

# 支持自动评测的计算机体系结构课程实验管理系统\*

吴强 彭蔓蔓 贺旭 张吉良 许邦建 刘彦

湖南大学信息科学与工程学院, 长沙, 410082

**摘要** 针对计算机体系结构课程中软件和硬件实验自动评测的问题, 参考软件程序设计的线上裁判设计思路, 提出支持软硬件设计自动评测的实验管理系统设计方案, 利用开源和免费软件完成了该实验管理系统的构建, 对该实验管理系统的优势和不足进行探讨。

**关键字** 计算机体系结构课程实验, 自动评测, 实验管理系统

## Lab Management System Supporting Automatic Grading for Computer Architecture Course

WU Qiang PENG Manman HE Xu ZHANG Jiliang XU Bangjian LIU Yan

College of Information Science and Engineering  
Hunan University

Changsha 410082, China

{wuqiang, pengmanman hexu2015, zhangjiliang, bjxu, liuyan}@hnu.edu.cn

**Abstract**—To make automatic grading of software and hardware labs for computer architecture course, the paper follows the idea of online judge for software programming and proposes a design of the lab management system supporting automatic grading which utilizes open source and free software tools to implement the system. A discussion of the benefits and shortcomings of the system is made at the end of the paper.

**Keywords**—Computer Architecture Course Labs, Automatic Grading, Lab Management System

## 1 引言

计算机体系结构课程是计算机科学与技术及其相关专业的重要核心课程, 其内容涉及计算机硬件设计、编译技术、操作系统接口等, 对于计算机相关专业的学生包括研究生而言, 都是比较难的。通过实验教学来提高计算机体系结构课程的教学效果, 是计算机体系结构教学改革中的重点之一<sup>[1-4]</sup>。

计算机体系结构的课程实验通常包括软件和硬件两方面的任务。软件方面通常是通过软件程序模拟仿真硬件功能, 验证或研究硬件设计方案的效果。硬件方面通常是通过硬件设计实现不同的硬件部件, 直接把理论知识转化为实践技能。这些软硬件实验对于实现计算机体系结构课程的教学目标是十分必要的, 设计并管理好课程实验对于提升计算机体系结构课程教学效果非常重要<sup>[3,4]</sup>。

随着互联网的发展, 在线教学方式已广泛应用到计算机相关课程的教学<sup>[5,6]</sup>。自动评测技术也运用到了有些课程的实验管理之中, 显著提升了实验教学效果<sup>[7]</sup>。如何利用互联网技术, 结合自动评测技术, 实现高效的计算机体系结构课程软硬件实验管理系统, 是值得研究的问题。

## 2 系统架构

### 2.1 系统目标

考虑到软硬件实验管理的需要, 计算机体系结构课程实验管理系统拟达到表1所示的目标。

首先, 系统应该支持全流程的实验管理, 包括实验任务发布、实验代码和文档提交、实验结果评测等环节。实验任务的发布由教师或助教完成, 主要是实验任务描述、实验参考资料和实验结果的要求等。实验任务的具体操作由于可能涉及不同软件和硬件工具, 难以形成统一的流程和接口, 因此不由本系统管理。实验任务完成后, 学生提交相应的代码和数据文件到系统中。系统可以对代码和数据进行评测, 检查是否符合参考结果, 给出评分。

\***基金资助:** 本文得到湖南省研究生优质课程建设项目“高等计算机体系结构”(531119100138)和湖南省教改项目“新工科计算机系统能力培养课程体系研究”(HNJG-2021-0351)的支持。

其次,系统应该支持对软件程序和硬件电路设计的自动评测。计算机体系结构课程实验的软件程序设计任务通常是用 C 或 C++ 程序设计语言编写程序,模拟某个硬件部件功能或操作过程,可以根据程序运行的输入和输出是否符合参考结果来判定是否正确。硬件电路设计任务通常是实现某个硬件部件,实验结果通常是以 VHDL 或 Verilog 代码的形式提交。这也可以通过 VHDL 和 Verilog 代码仿真来检验设计的正确性。因此,实现对计算机体系结构课程软硬件设计实验任务的自动评测是可行的。

表 1 计算机体系结构课程实验管理系统目标

序号	目标	备注
1	支持全流程实验管理	包括实验任务发布、实验文档提交、实验结果评测等
2	支持对软件和硬件设计自动评测	软件方面支持 C/C++, 硬件方面支持 VHDL、Verilog
3	零采购成本	全部采用开源或免费软件构建

第三,考虑高校教学经费有限,本系统应该完全采用开源或免费软件来构建,实现零采购成本。计算机体系结构方面的开源和免费软件不少,已经能支撑计算机体系结构课程实验需要<sup>[8]</sup>。采用恰当的设计方

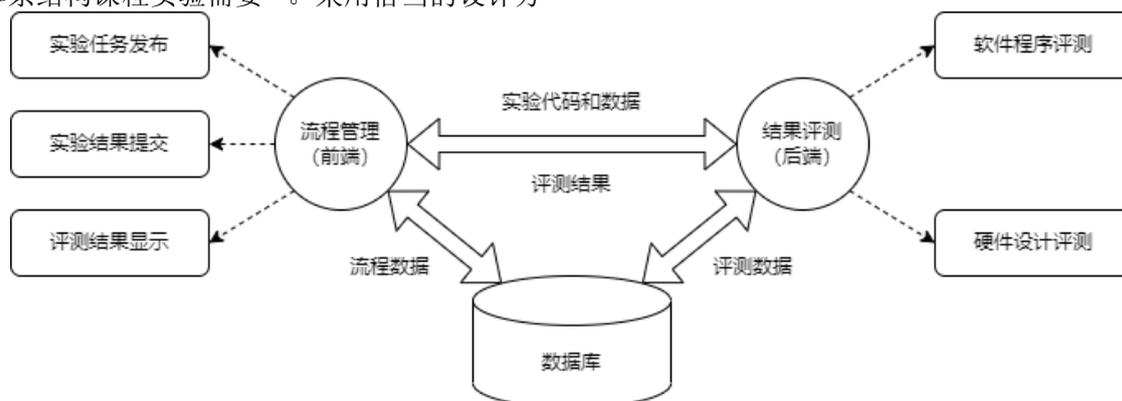


图 1 计算机体系结构课程实验管理系统基本框架

### 3 自动评测

自动评测技术一个典型的成功应用实例是 ACM 程序设计竞赛的线上裁判系统(Online Judge)。参赛学生按照赛题要求编写程序,然后上传到 ACM 程序设计竞赛的网站,线上裁判系统会自动编译执行该程序,并将输出结果与参考答案进行比较,给出评判结果。计算机体系结构课程中的软件和硬件设计实验可以按照这个思路来设计自动评测器。

#### 3.1 软件设计自动评测

计算机体系结构课程软件设计实验通常是模拟某个硬件部件功能或操作过程,例如模拟高速缓存对于访存请求的响应,程序设计语言通常是 C 或 C++ 语言。

案,可以实现本系统的零采购成本构建,达到期望的目标。

#### 2.2 基本框架

从系统目标来看,实验管理系统主要有两大功能,一个是实验流程管理,一个是自动评测。实验流程管理直接与课程师生交互,作为前端。自动评测对提交的实验代码和数据进行评判,作为后端。为统一管理流程信息和评测结果,采用数据库作为集中存放设施。因此系统基本框架如图1所示。

课程师生首先需要注册到系统中成为用户。教师和助教可以创建课程,发布课程实验任务,描述实验目标、实验资料和实验要求。同时,教师和助教需要设置实验结果提交日期、评测方法等信息。学生根据实验任务描述进行实验,将软件程序或硬件设计代码,以及必要的实验数据作为实验结果提交到系统中。系统会根据教师或助教设置的评测方法,执行对应的软件或硬件评测脚本,对比参考结果,对学生实验结果进行评测,给出评分。数据库会记录师生信息、课程信息、实验任务信息、结果提交和评测信息,便于流程管理和评测管理。

这种类型的实验可以使用类似 ACM 程序设计竞赛中的线上裁判方式进行自动评测。

教师在实验任务发布时,指定可执行文件的名称、输入数据格式和输出数据格式,即可编写评测脚本,调用编译器对学生提交的程序进行编译,然后执行并提供输入数据,并根据输出数据格式的规定检查输出结果。

如果实验任务较为复杂,程序设计可能包含多个源文件,需要专门的 Makefile 或其它脚本进行编译,那么教师可以在实验任务发布时也指定编译脚本名称,在评测学生提交的程序时,直接调用该脚本进行编译。

评测脚本可以使用命令行脚本或 Makefile 的形式，或者使用脚本语言，例如 Python。一个 Makefile 形式的简单评测脚本如下所示：

```
.PHONY: judge
judge:
make -f Makefile.lab1 || $(error “编译有错误，请查看日志”)
./lab1.exe input.lab1 output.lab1 || $(error “运行有错误，请查看日志”)
diff output.ref1 output.lab1 || $(error “结果比较有错误，请查看日志”)
```

为简洁起见，上述脚本中的命令省略了利用输出重定向产生日志文件的部分。该评测脚本默认“Makefile.lab1”为编译所使用的 Makefile 文件，可执行程序名称为“lab1.exe”，接收“input.lab1”和“output.lab1”，分别作为输入数据文件和输出数据文件。结果评判的参考文件是“output.ref1”。如

果学生按照这些要求设计程序和数据文件，就可以通过该评测脚本进行评测。

评测脚本可以调用任何支持脚本执行接口的程序，因此一些使用专门模拟器的实验任务，只要其模拟器支持脚本执行，且输入输出支持文件形式，也可为其编写评测脚本实现自动评测。

### 3.2 硬件设计自动评测

计算机体系结构课程中有不少硬件设计实验，主要是 CPU 和存储器的各个部件硬件设计，以及输入输出设备的接口电路设计。通常这些硬件设计会让学生以画电路图或编写硬件描述语言代码的方式完成，结果通过模拟仿真来验证。图 2 给出了硬件设计的基本仿真流程。

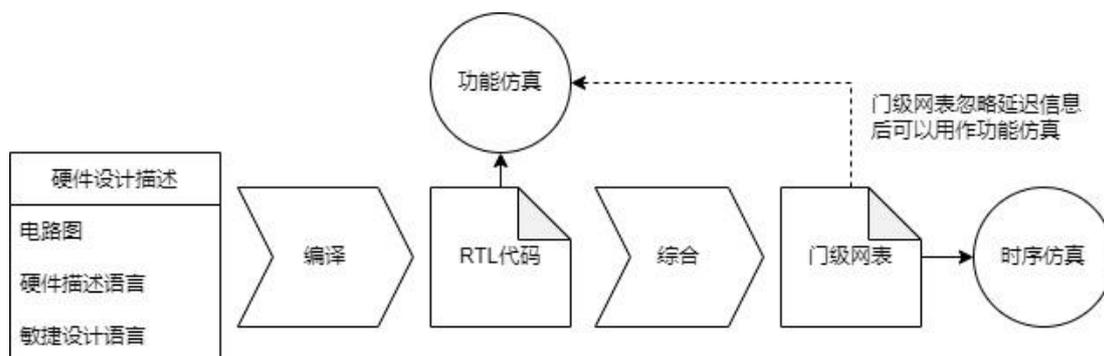


图 2 计算机体系结构课程实验硬件仿真基本流程

计算机体系结构实验通常完成功能仿真即可，有的硬件设计实验任务会需要进行时序仿真。

硬件模拟仿真需要用到硬件设计描述的编译器、综合器，以及仿真软件。这些软件基本都支持脚本执行，因此可以通过编写脚本来自动完成上述流程，最后，将模拟仿真结果与参考结果进行比较，就可以完成自动评测。以开源的 VHDL 仿真软件 GHDL 为例，其自动评测脚本如下所示：

```
ghdl -a lab1.vhd lab1_test.vhd >> lab1.log 2>&1
ghdl -e lab1_test >> lab1.log 2>&1
ghdl -r lab1_test --vcd=lab1_test.vcd >> lab1.log 2>&1
diff lab1_ref.vcd lab1_test.vcd || $(error “结果比较有错误，请查看日志”)
```

上述脚本利用 GHDL 软件对学生提交的“lab1.vhd”代码进行编译，与教师提供的测试平台文件“lab1\_test.vhd”一同编译，生成可执行的“lab1\_test”程序。然后 GHDL 会执行“lab1\_test”程序，生成“lab1\_test.vcd”波形文件。脚本随后将

“lab1\_test.vcd”波形文件与参考波形做比较，根据比较结果判断设计是否正确。

由于开源的仿真软件一般只支持功能仿真，如果需要进行时序仿真，那么需要用到商业软件，例如 Xilinx 的 Vivado 系列 FPGA 设计软件以及 ModelSim 等软件。通常商业软件会提供工具命令语言（Tool Command Language, Tcl）接口，支持以批处理形式执行 Tcl 脚本，并提供了从硬件设计工程中生成用于综合、仿真脚本的功能，可以省去编写 Tcl 脚本的工作。例如 Xilinx 的 Vivado 设计软件采用如下命令执行 Tcl 脚本：

```
vivado -mode batch -source <your_Tcl_script>
```

时序仿真的结果通常不能通过简单的文件比较来进行评测，需要根据硬件功能和时序约束编写相应的检查程序，而且也不一定完全自动化。因此本实验管理系统对于自动评测的支持主要针对功能仿真，时序仿真的自动评测主要针对不太复杂的硬件设计实验。

## 4 系统构建

### 4.1 软件工具选择

支持自动裁判的软件程序设计系统在国内不少大学都有了成功的应用,例如 CMU 的 Autolab 系统,中国科技大学的在线裁判系统等。构建计算机体系结构课程实验管理系统可以在这些系统基础上,结合硬件设计的开源或免费软件来完成。表 2 给出了本实验管理系统采用的开源和免费软件。

其中支持硬件自动评测的软件工具主要包括开源软件和免费版商业软件。开源软件包括 GHDL/Verilator,分别用于 VHDL 和 Verilog 的编译和功能仿真。用于时序仿真的商业软件均选择其免费版,以实现零采购成本的目标。

### 4.2 安全运行环境

由于自动评测时要运行学生所提交的软件程序或对硬件设计进行仿真,为保证运行环境的安全,本实验管理系统采用了 Docker 软件来建立虚拟运行环境,使得评测中的程序与实验管理系统本身的运行隔离开,避免因评测中程序的错误导致系统崩溃。

Docker 镜像基于 Ubuntu 20.04 系统,预装了“build-essential”,“ghdl”,“verilator”等软件包。商业软件包则需要手工安装。由于商业软件体积庞大,如果实验中没有需要进行硬件设计时序仿真的任务,可以不安装商业软件。不带商业软件的 Docker 镜像大小为 421MB。

表 2 计算机体系结构课程实验管理系统采用的软件工具

序号	软件	备注
1	Autolab	提供实验任务发布、实验文档提交等功能
2	Tango	提供自动评测服务,调用自动评测脚本
3	GCC/Make等	软件设计自动评测所需的编译工具
4	GHDL/Verilator等	硬件设计自动评测所需的编译、仿真开源软件
5	Vivado/Quartus/ModelSim	用于时序仿真的免费版商业软件
6	Docker等	构建安全运行环境的工具软件

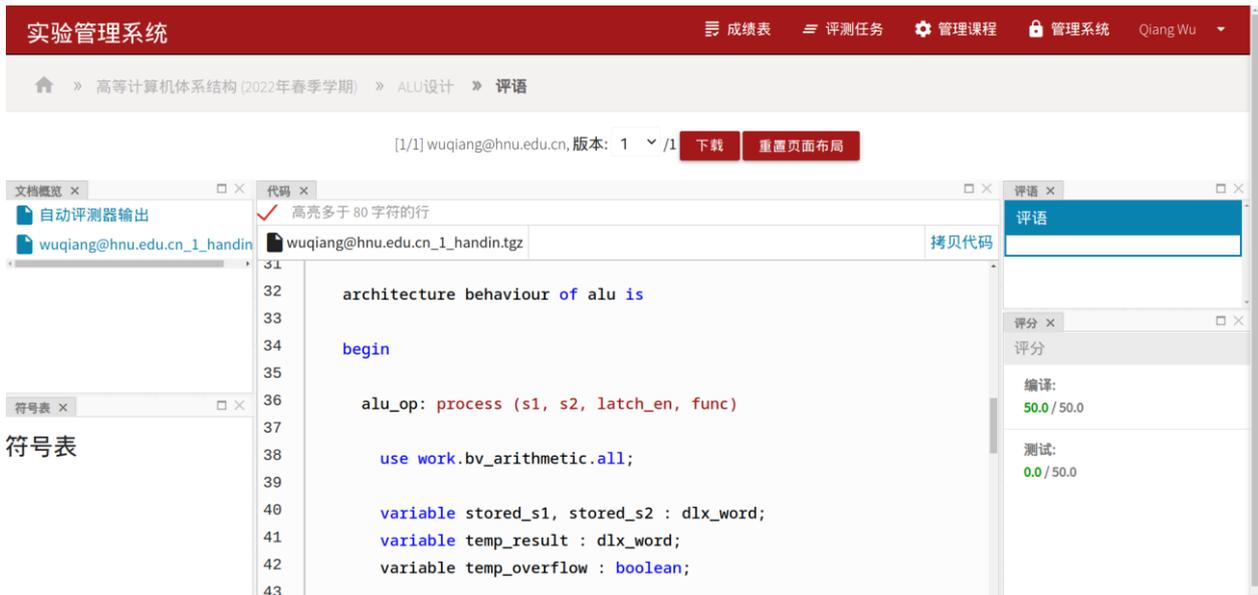


图 3 计算机体系结构课程实验管理系统

### 4.3 优势和不足

本实验管理系统的主要优势在于:

(1) 支持硬件设计的自动评测。

(2) 主要采用开源软件构建,实现了零采购成本。这对于提升计算机体系结构课程实验教学效率可以起到有力的促进作用。图 3 展示了一个运算器设计的自

动评测例子,可以看到代码通过了编译,但测试未通过。

本系统主要的不足在于:

(1) 硬件设计的时序仿真需要借助于商业软件,虽然商业软件通常提供了免费版本,但能支持的硬件设计规模有限。

(2) 对时序仿真的自动评测支持有限, 较为复杂的硬件设计实验可能还需要人工评测。

## 5 结束语

本文介绍了如何采用开源软件构建支持自动评测的计算机体系结构课程软硬件实验管理系统。该系统利用命令行脚本, 将实验代码的编译、运行和测试工作自动完成, 并通过实验代码运行结果与参考结果的比对, 自动判断实验结果是否正确, 减轻了实验评测的负担, 可以有力地提升计算机体系结构实验教学的效率。下一步的工作将探寻利用开源软件取代商业软件进行硬件设计的时序仿真, 并进一步研究对时序仿真结果进行自动评测的方法。

## 参考文献

- [1] 郑纬民. 教育部—Intel 精品课程“高等计算机系统结构”内容介绍[J]. 计算机教育, 2008, 03:74-75
- [2] 王志英, 李宗伯, 钱程东, 张晨曦. “计算机体系结构”国家精品课程的特色与建设经验[J]. 计算机教育, 2007, 07:27-28+31
- [3] 沈立, 张春元, 王志英. “计算机体系结构”课程实验教学建设[J]. 计算机教育, 2011, 22:88-91
- [4] 张晨曦, 林冰轩, 刘依, 李江峰. 计算机系统结构课程实验方案设计[J]. 计算机教育, 2012, 02:91-94
- [5] 李宁, 张晓, 赵晓南, 刘海龙, 李战怀. MOOC 下的计算机软件课程虚拟实验研究与实践[J]. 计算机教育, 2019, 04:145-149
- [6] 单子鹏, 朱弘飞. 基于云计算技术的教学实验系统设计与实践[J]. 计算机教育, 2016, 05:139-142
- [7] 张晓莹, 卢卫, 程一艘, 等. 面向慕课的在线 SQL 自动评测系统及应用[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(4):16-22
- [8] 吴强, 彭蔓蔓, 李建江. 基于开源 EDA 软件的 CPU 设计实验[J]. 计算机教育, 2018, 08:156-159