



## 基于 OBE 的三坐标测量机大仪实践教学建设

汤洁, 姜可嘉, 吴信辉

(北京工业大学机械与能源工程学院, 北京 100124)

**摘要:** 工程教育专业认证背景下, 针对机械类、智能制造和测控等专业的本科生实践课程教学, 需要建设精密仪器或精密测量系统的综合实训课程。三坐标测量机(CMM)是广泛应用于工程领域的融“光、机、电、算”于一体的典型精密仪器, 选用该仪器作为实践教学平台, 建设了三坐标测量机通用测量软件 PC-DMIS 和脱机版 PC-DMIS 软件实践系统, 并明确了基于成果导向教育(OBE)的教学目标和达成度评价方法。依托该实践系统, 开展了多轮实践课程教学, 学生通过实践训练能解决精密零件复杂测量工程问题, 可掌握通用测量软件 PC-DMIS 的应用, 并了解其专用软件开发。实践证明, 实践系统有助于培养学生的实践和创新能力, 可为相关专业实践课程建设提供参考。

**关键词:** 实践教学; 专业认证; 成果导向教育; 仪器; 三坐标测量机

中图分类号: G642.3

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240007

## Construction of CMM Large-scale Instrument Practical Teaching Based on OBE

TANG Jie, JIANG Kejia, WU Xinhui

(College of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Under the background of engineering education certification, it is necessary to build a comprehensive practical training course for precision instrument or precision measurement system for undergraduate students majoring in mechanical engineering, intelligent manufacturing, and measurement & control majors. Coordinate measuring machine (CMM) is selected as a practical teaching platform, which is a typical precision instrument integrating “optical, mechanical, electrical and computing”. The measuring practice platform of general measuring software PC-DMIS of CMM and the offline software programming practice teaching platform are built, the teaching objectives for outcomes-based education (OBE) are defined, and the method of teaching goal achievement degree analysis are given. Several rounds of practical courses teaching have been carried out. Through practical training, students can solve complex measurement engineering problems of precision parts, master the application of general measurement software, and get familiar with its special software development. The CMM large-scale instrument practice system teaching based on OBE is helpful to cultivate students' practice and innovation ability, and can provide reference for the construction of relevant professional practice courses.

**Key words:** practical teaching; engineering education certification; OBE; instruments; CMM

在测控技术与仪器专业、机械类专业的课程中需要建设精密仪器和精密测量系统相关的实践课程, 以提升学生的专业素养、实践动手能力和创新能力。智能制造专业系列课程的知识结构中支撑技术包含了传感与测量技术<sup>[1]</sup>, 教学实践需涉及智能制造全生命周期, 而实践教学内容有待推

陈出新<sup>[2]</sup>。在深化“新工科”建设中, 要求将相关学科专业发展前沿成果融入教学过程<sup>[3]</sup>。

工程教育专业认证倡导 OBE 教育理念<sup>[4]</sup>, 要求明确学生毕业要求, 再根据毕业要求达成反馈来持续改进课程设计与课程教学。教育部要求高校贯彻落实以学生为中心、以产出为导向、持续

收稿日期: 2024-01-10; 修回日期: 2024-02-21

作者简介: 汤洁(1975-), 女, 博士, 副教授, 主要从事精密测试技术与仪器方面的研究。E-mail: tangjie@

bjut.edu.cn

改进的理念<sup>[5]</sup>。

围绕实践教学建设方面,文献[6]采用理论和实践并行的教学模式,测量实习中以模拟工程项目为驱动贯穿教学过程;文献[7]开发和建设了一系列测控专业创新型实验项目,探索其实施模式;文献[8]基于Labview软件控制各种传感器的机械测控综合实验课程,在学生无法直接操作实验设备背景下,开展了线上线下混合教学实践。

基于OBE的实践课程建设方面,文献[9]构建了工程教育背景下机械专业实践教学新体系,阐述了基于OBE教育理念的实践教学质量和保障体系;文献[10]以工程能力提升为目标导向,基于软件工程全生命周期,教学模式变为学生自主设计,通过OBE达成度和成绩正态分布结果来验证学习效果;文献[11]针对嵌入式测控技术课程群建立了OBE下的课程群标准,开发了系列项目化工程案例,并给出了教学案例建设。

以往相关实践课程建设中涌现了理论与实践并行模式、开发创新实验项目、项目化工程案例、学生自主设计和线上线下混合教学等内容。而本文基于OBE的精密仪器实践教学建设重点在于选择一款精密仪器并开展实践教学建设,让高效的实践教学成为可能,并可在此基础上开展教学模式探索和研究。

三坐标测量机作为一种通用性强、自动化程度高的融“光、机、电、算”于一体的精密测量系统,广泛应用于汽车、航空航天、机械制造、电子等领域。三坐标测量机由测量机主机、控制系统、测头系统、测量软件4部分组成,可分为悬臂式、龙门式、桥式、高精度型、车间型等。通用测量软件PC-DMIS目前已经安装超过3万套,被认为是功能最为强大的坐标测量机通用软件。目前三坐标测量机主要厂商国外有瑞典海克斯康、德国蔡司、日本三丰等,国内有航空303所、爱德华、德普赛科等,其中海克斯康目前在国内市场占比近一半。

选用典型仪器三坐标测量机作为实践平台可为精密仪器、精密测量实践教学提供有力支撑。本文主要建设了三坐标测量机精密仪器实践教学系统,描述了主要教学内容,并基于OBE给出了教学目标和达成度评价方法,分析了多轮教学的实施效果。

## 1 三坐标测量机大仪实践教学系统建设

针对精密仪器和精密测量实践教学需求,为了培养学生面向精密测量系统和通用测量软件的实践性和创新性,开展了三坐标测量机仪器实践教学系统的建设,主要包括教学系统建设和配套教学资源建设。

### 1.1 教学系统建设

该实践教学系统主要由三坐标测量机实践系统和脱机版PC-DMIS软件实践系统组成。三坐标测量机实践系统由海克斯康实践型三坐标测量机、被测精密零件、校准球、工装夹具、测球测杆等构成,如图1所示。测量机型号为POLESTAR443,设备行程为400 mm×400 mm×300 mm;设备精度的长度测量最大允许示值误差 $G/M \leq (5.0+L/200) \mu\text{m}$ ,重复性测量精度示值误差 $R \leq 5.0 \mu\text{m}$ ;工作台承重150 kg、设备总重260 kg、设备外观尺寸为720 mm×880 mm×1 810 mm。

脱机版PC-DMIS软件实践系统是由一台主机(台式电脑)作为服务器,加上路由器、无线网卡和其他若干台式电脑构成的内部局域网,其构成如图2所示。每台电脑装有脱机版PC-DMIS软件。

为了辅助教学,教学环境需配备投影仪、幕布和教学电脑。所述的一台测量机配10套脱机版PC-DMIS软件的教学系统,建议用于20人以内的实践教学。选课学生人数多的情况,可以开展多个教学课堂或者建设多套教学系统。

### 1.2 配套教学资源

为了顺利开展教学,需要配备较为完善的教学资源,主要包括以下4点:

- 1) 被测精密零件的图纸供学生开展测量分析;
- 2) 被测零件的数模用于导入测量软件,开展基于数模的测量软件训练;
- 3) 为学生选定相关教材<sup>[12]</sup>,制作实践指导书、教学课件和教学视频;
- 4) 实践教学人员应具备相关专业背景,需参加仪器培训,并加强实践训练。

实践训练需要用到实体零件及其设计数模。被测零件可以来源于工程项目或者自主定制,可以通过其测量特征的难易程度体现实践能力和创新能力的培养。



图 1 三坐标测量仪器实践教学系统实物图

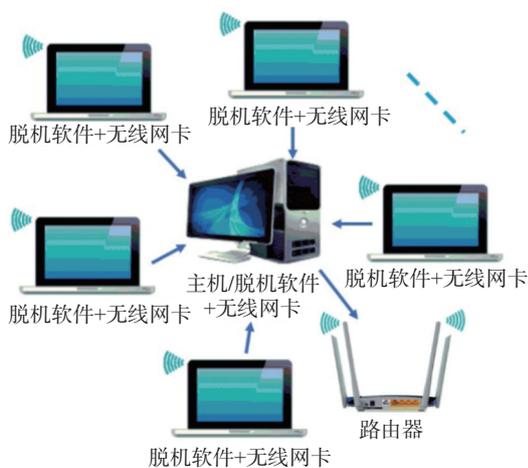


图 2 脱机版 PC-DMIS 软件实践系统构成图

## 2 实践教学主要内容

目前建成的主要实践教学模块包括：测量准备、测球校准和建系、手动测量、自动测量、脱机测量和二次开发。各教学内容可在三坐标测量机实践系统、脱机版 PC-DMIS 软件实践系统上单独或组合开展。

### 2.1 测量准备

测量准备教学模块的作用是为了保障后续实践教学的顺利开展，需要具备相关背景知识并开展基本训练，主要包括以下 7 点。

- 1) 熟悉公差分类、符号和定义，包括形状公差、位置公差、方向公差和跳动公差。
- 2) 了解机器坐标系规定，操作人员位于仪器正前方，左右方向为  $X$  轴，右方为正；前后方向为  $Y$  轴，后方为正；上下方向为  $Z$  轴，上方为正；一般原点在左、前、上方位置。
- 3) 测头  $A$  角、 $B$  角概念，测座与机器  $Z$  轴相连， $A$  角是测头向前向后的摆角，可在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  之间选取，不同测头型号摆角区间可能不同； $B$  角指测头绕机器  $Z$  轴旋转的角度，可  $360^\circ$  旋转，在  $-180^\circ \sim 180^\circ$  之间选取。
- 4) 标准球的方向是指支撑杆指向球的方向，用  $I$ 、 $J$ 、 $K$  来表示：与  $X$  轴夹角的余弦值称之为  $I$ ；与  $Y$  轴夹角的余弦值称之为  $J$ ；与  $Z$  轴夹角的余弦值称之为  $K$ 。
- 5) 测头基本参数，包括测球直径、测针总长

度、测杆直径、有效工作长度等。

6) 需要熟悉操纵盒各按键功能及操作。

7) 进行开关机流程操作。

## 2.2 测球校准和建系

测球校准和建系教学模块是在完成测量准备工作之后、开展零件测量之前需要进行的仪器操作,主要包括以下3点:

1) 开机后,按测头选型在PC-DMIS软件中配置测头,在工作台固定标准球,如图3所示;

2) 软件中添加测头角度、定义标准球、设置其他校准参数,根据测量需要开展单测针校验或多测针校验;

3) 最后查看结果,包括各测头角度的测球中心的实测坐标数值及标准差。

测球校准完成后才能进行后续操作。没有通过校验的测头角度,后续不能正确采集数据。



图3 测球校准图

建立工件坐标系主要内容包括以下3点。

1) 在工作台正确进行零件装夹,基本原则是在满足测量要求的前提下用尽量少的装夹次数完成全部测量;并需要进行零件机械找正,避免测量过程中的测针干涉。

2) 手动粗建工件坐标系,按建系方法在被测零件表面测点采集后,在软件中插入新建坐标系。建系基准面的确定需要结合被测零件图纸中的公差标注。

3) 自动精建工件坐标系,需要在手动建系的基础上添加移动点,避免自动采点过程中的碰撞或干涉。被测零件装夹示意图如图4所示。

## 2.3 手动测量

手动测量模块的主要内容包括以下4点。

1) 手动测量之前,需要分析被测零件图纸,

厘清被测尺寸和形位公差的设计值、公差值,以及零件的关联特征,排列各项目的测量顺序,确定测头角度。

2) 手动测量特征,操作操纵盒移动测头在被测零件表面采集测量点并在程序框生成程序代码。手动测量特征有:点、直线、平面、圆、圆槽、方槽、圆柱、球、圆环。不同特征对测量点数有要求,测量二维元素时,须确认选择了正确的工作平面。

3) 测量特征之后,进行尺寸评价,主要包括评价尺寸误差和几何误差。尺寸误差包括位置、距离、夹角;几何误差即形位误差,包括形状误差和位置误差。

4) 最后可以设置或查看测量报告。



图4 被测零件装夹示意图

## 2.4 自动测量

自动测量模块的主要内容包括以下两点。

1) 自动测量是在精建坐标系之后,通过PC-DMIS软件的特征参数交互设置测量参数生成程序代码,在自动模式下实现特征的自动测量,不同特征连续测量过程中需要注意添加移动点避免测头与被测零件表面的碰撞。

2) 自动测量特征有:矢量点、曲面点、棱点、角点、隅角点、高点、直线、平面、圆、椭圆、圆槽、方槽、凹口槽、多边形、圆柱、圆锥、球等。有些特征元素不能直接测量得到,需使用构造功能。至此,递进式的教学模块可串联完成精密零件在三坐标测量机的测量全过程。

## 2.5 脱机测量

脱机版PC-DMIS软件是在PC-DMIS基础上使计算机在不连接三坐标测量机的情况下独立完成编程、调试与故障排除,主界面如图5所示。软件具备了以动态的形式在模型上进行模拟测

量、碰撞测试和生成报告。联机检测时把程序导入即可安全运行。脱机版软件可以让三坐标测量机进行零件检测的同时继续对其他零件进行独立编程，有助于提高测量和编程效率。

脱机测量教学模块在软件中鼠标操作数模的同时生成程序代码，主要内容包括：在脱机版 PC-

DMIS 软件中定义测头系统和校准测球；导入被测零件的数模；用鼠标控制数模姿态和选择测点；选择“程序模式”，建立数模坐标系；手动或自动模式下测量特征并开展尺寸或公差评价；查看或输出报告。编程过程中可以显示/隐藏机器模型、测头模型和零件模型的部分特征等。

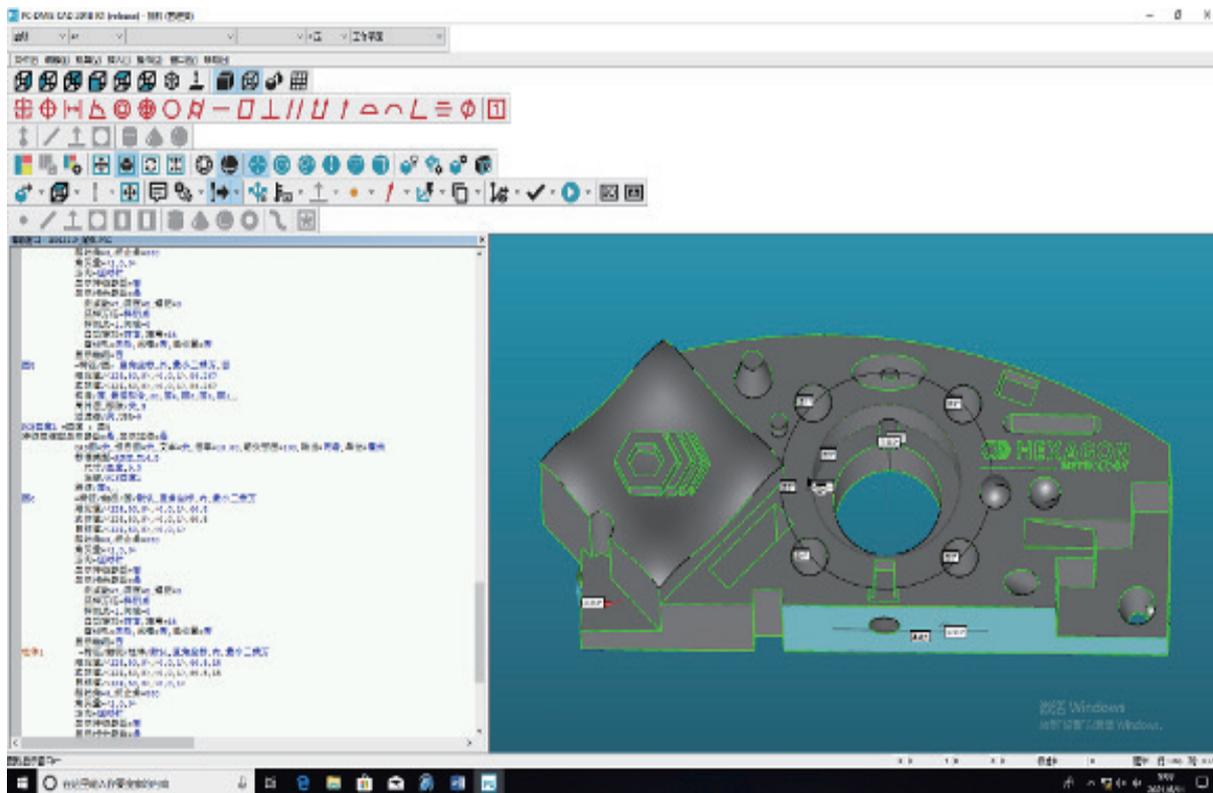


图 5 脱机版 PC-DMIS 软件主界面

### 2.6 二次开发

为提升学生创新能力，建立了针对复杂形状机械零件测量——以圆柱齿轮为例的 PC-DMIS 专用测量程序二次开发，如图 6 所示。该模块适用于能力较强学生的拓展学习，相关建设包括：中模数齿轮、装夹底座、熟悉齿轮精度标准及坐标测量方法。

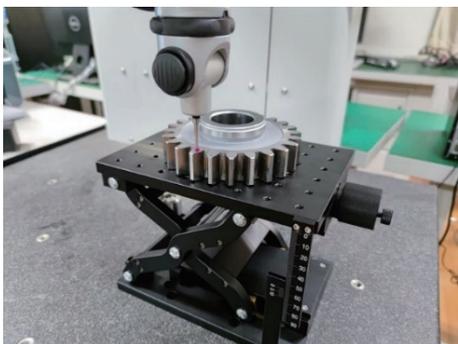


图 6 圆柱齿轮测量程序二次开发示意图

主要教学内容包括以下两点。

1) 建立三坐标测量机齿轮测量方法，建立被测齿轮零件坐标系，根据被测特征点理论坐标与法矢量对测量路径进行规划，开展特征点的测量，并根据圆柱齿轮精度标准对其单项偏差进行评价。

2) 熟悉三坐标测量机齿轮专用测量软件的开发方法，在 PC-DMIS 基础上二次开发专用测量程序，实现测量。

### 3 基于 OBE 的教学设计

以测控技术与仪器专业为例，工程教育专业认证的 12 条毕业要求包括：工程知识、问题分析、设计/开发解决方案、研究、使用现代工具、工程与社会、环境和可持续发展、职业规范、个人和团队、沟通、项目管理和终身学习<sup>[13]</sup>。

工程教育专业认证倡导的 OBE 背景下的课程教学设计,需要凝炼对应毕业要求的教学目标,并给出教学目标总达成度评价。

### 3.1 基于 OBE 的教学目标

对照 12 条毕业要求,本实践教学的教学目标主要为毕业要求中的“工程知识”“问题分析”“使用现代工具”提供支撑。实践教学目标主要包括以下 3 点。

1) 能够将三坐标测量机及其 PC-DMIS 测量软件基础知识用于解决精密零件复杂测量工程问题。知识包括:坐标测量系统的轴系和基准面、测头角度和矢量方向、测球校准方法等。

2) 能够分析精密零件的工程图纸,确定解决精密零件复杂测量工程问题所需的技术及其可行性,并获得有效结论。图纸分析可得到测量坐标系和基准面、测量尺寸和形位公差的测量参数信息,并确定测量方案。

3) 能够使用现代工具 PC-DMIS 通用测量软件对精密零件复杂测量工程问题进行手动测量、自动测量和脱机编程,实现精密零件尺寸误差和形位误差的评价。

### 3.2 教学安排

实践课程教学 32 学时分配如下:三坐标测量机发展历程及系统结构、课程安排,2 学时;测量准备教学模块,2 学时;测球校准和建系教学模

块,4 学时;手动测量教学模块,4 学时;自动测量教学模块,4 学时;脱机测量教学模块,4 学时;二次开发教学模块,8 学时;操作考核,4 学时。该门课程教学学时可延至 60 学时来增加学生的实践训练时长。

课前向学生布置任务,包括文献调研、指导书或资料的预习;课堂教学一般分为知识讲解、操作演示和分组训练 3 步骤;课后布置实践报告撰写任务。

### 3.3 考核方式

本实践课程采用过程考核方式,考核环节包括平时成绩、实践报告和操作考核。平时成绩由选课学生平时上课的出勤和课堂表现决定,占总成绩的 40%;实践报告为学生提供模版,包括知识点、测量(含方法、过程、代码和数据结果)、总结等,占总成绩的 30%;操作考核中,为避免任务重复,将几个被测零件的若干测量任务随机分配给参加考核的学生,占总成绩的 30%。

### 3.4 达成度评价

考虑 OBE 要求,该课程教学目标总达成度计算如下:

教学目标总达成度 =  $\sum$  教学目标达成度  $\times$  教学目标达成度权重

课程各考核环节权重、教学目标对毕业要求的达成度,以及教学目标总达成度的算例如表 1 所示。

表 1 教学目标总达成度算例

毕业要求	教学目标	考核环节得分	权重	教学目标达成度	
				数值	权重
工程知识	第一点	实践报告: 知识点 0.92	1.0	0.92	0.10
		实践报告: 测量 0.87	0.6	0.52	0.15
问题分析	第二点	操作考核 0.85	0.4	0.34	0.05
		平时成绩 0.91	1.0	0.91	0.40
使用现代工具	第三点	操作考核 0.85	1.0	0.85	0.25
		实践报告: 总结 0.95	1.0	0.95	0.05
教学目标总达成度				0.82	

### 3.5 持续改进

按工程教育专业认证要求,应持续改进课程设计与课程教学。本课程教学在期末向学生征集教学改进意见和建议。每轮教学的成绩分析中,以教学目标总达成度为依据,结合学生建议,充分分析教学过程中的不足,并提出改进措施;在下一轮教学的成绩分析中,应答所述改进措施的实施情况,并再作分析和改进,以此循环持续改进。

## 4 教学实践成效

精密仪器实践课程中引入三坐标测量机实践教学系统,通过测量主机和脱机编程相结合的教学方法,将基本知识与仪器测量编程紧密结合,提高学生学习兴趣的同时,进一步提高了学生的主观能动性和实践创新能力。该实践教学系统建成以来,已经面向相关专业本科生开展多轮实践

教学。结合课程实际教学效果及学生成绩来看,主要成效有以下 4 点。

#### 1) “实体-数模”, 支撑高效实践

三坐标测量机精密仪器实践教学系统建设较为复杂。建设一台三坐标测量机的情况下,如果仅在仪器主机开展精密零件测量实践教学,可能会影响学生参与程度和教学进程。在主机开展实体零件精密测量实践训练的同时,结合零件的数模在脱机版软件系统中开展实践。这样的“实体-数模”相结合的实践教学模式,一方面简化了教学系统建设、大大增加了学生对实践环节的参与;另一方面也让学生了解先进的数字化测量技术。

#### 2) 软件训练, 掌握现代工具

PC-DMIS 是应用广泛的通用测量软件。学生通过在主机开展训练、在配备的脱机版软件中进行编程训练,可以系统、深入地掌握通用测量软件编程技术;能力较强的学生还可以进行 PC-DMIS 二次开发,拓展学习深度。学生反映通过这门实践课程,掌握了一门新技能,受益匪浅;提高了精密仪器操作水平,获得了宝贵的仪器操作经验,为未来学习与科研打下坚实基础。

#### 3) 过程考核, 促进全程投入

实践课程采用过程考核,规避了考前突击、一考定成绩。课程教学的全程都引导学生每次课程都认真投入实践训练,加强课前准备和调研。考核成绩覆盖平时成绩、实践报告和操作,并增加平时成绩占比来提高学生参加实践训练的积极性。

#### 4) 学以致用, 提升专业素养

本实践课程的先修课程是工科数学、误差理论与数据处理、精密机械精度设计等,所学内容在本实践课程里均得到延续。围绕一套精密仪器的系统、方法和软件的深入学习,强化了学生对精密仪器或装备的感性认识,通过实践训练能解决精密零件复杂测量工程问题。学生拓宽了专业知识面,加深了专业认知。在训练过程中,通过细致的、循序渐进的精密测量操作,让学生体会到工作中要具备的细致耐心。

## 5 结束语

针对精密仪器、精密测量的实践教学需求,建设了三坐标测量机精密仪器实践教学系统,可实现测量主机和脱机编程相结合的实践教学。开发了完善的教学模块,基于工程教育专业认证倡导的 OBE 给出了教学目标和达成度评价方法,并结合多轮教学得出教学成效思考。该实践课程建设可为测控技术与仪器、机械类和智能制造等相关专业的实践课程建设提供参考。

### 参考文献

- [1] 李培根,高亮. 智能制造概论[M]. 北京:清华大学出版社,2021.
- [2] 袁林江,何桂霞,刘福庆,等. 智能制造专业实践教学创新路径的探究[J]. 实验科学与技术,2023,21(1): 109-113.
- [3] 教育部、国家发展改革委、工业和信息化部、财政部、人力资源社会保障部. 普通高等教育学科专业设置调整优化改革方案[Z]. 2023.
- [4] 顾佩华,胡文龙,林鹏,等. 基于“学习产出”(OBE)的工程教育模式:汕头大学的实践与探索[J]. 高等工程教育研究,2014(1): 27-37.
- [5] 李志义. 解析工程教育专业认证的持续改进理念[J]. 中国高等教育,2015(Z3): 33-35.
- [6] 张敬宗,许海亮,宋小软,等. 工程测量理论与实践并行教学模式的改革[J]. 实验科学与技术,2023,21(2): 83-87.
- [7] 曾飞,李公法. “跟进式教育”理念下测控专业创新型实验项目建设与探索[J]. 实验室研究与探索,2020,39(5): 176-181.
- [8] 迟玉伦,应晓昂,刘建国. 疫情下机械测控综合实验线上线下载混合教学实践[J]. 实验科学与技术,2021,19(6): 70-74.
- [9] 周龙,景大雷. 工程教育认证背景下机械专业实践教学体系建设[J]. 实验室科学,2020,23(1): 71-74.
- [10] 吴祖峰,蓝天. 基于成果导向的软件工程实践教学模式研究[J]. 实验科学与技术,2023,21(5): 77-82.
- [11] 宋跃,余焯业,胡胜,等. 基于 OBE 的嵌入式测控技术课程群建设与探索[J]. 实验室研究与探索,2016,35(6): 208-210.
- [12] 鲁储生,张宁. 精密检测技术[M]. 北京:机械工业出版社,2019.
- [13] T/CEEAA 001—2022 工程教育认证标准[S]. 中国工程教育专业认证协会,2022-07-13.

编辑 葛晋