doi:10. 11835/j. issn. 1005-2909. 2024. 01. 009

欢迎按以下格式引用:吴越,许伟舜,孟浩. 从链条到生态——浙江大学建筑学系的数字化课程体系改革[J]. 高等建筑教育,2024,33(1):67-75.

从链条到生态
——浙江大学建筑学系的数字化课程体系改革

吴　越[1],许伟舜[1],孟　浩[2]

(1.浙江大学 建筑工程学院,浙江 杭州　310058;2.上海大界机器人有限公司,上海　201900)

摘要:随着人工智能等新兴科技带来的挑战,数字建筑教学的系统性及其与传统设计教学的关联性日益凸显。浙大建筑学系自2021年起,实行了以数字建筑课程生态建设为核心的一流本科课程综合改革,主要针对数字建筑课程的递进式教学内容,并强调其对传统设计教育中理性思维的辅助及延伸作用,形成了纵向完整的课程链,并横向与核心设计课程产生有效关联,初具成效。在此背景下,文章总结并探讨了该课程体系建设的核心理念、内容结构框架及课程间的关联性。

关键词:数字建筑;计算性设计;数字建造;教学改革;课程体系

中图分类号:G642.3　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1005-2909(2024)01-0067-09

自1989年William Michell提出计算性建筑作为一种新设计范式和思维模型,30余年间,计算性设计和数字建造技术从工具到方法论的快速发展不断为建筑学学科提供新的议题,促进了建筑学从教学、科研到实践的数字化转型[1]。近年来,机器学习、生成式设计等人工智能应用的涌现和快速进步正在对建筑学学科提出新的挑战,并促使教育者对学科本体进行反思和扩充。

在此大背景下,本科阶段的数字建筑教学不但需要完成基础性、普惠性的认知和技能教学,也需要留有足够空间应对快速发展的前沿技术,其对教学体系而非单门课程的要求越来越高。与之相对,许多高校普遍基于制图和软件课程,改良形成数字建筑基础课,并通过设计课程进行专题化数字建筑教学,其课程结构带来的限制已经无法满足当下数字建筑教学的体系性需求。因此,从现状出发,针对课程体系改革及其方法开展讨论,是数字建筑教学需要解决的核心问题之一。

为应对数字建筑快速发展带来的教学挑战,浙江大学建筑学系于2021—2022年间执行了题为《数字化设计与建造综合课程体系建设》的校级一流本科综合改革项目。本次综合改革意图从课程生态出发,通过改造、增补、联动的方式,对具体课程的授课内容和授课形式进行调整,纵向整合数字建筑课程教学目标,横向联动专业设计、构造等传统课程教学内容,形成以建筑设计为核心价值的课程生态。

修回日期:2023-09-08

作者简介:吴越(1965—),男,浙江大学建筑工程学院求是特聘教授,浙江大学建筑与城市发展国际研究中心主任,主要从事战略规划、城市设计、建筑设计、机器人建造与智能设计等研究,(E-mail)ywu100@zju.edu.cn。

一、综合改革背景

与数字建筑教学在国际上的快速发展相对应，在国内，计算性设计和数字建造课程已经在大部分“老八校”和“新四校”中广泛实施，且大多初步形成了跨年级的课程设置[2]，并不乏通过寒暑期工作坊等，在课程安排上方便技术探索并产出高水平成果的灵活课程结构[3]。同时，随着线上课程的逐步发展，国内学生也能及时利用DigitalFUTURES等普惠性、全时段、跨地域的非营利学术平台，参与前沿课程，拓宽视野[4]。

虽然从学生的视角出发，数字建筑内容的可达性已经较为丰富，但从教学体系出发的系统性探讨在国内仍然处于快速迭代阶段。在许多高校，数字建筑课程仍存在基础知识和技能教学薄弱[5]、知识碎片化严重[2]、与传统建筑学教育衔接困难[6]等结构性问题。与此现象相伴的则是建筑学专业课程在旧课程结构及学分系统下的限制，造成新课开设难、课程生态建设难的情况。比如，根据项星玮等人的调研，许多高校虽已初步具备了跨年级开课条件，但76学时以下的课程大多集中于由计算机辅助设计或制图课程延伸而来的数字建筑基础课，学时不足的问题普遍存在。随着年级升高，许多高校依靠设计课专题推进数字建筑教育，不再专设数字建筑课程[7-9]。由于设计课专题选择的排他性，数字建筑教育可能存在与传统建筑设计教育割裂的情况。鉴于此，从课程体系的讨论和整合出发，建立数字建筑跨年级的知识和技能链条，并同时考虑与传统设计教育的结合十分必要。

此次改革之前，浙江大学建筑学系与大部分高校类似，主要基于现有课程进行改造及分年级增设选修课程，在二、三、四年级对数字建筑教学进行初探。浙大采用大类招生，在第一学年中期才确定专业，因此，建筑学系选择在二年级以软件基础教学必修课的形式设置计算机辅助设计课程，并在四年级专题化设计中开设建筑信息模型（BIM）专题化设计课程。2018年，随着人工智能与机器人建造实验室落成，在三、四年级增设参数化设计基础和数字设计与机器人建造选修课程，2020年起，在四年级开设基于建筑信息模型软件ArchiCAD内置编程语言的描述性设计专题化设计课。此外，建筑学系还利用浙江大学校级“全英文课程”资源，于2018—2019学年两次开设了与香港大学建筑学系合作的异形混凝土构件设计课程，与新加坡科技设计大学（SUTD）合作开设陶土3D打印课程——建筑机器人，初步积累了将计算性设计与传统建构体系结合的教学经验。改革前的原课程体系如图1所示。

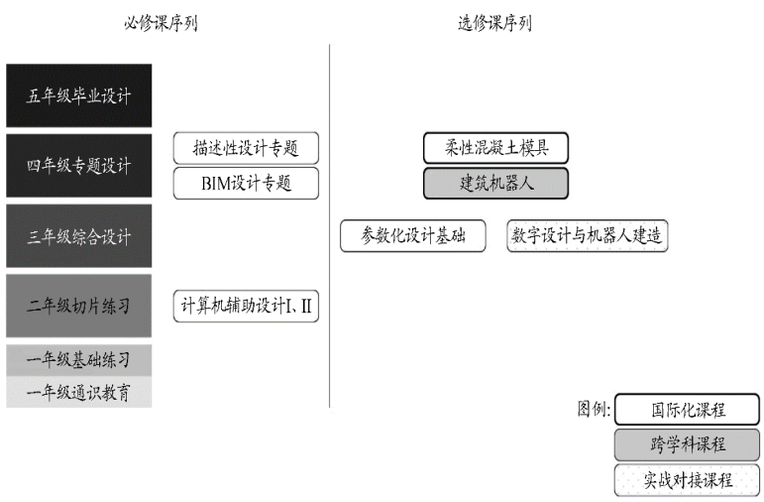

图1 综合改革前的数字建筑课程体系

除初步建设了课程体系之外，建筑学系还建立了机器人建造实验室的分级教学模型，对各课程的教学方法进行规范，并开展教学形式的创新实验[10]。受益于清晰的教学目标设计，专题化设计、参数化设计基础、数字设计与机器人建造等课程教学成果颇丰，分别取得了省级一流课程、校级一流本科优秀课程、校级“专创融合”示范课程认证等成绩。但是，原数字建筑课程体系仍存在基础教学时长不足、长短课程相对割裂、对传统建筑教学渗透有待加强等问题。面对全国设计学科数字化前沿的发展需求及人工智能等新领域的崛起，浙大建筑学有必要从培养方案的再审视出发，对数字化设计与建造的课程生态及其与传统设计教育的协作关系进行整体优化和提升。

二、综合改革策略

笔者认为，数字建筑技术的快速发展和其带来的教学改革需求不仅是时代技术发展趋势在设计学科中的反馈，也构筑了建筑设计与技术间衔接的桥梁，而这恰恰是传统建筑学教育，特别是设计课程和技术课程之间容易出现的矛盾。因此，基于数字建筑技术进行的课程体系改革并不排斥传统设计思维，与之相反，因为数字技术的逻辑性和描述性特征，其适合作为传统建筑设计教育中理性思维的解析和延伸手段，并通过计算性方法和工具逻辑加以辅助和放大。

在这一指导思想下，数字建筑设计课程体系改革的价值导向是针对本科生课程普惠性、基础性的特点，通过课程间知识点的联系和课程教学目标的互补，整合数字建筑设计与传统建筑设计教育，形成二者紧密联系的课程生态。

考虑到数字建筑课程的发展现状，结合前述全国高校在数字建筑课程体系建立中遇到的普遍问题，如何从教学体系角度出发，围绕“跨学科、国际化、实战对接”的核心路径，将各年级的数字建筑课程纵向衔接，形成跨年级衔接的课程链条，并横向扩展，构建与传统教学体系及设计方法相互关联的课程生态，是此次改革意欲解决的结构性问题。

为确立课程内容之间的相互联系，建筑学系针对现有数字建筑课程教学的特点，使用了一种近似布鲁姆分类法的二维框架，对课程难易度和教学内容分别进行归纳。Earl Mark 等为应对教学中引入数字技术导致传统设计与数字建筑课程的割裂问题，经由一系列 eCAADe 组织的教育从业者圆桌会议，设立课程体系的理想模型[11]。该模型把数字建筑课程分为基础、中级和高级 3 个难度层次，同时建立了表现、设计和建造 3 个课程部门，以此帮助高校在尊重自身核心课程差异的基础上，渐进式地引入数字技术，而非形成课程间的理念或概念的割裂甚至对立。随后的数字建筑教学课程体系研究逐渐证明了该二维框架的有效性。如，项星玮等人对包括“老八校”和“新四校”在内的大部分高校数字建筑课程体系的研究中，就使用了年级替代难度层次分类，而在课程部门中则使用了表达层面、实施层面和计算与建构层面这一近似分类[12]。在此次课程体系改革中，课程难易度被分为“认知基础”“实现方法”和“前沿探索”3 个层次，大致对应了中低年级专业必修课、无前置课程专业选修课和部分前置课程要求的专业选修课 3 种不同的课程类型。“认知基础”课程主要围绕数字建筑的一般概念辨析及当代建筑实践必须掌握的基础软件技能展开。“实现方法”从设计和工程方法论的角度，帮助对计算性设计及数字建造有兴趣的学生，初步理解并简单实践数字建筑从设计到原型建造的一般流程。“前沿探索”则均为问题导向教学，从教师的研究方向中抽取位于前置课程延长线上并适合本科生在课程时间内探索的小问题，促进学生在有概念引导和技术支持的情况下形成自己的回应。课程内容则大致分为“表现”“设计”“建造”3 个大类，并进行细分，如参数化设计基础课，将其涉及的“设计”大类内容大致拆分为“几何描述”“算法生成”“性能模拟”“建造优化”4 个小类进行讲解。这样的分类未必能做到不重不漏，需要各门课程在设计教案时细致调整，同时在课程生态

的建立中方便各课程间相互规划和协调教学内容，以形成课程间的强关联。

此外，鉴于前述数字建筑专题化设计课程的排他性，为保证数字建筑课程体系与传统建筑设计教学的联系，并保证课程生态的灵活性，建筑学系选择谨慎增设专题化设计，尽量使用48学时选修课的形式完成本轮课程改革。

三、数字建筑课程链条的形成

如图2所示，将原有课程结构可视化为基于课程内容及难度层次的二维分类后，可以较直观地发现该体系的结构性问题。在认知基础方面，现有计算机辅助设计I、II课程与后续计算性设计及数字建造内容衔接不畅，这主要体现在设计内容的缺失上。与之相对，过度偏重“表现”的前置课程使参数化设计基础需要兼顾“认知基础”和“实现方法”两个层次的内容。同时，囿于后续课程的缺失，本课程也需要覆盖部分“前沿探索”层次的主题，48学时的课程时长较为局促。此外，属于“实现方法”层次的BIM专题化设计及描述性设计专题均需要相对更专业的软件或文本编程平台作为支撑，但前序课程需求并未体现在原培养计划中。反之，数字设计与机器人建造课程虽然提供了良好的认知基础和实操经验，但囿于其选修课的设置，后续没有更多学时支撑学生的前沿探索。

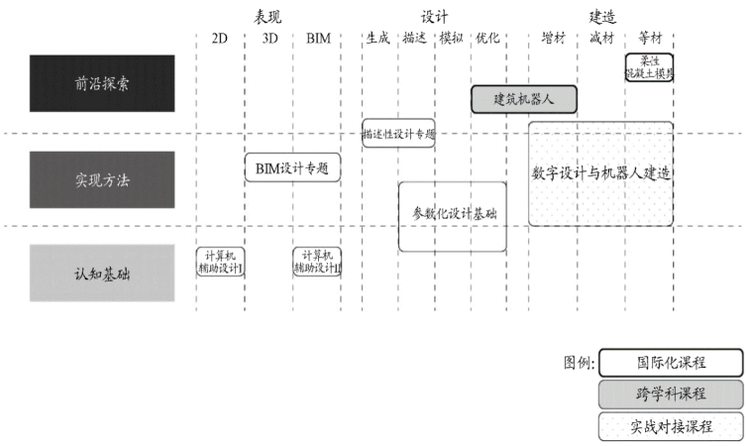

图2 使用教学内容－难度二维框架归纳改革前数字建筑课程体系

为了在不增加学分负担的情况下应对教学内容前后脱节问题，建筑学系通过调整原有课程知识点和增加选修课中数字建筑课程比重的方法，形成数字建筑课程的全过程链条（图3）。

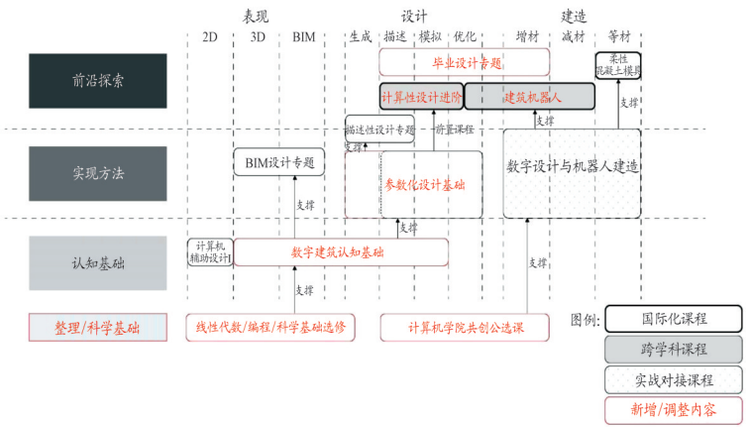

图3 调整后的数字建筑课程体系及其知识点支撑关系

在“认知基础”层次，建筑学系利用全校公共课程，在培养方案中替换一部分原有课程，追加了线性代数、C#编程或Python编程必修课，在学生具有初步专业意向的时期就提升其数理基础，同时利用浙江大学专业全、选课范围广、生源基础素质高的优势，增加了科学类的通识选修课比例。此外，针对计算机辅助设计系列课程重表现、轻设计的现状，将计算机辅助设计II改为数字建筑认知基础选修课，结合二年级核心设计课作业进程，覆盖制图表现、参数化设计概论、BIM概览、物理模拟找型、立面建模、性能模拟初步等内容，在未来的培养方案中，预计调整为必修课程，以减轻后续课程参数化设计基础的课时压力。同时，鼓励学生选修本次教学改革中与计算机学院商定开设的自动化设计课程，课程覆盖部分编程实操及工业机器人基础认知的专业内容。从实现效果上看，部分学生能将这部分前置课程有效转化为数字建筑后续课程中自主探索的动力及技术能力，初步达到了改革目的。

在“实现方法”层次，鼓励现有课程“减负”，将“前沿探索”层次的话题单独拆分，成为新的后续课程，并通过释放出来的课时数增加相互间内容的关联性。例如，为增加参数化设计基础对专题化设计的支持，单独开设计算性设计进阶选修课，以降低课程难度，并基于前置必修课对计算机编程等知识的扩充，扩大“生成式设计”内容，包括L-system、元胞自动机、集群智能等内容及相应的代码简介，帮助学生熟悉建筑语境下的初级文本编程内容，为描述性设计专题课程作准备（图4）。

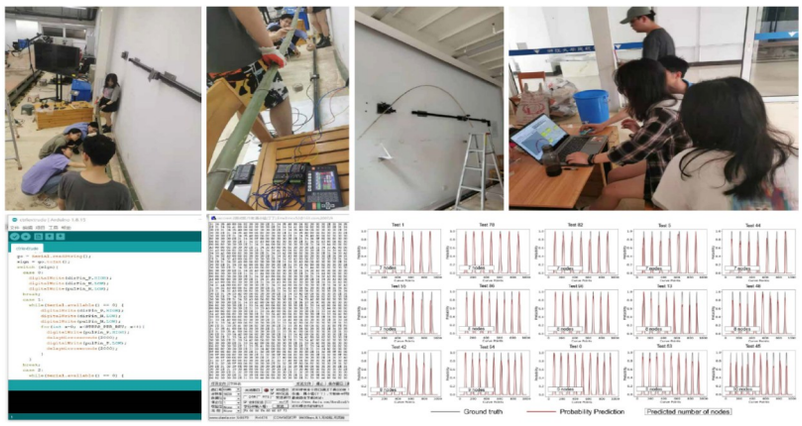

图4　学生参与参数化设计基础课程的黑客松采集用于机器学习的材料数据

在“前沿探索”层次，主要以项目制教学的方式进行基于专题的深度讨论。通过增加建筑机器人等专题化及计算性毕业设计课题，在现有课程框架中尽可能丰富学生的选择。此外，建筑学系与康奈尔大学Leslie Lok教授合作增开计算性设计进阶作为校级“全英文课程”选修课，其目的是对参数化设计基础中学生普遍感兴趣的前沿话题进行项目制延展，以1:1建造原型的课程成果为目标，带领学生从设计方法创新开始完整经历一个计算性设计项目周期（图5、图6）。建筑学系还成立了数字建筑基层教学组织，通过集体讨论的方式，对“前沿探索”的课程选题、教学方式、教学内容及与前置课程的关联性进行规范，以确保其与“实现方法”层次课程在内容上的连续性。

四、数字建筑生态支持传统设计教学

如前所述，如果数字建筑课程体系的建设仅限于几门课程间的联系，同样难以避免碎片化的知识传递和传统设计方法与价值间的冲突，甚至给学生造成数字建筑与传统建筑背道而行的错觉。因此，如何让数字建筑课程成为设计教育的延伸及辅助，既带来新技术与课题的刺激，又不至于与设计核心课程割裂，是本次改革的重点之一。在关切设计价值的主导地位、提升数字化技术的支撑

作用与关注课程成果的工程技术合理性这一理念下，本次改革重点规划了两条横向连接设计核心课程与数字建筑课程的教学路径：其一是数字建筑课程承担部分传统课程的外延教学目标；其二是将数字建筑技术植入传统设计课程中。这两条路径的设置保证了选择数字建筑方向课程的学生能在课程中感受新技术、新思维与传统建筑设计及建造方法的连贯性，从而达到数字建筑教学与传统设计教育互补的目的。

图5　学生参与计算性设计进阶课程中的混合现实建造项目

图6　混合现实建造项目的最终构造成果

在承担传统课程外延教学方面，建筑学系通过联合大界机器人进行的数字设计与机器人建造选修课可视为对建筑构造课程的补充及三年级综合设计课程的延伸。在课程进行过程中，学生并非单纯探索如PETG倾斜打印或陶土打印等技术的边界及可能性，而是针对某一确定的建筑构件如立面干挂单元的力学性能及建造方式，思考建筑形式、构造体系与加工方法优化的结合点，并将之应用于足尺模型的测试件中，作为课程成果呈现。在课程教案中，除计算性设计和工业机器人相关内容外，教学内容还包括建筑围护结构的详细讲解及相关的力学模拟等，这对尚未经历过实际建造项目的本科生而言是一次将设计及构造课所学应用于实践的综合训练（图7）。经过该课程的深度实践，学生也对中高年级设计核心课程中同时要求的大样及节点绘制等常因图纸过于抽象难以理解而产生问题的练习有了更具体的感知。

图7　与大界机器人合作数字设计与机器人建造课程仿生异形拱建造成果

将数字建筑技术植入传统设计课程的路径则主要通过各专题化设计课程（即四年级设计课）体现。例如，由柏庭卫（Vito Bertin）主讲的描述性设计，虽然应用了GDL语言这一基于文本的编程平台进行建筑形态的生成，但其课程的核心教学目标并非生成式算法本身，也不要求学生探索非线性建筑形态。相反，本课程的核心理念在于使用简单的正交体系和体块间的布尔运算规则，使用同样的基础逻辑定义所有长方体，仅以其外观参数的改变产生从家具到城市尺度的形态变化，使学生批判性地阅读生成的形态，以格式塔理论探索其“建筑化”的可能性，其本质更接近利用了生成式方法的现象学建筑设计方法教学（图8）。

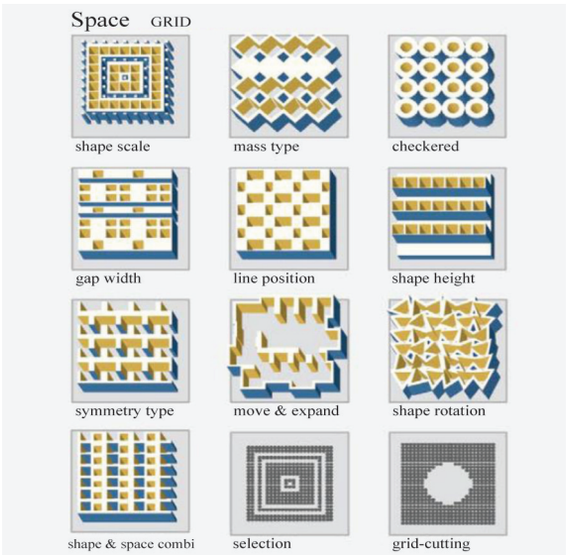

图8　描述性设计课程作业——基于简单规则的集合空间（陆浩供图）

在建筑系清晰的“3+1+1”核心课程结构下，经由以上两条主要路径，各数字建筑课程分别与同层次的建筑设计核心课程建立了实质教学内容上的横向连接，既促进了学生理解计算性设计方法这一相对抽象的描述逻辑在建筑学科内的应用，也帮助传统建筑学科教育以更高效的手段探索和归纳可传授的理性思维。

五、综合改革成果

从2018年建设数字建筑设计教学课程体系起，历经2021年开始执行的“数字化设计与建造综合课程体系建设”校级一流本科综合改革项目，浙江大学建筑学系的数字建筑课程生态建设取得了显著成效。在整体培养方案选课要求下降1.5学分的情况下，数字建筑方向共开设7门各为2学分的选修课，涵盖了从表达、设计到建造各方向的专业知识。在专业选修课总分9.5~13学分（各年级培养方案略有不同）的情况下，现有数字建筑选修课可以满足学生从确定专业到毕业的全部专业选修课需求。同时，在二三年级开设独立选修课程，对有兴趣的学生进行引导，再结合设计课教学，使学生在学时更长的课程中能以更浓厚的兴趣投入更多的时间，避免了必修课程学分集中段和数字建筑课程开设时间的强关联[2]，增加了学生选课的自由度，也构成了浙大与大部分其他学校在数字教学课程体系上的差别。除核心设计课程及专题化设计课外，约有60%的本科生在不同层次接触了数字建筑教学，其中，超过一半的学生选修了参数化设计基础和数字设计与机器人建造这两门“实现方法”层级的中坚课程，且二、三、四、五年级学生均有，使这一教学体系真正做到了普惠性。

目前，浙大建筑学系先后有7位教师投入数字建筑本科生教学中，并通过全英文课程等渠道引

入来自康奈尔大学、香港大学等国际高水平学校的3个教学团队，长期稳定支持“前沿探索”系列课程，也建立了与大界机器人、冠力科技等数字建造企业的长期合作关系，加大对课程教学、数字建造实验室硬件升级的支持力度，并通过建筑规划学科联盟争取浙江大学设计研究院等单位的建设资金投入。在“认知基础”和“实现方法”课程中，数字课程生态涵盖了参数化建模、生成式设计、找型模拟、性能优化、曲面理性化、增强现实等计算性设计方向内容及其理论，建筑信息模型及制图的相应实践性内容，及工业机器人增材、减材、等材建造等数字建造方向内容，形成了相对广的覆盖面。在项目制的“前沿探索”课程中，仅综合改革开展期间，就支持学生进行了计算机视觉支持使用后评估（2021年）、混合现实指导手工竹构建造（2021—2023年）、倾斜打印支持的大尺度构件建造（2021年）、热缩成型仿生结构（2022年）、基于流体3D打印的预制构件设计方法（2022—2023年）等多元化课题，形成了丰富的教学成果储备。同时，具有连续性的课程设置允许学生在更长的周期中完成后续学术成果的转化。截至目前，已基于各项课程教学成果，由本科生深度参与发表各类学术论文十余篇，本科生进行会议报告6次。由于许多课程成果与1:1足尺模型建造相关，参与课程的学生在实践方面有所积累，随后进入了相关行业从业或转专业升学。

2023年，浙江大学建筑学系在全球建筑学专业QS排名中上升至49位，其中，雇主声誉排名位列世界第16。作为近年来建筑学系投入资源较多、课程改动最大的教学板块，数字建筑课程生态的贡献得到了初步印证。

六、结语

浙大建筑学系本轮数字化设计与建造综合课程体系建设校级一流本科综合改革项目以本科设计教育核心价值为主线，突出设计课与选修课集群长短结合的普惠性生态，结合设计课“3+1+1”教学序列，形成了数字建筑纵向课程链条完整、横向与设计核心课程衔接紧密的课程生态。目前，该数字建筑课程生态基础教学内容逐渐丰满，也产出了具有一定学术价值的前沿探索课程成果。随着全国高校数字建筑课程的继续普及和发展，结合学校现有特色和教育价值导向，与核心设计课程协同进行数字建筑课程整体规划的改革模式，对国内其他高校下一轮的课程体系建设有一定借鉴意义。

同时，本次课程建设也凸显了一些亟待解决的问题。其一是教材的缺失。由于数字课程教学内容在纵向和横向的贯通改变了单门课程的教学内容组织逻辑，现有教材很难满足其教学需求。其二是人工智能等认知和应用门槛低、操作门槛高的新技术大量涌现，如为本科生覆盖该类前沿话题，不同层次间课程较难建立联系，目前的课程内容大部分仍停留在认知基础上。

浙大建筑学系已经开始着手解决这些问题，以持续提升数字建筑设计教学课程质量。为缓解教师的备课压力、降低学生的认知门槛，具有本校教学特色的数字建筑教材已在编写中。同时，针对具有更高门槛的前沿话题，基于基层教学组织，建筑学系已在筹备四年级专题化设计和五年级毕业设计题材的一贯制课程结构，对于有兴趣长期探索某一方向的学生，可选择以四五年级两门设计课为核心，辅以相关“前沿探索”层次选修课，进行专业方向较为深入同时兼顾设计综合性和可实现性的长周期学习。

参考文献：

[1] Mitchell W. A computation approach to basic design[C]//Pioneers of CAD in Architecture，1985.

[2] 项星玮，刘翠，沈杰. 数字化建筑设计教学的三个基础性维度及维度属性——以国内15所高校本科阶段的数字化建筑设计教学为样本[C]//数智营造：2020年全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会，2020.

[3] 徐卫国,黄蔚欣,于雷. 清华大学数字建筑设计教学[J]. 城市建筑,2015(28):34-38.
[4] 袁烽,李可可. 面向"数字未来"(DigitalFUTURES)的建筑教育[J]. 当代建筑教育,2022(1):9-22.
[5] 章为,李大利,何韶瑶. 参数化设计在实体建造基础教学中的应用研究[C]//数智营造:2020年全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会论文集,2020.
[6] Duarte J. Inserting new technologies in undergraduate architectural curricula[C]//Proceedings of the 25th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe(eCAADe),2007.
[7] 李飚,华好,唐芃,等. 建筑·运算·应用:教学与研究[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
[8] Quan D, Wang S. The Rise of Digital Craftsmen: Study of Digital Architectural Education in China and the West[C]//数智营造:2020年全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会,2020.
[9] 张烨,许蓁,魏力恺. 基于数字技术的建筑学新工科教育[J]. 当代建筑,2020(3):129-133.
[10] 吴越,许伟舜,孟浩. 以系统性数字化生态改造建筑学教育[J]. 当代建筑教育,2022(1):75-82.
[11] Mark E, Martens B, Oxman R. The ideal computer curriculum[C]//Proceedings of the 19th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe(eCAADe),2001.
[12] 项星玮,宋振旭,张烨,等. 构建具有跨学科内容整合特征的数字化建筑设计教学框架——面向新工科建设背景[J]. 新建筑,2022(5):124-129.

From chain to ecology—the reform of the digital course system in the Department of Architecture of Zhejiang University

WU Yue[1], XU Weishun[1], MENG Hao[2]

(*1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China*;
2. Shanghai Dajie Robot Co., Ltd., Shanghai 201900, P. R. China)

Abstract: With the challenges brought by emerging technologies such as artificial intelligence, the systematization of digital architecture teaching and its relevance to traditional design teaching are becoming increasingly important. Since 2021, the Department of Architecture of Zhejiang University has implemented a first-class undergraduate comprehensive reform focusing on the ecological construction of digital architecture courses, which is mainly aimed at the rectification and integration of the progressive teaching content of digital architecture courses. It also emphasizes its auxiliary and extension role in rational thinking in traditional design education, forms a vertical and complete curriculum chain, and has an effective relationship with the core design curriculum. This paper summarizes and discusses the core concept of the curriculum system, the construction of the content framework and the relevance between the courses.

Key words: digital architecture; computational design; digital fabrication; teaching reform; curriculum system

(责任编辑　周　沫)