



“新工科”背景下机电系统控制实验课程 改革与实践

李小鹏, 苗志怀*, 王彬彬, 李洪泉

(哈尔滨工业大学(深圳) 实验与创新实践教育中心, 深圳 518055)

摘要: 针对当前机电系统控制实验课程的教学现状, 结合“新工科”多元化、创新型卓越工程人才的培养新要求, 构建了“强基础、重分析、知识过渡、创新设计”的多元化机电系统控制实验教学体系, 建立了以前沿科技激发兴趣, 学生独立设计与思考, 教师辅助指导与启发, 多平台资源并用的多维度实验教学模式, 形成了全方位、多角度、综合性强的实验教学评价体系。通过对该实验课程的改革与实践, 增强了学生学习积极性, 有利于学生对控制知识的深刻理解和掌握, 并进一步提高了其学以致用和科技创新能力。

关键词: 新工科; 机电系统控制; 多元化; 多维度

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230571

Reform and Practice of Electromechanical System Control Experimental Courses under the Background of “New Engineering”

LI Xiaopeng, MIAO Zhihui*, WANG Binbin, LI Hongquan

(Experimental and Innovation Practice Education Center, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

Abstract: In view of the current teaching status of electromechanical system control experimental courses, combined with the new requirements for cultivating diversified and innovative outstanding engineering talents in “new Engineering”, a diversified electromechanical system control experimental teaching system with “strong foundation, emphasis on analysis, knowledge transitions, and innovative design” has been constructed. A multi-dimensional experimental teaching model that uses the cutting-edge technology has been established to stimulate students’ interest, students design and think independently, teachers assist with guidance and inspiration, and multi-platform resources are used together. An all-round, multi-angle, and comprehensive experimental teaching evaluation system has been formed. Through the reform and practice of this experimental course, students’ learning enthusiasm is enhanced, which is conducive to students’ deep understanding and mastery of control knowledge, and further improves students’ knowledge application and scientific and technological innovation abilities.

Key words: New Engineering; electromechanical system control; diversity; multi-dimensional

党的二十大报告提出“三个第一”, 即科技是第一生产力、人才是第一资源、创新是第一动力^[1]的重要论述, 着重强调教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑。这意味着将教育、科技、人才摆在了新时代新征程发展的重要位置。在“新工科”背景下, 课程教学更加注重跨学科融合、实践导向、创新思维、团队合作和社会责任感, 重视工程教育、

创新教育的交叉融合, 学生的综合实践能力的提升, 让学生能够具备全面的素养和能力, 适应快速变化的社会和工程领域的需求^[2-3]。

机电系统控制是现代工程领域的核心技术之一, 课程包含了机械、电气、自动化等多学科知识, 是智能机器人发展最重要的学科之一^[4-6]。在实验教学改革中, 围绕“新工科”人才培养方式, 将控制理论与基础电路和多元化电机控制对

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-02-11

基金项目: 2020 年哈尔滨工业大学(深圳) 高等教育教学改革项目(HITSZERP20030); 广东省高等教育学会“十四五”规划 2024 年度高等教育研究课题(24GYB215)。

作者简介: 李小鹏(1995-), 男, 硕士, 助理实验师, 主要从事机械基础和机电系统控制实验教学与研究工作。

*通信作者: 苗志怀(1978-), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事工业机器人运动规划实验教学研究。E-mail:

miaozhihui@hit.edu.cn

象巧妙融合, 为学生提供扎实的学科交叉知识; 通过传感器、执行器、控制器的学习和应用, 培养学生的工程实践能力; 利用多元化控制对象进行自主设计、动手实践, 团队合作, 让学生具备专业的综合能力和素质。

1 机电系统控制实验教学现状及存在问题

机电系统控制实验教学针对机械、电气、自动化专业学生, 分别在机械动力学、电气控制以及控制系统与算法上进行实验设计。实验内容往往围绕电路、电机进行设计或者以线上控制算法仿真为主, 重在帮助学生理解课堂理论知识, 掌握控制系统分析方法, 提升使用控制理论解决系统特性的能力^[7-8]。

针对“新工科”对于人才培养的要求, 需要学生具有优秀的分析能力、实践能力、创造能力, 而目前的机电系统控制实验教学存在以下问题^[9]:

1) 实验内容不够丰富, 知识嵌套不够饱满, 学生理解不够充分, 与目前的社会生活生产实践距离较远, 理论学习内容与实际应用中缺少过渡;

2) 实验过程中, 学生缺少主动思考、分析设计、创新应用的过程, 学习积极性低, 缺乏学习兴趣;

3) 实验教学模式比较单一, 往往采用演示、引导、巡视指导的固定模式, 对学生自主学习和解决问题的能力有所限制;

4) 实验成绩评价机制不够全面, 采用实验报告的形式对学生实验综合能力进行评价过于片面, 忽视了对学生工程实践能力的培养, 不利于学生科学思维的形成, 容易打消学生动手兴趣和实验参与的积极性。

2 机电系统控制实验课程改革

针对“新工科”多元化、创新型人才培养的目标, 结合目前机电系统控制实验课程存在的问题, 以强化基础、拓展应用为实验课程重点, 优化实验内容、创新知识应用、探究多元化知识体系, 开展机电系统控制实验课程教学改革^[10-13]。

2.1 基于“新工科”的教学目标设定

在“新工科”人才培养目标的指导下, 实验教学旨在开阔学生的创新思维, 提升学生团队合作的意识, 增强学生的动手实践能力和问题解决能力, 培养全面发展、具备综合素质和创新能力

的工科人才。基于此, 在课程大纲和教学计划中融入多学科知识, 设置阶段式教学, 结合多平台教学资源, 使用多元化对象^[14], 设定由基础到应用、由单一到丰富、由被动接收到主动探究、由理论验证到工程应用的教学内容, 实现知识结构丰富、创新思维意识完备、动手实践能力强、综合素质全面发展的人才培养目标。

2.2 教学内容多样化

在“新工科”继承与创新、交叉与融合的新途径下, 教学目标的设计需更加具有针对性, 教学内容也需更加多样化, 以满足学生的不同需求。在保证理论学习的基础上, 拓展前沿科技的应用, 衔接理论学习和实践应用。教学内容方面, 结合不同学科领域的知识, 引入新兴技术和前沿科学的应用案例。采用阶段式教学方法, 将教学内容分为不同的阶段, 每个阶段都针对特定的学习目标进行教学。从认知、理解、验证、分析到应用, 每个阶段都能够对学生产生不同的教学效果。

整个实验课的教学内容总体分为理论验证、基础分析、拓展应用三大部分, 对应学生的认知和能力的 3 个层次: 基础认知、知识应用和创新设计。围绕电路、电机展开实验内容的设计, 以与前沿科技相关的电机控制对象(如机械臂、倒立摆、旋翼机、智能车)为兴趣导向, 形成兴趣引导、科学学习、能力提升的层层递进的课程教学内容。具体实验教学内容如图 1 所示。

2.2.1 夯实基础, 理论验证

学生在学习过控制理论后, 对于控制理论的实际应用和时域响应曲线还停留在课本理论层面, 对于实际的应用并不理解, 因此加强认知、加深理解、学以致用是学生初次实验所要达到的学习效果。

基于此, 在实验设计上, 将实验原理紧紧围绕课本知识, 实验内容结合课本电路案例, 实验操作以易上手、逻辑强、建立信心为目标实施教学计划。帮助学生建立控制的概念, 回顾控制对系统的影响, 理解控制在典型系统上的应用。

实验内容融合高等数学、大学物理、电路分析、控制理论等知识, 设计典型系统的时域响应和频域响应实验, 通过对各典型环节的方框图、传递函数、阶跃响应和模拟电路图的回顾学习, 掌握控制参数与实际电路中的映射关系。



图 1 机电系统控制实验教学内容

以一阶惯性环节学习为例, 回顾一阶惯性环节的方框图, 根据电路图进行推导传递函数, 确定参数 K 和 τ 的取值和电路中的电容电阻对应关系, 由学生动手实践完成电路的搭建, 通过设置采样频率、运行时间, 调整电容电阻数值, 观察时域响应和频域响应曲线图, 对控制效果有一个整体的感性认识, 并对响应曲线进行测量, 反求系统的参数 K 和 τ , 探究理论和实际的差别, 并进行误差分析。实验可通过更换不同板卡, 实现不同典型环节实验电路, 整体实验流程以一阶惯性环节为例, 如图 2 所示。

由此, 学生通过熟悉的课本电路案例进行理论计算、电路搭建、软件应用、图像分析、响应观察等一系列实验操作, 完成控制理论知识在实际电路中的响应分析, 达到夯实控制理论基础的学习效果。

2.2.2 基础延伸, 知识过渡

在学生对控制系统有了一定概念和基础应用之后, 其对实际的控制对象如何建立传递函数以及控制算法在系统上如何使用仍然是困惑的, 因此在这个阶段, 如何针对实际控制对象进行控制理论应用是学生学习的重点。

实验的设计在基础认知验证实验的基础上, 对控制对象做一定的延伸。在选择控制对象上, 既要保证其在实际应用中具有基础性、广泛性、代表性, 又要确保学生在实验中易接触、易上手、易理解, 达到通过该实验的学习和操作, 实现由分析验证到基础实践应用的过渡。

实验选择直流电机作为控制对象, 实验内容由电路控制过渡到电机建模控制, 由电路知识延

伸到电机知识, 由响应分析进阶到对直流电机进行建模分析。具体实验内容结合直流电机的电路和其特性, 以直流电机的转速控制为控制对象, 通过电路原理分析、控制模型搭建、传递函数推导, 实现一阶系统时域分析、等效传递函数求解、控制器添加稳定性分析、Bode 图绘制频域分析, 实现所学控制理论在直流电机上的应用。基于直流电机设计的模型推导和等效传递函数求解实验内容如图 3 所示。

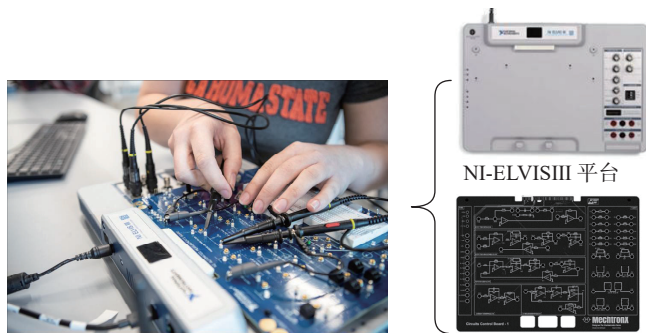
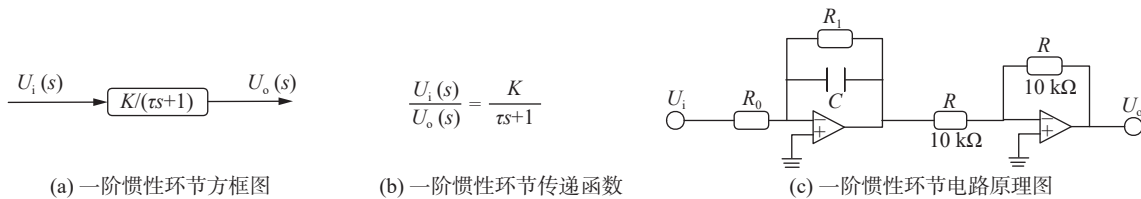
在直流电机模型推导实验中, 学生将根据直流电机模型图与电路原理图, 列出电路微分方程, 实际测量获得电机硬件参数, 在 Simulink 中构建理论电压-转速 ($V_m-\omega_m$) 理论控制模型, 通过编码器的数据反馈, 在 Simulink 示波器中对比理论和实际响应曲线。在直流电机等效传递函数求解实验中, 由电路微分方程转化为电压-转速的传递函数, 以及通过实际响应曲线测量获得的参数 K 和 τ 转化的传递函数, 两者对应的响应曲线, 分别与实际响应曲线进行对比, 验证直流电机的响应特性。

该实践技能型实验重在帮助学生掌握控制理论在工程实际对象中的应用。通过对直流电机特性的分析, 掌握对被控对象的建模、分析、控制, 以及运用控制领域专业软件进行理论分析与算法设计, 培养学生的工程实践与应用能力。

实验平台逻辑关系如图 4 所示。将电机电流和编码器的实时反馈信号通过 NI-ELVIS III 实验平台采集到计算机系统中, 通过软件模块将电机真实工作状态和响应实时显示出来。利用理论推导、原理分析、软件应用、模型搭建, 在对电机控制

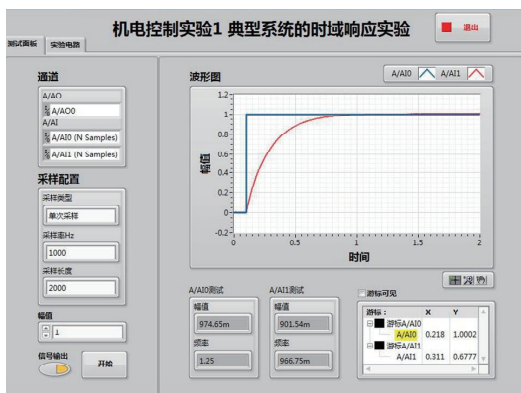
系统进行仿真的同时，与实际采集的电机信号做比较，使用计算所得系统参数对电机实际控制系

统进行调参，可以直观感受并理解各项参数对系统响应的影响，对比理论结果与实际效果的差别。

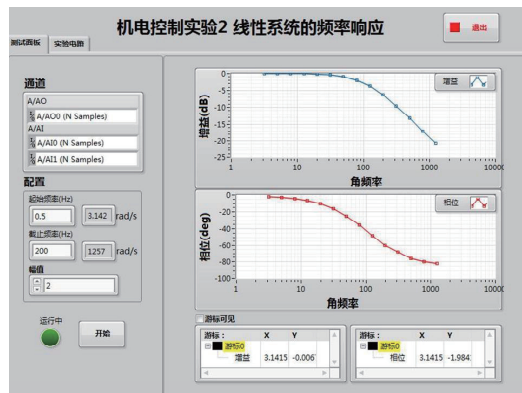


可更换控制板卡

(d) 学生实验动手操作平台



(e) 一阶惯性环节时域响应界面图



(f) 一阶惯性环节频域响应界面图

图 2 基于电路原理分析的实验流程

直流通电机模型推导和搭建

直流通电机模型图

- ① 基于电路原理列出方程：

$$v_m(t) - R_a i_m(t) - L_m \frac{di_m(t)}{dt} - k_m \omega_m(t) = 0$$
- ② 构建理论控制模型：
- ③ 对比理论和实际转速响应曲线图：

方法一：理论计算求解

- ① 基于电路原理求出电压-转速的传递函数：

$$\frac{\Omega_m(s)}{V_m(s)} = \frac{k_m}{J_m R_m s + k_m}$$
- ② 修改模型中的传递函数

方法二：实际曲线测量求解

- ③ 基于实际图像测量获得增益 K 和时间常数 τ
- ④ 对比理论计算的传递函数和测量获得的传递函数和实际响应曲线哪个更能准确代表模型

— 理论响应曲线
— 实际响应曲线

图 3 基于直流电机设计的等效传递函数求解实验内容

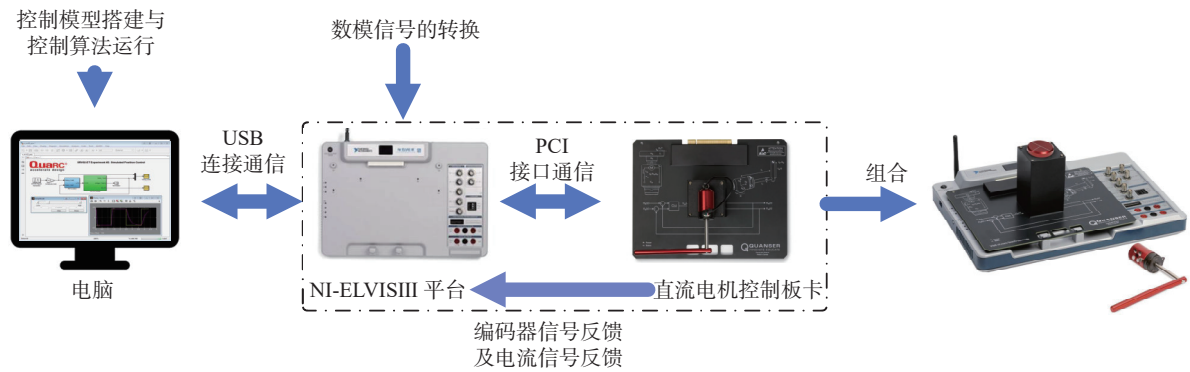


图4 基础演示实验平台

2.2.3 创新对象, 综合应用

在机电系统控制课程教学中, 既强调理论知识的传授, 也注重工程教育、创新教育的交叉融合, 增强学生的综合实践能力。在创新实验教学中, 将控制理论与机器人巧妙融合, 在兴趣引导下, 不仅可以增加学生学习的兴趣, 也可以增加学生攻坚克难的信心。在第二部分基础延伸实验中, 通过对常用机器人中常见的控制对象直流电机建立模型、理论分析、实践验证, 强化了学生对控制理论的理解和运用, 增强了学生对实际控制对象自主学习的信心。

在创新实验中, 旨在通过多元化的实验对象, 提高学生兴趣, 拓展学生思维, 增长学生见识。由学生自主选择实验对象, 在课程资源的指导下, 完成理论分析、模型构建和控制器的设计, 培养学生自主解决机器人控制问题的综合能力, 促进学生知识迁移和创新应用能力的提升。

实验设计基于直流电机的控制, 结合电机控

制对象, 如旋转倒立摆、SCARA 机械臂、可重构双旋翼等, 在动力学模型和电路原理的帮助下, 结合动力学和机构运动学知识, 由学生自主求解系统的控制模型, 并在经验控制器设计的帮助提示下, 进行控制器的自主设计, 控制算法的分析和验证, 通过观察实验现象以及响应曲线, 记录系统响应情况, 对控制器进行参数调整, 体会不同参数对系统的影响和作用。创新实验的具体内容和倒立摆实验流程如图5所示。

以倒立摆实验对象为例, 实验中给出旋转倒立摆的示意图, 由学生根据示意图推导动力学方程, 并结合课外资源学习状态空间矩阵, 求出控制模型的状态空间矩阵, 利用极点配置法引导学生进行控制器的设计, 由学生自主搭建理论控制模型, 完成测试和验证。同时通过实验平台引入实际的电流信号和编码器信号, 与理论模型作对比, 调整控制参数, 在体会参数系统特性影响的同时, 实现倒立摆的稳定控制。

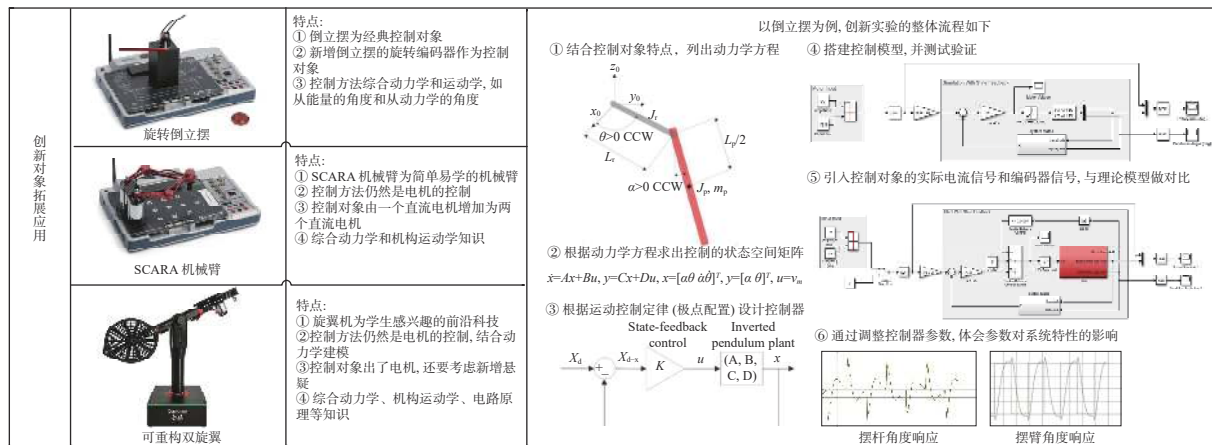


图5 创新实验对象与实验流程——以倒立摆实验流程为例

2.3 教学方法多维度

利用现代科学技术力量, 结合学科实验教学

的特点和教学目标, 通过多平台教学资源 and 教师的辅助指导, 贯穿整个教学过程, 形成课前兴趣

引导、课中教师指导、课后独立思考、线上视频学习、线下师生互动的教学模式，如图 6 所示。

依托互联网资源，进行纵向整合、横向开放，获得丰富的教学资源 and 教学资料，有助于学生的课外自主学习，提高学生学习的主动性；在课前播放与前沿科技相关的控制对象运行视频，感受控制的魅力，提升学习兴趣；在教学中借助

多元化的实验平台，结合多学科知识理论，通过巡回指导，侧面点拨的形式^[15]，协助学生克服困难，实现最终控制效果，增强学生动手实践能力和解决问题的信心；创新实验教学中，对学生进行分组教学，由小组协作、分工合作、攻坚克难、动手思考、创新应用，实现控制最终效果，提高学生创新意识、创新思维 and 创新能力。

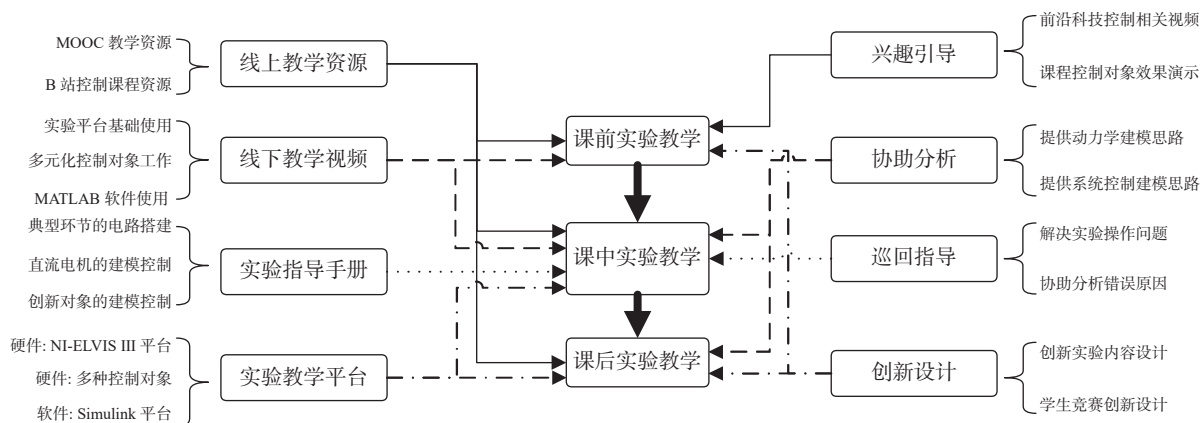


图 6 机电系统控制多维度教学模式图

整个教学过程中，以学生自主动手、自主学习为主导，改变以往演示式、“填鸭式”教学，设计循序渐进、由浅入深的教学环节，旨在通过多维度、多平台、多资源的教学方式达到强化基础、虚实结合、创新应用的教学效果。

2.4 教学评价全方位

机电系统控制实验课程坚持以学生“求知、求真、求新”为主体，设计阶段式教学，关注学生不同阶段学习效果，将学生的分析设计能力、工程实践能力和创新能力对应到不同阶段的教学评价中，形成过程评价体系，结合学生的创新设计、问题解答、总结展示、小组分工，形成全方位、多角度、完整科学的教学评价体系^[16]。

根据 3 个阶段的实验教学内容，将过程评价分为 3 大部分，对应学生不同能力的考核。在具体实施过程中，第一阶段基础实验，以学生对实验过程的计算、记录和分析过程作为成绩的主要评价标准，进行分析设计能力评估；第二阶段延伸实验，以学生实验操作结果、软件应用能力作为学生成绩的评价标准，与工程实践能力相对应；第三阶段以学生创新成果和文字总结、视频展示作为成绩判定标准，对标创新能力。同时在整个过程中，结合实验安全规范，对学生知

识的理解程度、学习主动性、积极性、创新性以及团队协作在整个实验中的表现给予额外加分。

实验评价体系不仅对学生实验能力进行评估，还对学生的思考分析、创新意识、实践应用、总结展示、团队协作等多方面进行综合评价，有利于提高其主动获取知识的欲望，激励其创新能力发挥，锻炼团队协作、克服困难的能力，更好地体现教学评价体系的均衡性、综合性、公平性。

3 改革成效

自实施机电控制系统实验课程内容的改革和科学评价体系后，增加了学生对控制课程的兴趣，提高了其跨学科知识运用能力，为“新工科”人才教育探索了新的培养之路。同时课程实验设计与内容革新，增强了学生的自信心与动手实践能力，为人工智能控制相关的各项学科竞赛奠定了坚实的实践基础。2022 年学校首次组织参加中国机器人及人工智能大赛，参加学生 40 人，斩获国家级奖 9 项；2023 年参加学生 45 人，获国家级奖 10 项。参赛学生中有 90% 的学生接受过该实验课的教学指导，实验教学改革成效显著，为后续工科实验教学的研究和改革积累了实践经验。

4 结束语

在“新工科”人才培养目标的指导思想下,机电系统控制实验课程改革融合多学科知识,选择多元化控制对象,提升学生兴趣、拓展眼界视野,实现了强化基础、知识过渡、创新应用的实验课程体系。结合多平台资源,使用多维度教学方法,创建了科学、全面的教学评估体系。课程改革激发了学生的学习兴趣,提高了学生学习主动性,锻炼了其科学思维能力,并增强了其创新能力。

参考文献

- [1] 陈涛,刘鉴漪.中国式现代化强国战略:政策特征、逻辑关系及支撑路径:基于教育、科技、人才三合一体系的政策分析[J].重庆高教研究,2023,11(2):23-35.
- [2] 袁佳如.新工科跨学科人才培养体系研究[D].武汉:武汉理工大学,2023.
- [3] 刘宇雷,余明.“新工科”背景下高校实验教学体系建设探索[J].实验技术与管理,2019,36(11):19-21.
- [4] 董惠娟,隋明扬,王奕,等.机电系统控制基础课程实验中传递函数辨识方法及关键技术[J].实验技术与管理,2019,36(11):36-39.
- [5] 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.
- [6] 姚佳,黄有全,曾义聪.机电类专业贯穿式项目制教学体系研究与实践[J].实验技术与管理,2020,37(2):223-225.
- [7] 汤瑞丽,梁丙卓,周利民.面向复杂系统的高等工程教育再设计:南方科技大学SDIM“深度整合”新工科教育实践[J].高等工程教育研究,2023(5):41-47.
- [8] 倪敬,任旭,蒙臻.双电动机电伺服同步驱动实验系统设计[J].实验技术与管理,2019,36(2):101-107.
- [9] 何俊.机电系统控制基础教学中存在的问题及策略分析[J].西部素质教育,2017,3(12):46.
- [10] 胡蔓,赵云龙,栾晓娜,等.新工科背景下工程训练实践教学模式探索[J].实验技术与管理,2022,39(3):256-259.
- [11] 唐波,黄力,袁发庭,等.新工科建设下的专业课程实验教学模式改革[J].实验技术与管理,2019,36(5):235-238.
- [12] 石素君,李红,赵修臣,等.基于“新工科”的电子封装技术实验教学改革与探索[J].实验技术与管理,2023,40(S1):29-33.
- [13] 徐晓飞,沈毅,钟诗胜,等.新工科模式和创新能力人才培养探索与实践:哈尔滨工业大学“新工科‘Π型’方案”[J].高等工程教育研究,2020(2):18-24.
- [14] 付庄,贡亮,金惠良.“多元融合”教学法的线上控制理论课程教学实践[J].高等工程教育研究,2021(S1):99-101.
- [15] 郭俊杰.“三阶段教学法”初试[J].高等工程教育研究,1994(1):89-90.
- [16] 张春良,刘长红,江帆,等.“多元协同、多维评价”工程人才培养模式探索[J].高等工程教育研究,2022(3):112-116.

编辑 钟晓