

文章编号: 1672-5913(2016)05-0135-04

中图分类号: G642

# 面向实验过程的操作系统实验集成环境

王雷, 高超, 沃天宇

(北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100083)

**摘要:** 基于教学质量蕴含在教学过程中的思想, 提出一个实验代码自动发布、测试以及评测结果反馈的面向实验过程的操作系统实验集成环境, 介绍该集成环境的设计过程。

**关键词:** 操作系统; 实验集成环境; 实验过程管理

## 1 背景

操作系统是计算机系统中软件与硬件的纽带。课程内容丰富, 既要讲授关于操作系统的基础理论, 又要让学生了解实际操作系统的设计与实现。操作系统实验设计正是该课程实践环节的集中表现, 不仅使学生巩固理论学习的概念和原理, 同时培养学生的工程实践能力。国内外大学都非常重视操作系统实验设计<sup>[1-6]</sup>, 我们尝试了诸如 Linux、Windows 等很多实验, 并在 2007 年引入 MIT 的操作系统实验<sup>[7]</sup>。该实验让学生在—学期内完整地实现一个小型的操作系统, 能极大提高学生的工程实践能力。2009 年在北航计算机学院的支持下, 我们将该实验从 x86 平台移植到 MIPS 平台, 并进行适当简化<sup>[8]</sup>。由于小型操作系统实验比较难, 我们一直采用 4 人—组的方式来完成实验。这种方式带来的直接问题是很难区分同一组学生的工作量和学习效果。

通过对实验教学的反思, 我们发现存在下述问题:

(1) 精英教育转为普及教育问题。在教学改革过程中我们会经常将实验班与普通班相比, 实验班的学生素质、学习态度都比较好, 只要稍加指导, 他们就能很好地完成教学任务; 普通班学生则需要更精细的指导。由于学生人数和作业量的增加, 教师很难提供细粒度、及时的指导。

(2) 复杂软件环境问题。操作系统实验需要安装 Linux、GCC 和仿真器等复杂软件, 由于没有一个集成环境, 学生面临软件 Linux、GCC 和仿真器版本问题。

(3) 与学生沟通问题。由于完成操作系统实验需要较多的预备知识, 学生感觉不会的东西很多、实验很难, 但又说不出到底什么地方难。

正如软件工程中强调的“软件质量蕴含在软件开发过程中”, 同样教学质量蕴含在教学过程中。因此, 我们解决这些问题的基本思路是: 通过自动化工具管理整个教学实验过程, 将实验的发布、提交、评判等工作自动化以减少指导教师的工作; 同时, 分析实验过程中学生的行为数据, 找出不同学生的问题, 提供细粒度的指导。

## 2 操作系统实验内容简介

调研了多所高校的 MIT、CMU 等操作课程设计后, 我们基于 MIPS 平台, 让学生在操作系统课上开发一个实际的小型操作系统。实验包含以下 6 个部分。

实验 1: 启动和系统初始化: 通过分析硬件启动过程, 理解操作系统内核的链接、加载和重定位。通过实现一个串口输出函数。

实验 2: 内存管理实验: 理解 MIPS 内存布局, 实现操作系统对物理内存和虚拟内存空间的管理。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61272167)。

第一作者简介: 王雷, 男, 副教授, 研究方向为操作系统、复杂网络, wanglei@buaa.edu.cn。

实验3：进程管理：实现时钟中断处理程序，编写进程创建、进程中止和进程调度程序，实现进程管理。

实验4：系统调用：掌握 MIPS 平台上系统调用的实现方法，实现相关系统调用。

实验5：文件系统：实现一个简单的文件系统，掌握文件系统的实现方法。

实验6：命令解释程序：实现一个具有基本功能的命令解释程序，将6部分链接起来，使之成为一个可运行的操作系统。

### 3 操作系统实验集成环境设计

作为一门实验课程，一次实验课程的整个流程包括：初始代码的发布、代码编写、调试运行、学生代码的提交、编译测试以及评分结果的反馈；为了分析学生的学习过程数据，我们在集成环境中设计了一套用来追踪学生学习过程的部件。另外，为了适应教学要求，同时方便辅助教学，我们采用 git<sup>[9]</sup> 进行版本管理，保证学生之间的代码互不可见，而老师和助教可以方便地查看每位学生的代码，为学生解决问题。

整个环境的结构如图1所示。为了满足实验需求，操作系统分为以下几个部件：①虚拟机平台，包含实验需要的开发环境，如Linux环境、交叉编译器、MISP仿真器等。②git服务器，包括学生各个实验的代码以及相关信息。③自动评测和反馈，这部分集成在git服务器中。④追踪

学习过程的工具，集成在虚拟机中完成对学生学习过程的追踪与分析。

#### 3.1 虚拟机平台

操作系统实验涉及多个系统软件开发工具，如交叉编译器 gcc、仿真模拟器 Gxemul 等。在学生缺乏相关编译知识（根据目前教学计划，编译原理课程在操作系统之后一个学期开设）和系统软件开发经验的情况下，如何让学生快速构建一个开发环境，也是影响实验课进度和效果的因素之一。由于本课程选择 MIPS 平台作为操作系统目标平台，在先前的实践中，发现仅仅通过实验指导书的形式让学生自行搭建开发环境，会遇到大量的基础软件安装与配置问题，例如学生在 Windows、Linux、MacOS 等不同环境下搭建 MIPS 操作系统开发环境，会产生版本依赖等一系列问题，耗费大量教师和助教资源解决这类问题，严重阻碍实验核心内容的顺利开展。

为了简化学生构建实验环境的过程，同时加强对学生学习过程的数据收集，我们采用虚拟机作为实验后端，在虚拟机中部署统一的 Ubuntu Linux 12.04 系统、系统仿真器 Gxemul v0.4.6、可生成 MIPS 目标代码的 gcc v4.0.0 交叉编译器，并指定 vi 作为文件编辑器，同时部署了必要的学习过程监控工具，实现学生实验环境的标准化，并且要求整个实验过程均在虚拟机中进行，以便采集学生学习的全过程数据。每位学生在虚拟机中拥有一个普通权限的 Linux 账号，学生只需要一个 ssh 客户端，就可以登录系统完成实验。

借助虚拟机管理平台（VMWare）的克隆机制实现多节点实验服务器快速部署，既避免了软件版本冲突问题，节约学生安装实验环境花费的时间，也为我们的自动评测系统打下了基础。同时，采用虚拟机的实验平台可以实现快速部署和归档，使得实验资源规模可以根据选课学生数量调整，实验后能够长期保存学生实验过程资料。在2015年的操作系统实验课程中，通过部署9台虚拟机（每台配置为2 CPU、4GB内存），支持了

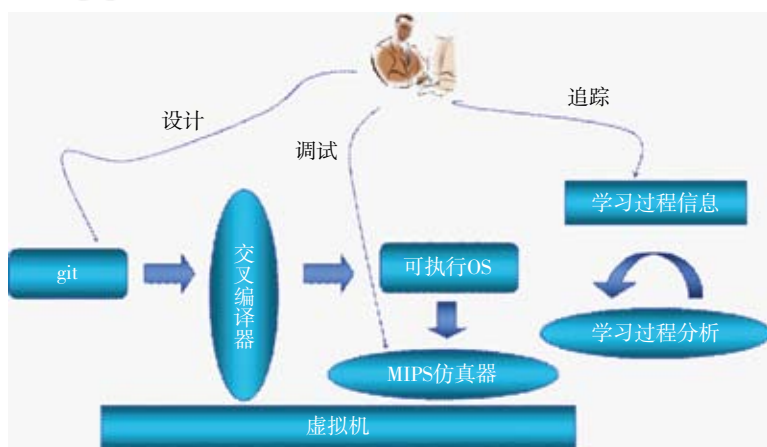


图1 操作系统实验集成环境结构

158 名学生的在线实验。

### 3.2 Git 服务器

为了保证学生代码安全,同时提供方便的代码版本管理工具,我们部署了一个 git 服务器,每位学生的代码编写过程在虚拟机中完成,同时将代码提交到 git 服务器中,从而避免磁盘损坏等系统故障带来不必要损失,影响实验开展。同时,我们实验的发布、测试结果的反馈均通过 git 服务器完成。

在 git 服务器中,每个学生拥有一个独立的代码库,对于每位学生来说,只有自己的代码库是可见的,每位学生可以随意下载和提交自己代码库中的代码。同时,所有学生的代码库助教和老师是可见的,助教和老师都可以下载学生代码。

学生可以自行建立分支并提交到 git 服务器实现代码版本管理,labX (X=1……6)这 6 个分支为我们认定的有效实验分支,这些分支分别代表实验 1 到实验 6 的最终结果,我们会评测这些分支中的代码。学生通过了某个实验,下一个实验对应的分枝也会自动出现在学生的代码库中,从而监控学生的学习进度。

### 3.3 自动评测

由于学生人数众多,对于学生实验代码的评判是一个繁复、机械化的过程,通过每个助教和老师手动评测非常困难。通过部署自动评测系统实现对学生提交的代码自动给出相应的评分。当学生向 git 服务器的有效实验分枝提交代码后,通过 git 的 hook 机制触发自动评测系统。评测系统获取学生最新代码,依次完成编译、仿真运行,并根据运行结果的控制台输出进行测试,最终给出评测结果。评测结果自动反馈到 git 服务器中学生代码库的特定分枝中,以便学生查看。如果学生通过了评测,则直接发布下一次实验的内容,这样改变了原有所有学生按照固定教学计划进度开展实验的模式,让有能力的同学尽早开始高难度实验,实现个体差异化培养,提升整体实验课效果。自动评测系统集成在 git 服务器中,整个评测过程如图 2 所示。

### 3.4 追踪学习过程

通过课程实验培养学生能力需要更加关注学生的学习过程。因此评价学生的学习效果也不应仅仅依赖实验结果和实验报告给出最后分数,需要综合考虑实验的过程,更加客观准确地评价学习效果。然而,如何细粒度地掌握学生学习的过程,及时发现实验过程中学生遇到的共性问题,

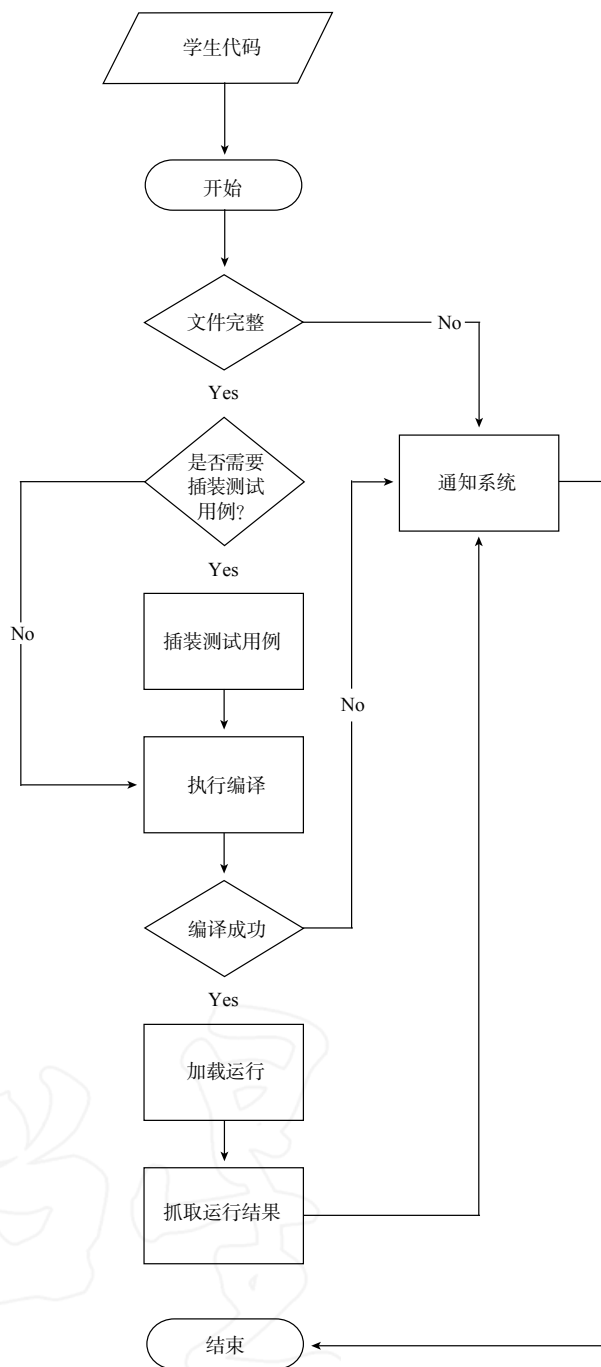


图 2 自动评测过程

实现精细化的指导,这些都面临着学生实验操作收集与分析的难题。通过在集成环境中部署交互追踪与记录程序,可以实现细粒度的实验过程跟踪,包括学生对特定源代码文件的访问以及各类键盘操作等。

在实验集成环境中,所有用户通过 ssh 连接虚拟机,使用 vi 作为文本编辑工具完成实验要求的程序编写,并在虚拟机内调试。我们在后台收集并记录学生的各种信息,以便事后还原和分析学生的整个实验过程。在最终成绩评定过程中,综合过程信息,例如阅读代码数量等,从而可以更加客观准确地反映学生学习效果,避免实验过程抄袭。同时,可以根据学生浏览代码的情况,分析得出实验过程中的难点。

#### 4 实施效果

2015年,我们完成了操作系统实验集成平台并投入使用。每位学生登陆自己的账号,同时从 git 服务器下载自己的代码库开始进行编码工作,git 服务器中允许学生创建自己的分支进行版本管理。我们将 labX (X=1……6)分支作为评测的对象。学生所有的工作都需要在自己的代码库中完成。

当学生完成实验,通过 git 命令,将各自的代码推送到 git 服务器;我们收到学生提交的代码,其中 labX (X=1……6)分支中的代码更新之后进行评测;当评测结果与上次相比发生变化,将结

果推送到学生的代码库;若学生通过评测,将下一次的实验代码推送到学生的代码库。

#### 5 结语

北航操作系统实验设计在 2013 年开始在一个 20 人的实验班中采用基于 MIPS 的小型操作系统。由于实验班的学生水平相对较好,实验完成度很高,在 2013 年的实验班中 100% 的人都完成了前 4 个实验,其中 70% 的同学完成了实验 5 和 6。在 2014 年开始,面向整个学院(255 人)实验每人独立完成操作系统实验。由于没有一个自动化的实验环境,在 2014 年只有 38% 的同学完成了实验 4,8% 的同学完成了实验 5 和 6。在 2015 年,我们完成了整个实验平台后,课程同样面向整个学院(158 人)开设,其中实验 4 的完成度高到了 62%,同时实验 5 和实验 6 的完成度提高到了 46%,从这些数据可以看出,实验平台对学生的实验帮助很大。同时,通过分析学生第 1 个实验的过程数据,我们发现了学生预备知识不足、不重视硬件体系结构相关代码阅读等问题。在第 2 个实验中,我们通过增加实验时间、讲解硬件相关代码等措施及时加以解决,从而避免了以前很多问题都需要到下一个学期才能解决。该集成环境使我们真正实现了对实验过程的持续改进。

目前我们在北航建立了一个外网可以访问的操作系统实验集成环境,有兴趣试用的老师可以与我们联系。

#### 参考文献:

- [1] Stanford University Pintos Project [EB/OL]. [2015-12-29]. <http://www.stanford.edu/class/cs140/projects/pintos/pintos.html>.
- [2] 清华大学. 教学操作系统ucore[EB/OL]. [2015-2-25]. <http://os.cs.tsinghua.edu.cn/oscourse/ucore2012>.
- [3] Harvard University OS/161[EB/OL]. [2015-6-27]. <http://www.eecs.harvard.edu/~syrah/os161/>.
- [4] Cox R, Kaashoek M F, Morris R. Xv6, a simple Unix-like teaching operating system [R]. 2011-9-11
- [5] 张玉宏, 张玉, 程红霞. 操作系统课程设计的实践教学尝试[J]. 计算机教育, 2015(14): 19-20.
- [6] 叶保留, 费翔林, 骆斌, 等. 南京大学操作系统原理与实践国家精品课程建设[J]. 计算机教育, 2014(7): 12.
- [7] MIT6.828: Operating System Engineering[EB/OL]. [2015-12-10]. <http://pdos.csail.mit.edu/6.828/2009/schedule.html>.
- [8] 王雷, 操作系统实验设计[J]. 计算机教育, 2009(17): 16.
- [9] Git.git-distributed-is-the-new-centralized[EB/OL]. [2015-12-23]. <http://git-scm.com/doc>.

(编辑: 郭田珍)