

基于国产无人机的智能化嵌入式系统课程设计探索*

赵帅 李博洋** 陈浩然 李涵 陈刚 黄凯

中山大学计算机学院, 广州 510006

摘要 本文针对高校嵌入式系统课程滞后于技术发展, 新兴智能化嵌入式系统人才培养欠缺的问题, 分析现有课程在国产化生态覆盖、全链路实践能力培养等不足, 提出智能化嵌入式系统课程设计方案。课程以新型智能化无人机系统为载体, 贯通智能化嵌入式系统软硬件协同开发全流程, 构建“理论-技术-实践”的教学体系闭环。教学结果表明, 该方案强化学生对系统设计优化、技术功能实现等核心技术的掌握, 为低空经济领域培养兼具创新能力与工程素养的复合型人才, 促进国产嵌入式系统及各类智能化应用的发展。

关键字 智能化嵌入式系统, 国产无人机系统, 系统设计与验证, 实践应用

Exploration of the Course Design of Intelligent Embedded System Based on Domestic UAV

Zhao Shuai Li Boyang Chen Haoran Li Han Chen Gang Huang Kai

School of Computer Science and Engineering of SunYat-Sen University,
Guangzhou 510006, China
liby83@mail.sysu.edu.cn

Abstract—This paper focuses on the problems that the embedded system courses in colleges and universities are lagging behind the technological development and the lack of talents training in the emerging intelligent embedded system, analyzes the shortcomings of the existing courses in the coverage of localized ecology and the cultivation of the whole-link practical ability, and puts forward the design scheme of the intelligent embedded system course. The course takes the new intelligent unmanned aircraft system as the carrier, passes through the whole process of intelligent embedded system software and hardware collaborative development, and builds the closed loop of teaching system of “theory-technology-practice”. The teaching results show that the program strengthens students' mastery of core technologies such as system design optimization and technical function realization, cultivates compound talents with both innovation ability and engineering literacy for the low-altitude economic field, and promotes the development of domestic embedded systems and various intelligent applications.

Keywords—intelligent embedded system, domestic unmanned aircraft system, system design and verification, practical application

1 引言

嵌入式系统作为计算机科学领域的重要分支, 其核心在于将计算机硬件与软件嵌入到特定的物理设备中, 实现计算机系统对物理世界的实时感知、智能决策与精确控制。随着智能化革命的深入推进, 这类系统已成为无人机、工业机器人等智能装备的核心技术支撑。特别是在低空经济领域, 作为飞行控制系统核心载体的嵌入式系统, 正加速向自主化、智能化方向演进。2025年十四届全国人大三次会议政府工作报告明确提出, 要培育壮大新兴产业、未来产业, 推动低空经济等新兴产业安全健康发展^[1]。无人机作为低空

经济的核心载体, 其技术成熟度和应用场景的多样性使其成为推动低空经济发展的重要力量, 在配送、医疗、军事、农业、巡检、交通等领域有着重要应用。

值得注意的是, 在智能无人机嵌入式系统研发领域, 技术国产化已成为保障产业链安全的战略选择。当前, 国内无人机飞控系统仍依赖进口芯片(如 ARM Cortex-M 系列)与实时操作系统(如 VxWorks), 存在底层技术“卡脖子”的风险。在此背景下, 国产芯片生态加速崛起, 但与之配套的开发工具链、技术标准体系尚未完善, 暴露出自主化嵌入式开发人才储备不足的突出问题。

2017年, 教育部提出“新工科”建设理念, 强调培养应对新兴经济与产业变革的工程类人才, 加强学科融合与对高校学生综合能力的培养^[2]。面向无人机的技术发展和应用潜力, 教育部在相关专业设置方面

*基金资助: 本文得到 2024 年教育部产学研协同育人项目“面向智能无人机自主化创新人才培养研究”(2408234204)资助。

**通讯作者: 李博洋 liby83@mail.sysu.edu.cn。

进行了多方面的探索和调整。当前,高职院校已初步形成以操作维护为主的无人机专业课程体系,但在高校尤其是研究生教育层面上仍存在显著短板:一是现有计算机系统方向课程与无人机技术需求脱节,二是缺乏覆盖国产化软硬件生态的教学内容,三是未形成“理论-设计-应用”的完整培养链条。这种结构性缺陷导致高端研发人才供给严重滞后于产业发展速度。

基于此,笔者拟提出面向国产技术生态的嵌入式系统课程创新设计,课程以智能无人机为典型教学载体,构建理论知识与工程实践深度融合的教学体系。课程将理论知识与实践操作深度融合,重点培养学生对嵌入式系统资源管理、实时性保障、多任务调度等核心技术的掌握能力。同时,课程引入国产 SylixOS 操作系统与 RK3588 硬件平台,结合智能无人机自主导航、硬件在环仿真等前沿技术实践,不仅培养学生在复杂场景下的问题解决能力,还激发学生的创新思维与家国情怀,为我国嵌入式领域输送具有坚实技术基础与创新视野的专业人才。

2 嵌入式系统课程背景

嵌入式系统经历了从传统范式向智能架构的演进。传统系统以单片机为核心,依托静态调度算法实现确定性响应,其专用硬件架构虽能保障硬实时性,但功能单一且缺乏环境适应性。随着 AI 与边缘计算技术的突破,智能化嵌入式系统通过轻量化模型、自适应算法与多源感知融合,在复杂场景中实现动态决策与资源优化。这一演进对嵌入式系统开发者的能力结构提出新要求:需同时掌握硬件优化、实时算法与 AI 模型部署能力。

2.1 传统嵌入式课程不足

(1) 课程体系陈旧,与技术发展脱节。与当前各类智能化嵌入式应用相比,嵌入式课程体系呈现显著的滞后性:教学内容仍以单片机开发与基础理论(如 GPIO 控制)为核心,缺乏物联网、边缘计算、AI 融合等前沿技术的深度覆盖,导致学生知识结构落后于行业发展^[3]。同时,其实践环节呈现碎片化特征,实验内容多局限于 LED 闪烁、按键中断等简单功能验证,缺乏面向智能装备的复杂嵌入式系统全链路设计训练。此外,课程结构失衡问题同样突出:部分课程设置过度强调基础理论而脱离应用场景,而另一部分则重在突出未落地的 AI 概念,但未能构建“理论-技术-实践”的完整框架。

(2) 教学资源不足,缺乏实践支撑。教学资源短板制约了新型嵌入式系统人才的培养:一方面,传统课程实验室硬件设备长期停滞于 STM32 系列等低性能平台,难以支撑多核调度、异构计算等现代嵌入式开发需求;另一方面,教师队伍普遍缺乏工业级项目经

验(如 SylixOS 内核优化、工业通信协议开发),难以传授贴近行业的实践技能。更为关键的是,工具链的缺失导致教学局限于代码编写层面,虚拟化调试等嵌入式系统开发工具未被引入课堂,学生无法掌握复杂系统的工程化验证能力。

(3) 产教协同薄弱,人才培养与行业需求脱钩。当前嵌入式教育生态存在显著产教割裂:课程设计脱离实际场景,工业自动化设备控制等企业级案例未被纳入教学。同时,评价体系仍以理论考试为主导,动态调度能力、软硬协同调试等工程素养未被纳入考核标准^[4],这种脱节激化人才供需矛盾,毕业生仅能完成简单外设驱动开发,而行业亟需具备“理论建模-技术实现-应用验证”复合能力的高端人才。

2.2 国内外嵌入式课程对比

为提出完整合理的课程设计,笔者整理并对比了具有代表性的国内外高校嵌入式系统课程,并分析了现有课程的主要特征,包括是否涉及操作系统调度、实时性保障技术等关键技术,理论实践结合情况,以及是否包含操作系统实战与智能化应用实践等,具体比较如表 1 所示。

(1) 北卡大学嵌入式系统课程(COMP737)。课程围绕嵌入式系统任务调度与操作系统优化展开,分析处理器调度算法、资源同步协议及其在场景中的应用。虽然内容系统性强且注重学科基础,但对新兴边缘计算场景及异构架构的前沿问题覆盖有限。同时,课程缺乏实验条件与模拟工具,不利于学生的实践认知;复杂的理论推导与较高算法基础门槛也增加了学生的学习压力。

(2) 约克大学嵌入式系统课程(COM00001H)。课程涵盖嵌入式系统核心内容,包括任务调度与资源分配算法、系统的建模与验证与性能分析与优化,使用汽车控制系统作为实际应用案例,同时将 Ada 语言编程作为实验课程。然而,课程对新兴边缘应用(如边缘计算和物联网)的支持不足,以及缺乏面向智能化实时系统及其应用(如基于 AI 的实时决策和自适应调度)的内容。

(3) 普林斯顿大学嵌入式课程(COS436)。课程旨在教授学生如何设计和实施面向用户的系统,以增强人类能力并创造适合日常生活的技术。课程内容涵盖了人机交互领域的研究工具、技术和原则,并强调如何设计系统以提升用户体验。但是,该课程理论实验结合不足,未能充分结合实际项目或案例分析,同时缺乏对新兴边缘应用与智能化实时系统等最新技术趋势的深入探讨。

(4) 国内课程。随着新工科建设推进,嵌入式系统作为计算机技术的重要应用领域备受关注。国内课

程构建涵盖硬件、软件及实时系统设计的完整知识体系，强调实践能力培养，采用案例与跨学科融合模式。但在实际教学中仍存在以下共性挑战：

① 实践环节深度有限，较少涉及硬件开发，依赖虚拟环境和现成套件；

表 1 国内外嵌入式课程对比（注：Y 代表是；N 代表否）

课程	多核任务调度	实时性保障	实验课程	操作系统实战	智能化应用
COMP737 ^[5]	Y	Y	N	N	N
COM00001H ^[6]	Y	N	Y	Y	N
COS436 ^[7]	N	Y	N	Y	N
国内课程 ^{[8][9][10]}	Y	N	Y	Y	N
理想课程	Y	Y	Y	Y	Y

② 技术前瞻性方面，主流课程仍锚定 ARM/Linux 传统体系，对新兴实时系统架构和边端智能化应用少有涉及，配套教材也难与行业迭代速度相匹配；

③ 跨学科支持相对薄弱，课程对学生前置课程要求较高，分层辅助资源较少；

④ 考核形式多以实验报告和考试为主，部分课程学时分配不均，实验编程量及创新自由度受硬件资源配置影响较大。

3 课程理念与目标

以智能化实时系统设计为核心，围绕无人机这一复杂嵌入式平台，构建面向嵌入式系统的“理论-技术-实践”三位一体的课程体系，培养掌握系统设计调度与验证技术、具备软硬件模块化协同开发能力，并能实现端到端全链路设计的复合型嵌入式开发人才。具体目标：

（1）构建系统化无人机理论体系，强化软硬件一体思维。以无人机系统理论为基础，涵盖需求分析、模块化分解及软硬件协同设计流程，探究硬件架构与软件逻辑。

以自主导航系统为例，课程重点讲述激光雷达点云处理与 SLAM 算法的实时协同优化等原理，并探索面向嵌入式系统的有限资源下的算法优化方案，指导学生完成从多模态传感器硬件架构搭建到智能决策算法的全局设计，掌握导航系统的多源数据融合、路径动态规划等关键技术，培养软硬协同设计能力。

（2）引入 SylixOS 实时操作系统，助力国产化自主可控发展。课程围绕国产 SylixOS 实时操作系统展开，重点介绍其微内核架构设计与层级式任务调度机制，同时介绍其凭借强大的实时性与跨平台兼容性，为无人机系统各模块提供高效稳定的运行环境。通过讲授嵌入式实时系统的基本原则，结合优先级继承协议、时间片轮转算法等核心理论，分析 SylixOS 在硬实时保障与多模态资源协同管理方面的技术实现。介

绍任务优先级反转典型案例，引导学生深入理解确定性调度模型在航空航天嵌入式领域的技术规范，系统掌握面向国产实时操作系统的可靠性设计与验证理论。

（3）贯通基于瑞芯微 RK3588 的端到端开发框架理论体系。课程重点讲授基于 RK3588 芯片的系统设计理论，分析双集群硬件架构特点与能效优化原理。软件部分研究异构计算资源分配方法，结合实际案例讲解 CPU/NPU 协同调度机制，理解嵌入式系统下的异构计算任务执行过程，掌握多核协同优化的理论方法。

4 课程设置方案

4.1 理论课程

在理论课程设置上，主要分为嵌入式系统概念、软件基础与硬件基础三个部分，如图 1 所示。作为研究生课程，学生应初步掌握数字电路与逻辑设计知识，以及基础程序设计与算法分析。首先，在嵌入式系统概念方面，课程先介绍嵌入式系统概念与经典案例，再学习嵌入式系统设计方法论，为后续课程打下基础；在软件基础方面，课程先教授系统资源管理与调度模型，接着深入到实时性保障与能耗分析，最后以国产实时操作系统 SylixOS 为例，讲解其核心架构设计与研发思路，同时关注实时响应保障、资源管理等核心机制的实现方法；在硬件基础方面，课程从异构多核核心处理器设计方法入手，过渡到面向 MPSoC 的编程与分析与基于 Verilog 的数字电路设计，逐步巩固学生的理论知识体系。

整体课程布局贯通国产系统生态、实时调度理论与主流芯片平台应用，形成“理论-技术-实践”三位一体的教学闭环。

4.2 实验课程

基于前述课程理念，笔者设计了一套从先导课程基础到实物实验的多维度多层次实验框架，如图 2 所示。作为研究生实验课程，需要同学们掌握开发板基础使用知识。图 3 展示了实验课程所用的无人机系统

仿真环境、无人机实机和无人机测试场。从基础的系统认知与仿真校准，到自主导航系统设计、AI 算法应用，再到最终的多维任务实战验证，旨在引导学生在

掌握基本理论知识的前提下逐步深入无人机技术的核心领域，为未来投身相关行业奠定坚实基础。

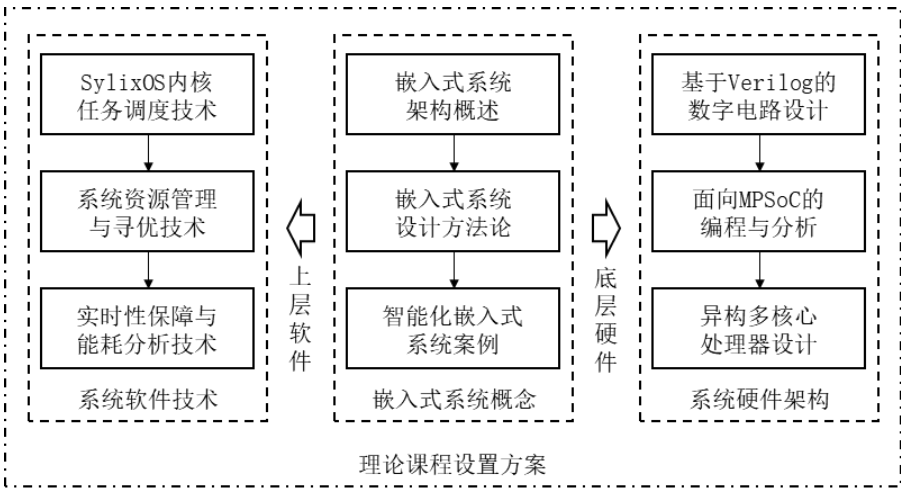


图 1 理论课程设置方案

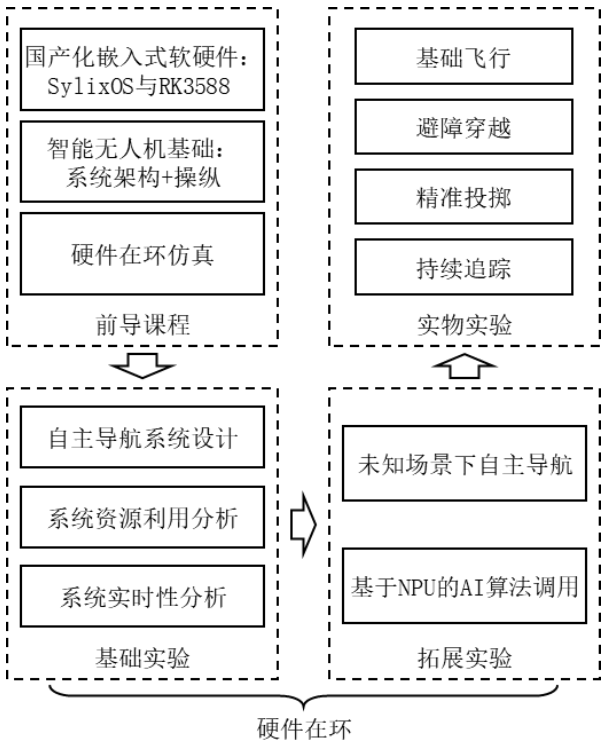


图 2 实验课程设置方案

(1) 实验一：系统认知与硬件在环仿真（前导课程）。作为基础铺垫阶段，实验一聚焦嵌入式平台原理与无人机系统框架认知。重在指导学生围绕 SylixOS 操作系统、RK3588 芯片组展开软硬件适配训练，通过在环仿真平台模拟飞行控制逻辑，实现对无

人机传感器融合、动力模型的参数校准。该阶段构建虚实结合的认知底座，为后续开发奠定操作规范。

(2) 实验二：自主导航系统设计与分析（基础实验）。在仿真验证基础上，重点突破自主导航系统的嵌入式实现。学生需要完成 RTOS 下的多线程航点规

划、封闭环境建图等核心功能开发,同时对系统资源占用率、任务响应实时性等指标进行量化分析。此实验主要需要通过性能监控工具优化内存分配策略,培养学生从功能实现到工程落地的转化能力。

(3) 实验三:基于NPU的AI算法应用(拓展实验)。面向实际应用中的不确定性,实验三融入了边缘智能技术。通过设计库房巡检、山地穿行等复杂场景,要求学生调用RK3588的NPU模块开发动态障碍物检测、姿态鲁棒控制等AI模型,并探索轻量化压缩算法与硬件加速器的联合优化方法。学生在完成实验三后,可以提高个人对非结构化场景的综合分析能力。

(4) 实验四:多维任务实战验证(实物实验)。实验要求学生在飞行平台开展跨场景综合验证。基于前序实验搭建的ROS框架和智能化算法,完成避障穿越、精准投掷与持续追踪三大核心任务。引导学生构建从代码调试-物理部署-场景适配的完整工程闭环,建立从环境感知-决策规划-执行效能的完整技术链认证体系,从而实现对全面决策能力的立体化检验。

5 课程评估

基于前述设计,本学院已连续5年开展面向研究生的专业基础选修课《嵌入式系统》,课程跨度为完整学期,共18周(54学时),其中理论课与实验课的占比为2:1。课堂规模约为60名学生,3名任课教师,2名助教。实验部分以小组形式完成(每组3人),小组学生共同完成实验与相应报告。

5.1 理论课

理论课部分总学时为36学时,分3个部分进行教学。第一部分教学重点在于嵌入式系统基础与设计理

论,需要厘清嵌入式系统核心定义与设计方法论演进逻辑,结合具体案例解析任务分区与硬件映射的物理约束。学生的学习难点在于抽象设计理论需结合具体场景理解,此外新兴技术与传统架构的融合逻辑易混淆。在第二部分嵌入式软件与实时系统开发中,教学重点在于深入RTOS任务调度机制、实时建模方法,通过数学推导与工具仿真验证算法可行性,强化实时性与功耗的工程权衡。学习难点在于相关概念、定理与公式较多,需要结合具体实验加以理解。

在第三部分硬件架构与协同设计技术中,教学重点在于解析异构架构能效原理,贯通Verilog数字电路电路设计与FPGA集成,培养软硬件协同调试能力。学生学习难点在于硬件并行逻辑与软件顺序思维冲突。

5.2 实验课

实验课部分总学时为18学时,由4个实验组成,每个实验要求学生以小组为单位,在期限内完成任务,并以实验报告形式提交。课程为每个学生提供充足的教学资源,包括专门的开发手册,每个小组都有一块开发板与无人机设备。实验一难度较小,主要内容是在实验平台上进行基础编程,让学生适应实验环境,为接下来的实验作铺垫。

实验二难点在于嵌入式核心功能开发,很多学生本科期间缺少相关经验,需要额外指导和较频繁的答疑,同时推荐组内同学间充分交流。最后,90%的小组都能按时完成,其他小组通过给予额外时间也能顺利提交。

实验三涉及到在边缘设备(例如RK3588开发板)运行AI模型。在模型选择上,课程选用轻量级神经网络



(a) 无人机系统仿真环境



(b) 无人机实机展示



(c) 无人机应用测试场地

图3 实验课程教学设备与环境支持

络(如MobileNet等),绝大部分实验小组根据不同需求实现自主飞行无人机基础应用并完成对应指标。

实验四涉及无人机飞行,课程提供具有安全防护措施的飞行场地,学生需要提前学习基础无人机操作。该实验工作量较大,考验小组分工合作水平,该实验需要完成三种类型的任务,合理设定评定指标使得大部分小组能够达到及格线,鼓励小组通过不同方式完成任务,最后大部分小组成绩在80~90分区间内。

5.3 教学改革成果

本课程在课程体系上进行了系统性优化,尤其注重“理论—技术—实践”三位一体的深度融合。教学改革的成效主要体现在三个方面:课程成绩显著提升,专业能力增强,教学资源优化。

首先,在课程成绩方面,学生整体成绩显著提升。如图4所示,改革前80~89分段学生占比接近40%,而90~99分段为50%;改革后,90~99分段学生比例大幅

上升至近 90%，80 - 89 分段则降至个位数，整体表现出明显的右移趋势。此外，改革前仍有约 13% 的学生分布在 60 - 69 分区间，改革后该区间人数为零。这一分布变化充分说明，经过课程体系重构与实验模块深化，学生能够熟练掌握基于嵌入式系统的功能开发流程与方法，整体学习质量显著提升。

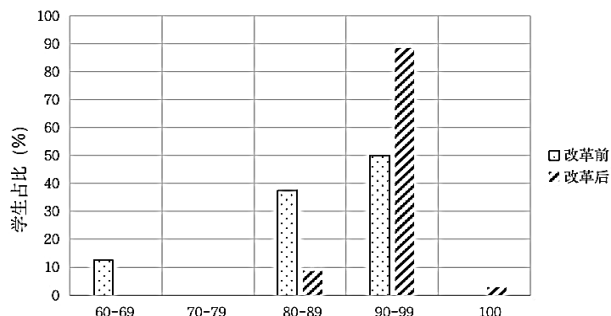


图 4 教学改革前后学生成绩分布对比

其次，从能力培养的角度看，改革极大提升了学生的理论掌握程度与实验能力。

在理论教学中，课程围绕嵌入式系统核心概念、资源调度机制、国产 OS 架构，以及 SoC 架构设计展开。如图 5 所示，改革后学生在五个关键理论维度的掌握情况均有显著提升，通过 SylixOS 架构剖析与调度模型建构训练，学生对国产操作系统的理解更加深入，并显著增强了系统架构理解力。

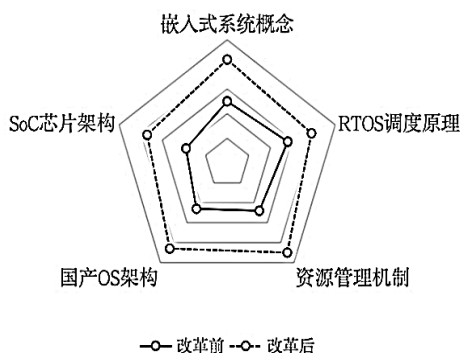


图 5 教学改革前后理论掌握程度对比

在实验教学中，课程设置了从仿真到实机、从基础任务到综合验证的完整链条，如图 6 所示，教学改革后，学生在多项能力上实现跨越式提升，其中 AI 算法部署能力大幅提升，低功耗系统设计与系统资源管理能力也显著增强。课程改革有效提升了学生的系统实现、资源优化与软硬件协同调试能力，推动实验能力从“完成任务”向“掌握系统设计方法论”跃升。

最后，设备资源优化是本次改革的关键突破。在教学改革之前，学生需自行搭建复杂的嵌入式开发环境，常因版本不兼容或系统配置错误而浪费大量时间。

改革后，如图 7 所示，课程团队提供了标准化的封装镜像与 SylixOS 开发模板，统一实验平台，减少了调试时间，提高了教学起点一致性。

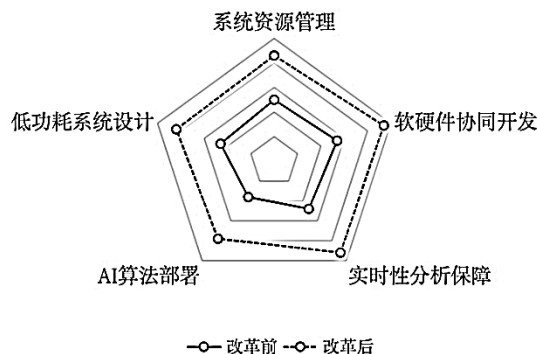


图 6 教学改革前后实验能力对比



图 7 教学改革后的设备资源

以“自主导航系统设计与分析”为例，改革前项目平均开发周期为 14 天，部分学生因平台搭建问题延迟提交；改革后，镜像部署时间缩短至 15 分钟内，项目完成周期缩短至 9 天，项目按时提交率由 72% 提升至 96%。此外，授课教师与课程助教也能通过镜像统一环境进行远程协助，有效提升了教学支持能力。

5.4 主要挑战

根据以往教学过程中学生的反馈，课程目前存在以下挑战：

其一，在文档体系构建方面存在不足。本课程尚未构建完整的结构化文档体系（包括实验手册与代码仓库），而实验环节因涉及复杂环境配置进一步增加了实践门槛。为此，课程为学生预置标准化环境（采用虚拟机镜像等）与模块化实验设计，将学生精力聚焦于核心功能开发，减少因环境搭建带来的冗余耗时与精力消耗；

其二，教学内容与学生基础适配度不充分。课程需在有限学时内兼顾理论深度与技术广度，而部分学生基础较为薄弱，易出现学习断层。对此，课程通过进一步添加前置资料并充分引导，确保不同基础学生均能阶梯式提升能力，达到教学要求。

6 结束语

嵌入式系统作为智能装备与低空经济发展的核心技术，其国产化之路亟待突破高端人才短缺的瓶颈。本文针对无人机领域嵌入式开发的“卡脖子”难题，构建以国产 SylixOS 操作系统和 RK3588 芯片为核心的课程体系，通过导航算法设计、硬件在环仿真等实战模块，实现了理论教学与国产技术生态的深度耦合。该方案不仅为相关领域培养技术人才，更通过教育链与产业链的协同联动，为新兴产业安全发展提供可持续的人才支撑，助力我国在以无人机为核心的低空经济领域构建自主可控的嵌入式系统生态和技术发展。

参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府 政府工作报告[EB/OL]. [2025-03-20]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202503/content_7013163.htm
- [2] 钟登华. 新工科建设的内涵与行动[J]. 高等工程教育研究, 2017(03):1-6.
- [3] 姜宏旭, 赵梅娟, 李辉勇, 张永飞. 产教融合背景下嵌入式人工智能课程建设的探索[J]. 计算机技术与教育学报, 2024(06):8-12
- [4] 王丽杰, 罗蕾. 基于新工科的新生嵌入式系统设计课程探索[J]. 计算机技术与教育学报, 2022(04):34-37
- [5] Comp 737 Information[EB/OL]. [2025-03-20]. <http://www.cs.unc.edu/~anderson/teach/comp737/>
- [6] Analysable Real-Time Systems (COM00001H)[EB/OL]. [2025-03-20]. <https://www.studocu.com/en-gb/course/university-of-york/analysable-real-time-systems/2047435>
- [7] Springer Verlag. HCI Design: Princeton Real-Time Lecture Notes[EB/OL]. [2025-03-20]. <https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall07/cos436/HIDDEN/RealTime/RTNotes.html>
- [8] 秦国锋, 周涛. 基于 Chisel 的 RISC-V 处理器设计[J]. 计算机技术与教育学报, 2024(02):1-9
- [9] 电子科技大学. 嵌入式系统[EB/OL]. [2025-03-21]. <https://i.study.uestc.edu.cn/ESD/menu/home>
- [10] 东南大学. 嵌入式系统[EB/OL]. [2025-03-21]. <http://cse.seu.edu.cn/2018/1214/c22634a254960/page.htm>