



虚拟 3D 打印机项目驱动机电一体化 课程教学改革

石 勇, 魏永庚, 王中鲜

(黑龙江大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对目前机电一体化课程存在的教材内容重复、教学模式单一、课程目标缺乏特色、师资不足和试验条件不足的问题, 提出以虚拟 3D 打印机项目为驱动的课程教学模式。该教学模式重新规划理论课程部分内容, 提出非标设备机械设计、计算机控制系统、单片机控制系统、PLC 控制系统、数控系统和通讯协议 6 个专题, 并设计了相对应的 6 个实验作业, 初步实现理论和应用的紧密结合。在课程实践部分设计了一个虚拟 3D 打印机项目, 有效提升学生对单片机控制、计算机编程和机械设计知识的理解、融合和应用。以虚拟 3D 打印机项目为驱动的课程实践避免了实体项目中的硬件、人力和物力要求, 实现了机械与电子控制的全仿真。该教学模式的提出和应用有效地提高了学生的实践和创新能力。

关键词: 机电一体化; 实践及创新能力; 教学改革; 3D 打印机; 虚拟机电系统

中图分类号: G640

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240260

A Project-Driven Teaching Reform for Mechatronics Courses Based on a Virtual 3D Printer

SHI Yong, WEI Yonggeng, WANG Zhongxian

(School of Mechatronic Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150001, China)

Abstract: To address the current issues in the mechatronics course, such as redundant textbook content, a monotonous teaching model, undistinguished course objectives, a shortage of qualified instructors, and inadequate experimental facilities, this study proposes a project-driven teaching model based on a virtual 3D printer. This model restructures the theoretical curriculum around six specialized topics: mechanical design for non-standard equipment, computer control system, microcontroller control system, PLC control system, numerical control system, and communication protocol. Corresponding experimental assignments for each topic were designed to foster a tight integration of theory and practice. In the practical section, a virtual 3D printer project is designed to effectively enhance students' understanding, integration, and application of knowledge in microcontroller control, computer programming, and mechanical design. This project-driven practical approach eliminates the hardware, manpower, and material resource demands associated with physical projects, enabling a comprehensive simulation of both mechanical and electronic control. The implementation of this teaching model has proven to be effective in improving students' practical and innovative capabilities.

Key words: mechatronics; practical and innovative capabilities; teaching reform; 3D printer; virtual mechatronic system

培养高素质专业型人才是高校教学改革的目标, 我国的教育模式正从传统的应试教育逐步趋向于素质教育和创新教育^[1]。因此, 探讨新的教学理念与教学方法, 激发学生自主学习和探究的积极性, 增强学生的实践能力是教育必须承担的责任。

机电一体化属于机械、电气、电子、控制、计算机等多学科交叉的领域, 其核心是通过技术

融合打造出具备智能化、网络化、自动化、高效节能等特点的产品或系统^[2]。在传统制造业向“智能制造”转型的时代背景下, 机电一体化系统的开发和升级已成为机电专业毕业生在实际工作中要面临的典型综合性问题^[3]。作为机电工程学科重要的专业课程, 机电一体化课程的开设目标是培养具备多学科综合素质且能够胜任机电一体化产品设计、制造和控制工作的人才。

收稿日期: 2024-05-14

基金项目: 2022 年度黑龙江省高等教育教学改革研究一般委托项目(SJGY20220186)。

作者简介: 石勇, 博士, 教授, 主要从事机器人方面的研究。E-mail: 2018061@hlju.edu.cn

1 现有机电一体化课程的主要问题

1.1 教材内容重复

现有机电一体化课程教材大多覆盖了机械、电气、计算机、控制和传感器等课程的教学内容,但又受限于课时,所以各部分浅尝即止,各章节仅简单罗列了机电一体化涉及的理论知识,不同知识点之间缺乏内在联系,导致学生不能将各个知识点有机联系起来,更不能从整体上掌握机电一体化技术的核心^[4]。

1.2 教学模式单一

由于教材的内容重复,同时也受限于试验条件的不足,且在传统教学观念的约束下,教师更注重对理论知识的讲解,因此目前机电一体化课程教学大多以课堂为中心,注重对知识的传授过程,导致课程过于单调、枯燥。在这样的教学氛围中,学生无法全身心投入,容易失去学习的兴趣和耐心^[1,5]。

1.3 课程目标缺乏特色

与大多数专业课程的培养目标相似,机电一体化课程的教学目标要求学生掌握机械、电气、电子和计算机等学科的原理和基础知识,熟悉机电一体化技术在工业自动化、智能制造等方面的应用,具备机电一体化产品设计开发能力和解决实际问题能力。在强调素质教育和创新教育的背景下,面对新工科培养实践与创新能力的要求下,课程的教学目标应该强调实践技能的培养和锻炼。

1.4 师资不足

机电一体化课程是典型的多学科相互融合的综合课程^[4],需要教师不仅具有综合学科的理论知识,更需具备一定的机电产品项目研发经验,这对该门课程的教师提出了较高的要求。

1.5 缺乏试验条件

在新工科背景下,想要建立一套适合机电一体化课程实践能力培养目标的试验平台,需要花费大量的人力和物力,然而大多数院校没有这样的资源。面对机电一体化产品动辄上千元,设计开发周期少辄数个月的情况下,基于实体项目驱动的课程培养模式难以实施。

2 解决问题的思路

为破解上述难题,完成提升学生实践能力的培养目标是现有机电一体化课程教学改革的关键,

本文提出以虚拟3D打印机为项目驱动的机电一体化课程教学方法。

项目驱动教学法在理论教学独有的体系上,承载着实践项目教学载体,能有效地把课程理论知识与实践教学项目有机结合起来^[6]。项目驱动教学法已被大多数研究证明有效。文献[7]以草捆捡拾码垛机器人作为教学载体,讲解机电一体化系统典型机械零部件的选型和结构设计方法;传授控制系统的设计和软件编程思想,促进学生的创新能力和专业技能等综合素质的提高。文献[8]引入训练创新与工程实践的机械设计大作业,综合训练学生运用所学机械专业知识进行分析与解决问题的能力。文献[9]基于传感器课程具有的实践性和应用性强特点,提出用于该课程的项目驱动式教学模式。

尽管项目驱动教学方法已被众多课程证明是有效的,但面对机电一体化产品的高成本和长研发周期的特点,采用实体项目驱动的课程教学模式难以复制到本课程中。虚拟技术成为解决这个问题的关键,并且在教学中已广泛应用^[10-14],能够为学生提供身临其境的学习体验,增强学习互动性、降低教学成本、提升教学效果,从而使学生更深入地理解和体验所学内容。然而面对机电一体化课程的实践能力培养需求,以虚拟机电系统项目为驱动开展教学还存在一个难题,即如何模拟机电一体化设备复杂的机械、控制系统和上位机之间的交互。以机电设备的回零过程为例,首先操作者发出指令,电机带动机械设备运动,当碰到零位开关后,零位开关返回控制系统零位触发信号;然后控制系统控制电机反转,带动机械设备回撤一段距离停止;再次慢速碰撞零位开关,而零位开关再次返回控制系统零位触发信号,控制系统控制电机反转脱离零位开关;最后通知上位机回零完成。以上整个过程涉及机械、控制系统和上位机之间的多次交互。

如何解决全软件的机电产品仿真是本课程教学改革成功的关键,NX MCD软件较好地解决了这个问题。Siemens PLC与NX MCD机电模型联合仿真,再集成WinCC组态软件,可以实现机械、控制系统和上位机之间的交互。但是,面对单片机控制系统和计算机控制系统,仅靠Siemens软件已无能为力,必须采用其他的技术才能实现。

3 课程整体规划

本课程共计 32 课时，包含教学理论和实践项目两大类，课时安排如表 1 所示。整个课程聚焦“实践技能的培养和锻炼”这一目标，紧紧围绕融合既有知识。在理论授课内容方面讲解 6 个专题，其目的是介绍如何开展非标设备的结构设计，如何选择控制系统的类型，并完成设计。针对理论教学部分，布置 6 个对应实验内容，并要求学生汇报和讲解，包括：机械设计、单片机控制、计算机编程、PLC 编程和通讯协议应用编程等，完成后的实验内容如图 1 所示。

教学类型	教学内容	实验内容	课时
理论教学 (20课时)	非标设备机构设计	X、Y两轴机构	4
	单片机控制系统	Arduino控制步进电机	4
	计算机控制系统	基于Python开发串口数据采集	4
	PLC控制系统	S7-200数据采集及电机控制	4
	数控系统	Grbl/Marlin	2
	通讯协议	TCP/IP、Modbus TCP及编程	2
实践项目 (12课时)	虚拟3D打印机	3D打印机MCD模型 OPC UA服务器 Proteus/Grbl Grbl Controller	12

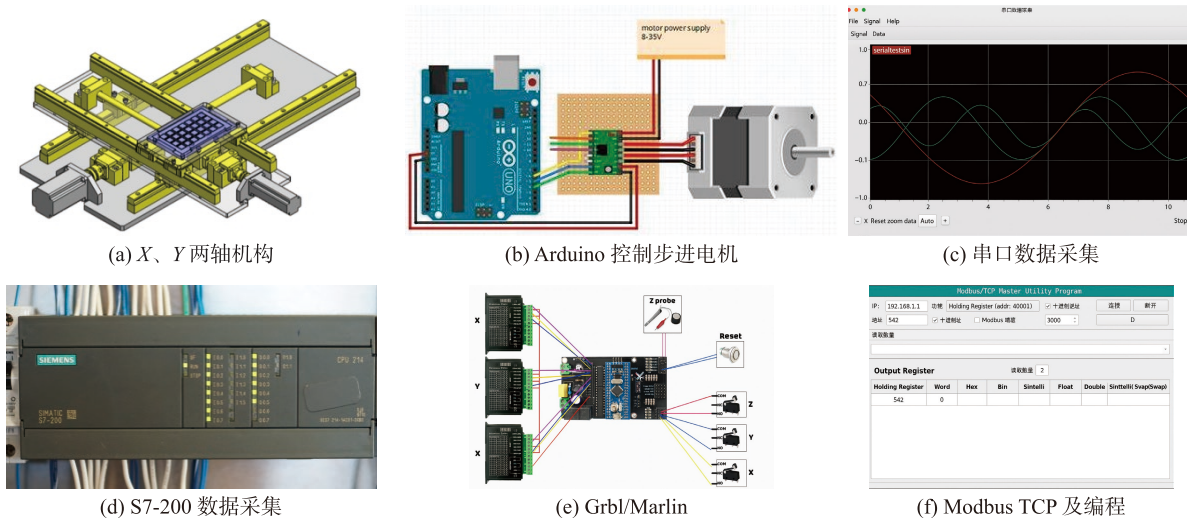


图 1 实验内容展示图

4 虚拟机电系统项目设计

在本课程中选择熔融沉积成型 3D 打印机作为虚拟机电系统驱动项目，因为 3D 打印机是典型的三坐标设备，结构相对简单，受力较小，可参考的模型较多，多数学生感兴趣，更重要的是具有开源代码，容易搭建控制系统。熔融沉积成型 3D 打印机是将低熔点丝状物质融化成液体，通过挤出头沿着零件各截面的轮廓正确移动，堆积成型的增材设备。考虑到本项目仅仅是一个虚拟设备，并不能完成真实热熔式 3D 打印机的所有功能，因此加热和温度反馈，以及打印出丝的功能都被删除。这也导致在单片机固件选择上，本项目采用的是 Grbl，没有选择 Marlin。

Grbl 是基于 Arduino 开发板的开源 CNC 程序，包括 G 代码解释器、上位机通讯、限位、回零、

轨迹规划器和插补器等功能，是 Marlin 固件的底层技术。

本项目涉及的学科和知识内容如表 2 所示，较好地实现了多学科融合。

学科	内容	目的
计算机技术	Python编程	HMI、服务器
数字电路	Proteus仿真	Grbl外部电路，步进电机驱动
单片机技术	Arduino	Grbl CNC
传感器技术	Arduino、MCD	限位开关、位置传感器
机械设计	UG NX/Solidworks 建模	3D打印机
通讯协议	Python	串口、Modbus、OPCUA

整个项目涉及 Proteus、Arduino IDE、Python IDE、NXMCD、Virtual serial port 和其他工程软件。项目实施流程如图 2 所示：Grbl Controller 利用虚

拟串口与 Proteus 里的 Grbl CNC 通讯, 再自行编写一个 sever 程序实现 Proteus 与 MCD 模型的通讯。

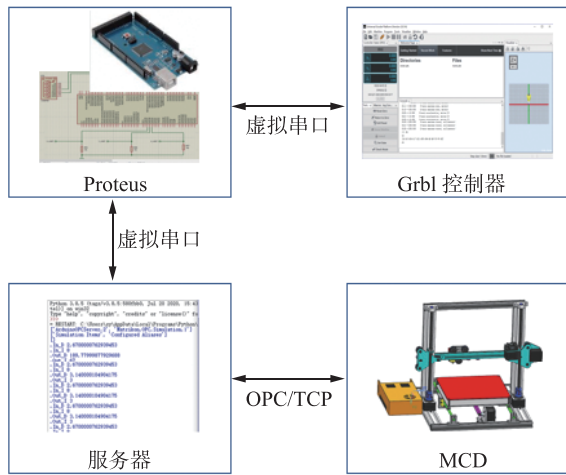


图 2 基于 MCD 的虚拟 CNC 仿真结构图

4.1 项目的建立

4.1.1 用 Proteus 软件仿真运行 Grbl CNC 固件

基于 Arduino Mega 的 Grbl 固件部分缺省引脚功能解释如表 3 所示。尽管 Grbl 还包括主轴、冷却和安全门等功能, 但不属于 3D 打印机, 因此在

本项目中没有考虑。

表 3 Grbl 固件引脚及功能表

功能	变量名称	引脚
X轴脉冲	X_STEP_BIT	Digital Pin 24
Y轴脉冲	Y_STEP_BIT	Digital Pin 25
Z轴脉冲	Z_STEP_BIT	Digital Pin 26
X轴方向	X_DIRECTION_BIT	Digital Pin 30
Y轴方向	Y_DIRECTION_BIT	Digital Pin 31
Z轴方向	Z_DIRECTION_BIT	Digital Pin 32
电机使能	STEPPERS_DISABLE_BIT	Digital Pin 13
X轴限位	X_LIMIT_BIT	Digital Pin 10
Y轴限位	Y_LIMIT_BIT	Digital Pin 11
Z轴限位	Z_LIMIT_BIT	Digital Pin 12

在建立的 Proteus 工程中导入 Arduino Mega-2560 模块, 按照图 3 所示搭建电路, 电路中用到的元件和功能如表 4 所示。本文仅以驱动与控制硬件设计为例介绍如何实现电机驱动, 学生可以自己选择更简单的驱动模块完成设计。

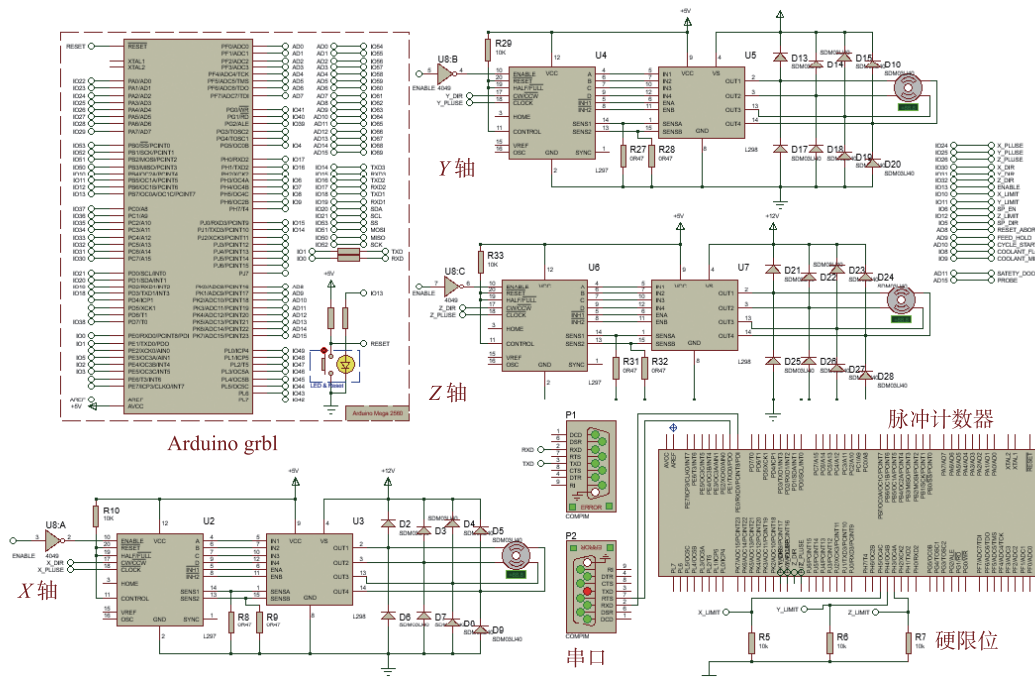


图 3 Proteus 仿真模型

在 Proteus 工程中, 使用了 3 个步进电机模型, 以便学生理解步进电机驱动原理。因为 Grbl 采用脉冲/方向控制方式连接步进电机, 所以模型中使用了 L297 和 L298。另外, 缺省 Grbl 的电机 Enable 控制端口输出低电平有效, 而 L297

要求为高电平有效, 因此使用一个反相器 4049。

模型又添加了一个 Arduino Mega 元件(图 2 中 Pulse Counter 部分), 用于记录 Grbl 的 X、Y、Z 轴发出的脉冲数和方向, 然后利用串口通讯发送给 sever 程序, sever 程序再将脉冲数传给 3D 打印

机 MCD 模型；它还接收 sever 程序传来的 3D 打印机 MCD 模型的限位开关状态，然后控制 Proteus 模型里的 X、Y、Z 轴硬限位输出对应状态(图 3 中硬限位部分)。

Proteus 模型设计了两个串口模块(COMPIM)，一个与上位机通讯，一个与 sever 程序通讯。

表 4 仿真元件及其功能

元件	功能
Arduino Mega	Arduino Mega2560
4049	反相器
L297	步进电机控制集成电路
L298	双H桥功率集成电路
Motor-BISTEPPER	步进电机
SDM03U40	二极管
COMPIM	串口
Res	电阻

4.1.2 用虚拟串口软件实现 Grbl 与上位机及 sever 的通讯

如果希望上位机程序控制 Proteus 里的 Grbl 运行，还需要使用 Virtual serial port 软件建立 2 个虚拟串口连接。在 Virtual serial port 中设置 COM1 和 COM2 为一对，在 Proteus 的 COMPIM 中采用 COM1，则上位机程序连接到 COM2 口即可完成两者的通讯。

4.1.3 3D 打印机 MCD 模型建立

项目实施开始，向学生提出打印机结构尺寸在 500 mm×500 mm×800 mm 以内，采用笛卡尔坐标结构(非笛卡尔坐标结构会涉及轴耦合的问题，导致项目难度增加)，推荐 42 型步进电机，以型材作为结构框架，采用标准化移动模组，挤出头采用模块化产品，按照集成化的设计思想完成机械结构设计。学生建立的 3D 打印机模型如图 4 所示。此后，在 NX MCD 软件中需要建立机电系统仿真模型，并设置 NX MCD 与外部信号的通讯。

4.1.4 服务器的开发

MCD 提供了多种通讯方式，包括：OPC DA、OPCUA、TCP/IP、ModbusTCP、MATLAB、PLCSIM Adv、UDP 和 PROFINET。在本文作者编写的教材《Grbl 代码解析及虚拟机电系统仿真》中详细介绍了前 4 种通讯方式的编程方法。服务器程序实现两个功能，一是建立与 MCD 模型的通讯(OPC UA 协议)，二是建立与 Proteus 串口的通讯。

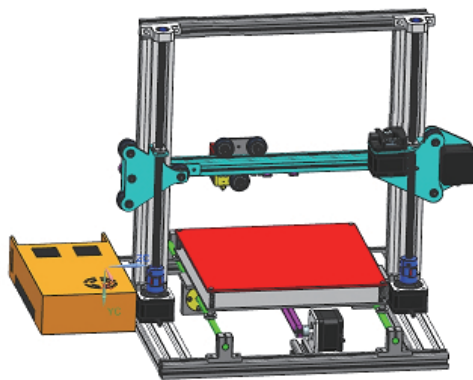


图 4 3D 打印机 MCD 模型图

4.1.5 上位机的开发

鼓励学生采用 Python 语言编写上位机程序，并在教材《Grbl 代码解析及虚拟机电系统仿真》中详细介绍如何开发。此外，对于编程基础不足的学生，还可以采用开源上位机程序(UGS)。

4.2 项目测试和试验

经过以上步骤，学生搭建出虚拟 3D 打印模型，并实现机械与控制系统的全软件仿真，如图 5 所示。在仿真过程中，学生需要开展如表 5 所示的试验，这些试验基本实现了三坐标设备的操控功能。完成这些试验即表明学生的项目是成功的，又能保证学生更好地理解三坐标数控设备的功能和设计原理。最后，作为成绩的一部分，要求学生制作仿真视频，上传到个人抖音账号。

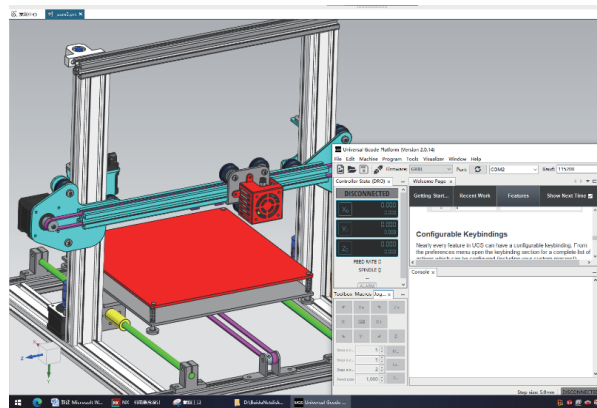


图 5 3D 打印机 MCD 模型界面

4.3 教学模式实施效果分析

本课程教学改革已实施两年，从学生和教师得到的反馈如下。

- 1) 动手实践能力有明显提高。特别是在低压电器元件的电路图理解和实物接线方面表现显著。
- 2) 编程能力有所增强。考虑到项目实施中需

要的上位机编程和单片机编程等工作,学生在Python和C语言应用上得到了更多的锻炼。

3) 扩展了知识面,对学科的融合更加紧密。机械和电气的融合是机电一体化课程的核心目标,理论课程教学很难帮助学生理解机电如何一体化,但是身临其境的虚拟环境很容易达成此目标。

4) 学习的主动性显著增加。所有的教学及实践内容紧紧围绕自身技能水平的提升,这种看得见的能力培养给了学生巨大的学习动力。

表5 打印机仿真试验内容

试验项目	试验目的
JOG	测试X、Y、Z轴的JOG运动,改变方向和进给率
程序运行	运行G代码程序,测试循环运行/暂停
系统复位	测试系统复位功能
回参考点	观察X、Y、Z轴回参考点的过程,注意硬限位的触发状态
参数设置	试验测试Grbl参数的功能,如回参考点的相关参数
MDI	测试MDI(手动命令输入)功能
硬限位	观察X、Y、Z轴触发硬限位的过程和系统响应
软限位	观察X、Y、Z轴触发软限位的过程和系统响应
位置显示	分析Grbl代码和通讯协议,确定如何获取Grbl位置参数

5 结束语

机电一体化课程承载着机电一体化专业学生对机械与电子控制专业学科融合的期望,也面临培养具备实践和创新能力人才的社会需要压力。针对目前普遍存在的机电一体化课程教材不合理、教学模式单一、课程目标缺乏特色、师资不足和缺乏试验条件的问题,本文提出以虚拟3D打印机为案例的虚拟机电系统项目驱动教学模式,对课程内容和教学方法进行改革,取得了以下成效。

1) 对机电一体化课程内容和讲解模式的重新规划可以避免课程内容重复,解决机械与电子控制专业知识不易融合和教学模式单一的问题。

2) 虚拟机电系统为项目驱动力的课程教学模式可以有效解决机电一体化课程面对的缺乏试验条件的问题。

3) 虚拟3D打印机项目有效融合了机电一体化课程要求传授的知识,提升了学生的实践和创新能力。

4) 以虚拟3D打印机项目为案例的虚拟机电

系统全软件仿真模式,有效地解决了机械系统与单片机控制系统的联合仿真,扩展了机电系统仿真的应用广度。

本文提出的虚拟机电系统全软件仿真模式还适用于机械系统与计算机控制系统的联合仿真,以及机械系统与其他PLC控制系统的联合仿真。

参考文献

- [1] 刘会聪. 机电一体化教学探讨与策略研究[J]. 中国教育技术装备, 2017(20): 144-145.
- [2] 李炳初, 杨丽红, 孙福佳. 以工程创新能力为导向的“机电一体化”课程教学模式探索[J]. 南方农机, 2023, 54(11): 170-173.
- [3] 杨新刚, 刘鸿雁, 呼刚义, 等. 机械专业机电一体化综合实践课教学模式探索[J]. 高等工程教育研究, 2021(5): 88-93.
- [4] 嵇海旭, 梁秀娟. 机电一体化教学存在的问题及其改革[J]. 教育教学论坛, 2020(27): 175-176.
- [5] 李博. 工程教育认证背景下的《机电一体化技术》教学改革研究[J]. 包装工程, 2020, 41(S1): 144-146.
- [6] 姚运金, 余茂静, 陈树海, 等. 项目教学法驱动研究生课程教学改革与实践: 以“化工设计与过程优化”课程为例[J]. 化学教育(中英文), 2019, 40(22): 69-73.
- [7] 李海芸, 叶大鹏, 邱荣斌, 等. “机电一体化”课程移动机器人协作实验平台搭建与探索[J]. 现代电子技术, 2019, 42(15): 150-153.
- [8] 尹来容, 张健, 胡宏伟, 等. 项目驱动的机械设计实践课程反向设计与研究[J]. 机械设计, 2018, 35(S2): 203-205.
- [9] 谢建宏. 基于项目驱动传感器原理课程教学改革研究[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(10): 216-218.
- [10] 苗丹, 卢伟. 以项目为驱动的信号处理类课程教学改革实践[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(1): 212-217.
- [11] 侯琼, 朱晓磊, 李明轩, 等. 轻质结构材料力学性能虚拟教学实验平台的开发与应用[J]. 实验力学, 2022, 37(5): 765-774.
- [12] 谷艳华, 苗广文, 杨得军. 混合教学模式下虚拟仿真教学的探索与实践[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(7): 188-191.
- [13] 杨太华, 汪洋, 赖小玲. 基于BIM技术的工程管理综合实验虚拟教学平台的构建[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(8): 108-111.
- [14] 潘公宇, 江浩斌, 刘志强, 等. 车辆工程专业虚拟仿真实验教学平台的设计[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(4): 1-5.