

人工智能时代“现代控制理论”教学改革研究*

张德华 王宇辰 秦春斌

(河南大学人工智能学院 河南郑州 450046)

摘要: 针对人工智能时代对创新型卓越工程科技人才的要求, 本文详细分析了现代控制理论课堂的教学现状以及存在的问题, 以提升学生学习兴趣为初衷, 培养学生创新和实践能力为根本目标, 结合课程的特点, 探索案例教学方法, 提出将倒立摆引入“现代控制理论”的课堂教学、实验教学以及综合考评中。这样不仅提升了学生学习兴趣, 而且丰富了课程内容, 搭建了理论教学与工程实际的桥梁, 最终实现了培养学生解决复杂问题的应用创新能力。

关键词: 一阶倒立摆 现代控制理论 教学改革

中图分类号: G625.1 **文献标识码:** A

DOI: 10.12218/j.issn.2095-4743.2022.33.088

引言

2019年10月8日, 由教育部印发的《关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》中指出教师要强化科研育人功能, 推动高校及时地把最新的科研转化为教学内容, 激发学生的专业学习兴趣, 加强对学生的科研活动的指导, 加大科研实践平台建设力度, 推动国家级、省部级科研基地更大范围开放共享, 提高学生的创新和实践能力^[1-4]。“现代控制理论”是自动化专业、人工智能专业等相关专业的一门必修的骨干基础课程。作为经典“自动控制原理”的后续课程, 学好“现代控制理论”, 既有助于后期最优控制、系统辨识等高级课程的学习, 也有助于专业知识的综合应用, 还有助于理解深度学习等机器学习算法。与经典控制理论不同的是, “现代控制理论”是以状态空间方程为工具, 描述系统的内部和外部性能的一种综合控制方法。如何通过本课程提高本科生的综合研究素养, 并为学生开展应用研究打下扎实的基础, 是本课程改革建设必须思考和探究的一个主要问题。由于该课程概念抽象、数学定理理论推导多、计算复杂, 故在日常的教学中, 教学内容偏向于理论, 内容枯燥乏味, 导致学生很难对课程的思想体系有较好把握, 进而使较多学生在学习过程中逐渐失去探索兴趣, 甚至部分学生在完成课程的学习后仍不知该如何在实践中运用所学的理论知识, 这种现象致使较难培养出符合人工智能时代下新工科要求的专业人才。同时, 课堂教学质量直接影响着新工科专业人才培养的质量。因此, 针对人工智能时代对创新型卓越工程科技人才的要求, 本文致力于从改革与深化“现代控制理论”教学着手, 研究在新工科教育理念下, 如何将“借

鉴成果导向教育(Outcomes-based education, OBE)”教学思想贯穿于整个教学内容中, 促使学生能够将所学知识与研究问题的国际前沿相结合, 并能综合运用所学知识分析和解决专业复杂问题, 进而培养学生思考、调研、分析以及创新的综合能力。本文将河南大学“现代控制理论”课程为例开展教学模式创新的探索, 以“OBE”教学思想为指导, 以一阶倒立摆为典型的研究案例而贯穿课程整体教学内容的五大知识模块中, 通过不断完善该课程的教学内容与方法及考核激励机制, 进而有效地提高学生解决复杂问题的工程实践能力和创新能力, 从而满足工程教育认证的培养目标。

一、课程教学现状分析

“现代控制理论”是一门理论性较强的课程, 在传统的课程教学中, 存在以下问题。

1. 目标达成度低

首先, 在面对学生基础参差不齐的情况下, 若教师在授课时将重点放在对概念和定理的推导上, 则会使得该课程变得枯燥乏味。学生也只是僵硬地记住了公式定理, 课堂效果也很差, 同时也会不知如何与“经典控制论”课程衔接, 无法将相关课程的知识应用于实践, 而且课堂参与度也不高, 目标达成度更难合格, 直接导致后续的创新能力的培养不足。

2. 难以激发创新兴趣

在考核方面, 考核单调, 教学评价单一, 大多采用平时的考勤以及单调的闭卷考核形式来衡量学生的学习成果。这种考核方式不仅不能有效衡量学生的学习效果, 而且也不能激发学生的学习兴趣, 同时由于理论困难也容易扼杀学生的应用创新兴趣。

*基金项目: 教育部产学研合作协同育人项目: 河南大学2020年度校级本科教学改革研究与实践项目。

3. 院校经费有限

由于很多高校经费有限,没有相关的课程实验硬件设备,且即使有,后续维护等也很困难。因此,除了期末成绩,学生很难体会到学习这门课的成就感以及应用价值,进一步导致培养学生应用于解决复杂问题的实践能力以及综合创新能力更无从谈起。

由此可见,当前,该课程存在的问题直接导致我们高校无法培养出创新型卓越工程科技人才。因此,作者借鉴成果导向教育模式的基本思想,围绕人工智能时代下新工科专业人才培养要求,面对传统课程教学中存在的问题,从成果导向、实验配置及实验报告的延伸与拓展、综合案例探究、国际学术前沿等角度,为学生创造“自学->互学->群学->创新”的学习环境和氛围,建立平时成绩、实验成绩(创意)、期末考试成绩等多种主客观综合成绩考核激励机制,多角度分析以及评价学习效果,以学生为主,引导创新,因材施教,实时了解学生学习成效、及时开展学情分析、教学调整、定点帮扶。

二、OBE驱动课程教学内容以及实验创新思路

前文提到,虽然“现代控制理论”这门课有倒立摆等硬件可用于开设的实验,但实验设备过于昂贵且维护困难,对于经费不足且没有稳定资金应用于维护的高校很难满足每个学生的实验需求,同时一些抽象内容(如高维状态空间)难以用硬件直观展示出来,也很难达到预期效果。而对于这一问题,完全可以借助仿真软件MATLAB完成。如此,我们不仅可以顺利地将“现代控制理论”中抽象的定理公式形象展示并验证,还能让学生掌握如何运用仿真工具解决在工程实践中遇到的问题;同时,即使对经费充足的院校,这些硬件实验是对定理的验证,但实验内容分散且不成体系,割裂了课程的整体性。

而在现实生活中,现代控制理论的应用实际非常广泛,尤其是很多问题都可以抽象为倒立摆的控制问题,如机器人的行走、火箭的发射、飞机的姿态控制等,而倒立摆也一直是学术界的研究热点。因此,将倒立摆系统作为一个典型的工程项目开展教、学、研具有十分重要的意义。同时,倒立摆是一个典型的不稳定系统,不仅可以用经典控制论的方法

来分析,而且也可用状态空间分析方法来建模,更可以结合相关的学术前沿,还可以鼓励学生学术创新,协助学生走进科研的殿堂,培养学生的创新能力。

团队在探索中发现,教学的关键在于激发学生的学习兴趣。因此,本文借鉴OBE模式的基本思想,应用典型的工程案例“一阶倒立摆”来开展应用教学、实验研究,使学生聚焦于案例驱动式的知识的理解、应用和创新,不仅可以激发学生的学习兴趣,将学生从枯燥的理论证明解放出来,而且还可以促使学生对基础理论的形象化掌握,激发学生在实验探索过程中的兴趣,并提升其动手实践创新能力,从而进一步实现产学研三方面的结合,进而满足工程教育认证中对学生培养的新时代要求。本文的教学实验创新安排见表1所列。从表1可见,在学习到状态空间表达式和不同模型转换的时候,可以使用MATLAB中的ss2tf()、tf2ss()、ss2ss()等函数实现,后续所有的教学内容都可以通过相应的函数实现,而且不依赖于传统实验器材的限制,不仅教学内容与实验内容形成了一体化,同时将实验内容与实验设计的创新也结合到了一起。比如。在状态空间表达式及模型转换部分,可以考虑带有相关约束的非线性特性;而在系统分析与综合部分,可以尝试采用当前先进的LQR控制、神经网络控制、滑膜控制等实现并改进。

从表1可以看出,MATLAB与“现代控制理论”的教学紧密结合,并以“一阶倒立摆”工程项目控制问题作为教学背景贯穿在课程的学习过程中,不仅能够提高学生对课程整体的把握,而且还能通过实验设计的内容提高学生的创新能力。

三、一阶倒立摆系统机理建模

倒立摆系统是一个典型的线性不稳定系统,使用现代控制理论的方法对倒立摆系统进行分析非常合适。一阶倒立摆的模型如图1所示。假设倒立摆的质量为 m ,倒立摆运载小车的质量为 M ,倒立摆摆杆的长度为 l ,倒立摆系统在电机的拖动下运动,水平控制力为 F ,摆杆的位移为 x ,小车的速度为 \dot{x} ,摆杆与竖直方向上的夹角为 θ , $\dot{\theta}$ 为摆杆的角速度。倒立摆控制系统的控制目标是小车在水平运动的过程中,让摆杆保持竖直。分析倒立摆的运动受力机理,可建立该系统的

表1 OBE驱动的“现代控制理论”实验安排

| 课本知识点 | MATLAB中的相关函数 | 倒立摆控制设计内容 |
|--------------|--------------------------|--------------|
| 状态空间表达式及模型转换 | ss2tf()、tf2ss()、ss2ss()等 | 数学建模以及与经典控制 |
| 状态空间模型的求解 | ss()、expm()、lsim()等 | 矩阵指数函数以及模型求解 |
| 系统能控/能观性分析 | ctrb()、obsv()、rank()等 | 能观性/能控性、最小实现 |
| 李氏稳定性定理 | eig()、lyap()、dlyap()等 | 正定矩阵及稳定性验证 |
| 系统分析与综合 | acker()、place()、lqr()等 | 状态反馈及观测器设计 |

经典控制论中的数学模型图1。

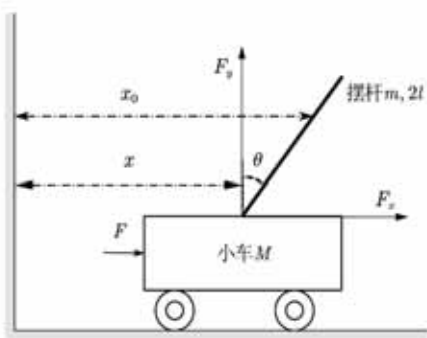


图1 一阶倒立摆模型

倒立摆的偏角平衡控制为:

$$\ddot{\theta} = \frac{-mlb}{I(m+M)+Mml^2} \dot{x} + \frac{mgl(M+m)}{I(m+M)+Mml^2} \theta + \frac{-ml}{I(m+M)+Mml^2} u \quad (3.1)$$

倒立摆的位移平衡方程为:

$$\ddot{x} = \frac{-(I+ml^2)b}{I(m+M)+Mml^2} \dot{x} + \frac{m^2gl^2}{I(m+M)+Mml^2} \theta + \frac{I+ml^2}{I(m+M)+Mml^2} u \quad (3.2)$$

在上式中 $I = \frac{1}{12}mL^2, l = \frac{1}{2}L$

利用状态空间描述方法,可搭建起现代控制论的模型,故系统的状态空间完整表达式为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(I+ml^2)b}{I(m+M)+Mml^2} & \frac{m^2gl^2}{I(m+M)+Mml^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mlb}{I(m+M)+Mml^2} & \frac{mgl(M+m)}{I(m+M)+Mml^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I+ml^2}{I(m+M)+Mml^2} \\ 0 \\ \frac{-ml}{I(m+M)+Mml^2} \end{bmatrix} u \\ y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3.3)$$

式(3.3)中的相关常量参数见表2所列,带入系统的状态空间描述即可得到系统具体的状态空间表达式,并可实现各种数学模型的互相转换,为后续各章节的实验内容奠定坚实的基础。

四、一级倒立摆系统仿真

状态空间模型建立之后,即可开展MATLAB仿真,在SIMULINK中搭建系统的仿真模型,并开展各章节实验,如在综合实验中可选择使用极点配置方法。极点配置法是指系统的闭环极点配置到希望的极点位置上,从而获得良好的系统性能指标的一种方法。当然倒立摆的控制方法还有很多,选取极点配置法只是起到抛砖引玉的作用,将何种控制算法引入本科教学中,仍需要授课教师按需选择。经过分析,设期望极点为 $[-1 \ -2]$,经过MATLAB中的place()函数求得状态反馈矩阵为 $[-9.4204 \ -12.1882 \ 59.4914 \ 10.8353]$ 。

表2 一阶倒立摆系统参数

| 符号 | 物理含义 | 具体参数数值 | 单位 |
|----|--------|--------|----|
| | 小车质量 | 0.5 | |
| | 摆杆质量 | 0.5 | |
| | 摆杆长度 | 0.3 | |
| | 摩擦因素 | 0.1 | — |
| | 摆杆转动惯量 | 0.006 | |
| | 重力加速度 | 9.8 | |

通过观察一阶倒立摆系统摆杆偏角和小车位移的变化曲线,可以非常直观地观察倒立摆系统的摆杆运动幅度是一个很小的范围,并可以在短时间内趋于稳定,而且小车的位移在经过一个较小范围的调整后也趋于一个固定值,摆杆摆角经过2秒的时间调整后摆杆角度便趋于稳定,小车用时3秒停了下来,保持静止。由此可见,系统的迅速性是可以保证的,满足系统快速性的要求。

五、多种考核评价机制

纯粹的闭卷考核自然驱动学生重视定理公式的僵化记忆和推导,合理的考评机制可更加有效地提升学生学习课程的方法和导向。为此,我们采用闭卷考试(50%)+课堂表现及考勤(10%)+课后作业(10%+5%)+实验(20%+5%)的综合考评方案。其中,课后作业以及实验各增加了5%的程序实现以及创新加分激励政策。这将直接驱使学生不断锻炼自己解决复杂问题的能力。

结语

本文根据现代控制理论的教学现状,提出将一阶倒立摆引入整个课程的教学以及实验中,并提出了一种综合的考评机制。这不仅可提升学生的学习兴趣,而且也培养了学生独立解决问题的能力,丰富工程实践经验,让学生在实践中加深对知识点的理解,还可以在不需要任何实验器材的情况下,充分地提高分析与解决复杂问题的能力。

参考文献

- [1]尹盼晓. 直线一级倒立摆系统研究[D].泰安:山东农业大学, 2015.
- [2]郑舒人. 一阶直线倒立摆平衡控制研究[D].大连:大连理工大学, 2014.
- [3]祝洁. 直线一级倒立摆的起摆及稳摆的智能控制[D].济南:山东大学, 2009.
- [4]韩娜妮,郑耐琴,徐秀妮. 基于Matlab的现代控制理论教学改革研究[J].甘肃科技, 2020, 36(10): 66-68.