# 产教融合背景下应用型本科院校一流课程建设研究

## ——以唐山学院“建筑给水排水工程”课程为例

张　磊[1]，刘宇丽[1]，果凤来[2]，王伟艳[3]

（1. 唐山学院 土木工程学院，河北 唐山 063000；2. 中建工程产业技术研究院有限公司，北京 101300；
3. 河北易拓工程设计有限公司，河北 唐山 063000）

**摘要：**“建筑给水排水工程”是一门紧密对接行业需求、以培养较强实践能力和较高职业素养的人才为目标的课程。唐山学院在该课程的建设中，以产教融合为依托，立足高素质应用型人才培养目标，对标“两性一度”一流课程要求，从明确三维课程目标、打造五元融合的课程内容、优化教学方法、构建科学的考评体系等方面进行统筹推进，不仅有效提高了教学效果，而且实现了学生理论知识、实践能力和职业素养的全面提升。

**关键词：**产教融合；一流课程；唐山学院；建筑给水排水工程

**中图分类号：**G642.42　**文献标志码：**A　**文章编号：**1672－349X(2025)06－0091－09

**DOI：**10.16160/j.cnki.tsxyxb.2025.06.013

# Research on the Construction of First-Class Course in Application-Oriented Undergraduate Institutions Under Industry-Education Integration: A Case Study of “Building Water Supply and Drainage Engineering” in Tangshan University

ZHANG Lei[1], LIU Yuli[1], GUO Fenglai[2], WANG Weiyan[3]

(1. School of Civil Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China;
2. China State Construction Engineering Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 101300, China;
3. Hebei Yituo Engineering Design Co., Ltd, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** “Building Water Supply and Drainage Engineering” is a course closely aligned with industry needs, aimed at cultivating talents with strong practical abilities and professional qualities. Based on industry-education integration and the object of cultivating high-quality application-oriented talents, and guided by the “high-order, innovative and challenging” first-class course standards, Tangshan University promotes course construction through clear three-dimensional goals, five-element content integration, optimized teaching methods, and a scientific evaluation system. This approach has effectively improved teaching outcomes and fostered comprehensive development in theoretical knowledge, practical skills,

**收稿日期：**2024－12－01

**基金项目：**唐山市教育科学研究“十四五”规划课题立项项目(LX2023139)

**作者简介：**张磊(1986—)，女，河北玉田人，副教授，硕士，研究方向为给排水专业课程建设；
刘宇丽(1977—)，女，河北唐山人，讲师，硕士，研究方向为教学管理及课程建设。

and professional ethics among students.

**Key Words**: industry-education integration; first-class course; Tangshan University; Building Water Supply and Drainage Engineering

## 0 引言

2017 年国务院办公厅印发的《关于深化产教融合的若干意见》指出,产教融合对于解决人才供给和产业需求“两张皮”问题以及全面提高教育质量具有重要意义[1]。2019 年时任教育部高教司司长吴岩在《融合发展协同攻坚——以产教融合推进“质量革命”》主旨报告中指出,产教融合是提高人才培养质量的重要途径,打好“质量体系”攻坚战要立标准、树“金课”标杆、进行一流课程建设[2]。因此,产教融合既是国家推动教育改革与产业发展深度对接的核心导向,也是高校打造一流课程、提升人才培养适配性的关键路径。

课程是人才培养的最基本单元,课程质量直接决定人才培养质量[3]。唐山学院作为一所地方应用型本科高校,在产教融合背景下,始终积极探索一流课程建设路径,其中“建筑给水排水工程”(以下简称“建水”)即是其重点打造的一流课程之一。“建水”是给排水科学与工程专业的核心课程,旨在面向工程一线培养能够掌握建筑工程中给水、排水、消防、热水等方面的实践技能并具备解决相关复杂工程问题能力的应用型人才。自 2006 年开设以来,“建水”课程逐步发展成为校级一流课程、校级思政示范课程、河北省精品在线开放课程,并入选了河北省一流本科课程(线上线下混合式);并且,在近几年的课程建设中,该课程把握产教融合主基调和一流课程建设要求,以支撑毕业要求为目标,进行了系统打造,收到了良好的效果。本文拟详细介绍在产教融合背景下唐山学院“建水”一流课程的建设过程,旨在为地方应用型本科高校的课程建设提供有益参考。

## 1 立足行业需求,明确三维课程目标

随着建筑行业的规模化发展,社会对学生的工程实践能力提出了更高要求。对于应用型高校而言,若其毕业生能够在就业后快速参与工程项目研究,实现理论知识与实际工程应用的无缝衔接,对于提升学校及学生的竞争力至关重要。基于此,“建水”课程以行业需求为导向,紧密围绕人才培养总目标,通过校企合作共同明确了知识、能力和素质三位一体的课程目标,该目标可全面支撑毕业要求中的 3 个关键指标点(课程建设规划见图 1)。在具体的教学实施中,该课程始终坚持以学生为中心、以成果产出为导向,将线上教学、线下实践和过程性考核深度融入整个教学环节。这一过程突破了传统偏重理论知识的教学模式,从而转向对学生高阶工程实践能力的培养。同时,该课程通过分析考核结果精准检测课程目标的达成度,并据此持续优化教学内容和方法,最终致力于打造具备高阶性、创新性与挑战度的“两性一度”的一流课程。

## 2 基于“两性一度”,构建五元融合的课程内容

在产教融合背景下,课程内容的科学构建至关重要,其质量直接关系到学生能否满足工作岗位对其核心素养和能力提出的新要求[4]。对于一流课程而言,其教学内容的构建需围绕三大核心方向展开:首先,不仅应涵盖教材中的重点知识领域,还要紧密对接产业发展实际,紧跟行业前沿动态,通过及时“追新”确保时效性与实用性[5];其次,需注重引入实际案例,推动理论知识与实践应用的有机结合,以“强能”为目标提升学生的岗位适配能力;最后,应将思政教育融入内容体系,以“启智”为导向引导学生树立正确价值观,最终实现对学生知识、能力、素质的全面培养。

在“建水”课程设计中,始终以“两性一度”为核心标准,以学生的职业能力培养为根本任务,构建了“岗－课－赛－证－思”五元融合的

课程内容（见图 2）。具体而言，一方面，课程以真实工程中的建筑给排水任务演练为纽带，对接设计、施工等岗位工作能力要求，将课程内容整合为给水、排水、消防、热水等模块化教学单元，并依托国家标准和行业规范在各模块中嵌入实战演练任务，从而强化课程的挑战度；另一方面，课程紧密结合绿色建筑、智慧水务等行业新业态，在课程内容中植入建筑给排水工程领域的新设备、新技术、新方法和新标准，并进一步融入相关竞赛要求和职业证书考核要点，实现“课赛融合”与“课证融通”，有效提升课程的创新性。此外，课程还充分挖掘了本地工程案例的教育价值，通过引入唐山市科技馆和唐山市规划展览馆的“建水”系统等知名工程案例开展启智教学，再结合企业教师的工作感悟和职业规范进行引导，最终实现专业知识传授、职业技能培养与价值塑造的有机统一，从而实现课程的高阶性。

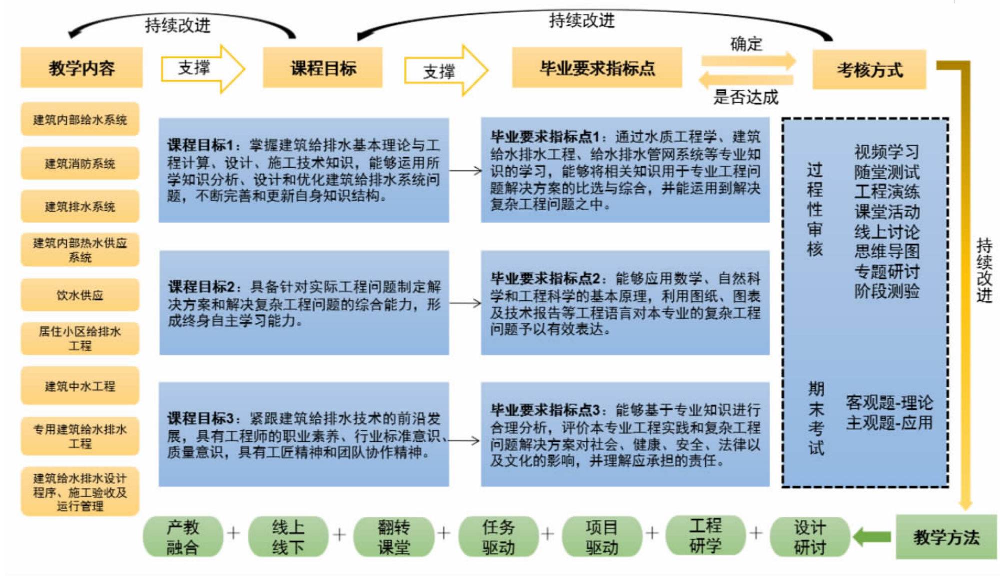



图 1　课程建设规划

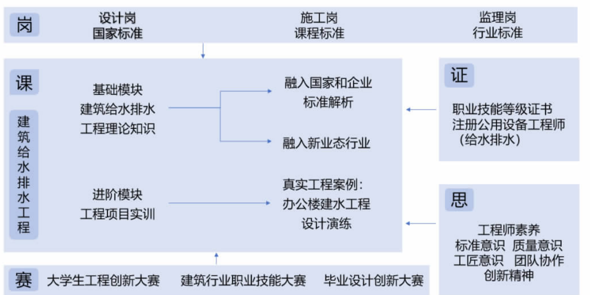



图 2　五元融合的课程内容

## 3　依托校企合作，优化教学方法

在产教融合背景下，针对学生实践能力提升需求大的特点，“建水”课程在教学过程中运用线上线下混合式、工程引导式等多样化教学方法，针对性地开展案例式、启发式、研讨式教学活动，从而打破了传统课堂的固有模式，实现了线上与线下教学的深度融合、企业资源与高校教学的有机联动，最终，不仅有效拓宽了学生的专业视野，更提升了其工程思维和综合实践能力。

### 3.1　开展线上线下混合式教学

校企双方共同为课程搭建了数字化资源，包括微课、动画视频、重难点答疑视频、课件、分级题库、国家标准和行业准则资料库、建筑工程案例库等。教学过程中利用这些资源、依托网络课堂，开展了全新的线上线下混合式教学，即校内教师负责线上指导和线下课堂系统讲授，企业教师参与线下授课和指导。

课前启化阶段（借助网络平台）：依托线上课程教学资源，任课教师发布自学和测试任务，引导学生自主学习和自我评估，进行“导学”和“促学”[6]。

课中内化阶段（采用“实体课堂＋网络平台”结合模式）：为了解决大班授课难以适配不

同层次学生的问题，首先，依据学业成绩和学生意愿，将班级划分成翻转班和平行班，且采用动态调整机制，即参考阶段测评成绩进行两次班级成员调整，确保学生在最适合自己的班级学习。其次，对两类班级进行差异化教学，在平行班以教师为主导，对重难点内容进行讲解和梳理，借助网络平台发起随堂测试与主题讨论，开展互动式教学，引导学生积极参与和反馈，鼓励学生应用所学知识进行工程案例剖析；在翻转班以教师为引导，进行启发式、研讨式教学，针对给水方式、排水管系中水气流动规律等重点且具有一定挑战度的内容设计研讨专题，组织学生以小组形式汇报学习成果，教师依托平台工具组织互评与深化讨论。此外，面向全体学生开展“工程师进课堂”活动，邀请唐山市规划建筑设计研究院有限公司和河北易拓工程设计有限公司的工程师进行辅助教学，他们会从具体工程问题出发解析实际工程案例、讲解市场动态和行业前沿，为课程提供真实的工程视角。总之，通过案例分析、汇报研讨、工程研读等提升式教学形式，深化学生对专业知识的理解，增强他们的专业认同感，从而达成高阶教学目标。

课后强化阶段(采用“课外＋网络平台”模式)：依据学生水平，校企教师合作挑选难度等级适合的真实工程案例，布置建筑给排水工程演练任务，以此引导学生深度思考，从而构建工程思维，实现理论知识与岗位技能的融会贯通[7]。同时，该阶段利用网络平台开展阶段测试和进行学生学习情况调查，以实时掌握学生的学习动态。此外，还通过鼓励学生参加竞赛和考取技能证书，进一步提升其专业实践能力。

课程实施的课前、课中、课后三个阶段均注重思政元素的融入，并各有侧重地培养学生的能力。课前启化阶段，培养学生掌握自学方法和提升自我评估能力；课中内化阶段，通过“课程导入－原理认知－案例分析－总结提炼”四个步骤，层层递进，强化学生的自主探究能力，并同步培养其工程思维、逻辑思维和工匠精神，增强其协同合作和知识整合能力；课后强化阶段，通过工程训练增强学生的工程责任意识和职业素养，同时培养其合理分析问题和综合评价的能力。混合式教学设计如图 3 所示。

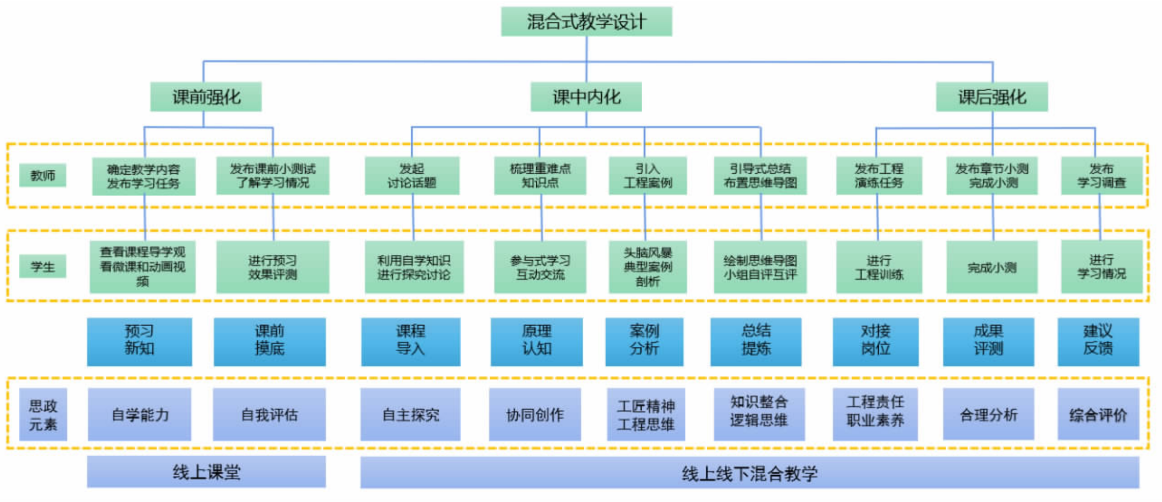



**图 3　混合式教学设计**

### 3.2　开展工程引导式教学

在传统“建水”课程中，理论学习和工程实践常处于割裂状态[8]，这在一定程度上阻碍了学生对理论知识和实践知识的有效融合。唐山学院在该课程授课时打破了此局限：一方面将课堂学习、工程研学、工程训练、专题研讨穿插结合，以实际工程为导引，开展“构思－设计－实施－运行”四环节教学活动；另一方面，以实际工程项目为基础，组织学生以 3－4 人小组协作形式进行工程演练，教师根据理论知识学习

进度布置工程演练任务，学生分模块完成项目内给水、排水、消防和热水工程的方案比选、工程计算和图纸设计，实现理论与实践的紧密衔接，并以翻转课堂形式让各小组展示项目成果，并针对工程中遇到的问题进行专题研讨。总之，在整个“建水”课程的学习过程中，学生借助工程实践完成对各知识模块设计、施工等能力的训练，通过小组协作和专题研讨，学生的沟通、知识整合、探索及表达等能力得到提升，从而实现理论知识和工作技能的有效融合统一。表 1 是建筑消防工程知识模块教学活动的实施过程。

**表 1　建筑消防工程知识模块教学活动的实施过程**

| 主体 | 构思 | 设计 | 实施 | 运行 |
|---|---|---|---|---|
| 企业教师 | 带领学生进行办公楼消火栓系统的实地调研 | 引导学生进行工程项目的情景分析 | 对工程实际问题进行解析 | 成果分析与点评 |
| 校内教师 | 布置消火栓系统设计任务 | 引导学生把与设计任务相关的知识点拆解为可操作的设计步骤 | 对理论知识进行解析 | 成果分析与总结 |
| 学生 | 通过参观加强理论与实践之间的联系，使知识内化，对设计任务进行分析与思考 | 对消火栓系统设计方案进行论证与比选，确定管道、设备等的布置方案 | 查阅相应国家技术标准，进行消火栓系统设计表达，完成水力计算 | 成果展示、研讨交流 |

## 4　依据课程目标达成要求，构建科学的课程考评体系

依据课程目标达成要求，由校内教师和企业教师共同构建多维度、可量化、重过程的课程考评体系（见表 2），细化考核内容和指标，合理支撑课程目标，将课程考评重点由原来学生对理论知识的掌握情况转变为学生对理论知识和实践能力的综合提升情况。

**表 2　课程考评体系**

| 考评形式 | 考核内容 | | 考核指标 | 评价主体 |
|---|---|---|---|---|
| 过程考核（50%） | 课前评价（6%） | | 线上资源自学情况（3%） | 学习通评价 |
| | | | 线上课前自测情况（3%） | 学习通评价 |
| | 课中评价（27%） | 翻转班 | 课内讨论参与情况（5%） | 校内教师＋学习通评价 |
| | | | 案例分析参与情况（3%） | 校内教师评价 |
| | | | 思维导图完成情况（3%） | 校内教师评价＋学生互评 |
| | | | 随堂测试完成情况（5%） | 学习通评价 |
| | | | 理论知识专题研讨汇报发言情况（6%） | 校内教师评价＋学生互评 |
| | | | 工程演练任务专题研讨汇报发言情况（5%） | 校内教师＋企业教师评价＋学生互评 |
| | | 平行班 | 课内讨论参与情况（5%） | 校内教师评价 |
| | | | 案例分析参与情况（7%） | 校内教师评价 |
| | | | 思维导图完成情况（3%） | 校内教师评价＋学生互评 |
| | | | 随堂测试完成情况（5%） | 学习通评价 |
| | | | 工程演练任务专题研讨汇报发言情况（7%） | 校内教师＋企业教师评价＋学生互评 |
| | 课后评估（17%） | | 工程演练任务完成情况（12%） | 校内教师＋企业教师评价 |
| | | | 阶段测验完成情况（5%） | 校内教师＋学习通评价 |
| 期末考核（50%） | 期末考试（50%） | | 闭卷：理论知识掌握情况（25%） | 校内教师评价 |
| | | | 开卷：知识应用能力和综合设计能力（25%） | 校内教师评价 |

注：出勤按照只减分不加分执行，单次无理由缺勤从综合成绩中减 0.5 分。

### 4.1　课程考评形式

课程考评形式分为过程考核和期末考核。过程考核覆盖课前、课中和课后三个阶段。课前借助学习通平台，动态记录学生自学效果，并及时进行评价反馈。课中依据教学目标反向设计教学活动，通过“线上与线下评价相结合、校企评价相结合、师生评价相结合”的方式，结合案例分析互动情况、专题研讨汇报发言情况等，多角度评估学生能力提升效果；同时，依据翻转班和平行班不同的教学活动安排设置差异化的考核指标，提高考核方式的针对性，发挥督促作用。课后安排工程演练任务和阶段测验，其一，对工程演练任务从工作表现、方案立意、技术标准理解运用、图面成果四个方面进行评价，由校企教师从不同角度共同打分（取平均值）作为考评结果——校内教师侧重考查学生的工作态度、团队协作状况和理论知识转化效果，企业教师侧重考查学生对行业标准的理解度、图面表达规范性和完整性、工程解决方案的可行性和实用性；其二，课程的阶段测验共安排两次，用于评估学生的阶段学习效果，为后续授课方案的优化调整提供依据。期末考核包括理论知识考核和能力考核两方面，其中，理论知识考核采用闭卷形式，其题型包括基础题、运用题和提高题；能力考核借鉴全国注册公用设备工程师（给排水）职业证书专业考试的考核方式，采用开卷形式，重点考查学生的知识应用能力和综合设计能力。

### 4.2　考核方式对课程目标的支撑情况

课程考核方式支撑 3 个课程目标，各目标对应差异化考核内容和方式（具体见图 4）：课程目标 1 聚焦考察学生理论知识的掌握程度，课程目标 2 以对学生能力的考核为主，课程目标 3 侧重评估学生的职业素养。

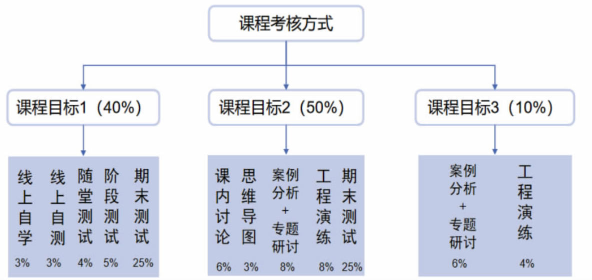



**图 4　考核方式对课程目标的支撑**

课程目标 1 的考核贯穿“建水”学习全程：借助线上平台追踪学生的自学动态，针对课堂知识要点安排随堂测试，以实时评价其学习效果；在消防和热水两个知识模块学习结束后分别设置阶段测验，均利用学习通已建的分级题库在线上开展，命题时，依据班级人数设定试卷套数，从对应知识点的分级题库中随机选题，以保证试卷难度相当，发放试卷时，设置题目、选项乱序，避免学生相互抄袭；期末考试的试卷主要以选择、填空、判断等客观题形式对理论知识进行闭卷测评。

课程目标 2 的考核围绕学生的能力提升展开：针对工程问题开展线上线下相结合的课程讨论，讨论环节采取积分奖励制，线上将优质讨论内容设为精华帖并赋分，线下设置问答、抢答等环节，依据学生表现对应赋分，学期末以讨论环节最高分学生成绩设置满分为基准，其他同学的分数按比例进行折算；设置思维导图绘制任务，通过小组自评、互评考核学生对知识的提炼总结能力和思辨能力；在案例分析、专题研讨和工程演练等环节，重点考核学生工程思维、问题解决、制定方案等能力，其中对于工程演练任务，要求学生既要完成绘图和计算，又要进行答辩和汇报，并接受来自校内教师、企业教师和其他学生的综合评价；期末的能力考核主要以案例为载体，侧重对学生知识和行业标准的应用能力以及综合设计能力的考察。

课程目标 3 的考核聚焦学生职业素养的培养效果：结合给排水专业高级工程技术人才的培养定位，在案例分析、专题研讨和工程演练等环节要求学生以小组协作形式对实际工程案例进行剖析、汇报、演练，使其展开进阶式思考和探索，然后通过校企等多方评价，帮助学生在面对复杂环境和多变工程挑战时能够坚定自信，逐步形成契合行企岗位需求的职业素养。

## 5　“定量+定性”分析课程目标达成情况

课程结束后，教师通过两种方式对“建水”课程目标达成情况进行分析，一是定量计算课

程目标达成值，二是结合问卷调查从学生视角进行定性分析。

对最近三期(2020 级、2021 级和 2022 级)学生的课程目标达成情况进行定量计算(见图 5)，结果显示均较理想：2020 级 3 个课程目标达成值依次为 0.86，0.77，0.78；2021 级依次为 0.87，0.79，0.87；2022 级依次为 0.87，0.80，0.88。课程目标 1 达成值基本稳定，说明学生对"建水"知识掌握牢固，具备扎实的理论基础。课程目标 2 达成值相对偏低，反映出在培养学生解决复杂工程问题能力方面仍有提升空间，且如何将理论知识有效转化为实际工程能力是应用型人才培养中存在的普遍挑战，但对比 3 个年级，该目标达成值呈稳中有升趋势，说明工程研学、工程演练、与企业教师面对面研讨等环节已帮助学生形成了全面的工程思维、积累了丰富的工程经验，使其在实际项目中能够识别关键要素、制定解决方案。对于课程目标 3 达成值，2022 级较 2020 级显著提高，说明对学生职业素养塑造成效明显、他们的团队协作能力得到了很好的锻炼。

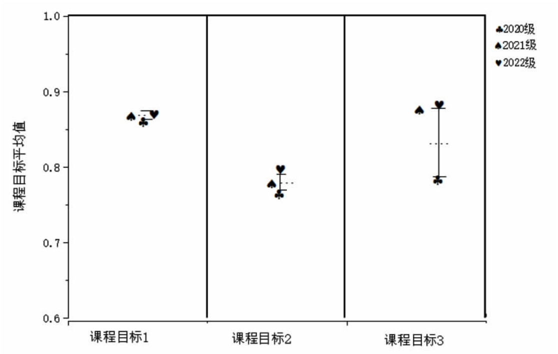



**图 5　2020—2022 级课程目标达成值对比**

2020—2022 级学生个体课程目标达成值分布如图 6 所示，从中可知，课程目标 1 和课程目标 3 的达成值较为集中，说明学生在知识掌握程度和职业素养提升这两方面的表现较为接近；课程目标 2 的达成值偏分散，说明学生在知识综合应用能力上还存在个体差异，但对比不同年级的数据，该达成值正逐渐向集中趋势发展，这既是今后教学的重要关注点，也是课程高阶性的重要体现。

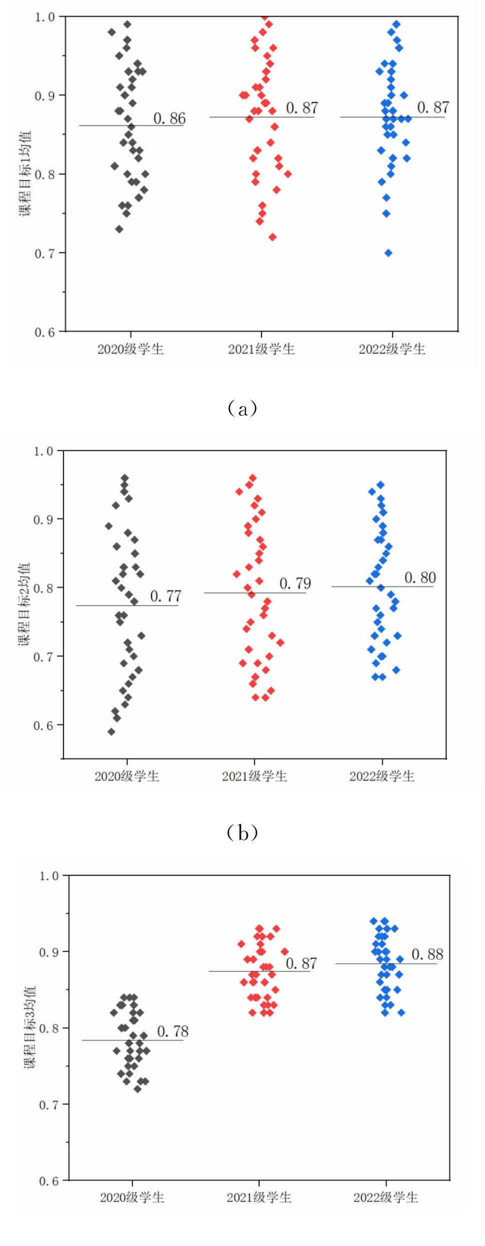
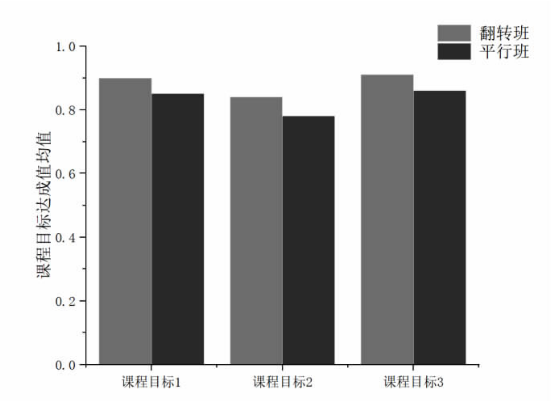


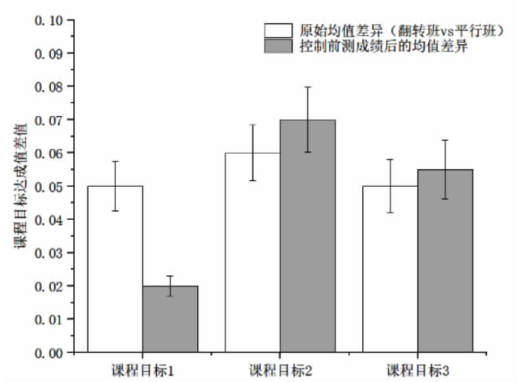

**图 6　2020—2022 级学生个体课程目标达成值分布**

为了验证"大班讲授＋小班翻转"分层教学模式的有效性，对 2022 级翻转班($n$=35)与平行班($n$=65)的 3 个课程目标达成值展开定量分析，结果如图 7(a)所示。从图 7(a)中可以发现，翻转班在课程目标 1(0.90vs0.85)、课程目标 2(0.84vs0.78)和课程目标 3(0.91vs 0.86)上的达成值均显著优于平行班。需注意的是，分班时存在学业成绩的初始差异(翻转班82.9%的

学生位于年级前 40%)，因此为了排除该因素的干扰，进一步进行协方差分析(ANCOVA)，结果如图 7(b)所示。结果显示，在控制学生原有学业水平的影响后，翻转课堂这种教学模式对课程目标达成值仍具有显著促进作用，这充分说明翻转课堂可有效提升学生的学习效果。



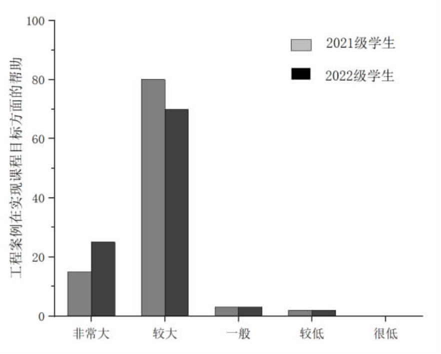

(a)



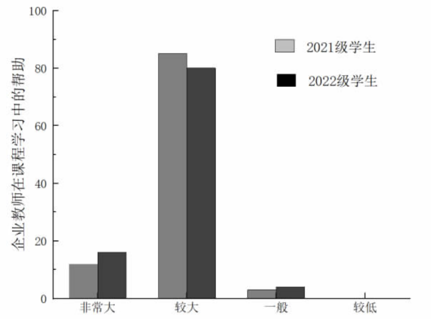

(b)

**图 7　2022 级学生翻转班一平行班课程目标达成值对比**

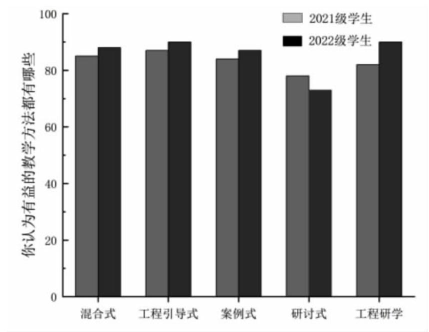
对最近两期(2021 级、2022 级)学生发放调查问卷，以定性分析“建水”课程目标达成情况和学生对该课程的感受，结果如图 8 所示。结果表明，95%以上的学生认为工程案例和企业教师在达成课程目标方面帮助大，且多数学生认为混合式、工程引导式、案例式、研讨式和工程研学等教学方法的教学效果较好，而且 70%以上的学生认为，通过该课程的学习自己在自主学习、工程问题分析和解决、知识综合应用以及团队协作方面的能力得到了提升，这与定量分析结果基本吻合。



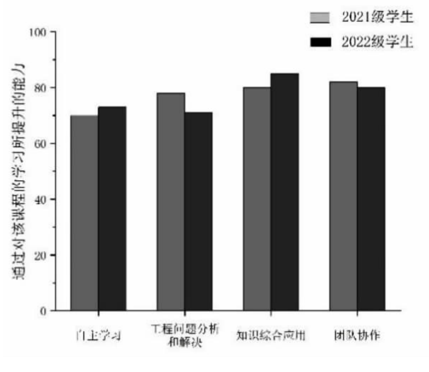

(a)




(b)




(c)




(d)

**图 8　课程问卷调查统计结果**

## 6　结语

作为地方应用型本科高校，唐山学院在“建水”课程建设中不断探索，立足行业需求和人才

培养目标，明确课程目标、重构课程内容、优化教学方法，并推动学生与企业教师深度交流，使之接触实际工程并开展工程锻炼，从而有效激发了学生的学习积极性，提升了其岗位技能和职业竞争力，促进其成为合格的高级工程技术人才。总之，这一课程建设模式不仅有效破解了传统课程与行业需求脱节的问题，实现了教学效果与学生岗位技能、职业素养的同步提升，更印证了产教融合与一流课程建设同向同行的可行性，为同类院校深化课程改革、培养高素质应用型人才提供了实操性强的参考范式。

诚然在“建水”教学实践中仍存在一些挑战，一是翻转班与平行班的学生在知识应用上还存在一定差异，二是学生处理复杂工程问题的能力还有待加强。因此，在未来教学中会对不同层次的学生持续加强针对性教学，并继续优化教学方法和内容，以便进一步提升学生的知识应用能力以及解决复杂工程问题的能力。

## 参考文献：

[1] 国务院办公厅. 关于深化产教融合的若干意见［EB/OL］.（2017-12-19）［2024-11-02］. https://www.gov.cn/zhengce/content/2017-12/19/content_5248564.htm.

[2] 吴岩. 融合发展协同攻坚：以产教融合推进“质量革命”［R/OL］.（2019-11-30）［2024-11-02］. http://k.sina.com.cn/article_2613324761_9bc42bd902000pwsk.html.

[3] 高品，薛罡，刘振鸿，等. 工程化教育背景下“建筑给水排水工程”课程教学改革与实践［J］. 东华大学学报（社会科学版），2019，19(2)：191－195.

[4] 贾海燕，周典. 产教融合视域下“岗课赛证思”五元融合的课程教学改革与实践：以道路工程施工课程为例［J］. 黄冈职业技术学院学报，2024，26(4)：31－36.

[5] 刘志峰，马颖忆，张启菊，等. “产教融合”应用型本科高校一流本科课程建设的应然之路：基于《建筑设计Ⅳ》的建设探讨［J］. 汉江师范学院学报，2023，43(4)：115－120.

[6] 马力，魏守凤，段然，等. 项目引导式教学在“园林设计”课程中的探索与实践［J］. 宁波工程学院学报，2021，33(1)：95－100.

[7] 王倩倩，于竹青，胡秀兰. 无机非金属材料工学课程科产教融合教学改革探索［J］. 高教学刊，2024(29)：152－155.

[8] 黄心怡，陈艳，吴轶群. 产教融合背景下的“电气安全技术”课程改革与实践［J］. 科技风，2024(31)：17－19.

（责任编校：李秀荣）

（上接第 11 页）

[5] 周宇杭. 应力加载作用下的石灰石物料破碎特性研究［D］. 南京：东南大学，2022.

[6] ROSENKRANZ S, BREITUNG-FAES S, KWADE A. Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills［J］. Powder technology, 2011, 212(1)：224－230.

[7] 杨明坤. 数字化落锤冲击试验机改进设计［D］. 重庆：重庆大学，2017.

[8] 刘金铭，张建卓，潘一山，等. 高速冲击试验机设计与结构件冲击拉压试验研究［J］. 辽宁工程技术大学学报（自然科学版），2019，38(3)：216－223.

[9] 胡育齐. 冲击式破碎机单颗粒物料累积损伤破碎行为研究［D］. 贵阳：贵州大学，2023.

[10] NADPLSKI S, KLEIN B, GONG D, et al. Development and application of an energy benchmarking model for mineral comminution［C］//The 6th International Conference on Semi-Autogenous and High Pressure Grinding Technology, Perth, Australia, 2015：453－456.

[11] 邓琪昌. 几种岩石类材料破碎特性及能耗研究［D］. 沈阳：沈阳工业大学，2023.

[12] 秦大同，谢里阳. 现代机械设计手册［M］. 2 版. 北京：化学工业出版社，2019：1153－1154.

[13] 周炬，苏金英. ANSYS Workbench 有限元分析实例详解（动力学）［M］. 北京：人民邮电出版社，2024：42－48.

（责任编校：白丽娟）