



控制类专业基础课虚拟实验的建设及应用

王玲玲, 梁 勇, 王 宏
(海军航空大学 三院, 烟台 264000)

摘要: 针对专业基础课程教学中存在的理论教学与装备案例结合度难以把握、现有实验方案难以建立理论与实际的关联、实验教学评价单一等问题, 从自动控制原理课内实验着手, 按照“直观引入—逐层递进—高阶综合”的思路, 依据建构主义原则, 建设了一套以导弹控制为案例背景的自动控制原理虚拟实验系统, 实现了以虚拟孵化工程实践能力的培养过程。将该套实验系统应用到教学实践中, 并通过调查分析可知, 学生能通过对装备实例的研究, 充分理解并熟练运用控制理论在装备中的应用技术, 为后续导弹控制系统原理等专业课程提供了预先的研究基础, 更好地培养了学生理论至实践的转化能力。该系统的建设和应用对这一类专业基础课程虚拟实验的建设具有较好的参考价值。

关键词: 专业基础课; 虚拟仿真; 自动控制原理; 导弹控制; 案例库
中图分类号: TP13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.12179/1672-4550.20240075

Construction and Application of Virtual Experiments for Professional Background Courses of Control Majors

WANG Lingling, LIANG Yong, WANG Hong
(The Third College, Naval Aviation University, Yantai 264000, China)

Abstract: In order to solve the problems in teaching of professional background courses, such as difficulty in grasping the integration of theoretical teaching and equipment cases, difficulty in establishing the correlation between theory and practice in existing experimental plans, and singularity in evaluating the effectiveness of experimental teaching, a virtual experimental system for automatic control principles with missile control as a case background is constructed. The design concept of this virtual experimental system is based on the course of “Automatic Control Principles”, which applies the principle of constructivism and follows the idea of “intuitive introduction, layer by layer progressive, high-order synthesis”. It realizes the process of cultivating practical engineering skills through virtual experiments. By applying this experimental system to teaching practice, students are able to fully understand and proficiently apply the application technology of control theory in equipment installation through the study of equipment examples, which better cultivates their ability to transform theory into practice. The construction and application of this system have good reference value for the construction of virtual experiments in this type of professional background courses.

Key words: professional background courses; virtual simulation; automatic control principles; missile control; case library

在教育信息化技术与教学内容深度融合的今天, 课程的信息资源建设已经成为众多课程建设中重要的一环^[1-2]。与课堂理论教学的信息程度相比, 实践教学由于受到物理条件、资源成本、实验需求的影响, 其信息化的广度和深度远远不及前者。同时, 对于很多既具有理论性, 又同时具有工程特点的课程来说, 如何将理论在实

践中的应用完美地呈现给学生, 是该类课程的教育工作者孜孜不倦研究的课题之一^[3-5]。因此, 如何突破实践教学信息化壁垒, 实现理论与实践相融合, 是当前此类相关课程亟须解决的难点之一。

首先, 在实践教学的信息化建设中, 目前在国家虚拟仿真实验教学平台上, 已经面向全国用

收稿日期: 2024-02-26

基金项目: 海军航空大学教育训练理论研究课题(2022年)。

作者简介: 王玲玲, 硕士, 副教授, 主要从事教育理论与虚拟实验室建设方面的研究。E-mail: lingling0711@163.com

户开设了包含虚仿课、线上实验课、混合实验课共计 11 196 期次的实验课程(2023 年 4 月统计)。然而,从目前的建设内容来看,多数比较偏向专业课程^[6-11],如文献[7]针对轮机工程专业的船舶柴油机拆装课程,文献[8]针对弹药工程与爆炸技术专业的弹药类课程,文献[10]针对古生物学学科。而对于专业基础类实验课程的建设研究偏少,其理论至实践的转化应用不那么明显。以自动控制原理课程为例,很少有基于同一案例进行深度的三性及 3 种分析方法的建设研究。如国防科技大学开发的航空制导弹药系统虚拟仿真实验,以某型导弹为研究对象,通过原理认知和学习,从导弹制导控制的角度逐步完成姿态控制律设计和导引律设计;空军工程大学开发的察打一体型无人机自主飞行控制虚拟仿真实验教学项目,以无人机为研究对象,从飞行控制的角度逐步设计并完成姿态控制、航向控制等。

其次,在专业基础课目前通用的实验体系中,为了将理论与实践相融合,比较常用的做法是在理论课堂上通过案例法突出理论的应用特点,并通过实验加强理论在实践中的认知以及培养其工程创新能力。但在实际教学时,由于各种客观原因的存在,由感性到理论,由理论至实践,由实践加深理论的过程仍存在一定不足。主要表现在以下 3 个方面。

1) 理论教学与装备案例的结合度难以把握。应用背景讲得多,会涉及很多专业的装备理论知识,如研究飞控案例时,会涉及空气动力学、导弹飞行力学等。学生会觉得这些知识太难,无从切入,从而失去了学习兴趣;反之,应用背景讲得太少,就完全成了一块“背景板”,一样的模型换个“背景板”又是一个案例,失去了应有的专业特色。

2) 现有各类实验方案,无论是用仿真研究还是实际实验设备,都各有利弊,整体效益尚未完全发挥。虽然在具体操作时会根据优缺点组合使用各种实验方案,这样可以具有一定的互补作用,但实际上不同的实验类型其实验对象已经发生了变化,这让学生很难在一个对象上进行深入研究,缺乏知识的连贯性和系统性。而且目前多数实验设备和装备联系不够紧密,且实验效益是否能够充分发挥受场地大小、设备数量以及实验安排时间影响较大。

3) 实验教学效果的评价较为单一。目前对学生实验成绩的评价主要依据实验报告,缺少与教学目标紧密结合的量化标准和过程性评价。这样会导致学生只重视结果而忽视过程,从而使其极力回避实验中出现的问題,更有甚者更改实验结果或拼凑实验数据,不利于学生科学素质的培养。

因此,依据上述背景分析,针对目前现阶段的教学需求,迫切需要结合新的实验技术,开展基于某一具有专业特色的装备虚拟实验系统建设和评价研究。课题调研了军地高校相关装备虚拟实验课程,发现通过装备对象的分层化研究,能够使學生逐步建立起模型与实物的直观联系,有助于学生更深层次地理解和掌握相关装备。如前文提到的国防科技大学的航空制导弹药系统虚拟仿真实验、空军工程大学开发的察打一体型无人机自主飞行控制虚拟仿真实验教学项目等。

信息化的融入能使之满足不同的实验需求,开展多样化的实验教学模式。本文以自动控制原理课程的实验教学为例,针对如何将理论教学的抽象图形与实践教学中的具体效果相结合,从实验体系、案例库、进程、架构、评价体系逐一设计,建立起一整套基于导弹控制的自动控制原理虚拟实验系统。同时在实际应用中,注重与课堂理论教学部分进行深度融合,最终实现由理论教学至实践教学的完美衔接。

1 实验内容体系设计

目前,自动控制原理(经典部分)的课内实验一般由 5 个实验组成,如表 1 所示。

表 1 自动控制原理(经典部分)的课内实验

序号	实验名称	开设时期
实验1	典型环节的数学模型	第二章(传递函数)后
实验2	线性系统的时域分析	第三章(时域分析法)后
实验3	根轨迹绘制与稳定性分析	第四章(根轨迹分析法)后
实验4	频率特性曲线绘制与稳定裕度分析	第五章(频域分析法)后
实验5	PID控制仿真	第六章(校正)后

该课程的实验更强调理论模型和实物之间的关联,强调能够从时域分析法、根轨迹分析法、频域分析法这 3 种角度上对系统进行分析 and 设

计, 能够采用至少一种控制算法对实际控制系统进行改善。

在实验教学设计中, 要突出理论联系实际, 就需要对某一工程案例能够做到相对深入的研究, 能够使课上所学理论知识在实验课上的工程案例中清晰地展现出来^[6]。在常规的课内实验中, 通常会选择一个工程案例, 可以完成实验 1、实验 2 和实验 5, 目前实验空间上绝大多数此类虚拟仿真课程也是这样的做法。因为实验 3、实验 4 实际是不同分析方法的体现, 其复杂性使得如果沿用同一个控制案例并不能获得较好的实验效果。但是, 如果在一个课内实验中采用多个工程案例, 必然会使研究不够深入, 工程性不强, 造成走马观花的效果。

因此考虑将实验内容与具有多层控制回路的

研究对象相结合, 使得整个实验过程既做到统一, 又能各自相对独立, 同时从内至外的嵌套回路可以使实验过程实现分层化、递进式设计, 使得实验内容呈现较好的高阶性、创新性和挑战度。而在众多的控制对象中, 结合学校专业培养特色, 最终选用导弹这一飞行器作为控制实验的研究对象。

导弹作为复杂的系统, 其本身涵盖了多种控制回路, 满足上述具有多层控制回路的研究方向, 有制导控制回路、高度控制回路等。为了使案例的研究内容难度适中, 不至于使用过高难度的案例而影响对课内知识的理解, 结合往期课堂教学反馈中学生对案例复杂度的适配性, 选用导弹姿态控制回路、高度控制回路作为主要的研究设计对象, 如图 1 所示。

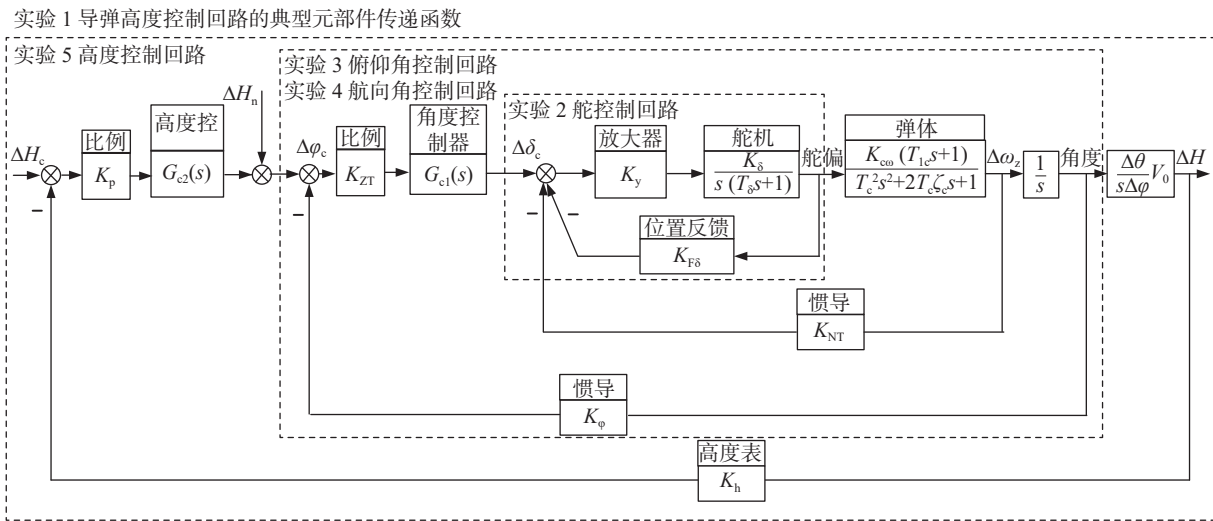


图 1 实验体系中所采用的控制回路

2 实验案例库设计

依据建构主义原则, 以理论教学实验项目体系为基础^[7], 选择导弹控制回路中合适的案例, 并加以简化, 构建起与控制理论抽象概念相关联的导弹具体部件和回路组成的案例库, 如图 2 所示。关联控制系统典型环节传递函数的导弹控制类元部件案例库, 包括运放电路、惯导系统、气压高度表、雷达高度表、液压舵机、电动舵机等 16 个案例; 关联控制系统时域分析性能指标的导弹控制回路案例库, 包括液压舵回路、电动舵回路、俯仰角稳定回路、航向角稳定回路、倾斜角稳定回路和高度回路等 16 个案例, 以期使实验内

容和任务尽可能地接近装备实践, 从而达到在一个致力于解决问题的实验环境中, 学生能够自主地建构自身知识的目的。

2.1 典型环节的元部件

根据实验 1 的目标, 建立模型和传递函数之间的联系, 理解建模的含义和工程意义。结合导弹控制中的元部件, 选择能够简化为比例、积分、微分的电路或元部件(如运放、惯导、放大器、高度表、舵机等)进行研究, 通过观察元部件的外观和在导弹中的位置^[8], 了解其功能; 通过给定输入信号研究响应, 认知该元部件所代表的传递函数的输入输出响应关系; 通过将元部件组合形成回路, 进行惯性、振荡等传递函数模型的研究。

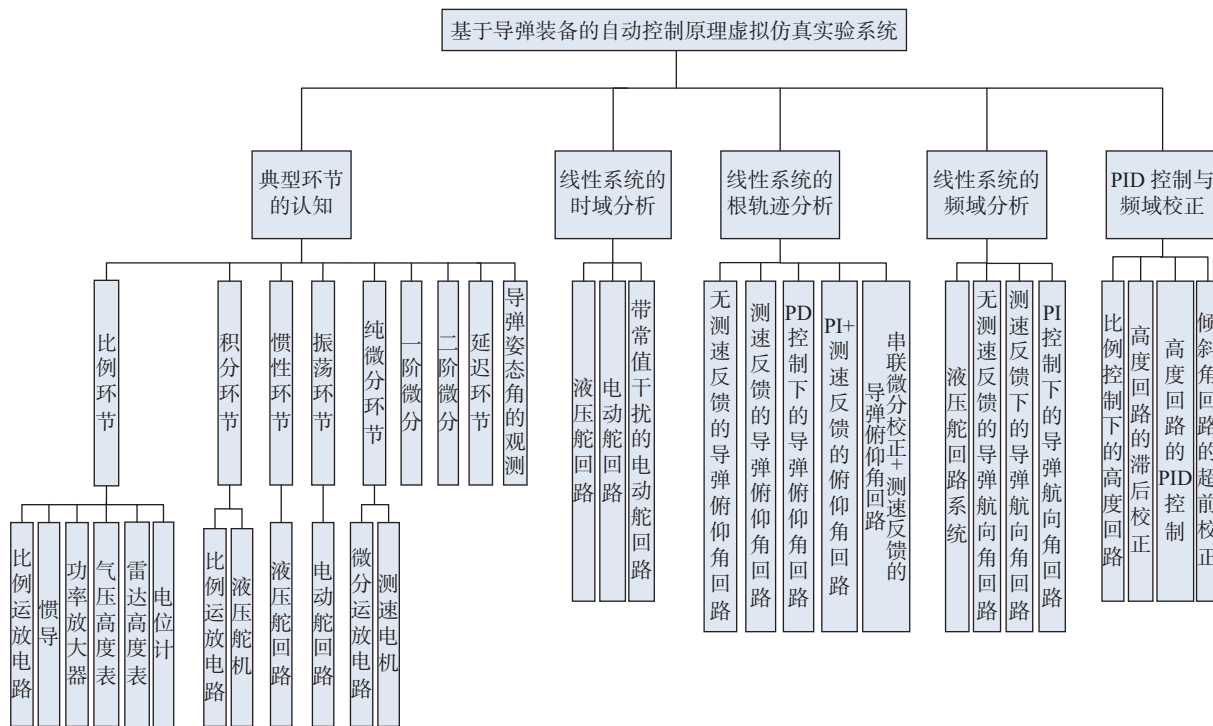


图 2 实验系统中的案例库

2.2 使用时域分析法的案例

实验 2 的目标是能够对某一控制系统的阶跃响应给出指标分析, 并对系统中参数变换时对性能有何种影响有定性的判断。结合导弹控制回路, 可以设计液压舵回路系统, 如图 1 最内层的回路所示(图中为电动舵在简化后的传递函数), 作为一阶系统来进行研究, 研究系统参数 K_y 、 K_δ 、 $K_{F\delta}$ 与惯性参数 T 之间的关系; 设计电动舵回路系统, 如图 1 最内层的回路所示, 作为二阶系统来进行研究, 研究系统参数 K_y 、 K_δ 、 $K_{F\delta}$ 、 T_δ 与阻尼比 ζ 、自然频率 ω_n 之间的关系, 同时还可以研究扰动作用下的稳态误差与动态性能之间的参数平衡问题。最终将这种响应通过虚拟实物呈现, 如舵面怎么偏转、在舵面偏转下整个导弹的姿态如何改变。

2.3 使用根轨迹分析法的案例

实验 3 的目标是能够在根轨迹下对系统进行分析设计。结合导弹控制回路, 通过以俯仰角控制回路为研究设计对象, 绘制不同算法下的根轨迹, 通过选定根轨迹上的不同位置, 进而影响阶跃响应和性能指标。通过理解不同算法下的根轨迹变化趋势以及根轨迹不同位置上的性能指标变化趋势, 选定合适的一点满足指标要求。最后将设计好的选点位置以动态参数的形式落到俯仰回

路的三维动画上, 来给出直观控制效果。

图 1 所示的中层回路为导弹俯仰角控制回路, 在实验系统中通过将所需的三维元部件放置到导弹纵剖面正确的位置上来进行搭建, 并通过调整 K_{ZT} 、 K_{NT} 、 $G_{c1}(s)$ 的取值, 研究测速反馈、PD 控制、PI 控制、串联微分对根轨迹和动态性能的影响。

2.4 使用频域分析法的案例

频域分析较之时域、复数域来说, 更抽象、更复杂, 也是学生很难理解的一种方法。因此案例和实验的设计以理解奈奎斯特图、伯德图的工程意义为主, 并能够使用频域指标简单分析系统性能。

1) 针对频域图形的工程意义

在虚拟实验界面中, 选择三维液压舵机、电位计、功率放大器、比较元件、示波器、信号源, 搭建图 1 内层回路所示的舵回路, 用信号线将元件依次连接。此时信号给出的是正弦输入 $\Delta\delta_c = A \sin \omega t$ 。调整 ω , 观察输出随 ω 的变化规律。

记录 10 组不同 ω 下的幅值和相位, 依次算出幅值比 $|\Delta\delta_{z_s}|/|\Delta\delta_c|$ 、相角差 $\angle\Delta\delta_{z_s} - \angle\Delta\delta_c$; 通过幅值比和相角差的数据绘制奈奎斯特图以及伯德图, 从而理解频率特性的工程意义。

2) 针对频域指标的分析

将图 1 中的弹体传递函数换成航向角速度与舵偏的传递关系，就可以研究导弹航向角回路。同样通过调整 K_{ZT} 、 K_{NT} 、 $G_{c1}(s)$ 的取值，研究测速反馈、PI 控制下系统的奈奎斯特图和伯德图，并针对频域指标和稳定性进行分析，以及 PI 控制对航向的纠偏作用。最后仍然将设计好的系统以三维动画来直观演示导弹偏航和纠偏的效果。

2.5 使用 PID 控制算法的案例

实验 5 的目标是针对 PID 控制算法进行一次完整的控制系统的分析和设计，因此设计将姿态回路扩大到弹体的高度回路，通过 PID 算法在高度回路中的应用，形成控制系统设计的渐进性和高阶性，并以三维动画直观展示不同 PID 参数对导弹掠海飞行中高度控制的影响。

高度控制回路如图 1 所示。选择舵回路子系统、惯导、综控机、高度表等元部件放入导弹剖面中的正确位置，以搭建高度回路；选择不同的 K_p 、 $G_{c2}(s)$ ，研究比例、滞后、PID 控制下的高度回路。其中舵机环节在该实验中可以任

选电动舵或者液压舵。在俯仰角回路中， $G_{c1}(s)$ 可以采用实验 3 中的控制算法。舵回路参数 K_y 、 $K_{F\delta}$ 、 K_{δ} ，俯仰回路控制参数 K_{ZT} 、 K_{φ} 以及 $G_{c1}(s)$ 中的参数可以使用实验 2 和实验 3 中学生调整好的参数。

3 实验进程和关联度的设计

根据上述案例库的设计，实验体系共分 5 个实验 25 个子实验，涵盖导弹元部件、舵回路、姿态回路、高度回路。实验以闯关模式进行，并依次由元部件至内环再到外环的方式，实现由基础到提高、由简单到复杂的实验设计流程，满足“两性一度”的设计要求。具体实验进程及关联度如图 3 所示。

从图中可以看出，进入实验选择界面后，5 个实验本身没有优先级关系，任选一个实验都可以进入。5 个实验内部分为基础模式、进阶模式和高阶模式，每个模式只有完成相应的实验步骤及其要求，才能进入下一级实验。

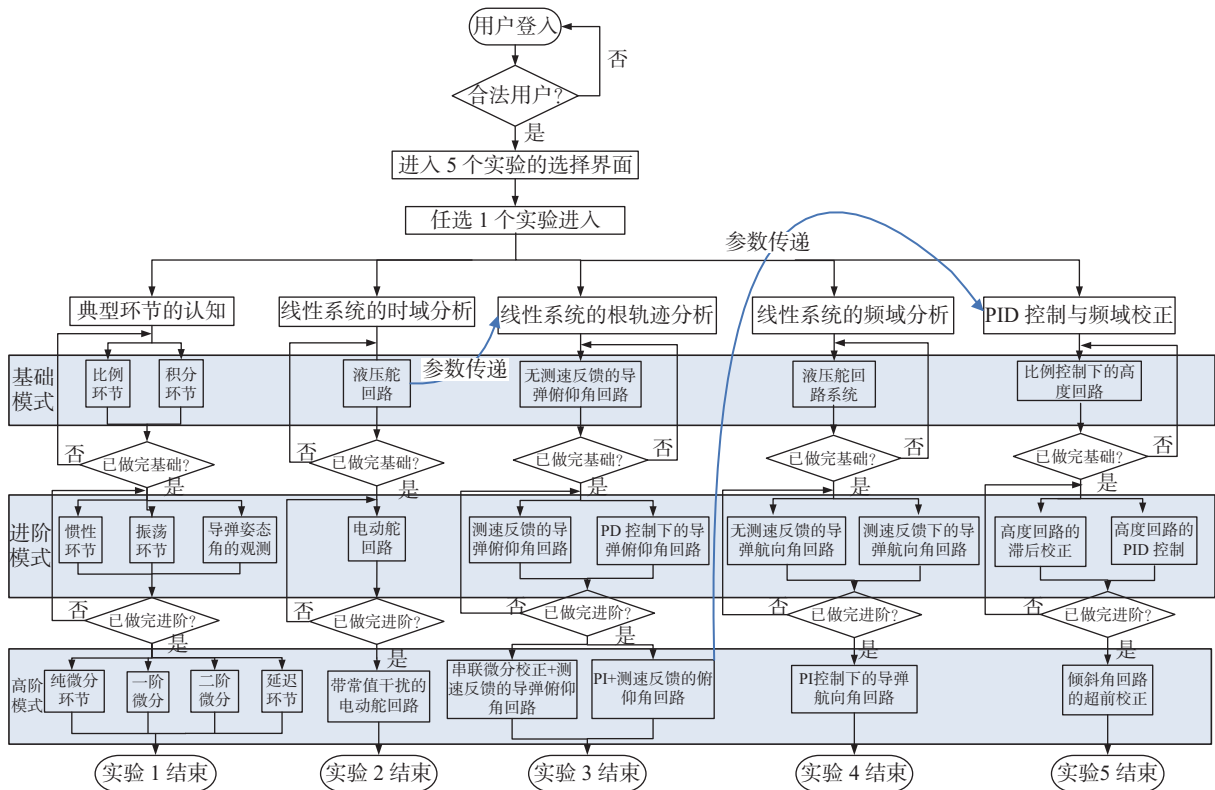


图 3 实验进程和关联度关系图

尽管初始都可以进入 5 个实验，但实验彼此之间存在关联度设计，这与实验案例设计里的回路控制相一致，即推荐从内回路开始设计，依次

由舵回路、俯仰角回路到高度回路才能更方便、有序地进行实验。从图中可以看出，实验 2 中的舵回路设计参数会传递给实验 3 的俯仰角控制回

路,而实验3的俯仰角控制回路参数又会传递给实验5的高度控制回路。如果用户一开始没有经过实验2和实验3就开始实验5的设计,那么将会同时调3个回路的参数,设计难度很大。

4 实验系统架构设计

根据实验项目和案例设计要求,开展实验系统架构设计。考虑需要安全性较高、不容易受到他人网络入侵且相对封闭的网络使用环境,系统采用C/S架构,即设计客户端应用软件安装至客户端电脑上。这样的架构既可以满足互联网使用,也可以在局域网内使用。采用C/S架构,具备Web端管理功能。教师可登录Web端进行实验管理,查看学生学习记录、实验成绩、实验报告以及开展虚拟环境场景下的虚拟仿真教学等;学生可登录Web端进行个人信息管理、各项学习训练和测评,提交实验报告和查看个人实验成绩等。

应用软件中,使用3d Max进行虚拟场景^[12]、导弹及元部件建模,实现关键部件的三维展示和组合;采用Unity3D完成三维元部件的交互和动作^[8-11];前端通过搭建结构图实现可视化编程,通过框图与三维模型建立链接关系。底层采用MATLAB的m语言,后台通过云服务器进行可视化模拟计算。

5 实验评价体系设计

实验评价体系采用“过程评价与结果评价相结合、技能评价和素养评价相结合、教师评价与学生互评相结合”的方式,设计实验评价体系,增设实验准备评价环节。对每个实验,提前在实验系统Web端发布实验指导手册、课程PPT、实验操作指导视频等参考资料,预留预习问题,学生按照预习要求进行预习,提交预习报告;发挥Web实验优势,根据操作时间、试错次数、关键步骤等自动完成对实验操作过程的技能评价;根据课程目标,将每个实验设计分为基本任务和进阶任务。针对进阶任务和综合性设计性实验,采取教师评价与学生互评相结合的方式进行。重点关注项目设计思路、设计过程、成果分析与展示及整个实验项目过程中小组成员的综合表现,实现整体素养评价^[13-15]。

实验评分注重形成性过程,既考虑实验步骤得分,同时考虑结果是否满足指标要求得分,并能够由实验结果进行的分析和讨论,产生发散性

的科研思维。

每个实验设计分为基本任务、进阶任务和高阶任务,满分为100分,完成基本任务可以得0~45分,完成进阶任务可以得0~90分,完成高阶任务可以得0~100分。5次实验所得平均分折合10%算入本门课程的平时成绩之一。

6 实验系统功能界面

6.1 主界面

主界面包括典型环节认知、线性系统的时域分析、线性系统的跟轨迹分析、线性系统的频域分析、PID控制与频域校正共5个实验入口,如图4所示。



图4 实验入口界面

6.2 实验1~实验5的设计

在图2中,点击按钮,可进入对应的实验1~实验5,如图5~图9所示。在每个实验中,可以选择下拉菜单,在完成必要的闯关要求后,进入各子实验环节。

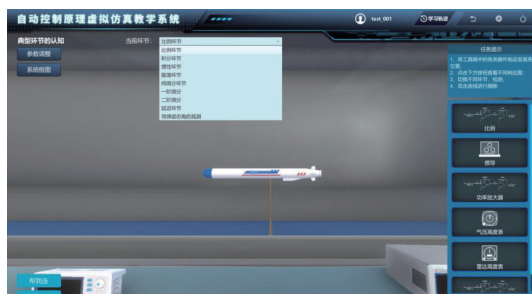


图5 实验1界面



图6 实验2界面



图 7 实验 3 界面

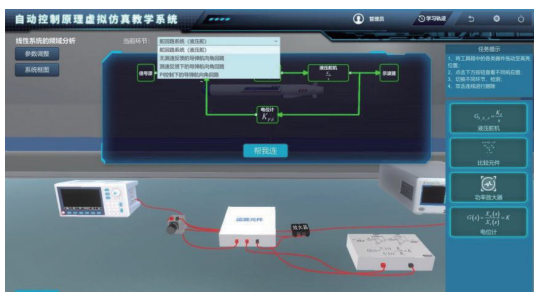


图 8 实验 4 界面



图 9 实验 5 界面

7 虚拟实验系统教学应用分析

以导弹这一飞行器作为研究对象来实践控制理论的应用，其过程有一定的难度。因为导弹本身是一个特别复杂的被控对象，属于非线性变参多变量控制系统，对其研究也涉及多个课程的知识，如导弹飞行力学、导弹控制系统原理、飞行器控制、空气动力学等。因此想要让这个对象更好地服务于自动控制原理的教学，需要在对对象进行合理简化的基础上，通过一定方式的教学设计和安排，让学生能够顺利地接受案例所具备的最基本的基础知识，再开展控制理论的实践和应用。

7.1 高契合度的课堂与实验之间的交叉教学

实验课程中有大量的案例，如课题所研究的系统就有 32 个相对独立的案例，它本身就可以为

课堂理论授课提供案例资源库。同时通过上述分析，自动控制与飞行器控制本身有很多的契合点。如果将课堂授课内容与实验授课内容交叉进行，而不是完全割裂，即课堂授课以部分实验案例进行理论原理分析，而实验授课则对该理论分析的结论进行验证，从而让这二者之间的教学产生极大的关联度，使理论分析有了具象的体现，不会由于复杂案例的使用而对控制理论的理解产生障碍，同时更能深入理解控制理论在装备实践中的应用。

7.2 充分利用混合式教学模式

对复杂案例的融合、渗透、拓展可以充分借助混合教学模式。混合式教学更强调自主学习，这对于案例背景的了解、应用的拓展大有裨益^[16-17]。

如实验 1 主要是对导弹控制系统中的元部件、传递函数、导弹姿态角等知识加以认知，是案例应用所必备的学科基础知识。这部分内容的延伸度很广，来源也比较多样化，可以在第一次课涉及自动控制系统应用的时候以课前自主学习的方式获取，并通过一些客观试题使其对自主学习的内容有提纲挈领的认知。

7.3 差异化自主式的实验模式

系统中对每个实验设计了闯关模式，可以满足不同层次的学习需求。实验中的基本任务和进阶任务覆盖了教学计划中对实验目标的要求，且进阶任务高于教学计划中的要求。系统评分的设计也注重形成性评价，即只要留下实验痕迹都可以获取相应的分数，但每一项如果想获取高分，则必须严格达到指标要求。

闯关模式和形成性的评价方式帮助学生更好地把握哪个环节做过，哪个环节做得不好，实现精准定位，学生也可以根据自身的学习需求进行自主实验。

7.4 实验教学效果分析

截至 2024 年 6 月，该实验系统目前在校内使用了 3 个学期共 7 个班次，各项功能已趋于稳定。通过闯关式的分层化实验，以及参数对控制效果的直观影响，学生普遍能够沉浸在实验系统中进行设计和调试，并能够理解控制理论与实际系统的关联。其中两个班次结课后的调查结果如图 10 所示。

< 统计结果

第1题: 本班次的实验是虚拟仿真实验, 你觉得这样的实验形式有没有帮助你理解控制系统的相关知识? [单选题]

选项	小计	比例
A. 非常有帮助, 我看见了不同参数下导弹飞行姿态的变化, 很有趣	25	80.64%
B. 一般般吧, 没什么特别的感觉	5	16.13%
C. 我不喜欢虚仿实验, 我觉得还是动手实践, 比如编程, 比如插线。	1	3.23%
本题有效填写人次	31	

饼状 圆环 柱状 条形 折线

第2题: 通过基于导弹控制的虚仿实验, 你觉得你对导弹等翼式飞行器的姿态、高度等控制回路有没有基本的了解? [单选题]

选项	小计	比例
A. 有, 正是通过这个实验我才知道了三轴控制	27	87.1%
B. 一般般吧, 反正做得也是糊里糊涂	4	12.9%
C. 我本来就知道	0	0%
本题有效填写人次	31	

饼状 圆环 柱状 条形 折线

(a) 2023年秋季某班次

< 统计结果

第1题: 本班次的实验是虚拟仿真实验, 你觉得这样的实验形式有没有帮助你理解控制系统的相关知识? [单选题]

选项	小计	比例
A. 非常有帮助, 我看见了不同参数下导弹飞行姿态的变化, 很有趣	15	100%
B. 一般般吧, 没什么特别的感觉	0	0%
C. 我不喜欢虚仿实验, 我觉得还是动手实践, 比如编程, 比如插线。	0	0%
本题有效填写人次	15	

饼状 圆环 柱状 条形 折线

第2题: 通过基于导弹控制的虚仿实验, 你觉得你对导弹等翼式飞行器的姿态、高度等控制回路有没有基本的了解? [单选题]

选项	小计	比例
A. 有, 正是通过这个实验我才知道了三轴控制	15	100%
B. 一般般吧, 反正做得也是糊里糊涂	0	0%
C. 我本来就知道	0	0%
本题有效填写人次	15	

饼状 圆环 柱状 条形 折线

(b) 2024年春季某班次

图10 课程结课后有关实验部分的调查问卷

8 结束语

论文从教学需求出发, 结合新的实验技术, 构建以导弹为被控对象, 面向自动控制原理课程实验的虚拟实验系统。通过系统中参数与结构的改变对导弹姿态和高度产生的影响, 不仅满足实验教学中对控制系统分析和设计需求, 同时能够使學生自主直观感受控制效果, 帮助其在认知领域建立起实际系统与抽象模型的联系。同时, 让学生充分理解控制理论在装备中的应用技术, 使专业基础课程教学更具岗位特色, 帮助学生更深层次地理解和掌握装备。将实验项目与具有多层控制回路的研究对象相结合, 设计由元部件至内环再到外环的相互关联的实验过程, 实现由基础到提高、由简单到复杂的分层递进认知过程, 使得实验内容呈现较好的高阶性、创新性和挑战性。

该研究解决了专业基础课中理论教学与装备案例结合度不高的问题, 以导弹这一个研究对象实现了所有经典部分的自控实验; 在实验过程中设计的评分机制、分级实验项目可以便于更好地实施个性化的精准教学。该研究的思路、方法、过程可为其他工科类专业基础课建设提供参考。

参考文献

- [1] 安传迎. 5G+VR 促进大学教学从片面沉浸化到全面沉浸化[J]. 重庆高教研究, 2021, 9(4): 59-68.
- [2] 谢峰. 5G 网络下基于虚拟现实技术沉浸式课堂教学的应用与研究[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(S1): 14-17.
- [3] 李琰, 张佳琳, 饶星, 等. 基于数字化的高校虚拟仿真实验教学平台建设与实践[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(10): 233-238.
- [4] 周正贵, 黄飞, 许美珏, 等. 信息技术虚拟仿真实实践教学资源建设研究[J]. 电子测试, 2022, 36(24): 32-34.
- [5] 占玉林, 许江辉, 何畏, 等. 智能建造虚拟仿真实验教学平台建设与探索[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(6): 227-232.
- [6] 霍朝霞, 于晓虹, 廖志银, 等. 虚实结合模式下专业实验课程体系的重构探索[J]. 基础医学教育, 2023, 25(12): 1092-1095.
- [7] 梁大龙, 杜太利, 崔文彬, 等. 基于对分课堂和虚拟仿真“金课”的“船舶柴油机拆装”实验课程设计[J]. 航海教育研究, 2022, 39(4): 83-87.

- [8] 王丽,刘派.基于 Unity 3D 的弹药类虚拟仿真实验开发与教学应用[J].中国现代教育装备,2023(23):29-32.
- [9] 黄陈.基于虚拟现实的变电站仿真系统研究与设计[D].焦作:河南理工大学,2018.
- [10] 周敏,郭艳军,崔莹,等.虚拟仿真技术在古生态场景重建中应用的探索[J].实验技术与管理,2021,38(6):142-146.
- [11] 张赛昆,李德鑫,马冬宝,等.基于 WPF 和 Unity3D 的机器视觉虚拟仿真教学平台研究[J].中国设备工程,2023(23):10-14.
- [12] 张贺.虚拟现实作品中的视效沉浸感营造[D].沈阳:鲁迅美术学院,2021.
- [13] 张昀.以兴趣驱动的沉浸式教学模式设计及评价机制[J].大学教育,2021,10(4):126-128.
- [14] 李婷婷,田芯.雨课堂在社科类课堂教学中的效果评估:基于“社会调查方法”课程的实证研究[J].航海教育研究,2019,36(4):93-97.
- [15] 马鹤.信息化课堂教学绩效评价体系研究[D].长春:东北师范大学,2009.
- [16] 康伟,赵鹏飞,龚新.智慧教育背景下混合式教学模式的研究[J].黑龙江教育(高教研究与评估),2018(12):1-4.
- [17] 范玉芳.混合式学习:在校学习与在岗学习的对接融合[J].高等教育研究学报,2017,40(1):5-9.

编辑 葛晋