

基于成果导向的编译实验体系逆向设计与 课赛融合探索^{*}

沈洁^{**} 方建滨 陈振邦 苏醒 黄春 王挺

国防科技大学计算机学院, 长沙 410073

摘要 在后 E 级计算时代, 国产编译软件人才培养是关系高性能计算机系统软件自主可控核心技术的重要方面。本文以成果导向教育 (Outcome-Based Education, OBE) 理念为指导, 针对传统编译课程实践环节碎片化、与工程需求脱节的问题, 提出一种“能力-知识点-实验”映射驱动的编译实验项目逆向设计方法。通过构建覆盖编译前端、中端与后端全流程的九项阶梯式实验, 形成“基础编译功能、基础编译优化、并行编译优化”的递进式实验体系, 并结合全国大学生计算机系统能力大赛实现课赛深度融合。实施结果表明, 该模式有效提升了学生在编译理论知识、并行计算思维与系统实践维度的能力, 为学生继续在编译领域研究深造或进入高性能计算相关行业提供了扎实的能力基础与工程实践支撑, 为国产编译软件人才培养提供了有效的实践教学范式。

关键字 成果导向教育, 编译课程, 能力目标, 实验体系逆向设计, 课赛融合

Outcome-based Compiler Experiment Reverse Design and Exploration of Course-Competition Integration

Jie Shen Jianbin Fang Zhenbang Chen Xing Su Chun Huang Ting Wang

College of Computer Science and Technology
National University of Defense Technology
Changsha 410073, China

Abstract—In the post-exascale era, cultivating domestic compiler professionals is critical to developing self-supporting core technologies for high-performance computing system software. Guided by the Outcome-Based Education (OBE) philosophy, this paper addresses the issues of fragmented practical components and misalignment with engineering needs in traditional compiler courses. We propose a reverse design method for compiler course experiments driven by a "capability-knowledge point-experiment" mapping. This method involves constructing nine progressive experiments covering the entire front-end, middle-end, and back-end compiler workflow, and forms a tiered experiment project structured across basic compiler functionality, basic compiler optimization, and parallel compiler optimization. Deep integration with the National Computer System Development Capability Competition is implemented to achieve course-competition synergy. Implementation results demonstrate that this compiler experiment project effectively enhances students' capabilities across three dimensions: compiler theory knowledge, parallel computing thinking, and system-level practical competence. It provides students who aspire to pursue advanced research in the field of compilers or enter the high-performance computing industry with a solid foundation in essential skills and engineering practice. Furthermore, it offers an effective practical teaching paradigm for cultivating domestic compiler software professionals.

Keywords—Outcome-Based Education, compiler course, capability objectives, experiment project reverse design, course-competition integration

1 引言

高性能计算能力是国家科技创新体系和综合科研实力的重要体现, 而编译器作为后 E 级时代高性能计

算机系统的核心基础软件, 是国家长期关注和重点突破的“卡脖子”关键技术之一。在当前国际技术竞争格局下, 培养国产编译软件人才对突破系统软件自主可控技术瓶颈具有重要战略意义。如图 1 所示, 基于高性能计算行业发展和工程需求, 国产编译软件人才需具备三个维度的能力:

(1) 编译理论知识能力, 理解和掌握基础编译原理与编译优化方法, 能够贯通编译前端、中端至后端的编译理论知识框架的能力;

(2) 并行计算思维能力, 面向多级并行处理器架

^{*} **基金资助:** 湖南省普通本科高校教学改革研究项目“突出软件理解与优化能力培养的基础软件课程群建设”(202401000248); 湖南省研究生精品示范课程项目“高级编译技术”(湘教通[2024]18 号); 国防科技大学研究生精品课程培育项目; 国防科技大学教学成果立项培育项目。

^{**} 通讯作者: 沈洁 j.shen@nudt.edu.cn。

构（指令级/数据级/线程级并行），能够在不同层次设计和提出并行编译优化方法、提升程序性能的能力；

（3）编译系统实践能力，通过编译器全生命周期开发实践，能够将理论知识与并行思维应用于编译器实际开发过程的动手实践能力，最终培养出能够解决国产基础软件领域复杂工程问题的编译软件人才^[1,2]。

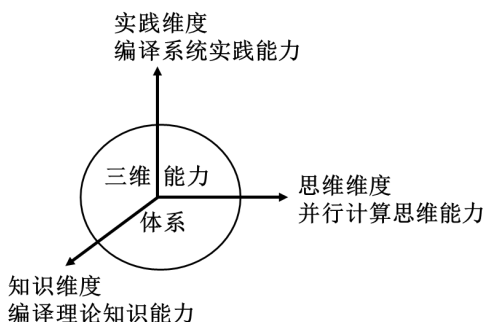


图1 国产编译软件人才三维能力体系

成果导向教育（OBE）以能力达成为核心导向，遵循“目标驱动、学生主体、持续迭代”的三原则^[3]，旨在实现从知识灌输向能力内化的教学模式转型，实现知识教学向能力教学的转变^[4,5]。编译课程作为衔接计算机硬件架构（如向量计算单元、多核处理器架构）与上层软件优化（如高性能计算、并行算法设计）的关键枢纽，是计算机学科中一门十分重要的专业课程^[6]。同时，由于编译优化涉及较多抽象理论与复杂算法，编译课程也是一门公认的兼具高阶性、挑战性和工程性的课程^[7]。为使学生有效将编译理论知识与并行计算思维转化为系统性实践能力，需设计和构建全流程实践教学，形成以实践推动能力培养的递进式培养途径^[8,9]。传统编译课程实践教学多采用碎片化实验设计（如独立的词法分析实验、标量优化实验等），实验间缺乏统一的目标与延续性，没有形成一个完整的实验体系，难以支撑编译器全生命周期开发能力的系统性训练。针对这一问题，国防科技大学编译教学团队基于OBE理念开展以能力目标为导向的实践教学逆向设计与重构，形成了覆盖编译前端、中端至后端的递进式实验体系，并深度融合全国大学生计算机系统能力大赛赛题^[10]，形成以赛促教、以赛验学的课赛融合良性闭环。

教学团队于2023年起基于OBE理念，通过“能力目标拆解、知识点映射、实验项目逆向设计”的方法，构建了“能力-知识点-实验”三维关系模型，并据此设计分层次阶梯式实验。经过近3年的迭代优化，最终形成了具有我校高性能计算特色的课程实验体系。整个实验项目包括三阶共九项实验，不仅涵盖编译器的基础功能实现和基础代码优化，还包括面向并行处理器架构的并行编译与优化，学生能够在编译器开发的全流程中，通过学（编译理论）、练（实践开发）、

悟（思维范式），实现螺旋式能力提升，从而为进入科学研究或高性能计算、国产基础软件研发等行业提供良好的能力基础。

2 基于能力目标的实验体系逆向设计

2.1 编译课程能力目标

编译课程以培养适应国产处理器技术需求的编译软件人才为目标，学生需具备覆盖编译理论知识、并行计算思维、编译系统实践的三维能力体系。

在理论知识维度，需突破传统课程对编译前端的单一聚焦，系统掌握包括词法分析、语法分析、语义分析、中间表示生成的前端技术，深入理解中端控制流分析、数据流分析、标量优化及依赖关系分析与循环优化，并熟练运用后端指令选择、寄存器分配等方法进行目标代码生成。

在并行计算思维维度，围绕国产处理器多级并行架构，学生需分层掌握针对处理器流水线部件的指令调度以开发指令级并行（Instruction Level Parallelism, ILP），针对向量计算单元的自动向量化以开发数据级并行（Data Level Parallelism, DLP），以及针对处理器多计算核心的自动并行化以开发线程级并行（Thread Level Parallelism, TLP）。

在编译系统实践维度，聚焦高性能计算中编译器开发的实际工程需求，学生需具备运用编译理论知识和并行计算方法，进行综合性、系统性的编译器设计、实现、优化与集成的能力，形成面向国产处理器的编译器架构设计、中间表示设计、目标代码生成、目标代码优化的技术闭环。

2.2 能力-知识点-实验三维关系模型

基于能力目标到知识点的拆解细化，教学团队以OBE理念为指导，通过“能力-知识点-实验项目”的逆向设计方法对编译课程实验体系进行重构。如图2所示，一方面，根据三个维度的能力目标和知识点，设计9项针对性的实验；另一方面，将所有实验整合为一个从零构建编译器的综合性实验项目，按照阶梯式推进的顺序划分为基础编译功能、基础编译优化和并行编译优化三个模块，兼顾功能性、系统性和挑战性。

基础编译功能模块包括构建词法与语法分析器（实验一）、生成中间语言表示（实验二）和基于指令选择的基础代码生成（实验三），对应理论知识能力维度，该模块是编译器的基础功能实验，旨在快速构建编译器原型，实现从源码解析、中间代码生成、再到目标代码生成的前-中-后端全流程贯通，为后续编译优化提供可扩展的验证基准。

基础编译优化模块包括基于控制流分析和数据流

分析的标量优化(实验四)、基于寄存器分配的代码生成优化(实验五)和基于依赖关系分析的循环优化(实验六),同样对应理论知识能力维度,该模块是编译器

的基础性能实验,通过“代码分析、代码变换、功能验证与性能测试”的开发方式,夯实学生对经典编译优化范式的工程实现能力。

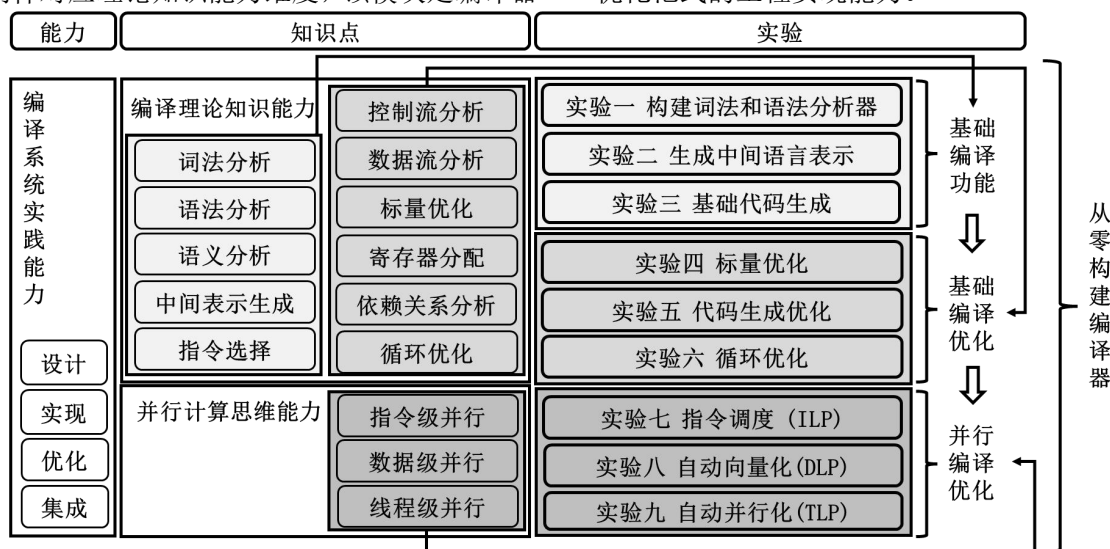


图2 以“能力-知识点-实验项目”逆向设计方法指导编译课程实验体系设计与重构

并行编译优化模块包括指令调度(实验七)、自动向量化(实验八)和自动并行化(实验九),对应并行计算思维能力维度,是针对国产处理器深流水、宽向量、多核心并行架构所设计的编译器性能进阶实验,实现从标量代码到多层次并行代码的性能提升,旨在培养学生进行并行编译与优化的能力。

上述三阶九项实验共同组成了从零构建编译器的完整实验体系,对应系统实践能力维度。通过分层递进、能力耦合的设计逻辑,将编译理论、优化算法、实现技术与编译器构建深度融合。学生通过分层次阶

梯式的实验流程,逐步掌握从编译器基础功能开发到性能优化的全过程系统实践能力。

3 实验项目内容、实施与成效

3.1 实验项目内容

根据实验体系设计,教学团队细化了整个实验项目各项实验的具体内容与实施方案。如图3所示,每项实验又再细分为面向编译功能的基础实验、面向竞赛的进阶实验,以及面向国产处理器现实编译优化问题的高阶实验。



图3 编译课程实验项目内容

实验项目以全国大学生计算机系统能力大赛编译系统设计赛的 SysY 语言作为源语言。其中:

(1)构建词法与语法分析器要求通过 ANTLR 工具链构建 SysY 语言的词法分析器和语法分析器,并生成抽象语法树。

(2)生成中间语言表示要求定义和实现编译器的中间语言和相关数据结构,通过遍历抽象语法树生成 SysY 源程序的中间表示,其进阶实验要求设计和生成 SSA (Static Single Assignment) 形式的中间表示。

(3)基础代码生成要求利用宏扩展或模式匹配的指令选择方法实现基于 load/store 栈的基础代码生成,可进一步完成支持函数调用的代码生成。

(4)标量优化要求基于控制流分析和数据流分析,实现常数折叠(CF)、常数传播(CP)、公用子表达式删除(CSE)、值编号(VN)、死代码删除(DCE)等标量优化,并可以进阶实现遍管理器。

(5)代码生成优化要求运用使用计数寄存器分配方法,或图着色、线性扫描等进阶寄存器分配方法实现编译后端的寄存器分配,进一步优化后端代码生成。

(6)循环优化要求利用依赖关系分析和循环优化方法进行循环展开、标量替换等基础优化,以及循环分块等进阶优化,以提高程序性能。

(7)指令调度要求利用依赖关系分析和列表调度算法实现基本块内的局部指令调度,其进阶实验要求利用轨迹调度实现跨基本块的全局指令调度。

(8)自动向量化要求识别适合向量化的循环或进行必要的循环变换以满足向量化条件,利用 NEON/RISC-V 指令级扩展实现循环向量化。进一步地,可构建面向自动向量化的代价模型,用于量化评估代码段是否适宜实施向量化变换。

(9)自动并行化要求判定适合并行化的循环或进行必要的循环变换以满足并行化条件,利用多线程机制实现矩阵乘、快速傅里叶变换 FFT、LU 分解等高性能计算典型计算核心的自动并行化。

3.2 实验项目实施与初步成效

整个实验项目按 3-4 人为一组分组实施,遵循“增量式开发、阶段性验收、个性化提升”的实施方法。共 9 项实验采取与理论教学穿插进行、动态协同的方式展开,在讲授完相关理论知识后即衔接对应的实验,让学生在实践中深化理解、巩固理论,实现“学中做、做中学”的良性循环。实验项目建设有配套的实验仓库,包括实验课件、实验说明文档、基础框架代码和实验测试用例。每项实验均给出明确的实验目标、实验方法指导和可操作的基本步骤,引导学生完

成从环境搭建、分析设计、实现编码到测试验证的系统化实践流程。

依据三层次化的实验设计,整个实验项目设置了基础编译功能、基础编译优化和并行编译优化三个里程碑节点,由教学团队老师进行阶段性验收和反馈,并在学期末进行最终实验验收,确保项目方向正确、实验达标,并促使学生能够在可控的粒度内持续获得成就感。

鉴于学生学习能力的个体化差异,项目提供不同难度和深度的实验任务,如图 3 所示的实验项目中,基础编译实验是必做实验,面向编译竞赛的进阶实验和面向国产处理器现实编译优化问题的高阶实验是选作实验。允许并鼓励学生根据自身兴趣和能力,在完成基础要求的前提下,选择不同难度和侧重点的扩展任务路径。同时,合理制定实验成绩评定标准,其中基础编译功能模块占实验成绩的 60%,基础编译优化模块占 15%,并行编译优化模块占 10%,小组分工与工作量占 10%,答辩情况占 5%,既要求全体学生能够完成完整编译流程的功能性实验,又鼓励有潜力的学生去挑战更具高阶性的优化实验,冲击全国编译竞赛,最终实现“全员达标、梯队拔尖”的个性化人才培养模式。

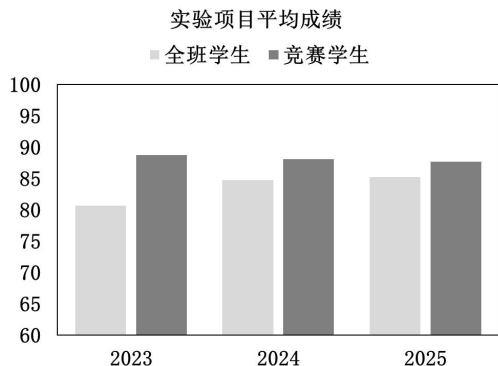


图 4 实验项目成绩统计

教学团队依托我校计算机专业《并行编译与优化》课程,系统性推进编译课程实验体系重构与实验项目改革。自实施改革以来,共三届学生完成实验项目。从实验完成情况看,学生能够掌握从前端词法分析、语法分析到中间语言表示生成,再到后端代码生成这一完整编译流程的基础算法和代码实现,并在此基础上实现了 CF、CP、DCE 等标量优化和简易寄存器分配算法等部分编译优化遍,构建了一个具备基础编译功能并兼具一定编译优化能力的编译器。如图 4 所示,三届学生的实验平均得分依此为 80.65、84.78、85.22 分,呈持续上升趋势,表明学生愈发愿意投入更多精力以高质量完成实验项目。其中,报名参加编译竞赛的学生进一步拓展开发了函数内联、循环不变量外提、

图着色寄存器分配等更多编译优化遍,并尝试实现了指令调度、多线程并行等并行编译优化,取得了更高的实验成绩,平均得分维持在约88分。从竞赛结果看,三届累计10支参赛队伍入围全国大学生计算机系统能力大赛编译系统实现赛道决赛,最终斩获国家级奖项8项,包括二等奖2项、三等奖3项、优胜奖3项。

此外,学期末学情分析表明,94.7%的选课学生认为该实验体系有效加深了自己对编译优化算法的理解、开拓了并行计算思维,提高了编译全流程实践能力。毕业生追踪数据显示,绝大多数选课学生毕业后选择继续攻读高性能计算、系统软件方向研究生,或进入系统软件研发相关行业,实证了本实验项目对科研人才和工程人才培养的显著赋能效应。

4 结束语

本文基于OBE理念,根据国产编译软件人才培养的三维能力体系,提出了“能力-知识点-实验”三维关系模型驱动的编译课程实验体系逆向设计,构建了覆盖编译前-中-后端全流程的实验项目,包括三阶(基础编译功能、基础编译优化、并行编译优化)共九项分层次阶梯式实验,并结合全国大学生计算机系统能力大赛赛题,形成了基础实验固本、竞赛实验提质、高阶实验拓界的课赛融合闭环。实验项目实施成效表明,该实验体系显著提升了学生对编译优化算法的理解能力、并行计算思维水平以及动手实践能力。未来工作将进一步深化实验教学改革,探索大模型辅助编译优化的教学路径,为构建自主可控的高性能计算机软件生态提供可持续的人才支撑。

参考文献

- [1] 陈立前,卢遥,刘万伟,等.将现代计算能力培养融入理工科教育的实践[J].计算机教育,2022,(6):103-107.
- [2] 张铭,陈娟.ACM/IEEE CC2020 胜任力模型对中国计算机教育发展的影响[J].计算机教育,2023,(4):3-8+14.
- [3] 李鑫,齐红,张馨予,李烁,姜宇.工程教育认证背景下计算机一流专业建设的路径研究[J].计算机技术与教育,2022,10(2):62-65.
- [4] 李志义,王泽武.成果导向的课程教学设计[J].高教发展与评估,2021,37(3):91-98.
- [5] 王玉.OBE背景下的师生学习共同体人才培养方式研究[J].计算机技术与教育学报,2024,12(1):100-104.
- [6] 张莉,蒋竞.编译课程建设思路及成效[J].计算机教育,2024,(5):25-30.
- [7] Yanxiang He, Zhuomin Du, Hanfei Wang. Research on the Knowledge and Ability dual-driven Teaching Model for the Course of Compilers Principles. In Proceedings of the 15th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2020), pp.24-29,2020.
- [8] 计卫星,王贵珍,栾华,张杨.层次递进式编译课程实践体系构建与实践[J].计算机教育,2025,(7):259-266.
- [9] 刘彬彬,李宏芒,唐益明,胡学钢,李建华,石雷.面向编译器实现的编译原理实践教学改革[J].计算机技术与教育,2024,12(3):161-165.
- [10] Yu Zhang, Chunming Hu, Mingliang Zeng, Yitong Huang, Wenguang Chen, and Yuanwei Wang. Encouraging Compiler Optimization Practice for Undergraduate Students through Competition. In Proceedings of the 26th ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education (ITiCSE 2021), pp.4-10, 2021.