



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2308194

引用格式:王章琼,赵歧林,徐晓雅,等.人工智能在建筑结构设计中的应用研究进展[J].科学技术与工程,2025,25(16):6598-6607.

Wang Zhangqiong, Zhao Qilin, Xu Xiaoya, et al. Research progress on the application of artificial intelligence in building structure design [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(16): 6598-6607.

建筑科学

人工智能在建筑结构设计中的应用研究进展

王章琼,赵歧林,徐晓雅,周意,蔡永辉

(武汉工程大学土木工程与建筑学院,武汉 430073)

摘要 结构设计是建筑工程设计阶段的重要环节,须保证建筑物安全可靠、经济耐久。人工智能可代替结构设计师进行大量训练及重复操作,从而找到最优设计结果、提高设计效率。为全面了解人工智能在结构设计中的相关研究和应用热点,从整个结构设计流程的角度总结当前人工智能在方案设计、初步设计、施工图设计3个阶段的研究现状。通过查阅文献发现,专家系统、决策树、退火算法、遗传算法、神经网络、线性回归等人工智能方法在建筑结构设计领域有着广泛的应用,为其带来了新的发展方向 and 途径。目前,人工智能方法在地上结构设计中应用较多,但在地下结构(基础、地下室等)中应用较少,需加强其在地下结构中的应用;此外,定量的规范条文转译技术较为成熟,但定性的规范条文转译技术还有待突破,有必要加强基于规则或基于机器学习的自然语言处理研究。

关键词 人工智能;智能设计;优化算法;建筑结构设计;建筑信息模型(BIM)技术

中图分类号 TU318; 文献标志码 A

Research Progress on the Application of Artificial Intelligence in Building Structure Design

WANG Zhang-qiong, ZHAO Qi-lin, XU Xiao-ya, ZHOU Yi, CAI Yong-hui

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China)

[Abstract] Structural design is an important part of the architectural engineering design stage, which must ensure that the building is safe, reliable, economical, and durable. Artificial intelligence can replace structural designers with a lot of training and repetitive operations to find the optimal design results and improve design efficiency. In order to comprehensively understand the relevant research and application hotspots of artificial intelligence in structural design, the current research status of artificial intelligence in the three stages of scheme design, preliminary design and construction drawing design was summarized from the perspective of the entire structural design process. Through reviewing literatures, it is found that artificial intelligence methods such as expert systems, decision trees, annealing algorithms, genetic algorithms, neural networks, and linear regression have been widely used in the field of building structure design, which has brought new development directions and approaches. At present, artificial intelligence methods are more widely used in the design of aboveground structures, but less in underground structures (foundations, basements, etc.), and their application in underground structures needs to be strengthened. In addition, the quantitative translation technology of normative provisions is relatively mature, but the qualitative translation technology of normative provisions still needs to be broken, and it is necessary to strengthen the research on rule-based or machine learning-based natural language processing.

[Keywords] artificial intelligence; smart design; optimization algorithm; building structure design; building information modeling (BIM) technology

人工智能(artificial intelligence, AI)自1956年达特茅斯会议提出以来,经历起步阶段、专家系统阶段、深度学习阶段等一系列发展后,已成为各个行业的研究热点^[1]。近期,席卷全球的ChatGPT再次引起了各行各业对人工智能的关注。可见,人类

社会正朝着数字化演进,人工智能在其中扮演的角色越来越重。

结构设计是整个建筑物设计过程中的重要环节,对建筑物的结构安全起着至关重要的作用^[2]。结构设计大致包括方案设计、初步设计和施工图设

收稿日期:2023-10-21; 修订日期:2025-02-28

基金项目:国家自然科学基金(52278369);武汉工程大学第十四届研究生教育创新基金(CX2022165)

第一作者:王章琼(1984—),男,汉族,湖北黄冈人,博士,副教授。研究方向:土木工程智能化、地质灾害调查。E-mail:wzqcug@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

计,结构设计人员在设计过程中需要与其他专业相互协调,建筑物稍作修改,结构则需要重新计算,且计算量约占整个建筑物设计阶段的50%,因此结构设计也是耗时最多的环节。中国传统的建筑结构设计多依赖于YJK、PKPM等软件,凭借规范及工程师经验进行设计,包括较为合理的构件尺寸、布置和配筋信息,使其满足相关规范的要求,在保证结构可靠性、安全性的同时降低工程造价^[3]。

随着中国经济的快速发展,建设项目不断增加,建筑样式更加复杂多变,尺寸跨度也越来越大,建筑结构设计效率低、主观因素影响较大、特殊造型设计困难等一系列问题愈发突出^[4]。而人工智能为结构设计提供了新方法,一方面,计算机能够代替人脑进行大量训练,尽可能找到最优结果;另一方面,用程序化的思维替代人工繁琐或重复的操作,提高设计效率。为此,从方案设计、初步设计和施工图3个方面总结当前结构设计智能化技术的研究热点,以推动结构智能设计的发展与工程应用。

1 基于人工智能的方案设计

方案设计阶段需确定建筑物的整体结构可行性,以便选择合适的结构体系;其次确定梁、柱、墙及板支承条件的合理性,以便进行结构布置。该阶段配合建筑专业进一步深化方案,形成一个各专业都可行且大体合理的方案。

1.1 结构选型

在进行建筑结构设计时,结构选型是设计的第一步,选择恰当的结构体系以保证建筑物安全可靠、经济耐久^[5]。结构选型应用智能化技术相对于其他设计阶段较早,其智能化应用主要包括专家系统、决策树等。

专家系统的主要任务是使计算机尽可能模仿专家运用他们的知识和经验来解决某些实际的决策问题,而建筑结构设计正是一个能被专家系统解决的对象,如图1所示。专家系统可在设计人员进行结构选型时提供非常有价值的辅助手段,早在1999年,神经网络的加入提高了专家系统的处理能力和智能化水平,利用神经网络储存专家设计经验,可帮助设计人员选择恰当的结构体系,并具有渐进的学习功能^[6]。随着专家系统的完善,该平台提供了开发工具,王力等^[7]采用C-ADVISOR 3.0工具开发出了大跨空间结构智能选型设计系统,该系统可进行选型阶段的概念设计。

决策树的基本思想是利用树的结构,将实例库中大量的具体案例进行归纳和分类,以发现隐含在大量实例中的分类判别规则,并形成预测分析模

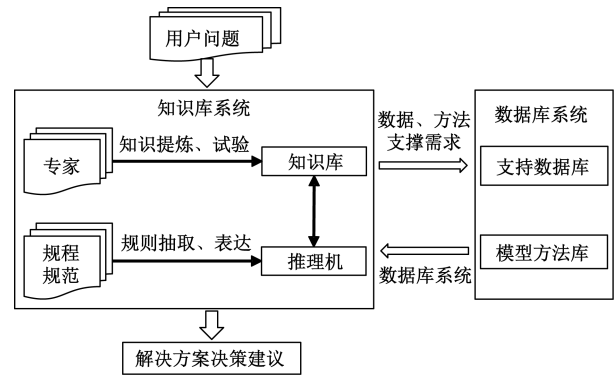


图1 专家系统原理

Fig. 1 The principle of the expert system

型。模糊多属性决策模型可以有效地处理结构选型中方案决策问题^[8],进而开发出高层建筑结构选型智能决策支持系统^[9],该系统可对高层建筑设计阶段的结构选型进行决策,但决策结果准确率较低。而建立基于决策树的知识发现方法可提高决策的准确率^[10],该方法从侧面将大量繁杂的工程实例信息转化为指导结构选型的经验或半经验设计,提高了决策的准确率,使结构选型更加符合工程实际需要。

上述研究表明,人工智能为结构设计选型带来了便利,有效地解决了智能选型这一瓶颈问题,提高了设计效率。虽然对于结构选型的智能化研究相对较早,但近10年内大都集中于高层建筑,鲜有其他类型的建筑。今后可引入新的人工智能技术对其他类型的建筑进行研究,以提高建筑结构选型智能化设计的普适性。

1.2 结构布置

结构选型确定后,需结合建筑设计进行结构总体布置,保证建筑物具有合理的传力路径^[11]。结构布置是对建筑物的梁、板、柱、墙等构件进行尺寸位置确定,在建筑物满足建筑使用功能、建筑美学要求的同时确保满足强度、刚度和稳定性要求。结构布置是一项工作量较大、耗时较多的工作,而人工智能技术能有效改善传统结构的布置效率,诸多学者运用退火算法、遗传算法、深度学习等智能算法实现结构智能布置。

退火算法是通过赋予搜索过程一种时变且最终趋于0的概率突跳性,从而可有效避免陷入局部极小并最终趋于全局最优的优化算法。退火算法在结构拓扑优化方面表现良好,可实现桁架结构^[12]、杆系结构^[13]的截面优化。由于退火算法是一种串行优化算法导致运行效率不高,一些学者对模拟退火算法进行改进,提出一种两阶段模拟退火算法,解决了优化效率不高的问题^[14]。周婷等^[15]

基于改进的两阶段模拟退火算法提出了钢框架结构的智能优化方法,经过实例证明该方法较传统退火算法优化速度快且效果良好,如表 1^[15]、表 2^[15]所示。

但其把握整体搜索过程的能力不足,这也正是退火算法在钢结构、杆系等单一结构中的布置优化应用较多,而在复杂结构中应用较少的原因。

遗传算法是模拟自然选择和自然遗传在每次迭代中都保留一组候选解,利用遗传算子对候选解进行组合,产生新一代的候选解,重复此过程直到满足指标为止^[16]。该算法常被用在超大跨度结构设计及钢框架设计中解决优化问题和制定最优化决策^[17-18],测试结果与有限元分析基本一致,且效果显著。但通过研究发现,采用遗传算法进行结构体量大、约束条件复杂的结构设计优化时计算时间久,针对这一问题,可采取贪婪策略、罚函数、精英保留策略等多项措施对遗传算法进行改进^[19],提高优化效率和稳定性。Zhou^[20]提出了一种带有贪婪策略的改进遗传算法,实现了剪力墙的布置优化,解决了遗传算法难以表示约束条件、计算时间久等问题,提高了遗传算法的优化效率与稳定性。

神经网络是模仿动物的中枢神经系统行为特征,进行分布式并行信息处理的数学模型^[21]。神经网络是人工智能领域的研究热点之一,越来越多的学者将神经网络应用到建筑设计布置优化中,以提高拓扑优化的计算效率^[22],如高层建筑的伸臂桁架尺寸拓扑优化^[23]。生成对抗网络是神经网络中的常用方法,其通过两个神经网络相互博弈学习,可解决神经网络训练次数要求高、学习效率低等问题,因此被学者广泛应用。Zhao^[24]提出了建筑构件、空间布置耦合学习的生成对抗网络,经过训练

后生成的梁构件布置设计,其设计结果与工程师设计高度一致。

深度学习是神经网络的进阶版,其基本思路与神经网络类似,但比神经网络有着更复杂的结构及优化算法,相当于神经网络的纵向延伸^[25]。深度学习因其操作简单、高效等优点在剪力墙结构智能优化中应用研究较多,其优化结果与结构设计师设计的剪力墙布置图相比,材料成本降低了 22.4%,设计周期缩短了 96.7%^[26]。深度学习也常被用于剪力墙结构生成式设计中,廖文杰等^[27]基于深度学习提出了剪力墙结构生成式设计框架、智能设计算法、设计性能评价方法,有效实现了对结构拓扑特征的学习及框架结构剪力墙构件的智能设计。

目前关于结构智能布置优化的研究大多集中于单一构件结构优化^[28],针对这一现象,周绪红等^[29]不但进行了多标准层剪力墙结构智能布置,还进行了梁自动化布置、板自动化布置及荷载自动化布置研究,并采用分步优化策略和遗传算法对剪力墙、梁、板进行优化,通过实例验证该方法可显著缩短设计周期;陆新征等^[30]基于卷积对抗网络算法对建筑设计图像特征、设计文本条件指导、力学机理约束、经验规则优化等规律的学习,实现了结构的剪力墙、梁和柱智能化布置。

综上所述,学者们将许多智能优化方法或改进后的智能算法应用在结构布置中,具有效率高、周期短和人力投入少等优点。但研究对象较为单一,大多为标准的规则建筑,而现实中的建筑物大多不规则。可以预见,随着人工智能技术的逐渐成熟,建筑结构优化布置将更加的智能化、自动化和普适化。

2 基于人工智能的初步设计

该阶段在方案设计基础上进行结构的计算、调整、细化,满足结构稳定性、合理性和经济性要求,以此作为施工图设计的实施依据。

2.1 结构计算

在结构计算分析阶段,目前仍主要依赖于 PK-PM、YJK 等工程计算软件,对于规范无法满足的特殊构件依靠手算解决,因而存在重复性劳动、人工经验依赖性强、计算效率较低等问题^[31],且新型材料与结构造型日趋复杂,传统的计算方法及效率难以满足结构设计的需求。随着人工智能技术不断发展,越来越多的学者采用机器学习、深度学习、神经网络等智能算法来解决以上问题。

AdaBoost 算法是将多个弱分类器进行合理的结合,使其成为一个强分类器,同时在每一轮中加入

表 1 普通模拟退火算法优化结果^[15]

Table 1 Optimization results of ordinary simulated annealing algorithm^[15]

运算次数	优化后用钢量/kg	时间/min
1	3 079.82	127
2	3 074.36	133
3	3 063.57	124

表 2 两阶段模拟退火算法优化结果^[15]

Table 2 Optimization results of two-stage simulated annealing algorithm^[15]

运算次数	优化后用钢量/kg		时间/min	
	阶段一	阶段二	阶段一	阶段二
1	3 220.38	3 049.25	18	74
2	3 215.47	3 054.49	21	72
3	3 198.72	3 059.89	23	77

新的弱分类器,直到达到预定的错误率或迭代次数。钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)柱的破坏模式和承载力计算是结构设计中的关键问题,开发高效可靠的方法来识别破坏模式和预测相应的承载能力对于结构设计来说极其重要。对此,一些学者采用 AdaBoost 预测 RC 柱的承载特性,并与规范提供的经验公式计算的承载力相比,预测结果较经验公式有明显的优越性^[32]。AdaBoost 算法因其较高的预测精度被广泛用于试验结果的训练,该算法可预测出影响柱承载特性最重要的参数是混凝土强度、横向荷载、纵向钢筋配筋率,且预测精度显著高于目前最先进的经验公式和反向传播(back propagation, BP)、Elman 等高效的神经网络模型^[33]。

XGBoost(extreme gradient boosting)算法是一种可并行计算的集成算法,该算法通过加入正则项来控制模型复杂程度,有效防止模型的过拟合,能较好地解决传统模型存在的过学习、预测效率低、训练时间长等问题。钢筋混凝土梁可能在某些情况下发生没有任何预兆的破坏,因此提高预测模型的准确性至关重要,而 XGBoost 算法以其超高的预测精度常被用于预测钢筋混凝土梁的抗剪承载力^[34]。相比传统机器学习[线性回归、人工神经网络(artificial neural network, ANN)等]算法建立的预测模型, XGBoost 的精度更高, Rahman 等^[35]采用线性回归、决策树、XGBoost、AdaBoost 等 11 种机器学习模型对钢纤维混凝土梁的抗剪强度进行了评估, XGBoost 以最低的均方根误差和平均绝对误差(85%)得到了最精确的预测,同时得出剪跨比、纵筋率和混凝土强度是影响钢纤维混凝土(steel fiber reinforced concrete, SFRC)梁抗剪强度最重要的参数。

多元线性回归(multiple linear regression, MLR)是用于分析一个连续型因变量与多个自变量之间线性关系的统计学分析方法^[36]。MLR 算法常被用于预测钢筋混凝土板的抗冲切承载力,该算法具有优越的预测性能,但与 ANN 模型相比预测结果精度较低^[37]。为提高 MLR 的预测精度, Nhat-Duc^[38]提出了分段多元线性回归模型,且将分段多元线性回归模型与 ANN 模型分别预测 SFRC 板抗冲切承载力,结果显示分段多元线性回归模型比 ANN 预测和经验方程计算的结果更好,该方法可为结构工程师在 SFRC 结构设计阶段提供可靠的计算方案。

集成机器学习模型是将几种机器学习算法组合成一个预测模型的元算法,以达到减小方差和偏差、改进预测的效果。随机森林、自适应增强、梯度增强回归树和极端梯度增强作为 4 种典型的集成机器学习模型,常被用于预测钢筋混凝土梁的抗剪强

度^[39],其预测结果无论在精度还是误差上都明显优于传统的力学模型。对于 FRP 筋混凝土板抗冲切承载力计算也可采用集成机器学习的方法,该方法与基于公式的方法相比,误差降低了约 15%^[40]。

还有学者采用深度学习模型预测钢筋混凝土梁构件塑性铰的承载特性,塑性铰的经验计算公式难以准确表示构件受力特性与模型参数的复杂关系。对此,韩小雷等^[41]基于深度学习模型(hardness-aware deep metric learning, HDML)预测 RC 梁构件塑性铰受力特性与参数的关系,并将 HDML 预测结果与现有经验公式等方法的计算结果做对比,如表 3^[41]所示,结果表明,HDML 预测结果精度更高。

表 3 HDML 预测结果与经验公式计算误差对比^[41]

Table 3 HDML prediction results compared with empirical formula calculation errors^[41]

参数	计算误差/%			
	Fadis 经验公式	Haselton 经验公式	截面分析法	HDML
M_y	25.49	—	21.96	9.13
θ_y	79.51	—	57.37	13.57
M_c	—	24.56	13.54	9.70
θ_c	—	244.49	75.92	11.19

注: M_y 为屈服承载力; θ_y 为屈服转角; M_c 为峰值承载力; θ_c 为峰值转角。

综上所述,AdaBoost 作为最典型的机器学习方法,具有较高的稳定性;XGBoost 以最低的均方根误差和平均绝对误差得到了最精确的预测;集成机器学习模型比单一的学习方法具有更好的预测性能。可见,在这个大数据时代,机器学习技术,特别是集成学习,可以为结构设计中传统的力学计算模型提供一种替代方案。

2.2 抗震计算

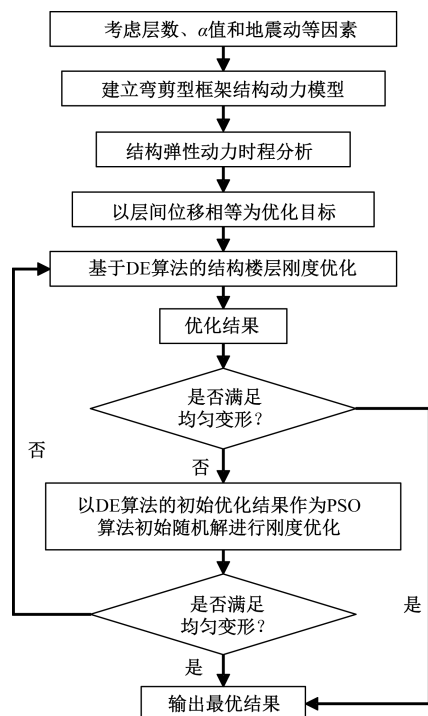
《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[42]规定抗震设防烈度在 6 度及以上地区须进行结构抗震计算。传统计算方法无法实现对结构薄弱层和损伤分布的有效调控,更没有充分实现优化设计的理念,而能够解决复杂问题且高效的智能算法为结构抗震计算提供了新途径。

建筑物在地震作用下底层到顶层的层间位移角逐渐变大,而规范中公式计算的相邻层配筋率大致相同,极易出现薄弱层和集中破坏,因此,层间位移角的计算在高层建筑中尤其重要。一些学者采用人工神经网络对建筑进行损伤状态预测, Konstantinos 等^[43]利用 30 个不同的混凝土框架结构在 65 条实际地震作用下的数据集,选取最大层间位移比作为损伤指标,实现对 RC 建筑物损伤状态的最优预测。还有学者采用机器学习预测 RC 在地震作用下的安全性, Hwang 等^[44]基于高层建筑的楼

层加速度和层间位移角数据,采用机器学习预测 RC 在地震作用下的反应,误差约为实测值的 30%,根据预测结果进行配筋计算相较于传统计算方式提高了建筑的安全性。

梁柱节点是控制钢筋混凝土结构在地震荷载作用下整体性能的关键构件。为了识别梁柱节点的响应机制,建立准确的预测模型来量化梁柱节点的剪切强度至关重要。对此,可采用极限学习机(extreme learning machine, ELM)智能模型来预测混凝土梁柱节点的承载能力和模拟失稳,该方法与多元自适应回归样条(multivariate adaptive regression splines, MARS)模型相比,ELM 模型具有更加可靠的预测性能^[45]。针对预测精度, Jong-Su 等^[46]将 MLR、MARS 和符号回归(symbolic regression, SR)等机器学习算法联合,形成一套新的抗剪强度联合预测模型,用于 RC 梁柱节点的抗剪强度评估,与单一模型相比,所提出的联合模型预测精度更高。

对于自由度较多的结构,传统的智能算法在计算效率和精度方面略有不足,何浩祥等^[47]采用均匀变形、差分进化与粒子群混合智能算法(图 2^[47])进行框架结构抗震优化设计,实现了高精度的均匀变形优化设计,将优化结果做归一化处理得到经验公式,可供结构设计师参考。



α 为地震影响系数;差分进化算法(differential evolution, DE); 粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)

图 2 混合智能算法结构优化设计流程^[47]

Fig. 2 Hybrid intelligence algorithm structure optimizes the design process^[47]

综上所述,抗震计算作为结构设计中重要环节之一,大量学者在层间位移角、梁柱节点位移等方面采用神经网络、极限学习机等智能算法做建筑稳定性预测或模拟研究,给出了建筑物的最优结构抗震设计方案以提高结构抗震性能,为结构设计师进行抗震计算时提供有力帮助。

3 基于人工智能的施工图设计

目前结构施工图主要是基于 CAD 二维平面进行设计,结构设计师基于建筑图纸进行结构布置、内力分析和结构施工图绘制。在施工图绘制过程中,存在大量的重复建模工作,导致设计效率偏低^[48]。为提高设计效率,越来越多的学者进行 CAD 二次开发或引入建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术,一定程度上实现了结构施工图的智能设计^[49]。

3.1 CAD 二次开发

目前 Auto CAD 的二次开发工具主要包括 Visual Lisp、VBA、Object ARX 和 .Net API 等。其中 Visual Lisp 采用 Lisp 语言开发,简单但不直观;VBA 采用 Visual Basic 开发,开发简单方便,但功能不足;Object ARX 基于 Visual C++ 语言开发,该语言功能强大,但难以掌握;.Net API 支持 .Net 的所有语言,主要包括 VB、NET、C#等,性能强大、稳定性好,但学习难度较大。

近年来,出现了大批 CAD 辅助设计工具,可见 CAD 二次开发技术在工程实践中发挥的作用越来越重要。这些辅助工具(TSSD、CAD 自动标注等)为结构设计人员提供了诸多绘图命令和功能,实现了标准化、高效化、精细化绘图,大大提高了绘图效率。文献[50-51]对 CAD 进行了二次开发,实现了参数化设计,输入相应的尺寸参数,即可完成整套施工图纸的绘制,该方法切实提高了设计效率,减少因人工绘制产生的失误,提高工作效率,但研究的对象较为单一,通常为某一类型建筑。

综上所述,CAD 二次开发可以帮助设计人员摆脱繁重且重复的绘图工作,针对建筑结构的辅助设计软件也相对完善,使得绘图工作具备一定的智能化。但 CAD 与计算分析软件(PKPM、YJK 等)依旧是两个独立操作软件,结构设计步骤未得到质的改变,可见辅助设计软件对于结构设计的帮助有限,因此,还需对制图软件与计算软件相结合的方面进一步研究。

3.2 BIM 技术

目前 BIM 技术在建筑结构设计中的应用越来越广泛,实现了二维图纸到三维模型的演变^[52]。通

过 Revit 构建三维模型,能够更加直观的分析结构设计的不足,方便修改与优化,最后导出的图纸为风格统一的平、立、剖布置图^[53],大大减少了结构工程师绘图工作^[54]。

BIM 技术的推进也遇到了许多瓶颈,主要原因是三维模型审查还未有被广泛采用的标准方法,结构设计所涉及的法律法规还停留在二维图纸中。虽然合规性检查理论与专家系统可实现 BIM 模型的合规性自动检查,但无法按照规范条款审查,该方法在一定程度上能够指导后续合规性检查研究^[55]。对此,张吉松等^[56]结合一阶谓词逻辑和 Java 编程转译《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2011)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)和《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)中部分设计条款,该方法能根据结构设计规范实现 BIM 结构模型半自动化合规性审查,有效提高了 BIM 模型合规性检查效率及出图质量,但对于大多数定性条文较难转译,要全面实现 BIM 模型自动审查还需进一步研究。

基于 CAD 结构设计时,结构计算与施工图绘制是两个不同的过程,如图 3^[57]所示。而 BIM 技术将结构分析和施工图绘制融为一体,BIM 模型经计算分析后可实现一键绘图,提高设计效率^[57],如图 4^[57]所示。对于 BIM 模型计算分析成了一大难题,Revit 提供的计算分析系统(Robot)并不适应《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2011)的要求,因此需要将 BIM 模型数据转换到结构分析软件中进行计算,而 IFC 标准与结构计算软件(PKPM 等)之间数据转换易出现模型信息缺失^[58-59]。对此,PKPM 平台的 P-Trans 系统与 YJK 平台的 Revit-YJKS 软件都实现了各自的结构计算模型和 Revit 结构模型数据双向转换。但都或多或少存在一些问题,如 P-Trans 暂不支持荷载传递、Revit-YJKS 缺少 P-Trans 功能完善等^[60]。李志文等^[61]基于 Revit-YJKS 软件和相关案例证明了 YJK 模型和 Revit 模型的匹配率达 85% 以上,通过速博插件和定义相应的标记族在 BIM 模型中进行平法标注,实现了标注文本与 BIM 结构模型钢筋信息的统一和联动。

综上所述,CAD 二次开发为结构设计带来了便利,而利用 BIM 技术可视化、数据化的特征可有效排查图纸错误,提高设计质量和效率,为传统结构设计带来了质的改变。可以预见,各专业在 BIM 中协同设计是未来建筑设计的趋势,最终交付的成品中不仅包括传统的图纸文件,还包括全专业 BIM 模型、移动端的 BIM 模型、管线碰撞结果文件等。

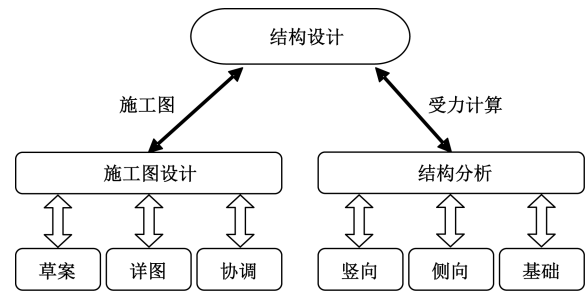


图3 传统的结构设计流程^[57]

Fig. 3 Traditional structural design process^[57]

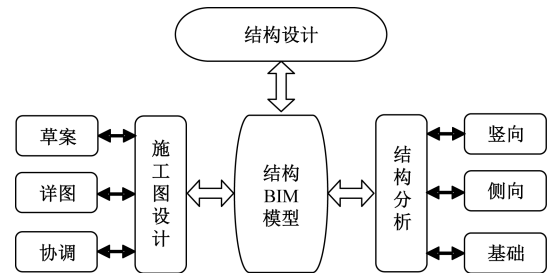


图4 基于BIM的结构设计流程^[57]

Fig. 4 BIM-based structural design process^[57]

4 发展趋势

综合考虑人工智能在建筑结构设计领域的研究现状,对中国知网数据库已发表的人工智能与建筑结构设计相关文献进行量化分析。文献主要来源于中国知网与 SciHub 学术导航,检索时间为 2016 年 1 月—2023 年 4 月,通过论文标题、摘要与关键词剔除与检索目标不相关或无实际技术支撑的文献。最终共检索到文献 46 篇,其中,中文文献选取“结构智能设计”“结构智能优化”等关键词进行检索,共 23 篇;英文文献选取“Structural Intelligent Design”“Structural Optimization”等关键词进行检索,共 23 篇。文献主要来自《建筑结构学报》《土木与环境工程学报(中英文)》、*Engineering Structures*、*Journal of Building Engineering* 等知名期刊。

将以上所收集的文献按发表年限统计,如图 5 所示,结果显示从 2016 年开始,文献数量较少,2019 年之后文献数量逐年增加,近两年来增加幅度愈发明显,表明结构设计领域存在广阔的智能化需求;按研究对象统计,如图 6 所示(数量 ≥ 3),可见诸多学者将人工智能应用于剪力墙、钢结构、BIM 模型等研究中。

基于人工智能技术在建筑结构设计领域的发展现状和研究热点及文献量化分析结果,结合建筑结构设计智能化发展的实际需求,归纳出人工智能在结构设计领域的发展趋势如下。

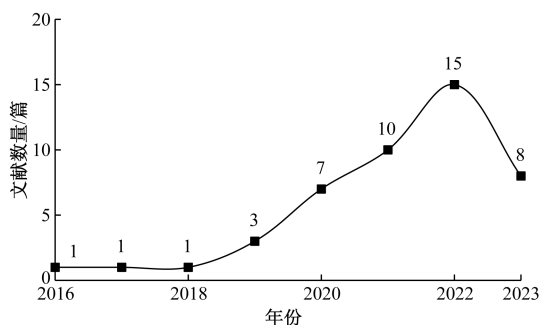


图5 文献发表时间分布

Fig. 5 Distribution of publication time of literature

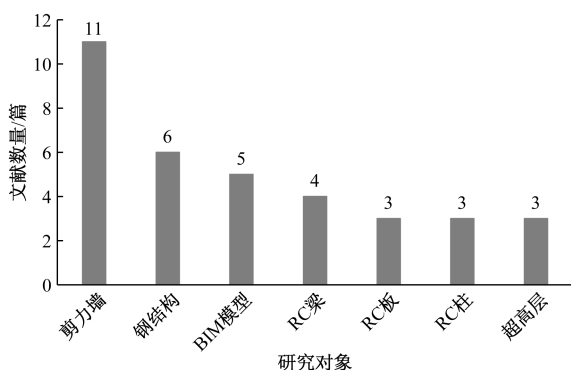


图6 文献研究对象统计

Fig. 6 Statistics of literature research objects

(1)未来,人工智能技术在结构设计领域的发展和應用将更加均衡。通过前沿研究文献可知,近年来人工智能在建筑结构设计领域得到了广泛关注与研究,同时在结构设计各阶段均有涉及,但对于不同形式的结构智能化发展不够均衡,如诸多学者对上部结构(剪力墙、梁、板、柱等)研究较多,而对于基础、地下室等方面的智能化应用研究较少。因此,对不同的结构形式进行研究,以应对目前形式多样的建筑是结构智能设计的必经之路。

(2)基于人工智能的BIM模型合规性审查技术将取得突破。在社会层面,智能设计是未来建筑设计领域的发展趋势,BIM模型审查是智能设计的重点研究内容,同时国家也出台了相关政策加强BIM与人工智能的集成应用。在技术层面,模型的合规性审查依据规范条文进行,目前定量的规范条文转译技术相对成熟,而定性的规范条文转译技术还有待突破。对此,需加强基于规则或基于机器学习的自然语言处理研究以实现BIM模型合规性审查,从而实现建筑设计领域高效、可持续的发展。

(3)尽管人工智能技术极大地提高了建筑结构设计效率,但在实际操作中,因使用门槛和学习成本较高,在一定程度上阻碍了该技术的应用和推广。目前,已有学者提出大语言模型驱动的人机交互设计新范式(即设计师采用自然语言指令与软

件进行交互设计),并验证了其可行性,该范式可为建筑结构智能化设计的应用推广提供解决方案。

5 结论

从设计流程的角度阐述人工智能在建筑结构设计中的相关研究和应用现状,总结人工智能在结构选型、结构布置、结构计算、抗震计算、CAD二次开发和BIM技术6个方面的研究热点和前沿技术。得出以下主要结论。

(1)人工智能在建筑结构设计领域的研究及应用较为广泛,主要包括专家系统、决策树、退火算法、遗传算法、神经网络、线性回归等智能算法。证明人工智能在建筑结构设计领域有着广泛的应用,且存在实际的智能化需求。

(2)人工智能在建筑结构设计各阶段的研究均有涉及,但对于不同形式的结构智能化发展不均衡。应较多关注基础、地下室等结构设计的智能化发展,提高结构设计的整体智能化水平。

(3)目前智能化技术在建筑结构设计领域得到极大的发展,但大部分研究只能在结构设计某阶段或单一构件中作为参考而无法应用于实际工程项目中,主要原因为定性的规范条文转译较为困难,这一技术壁垒仍需深入研究,这也正是智能化技术在结构设计领域无法全面应用的重要原因。

人工智能在建筑结构设计中的研究和应用仍处于起步阶段,随着人工智能与建筑深度设计的深度融合,将真正实现“一体化设计”和“一键出图”。

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 Yuequan, Li Hui. Artificial intelligence for civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 1-11.
- [2] 包联进,陈建兴,童骏,等.超高层建筑锥形体型与结构设计的关系[J].建筑结构,2022,52(10):118-122.
Bao Lianjin, Chen Jianxing, Tong Jun, et al. Relationship between tapered shape and structural design of super high-rise buildings [J]. Building Structure, 2022, 52(10): 118-122.
- [3] Wang F Q, Shi Q X, Wang P. Seismic behaviour of reinforced concrete frame structures with all steel assembled Q195 low yield buckling restrained braces [J]. Structures, 2021, 30: 756-773.
- [4] 罗齐鸣,华建民,黄乐鹏,等.基于知识图谱的国内外智慧建造研究可视化分析[J].建筑结构学报,2021,42(6):1-14.
Luo Qiming, Hua Jianmin, Huang Lepeng, et al. Visualization analysis of domestic and overseas intelligent construction assisted by mapping knowledge domains [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(6): 1-14.
- [5] 张慎,尹鹏飞,王杰,等.超高层建筑结构方案智能设计工具的开发与实现[J].建筑结构,2022,52(23):100-106,138.
Zhang Shen, Yin Pengfei, Wang Jie, et al. Development and im-

- plementation of intelligent design tools for super high-rise building structural schemes[J]. *Building Structure*, 2022, 52(23): 100-106, 138.
- [6] 刘西拉, 李楚舒. 基于神经网络的高层建筑结构体系选择[J]. *建筑结构学报*, 1999(5): 36-41, 65.
Liu Xila, Li Chushu. Selecting the structural system of high-rise buildings based on neural networks[J]. *Journal of Building Structures*, 1999(5): 36-41, 65.
- [7] 王力, 吕大刚, 刘晓燕, 等. 大跨空间结构智能选型系统的研究与开发[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003(6): 644-646.
Wang Li, Lü Dagang, Liu Xiaoyan, et al. Intelligent form selection system for large span structures[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003(6): 644-646.
- [8] 江杰, 汤娟, 甘雨, 等. 基于组合赋权法的建筑结构安全评价[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(17): 7278-7285.
Jiang Jie, Tang Juan, Gan Yu, et al. Safety evaluation of building structures based on the combined weighting method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(17): 7278-7285.
- [9] 吕大刚, 邢方亮, 张世海, 等. 高层建筑结构选型智能决策支持系统研究开发[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004(2): 205-208.
Lü Dagang, Xing Fangliang, Zhang Shihai, et al. Intelligent decision support system for high-rise building structural form selection[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004(2): 205-208.
- [10] 张世海, 刘晓燕, 涂庆, 等. 基于决策树的高层结构智能选型知识发现[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005(4): 451-454, 567.
Zhang Shihai, Liu Xiaoyan, Tu Qing, et al. Decision trees based knowledge discovery in databases for high-rise structures intelligent from selection[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005(4): 451-454, 567.
- [11] 许馨悦, 李洪强, 刘丽芳, 等. 多联机系统与轻钢装配式建筑一体化设计新方法[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(15): 6354-6365.
Xu Xinyue, Li Hongqiang, Liu Lifang, et al. A new method of integrated design of multi-online system and light steel prefabricated building[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(15): 6354-6365.
- [12] 王仁华, 赵宪忠. 平面桁架结构拓扑优化设计的改进智能算法[J]. *工程力学*, 2012, 29(11): 205-211.
Wang Renhua, Zhao Xianzhong. Improved intelligent algorithm for topology optimization design of planar truss structure[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(11): 205-211.
- [13] 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 Xianzhong, Shea Kristina. Intelligent generation and design of spatial truss structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(9): 63-69.
- [14] Hasançebi 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.
- [15] 周婷, 孙克肇, 陈志华, 等. 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[J]. *土木与环境工程学报*, 2024, 46(1): 139-151.
Zhou Ting, Sun Kezhao, Chen Zhihua, et al. Intelligent design method of rural light steel frame structure based on BIM technology and simulated annealing algorithm[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(1): 139-151.
- [16] 张文勇. 响应面优化算法在被动式低能耗建筑设计中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(21): 282-287.
Zhang Wenyong. Application of responsive surface optimization algorithm in passive low-energy building design[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(21): 282-287.
- [17] 杨永强, 马云鹏, 林康, 等. 遗传算法的超大跨度充气结构设计优化[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(9): 86-91.
Yang Yongqiang, Ma Yunpeng, Lin Kang, et al. An optimizing design method of large span inflatable structure based on genetic algorithm[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(9): 86-91.
- [18] 何嘉年, 王湛. 半刚性连接钢框架结构体系优化设计[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(S1): 98-103.
He Jianian, Wang Zhan. An optimal design for steel frame structural systems of semi-rigid connections[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(S1): 98-103.
- [19] 杨律磊, 张谨, 孙意斌, 等. 参数化技术在超高层结构设计中的应用[J]. *建筑结构*, 2022, 52(20): 29-37.
Yang Lulei, Zhang Jin, Sun Yibin, et al. Application of parametric technology in the design of super high-rise structures[J]. *Building Structure*, 2022, 52(20): 29-37.
- [20] Zhou X H. Automated structural design of shear wall structures based on modified genetic algorithm and prior knowledge[J]. *Automation in Construction*, 2022, 139; DOI: 10.21203/rs.3.rs-84863/v1.
- [21] 刁建新, 杜一凡. 智能化建筑结构抗震强度性能准确预测仿真[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(3): 321-324.
Diao Jianxin, Du Yifan. Accurate prediction and simulation of seismic strength performance of intelligent building structures[J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(3): 321-324.
- [22] Kaviani S, Sohn I. Application of complex systems topologies in artificial neural networks optimization; an overview[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 180; DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115073.
- [23] Farahmand-Tabar S, Payam A. Simultaneous size and topology optimization of 3D outrigger-braced tall buildings with inclined belt truss using genetic algorithm[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2020, 29(13); DOI: 10.1002/tal.1776.
- [24] Zhao P J. Intelligent beam layout design for frame structure based on graph neural networks[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 63; DOI: 10.1007/BF01213999.
- [25] 丁志坤, 王展. 既有建筑围护结构节能改造多目标优化设计[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(17): 7269-7277.
Ding Zhikun, Wang Zhan. Multi-objective optimization design for energy-saving renovation of existing building envelope structures[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(17): 7269-7277.
- [26] 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 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.

- [27] 廖文杰, 陆新征, 黄羽立, 等. 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[J]. 土木与环境工程学报, 2024, 46(1): 82-92.
Liao Wenjie, Lu Xinzheng, Huang Yuli, et al. Intelligent generative structural design methods for shear wall buildings: from data-driven to physics-enhanced[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 82-92.
- [28] 陈圣格, 周婷, 陈志华, 等. 模块建筑参数化平面优化及智能化结构设计方法[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(9): 51-66.
Chen Shengge, Zhou Ting, Chen Zhihua, et al. Modular building parametric plane optimization and intelligent structure design method[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(9): 51-66.
- [29] 周绪红, 胡佳豪, 王禄锋, 等. 高层剪力墙结构多目标智能设计方法[J]. 土木工程学报, 2024, 57(6): 92-100.
Zhou Xuhong, Hu Jiahao, Wang Lufeng, et al. Intelligent multi-objective design method of high-rise shear wall structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(6): 92-100.
- [30] 陆新征, 廖文杰, 顾栋栋, 等. 从基于模拟到基于人工智能的建筑设计方法研究进展[J]. 工程力学, 2025, 42(3): 1-17.
Lu Xinzheng, 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.
- [31] 徐阳, 金晓威, 李惠. 土木工程智能科学与技术研究现状及展望[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 23-35.
Xu Yang, Jin Xiaowei, Li Hui. State-of-the-art and prospect of intelligent science and technology in civil engineering[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(9): 23-35.
- [32] Feng D C, Liu Z T, Wang X D, et al. Failure mode classification and bearing capacity prediction for reinforced concrete columns based on ensemble machine learning algorithm[J]. Advanced Engineering Informatics, 2020, 45: DOI: 10.1016/j.aei.2020.101126.
- [33] Feng D C, Cetiner B, Kakavand M R A, et al. Data-driven approach to predict the plastic hinge length of reinforced concrete columns and its application[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(2): DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002852.
- [34] Naderpour H, Poursaeidi O, Ahmadi M. Shear resistance prediction of concrete beams reinforced by FRP bars using artificial neural networks[J]. Measurement, 2018, 126: 299-308.
- [35] Rahman J, Khondaker S A, Nafiz I K, et al. Data-driven shear strength prediction of steel fiber reinforced concrete beams using machine learning approach[J]. Engineering Structures, 2021, 233: DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111743.
- [36] 丁玉贤, 李阳灿, 丁超, 等. 农居建筑围护结构改造节能敏感性分析: 以内蒙古河套地区为例[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(23): 9998-10007.
Ding Yuxian, Li Yangcan, Ding Chao, et al. Energy saving sensitivity analysis of rural building envelope renovation: a case study in Hetao of Inner Mongolia[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(23): 9998-10007.
- [37] 李昕, 陈洪根, 左乐, 等. 钢筋混凝土板柱节点抗冲切承载力预测与影响因素分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 963-967.
Li Xin, Chen Honggen, Zuo Le, et al. Prediction of punching shear bearing capacity of reinforced concrete slab-column joints and analysis of influencing factors[J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 963-967.
- [38] Nhat-Duc H. Estimating punching shear capacity of steel fibre reinforced concrete slabs using sequential piecewise multiple linear regression and artificial neural network[J]. Measurement, 2019, 137: 58-70.
- [39] Feng D C, Wang W J, Mangalathu S, et al. Implementing ensemble learning methods to predict the shear strength of RC deep beams with/without web reinforcements[J]. Engineering Structures, 2021, 235: DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.111979.
- [40] Duy-Thang V, Nhat-Duc H. Punching shear capacity estimation of FRP-reinforced concrete slabs using a hybrid machine learning approach[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016, 12(9): 1153-1161.
- [41] 韩小雷, 冯润平, 季静, 等. 基于深度学习的 RC 梁集中塑性铰模型参数研究[J]. 工程力学, 2021, 38(11): 160-169.
Han Xiaolei, Feng Runping, Ji Jing, et al. Research on parameters of the RC beam lumped plastic hinge model based on deep learning[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(11): 160-169.
- [42] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [43] Konstantinos M, Konstantinos K. Seismic parameters' combinations for the optimum prediction of the damage state of R/C buildings using neural networks[J]. Advances in Engineering Software, 2017, 106: 1-16.
- [44] Hwang S H, Mangalathu S, Shin J, et al. Machine learning-based approaches for seismic demand and collapse of ductile reinforced concrete building frames[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 5: 101905.
- [45] Abdulelah A, Alwanas H, Al-Musawi A A, et al. Load-carrying capacity and mode failure simulation of beam-column joint connection: application of self-tuning machine learning model[J]. Engineering Structures, 2019, 194: 220-229.
- [46] Jong-Su J, Abdollah S, Reginald D. Statistical models for shear strength of RC beam-column joints using machine-learning techniques[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(14): 2075-2095.
- [47] 何浩祥, 王文涛, 吴山. 基于均匀变形和混合智能算法的框架结构抗震优化设计[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4): 113-121.
He Haoxiang, Wang Wentao, Wu Shan. Aseismic optimization design of a frame structure based on uniform deformation and a hybrid intelligent algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(4): 113-121.
- [48] 周智超, 苏义坤. 高速公路智能建造技术领域综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13): 5106-5115.
Zhou Zhichao, Su Yikun. A review of the field of intelligent highway construction technology[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(13): 5106-5115.
- [49] 刘聪, 逯跃锋, 闻俏, 等. 基于数据互操作的建筑信息模型转换与融合方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6515-6521.

- Liu Cong, Lu Yaofeng, Wen Qiao, et al. Building information modeling transformation and fusion method based on data interoperability[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(16): 6515-6521.
- [50] 杨瑞宇. CAD 二次开发及其在铁路信号施工图设计中的应用[J]. 铁道标准设计, 2012(2): 115-117.
- Yang Ruiyu. CAD secondary development and application for design of shop drawing on railway signal[J]. Railway Standard Design, 2012(2): 115-117.
- [51] 徐贤德. Auto CAD 二次开发在铁路桥墩设计中的应用[J]. 铁道工程学报, 2014(2): 56-60.
- Xu Xiande. Application of Auto CAD secondary development in railway bridge pier design[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(2): 56-60.
- [52] 邹贻权, 余有, 董道德, 等. 面向制造与装配的设计的装配式竖向预制混凝土构件参数化设计与应用[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(13): 5480-5490.
- Zou Yiquan, Yu You, Dong Daode, et al. Parametric design and application of prefabricated vertical precast concrete components for manufacturing and assembly design[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(13): 5480-5490.
- [53] 严旭. BIM 技术在某钢结构厂房全过程设计中的应用[J]. 结构工程师, 2020, 36(5): 186-196.
- Yan Xu. Application of BIM technology in the whole process design of a steel structure workshop[J]. Structural Engineers, 2020, 36(5): 186-196.
- [54] 王艳彤, 苏义坤, 苏伟胜, 等. 高速公路建设进度智慧化管理效果评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(30): 13071-13077.
- Wang Yantong, Su Yikun, Su Weisheng, et al. Evaluation of the effect of intelligent management of highway construction progress[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(30): 13071-13077.
- [55] 陈远, 张雨, 康虹. 基于知识管理的 BIM 模型建筑设计合规性自动检查系统研究[J]. 图学学报, 2020, 41(3): 490-499.
- Chen Yuan, Zhang Yu, Kang Hong. Research on knowledge-based BIM for automated compliance checking system in architectural design[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(3): 490-499.
- [56] 张吉松, 赵丽华, 崔英辉, 等. 基于 BIM 模型的结构设计审查方法研究[J]. 图学学报, 2021, 42(1): 133-140.
- Zhang Jisong, Zhao Lihua, Cui Yinghui, et al. Code compliance checking of structural design based on BIM model[J]. Journal of Graphics, 2021, 42(1): 133-140.
- [57] 刘照球, 张吉. 结构分析 BIM 模型框架和数据转换应用[J]. 工业建筑, 2015, 45(2): 178-183.
- Liu Zhaoqi, Zhang Ji. BIM-based structural analysis model and data conversion application[J]. Industrial Construction, 2015, 45(2): 178-183.
- [58] Sampaio A Z, Paulo S, Augusto M G, et al. BIM methodology in structural design: a practical case of collaboration, coordination, and integration[J]. Buildings, 2022, 13(1): <https://doi.org/10.3390/buildings13010031>.
- [59] 赖华辉, 侯铁, 钟祖良, 等. BIM 数据标准 IFC 发展分析[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(1): 126-133.
- Lai Huahui, Hou Tie, Zhong Zuliang, et al. Analysis of the development of the BIM data standard IFC[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37(1): 126-133.
- [60] 李红豫, 李恒, 张璐, 等. BIM 模型与结构分析平台的信息转换关键技术研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 649-653.
- Li Hongyu, Li Heng, Zhang Lu, et al. Key techniques in model transformation between BIM and structural analysis platform[J]. Building Structure, 2020, 50(S1): 649-653.
- [61] 李志文, 王春光, 张优优, 等. 基于 Revit 的结构施工图 BIM 平法表达[J]. 建筑结构, 2016, 46(S2): 609-613.
- Li Zhiwen, Wang Chunguang, Zhang Youyou, et al. BIM expression of plane method in structural construction drawing based on Revit[J]. Building Structure, 2016, 46(S2): 609-613.