

计算机类专业  
系统能力培养系列教材

HZ BOOKS  
华章教育

# AI Computing Systems

# 智能计算系统

陈云霄 李玲 李威 郭崎 杜子东 编著



- 全面贯穿人工智能整个软硬件技术栈
- 以应用驱动，形成智能领域的系统思维
- 前沿研究与技术实践结合，快速提升智能领域的系统能力



机械工业出版社  
China Machine Press

计算机类专业  
系统能力培养系列教材

*AI Computing Systems*

# 智能计算系统

陈云霁 李玲 李威 郭崎 杜子东 编著



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

智能计算系统 / 陈云霁等编著. —北京: 机械工业出版社, 2020.2 (2020.4 重印)  
(计算机类专业系统能力培养系列教材)

ISBN 978-7-111-64623-5

I. 智… II. 陈… III. 人工智能—计算—高等学校—教材 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 008266 号

本书通过一个贯穿始终的应用案例——图像风格迁移, 全面系统地介绍智能计算系统的软硬件技术栈。首先概述人工智能和智能计算系统 (第 1 章); 接下来介绍完成应用所必要的神经网络和深度学习算法知识 (第 2、3 章); 然后介绍支撑算法在智能芯片上运行的编程框架 (第 4、5 章); 再往下是智能芯片, 即引导学生设计一款满足图像风格迁移应用需求的深度学习处理器 (第 6、7 章); 接下来介绍如何利用智能编程语言 BCL 提升开发智能应用的效率 (第 8 章); 最后以具体实验把所学知识点串联起来, 打通知识结构的“任督二脉”(第 9 章)。

本书由中科院计算所、软件所的专家学者倾心写就, 领衔作者陈云霁带领团队研制了国际上首个深度学习处理器芯片“寒武纪 1 号”, 这本教材凝聚了作者团队多年的科研和教学成果, 填补了人工智能专业系统类课程的教材空白, 适合作为高等院校人工智能及相关专业的教材。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 温莉芳

责任校对: 殷虹

印刷: 中国电影出版社印刷厂

版次: 2020 年 4 月第 1 版第 2 次印刷

开本: 186mm×240mm 1/16

印张: 23.75

书号: ISBN 978-7-111-64623-5

定价: 79.00 元

客服电话: (010) 88361066 88379833 68326294

投稿热线: (010) 88379604

华章网站: www.hzbook.com

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

# 智能时代计算机类专业教育-计算机类专业系统能力培养 2.0

## 系列教材出版前言

人工智能、大数据、云计算、物联网、移动互联网以及区块链等新一代信息技术及其融合发展是当代智能科技的主要体现，并形成智能时代在当前以及未来一个时期的鲜明技术特征。智能时代来临之际，面对全球范围内以智能科技为代表的新技术革命，高等教育也处于重要的变革时期。目前，全世界高等教育的改革正呈现出结构的多样化、课程内容的综合化、教育模式的学研产一体化、教育协作的国际化以及教育的终身化等趋势。在这些背景下，计算机专业教育面临着重要的挑战与变化，以新型计算技术为核心并快速发展的智能科技正在引发我国计算机专业教育的变革。

计算机专业教育既要凝练计算技术发展中的“不变要素”，也要更好地体现时代变化引发的教育内容的更新；既要突出计算机科学与技术专业的核心地位与基础作用，也需兼顾新设专业对专业知识结构所带来的影响。适应智能时代需求的计算机类高素质人才，除了应具备科学思维、创新素养、敏锐感知、协同意识、终身学习和持续发展等综合素养与能力外，还应具有深厚的数理理论基础、扎实的计算思维与系统思维、新型计算系统创新设计以及智能应用系统综合研发等专业素养和能力。

智能时代计算机类专业教育-计算机类专业系统能力培养 2.0 研究组在分析计算机科学技术及其应用发展特征、创新人才素养与能力需求的基础上，重构和优化了计算机类专业在数理基础、计算平台、算法与软件以及应用共性各层面的知识结构，形成了计算与系统思维、新型系统设计创新实践等能力体系，并将所提出的智能时代计算机类人才专业素养及综合能力培养融于专业教育的各个环节之中，构建了适应时代的计算机类专业教育主流模式。

自 2008 年开始，教育部计算机类专业教学指导委员会就组织专家组开展计算机系统能力培养的研究、实践和推广，以注重计算系统硬件与软件有机融合、强化系统设计与优化能力为主体，取得了很好的成效。2018 年以来，为了适应智能时代计算机教育的重要变

化，计算机类专业教学指导委员会及时扩充了专家组成员，继续实施和深化智能时代计算机类专业教育的研究与实践工作，并基于这些工作形成计算机类专业系统能力培养 2.0。

本系列教材就是依据智能时代计算机类专业教育研究结果而组织编写并出版的。其中的教材在智能时代计算机专业教育研究组起草的指导大纲框架下，形成不同风格，各有重点与侧重。其中多数将在已有优秀教材的基础上，依据智能时代计算机类专业教育改革与发展需求，优化结构、重组知识，既注重不变要素凝练，又体现内容适时更新；有的对现有计算机专业知识结构依据智能时代发展需求进行有机组合与重新构建；有的打破已有教材内容格局，支持更为科学合理的知识单元与知识点群，方便在有效教学时间范围内实施高效的教学；有的依据新型计算理论与技术或新型领域应用发展而新编，注重新型计算模型的变化，体现新型系统结构，强化新型软件开发方法，反映新型应用形态。

本系列教材在编写与出版过程中，十分关注计算机专业教育与新一代信息技术应用的深度融合，将实施教材出版与 MOOC 模式的深度结合、教学内容与新型试验平台的有机结合，以及教学效果评价与智能教育发展的紧密结合。

本系列教材的出版，将支撑和服务智能时代我国计算机类专业教育，期望得到广大计算机教育界同仁的关注与支持，恳请提出建议与意见。期望我国广大计算机教育界同仁同心协力，努力培养适应智能时代的高素质创新人才，以推动我国智能科技的发展以及相关领域的综合应用，为实现教育强国和国家发展目标做出贡献。

智能时代计算机类专业教育-计算机类专业系统能力培养 2.0

系列教材编委会

2020 年 1 月

## 编委会名单

荣誉主编：吴建平

主 编：周兴社

副主编：马殿富

委 员：金 海

陈文光

毛新军

陈莉君

汤 庸

单 征

王志英

陈 钟

李宣东

袁春风

姚 新

孟小峰

朱 敏

陈卫卫

武永卫

古天龙

庄越挺

安 虹

陈云霖

于 戈

卢 鹏

温莉芳

臧斌宇

包云岗

陈向群

张 昱

明 仲

吴功宜

章 毅

向 勇

王宏志

王晓阳

F O R E W O R D

## 序 言 一

未来 20 年或更长的时期内，人工智能将是科学技术和经济发展的重要方向，智能化技术有可能触发新一轮经济长波甚至第四次产业革命。世界各国都制定了发展人工智能技术和产业的长期规划，在这些规划中，适应智能化社会需求的人才培养都已被列为一项艰巨而紧迫的任务。

由于巨大的市场潜力和 863 等国家科技计划形成的长期科研积累，我国的人工智能应用和算法研究走在世界前列。但是，我国人工智能基础层、技术层和应用层的人才数量占比分别为 3.3%、34.9%和 61.8%，基础层人才比例严重偏低。这种现状是我国计算机领域长期不重视系统教育造成的。

我国近千所大学设立了计算机专业，近年来有上百所高校创办了人工智能专业。由于缺乏师资力量和合适的教材，目前一些学校的人工智能课程重点教授一些流行的机器学习算法和图像处理等应用，培养出来的学士、硕士和博士只会用算法调参数，并不真正理解人工智能应用到底是怎样运转起来的。对于人工智能算法究竟如何调用编程框架、编程框架如何与操作系统打交道、编程框架中的算子在芯片中如何运行，很多学生并没有清晰全面的理解。缺乏系统知识和系统思维，学到的知识点就是零碎的，没有打通“任督二脉”。到了毕业后参加实际工作，懂不懂系统知识带来的工作成效差别巨大。同样一个程序，一个普通的程序员来写和一个懂体系结构的人来写，性能可能差几万倍。

中国科学院计算技术研究所从 1956 年成立起就一直从事计算机系统研究。1990 年依托中科院计算所成立的国家智能计算机研究开发中心继承了该所的学术传统，既做系统结构研究，又做人工智能理论、算法和应用研究。陈云霁、陈天石研究员领导的团队研制的“寒武纪”智能芯片就是在这样的环境中孕育出来的。看到国内人工智能系统人才十分短缺的现状，陈云霁研究员主动请缨，2018 年在中国科学院大学率先主讲了“智能计算系统”课程，后来又在北大、北航、天大、中科大、南开、北理工、华科等高校独力或联合开设了同样的课程。2019 年 8 月他办了一次导教班，全国 40 多所高校的 60 多位老师参加

了这次导教班。他开的“智能计算系统”课程受到老师和学生的普遍欢迎。经过两年的打磨，这门课的内容已基本成熟。经过中科院计算所智能处理器研究中心多位同仁的努力，将讲课的录音整理成文字，形成了这本国际上首创的《智能计算系统》教材。

一个完整的智能计算系统涉及芯片、系统结构、编程环境、软件等诸多方面，内容十分庞杂，要在一个学期讲完所有的内容十分困难。这本教材采用“应用驱动，全栈贯通”的原则，以“图像风格迁移”这一具体的智能应用为牵引，对智能计算系统的各层软硬件技术栈的奥妙和相互联系进行精确、扼要的介绍，使学生对系统全貌有一个深刻印象，达到举一反三、触类旁通的效果。

人工智能过去不是大学教育的必修课，培养人工智能专业的人才需要本科毕业后再花3~6年时间攻读硕士或博士才行。目前阻碍人工智能在各个行业落地的困难之一是人员成本太高，加速培养研究生只是解决困难的路径之一，但不能从根本上解决问题。对任何行业而言，技术人才的构成都是金字塔结构，而构成金字塔底层的技术人员主力应该是大学毕业生。因此，如何让大学毕业生在推广智能应用中发挥重要作用是本科教育应该考虑的问题。中国科学院大学启动了一个计划，让本科生在全开源的EDA工具链上设计出开源处理器芯片并完成流片，实现带着自己设计的芯片毕业的梦想。这本教材的初衷也是希望能培养更多懂智能计算系统的本科生，加速弥补人工智能的人才缺口。由于我国系统结构方向师资力量较薄弱，也许很多学校一开始会用这本教材上研究生课。希望通过大规模教学实践的检验，这本教材能进一步修改完善，成为一本被广泛采用的高年级本科生教材。

互联网服务业的发展得益于开源软件和公共开发平台，丰富的网络软件开发工具使得开发互联网应用APP成为一件很轻松的事情。同样，提供容易掌握的成套抽象化工具，可以大幅度降低人工智能的应用人才门槛。本教材除了讲述深度学习等智能算法和加速处理器外，特别用了两章篇幅详细阐述编程框架的使用和机理。所谓编程框架可以从两方面来理解：一方面将算法中的常用操作，如卷积、池化等，封装成“算子”，方便程序员直接调用；另一方面像操作系统一样，作为软硬件的界面，起到承上启下的作用。目前，我国的技术人员使用的编程框架基本上都是外国公司提供的开源软件，使用最多的是Google公司开发的TensorFlow。从长远来讲，如果中国的技术人员离不开外国公司的编程框架等开发平台，智能产业的发展一定不平衡、不协调。会用编程框架和会自己写编程框架是差别悬殊的两种本领。希望通过本课程的教学，中国能培养出可以自己创立编程框架的研发队伍，为技术领先、有市场竞争力的人工智能开源平台贡献中国的力量。

陈云霁研究员不但善于做基础研究，写了不少引领世界潮流的高水平论文，而且长期从事芯片设计工作，有丰富的工程实践经验。他主持编写的这本教材具有理论与实践相结合的特点。本书不但每一章都有从实践中总结出来的习题，而且专门安排了一个大实验，要求学完本课程的学生实际动手开发一个能完成图像风格迁移（如把一幅风景照片转换成梵高风格的画）的简单智能计算系统。国外一流大学的计算机系统课程都有较重的课程实验，国科大开设的操作系统等课程也配有大量的实验内容，学生们反映做实验的收获很大。“纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行。”计算机系统方面的课程如果只是“纸上谈兵”，学生学到的知识往往是空洞的名词术语，毕业后仍然会“眼高手低”。希望采用本教材的学校尽量创造条件，让学生有动手做实验的机会。



中国工程院院士

2019年12月

## 序 言 二

在上个世纪，我就曾指导学生开展神经网络计算系统的研究。几十年过去了，人工智能、神经网络、计算机系统结构等方向的研究和产业已经发生了翻天覆地的变化。但是有一点没有变化，那就是系统思维对于人工智能的重要性。

系统思维是指从整体的角度，对技术栈各个环节进行全局考虑的思维方式。人工智能的技术栈涉及不少技术环节，不仅仅包括智能算法，还包括智能编程框架、智能编程语言、智能芯片等。如果没有系统思维，只考虑智能算法这一个环节或者把技术栈的各个环节割裂来考虑，不可能开发出准确、高效、节能的人工智能应用，也就使人工智能难以落地。

培养具有系统思维的人工智能人才必须要有好的教材。然而，在中国乃至国际上，对当代人工智能计算系统进行全局、系统介绍的教材十分稀少。因此，中国科学院计算技术研究所陈云霁研究员及其同事编写的《智能计算系统》教材就显得尤为及时和重要。

这本教材采用了一种比较独特的组织方式，以一个典型的深度学习应用（图像风格迁移）作为驱动范例，将上层的算法、中间的编程、底层的芯片串联起来，帮助读者对人工智能完整的软硬件技术栈形成系统的理解。更重要的是，这本教材不是孤立地介绍技术栈的各个环节，而是非常强调技术栈各个环节之间的结合部，例如一个算法怎样拆分成算子，算子在编程框架中怎样调度，芯片体系结构又如何支持算子，并且上述知识在最后的实验中都有所体现。因此，这种组织方式在读者对知识体系的融会贯通和系统思维的形成上非常有帮助。

除了对人工智能技术栈覆盖的广度，《智能计算系统》还有一个特点是深度。这本教材不仅介绍智能计算系统使用知识，更强调内在的原理。例如在算法部分，教材从线性回归开始，到感知机模型，再到多层感知机，最后到深度学习，一步步地把神经网络计算背后的机理讲得比较透彻。在体系结构部分，教材先从算法特征分析出发，介绍深度学习处理器的基本设计思想和简单模型，然后再讲具体优化技术，最后介绍工业级深度学习处理

器结构。这样不仅仅能授人以“鱼”，也能授人以“渔”。

《智能计算系统》之所以能对人工智能软硬件技术栈做出清晰的梳理，和陈云霁研究员独特的研究背景有一定关系。他从事人工智能和计算机系统结构的交叉研究十多年，曾经研制了国际上首个深度学习处理器芯片“寒武纪1号”，在国际学术界有较大的影响。*Science* 杂志刊文评价他为智能芯片研究的“先驱”和“领导者”。同时，陈云霁还有在多个高校讲授智能计算系统课程的丰富教学经验。这使得这本教材既体现了学术上的前沿性，又充分考虑了高校实际教学的需求。某种意义上说，这也是对中国科学院几十年来“科教融合”理念的传承。



中国科学院院士

2019年12月

# 前 言

## 为什么会有这本书

随着智能产业的飞速发展，社会迫切需要大量高水平的人工智能人才。因此，我国近千所高校的计算机学院和信息学院都在培养人工智能方向的人才，而且我国已经有上百所高校开始设立专门的人工智能专业。可以说，我国人工智能高等教育的大幕正在徐徐拉开。今天，教育界对人工智能人才培养的决策，将会对历史产生深远的影响。因此，我们应当慎重思考一个关键问题：人工智能专业的高等教育需要培养什么样的人才？

有一种看法认为：人工智能专业只需要教学生如何开发智能应用和编写智能算法，至于运行这些应用和算法的计算系统，则不是教育的重点。这种看法，类似于汽车专业只需要教学生如何组装车辆，而不需要让学生理解发动机的机理；又类似于计算机专业只需要教学生如何写 APP，而不需要让学生理解 CPU 和操作系统的机理。重应用、轻系统的风气，有可能使我国人工智能基础研究和产业发展处于“头重脚轻”的失衡状态。

与此形成鲜明对比的是，我们的国际同行对于智能计算系统的重视程度远远超过普通人的想象。仅以谷歌公司为例。众所周知，谷歌拥有全世界最大规模、最高水平、最全产品的智能应用和算法研究团队。仅谷歌一个公司就发表了 2019 年国际机器学习会议 (ICML) 近 20% 的论文，和整个中国相当。然而，当我们真正认真审视谷歌时就会发现，谷歌并不只是一个算法公司，它更是一个系统公司。谷歌的董事长 J. Hennessy 是国际最著名的计算机系统结构研究者，图灵奖得主；谷歌人工智能研究的总领导者 J. Dean（每次谷歌 I/O 大会都是他代表谷歌介绍全公司的智能研究进展）是计算机系统研究者，著名的 MapReduce 分布式计算系统就出自他之手。谷歌在人工智能领域最令人瞩目的三个贡献——机器学习编程框架 TensorFlow，战胜人类围棋世界冠军李世石的 AlphaGo，以及谷歌自研的智能芯片 TPU——也和系统有关，而非单纯的算法。

因此，人工智能专业的高等教育，应当培养人工智能系统或者子系统的研究者、设计

者和制造者。只有实现这个目标，高校培养的人才才能源源不断地全面支撑我国人工智能的产业和研究。为了实现这个目标，人工智能专业的课程体系，不仅仅应当包括机器学习算法、视听觉应用等课程，还应当包括一定的硬件和系统类的课程。

事实上，国内有很多前辈和专家也意识到了这个问题。很多国内高校并不是主观上不想给学生开设面向人工智能专业的系统类课程，而是开设这样的课程有一些客观困难，不容易克服。毕竟智能计算系统是一个新兴的交叉方向，所涉及的知识非常新，老师们找不到现成的课程可以参考。事实上，即便是国际顶尖高校，过去也没有太多这方面的教学经验（例如，斯坦福大学 2015 年曾请我去讲授这个方向的短期课程）。另外，讲授智能计算系统课程所需要的背景知识也非常广泛，涉及算法、结构、芯片、编程等方方面面，能对这些知识都有全面涉猎的老师确实不多。

但是，在所有的困难中，大家一致认为，最关键的困难就在于没有现成的教材。教材是课程的基础，要上好一门课，没有合适的教材是不可能的。据我们了解，目前国际上也没有一本能全面覆盖人工智能计算系统（尤其是当代机器学习计算系统）新进展的教材。因为我们实验室在研究上涉及智能计算系统的各个方面，又在中国科学院大学、北京大学、北京航空航天大学等院校有讲授智能计算系统课程的经验，所以很多老师问我们，是否能编写一本内容较新、较全面的教材。于是，我们参考过去讲课的录音录像，整理形成了这本《智能计算系统》教材。希望这本教材能抛砖引玉，为高校开设面向人工智能专业的系统类课程提供微小的助力，为我国培养人工智能人才起到一点推动作用。

## 智能计算系统课程的价值

个人认为，智能计算系统课程对于学生、教师、高校，都具有重要的价值，能产生深远的影响。

对于学生来说，学习智能计算系统课程有助于形成系统能力和系统思维。系统能力可以帮助学生在就业市场中拥有更强的竞争力。在不久的将来，全国上百所开设人工智能专业的高校每年将培养出上万名学过智能算法的学生。到那时，如果一个学生只会算法调参，而对整个系统的耗时、耗电毫无感觉，不具备把一个算法在实际系统上部署起来的能力，找到好工作的难度会较大。而智能计算系统课程的学习，就能让学生真正理解人工智能到底是怎样运转的（包括一个人工智能算法到底如何调用编程框架，编程框架怎么和操作系统打交道，编程框架里的算子又是怎样在芯片上运行起来），就能使学生拥有亲手构

建出复杂的系统或者子系统的能能力。很自然地，就更容易在就业的竞争中脱颖而出。我曾经在网上看到一个段子：“会用 TensorFlow 每年挣 20 万元人民币，会写 TensorFlow 每年挣 20 万美元。”这个段子其实还是有一定的现实依据的。

而系统思维对于提高学生的科研能力有帮助。缺乏系统思维的学生很容易陷入精度的牛角尖中，把科学研究当成体育比赛来搞（别人做了 97% 的精度，我就要做 98%；别人做了 98%，我就要做 99%），最后研究道路越走越窄。事实上，从系统角度看，评价智能的标准远不止精度一个维度。速度、能效、成本等都是很重要的维度，无论在哪一个维度上做出突破，都是非常有价值的研究。因此，近年来深度学习领域一些非常有影响力的工作如稀疏化、低位宽等，都是在提升整个智能计算系统的速度和能效上做文章，而不是只盯着精度不放。所以说，学习智能计算系统课程，能让学生形成系统思维，在科研道路上拥有更宽广的舞台。

对于教学科研人员来说，讲授智能计算系统课程，对于自己的科研能力也可能有很大的帮助。我自己担任任课教师时就发现，科研人员把一门课教好，自己的收获可能比学生还大。这也就是《礼记·学记》所说的“教学相长”。因为做科研只能让人对一个方向中的某些具体知识点很熟，而教学某种意义上逼着教师要对整个方向有全面的理解，这样反过来又能让科研的思路更开阔。智能计算系统课程覆盖面比较广，教好这门课受益尤其大，能使教师的知识面从软到硬更加全面。

对于高校管理人员来讲，系统研究已经成为人工智能发展的热点，在学科布局中应予以充分重视。2019 年，一些国际顶尖高校和企业（如斯坦福大学、卡内基梅隆大学、加州大学伯克利分校、麻省理工学院、谷歌、脸书、英特尔、微软等）的数十位知名研究者（包括图灵奖得主 Y. LeCun、美国科学院院士 M. Jordan、美国工程院院士 B. Dally、美国工程院院士 J. Dean 等）联合发布了一份白皮书——“SysML: The New Frontier of Machine Learning Systems”，展望了机器学习计算系统软硬件技术的未来发展。这充分体现出，在国际上无论是学术界还是工业界，都对智能计算系统高度关注。在这样的新兴热门方向尽早布局并培育一批教师，无疑对提升高校乃至我国在国际学术界的影响力有巨大帮助。

## 智能计算系统课程的内容

对于教学比较熟悉的教师可能会问：“智能计算系统这门课程涉及面太广，知识点太

多，在一门课内学完是否难度太大？”是的，智能计算系统课程涉及算法、芯片、编程等方面，每个方面展开来都可以是自成体系的一门课。所有枝枝蔓蔓要在一门课、一个学期里学完是不可能的。因此，我们在设计智能计算系统这门课程时采用了两个原则：应用驱动，全栈贯通。课程以一个应用为牵引，在软硬件技术栈的各个层次，聚焦于完成这个应用所需要的知识。这样不仅能使教师在一个学期内把智能计算系统课程教完，还有以下两个好处。

第一，一门好的工程学科的课程应当是学以致用。尤其是智能计算系统这样的课程，如果上完之后只学会了一些理论知识，那教学效果一定不理想。应用驱动可以让学生学完了课程，就能把课程知识在实践中用起来。第二，帮助学生形成系统性理解。过去计算机专业课程设计有个问题，就是条块分割明显，比如操作系统和计算机体系结构是割裂的，操作系统对计算机体系结构提出了什么要求，计算机体系结构对操作系统有哪些支持，没有一门课把这些串起来，打通学生知识的“任督二脉”。智能计算系统作为高年级本科生（或研究生）课程，通过应用的牵引，能帮助学生把过去所有的人工智能软硬件知识都串起来，形成整体理解。

具体来说，智能计算系统课程以图像风格迁移（例如，把一个实景照片转换成梵高风格的画）这一具体应用为牵引，来对整个智能计算系统软硬件技术栈做介绍。为此，本书的第1章将对人工智能、智能计算系统进行概述，同时介绍风格迁移这一贯穿全书的驱动范例。

接下来，课程讲述完成这个应用所必需的神经网络和深度学习算法知识。对于图像风格迁移不涉及的算法知识，课程就不做过度展开。这样在最多不超过6个学时内就能够把算法部分讲完。上述内容将在本书的第2、3章做介绍。

智能算法要在智能芯片上运行起来，还需要编程框架这一系统软件的支持。对上，编程框架降低程序员编写具体智能应用的难度；对下，编程框架将智能算法拆分成一些具体算子，并将算子分配到智能芯片（或者CPU）上运行。编程框架是很复杂的系统软件。但是实现图像风格迁移所需要的编程框架知识相对有限（比如说，TensorFlow编程框架中有上千个算子，但是风格迁移只涉及其中不到十分之一）。这样教师在6个左右的学时里，就可以教给学生如何使用主流的编程框架，以及编程框架内在的运行机理。上述内容将在本书的第4、5章做介绍。

编程框架再往下是智能芯片。由于传统CPU远远不能满足智能计算飞速增长的速度和能效需求，智能计算系统的算力需要由专门的深度学习处理器提供。开发一款能处理各

种视频识别、语音识别、广告推荐、自然语言理解任务的工业级深度学习处理器，需要成百上千有经验的工程师数十个月的努力。但是，在这门课里，我们只需要考虑有限目标，即如何针对图像风格迁移这一具体应用来设计深度学习处理器，包括设计思想、设计方法、具体结构等。当然，为了让学生能了解业界前沿动态，本书也会介绍真正的工业级深度学习处理器的大致结构。这样教师在6个左右的学时里，就可以让学生比较系统地掌握深度学习处理器的基础知识。上述内容将在本书的第6、7章做介绍。

深度学习处理器的指令集和结构与传统的通用CPU有较大区别。为了方便程序员充分发挥深度学习处理器的计算能力，需要有新的高级智能编程语言。因此，本书的第8章将介绍一种智能编程语言（BCL语言）。这种编程语言考虑了如何提升程序员编写智能算法的生产效率，也考虑了如何利用深度学习处理器的结构特点。本书在这一章除了介绍如何用BCL语言开发出图像风格迁移所需的基本算子，还提供了系统级开发和优化实践。这一部分内容大约需要3个学时。

智能计算系统课程的最终目标是让学生融会贯通地理解智能计算系统的完整软硬件技术栈。如果只是单纯学习上述章节的内容，可能学生掌握的还是一些割裂的知识点，必须要有一个实验，把这些知识点串起来，打通“任督二脉”。因此，本书的第9章具体介绍了一个实验，即如何开发一个能完成图像风格迁移任务的简单智能计算系统。理论上，学生把这个实验做好，就应该能对整个课程的知识体系有一定的全局理解。完成这个实验所需要的学时数和学生基础有较大的关系，可能要根据各个高校的实际情况来决定。此外，如果课程体系允许，我们建议专门开设一门智能计算系统实验课。我们专门编写的《智能计算系统实验教程》将于2020年出版，提供更全面、丰富的实验，为专门的智能计算系统实验课提供支撑。

在设计上述课程内容时，我们主要考虑的是中国科学院大学（简称国科大）的学生情况。我们在其他兄弟院校讲授这门课程时发现，各个学校的前置课程和学生基础不太一样，教师可以根据自身情况对各个部分的学时做灵活调整。比如，如果学生之前学过人工智能或者机器学习基础课，第2、3章算法部分的课时数可缩短。再比如，如果学生没有学过计算机体系结构或者计算机组成原理，那么第6、7章深度学习处理器部分可以讲慢一点，增加一些课时。

书中标\*的章节或习题，供有志于从事智能计算系统研究的读者选读或选做。

## 本书的写作

这本书的出版，凝聚着中国科学院计算技术研究所智能处理器研究中心以及中国科学院软件研究所智能软件研究中心很多老师和同学的心血。其中，我负责整理了本书第1章，李玲研究员负责整理了第2、3章，李威副研究员负责整理了第4、9章，郭崎研究员负责整理了第5、8章，杜子东副研究员负责整理了第6章，周徐达助理研究员负责整理了第7章。我和李玲研究员负责了全书的统稿。杜子东副研究员负责了本书的习题。此外，李震助理研究员、韩栋助理研究员，以及韦洁、潘朝凤、曾惜、于涌、王秉睿、张磊、郝一帆、刘恩赫、何皓源、高钰峰、宋新开、杜伟健等同志也参与了本书的部分工作。杜伟健、张振兴和宋新开对本书习题做出了贡献。方舟、曾惜、张振兴、李普泽和陈斌昌等同志负责了本书多幅图的绘制。张曦珊副研究员、张蕊助理研究员，以及吴道雨、承书尧、汪瑜、谭懿峻等同志参与了本书的校对。在此向这些同志表示衷心的感谢。同时，我们也特别感谢西北工业大学的周兴社教授和南开大学的李涛教授对智能计算系统的课程建设和教材编写提供的宝贵意见。由于我们学识水平有限，书中一定还有错漏之处，恳请读者多多批评指正。如有任何意见和建议，欢迎发邮件至 [ics\\_textbook@ict.ac.cn](mailto:ics_textbook@ict.ac.cn)。

本书的写作受到了国家重点研发计划、国家自然科学基金、“核高基”科技重大专项、中科院先导专项、中科院弘光专项、中科院前沿科学重点项目、中科院标准化研究项目、北京市自然科学基金、北京智源人工智能研究院和腾讯科学探索奖的支持。此外，机械工业出版社华章公司的温莉芳、刘立卿等同志给予我们大量的帮助。在此一并表示诚挚的谢意。

中国科学院计算技术研究所

陈云霖