

面向新时期强交叉人才培养的土木与建筑工程 CAE 课程建设

胡振中¹, 朱时艺¹, 林佳瑞²

(1.清华大学深圳国际研究生院 海洋工程研究院, 深圳 518000;

2.清华大学 土木水利学院, 北京 100084)

摘要:在当前高速发展的经济和科技环境下,土木与建筑工程行业正面临着新的挑战 and 机遇。为了适应新时期的需求,培养出具有交叉学科知识和综合能力的人才,已成为该行业教育改革的重要方向之一。本文旨在探讨如何通过 CAE 课程建设,实现面向新时期强交叉人才的培养目标。

首先,本文分析了新时期强交叉人才的发展现状与需求;其次,本文分析了土木与建筑工程 CAE 课程的发展历程与定位;最后,本文分享了面向新时期强交叉人才培养的土木与建筑工程 CAE 课程建设的基本经验,包括:1) 教学理念体现全面化和个性化;2)教材建设注重结构体系的创新性;3)课程内容注重“新”状态;4) 教学设计注重应用性和实践性;5) 重视教学团队建设。

关键词:新时期;强交叉人才;土木与建筑工程 CAE;课程建设

中图分类号: **文献标志码:** A **文章编号:**

一、引言

在新时期,随着社会的快速发展和科技的不断进步,土木与建筑工程领域所涉及的技术和工程越来越复杂,对人才的要求也越来越高。如何培养具备跨领域综合素质和能力的强交叉人才成为了当前土木与建筑工程教育的重要议题和热点问题。

然而,现阶段交叉学科高级专业人才的数量和质量仍然不足以满足社会发展的需求。中国教育部在发布的一份名为《全国教育事业发展统计公报 2022》的报告中指出,当前中国高等教育中存在的一些问题,其中包括缺乏跨学科和实践性的教育,以及缺乏足够数量和高质量的交叉学科高级专业人才。尽管近年来我国高等教育在交叉学科领域的投入逐渐增加,但由于课程体系、师资力量等方面的制约,交叉学科高级人才培养效果尚不理想。这在一定程度上限制了人才的充分发挥和交叉学科的发展。

当前，我国各个行业对交叉学科高级专业人才的需求愈发显著。尤其在新兴产业、传统产业改革、社会治理等领域，对交叉学科高级专业人才的需求更为突出。2019 年，教育部等九部门联合发布了《关于促进高等教育内涵式发展的意见》，提出要“推进学科交叉、专业融合、综合创新”，鼓励高校开设跨学科课程和专业，培养跨领域复合型人才。这一政策的出台，进一步凸显了交叉学科高级专业人才的重要性和需求。《国家中长期人才发展规划纲要（2021-2035 年）》提出，要推动工程技术领域的跨学科交叉人才培养，培养工程技术、自然科学、社会科学交叉人才，满足经济社会发展对高素质人才的需求。

作为国内著名的高等学府，清华大学积极响应国家战略需求，开展了一系列具有国际竞争力的科研项目和重大工程项目，在我国“培养强交叉人才”方面发挥了重要作用和影响力，为国家的经济发展和社会进步做出了突出贡献。同时，学校采取多种创新型人才培养模式，培养了一批具有创新能力、实践能力和国际竞争力的高层次人才，为国家的人才战略做出了突出贡献。此外，学校还积极推进学科交叉和融合，打破学科壁垒，促进学科创新和发展，为国家的科技创新和产业升级做出了重要助力。

二、土木与建筑工程 CAE 的发展历程与定位

土木与建筑工程作为人类社会发展的基础和支撑，其发展历程一直伴随着科技的进步和技术的创新。计算机辅助工程（Computer Aided Engineering, CAE）技术的应用，为土木与建筑工程领域的发展带来了新的机遇和挑战，同时也为人才培养提出了更高的要求 and 标准。土木与建筑工程 CAE 课程作为一门以计算机辅助工程（CAE）技术为核心的课程，在土木与建筑工程领域中具有重要的地位和作用，其发展历程可以分为以下两个阶段。

第一个阶段主要集中在 1992 年至 2021 年，即引进阶段。国家精品课土木工程 CAD 原包括“工程计算机制图”和“土木工程 CAD 技术基础”。其中，面向大一学生，授课“工程计算机制图”，旨在为学生提供计算机制图的基本知识和技能；面向大三学生，授课“土木工程 CAD 技术基础”，旨在帮助学生掌握 CAD 软件的基本操作和应用方法，进行基本的工程绘图和设计。20 世纪 90 年代至 21 世纪初，计算机辅助工程（CAE）技术开始应用于土木与建筑工程领域。这一阶段的 CAE 主要用于辅助设计与分析，通过引进国外先进的土木工程 CAE 技术和教学资源，建立了土木工程 CAE 课程体系，它的发展符合了计算机技术的普及与应用的基本趋势。2015 年，面向研究生，授课“土木与建筑工程 CAE”，旨在为学生提供先进的土木与建筑工程领域的 CAE 技术，了解 CAE 的工程应用和 CAE 的发展方向。

2021 年至今，土木与建筑工程 CAE 课程进入了第二个阶段，即改革创新阶段。这一阶段的主要特点是调整课程定位、优化课程体系，以适应国内外土木工程专业发展的新趋势。其中，土木与建筑工程 CAE 课程的定位从原来的基础课程调整为专业核心课程，以更好地体现该课程在培养具有计算机辅助工程能力的土木工程专业人才中的重要地位。通过梳理和完善课组体系，以“工程领域信息技术研发与应用”为培养目标，“强基础、重应用、探前沿”为本研贯通思路，在原有“工程计算机制图”和“土木工程 CAD 技术基础”两门课程基础上，面向高年级本科生首次开设“建筑信息模型 BIM 技术基础”课程并编著教材讲义，提升工具软件的应用和研发能力；面向研究生，授课“工程硕士数学”以强化数理基础和逻辑能力，授课“土木与建筑工程 CAE”以培养懂工程、会技术，能引领和指导面向工程应用的软硬件技术开发的复合型人才。基于本课程内容，课程组老师秉承严谨细致的工匠精神，已按照教材大纲和确定的教学内容进行《土木与建筑工程 CAE》教材编写，新教材注重与先进技术接轨，如虚拟现实（VR）、人工智能（AI）、机器学习等。如此，土木工程 CAD 系列课程进行多学科的交叉融合不仅可以拓宽学生的学科视野，让他们了解不同领域的理论和实践知识，从而更好地适应未来的工作和生活，还可以激发学生的创新能力，让他们能够将不同学科的知识和方法进行有机结合，从而创新性地解决工程问题。

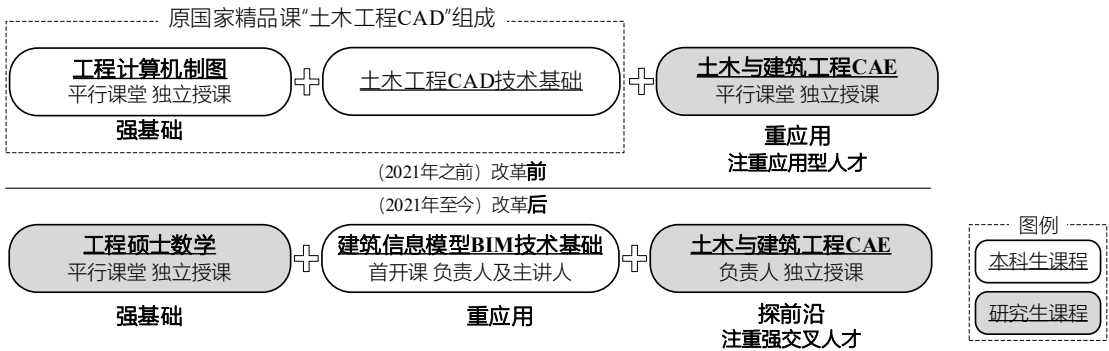


图 1 土木与建筑工程 CAE 课程的发展与定位

课程发展历程和定位变化，不仅是教育创新的见证，也是国内土木与建筑工程专业发展的缩影。如今，清华大学土木与建筑工程 CAE 课程已经成为土木工程 CAD 国家精品课的核心组成，对于提高土木与建筑工程人才的素质和水平发挥了重要的作用。

三、新时期土木与建筑工程 CAE 课程建设的基本经验

随着时代的发展和学科的进步，课程建设已成为教育领域重要的议题^[1]。在新的历史时期，清华大学一直致力于推动教育创新和教学改革，积极探索新时期课程设的有效路径。在这一过程中，清华大学积累了丰富的经验和教训，不断完

善教学模式和教育理念。本文将就新时期土木与建筑工程 CAE 课程建设的基本经验进行探讨，以期为广大教育工作者提供借鉴和启示^[2]。

（一）教学理念体现全面化和个性化

土木与建筑工程 CAE 课程的教学改革旨在贯彻“三位一体、为人师表、业精于勤、因材施教”的育人理念，为培养强交叉人才创造良好的教育环境。

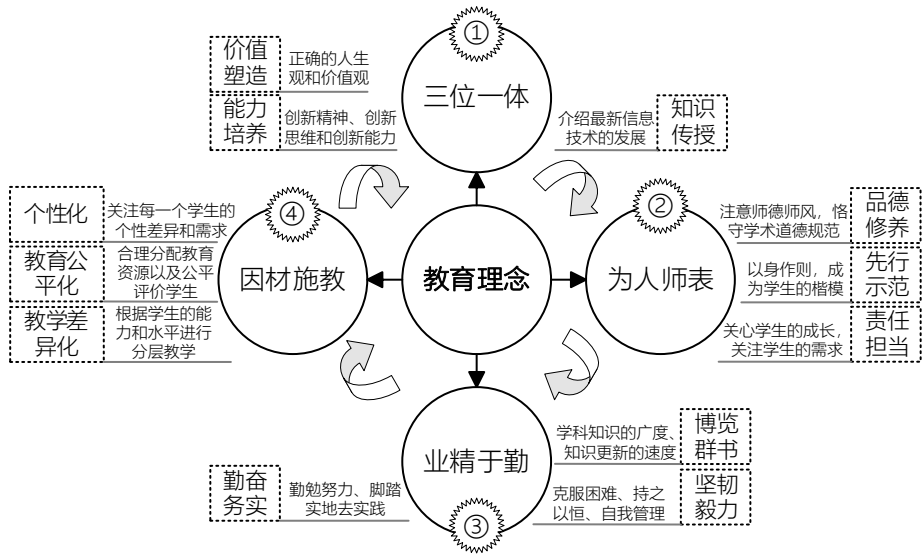


图 2 土木与建筑工程 CAE 课程的教育理念

（1）三位一体。在土木与建筑工程 CAE 课程的教学过程中，强调价值塑造、能力培养和知识传授三位一体的教育理念。分清培养教育的主次，知识传授是其次的，要让学生坚定塑造正确的价值观和人生观，鼓励学生立大志、入主流、上大舞台，并在学习知识的同时，培养创新精神、创新思维 and 创新能力。

（2）为人师表。教师在课程中应注意自身的师德师风，以身作则，成为学生的楷模。恪守学术道德规范，严谨治学，树立良好的学术风气。在教学过程中，教师应要求自己用心讲解，勤于钻研，不断提高教学质量，为学生树立学术榜样。此外，教师要关心学生的成长，关注学生的需求，对学生要有耐心、热情，帮助学生解决学习和生活中遇到的问题，使学生感受到关爱和尊重。

（3）业精于勤。CAE 课程的改革强调勤奋务实的精神，教师和学生共同追求卓越。为师者，首先在专业上应该博览群书、博取众长，通过不断地提升专业素养，确保能给最优秀的学生带去正确而先进的专业知识。为学生者，要珍惜学习机会，刻苦学习，自觉克服困难。在课程学习中，不仅要掌握基本知识，还要深入研究，勇于创新。

（4）因材施教。每个学生都有自己的特点，或勤学，或聪慧；或积极外向，或内敛稳重，通过增加与学生的接触，关注每一个学生的个性差异和需求，做到因材施教。切不可一概而论，将教育过程同化为工厂流水线。针对学生的基础水平和兴趣，教师可以设置不同层次的课程内容，并给予相应的指导，即分层教学。

这样既能满足学生的个性化需求，又能激发他们的学习积极性。此外，教师应关注学生的需求，鼓励学生参与课程建设。例如，可以征集学生的意见和建议，完善课程设置。同时，教师可引导学生自主学习，培养他们的自主探索精神。对于学习成绩较差或缺乏自信的学生，教师要关注他们的需求，采用个别辅导、心理关怀等方式，帮助他们建立自信、提高成绩。

（二）教材建设注重结构体系的创新性

在土木与建筑工程 CAE 课程改革中，教材建设为培养强交叉人才提供理论支撑和知识基础，帮助学生在跨学科领域掌握必要的知识和技能，促进了教学理念的实现。

习近平总书记指出，高水平人才培养体系包括学科体系、教学体系、教材体系、管理体系和思政体系^[3]。其中，学科体系为教学提供了知识结构和知识分类的基础，教学体系是将学科知识转化为教学内容和教学方法的具体体现，好的教材体系可以为教学体系提供有力的支撑、是教师进行教学的主要依据和工具，管理体系为教学提供管理保障，思政体系则是通过思想教育来引导学生树立正确的思想观念和价值观念、促进学生全面发展。创新性的教材结构体系是高水平人才培养体系的重要组成部分，但在某些情况下，可以说教材是当前的弱点^[4]。如果没有适当的课程和教材，即使讲授再多的理念和理论，也无法真正提高学生的培养质量。同样地，如果没有教师的积极参与和自我革新的勇气，教学质量也将无法得到保证。因此，拥有一本适用于高水平教育的优质教材尤为关键。为了提高教材的质量和效果，可以从教材整体架构、模块设计和学科交叉方面注重创新性的教材结构体系设计。

（1）整体架构有条不紊，模块设计分而治之

首先，教材结构体系可以根据学科发展的趋势和最新的研究成果，重新构建整体框架。在新教材《土木与建筑工程 CAE》中，根据土木与建筑工程的 CAE 技术类型可以分为 CAE 系统的可视化技术、CAE 系统的模型化技术、CAE 系统的离散化技术、CAE 系统的虚拟化技术、CAE 系统的网络化技术、CAE 系统的自动化技术和 CAE 系统的智能化技术，教材总字数 35 万。各技术之间的逻辑关系如图 3 所示。



图3 各技术之间的逻辑关系

其中可视化技术是将复杂的土木与建筑工程问题通过图像、动画和视频等形式呈现出来，以便更好地理解和分析。模型化技术是将土木与建筑工程中的各种问题抽象成数学模型，以便进行分析和计算。离散化技术是将连续的土木与建筑工程问题抽象成离散的形式，以便进行数值计算。虚拟化技术可以通过虚拟现实技术，将建筑物的结构、装修等方面呈现出来，以便设计和施工。网络化技术可以通过互联网将建筑物的设计方案、施工进度等信息进行共享和交流，以便多方面的参与和协作。自动化技术可以对建筑物的空调、照明等系统进行自动控制，提高能源利用效率和工作效率。智能化技术是将土木与建筑工程中的各种问题通过人工智能技术进行处理和控制在。该教材整体架构强调知识的基础性，重视对概念和原理的说明，着重展现土木与建筑工程领域的最新发展成果和未来发展趋势，方便于学生更好地理解 and 掌握。

其次，教材结构体系中的每个单元可以设计为一个独立的模块，包括概念、原理、方法、案例分析等内容，让教材的组织结构更加清晰、灵活和高效，从而为学生提供更好的学习体验和学习效果。在“CAE 系统的可视化技术”章节中，分为“计算几何基础”、“计算机图形学基础”、“可视化与计算机视觉技术”、

“三维几何信息的轻量化”和“三维图形平台的研发”5个模块，各模块之间的逻辑关系如图4所示。其中，计算几何基础为CAE系统中的几何建模和计算提供了基础理论和方法支持，计算机图形学基础为CAE系统中图形可视化和计算提供了算法基础，可视化与计算机视觉技术为CAE系统中的数据可视化和图像处理提供了技术支撑，三维几何信息的轻量化技术为CAE系统中的大规模三维几何数据的处理和可视化提供了技术保障，三维图形平台的研发涉及到三维图形平台的架构和实现。该章节的部分教材内容如图5所示。

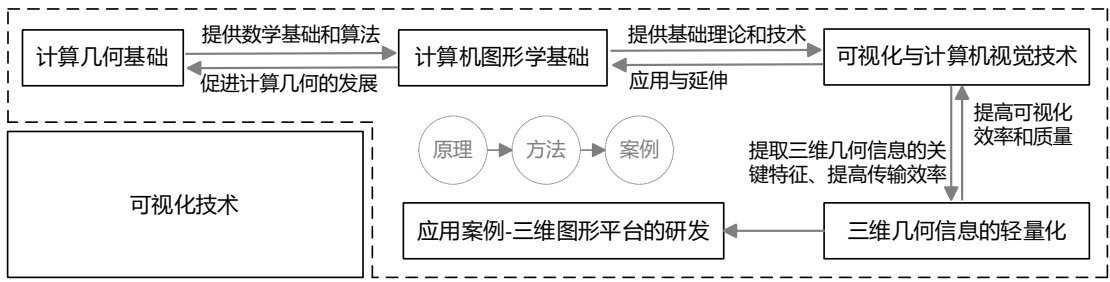


图4 可视化技术中各模块间的逻辑关系

第二章

CAE系统的可视化技术

可视化是指所有通过创造图像、图形或者动画以传递信息的技术，是传递具体或者抽象的概念和信息的有效手段。从史前人类在洞穴中留下的壁画，到象形文字和甲骨文，到达·芬奇创造性地用图纸来表达机械设计方案，到我国清代著名的“样式雷”皇家建筑设计表达方式，再到新一代信息技术支撑下的多动态可视化技术体系，都是人类历史上可视化技术的重要里程碑。

在科学研究中，同样通过图形、图像或者动画等方式来直观、高效地传递信息，这些信息甚至包括现实中无法直接观察的数据和现象，例如空气流动状况，或者结构中某构件的应力应变等。随着获取数据能力的飞速提高，及时解读和获取有用的信息成为了巨大挑战，致使传统的方式理解大量科学数据中包含的复杂现象和规律不再现实，进而催生了科学计算可视化这一技术领域的诞生。科学计算可视化重点研究将离散的数据场转变为图形图像的技术，在众多其他学科分支中，在土木工程CAE系统中也发挥着重要的作用。城市规划、有限元分析、计算机辅助设计和施工模拟等都是土木工程CAE系统可视化的典型应用场景。本章中，将介绍可视化技术的数学原理、常用技术和三维图形平台的开发。

2.1 计算几何基础

算法是数学与计算机科学中十分重要和基础的概念。对于某一类特定的数学问题，如果给定问题的输入，能够通过明确的有限计算步骤得到正确的结果，则这些计算步骤就构成了一个算法。例如，给定一系列特定的数字，总能够按照一定的步骤输出一列这些数字的升序排列，这些步骤就构成了一个排序算法。在可视化技术中，需要处理的通常是各种几何数据，而对于几何学中各种算法的研究，也构成了计算机科学的一个分支学科，即计算几何。本节介绍计算几何的数学基础，及某些常见几何问题的算法。

2.1.1 数学基础

2.1.1.1 坐标系

为了在计算机中对几何空间和几何体进行分析和计算，首先需要用数字将几何空间中的位置表示出来。这种用一组数字来特定地表示几何空间中一个位置的系统，就是坐标系，而用来表示位置的这组数字就称为坐标。坐标中的数字通常是有序的，即它们的位置不能调换。坐标和空间中的位置也是一一对应的。

实际上，所有流形空间中的位置都是可以用坐标系统表示的（注：流形（Manifold），一个数学概念，是局部具有欧几里得空间性质的空间。在数学中用于描述几何形体；在物理学上，经典力学的相空间和构造广义相对论时空模型的四维伪黎曼流形都是流形的实例），但是本章所讨论的问题均定义在欧几里得空间，也称欧氏空间。欧氏空间最早出现在古希腊数学家欧几里得的著作《几何原本》中。欧几里得对存在的物理空间中的几何关系做出了一些基本假定，再基于这些假定演绎出了大量的定理，从而构成了整个欧氏几何体系。这些假定被称为欧几里得公理，包括：

- （1）直线公理：经过相异两点有且只有一条直线；

- （2）线段可以无限延长成为直线；
- （3）圆公理：给定圆心和半径有且只有唯一的圆；
- （4）角公理：所有直角都互相相等；
- （5）平行公理：在平面内过直线外一点有且只有一条直线的平行线。

显然，在存在的物理空间中，以上五条假设的成立都是不言自明的。满足这五条假设的几何空间，就称为欧氏空间。实际上，前四条公理在所有的流形空间中都是成立的，而平行公理不成立的空间，则构成了各种不同的非欧氏空间，本书不做讨论。

为了在欧氏空间中表示确切的位置，需要首先定义一个原点，作为在空间中进行定位的基准点。显然，在给定原点的情况下，只要用坐标唯一地表示某个位置和原点的相对关系。通常，在三维欧氏空间中表示某个位置和原点的相对关系需要三个互相独立的数字。类似的，一个平面就构成了一个二维的欧氏空间，而一条直线就是一个一维的欧氏空间。更高维度的欧氏空间也是可以按照类似的方式拓展定义的，但是本书只讨论三维及以下的欧氏空间。

最简单、直接和常用的坐标系是笛卡尔坐标系，也称作直角坐标系。在二维欧氏空间（平面）中，选取两条经过原点且互相垂直的直线作为坐标轴，这样平面上所有点的位置的坐标可以由点在两条直线上的投影长度所确定。类似的，在三维空间中，选取三条经过原点且互相垂直的直线作为坐标轴，分别定义为x轴、y轴、z轴，且x、y、z轴方向之间符合右手法则（注：右手法则，指以右手握住z轴，让右手的四指从x轴的正向以90度的直角转向y轴的正向，此时拇指所指的方向就是z轴的正向），空间中所有点的位置坐标就可以由点在三条坐标轴上的投影长度所确定，如图2-1所示。通过这样的方式确定的坐标，就是笛卡尔坐标。

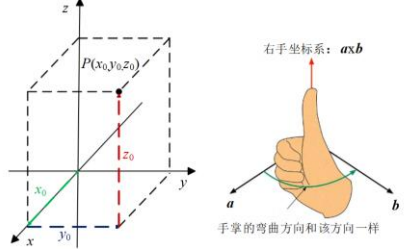


图2-1 三维直角坐标系

除了笛卡尔坐标系外，另一个常用的坐标系是极坐标系。在二维平面上，选取一条经过原点的射线作为极轴，对于任何一个位置，从极轴逆时针旋转到该点所在射线的角度称为辐角 θ 。这样，某个点的位置也可以通过点和原点的距离加上辐角确定，其中点和原点的距离也称极半径 r ，这样的极半径和辐角构成的坐标就是极坐标。从二维极坐标系推广到三维极坐标系有两种常用的方法，分别是柱坐标系和球坐标系。在三维空间中，通过原点取一个极坐标平面和一条与极坐标平面垂直的直线作为竖轴，某个点的位置可以由在竖轴上的投影长度和在极坐标平面内的投影点的二维极坐标相结合而确定，其形式为 (r, θ, ϕ) ，这样的坐标就是柱坐标系，如图2-2所示。而球坐标系则是将极轴推广为一个通过原点的参照平面，通过极半径、仰角和方位角来确定一个点的位置。现实中广泛应用的地球经纬度坐标，实际上就是一个球坐标系。地球的球心作为原点，赤道平面作为参照平面，纬度和经度就是在这个球坐标系中的仰角和方位角。通过海拔和经纬度，就可以完全确定地球表面的任意位置。

图5 可视化章节部分教材内容

（2）学科交叉融汇贯通

现代工程学科之间体现的是交叉融合，不同学科之间的知识相互渗透、相互贯通、相互作用和相互促进。这种交叉融合的趋势，使得工程学科变得更加综合、复杂和多元化，这也对未来人才培养提出了更高的要求——需具备广泛的学科知识和技能、创新思维和能力、团队合作和沟通协调的能力、全球化视野和国际交流能力等多方面能力。为实现人才培养目标，教材建设需要设计和构建学科交叉融合的结构体系。

编排教材应反映不同学科之间的相互渗透和知识的再生，表达教材内容的方式应多用启发性语言，从而实现教材内容成熟与创新的有机融合。通过教材学习，让学生领悟到工程知识的综合性和不同学科之间的联系，从而培养学生系统性思维和整合不同学科观点的能力，培养学生发散性思维和全面分析问题、解决问题的能力。在新教材第八章 CAE 系统的智能化技术中，包含“人工智能”、“知识表达与管理”、“算法基础”、“数据挖掘”、“数据分析”和“机器学习”六个模块，融合了计算机科学、数学、人工智能、统计学、土木工程、建筑工程、数据挖掘和机器学习等多个学科的内容和方法，如图 6 所示。它们相互依存、相互促进，共同构成了智能化技术的基础和核心，促使学生了解不同学科的知识和方法，也为实现培养交叉学科高级专业人才的重要目标构筑基础。



图 6 智能化技术涉及的交叉学科

（三）课程内容注重“新”状态

土木与建筑工程 CEA 课程内容的设置为培养强交叉人才提供了跨学科的知识 and 技能。想做好新时期下教学改革，课程教学内容选择需更加谨慎。在“知识爆炸”的时代，人类面临着“知识过时”问题。随着科学技术的不断发展，土木工程领域的技术和理论也在不断更新和改进，特别是新的设计和建造技术的出现，需要土木工程人员不断更新和学习新的技术和方法，例如计算机辅助设计、数字化建造等。因此，在课程内容的设计上，不能简单沿用以往课程的教学内容，必须根据实际情况和需求进行不断调整和更新，以适应社会和技术的发展，并满足学生的学习兴趣和需求。从长远来看，如何在有限学时中选择课程内容^[1]、如何培养学生解决复杂工程问题和未知工程问题的能力，是老师需要面对的问题。

所以，随着新产业、新技术、新模式不断发展，教学内容和课程设置的调整显得尤为重要。

(1) 主要教学内容。对于现有课程内容的发展变化，可以将成熟的基本理论及原理作为课程的主要教授内容，要求学生系统掌握^[5]。例如有限元分析理论，它是土木与建筑工程中常用的一种数值分析方法，可以对复杂的结构和系统进行建模、分析和优化，是现代工程计算中的一种重要工具。因此，教学内容首先应该涵盖有限元分析的基本理论知识，如有限元离散化、刚度矩阵、应力分析等。其次，应该包括有限元分析计算软件（如 ANSYS、ABAQUS）的使用方法和技巧。同时注重实践应用，让学生通过真实的工程案例学习有限元分析的应用方法和技巧，例如通过大型通用有限元分析软件 ANSYS 对国家体育场（鸟巢）工程项目进行结构安全分析，说明有限元方法与离散事件模拟技术的实际应用。同时，通过分析应力云图和位移云图，可以评估鸟巢工程结构在不同施工阶段的受力和变形情况，为工程施工和监管提供科学依据。再如，通过分析当前建筑工程项目模型信息传递中存在的典型问题及应用需求，提出 IFC-API 建筑结构模型转换模式，并结合前期结构分析模型转换框架，形成一套完整的基于 BIM 的面向结构有限元分析的模型转换体系^[6]，如图 7 左侧所示。该过程涉及有限元分析模型的输入、输出、存储和转换方法，包括几何模型的建立、网格划分、边界条件的处理等。规则化数据文件是绝大多数有限元分析软件会提供的快速建模和分析控制方式，其建模过程也大同小异，只是对一些文本的规定和细节的处理有所不同。如图 7 右侧所示，对比了多种有限元分析软件对于建模过程中的几何、材料、截面信息定义的方式。

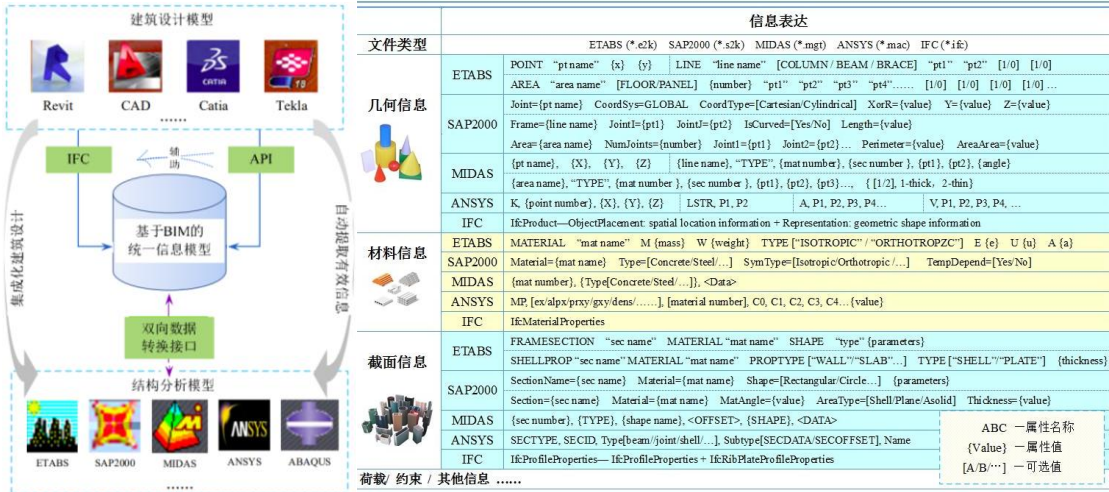


图 7 基于 BIM 的模型转换机制（左）和不同有限元分析软件的大纲解析对比（右）

(2) 前沿性探讨内容。对于相对成熟且仍在发展的内容可作为课程的前沿性探讨，并鼓励学生进入深入的学习与探讨。例如建筑信息模型（BIM），它通过数字化建筑信息模型，实现建筑项目各个阶段信息共享、协调和管理。作为前

沿性探讨教学内容设计，应该注重 BIM 基础理论、BIM 标准规范、BIM 软件工具、BIM 应用案例、BIM 与其他技术的融合等方面的内容。其中，BIM 在设计阶段的应用、BIM 在建筑运营和维护阶段的应用、BIM 与人工智能的融合等方面的探讨也将为 BIM 技术的发展和應用提供新的方向和思路。再如近年来逐渐出现的知识图谱和混合现实技术，在课程中可以将它们作为一种前沿性的技术引入，探讨其原理、特点、应用场景和未来发展方向等内容。

(3) 作业专题。对于相对热门的研究领域，可作为作业专题，掌握它们可以帮助学生更好地应对未来的土木与建筑工程 CAE 技术发展趋势，培养学生的创新能力。土木与建筑工程 CAE 课程各章节的学习重点如表 1 所示，可结合各章重点中进行作业专题的设置，综合考虑知识层面与科学方法论层面。例如，研究机场运维管理中 GIS 技术的应用，包括航班调度与运行监控、资源管理与维护、安全管理与应急响应、空间规划与规划决策等方面。再如，智能化技术是 CAE 系统中的热门技术之一，主要涉及人工智能、机器学习等方面的研究。学生可以开发一个 BP 神经网络程序、用 BP 神经网络解决一个土木工程中的实际问题、开发一个知识库和提出一种有效知识的提取算法等。该作业综合考量神经网络、自然语言处理、数据挖掘、知识图谱等知识点，培养学生驾驭人工神经网络的能力。

表 1 土木与建筑工程 CAE 课程各章节的学习重点

章节名称	各章学习重点	
	知识层面	科学方法论层面
CAE 系统的可视化技术	①了解工程建模技术的发展概况 ②掌握三维图形显示的关键技术 ③了解多维场的可视化实现方法 ④了解图像分析方法 ⑤了解轻量化技术	①三维图形平台的研发能力 1) 使用开源库读取和显示模型 2) 提升模型显示的真实感 3) 提升人机交互能力 ②图形处理软件的研发能力 1) 使用开源库读取和显示图像 2) 进行图像处理和图像分析 3) 开发独立的图像处理软件
CAE 系统的模型化技术	①了解信息标准体系 ②了解建筑信息模型 ③了解 BIM 技术的前沿应用 ④准确理解 BIM 技术的优势与发展中遇到的困难 ⑤了解 GIS 的概念及应用方向 ⑥了解 CIM 和智慧城市的发展	①BIM 的鉴别和应用能力 1) 从共享和协同理念理解 BIM 2) 了解和熟悉 BIM 标准 3) 应用 BIM 技术解决工程问题 ②模型化技术的研发应用能力 1) 深入理解 BIM 技术 2) 能应用 GIS 系统解决问题 3) 掌握 CIM 的发展方向
CAE 系统的离散化技术	①理解分布式存储原理与架构，了解并行计算基本概念与常用模型 ②正确理解前处理技术，掌握有限元求解与分析 ③仿真策略与 SDESA 算法	①离散化技术的应用能力 1) 如何将连续转化为离散 2) 如何将离散结果聚合 3) 看待问题的多重视角

CAE 系统的 虚拟化技术	①理解 VR 基本概念与原理，熟悉 VR 常用的软硬件开发技术 ②了解增强现实技术 ③了解混合现实技术 ④辨析 VR/AR/MR 技术	①虚拟化技术的研发应用能力 1) 掌握 3R 应用的开发 2) 了解 3R 技术的硬件原理，可以开发相应的软硬件模块
CAE 系统的 网络化技术	①掌握 HTML 页面开发技术，掌握动态网站开发技术 ②了解移动互联网的发展趋势 ③了解 Android 应用程序开发 ④了解云计算的基本概念 ⑤掌握云计算的三种服务模式 ⑥了解物联网的概念 ⑦了解物联网的四个关键技术 ⑧学习 Arduino 开发技术	①网络化技术的研发应用能力 1) 深入思考网络化技术在土木、建筑、海洋工程领域的应用 2) 网络化技术辅助工程管理 3) 云计算平台的合适选型 4) 自己搭建一个物联网系统 5) 软硬件开发能力
CAE 系统的 智能化技术	①了解人工智能系统特征和应用场景 ②掌握知识的计算机表示方法 ③了解大数据的概念和应用 ④正确理解大数据的特点 ⑤掌握 BP 神经网络模型结构和算法原理 ⑥了解 DNN 结构 ⑦理解 CNN 模型结构和算法实现 ⑧了解 RNN 结构	①让计算机理解人类的能力 1) 知识的表示 2) 知识的处理 3) 知识的应用 ②驾驭 ANN 的能力 1) 了解生物神经元的机理 2) 了解 ANN 的本质 3) 掌握 ANN 模型的选择

随着现代科技的不断发展和应用，CAE 相关技术已经成为现代土木工程的重要技术手段，土木与建筑工程 CAE 课程内容改革是必要且重要的。注重“新”状态对于土木与建筑工程 CAE 课程的意义重大，它不仅能够适应行业的需求和发展，提高教学质量和效果，还有助于促进土木工程教育的发展和提升。

（四）教学设计注重应用性和实践性

土木与建筑工程 CEA 课程的教学设计为培养强交叉人才提供了实践机会和交流平台。应用性和实践性工科专业属性的基本要求。这不仅体现了工科教育的特点和目标，也反映了社会对工程技术人才的需求。强调应用性和实践性的教学设计应该包括引入教学实践环节以及设计与之相适应的课程评估方式两方面。

首先，引入教学实践环节是实现教学设计应用性和实践性的重要举措。课程教学中可以引入“做”，通过完成章节小作业和小组大作业，帮助学生更好地理解 and 消化所学知识，形成课内学习和课外学习双轮驱动。土木与建筑工程 CAE 课程是小班教学，作业部分涉及“三维模型的可视化”、“BIM 模型的创建”、“图像去噪问题”“离散事件的模拟”、“虚拟场景的建立与浏览”等方面，学生可以针对基于三角形网格描述的实体模型，提出一个高效的碰撞检测算法，或者编写一个程序，实现用三角形或四边形为单元对任意多边形进行网格划分，或者通过 Matlab 或 Tensorflow 神经网络工具箱中的 BP 神经网络解决一个土木工程中的实际问题等。图 8 为作业部分展示，其中在《实体模型高效碰撞检测算法》

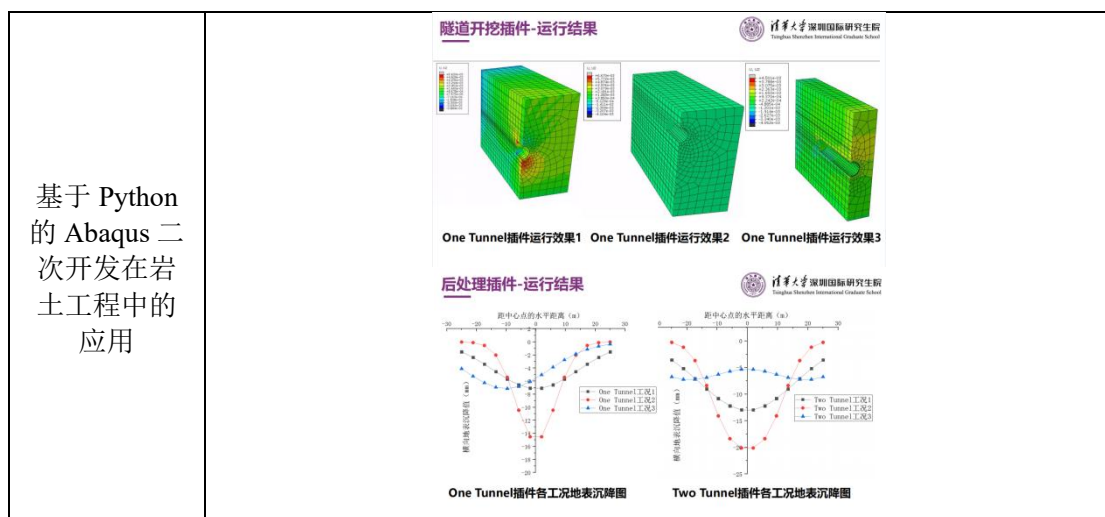


图 8 作业部分展示

其次，制定与之相适应的课程评估方式也是实现教学设计应用性和实践性的重要手段^[7]。为实现信息技术与工程的学科知识交叉，培养学生利用计算机来辅助实际工程的能力，土木与建筑工程 CAE 课程采用综合评估的考核方式，以检验学生所学知识的应用性和实践性。学生们可分成若干学习小组，每组 1~2 人。学生的考核内容分为课堂表现、小作业、大作业选题、大作业汇报和大作业报告五部分，考核内容包括大作业背景、目标和技术方案的完整性，工作量与完成度，以及现场展示效果等。对于大作业成绩评定，采用教师打分与学生互评相结合的方法。其中，教师从专业的角度对实验结果进行评分，可对学生在课题报告中的创新性工作适当加分，学生互评应根据研究课题过程中个人分工的完成情况进行，可对各阶段起到主导作用的部分学生予以加分。采用教师打分与学生互评相结合的方法对作业进行评定是一种好的评估方式，它可以保证评估的客观性和专业性，同时也可以激发学生的主动性和自我反思，促进学生之间的互动和交流，培养学生的综合素质和社交能力。

（五）重视教学团队建设

教学团队建设为培养强交叉人才提供了跨学科和跨领域的教学资源和专业指导。深圳国际院的海洋工程学科开展课程体系有的放矢的建设和改革，团队成员包括郑向远、陈胜利、李彬彬和李孙伟 4 名青年骨干教师，教授“海洋工程结构物的流体荷载”、“中国邻近海域水文及动力环境”、“船舶与海洋浮式结构物的静力学与耐波性”和“海洋工程与技术概论”课程，如图 9 所示。本体系就是尝试将它们进行水文气象 + 工程应用 + 力学原理 + 信息智能的有机融合，消除课程之间的割裂，打通隔阂，梳理和连接各课程所涉知识在海洋工程中的脉络。本教改项目的执行过程中将落实到海洋风机上，它成为五门课程之间穿针引线的一个工程载体。其中涉及土木与建筑工程 CAE 课程教学内容中的数字孪生技术可应用于双船浮托安装仿真，为船舶的设计提供反馈，为风机设备的安装过

程提供预演、动态监测与实时分析，保障全新技术架构下风机安装过程的安全性和可靠性。通过教学促科研的方式进行教学团队建设，可以提高教学质量和水平，促进交叉学科的发展和进步，为培养交叉学科高级专业人才打下坚实的基础^[7]。

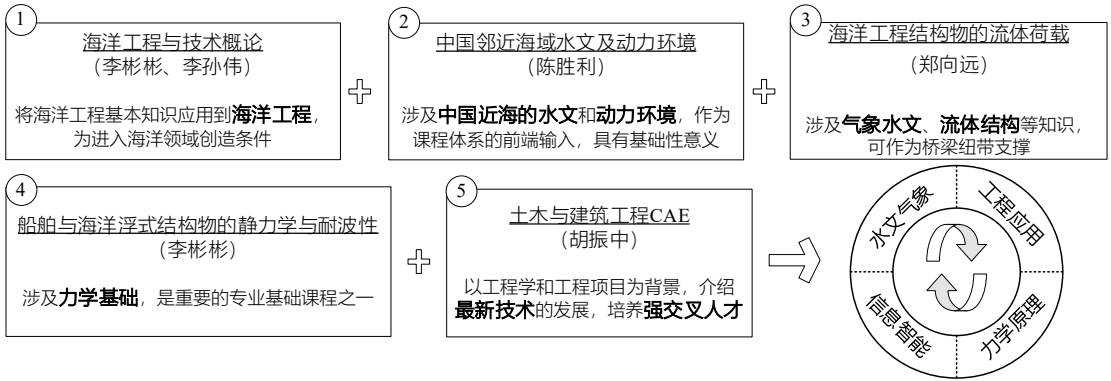


图 9 海洋工程学科教学团队的建设

笔者以科技创新实现建制化、成体系服务国家和区域战略需求为团队建设和科研攻关的首要目标，践行面向重大问题做“有组织科研”，推动学科“大交叉”、组建“大团队”开展科技攻关的科研模式，组建了一个结构优化、年富力强的科研团队，体现了骨干成员面向国家重大战略方向，重应用基础研究，强学科交叉综合，优势互补、协同创新的团队文化创新理念。其中，笔者牵头组建了广东省粤港澳研究团队，该团队以张建民院士为顾问，包括于言滔、李孙伟、陈胜利、李彬彬和景路 5 名教研系列青年骨干教师，如图 10 所示。团队将以海洋工程数字孪生为切入点，发展新型的海洋结构物设计、建造与维护技术体系，以及新一代海洋工程数值模拟与数字防灾理论方法，为相关规范标准的编制和重大工程实践提供科学技术支撑。面向国家的战略发展方向，深化合作基础，创新合作机制，形成团队合力，团结协作、联合攻关，高质量地完成科研项目。将高水平的研究成果与教学活动结合，将研发的新技术、新方法示范应用到课程设计中，实现教学和科研的良性互动，促进教学团队建设的开展^[8]。

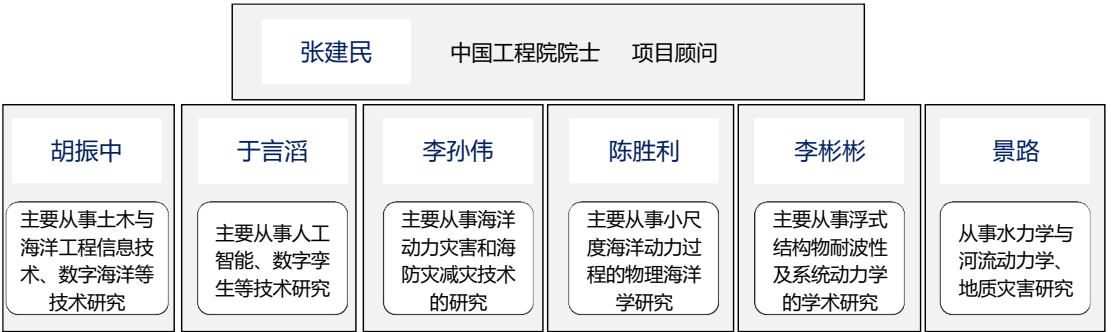


图 10 粤港澳团队核心成员

以上就是土木与建筑工程 CAE 课程改革基本经验分享, 还可通过“培植”大工程观^[9]、并入现代科技、课程融入思政^[10]等措施, 实现对土木与建筑工程 CAE 课程的更新升级, 为传统工科专业的改造升级提供一种有益思路。

四、结语

新时期的土木与建筑工程行业面临着各种新技术、新方法和新理念的不断涌现, 以及工程项目的复杂性和多样性的逐步提高。在这样的环境下, 传统的土木与建筑工程教育体系已经难以满足社会对于高素质、具备强交叉背景知识、具备跨领域协同创新能力的新型人才的需求。本文以课程的发展与改革为基础, 分享了课程建设的基本经验。在课程建设的过程中, 教学理念的制定、教材建设的创新、课程内容的更新、教学设计的应用和实践以及教学团队建设的重视都是必不可少的关键环节。在 2021 年秋季学期, 笔者讲授的“土木与建筑工程 CAE”课程共有 15 位同学修读, 并进行了有效评价。该课程类别为理论类, 全校同类同规模课程共 415 门, 课评前 5%。获全校表彰的“我会推荐这位老师”指标前 5% 多次。实践证明, 课程改革成效显著, 学生解决复杂工程能力得以培养。

面向新时期强交叉人才培养的土木与建筑工程 CAE 课程改革是当今时代发展的需要, 也是教育改革的重要任务。只有不断进行改革和创新, 才能够培养出更多具有交叉学科背景的高级专业人才, 为推动土木与建筑工程学科的发展和进步提供有力的保障。

参考文献

- [1] 林健.新工科专业课程体系改革和课程建设[J].高等工程教育研究,2020(01):1-13+24.
- [2] 程文浩.浅析案例教学在公共管理教育中的应用[J].公共管理评论,2011,10(01):135-144.
- [3] 习近平.高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告(2022 年 10 月 16 日)[N].人民日报,2022-10-26(1).
- [4] 吴岩.教学改革改到深处是课程,改到痛处是教师,改到实处是教材[EB/OL].[2022-01-30].<https://mp.weixin.qq.com/s/u18H89iT3-C0oe5IzdAVOA>.
- [5] 纪晓东,钱稼茹,赵作周.清华大学高层建筑结构精品课程及教材建设[J].高等建筑教育,2023,32(01):88-95.
- [6] 张晓洋,胡振中.面向结构有限元分析的模型转换方法研究[J].工程力学,2017,34(06):120-127.

- [7] 王传毅,辜刘建.加强高校教师队伍建设为现代化建设提供坚实的人才支撑[J].中国高教研究,2023,No.354(02):16-23.DOI:10.16298/j.cnki.1004-3667.2023.02.03.
- [8] 林健.未来技术学院建设:教师队伍建设和未来技术研发[J].清华大学教育研究,2021,42(03):70-76.DOI:10.14138/j.1001-4519.2021.03.007007.
- [9] 李辉.新工科教育改革视界下的教材建设思考[J].现代教育管理,2019(10):102-106.DOI:10.16697/j.cnki.xdjygl.2019.10.017.
- [10] 李莉,彭妙娟.新工科背景下面向土木工程研究生的教学改革探索——以“高等建筑材料学”课程为例[J].教育教学论坛,2023(08):92-95.

Development of Civil and Architectural Engineering CAE Courses for Cultivating Strong Cross-Disciplinary Talents in the New Era

Hu Zhenzhong¹, Zhu Shiyi¹, Lin Jiarui²

(1. *Institute for Ocean Engineering, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518000, China;*

2. *School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: In the current rapidly developing economic and technological environment, the civil and architectural engineering industry is facing new challenges and opportunities. To meet the demands of the new era, cultivating talents with interdisciplinary knowledge and comprehensive abilities has become an important direction for education reform in this industry. This article aims to explore how to achieve the goal of cultivating strong cross-disciplinary talents in the new era through the construction of CAE courses.

Firstly, this article analyzes the development status and demand for strong cross-disciplinary talents in the new era. Secondly, it analyzes the development process and positioning of civil and architectural engineering CAE courses. Finally, this article shares the basic experience of development of civil and architectural engineering CAE courses for cultivating strong cross-disciplinary talents in the new era, including: (1) teaching philosophy that embodies comprehensiveness and individualization; (2) innovative structural system in course material construction; (3) course content that emphasizes the "new" state; (4) teaching design that emphasizes applicability and practicality; (5) emphasis on building a strong teaching team.

Key words: new period; strong cross-disciplinary talents; civil and architectural Engineering CAE; course development