

面向程序设计实验教学的结对编程系统设计与实现^{*}

何扬帆 高建华 黄文斌

武汉大学计算机学院, 武汉 430072

摘要 《C 语言程序设计》是国内部分理工专业的重要必修课。其中, 上机实验课是培养学生计算思维的重要环节。然而, 在实际的教学过程中, 部分学生由于基础薄弱无法独立完成上机实验, 而且教师难以及时了解学生的实验进度并给予指导。针对此类问题, 本文提出在实验教学中采用结对编程, 并设计了一款名为“结对辅助编程系统”的 Web 应用辅助这一过程的实现。该系统采用二分图最大权值匹配-匈牙利算法与 KM 算法来对学生进行自动分组, 能够综合考虑学生性别、性格特点和编程水平等多种特征。应用前端主要采用 Vue 框架, Element-UI 与 Axios 技术, 后端主要采用 SpringBoot 框架, MyBatis 以及 Maven 技术, 数据库则选用了轻量便捷的 MySQL。从实践效果来看, 该系统能够有效地协助教师进行课堂创建与管理, 学生信息收集, 分组方案设计, 结对环节设计, 过程信息记录和结对成果展示。绝大部分学生在体验了结对编程后, 均表示能够从这种软件过程中受益。

关键字 C 语言, 结对编程, Vue, SpringBoot

Design and Implementation of Pair Programming Assistant System for Programming Experiment Teaching

HE Yangfan GAO Jianhua HUWANG Wenbin

School of Computer Science of Wuhan University
Wuhan 430072, China
heyangfan@whu.edu.cn

Abstract— Programming in C Language is an important compulsory course for some science and engineering majors in China. The experimental class is an important part for the cultivation of students' computational thinking. However, in the actual teaching process, some students are unable to independently complete the whole experiments due to weak foundations, and teachers find it difficult to timely understand the progress of students' experiments and provide guidance. Accordingly, this article proposes the use of pair programming in the experimental teaching and designs a web application called "Pair Programming Assistant System" to help realize this process. The system adopts the maximum weight matching of bipartite graphs - Hungarian algorithm and KM algorithm to automatically group students, which can comprehensively consider various characteristics such as gender, personality traits, and programming level of students. The front-end of the application mainly adopts Vue framework, Element UI and Axios technology, while the back-end mainly adopts SpringBoot framework, MyBatis and Maven technology. The database uses lightweight and convenient MySQL. From the perspective of practical effects, the system can effectively assist teachers in classroom creation and management, student information collection, grouping scheme design, pairs forming, process information collection, and paired result display. The vast majority of students, after experiencing pair programming, indicate that they can benefit from this software process.

Key words—C Language, Pair Programming, Vue, Spring Boot

1 引言

《C 语言程序设计》是国内部分理工科专业的重要必修课。该课程介绍 C 语言的基础知识以及结构化程序设计方法, 对非专业学生而言, 是学习使用计算机技术解决专业问题的一个途径, 也是后续很多高阶计算机类课程的基础^[1]。因此, 该课程的教学非常重要。其中, 上机实验课更是让学生掌握知识点, 培养计算思维能力的重要环节。在实验课中, 学生通常

需要完成教师指定的习题。而同一门课程的学生编程水平参差不齐, 部分学生完全没有编程经验, 在起步阶段特别需要他人的帮助。但教师的时间精力有限, 难以当场指导所有困难学生。学生之间也可能因为互不熟悉, 难以通过沟通来解决问题。因此, 迫切需要行之有效的办法来改进实验教学环节的效果。

本文提出, 在实验教学中采用结对编程, 并设计实现了一款名为“结对编程辅助系统”的 Web 应用辅助这一过程。

^{*}基金资助: 本文得到“武汉大学 2022 年本科教育质量建设综合改革项目”资助。

2 国内外相关工作

结对编程的概念起源于 20 世纪 90 年代澳大利亚悉尼理工大学计算机教授 Larry Constantine。他观察到一种情况：“两名程序员一起合作编程，可以比单人编程更快地交出完整的，经过测试的代码，而且这些代码可以直接编译通过，几乎没有任何的错误^[2]。”

随着时代的不断发展，敏捷开发的思想和极限编程的方法不断普及，结对编程已经逐渐被软件开发者所接受。

在结对编程中，一名程序员担任驾驶员，负责进行代码输入；另一名程序员担任领航员，在驾驶员旁边审查他输入的每一行代码并提出改进意见，领航员主导整个代码的设计思想，由操作键盘的驾驶员来实现^[4]。由于人的思维速度比输入代码的速度快，一旁审查的人有足够的时间进行额外的思考，观察代码语法和程序内部结构有没有问题，并作下一步的计划，以便写出更为健壮准确的代码。

国内一些高校的教师已经在程序设计类课程教学中进行了实验，将实行结对编程的课堂与实行单独编程的课堂进行对照，得出了让学生进行结对编程的效果普遍优于单独编程的结论。然而结对编程进度的反馈，过程信息的记录仍缺少必要的研究^[6]。此外，目前的结对编程实践都是学生自行组队或者是老师指定组队，并不能全面地发挥结对编程应有的效果^[7]。

本研究设计并实现的结对编程系统能够为自愿分组与自动分组相结合，过程信息收集等环节提供支持。

3 结对编程系统的设计

3.1 结对分组的影响因素

分组是结对编程的前提，一个合理的分组方案将对结对编程的效果起到巨大的提升作用。在教学实践中，分组方案首先应充分尊重学生的意愿，不仅要满足部分学生的特殊要求（如自行组队），还要尽可能地让大部分学生匹配到自己理想类型的队友。这样的分组方案能极大地提高学生编程的积极程度。因此，本文设计了学生个人信息与结对意愿收集表，表单中有以下三个重要的参考因素。

性别：性别是匹配系统中重要的参考因素。在教学实践中，处在异性结对分组中的学生，相较于同性结对分组中的学生，编程效率的提升程度更大。

性格特点：队伍中两名学生的性格特点决定了编程中的交流强度，性格开朗的人在结对编程中往往会更倾向于与同伴交流，而性格内向的人则多数沉默寡言，与同伴的交流强度较低。编程中的交流强度过低会导致学生难以从对方身上学习编程经验，过高会导

致编程中出现太多无关编程的交流内容。为了量化学生们的性格特点，本文将性格分为开朗，中立，活泼三类。

编程水平：编程水平是分组方案设计最关键的参考因素。两名编程水平较低的同学可能会花大量的时间在部署开发环境等基础操作上，而编程水平较高的同学能通过自身的操作演示为同学们解答疑惑，减轻老师的工作负担。为了量化学生们的编程水平，本文将编程水平分为三类，分别是高（有较好的编程基础），中（对编程有一定的了解），低（完全没接触过编程）。

3.2 分组方案

在分组管理模块中，系统会对班级中所有未分组的学生进行自动分组。该分组方案的目的是将分组的学生进行两两分组，并使分组结果尽可能地满足课程教学的需要与学生们填写的结对意愿。对此，本文的分组方案采用二分图最大权值匹配-匈牙利算法与 KM 算法实现^{[8][9]}。

班级中的学生被视作一个带权二分图，其中顶点集 V_1 与 V_2 中顶点的数量相同，边的权值参考学生信息与结对意愿的匹配程度，从而将分组问题转化为求二分图的最大权值匹配问题。

算法首先为二分图各顶点设置初始顶标，使用匈牙利算法寻找图的完备匹配，并判断是否为最佳匹配。如果不是，则使用 KM 算法更新顶标，继续使用匈牙利算法寻找完备匹配。

重复以上过程，直到找出拥有最大权值之和的最佳匹配。最后，将最佳匹配中每条边顶点对应的两个学生作为一组，分组算法完成目标。

(1) 顶点集的构造

一般来说，编程水平较高的人能在结对编程中给予编程水平较低的人技术上的指导，使其编程水平得到不小的提升。教师在对学生进行分组时，应尽可能地使编程水平较低的人与水平较高的人结对，让他们从队友身上学到更多的编程知识，巩固《C 语言程序设计》知识点，这样可以很好地提升教学效果。因此，在算法二分图的构造中，要尽可能地将编程水平较好的同学和编程水平较差的同学归为不同的顶点集合。

系统根据之前收集的学生个人信息，将学生分为编程水平高（有较好的编程基础），中（对编程有一定的了解），低（完全没接触过编程）三类，并放入 X 组（编程水平较高）和 Y 组（编程水平较低）中。如果学生人数为奇数，则从中选择一位编程水平为高（如果没有编程水平为高的学生，则选择为中的学生）的学生从图中剔除让其单独组队。如果学生人数为偶数，两组的人数均为总人数的一半。之后将编程水平为高

的人全部放入 X 组,编程水平为低的人全部放入 Y 组,最后将编程水平为中的人随机填入两组中,使得两组人数相同。如果出现编程水平为高或为低的人超出总人数一半的情况,则将多出的人数直接放入另一组中,再进行人数的调整。



图 1 顶点集构造

最后将 X 组和 Y 组的同学视作二分图两个顶点集中的顶点,顶点集构造完毕。图 1 以 8 名同学为例,展示了顶点集的构造过程。

(2) 边权值的选定

二分图中边权值的选定主要参考学生之间的匹配程度(学生填写的结对意愿与结对伙伴的个人实际信息),为了量化这一匹配程度,本文提出了“契合分数”这一概念。“契合分数”由三部分相加而得,分别是编程水平匹配分数,性格特点匹配分数以及性别匹配分数。学生编程水平意愿与待定队友的编程水平信息相同则分数为编程水平的权值,不同为 0,例如甲学生期望自己的队友编程水平为高,而待定队友乙自己填写的编程水平为低,那么编程水平匹配分数为 0,其它两项分数也是通过类似的方式确定的。契合分数公式如公式 2 所示,其中 f 为契合分数, $w1$ 为性别匹配分数(相同为性别的权值,不同为 0), $w2$ 为性格特点匹配分数(相同为性格的权值,不同为 0), $w3$ 为编程水平匹配分数(相同为编程水平的权值,不同为 0)。

$$f = w2 + w3 \quad (1)$$

甲对乙的“契合分数”量化了甲学生对乙学生单向的匹配程度,而由于结对意愿是双向的,二分图边权值的选定也需要考虑到乙学生对甲学生的匹配程度。因此,本文将边权值定义为公式 3,其中 f_{ij} 和 f_{ji} 分别表示学生 i 对 j 的契合分数和 j 对 i 的契合分数。

$$W(i,j) = (f_{ij} + f_{ji})/2 \quad (2)$$

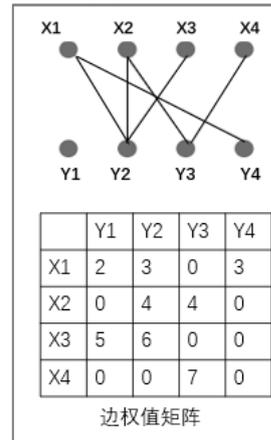


图 2 边权值矩阵

算法将 X 组的每个顶点和 Y 组中的顶点相连为边,并计算顶点所代表学生之间的契合分数,得出边权值矩阵,带权二分图构造完毕,如图 2 所示。

(3) 最佳匹配的求解

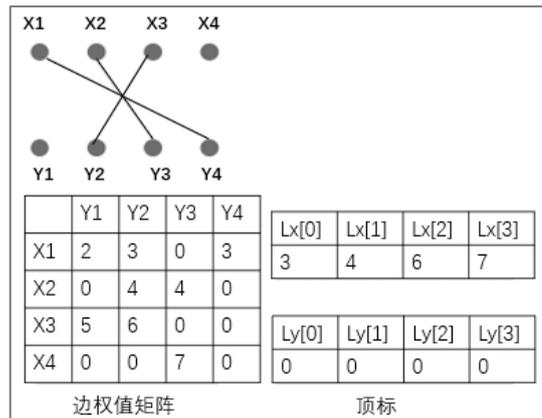


图 3 探索匹配

构造二分图之后,开始正式使用匈牙利算法和 KM 算法求解最佳匹配,以期得到整体匹配程度最高的分组。

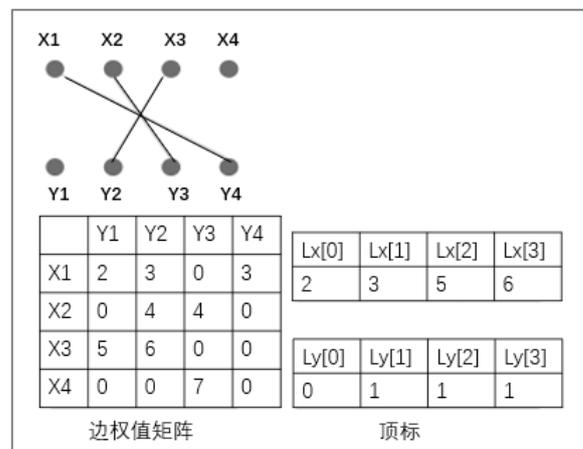


图 4 更新顶标

使用匈牙利算法探索，为 X1, X2, X3 分配，成功，如图 3 所示。继续为 X4 匹配，未找到增广路径，已经达到了本此匈牙利算法所能找到的最大匹配，但并没有找到最佳匹配。因此需要更新顶标，求解最小差值 $d=1$ ，更新如图 4 所示。更新后，继续使用匈牙利算法求解最佳匹配。

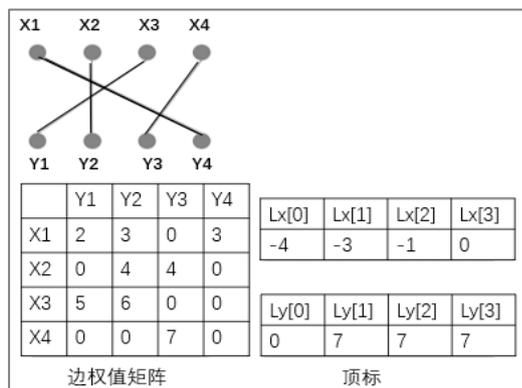


图 5 最终结果

图 5 所示为得到的最佳匹配分组 (X1, Y4), (X2, Y2), (X3, Y1), (X4, Y3)。系统将顶点对应的学生加入分组，分组完成。

3.3 结对编程的角色

本文参照结对编程的定义，为小组中学生定义了两个角色和相应的职责。驾驶员，主要负责操纵键盘，

编写代码，运行和调试。领航员，主要负责与驾驶员交流编程思想，检查驾驶员写的代码有没有逻辑错误或语法错误，以及提交过程信息表格与结果信息表格。

为了确保学生在实验中有足够的参与度，本文设计的系统提供了“角色互换”的功能。领航员在审查代码时可以学习到驾驶员的编程技巧，例如快捷键，代码命名及格式等，成为驾驶员之后可以实践新学习的内容，并在队友的指导下掌握问题更好的解决方式。

3.4 结对编程的过程信息

在大部分程序设计语言课程的上机操作环节中，老师可能由于上机课时不够或验收环节设计存在的欠缺，无暇顾及学生编程中的进度，难以及时对有困难的学生给予指导。另外，部分学生不会主动向老师提出遇到的难题，这导致结对编程的过程对于老师来讲是透明不可见的。针对此问题，本文设计的辅助系统提供了“提交过程信息”这一功能，它需要观察员提交以下几项重要信息：已完成代码行数，代码测试次数，是否完成和编程截图。

3.5 结对编程的结果信息

在现有的上机课程中，老师可能只关注程序是否能测试通过，并不能准确地把握学生结对编程的学习成果。本文设计的辅助系统添加了“提交结果信息”这一功能，它需要观察员填写以下几项重要信息：

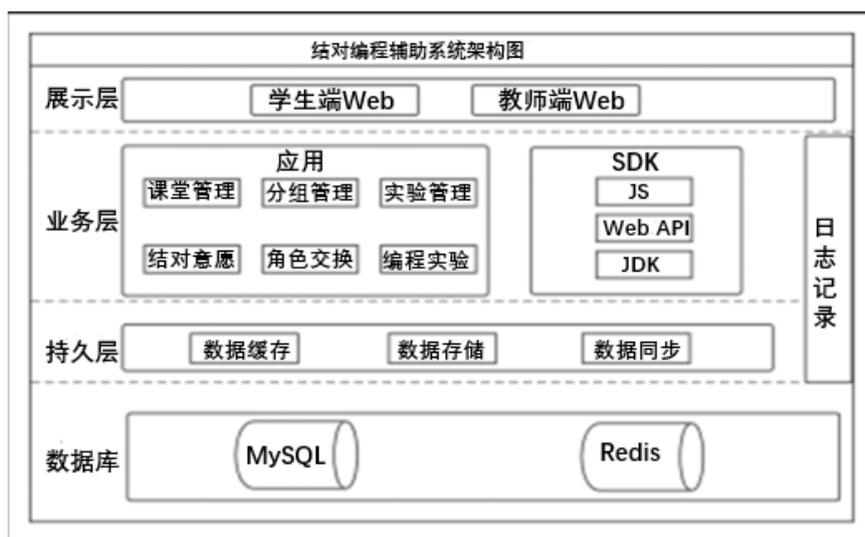


图 6 系统逻辑架构图

角色交换次数：这项指标一定程度上反映了小组成员的参与程度和交流程度，一次成功的结对编程会进行至少一次但不频繁的角色交换。

代码纠错次数：观察员的职责之一就是在驾驶员编写代码时指出错误并协助修改，这是提高代码正确

性，代码通过率的重要手段。这项指标反映了结对编程中的观察员与驾驶员的交流程度。

代码测试次数与编程截图与过程信息中相应的项含义相同。

3.6 技术选型与系统逻辑架构设计

本系统主要采用 Vue+SpringBoot+MyBatis-plus 的 Spring MVC 模式。这是一种低耦合的开发模式，使用户界面与业务逻辑分离，降低了系统的复杂度，使本系统的 Web 开发变得更加便捷。前端采用的技术为 Vue，Element-UI 组件库以及 Axios，后端采用的技术为 SpringBoot，数据库采用的技术为 MySQL 以及 Redis。这些技术都是 Web 应用开发的前沿技术，很适用于本系统的开发。

结对编程辅助系统逻辑架构设计为如图 6 所示。系统主要呈现为学生端 Web 网页和教师端 Web 网页，分别供学生和教师登陆使用，学生端有填写结对意愿，角色交换与编程实验的功能，教师端有课堂管理，分组管理，实验管理等功能。系统所使用的软件开发工具包为 JS，Web API 与 JDK，所使用的数据库为 MySQL。

4 系统主要功能的实现

4.1 主要功能模块

教师端和学生端的主要功能模块如表 1 和表 2 所示。

表 1 教师端功能模块列表

序号	功能模块	功能定义
1	课堂管理	教师可以创建新的课堂，查看自己名下所有的课堂，为课堂添加学生并提供学生使用的账号和密码，在课堂结束后关闭课堂。
2	分组管理	教师可以对课堂进行分组，并查看指定课堂的分组。
3	实验管理	教师可以发布实验，查看实验题下的过程信息和结果信息。

表 2 学生端功能模块列表

序号	功能模块	功能定义
1	填写结对信息	学生可以填写自己的个人信息和结对意愿。
2	角色交换	学生可以查看自己的角色并与队友互换角色。
3	编程实验	学生查看教师发布的实验题，在规定的时间内提交过程信息和结果信息。

4.2 编程实验与实验管理的实现

在完成了课堂创建、学生分组之后，教师可以进入发布实验页面，点击右上角发布实验，上传实验图片，设置相应时间节点，如图 7 所示。发布成功后，

系统会刷新实验题列表。教师找到新发布的题目，点击开始，实验正式开始计时，如图 8 所示。



发布实验

实验题号
编程题第5小题

实验截止时间 (单位: 分钟)
- 20 +

中途提交时间 (单位: 分钟)
- 10 +

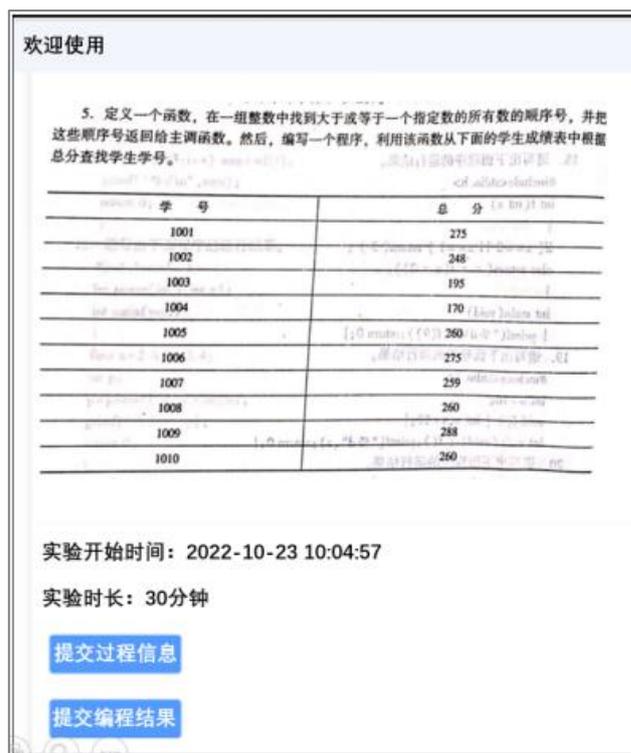
实验图片
点击上传
只能上传jpg/png文件, 且不超过1500kb
实验2.png

班级
《C语言程序设计》测绘学院

取消 确定

图 7 发布实验页面

学生进入编程实验页面可以查看实验题图片并根据题目要求开始结对编程，如图 9 所示。



欢迎使用

5. 定义一个函数，在一组整数中找到大于或等于一个指定数的所有数的顺序号，并把这些顺序号返回给主调函数。然后，编写一个程序，利用该函数从下面的学生成绩表中根据总分查找学生学号。

学号	总分
1001	275
1002	248
1003	195
1004	170
1005	260
1006	275
1007	259
1008	260
1009	288
1010	260

实验开始时间: 2022-10-23 10:04:57
实验时长: 30分钟

提交过程信息
提交编程结果

图 9 实验题

实验题号	途提交时间 (分钟)	实验截止时间	状态	操作
实验题1	5	10	已完成	查看实验题图片 查看过程列表 查看结果列表
实验题2	10	30	已完成	查看实验题图片 查看过程列表 查看结果列表
编程题第5小题	10	20	开始	查看实验题图片 查看过程列表 查看结果列表

图 8 实验题列表

小组观察员进入结对编程页面。系统在教师指定的时间弹出表格提醒小组观察员填写，如图 10 所示。这些信息不仅反映了小组的实验进度，还反映了小组内两名同学的交流程度。在实验截止之前，还需要提交结果信息表格。

全屏查看学生上传的代码界面截图，直观地了解学生的实验进度和实验成果，如图 12 所示。

图 10 过程信息表单

```

1 #include <stdio.h>
2 const int MAX = 256;
3
4 int* func(int arr[2], int target, int length) {
5     int res[MAX];
6     int j = 1, num = 0;
7     for (int i = 0; i < length; i++) {
8         if (arr[i][1] >= target) {
9             res[j++] = arr[i][0];
10            num++;
11        }
12    }
13    res[0] = num;
14    return &res[0];
15 }
16
17 int main() {
18
19 }
    
```

图 12 代码截图

5 教学效果

2022-2023 学年第一学期和第二学期，我们在武汉大学面向非专业学生开设的《C 语言程序设计》课程中开始了结对编程试验。

采用结对编程实践的学期，学生评教分数均高于未采用结对编程的 2021-2022 第二学期，如表 4 所示。

在每个章节，老师选择 2 道题目供结对编程实践，学生根据情况选择其中的 1-2 道。课后编程题，则由学生独立完成。在比较结对编程和个人编程的效果后，学生完成了课程结束时老师发放的问卷。问卷中包含的问题和回答情况如表 3 所示。从反馈来看，绝大部分学生对于结对编程过程的效果是满意的。

组号	时间	已完成行数	测试次数	是否完成	操作
1	2022-10-23 10:15:03	10	2	否	查看编程截图

图 11 过程信息列表

在学生进行结对编程时，教师可以查看学生们提交的过程信息列表和结果信息列表，掌握学生的工作进度和学习效果，从而及时地指导有困难的小组，并更好地调整未来的教学计划，如图 11 所示。教师可以

表 3 结对编程教学效果问卷中的问题

编号	题目	支持率
1	是否有利于快速熟悉编程环境?	95.23%
2	是否有利于理解本章重要知识点?	96.71%
3	是否有利于提升实验题的完成速度?	97.07%
4	是否有利于开阔解题思路?	95.35%
5	是否有利于团队协作能力的培养?	94.20%

表 4 学生评教分数

学期	采用结对编程	评教分数
2021-2022 第二学期	否	93.11
2022-2023 第一学期	是	94.69
2022-2023 第二学期	是	96.50

6 结束语

以《C 语言程序设计》为代表的程序设计类课程是国内高校诸多理工科专业的重要基础课。由于非专业的学生计算机应用能力差异较大,很多学生在熟悉编程环境、独立完成实验等方面存在一定困难。另外,传统的编程实验教学环境缺少学生完成情况的及时反馈,教师难以及时发现困难学生并提供指导。本研究提出,在实验教学环节采取结对编程的方式,并设计实现了一款名为“结对编程系统”的 Web 应用辅助这一过程的实现。从两个学期的实践反馈来看,绝大部分学生肯定了结对编程对于改进实验教学的积极效果。

参考文献

- [1] 林宁,左悦.基于云平台的 C 语言课程学习平台设计与实现[J].计算机技术与教育学报,2023,11(5):96-100.
- [2] 涂韬,郭燕青,王莹莹.任务驱动的结对编程在 C 语言程序设计实践教学中的应用[J].通讯世界,2020,27(3):217-218.
- [3] 张玥,杨叶博,杨洋,窦万峰.基于结对编程的结对学习方法与模式研究[J].电脑知识与技术,2017,13(14):114-116. DOI:10.14004/j.cnki.ckt.2017.1553.
- [4] 闫晟,徐彬.程序设计基础课程中结对编程实践与效果评估[J].计算机教育,2020(4):17-20.
- [5] 涂小琴,张春红,商伟.结对编程方法在 C 语言教学中的应用[J].现代计算机(专业版),2016(28):28-31.
- [6] 吕钊,张超.基于结对编程的翻转课堂教学模式探索[J].山东农业工程学院学报,2018,35(5):166-169.
- [7] 汤傲.分布结对编程环境下的干预模型及系统实现[D].南京师范大学,2017.
- [8] Shuang Fu,Guoyin Zhang,Tingyi Shang. Cross-layer parallel cooperative spectrum sensing for heterogeneous channels based on iterative KM algorithm[J]. Cluster Computing,2019,22(2).
- [9] 肖瑶,刘会衡,程晓红,安忙忙.基于灰狼优化和匈牙利算法的 D2D 资源分配策略[J/OL].计算机应用研究:1-6[2022-05-02]. DOI:10.19734/j.issn.1001-3695.2021.10.0467.