

基于虚实结合的球杆自动控制系统 教学实验平台设计

张广悦¹, 孙国鑫^{1,2*}, 李瑞峰¹, 刘国庆¹, 虞启辉¹, 张建龙³

¹内蒙古科技大学机械工程学院, 内蒙古 包头

²内蒙古自治区机电系统智能诊断与控制重点实验室, 内蒙古 包头

³内蒙古明阳北方智慧能源研究院, 内蒙古 包头

收稿日期: 2025年9月18日; 录用日期: 2025年10月22日; 发布日期: 2025年10月29日

摘 要

针对自动控制原理硬件实验在实际教学中存在的实验条件受限和学生实践机会不足等问题, 本文提出一种虚实结合的实验教学方法, 通过将虚拟仿真与实物模型相结合的方式开展自动控制原理教学。利用 Matlab/Simulink 平台搭建球杆系统模型, 设计 PID 控制器, 实现对球杆系统的稳定控制, 通过仿真实验展现小球在杆上的动态响应与平衡过程; 同时, 结合实物模型演示, 形成虚实结合的教学方法。教学实践表明, 所提出的虚实结合教学方法可扩展自动控制原理课程的实验环境, 有效克服实验条件的局限性, 并为学生提供可重复的实践机会, 提高学生的学习积极性与实践能力, 对提升教学质量具有重要意义。

关键词

球杆系统, Matlab/Simulink, 虚实结合实验教学

Design of a Virtual-Physical Integrated Teaching Experimental Platform for Ball-and-Beam Automatic Control System

Guangyue Zhang¹, Guoxin Sun^{1,2*}, Ruifeng Li¹, Guoqing Liu¹, Qihui Yu¹, Jianlong Zhang³

¹School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia

²Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Intelligent Diagnosis and Control for Electromechanical Systems, Baotou Inner Mongolia

³Inner Mongolia Mingyang Northern Smart Energy Research Institute, Baotou Inner Mongolia

Received: September 18, 2025; accepted: October 22, 2025; published: October 29, 2025

*通讯作者。

文章引用: 张广悦, 孙国鑫, 李瑞峰, 刘国庆, 虞启辉, 张建龙. 基于虚实结合的球杆自动控制系统教学实验平台设计[J]. 教育进展, 2025, 15(10): 1432-1441. DOI: 10.12677/ae.2025.15101987

Abstract

Experimental teaching in automatic control principles faces limitations in hardware resources and insufficient practical opportunities for students. A blended virtual-physical experimental approach is proposed. This method combines simulation tools with physical models for teaching automatic control principles. Matlab/Simulink platforms build a ball-and-beam system model. PID controllers are designed to achieve stable control. Simulation experiments demonstrate the ball's dynamic response and balancing process. Physical model demonstrations complement the simulations. This integrated methodology creates blended experimental environments. Teaching practices demonstrate the approach's effectiveness in overcoming resource constraints. Students gain repeatable practice opportunities. Learning engagement and practical skills show significant improvement. The method proves valuable for enhancing instructional quality in control engineering education.

Keywords

Ball-and-Beam System, Matlab/Simulink, Virtual-Real Integrated Experimental Teaching

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传统自动控制原理实验教学面临两大问题：一方面，实验条件受限，难以满足大规模教学需求；另一方面，学生实践机会不足，无法充分掌握控制理论与实践操作。这一现状不仅限制学生的实践能力，也阻碍教学效果的提升[1]。随着教育现代化和信息技术的发展，虚拟仿真技术与远程实验教学成为解决这一问题的的重要途径。

国外在控制系统虚拟实验教学领域起步较早，已形成多样化的技术解决方案。Learn Anytime Anywhere Physics 物理实验系统作为综合性虚拟实验平台，为多学科在线教学提供统一解决方案[2]。西班牙国立远程教育大学基于 Java 技术开发的网络化远程自动控制仿真实验平台，提供了 PID 参数整定、频率响应分析等核心功能模块[3]。Maria Guinaldo 等人通过融合 EJS 和 Moodle 技术，开发了控制系统仿真实验平台，支持鲁棒控制、模糊控制等多种控制算法实验及与 PID 控制的对比分析[4]。德国 Ruhr University Bochum 采用多插件架构和 Java applet 技术，结合 MATLAB/Simulink 和 VRML 语言，构建了具有高度沉浸式体验的虚拟控制仿真实验室[5]。

相较于国外，国内在控制系统虚拟实验教学领域起步较晚，但近年来发展迅速。吉林大学利用 LabVIEW 与 Multisim 构建虚拟端实验，配合 STM32 硬件平台构建物理实验系统，实现仿真与实物数据的关联分析[6]。西北大学基于 LabVIEW 和 FPGA 技术开发电子线路远程虚拟仿真实验室，集成度高、操作简易[7]。国防科学技术大学基于云计算技术开发虚拟仿真实验云平台，实现了实验资源最大化利用和规模扩展[8]。东南大学构建机电综合虚拟仿真实验平台，面向多专业建立了模块化实验课程体系[9]。

本文通过设计基于球杆系统的虚实结合教学实验平台，将 Matlab/Simulink 理论仿真与物理实验模型有机融合。在 Simulink 环境中，本文构建包括系统动力学模型、传感器模型、执行器模型和控制器模块等完整仿真系统，并以 PID 控制器实现对球杆系统的稳定控制，学生可以在仿真环境中调整控制参数，观察不同参数对系统响应的影响。通过构建涵盖系统建模、仿真分析、控制器设计、参数调试等多环节

的完整教学实验体系，为学生提供了从虚拟仿真到实物验证的完整学习闭环，有效提升了自动控制原理课程的教学效果，深化学生对控制理论的理解。

2. 球杆系统简介与数学建模

2.1. 球杆系统简介

球杆系统为研究非线性控制算法、系统建模、参数辨识和控制器设计等提供了理想的实验平台，是现代控制理论中具有代表性的基准测试系统[10]。从教学实践角度来看，球杆系统作为典型的不稳定系统，能够直观地帮助学生理解开环不稳定系统的特性，深入掌握反馈控制的重要作用，是培养学生系统建模能力、控制器设计技能和工程实践素养的优秀载体。通过球杆系统实验，学生能够经历从理论分析到仿真验证，再到实物调试的完整工程实践过程，有效提升解决复杂控制问题的综合能力。球杆系统的控制原理如图 1 所示，系统通过设定目标位置和控制参数，控制器根据小球的实时位置偏差计算相应的控制策略，驱动机构使小球稳定在期望位置。这一控制过程不仅体现了经典控制理论的核心思想，更为学生提供了观察控制效果、分析系统性能、优化控制参数的直观平台，使抽象的控制理论转化为可见、可操作的教学实践。

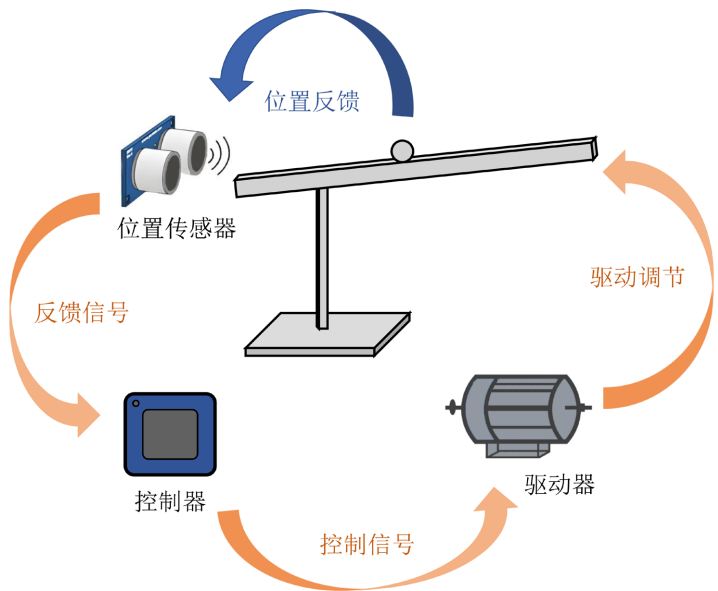


Figure 1. Schematic diagram of the ball and beam system
图 1. 球杆系统原理图

2.2. 球杆系统的数学模型

球杆系统作为自动化控制领域的经典模型，为实现其精确控制，通常为其建立数学模型来描述系统的动态行为，同时揭示系统的内在动力学特性，为后续控制器设计提供理论基础[11]。球杆系统的运动分析如图 2 所示。

由图 2 可知，小球的动能由向下滚动的动能、平衡杆推动小球的动能和小球自身滚动的动能组成，小球的总动能为：

$$T = \frac{1}{2} \left(m + \frac{J}{R^2} \right) \dot{\gamma}^2 + \frac{1}{2} m \gamma^2 \dot{\alpha}^2 \quad (1)$$

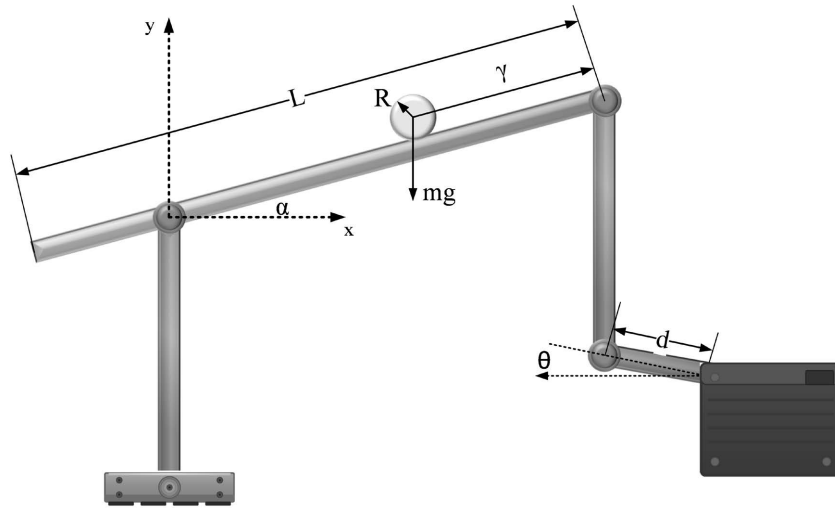


Figure 2. Motion analysis diagram of the ball and beam system
图 2. 球杆系统运动分析示意图

小球的势能为:

$$U = mg\gamma \sin \alpha \quad (2)$$

式(1)和(2)中, T 为小球动能; U 为小球势能; m 为小球质量; R 为小球半径; J 为小球转动惯量; $\dot{\gamma}$ 为位移速度; $\dot{\alpha}$ 为角速度, g 为重力加速度; γ 为小球位置; α 为平衡杆转角。

以 α 为广义坐标建立方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = - \frac{\partial U}{\partial \alpha} \quad (3)$$

将式(1)和式(2)带入方程(3)得:

$$\begin{cases} m\gamma^2 \ddot{\alpha} = -mg\gamma \cos \alpha \\ \gamma \ddot{\alpha} + g \cos \alpha = 0 \end{cases} \quad (4)$$

忽略小球与平衡杆之间摩擦力, 小球的数学模型为:

$$mg \sin \alpha = - \left(m + \frac{J}{R^2} \right) \ddot{\gamma} \quad (5)$$

电机转角 θ 与平衡杆角度 α 之间关系可表示为:

$$\alpha = \frac{d}{L} \theta \quad (6)$$

对式(5)进行拉普拉斯变换得到:

$$\left(\frac{J}{R^2} + m \right) r(s) s^2 = -mg\alpha(s) \quad (7)$$

以平衡杆角度 α 为输入, 小球位置 γ 为输出的系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{\gamma(s)}{\alpha(s)} = - \frac{mg}{\left(\frac{J}{R^2} + m \right) s^2} \quad (8)$$

将式(6)带入式(8)中, 得到以点电机转角 θ 为输出, 小球位置 γ 为输出的系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{\gamma(s)}{\theta(s)} = -\frac{mgd}{L\left(\frac{J}{R^2} + m\right)s^2} \quad (9)$$

2.3. 球杆系统控制器设计

球杆系统实验的核心是控制器, 控制器的优劣决定系统的稳定情况。目前控制方法有多个种类, 例如 PID、LQR 等经典控制方法, 以及模糊控制、神经控制等智能控制方法[12] [13]。经典 PID 控制因为其结构简单、实用性强, 同时在球杆系统这类线性控制问题中已被广泛使用且具有良好的控制效果。故采取经典 PID 控制器对球杆系统进行控制。

PID 控制器的偏差函数为:

$$E(t) = R(t) - X(t) \quad (10)$$

式(10)中, $R(t)$ 为给定值; $X(t)$ 为输出值; $E(t)$ 为偏差值。

PID 控制器是一种通过将偏差的比例项(Proportional)、积分项(Integral)和微分项(Derivative)按一定权重线性组合后, 产生控制量的反馈控制器[14]-[16]。它的传递函数为:

$$G(S) = \frac{U(S)}{E(S)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (11)$$

式(11)中, K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

根据式(11)设计的球杆系统 PID 控制器原理图如图 3 所示, 将小球实际位置和参考输入位置做比较, 其误差作为 PID 控制器输入, PID 输出控制作为伺服电机参考输入[17]-[19]。

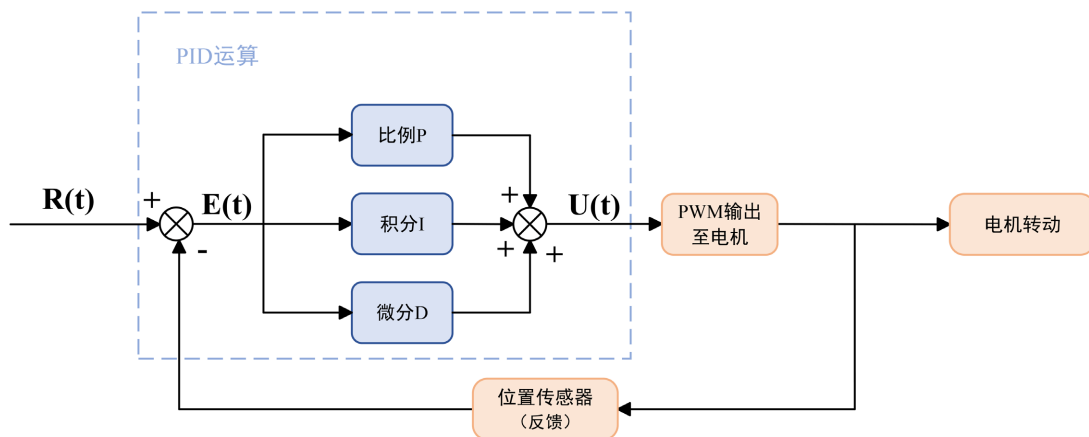


Figure 3. Schematic diagram of PID controller

图 3. PID 控制器原理图

图 3 的 PID 控制器的单位闭环传递函数为:

$$\Phi = \frac{x(s)}{r(s)} = \frac{K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \times \frac{c}{s^2}}{1 + K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \times \frac{c}{s^2}} \quad (12)$$

化简球杆系统的 PID 控制器的传递函数为:

$$\frac{x(s)}{r(s)} = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s^3 + K_D s^2 + K_P s + K_I} \quad (13)$$

式(13)中, $K_P T_D = K_D$ 为微分常数; K_P 为比例常数; $\frac{K_P}{T_I} = K_I$ 为积分常数。

3. 基于 Matlab/Simulink 的仿真系统建模

本文的模型基于 Open Simscape Multibody 库构建。系统使用多个 Revolute Joint 关节连接不同部件, Ground_& Beam 关节将平衡杆与固定基座相连; Lever_Arm_& Beam 和 Lever_Arm_& Disc 关节则构成杠杆臂传动机构。各组件间的空间关系通过(B→F)坐标变换模块精确定义。系统通过 Contact_Forces 模块真实模拟小球在平衡杆上的滚动行为及相关动力学特性。Position_Sensor 模块实时监测球体位置。控制系统采用经典 PID 结构。球杆系统 simulink 控制仿真模块如图 4 所示。

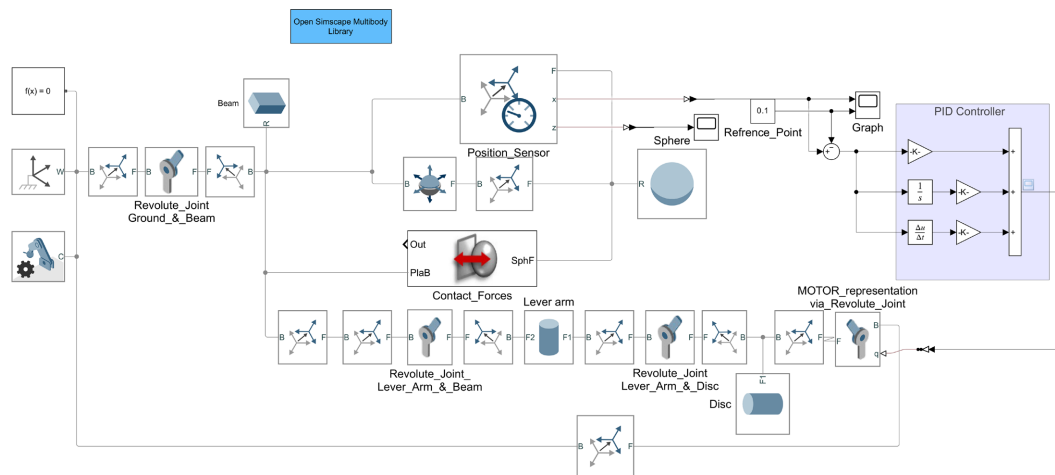


Figure 4. Simulink simulation module of the ball and beam system

图 4. 球杆系统 Simulink 仿真模块

仿真模型结合运动可视化界面,如图 5 所示,为学生提供极佳的交互式学习体验,使学生能够直观地观察到不同的 PID 参数对球杆系统的影响。左图显示小球处于运动状态,右图则显示小球到达平衡位置。当学生调整 PID 参数后,系统会立即响应并更新仿真结果,这种即时反馈机制极大增强了学习效果,使学生能够清晰地观察到不同参数设置下小球从初始位置到平衡位置的完整运动过程,从而深化对控制参数与系统性能关系的理解。

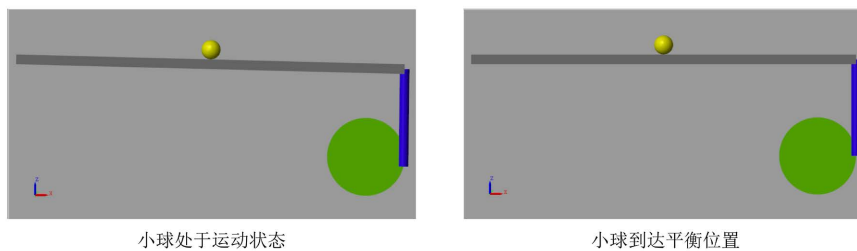


Figure 5. Visualization interface of the ball and beam system

图 5. 球杆系统运行可视化界面

4. 实物平台构建与教学实验设计

为了构建完整的球杆系统教学平台，本文在理论分析和 Simulink 仿真建模的基础上，进一步搭建了球杆系统的实物教学装置。该装置主要由控制器、距离传感器、球杆运动机构、小球、伺服电机和电源等部分组成，小球在平衡杆上运动，平衡杆围绕转轴上下摆动，伺服电机根据控制算法改变平衡杆的倾斜角度，从而实现对小球位置的精确控制。在实物平台的教学应用中，学生通过亲手操作实验装置，能够深刻体验控制系统的实时性要求和实际约束条件，培养工程实践的严谨态度。同时，实物系统中传感器噪声、机械摩擦等非理想因素为学生提供了宝贵的工程认知机会，使其理解理论模型与实际系统的差异及其工程意义。球杆系统的实物图如图 6 所示。

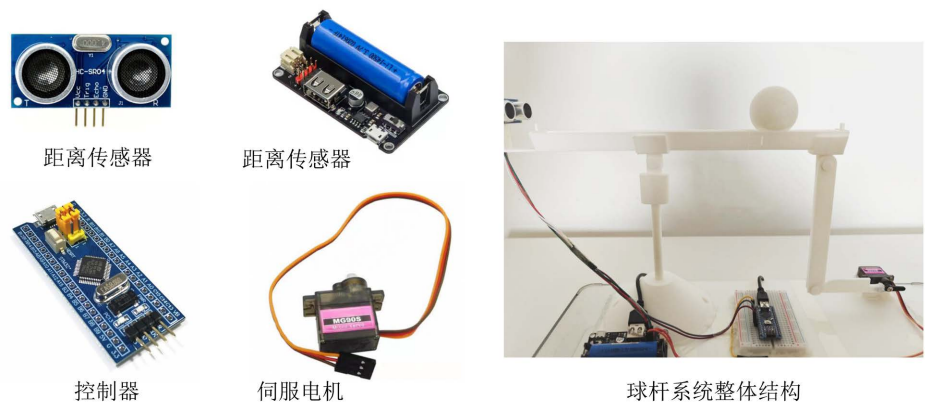
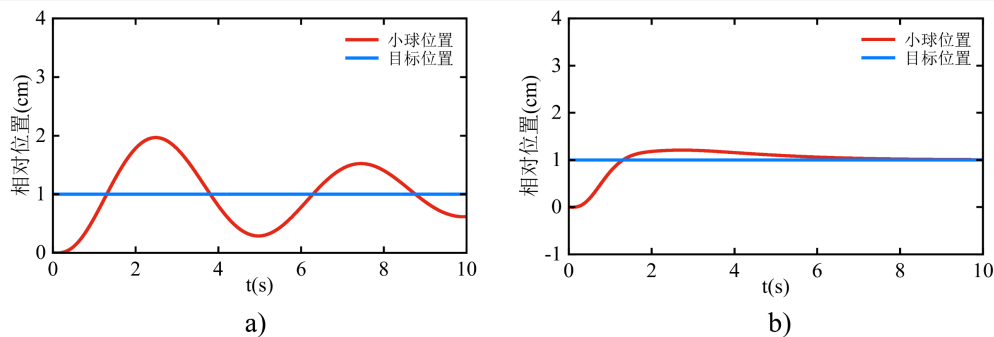


Figure 6. Photograph of the ball and beam system
图 6. 球杆系统实物图

通过实物平台与 Simulink 仿真模型的结合，构建了完整的 PID 参数整定教学实验体系。教学设计采用“问题驱动 - 探究实践 - 反思总结”的教学模式，引导学生从控制理论的基本概念出发，逐步深入理解控制系统的动态特性。在具体的教学实施中，将整个实验过程划分为四个递进式教学阶段：理论准备阶段：要求学生复习 PID 控制原理，明确各参数的物理意义；仿真探索阶段：学生在 Simulink 环境中进行参数调试，教师通过巡回指导发现共性问题并集中讲解；实物验证阶段：学生将仿真参数应用于实物系统，观察实际控制效果；总结反思阶段：引导学生对比分析虚实差异，形成实验报告。在教学过程中，学生首先在仿真环境中尝试不同的 PID 参数组合，通过观察系统响应曲线和仿真模型的可视化界面来理解各参数对控制性能的影响。如图 7 所示的两组对比实验中，左列参数设置导致小球围绕目标位置持续震荡，无法达到稳定状态，电机角度在 -15° 至 15° 之间大幅振荡，学生通过这一现象可以直观认识系统欠阻尼状态的特征。此时教师提出启发性问题，引导学生运用控制理论知识分析现象背后的机理。



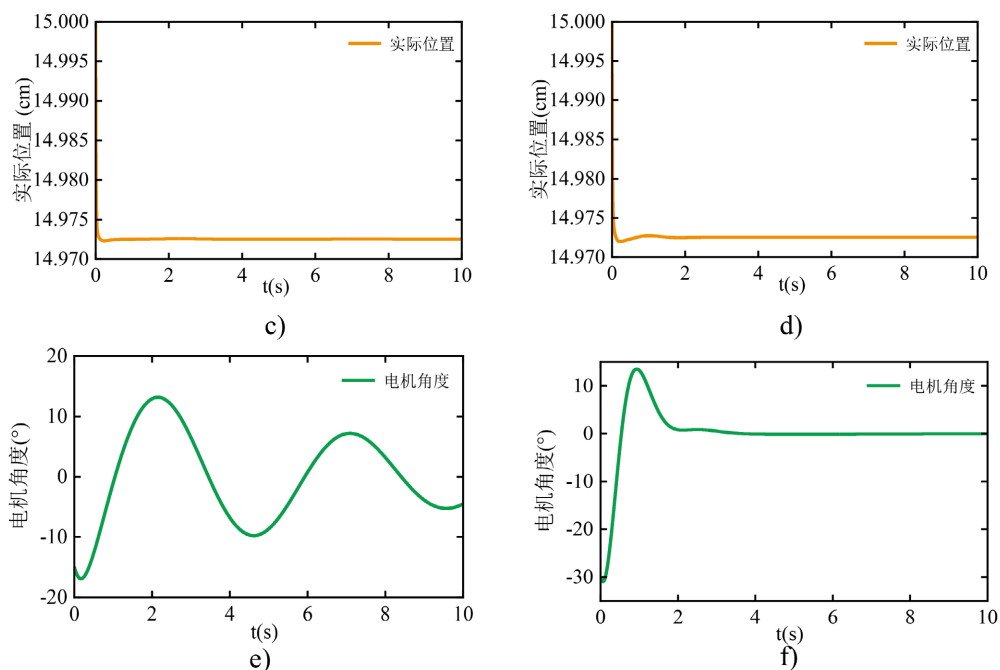


Figure 7. Control performance of the ball and beam system
图 7. 球杆系统控制效果

经过参数优化后，右列结果显示小球在初始阶段轻微超调后约 2 秒内收敛并稳定在目标位置，电机角度响应也相应改善，学生通过成功与失败的对比分析加深了对 PID 各参数物理意义的理解。在这个过程中，学生不仅学会了参数整定的技巧，更重要的是培养了工程问题的分析思维和解决方法。

更为重要的是，学生将仿真中验证有效的参数应用于实物系统，如图 8 所示的实物运动过程展现了从扰动状态到平衡控制的完整过程。学生亲眼观察到理论预测与实际现象的高度一致性，这种虚实结合的学习体验显著增强了学生对控制理论的信心和兴趣。在实验过程中，学生不仅掌握了 PID 参数整定的基本方法，更重要的是建立了“理论建模 - 仿真验证 - 实物测试”的完整工程思维模式。当仿真曲线与实物表现出现差异时，教师引导学生思考实际系统中的非线性因素、摩擦影响等建模未考虑的因素，培养学生的工程实践能力和问题分析能力。通过这种教学方式，抽象的控制理论转化为可视化的学习体验，学生对系统动态特性、稳定性概念和控制器设计原理的理解程度显著提升。

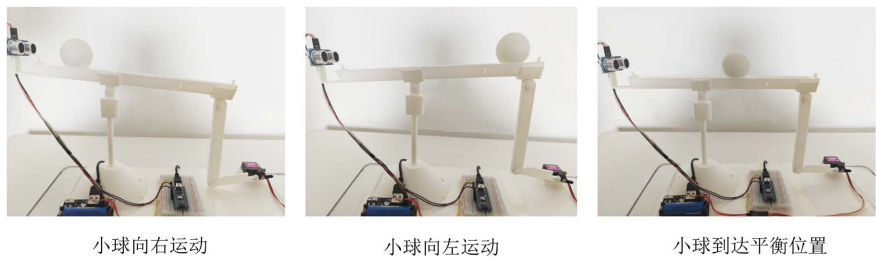


Figure 8. Motion sequence of the ball and beam system
图 8. 球杆系统运动过程

5. 教学效果验证

为验证基于虚实结合的球杆自动控制系统教学实验平台的有效性，本研究设计了一项对比教学实验。

实验选取某工院校自动化专业两个班级的学生作为研究对象, 共计 86 名学生, 随机分为实验组(43 人)和对照组(43 人)。

实验组采用虚实结合教学平台进行控制系统理论学习, 教学流程为: 理论准备、Matlab/Simulink 仿真实验、实物平台操作、总结反思。对照组采用传统教学方式, 即理论讲授、黑板推导、PPT 演示的方式进行同一知识点的教学。两组学生均由同一位教师授课, 教学内容涵盖 PID 控制器设计原理、参数整定方法、系统稳定性分析等核心知识点, 总教学时长均为 120 分钟。通过前、后测和学生调查问卷得到图 9 的教学效果对比图。

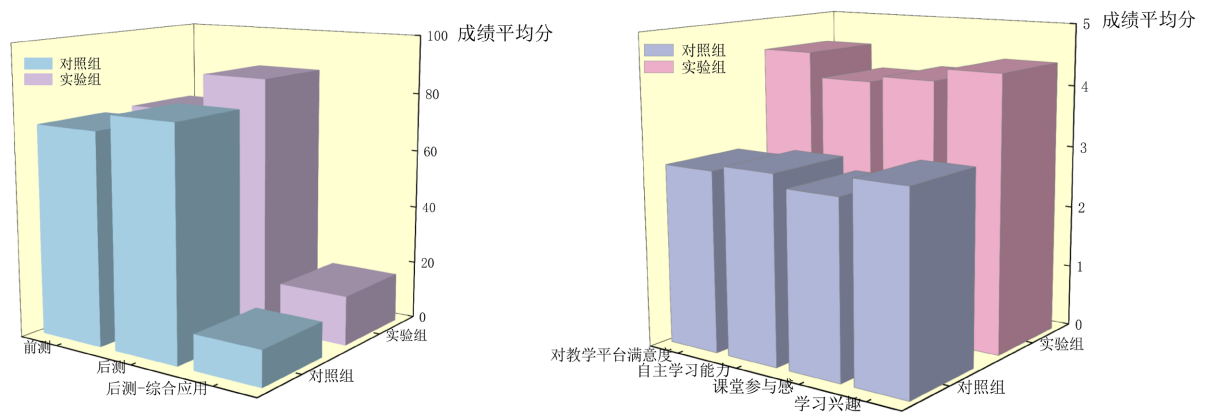


Figure 9. Comparison of teaching performance
图 9. 教学效果对比图

从测试成绩来看, 实验前两组学生的平均分基本一致, 确保了实验的公平性。经过教学干预后, 实验组学生的成绩提升幅度明显高于对照组, 特别是在综合应用能力的考核中, 实验组表现出更强的知识运用和解决问题的能力。这充分说明虚实结合的教学方式能够有效促进学生对控制系统理论知识的深度理解, 并将理论知识转化为实践能力。

在学习能力的各维度评价中, 实验组同样展现出全面的优势。学习兴趣方面, 实验组学生表现出更高的学习热情和探索欲望, 这得益于虚拟仿真带来的直观性和实物操作带来的真实感。课堂参与感维度上, 实验组学生的积极性和主动性明显增强, 学生更愿意参与讨论、提出问题并动手实践。在自主学习能力的培养上, 虚实结合平台为学生提供了自主探究的空间, 学生可以通过反复仿真和实验验证自己的想法, 这种探索式学习方式有效提升了他们独立思考和解决问题的能力。此外, 学生对教学平台表现出很高的满意度, 普遍认为这种教学方式新颖有趣、易于理解, 能够帮助他们更好地掌握抽象的控制理论知识。

综合以上分析可以看出, 基于虚实结合的球杆自动控制系统教学实验平台在提升教学效果方面具有明显优势。

6. 结论

为提高自动控制原理课程的教学质量与实效性, 本文将基于 Matlab/Simulink 的球杆系统虚拟仿真平台与实物模型相结合, 应用于控制理论的教学实践, 形成了虚实结合的教学实验方法。实验向学生展示了基于 PID 控制器的球杆系统在不同参数配置下的控制效果, 通过对比分析欠阻尼状态下的持续震荡与合理参数调整后的稳定控制, 使学生能够深入理解控制参数对系统性能的影响。本文提出的实验教学方法具有显著的可视化优势, 学生可以直观观察小球在平衡梁上的运动轨迹以及电机角度的变化情况, 同

时还可以实时调整 PID 参数并立即观察系统响应的变化。虚拟仿真与实物系统的结合,有效提升自动控制原理课程的教学质量。

基金项目

内蒙古科技大学教育改革项目研究(JY2023020)。

参考文献

- [1] 孙国鑫,夏龙飞,李帅鹏,等. 基于 Matlab/SimScope 的飞轮倒立摆仿真实验教学设计[J]. 中国教育技术装备, 2024(20): 125-128, 132.
- [2] Meisner, G. and Hoffman, H. (2005) Virtual Interactive Laboratories and E-Learning. *E-Learn: World Conference on E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, and Higher Education*, Association for the Advancement of Computing in Education (AACE), 120-127.
- [3] Saenz, J., Chacon, J., De La Torre, L., Visioli, A. and Dormido, S. (2015) Open and Low-Cost Virtual and Remote Labs on Control Engineering. *IEEE Access*, **3**, 805-814. <https://doi.org/10.1109/access.2015.2442613>
- [4] de la Torre, L., Guinaldo, M., Heradio, R. and Dormido, S. (2015) The Ball and Beam System: A Case Study of Virtual and Remote Lab Enhancement with Moodle. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **11**, 934-945. <https://doi.org/10.1109/tii.2015.2443721>
- [5] Grodotzki, J., Ortelt, T.R. and Tekkaya, A.E. (2018) Remote and Virtual Labs for Engineering Education 4.0: Achievements of the ELLI Project at the TU Dortmund University. *Procedia Manufacturing*, **26**, 1349-1360. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.126>
- [6] 周志坚, 颜培荣, 冯雪, 等. LabVIEW 和 ARM 虚实结合的模拟电路实验平台[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2019, 19(7): 47-50, 77.
- [7] 李银奎. 电子线路远程实验平台的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2022.
- [8] 张乃千, 杨海, 周丽涛. 基于云计算的虚拟实验云平台设计[J]. 计算机教育, 2015(1): 39-44.
- [9] 吴涓, 孙岳民, 雷威, 等. 东南大学机电综合虚拟仿真实验教学中心建设规划思路与进展[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(10): 5-9.
- [10] 李真, 余善恩, 倪红霞. 球杆控制实验系统的设计与实现[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(11): 92-95, 310.
- [11] 张佳, 辛斌, 郑荣钦. 球杆系统动态仿真实验平台的构建与实现[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(7): 120-123, 128.
- [12] 王辉, 王晗, 丛榆坤. 自动控制系统及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020: 188.
- [13] 姜海燕. 球杆系统的 PID 控制方法研究[J]. 河南科学, 2019, 37(3): 343-348.
- [14] 郑荣钦. 基于球杆系统的智能控制仿真实验平台设计[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [15] 郝洋洋. 球杆系统设计及控制实现[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [16] 吴偏偏, 王富东, 王敬驰. 球杆控制系统的设计[J]. 自动化技术与应用, 2015, 34(9): 114-116.
- [17] 宋志伟, 翟文鹏, 信建峰, 等. 基于 PID 算法的球杆教学系统设计[J]. 硅谷, 2015, 8(3): 5-6.
- [18] 黄星, 何标涛, 王涛, 等. 有限时间稳定的球杆控制系统设计[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2019, 32(1): 37-42.
- [19] 王长正. 板球系统的 PID 控制器参数智能优化研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.