

《自动控制理论》实验教学改革探索与实践

杨汇军, 孙丽颖, 王 巍, 王贺彬

辽宁工业大学电气工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年9月14日; 录用日期: 2026年10月15日; 发布日期: 2026年10月21日

摘 要

针对《自动控制理论》课程概念抽象、理论性强以及传统实验教学难以有效支撑能力培养的问题, 本文在分析国内外实验教学研究现状的基础上, 依托EL-CAT-IV自动控制原理实验平台, 构建了“基础型 - 综合设计型 - 创新探索型”三层递进式实验教学模式。教学中采用MATLAB仿真与实验现场操作相结合的虚实结合方式, 以二阶系统阶跃响应分析和连续系统串联校正为例, 设计了虚实融合的实验教学流程。在此基础上, 以实验技能测试为核心, 建立了过程考核、技能测试与创新探索三个维度的实验课程考核评价体系, 并通过课程实验环节的达成度分析提出持续改进措施。教学改革实践表明, 该模式有效提升了学生对抽象控制理论的理解能力、工程实践能力和创新探索能力, 为自动控制理论实验教学改革提供了可借鉴的路径。

关键词

自动控制理论, 实验教学, 虚实结合, 评价体系

Exploration and Practice of Experimental Teaching Reform in “Automatic Control Theory”

Huijun Yang, Liying Sun, Wei Wang, Hebin Wang

School of Electrical Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: September 14, 2026; accepted: October 15, 2026; published: October 21, 2026

Abstract

For some problems, such as abstract concepts, highly theoretical, and the difficulty of effectively supporting ability cultivation by the traditional experimental teaching in the course of “Automatic Control Theory”, based on the analysis of the current status of experimental teaching research both domestically and internationally, a three-tier progressive experimental teaching model has been

established, encompassing “basic type - comprehensive design type - innovative exploration type” relying on the EL-CAT-IV automatic control principle experimental platform in this paper. A virtual-real integration approach that combines MATLAB simulation with on-site experimental operation is adopted in the teaching. The step response analysis of a second-order system and the cascade correction of a continuous system and a virtual-real integrated experimental teaching process designation are used as examples. On this basis, with experimental skill testing as the core, an experimental course assessment and evaluation system is established, encompassing three dimensions: process assessment, skill testing, and innovative exploration. Continuous improvement measures are proposed through the analysis of the achievement level of the experimental course. The practice of teaching reform demonstrates that this model effectively enhances students’ understanding of abstract control theory, engineering practice ability, and innovative exploration ability, providing a reference path for the reform of automatic control theory experimental teaching.

Keywords

Automatic Control Theory, Experimental Teaching, Integration of Virtual and Practical Elements, Evaluation System

Copyright © 2026 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

自动控制理论课程是自动化、测控技术与仪器、电气工程及其自动化以及智能电网等工科专业的核心课程，是学生能够解决工业过程复杂工程问题的理论基础。该课程具有概念抽象、理论性强、数学推导繁复等特点，而实验教学是连接理论与实践的媒介，对于加深学生对自动控制理论知识的理解、培养学生解决复杂工程问题能力具有不可替代的重要作用。

目前我校本课程已初步形成“期末笔试 + 实验环节考核 + 技能测试”的考核模式，但实验环节考核仍存在以下突出问题：

(1) 考核目标与能力培养不够匹配。实验环节考核偏重于实验操作与报告的规范性评价，实验技能测试侧重于对基本操作和仪器使用的检验，两者均未能有效覆盖“运用控制理论知识解决工程问题”这一核心能力目标。

(2) 考核方式缺乏对实验过程的分阶段、分层次评价。随着虚拟仿真平台、MATLAB 仿真软件的引入，实验教学模式已从单一的“实验箱验证”向“虚实结合、层次递进”方向演变，但现有考核方式尚未建立对方案设计、结果分析、故障排查等实验过程的阶段性、层次性评价机制。

(3) 考核维度难以激发学生的创新思维。现有考核缺乏对工程思维、团队协作、创新意识的评价维度，难以形成对创新能力的有效引导与激励。

针对上述问题，本研究以已有实验技能测试改革成果为基础，提出并构建“三层内容 - 虚实结合模式 - 三维度评价”集成框架，将实验内容、教学模式与考核方式整合为一个闭环体系，推动考核从“结果判定”向“过程驱动”“成果检测”转变。

2. 自动控制理论课程的实验教学研究现状

国外高校在自动控制理论的实验教学方面起步较早，主要存在以下特点：

(1) 虚实结合的实验模式成熟。国际自动控制联合会(IFAC)的研究表明,国外控制教育中已普遍采用“仿真实验与硬件实验相结合”的模式,通过高保真仿真模拟真实工业场景,弥补硬件实验的时空限制。同时有一些高校甚至将工业级控制系统(如 PLC、DCS)引入本科实验教学,让学生接触真实连续生产过程的工业对象。

(2) 过程性评价体系完善:国外实验课程普遍采用“持续评估”理念,将实验成绩分散到实验前预习、实验操作、实验报告、团队协作、口头答辩等多个环节,降低终结性考试权重,强调对学生学习过程的监控和反馈。

(3) 项目式学习(PBL)成为主流:以项目驱动实验教学,学生在完成具有工程背景的综合项目中,综合运用建模、分析、设计、调试等能力,考核关注点从“正确与否”转向“是否有创新”。

国内高校近年来在自动控制理论实验教学改革方面进行了大量探索:

(1) 引入虚拟仿真实验平台:依据实验室的真实环境,利用虚拟仿真技术[1]和网络信息技术,建立了完整的空间和设备三维模型,构建了模拟实验环境的三维场景,提高了学生的实验参与度;也有部分高校开发了由实验箱、电路板、电机拖动平台组成的多电机驱动控制综合实验平台,支撑“硬件模拟 + 软件仿真 + 综合创新”的三结合实验模式。

(2) 基于 OBE 理念的实验教学内容改革:引入实际工程案例、虚实结合[2]、整合教学内容已成共识。部分高校依托卷绕平台进行速度 - 张力协同控制综合实验设计,使学生接触真实的工业控制对象,从特性测试、控制方案设计到算法实现进行全流程训练;同时也有高校构建了“实验箱 + 仿真实验 + 创新控制实验”迭代升级的实践教学体系。

(3) 推行线上线下混合式实验教学:西北工业大学等高校采取线上 MOOC 内容与线下实验结合的方式,增加创新综合性实验项目,突出该课程的前沿性与时代性;同时人工智能辅助教学也开始逐步引入,通过 AI 仿真平台重构实验教学体系,运用 AI 工具动态演示核心知识点。

(4) 实验教学考核方式的改革方面,已有高校采取“线上、线下面向过程的全教学流程考核模式”,强调过程性评价。但多数改革仍处于“增加考核环节”的层面,尚未形成系统化的、与能力目标实时对接的实验考核体系。

综合以上分析,目前我校自动控制理论课程考核指标与能力目标的对应关系略显模糊,尽管采用了多元化的考核,各考核环节与课程目标、毕业要求的对应关系仍不够清晰,缺乏“教 - 学 - 评”一体化的闭环设计。本研究正是在此背景下,以已有实验技能测试改革为基础,着眼于“教学内容与考核方法的协同改革”,在该课程实验教学中,构建虚实结合、线上线下混合的实验教学[3]与考核新体系。

3. 自动控制理论的实验教学内容改革

3.1. 实验教学目标

本课程实验结束后,学生应能独立或协作完成典型线性定常系统的建模、分析、校正与仿真验证,具备运用控制理论解决简单工程动态问题的初步实践能力,并养成严谨求实、系统思维、团队协作与科技报国的职业自觉。

核心目标如图 1 所示,按能力导向形成递进式培养目标,并在考核方式中得到支撑。

(1) 工程建模与实验操作能力:能针对给定被控对象(如水箱、温控箱),正确搭建实验电路或 Simulink 模型,完成时域与频域测试,获取系统的阶跃响应曲线和 Bode 图,并能辨识出系统的关键动态参数(超调量、调节时间、稳态误差、相角裕度)。

(2) 控制系统设计能力:能根据给定的时域或频域性能指标要求,运用频率法,设计至少一种串联校正装置(超前或滞后),并通过仿真或硬件验证,证明校正后系统满足指标。

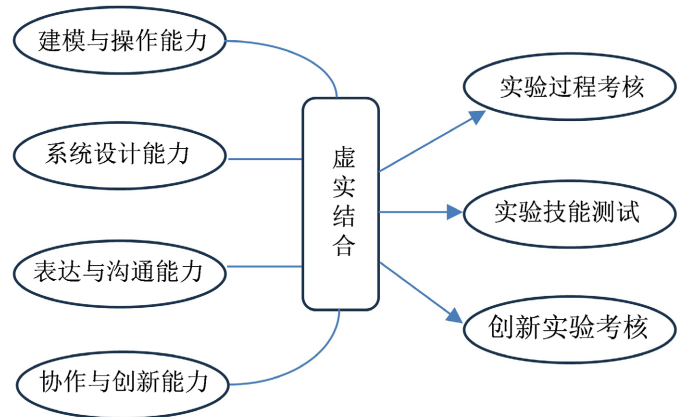


Figure 1. Core training objectives
图 1. 核心培养目标

(3) 工程分析与表达沟通能力:能对实验中出现的不稳定、超调或余差过大等问题,运用稳定性判据、稳态误差分析等理论工具进行故障定位与原因分析,并以书面或口头形式提交一份包含数据、曲线和结论的规范实验报告。

(4) 团队协作与创新能力:能在小组实验中合理分工(如接线、记录、误差分析等),协作完成复杂系统的联调,并能对他人的设计方案进行技术提问与合理性评价,在组内形成改进共识。

3.2. 三层实验教学设计

遵从我校测控技术与仪器专业的培养方案,本课程实验教学内容紧密围绕自动控制理论的核心培养目标与能力要求,设置 4 个实验项目,涵盖典型环节的阶跃响应分析、二阶系统的阶跃响应分析及系统频率特性测量及连续系统串联校正等主要内容。

实验一、实验三和实验四为验证性实验,实验二为设计性实验。

实验一、典型环节的阶跃响应实验:通过比例、惯性、积分及比例积分等典型环节阶跃响应分析典型环节的特点,通过测试参数获取其数学模型(如惯性环节的时间常数与比例增益)。

实验二、利用已完成的比例、惯性、积分环节的特性参数对性能的影响,综合设计二阶系统,提出设计电路,并利用实验箱进行接线,实现阶跃响应测试。

实验三、系统频率特性实验:利用惯性环节构建一阶系统,然后测试正弦信号输入下系统的稳态输出,理解系统频率特性的物理意义。

实验四、由频域指标和时域指标结合,分析待校正二阶系统的时域与频域特性,然后利用校正装置实现串联超前和串联滞后校正实验。

Table 1. Experimental teaching system
表 1. 实验教学体系

实验类型	内容特征	能力目标
基础验证类	依托实验箱和虚拟仿真平台,完成典型环节的时域与频域分析	掌握基本实验技能,理解典型环节与频率特性概念
综合设计类	模拟二阶对象(如加热炉、换热器等),完成对象建模、时域分析,校正设计	运用理论知识解决工程问题
创新探索类	开放课题、项目驱动,学生自主选题或利用实验箱或 MATLAB 仿真	创新思维、团队协作、自主探究

重新设计“三阶递进”实验教学体系[4]:在现有实验项目基础上,按照能力培养的需求,将实验内容设定为三个层次,将实验四改为综合设计实验,如表 1 所示。

3.3. 实验教学具体措施

实验教学过程按基础验证类、综合设计类和创新探索类三个层次开展实验教学:

(1) 在基础验证类实验中,“典型环节阶跃响应”、“系统频率特性测试”等 2 个实验中,作为基础性实验仍然以验证性为主,学生按分组实现课前预习与提问、实验操作与阶跃响应分析、典型环节模型与频率分析特性及实验报告撰写;

(2) 将连续系统的串联校正改为综合设计类实验,在综合设计类的二阶系统阶跃响应分析和连续系统的串联校正中,实验前学生的预习部分,将部分内容迁移至 Simulink/MATLAB 虚拟仿真平台,做仿真分析,实现“虚实结合”引入工程对象,如温度过程和水箱液位过程等具有工程背景的实验对象,开展虚拟设计、仿真建模与分析,然后提出可行的实验方案,然后到实验室利用实验装置接线试验,并测试相关的参数;

(3) 在创新探索层,设置开放性课题(如工业对象的时域、频域分析、无人机姿态控制仿真、智能车循迹控制等),学生自主选题、组队合作完成。

4. 虚实结合的实验课程教学模式改革

自动控制理论课程最常用的仿真软件为 MATLAB 软件,通过 MATLAB 软件可以直观分析控制系统参数的改变对系统的稳定性、平稳性、快速性的影响,也可实现图形化展示,无论是时域响应曲线、根轨迹图,还是伯德图、奈奎斯特图,帮助学生利用“物理图像”理解“数学公式”。

在实验教学环节,利用 MATLAB 中的 Simulink 工具箱搭建系统或环节的传递函数模型,使用常用输入信号,实现时域、频域系统分析的仿真,再通过实验箱电路搭建实际系统进行对比,找出相同参数下误差的原因,从而分析数学模型与工程实际应用对象的区别,帮助学生理解从理论模型到真实对象的转换方法。

4.1. 二阶系统的仿真建模与阶跃响应分析

二阶系统阶跃响应分析为设计性实验,其实验目的是学生能利用 MATLAB 建立二阶系统仿真模型,并能研究阻尼比 ζ 和无阻尼自然振荡频率 ω_n 对系统动态性能的影响,能利用单位阶跃响应曲线中分析时域性能指标,以此能够分析二阶系统。

实验前预习,要求学生利用比例环节、惯性环节及积分环节设计二阶系统,分析所设计的二阶系统阻尼比 ζ 和无阻尼自然振荡频率 ω_n ,并分析所设计系统理论上的各项时域指标;利用 MATLAB/Simulink 工具箱搭建二阶系统阶跃响应仿真模型[5],然后双击 Scope 查看响应曲线,以此验证设计方案的合理性与正确性;在实验报告中,打印所仿真的阶跃响应曲线,同时记录仿真得到的各项性能指标,如上升时间、峰值时间、超调量及调节时间。

实验过程中,按设计电路利用实验箱接线,并利用实验上位机软件测试阶跃响应,根据得到响应曲线测取各项时域指标(重点是二阶系统欠阻尼下的指标分析);改变电路参数,由不同参数下的阶跃响应曲线,直观分析电路参数对响应曲线的影响,同时将理论计算、实验结果与仿真结果三项对比,分析误差原因,实现虚实结合。

4.2. 连续系统串联校正的仿真建模与分析

连续系统串联校正实验改为综合性实验, MATLAB 软件为连续控制系统的设计与校正提供了强有力

的平台支撑。学生可以根据已给的连续系统，如以温度过程的大滞后对象为例搭建模型；可分析校正前与校正后系统的阶跃响应及性能指标的变化，从而理解校正的效果。

串联校正实验中分超前校正和滞后校正两种情况，针对模拟工业温度对象的二阶系统进行校正，例如，某次实验的理论分析、MATLAB 仿真和实验过程数据如表 2 所示。

Table 2. Calibrate experimental data
表 2. 校正实验数据

实验类型	指标名称	理论分析		仿真结果		实验结果	
		校正前	校正后	校正前	校正后	校正前	校正后
超前校正	超调量	56.93	20.75	57.33	20.22	57.6	22.21
	峰值时间(s)	0.225	0.181	0.228	0.183	0.211	0.179
滞后校正	超调量	48.73	15.9	51.41	15.5	54.8	15.2
	峰值时间(s)	0.144	0.423	0.148	0.430	0.142	0.411

(1) 实验前预习，首先学生按所给的模型理论分析校正前后的时域指标，重点是峰值时间和超调量，完成数据表 2 中的预习理论数据部分；

(2) 在 Simulink 环境中，搭建该单位负反馈二阶系统校正前后的数学模型，按仿真软件操作得到待校正系统和校正后系统的阶跃响应曲线，并针对仿真得到的校正前后的阶跃响应，分别分析时域指标，填入表 2 中的仿真数据部分；

(3) 利用实验箱按串联超前与串联滞后、校正前与校正后进行实验接线，并按上位机软件操作获得响应曲线，由曲线测取峰值时间和超调量，如表 2 中的实验数据部分。

学生通过理论分析、仿真验证以及实验操作三个过程的数据对比分析，实现虚实结合、图解与数据结合，能够直观理解串联超前校正与串联滞后校正的校正效果，理解超前与滞后适用的场合，这种仿真先行与实践验证的虚实结合方式，高效地培养了学生的系统设计能力和工程思维。

5. 实验课程考核评价体系改革

5.1. 考核评价体系构成

自动控制理论实验考核评价体系应体现理论与实践结合、过程与结果结合、知识与能力结合的多维评价理念。综合国内高校的改革经验，我校自动控制理论课程实验考核评价体系由实验过程性考核、实验技能测试、创新探索实验考核三个模块构成，并可根据课程实际融入总成绩中。

(1) 实验过程性考核，过程性考核强调对学生实验全过程的动态监测，含实验课前预习、实验过程操作及实验报告撰写，采用“课前预习考核→课中操作考核→课后报告考核”的考核方式。

课前预习考核：学生在实验前需完成预习报告(含仿真内容)，并回答测试题(一般在实验前教师随机提问)，考查对实验原理与目标、实验步骤、安全规范的熟悉情况，并给出合理的预习成绩。

课中实验操作考核：重点考核学生实验过程的动手能力、分析问题与解决问题能力及实验主动参与意识与团队合作情况。

课后实验报告考核重点在于实验曲线的合理性、性能指标测试的准确性以及回答思考题的逻辑性给出综合评价。

(2) 实验技能测试考核

实验技能测试依据学生知识掌握程度和实践操作能力，建立 3 个难度系数的试题库。实验技能测试

试题分 A、B、C 三个等级,系数分别为:1.0、0.9、0.8,其中 A 等级试题库 12 套、B 等级试题库 26 套、C 等级试题库 12 套,共 50 套试题。该考核环节采用“预定等级、随机抽题、限时操作”的方式,考查学生对基本仪器使用、典型实验操作的独立完成能力。

(3) 创新探索实验考核:学生分组设计实验,内容限制为模拟工业对象的时域分析或者频域分析,选择实验箱或 MATLAB/Simulink 工具实现,实验过程实施,并获取实验结论,考核学生独立组队实验整体的实施过程和创新成效。

5.2. 考核评价实施方法

自动控制理论实验考核评价体系的实施,在各考核环节均遵循“课前-课中-课后-期末”的闭环流程实施:

(1) 实验过程性考核

课前预习考核实施:平台支持:依托学校网络教学平台(我校选用 MOOC 平台)发布预习任务。考核内容:提交预习报告(含实验目的、原理简述、预期结果),并完成预习测验题,一般课前实验教师检查预习情况并灵活地随机提问测验;评分标准预习报告由教师评阅。

课中实验操作考核:在实验操作过程中,实验教师根据实验电路接线、上位机软件等的操作规范性、数据记录的合理与完整性、问题解决能力等进行实时考评,同时也会综合考虑实验课堂的参与度:包括出勤情况、实验过程中的主动提问与思考情况、与教师及组内成员的互动质量等方面,以此实现理论与实践的深度融合。

课后实验报告考核:学生实验后提交实验报告,教师根据报告的书写内容,包括分析逻辑、所提交实验曲线的分析深度与提炼实验数据,如性能指标的合理性,归纳总结实验结论的提炼、准确性及创新性,回答思考题的缜密逻辑性等合理给出综合评价。

(2) 实验技能测试实施:时间安排:学期末集中组织;实验技能测试的每场测试时间 30 分钟,学生结课后、技能测试前申报好试题等级,技能测试的现场抽取相应等级试题,每个学生单独完成测试操作;由 3 名实验指导教师负责监考,测试内容:覆盖本学期所有实验项目的基本操作技能,评分方式:由 3 名以上教师或助教同时评分,取平均值,减少主观差异。

考核成绩包括四个方面:理论分析与电路参数设计(30 分);电路接线(40 分);运行结果分析(20 分);答辩并回答测试中有关的问题(10 分)。

(3) 创新探索实验考核:学生可根据兴趣爱好,自己组队,内容自选,然后可利用实验箱或 MATLAB/Simulink 工具,拟定模型、设计实验,然后实验接线与测试结果或者建模、仿真分析,获取实验结论,引导学生理解工程实践中理想化假设与实际情况的区别,培养学生的辩证思维能力和创新能力。

6. 实验教学改革结果与分析

6.1. 实验成绩及达成度分析

我校自动控制理论的实验成绩采用百分制计分,融合为 2 个环节给出:

(1) 实验过程考核:每个实验由三个环节组成:实验课前预习(占 20%)、实验操作过程(占 50%)和实验报告撰写(占 30%),每个实验给出成绩后,4 个实验平均作为实验过程考核成绩,占课程成绩的 8%。此考核环节覆盖了实验教学的预习、操作及报告撰写全过程,有效提升学生的工程素养和综合实践能力。

在首次改革试点中,创新探索实验考核:按每组总体的方案创新性及操作可行性,按百分制给出,仅占总成绩 2%。

在实验成绩考评中,将“实验过程考核”成绩与“创新探索实验”考核成绩合并为最后的实验成绩,

占课程总成绩的 10%。

(2) 实验技能测试考核：实验技能测试中，每个学生按百分制给出，并选 A、B、C 等级，折算实验技能测试成绩，占总成绩的 20%。

在 2025/2026-1 学期中，实验环节支持课程目标的达成度为 0.848，技能测试环节支持课程目标的达成度为 0.791，较好地完成了课程目标。

6.2. 实验教学持续改进措施

自动控制理论课程的实验教学改革实现了基础、综合设计及创新三层教学设计，并采用“虚实结合”的教学模式，构建了多维评价体系，但技能测试的达成度还没有达到预期，还应不断探索新的改革方向。

- (1) 实验过程考核尽可能突出“成果导向”的教学目标；
- (2) 改进创新探索实验考核的内容和形式，提升其可操作性；
- (3) 实验技能测试继续丰富内容、改进形式，激发学生平时的实验热情，提升学生的实践能力。

7. 结语

通过《自动控制理论》实验教学内容、教学模式与考核评价等方面进行探索与实践，取得以下三方面的改进：

首先，突破以往实验教学改革中内容、模式、评价相互割裂的局限，提出三者 in 能力培养目标下协同设计的集成框架，为工科实验教学改革提供系统性方法论；

另一方面，将“虚实结合”从教学手段层面提升为贯穿“基础 - 综合 - 创新”三层次实验的教学组织原则，明确其在各层次中的功能定位与实施路径；

最后，构建以技能测试为核心、过程考核与创新探索并重的三维度评价体系，填补现有考核对工程思维、团队协作与创新意识评价的空白。

该研究可为同类工科课程的实验教学改革提供可复制、可推广的经验范式。

基金项目

辽宁工业大学教学改革研究项目(202019)。

参考文献

- [1] 李欣, 张亮. 基于虚拟仿真软件的温度测量与控制实验教学[J]. 中国冶金教育, 2026(3): 80-82.
- [2] 邵康敏, 赵雪梅. 基于虚实结合的自动控制原理课程教学改革探索与实践[J]. 职业, 2024(4): 16-18.
- [3] 刘忠坤, 闫俊, 李盈, 等. 虚实结合、线上线下混合分层次模块化大学物理实验教学体系建设与实践[J]. 辽宁科技学院学报, 2025, 27(1): 73-76.
- [4] 赵洪霞, 黄伟. 面向社会科学专业的三阶递进式 Python 实验教学体系构建[J]. 电脑知识与技术, 2025, 21(26): 114-116.
- [5] 李翠玲, 张浩, 陆剑峰, 等. MATLAB 与控制工程虚拟实验编程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2023.