

面向交叉学科人才培养的高性能计算课程建设

贺红¹, 程雨芊², 袁胜忠², 李素梅¹, 金长龙¹

(1. 山东大学机电与信息工程学院, 山东 威海 264209;

2. 山东大学高效能计算实验中心, 山东 威海 264209)

【摘要】随着云计算资源的普及和人工智能发展对算力日益增长的需求, 计算模式从串行发展到并行。目前, 计算机专业的大学毕业生能够编写并行化程序的寥寥无几, 这说明计算机本科培养的课程体系已经落后于经济发展的需要, 必须立即做出课程体系的相应调整。为此, 本文提出在计算机本科培养方案中增加高性能计算选修课以及为了培养交叉学科创新性人才在工程类通识模块中增加高性能计算通识课的思路, 给出课程建设目标和方法以及课程思政内容和实验课开设注意事项。实践证明, 选修高性能计算课程的学生有较高的解决大规模复杂计算问题的能力和更宽广的就业选择, 能够满足国家经济发展对高性能计算人才的需求。

【关键词】交叉学科人才培养; 高性能计算; 课程建设; 课程思政; 线上实验指导
中图分类号: TP391 文献标识码: A

Construction of the High Performance Computing Curriculum for Interdisciplinary Talent Training

He Hong¹, Cheng Yuqian², Yuan Shengzhong², Li Sumei¹, Jin Changlong¹

(1. School of Mechanical, Electrical & Information Engineering, Shandong Weihai 264209, China;

2. High Efficient Computing Experiment Center, Shandong University, Shandong Weihai 264209, China)

【Abstract】 With the popularization of cloud computing resources and the growing demand for computing power from the development of artificial intelligence, the computing mode has evolved from serial computing to parallel computing. Currently, very few college graduates majoring in Computer Science and Technology are able to code parallelization programs. This shows that the curriculum system of computer undergraduate training has lagged behind the needs of economic development. Corresponding adjustments to the curriculum system must be made immediately. Therefore, this paper puts forward the idea of adding high performance computing (HPC) elective courses to the computer undergraduate training program, and adding HPC general education courses to cultivate interdisciplinary innovative talents. The objectives and methods of HPC course construction, as well as the ideological and political content and online experiments guidance are proposed. Practice has proved that students who take HPC curriculum have high ability to solve large-scale complex computing problems and broader employment choices, which can meet the needs of national economic development for HPC talents.

【Keywords】 Interdisciplinary talent training; High performance computing; Curriculum construction; Curriculum ideological and political training; Online experiments guidance

一、前言

在人工智能时代, 科学计算已经成为继理论研究、实验科学之后的新的科学研究模式, 算力已经成为未来企业乃至国家发展的主要动能。算力, 也称作计算力, 顾名思义就是设备的计算能力。小至手机、PC, 大到超级计算机 (Super Computer,

SC), 算力存在于各种硬件设备, 没有算力就没有各种软硬件的正常应用。本研究中的高性能计算 (并行计算 / 高效能计算 / 集群网络与并行计算) 是指使用超级计算机进行科学计算。中国的高性能计算 (High Performance Computing, HPC) 领域硬件发展很快, 超级计算机的数量和质量居世界第二位,

稳居世界先进水平。超级计算机借助云计算助力新一代人工智能,已经进入科学研究和数字经济的大舞台。但是,由于人才培养课程体系改革的速度落后于计算机体系结构进步的速度,在 HPC 人才培养和储备方面,中国与国际最顶尖水平还存在差距。

(一) 问题原因分析

1. 中国 HPC 相关学科领域的教育起步较晚。如今,超算领域的竞争已经从硬件的“军备竞赛”,拓展到了 HPC 领域人才储备“软实力”竞赛。

2. HPC 领域需要的是复合应用型人才,超级计算机只是一种工具,需要在不同学科进行应用才有价值,人才培养成本高周期长。譬如,进行金融方面的超算研究,就得在精通计算机之外,还得了解金融领域的知识;而想要进行这样的人才培养,仅靠本专业培养是不够的,还需要学校各专业积极支持,为学生提供更多学科交叉培养的学习机会与实践条件。

3. 在大数据时代,HPC 教育在中国面临着更加现实的挑战。第一个挑战来自当代多样化的计算机体系结构设计,第二个挑战是编程环境纷繁复杂。我国本科教育对学生并行编程能力的培养不够普及也不够系统。全国每年向社会输送约 10 万计算机相关专业的毕业生,其中,能编写并程序和使用云计算资源的学生寥寥无几。国内高校由于实验条件限制,昂贵的集群计算资源一般只用于支撑科研,对于计算机本科学生几乎不能开设高性能计算基础课程。比如深度学习实验都是在 PC 上模拟。这种情况导致高层次人才严重匮乏。



图1 人工智能技术全景图 (HPC 课程内容位于全景图最基础部分)

高性能计算课程在图1中最下面一层,是讲述集群网络与并行计算以及如何使用硬件/计算力、大数据等基础设施资源支撑机器学习和知识工程研究。本研究针对 HPC 课程在知识体系和能力体系中的定位,根据这个定位进行内容组织和课程思政,

进而抛砖引玉,研究将 HPC 课程开设成通识课在培养复合型学科交叉人才中的作用。

(二) 本研究意义体现

1. 高性能计算是机器学习和深度学习等课程的基础与前驱课程,没有 HPC 课程基础就没法做深度学习等课程的实验,没法进一步研究人工智能。

2. 云计算、大数据与人工智能依托的计算模式主要是并行计算/高性能计算,或者说,非 HPC 无法支撑人工智能,所以本课程的内容事实上已成为计算机专业人才培养必备的编程基础课程,对这门课改进有助于提高新工科课程体系的整体质量。

3. 人才培养是开设 HPC 课程的目标,国家知识经济发展急需 HPC 人才。《中华人民共和国高等教育法》明确规定,高等教育的基本任务是培养具有创新精神和实践能力高级专门人才,技术创新与创新教育是紧密联系的。国家“科教兴国”战略能否实现,关键在高等教育能否培养出适应时代发展的创新人才。课程建设目标是各学科需要使用计算机创新创业的人都能方便地使用云资源和 HPC 资源,提高创新型人才培养的效率。

4. 充分利用学校已经投巨资建设的 HPC 资源。将学校的投入导向本科教学。利用现有的空间物理、材料科学、海洋生物、金融数学、材料、机械等多学科需要 HPC 的机遇,培养多学科融合的创新人才,将科研基地建设成本科教学和大学生科技创新和学科竞赛基地。有 HPC 条件不能用于教学,等于造成学校 HPC 资源浪费。

5. 丰富了计算机系选修课体系,也丰富了全校通识教育课程体系。扩充高校工科类通识课程资源。

教育改革需要我们有创新的思想。本研究创新性在于利用学校科研基础设施反哺本科教学,将复杂的编程实验指导搬到线上,推动将 HPC 课程加入高校通识课程体系,最终为各专业培养出学科交叉型的创新型人才提供常用的技术和工具支撑。

二、根据高性能计算在课程体系中的意义设计教学大纲

高性能计算课程主要工程目标是让学生学会把串行程序并行化,灵活运用集群计算和云计算资源,从工程角度看,HPC 课程的内容主要有并行化接口和并行化编程语言,并行算法以及 GPU 编程和 MIC 编程等。选修课可以开设成 2 学分课堂授课和 1 学分实验,比如 32 课堂授课+32 学时实验。由于 HPC 领域和成果日新月异,为了保持教学内容的先

进性，需要在每次开课前重新组织授课的具体内容。

（一）HPC 授课内容的组织

由于高性能计算技术飞速发展，高性能计算课程的教学内容需要不断更新。为了更好地研究如何整理大纲内容，可以把课程内容分成必讲部分和可选部分。其中可选部分是根据计划学时由教师根据学生情况选讲的部分。在后面的阐述中以 2 学分（16 学时讲课 +32 学时实验）为例。

按照课程的前驱后继关系，从专业角度来看，高性能计算只需要一门高级程序设计语言为基础，如图 2 所示。



图 2 课程之间的关系

从建设完整的人工智能课程体系而言，高性能计算课程尽量向前，最早可以开设在大二第二学期。当然，随着计算机专业课程的全面展开，比如数据结构与算法等，对于高性能计算内容的理解会逐渐加深。课程必讲的和选讲的内容用表 1 列出来。

表 1 高性能计算课程必讲和选讲内容

学时	必讲内容	选讲内容
2	CH1 高性能计算发展史	1. 国内高性能计算企业简介（中科院计算所曙光与申威计算机，国防科技大天河计算机，曙光集团、浪潮集团、联想集团的成长）进行爱国主义教育 2. 各国对于高性能计算节能系统的研究进展 3.TOP500 评选的意义 4. 相关开源软件和高性能计算评测软件的下载地址
4	CH2 并行计算机系统结构	工匠精神与创新意识：Clay 的创新之路 曙光并行计算机系统 浪潮新型服务器构造 复习 LINUX 常用命令
4	CH3 MPI 基础	开放和共享精神，分布式多节点数据通信的标准，标准的重要性
4	CH4 OpenMP 基础	ASC 赛题选讲
6	CH5 GPU 编程	国产 GPU 研究进展，深度学习例题选讲
4	CH6 MIC 编程	MIC 和 GPU 对于提高集群的浮点计算能力的贡献对比
2	CH7 并行算法	矩阵乘法示例，计算圆周率示例。软件工程师应确保他们的产品与相关修改尽可能达到最高的专业水准
2	CH8 并行计算性能评测	基准测试程序与专业评价的公正性 浪潮集群搭建与三层测试 如何根据需求设计与搭建高性能计算集群
4	CH9 云计算与高性能计算	云节能，云安全，案例分析与 ASC 赛题选讲，ASC 竞赛简介

（二）课程思政内容设计

因为本课程内容紧密结合技术进展与国内外技术竞争，对计算机各学科有很大的影响，所以，课程思政内容容易根据授课内容穿插在课程中。每一章插入的思政内容如表 2 所示，其中宋体字是重点，

其他内容酌情增加。

表 2 高性能计算每章嵌入的思政内容

CH1 高性能计算发展史 思政内容：集群网络技术发展史，爱国主义教育，理解国产高性能计算集群在国际上的地位以及科学家的追求，树立民族自信
CH2 并行计算机系统结构 思政内容：CLAY 创新之路，集群网络技术发展史，追求卓越的创新精神，精益求精的工匠精神
CH3 MPI 基础 CH4 OpenMPI 基础 思政内容：软件研发的团队精神，通信和软硬件标准，软件开源与接口标准化的重要性
CH5 GPU 编程 CH6 MIC 编程 思政内容：在芯片研制方面的国际竞争，国产 GPU 研制与应用现状，算力与科研与 GDP 的关系，树立民族自信
CH7 并行算法 思政内容：串并行效能对比，软件工程师应确保其产品与相关修改尽可能达到最高的专业水准，精益求精的工匠精神，国内外深度学习典型应用
CH8 并行计算性能评测 思政内容：基准测试程序与专业评价的公正性，工程师在专业评价中应公平与独立
CH9 云计算与高性能计算 思政内容：软硬件资源共享、数据安全与成本核算，国家为什么鼓励企业上云

（三）高性能计算实验内容组织与线上指导

与一般的程序设计语言上机实验集中在实验室完成实验、教师在实验室指导不同，高性能计算实验是学生使用自己的电脑通过网络登录高性能集群来完成实验。所以，学生可以在实验室、教室、图书馆或者任何方便上网的地方做实验。

随时随地做实验带来了指导实验的麻烦。为此，我们统一规定了每次连续 4 小时的实验时间，并且在这个时间由实验指导老师在线答疑。有些学生当时完成实验有困难，教师在实验课后也会线上答疑，只是有可能不是非常及时而已。也有学生不爱在群里提问题，会加老师的 QQ 小窗问。但是教师在群内统一答疑能让大家对别人碰到的问题都注意一下，有普遍性的问题及解答教师还是转发到群里让大家都能看到。

实验组织需要注意的主要事项如下。

1. 在课程开始之后，实验内容可以安排参观高性能计算实验室与本地云计算中心，让学生查阅资料撰写实验报告，弄清楚高性能计算集群和云计算中心的区别。参观讲解要形成对课程内容的补充，比如集群实验室的异构服务器联网、双路供电、机柜结构、水冷系统、网络布线、报警方式甚至高门槛的防鼠板等，尽量详尽。目的是让学生在参观并听取讲解之后，即使以后不在实验室集中做实验，也能对实验环境有个直观清晰的印象。

教师可以利用这个时间段给确定选课的学生申

请开设高性能计算的实验账户。

2. 在发布给学生高性能计算实验账户后,要同时给学生发布一个集群登录说明文档,提醒学生修改登录密码等。从第二章开始每一章根据讲课内容安排4学时的上机实验内容,恰好在第八章以后完成实验。

3. 本课程实验学时较多,为了尽早开始实验,在前几次实验课上应安排 LINUX 常用命令练习以及在开源网站上下载安装基准测试程序 HPL 和 HPCG,熟悉将来实验和评测软件要用的软件环境。如果学生没有 LINUX 基础,可以在第一次上机实验课前,在课上介绍一下本课程常用 LINUX 命令,为后面完成实验做好准备。

在介绍了常用评测参数后可以熟悉 HPL 软件,在后面的每一个并行化阶段都可以使用基准测试程序软件对实验结果进行评测。

4. 在开始讲授 MPI 和 OpenMP 内容后,就按部就班地开始必讲内容的基本操作练习和拓展应用练习。在 GPU 基本实验完成后,可布置拓展性实验内容以及参考历年 ASC 竞赛试题布置学生做提高性练习。

5. 为了引导学生参加每年1—3月的ASC世界大学生超算竞赛,要向学生介绍竞赛,课上经常以往届竞赛题为例题或实验作业题,引导学生关注和参加;在指导实验期间,教师要密切关注那些出色地完成实验的学生以及在群里积极参加答疑的学生,这些学生可能会成为下一届竞赛的候选队员。在每年十二月组队报名期间,除了在群里发布通知外,还要重点通知这些学生,动员他们组队参赛。

三、开设高性能计算通识课,培养交叉学科人才

美国麻省理工学院院长乔尔莫西斯在20世纪90年代提出“大工程”教育观,其理念强调任何工程的实施不仅要考虑工程建设的可能性,还要考虑环境、文化等因素,需要从“重视工程科学理论的分科教育”向“更多地重视工程系统及其背景的教育”转变。要加强学科间的交叉渗透,实现科技、工程与人文的融合。此工程教育理念引起了以知识集成化、学科交叉、工程技术与经济紧密结合为的工程教育改革。

人工智能时代,计算无处不在。计算机科学与技术作为工具学科为其他所有学科提供了信息处理能力,几乎所有的理工科都在培养方案里增加了必修的IT课程,从基本的高级程序设计语言开始,

比如C和Python,并且在实践体系里增加了IT开发技术实训,几乎所有与学科交叉相关的教育改革都希望能与计算机学科交叉寻求创新点。但是对于非计算机学科的工科学生而言,一般较少直接从事软件开发工作,常常需要读懂别人写的自己研究领域的程序,然后对程序进行优化。如果能找到云资源,最常见的优化就是把现有的程序通过改进部署到云上。这里的改进主要就是串行程序并行化。读懂别人的程序,然后把串行程序并行化,这正是高性能计算课程要完成的基本教学目标。(参见图2)

高性能计算的低入门和高出口的特点能吸引到所有有一定编程基础的爱好者选学,几乎所有的理工科学生都具备了学习高性能计算课程的基础。所以,如果师资和实验条件允许,高性能计算课程能够在各理工科专业开设选修课,为学生结合IT技术创新创业做好铺垫。

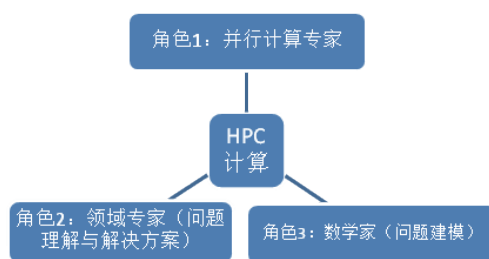


图3 使用 MIC 高效能计算需要具备的三种角色的能力

与一般计算相区别的是,各行各业用到高性能计算的都是大规模复杂系统的分析和管理的,这不仅是对有关技术学科的知识整合,还包括对更大范围内经济、社会政治和技术系统日益增进的了解。比如,2019年的ASC大学生超算竞赛决赛要求是:参赛大学生队伍在3000瓦功耗约束下自行设计超算系统,运行优化国际通行基准测试、人工智能人脸超分辨率重建、地球系统模式CESM、基因测序组装软件wtdbg、神秘应用声子计算软件ShengBTE等前沿科学与工程应用。这些赛题从某种角度上反映了对于学习过高性能计算的本科生的最高能力要求,要求他们同时具备对应图3三种角色的以下三种能力:(1)准确理解某个陌生专业领域问题的能力;(2)对应用问题进行数学建模的能力;(3)串行程序并行化和并行算法设计能力。每一个高性能计算相关问题要想完美求解,都需要领域科学家、数学家和并行算法专家合作设计好的高性能计算解决方案,(如图3所示)假设都学过高等数学,有了角色3的建模能力,计算机系学生在图3中担任

角色1,则其他专业的学生就可以担任角色2,他们在用高性能计算解决大规模复杂问题的过程中担任的角色同等重要,或者说,领域专家的角色更加重要,因为相对于领域知识,掌握串行程序并行化的知识更加简单。

因此,在各理工科专业开设通识课,具有充分的可行性。课程内容里不断整合最新的技术进展也是基于对复合型工程人才进行实践能力和创新能力培养的需求。通识课可以根据学分和学时数在课程内容和实验内容里面选择,实验要求可以适当降低,最低的要求是让学生能独立地按照分配的账号登录和使用云计算资源,并且能够读懂并行化的程序。

四、结语

本研究阐述了高性能计算课程在人工智能课程体系中的地位,并且系统地论述了课程授课内容组织和线上指导高性能计算实验的注意事项,设计了课程思政内容,为了培养交叉学科人才开设高性能计算通识课的可行性。

受计算转型的影响,目前能开设高性能计算课程并且指导高性能计算实验的师资比较匮乏。解决这个问题一个捷径是聘请学校高性能集群实验室的管理员工程师兼任实验老师。他们不仅能熟练分配和使用集群资源,还熟悉各种参数和软件资源配置,及时排除实验中的问题。特别是,管理员老师有权限在后台看到学生实验完成情况,不仅能及时向授课教师反馈,而且给出的实验成绩也非常客观。

国际高等工程教育的培养目标非常明确,即培养未来的工程师,这就决定了其人才培养是面向实际工程和技术的。这样的培养目标对任课教师自身素质结构提出了双向要求。德国工科大学在教师聘任上,要求应聘者一般应有工程技术一线和企业工作经历,应用技术大学聘请的教授还必须有五年以上在企业工作的经历。对已有教师还提供很多校企合作研发的机会,这为他们在课堂培养未来的应用型工程师提供了帮助。

由于国内高校对师资学历要求高,工程经历要求较少,这样的师资能胜任工程理论教学,但是在工程实践上需要提高。因此,引入学校集群管理员担任实验员是个很好的办法,也满足高校全部优质资源投入教育教学的原则。

【参考文献】

[1] 李国杰.有关人工智能的若干认识问题.中

国计算机学会通讯,2021.7.

[2] 朱高峰.我国工程教育的改革发展趋势[J].高等工程教育研究,2016(5):1-9.

[3] 李国杰.大学计算机教育的改进方向,CCCCF2020 专辑,卷首语。

[4] 赵永生,刘焱,赵春梅.高阶思维能力与项目式教学[J].高等工程教育研究,2019(6):145-148.

[5] 李国杰.计算机学科基础理论需要重塑.CCCF2018.11,主编评语。

[6] 林健.如何理解和解决复杂工程问题——基于《华盛顿协议》的界定和要求[J].高等工程教育研究,2016(5):18-26.

[7] 纪阳,吴振宇,尹长川.新生工程教育问题与引导方式创新[J].高等工程教育研究,2018(4):55-60.

【基金项目】本研究由山东省教改面上项目(M2020285)和山东大学(威海)重点教研项目“新文科、新工科研究与改革实践项目”(Z2021012)资金资助。

【作者简介】程雨芊(1990—),女,汉族,山东威海人,硕士,工程师,现任职于山东大学(威海)高效能计算实验中心,主要研究方向:集群网络与并行计算;袁胜忠(1965—),男,汉族,山东淄博人,本科,高级工程师,现任职于山东大学(威海)高效能计算实验中心,主要研究方向:软件工程与数据工程,教育信息化技术;李素梅(1968—),女,汉族,河北张家口人,博士,副教授,现任职于山东大学机电与信息工程学院电子系,主要研究方向:嵌入式技术、低维半导体器件;金长龙(1978—),朝鲜族,吉林珲春人,博士,副教授,现任职于山东大学机电与信息工程学院计算机系,主要研究方向:深度学习、计算机视觉

【通讯作者】贺红(1965—),女,汉族,山东淄博人,博士,副教授,现任职于山东大学机电与信息工程学院计算机系,主要研究方向:人工智能算法,软件工程与数据工程