

面向华为鲲鹏服务器的操作系统教学实践平台

王雷, 王廉杰, 李永毅, 姜博

(北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100191)

摘要: 操作系统是高校计算机专业本科生的必修课程。针对操作系统实验教学的需求, 面向华为鲲鹏服务器, 设计并实现了基于Web IDE的操作系统教学实践平台, 并在openEuler社区开源; 面向学生群体, 实现了操作系统实验的全过程管理。此外, 还基于Docker容器技术实现了快速部署能力, 基于GitLab实现了代码管理和自动评测。同时, 开发了学习行为收集插件, 帮助教学团队更深入地了解教学情况。最后, 设计与实现了一个综合信息平台, 方便教学团队对实验相关信息进行查看与分析。

关键词: 操作系统; 教学实践平台; 鲲鹏服务器

DOI: 10.11907/rjdk.231656

中图分类号: G434

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1672-7800(2024)008-0001-07



Operating System Teaching Practice Platform for Huawei Kunpeng Servers

WANG Lei, WANG Lianjie, LI Yongyi, JIANG Bo

(School of Computer Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Operating system is a compulsory course for undergraduate students majoring in computer science in colleges and universities. To meet the needs of operating system experimental teaching, a operating system teaching practice platform is designed and implemented for Huawei Kunpeng servers, which is based on Web IDE and open-sourced in the openEuler community. The platform is aimed at student groups and manages the entire process of operating system experiments. It is capable of rapid deployment based on Docker container technology, and code management and automatic assessment are achieved based on GitLab. A learning behavior collection plugin is developed to help teaching teams better understand the teaching situation. Finally, a comprehensive information platform is designed and implemented, which facilitates teaching teams to view and analyze information about the experiments.

Key Words: operating system; teaching practice platform; Kunpeng servers

0 引言

操作系统是计算机系统中连接软件与硬件的纽带, 其作为高校计算机专业本科生的必修课程之一, 是培养学生系统能力的关键课程。由于学生之间的差异, 操作系统实验教学需要进行更精细的个性化指导。随着学生人数的增加, 教师实验评测、实验指导工作量非常大。因此, 需要一个自动化管理实验过程的操作系统教学实践平台。

教学实践平台首先需要满足学生完成实验的需求。一次实验课程的流程通常包括: ①基础代码发布; ②学生实验代码编写; ③本地调试运行; ④学生代码提交; ⑤学生

代码自动编译测试; ⑥评测结果反馈。同时, 需要为学生提供一套远程接入的工具, 以降低实验设备的成本, 并方便教学团队对学生提供远程帮助和统一管理。

实验代码作为学生操作系统实验学习过程中的重要学习成果, 需要有一个平台对实验代码进行统一管理。为了检验学生学习成果, 还需要对学生的操作系统代码进行评测。因此, 平台应该支持对学生提交的实验代码进行自动评测。另外, 教学团队还需要关心学生在操作系统实验开发过程中的学习行为, 通过对行为数据的分析对学生进行针对性的帮助, 以及对教学内容进行优化与调整。

随着国产芯片和操作系统的兴起, 针对国产操作系统学习、生态建设的需求, 在北京航空航天大学计算机学院

收稿日期: 2023-06-22

扫描二维码阅读全文:

基金项目: 国家自然科学基金项目(62077002)

作者简介: 王雷(1969-), 男, 北京航空航天大学计算机学院教授, 研究方向为操作系统和虚拟化; 姜博(1981-), 男, 博士, CCF会员, 北京航空航天大学计算机学院副教授, 研究方向为软件测试、区块链安全、操作系统。本文通讯作者: 姜博。



本科生操作系统课程基础上,基于华为自研的鲲鹏服务器 TaiShan 200 ARM 架构服务器创建了一个操作系统实践平台。针对现有操作系统实验环境缺少图形化界面、管理团队管理不便等问题,通过分析 VS Code、Docker、TypeScript、GitLab、Django 等开源项目,设计了一个基于 Web IDE (Web Integrated Development Environment) 的操作系统教学实践平台,既能支持学生通过 Web IDE 便捷地进行操作系统实验学习,又能提高团队的教学效率,为师生提供良好的操作系统实验课程体验。

1 研究现状

1.1 集成开发环境

集成开发环境(Integrated Development Environment, IDE)是一种可为计算机程序员提供全面功能的软件开发工具,其通常集成了源代码编辑器、编译器和调试器等自动化工具,以提升计算机程序员的开发效率。另一方面,IDE 在一个统一的平台上进行代码开发,降低了学习成本。目前对集成开发环境的研究较为成熟,其被广泛应用于各类软件开发过程中,许多 IDE 已发展为成功的商业软件和开源软件,如 IntelliJ IDEA^[1]、Eclipse^[2]、Xcode^[3]等。

1.2 Web IDE

鉴于本地开发环境的局限性,云端开发平台应运而生。Web IDE(在线集成开发环境)作为一种基于浏览器的集成开发环境,可提供一键式的访问功能,使用户能够便捷地连接到云端开发环境^[4]。程序员可以利用 Firefox、Google Chrome、Microsoft Edge 等 Web 浏览器访问 Web IDE,使代码开发不再需要依靠本地硬件。在网络条件良好的环境下,Web IDE 降低了对程序开发的设备要求^[5]。随着云服务越来越流行,许多公司都开始在 Web IDE 领域投入研发,例如 AWS Cloud9^[6]、Visual Studio Code for the Web^[7]、HUAWEI CloudIDE^[8]等。以 HUAWEI CloudIDE 为例,其支持开发者在云端完成环境配置、代码阅读、代码编写,可对代码进行运行、调试、预览等操作,并支持对接多种代码仓库。同时,其支持丰富的插件扩展,开发者可以按需申请开发环境配置,快速获取工作空间。

1.3 操作系统实验平台

鉴于操作系统在计算机系统的重要性,教学操作系统不断涌现,如国外高校的 Minix^[9]、XV6^[10]、OS/161^[11]等,国内高校的 uCore^[12]、MOS^[13]等。虽然各类操作系统在设计方法和主要功能上略有区别,但其均围绕操作系统的核心功能进行设计,所以能很好地满足操作系统实验教学需求。操作系统实验需要依赖特定的环境运行,尤其是内核实验。为了避免工具链上配置的差异,国内高校通常使用虚拟机平台来解决此问题。例如清华大学采用发布虚拟机映像、学生安装统一实验环境的方法^[14]。该方式适用于大型公开课,学生能够自行搭建实验环境进行操作系统实

验自学,但对学生电脑配置要求较高。此外,由于学生代码以及学习行为数据较难进行收集分析以量化教学效果,因此不适用于校内教学^[15]。另一种如北京航空航天大学、南京航空航天大学等高校的操作系统实验课程平台,由校内服务器提供实验环境的支持,通过 SSH 连接远程开发环境进行操作系统实验^[16]。该方案虽然能统一学生的实验环境,但存在无图形化界面、工具链使用繁琐等问题。

1.4 开发人员行为数据收集

软件生命周期中项目参与人员的行为特征是软件工程领域关注的重点问题,以期通过分析个体行为数据特征来评估项目开发进度、发现项目开发瓶颈以及开发过程中的异常现象。袁霖等^[17]设计基于 Alitheia 的测度插件对开源环境下开发人员的行为特征进行挖掘与分析,旨在从参与项目的开发人员贡献行为、协同方式两方面对开发人员行为数据进行收集;李存燕等^[18]以 Github 开源社区数据为研究对象,从开发人员贡献度影响因素、贡献度人数分布规律和合作关系 3 个问题以及开发人员贡献度影响因素与开发人员间的协同关系 2 个维度出发,揭示了开发人员在 Github 上的部分行为特征。本文旨在通过对学习行为数据的收集,为教学改革提供依据。

2 总体设计

为满足学生和教学团队的不同需求,本文将操作系统实践教学平台分为学生实践平台、代码仓库管理平台和综合信息平台 3 类。平台整体部署在华为 TaiShan 200 服务器上,借助 Docker 容器技术进行平台服务部署。本文实现的基于 Web IDE 的操作系统实践教学平台总体架构如图 1 所示。

学生实践平台基于统一的 Docker 镜像,利用 Docker 容器技术进行学生实验环境部署。Docker 镜像是在 openEuler 基础上,统一部署 ARM64 开发工具链、QEMU 仿真器以及 Web 版 VS Code 服务,实现基于 Web IDE 访问的操作系统实验平台。同时,基于操作系统实验需求在 VS Code 上集成了独立开发的调试运行插件以及学生开发行为数据收集插件。

面向教学团队,本文设计了代码仓库管理平台和综合信息平台。代码仓库管理平台基于 GitLab 实现,通过为学生与教学团队配置不同权限,实现对实验代码的隔离与管理。通过部署自动评测脚本实现对学生代码的自动评测。综合信息平台基于 Django 框架开发,提供了可查询学生实践环境配置、实验评测数据、学生学习行为等内容的前端查询界面。各部分的详细设计将在后续章节中展开。

2.1 学生实践平台

2.1.1 基于 Docker 技术的快速部署

在操作系统实验学习过程中,从代码开发到编译、调试与运行,都需要特定的工具与环境来支持。同时由于操

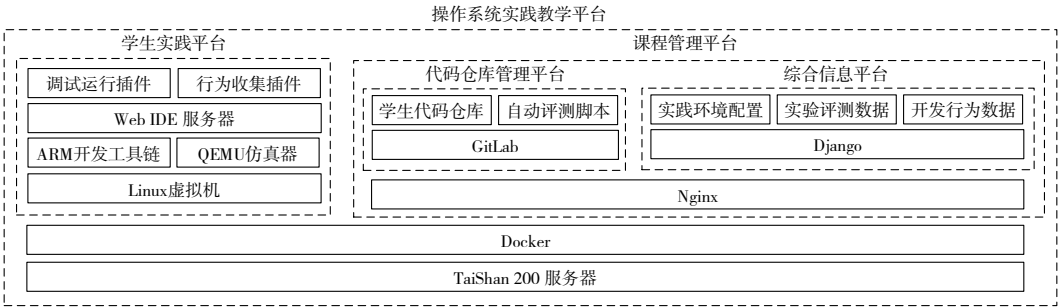


Fig. 1 Overall architecture of the Web IDE-based operating system practice teaching platform

图1 基于 Web IDE 的操作系统实践教学平台总体架构

作系统代码的特殊性,目前缺少成熟的集成开发环境以支持操作系统实验的全流程。本文选择 openEuler 作为学生的操作系统实验开发环境,由于安装开发工具和部署环境十分耗费时间与精力,平台为学生提供了一个已安装好开发软件与部署好开发环境的虚拟机平台,从而塑造上手即用的学生操作系统实验开发环境。为了能够方便、快捷地部署统一且独立的学生实验开发环境,本文选择 Docker 容器技术作为学生实践平台的实现方式。采用 Docker 技术、基于 Linux 系统构造统一的 Docker 镜像,并通过 Docker 容器技术快速在服务器上将镜像部署成单独的实例。通过不同的 Docker 镜像快速实现对不同学生实践环境的部署,以及通过 Docker 容器技术能快速基于同一版本的 Docker 镜像部署多个相同的学生实践环境。基于 Docker 技术的学生实践平台快速部署能力实现原理如图 2 所示。

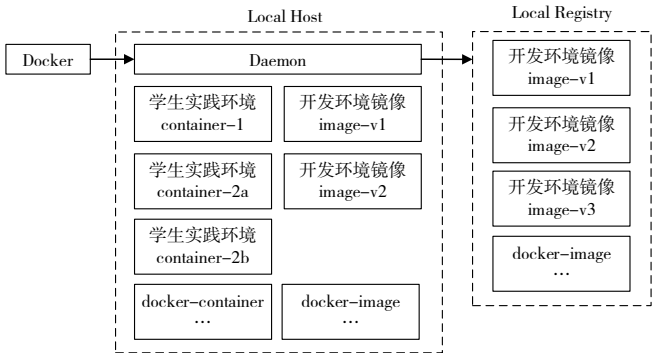


Fig. 2 Implementation principle of rapid deployment capability for student practice platform based on Docker

图2 基于 Docker 的学生实践平台快速部署能力实现原理

2.1.2 面向操作系统教学实验的 Web IDE 设计

学生实践环境通过 Docker 容器技术部署于服务器上,学生需要通过远程连接的方式进行操作系统实验。通常远程开发机的接入方式是通过 SSH,但是 SSH 连接方式没有图形化界面供学生进行操作系统实验,同时学生使用的各种系统工具以及开发软件都需要通过命令的方式进行交互。因此,本文设计通过 Web IDE 方式进行学生实践环境的远程接入与操作系统课程实验开发。通过 Web IDE 进行操作系统实验开发有两方面优势:一方面,通过 Web 接入远程服务器,对学生更友好、便捷;另一方面,Web IDE 为学生提供了图形化界面以及集成开发环境,可提高学生

开发效率。

独立开发一个功能齐全的集成开发环境的工作量巨大,短时间内不易实现,而且需要较长的时间周期来完善用户体验。集成开发环境经过多年发展,目前已有多种开源集成开发环境可供二次开发,开发者可以根据自己的需求进行针对性定制。通过对多种开源集成开发环境的调研,本文选用开源的 VS Code 作为 Web IDE 的基础,在此基础上针对操作系统实验所需的特定功能以插件形式进行开发,实现了面向操作系统教学实验的 Web IDE。

2.1.3 学生开发行为数据收集功能设计

教学团队需要对操作系统实验课程进行不断优化与改进,其中很重要的一部分就是收集学生在操作系统实验学习过程中的反馈。通过问卷收集、成绩分析等形式对学生学习情况进行分析,但这些数据并不能完全、准确地反映出学生整个实验过程的行为。Web IDE 作为操作系统实验的入口,通过收集学生在 Web IDE 上的操作数据,可以记录学生在整个实验过程中的开发行为。

基于 VS Code 的架构设计,通过开发扩展插件,能够快速实现 IDE 的功能拓展。在 VS Code 基础上,通过设计一个学生开发行为数据收集插件,从而收集学生在 Web IDE 上的学习行为数据。学生在 VS Code 上的所有行为都会触发对应事件。在 VS Code 启动之后,在 Extension Host 中自动加载学生行为数据收集插件,该插件能够创建一个独立的 Listener(监听器)。VS Code 对各类事件都进行了封装,提供相应的 API 接口,通过对文件创建、文件打开、文件保存、文件删除、光标移动、Terminal 命令等操作事件进行监听,而监听器收到 Events 消息后,能够根据触发的不同事件执行不同的操作记录程序,以实时记录学生开发行为数据以及时间信息,由此实现对学生开发行为数据的收集。学生学习行为数据收集流程如图 3 所示。

2.2 代码仓库管理平台

在操作系统实验教学过程中,学生并不是从零开始开发一个独立的操作系统。操作系统实验的教学方式通常是教学团队在一个小型的操作系统程序中,提取出其核心函数或核心模块,让学生独立实现核心函数或核心模块的功能,并结合操作系统其他代码运行整个操作系统。该学习模式需要实践平台支持教学团队初始代码下发、学生后

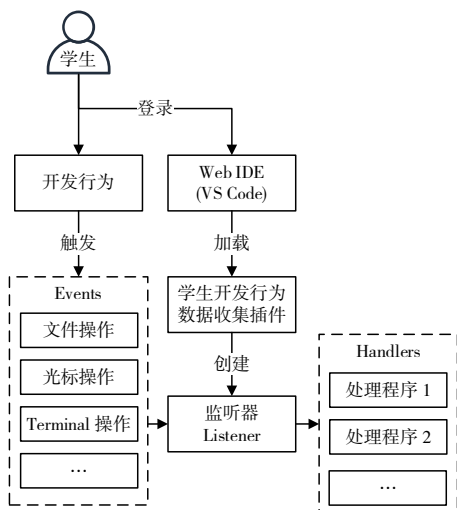


Fig. 3 Student learning behavior data collection flow

图3 学生学习行为数据收集流程

续操作系统代码上传等功能。

Git 是一个开源的版本库控制系统,能够高效地实现项目版本管理。目前借助开源的 GitLab 仓库管理系统,能够很方便地实现对学生项目代码的管理。学生实践平台在为学生创建开发实践环境前,先按照统一规则在 GitLab 上生成一个学生账号,并为其创建一个独立的 Project。对于学生来说,只有自己账号对应 Project 下的代码是可见的,并且学生可以通过 git clone、git pull、git push 等命令进行操作实验代码的获取与提交。对于教学团队,可以在统一平台上对所有学生的代码进行管理。同时,学生能利用 Git 的分支功能在不同分支上进行不同单元的操作系统实验。

课程团队需要对学生操作系统实验代码进行自动化评判。借助 Git 的 hook 机制,学生将对应分支的实验代码提交到代码仓库后,自动触发自动评测程序:将正确命名的可执行文件与 git 目录下的 hooks 子目录进行关联,即可激活此脚本,在不同时机被 Git 所调用。通过使用服务器端的 hook 可以对项目进行各种类型的强制性策略。在客户端将代码推送到服务器端时最先调用 pre-receive 脚本,通过编写和放置 pre-receive 脚本,能够实现在学生推送代码分支时对其进行自动评测。

学生实验代码开发完整流程如图 4 所示。学生通过 Git 命令与 Git 服务器进行交互,之后从远端仓库拉取实验代码,在自己的实践环境中完成代码开发与本地版本管理。开发完成后,使用 git push 命令将代码推送到远程服务器。服务器在接收到 Push 消息后,会自动触发 pre-receive 脚本。根据制定的自动评测脚本,在远程代码仓库更新前进行一次代码自动评测。

2.3 综合信息平台

为了方便教学团队查看实验课程各种数据,综合信息平台对实验过程中的各类数据进行了汇集与展示。为了方便数据展示,需要对展示数据进行收集与保存。其中,

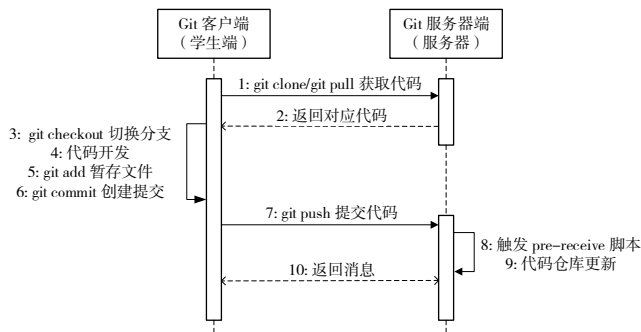


Fig. 4 Student experiment code development flow

图4 学生实验代码开发流程

学生实践环境中创建的容器 ID、Token、端口号等配置信息会被记录下来,学生实验代码评测成绩的自动评测结果会以文件形式存储在服务器上,学生开发行为数据存储在 Docker 容器对应的日志中。由于综合信息平台对数据的实时性没有很高要求,因此可通过设计定时任务对操作系统实验过程中的数据进行收集、加工及保存。

针对教学团队的需求,综合信息平台可将操作系统实验环境的相关信息整合,对操作系统实验过程中的学生实践环境、学生实验代码评测成绩、学生开发行为数据等综合信息进行集中展示。平台后端使用基于 MTV 模式的 Django 框架,并基于 Django Restful Framework 设计前后端交互的 API 接口,前端使用 Layui 框架进行搭建。数据库采用 MySQL 作为平台的存储,并使用 Redis 作为缓存。通过 Django 框架中 Model 的 ORM 层与 MySQL 数据库进行交互。

2.4 学习行为数据分析

通过记录学生在教学实践平台上的实验过程与信息,可以收集到学生的行为数据包括以下几部分:①学生所有登录信息,如登录时间、登录次数等;②学生阅读、运行和调试代码等信息,例如打开文件等;③git 服务器上对代码库的操作信息,例如代码提交次数等。针对这些数据可以进行如下分析,教师也可以根据数据分析发现的问题,进一步优化操作系统实验。

(1)登录分析。通过分析日志文件中的时间可以了解每个实验学生的平均登录次数和时长。学生的平均登录次数和时长反映了实验难度以及学生对实验的态度。根据这些反馈信息,教师可以对不同实验的难度进行调节。

(2)打开文件分析。由于操作系统实验难度较大,通常会将一些框架性代码提供给学生参考,学生通过阅读这些代码了解操作系统的设计。通过分析学生经常打开的文件,可以看出学生可能在哪些环节碰到困难。根据这些信息,教师可以加强对这些部分的讲解。

(3)git 收集的数据分析。git 服务器可以收集学生的代码提交次数,同时记录每次提交自动评测的成绩。根据提交次数和相应成绩,教师可以了解学生动态,分析学生对实验的掌握情况。

3 实践平台部署与测试

3.1 学生开发环境

本文开发的实验环境支持在 arm64 架构的主流 Linux 发行版下运行,并在 openEuler 20.03 LTS 环境下进行了测试。运行实验环境时,系统需要至少 4 GB 的物理内存,且需要安装以下依赖包:docker-engine(版本至少为 20.10)、Python3(版本至少为 3.7)、curl、sqlite、openssh。目前该环境已在华为云提供的弹性云服务器上被部署为测试环境。

本文实现了一个完整的基于 Web IDE 的面向操作系统实验的学生开发环境,并且实现了一键部署的能力。同时可以对其进行简单改造,以支持不同的操作系统实验。通过将 Web IDE 接入远程开发环境,实现操作系统实验开发、调试、运行、评测等功能。Web IDE 运行界面如图 5 所示。

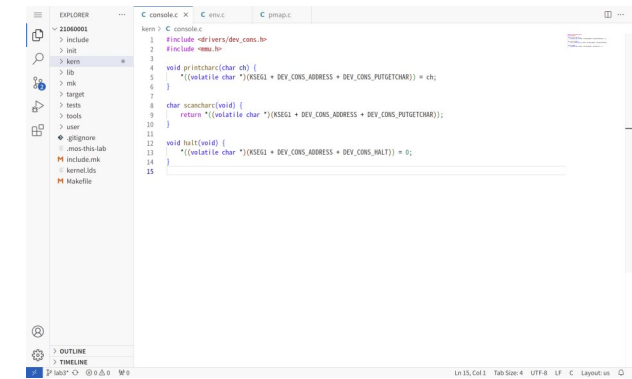


Fig. 5 Interface of the Web IDE

图5 Web IDE 界面

代码仓库平台基于 GitLab 实现。通过开源的 GitLab 代码仓库服务,可以对操作系统课程的学生代码进行管理,并将操作系统课程组的代码放在统一的 Group 中进行管理。在自动创建学生实践环境时,会自动为学生生成对应的 GitLab 账户添加到相应课程组中,并自动为学生创建对应的 Project 作为独立的代码仓库,如图 6 所示。每位学生只有对应 Project 的读写权限,其他学生的代码对其是屏蔽的。而教学团队拥有整个 Group 的控制权限,能够看到每个学生代码仓库的情况。Git 的提交记录能够清晰记录学生每次代码提交的内容,作为对学生学习情况的一种反映。

通过 Git 的版本管理,学生可以在自己代码仓库中的不同分支下进行不同单元的操作系统实验,不同单元间的代码可以保留且互不干扰。教学团队也能够为不同的代码分支运行相应实验单元的自动评测程序,并以代码分支的形式返回评测结果。

实验代码的自动评测基于 Git 的 hook 机制实现。自动评测脚本 pre-receive 会获取到学生本次提交的相关代码分支信息。由于各个操作系统实验单元是基于不同分支实现的,因此脚本首先判断本次提交的分支是否是实验单

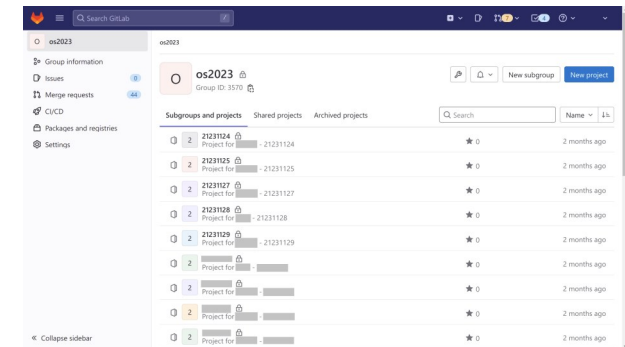


Fig. 6 GitLab repositories

图6 GitLab 仓库

元对应的分支。如果是需要评测的分支实验代码,则会判断本次提交的操作人是否为学生本人。如果是学生本人,则会将本次提交的代码克隆至指定路径,并且新建一个空的临时目录用于实验代码评测。

本文规定固定格式的 judge.sh 脚本文件作为自动评测程序的入口,因此在自动检测前会查看是否存在对应分支的自动评测脚本。如果存在,则会指定 judge.sh 脚本进行实验评测,并且返回评测结果。各实验单元的 judge.sh 脚本会在对应学生分支下加载测试程序,并构建实验代码。在仿真器中运行内核后,根据该单元的测试逻辑,将学生的输出与期望输出进行比对,并向 pre-receive 脚本返回 0 ~ 100 间的得分。此后,pre-receive 脚本会将评测结果记录在服务器对应的路径下,并将本次评测结果上传到学生仓库对应的 result 分支,学生通过拉取对应的 result 分支即能获取本次实验评测结果。同时基于课程需求,在学生通过本单元实验评测并且下一单元实验开放的前提下,会触发对应的 push 脚本,为学生推送下一单元分支的实验代码。

自动评测结果如图 7 所示,提供了学生在评测过程中所见的反馈信息。该评测在 lab-qmos 分支上进行,由于学生代码中未正确配置交叉编译器的路径,评测过程中出现构建失败,以红色文字进行了警告,因此返回的得分为 0。在评测结束后,将评测结果上传到学生仓库的 lab-qmos-result 分支,以供学生进行回顾。

3.2 综合信息平台

综合信息平台包括用户管理和信息统计平台两部分。

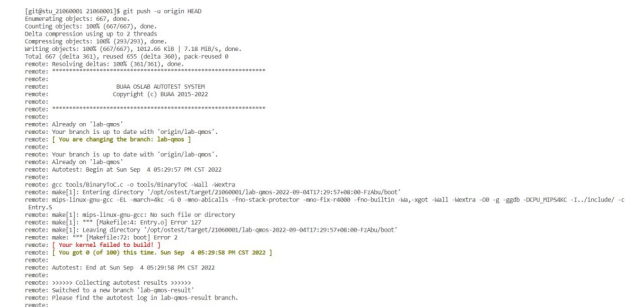


Fig. 7 Automatic evaluation results

图7 自动评测结果

用户管理模块主要包括用户登录和用户成员管理,在登录时对用户进行身份校验。登录成功后,服务器会返回随机生成的 Token 信息,以此实现对用户权限的鉴定,区分学生和教学团队能够访问的资源。信息统计平台通过定时任务收集实验评测结果,定时任务会遍历评测结果文件,其中只读取新增的评测结果文件,对学生各单元的所有评测结果仅保留最高成绩在数据库中,作为学生在此单元的成绩。

在学生实验成绩界面,信息统计平台为教学团队提供了丰富的表单功能,可以根据不同条件组合筛选对应的学生成绩。组合条件包括任课教师、任务类别、院系编号等筛选条件,按不同分数区间展示学生成绩。此外,平台还记录了学生代码提交次数、登录时间等信息。图 8 展示了本学期 533 名学生在操作系统课程各实验单元的得分情况,其中统计了约 35 740 次评测结果。各实验单元的得分分布均与实验难度相吻合,验证了自动评测程序与成绩统计的准确性。

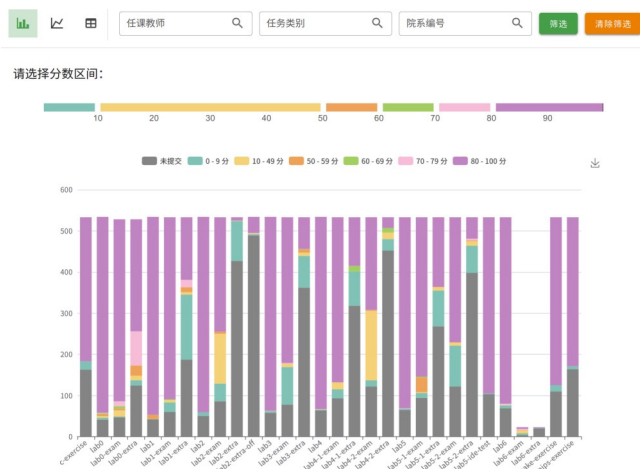


Fig. 8 Student score statistics

图8 学生成绩统计

3.3 实践与反馈

目前本系统已在 openEuler 社区开源,并在本学院 2022~2023 学年开设的操作系统实验课程中进行了实际应用。相比于在命令行界面下进行代码编写和调试的传统方式,本系统提供的 Web IDE 显著简化了学生和教学团队进行实验开发时的环境配置与操作流程,优化了学习、教学体验。基于自动评测的结果,综合信息平台提供了对学生实验成绩和行为数据的统计与分析功能,能够帮助教师了解不同学生的学习表现,对各实验单元的教学情况和难度进行实时评估,从而为实验设计和教学提供了参考。

通过使用基于 Git 的代码仓库平台,学生能够方便地对实验代码进行版本控制,并通过 Git Hook 获得实时的评测反馈,便于及时发现并解决代码存在的问题。各个实验单元均对应学生仓库中的不同分支,学生能够通过创建分支进行基于特定实验单元的增量开发,实现了增量式的实验设计。教学团队只需为不同实验分支编写评测脚本,即

可在系统中部署不同的操作系统实验,并允许学生通过统一的代码仓库进行开发和评测,使实验设计更加灵活。

4 结语

本文针对华为鲲鹏服务器和 openEuler 平台设计并实现了基于 Web IDE 的操作系统教学实践平台,该平台为学生和教学团队均提供了 Web 界面,可方便师生操作,从而优化了操作系统实验过程的体验。同时,基于 Docker 镜像的部署以及 GitLab 自动评测脚本框架,该平台能够通过替换镜像及评测程序以支持多种操作系统实验,有较强的通用性。该系统已在 openEuler 社区开源(<https://gitee.com/openeuler/taishan-oslab/>)。目前该操作系统实践平台实现了实验自动发布、实验开发、代码调试和运行等功能。通过该平台,可以收集学生的登录时间、登录次数、文件打开次数、代码提交次数等行为数据信息,为学习行为分析提供了数据基础。由于该平台 2022 年 10 月才在 openEuler 社区开源,目前的使用用户数量较少,北航课程上使用的时间也较短,因此积累的学习行为数据和对系统的反馈信息较少。将来会加强对用户反馈信息和学习行为信息的收集,通过分析反馈信息进一步改进与优化操作系统实践平台,为国内高校的操作系统相关实验提供参考。

参考文献:

- [1] KROCHMALSKI J. IntelliJ IDEA essentials[M]. Birmingham:Packt Publishing Ltd, 2014.
- [2] CHEN Z, MARX D. Experiences with Eclipse IDE in programming courses[J]. Journal of Computing Sciences in Colleges, 2005, 21(2): 104-112.
- [3] JAVED M, ESTEP M. Teaching undergraduate software engineering: Xcode mobile APP development during dedicated lab periods[C]//2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence, 2019: 843-848.
- [4] TUNC H, TADDESE A, VOLGYESI P, et al. Web-based integrated development environment for event-driven applications[C]//SoutheastCon, 2016: 1-8.
- [5] BALL T, BURCKHARDT S, DE HALLEUX J, et al. Beyond open source: the touch develop cloud-based integrated development environment[C]//2015 2nd ACM International Conference on Mobile Software Engineering and Systems, 2015: 83-93.
- [6] AANTONOVA, BARTKOVA S. An overview of the advantages of cloud computing and online IDE[J]. Automation of Technological and Business Processes, 2020, 12(3): 47-50.
- [7] Visual Studio Code. Visual studio code for the Web[EB/OL]. <https://code.visualstudio.com/docs/editor/vscode-web>.
- [8] HUAWEI Cloud. Overview of Huawei cloud IDE products and technologies[EB/OL]. <https://www.huaweicloud.com/product/ide.html>. 华为云. 华为云 IDE 产品与技术总览[EB/OL]. <https://www.huaweicloud.com/product/ide.html>.
- [9] HERDER J N, BOS H, GRAS B, et al. MINIX 3: a highly reliable, self-

- repairing operating system[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2006, 40(3): 80–89.
- [10] COX R, KAASHOEK M F, MORRIS R. Xv6, a simple Unix-like teaching operating system[EB/OL]. <https://pdos.csail.mit.edu/6.828/2023/xv6.html>.
- [11] HOLLAND D A, LIM A T, SELTZER M I. A new instructional operating system[C]//Cincinnati: Proceedings of the 33rd SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education, 2002.
- [12] GitBook. uCore OS Tutorial lab[EB/OL]. https://chyyuu.gitbooks.io/ucore_os_docs/content/.
- GitBook. uCore OS 实验指导书[EB/OL]. https://chyyuu.gitbooks.io/ucore_os_docs/content/.
- [13] OSCHINA. Mos introduction[EB/OL]. <https://gitee.com/osbuaa/mos>.
- OSCHINA. Mos 介绍[EB/OL]. <https://gitee.com/osbuaa/mos>.
- [14] XIANG Y, CHEN Y. Operating system (autonomous mode)[EB/OL]. <http://www.xuetangx.com/courses/course-v1:TsinghuaX+30240243X+sp/about>.
- 向勇, 陈渝. 操作系统(自主模式)[EB/OL]. <http://www.xuetangx.com/courses/course-v1:TsinghuaX+30240243X+sp/about>.
- [15] WANG L, ZHEN Z Q, WO T Y, et al. Quantitative analysis of the teaching effect of operating system courses based on learning behavior data[J]. Computer Engineering and Science, 2018, 40(S1): 63–71.
- 王雷, 甄子琦, 沃天宇, 等. 基于学习行为数据的操作系统教学效果量化分析[J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(S1): 63–71.
- [16] ZHU X J. Construction scheme of operating system experimental platform based on public cloud[J]. Computer Education, 2020(4): 159–162.
- 朱小军. 基于公有云的操作系统实验平台建设方案[J]. 计算机教育, 2020(4): 159–162.
- [17] YUAN L, WANG H M, YIN G, et al. Mining and analyzing behavioral characteristic of developers in open source software[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(10): 1909–1918.
- 袁霖, 王怀民, 尹刚, 等. 开源环境下开发人员行为特征挖掘与分析[J]. 计算机学报, 2010, 33(10): 1909–1918.
- [18] LI C Y, HONG M. Analysis on behavior characteristics of developers in Github[J]. Computer Science, 2019, 46(2): 152–158.
- 李存燕, 洪玫. Github 中开发人员的行为特征分析[J]. 计算机科学, 2019, 46(2): 152–158.
- [19] GAO Y Q, HE Y P. Establishment and practice of computer virtual simulation experiment teaching platform[J]. Software Guide, 2022, 21(8): 183–187.
- 高永强, 何沂沛. 计算机虚拟仿真实验教学平台建设与实践[J]. 软件导刊, 2022, 21(8): 183–187.
- [20] XIA K T, LIN F, ZHANG C, et al. Design of remote experimental platform for hardware courses based on MOOC and FPGA technologies[J]. Software Guide, 2022, 21(2): 144–148.
- 夏开堂, 林菲, 张聪, 等. 基于 MOOC 的 FPGA 硬件类课程远程实验教学平台设计[J]. 软件导刊, 2022, 21(2): 144–148.
- [21] DONG Q X, XUE Y M, SHI Q L, et al. Construction of Internet of Things control system lab platform for new engineering talent training[J]. Software Guide, 2023, 22(7): 98–103.
- 董乔雪, 薛一鸣, 石庆兰, 等. 面向新工科人才培养的物联网控制系统实验平台建设[J]. 软件导刊, 2023, 22(7): 98–103.
- [22] YANG X W, ZHANG Y, XIONG F G, et al. Exploration of teaching reform practice of operating system course for system capability cultivation[J]. Computer Knowledge and Technology, 2024, 20(16): 159–162.
- 杨晓文, 张元, 熊风光, 等. 面向系统能力培养的操作系统课程教学改革实践探究[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(16): 159–162.
- [23] ZHANG S N, ZHENG C Y, HU B, et al. Reform of operating system course highlighting the cultivation of engineering practice ability[J]. Computer Education, 2024(6): 227–231.
- 张赛男, 郑长友, 胡斌, 等. 突出工程实践能力培养的操作系统课程改革[J]. 计算机教育, 2024(6): 227–231.

(责任编辑:黄健 刘晶)