

云计算原理与实践

CLOUD COMPUTING PRINCIPLE AND PRACTICE

过敏意 主编

吴晨涛 李超 阮娜 陈雨亭 编著

- 结合云计算理论和工程实践安排教材体系，内容涵盖云的各个层次，全面展现云计算的技术架构
- 深入介绍云计算的工程化方法和技术内涵，培养读者的工程能力



机械工业出版社
China Machine Press

教育部-阿里云产学合作协同育人项目成果

计算机类专业
系统能力培养
系列教材

云计算方向

云计算原理与实践

CLOUD COMPUTING PRINCIPLE AND PRACTICE

过敏意 主编

吴晨涛 李超 阮娜 陈雨亭 编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

云计算原理与实践 / 过敏意主编. —北京: 机械工业出版社, 2017.9
(计算机类专业系统能力培养系列教材)

ISBN 978-7-111-57970-0

I. 云… II. 过… III. 云计算—高等学校—教材 IV. TP393.027

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 220600 号

本书跨越云计算的各个层次, 全面系统地介绍了云计算的基本概念、原理和技术, 并结合产业实践介绍了云计算的最新发展和相关的工程问题。本书内容涵盖云计算的技术框架、数据中心、网络、虚拟化技术、分布式存储技术、云数据库、中间件和分布式部署, 并从产业角度给出了对云计算的理解和思考以及云上架构设计的常用方法和最佳实践。

本书适合作为高等院校计算机、电子工程及相关专业云计算课程的教材, 也适合作为对云计算技术感兴趣的技术人员和研究人员的参考书。

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: 朱 劼

责任校对: 李秋荣

印刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

版 次: 2017 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 186mm×240mm 1/16

印 张: 22.5

书 号: ISBN 978-7-111-57970-0

定 价: 79.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzsj@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

丛书序言

——计算机专业学生系统能力培养和系统课程设置的研究

未来的5~10年是中国实现工业化与信息化融合,利用信息技术与装备提高资源利用率、改造传统产业、优化经济结构、提高技术创新能力与现代管理水平的关键时期,而实现这一目标,对于高效利用计算系统的其他传统专业的专业人员需要了解和掌握计算思维,对于负责研发多种计算系统的计算机专业的专业人员则需要具备系统级的设计、实现和应用能力。

1. 计算技术发展特点分析

进入本世纪以来,计算技术正在发生重要发展和变化,在上世纪个人机普及和 Internet 快速发展基础上,计算技术从初期的科学计算与信息处理进入了以移动互联、物物相联、云计算与大数据计算为主要特征的新型网络时代,在这一发展过程中,计算技术也呈现出以下新的系统形态和技术特征。

(1) 四类新型计算系统

1) **嵌入式计算系统** 在移动互联网、物联网、智能家电、三网融合等行业技术与产业发展中,嵌入式计算系统有着举足重轻和广泛的作用。例如,移动互联网中的移动智能终端、物联网中的汇聚节点、“三网融合”后的电视机顶盒等是复杂而新型的嵌入式计算系统;除此之外,新一代武器装备,工业化与信息化融合战略实施所推动的工业智能装备,其核心也是嵌入式计算系统。因此,嵌入式计算将成为新型计算系统的主要形态之一。在当今网络时代,嵌入式计算系统也日益呈现网络化的开放特点。

2) **移动计算系统** 在移动互联网、物联网、智能家电以及新型装备中,均以移动通信网络为基础,在此基础上,移动计算成为关键技术。移动计算技术将使计算机或其他信息智能终端设备在无线环境下实现数据传输及资源共享,其核心技术涉及支持高性能、低功耗、无线连接和轻松移动的移动处理机及其软件技术。

3) **并行计算系统** 随着半导体工艺技术的飞速进步和体系结构的不断发展,多核/众核处理机硬件日趋普及,使得昔日高端的并行计算呈现出普适化的发展趋势;多核技术就是在

处理器上拥有两个或更多一样功能的处理器核心，即将数个物理处理器核心整合在一个内核中，数个处理器核心在共享芯片组存储界面的同时，可以完全独立地完成各自操作，从而能在平衡功耗的基础上极大地提高 CPU 性能；其对计算系统微体系结构、系统软件与编程环境均有很大影响；同时，云计算也是建立在廉价服务器组成的大规模集群并行计算基础之上。因此，并行计算将成为各类计算系统的基础技术。

4) 基于服务的计算系统 无论是云计算还是其他现代网络化应用软件系统，均以服务计算为核心技术。服务计算是指面向服务的体系结构 (SOA) 和面向服务的计算 (SOC) 技术，它是标识分布式系统和软件集成领域技术进步的一个里程碑。服务作为一种自治、开放以及与平台无关的网络化构件可使分布式应用具有更好的复用性、灵活性和可增长性。基于服务组织计算资源所具有的松耦合特征使得遵从 SOA 的企业 IT 架构不仅可以有效保护企业投资、促进遗留系统的复用，而且可以支持企业随需应变的敏捷性和先进的软件外包管理模式。Web 服务技术是当前 SOA 的主流实现方式，其已经形成了规范的服务定义、服务组合以及服务访问。

(2) “四化” 主要特征

1) 网络化 在当今网络时代，各类计算系统无不呈现出网络化发展趋势，除了云计算系统、企业服务计算系统、移动计算系统之外，嵌入式计算系统也在物联时代通过网络化成为开放式系统。即，当今的计算系统必然与网络相关，尽管各种有线网络、无线网络所具有的通信方式、通信能力与通信品质有较大区别，但均使得与其相联的计算系统能力得以充分延伸，更能满足应用需求。网络化对计算系统的开放适应能力、协同工作能力等也提出了更高的要求。

2) 多媒体化 无论是传统 Internet 应用服务，还是新兴的移动互联网服务业务，多媒体化是其面向人类、实现服务的主要形态特征之一。多媒体技术是利用计算机对文本、图形、图像、声音、动画、视频等多种信息进行综合处理、建立逻辑关系和人机交互作用的新技术。多媒体技术使计算机可以处理人类生活中最直接、最普遍的信息，从而使得计算机应用领域及功能得到了极大的扩展，使计算机系统的人机交互界面和手段更加友好和方便。多媒体具有计算机综合处理多种媒体信息的集成性、实时性与交互性特点。

3) 大数据化 随着物联网、移动互联网、社会化网络的快速发展，半结构化及非结构化的数据呈几何倍增长。数据来源的渠道也逐渐增多，不仅包括了本地的文档、音视频，还包括网络内容和社交媒体；不仅包括 Internet 数据，更包括感知物理世界的的数据。从各种类型的数据中快速获得有价值信息的能力，称为大数据技术。大数据具有体量巨大、类型繁多、价值密度低、处理速度快等特点。大数据时代的来临，给各行各业的数据处理与业务发展带

来重要变革，也对计算系统的新型计算模型、大规模并行处理、分布式数据存储、高效的数据处理机制等提出了新的挑战。

4) 智能化 无论是计算系统的结构动态重构，还是软件系统的能力动态演化；无论是传统 Internet 的搜索服务，还是新兴移动互联的位置服务；无论是智能交通应用，还是智能电网应用，无不显现出鲜明的智能化特征。智能化将影响计算系统的体系结构、软件形态、处理算法以及应用界面等。例如，相对于功能手机的智能手机是一种安装了开放式操作系统的手机，可以随意安装和卸载应用软件，具备无线接入互联网、多任务和复制粘贴以及良好用户体验等能力；相对于传统搜索引擎的智能搜索引擎是结合了人工智能技术的新一代搜索引擎，不仅具有传统的快速检索、相关度排序等功能，更具有用户角色登记、用户兴趣自动识别、内容的语义理解、智能信息化过滤和推送等功能，其追求的目标是根据用户的请求从可以获得的网络资源中检索出对用户最有价值的信息。

2. 系统能力的主要内涵及培养需求

(1) 主要内涵

计算机专业学生的系统能力的核心是掌握计算系统内部各软件/硬件部分的关联关系与逻辑层次；了解计算系统呈现的外部特性以及与人 and 物理世界的交互模式；在掌握基本系统原理的基础上，进一步掌握设计、实现计算机硬件、系统软件以及应用系统的综合能力。

(2) 培养需求

要适应“四类计算系统，四化主要特征”的计算技术发展特点，计算机专业人才培养必须“与时俱进”，体现计算技术与信息产业发展对学生系统能力培养的需求。在教育思想上要突现系统观教育理念，在教学内容中体现新型计算系统原理，在实践环节上展现计算系统平台技术。

要深刻理解系统化专业教育思想对计算机专业高等教育过程所带来的影响。系统化教育和系统能力培养要采取系统科学的方法，将计算对象看成一个整体，追求系统的整体优化；要夯实系统理论基础，使学生能够构建出准确描述真实系统的模型，进而能够用于预测系统行为；要强化系统实践，培养学生能够有效地构造正确系统的能力。

从系统观出发，计算机专业的教学应该注意教学生怎样从系统的层面上思考（设计过程、工具、用户和物理环境的交互），讲透原理（基本原则、架构、协议、编译以及仿真等等），强化系统性的实践教学培养过程和内容，激发学生的辩证思考能力，帮助他们理解和掌控数字世界。

3. 计算机专业系统能力培养课程体系设置总体思路

为了更好地培养适应新技术发展的、具有系统设计和系统应用能力的计算机专门人才，

我们需要建立新的计算机专业本科教学课程体系，特别是设立有关系统级综合性课程，并重新规划计算机系统核心课程的内容，使这些核心课程之间的内容联系更紧密、衔接更顺畅。

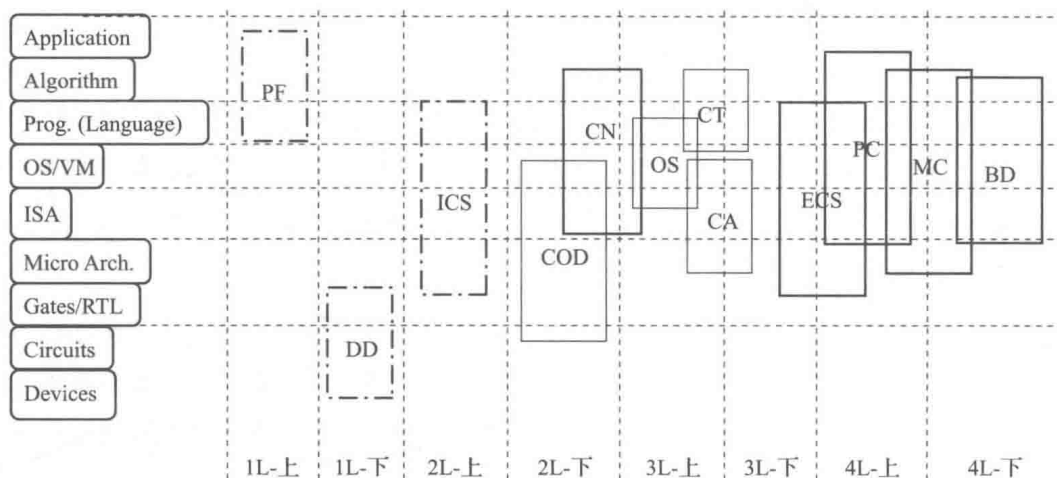
我们建议把课程分成三个层次：计算机系统基础课程、重组内容的核心课程、侧重不同计算系统的若干相关平台应用课程。

第一层次核心课程包括：“程序设计基础（PF）”“数字逻辑电路（DD）”和“计算机系统基础（ICS）”。

第二层次核心课程包括：“计算机组成与设计（COD）”“操作系统（OS）”“编译技术（CT）”和“计算机系统结构（CA）”。

第三层次核心课程包括：“嵌入式计算系统（ECS）”“计算机网络（CN）”“移动计算（MC）”“并行计算（PC）”和“大数据并行处理技术（BD）”。

基于这三个层次的课程体系中相关课程设置方案如下图所示。



图中左边部分是计算机系统的各个抽象层，右边的矩形表示课程，其上下两条边的位置标示了课程内容在系统抽象层中的涵盖范围，矩形的左右两条边的位置标示了课程大约在哪个年级开设。点划线、细实线和粗实线分别表示第一、第二和第三层次核心课程。

从图中可以看出，该课程体系的基本思路是：先讲顶层比较抽象的编程方面的内容；再讲底层有关系统的具体实现基础内容；然后再从两头到中间，把顶层程序设计的内容和底层电路的内容按照程序员视角全部串起来；在此基础上，再按序分别介绍计算机系统硬件、操作系统和编译器的实现细节。至此的所有课程内容主要介绍单处理器系统的相关内容，而计算机体系结构主要介绍各不同并行粒度的体系结构及其相关的操作系统实现技术和编译器实现技术。第三层次的课程没有先后顺序，而且都可以是选修课，课程内容应体现第一和第二

层次课程内容的螺旋式上升趋势，也即第三层次课程内容涉及的系统抽象层与第一和第二层次课程涉及的系统抽象层是重叠的，但内容并不是简单重复，应该讲授在特定计算系统中的相应教学内容。例如，对于“嵌入式计算系统（ECS）”课程，虽然它所涉及的系统抽象层与“计算机系统基础（ICS）”课程涉及的系统抽象层完全一样，但是，这两门课程的教学内容基本上不重叠。前者着重介绍与嵌入式计算系统相关的指令集体系结构设计、操作系统实现和底层硬件设计等内容，而后者着重介绍如何从程序员的角度来理解计算机系统设计与实现中涉及的基础内容。

与传统课程体系设置相比，最大的不同在于新的课程体系中有一门涉及计算机系统各个抽象层面的能够贯穿整个计算机系统设计和实现的基础课程：“计算机系统基础（ICS）”。该课程讲解如何从程序员角度来理解计算机系统，可以使程序员进一步明确程序设计语言中的语句、数据和程序是如何在计算机系统中实现和运行的，让程序员了解不同的程序设计方法为什么会有不同的性能等。

此外，新的课程体系中，强调课程之间的衔接和连贯，主要体现在以下几个方面。

1) “计算机系统基础”课程可以把“程序设计基础”和“数字逻辑电路”之间存在于计算机系统抽象层中的“中间间隔”填补上去并很好地衔接起来，这样，到2L-上结束的时候，学生就可以通过这三门课程清晰地建立单处理器计算机系统的整机概念，构造出完整的计算机系统的基本框架，而具体的计算机系统各个部分的实现细节再通过后续相关课程来细化充实。

2) “数字逻辑电路”“计算机组成与设计”“嵌入式计算系统”中的实验内容之间能够很好地衔接，可以规划一套承上启下的基于FPGA开发板的综合实验平台，让学生在一个统一的实验平台上从门电路开始设计基本功能部件，然后再以功能部件为基础设计CPU、存储器和外围接口，最终将CPU、存储器和I/O接口通过总线互连为一个完整的计算机硬件系统。

3) “计算机系统基础”“计算机组成与设计”“操作系统”和“编译技术”之间能够很好地衔接。新课程体系中“计算机系统基础”和“计算机组成与设计”两门课程对原来的“计算机系统概论”和“计算机组成原理”的内容进行了重新调整和统筹规划，这两门课程的内容是相互密切关联的。对于“计算机系统基础”与“操作系统”、“编译技术”的关系，因为“计算机系统基础”以Intel x86为模型机进行讲解，所以它为“操作系统”（特别是Linux内核分析）提供了很好的体系结构基础。同时，在“计算机系统基础”课程中为了清楚地解释程序中的文件访问和设备访问等问题，会从程序员角度简单引入一些操作系统中的相关基础知识。此外，在“计算机系统基础”课程中，会讲解高级语言程序如何进行转换、链接以生成可执行代码的问题；“计算机组成与设计”中的流水线处理等也与编译优化相关，而且“计算机组

成与设计”以 MIPS 为模型机进行讲解，而 MIPS 模拟器可以为“编译技术”的实验提供可验证实验环境，因而“计算机系统基础”和“计算机组成与设计”两门课程都与“编译技术”有密切的关联。“计算机系统基础”“计算机组成与设计”“操作系统”和“编译技术”这四门课程构成了一组计算机系统能力培养最基本的核心课程。

从“计算机系统基础”课程的内容和教学目标以及开设时间来看，位于较高抽象层的先行课（如程序设计基础和数据结构等课程）可以按照原来的内容和方式开设和教学，而作为新的“计算机系统基础”和“计算机组成与设计”先导课的“数字逻辑电路”，则需要对传统的教学内容，特别是实验内容和实验手段方面进行修改和完善。

有了“计算机系统基础”和“计算机组成与设计”课程的基础，作为后续课程的操作系统、编译原理等将更容易被学生从计算机系统整体的角度理解，课程内容方面不需要大的改动，但是操作系统和编译器的实验要以先行课程实现的计算机硬件系统为基础，这样才能形成一致的、完整的计算机系统整体概念。

本研究还对 12 门课程的规划思路、主要教学内容及实验内容进行了研究和阐述，具体内容详见公开发表的研究报告。

4. 关于本研究项目及本系列教材

机械工业出版社华章公司在较早的时间就引进出版了 MIT、UC-Berkeley、CMU 等国际知名院校有关计算机系统课程的多种教材，并推动和组织了计算机系统能力培养相关的研究，对国内计算机系统能力培养起到了积极的促进作用。

本项研究是教育部 2013 ~ 2017 年计算机类专业教学指导委员会“计算机类专业系统能力培养研究”项目之一，研究组成员由国防科技大学王志英、北京航空航天大学马殿富、西北工业大学周兴社、南开大学吴功宜、武汉大学何炎祥、南京大学袁春风、北京大学陈向群、中国科技大学安虹、天津大学张刚、机械工业出版社华章公司温莉芳等组成，研究报告分别发表于中国计算机学会《中国计算机科学技术发展报告》及《计算机教育》杂志。

本系列教材编委会在上述研究的基础上对本套教材的出版工作经过了精心策划，选择了对系统观教育和系统能力培养有研究和实践的教师作为作者，以系统观为核心编写了本系列教材。我们相信本系列教材的出版和使用，将对提高国内高校计算机类专业学生的系统能力和整体水平起到积极的促进作用。

本书编委会

主编 过敏意 (上海交通大学)

编委 (按拼音顺序排列)

曹 锋 (阿里云公司)

李 超 (上海交通大学)

李 毅 (阿里云公司)

刘澍泉 (阿里云公司)

阮 娜 (上海交通大学)

汤志敏 (阿里云公司)

王宇德 (阿里云公司)

吴晨涛 (上海交通大学)

易 立 (阿里云公司)

赵杰辉 (阿里云公司)

陈雨亭 (上海交通大学)

李妹芳 (阿里云公司)

林晓斌 (阿里云公司)

任华华 (阿里云公司)

唐 洪 (阿里云公司)

王晓斐 (阿里云公司)

文 荣 (阿里云公司)

姚伟斌 (阿里云公司)

张良模 (阿里云公司)

钟 华 (阿里云公司)

特别感谢

唐 洪 (阿里云公司)

李妹芳 (阿里云公司)

序

当前，一场科技革命浪潮正席卷全球，这一次，IT 技术是主角之一。云计算、大数据、人工智能、物联网，这些新技术正加速走向应用。很快，它们将渗透至我们生产、生活中的每个角落，并将深刻改变我们的世界。

在这些新技术当中，云计算作为基础设施，将全面支撑各类新技术、新应用。我认为：云计算，特别是公共云，将成为这场科技革命的承载平台，全面支撑各类技术创新、应用创新和模式创新。

作为一种普惠的公共计算资源与服务，云计算与传统 IT 计算资源相比有以下几个方面的优势：一是硬件的集约化；二是人才的集约化；三是安全的集约化；四是服务的普惠化。

公共云计算的快速发展将带动云计算产业进入一个新的阶段，我们可以称之为“云计算 2.0 时代”，云计算对行业演进发展的支撑作用将更加凸显。

云计算是“数据在线”的主要承载。“在线”是我们这个时代最重要的本能，它让互联网变成了最具渗透力的基础设施，数据变成了最具共享性的生产资料，计算变成了随时随地的公共服务。云计算不仅承载数据本身，同时也承载数据应用所需的计算资源。

云计算是“智能”与“智慧”的重要支撑。智慧有两大支撑，即网络与大数据。包括互联网、移动互联网、物联网在内的各种网络，负责搜集和共享数据；大数据作为“原材料”，是各类智慧应用的基础。云计算是支撑网络和大数据的平台，所以，几乎所有智慧应用都离不开云计算。

云计算是企业享受平等 IT 应用与创新环境的有力保障。当前，企业创新，特别是小微企业和创业企业的创新面临 IT 技术和 IT 成本方面的壁垒。云计算的出现打破了这一壁垒，IT 成为唾手可得的基础性资源，企业无须把重点放在 IT 支撑与实现上，可以更加聚焦于擅长的领域进行创新，这对提升全行业的信息化水平以及激发创新创业热情将起到至关重要的作用。

除了发挥基础设施平台的支撑作用外，2.0时代的云计算，特别是公共云计算对产业的影响将从量变到质变。我认为，公共云将全面重塑整个 ICT 生态，向下定义数据中心、IT 设备，甚至是 CPU 等核心器件，向上定义软件与应用，横向承载数据与安全，纵向支撑人工智能的技术演进与应用创新。

对我国来说，发展云计算产业的战略意义重大。我认为，云计算已不仅仅是“IT 基础设施”，它将像电网、移动通信网、互联网、交通网络一样，成为“国家基础设施”，全面服务国家多项重大战略的实施与落地。

云计算是网络强国建设的重要基石。发展云计算产业，有利于我国实现 IT 全产业链的自主可控，提高信息安全保障水平，并推动大数据、人工智能的发展。

云计算是提升国家治理能力的重要工具。随着大数据、人工智能、物联网等技术应用到智慧城市、智慧政务建设中，国家及各城市的治理水平和服务能力大幅提升，这背后，云计算平台功不可没。

云计算将全面推动国家产业转型升级。云计算将支撑“中国制造 2025”“互联网+”战略，全面推动“两化”深度融合。同时，云计算也为创新创业提供了优质土壤，在“双创”领域，云计算已真正成为基础设施。

在 DT 时代，我认为计算及计算的能力是衡量一个国家科技实力和创新能力的重要标准。只有掌握了计算能力，才具备全面支撑创新的基础，才有能力挖掘数据的价值，才能在重塑 ICT 生态过程中掌握主导权。

接下来的几年，云计算将成为全球科技和产业竞争的焦点。目前，我国的云计算产业具备和发达国家抗衡的能力，而我们对数据的认知、驾驭能力及对资源的利用开发和人力也是与发达国家等同的。因此，我们正处在一个“黄金窗口期”。

我一直认为，支撑技术进步和产业发展的最主要力量是人才，未来世界各国在云计算、大数据、AI 等领域的竞争，在某种程度上会转变为人才之争。因此，加强专业人才培养将是推动云计算、大数据产业发展的重要抓手。

由于是新兴产业，我国云计算、大数据领域的人才相对短缺。作为中国最大的云计算服务企业，阿里云希望能在云计算、大数据领域的人才培养方面做出努力，将我们在云计算、大数据领域的实践经验贡献到高校的教育中，为高校的课程建设提供支持。

与传统 IT 基础技术理论相比，云计算和大数据更偏向应用，而这方面恰恰是阿里云的优势。因此，我们与高校合作，优势互补，将计算机科学的理论和阿里云的产业实践融合起来，让大家从实战的角度认识、掌握云计算和大数据。

我们希望通过这套教材，把阿里云一些经过检验的经验与成果分享给全社会，让众多计算机相关专业学生、技术开发者及所有对云计算、大数据感兴趣的企业和个人，可以与我们一起推动中国云计算、大数据产业的健康快速发展！

胡晓明
阿里云总裁

P R E F A C E

前 言

Computation may someday be organized as a public utility.

——John McCarthy (美国计算机科学家和认知科学家, 1971 年图灵奖获得者)

让计算以公共资源的形式更加便捷地服务于这个世界——这一想法早在 20 世纪 60 年代就已出现。几十年过去, 云计算概念的提出将愿望化作现实。毫无疑问, 云计算是进入 20 世纪以来最重要的信息技术变革之一。虽然云不是某种特定的算法, 也不是某个安装在电脑中的软件, 更不是一个新兴的硬件设备, 但它却成为当今信息社会的重要基础设施。无论是政府、企业、高校, 还是其他团体或个人, 都日益依赖云计算带来的便捷。

尽管云计算已飞速发展多年, 但目前市面上关于云计算的教材却屈指可数, 将云计算的基本理论与产业实践结合的教材更是凤毛麟角。为此, 上海交通大学计算机科学与工程学院申报了“教育部-阿里云产学合作协同育人项目”, 在该项目的支持下进行云计算课程的建设, 并基于课程编写了本书。本书是校企联合建设课程并编写教材的有益尝试。在内容上, 本书全面系统地介绍了云计算的相关概念、方法、技术与现状, 充分融入产业界的先进理念, 结合产业一线实践, 既反映了编者在云计算和互联网规模系统设计领域的主要教学和科研成果, 也展现了阿里云公司有关专家和工程师多年的技术积淀和开发经验。

本书有两个突出的特点。首先, 全书跨越云的各个层次, 内容全面而新颖。虽然以云计算为核心, 但同样重视云存储; 虽然主要着眼于云的系统平台和软件环境, 但对同样关键的硬件基础设施(即数据中心)也做了较为详尽的介绍。其次, 本书是一部理论和实践相结合的教材, 论述深入浅出、易于理解。书中不仅介绍了经典的虚拟化理论、网络理论等, 还以阿里云的真实系统为例, 阐述了云计算实践过程中的工程和技术问题。

本书面向计算机、电子工程等相关专业的学生, 以及对云计算技术感兴趣的技术人员和研究人员。第 1 章对云计算的基础概念进行了阐述, 使读者初步了解云计算的诞生和发展, 为后续的学习奠定基础。第 2 章介绍数据中心及架构, 读者从中可以理解云计算这一无形服

务的硬件根基和运行环境。第3章重点介绍云计算中的网络技术，由于云数据中心的访问量很大，因此对网络有很高的要求。第4章重点介绍云计算的重要系统支撑——虚拟化技术，本章对于理解云计算环境中的资源管理具有重要参考价值。第5章介绍分布式存储技术，在云环境下，数据存储是核心问题之一，该章将应用大量的案例来进行说明。第6章在云存储基础上介绍云数据库的知识，建议想了解云计算对大数据的支持的读者深入学习这一章。第7章和第8章分别对中间件和分布式部署进行介绍，其中包含丰富的实际产品细节，建议学有余力的学生在此基础上增加实践操作。第9章从产业角度给出了对云计算的理解和思考，以及云上架构设计的常用方法和最佳实践，并对云计算的未来进行了展望。

本质上，云计算不是一门独立的技术领域，而是构筑在多门已经成熟的计算机技术领域之上的一个综合体系。因此，本书可以看作是云计算相关技术体系的总览，并以本书内容为主线延伸到其他专业课程的学习中。在上海交通大学计算机科学与工程系的教学实践中，学生通过这门课收获最多的是关乎原理的“为何”（比如为何选择虚拟化，为何不选择传统架构等），然后是关乎技术的“如何”（比如如何实现高可靠性，如何分布式部署等），最后是关乎云计算实践的应用技巧和方法等。全书各章最后均附相关的习题，供读者思考和练习。此外，每章之后还附有参考文献，除相关书籍和论文外，我们还提供了主要技术开发者社区的博客和文章链接。考虑到云计算是一个技术快速更新的领域，读者可以通过互联网了解技术的最新动态和进展。

本书的成稿得益于很多人的付出和努力。感谢教育部高等学校计算机类专业教学指导委员会“系统能力培养研究项目”专家组的指导，感谢上海交通大学计算机科学与工程系相关老师的付出，感谢阿里云公司唐洪、李妹芳、刘澍泉、任华华、文荣、姚伟斌、易立、汤志敏、曹锋、林晓斌、钟华、赵杰辉、李毅、王宇德、张良模、王晓斐等专家对本书技术内容的指导和建议，感谢阿里云公司章文嵩、吴结生、卢毅军、曲海峰、祝顺民、朱照远、张献涛、董元元、徐立、李文兆、陈舟锋、周琦、仇应俊、占超群、李妹芳等专家在授课过程中为本书提供了素材，特别感谢阿里云公司李妹芳以及机械工业出版社华章公司各位编辑的辛苦工作和大力支持。

云计算是一个充满生机和活力的领域，限于作者的学识及视野，本书难免存在疏漏和理解不到位之处，欢迎各位同行和读者批评指正。我们将不胜感激！

作者

2017年7月

目 录

丛书序言

本书编委会

序

前言

第 1 章 云计算概述 1

1.1 云计算的产生及发展 1

1.1.1 云计算的产生背景 1

1.1.2 云计算的特点 2

1.1.3 云计算发展简史 3

1.1.4 知名的云计算服务提供商 3

1.2 云计算的基础知识 4

1.2.1 云计算的概念 4

1.2.2 云服务的使用形态 5

1.2.3 云计算的服务类型 7

1.3 云计算的价值与典型的使用场景 8

1.3.1 云计算的价值 8

1.3.2 云计算典型的使用场景 9

1.4 云计算平台架构 11

1.4.1 AWS 平台架构 11

1.4.2 阿里云平台架构 12

1.4.3 谷歌云平台 13

1.4.4 几种云计算平台的特点 15

1.5 云计算部署小实例 15

1.6 云计算的核心技术 18

1.7 云计算的生态 22

本章小结 23

习题 24

参考文献与进一步阅读 24

第 2 章 数据中心 25

2.1 数据中心基础设施 25

2.1.1 数据中心的基本组成 26

2.1.2 机房规划与设计 30

2.1.3 基础设施运维 33

2.1.4 数据中心的评价 35

2.2 云计算数据中心 41

2.2.1 云数据中心的发展 41

2.2.2 互联网数据中心 42

2.2.3 多租户数据中心 42

2.2.4 数据中心多级架构 43

2.2.5 模块化设计与硬件重构 43

2.3 阿里云数据中心 45

2.3.1 绿色环保新实践 45

2.3.2 数据中心设计新实践 46

2.3.3 云计算应用新实践 46

本章小结	46	3.5.4 DNS 负载均衡	88
习题	47	3.5.5 开源负载均衡概述	88
参考文献与进一步阅读	47	3.5.6 阿里云负载均衡服务	90
第 3 章 网络	48	本章小结	92
3.1 网络架构	48	习题	92
3.1.1 数据中心网络架构	49	参考文献与进一步阅读	93
3.1.2 区域网络架构	50	第 4 章 虚拟化	95
3.1.3 核心网架构	51	4.1 虚拟化技术概述	95
3.1.4 边缘或内容分发网络架构	52	4.1.1 概念和历史	95
3.2 数据中心网络	53	4.1.2 虚拟化的意义	96
3.2.1 数据中心网络概述	53	4.2 虚拟机的核心原理和技术	96
3.2.2 数据中心网络架构技术演进	54	4.2.1 机器与接口	96
3.3 边界网络和 CDN	57	4.2.2 系统接口	96
3.3.1 HTTP	58	4.2.3 运行模式	98
3.3.2 DNS	59	4.2.4 虚拟机的分类	99
3.3.3 CDN 的基本原理	61	4.3 虚拟化的实现	101
3.3.4 CDN 的应用	66	4.3.1 Xen 虚拟机技术	101
3.3.5 阿里云 CDN	68	4.3.2 KVM 技术	103
3.3.6 CDN 的安全	71	4.3.3 其他资源虚拟化技术	104
3.4 网络虚拟化技术	72	4.4 虚拟机管理与调度	106
3.4.1 网络虚拟化的概念	72	4.4.1 典型管理问题	106
3.4.2 网络虚拟化的原理	74	4.4.2 弹性伸缩	108
3.4.3 虚拟网络互联	76	4.5 容器技术	109
3.4.4 主流开源项目介绍	79	4.5.1 操作系统级虚拟化	109
3.4.5 阿里云的虚拟专有网络	81	4.5.2 Docker	110
3.5 负载均衡技术	83	4.5.3 容器与传统虚拟机	111
3.5.1 负载均衡的原理	83	4.5.4 Docker 服务编排	112
3.5.2 四层负载均衡	84	4.5.5 Docker 对云的扩展	114
3.5.3 七层负载均衡	86	4.6 阿里云虚拟化实践	114