

面向系统能力培养的计算机组成原理课程教学内容改革

张 策^{1,2}, 吕为工², 李剑雄²

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 教务处; 2. 哈尔滨工业大学(威海) 计算机科学与技术学院, 山东 威海 264209)

摘要: 为了提升学生对计算机组成结构、运行机理和发展动态的认知, 提出4个方面的教学内容改革, 重点对计算机结构的非封闭性、计算机组成的与时俱进性、原理对现实的关照性和计算机组成与运行的系统性进行阐释, 并给出了必要的案例分析。同时, 提出要创新教学方法, 注重运用案例式教学和翻转课堂教学方法提升教学效果。经过5年多的改革实践, 教学改革取得了积极成效, 学生的学习成绩、实践能力得到明显提升。

关键词: 计算机硬件系统; 计算机组成原理; 系统能力; 教学内容改革

DOI: 10.11907/rjdk.221750

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: G642

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2023)007-0164-05

Reform of the Teaching Content of Computer Composition Principles Course for the Cultivation of System Capacity

ZHANG Ce^{1,2}, LYU Weigong², LI Jianxiong²

(1. Office of Educational Administration, Harbin Institute of Technology (Weihai);

2. School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

Abstract: In order to improve students' in-depth understanding of the structure, operation mechanism and development of computers, four aspects of teaching content reform are proposed and actively explored. Through the partial reconstruction and in-depth understanding of the teaching content, this paper focuses on the non closure of the computer structure, the advancement of the computer composition, the consideration of the principle to the reality, and the systematicness of the computer composition and operation, and gives the necessary case analysis. In the meantime, it is proposed to innovate teaching methods and pay attention to the use of case teaching and flipped classroom teaching methods to improve teaching and learning effects. After more than 5 years of reform and practice, positive progress has been made in course grades and practical aspects, and students' learning outcomes have been significantly improved.

Key Words: computer hardware system; computer composition principle; system capacity; teaching content reform

0 引言

计算机组成原理课程是计算机类专业核心必修课程, 对于学生掌握计算机的组成与工作原理、设计与开发各类计算系统和培养计算系统方面的专业综合能力具有重要

作用^[1-5]。该课程是对人类设计发明的各种类型计算机的组成与运行原理进行一般性宏观抽象后形成的原理性、逻辑性知识, 因此内容比较晦涩, 也为教学带来了许多困难。多年来, 计算机组成原理课程的改革一直在持续, 其中针对内容知识体系, 以及培养学生的计算机体系结构系统观一直是改革的核心^[1,3,6-9]。如何帮助学生在掌握计算机基

收稿日期: 2022-07-05

基金项目: 山东省本科教学改革研究培育项目(P2020007, P2020027); 山东省本科教学改革研究重点项目(Z2020020); 山东省本科教学改革重大子课题项目(T2020011); 哈尔滨工业大学(威海)“课程思政”专项课程建设项目(2019); 2021年华为“智能基座”项目(IDEA1040200302)

作者简介: 张策(1978-), 男, 博士, CCF高级会员, 哈尔滨工业大学(威海)教务处副处长、计算机科学与技术学院副教授、硕士生导师, 研究方向为可靠性和安全性建模与评测、高等教育教学管理、信息化教学、教学设计优化; 吕为工(1967-), 男, 硕士, 哈尔滨工业大学(威海)计算机科学与技术学院副教授, 研究方向为嵌入式系统与物联网; 李剑雄(1980-), 女, 硕士, 哈尔滨工业大学(威海)计算机科学与技术学院讲师, 研究方向为嵌入式系统与物联网。

本组成与运行原理的基础上,加深对各类计算系统,特别是计算机系统中硬件结构子系统的认识,提高对整个计算机系统的综合分析、设计与开发能力,是教学中的重点与难点。

计算机体系结构、计算机硬件系统构成与运行原理是计算机专业人才需掌握的重要基础知识,考虑到到计算机是软硬件的综合体,如何提升学生的计算机系统能力得到了研究者们的重视。针对计算机系统能力培养,文献[1]对计算机系统能力进行剖析,提出学生应该具备设计与开发计算机运行系统及各种应用系统的综合能力,并从课程体系建设和实验两个环节加强对学生计算机系统能力的培养;文献[3]从构建课程实验体系的角度,对计算机系统能力培养进行探索;文献[4]提倡将计算机核心课程进行贯通教学,通过理论与实践相结合的办法进行系统能力培养。从课程体系设置的角度,文献[5]较早地提出课程结构对于系统能力培养的重要性,建议要设立有紧密内在关系的系统级综合性课程;文献[10]提出采用软硬件课程融会贯通的方法建立课程体系和实践体系,以此培养学生的系统设计能力。以上研究与改革实践丰富了计算机系统能力培养理论,对于计算机类专业的教学改革具有重要的启发与借鉴意义。整体来看,现有研究偏向于将计算机软硬件多门课程进行内容重构,建立有机关联的课程体系,通过理论教学与实践改革来提升学生的系统能力。但就计算机专业的计算机体系结构中的一门课程,例如计算机组成原理课程如何进行课程内容改革,以提升学生的计算机系统能力,相关的研究较少。

在对课程的教学模式与教学方法^[11-13]、课程思政^[14-15]、课程设计^[16]等改革的基础上,本文从4个方面进行课程教学内容改革,并探索相应的教学方法。集中探讨在计算机组成原理课程教学中,如何培养学生系统地理解计算机硬件系统的组织结构和工作原理,掌握计算机硬件系统的基本分析与设计方法,以及建立计算机系统的整体概念等,以期对相关课程的教学改革提供参考。

1 教学改革基本规划

从计算机的整体结构与运行原理出发,从理论知识到物理实现、从经典模型到现实构造、从书本知识到科技进展,多维度深化教学内容改革。同时,强化教学方法的适配性,拓展教师对计算机硬件系统的认知,提升其对课堂教学的把控能力,有效促进学生对计算机硬件组成与工作过程的深入理解,掌握计算机系统实现的基础知识,夯实计算机专业学习的理论根基。

(1)理论知识与物理实现的结合。计算机组成原理课程以计算机的理论构成为主要教学内容,是以理论为主的课程,对计算机的物理实现讲述得并不深入。但是随着教学的进行,容易出现理论与实践的脱节,继而使学生对整

机的认知出现很多不确定问题。出现此问题的原因主要在于对计算机的物理实现讲解不够,因此需要教师把计算机的物理实现与理论知识有机结合起来进行讲授,以物理实现促进学生对于理论知识的理解,依托理论知识来更深入地看待物理实现的多种差异。

(2)经典模型与现实构造的结合。计算机的基本理论模型主要包括图灵机和冯·诺依曼计算机等模型,至今也是计算机设计与实现的关键理论指导。课程教学中必然要对这些经典模型进行讲解,但也要考虑到当今计算机现实构造的多样化和变异性,有针对性地统一理论模型指导下的众多现实构造进行讲解,讲清统一性与差异性、经典性与现实性,将理论课程教学向现实生活进行过渡。

(3)书本知识与科技进展的结合。计算机诞生于国外,至今包括处理器与操作系统在内的核心元素内容仍然以“黑盒”或“灰盒”状态出现在书本中,众多关键、核心与细节知识因受限于非自主制造而无法讲授。近年来,随着我国计算机技术的快速发展,高性能的国产处理器不断涌现,为教学带来了鲜活案例。国产鲲鹏处理器、昇腾AI处理器等已成为计算机组成原理课堂教学的优质素材。因此,教师需要把握我国科技发展前沿,使教学内容与时俱进。

2 课程教学内容与方法改革实践

2.1 把握计算机结构的非封闭性——开放性、扩展性、动态性

冯·诺依曼结构是计算机模型的经典结构,给出了计算机的整体结构组成。但冯·诺依曼计算机结构并不是封闭的构成,非封闭性是现代计算机的重要属性,通过增设硬件与软件等方式,可达到增强设备功能的目的。因此,在教学中要令学生掌握计算机整体的组成与运行原理,在认识到计算机的整体性、系统性的同时,培养其系统思维与全局概念,不能囿于经典模型,要通过对授课内容的深入讲解,帮助学生认识到计算机系统的开放性与扩展性。

例如,在总线部分的教学中,强调总线的3个依次递进的基本功能,即“连接→通信→标准”。总线上可以连接与挂载硬件设备,具有某类标准的总线可以连接也具备此类标准的非固定厂商生产的设备。总线的这一开放性特性,为计算机的功能扩展带来便利。这是课程原理层面的讲解,在应用层面则需要讲解主板上的插槽。主板对外往往会预留出插槽,以供用户连接外部输入输出接口设备,再配合相应软件(驱动程序等),即可实现功能的扩展。主板插槽的开放性与扩展性,是计算机能够实现功能升级的重要因素。与之紧密联系的是,接口设备(如中断控制器、DMA控制器、串行控制器等)的可编程性也为灵活发挥硬件资源的作用带来便利。此外,各类可编程器件(多种可烧写ROM、FPGA、CPLD)内部可灵活地置入代码来实现特

定的硬件功能,也是计算机系统开放性与动态性的展现。

计算机在硬件配置上,通过寄存器、触发器、加法器、移位器和控制电路构成一套运算电路,即可完成加减乘除运算,展现了计算机硬件设计与组成实现上的动态灵活性。冯·诺依曼计算机结构模型的组成中,虽然只有一个处理器(运算器、控制器)和存储器(内存),但是随着理论与实践的发展,多处理器、多内存结构的计算机组成早已司空见惯,例如向量计算机、并行计算机、超级计算机等。

通过对这些内容的讲解,帮助学生深入理解计算机硬件结构的开放扩展性以及作为软件运行平台的公共性和通用性。计算机部件构成了硬件系统和平台,硬件平台不仅是可扩展、开放的结构,同时也为由机器指令编制的各类程序提供了运行平台,体现了计算机的动态性。由此可见,计算机组成原理课程主要讲授硬件系统和体系结构层面的内容,但教学中不能仅对相关内容进行孤立、静态地讲授。

2.2 把握计算机组成的与时俱进性——发展性、进步性、革新性

如今,虽然颠覆性的变革尚未到来,但计算机一直处于动态的发展变化中。特别是计算机系统的非封闭属性和开放性为计算机的发展开辟了空间。例如,作为信道(介质/媒介)的总线来看,总线上设备之间的通信必然涉及到“总线使用权的竞争(链式查询方式、计数器定时方式、独立请求方式等)”和“总线通信过程的管理(同步、异步、半同步和分离式通信等)”等内容,这些是本课程的基本原理,具有不变性。与之相对的,总线的标准一直在不断的发展进步中,成为推动计算机主板架构和计算机体系结构变革的重要力量。例如:“无总线→单总线→双总线→三总线→四总线→五总线→……”“全局总线→局部总线→多标准、多类型的局部总线”“片内总线→板内总线→外总线”,并带来了“独立显卡→集成显卡”以及“独立网卡→集成网卡→片内网卡”功能(如华为鲲鹏处理器内部集成了此功能)的变化。总线技术的进步带动了硬件及体系结构的进步,后者的发展也对前者提出了新要求,二者相辅相成地协同前进。

当前计算机中多种类型的存储器构成了多级层次存储——寄存器、Cache(SRAM)、固态硬盘、DRAM、ROM、磁盘存储器、优盘、移动硬盘。科研人员发现了计算机内程序运行的空间局部性和时间局部性,提出“局部性原理”,产业界受到启发后,在原来只有主存和辅存的计算机中增设了高速缓冲存储器Cache。从“没有Cache→主板上集成Cache→CPU内部集成Cache→CPU内部集成多级Cache→多核处理器的核内集成Cache和核间共享Cache(如华为鲲鹏处理器的内部结构)”的发展路线来看,Cache的工作原理与作用基本保持不变,但其位置、形态、数量等发生了很大变化。技术的进步还体现在控制器实现原理从“基于组合逻辑电路(硬布线/硬链接)→微程序设计原理”,以及

指令集设计思想从“CISC→RISC→二者综合原理”等。

2.3 把握原理对现实的关照性——丰富性、多态性、灵活性

计算机是软硬件资源的综合体,现实往往是通过操作软件或控制面板来使用计算机,使得学生对计算机的硬件形态、构成、工作方式的认识相对比较模糊。冯·诺依曼计算机结构模型自诞生以来,虽然未发生根本性变革,但基于此模型发生的结构性演进却一直在持续,主要表现在现实中多种计算装置的构造上。在现实生活与工作生产中有各种形态的计算机、PAD、手机等,课程中讲授的知识有些能够与之对应,有些却对应不上。因此,把握好计算机硬件组成的基本理论与现实的一致性和差异性,是课程教学中的一个重点和难点。

在教学中,教师对多种形态的计算机装置进行讲解,涉及到单片机微控制单元(Micro Controller Unit, MCU)、可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controllers, PLC)、远程终端单元(Remote Terminal Unit, RTU)/数据传输单元(Data Transfer Unit, DTU)、片上系统(System-On-a-Chip, SOC)、嵌入式系统、超级计算机等,重点阐述计算机组成原理与现实计算机构造之间的映射,帮助学生理解计算机实现的多态性,甚至是变异性。同时,针对具体产业,以华为鲲鹏处理器作为讲解的案例。鲲鹏处理器是华为基于ARM架构自主研发的片上系统SOC,芯片内部集成了传统的CPU、南桥、RoCE网卡和SAS存储控制器等传统芯片,基本实现了“1颗鲲鹏处理器等价于4颗芯片”的效果。帮助学生认识到,随着SOC的发展,其在原理、功能上变化不大,但在物理结构、组织布局、形态上发生了很大变化,最终体现在整个鲲鹏处理器的内部构造上。可以看出,教师在引导学生牢牢掌握计算机基本构成原理基础上,帮助其从理论向实际过渡,从而学会活学活用。这体现的是“理论联系实际”的思想,用理论去观察和认识实际,并用实际去反观和验证理论,从而在更高层面上理解计算机组成原理与计算机现实构造之间的统一性及差异性。随着产业的进步和科技的发展,计算机的多态性和变异性将得到进一步发展,推动计算机技术迈向更高水平。

2.4 把握计算机组成与运行的系统性——关联性、层次性、协同性

计算机组成部件之间相互联系在一起,形成主机、接口与外设的基本层次结构,表现为部件通过总线进行各类信息的交互和执行动作上的协同配合。例如图1展示了I/O系统的基本构成,其中体现了软硬件之间的配合。

由图1可以看出,不同外设通过不同类型的I/O接口(表现为系统接口芯片或板卡)与CPU、内存进行连接和通信,形成了“外设→接口→主机”层次的硬件结构,发挥出接口的桥梁作用,为硬件设备之间的关联与协同带来可能。外设之间的通信方式也包括多种,涉及程序查询、程序中断、DMA等,为计算机软硬件之间的关联配合与协同工作提供保障。“外设→接口→主机”的硬件结构,软件通



Fig. 1 Basic composition of I/O system

图 1 I/O 系统基本构成

信与硬件连接的结合,是计算机软硬件资源系统集成统一的重要呈现。

此外,在程序中断方式中,CPU 可对中断 INTR 引脚进行查询。在 DMA 方式中,通信结束前,DMAC 以中断方式向 CPU 归还总线使用权,从而形成了“中断内有查询”和“DMA 内有中断”的协调机制。在 DMA 通信过程中,DMAC 管理外设与内存的通信,处于“接口”地位;在通信结束前,DMAC 向中断控制器发出归还总线使用权的申请,处于“外设”地位,中断控制器则处于“接口”地位。DMAC 地位的变化,也同样是计算机部件间协同一致工作的结果。基于此,教学中要将前后章节的知识有机贯通起来,更有助于学生对课程内容的理解。

2.5 教学方法

为了更好地讲授课程内容,加深学生对理论知识的理解,不仅需要某些章节进行内容上的重构(至少是在保持已有课程教学框架下,将新的产业技术内容融入其中),而且要采用更多创新性的教学方法。

(1)案例式教学。注重采用案例式教学,将产业界的新进展有机融入到课堂教学中。为此,将华为鲲鹏处理器作为案例进行讲解。华为鲲鹏处理器的内部结构,特别是 SoC 结构、Cache 结构等,就是冯·诺依曼结构计算机模型在现实中的体现,能够体现当代计算机技术的进步性、开放性、灵活性与层次性。

华为鲲鹏 920 处理器片上系统的基本组成如图 2 所示^[17]。华为鲲鹏处理器是 SoC 的结构,相当于将传统的 CPU、南桥、网卡和硬盘控制器等多个芯片的功能合一。这种现实构造直接看起来似乎与经典的冯·诺依曼结构计算机模型有很大不同,但是从逻辑构成、功能运行上二者依然保持一致。此外,再以 Cache 为例,在逻辑上,Cache 是位于 CPU 与内存之间的小型快速存储器,在现实中,Cache 采用 SRAM 材质被集成制作在 CPU 内部,且存在层级,并区分为指令 Cache 和数据 Cache,形成哈佛存储结构,但在冯·诺依曼结构计算机模型中并不包含 Cache。然而,这些变化与发展,并未颠覆或推翻冯·诺依曼模型(模型中的存储器完全可以包括 Cache 存储器),且能够与模型形成有机统一体。即冯·诺依曼模型并不是僵化机械、不变的教条性结构,其不仅为人们设计与研发计算机提供了基础理论,而且提供了进一步发展的理论与方法。

(2)翻转课堂教学。针对华为鲲鹏处理器和昇腾 AI

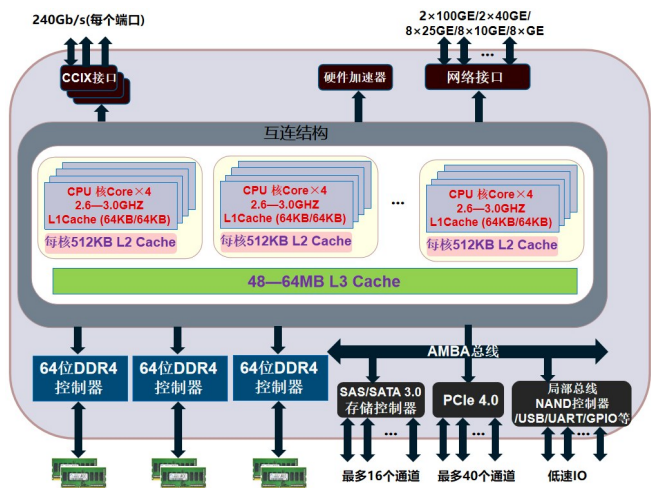


Fig. 2 Basic composition of system on chip of Kunpeng 920 processor

图 2 鲲鹏 920 处理器片上系统基本组成

处理器部分的教学,除教师课堂讲授外,还探索开展了翻转课堂教学。在教师先行讲授计算机组成原理,帮助学生掌握必要的知识后,向学生布置翻转课堂任务,并要求以小组形式进行展示。有的小组针对华为鲲鹏处理器的内部结构、指令执行情况、片上系统 SoC 的平台设备与附加设备等内容进行登台讲解,有的小组对沙箱实验进行了演示,表明学生能够以自主学习的方式完成新知识的自学和初步运用,该过程加深了学生对计算机组成相关知识的理解。

3 改革初步成效

2017 年至今的多轮次教学改革实践以来,围绕计算机组成与运行原理,通过对课程理论知识、物理实现、经典模型、现实构造与科技进展进行融合式讲授,并开展以案例式与翻转课堂教学方法为核心的综合改革,计算机组成原理课程教学改革取得了积极成效。

从课程最终考核成绩来看,170~215 人大班学生的整体学习效果较好,不及格率仅为 3.33%~5.58%,平均分保持在 73.34~76.28 分,成绩优良的比例较高。需要特别指出的是,在翻转课堂教学环节,学生针对华为鲲鹏处理器进行自主式学习与开发实践,并对成果进行汇报,展示了良好的学习效果。反映出其能将课堂教授的理论知识与培养的能力迁移到对产业新技术的学习与技术运用上,不仅实现了理论与实践的结合,而且促进了对计算机硬件组成相关知识的创新运用。

课程设计环节要求在 FPGA 开发板上设计与实现 MIPS 类型的指令集模型机,具体工作包括数据通路图设计、指令集设计、硬件描述语言程序开发与仿真、汇编语言应用程序开发、FPGA 开发板调试等,学生能够高成功率、高质量地完成。此外,部分学生在针对计算机体系结构类的科创竞赛中也取得了较好成绩。

4 结语

本文从4个方面对计算机组成原理课程进行教学内容改革,取得了初步成效。教师要不断深化对计算机组成与工作原理的认知,积极面向科技与产业前沿同步更新授课内容,并采用创新性的教学方法。在后续教学改革中,教师还要结合软件系统,包括操作系统、编译原理、数据库、数据结构、编程语言等内容进行系统性讲解,体现出完整、全面的计算机系统的动态性和发展性,使学生更好地掌握多形态的复杂计算装置与计算系统,同时有意识地培养学生的计算机系统性思维,以有效提升学生的专业能力和素养。

参考文献:

- [1] ZHENG W M. Cultivation of systematic ability of college students majoring in computer science [J]. *China University Teaching*, 2021 (5): 19-23.
郑伟民. 计算机专业大学生的系统能力培养[J]. *中国大学教学*, 2021 (5): 19-23.
- [2] LIU Q Z, CHEN J J, YUAN C F. On the starting point of systematic ability training of computer professionals [J]. *Computer Education*, 2020(4): 120-123, 127.
刘奇志, 陈家骏, 袁春风. 论计算机类专业人才系统能力培养的起点 [J]. *计算机教育*, 2020(4): 120-123, 127.
- [3] YUAN C F, TAO X P, WANG L, et al. Construction on curriculum experiment system for ability training of computer system [J]. *Experimental Technology and Management*, 2018, 35(6): 12-16.
袁春风, 陶先平, 汪亮, 等. 面向计算机系统能力培养的课程实验体系构建[J]. *实验技术与管理*, 2018, 35(6): 12-16.
- [4] SHI Q S, CHEN W Z. Strengthening the teaching of computer courses and deepening the cultivation of system oriented ability [J]. *China University Teaching*, 2014(12): 61-65.
施青松, 陈文智. 强化计算机课程贯通教学深入面向系统能力培养 [J]. *中国大学教学*, 2014(12): 61-65.
- [5] WANG Z Y, ZHOU X S, YUAN C F, et al. Research on the cultivation of systematic ability and the establishment of systematic curriculum system for computer majors [J]. *Computer Education*, 2013(9): 1-6.
王志英, 周兴社, 袁春风, 等. 计算机专业学生系统能力培养和系统课程体系设置研究[J]. *计算机教育*, 2013(9): 1-6.
- [6] TANG S F, LIU X D, WANG C, et al. Teaching implementation plan of "principles of computer composition" [J]. *China University Teaching*, 2010(11): 42-45.
唐翔飞, 刘旭东, 王诚, 等. "计算机组成原理"课程教学实施方案 [J]. *中国大学教学*, 2010(11): 42-45.
- [7] YUAN C F, ZHANG Z S, YANG R Y, et al. Construction ideas and teaching practice of the course "computer composition and system structure" [J]. *Computer Education*, 2012(2): 62-66.
袁春风, 张泽生, 杨若瑜, 等. "计算机组成与系统结构"课程建设思路与教学实践[J]. *计算机教育*, 2012(2): 62-66.
- [8] YUAN C F, YANG R Y, WANG S, et al. Analysis of the related contents between computer composition and other courses [J]. *Computer Education*, 2015(17): 35-38, 87.
袁春风, 杨若瑜, 王帅, 等. 计算机组成与其他课程之间的关联内容分析[J]. *计算机教育*, 2015(17): 35-38, 87.
- [9] YUAN C F, CHEN G H, HUANG Y H, et al. Current teaching situation and reform ideas of the course "computer organization and system structure" [J]. *Computer Education*, 2009(16): 153-156.
袁春风, 陈贵海, 黄宜华, 等. "计算机组织与系统结构"课程的教学现状和改革思路[J]. *计算机教育*, 2009(16): 153-156.
- [10] CHEN W Z, CHEN Y, ZHUANG Y T. Exploration of teaching reform oriented to the cultivation of system design ability [J]. *Computer Education*, 2013(20): 71-76.
陈文智, 陈越, 庄越挺. 面向系统设计能力培养的教学改革探索 [J]. *计算机教育*, 2013(20): 71-76.
- [11] ZHANG C, GU S L, XU X F, et al. Research on MOOC teaching pilot college — taking the Computer College of Harbin Institute of Technology (Weihai) as an example [J]. *China University Teaching*, 2018 (11): 38-42.
张策, 谷松林, 徐晓飞, 等. MOOC教学试点学院探究——以哈尔滨工业大学(威海)计算机学院为例 [J]. *中国大学教学*, 2018(11): 38-42.
- [12] ZHANG C, CHU D H, GU S L, et al. Research and practice of blending teaching based on "MOOC + SPOC + flipped classroom" for software engineering [J]. *Computer Education*, 2018(12): 108-113.
- [13] ZHANG C, LYU W G, LI J X. Online participatory discussion teaching of computer architecture courses [J]. *Computer Education*, 2021 (1): 8-12.
张策, 吕为工, 李剑雄. 计算机体系结构类课程的线上参与式研讨型教学[J]. *计算机教育*, 2021(1): 8-12.
- [14] ZHANG C, LI J X, LYU W G, et al. Computer organization course teaching reform based on student-centered perspective [J]. *Software Guide*, 2020, 19(2): 198-201.
张策, 李剑雄, 吕为工, 等. 以学生为中心的计算机组成原理课程教学改革探索[J]. *软件导刊*, 2020, 19(2): 198-201.
- [15] ZHANG C, LYU W G, LI J X. The reform of ideological and political education in the core curriculum of student-centered computer majors [J]. *Computer Education*, 2021(4): 51-55.
张策, 吕为工, 李剑雄. 以学生为中心的计算机类专业核心课程的课程思政改革[J]. *计算机教育*, 2021(4): 51-55.
- [16] ZHANG C, LYU W G, BAI J, et al. Discussion on course design of principles of computer composition based on application traction and target driving [J]. *Experimental Technology and Management*, 2020, 37(7): 195-199.
张策, 吕为工, 柏军, 等. 应用牵引与目标驱动式计算机组成原理课程教学设计刍议[J]. *实验技术与管理*, 2020, 37(7): 195-199.
- [17] DAI Z T, LIU J P. *Kunpeng processor architecture and programming* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020.
戴志涛, 刘健培. *鲲鹏处理器架构与编程* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.

(责任编辑:黄健)