

人工智能在土木工程领域的前沿应用

■ 郑则群 徐武兴

随着全球基础设施建设的快速发展，土木工程面临着越来越复杂的挑战，如项目规模增大、设计要求复杂化、施工环境多变等。传统的土木工程方法在应对这些挑战时往往效率较低，且难以满足现代工程对精度、速度和可持续发展的需求。在此背景下，人工智能（AI）技术的迅速崛起为土木工程领域提供了前所未有的机遇。

人工智能通过其强大的数据处理和自主学习能力，能够在规划、设计、施工及维护等多个环节显著提升效率和精度。特别是深度学习、机器学习、计算机视觉、无人机、3D 打印、BIM（建筑信息模型）、虚拟现实（VR）和增强现实（AR）等技术的应用，逐步实现了从传统人工操作到自动化、智能化的转变。这些技术不仅能够优化资源配置、提高工程质量，还能增强建筑物的耐久性和安全性，有效应对自然灾害等突发事件。

本文旨在探索人工智能在土木工程中的应用前景，系统阐述 AI 技术在城市规划、结构设计、施工建造、维护管理以及灾害防控等方面的创新应用，揭示其给土木工程领域带来的深远影响。

一、智能规划

随着我国基础建设的规模不断增长，消耗的资金和能源也不断增加，在基础建设的过程中由于规划不合理等问题，进一步加剧了能源的消耗，并且引发了一些环保问题。为了优化施工流程，国内外诸多学者都对智能规划建设这一方面做了大量的研究。李华在优化城市施工过程中，针对以往的遗传算法迭代次数较多、迭代结果不理想等问题，提出一种基于改进快速非支配方法遗传算法 INSGA2 的城市绿色施工智能规划模型，此模型只需 60 次左右迭代，即可达到最优状态，能够在保证质量和环保的情况下，进一步压缩工期节约时间成本。常拥在优化市政排水管网的研究中，提出了一种基于改进遗传算法的市政排水管道路径智能规划与优化布局方案，此方案能够根据路网与河网、地形高程等信息自动计算出最优的管道布局和管径，此方案生成的排水系统在满足实际需求的前提下大大降低了投资成本和维护成本，提高了规划的准确性和可靠性。

二、智能设计

生成式人工智能在工程设计中的应用，正在逐步成为推动创新设计流程的核心力量。在这一领域，生成式 AI 的引入标志着设计过程从传统的被动响应向主动创造的转变。它能够自动生成设计方案并优化参数配置，从而在严格的工程要求下提高设计效率和创新性。随着技术的不断发展，生成式模型在电气工程、建筑设计以及复杂系统设计等领域得到了越来越广泛的应用。它通过自动化简化了以往繁琐的流程，减轻了设计师的工作负担，并提升了设计的智能化和个性化水平。生成式人工智能的应用正在深刻改变行业格局，不仅提高了设计的效率和质量，还推动了创新思维的产生。未来，工程设计将更加依赖智能系统的辅助，带来更加高效和富有创造性的解决方案。特别是在建筑领域，随着这一技术的广泛应用，越来越多的学者对其展开了深入研究。李刚提出了一种基于生成式人工智能的某高层建筑设计方法，此方法通过 Pix2Pix 算法可以实现将黑白图片转化为彩色图片，将草图转化为真实照片，通过此方法设计的高层建筑结构具有一定创新性。

三、智能建造

在智能建造领域，与人工智能相关的技术主要包括：3D 打印、建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）等。

1. 3D 打印技术

3D 打印又称增材制造技术（Additive Manufacturing Technologies, AM），是一种依据三维 CAD 数据通过逐层材料累加的方法制造实体零件的技术。3D 打印技术的核心理念是根据数字模型将物体快速制造成型，但 3D 打印混凝土还存在着诸多问题。

（1）材料性能不稳定。3D 打印混凝土必须具有适合的流变性能，既要能够顺利通过打印喷头，又要在打印后保持形状，避免坍塌。这对混凝土的流动性和早期固化速度提出了很高的要求。传统混凝土在打印过程中可能会出现分层、未充分结合等问题，影响整体结构的强度。此外，打印过程中没有模板支撑，要求混凝土快速凝固，以避免坍塌或变形，但这可能导

致强度不均匀。

(2) 大规模打印的精度和尺寸控制问题。由于3D打印混凝土是分层构建的,层与层之间的粘结性能可能不如传统浇筑混凝土。如果层间结合不紧密,会削弱结构的整体强度,产生薄弱点。并且随着打印尺寸的增加,控制打印头的精度和稳定性变得更加困难,尤其是对于高层或大规模结构。此外,大型结构的打印时间长,可能导致早期的层与后续的层之间出现收缩或变形差异。

(3) 混凝土配方与传统建筑材料的不兼容性。传统钢筋的使用问题:传统建筑中使用钢筋来增强混凝土的抗拉强度,但在3D打印过程中,如何在不影响打印连续性的前提下加入钢筋仍然是一个技术难题。目前,研究者正尝试使用其他材料或方法(如纤维增强材料)来替代钢筋,但效果和 application 范围有限。与传统混凝土相比,3D打印混凝土的配方需要特别设计,以适应打印工艺的需求(如快速凝固、良好的可挤出性等)。然而,找到既能满足这些要求,又能确保结构性能和耐久性的配方仍然具有挑战性。

2. BIM 技术

建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM),由美国佐治亚理工大学 Eastman 教授于1975年提出。应用BIM技术,可以有效提高建造效率。中国第一高楼上海中心就应用了BIM技术,其中上海中心的工程实践证明:应用BIM技术,可以排除90%图纸错误,减少60%返工,缩短10%施工工期,提高项目效益。

四、智能养维护

在工业智能化时代,人工智能可为各行各业赋予新的能量,为行业注入新鲜血液,促进行业的积极发

展。人工智能(Artificial Intelligence, AI)是较为宽泛的一个概念,其中最重要的分支就是机器学习(Machine Learning, ML),机器学习的算法多种多样,主要包括分类、回归、聚类、降维等;而机器学习最核心的部分即是神经网络(Neural Network, NN),神经网络中的隐藏层如果足够深,就可以称之为深层神经网络,即深度学习(Deep Learning, DL);深度学习包含深度神经网络(Deep Neural Networks, DNN)、卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)、循环神经网络(RNN)等。在土木工程领域,目前应用较为广泛的是深度神经网络和卷积神经网络。

计算机视觉:

1. 螺栓松动检测

螺栓连接是土木工程结构中常见的连接方式,但螺栓松动是导致结构失效的主要因素之一,尤其在桥梁、塔架等结构中。因此,螺栓松动的早期检测对于确保结构的安全性至关重要。然而,传统的检测方法通常依赖于人工检查或传感器检测,存在效率低、成本高等问题。Cheng Yuan 等采用了 Mask R-CNN 和区域卷积神经网络(R-CNN),来实现对螺栓的自动检测和定位。具体方法包括:

(1) Mask R-CNN:用于生成螺栓的分割掩模,以便在图像中精确定位螺栓。

(2) 区域卷积神经网络(R-CNN):用于区域提议和目标检测,能够对螺栓松动与否进行分类。

此研究总共收集了300张原始图像,并且使用700张图像数据来训练、验证和测试准备数据集,经过训练后,本模型的检测率为0.94,说明训练后的模型成功检测了不同拍摄角度下螺栓的松动和拧紧,文章进行了多组实验验证其方法的有效性,该方法在检测精度和速度上都有良好表现,尤其是在接近实时的检测

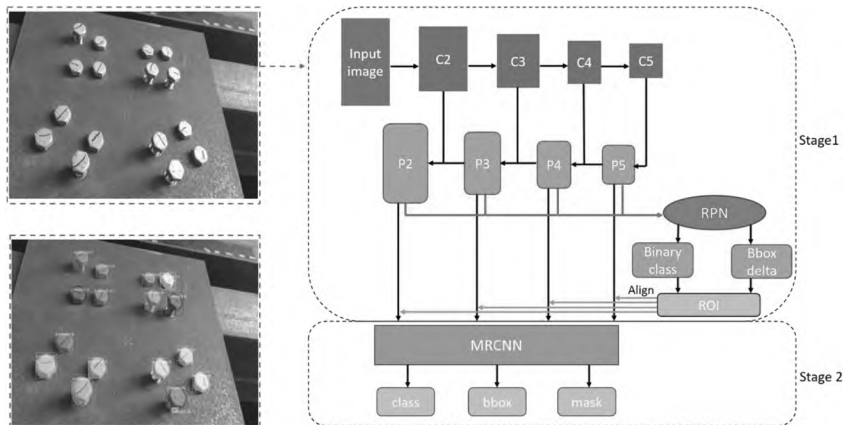


图1 Mask-RCNN流程图

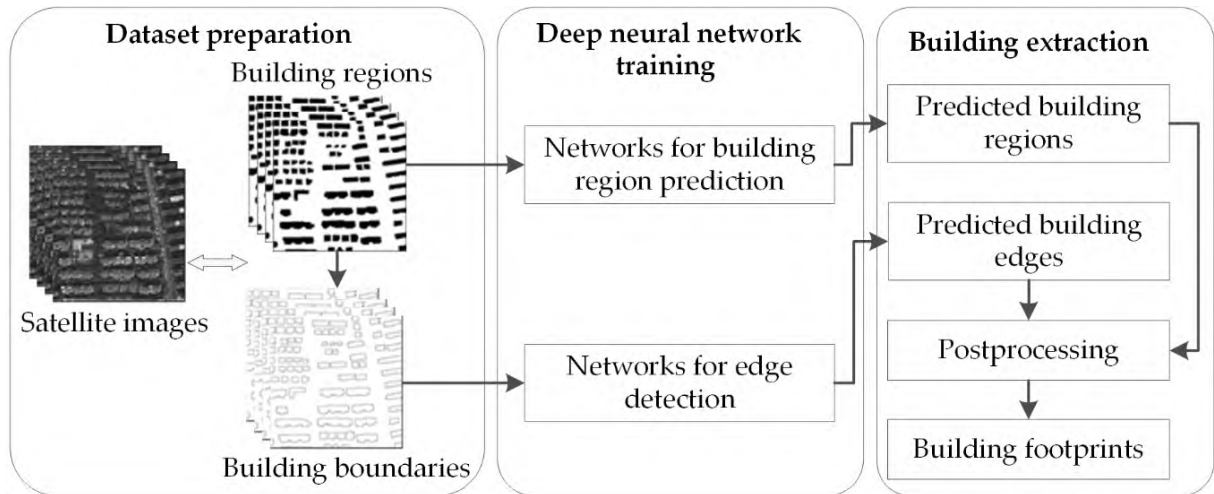


图2 建筑物检测框架概述

需求下，能够快速、准确地识别螺栓松动，如图 1。

2. 结构表面典型损伤检测

基于人工智能（AI）的土木工程结构表面典型损伤检测已经成为当前研究的热点之一。随着深度学习、计算机视觉和图像处理技术的快速发展，AI 技术为土木工程结构健康监测（SHM）提供了更高效、准确和自动化的解决方案。Ruoxin Li 等，提出了一种完全基于视觉的深度学习模型，用于同时检测混凝土表面的缺陷并进行地理定位。此研究的重点是解决当前混凝土缺陷检测方法中的几个问题：现有方法多只关注单一类型的缺陷检测，且检测环境过于理想化，而真实场景中常常出现多种缺陷。此外，传统方法依赖 GPS 进行定位，但在 GPS 信号被遮挡的地方，定位不准确且增加了维修成本。为解决这些问题，文章提出了一个深度卷积神经网络（CNN），通过网络同时检测并分类混凝土缺陷，并进行地理定位，且不依赖外部定位传感器。此研究提出一种多尺度缺陷区域提议网络（MSDRPN），能够在多层次上生成检测区域，提高了对不同尺度缺陷的检测准确率。

通过引入数据增强、不同尺度的训练方法，以及“困难样本挖掘”策略，进一步提高了检测精度，尤其是对小缺陷的检测效果显著。结合 NetVLAD 模块进行图像的地理定位，并改进了三元组损失函数，从而增强了网络的定位精度。通过迁移学习和共享知识，将缺陷检测和定位网络统一在一个模型中，有效降低了内存和计算成本。实验结果表明，该方法检测准确率达到 80.7%，定位准确率为 86%，且检测速度为每张图像 0.41s。

3. 基于卫星影像的结构灾后整体损伤检测

建筑物提取在城市规划、建筑损伤制图等多个领域

有重要应用。传统的建筑物提取方法依赖人工或机器学习算法，效率较低且难以适应不同地区的复杂背景。因此，Haiping Yang 等，转向深度学习模型，希望通过自动化方法提升建筑物提取的精度。此研究提出了一种结合区域和边界的后处理方法，先通过 DCNN 分别预测建筑物的区域和边界，再通过后处理步骤将二者结合，生成完整的建筑轮廓。在此研究中作者利用包含杭州西湖区的高分辨率卫星图像的 XIHU 建筑数据集进行试验，结果表明，结合区域和边界的后处理方法在建筑物提取任务中的表现优于单独使用 DeepLab 或 Mask R-CNN 等模型。在 XIHU 数据集上，结合 DeepLab 和 BDCN 的 F1 分数达到 83.14%，交并比（IoU）为 71.14%。该研究有效提高了建筑物提取的完整性，尤其对复杂形状的建筑物表现优异，如图 2。

五、结论

随着人工智能技术的不断发展，未来土木工程将在数据驱动决策、实时监测和预测维护等方面取得更大突破。这不仅将提高工程项目的安全性和经济性，还有助于推动可持续发展目标的实现。然而，要充分发挥人工智能在土木工程中的潜力，仍需解决数据获取、标准化和伦理等挑战。总体而言，人工智能为土木工程领域的未来发展提供了广阔的前景，促使该领域向更加高效、智能和环保的方向迈进。随着技术的进步和应用的深入，人工智能将在土木工程中发挥越来越重要的作用。

（作者单位：福州大学土木工程学院）