

大数据科学与应用丛书

- 了解云计算技术 ·
- 提升云计算性能 ·
- 保障云计算安全 ·
- 实现绿色云计算 ·
- 融合云与端资源 ·

云计算

技术及性能优化

徐小龙 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

大数据科学与应用丛书



云计算 技术及性能优化

徐小龙 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京•BEIJING

内 容 简 介

本书取材国内外云计算技术领域最新资料,并在认真总结作者团队相关科研成果的基础上,精心组织编写。本书分为四个部分:第一部分云计算基本知识介绍了云计算发展现状、云计算系统架构与组成部件;第二部分云计算安全保障机制介绍了可信虚拟私有云及执行体与执行点可信评估机制、云数据销毁机制、云存储隐私保护机制与保护模型以及多授权机构基于属性的密文访问控制方案;第三部分绿色云计算分析了云计算能耗问题,介绍了绿色云计算模型、节能型资源配置与任务调度机制、动态数据聚集机制与重复数据删除机制;第四部分云端融合计算重点介绍了云端融合计算模型、关键技术及其在知识系统、恶意代码防御、流媒体等领域的应用。本书集中反映了云计算技术的新思路、新观点、新方法和新成果;注意从实际出发,采用读者容易理解的体系和叙述方法,深入浅出、循序渐进地帮助读者把握云计算技术的主要内容,富有启发性。

本书既可作为计算机科学技术学科、电子信息学科,以及信息安全专业的大学高年级学生、硕士及博士研究生教材,对从事分布式计算、网络信息安全技术、信息网络应用系统研究和开发工作的科研人员也具有重要的参考价值。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

云计算技术及性能优化 / 徐小龙编著. —北京: 电子工业出版社, 2017.8

(大数据科学与应用丛书)

ISBN 978-7-121-32310-2

I. ①云… II. ①徐… III. ①云计算—研究 IV. ①TP393.027

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 181831 号

责任编辑: 田宏峰

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 30 字数: 768 千字

版 次: 2017 年 8 月第 1 版

印 次: 2017 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 88.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: tianhf@phei.com.cn。

前言

现代网络计算与信息通信的核心目标之一就是消除一切信息孤岛，并最大限度地聚合计算、存储与信息等各种软硬件资源，以解决大规模计算和海量数据处理的需求。云计算（Cloud Computing）技术的提出为满足这类需求提供了一种高性价比的解决方案。

云计算是分布式计算（Distributed Computing）、并行计算（Parallel Computing）和网格计算（Grid Computing）的进一步发展，通过将计算任务均衡分布在由大规模集群服务器构成的资源池上，使各种应用系统能够根据按需、透明地获取高性价比的计算能力、存储资源和信息服务。目前云计算系统分为两种，一种是私有云，一种是公共云。私有云计算由政府、企事业等机构投资、建设、拥有和管理，仅限特定的本机构用户使用，提供对数据、安全性和服务质量的最有效控制，用户可以自由配置自己的服务。公共云则基于信息服务提供商构建并集中管理的面向公众的大型数据中心，与相对封闭的私有云不同，供多租客（Multi-Tenant）以免费或按需付费等方式使用。

云计算平台的易编程、高容错、方便扩展等特性，使得处理超大规模数据的分布式计算成为现实。云计算技术已经受到学术界和产业界的双重关注，与大数据（Big Data）和物联网（Internet of Things, IoT）同时成为当前信息技术领域的三大研究热点。事实上，云计算已经成为处理大数据的基础平台，也是物联网系统的处理核心。目前本领域的研究者和研究机构已经在云计算任务调度、资源管理、数据存储、网络结构及安全保障机制等方面已经取得不少重要的研究成果。Google、IBM、Amazon、百度、阿里巴巴、腾讯等商业机构均已构建了各自的大规模云计算平台，并在平台上承载了信息检索、数据挖掘、商业信息处理、科学计算和电子商务等大规模的数据处理工作，终端用户通过合适的互联网接入设备即可获取各类计算和数据服务。Gartner 在近年来发布的《IT 行业十大战略技术报告》中每年均将云计算技术列入十大战略技术。《中国云计算产业发展白皮书》指出，云计算应用以政府、电信、教育、医疗、金融、石油石化和电力等行业为重点，在中国市场逐步被越来越多的企业和机构采用。

然而，目前的云计算系统还有提升的空间，普遍存在以下的内生性根本问题。

（1）基于集中建设、管理的数据中心的云计算系统广泛聚集了用户的应用和数据资源，虽然可以组织安全专家以及专业化安全服务队伍实现整个系统的安全管理，但也更方便黑客发动集中的攻击，带来了更大的安全风险事故，一旦发生则影响范围更广，后果严重。

（2）开放的公共云计算环境在系统的管理监控、计算安全可信性和服务质量保障机制的实现存在一系列问题。很多企业出于对云计算平台安全可信性的怀疑而望而却步，因为用户委托云计算平台处理的任务和存储的私密数据被云计算系统节点或其他用户窃取和破坏的可能性是显然存在的。如何有效增强用户的信心，提升云计算平台的资源利用率，是云计算进一步推广应用的首要前提。

（3）简单认为网络边缘的终端节点仅仅是服务的消费者，对于终端节点所蕴含的各种可

利用的潜在资源考虑并不足够。事实上,大量的终端节点(PC等非瘦客户端)本身也拥有一定的计算、存储等信息资源,且常常处于在线闲置状态,这些节点所拥有的、可被聚合的海量资源被浪费了。

(4)相较于传统的数据中心的能耗和性能不均衡问题,云计算系统所基于的数据中心有所改善,但产生能耗仍然非常惊人,并仍然会在服务的高峰期间出现服务质量(Quality of Service, QoS)难以保证和低谷期间资源浪费等一系列问题。

在学术界,云计算技术现已成为分布式计算及相关领域最活跃的研究领域之一,很多高校与研究部门针对云计算关键技术展开等多方面研究工作,重要的国际学术会议,如Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)、Operating Systems Design and Implementation (OSDI)、Special Interest Group on Management of Data (SIGMOD)、Conference on Computer and Communications Security (CCS)等,相继刊载了云计算领域的相关研究成果。各国政府也投入大量的人力、物力和财力进行云计算的战略部署。例如,美国政府利用云计算技术降低政府信息化运行成本;英国政府建立G-Cloud平台;我国政府也在五个城市开展云计算服务试点示范工作,并在石油石化、交通运输等行业启动了相应的云计算发展计划,以促进产业信息化。

本书作者在分布式计算(特别是云计算)、数据处理及信息安全技术领域进行了多年的研究,具有扎实的理论基础和实践经验。本书的内容主要源于作者所领导的科研团队承担了国家自然科学基金项目“面向绿色云计算的节能型资源整合和任务调度关键技术的研究”(编号:61472192)、国家自然科学基金项目“基于安全Agent的可信云计算与对等计算融合模型及关键技术的研究”(编号:61202004)、江苏省自然科学基金项目“公共云计算环境中可信虚拟私有云模型VPC及其关键技术的研究”(编号:BK2011754)、江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助项目“节能优化的多数据中心的资源协同管理与任务动态调度关键技术”(编号:JNHB-012)及信息安全国家重点实验室开放课题“面向隐私保护的云数据安全及销毁机制的研究”(编号:2016-MS-18)等项目的研究工作和相关成果。

针对目前国内对云计算技术的研究需求,本书取材国内外最新资料,在认真总结作者主持的国家自然基金项目、江苏省自然科学基金项目等相关科研成果的基础上,精心组织编写。本书详细、深入地介绍了云计算发展现状、云计算系统架构与组成部件、云计算安全保障机制、绿色云计算关键技术、新型云端融合计算技术,集中反映了云计算技术的新思路、新观点、新方法和新成果,具有较高的学术价值和应用价值。本书分为四部分,首先深入分析云计算发展历程、关键技术,然后介绍了典型的云计算平台和应用系统。在此基础上,重点介绍我们在云计算安全保障领域的创新性研究成果,主要包括可信虚拟私有云及执行体与执行点可信评估机制、云数据销毁机制、云存储隐私保护机制与保护模型,以及多授权机构基于属性的密文访问控制方案。实现绿色云计算是我们的重要研究目标,本书重点分析了云计算能耗问题,然后介绍了作者领导的团队在绿色云计算模型、节能型资源配置与任务调度机制、动态数据聚集机制与重复数据删除机制等方面的研究成果。本书的最后一部分则重点阐述了作者领导的项目组提出的云端融合计算模型、关键技术及其在知识系统、恶意代码防御、流媒体等领域的应用。

本书注意从实际出发,采用读者容易理解的体系和叙述方法,深入浅出、循序渐进地帮助读者把握云计算技术的主要内容,富有启发性。与国内外已出版的同类书籍相比,本书选材新颖、学术思想新、内容新;体系完整、内容丰富;范例实用性强、应用

价值高；表述深入浅出、概念清晰、通俗易懂。本书既可作为计算机科学技术学科、电子信息学科，以及信息安全专业的大学高年级学生、硕士及博士研究生教材，也对从事分布式计算、网络信息安全技术、信息网络应用系统研究和开发工作的科研人员具有重要的参考价值。

项目团队中的吴家兴、曹玲玲、周静岚、龚培培、邵军、李永萍、涂群等参与了本书的编写工作，并融合了他们的研究成果，张栖桐、湛运、胡楠、刘广沛、崇卫之、万富强等也参与了本书的编写工作。此外，本书还引用了国内外研究人员的诸多研究成果已经网络上的相关资料，在此一并衷心感谢！

由于编写时间仓促，加上作者水平有限，书中的错误及不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2017年7月

目 录

第一部分 云计算基本知识

第 1 章 云计算产生与发展	2	2.4.2 典型的分布式计算技术	42
1.1 云计算的产生	2	2.4.3 存储整合	46
1.2 云计算发展历程	3	2.4.4 技术分析与比较	46
1.2.1 计算模式演进	3	2.5 安全机制	47
1.2.2 云计算发展大事记	6	2.5.1 安全挑战	47
1.2.3 云计算时代	9	2.5.2 技术现状	48
1.3 云计算定义及特征	11	2.5.3 关键技术	50
1.3.1 定义	11	2.6 资源调度与性能管理	53
1.3.2 典型特征	13	2.6.1 资源调度技术	53
1.3.3 计算模式对比	13	2.6.2 性能管理技术	54
1.4 本章小结	15	2.7 本章小结	56
参考文献	15	参考文献	56
第 2 章 云计算关键技术	17	第 3 章 云计算平台	62
2.1 体系架构	17	3.1 Google 云计算平台	62
2.1.1 核心服务层	18	3.1.1 系统简介	62
2.1.2 服务管理层	18	3.1.2 GFS 文件系统	62
2.1.3 用户访问接口层	19	3.1.3 MapReduce 编程模型	64
2.1.4 云计算性能要求	19	3.1.4 分布式数据库 BigTable	65
2.1.5 云平台运营方式	20	3.1.5 典型应用	66
2.2 虚拟化技术	21	3.2 Amazon 云计算平台	67
2.2.1 技术定义及优势	21	3.2.1 系统简介	67
2.2.2 技术分类	22	3.2.2 分布式文件系统 Dynamo	68
2.2.3 几种虚拟化软件介绍	30	3.2.3 弹性计算云 EC2	71
2.2.4 Docker 技术	33	3.2.4 简单存储服务 S3	72
2.3 云存储	34	3.3 Microsoft 云计算平台	75
2.3.1 基本概念	34	3.3.1 系统简介	75
2.3.2 网络架构与系统特征	35	3.3.2 服务组件	75
2.3.3 层次结构模型	38	3.4 阿里云计算平台	77
2.3.4 技术优势	39	3.4.1 系统简介	77
2.3.5 云存储文件系统	40	3.4.2 弹性计算服务	78
2.4 分布式计算	41	3.4.3 对象存储服务	79
2.4.1 分布式计算的基本概念	41	3.4.4 开放表格存储	81

3.4.5 云数据库 RDS	82	4.1 在电信领域的应用	114
3.4.6 大数据计算服务 MaxCompute	82	4.1.1 云计算在电信行业的优势	114
3.4.7 阿里云数加平台	82	4.1.2 应用模式	115
3.4.8 阿里云盾系统	83	4.2 在医疗领域的应用	118
3.5 开源云计算平台	84	4.2.1 医疗信息化建设	118
3.5.1 OpenStack	84	4.2.2 医疗数据处理	120
3.5.2 Hadoop	88	4.3 在政务领域的应用	121
3.5.3 Spark	96	4.3.1 基于云计算的电子政务	121
3.6 云计算仿真平台	110	4.3.2 基于云计算的智慧城市	122
3.6.1 CloudSim 简介	110	4.3.3 智慧南京	125
3.6.2 CloudSim 体系结构	111	4.4 在电子商务领域的应用	126
3.6.3 CloudSim 应用	111	4.4.1 应用意义与前景	126
3.7 本章小结	112	4.4.2 典型应用案例	127
参考文献	112	4.5 本章小结	130
第 4 章 云计算应用	114	参考文献	130

第二部分 云计算安全保障机制

第 5 章 可信虚拟私有云	134	第 6 章 云数据销毁	157
5.1 云计算安全分析	134	6.1 概述	157
5.1.1 云安全问题及需求	134	6.1.1 云数据销毁需求	157
5.1.2 云安全架构	137	6.1.2 数据销毁方式	158
5.1.3 云安全解决方案	140	6.1.3 数据销毁策略	159
5.2 可信虚拟私有云模型	141	6.2 基于多移动 Agent 的云数据 销毁模型	160
5.2.1 可信虚拟私有云定义	141	6.2.1 多移动 Agent 技术	160
5.2.2 安全 Agent 与 Agency 体系 结构	142	6.2.2 模型架构	163
5.2.3 基于安全 Agent 的可信虚拟 私有云模型	144	6.2.3 销毁模式	164
5.2.4 SATVPC 的多租客隔离模型	144	6.2.4 基本流程	166
5.3 执行体与执行点可信评估机制	145	6.3 防御型销毁机制	171
5.3.1 基本思想	145	6.3.1 模型架构	171
5.3.2 动态复合可信评估算法	146	6.3.2 数据托管流程	172
5.3.3 可信判别策略	148	6.3.3 数据检测	174
5.4 实验系统	149	6.3.4 数据销毁	177
5.4.1 原型系统	149	6.3.5 实验验证	181
5.4.2 原型系统与工作流程	150	6.4 云数据销毁原型系统	184
5.4.3 实验验证与性能分析	152	6.4.1 JADE 平台	184
5.5 本章小结	154	6.4.2 关键类图	184
参考文献	155	6.4.3 预处理	185
		6.4.4 防御型监测	186

6.4.5 性能分析	186	7.4.6 性能开销	210
6.5 本章小结	186	7.5 本章小结	211
参考文献	187	参考文献	211
第 7 章 云存储数据隐私保护	189	第 8 章 多授权机构基于属性的密文	
7.1 数据安全隐私问题	189	访问控制方案	215
7.2 云数据隐私保护关键技术	191	8.1 有中央机构的多授权机构基于	
7.2.1 数据内容隐私保护	191	属性的密文访问控制方案	215
7.2.2 数据属性隐私保护	195	8.1.1 基本思想	215
7.3 云存储隐私保护机制	198	8.1.2 安全假设	218
7.3.1 代表性方案	198	8.1.3 算法描述	219
7.3.2 基于加密的隐私保护算法	200	8.1.4 安全性分析	221
7.3.3 基于属性的访问控制策略	202	8.1.5 实验与验证	224
7.3.4 代理重加密技术	203	8.2 无中央机构的多授权机构基于	
7.3.5 安全隔离机制	204	属性的密文访问控制方案	227
7.4 基于分割的云存储分级数据		8.2.1 基本思想	227
私密性保护模型	205	8.2.2 安全假设	229
7.4.1 体系架构	205	8.2.3 算法流程	230
7.4.2 安全假设	206	8.2.4 安全性证明	234
7.4.3 主要功能模块	207	8.2.5 实验验证与性能分析	236
7.4.4 工作流程	208	8.3 本章小结	239
7.4.5 安全性分析	210	参考文献	239
第三部分 绿色云计算			
第 9 章 云计算能耗分析	242	10.1.1 资源配置模型	262
9.1 能耗问题	242	10.1.2 基于概率匹配的资源配置	
9.1.1 当前状况	242	算法	268
9.1.2 原因分析	244	10.1.3 基于改进型模拟退火的	
9.2 绿色计算	246	资源配置算法	270
9.2.1 绿色计算定义	246	10.1.4 实验验证与性能分析	272
9.2.2 节能机制	247	10.2 基于动态负载调节的自适应	
9.3 绿色云计算	250	云计算任务调度策略	279
9.3.1 绿色云计算定义	250	10.2.1 面向任务调度的多级负载	
9.3.2 相关技术简介	251	评估方法	279
9.3.3 绿色云计算模型	255	10.2.2 基于动态负载调节的	
9.4 本章小结	258	自适应任务调度策略	283
参考文献	258	10.2.3 实验验证与性能分析	288
第 10 章 节能型资源配置与任务调度	262	10.3 云环境下基于多移动 Agent	
10.1 面向低能耗云计算任务		的任务调度模型	292
调度的资源配置	262	10.3.1 任务调度模型	292

10.3.2	任务调度过程	296	11.3.3	仿真实验	337
10.3.3	基于优化缓存的 Agent 迁移机制	297	11.3.4	算法性能分析	339
10.3.4	移动 Agent 的迁移缓存 机制	300	11.4	本章小结	340
10.3.5	实验验证与性能分析	303		参考文献	341
10.4	面向大规模云数据中心的 低能耗任务调度策略	305	第 12 章	云存储中重复数据删除机制	345
10.4.1	基于胜者树的低能耗任务 调度算法	305	12.1	云计算与大数据	345
10.4.2	基于胜者树的单任务调度 策略	308	12.1.1	大数据时代	345
10.4.3	基于胜者树的多任务调度 策略	310	12.1.2	冗余数据问题	347
10.4.4	实验验证与性能分析	312	12.2	重复数据删除	348
10.5	本章小结	314	12.2.1	重复数据删除简述	348
	参考文献	314	12.2.2	方法分类	349
第 11 章	云计算环境下数据动态部署	317	12.2.3	相关技术及成果	351
11.1	云计算中的大数据	317	12.3	有中心云存储重复数据删除 机制	353
11.1.1	问题分析	317	12.3.1	典型的有中心存储结构	353
11.1.2	典型的数据存储管理 技术	320	12.3.2	系统结构模型	354
11.2	云环境下数据存储优化	325	12.3.3	重复数据检测与避免	357
11.2.1	云平台数据存储	325	12.3.4	延迟重复数据删除	359
11.2.2	云平台数据部署策略	326	12.3.5	实验验证与性能分析	361
11.2.3	数据迁移技术	330	12.4	无中心云存储重复数据删除 机制	364
11.3	数据聚集算法与实验分析	333	12.4.1	典型的无中心存储结构	364
11.3.1	云数据模型	333	12.4.2	系统架构	367
11.3.2	算法描述	334	12.4.3	网络拓扑结构	368
			12.4.4	重复数据检测与避免	372
			12.4.5	实验验证与性能分析	374
			12.5	本章小结	376
				参考文献	377
第四部分 云端融合计算					
第 13 章	云端融合计算模型	382	13.3	基于多移动 Agent 的云端 融合计算	388
13.1	基本概念	382	13.3.1	问题分析	388
13.1.1	云计算与对等计算	382	13.3.2	多移动 Agent 的引入	389
13.1.2	云端融合计算	383	13.3.3	层次结构	390
13.2	体系架构	384	13.3.4	可信云端计算	391
13.2.1	体系架构	384	13.4	本章小结	393
13.2.2	数据存储	385		参考文献	393
13.2.3	节点特征与属性	386			

第 14 章 云端融合计算技术	394	协同管理环机制	431
14.1 计算任务部署机制	394	14.5.3 环状网络拓扑结构	435
14.1.1 计算任务执行流程	394	14.5.4 实验验证与性能分析	437
14.1.2 cAgent 角色分配	395	14.6 本章小结	439
14.1.3 作业分割与任务分配	395	参考文献	439
14.2 任务安全分割与分配机制	396	第 15 章 云端融合计算应用范例	441
14.2.1 安全问题分析	396	15.1 基于云端融合计算网络平台的泛知识云系统	441
14.2.2 基于移动 Agent 的任务分割与分配	397	15.1.1 问题分析	441
14.2.3 任务分配实例	400	15.1.2 泛知识云模型	442
14.2.4 实验验证与性能分析	400	15.1.3 工作流程	443
14.3 任务执行代码保护机制	404	15.1.4 服务质量保障机制	444
14.3.1 问题分析	404	15.1.5 原型系统	446
14.3.2 基于内嵌验证码的加密函数的代码保护机制	404	15.1.6 系统性能分析	447
14.3.3 节点遴选机制	405	15.2 基于云端融合计算架构的恶意代码联合防御系统	448
14.3.4 安全性分析与验证	407	15.2.1 问题分析	448
14.4 多副本部署机制与选择策略	408	15.2.2 体系架构和基本功能	448
14.4.1 问题分析	408	15.2.3 场景及工作流程	450
14.4.2 云端数据存储方法	409	15.2.4 恶意代码报告评价和排序算法	452
14.4.3 数据副本数量确定机制	416	15.2.5 原型系统	455
14.4.4 数据副本放置机制	419	15.2.6 系统性能分析	457
14.4.5 副本部署机制实验验证与性能分析	420	15.3 云端流媒体系统	458
14.4.6 数据副本选择策略	424	15.3.1 流媒体简介	458
14.4.7 副本选择策略实验验证与性能分析	429	15.3.2 体系架构	460
14.5 复合协同管理环机制	430	15.3.3 性能优化	460
14.5.1 问题分析	430	15.3.4 原型系统	462
14.5.2 基于多移动 Agent 的复合		15.4 本章小结	465
		参考文献	465



第一部分



云计算基本知识



20 世纪, 图灵奖得主、美国计算机科学家、认知科学家 John McCarthy 提出“计算迟早有一天会变成一种公用基础设施”的设想。计算技术、网络等信息技术的高速发展, 尤其是近年出现的云计算 (Cloud Computing) 的技术和理念, 将 John McCarthy 的设想演变为现实。作为一种新兴的信息服务模式, 云计算已经深入各个行业, 并带来了巨大的效益。事实上, 云计算已经深入到我们普通人生活的方方面面, 不管我们是否已经意识到, 我们已经离不开云计算。

本章主要向读者全面介绍云计算的产生与发展: 首先介绍云计算的产生背景, 然后描述了传统计算模式到云计算模式的发展历程, 最后探讨了云计算的定义以及典型特征和与其他计算模式的区别。

1.1 云计算的产生

在传统模式下, 企业建立一套信息服务系统不仅需要购买硬件等基础设施, 还要买软件的许可证, 并需要专门人员维护。当企业的规模扩大时又要继续升级各种软硬件设施以满足需求。对于企业来说, 计算机硬件和软件本身只是他们完成工作、提供效率的工具而已, 无须独占拥有。对个人来说, 使用计算机也需要安装许多软件, 而许多软件并不经常使用, 常常处于闲置状态, 对用户来说这显然浪费。能不能有一个这样一种服务或平台, 给我们提供可以动态租用的软、硬件资源? 云计算正是为满足这种需求而诞生的。

云计算的想法可以追溯到 20 世纪 60 年代, John McCarthy 曾经提到“计算迟早有一天会变成一种公用基础设施”, 即计算能力可以像煤气、水电一样, 取用方便、费用低廉。云计算最大的不同在于它提供的服务和资源是通过 Internet 进行传输的。从最根本的意义来说, 云计算就是数据、应用和服务均存储在云服务器端, 充分利用云数据中心 (Cloud Data Centre) 所拥有的规模庞大的服务器集群 (Cluster) 的强大计算能力和海量存储资源, 实现用户业务系统的自适应性部署和高效运行。2007 年 10 月 IBM 和 Google 宣布在云计算领域的合作, 以及 Google 一系列云计算技术论文发布后, 云计算吸引了众多人的关注, 并迅速成为产业界和学术界研究的热点^[1]。

本世纪初, Web2.0 的流行让网络迎来了新的发展高峰。网络服务系统所需要处理的业务量快速增长, 例如, 在线视频或照片共享网站、社交网络平台需要为用户储存和处理大量的数据, 这类系统所面临的重要问题是, 如何在用户及服务数量快速增长的情况下快速扩展原有系统。随着移动终端的智能化和移动宽带网络的普及, 越来越多的移动终端设备进入 Internet, 这意味着与移动终端相关的信息系统会承受更多的负载, 而对于提供数据服务的

企业来讲,其信息系统需要处理更多的业务量。由于资源的有限性,其电力成本、空间成本、各种设施的维护成本快速上升,直接导致数据中心的成本上升,这就面临着如何有效地、更少地利用资源处理更多任务的问题。同时,处理器芯片和存储设备在性能增强的同时,价格也在变得更加低廉,拥有大规模服务器集群的数据中心,也具备了快速为大量用户处理复杂问题的能力。

技术上,分布式计算(Distributed Computing)技术的日益成熟和应用,特别是网络计算(Network Computing)的发展通过 Internet 把分散在各处的硬件、软件、信息资源连接成为一个巨大的整体,使得人们能够利用地理上分散于各处的资源,完成大规模、复杂的计算和数据处理任务。数据存储的快速增长产生了以谷歌文件系统(Google File System, GFS)、存储域网络(Storage Area Network, SAN)为代表的高性能存储技术。另外,服务器整合需求推动了虚拟化(Virtualization)技术的进步,此外多核技术的广泛应用,这些均为构建更强大的计算能力和服务平台提供了可能。随着对计算能力、资源利用效率、资源集中化的迫切需求,云计算应运而生^[2]。

1.2 云计算发展历程

1.2.1 计算模式演进

云计算是在并行计算(Parallel Computing)、分布式计算、网格计算(Grid Computing)和效用计算(Utility Computing)的基础上发展起来的,经过持续演化和融合改进逐步形成目前流行的云计算模型,云计算的演化过程如下所述^[3-5]。

1. 并行计算

在单核多线程的系统设计中,采用的算法均基于串行计算模式,即将任务分解成一串相互独立的命令执行流,每个命令执行流有自己的序号,串行计算要求所有的命令执行流按照顺序逐一执行,也就是说同一时间只有一个执行流在执行。

这种算法效率低下,无法满足大数据(Big Data)的分析和处理需求,而并行计算可以通过同时调用多个计算资源处理庞大、复杂的计算任务。这些计算资源可以是拥有多核CPU或者多个CPU的高性能服务器,也可以是多台服务器组成的集群系统。

任务可以分解成相互独立却可以同时运行的部分,每一部分再分解成相互独立的命令执行流。任务分解后,每部分的每个命令执行流都可以同时得以执行,如图 1.1 所示。

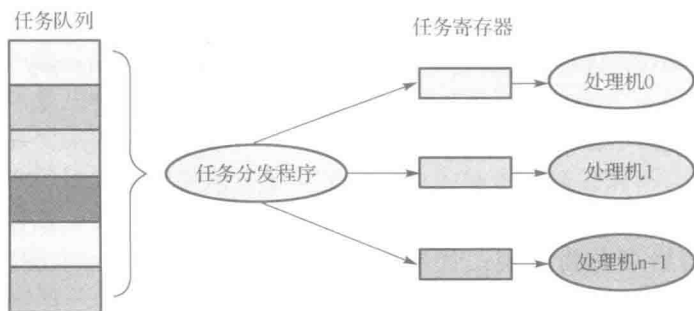


图 1.1 并行计算模型

并行计算包括空间并行、基于流水线（Pipeline）技术的时间并行，以及基于优化算法的数据并行和任务并行等。不管采用何种并行计算方法，都对串行计算的单指令流单数据流（Single Instruction Single Data, SISD）做出优化，以及通过采用多指令流多数据流（Multiple Instruction Stream Multiple Data Stream, MIMD）的并行计算大幅度提升系统的处理能力。

2. 分布式计算

并行计算调动的计算资源可以是单个 CPU 的多个内核或单个服务器内的多 CPU，也可以是服务器集群提供的多 CPU。如果仅从这个角度上看，分布式计算和并行计算有相似之处。

MapReduce 等分布式计算模式在处理庞大的计算请求时，会将需要解决的问题分解成细小的组成部分，然后将这些组成部分散给众多的计算机进行处理，处理完成后将结果进行汇总，形成最终结果，如图 1.2 所示。分布式计算则可以汇集成千上万台计算机，甚至几百万、几千万的计算机资源。

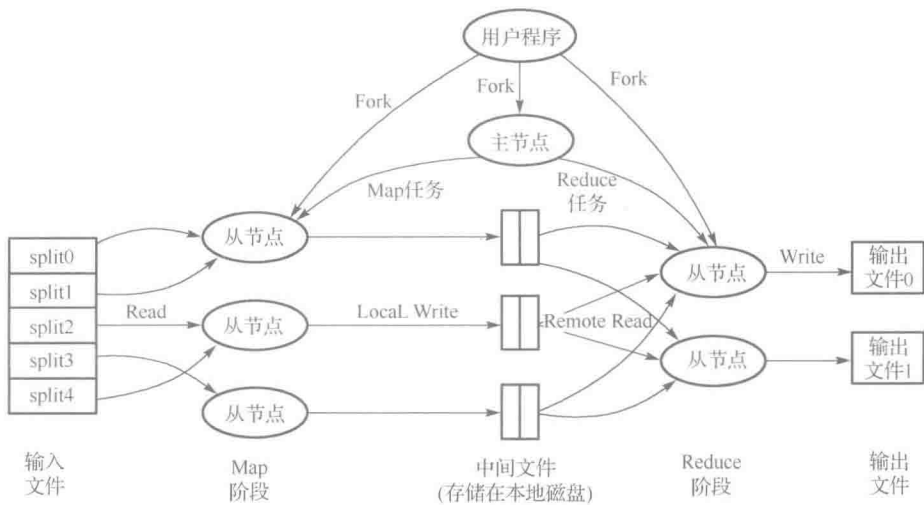


图 1.2 分布式计算模型

分布式计算的典型代表是对等计算（Peer-to-Peer Computing, P2P）。P2P 使得 Internet 用户可以提供其个人计算机上闲置的处理能力和存储资源，通过资源共享和计算能力的平衡负载来提供分布计算服务。目前众多机构发起了不同的 P2P 分布式计算项目，以解决复杂的数据难题、密码分析、生物科学、数据处理等大规模计算问题，如利用全球联网的计算机共同搜寻地外文明的 SETI@Home 项目、为大型强子计算机提供计算能力的 LHC@home 项目等。有兴趣的读者也可以关注伯克利开放式网络计算平台（Berkeley Open Infrastructure for Network Computing, BOINC）并搜寻自己感兴趣的项目。

3. 网格计算

根据 Larry Smarr 的描述，网格计算系统是一种无缝、集成的计算和协作环境。按照网格提供的功能，网格可分为两类：计算网格（Computational Grid）和存储网格（Access Grid）。计算网格可以提供虚拟的、无限制的计算和分布数据资源，存储网格则提供一个合作环境。

网络计算系统一般具有如下特点。

(1) 异构性：网络可以包含多种异构资源，包括跨越地理分布的多个管理域。构成网络计算系统的超级计算机有多种类型，不同类型的超级计算机在体系结构、操作系统及应用软件等多个层次上可能具有不同的结构。

(2) 可扩展性：网络可以从最初包含少数的资源发展到具有成千上万资源的大网格。

(3) 可适应性：在网格中，具有很多资源，资源发生故障的概率很高。网格的资源管理或应用必须能动态适应这些情况，调用网格中可用的资源和服务来取得最大的性能。

(4) 不可预测性：在网格计算系统中，由于资源的共享造成系统行为和系统性能经常变化。

(5) 多级管理域：由于构成网络计算系统的超级计算机资源通常属于不同的机构或组织并且使用不同的安全机制，因此需要各个机构或组织共同参与解决多级管理域的问题。

相比于分布式计算来说，网络计算不仅仅是一种计算模式，更是一套广泛的整合各种异构计算资源方式的方案和思想。一般的网络计算系统的架构如图 1.3 所示。

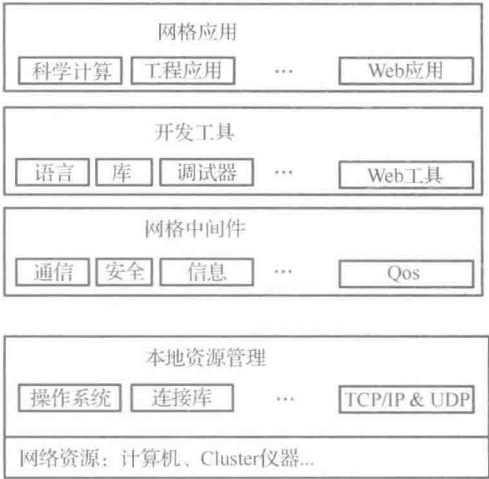


图 1.3 网络计算模型

网络计算系统的主要部件包括：

- 网络基础设施：包含网上可访问的所有资源，如运行 Windows、Linux 或 UNIX 的 PC 或工作站、运行 Cluster 操作系统的机群、存储设备、数据库，也可能是科学仪器。
- 网络中间件（Grid Middleware）：网络中间件提供核心服务，如远程进程管理服务、资源分配服务、存储访问服务、信息服务、安全控制服务、质量服务。
- 网络发展环境和工具：网络必须提供网络应用开发工具。
- 网络应用和网络门户：可以使用 PVM、MPI 等工具开发参数模拟等应用，这些应用通常需要相当多的计算资源以及远程数据访问。网络门户提供基于 Web 的应用服务，用户通过网络界面提交任务，并得到结果。

4. 效用计算

为了解决传统计算机资源、网络及应用程序的使用方法变得越来越复杂，并且管理成本越来越高的问题，科学家们提出了效用计算这个概念。效用计算的具体目标是结合分散各地的服务器、存储系统及应用程序来立即提供需求数据的技术，使得用户能够像把电器插头插入插座取电一样来使用计算机资源。效用（Utility）这个词是指为客户提供个性化的服务，并且可以满足不断变化的客户需求，可以基于实际占用的资源进行收费。

按需分配的效用计算模型采用了多种灵活有效的技术，能够对不同的需求提供相应的配置与执行方案。效用计算使用户可以通过网络来连接资源并实现企业数据的处理、存储和应用，而企业不必再组建自己的数据中心。

效用计算模型中包括计算资源、存储资源、基础设施等众多资源，它的收费方式发生了改变，不仅仅对速率进行收费，对于租用的服务也需要缴纳一定的费用。这种按照实际使用

进行收费计费方式在企业中变得越来越常见。从效用计算开始引入按需计算（Computing on Demand）的理念，不需要的额外服务不必为其支付任何费用。它的管理模块注重系统的性能，确保数据和资源随时可用，同时建立自动化（Automatization）模块，对服务器进行集群操控，促进服务器之间的自动化管理，保证服务之间可以自行分配。

可以看出，效用计算已经开始有了很多云计算的影子，云计算的很多理念也是在效用计算的基础上发展起来的。

5. 云计算

云计算强调所有资源均以服务的形态出现，包括基础设施即服务（Infrastructure as a Service, IaaS）、平台即服务（Platform as a Service, PaaS）、软件即服务（Software as a Service, SaaS）、数据即服务（Data as a Service, DaaS）、知识即服务（Knowledge as a Service, KaaS）、存储即服务（Storage as a Service, SaaS）、安全即服务（Security as a Service, SaaS）等。

企业对信息中心提出的要求会越来越高，企业首席信息官（Chief Information Officer, CIO）更加希望从基础设施、平台、软件中摆脱出来，转而关注业务流程的革新、办公效率的优化、业务成本的管控，这对于信息系统的交付和管理模式带来变化。中小企业则希望避免自行构建数据中心，而是将所有的服务迁移到公有云（Public Cloud）；大型企业则可以建立私有云（Private Cloud），将所有的资源整合，再以服务的形态呈献给企业内部员工和外部用户。而对于个人用户来说，理想的状态显然是通过一台能连网的设备来完成所有的办公、生活和娱乐需求，而不管身处何方，也不管使用的是笔记本电脑或者智能手机等移动终端。

简言之，云计算的发展历程如图 1.4 所示，云计算通过各种不同计算模式不断地演变、优化，形成我们现在所看到的云计算，它的发展不仅顺应当前计算模型，也为企业真正地带来效率和成本方面的诸多变革。

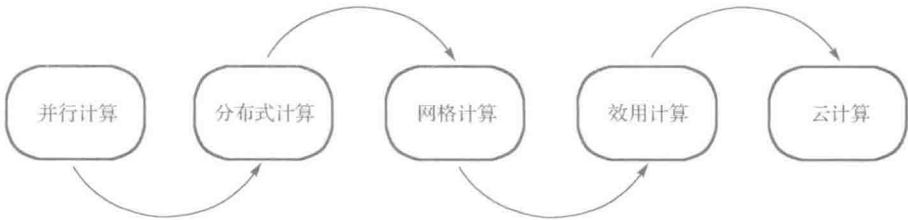


图 1.4 云计算的发展历程

1.2.2 云计算发展大事记

云计算被认为是科技界的一次巨大革新，已经带来工作方式和商业模式的根本性改变。那么，几十年来，云计算发展历程的里程碑事件列举如下^[5-8]。

1959 年，Christopher Strachey 发表论文提出虚拟化概念，虚拟化目前已成为云计算的核心技术之一。

1961 年，John McCarthy 提出计算力和通过公用事业销售计算机应用的思想。

1962 年，Joseph Carl Robnett Licklider 提出“星际计算机网络（Intergalactic Computer Network）”设想并详细阐述了这一概念，“星际计算网络”的概念包含了现代因特网几乎所有的特征。

1965 年，美国电话公司 Western Union 提出建立信息公用事业的设想。