

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2025.04.017

欢迎按以下格式引用:孙晓燕,王海龙,杨英楠.智能建造背景下结构设计原理教学创新与实践——以浙江大学为例[J].高等建筑教育,2025,34(4):159-166.

# 智能建造背景下结构设计原理 教学创新与实践 ——以浙江大学为例

孙晓燕,王海龙,杨英楠

(浙江大学建筑工程学院,浙江杭州 310058)

**摘要:**随着传统建造技术与现代信息科学的逐渐融合,建筑业正逐步向可视化、工业化和信息化的智能建造转型。开展新工科专业建设和教育教学改革已成为高等学校的重要发展方向。土木工程传统专业课程结构设计原理的现有教学方式单一,空间结构解析平面化,结构解析过程数字化、信息化、智能化程度不足,信息及软件资源利用不充分。在系统分析工程建造技术发展历程及智能建造技术主要发展趋势的基础上,以浙江大学为例,结合新工科专业建设的技术标准,从课程设置、教学方法、教学平台和案例分析等角度,提出结构设计原理课程的教学新模式,探索智能建造专业的创新教育路径,以期为高校智能建造专业建设提供参考和借鉴。

**关键词:**智能建造;结构设计;课程体系;案例分析;教学改革

**中图分类号:**G642;**TU-4**      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2909(2025)04-0159-08

智能建造<sup>[1]</sup>专业是面向国家战略需求和建筑业升级转型,以土木工程专业为基础,融合计算机应用技术、机械自动化、工程管理等专业发展而成的新工科专业,代表了国家“互联网+建筑业”的前沿发展<sup>[2]</sup>。截至2022年全国已有69所高校开设智能建造专业,但课程体系设置及教学框架依然是传统土木学科模式。2017年2月,教育部<sup>[3]</sup>明确提出了新工科的建设要求,强调学科的新兴拓展、新型升级与新生交叉,尤其注重智能化、数字化、物网化等新技术与传统工业技术的紧密结合。

在新工科及智能建造专业发展双重驱动下,高等工程教育必须改革高校专业人才培养模式,将最新的行业发展成果及工程实践应用于工程教育教学,与现有教学体系进行融合创新,注重内涵建设与质量提升,培养具有信息化素养、创新实践精神、综合管理能力的现代新型工科人才。

---

修回日期:2022-12-09

基金项目:国家自然科学基金(52279141);中国高等教育学会新工科专项教育基金(JG2022101);中央高校基本科研专项(SZ-TD016)

作者简介:孙晓燕(1976—),女,浙江大学建筑工程学院副教授,博士,主要从事增材智能建造砼结构研究,(E-mail)selina@zju.edu.cn;  
(通信作者)王海龙(1974—),男,浙江大学建筑工程学院教授,博士,主要从事智能建造与运维管理研究,(E-mail)hlwang@zju.edu.cn。

结构设计原理是土木工程专业的主干课程,教学内容涵盖钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、砌体结构、钢结构和钢-混凝土组合结构五种现代建筑结构设计的基本原理。课程不仅要促使学生明确现代结构的技术发展,掌握专业结构计算知识的基本目标,还要积极融合智能建造的发展趋势,培养学生基于最新数字设计、增材建造技术信息,独立开展空间结构设计分析的能力,提高学生对工程科学发展的适应能力,为其专业发展和建造实践打下良好基础。课程改革充满了必要性和迫切性。

## 一、工程结构建造发展过程及其趋势分析

### (一) 现代建筑工业建造技术发展过程

随着工业技术的进步和计算机科学的发展,材料制造发展经历了等材制造、减材制造、增材制造三个阶段。其中增材制造<sup>[4]</sup>(Additive Manufacturing, AM)技术是伴随着第三次工业革命浪潮发展起来的新型材料制造技术,采用逐渐累加的方法制造实体,相对于传统的材料去除-切削加工技术,是一种“自下而上、积少成多”的制造方法,被誉为“第三次工业革命最具标志性的生产工具”。作为数字化智能建造技术,3D打印凭借其机械化程度高、节约材料、提高生产效率等优势,迅速成为一种全新制造方式,在航空航天、生物医疗、轨道交通、智能建造等战略领域均展示出巨大的技术优势和广阔的应用前景,也推动土木工程基础设施智能建造成为国家重要战略方向。积极规划和探索智慧基础设施、智能建造等,推动绿色化建造的发展,不仅可以解决目前土木工程行业面临的劳动力不足、机械程度低、模板支护费工费时等一系列困境和难题,还可以为现代工业化建造和建设工程艺术化建造提供有力的支撑。3D打印技术主要经历了三个发展阶段<sup>[5]</sup>,基本上每十年实现一个质的飞跃。

第一个阶段是20世纪80年代后期至20世纪90年代初期,第一台商用3D打印机问世,打印技术处于初级阶段,只能使用塑料类材料,打印速度、精度和质量水平有限,仅适用于制造小型构件。因此,当时3D打印技术多出现在艺术、工业设计、服装、建筑等领域,被用于制作设计原型或概念模型。和传统工艺相比,3D打印的原型制作速度快,设计变更成本较低,设计师可以更轻松地测试不同的产品版本,根据客户反馈及时修改方案,缩短设计时间。

第二个阶段是20世纪90年代后半期,塑料不再是3D打印的唯一原材料,新型打印机的出现使金属合金和耐高温聚合物成为可选材料,大大丰富了3D打印原型制作的种类。更关键的是,3D打印可以制作金属模具,用于取代传统制造技术中所需的造价高昂、工艺复杂、耗时冗长的定制模具。3D打印技术不仅可以在几个小时内完成之前数周的模具制造量<sup>[6]</sup>,而且制作过程中的废料量较之传统工艺下降了40%,其中95%~98%的废料都可以回收利用。由此节约了大量的时间成本和材料成本。

21世纪开始,3D打印技术迈入了第三个阶段。随着材料和设备的不断改进,3D打印的成本逐渐降低,其速度、质量、精度和材料特性显著提升,达到了可以直接制作成品的水平。3D打印不再是制造技术中的一个配角,而是有能力参与整个生产环节,实现全数字化的生产过程。资料表明<sup>[6]</sup>:2008—2021年3D打印产业规模年平均增长率高达21.1%,其中2021年3D打印市场规模高达152.44亿美元。现今的3D打印技术不再局限于实验室和工厂,在人们日常生活中的普及度越来越高,商店、教室等场所都可以看到3D打印机的身影。未来这项技术必将完成从商用到民用的转型,实现3D打印的家庭制造模式。随着增材建造技术用于建筑工程等工业化领域,人类工业制造经历了5个阶段:机械化、电气化、自动化、智能化、智慧化<sup>[7]</sup>,即从工业1.0到工业5.0。

## (二) 智能建造技术及发展趋势

随着混凝土增材建造技术和设备的不断发展,现阶段已经能够实现中小型民用建筑结构的智能建造。虽然D-shape工艺具有更丰富的空间造型能力,但需要循环处理砂石废料,容易造成材料和工时的浪费。轮廓工艺免模施工,工序简便,便于形成数字设计智能建造一体化管理系统,日益成为混凝土增材建造结构主流技术。中国工程建设标准T/CECS 786-2020《混凝土3D打印技术规程》于2021年5月正式施行。增材智能建造混凝土结构建造技术集数字建模、新型建筑材料设计加工、智能机器人和机-电一体化装备集成管理于一体,是一种按既定设计和建设目标构建预期建(构)筑物的自动化建造技术。

现有增材混凝土建造硬件系统包括控制主机、打印设备、搅拌设备、泵送设备和动力驱动设备。通过控制主机发送操作命令给搅拌设备,进行混凝土备料并泵送至打印设备,再通过信号转换将命令发送给所属的控制电机。打印硬件控制系统通过参数设置,实现打印头三维方向位置调节、打印行走速度控制、打印设备移动控制。通过预设路径和具体参数,可以打印不同尺寸、大小和高度的构件。现有增材混凝土建造软件系统包括数字模型输入、切片设计、打印定位、路径输入、参数设定、路径优化、图形显示、后台监测等功能。用户可以使用系统包含的绘图软件进行设计,并导入打印软件完成打印。该系统也支持导入通用商业3D建模软件的数字模型。打印软件系统支持断点打印,可以在打印过程中随时暂停,便于解决打印过程中的突发状况(如材料准备不足),满足现场施工管理和布筋建造需求。同时,打印系统可以根据设定的打印流程进行打印头运动轨迹动画模拟,辅助开展打印工艺优化和智能建造管理。现有增材混凝土建造的软、硬件系统,如图1所示。

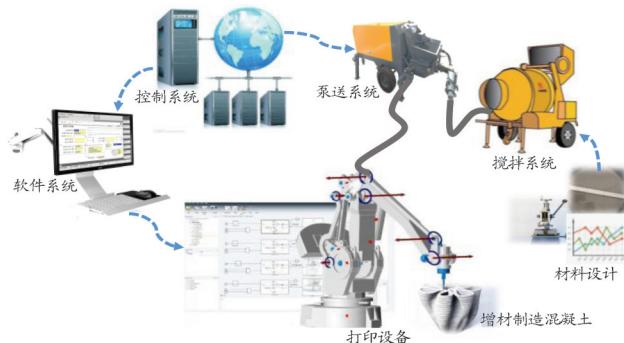


图1 增材混凝土建造软、硬件系统

智能建造以数字模型文件为基础<sup>[7-8]</sup>,通过软件与数控系统,将专用材料按照挤压、烧结、熔融、光固化、喷射等方式逐层堆积<sup>[9]</sup>,完成产品的制造。智能建造深度融合了信息技术和建造技术,是现代工程领域的新兴发展方向,如图2所示。智能建造也是工程建造的高级阶段,其基于大数据进行数字设计、增材智能建造和结构智能管理维护,推动了建筑结构智能建造维管模式的根本性变革。

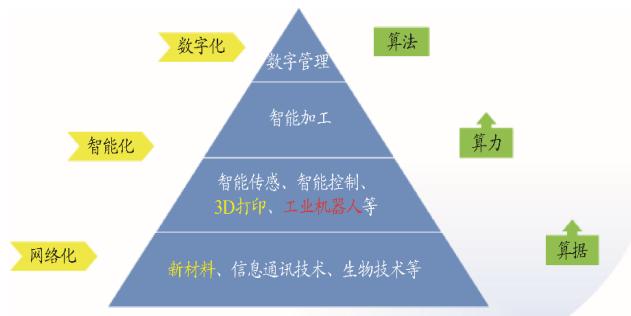


图2 智能建造学科与技术体系

## 二、从平面到空间转换探索结构设计原理教学改革

### (一) 结构设计原理课程的特点及难点

为了适应国家经济社会发展的需求,培养具有扎实的自然科学、人文科学知识基础,具备工程建设与规划、结构设计、建造管理与控制等方面知识<sup>[10-11]</sup>及相关研究、开发能力的高级工程技术人才<sup>[12]</sup>,结构设计原理的授课内容包括材料性能、设计方法、各类构件的力学分析及设计方法。进入课程学习的本科生,已经掌握了弹性力学、材料力学、结构力学的基本知识和相关专业技能,受到了工程制图、工程测量、结构计算、规划与综合分析等方面的基本训练,如图3所示。



图3 土木工程学科结构设计课程设置框架及主要教学内容

#### 1. 内容繁杂

结构设计原理课程包含多种型式结构的设计原理,主要讲解材料性能、结构设计基本原则。该课程的钢结构稳定性理论部分,内容繁杂难懂,学生难以理解整体稳定和局部稳定的区别及含义。此外,如果教师未能抓住教学主线,掌握合适的教学方法,就易造成学生难以深入理解不同类型结构构件截面的应力、应变概念,从而在分析不同结构设计时存在困难。

#### 2. 公式晦涩

在学习钢筋混凝土部分时,需要考虑材料的弹塑性,其受弯、受剪、受扭及受压承载力公式基于较多假设及实验数据,这对于学生而言较为复杂且抽象。同时,结构构件设计最终需要结合弯、剪、扭空间组合受力开展计算,仅仅在简化和假设的基础上进行公式讲解,不利于理解和掌握结构设计空间力学原理。

#### 3. 实践性较强

结构设计原理课程最大的特点是课程理论需与工程结构设计实践相结合。通过课程设计,将课程理论学习与结构空间建模及演示软件操作相融合,能够最大程度地加深学生对设计理论的理解,提升其学习获得感。

因此,现阶段亟待面向新工科建设深入开展土木工程结构设计原理课程的教学改革,加强教学过程中的创新与实践,提升现代教学的数字化、智能化水平,帮助学生理解多种结构设计之间的共性和关键技术原理,掌握空间结构基本受力分析流程,灵活运用设计计算公式,最终实现学以致用,成长为应用型工程设计人才。

### (二) 现有传统平面教学模式的总结与反思

空间弹性体的力学分析是结构设计原理的基础内容,如图4所示。三维微元体力学解析共有15个变量,需满足3个平衡方程、6个本构关系、6个几何方程,以及6个不完全独立的应变协调方程,可以通过“平衡+本构+几何或者平衡+本构+协调”构成弹性问题的基本方程组,转换成微分方程在某些边界条件下进行求解。

在人工进行力学计算和分析的时代,通过设定平面应力与平面应变问题进行空间简化,成为工程力学等课程的学习难点。在计算机数值仿真分析算法成为空间结构分析的主流技术之后,空间结构的精确分析从人工手算进入计算机电算的时代,结构设计开始针对大跨度、高耸、空间结构开展精准有效空间数值模拟分析计算。然而,根植于经典力学理论和方法的结构设计原理教学,还是以平面应力和平面应变的简化分析理论作为教学设计的基本依据,难以适应智能建造的发展趋势。

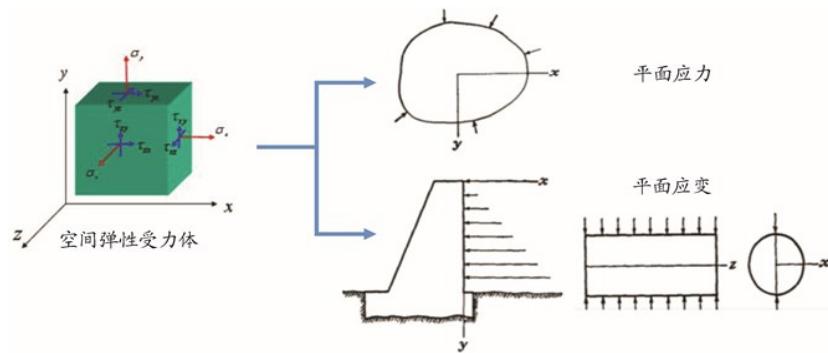


图4 空间力学问题的平面解析

现有的结构设计原理,基于材料科学和工程结构开展教学,其课程设计、计算分析和图纸构造,均建立在2D思维框架中,与实际的3D结构建造产品存在较大的维度差异,如图5所示。平面的原理设计和分析模式,难以满足数字时代的空间结构设计需求,也无法与计算机信息技术相融合,发展成为新型智能结构设计体系。如何在智能建造的时代发展背景下,从现有的2D结构设计原理教学中,基于对空间力学问题和现代材料性能解析,开展智能空间结构设计原理教学,是当前建筑工程学科面临的巨大挑战。

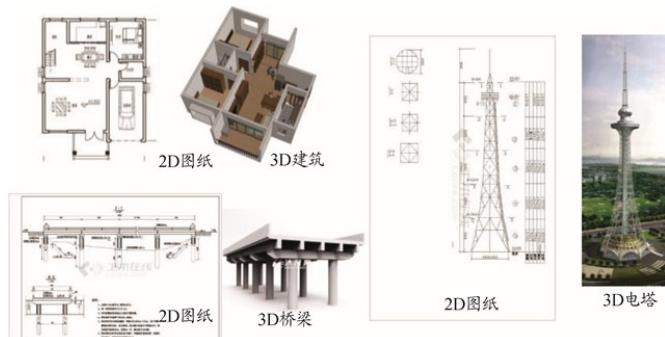


图5 空间结构的平面设计分析

### (三) 智能建造和数字技术发展下的教学改革设计

当前,计算辅助设计和有限元数值模拟已经成为结构设计原理的教学基础。利用计算机空间辅助分析将课程设计与教学工作相结合,有助于形成整体性良好的课程理论体系。将数值模拟与空间模型的动画演示相结合,有利于学生理解晦涩理论和复杂公式。此外,将设计基本理论与课程设计实际结构的整体体验算相结合,是集中深入的理论与实践融合教育。

在智能建造背景下开展结构设计原理的教学改革时,首先,在例题讲授过程中需要突出空间问题在结构设计中的必要性和显著性,结合工程结构设计要点和基本原理计算,利用新型三维数字模型软件开展仿真动态演示和空间结构优化设计。对于桥梁结构专业的学生,某些桥梁的空间稳定问题和组合受力问题均具有显著的空间结构分析特征,可作为日常例题、思考题。

其次,课程设计的题目和选择需要考虑工程智能建造技术和空间受力特征,既要确保有助于学生掌握课程体系中的关键技术,又要保障课程设计与工程实际的相似性,具有一定的应用借鉴价值。例如,对于结构工程专业的学生,可设置空间钢结构的稳定性分析和高耸结构的抗风设计问题。教师结合课程设计和智能建造技术的进行讲解,并依托实际工程案例,帮助学生深入理解空间设计要点,切实掌握智能建造结构的设计方法。

最后,在智能建造背景下,任何一种传统结构的设计原理都会随着建造技术的革新而进行设计方法的改进。在课程教学过程中,需要结合智能建造技术最新发展,对传统结构教学进行升级和更新。例如,传统砌体结构采用人工砌筑的方式建造,然而随着智能建造机器人的发明和应用,现代砌体结构在砌筑质量、结构验算和失效模式分析方面均得到了较大改善,需要结合新型砌体材料、建造工艺进行详细的对比分析和原理教学,以提升结构设计原理教学的工程适用性。

### 三、案例分析

面向新工科建设与智能建造双重驱动下的工程专业人才的市场需求,明晰结构工程专业创新型人才培养模式的构成要素,依托浙江大学新工科教育基金项目,主要从重塑专业空间结构设计理念、重构专业课程体系、强化创新教育、增强理论联系实际等方面进行教学改革。通过提炼建筑材料、建筑力学、建筑结构中共有的知识点,整合多种教学资源,按照“总体规划→结构模块→知识要点→拼装组合”的思路,开展从2D到3D的结构设计原理教学改革。

#### (一) 典型教学案例与教学效果

在结构设计原理教学中,抓住结构空间稳定性验算这个结构设计的关键技术要点,结合江苏无锡312国道独柱箱梁桥倾覆的工程案例,利用数值仿真开展重载车辆空间布置,进行动态倾覆模拟分析,如图6所示,并针对该特定桥型结构空间尺寸信息和重载车辆交通统计资料开展多工况空间布置的结构受力验算、稳定性验算。结合教学和微课视频,分析空间布载位置的变化与安全性关联机制,给出该类空间结构的失效预警设计理论基础。学生在课程学习的过程中结合工程实况开展结构计算,形成了空间结构设计及运维管理理念,取得了良好的教学效果。通过课程案例的空间解析和数字演示,激发了学生的深入学习兴趣。结合该课程案例,学生小组独立完成了桥梁结构抗倾覆分析设计,分析了各种空间超载重车车队在不同车道布置下对桥梁支座拓空和倾覆风险的影响,并利用计算机建模方法建立了数字模型,分析流程如图7所示。该方法可结合工程实践分析桥梁失效风险,实现交通基础设施的安全预警,立项省级大学生SRTP项目1项,表明教学改革有助于学生深刻掌握结构设计原理,灵活利用设计理论开展智能工程管理。

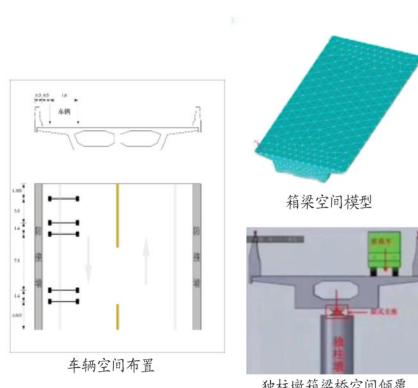


图6 空间结构倾覆数值模拟演示

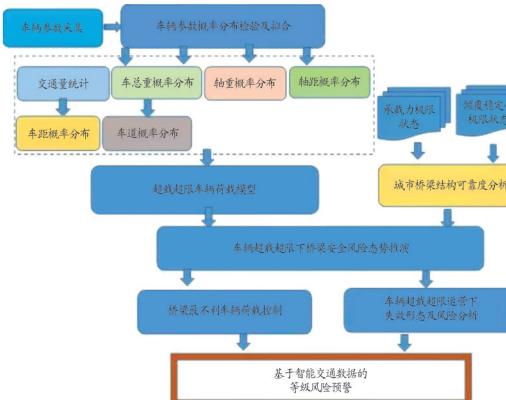


图7 基于案例教学的项目技术流程

## (二) 课程设计题目与智能建造教学案例

在课程设计环节中,以浙江大学紫金港校区东、西教学区湖上交通人行景观桥作为设计题目,针对小型拱桥空间体型优化展开设计流程的讲解,分析现有结构设计建造方法与数字设计、增材建造技术的对比,鼓励学生利用有限元数值仿真对比各设计结构体型的受力与变形,提出空间最优异型拱桥设计方案。学生基于结构基本原理建立的空间体型设计及安全验算流程如图8所示。

在优秀课程作业“腾飞桥”中,学生以生长中的藤树和类神经元树突的外观造型为灵感,设计了一座总长96.8米的异型刚架桥。该桥采用计算机拓扑优化技术生成桥梁雏形和完成结构外形的优化,省去了传统设计中多种桥梁方案的比选和手算工作。藤树根蔓缠绕,向上生长,寓意“团结协作,积极发展”;枝干的结合处类神经元树突造型,寓意“智慧与生命力”,传达“生命即创新”(creature is creative)的理念。在结构建造中采用增材智能建造3D打印和现浇装配相结合的施工技术,可以无模成型,增材自制,实现赋力与形,最大化利用材料,符合低碳环保的要求。学生结合结构设计原理课程毕业设计展开了空间异型桥梁结构的静力和动力分析,并积极修改课程设计作业,参加智能建造相关设计比赛。“腾飞桥”在全国混凝土3D打印设计大赛上,经过结构设计、实体打印、报告演示和答辩讲解环节,得到领域专家的一致认可,获得二等奖。该教学案例表明,在结构设计原理教学过程中,将现有的智能建造技术与传统的结构设计原理相融合,有助于学生清晰地掌握空间结构设计方法,形成创新型结构设计理念,具有良好的可行性和卓越的教学效果。

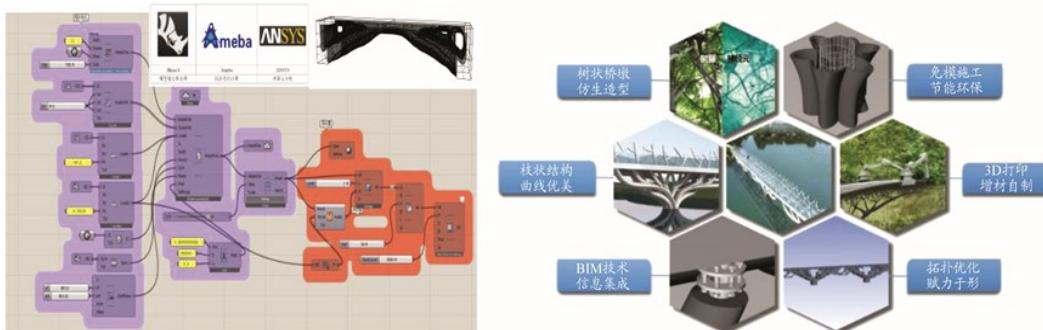


图8 桥梁结构空间拓扑优化

## 四、结语

建筑业从粗放式人工建造向数字化智能建造转型已经成为不可逆转的趋势,结构工程专业是偏应用型的专业,实践性也较强,必须根据时代要求进行教学改革。然而传统课堂教学模式均建立在平面力学分析方法与设计模式之上,难以适应智能建造3D化、数字化、工业化的发展形势。因此,本文从教学理念、课堂形式、组织方法、教学内容等方面对结构设计原理课程进行全方位的改革,构建全新的课堂教学体系,极大程度地提高结构工程专业学生的空间分析能力。经过积极探索,工程空间稳定性动态演示和混凝土拱桥的拓扑优化课程设计取得了良好的教学效果,表明传统建筑专业课程结构设计原理的教学可以与最新智能建造的技术融合,形成新工科专业教育教学模式。

### 参考文献:

- [1] 李琼林,袁冉,张东杰,等.面向智能建造专业的“土木工程实验教学”改革与探索:以路基压实质量检测为例[J].教育教学论坛,2023(34):51-55.
- [2] 刘梅,王培军,衣振华.智能建造多学科交叉融合人才培养模式研究[J].教育教学论坛,2023(41):1-4.

- [3] 丁烈云. 智能建造创新型工程科技人才培养的思考[J]. 高等工程教育研究, 2019(5):1-4, 29.
- [4] 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.
- [5] 周安亮, 王德成, 屈贤明. 基于历史发展的等材制造智能化趋势研究[J]. 机电产品开发与创新, 2018, 31(2):10-12.
- [6] 王梦颖, 张诚. 数字技术、产业关联与服务出口技术升级——基于3D打印技术的证据与解释[J]. 中国科技论坛, 2023(11):78-86.
- [7] 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.
- [8] 刘世平, 骆汉宾, 孙峻, 等. 关于智能建造本科专业实践教学方案设计的思考[J]. 高等工程教育研究, 2020(1):20-24.
- [9] 王子明, 刘玮. 3D打印技术及其在建筑领域的应用[J]. 混凝土世界, 2015(1):50-57.
- [10] 林健. 面向未来的中国新工科建设[J]. 清华大学教育研究, 2017, 38(2):26-35.
- [11] 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.
- [12] 赵继, 谢寅波. 新工科建设与工程教育创新[J]. 高等工程教育研究, 2017(5):13-17, 41.

## Teaching innovation and practice of structural design principle under the background of intelligent construction: taking Zhejiang University as an example

SUN Xiaoyan, WANG Hailong, YANG Yingnan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

**Abstract:** With the gradual integration of traditional construction and modern information technology, the construction industry is gradually transforming towards intelligent construction featuring visualization, industrialization, and informatization. It has become an important development direction of colleges and universities to carry out professional construction and teaching reform. The traditional structural design principle course has some problems, such as planarization of space structure, single teaching method, insufficient digitization, informatization, and intelligence in the structural analysis process, and inadequate utilization of information and software resources. This paper systematically analyzes the development process of intelligent construction technology. Taking Zhejiang University as an example, based on the technical standards of the construction of new engineering specialty, a new teaching scheme of structural design principle course is put forward from the perspective of curriculum system, teaching method, teaching platform and case analysis. A new educational path of intelligent construction specialty is explored, providing reference for the construction of intelligent construction specialty in other universities.

**Key words:** intelligent construction; structural design; curriculum system; case analysis; reform in education

(责任编辑 代小进)