



面向人工智能专业的“计算机组成与嵌入式系统”实验课程改进

徐文辉¹, 钟 胜^{1,2}, 邹 旭^{1,2}, 何顶新^{1*}

(1. 华中科技大学 人工智能与自动化学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 多谱信息智能处理技术全国重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 面向人工智能专业培养需求, 秉承紧扣理论课程内容、体现教学特色等原则, 对计算机组成与嵌入式系统实验课程进行扩展改进。结合嵌入式系统中的并行卷积计算和图像处理中的形态学滤波相关内容, 设计了基于 Logisim 仿真平台的形态学滤波并行计算电路设计实验。通过设计形态学滤波电路和测试用的图像案例, 对比分析不同滤波操作的特性差异, 学生既可以融会贯通各学科相关知识, 又锻炼了系统设计能力, 也为学习后续智能芯片等课程打下基础。

关键词: 人工智能; 计算机组成与嵌入式系统; 实验课程; 形态学滤波; 卷积并行计算

中图分类号: G642.423

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230574

Improvement of the Experimental Course on “Computer Composition and Embedded Systems” for Artificial Intelligence

XU Wenhui¹, ZHONG Sheng^{1,2}, ZOU Xu^{1,2}, HE Dingxin^{1*}

(1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. National Key Laboratory of Multispectral Information Intelligent Processing Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For the educational needs of artificial intelligence major, adhering to the principles of associating closely with the theoretical course and reflecting teaching characteristics, the experimental course of Computer Composition and Embedded Systems is expanded and improved. Combining parallel convolution computation in embedded systems with morphological filtering in image processing, a circuit design experiment for morphological filtering parallel computation is designed, which is based on the Logisim simulation platform. By designing both circuits and test image cases of morphological filtering, and comparing and analyzing the characteristic differences of different filtering operations, students can not only integrate relevant knowledge from various courses, but also exercise system design skills. Furthermore, it lays the foundation for learning subsequent courses such as intelligent chips.

Key words: artificial intelligence; computer composition and embedded systems; experimental course; morphology filter; convolution parallel calculation

随着人工智能的快速发展, 相关人才的需求量急剧增加, 为满足社会发展需要, 自 2019 年起, 教育部陆续批准国内高校开设人工智能本科专业, 截至 2023 年 10 月, 已有 400 多所高校开设了该专业。

人工智能具有知识覆盖面广, 与其他学科交叉较多的特点, 如何建设人工智能专业课程体系是亟待解决的问题, 近年来国内不少高校进行了探索研究并提出了切实有效的建议和措施^[1-5]。其

中, 总的指导性原则是: 不同学校可以在聚焦人工智能内涵的基础上, 根据自身特色或优势, 围绕人工智能相关技术设立不同培养方向, 设计“专、通、交”的课程体系, 并通过赋能应用来加强实践体系建设^[1]。华中科技大学在人工智能本科专业课程建设上也秉承了这一原则, 形成了以模式识别与机器学习、视觉智能系统为基础, “启于视, 谋于智, 精于算, 践于芯, 软硬兼施, 知行合一”的培养特色。为兼顾学生智能系

收稿日期: 2023-11-29

基金项目: 华中科技大学 2023 年实验技术研究项目(2023184018)。

作者简介: 徐文辉, 博士, 工程师, 主要从事图像处理、嵌入式系统、算法加速等方面的研究。E-mail: xuwenhui@hust.edu.cn

* 通信作者: 何顶新, 博士, 教授, 主要从事嵌入式系统, 机器人控制技术等方面的研究。E-mail: hedingxin@hust.edu.cn

统硬件设计能力培养和课程时长, 将计算机组成原理与嵌入式图像处理系统两门硬件相关课程合并, 开设计算机组成与嵌入式系统作为专业核心课程之一。该课程前承数字电路与逻辑设计(学科基础课程), 后继智能芯片设计(专业选修课程), 形成有层次的人工智能设计培养能力。在实验课程方面, 也需要配合理论教学进行课程改进, 因此, 本文聚焦于计算机组成与嵌入式系统实验课程建设, 结合华中科技大学在人工智能方面的特色, 并遵从承上启下的思想对现有计算机组成原理实验课程进行扩展改进。

1 计算机组成与嵌入式系统实验课程概况

计算机组成与嵌入式系统实验课程主要由计算机组成原理和嵌入式图像处理系统两个实验课程组成。

1.1 计算机组成原理实验课程

国内各高校在计算机组成原理实验课程上一般采取了 3 种方式^[6]:

1) 基于实验箱的验证实验;

2) 基于 Logisim、MaxPlus II 等设计原理图并仿真^[7-11];

3) 基于硬件描述语言设计电路并仿真^[12-13]。

其中, 后两者方式都属于设计性实验, 能更好地帮助学生融会贯通地理解计算机系统的组成结构和工作原理。

文献 [7] 基于 Logisim 软件开发了运算器、存储器、单/多周期处理器设计等硬件类实验, 帮助学生深入理解理论知识, 提高硬件动手能力。文献 [8] 基于 Logisim 软件设计了运算器、存储器、中断系统等相关电路, 并运用到教学实践中, 取得了良好的效果。文献 [9-10] 以中央处理器 (central processing unit, CPU) 的设计与实现为顶层实验目标, 将 CPU 设计总任务分解为若干功能部件设计任务 (运算器、存储器、控制器), 最终基于 Logisim 软件完成无内部互锁流水线微处理器 (microprocessor without interlocked piped stages, MIPS) 单周期 CPU 设计和 MIPS 五段流水 CPU 设计。文献 [11] 基于 Logisim 软件开发了多周期 CPU 设计实验, 并对不同平台 (Logisim、Quartus II) 下 CPU 仿真设计实验的差异进行了对比研究。文献 [12-13] 中基于自研的 VerilogHDL 智能评测平台, 结合自身特色, 提出了面向计算机组成原理课程的贯通式实验模式, 通过一系列改革与实

践, 有效提高了学生的计算机系统应用能力和教师的实验教学水平。

1.2 嵌入式系统实验课程

嵌入式系统涉及电子信息工程、计算机技术、通信工程、微电子学等多个学科领域, 其系统模型由低到高包括硬件电路层、驱动程序层、实时操作系统层和用户应用程序层^[14]。鉴于嵌入式系统与应用涵盖的知识量大、内容多, 但实验课时有限, 国内高校普遍结合自身特色, 基于实际案例或项目需求开发实验课程^[15-17]。

文献 [15] 基于 Jetson Nano 开发了遗留物检测人工智能嵌入式教学实践系统, 涵盖嵌入式开发板环境搭建、YOLOv5 网络训练、OpenCV 图像处理、遗留物检测算法设计等多个教学模块。通过实践与理论相结合的方式取得了良好的教学改进效果。文献 [16] 以单片机口袋仪器为实验平台, 探讨了建立以案例教学为主的教学内容系统、实验教学方法和实验评价考核机制的方法, 采用优秀实验案例分析和基础实验项目相结合的教学方法, 取得了良好的教学效果。文献 [17] 基于树莓派开发板搭建智能小车, 采用项目制教学法, 为具有不同学习基础和应用能力的学生制定差异化项目目标, 取得了良好的教学效果。

1.3 国外高校相关实验课程

国外许多高校也基于 Logisim 等仿真软件进行数字电路、计算机组成原理等课程的实验教学, 如美国加州大学伯克利分校等。在计算机组成原理实验课程方面, 各高校也多以设计 CPU 为最终实验目标, 通过基于项目的学习^[18], 又或是基于低成本的硬件如树莓派^[19]、现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, FPGA)^[20] 等进行 CPU 电路设计和仿真, 在此过程中锻炼学生的软硬件设计能力和动手能力。

在嵌入式系统相关实验课程方面, 国外高校也多采用国内高校相同的思想, 即结合实际情况, 采用设计、完成小项目的方式进行实验教学, 提高学生理论联系实际、解决实际问题的能力^[21-24]。

1.4 实验课程难点及改进思路

华中科技大学计算机组成与嵌入式系统课是由理论课和课内实验两部分组成, 包括计算机组成理论课 24 学时、嵌入式系统理论课 8 学时和课内实验 16 学时, 其教学目标为: 让学生理解计算机系统的组成结构和工作原理, 并以嵌入式图像

处理系统为例, 让学生了解掌握数字信号处理器(digital signal processor, DSP)、人工智能(artificial intelligence, AI)处理器及开发技术; 通过课程教学, 让学生融会贯通数字电路、数字图像处理等前导关联课程概念与知识, 培养系统设计能力。

在实验课程上, 借鉴了文献 [10] 中的思路和实验内容, 共设有数据表达、计算器、存储器和多周期 CPU 设计 4 个实验, 每个实验的时长安排均为课内 4 学时, 课外 4 学时。这 4 个实验均属于计算机组成原理相关的实验内容, 亟须增加嵌入式系统相应的实验内容。

由于课时有限, 仅能增加一个实验, 在实验内容设计上, 需要满足以下 4 个需求:

- 1) 基于 Logisim 仿真软件, 保证和前 4 个实验内容同平台;
- 2) 实验内容应关联 DSP 或 AI 处理器, 紧扣理论课程内容;
- 3) 实验内容应聚焦图像处理, 体现教学特色;
- 4) 实验结果应具备良好的可展示性。

综合考虑以上需求, 将并行卷积计算和形态学滤波相结合, 基于 Logisim 设计了嵌入式系统相关实验课程。通过熟悉并行卷积计算原理, 设计形态学滤波硬件电路(膨胀、腐蚀、开运算、闭运算等), 直观地比较滤波前后图像的差异, 学生既可以融会贯通各前导课程相关知识, 培养了系统设计能力, 又可以了解 AI 芯片中并行加速单位的架构特点, 为后续智能芯片课程打下基础。

2 基于 Logisim 的形态学滤波实验

2.1 卷积计算

在图像处理领域, 卷积计算是一种常见的运算操作, 可用于提取图像特征、对图像进行滤波等, 也是卷积神经网络中的基础运算。卷积计算可以看作是加权求和的过程, 卷积核(也称为卷积模板)在图像中依次滑动(从上到下、从左到右), 将卷积核覆盖的图像区域中的每个像素分别与卷积核的每个权重值对应相乘, 所有乘积之和即为被覆盖的图像区域中心点的卷积计算结果。卷积计算的过程如图 1 所示。

2.2 形态学滤波基础知识

形态学滤波是图像处理的常用方法, 可用于提取图像中的特征、消除噪声、改变图像的形状等。常用的形态学滤波包括膨胀、腐蚀、开运算、闭运算等。从教学角度来说, 膨胀或腐蚀就

是将图像(A)与核(B)进行卷积, 核(或模板)可以是任意形状或大小, 常用的有正方形或圆盘。

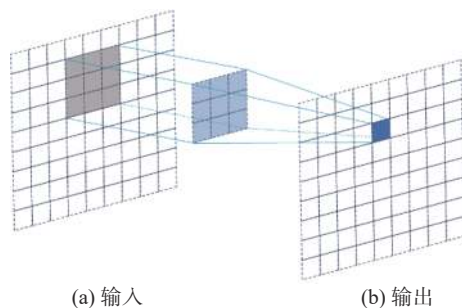


图 1 卷积计算过程图

膨胀操作可以将图像中的物体变大, 使它更加连通。假设 A 和 B 是 Z^2 中的集合, A 被 B 膨胀定义为:

$$A \oplus B = \{z | (\widehat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (1)$$

腐蚀操作则可以将图像中的物体变小, 使它更加细化。 B 对 A 进行腐蚀定义为:

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (2)$$

大小为 9×9 像素的图像如图 2(a)所示, 使用 2×2 的模板进行膨胀和腐蚀操作的结果示例如图 2(b)和(c)所示。

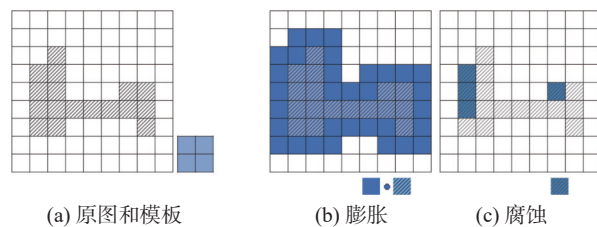


图 2 膨胀和腐蚀操作示例图

开运算是先对图像进行腐蚀, 再进行膨胀操作的组合过程; 闭运算则相反, 先对图像进行膨胀, 再进行腐蚀操作。图 2 中示例图像的开运算和闭运算结果如图 3 所示。

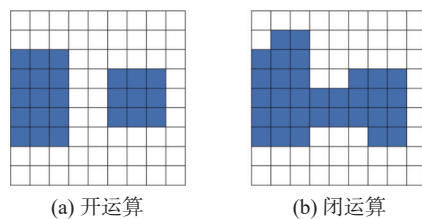


图 3 开运算和闭运算示例图

2.3 形态学滤波实验目的、内容与步骤

形态学滤波实验的主要目的为: 通过设计形态学滤波硬件电路, 让学生理解和掌握图像处理中并行卷积计算的原理, 了解 AI 智能芯片中卷积加速核的相关硬件架构, 为后续智能芯片课程打

下基础；同时，通过设计不同形态学滤波模板并对比其对应的滤波结果，加深学生对形态学滤波等图像处理知识的理解。

形态学滤波实验的内容：

- 1)设计膨胀并行运算电路和腐蚀并行运算电路，并进行测试；
- 2)基于膨胀、腐蚀电路搭建开运算、闭运算电路，测试并比较开、闭运算的异同；
- 3)设计用于测试的图像案例，要求经过不同形态学滤波处理后，其结果具有较显著的差异。

形态学滤波实验步骤如图 4 所示，依次完成膨胀、腐蚀电路设计，开、闭运算电路设计，以及测试图像设计后，测试并提交验收。



图 4 实验步骤图

2.4 形态学滤波实验电路设计

2.4.1 膨胀、腐蚀操作并行运算电路设计

本实验中，图像为二值图，大小采用 32×32 像素，形态学滤波模板大小采用 3×3 像素。对于膨胀和腐蚀并行运算电路，输入为一行数据(即 32 个 1 位数据)，为方便电路设计，采用 1 个 32 位数据表示；输出为滤波后的一行数据，同样采用 1 个 32 位数据表示。膨胀和腐蚀并行运算电

路的功能就是对输入的 32 个图像数据分别进行膨胀和腐蚀操作并输出滤波结果。

对于二值图像，其卷积计算可以使用逻辑运算实现。具体来说，对于膨胀操作，当图像与模板卷积时，只需将模板覆盖范围内图像区域各像素相互进行或运算，即可得到当前像素点经过膨胀操作后的结果。同理，对于腐蚀操作，只需将模板覆盖范围内图像区域各像素相互进行与运算，即可得到当前像素点经过腐蚀操作后的结果。

膨胀操作并行运算电路设计的示例如图 5 所示。图中左上方为接口定义区(如蓝色框线所示)，定义了膨胀电路的输入、输出以及电路需要完成的功能。定义区以外的区域可用于电路设计，完成电路所需功能。对膨胀操作并行运算电路来说，其功能是对输入的一行图像数据(32 个 1 位数据)，利用 3×3 像素的模板，同时进行膨胀操作。对每一个图像像素来说，都需要对其 8 个邻域的像素(8 个相邻像素)及自身进行或运算。最直观的方法是采用一个 9 输入的或门直接进行运算，处理一行图像需要 32 个 9 输入的或门。但是，考虑到相邻像素之间的计算存在重复的情况，可以将 9 个像素先在纵向上每 3 个进行或运算，然后将或运算的结果再进行或运算，这样只需 64 个 3 输入的或门即可完成电路功能，可以有效节约硬件资源。

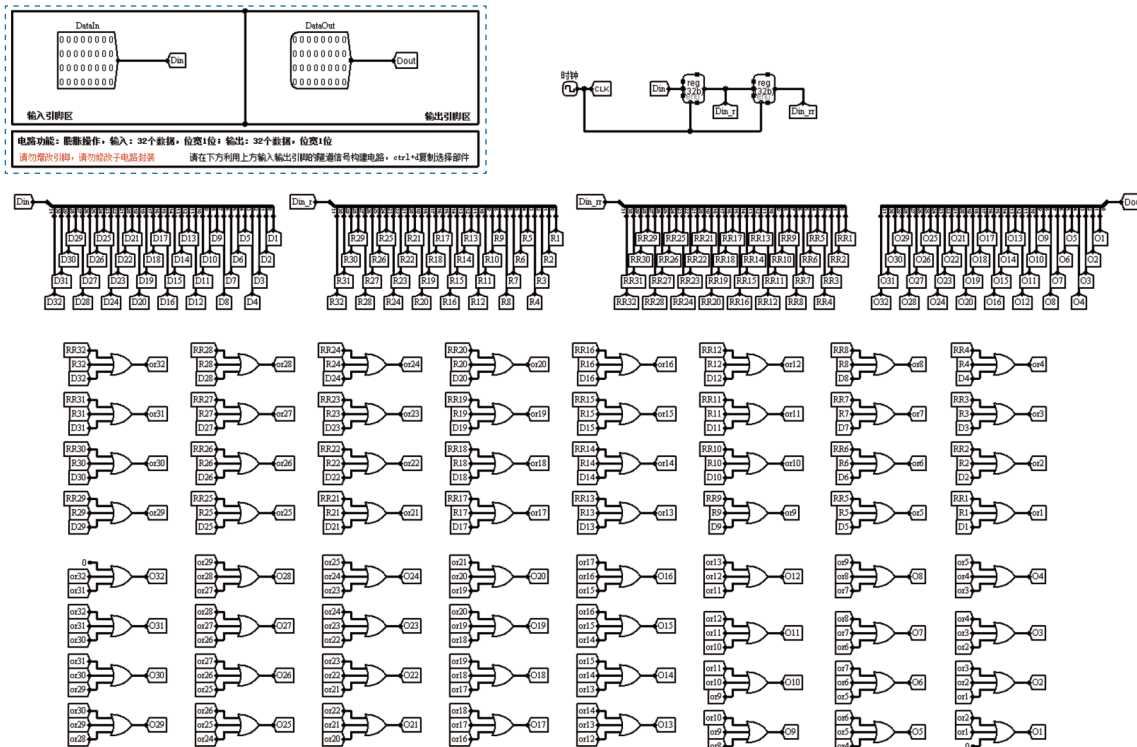


图 5 膨胀操作并行运算电路设计示例图

同理, 腐蚀操作并行运算电路也可以采用相同思路进行设计, 只需要将或操作换成与操作即可, 其电路设计示例如图 6 所示。

2.4.2 开运算、闭运算电路设计

完成膨胀和腐蚀电路后, 可以基于这两个电

路模块实现开运算和闭运算电路设计。开、闭运算电路的输入和输出定义与膨胀、腐蚀操作电路相同。开运算电路如图 7 所示, 由腐蚀操作电路和膨胀操作电路串接而成。闭运算电路如图 8 所示, 由膨胀操作电路和腐蚀操作电路串接而成。

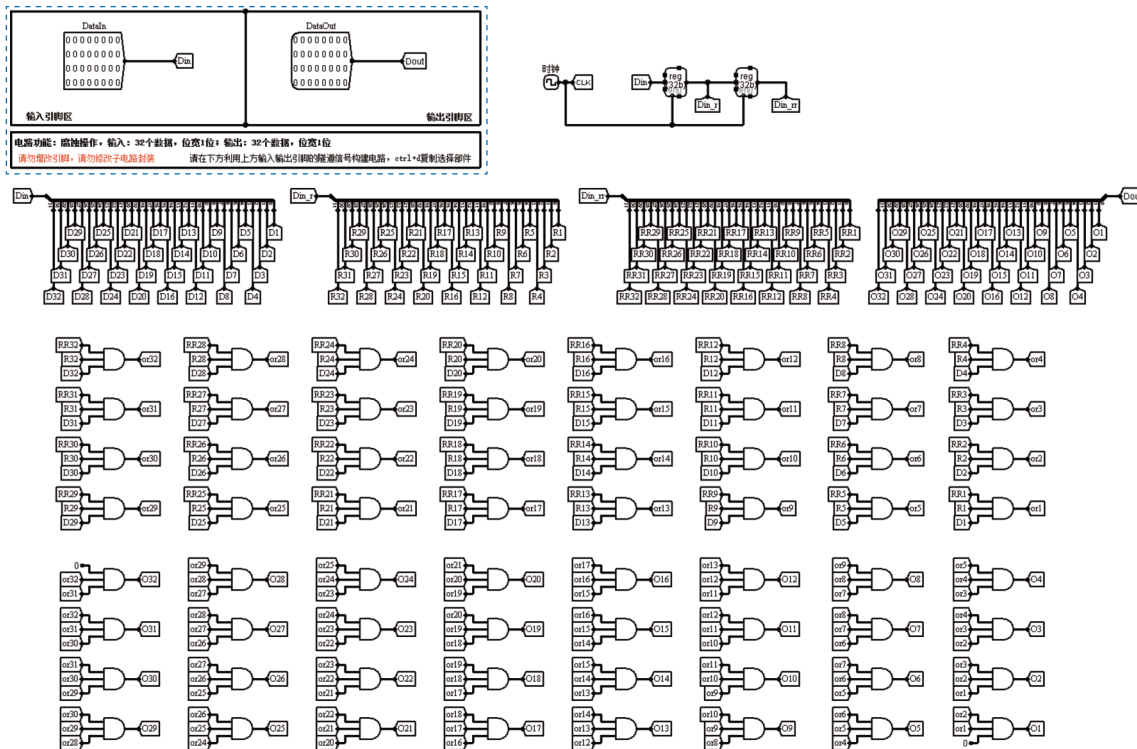


图 6 腐蚀操作并行运算电路设计示例图

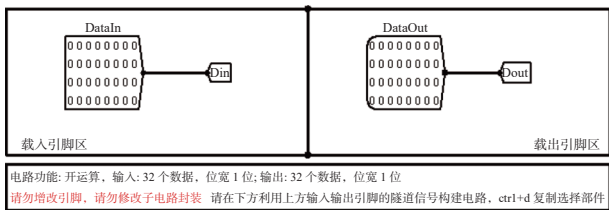


图 7 开运算电路设计图

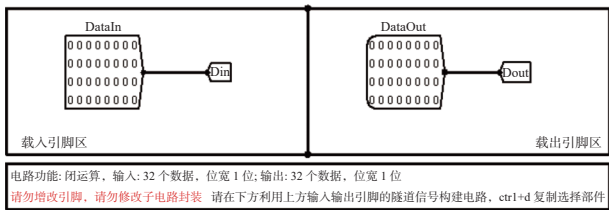


图 8 闭运算电路设计图

2.4.3 形态学滤波测试电路

为方便学生在实验时直观地对比不同滤波结果, 本实验设计并提供了一个测试电路(该测试电路不需要学生设计), 如图 9 所示。该测试电路可以同时为 4 个形态学滤波电路(膨胀、腐蚀、开运算、闭运算)进行测试, 并使用了 5 个 LED 点阵来显示原始图像和经过形态学滤波后的图像, 其中, 图 9(b)点阵显示的是原始图像, 图 9(c)~图 9(f)点阵分别显示膨胀、腐蚀、开运算和闭运算后的图像结果。

该测试电路中, 只读存储器 (read-only memory, ROM)(数据位宽为 32 位)中预存有测试用的图像数据(每一个地址对应一行图像数据)。测试时, 驱动时钟以每个时钟一行图像数据的速率将图像数据送入各个形态学滤波电路中, 并通过 5 个点阵直接观察和对比滤波的结果。如果各个滤波电路均设计无误, 则使用 ROM 中预存的测试图像进行测试, 结果如图 9 所示。

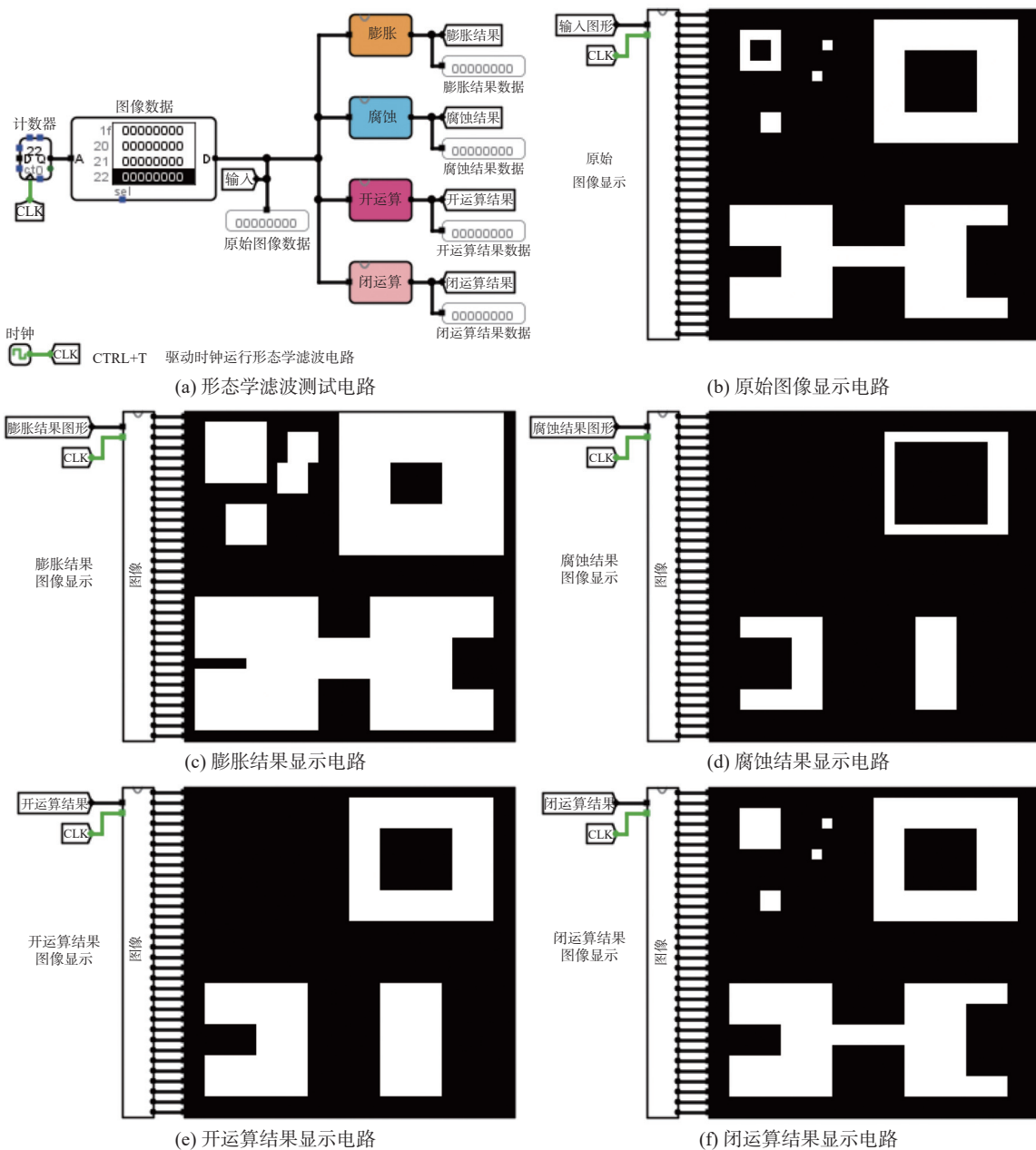


图 9 形态学滤波测试电路及测试结果示例图

2.4.4 测试图像案例设计

使用测试电路中预存的测试图像完成测试后，学生需要自行设计新的测试图像并进行测试，要求设计出的测试图像经过不同形态学滤波后，其结果具有较显著的差异，能体现出不同形态学滤波的特性。该部分开放性的实验内容，可以有效激发学生的学习热情和想象力，通过设计满足要求的测试图像，增强学生对形态学滤波相关特性及原理的理解，也锻炼了学生设计验证系统的能力。

2.4.5 实验验收

实验验收采用结果演示、思路讲解和现场问答相结合的方式。学生首先演示实验结果并讲解电路设计思想，然后实验指导老师根据其讲解情况现场提问，随机询问电路设计原理或细节相关问题，并基于学生回答情况确定实验验收是否通过。

3 实验拓展

在掌握了形态学滤波电路设计方法的基础上，本实验内容可以进一步拓展。

1) 设计不同大小的形态学滤波模板,并设计对应并行计算电路,对比不同尺寸模板下滤波电路的时延,并分析比较其滤波特性的差异。

2) 设计其他基于模板卷积的并行滤波电路,如中值滤波、高斯滤波等,并分析比较其滤波特性的差异。

3) 设计基于模板卷积的特征提取电路,如各种边缘提取算子(Roberts、Sobel、Laplacian)等,并分析对比其特性差异。

4 结束语

针对面向人工智能专业的计算机组成与嵌入式系统实验课程中缺少嵌入式系统相关实验内容的问题,本文秉承统一实验平台、紧扣理论课程内容、体现教学特色等原则,将并行卷积计算电路和形态学滤波相结合,基于Logisim平台设计了形态学滤波实验。通过熟悉并行卷积计算原理,并设计形态学滤波硬件电路及用于测试的图像案例,使学生既可以对各前导课程相关知识融会贯通,培养其系统设计能力,又可以了解AI芯片中并行加速单位的架构特点,为后续智能芯片课程打下良好基础。

参考文献

- [1] 吴飞,杨洋,何钦铭.人工智能本科专业课程设置思考:厘清内涵、促进交叉、赋能应用[J].中国大学教学,2019(2):14-19.
- [2] 陶泓杉,郗海霞.高校人工智能本科专业需要怎样的课程体系:基于卡内基梅隆大学和南洋理工大学的比较分析[J].重庆高教研究,2021,9(5):44-54.
- [3] 戴琼海.人工智能教育:通识与专业[J].清华大学教育研究,2022,43(3):2.
- [4] 全力,张笑钦,吴承文.面向核心能力培养的地方高校人工智能专业课程建设[J].高等工程教育研究,2022(3):102-106.
- [5] 樊超,杨铁军,侯慧芳,等.“新工科”背景下人工智能专业核心实验教学项目设计[J].实验技术与管理,2021,38(8):183-189.
- [6] 张磊,王建萍,郑榕,等.基于VerilogHDL智能评测平台的“计算机组成原理”课程贯通式实验模式[J].实验技术与管理,2021,38(3):236-241.
- [7] 陈微,梁正发,唐玉华,等.计算机原理课程实验探索[J].计算机教育,2014(15):23-27.
- [8] 吴荣海.Logisim在“计算机组成原理”教学中的应用实践[J].大理学院学报,2016,1(12):96-100.
- [9] 谭志虎,胡迪青,秦磊华.“计算机组成原理”课程设计的改革[J].电气电子教学学报,2016,38(6):112-114.
- [10] 胡迪青,谭志虎,吴非.“计算机组成原理”课程虚拟

- 仿真实践教学研究[J].电气电子教学学报,2018,40(4):113-116.
- [11] 吴继明,曾碧卿.一种高效的CPU设计方法及其在计算机组成原理课程中应用[J].实验室研究与探索,2018,37(9):147-153.
- [12] 张磊,何杰,齐悦,等.工程认证背景下计算机组成原理课程教学设计改革[J].实验技术与管理,2021,38(4):179-185.
- [13] 王力生,余智铭,张冬冬.“计算机组成原理”实验CPU设计方法研究[J].实验技术与管理,2018,35(5):1-5.
- [14] 童英华.“嵌入式系统与应用”教学改革与探索[J].物联网技术,2022,12(8):137-138.
- [15] 王俊,陈俊杰,刘胜.基于Jetson Nano的遗留物检测人工智能嵌入式教学实践系统[J].实验室研究与探索,2022,41(11):204-207.
- [16] 杨静,胡秋琦,刘能锋,等.嵌入式系统设计实验教学改革与实践[J].计算机教育,2022(4):182-187.
- [17] 张欢,宋慧娜,滕旭阳,等.新工科背景下的嵌入式系统实验教学探索[J].电脑知识与技术,2023,19(3):166-168.
- [18] NAYAK A S, HIREMATH N D, UMADEVI F M, et al. A Hands-on approach in teaching computer organization & architecture through project based learning[J]. Journal of Engineering Education Transformations, 2021, 34: 742-746.
- [19] LEE S J, JUNG A, PARK J, et al. Cost-efficient hands-on learning design for computer organization course[C]//2020 15th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2020), [S.l.]: [s.n.], 2020: 150-155.
- [20] OZTEKIN H, TEMURTAS F, GULBAG A. On the improvement of the teaching quality and learning effectiveness in the computer organization course through FPGA and modular centered microcomputer design[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2018, 26(5): 1825-1840.
- [21] LARSON J, JORDAN S S, LANDE M, et al. Supporting self-directed learning in a project-based embedded systems design course[J]. IEEE Transactions on Education, 2020, 63(2): 88-97.
- [22] USTUNEL H. A project based innovative approach to an embedded systems course laboratory in software engineering education[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2020, 28(1): 160-166.
- [23] ALI M A, WAQAR O, AFRIDI S, et al. Introduction to embedded systems course: An engineering design approach[J]. International Journal of Engineering Education, 2022, 38(1): 101-109.
- [24] SAWADA S. A development of coin return teaching material to be controlled by embedded systems designed in a student experiment[C]// 2023 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications (ITC-CSCC), [S.l.]: [s.n.], 2023: 1-6.