

基于“能力—知识—课程”矩阵的机械设计课程群构建与教学实践

熊 敏, 丁晓红, 李天箭, 钱 炜

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对机械工程传统知识导向型课程设置易形成“知识孤岛”, 导致学生机械设计能力不足的问题, 通过构建“能力—知识—课程”矩阵, 建立机械设计课程群架构, 并开展教学改革实践, 探索提升学生机械设计能力的教学模式。以理论类课程为支撑, 以实践类课程为载体, 促进学生“有知识—用知识—创新知识”的机械设计能力递升。改革教学方法, 开展“线上自主学习, 线下交流讨论, 课后项目实践”的教学实践, 并引入问题导向、案例教学的机械工程顶峰体验课程。机械设计课程群形成合力, 全面提升学生从知识的“抽象”到机械装备“具象”的双向演绎能力, “做”“学”深度结合, 使学生能主动将知识转化为能力, 取得良好的教学改革效果。

关键词: 专业核心能力; 课程群架构; 机械设计; 线上线下教学; 顶峰体验课程

中图分类号: G 642.0

文献标志码: A

文章编号: 1009-895X(2023)01-0088-07

DOI: 10.13256/j.cnki.jusst.sse.2023.01.015

Construction and Teaching Practice of Mechanical Design Curriculums Based on “Ability-Knowledge-Course” Matrix

XIONG Min, DING Xiaohong, LI Tianjian, QIAN Wei

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Since the traditional curriculum is easy to form a “knowledge island”, resulting in student non-proficiency in mechanical design, the “Ability-Knowledge-Course” matrix is constructed, and the framework of mechanical design curriculums is established. Then the teaching reform practice is carried out and the teaching mode to improve students’ mechanical design ability is explored. With relevant theoretical courses as the support and practical courses as the carrier, the students’ mechanical design ability of “having knowledge-using knowledge-innovating knowledge” is promoted step by step. Teaching methods are also reformed and practiced, including online independent learning, offline communication and discussion, and after-class project practice. Moreover, the capstone experience course is initiated and practiced. As a result, the mechanical design curriculums have made a concerted effort to comprehensively improve the students’ two-way deductive ability from the “abstract” knowledge to the “concrete” mechanical equipment so that they could transform knowledge into ability with practice and learning. To

收稿日期: 2021-08-11

基金项目: 上海高校市级重点课程建设项目 (2021378); 上海理工大学外国留学生课程建设项目 (1021304002)

作者简介: 熊 敏, 女, 讲师。研究方向: 结构优化设计。E-mail: xiongmin@usst.edu.cn

通信作者: 丁晓红, 女, 教授。研究方向: 结构优化设计。E-mail: dingxhsh021@126.com

our delight, students have made great achievements in various competitions and academic research, which are the good results of the teaching reform.

Keywords: professional core ability; framework of curriculums; mechanical design; online and face-to-face teaching methods; capstone experience course

随着科学技术的发展和中国制造 2025 国家战略的实施,高等院校必须面向未来培养卓越的工程人才。卓越的工程人才须有精益求精的专业知识、广泛的社会知识和综合的创造能力,还须有高瞻远瞩的工程理念、卓越非凡的工程创新精神、深切的职业自觉意识、强烈的社会责任感和历史使命感^[1]。因此,高等院校必须主动迎接挑战,进行工程教育的改革。我国自 2018 年开始强力推进“一流本科教育”的相关工作,全面实施一流专业、一流课程建设的“双万计划”,各高校围绕建设高水平本科教育,深入推进改革,取得了明显成效。如山东大学研究了知识、能力、实践、创新一体化培养模式,并在机械制造基础课程上进行了改革实践^[2]。上海交通大学对机械基础课程进行了改革探析,以产品设计制造为主线重构课程内容,并采用开放式的设计课题提升学生创新设计能力^[3]。同时,放眼世界,世界一流工程教育大学均在进行教育改革,以迎接第四次工业革命。如美国普渡大学进行了新工科建设,从专业设置、课程体系建设、教学方式方法革新等多方面进行了改革^[4];而麻省理工学院则从教学体系、文化氛围等各方面保障其创新型人才的培养^[5]。美国工科教育整体上也经历了一系列大规模的改革,例如,明确规定高校应当实施顶峰课程来避免知识缺乏整合与脱离实践等状况^[6]。

上海理工大学机械设计制造及其自动化专业立足国家和上海优先发展先进制造业的战略,面向先进制造业产业变革和技术发展对人才的需求,旨在培养厚基础、强实践的工程型、创新性、国际化的高素质机械工程领域专业工程师,可胜任机械及相关工程领域的技术和管理工作的。根据本专业对近 5 年的毕业生工作岗位调查统计,就业于各类企业和科研院所的毕业生占比近 80%,其中从事技术研发和管理等相应岗位的毕业生达 70% 以上,所从事岗位工作与专业直接对口或相近的约 80%,因此加强培养学生的专业核心能力非常重要。

机械设计是根据产品的功能要求,对机械的工作原理、结构、运动方式等进行构思、分析和计算,将其转化为具体的、可制造的工程图纸的过程。一

个产品的功能完善与否、性能优劣,乃至市场竞争力从根本上取决于产品的设计水平,因此机械设计能力是机械类人才专业核心能力的重中之重,也是卓越创新人才工程实践能力培养的重中之重。在机械工程教育知识体系中^[7],机械设计原理和方法包括五个子知识领域:形体设计原理和方法、机构运动与动力设计原理、结构与强度设计原理和方法、精度设计原理和方法、现代设计理论和方法等。在传统的教学体系中,这些知识领域分别纳入不同的设计类相关课程中,各门课程设置相对独立,各自有教学重点和目标。课堂教学由授课教师逐次讲授,授课内容依次推进;工程实践同样是按课程知识逐个训练,依次完成。这种分散独立的教学方式和相互缺少紧密关联的培养模式,使学生难以从一个个相对孤立的知识点形成系统的设计知识体系,也难以在整体上实现知识向能力有效转变^[2]。学生即使学完了所有的相关课程,仍对机械没有整体的认识,不知如何进行设计。虽然所有的机械都实现具体的功能,然而由于课程之间相关知识衔接关系不够明确,且教学理念、教学手段相对陈旧等原因,使得学生一方面难以将抽象的知识应用于具象的“机构—结构—机器”设计的演绎,不能将学到的知识应用于实际的机械设计中,另一方面针对实际的机械设计问题,又不能将其抽象为准确的力学分析模型,抽象到具象的正反演绎能力弱,导致学生的综合分析能力和创新设计能力不足。

事实上,设计就是创新^[8],而创新的实质是基于新思维的价值创造行为^[5],由此,面向未来的卓越机械工程人才必须具有创造性的新思维。如何通过机械设计课程群的合理构建和教学实践,培养学生的设计创新思维、创造性思维、批判性思维和系统性思维,使学生能主动、自如地应用所学知识发现问题、解决问题,是机械设计课程群构建和教学手段改革的目标。

一、机械设计课程群架构

课程群以机械设计能力递进提升为指引,使机

机械设计相关课程要素在动态过程中统一指向课程群目标,形成有机整体。由于课程体系是实现学生培养目标和毕业要求的载体,课程群目标根据本专业毕业要求中对学生机械设计能力的要求来制定。其总体要求是:具有机械的方案设计、机构和结构的设计能力;能准确表达设计意图,正确使用设计规范;具有综合分析、实验验证和创新设计的能力。

根据这一总体要求,我们进一步将其分解为13个具体的能力要点,每一个能力要点对应相关的知识点,每一个知识点对应相关课程,共由20门课程组成,由此构建机械设计课程群架构,形成4不断线的机械设计能力培养课程体系,实现学生机械设计能力递进提升。构建的“能力—知识—课程”矩阵如表1所示。

表1 “能力—知识—课程”矩阵
Tab. 1 “Ability-Knowledge-Course” matrix

总体要求	能力	知识	课程	修读学年
具有机械的方案设计、机构和结构设计、工程设计表达、设计规范使用、综合分析、实验验证和创新设计的能力。	(1) 了解机械设计的目的和意义; (2) 具有阅读工程图形、进行形体设计和发表工程设计的能力。	◇ 机械的基本认识 ◇ 形体表达	◇ 工程创新与实践 ◇ 工程制图 ◇ 工程学导论	一
	(3) 掌握力学基本理论与方法,具有力学分析能力; (4) 具有拟定机构及其系统运动方案、分析和设计机构的能力; (5) 具有应用计算机表达工程设计的能力。	◇ 机构运动和动力设计原理和方法 ◇ 简单结构强度设计原理和方法 ◇ 计算机辅助设计方法和软件	◇ 理论力学 ◇ 材料力学 ◇ 机械原理 ◇ 机械测绘及AutoCAD ◇ 计算机辅助三维结构课程设计 ◇ 计算机辅助设计技术	二
	(6) 具有机械传动装置和简单机械设计的能力; (7) 能进行零部件的精度设计; (8) 能运用标准、规范、手册、图册及其他信息等技术资料的能力; (9) 初步掌握现代设计方法的基本理论,并能用于解决简单的工程实际问题。	◇ 机械零件设计原理和方法 ◇ 机械装备结构功能和工艺设计原理和方法 ◇ 精度设计原理和方法 ◇ 现代设计理论和方法	◇ 机械工程材料基础 ◇ 机械设计 ◇ 机械设计课程设计 ◇ 机械装备结构设计 ◇ 公差检测与技术测量 ◇ 现代设计技术 ◇ 有限元法 ◇ 机械虚拟设计与制造	三
	(10) 能根据科技进步与市场需求进行机械方案设计,并初步具有技术经济性评价能力; (11) 具有创新设计能力; (12) 具有设计结果的数字仿真和实验验证能力; (13) 初步具有机械设计的研究能力。	◇ 综合分析和设计方法	◇ 复杂机电系统综合设计(顶峰体验课程) ◇ 科研项目课程 ◇ 毕业设计	四

课程设置中保留了经典的“工程制图”“理论力学”“材料力学”“机械工程材料基础”“机械原理”“机械设计”“公差检测与技术测量”和“机械装备结构设计”等课程,拓展和加深了“有限元法”和“现代设计技术”等教学内容,增加了“机械虚拟设计与制造”“复杂机电系统综合设计”和“科研项目课程”,提高了“毕业设计”的工程实践项目比例,相关的课程内容根据机械学科的技术发展趋势进行了重构。其中,新开设的科研项目课程,依托教师具有特色的科研项目,让本科生参与教师团队的科研活动,在将新知识、新技能、新动向呈现给学生的同时,鼓励学生自主探索,培养学生的工程意识、科研思维,提高他们的研究与创新能力。“能力—知识—课程”矩阵基于机械设计课程群强调课程之间的关联性和整体性,承载对学生知识传授、能力培养和价值塑造等多方面的功能。每门课程均制定详细的教学大纲,内容包括:

课程目标、教学内容、前后修学课程的知识领域关系,以及机械设计相关能力在课程中的培养方法、评估方法等。

基于“以学生为中心,以成果为导向”的教学理念,课程群围绕提升学生的机械设计综合能力、培养学生思辨性思维和创造性思维的目标,强调课程之间的关联性和整体性,“做”“学”结合,形成“理论—实验—创新实践”为一体的有机整体,课程体系关系架构如图1所示。其特征是,以各类实践项目为载体,在相关理论课程支撑下循序展开,促进学生“有知识—用知识—创新知识”的机械设计能力递升。实践项目分为四大类:课程项目(机械测绘及AutoCAD、计算机辅助三维结构课程设计)、课程组项目(工程创新与实践、机械设计课程设计)、多学科项目(机械虚拟设计与制造、复杂机电系统综合设计)、产品/技术研发项目(科研项目课程、毕业设计)。各类实践项目案例大多来

自于最新科研成果和实际工程技术问题的提炼,并根据课程特点进行了恰当的分类与设计,确保了学生能力培养和工程实际及学科前沿的接轨。在学习活动中,学生不仅主导项目的设计和分析,而且参与分析、讨论和表达等活动,进一步提高了学生分

析问题和解决问题能力。课程群的整体性及以实践项目为载体的案例教学、能力驱动的教学方式,可有效解决知识孤岛现象,使学生建立完整的机械设计知识架构,并进一步提升他们设计与制造、科学与技术研究、创造与创新、团队和管理等方面的能力。

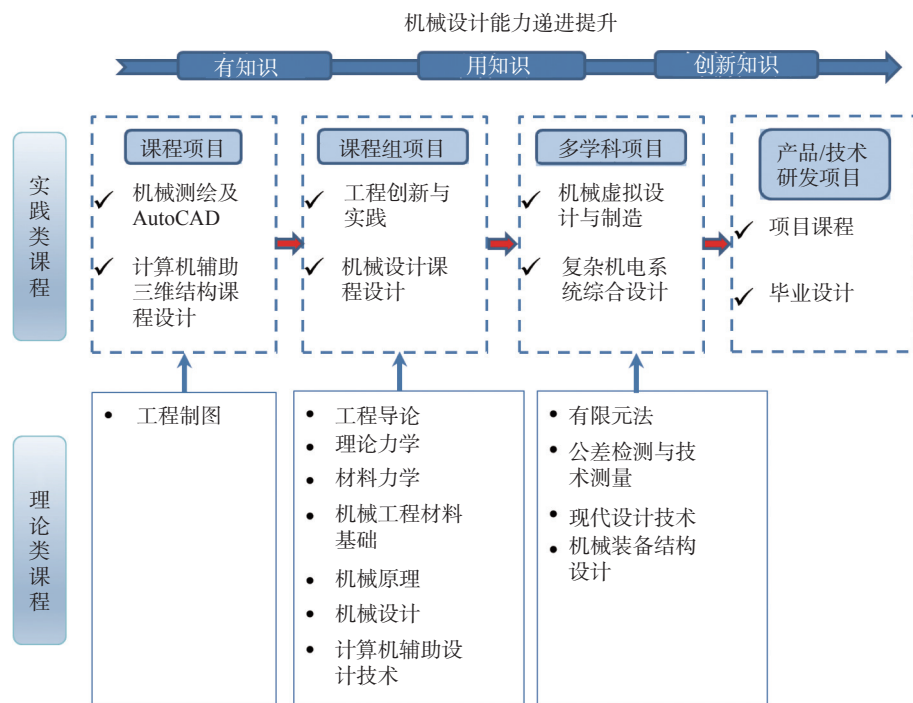


图1 基于机械设计能力提升的课程体系关系架构

Fig. 1 Framework of curriculum system based on improvement of mechanical design ability

二、以交叉融合和案例导向为特征的 课程教学设计

课程是人才培养的核心要素,学生从大学里受益最直接、最核心、最显效的是课程^[9]。为了达成图1所示“有知识—用知识—创新知识”的递进式能力提升,使学生主动、自如地应用所学知识发现问题、解决问题,课程群中各课程的教学设计尤为重要。教学设计的基本理念是,以交叉融合和案例导向为特征,学生为主体进行主动探索式学习,形成生—生、师—生合作学习模式。

就理论类课程而言,基于能力递进提升的教学设计需解决的主要问题有:1) 课程内容体系与产业技术发展以及社会需求的适应性;2) 课程教学方法的先进性和多样性;3) 课程考核方式的科学性。以主干课程“机械设计”为例来说明具体的教学设计。首先,基于未来机械工程师的知识能力素养的需求,在原有课程内容基础上增加现代机械设计方法、计

算机编程及智能设计方面的教学内容;其次,开发与课程内容密切结合又具有学科和技术前沿的教学案例,形成教学案例库;针对典型的工程案例,学生分组开展与教学内容匹配的机械设计项目实践,引导学生跟踪学科和技术发展前沿,启发学生创新思维,培养学生创新能力;实施“线上自主学习—掌握基本知识点,线下交流讨论—提升机械设计能力,课后项目实践—培养创造性思维”的教学模式,以进一步激发学生的学习主动性,提高学生的综合分析能力和技术研发能力。具体的教学实施过程以表2所示的“机械零件的疲劳强度”这一章节为例来说明。

疲劳失效是机械零件常见的失效形式,因此机械零件的疲劳强度概念、分析计算和设计方法贯穿于“机械设计”课程的全部内容。在教学设计中,首先明确教学目标、教学重点和难点以及教学内容与相关课程知识领域的关联性。(1) 教学目标分三个层次:价值观目标、能力目标和知识目标。通过教学实现价值塑造、能力提升和知识的掌握与应

用。具体来讲,价值观目标为:机械零件的强度是保证机械正常工作的基本条件,影响强度的因素错综复杂,引导学生用矛盾分析法辩证认识和分析机械零件的强度问题,通过对产品强度设计缺陷引发安全事故的思考,培养学生一丝不苟的工匠精神;能力目标为:能考虑各种因素,综合分析机械零件实际工作中的复杂载荷,建立正确的力学模型,具有机械零件强度分析和设计的能力;知识目标为:能阐述机械零件强度的概念,用计算原理分析零件在实际工作中强度。(2)疲劳强度知识点教学重点为机械零件疲劳强度的计算;教学难点为如何绘制机械零件的等寿命曲线,并基于该曲线计算机械零件的疲劳强度。(3)本教学内容涉及理论力学

(静力学平衡方程、受力分析)、材料力学(静态载荷下的构件基本变形的强度计算、经典强度理论)、现代设计技术(优化设计、可靠性设计)、有限元法(任意复杂形状结构的离散、加载及力学性能分析)。通过对以上与相关课程知识领域的关联性进行分析,使学生理解涉及机械零件疲劳强度的前后修学课程的相关知识点,能够融会贯通地应用知识,并了解复杂工程问题的多解性和解决方法的多样性。

教学过程的实施以疲劳失效引发的重大灾难事故导入,并基于学生微课视频的课前预习,通过提问以及设问的方式展开,最后以“新能源汽车底盘减震器悬挂的强度分析和设计”为主题,引导学生

表2 “机械零件的疲劳强度”教学过程设计案例

Tab.2 Teaching case for “Fatigue Strength of Mechanical Parts”

教学环节	教学内容	师生活动	设计意图
内容引入 (5~8分钟)	通过疲劳失效引发的重大灾难事故,说明机械零件强度分析和设计的重要性,引出教学的价值观目标。以1998年6月德国高铁事故引出知识点。	◇ 学生观看事故图片集; ◇ 教师简要分析; ◇ 师生交流。 互动问题:(1)机械零件的疲劳是怎么发生的?主要影响因素有哪些?(2)如何避免疲劳的发生?你能想到哪些方法?	通过事故图片和数字的直观展示,吸引学生的注意力,引发学生对设计的责任感,引导学生用矛盾分析法辩证认识和分析机械零件的强度问题,进一步引出机械零件强度分析和设计的概念。
与相关课程知识领域的关联性说明 (8~10分钟)	◇ 静应力强度——材料力学强度理论;变应力强度——疲劳失效; ◇ 应力是产生机械零件强度破坏的内因,载荷是外因。机械零件在实际工作中的载荷分析方法——理论力学受力分析; ◇ 应力分析方法——材料力学基本变形的应力公式、强度理论,有限元分析方法; ◇ 优化设计、可靠性设计等现代设计技术可更有效更可靠更经济地设计机械零件。	◇ 教师引导学生回忆先修课程的相关知识点; ◇ 教师通过案例引出后续课程的相关知识点。 互动问题:(1)载荷分析一般采用什么方法?(2)静应力强度如何计算?(3)时间变化的载荷(变载荷)会引起什么应力?继而会使材料产生哪种失效形式?(4)如何用一个统一的公式来表达机械零件的各类强度条件?(5)对于任意形状的机械零件如何进行强度计算?	串联理论力学—材料力学—机械设计—有限元分析—现代设计技术等相关课程的相关知识领域,建立机械零件强度分析和计算的整体概念,引导学生自己梳理出强度计算和设计的基本步骤。
学习目标 (2~5分钟)	掌握机械零件强度的概念、计算原理及其在实际工作中强度的计算方法。		明确学习目标
微课内容回顾、重点内容讲解和问题讨论 (40~55分钟)	◇ 材料的疲劳强度 ◇ 机械零件的疲劳强度计算	◇ 学生课前完成微课视频学习; ◇ 教师结合课件,通过提问以及设问的方式,引导学生思考和巩固本节课的主要内容。 互动问题:(1)从 $\sigma-N$ 疲劳曲线,你能得到哪些材料疲劳的信息?不同的应力比,这条曲线一样吗?(2)怎么绘制材料的等寿命曲线?不同的应力比,这条曲线一样吗? 互动问题:(1)机械零件的等寿命曲线怎么画?(2)机械零件的疲劳强度怎么计算?(3)怎样提高机械零件的疲劳强度?	利用线上微课学习基本知识,可快速帮助学生掌握相关知识点,通过教师进一步引导,消化吸收相关知识,同时进行应用思考。
小结 (5~7分钟)	知识点总结。	以提问引导的方式与学生一起梳理知识点。	巩固所学的知识。
实践项目案例 (15~20分钟)	新能源汽车底盘减震器悬挂的强度分析和悬挂设计。	◇ 教师说明实践项目案例的背景; ◇ 引导学生讨论悬挂的强度由哪些因素决定,进一步引出悬挂应如何设计的问题; ◇ 任务要求:4~5人一组,通过调研和文献阅读,2周后提交分析报告。	通过实际设计案例,引导学生建立综合分析复杂工程问题的思路,进一步强调机械零件强度分析和设计的重要性,并结合后续课程的知识(有限元、优化设计)引导学生探索新的解决方案。

了解机械零件在工程实际中的强度分析和设计过程,最后通过实践项目的答辩和讨论,提升学生从知识的“抽象”到机械装备“具象”的双向演绎能力,训练他们的设计思维。

实践类课程是知识的载体,和理论课程相比,实践课程的项目更强调知识的融合、交叉和应用。系统的实践课程能使学生可以利用整个本科教育阶段所学的知识,在特定的设计题目和设计要求的下,以团队为单位,发挥专业能力、写作能力及创新精神,完成产品的设计、制造及控制等全部任务^[10]。

在实践课程中,多学科项目和技术/产品研发项目的内容,均从工程实际和科研中凝练而来,以构建真实的知识应用场景。为了实现实践课的上述任务,进一步完善学生的知识架构,将知识通过内化转化为能力,我们开设了机械工程的顶峰体验课程(capstone experience course)“复杂机电系统综合设计”。顶峰体验是一种极点体验,通过学习这种课程,学生可以综合、拓展、批判和应用所学的知识^[11-12]。顶峰体验课程以融合并应用知识、连接社会、提高学生综合素质和能力为目的,20世纪后期在美国开始兴起。“复杂机电系统综合设计”的教学目标是,在真实的知识应用场景下,通过具体的项目导向,学生整合先前学习的机械设计、制造、控制等专业课程知识,并进一步融合新知识与既有知识基础,以解决机械领域复杂工程问题。

该课程在学生学完专业课程后,毕业设计前开设,教师在教学中强调“问题解决”,引导学生体验成功和快乐。其教学设计的思路是,以工程案例和典型任务为驱动,以分类学习成果为导向,学生在“做中学”“学中做”,通过做学结合,提升其

综合能力。选择的工程案例内容涵盖机械设计、制造和控制等方面的专业核心知识,难度和工作量介于课程设计和毕业设计之间。课程划分为三个模块:机械设计模块、制造模块和电气控制模块,每个模块包含需达到的分类学习成果,如图2所示。在教学实施过程中,学生需要顺次进行机械设计模块、制造模块和电气控制模块的实践。不同于传统课程教学中一位教师负责一门课程的形式,本课程的每个模块分别配备了相应专业方向的课程指导教师,有针对性地对项目子任务内容进行指导;三大模块不同研究方向的课程指导教师共同制定教学大纲和研讨教学内容,以确保各模块子任务的无缝衔接。

具体的教学实施中,学生自由组成小组(3~4人/组),从工程案例库中选择感兴趣的实践案例,以组为单位独立完成一系列的设计任务。教学设计同样围绕三个层次的教学目标(价值观目标、能力目标和知识目标)展开,以项目导向形式贯穿课程的整个教学过程。首先,教师就项目背景、具体任务、技术难点等进行说明,并演示实际设计对象的工作过程,构建真实的技术研发场景;随后,学生就设计构想、任务分割等展开讨论,明确各自的分工和任务目标;接着,各项目组顺次进入机械设计、制造和电气控制模块,通过团队协作完成相应模块的项目任务,达成分类教学目标;最后,小组成员进行汇报和现场演示,指导教师小组和学生自由提问,通过互相提问,促进学生思考并互相学习,引导学生探索问题的不同解决方案;以项目实际完成质量和现场答辩表现为依据,由教师和学生共同评分,完成项目验收。

在三大模块的教学实践中,“学与做”贯穿整

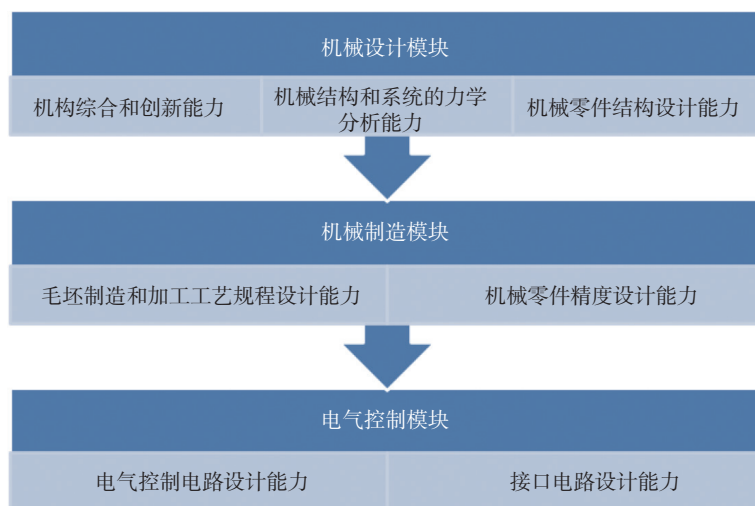


图2 “复杂机电系统综合设计”课程模块划分及分类学习成果

Fig. 2 Module division and classified learning outcomes of “Comprehensive Design of Complex Electromechanical System”

个过程,学生线上线下自主学习,积极与教师交流讨论,通过提出项目建议、完成项目策划、开展案例研究和进行口头、书面报告等一系列具有挑战性的工作任务,提升知识融合、应用、创新的综合能力。正如在进行回顾总结时学生的感言所述:“这是一个不断发现问题,解决问题,面对困难,克服困难的难忘历程,在整个设计创床的过程中,我们挑战了自己,付出了很多,获得了成长。”

三、教学改革成果

在2016—2020年之间,随着机械设计课程群建设的完善和教学改革的实施,学生的机械设计创新能力明显提高,在各类大赛中屡获佳绩。在全国大学生机械创新设计大赛中,获得一等奖3项、二等奖1项;在上海市大学生机械工程创新大赛中,获得一等奖10项,二等奖14项;在上海市大学生创造杯大赛中,获得二等奖4项,三等奖2项。“机械设计”课程被认定为上海市一流课程,机械设计制造及其自动化专业2019年获批第一批国家级一流专业建设点。此外,本科生参加科研项目课程,参与教师团队的科研活动,提升了其科学研究的能力,近3年本科生发表学术论文8篇,获批专利8项,受理专利14项。

四、结束语

针对传统知识导向型课程体系易导致“知识孤岛”的问题,从“能力—知识—课程”三者之间的内在联系出发,创新性地构建了以提升学生机械设计专业核心能力为目标的机械设计课程群架构,课程设置从“知识零散式”向“项目集成式”转变,教学任务从“知识传授”向“能力培养”转变。以理论课程为支撑,以实践课程为载体,基于精心的

教学设计,使学生将知识转化为能力,实现了“学知识—用知识—创新知识”递进式的机械设计能力的提升。

参考文献:

- [1] 迈克尔·戴维斯. 像工程师那样思考[M]. 丛杭青, 沈琪等, 译. 杭州: 浙江大学出版社, 2012.
- [2] 孙康宁, 于化东, 梁延德. 基于新工科的知识、能力、实践、创新一体化培养教学模式探讨[J]. 中国大学教学, 2019(3): 93–96.
- [3] 蒋丹, 王丽伟. 面向新工科人才培养的机械基础课程改革探析[J]. 高等工程教育, 2021(1): 56–58.
- [4] 林健, 彭林, BRENT Jesiek. 普渡大学本科工程教育改革实践及对新工科建设的启示[J]. 高等工程教育, 2019(1): 15–16.
- [5] 董一巍, 殷春平, 李效基, 等. 麻省理工学院创新型人才的培养模式与启示[J]. 高等教育研究学报, 2018, 41(1): 79–86.
- [6] 周周. 美国高校顶峰课程的内涵、实践与启示——基于发展性教育的理念[J]. 高教探索, 2020(4): 33–39.
- [7] 中国机械工程学科教程研究组. 中国机械工程学科教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [8] 罗伯特·诺顿. 机械设计[M]. 黄平, 李静蓉, 译. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [9] 吴岩. 建设中国“金课”[J]. 中国大学教学, 2018(12): 4–9.
- [10] 李津津, 叶佩青. 新工科背景下贯通式项目制研究型综合实践教学模式探讨[J]. 中国大学教学, 2020(10): 58–61.
- [11] WAGENAAR T C. The Capstone Course[J]. Teaching Sociology, 1993(3): 209–214.
- [12] 徐利梅, 谢晓梅. 新工科专业课程体系重构: 从新生项目课程到高峰体验项目课程[J]. 高等工程教育研究, 2019(4): 78–84.

(编辑: 程爱婕)