变形对比

Table 4 Comparison on structural dynamic characteristics and maximum inter-story drift ratio of Case 4-7d41m

阶数	智能设计与工程师设计的结构周期差异/%		
	StructGAN	StructGAN-TXT	StructGAN-PHY
1 阶	19.90	-6.21	-11.17
2 阶	13.79	-15.88	-11.49
均值*	16.84	11.05	11.33
方向	智能设计与工程师设计的最大层间变形差异/%		
	StructGAN	StructGAN-TXT	StructGAN-PHY
x 向	2.44	-14.63	-22.76
y 向	42.40	-22.30	-0.68
均值*	22.42	18.47	11.72

注:\*均值为差异绝对值的均值。



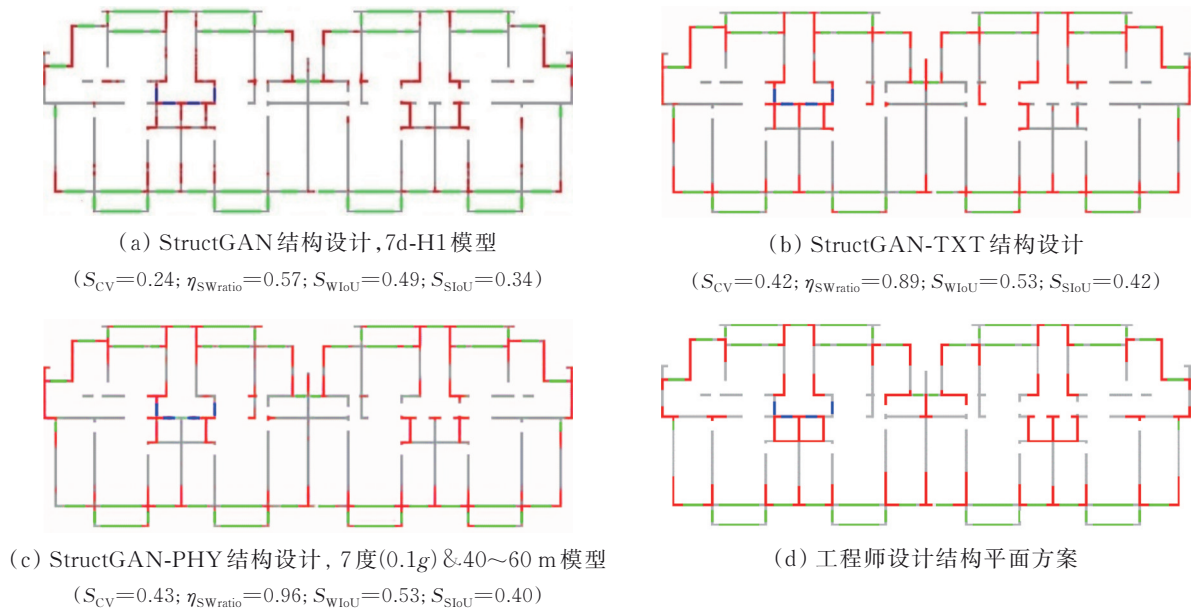


图 11 案例 4-7d41m 的智能生成式结构方案设计图

Fig. 11 Intelligent designed structural drawings of Case 4-7d41m

3.4 基于计算机视觉与力学分析的评价分析

通过对 4 个典型案例的平面设计结果和整体结构分析和对比,分析结果汇总至表 5 中。可以看出:1)在不同案例中,StructGAN-PHY 是 3 种方法中最有效的,较少受到数据质量的限制,能更准确地匹配对应设计需求,且设计结果与工程师设计最接近;2)StructGAN 和 StructGAN-TXT 的设计能力均受到训练数据的制约,仅有部分案例

效果较好,意味着如果待设计的建筑与训练数据的特征域较为接近,则对应的设计结果较良好,反之则设计质量不佳;3)结构抗震性能需求较高的案例,设计结果通常较好,原因在于所需布置的剪力墙较多,设计变化较少;对于抗震性能需求较少的案例,对应布置的剪力墙较少,设计变化则较丰富,人工智能不能保证找到最合适的结果。

表 5 不同案例设计结果分析对比

Table 5 Comparison on different case studies

案例	$S_{CV}$			动力特性差异/%			层间位移差异/%		
	StructGAN	StructGAN-TXT	StructGAN-PHY	StructGAN	StructGAN-TXT	StructGAN-PHY	StructGAN	StructGAN-TXT	StructGAN-PHY
1-7d83m	0.47	0.39	0.47	2.15	23.40	5.07	6.42	17.16	7.47
2-8d96m	0.67	0.68	0.66	4.87	1.00	3.37	11.92	3.79	12.30
3-7d77m	0.48	0.35	0.50	4.81	21.39	5.57	6.64	18.49	5.83
4-7d41m	0.24	0.42	0.43	16.84	11.05	11.33	22.42	18.47	11.72

既有研究认为当生成设计与目标设计的交并比大于 0.5 则相对较优秀<sup>[12-14]</sup>,但目前尚未明确基于计算机视觉的平面设计评价指标与结构力学性能评价指标之间的关系。将所有案例分析结果绘于图 12 中,可以看出:1)当  $S_{CV}$  大于 0.5 时,基本可以保证智能设计的结构力学性能与工程师设计的结构动力特性差异在 5% 以内,且层间位移角在 10% 以内;2)对于地震作用比较大的情况,例如 8 度 (0.2g) 设防、96 m 案例中,即使  $S_{CV}$  相差仅 0.02 且动力特性差异在 5% 以内,层间位移角的差异仍旧会超过 10%,主要原因在于较大地震作用会导致更大的结构变形,相对差异也变得更大。

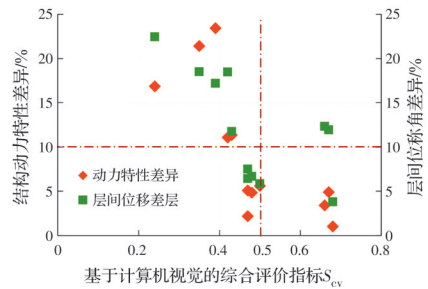


图 12 基于计算机视觉与结构力学分析的评价指标相关性

Fig. 12 Indexes relationship between computer vision-based and structural analysis-based evaluation

因此,可以认为基于计算机视觉的  $S_{CV}$  指标与结构力学性能评价的指标具有高度的正相关性,即

$S_{CV}$ 越高则结构力学性能越优,更接近专家的优化设计。 $S_{CV}=0.5$ 可作为基于视觉评价的合理性阈值,其对应的结构动力特性差异约为5%,层间位移角差异约为10%。

## 4 结论

针对建筑结构智能化方案设计方法进行了对比分析研究。从数据驱动到物理增强数据驱动方法,对比了核心算法构建和设计性能,并通过典型案例对比了相同设计条件下不同算法的实际表现,主要结论如下:

1)数据驱动与物理增强数据驱动是建筑结构智能化设计的两个阶段,数据驱动方法搭建了智能化设计的数据、算法、评价和应用方法的基础,物理增强数据驱动方法则进一步提升了算法性能。

2)数据驱动方法(StructGAN和StructGAN-TXT)通常受限于特定设计条件下的数据质量与数量,而物理增强数据驱动(StructGAN-PHY)则可以有效降低对结构设计数据的依赖性。

3)对于抗震设防需求较低的设计,剪力墙布置的需求较少,其布置的位置更加灵活,导致智能化设计与工程师设计存在一定差异,未来将进一步提升相关设计条件下的智能化设计能力。

4)确定了基于计算机视觉与力学分析评价方法的正相关性,且 $S_{CV}=0.5$ 可作为基于视觉评价的合理性阈值,可供未来智能化设计评价方法使用。

5)主要针对剪力墙结构开展了智能设计相关研究,框架、框架-剪力墙等多种结构类型的智能设计方法研究有待进一步从结构表达、智能算法和评估方法等方面开展。

采用的4个典型案例已在GitHub中开源(<https://github.com/wenjie-liao/StructGAN-PHY/blob/main/StructGAN-TXT-PHY.zip>)。

## 参考文献

- [1] 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)
- [2] 勾红叶,杨彪,华辉,等.桥梁信息化及智能桥梁2019年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(5):14-27.  
GOU H Y, YANG B, HUA H, et al. State-of-the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 14-27. (in Chinese)
- [3] 赵天祺,勾红叶,陈萱颖,等.桥梁信息化及智能桥梁2020年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(Sup1):268-279.  
ZHAO T Q, GOU H Y, CHEN X Y, et al. State-of-the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(Sup1): 268-279. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] BROWN N C, MUELLER C T. Design for structural and energy performance of long span buildings using geometric multi-objective optimization [J]. Energy and Buildings, 2016, 127: 748-761.
- [6] ZHANG Y, MUELLER C. Shear wall layout optimization for conceptual design of tall buildings [J]. Engineering Structures, 2017, 140: 225-240.
- [7] TAFRAOUT 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.
- [8] 何政,来潇.参数化结构设计基本原理、方法及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.  
HE Z, LAI X. Parametric structural design: Theory, approach and applications [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [9] 杜修力,刘占省,赵研.智能建造概论[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.  
DU X L, LIU Z S, ZHAO Y. Introduction to intelligent construction [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021. (in Chinese)
- [10] 周绪红,刘界鹏,冯亮,等.建筑智能建造技术初探及其应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.  
ZHOU X H, LIU J P, FENG L, et al. A preliminary exploration and application of building intelligent construction technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021. (in Chinese)
- [11] SUN H, BURTON H V, HUANG H L. Machine learning applications for building structural design and performance assessment: State-of-the-art review [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101816.
- [12] LIAO W J, LU X Z, HUANG Y L, et al. Automated structural design of shear wall residential buildings using generative adversarial networks [J]. Automation in Construction, 2021, 132: 103931.

- [13] 廖文杰, 黄羽立, 郑哲, 等. 基于生成对抗网络融合文本图像数据的剪力墙结构生成式设计方法[C]//第30届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册), 2021: 381-387. LIAO W J, HUANG Y L, ZHENG Z, et al. Building structural generative design using generative adversarial networks-based fused-image-text to image translation method [C]//Proceedings of the 30th National Conference on Structural Engineering (NO. Ⅲ), 2021: 381-387. (in Chinese)
- [14] LU X Z, LIAO W J, ZHANG Y, 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.
- [15] HUANG X, XIE Y M. Evolutionary topology optimization of continuum structures [M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [16] SHEA K, AISH R, GOURTOVAIA M. Towards integrated performance-driven generative design tools [J]. Automation in Construction, 2005, 14(2): 253-264.
- [17] 赵宪忠, SHEA Kristina. 空间杆系结构的智能生成与设计[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 63-69. ZHAO X Z, KRISTINA S. Intelligent generation and design of spatial truss structures [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 63-69. (in Chinese)
- [18] OH S, JUNG Y, KIM S, et al. Deep generative design: Integration of topology optimization and generative models [J]. Journal of Mechanical Design, 2019, 141(11): 111405.
- [19] SHU D L, CUNNINGHAM J, STUMP G, et al. 3D design using generative adversarial networks and physics-based validation [J]. Journal of Mechanical Design, 2020, 142(7): 071701.
- [20] HUANG W X, ZHENG H. Architectural drawings recognition and generation through machine learning [C]//Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), ACADIA Proceedings. October 18-20, 2018. Mexico City, Mexico. ACADIA, 2018.
- [21] CHAILLOU S. ArchiGAN: A generative stack for apartment building design [EB/OL]. [2019-7-17]. <https://developer.nvidia.com/blog/archigan-generative-stack-apartment-building-design/>.
- [22] NAUATA N, CHANG K H, CHENG C Y, et al. HouseGAN: Relational generative adversarial networks for graph-constrained house layout generation [M]// Computer Vision, ECCV 2020. Cham: Springer, 2020: 162-177.
- [23] NAUATA N, HOSSEINI S, CHANG K H, et al. HouseGAN++ : Generative adversarial layout refinement networks [EB/OL]. 2021: arXiv: 2103.02574. <https://arxiv.org/abs/2103.02574>.
- [24] CHANG K H, CHENG C Y. Learning to simulate and design for structural engineering [EB/OL]. 2020: arXiv: 2003.09103. <https://arxiv.org/abs/2003.09103>.
- [25] PIZARRO P N, MASSONE L M, ROJAS F R, et al. Use of convolutional networks in the conceptual structural design of shear wall buildings layout [J]. Engineering Structures, 2021, 239: 112311.
- [26] PIZARRO P N, MASSONE L M. Structural design of reinforced concrete buildings based on deep neural networks [J]. Engineering Structures, 2021, 241: 112377.
- [27] QIAN W L, XU Y, LI H. A self-sparse generative adversarial network for autonomous early-stage design of architectural sketches [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37(5): 612-628.
- [28] 田晴, 赵崇锦, 王忠凯, 等. 新疆某超高层住宅楼动力弹塑性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(Sup 2): 30-34. TIAN Q, ZHAO C J, WANG Z K, et al. Elastic and plastic dynamic analysis of a super high-rise residential building in Xinjiang [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(Sup 2): 30-34. (in Chinese)
- [29] WANG T C, LIU M Y, ZHU J Y, et al. High-resolution image synthesis and semantic manipulation with conditional GANs [C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, UT, USA. IEEE, 2018: 8798-8807.

(编辑 胡英奎)