

基于自制实验装置的《自动控制原理》课程教学案例与课外实践

罗云¹, 饶喆¹, 顾东杰², 周奇郑¹, 程晗^{1*}

¹海军工程大学, 湖北 武汉

²92326部队, 广东 湛江

收稿日期: 2025年11月3日; 录用日期: 2025年12月12日; 发布日期: 2025年12月23日

摘要

针对《自动控制原理》课程教学过程中理论和实验未能较好融合、实验环节采用基于Matlab/Simulink纯仿真而缺乏直观性的问题, 聚焦兵器随动系统的共性基础原理, 以真电机实验装置为被控对象, Simulink作实时控制器, 自制实验装置, 以此建设理实融合的教学案例4个, 安排2~3次课外实践大作业。结果表明教学案例和课外实践取得了良好的教学效果, 探索了一条培养学员高阶思维的新途径。

关键词

自动控制原理, 自制实验装置, 教学案例, 高阶思维

Leveraging a Home-Build Experimental Apparatus in Teaching Cases and Extracurricular Practice for “Automatic Control Principles”

Yun Luo¹, Zhe Rao¹, Dongjie Gu², Qizheng Zhou¹, Han Cheng^{1*}

¹Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

²92326 Troops, Zhanjiang Guangdong

Received: November 3, 2025; accepted: December 12, 2025; published: December 23, 2025

Abstract

In response to the issues observed in the teaching of Automatic Control Principles—namely, the

*通讯作者。

文章引用: 罗云, 饶喆, 顾东杰, 周奇郑, 程晗. 基于自制实验装置的《自动控制原理》课程教学案例与课外实践[J]. 创新教育研究, 2025, 13(12): 596-605. DOI: 10.12677/ces.2025.1312998

insufficient integration of theory and experiment, and the lack of intuitiveness in experiments relying solely on Matlab/Simulink simulations—this study focuses on the fundamental principles common to weapon servo systems. Utilizing actual motor experimental setups as the controlled objects and Simulink for real-time control, self-developed experimental devices were constructed. Based on this platform, four teaching cases integrating theory and practice were developed, accompanied by 2~3 extracurricular practical assignments. The results demonstrate that these teaching cases and practical activities achieved satisfactory educational outcomes, paving the way for cultivation of students' higher-order thinking skills.

Keywords

Automatic Control Principle, Home-Build Experimental Apparatus, Teaching Cases, Higher-Order Thinking Skills

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

自动控制原理广泛应用于机械、电子、化工、航空等领域，其课程具有概念难理解、理论与工程性强的特点，经常导致学员单纯地按数学或物理课方式学习，无法将理论与实践相结合[1][2]。目前高校开设的实验大多采用 Matlab/Simulink 纯仿真、基于模拟电路实验箱的形式[3]，也有部分国内外高校采用商业公司所开发的自动控制原理实验装置譬如直线倒立摆[4][5]，这些实验设备的优点是采用 Simulink 来进行设计、控制与结果显示，使学员只需关注算法与设计，而且有实物被控对象，学员可以获得直观的体验，对控制理论的理解与应用大有裨益。但是缺点是体积大、不易携带、价格高，只能局限于实验室使用，且实验指导书内容与课程理论结合不紧密。

以培塑学员高阶思维[6]-[9]为指导思想进行课程教学改革与实践，对舰炮、光电跟踪仪、光电吊舱一类的随动系统进行简化，用直流电动机作为被控对象自制一套实验装置，并将该装置贯穿整个课程教学环节，建设 4 个理实融合的教学案例，安排 2~3 次课外实践大作业。

2. 自制实验装置介绍

直流电动机[10]具有良好的调速特性、较大的启动转矩、功率大、响应快和驱动简单等优点。在伺服系统中应用的直流电动机称为直流伺服电动机，在上世纪 70 年代前处于伺服控制系统的主导地位，后因电力电子技术和交流伺服电机控制算法的发展，才逐步让位于交流伺服电机，但迄今仍有部分应用于民用、工业、军用中，例如光电跟踪仪仍采用直流力矩电动机。在控制理论课程教学中，直流电动机以其易于建模与驱动便捷的特性，有效衔接了理论分析与实践应用，为初学者构建了控制系统的完整认知闭环，是理想的研究对象。

(1) 总体介绍

该装置为虚实一体的实验装置，即虚控制器(Simulink 实时控制器) + 真电机装置的被控对象。学员无需涉及底层硬件及驱动编程，只需关注控制原理分析与控制器设计。实验装置体积小、方便携带，学员可在课后利用闲暇时间在任何地方进行实践。实验装置的原理框图见图 1，直流电动机 MG513 为被控对象，接口板在本系统中不做控制器，只是作为信号的输入输出，即通过串口接收来自上位机 Simulink 发来的 PWM 信号，经 PWM 模块和驱动板输出电机的控制电压，采集磁电编码器的电动机转速信息，

经串口发送给上位机 Simulink。系统的控制器由上位机(Simulink Desktop Real-Time)承担, 只需要一台计算机就可以完成模型的建立与外部设备的连接, 实现对直流电动机位置(或速度)闭环系统的实时控制。

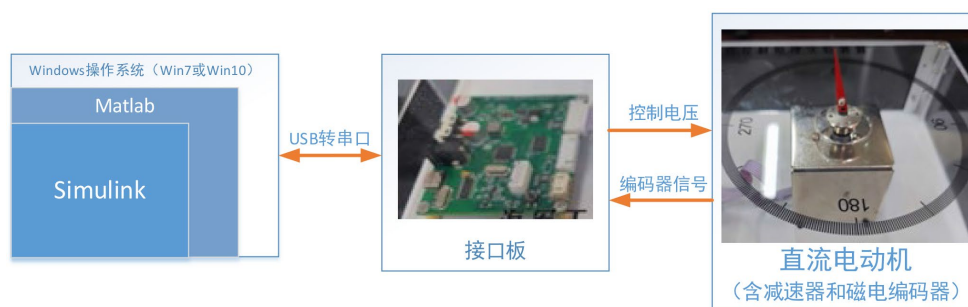


Figure 1. Block diagram of the experimental apparatus

图 1. 实验装置原理框图

(2) 接口板

由 STM32F103 [11]、TB6612FNG [12]及外围芯片构成。STM32F103 是 ST (意法半导体)公司生产的一种 32 位单片机, 该单片机基于 Arm Cortex-M3 内核, 内含 UART 模块、PWM 模块和读取正交编码器数据的定时器, 可编程实现串口通信、PWM 信号的产生与可调和读取磁电编码器的电机转速信息。TB6612FNG 内含两路 H 桥电路, 受 PWM 信号控制, 可同时驱动两路直流电机。本系统只用到其中一路。TB6612FNG 每通道输出最高 1.2 A 的连续驱动电流, 启动峰值电流达 2 A/3.2 A (连续脉冲/单脉冲), 完全能驱动直流电动机 MG513。

(3) Simulink 上位机

Simulink 是 Matlab 中的一种可视化仿真工具, 是一种基于 Matlab 的框图设计环境, 是实现动态系统建模、仿真和分析的一个软件包, 被广泛应用于线性系统、非线性系统、数字控制及数字信号处理的建模和仿真中。Simulink 提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。在该环境中, 无需大量编写程序, 而只需要通过简单直观的鼠标操作, 就可构造出复杂的系统。

在课程内安排的 Matlab 纯仿真实验为基于 m 语言和 Simulink 来实现, 自制实验装置和教学案例是对 Simulink 使用的强化, 不仅能对教材各个章节的原理算法进行仿真, 而且还能控制实际的硬件, 将所设计的控制器串入到实物系统中。

Simulink 工作在 Simulink Desktop Real-Time 状态, 它提供了一个实时内核, 与外部设备的交互都通过该内核。本系统中, 作为控制器的 Simulink 工作在正常模式(I/O Mode)。在该模式下, 模型运行在 Matlab 上, I/O 驱动模块在内核上, 因此只有 I/O 驱动程序与实时时钟同步, 使用固定步长求解器。在该模型下数据的传输过程为: 当 Simulink 往硬件发送数据时, Simulink 先将数据存到缓冲区, 内核从缓冲区读取数据, 之后再传到硬件上; 当 Simulink 要读取硬件的数据时, 硬件会将数据储存在 Simulink 可以访问的存储器中, 存满之后 Simulink 再读取。

3. 教学案例建设

以自制实验装置为基础, 紧密结合课程教学内容, 撰写了四个教学案例, 应用到课堂教学中。四个教学案例分别为: 系统辨识建立电动机的系统模型、直流电动机位置闭环系统的根轨迹校正、直流电动机位置闭环系统的频域校正、直流电动机实验装置的 PID 校正。教学案例覆盖模型建立、基于根轨迹法和频率法的控制器设计、PID 控制器参数整定等内容。学员通过自制实验装置的现场演示观察实验结果和运动情况来验证理论, 加深对理论知识的理解, 提高了课堂体验感。

下面以“直流电动机位置闭环系统的根轨迹校正”教学案例为例介绍。该案例对应课程的《自动控制原理》课程的第四章[1] (根轨迹法), 涉及的知识点有: 根轨迹法设计位置闭环控制器。

(1) 直流电动机的位置闭环系统

通过“系统辨识建立电动机的系统模型”教学案例, 我们获取了直流电动机的传递函数

$G(s) = \frac{16.15}{(0.0868s+1)}$, 该传递函数表示的是电动机的输出转速与输入电压之比。如果以此构成位置闭环系

统, 则可以得到直流电动机位置闭环系统的系统方框图, 如图 2 所示。其中, $\frac{2\pi}{30}$ 的意义为: 30 为减速

比, 2π 是将转速单位由 r/s 转换为 rad/s。 $\frac{5}{2\pi}$ 的意义为: 将输入的 rad 角度从数值上转换为电压值, 以便

驱动直流电动机。 $\frac{1}{s}$ 的意义为: 对转速积分, 得到的输出为相对角度, 单位为 rad。

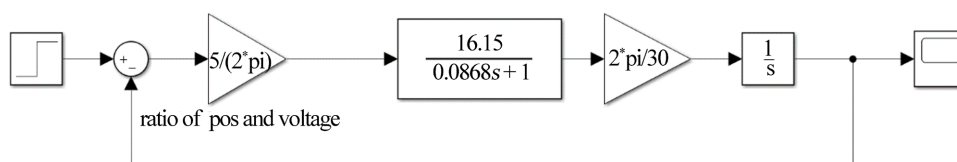


Figure 2. DC motor servo system block diagram

图 2. 直流电动机位置闭环系统方框图

根据上面的结构图, 我们可以得到开环传递函数为

$$G(s) = \frac{2.6917}{s(0.0868s+1)} = \frac{31.0104}{s(s+11.52)}$$

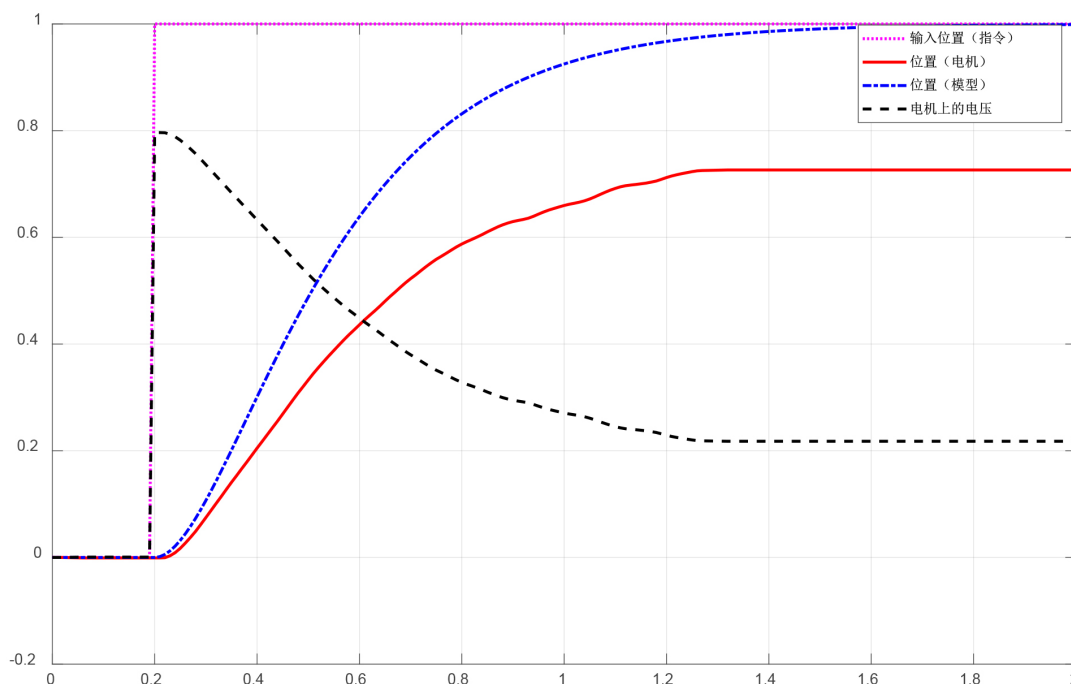


Figure 3. DC motor servo system step response

图 3. 直流电动机位置闭环系统的阶跃响应

利用 Matlab 工具, 可以分析闭环系统的特征根为两个负实根: -4.29 和 -7.23 , 调节时间为 1.12 秒。如果加一个 1 rad 的单位阶跃输入到该系统, 其输出为图 3 所示。从图中可以看出, 系统的响应慢, 而且稳态误差大。从理论上分析, 系统的稳态误差应该为 0 , 但是实物系统由于存在摩擦, 电机存在死区, 当控制电压较小时, 不足以克服摩擦, 所以不能使稳态误差为零。

那么该如何提高系统的快速性和减小稳态误差呢? 结合所学的根轨迹法来设计控制器, 对上述问题进行解决。

(2) 基于根轨迹法设计控制器

设定一个指标要求。动态指标: 调节时间 $t_s = 0.4 \text{ s}$, 超调 $\sigma\% \leq 10\%$ 。稳态指标: 5% 。

对系统校正最简单的是采用比例控制器来改变系统增益, 观察是否满足指标要求。当系统处于欠阻尼状态时, 闭环极点为共轭极点。根据公式 $t_s = \frac{3.5}{\zeta\omega_n} = \frac{3.5}{5.76} = 0.6076 \text{ s}$, 所以不能达到上述指标要求。

当继续增加系统增益时, 系统的闭环极点的实部不变, 虚部绝对值增大, 从而 β 角增大, ζ 减小, 超调 $\sigma\%$ 增大。因此, 单纯改变系统增益是不能满足指标要求, 必须改变系统的结构, 可以利用根轨迹来设计控制器。

从调节时间的公式 $t_s = \frac{3.5}{\zeta\omega_n}$ 可知, 要想提高系统的快速性, 减小调节时间, 极点需要远离虚轴, 即使目前的根轨迹往左偏移, 为此增加系统的零点。

具体设计步骤如下(与之配套的图见图 4):

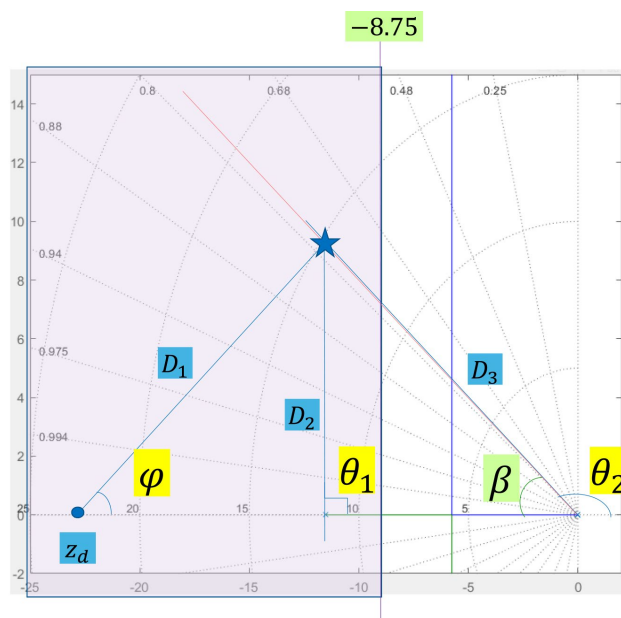


Figure 4. Root locus design diagram

图 4. 根轨迹设计图

① 根据调节时间的要求, 极点必须在 $\zeta\omega_n = \frac{3.5}{0.4} = 8.75$ 的左边。

② 根据超调量小于 10% 的要求, 我们选择工程上的最佳阻尼比 $\zeta = 0.707$, 此时 $\beta = 45^\circ$ 。此时选择的极点范围为: 实部小于 -8.75 , 且在 $\beta = 45^\circ$ 这条射线上的点。为了方便计算, 选择极点 $(-11.52, 11.52i)$ 。

③ 计算角度 φ , 以便确定所加的零点位置。根据根轨迹相角方程, $\varphi - \theta_1 - \theta_2 = -180$, 其中 $\theta_1 = 90^\circ$,

$\theta_2 = 135^\circ$ ，则 $\varphi = 45^\circ$ 。过极点 $(-11.52, 11.52i)$ 作一条直线交于实轴，且与实轴的角度为 45° ，与实轴交点就是要添加的零点。由图中几何关系知， $z_d = 23.04$ 。

④ 根据根轨迹的幅值方程，可以计算根增益 $K^* = \frac{D_2 D_3}{D_1} = D_2 = 11.52$ 。

⑤ 据此可以写出校正后的传递函数 $G'(s) = 11.52 \frac{(s + 23.04)}{s(s + 11.52)}$ ，原来的传递函数为 $G(s) = \frac{31.0104}{s(s + 11.52)}$ ，

两者相除可得控制器的传递函数：

$$C(s) = 11.52 \frac{(s + 23.04)}{31.0104} = 0.3715s + 8.5591$$

利用 `rltool` 工具可以观察校正后系统的根轨迹，见图 5。

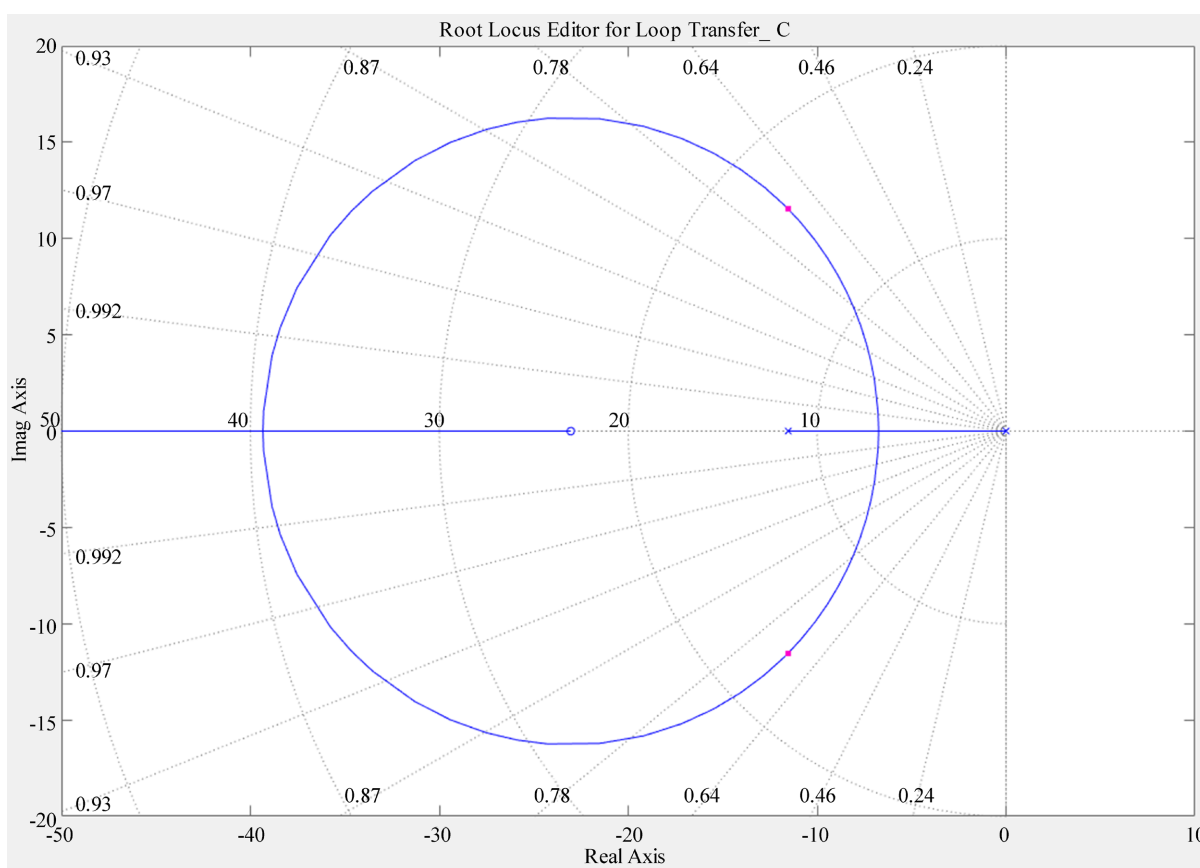


Figure 5. Compensated system root locus

图 5. 校正后系统的根轨迹

单位阶跃响应曲线见图 6，从图中可以读出超调量为 6.7%，调节时间为 0.324 s，稳态误差为 0，满足指标要求。

将该控制器串联到实物回路和仿真回路的前向通道中，见图 7 的虚线框所示。

其单位阶跃响应为图 8 所示。可见，实物系统的输出角度为 0.977 rad，略小于 1 rad。电机在启动时，加在电机上的电压为最大电压，可使电机快速启动并达到指定位置。然后电压慢慢减小，在快达到指定位置时，电机上的电压反向，这是 PD 控制器起作用，可改善系统的动态性能。

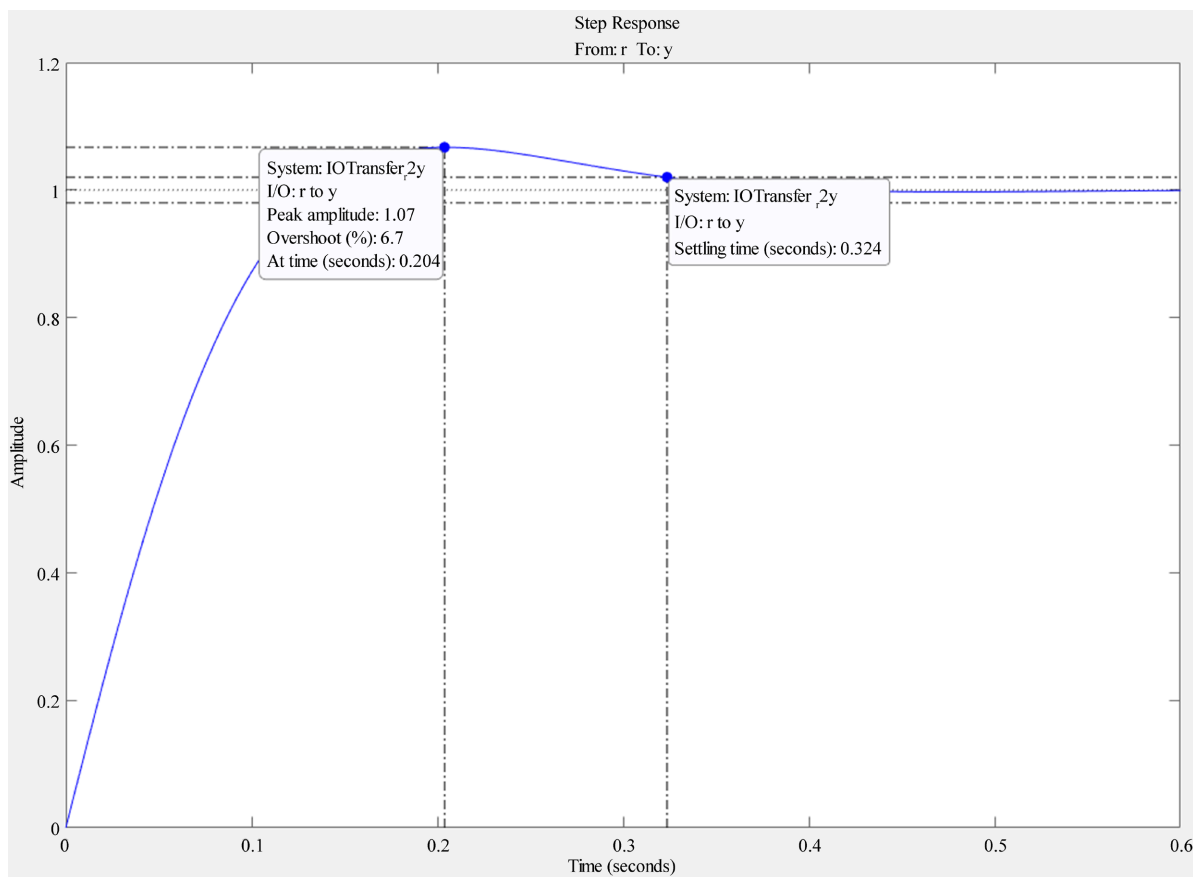


Figure 6. Compensated system step response

图 6. 校正后系统的阶跃响应

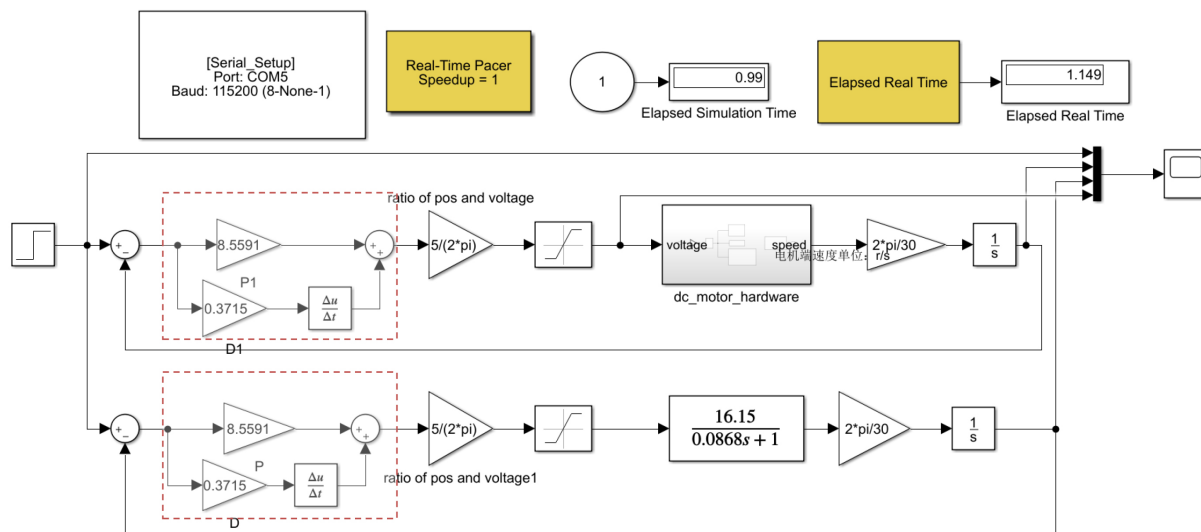


Figure 7. Simulink block diagram of simulation and physical loop with integrated controller

图 7. 仿真回路和实物回路串入控制器的 Simulink 框图

由于实物系统的电机存在摩擦、死区等因素，串口通信存在延时，Simulink 的实时性并不好，在建立直流电动机模型时都未考虑。因此仿真模型与实物系统有一定的误差，导致仿真回路的输出与实物回

路的输出有一定误差。

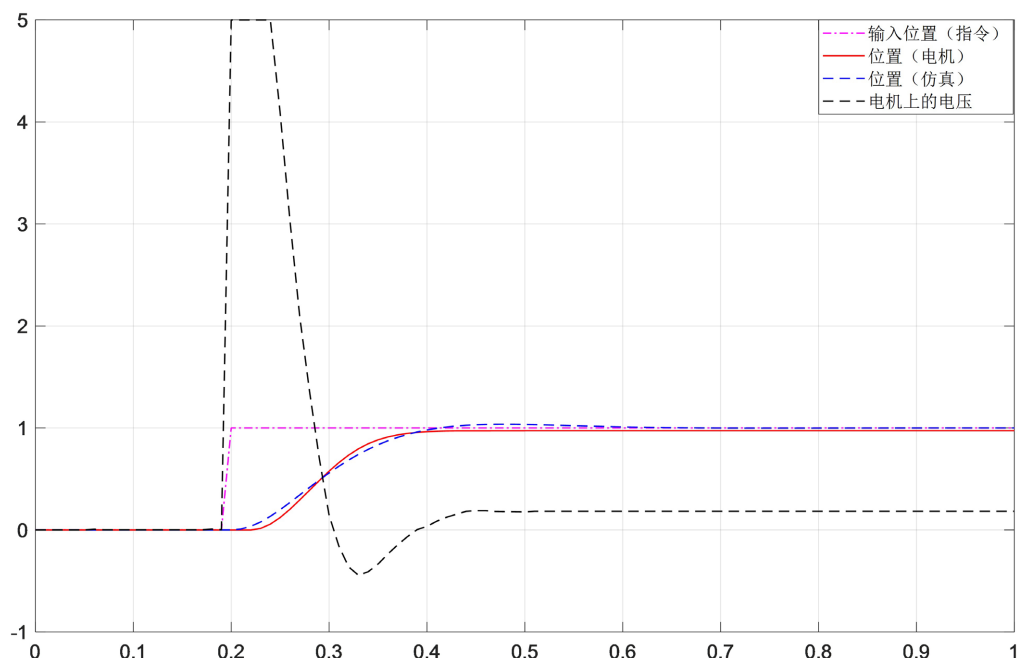


Figure 8. Step response of simulation and physical loop with integrated controller

图 8. 仿真回路和实物回路串入控制器的阶跃响应曲线

4. 案例在课堂教学中的应用

以“直流电动机位置闭环系统的根轨迹校正”教学案例为例进行说明。

在第四章介绍根轨迹的应用时，以自制实验装置的直流电动机为对象，首先由获得的直流电动机传递函数一步步构建位置闭环系统，然后利用根轨迹法对该系统的性能进行分析。在这个环节可以提问：如何根据直流电机的传递函数构建出直流电机位置闭环系统？如何分析直流电机闭环系统的性能？分析结果表明系统的响应慢，而且稳态误差大，针对此问题进行提问：如何提高系统的快速性？如何减小稳态误差？然后理论分析如何应用根轨迹法根据指标参数来设计位置闭环系统的控制器，在控制器设计好后，将控制器串入实验装置的实物回路和仿真回路，在课堂上现场演示没有控制器和有控制器的效果。在这个环节可以提问：应用根轨迹法如何设计控制器？控制器应添加到实物回路和仿真回路的哪个位置？直流电机位置闭环系统的系统性能满足给定指标要求吗？如何判定校正后的系统满足指标要求？仿真和实物输出不一致的原因是什么？这些问题涵盖了分析、创新和评价等高阶思维的培养。

教学案例在课堂的应用激发了学员的学习兴趣，学员反馈内容不再枯燥，所学的知识可以解决具体的实际问题，实现了课堂知识的深度构建和动态生成。

5. 课外实践实施

为了弥补课内传统实验项目只有 Matlab/Simulink 纯仿真的不足，基于自制实验装置并结合上述的教学案例设计了 2~3 个课外实践题目，并编写了配套讲义，旨在将学习延伸至课外。其实施方案如下：首先，在课程相关章节中引入自制实验装置，通过理论结合实践的现场演示，使学员掌握如何应用所学知识解决具体问题，为课外实践提供示范。其次，课外实践由教员发布题目，学员以小组形式合作完成，注重所学知识的应用与创新。题目既与课程内容紧密衔接，是课内实验的延伸，又以“Simulink 控制器

+ 真电机被控对象”的实物系统为对象。面对实物系统可能产生的各种不可预知问题,学员需依靠团队的通力合作和相互讨论来解决,这正是培塑高阶思维的有效教学手段。在具体安排上,考虑学员课程繁忙,课余时间有限,因此安排 2 个实践题目。首次课后即发放实验装置,以便学员利用个人笔记本,在自习室、实验室或寝室等场所灵活安排时间,熟悉和操作设备。学员按 3 人一组进行分组。具体任务随教学进度发布:在完成第三章“一阶系统时域分析”后,布置题目一(根据实验数据辨识直流电机的系统模型);讲授完第四章“根轨迹应用”后,布置题目二(应用根轨迹设计直流电机位置闭环系统控制器)。汇报安排在下课后进行,不占用课内时间,内容包括原理讲解、现场演示,图 9、图 10 是部分学员的汇报 PPT。

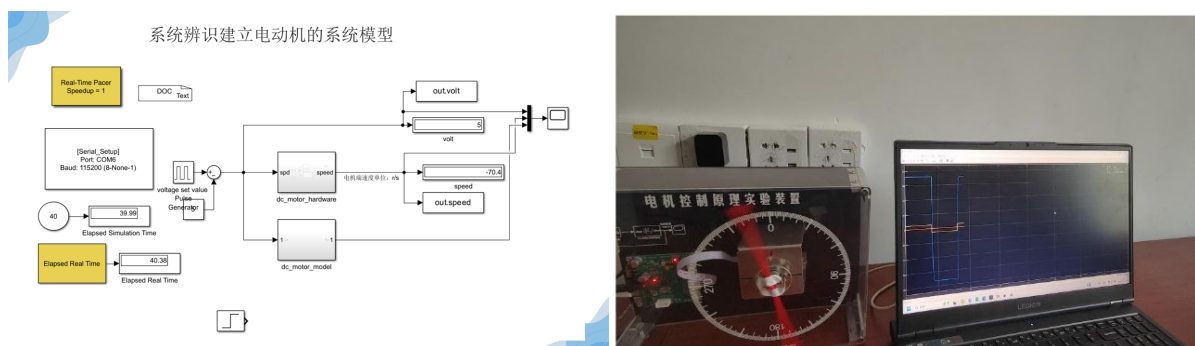


Figure 9. Student presentation for extracurricular practical assignment 1

图 9. 课外实践题目 1 的学员汇报 PPT

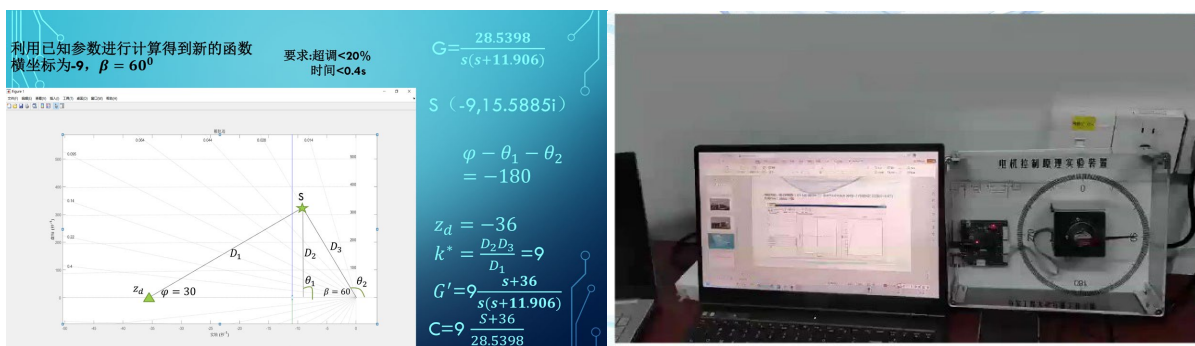


Figure 10. Student presentation for extracurricular practical assignment 2

图 10. 课外实践题目 2 的学员汇报 PPT

实践结束后,学员反映收获很大,不仅加深了对理论知识的理解,锻炼了动手能力与分析问题的思维,而且小组成员之间的分工合作与密切配合还培养了他们的沟通协调能力。

6. 结论

本文围绕自制实验装置,构建了理实融合教学案例和课外实践大作业。教学实践表明,该模式有效贯通了以问题为导向,从系统建模、分析到控制器设计的完整链条,助力学员构建系统化的知识体系。通过启发式教学,激发了学员的内生动力,推动其学习行为从浅层知识理解迈向深层情境应用,培养了学员系统化控制思维,取得了良好的教学效果,据此探索了一条实现学员高阶思维培养的教学模式,可为同类课程的教学改革提供借鉴。此外,实验装置可扩展为旋转倒立摆等复杂被控对象,为非线性控制、智能控制等前沿算法教学与研究提供开放平台,展现了良好的应用前景。

基金项目

2024 年度海军工程大学教学改革项目：学员高阶思维培塑——基于自制实验装置的教学案例建设和课外实践。

参考文献

- [1] 孟庆明. 自动控制原理[M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [2] 周武能, 石红瑞. 自动控制原理教学改革与实践[J]. 教学研究, 2010(1): 63-66.
- [3] 盛守照, 叶冯超, 孙武臣. “自动控制原理”实验设计与教学改革思考[J]. 电气电子教学学报, 2017(2): 131-134.
- [4] 杨世勇, 徐莉萍. 单级倒立摆的 PID 控制研究[J]. 控制工程, 2007(5): 23-25.
- [5] Irfan, S., Zhao, L., Ullah, S., Mehmood, A., *et al.* (2024) Control Strategies for Inverted Pendulum: A Comparative Analysis of Linear, Nonlinear, and Artificial Intelligence Approaches. *PLOS ONE*, **19**, e0298093.
- [6] 孙宏志, 解月光, 张于. 核心素养指向下高阶思维发展的表现性评价设计[J]. 课程与教学, 2021(9): 91-98.
- [7] 钟志贤. 教学设计的宗旨: 促进学习者高阶能力发展[J]. 电化教育研究, 2004(11): 13-19.
- [8] 王帅. 国外高阶思维及其教学方式[J]. 上海教育科研, 2011(9): 31-34.
- [9] 潘葳, 叶曦, 陈列文, 郑航. 面向高阶思维训练的实验教学模式设计与实践[J]. 物理与工程, 2024, 34(2): 46-53.
- [10] 池海红, 单曼红, 王显峰. 自动控制元件[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [11] 孙书鹰, 陈志佳, 寇超. 新一代嵌入式微处理器 STM32F103 开发与应用[J]. 微计算机应用, 2010(10): 59-63.
- [12] 王建平, 卢杉, 武欢欢. TB6612FNG 在直流电机控制设计中的应用[J]. 电子设计工程, 2010(6): 65-67.