

学为中心、构建脉络、体味经典

——工科研究生控制类专业课程教学模式初探

许雲淞，窦峰山，龙志强

(国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 工科研究生控制类课程建设应“以学为中心”，将授课理念由单纯的使学员“知如何”向“知为何”转变。在此理念下，借鉴 BOPPPS 教学模型和工科教育历史悠久国家相关课程的授课模式，探索了“2+1”授课模式，并利用启发式板书和互动式编程切实提高学员学习体验。通过分层级设置知识模块、引入学科前沿、体味学科经典文籍，实现内容向“高阶性”与“挑战度”的过渡，并帮助学员构建学科脉络。课程建设中突出形成性考核，有效引导学员自主学习，培养其主动探索知识的习惯。通过上述课程建设，探索了学员控制系统分析设计综合能力的培养模式。

关键词: 研究生课程；“2+1”授课模式；以学为中心

中图分类号: G642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-8874 (2023) 02-0105-05

Centering on Learning, Setting up the Big Picture, Exploring the Classic: Teaching Practice of the Graduate Specialized Course in Control System Engineering

XU Yun-song, DOU Feng-shan, LONG Zhi-qiang

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: It is suggested, during the “learning-centered” curriculum development in graduate specialized courses of control system engineering, that efforts should be placed on know “why” other than on know “how”. The “2 + 1” - organized class was proposed on the basis of the BOPPPS teaching model and the organization of class adopted in countries with a long history of engineering education. By conducting the inspiring blackboard-writing and interactive programming, students’ learning experience was effectively improving. To help the students set up the big picture of the discipline, the key points of the course were categorized into different levels, the state-of-the-art were introduced, and the classics were explored. It also made the specialized knowledge more advanced and more challenging. Formative assessment was highlighted in course construction in order to effectively guide students to learn independently and to cultivate their habit of actively exploring knowledge. This teaching practice is an exploration of the cultivation model which helps to enhance graduate students’ ability of control system analysis and design.

Key words: graduate course; “2+1”-organized class; learning-centered teaching

一、引言

2017 年以来,教育部大力推进“面向产业、面向世界、面向未来”的新工科建设,以培育优秀工程人才。如何在新工科建设背景下开展教学内容和教学模式的探索与改革,培养学员创新意识,增强学员学习能力,成为当前进行教学活动的基本要求^[1-2]。工科类部分学员在其研究生阶段的科研活动中,往往会用到控制学科其他领域的知识,如鲁棒控制、非线性控制等。对于控制专业研究生而言,针对上述领域,有专门的专业课程进行深入全面的讲解,每一门课程学时均较长;而对于工科大类学员而言,大部分人并不从事专业的控制理论与控制工程研究。如何在学时有限的研究生教学活动中,为这类学员介绍控制学科中常见的方向及其基本思想和经典方法,以工程应用为导向,加强其对控制学科脉络和重点知识的了解,以便于学员在未来的科研和实践中能够快速进入一个领域进行更深入的研究,成为值得探索的问题。因此,本文总结了新工科建设背景下笔者在教学实践中开展的新型授课模式和授课内容设置的探索。

二、“知如何”到“知为何”,转变讲授理念

在控制类专业核心课程的教学中,经常出现的情况是教学囿于概念的讲解和方法的使用,而缺少对方法背景和为何使用相关方法的讲解。在这种情况下,学员往往出现死记硬背公式和方法的情况,待课程结束后,会查阅和计算公式,但不知为何如此;或者甚少了解方法提出的背景,最终导致其应用能力薄弱且缺乏触类旁通的能力。

控制学科的发展得益于数学工具的发展,因而控制学科发展中提出的一些系统分析设计工具(如赫尔维茨判据、奈奎斯特判据等),由于其使用了不同数学工具而呈现出不同的特征。若单独从控制学科讲解系统分析工具,学员接受度不高,且难以明白“为何”如此,最终停留在会计算和知其然的阶段。因此,在此类概念和方法的讲授过程中,要结合其产生的背景和所依赖的数学工具的特点,着力讲好“为何”如此。

为此,我们在讲解时并不直接分析概念以及

基于此的公式推导/计算,而是通过概念和方法提出的背景来阐释“为何”会提出这样的方法、“为何”方法具有这样的特点。例如,在讲解赫尔维茨判据时,从赫尔维茨推导出“如何判断一般多项式具有负根”这一数学背景展开,引申到“多项式为系统的特征多项式”这一控制中的特殊情况,进而得到系统稳定性的判据,从而使学员明了“为何”使用赫尔维茨判据判断稳定性,并进一步发散到在任何涉及判断多项式负根的场景,都可以用赫尔维茨判据,而并不局限于控制系统。通过这样的方式,学员的思路被打开,也就了解了“为何”。再比如,在讲解奈奎斯特稳定性判据时,并不直接讲解如何使用该判据,而是先从辐角原理这一数学工具讲授,并演示闭曲线旋转圈数、方向和一般多项式在曲线内零极点个数的关系。待学员领会到该数学工具的特点之后,再引导其利用分析开环传递函数,从而使得学员了解了奈奎斯特稳定性判据为何具有相关特点及其数学形式,在应用中不会再出现排斥感。上述讲授方式使学员乐于将学到的数学工具应用至控制系统分析设计工具的推导中来,学员课堂参与度高。

三、“2+1”授课模式,即时巩固知识

控制类课程理论性较强,针对这一特点,一些学者提出了“理论—案例—讨论”的教学模式^[3],围绕工程案例引导学员参与,这样的模式在工科类课程教学中调动了学员的积极思考。受限于本科课程单次授课学时(2学时/次),此类教学往往以习题/实验微视频等,辅助学员进行课后巩固,并非即时且难以确保学员的完成度。

研究生专业课的知识密度大于本科课程,因此在每次授课的学时数上也做了新的探索。工科教育较悠久的德国研究生专业课程授课广泛采用3学时/次的授课长度,其中前2个学时用于(教授)理论讲授,紧跟1个学时用于(助教)习题讲解、答疑与编程演示。此方式便于学员即时巩固课堂内容、教员即时了解学员掌握情况,在教学中取得了很好的效果。

因此,本门课程综合前述三者的优势,每次授课共3学时,构成了“2+1”的授课模式。“理论—案例/讨论”置于前2个学时,混合式教学中的习题/实验微视频替代为现场演示,置于第3个

学时,第3个学时围绕前2个学时进行内容设计。按照BOPPPS模型进行3个学时之间的教学任务分配:前2个学时进行参与式教学(participatory learning),第3个学时实现学员主动式巩固,并作为一次授课的后测(post-assessment)与总结(summary)。前2个学时和第3个学时所使用的教学手段有明显区分,下文将具体介绍。

四、师生共导,营造沉浸式学习体验

在“2+1”授课模式的实施中,我们注重启发式板书和互动式编程。两者的核心思想在于使学员感受到在与教员共同完成一项任务,从而提高其体验度和沉浸感。

(一) 启发式板书

随着信息化教学手段的使用,授课过程越来越依赖于PPT、动画、视频等形式,板书所占权重越来越小,甚至经常出现一堂课结束后板书空白的现象。

首先,授课有别于学术报告,学员与教师不具备同一知识基础,并非仅需介绍思路,尚需阐释关键概念和环节。而当前常常出现的情况是,教员将所有公式置于PPT,并在授课时按部就班列出。如此并不利于学员参与,也难以建立学员对于教员的知识信任感,且对于记笔记或梳理思路的同学,以PPT列出公式的形式也不利于学员即时掌握公式。

其次,一些教师在研究生课堂教学中一味追求知识形象化,使用了大量动画和类比,缺乏数学描述和严肃的数学讲解。此类方式适合本科或概论课教学,是否适合研究生专业核心课教学值得商榷。研究生的专业课程教学在注重思路和形象的基础上,须保持“挑战度”这一要求^[4],这里包含对其抽象思维、数理能力的挑战,需使其掌握严肃的数学工具。

此外,在以往的授课和学情调研中发现,学员控制领域常用的专业数学知识基础薄弱。我们认为,研究生学员对于其所研究或从事专业的数学知识应当熟练。通过启发式板书推导,可以使其高效掌握所研究或从事专业的数学基础,尔后能够快速且少障碍地阅读相关文献,以助力其研究,而非在课后再花费大量精力重复学习专业数学知识。

因此,在我们的授课中,启发式板书用于两

方面。一方面,PPT仅展示公式或算法的关键步骤,至于公式或算法如何得来,我们通过在黑板上脱稿推导完成。在此过程中,启发引导学员一起参与推导,同时实时确认学员是否跟上思路。如此有利于提升学员的参与度和沉浸感,提高学员的专业数学知识基础和教学效果。另一方面,在一次课结束时,利用启发式板书,调动学员一起在黑板上绘制本次课的思维导图,进行课堂内容总结。主动参与式的总结相较于直接在PPT上给出本堂总结,互动程度更高。启发式板书主要用于前2个学时。

(二) 互动式编程

控制系统仿真是学习、分析和设计控制系统的重要手段,贯穿于整个控制类专业的教学和科研中。因此,在第3学时中,使用控制系统仿真工具(如Octave GNU和Scilab)对前2个学时的理论知识进行案例仿真。这个过程,我们借鉴颇受欢迎的一些线上专业课程的讲授方式,采用互动式编程的形式,原本呈现出编程过程,而非直接呈现调试好的代码。此方式教师同学员保持节奏一致,使其感受到和教员在共同完成一项任务,进而提升其学习体验度。此外,在授课中发现,大部分学员,尤其是本科非控制类的学员控制系统仿真基础薄弱,缺乏良好的控制系统仿真素养(如怎样在脚本和框图间传递数据,如何配置模型等),互动式编程能很好地解决这个问题。在此过程中,学员掌握的不仅是前2个学时所授的知识点,还包括互动式编程中的系统仿真素养、错误调试。由于课堂仿真案例并不庞大,且教员对其很熟悉,因此不必担心偶尔的错误调试占用时间。通过该方式,学员在第3学时的参与度和对抽象知识的理解程度明显提高。例如,在H无穷控制器设计中,学员直观看到H无穷指标的大小对系统相关信号的影响,加深了其对抽象知识的理解。

启发式板书和互动式编程的共同点在于教员在授课中即时和学员共同完成一项任务,且易于使学员和教员保持在同一节奏。它们是参与式教学(participatory learning)的优秀载体,有助于为学员营造沉浸式学习体验,提高其课堂参与度和对知识点的掌握程度。

五、构建课程脉络,嵌入经典

在本门研究生课程的建设中,既要避免将其

建设成本科相关课程的简单重复，又要照顾到跨专业学员的基础，使之既能抓住学科主干，又能接触到在研究中常用的基本方法，掌握“高阶性”^[5]知识。本课程分层级设置的讲授内容如表 1 所示。

（一）构建课程脉络“地图”

我们将学科内容划分为建模、仿真、分析与设计三大模块，并以此建立了思维导图分发给学员，使其在学习过程中心中始终有课程的全局脉络“地图”、明了当前所处的“位置”，以及当前知识点和其他知识点之间的联系，避免其思维局限于授课时间顺序而对于知识点存在割裂和线性的印象。

（二）以系统设计能力为输出构建“高阶性”

表 1 中知识单元分三个层级（基础、进阶、前沿）。在基础层级，删去了能使用计算机软件计算的知识点，增加控制系统应用和设计的讨论，避免与本科课程内容重复，打造课程“高阶性”^[6]。例如，不再讲解信号流程图、手绘根轨迹，而替代为根据软件给出的根轨迹进行系统设计，同时延拓本科课程中的输入输出稳定性概念至内稳定性，深入讲解频域设计中的控制系统设计约束（如 Bode 积分定理）。如此设置，既使得本科具有专业基础的同学能从另一个层面了解既有知识，又使得本科非控制专业的学员能从应用层面直接掌握主干内容，了解控制系统设计约束，从而高效开展工程设计。进阶层级为学员从事相关研究和进行工程实践提供基础，其囊括了应用中常见的滤波、对不确定性和非线性的处理，并引入了镇定控制器参数化等国内课程中介绍较少但对从事系统设计和研究十分重要的知识点。前沿层级结合学院“智能”特色而设置，选取授课时期的相应热点作为授课模块，讲解最新学术研究成果，并指导学员实现相关算法。前沿层级的内容设置并不固定，需阶段性更新。

（三）以经典培养品味

研究生阶段的专业课程学习，一个重要的方面在于“读经典”。通过经典了解问题和方法提出的背景，通过不同知名学者对同一问题的不同视角加深对同一问题的全面理解，同时通过阅读经典有意识地培养学员从“第一手”资料获得知识的习惯，以及未来对于相关研究工作的评判和思辨能力。为此，我们在介绍每个知识模块时均会推荐经典文献和经典书籍的章节。例如，冈瑟·

斯坦因（Gunter Stein）、弗朗西斯（B. A. Francis）、多伊尔（J. C. Doyle）、富兰克林（G. F. Franklin）、古德温（G. C. Goodwin）、周克敏（Kemin Zhou）、维迪亚萨格（M. Vidyasagar）等学者的书籍章节和文章，以及 *IEEE Control Systems Magazine* 上关于经典概念和问题的阐述，并将学员阅读报告作为课程考核内容。

表 1 课程内容设置

	知识模块	主要知识点	层级
概述	1. 绪论	学科发展历史、学完本课程能干什么	基础
建模	2. 控制系统建模	机理建模、实验建模	
仿真	3. 控制系统仿真	脚本/框图仿真、参数交互、仿真结构、配置与管理、常见仿真警告/错误处理	
分析与设计	4. 线性系统分析与设计：知识单元 I、II	（内）稳定性、灵敏度与鲁棒性、Bode 积分定理、校正环节与 PID 控制器	
	5. 数字控制系统设计	间接设计法、采样周期的确定、采样数据预处理	
	6. 线性系统分析与设计：知识单元 III、IV、V	能控能观性及其内涵、二自由度与积分控制、观测器设计（扰动观测器）、基于观测器的控制器设计、线性二次型调节器及其鲁棒性能分析	进阶
	7. 最优滤波	静态系统最优状态估计（投影）、Kalman 滤波	
	8. H 无穷控制与控制器参数化方法	LMI 辅助控制器设计、镇定控制器参数化、PID 与控制器参数化、容错控制架构	
	9. 非线性系统分析与设计	稳定性分析、局部/反馈线性化	前沿
	10. 强化学习辅助控制器设计	动态规划、策略/值迭代、方法的数据驱动实现	

六、突出形成性考核，引导主动学习

本门课程的目的是提高学员的系统分析和设计能力，这难以在常规的 2 个小时内完成考核。同时，为避免学员考前突击，以及课后自学流于形式，我们突出形成性考核。

形成性考核包括：雨课堂^[7]随堂测试、课后习题、课程综合设计、文献阅读报告四个部分。其中，课程综合设计围绕给定系统，应用表 1 中知识模块 2~9 中介绍的全部方法，完成分析与设计；文献阅读报告按研读小组进行，针对经典文献，通过仿真和文档等形式呈现阅读体会，并进行汇报与分享。雨课堂随堂测试、课后习题和课程综合设计由教师评分，文献阅读报告汇报由所有学员现场打分互评。形成性考核占最终评价总比例的 60%，开放性较强，侧重对学员的主动探索和解决复杂问题的综合能力进行考核。终结性考核占比 40%，侧重对基本知识和典型方法进行考核。

七、结语

如何实现学员在控制学科学习中从“知如何”到“知为何”的转变，引导学员掌握学科脉络，强化其进行控制系统设计的能力和系统思维，是本门课程建设与探索的目的。为此，在课程建设中，围绕“以学为中心”^[8]，借鉴 BOPPPS 模型，通过实行“2+1”教学模式、采用互动式编程、构建知识脉络“地图”、以经典培养品味等方式，提高学员的参与度和营造沉浸式学习体验。突出形成性考核，压实学员课堂参与和课外主动探索学时，形成师生合力共建的效果。在实践中，学

员的参与度、对新知识的掌握程度、获得感有了明显提升。

参考文献：

[1] 钟登华. 新工科建设的内涵与行动[J]. 高等工程教育研究,2017(3):1-6.

[2] 张来线,孙华燕,郑海晶,等. 新工科理念下的军校工科专业基础课程教学改革研究:以光电信息科学与工程专业本科“物理光学”为例[J]. 高等教育研究学报, 2022,45(3):60-64.

[3] 孔庆军. 基于激发研究生的学习动力与兴趣的课程改革研究[J]. 教育教学论坛,2018(43):130-131.

[4] 吴岩. 建设中国“金课”[J]. 中国大学教学,2018(12):4-9.

[5] 吴岩. 建设中国“金课”[J]. 中国大学教学,2018(12):4-9.

[6] 吴岩. 建设中国“金课”[J]. 中国大学教学,2018(12):4-9.

[7] 李明秋,姜淑华. 新工科和工程认证背景下计算机控制系统课程线上线下混合教学模式研究[J]. 吉林省教育学院学报,2021,37(8):67-71.

[8] BARR R B, TAGG J. From teaching to learning—a new paradigm for undergraduate education [J]. Change: The magazine of higher learning,1995,27(6):12-26.

(责任编辑：毛鸽枝)

(上接第 90 页)

[2] 杜震宇,张美玲,乔芳. 理工科课程思政的教学评价原则、标准与操作策略[J]. 思想理论教育,2020(7):70-74.

[3] 孙跃东,曹海艳,袁馨怡. 理工科课程思政教学评价指标体系构建研究[J]. 江苏大学学报(社会科学版), 2021,23(6):77-88,112.

[4] 任晨晨,孙辉. 基于层次分析法的高校思政课教学评价应用研究[J]. 新疆职业大学学报,2021,29(4):24-27.

[5] 徐兰香. 基于层次分析法的高校创业教育评价体系构

建[J]. 淮南师范学院学报,2021,23(1):60-67.

[6] 曹杨敏. 用于药企环境管理绩效评价的 AHP-模糊综合评价法模型构建与应用研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2019:17-35.

[7] 刘昱青,李春慧,林星辛,等. 基于 AHP-模糊综合评价法的水资源评价研究[J]. 水利规划与设计,2017(2):56-61.

(责任编辑：毛鸽枝)