

基于自主指令集 CPU 设计的“计算机组成原理” 课程实验

陈涵 罗健欣 张文宇 袁恩 刘莹 陈卫卫

陆军工程大学指挥控制工程学院, 南京 210007

摘要 针对计算机学科系统能力培养要求, 强调“计算机组成原理”课程对系统观、构造观、工程观的培养, 分析了“计算机组成原理”实验对系统能力的支撑现状, 提出一种基于自主指令集 CPU 设计的实验方案, 将实验分为课内软件仿真实验和课外硬件扩展实验。在课内通过软件实现自主指令集 CPU 设计构建, 一方面培养创新能力, 另一方面培养软硬协同能力, 着重培养系统观、构造观; 课外硬件扩展实验利用 FPGA 开发板, 依托大学生硬件俱乐部开展, 通过大学生科技竞赛活动的激励, 选拔学生完成, 着力实现工程观培养。并为计算机学科体系实验奠定基础, 更高层次达成计算机系统能力培养目标

关键字 系统能力培养, 计算机组成原理, 实验教学

Research on Computer Organization Principle Experimental Teaching based on Autonomous Instruction set CPU

Chen Han, Luo Jianxin, Zhang Wenyu, Yuan En, Liu Ying, Chen Weiwei

Army Engineering University of PLA, Jiangsu Nanjing, 210007

Abstract: According to the requirements of computer science system ability, emphasizing the cultivation of system view, structure view and engineering view in Computer Composition Principle. Based on the current situation of Computer Composition Principle experimental teaching, puts forward an Experimental Teaching method based on autonomous instruction set CPU. The experiment is divided into software experiment in class and hardware extension experiment after class. An autonomous instruction set CPU is designed by software in class to cultivate innovation ability, it would be implementation in FPGA after class through the college club to cultivate engineering literacy. It lays a foundation for the computer system experiment and achieves the goal of system ability training at a higher level.

Keywords—system ability cultivation, Computer Composition Principle, experiment education

1 引言

随着计算机类专业教学指导委员会将全面推进系统能力培养作为首批确认的工作重点, 高校人才培养模式由编程能力培养向系统能力培养转变。

早在 2008 年, 国内学者提出了包含计算机系统认知、系统设计、系统开发及系统应用等能力点的计算机系统能力概念, 并设计了面向系统能力培养的计算机专业核心课程体系^[1]。2011 年又对计算机系统能力进行了细化, 分别将系统认知能力、系统设计能力、系统开发能力及系统应用能力细化为 6, 19, 23 及 14 个能力点^[2]。

综合分析近几年国内学者对系统能力的研究^[3-5], 可以结合布鲁姆教学目标模型, 将系统能力归纳为理

解系统、构建系统、优化系统三个层次的能力, 突出了对系统观、构造观、工程观的培养与塑造。

2 “计算机组成原理”课程现状

2.1 “计算机组成原理课程”教学目标

“计算机组成原理”课程重点阐述了计算机各功能部件的组成、结构、工作原理和相互关系, 进而从软硬件协同角度, 构建计算机整机工作过程。作为计算机及其相关专业的核心专业基础课, 在计算机学科体系中起着承上启下的作用。课程从知识、能力、素质三个层次确立课程教学目标, 突出理解系统、构建体系、优化系统的系统能力培养目标^[6], 有利于塑造初步的系统观、构造观和工程观(图 1)。

2.2 “计算机组成原理课程”实验教学现状

目前, “计算机组成原理”课程实验的开展主要有两种形式:

***基金资助:** 本文得到军队院校计算机联席会教育教学课题“突出系统设计能力培养的‘计算机组成原理’课程实验设计”资助, 立项编号: CSLXH-2023-16, 发文单位: 军队院校计算机联席会(国防科技大学教育训练部(代章))。

(1) 软件仿真形式

利用Logisim等实验环境^[7]，以电路图形式构建成熟指令集（MIPS、龙芯^[8,9]）CPU系统，利用编译器仿真实现。实验环境搭建简单、成本低，实验进度易把控。这种实验形式结合理论教学自顶向下地分析、拆解系统，通过软件完成自底向上地构建系统，能够帮助学生进一步理解系统，也能够培养初步地构造观。但成熟指令集CPU构建对创新能力，系统设计能力培养还有欠缺，且软件仿真忽略了真实硬件设计中的诸多

问题，难以实现工程观的培养。

(1) 硬件开发形式

应用FPGA开发板，采用硬件描述语言完成硬件设计仿真，在开发板调试运行。这种开发形式需要考虑真实硬件的制约关系，有利于工程观塑造。但实验环境搭建成本高、学习周期长、实验难度大，实验进度难把控，对师生的技术水平要求高，另一问题是硬件设计程序化，易向编程能力训练倾斜，学生难以建立设计与底层电路的对应关系。

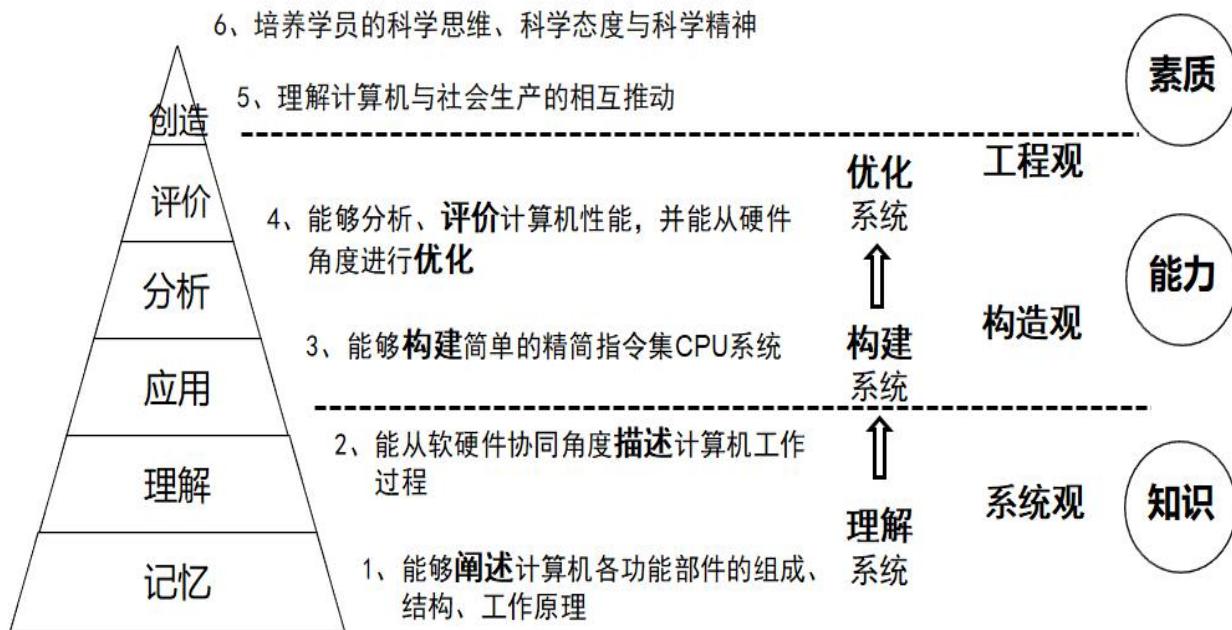


图 1 “计算机组成原理”课程教学目标

3 自主指令集 CPU 设计实验

基于此，提出一种基于自主指令集CPU设计实验，将实验分为课内软件仿真实验和课外硬件扩展实验。

采用自主指令集CPU设计实验，不仅需要考虑不同指令集（指令集功能完备、不同指令格式）对硬件电路的设计要求，还需要反过来从硬件是否易实现角度考虑自主指令集设计是否合理，如果增加指令条数，硬件结构复杂度是否会急剧增加等等问题，在指令集架构层考虑计算机系统的软硬协同，突出创新能力，系统设计能力培养。

将自主指令集CPU在FPGA板实现，需要学员考虑到总线接口控制、Flash控制与时延，CPU真正能够达到的频率，考虑到性能的优化，真正培养学员的工程观。并且，硬件实验会遇到软件实验中不会出现的各种问题，能够有效锻炼学员处理突发状况、解决实际问题的能力。

3.1 课内软件实验

课内软件实验主要利用Logisim软件，设计一个8/16/32位的自主指令集CPU最小系统要求能实现整数运算类指令（包括算术、逻辑、移位运算）、数据传输类指令（访存指令）。从软硬件协同角度，加深学员对CPU组成、结构、工作过程的理解；培养学员基础的系统设计与构建能力，培养系统观与初步的构造观，培养学员的实践动手能力、团队协作与沟通表达能力。从软硬件协同角度，加深学员对CPU组成、结构、工作过程的理解；培养学员基础的系统设计与构建能力，培养系统观与初步的构造观，培养学员的实践动手能力、团队协作与沟通表达能力。

(1) 实验内容

实验内容根据最小SPOC系统组成及实验课学时数（以20学时为例）划分成若干实验项目，包括运算器、控制器、寄存器、存储器（Cache）等，并根据电路设计难度，将实验项目分为基础、综合、进阶三个层次。如图2所示。

从项目设计角度，应该在实验开始确定系统需要

实现的指令系统及系统架构，但是，考虑到学员学习实际情况，实验开始先通过运算器实验，使学员逐渐上手，在设计专用寄存器和控制器之前，进行指令系统设计。具体项目划分及要求见表 1。

(2) 实验实施

实验采用任务驱动方式开展^[10]。由于实验带有一定设计性、创新性，第三次实验前须布置下一次实验内容与要求，且采用小组协作方式，协作讨论，设计实验项目方案，独立完成项目构建。实验教学实施环节，一般采用图3所示5步走策略，实际实验教学实施过程中根据教学内容灵活选取、调整教学环节。例如，第三次实验流程为：①布置实验任务 → ③小组讨论方案 → ④独立完成教员巡视指导 → ⑤实验结果展示点评 → ①布置下一次实验任务；第四次实验流程为：（课前：③小组讨论方案→）课中： ⑤分析、互评、自主指令集 → ④ 改进自主指令集 → ①布置下一次实验任务。

3.2 课外硬件扩展实验

课外硬件实验从分利用 FPGA 硬件实验的特点，依托硬件俱乐部选拔展开。为学生的毕业设计任务、大

学生科技竞赛进行培育[11]。

在真实硬件上实现 CPU，与软件仿真相比，需要考虑考虑工程制约因素，选择恰当技术工具进行工程化设计，统筹技术与非技术要素的综合运用，因此能够有效培养学员的在工程素养；另外，学员在面对硬件各种突发问题时，需要综合考虑各种因素进行排查、解决，也能够培养处置突发问题的能力与素质。

采用硬件描述语言 Verilog HDL，通过 QuartusII（或 ModelSim）、Vivado 等软件进行编译、综合、布局布线等功能，完成从电路设计到仿真的全过程。实现 CPU 的设计与构建，再在 DE-2 开发板上集成总线、Flash、DRAM、串口等设备，再 FPGA 板上实现一个片上可编程系统（SOPC），如图 4 所示。完成诸如 LED、数码管显示、串口通信、操作系统移植等应用^[12]。学生不仅要掌握 CPU 的工作原理及设计方法，而且需要了解编译的一般过程，需具备一定的系统观与构造观，才能够实现 Verilog HDL 设计 CPU，再通过 FPGA 硬件实验，迫使学员关注工程实施过程中的技术与非技术要素，进而培养学生基础的工程观。并与编译原理、操作系统等后续课程相衔接，帮助学员打通计算机学科核心课程体系。

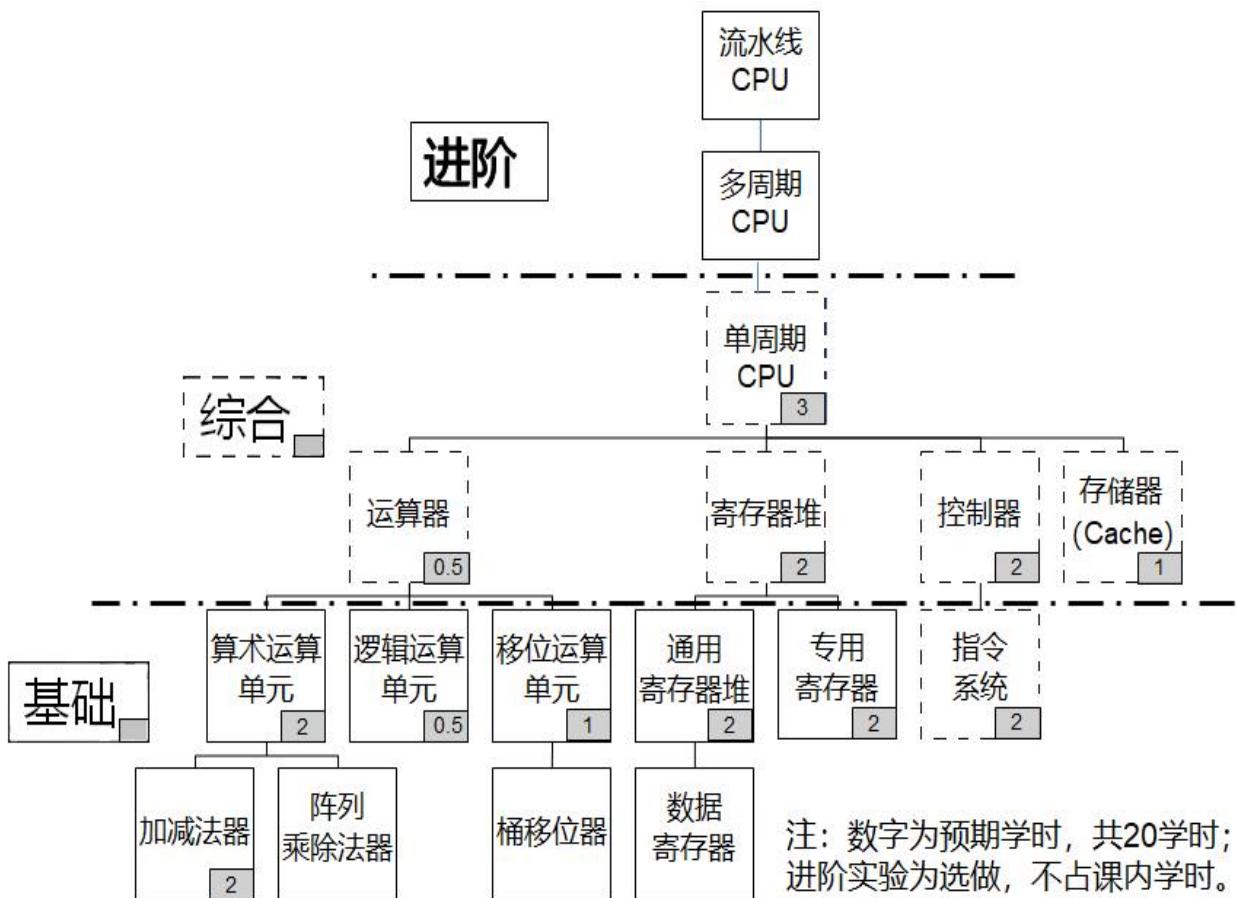


表 1 实验分项设计

实验内容	实验目的	实验基础要求	进阶要求
实验一 可控补码加减运算单元构建	熟悉实验环境。	1. 构建全加器，验证并封装； 2. 构建行波进位加法器，验证并封装； 3. 构建可控补码加减电路，验证并封装。	1. 构建16位（多级）先行进位补码加减法器，验证并封装。
实验二 算术运算单元构建	能够进行补码加减运算；区分逻辑和算术移位。	1. 利用自行构建的加减法器，加上软件自带的乘除法器，构建算术运算单元，验证并封装。	1. 乘法器使用阵列乘法器实现； 2. 除法器使用阵列除法器实现。
实验三 ALU构建	学会自上而下的设计与自下而上的构建方法。	1. 构建能够实现4种逻辑运算的逻辑运算单元，验证并封装； 2. 用系统自带的移位器，构建能实现4种移位运算的移位运算单元，验证并封装； 3. 构建算术逻辑运算单元，并添加必要的标志位，如ZF，验证并封装。	1. 用桶移位器构建能实现4种移位运算的移位运算单元，验证并封装。
实验四 指令系统设计	能够设计功能较完备、格式规范的基础整数指令集。	1. 构建合理的RISC指令集，能够运算类指令（包含全寄存器参与和带立即数参与）、数据传输指令（访存指令）、程序控制类指令（分支、跳转）。	1. 实现子程序调用、返回指令。
实验五 通用寄存器堆构建（1）	理解寄存器读写过程。	1. 使用软件自带的寄存器，构建两个数据输出端口、一个数据输入端口的寄存器堆，验证并封装。	1. 使用D触发器构建寄存器。
实验六 通用寄存器堆构建（2）	能够进行字扩展。	1. 用两个寄存器堆芯片，进行字扩展，验证并封装。	2. 在寄存器堆中设计零寄存器和乘除法特殊寄存器。
实验七 专用寄存器设计	能够设计专用寄存器。	设计构建程序计数器PC，能够实现顺序、分支、跳转执行指令，验证并封装。	
实验八 控制器设计	能够设计构建组合逻辑型控制器。	1. 设计构建指令译码器ID，验证并封装； 2. 设计组合逻辑型控制单元CU，验证并封装。	1. 设计存储逻辑型控制单元。
实验九 存储器设计	辨别ROM和RAM的区别和读写过程。	1. 使用ROM设计指令内存； 2. 使用RAM设计数据内存。	2. 设置字节编址，实现地址对齐访问。
实验十 系统集成	画出单周期CPU数据通路。	1. 利用之前设计的计算器、寄存器堆、控制器，集成单周期CPU； 2. 根据自行设计的指令集，设计验证程序，验证CPU功能；	1. 实现流水线CPU。

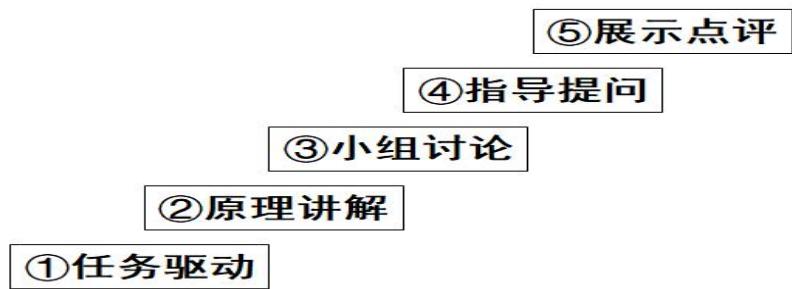


图 3 任务驱动 5 步教学法

SOPC片上可编程系统

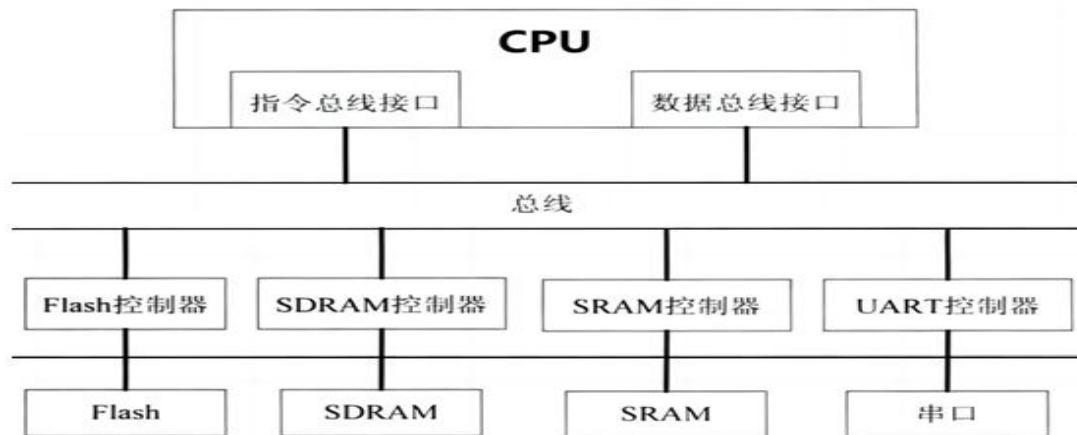
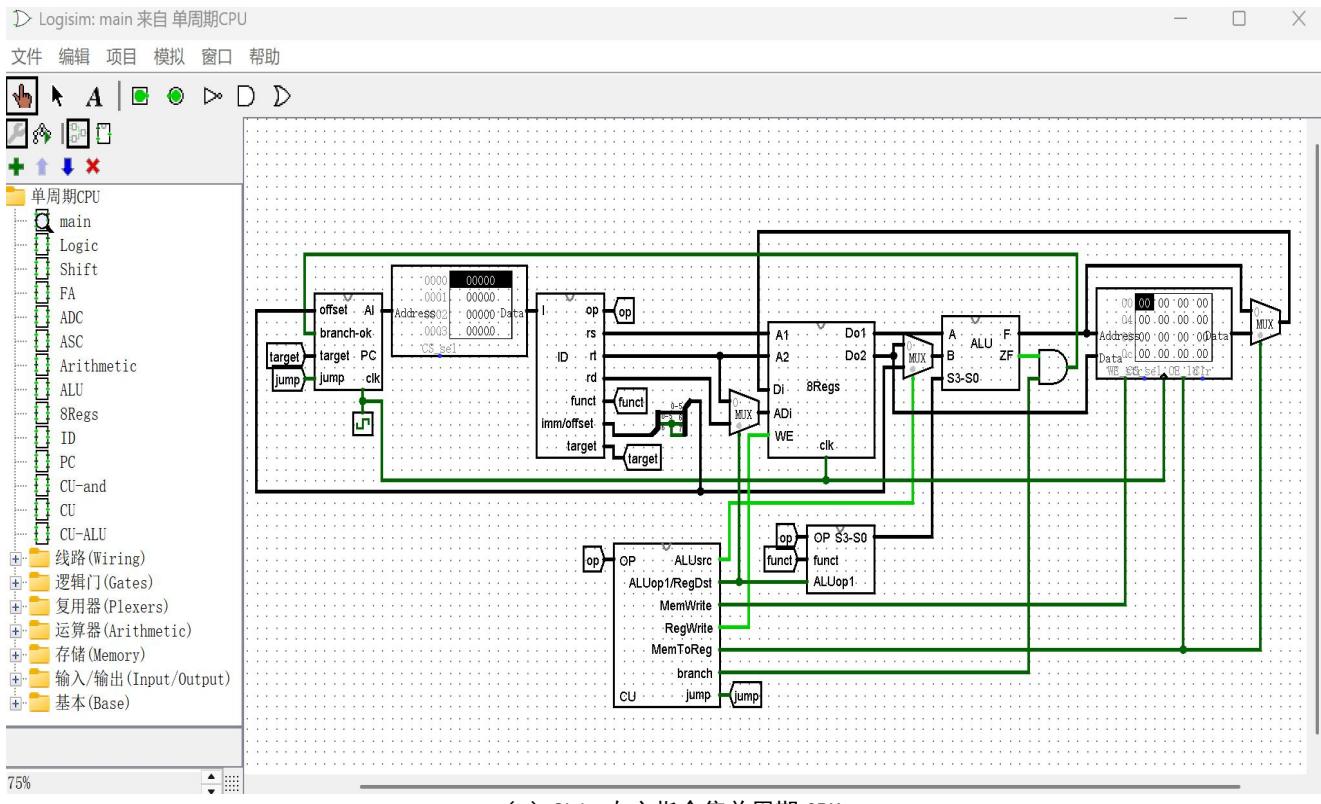


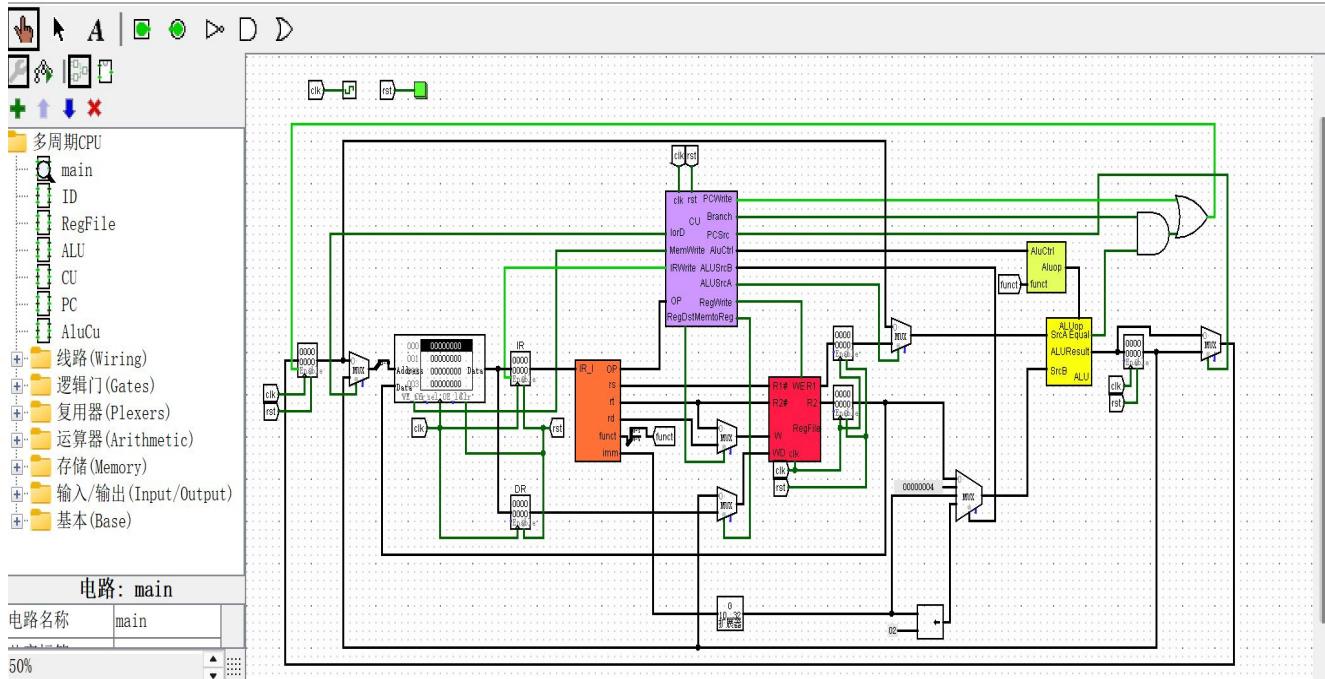
图 4 基于 FPGA 的 CPU 设计架构



(a) 8bit 自主指令集单周期 CPU

Logisim: main 来自 多周期CPU

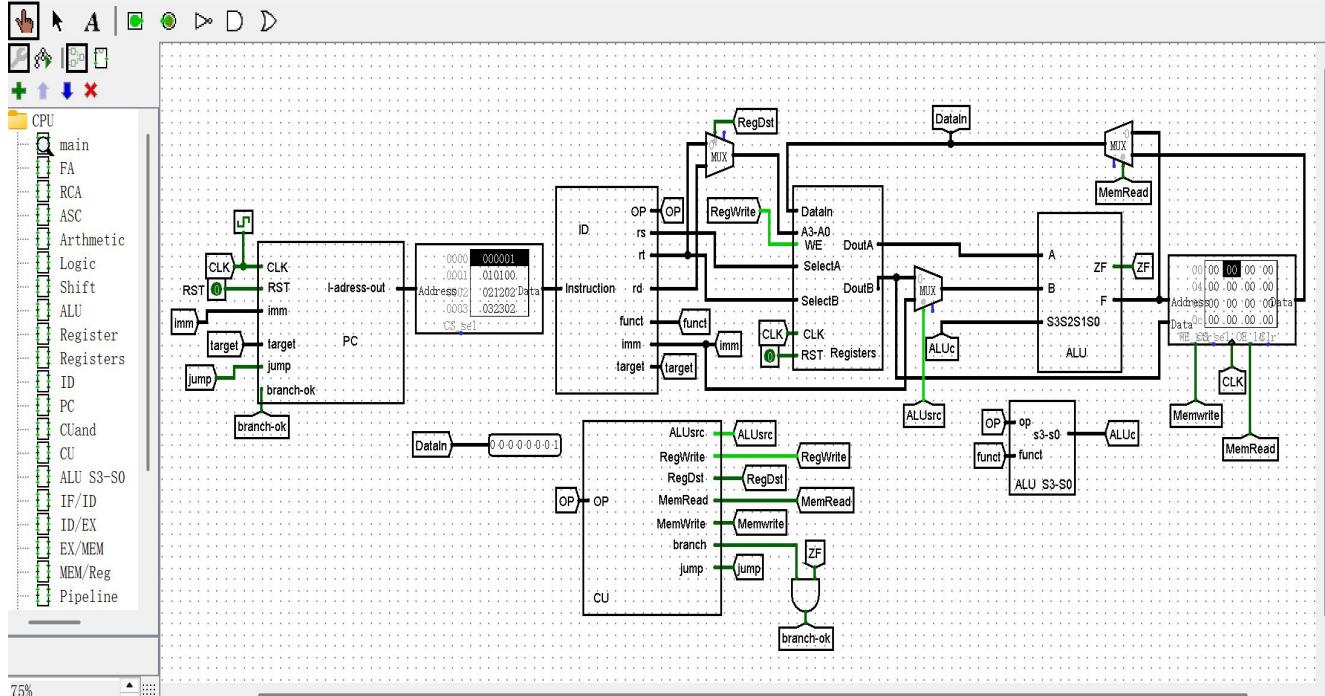
文件 编辑 项目 模拟 窗口 帮助



(b) 16bit 自主指令集多周期 CPU

Logisim: main 来自 CPU

文件 编辑 项目 模拟 窗口 帮助



(c) 8bit 自主指令集理想流水线 CPU

图 5 项目库部分学生实验成果

4 小结

目前, 该实验已实施三个学年的三个教学班, 实

验完成的完整度 (按要求完成运算类、数据传输类、程序控制类, 以实验成绩表现) 也逐年增加 (表 2), 收集完成度较高的实验成果建成项目库 (图 5)。

表 2 实验完成度统计

年度(人数)	2024(12)	2025(14)
成绩 90 分以上	8%	14%
成绩 85 分以上	33%	50%

此外,部分学员基于自主指令集实验的课外拓展实验部分,依托硬件俱乐部,也获得高相关度的校级科技创新奖项(图 6)。



图 6 基于自主指令集课外扩展实验成果

5 结束语

基于自主指令集的 CPU 设计实验,分课内软件实验和课外硬件扩展实验。课内软件实验环境搭建简单、实验进度可控,通过自底向上地构建 CPU 最小系统,可以有效支撑“计算机组成原理”系统观、构造观的培养,突出自主指令集设计,有利于进一步培养创新发展能力;课外硬件实验充分考虑实验开展难度大、起点高的现实情况,依托大学生硬件俱乐部选拔性开

展,通过 FPGA 板实现最小 SPOC 系统,培养基础的工程观,实现计算机系统能力培养。

参 考 文 献

- [1] 蒋宗礼. 以能力培养为导向提高计算学科教育教学水平[J]. 中国大学教学, 2008(8): 35-37.
- [2] 蒋宗礼. 计算机类专业人才专业能力构成与培养[J]. 中国大学教学, 2011(10): 11-14.
- [3] 王志英, 周兴社, 袁春风, 等. 计算机专业学生系统能力培养和系统课程体系设置研究[J]. 计算机教育, 2013(9): 1-6.
- [4] 张钢, 郭炜, 车明等. 计算机工程专业方向系统设计能力培养体系研究[J]. 计算机教育, 2015(1): 75-77.
- [5] 谭志虎, 秦磊华, 胡迪青. 面向系统能力培养的计算机专业实践教学模式[J]. 中国大学教学, 2017(9): 80-84.
- [6] 张文字, 王睿, 赵洪华, 等. 面向系统能力培养的计算机组成原理教学改革探索[J]. 软件导刊, 2020.12, Vol.19, No.12: 185-189.
- [7] 王俊昌, 成韶锦, 杨昆, 等. 基于龙芯开源 CPU 的计算机组成原理实验课程改革[J]. 计算机教育, 2018(6): 153-156.
- [8] 王海瑞, 潘晟昱, 李亚, 等. 国产化背景下的计算机组成原理教学改革[J]. 软件导刊 2023, Vol22(6): 70-74.
- [9] 苏玉萍, 李鹏, 李黎. 基于软硬件协同的问题驱动式计算机组成原理教学探索[J]. 计算机教育, 2023(7): 94-97.
- [10] 高明霞, 方娟, 朱文军. 计算机硬件类科技竞赛对硬件课程群建设的优化初探——以“计算机组成原理”为例[J]. 工业和信息化教育, 2021(2): 80-83.
- [11] 樊彦恩, 张俊霞. 学科竞赛与课程设计有机融合的计算机组成原理实验教学探索[J]. 软件导刊, 2023, Vol22(6): 182-186.