

“网络 + 编程”复合能力训练的课程实践探索

林为伟^{1, 2}, 张 栋^{1, 3}, 朱丹红¹

(1. 福州大学 计算机与大数据学院, 福建 福州 350108 ;
2. 福州大学 网络信息安全与计算机技术实验教学中心, 福建 福州 350108 ;
3. 福州大学至诚学院 计算机工程系, 福建 福州 350002)

摘 要: 在网络可编程的发展趋势下, 分析原有相关课程在学生专业能力训练和科研素养达成方面所面临的问题, 探讨如何巩固 SDN 网络基础理论, 推动北向应用及数据平面可编程进阶能力, 介绍通过自选题形式的应用案例项目驱动, 实现“网络 + 编程”复合能力训练的教学实践, 最后通过问卷调查和案例成果展示, 说明课程实践教学效果。

关键词: 网络; 编程; 复合能力; 实践探索

DOI:10.16512/j.cnki.jsjy.2022.05.015

0 引 言

传统的计算机网络专业课程在教学内容方面专注于经典的 TCP/IP 网络, 在教学手段上通过引入虚拟仿真手段, 形成对实体实验的有效补充, 对学生基础网络能力的训练起到了重要作用^[1]。随着网络技术的变革, 传统的计算机网络专业课程已难以满足未来网络发展对于网络人才的新需求。

网络可编程是未来网络的一个热点技术领域, 网络可编程能力已经成为未来网络服务和应用的关键所在^[2]。随着网络和编程之间的联系越加紧密, 新时代对网络人才的需求也不断地更新与升级^[3], 高校计算机网络专业需要相应地调整人才培养定位: 面向网络可编程技术领域, 综合训练学生的网络技能和编程技能, 使之能够运用“网络 + 编程”的复合能力解决复杂网络工程问题。为了实现上述培养目标, 需要在系统完善的人才培养体系下, 由教师依托专业, 在网络可编程领域开展持续改进的教育教学实践, 形成高质量的课程成果和人才培养产出^[4]。传统的计算机网络专业课程并不具备开展相关实践的条件, 而软件定义网络 (Software Defined Networking, SDN) 作为未来网络发展的重要方向, 属于计算

机和网络工程专业的前沿课程^[5]。面向 SDN 开展相关课程实践探索, 实现学生网络能力和编程能力的有机结合, 训练“网络 + 编程”的复合能力以解决复杂网络工程问题, 是应网络人才需求升级, 提升网络人才培养质量的合理尝试, 具有现实意义。

1 面临的问题

1.1 网络可编程能力训练有限

原有计算机网络专业课程主要基于传统经典的 TCP/IP 网络展开教学。由于课程相关实践内容基于传统封闭式网络, 因此学生通过课程学习所掌握的网络技能局限于对厂商定制网络设备的操作配置、固定格式和字段的网络协议分析, 以及基于传统网络的规划组网, 无法根据具体需求和业务场景实现对网络控制和转发行为的自定义设计和应用拓展, 难以适应开放化、可编程化趋势下未来网络发展对网络专业人才的能力要求。

在编程技能方面, 传统网络编程相关的课程实践与未来网络发展对于网络可编程能力的要求并不完全相符。传统网络编程主要围绕 Socket 套接字编程展开^[6], 其内容和任务在于通过 Socket 编程, 实现上层应用数据通过网络进行传输, 在

基金项目: 2020 年福建省中青年教育科研项目 (科技类) (JAT200027); 2021 年福州大学一流本科课程建设项目 (福大教 [2021]12 号)。

第一作者简介: 林为伟, 男, 实验师, 研究方向为计算机实验教学、计算机网络, fjlinww@fzu.edu.cn。

实践过程中网络本身仅作为固化的基础设施而存在,对于网络数据本身控制和转发的自定义编程基本不涉及。因此,上述所谓的“网络编程”,更多意义上是在网络环境下的程序设计训练,和网络本身的可编程并不相同。

1.2 科研素养和思政融入有限

探索围绕网络领域前沿研究方向,强化专业能力训练,切实有效地提升学生科研素养,树立科研强国的家国情怀,是计算机网络专业课程教学实践中面临的方向问题。目前已有在网络课程实践中探索以科研项目为依托开展创新型人才培养^[7],以及在项目驱动式教学中培养团队协作精神^[8]的相关案例。然而,基于传统经典 TCP/IP 封闭式网络的课程教学实践,其创新性不足,具体表现在:①传统网络经过几十年的技术沉淀,具备成熟的技术标准,导致课程内容的先进性和时代性先天不足;②教师多轮次的教学经历极易将教学形式固化为“满堂灌”,在教学形式上缺乏先进性和互动性;③传统网络基础验证性实践偏多,学生亦有多种渠道获取综合设计性实践的案例参考,造成学习成果的探究性和个性化不足。

面向网络前沿的创新型人才培养,离不开本科阶段的基础科研训练和课程思政元素的融入。基于传统网络的专业课程实践创新性不足,难以支撑课程对于学生科研素养的形成,需要在面向网络前沿领域的创新型课程教学实践中,实现上述目标。

2 面向“网络+编程”复合能力训练的课程实践

面向开放、可编程的未来网络,原有的计算机网络专业课程难以支撑对学生网络可编程能力的训练和科研素养的达成。SDN 的出现让网络走出封闭,增强了网络控制面的可编程和灵活适配能力,而协议无关转发相关技术更让网络转发平面也摆脱了对特定协议的依赖^[9]。针对原有计算机网络专业课程面临的问题,面向网络可编程,在 SDN 课程教学中开展“网络+编程”复合能力训练的课程实践。

2.1 教学目标设定

面向网络强国战略和数字经济产业需求,计

算机网络相关专业的人才培养必须顺应网络开放化、可编程化的发展趋势,相关课程须支撑对应的专业毕业要求。对于 SDN 课程而言,学生通过 32 学时的课程学习需达到的总体目标是把握软件定义网络理论和技术,紧扣网络前沿趋势和应用场景创新,懂网络且会编程,培养能够综合运用编程技能与网络技能解决复杂网络工程问题的能力,并且树立起科研强国的思想意识。具体教学目标设定如图 1 所示。



图 1 教学目标设定

(1) 知识目标。运用软件定义网络的理论和技术;理解网络开放可编程,包括应用层可编程和数据平面可编程,及掌握协议、功能和业务的开发与部署方法。

(2) 能力目标。融合 SDN 前沿理论和应用场景,设计基于 SDN 架构的解决方案;基于 SDN 接口,设计和编程实现新型网络功能;基于 SDN 仿真工具,实现模拟构建和数据分析。

(3) 素质目标。具备网络领域的科研素质,树立科技强国的理想信念;以历史观和发展观把握网络发展趋势。

2.2 课程实践设计

为了实现教学目标,软件定义网络的课程实践设计总体原则是在筑牢 SDN 网络理论基础的前提下,推动向 SDN 北向应用及数据平面可编程的能力进阶,最后通过自选题形式的应用案例项目驱动,实现“网络+编程”的复合能力训练,达到解决复杂网络工程问题,支撑计算机网络领域创新型人才的培养。SDN 课程实践设计的总体规划见表 1,实践项目和“网络+编程”复合能力训练的对应关系如图 2 所示。

表 1 SDN 课程实践项目规划设计

项目名称	学时	项目类型	侧重的能力训练
基于 Mininet 的 SDN 拓扑构建	2	基础	基础 SDN 网络认知
Open vSwitch 交换机实践	2	基础	网络虚拟化、软件交换
OpenFlow 协议分析	2	基础	SDN 南向协议
开源控制器安装及流表下发	2	基础	SDN 控制平面
基于 REST API 的北向应用	2	进阶	SDN 应用编程
数据平面 P4 编程	2	进阶	数据平面可编程
综合实践（自主选题）	4	综合探究	“网络 + 编程”复合能力

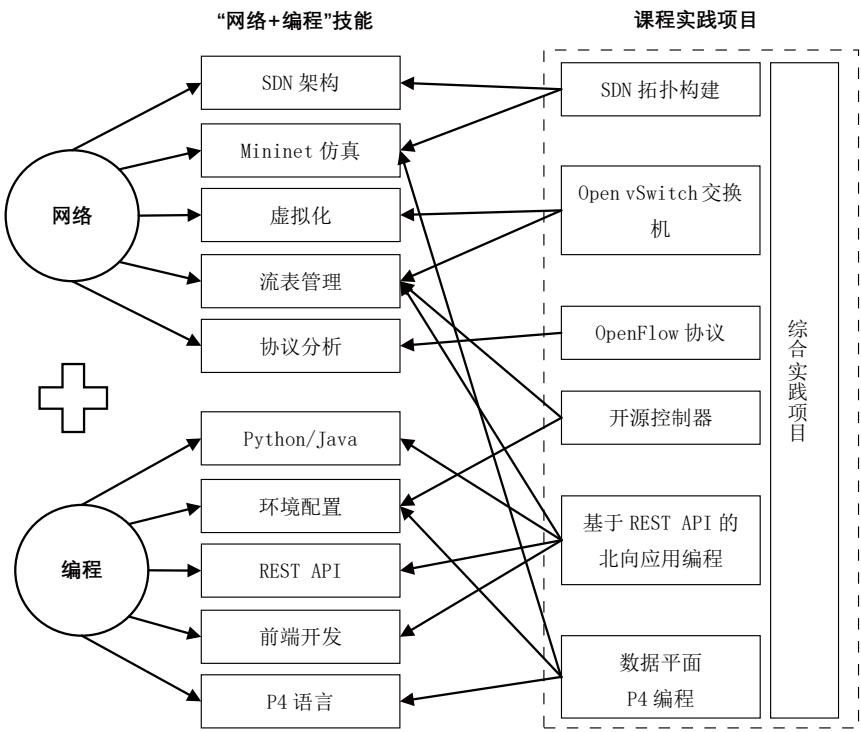


图 2 实践项目和“网络 + 编程”能力的对应关系

(1)综合网络原理和编程能力的基础和进阶实验。除最后的综合项目之外，其他前序实践项目由 SDN 总体架构开始，首先完成拓扑构建，然后根据 SDN3 层架构，从南到北依次经过数据平面的虚拟化和软件交换技术，南向接口协议，控制平面技术，实现对 SDN 网络原理的基础能力训练。基础训练可通过自研的基于自动化评测的 SDN 实验平台进行，有利于学生快速定位和修正实践过程遇到的错误，提高学习效率^[10]。利用控制器北向接口和应用编程开发，以及 P4 数据平面可编程进阶实践，使学生了解业界对于上

层应用和底层可编程交换芯片、设备的研发需求，实现真正意义上的网络编程能力拓展。

(2)应用案例项目驱动的“网络 + 编程”综合项目。该部分是课程最重要的部分，受限于有限学时，课堂时间仅提供学生答疑、汇报展示和答辩。综合实践根据业界在 SDN 领域的真实应用案例，驱动学生在掌握网络原理和具备编程能力后，基于 SDN 编程实现新型网络功能，并通过实验原型展现。在项目开发过程中，激发学生学习兴趣、专注热情以及团队协作精神，亦贴近复杂网络工程问题，持续深化“网络+编程”复合能力训练。

表 2 展示了 SDN 部分综合实验项目案例的选题内容和完成项目可能涉及的相关编程技术。

3 实施效果

3.1 课程反馈

自 2019 年以来，面向计算机和网络工程专业本科三年级学生，“网络 + 编程”复合能力训练的 SDN 课程教学已经经历 2 轮的教学检验，其中 2019 年选课学生 63 人，2020 年 126 人。

针对选课学生展开问卷调查，2019 年回收

表2 “网络+编程”综合项目选题(部分)

主题	内容	编程技术
负载均衡	自动分担网络流,提高性能,保障业务可用性	
网络攻防	识别外部 DDoS 攻击,自动下发表中断受影响的网络服务	
网络可视化	网络设备信息、整体拓扑的可视化呈现	REST API 接口, Python, Java, PHP, 前端 UI, 数据库
故障恢复	网络故障设备、链路的定位,自动修复	
网络测量	网络性能测试平台,实现连通性、吞吐率、容量等指标的在线测试	

有效样本 50 份;2020 年回收有效样本 93 份。采用 Likert5 级评分法对课程满意度展开调查,学生对课程实践的总体满意度保持在 70% 以上,表 3 展示了 SDN 课程实践总体满意度统计结果;同时,在 2020 年,还新增学生在参加课程前后对具体相关知识技能掌握水平的分析,可证明经过课程训练,相关知识技能的水平均有所提升,具体结果见表 4。此外,根据学生在教务系统上的评教反馈,教师通过课程向学生传递了正确的理想信念、价值观念和道德观念,成功实现课程思政的融入。

表3 SDN 课程实践总体满意度统计

选项	2019 年		2020 年	
	人数	比例 /%	人数	比例 /%
很不满意	0	0	2	2.15
比较不满意	1	2	3	3.23
一般	10	20	21	22.58
比较满意	31	62	37	39.78
非常满意	8	16	30	32.26

表4 学生对课程相关知识技能掌握水平的自我评价统计

知识技能	2020 年评分	
	课程学习前	课程学习后
Mininet 网络仿真	1.81	3.46
网络虚拟化	1.83	3.18
流表管理	1.61	3.06
协议分析	1.67	3.05
基于 SDN 的编程	1.67	3.09

注:由学生对知识技能的掌握进行自评,最高 5 分,最低 1 分。

3.2 课程成果

课程对于“网络+编程”复合能力的训练,使得学生基本具备综合运用网络技能和编程技能

解决复杂网络工程问题的能力,在国家级网络专业竞赛中取得了一定成绩。以两份具体的学生作品为例,展示学生综合运用网络技能和编程技能解决复杂网络工程问题。图 3 展示了作品所体现出的学生所掌握的网络能力和编程能力,其中包括不同作品所体现的共性能力以及各自作品单独体现出的能力。



图3 作品实现所体现的能力

1) 案例一: 软件定义网络性能验证平台。

面对原有众多功能分散、各自独立且互不关联的各类测试工具所带来的问题,本案例基于思博伦公司提供的平台和 API,基于网络虚拟化技术重新设计并集成所需要的测试功能,实现统一的 SDN 性能验证平台。平台针对 SDN 网络整体性能中的端到端最大吞吐率、时延、丢包率等指标,以及控制器性能中的信道容量、拓扑发现时间、流表容量、流表查询时间等系列指标进行测试;系统主要使用 Python 编程实现,并利用统一的 Web 可视化 UI 界面,让 SDN 网络的测试流程更加高效和直观。该作品的实现需要学生充分理解并掌握 SDN 网络整体性能和控制器性能

衡量指标,同时需要具备阅读 API 文档、Python 编程、前端开发等程序设计能力。该作品最终获得中国高校计算机大赛 2019 年网络技术挑战赛总决赛一等奖。

2) 案例二: 基于 SDN 可编程的园区网智能管理系统。

面对传统网络管理模式在园区网管理和运维中表现出来的缺乏全局视野、故障排查低效、手工配置设备、对网络攻击的防御不够灵活等问题,本案例基于 SDN 的灵活可编程,结合思科公司提供的平台和 API 接口,使用 Python 编程,设计并实现了支持园区网络、地址池和设备信息的可视化,具有故障定位和故障信息反馈,子网发现并自动添加进动态协议,洪泛攻击检测和智能防控等功能的园区网智能管理系统。系统的编程实现采用了基于 Python 的开源框架,涉及 Web 前端开发、数据库等基本技术,并使用了 Navicat、Postman 等数据库管理和接口调试工具。该作品的实现同样需要学生综合运用网络领域的各项能力,包括但不限于拓扑搭建、故障恢复、安全等,以及 PythonWeb 开发方面的编程能力。该作品最终获得中国高校计算机大赛 2020 年网

络技术挑战赛总决赛一等奖。

4 结 语

围绕技术应用和创新型人才培养目标,计算机和网络相关专业的课程建设须重点关注网络能力和编程能力的训练。在传统网络课程难以适应未来网络开放化、可编程化发展趋势的背景下,通过软件定义网络课程,针对如何将网络能力和编程能力有机结合,应训练“网络+编程”的复合能力以解决复杂网络工程问题。在巩固 SDN 网络基础理论,推动北向应用及数据平面可编程进阶能力之上,通过自选题形式的应用案例项目驱动,实现“网络+编程”的复合能力训练,以达到让学生懂网络且会编程,培养学生能够综合运用编程技能与网络技能解决复杂网络工程问题的能力,并且融入思政元素,树立起科研强国的思想意识。通过课程实践,学生对于整个教学环节满意度较高,且后续的相关作品体现了通过课程所掌握的“网络+编程”复合能力,在国家级竞赛中亦获得较好成绩。综上所述,“网络+编程”复合能力训练的课程实践教学取得了良好成果。

参考文献:

- [1] 李楠,李玉龙,张华卫. CDIO教育理念引领下的计算机网络实验教学体系[J]. 计算机教育, 2019(9): 30-33.
- [2] 黄韬,刘江,汪硕,等. 未来网络技术与发展趋势综述[J]. 通信学报, 2021, 42(1): 130-150.
- [3] 施晓秋,蒋宗礼,沈谦,等. 网络工程新工科人才培养与专业建设的挑战、机遇与对策[J]. 高等工程教育研究, 2020(5): 11-17.
- [4] 施晓秋. 以教研教改促进专业内涵式发展与人才培养[J]. 高等工程教育研究, 2021(2): 69-74.
- [5] 林为伟,叶福玲,张栋. 计算机专业软件定义网络实验课程建设探索[J]. 计算机教育, 2020(11): 179-182.
- [6] 刘琰,常斌,陈静,等. 网络编程技术实践教学方法的探索与实践[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(增刊1): 7-11.
- [7] 刘婷婷,王志明,李小平,等. 以科研项目为依托培养创新型人才: 以计算机通信与网络课程教学为例[J]. 中国现代教育装备, 2019(23): 110-112, 121.
- [8] 胡燕,孔凡哲,陈心浩. 实验项目驱动式教学促进四大关键能力的实证研究[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(2): 191-196, 203.
- [9] 虞志刚,冯旭,赵佳睿. 新型网络技术对网络信息体系的影响研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(4): 316-322.
- [10] 张栋,林为伟,叶福玲. 基于自动化评测的软件定义网络虚拟仿真实验平台[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(7): 83-86.

(编辑: 宋文婷)