

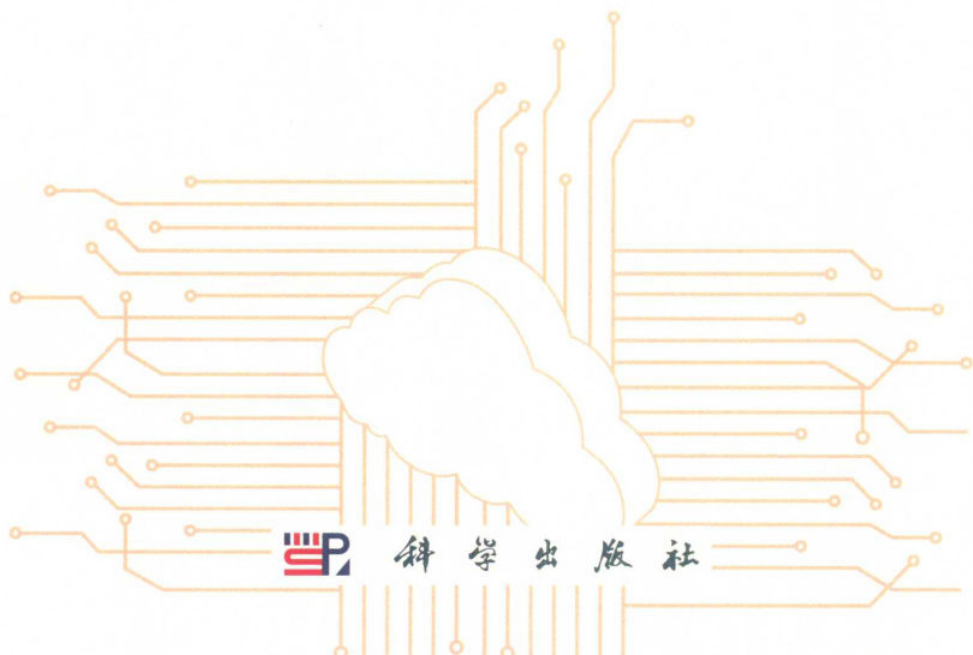
EVOLUTION FROM GRID COMPUTING TO CLOUD COMPUTING

ORIGIN AND DEVELOPMENT OF THE GUANGDONG EDUCATION CLOUD PROJECT

从网格计算 到云计算

“粤教云”工程起源与发展

许 骏 柳泉波◎著

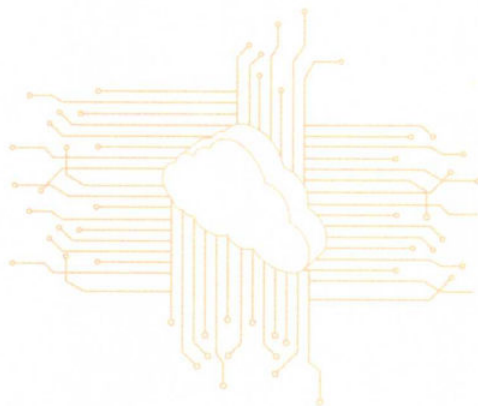


科学出版社

(TP-8175.0101)

EVOLUTION FROM GRID COMPUTING TO CLOUD COMPUTING

ORIGIN AND DEVELOPMENT OF THE GUANGDONG EDUCATION CLOUD PROJECT



www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-060329-6



定价：113.00元

从网格计算到云计算

“粤教云”工程起源与发展

许 骏 柳泉波 著

本书出版得到广东省重大科技专项和应用型科技研发重大项目
(2017B030306020, 2015B010131013) 资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍作者及其领导的团队在计算机网络与分布式系统领域所做的工作,揭示网格计算、对等网络、自组织网络、云计算和云原生计算等近 20 年来陆续涌现的新技术背后的本质问题。全书共 4 章,绪论介绍分布式系统研究视角、主要科学问题与前沿课题,讨论互联网技术架构从服务化到云原生的演进发展过程;第 1 章介绍网格计算的起因、发展脉络以及协同服务网格、P2P 网格和数字教育服务网格;第 2 章介绍云计算和“粤教云”工程的起源与发展,讨论教育云整体解决方案及其关键技术;第 3 章重新审视云应用管理及大型分布式系统面临的挑战,介绍云原生计算的背景及技术特征,讨论云原生应用引擎的体系结构、关键技术及其在“粤教云”工程中的应用。“粤教云”工程的相关成果对工业互联网平台及其他行业云建设具有示范引领作用。

本书可供计算机网络与分布式系统等相关领域的科技人员参考,也适合高等学校计算机科学与技术相关专业研究生阅读,对从事行业信息化顶层规划与技术架构决策的管理人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

从网格计算到云计算:“粤教云”工程起源与发展/许骏,柳泉波著. —北京:科学出版社,2019.10

ISBN 978-7-03-060329-6

I. ①从… II. ①许… ②柳… III. ①云计算-研究 IV. ①TP393.027

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 298817 号

责任编辑:孙露露 都 岚 / 责任校对:赵丽杰

责任印制:吕春珉 / 封面设计:武守友

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 10 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2019 年 10 月第一次印刷 印张: 14 彩插: 1

字数: 269 000

定价: 113.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135763-2010

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303



许 骏

博士，教授，博士生导师，享受国务院特殊津贴专家，曾获全国优秀教师奖章和广东省杰出教师奖。长期从事计算机、通信与自动控制技术研究，主要研究领域为计算机网络与分布式系统、计算机控制系统与机器人技术。拥有在高校领导国家重点学科建设和在高新技术企业(集团)担任总工程师的跨界工作经历。现任华南师范大学二级教授、广东高校计算机网络与信息系统工程技术研究中心主任，广州市电子行业协会副会长，中国人工智能学会智能信息网络专业委员会副主任。近年来带领团队主要从事云计算、大数据和人工智能技术研究，主持国家自然科学基金、广东省重大科技专项和应用型科技研发重大项目，作为专家组组长兼首席专家，牵头负责广东省“粤教云”工程，在云计算关键技术及新一代通用云操作系统与行业云整体解决方案研究方面取得重要进展。合著出版《面向服务的网格计算——新型分布式计算体系与中间件》等学术专著6部，主编出版《计算机系统原理与应用》等高校教材6部。



柳泉波

博士，现任广东高校计算机网络与信息系统工程技术研究中心副主任、广东省教育云服务工程技术研究中心副主任。分别于1997年和2000年毕业于北京师范大学计算机应用技术专业（本科）和电子与信息系统专业（研究生），获工学硕士学位，2003年在北京师范大学信息科学学院获理学博士学位。2005年起在华南师范大学工作，长期从事计算机、通信与人工智能技术研究，主要研究领域为计算机网络与分布式系统、人工智能与计算机教育。主持国家自然科学基金、广东省重大科技专项和应用型科技研发重大项目等，带领团队在国内较早从事容器云及云原生计算研究，突破云应用引擎共性关键技术，牵头负责广东省“粤教云”工程总体架构设计及技术标准研制，研发新一代通用云操作系统并提供行业云整体解决方案，相关成果已转化为云计算技术标准和国家发明专利。合著出版《面向服务的网格计算——新型分布式计算体系与中间件》等学术专著4部。

前 言

本书的写作和出版对我们来说具有非同寻常的意义。

2018 年是我们团队从事云计算研究 10 周年。当初选择云计算研究，并非赶时髦、追热点，而是顺势而为，因为我们团队此前主要从事计算机网络与分布式系统研究，从网格计算到对等网络再到自组织网络，一直处于技术发展前沿，有比较扎实的工作基础和研究积累。2003~2005 年，在清华大学计算机科学与技术系，我们带领团队承担了国家自然科学基金重大研究计划重点项目，在网格计算与协同服务研究方面取得重大进展，出版了专著《网格计算与 e-Learning Grid——体系结构·关键技术·示范应用》和《协作社群形成与演化机制——理论与算法》。科研创新不止于专著论文，应用示范工程——国家远程学习评价网格 LAGrid 在全球最大的现代远程教育系统——中央广播电视大学（现称国家开放大学）应用，创造了显著的社会效益和经济效益。2004 年 12 月，“数字教育网格支撑环境及关键技术与远程学习评价网格 LAGrid”在清华大学通过教育部主持的科技成果鉴定，总体达到国际先进水平，2005 年 4 月 1 日的《中国教育报》第 1 版以“我国网格技术教育应用取得重大进展”为题报道了该成果。2005 年秋，我们来到华南师范大学工作，当年获批国家自然科学基金项目“对等科研协作网络研究”，随后又承担了广东省科技计划项目“教育服务网格关键技术与示范工程”和“移动自组织网络体系结构与先进路由技术研究”等，提出融合网格计算、对等计算和自组织网络优势的新型网格体系结构，出版了学术专著《面向服务的网格计算——新型分布式计算体系与中间件》，清华大学的研究工作在华南师范大学得到延续和发展。2009 年，我们牵头组建广东高校计算机网络与信息系统工程技术研究中心，获广东省教育厅立项建设。该中心聚焦云计算关键技术、云服务应用创新和行业云研究。近年来，我们带领团队承担了国家自然科学基金、广东省重大科技专项和应用型科技研发重大项目等，在国内较早从事容器云及云原生计算研究，突破跨数据中心大规模集群管理等云应用引擎关键技术，研发新一代通用云操作系统，提供行业云整体解决方案，相关成果已转化为云计算技术标准和国家发明专利，并在“粤教云”工程中实际应用。2018 年 8 月，“云计算关键技术及新型云应用引擎与‘粤教云’工程”在广州通过中国人工智能学会主持的科技成果鉴定，总体达到国际先进、国内领先水平。这是专家对我们团队研究工作的肯定和鼓励，更是专家对我们的勉励与期待。

从网格计算到云计算，是我们团队近 15 年从事计算机网络与分布式系统的研究历程，本书总结我们团队所做的工作，解读互联网技术构架从服务化到云原生的演变发展过程，揭示网格计算、对等网络、自组织网络、云计算和云原生计算等十多年来陆续涌现的新技术背后的本质问题，“从网格计算到云计算”作为本书的名字最为贴切；加上“‘粤教云’工程起源与发展”这个副标题，是因为我们团队亲历和见证了“粤教云”工程 8 年不寻常的发展之路。

迈出第一步，共看云起时。2010 年，《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》提出促进云计算的研发和示范应用。当时，国内云计算产业缺乏具有实际价值的重大应用，“空中楼阁”现象非常突出，应用落地已成为当务之急。以行业云为突破口是实现云计算重大应用落地的最佳路径，《中国云科技发展“十二五”专项规划》把公共云服务和行业云服务作为重点。从 2008 年年初开始，我们团队一直在论证云计算重大科研项目，需要一个示范工程。国家远程学习评价网络 LAGrid 是我们团队此前完成的成果，随着研究重点从网格计算转向云计算，我们很自然地想到将教育网格推向教育云。2011 年，教育部发布《教育信息化十年发展规划（2011—2020 年）》，提出建立国家教育云服务模式。临大势应顺而有为。2011 年下半年，利用参加《广东省教育信息化发展“十二五”规划》编制工作的机会，我们向广东省教育厅提出实施“粤教云”计划的建议。2012 年 8 月，我们牵头的项目“云计算若干关键技术及产业化与‘粤教云’工程”获广东省重大科技专项支持，《广东省教育信息化发展“十二五”规划》也正式发布，“粤教云”列为五大行动计划之一，广东省人民政府《关于加快推进我省云计算发展的意见》将“粤教云”列为七大重点行业云之一。至此，“粤教云”工程完成了论证立项，正式启动实施。2013 年 3 月，广东省教育厅成立“粤教云”工程领导小组和专家组，时任厅长罗伟其任领导小组组长，许骏担任专家组组长，随后又被广东省教育厅聘为“粤教云”工程首席专家。2013 年 12 月，广东省科技厅批准由我们牵头组建广东省教育云服务工程技术研究中心，作为“粤教云”工程协同创新平台，负责“粤教云”工程总体设计、技术标准和实施方案研究，为广东省教育厅提供决策咨询。

聚焦“总抓手”，更上一层楼。“粤教云”工程早期主要在基础设施（IaaS）和云应用（SaaS）两个层面发力，总体处于云计算 1.0——虚拟化阶段，存在 IT 基础设施利用率低、不能形成云应用服务生态等突出问题。这并非“粤教云”独有的问题，同一时期各地建设的各类行业云都存在类似问题，因为云计算发展一直呈现“两头大、中间小”的态势，即 IaaS 和 SaaS 发展迅猛，PaaS 研发及应用一直徘徊不前。以容器和容器云为标志，云计算发展进入云原生计算时代，为构建通用 PaaS 提供了新机遇。《广东省云计算发展规划（2014—2020 年）》将“粤教云”工程列入社会服务领域重点项目，《广东省“互联网+”行动计划（2015—2020 年）》

提出加快“粤教云”平台建设。2015年初，我们受广东省教育厅委托，负责“十三五”粤教云工程（又称为“粤教云”2.0）总体规划与顶层设计，目标是从根本上解决“十二五”粤教云工程（又称为“粤教云”1.0）存在的突出问题，超前考虑“十三五”面临的新挑战：①基础设施多种建设模式并存，多云融合将成为常态，跨数据中心大规模集群管理成为当务之急；②云应用的类型和数量日益增多，微服务架构和无服务器架构等新型云应用崛起，大数据和分布式机器学习等应用领域不断拓展，支持多应用混合部署、建设开放服务生态势在必行。“粤教云”2.0总体架构引入云应用引擎，它本质上是一个通用 PaaS，向下自动管理跨地域的混合基础设施，按需动态调整基础设施的组成，避免资源闲置和浪费；支持不同应用的混合部署，极大地提高了资源利用率。云应用引擎向上自动管理应用生命周期，支持云应用的自动化部署和运维，标志着云计算进入自动化阶段。我们团队在容器云及云原生计算领域取得的创新性成果，为“粤教云”2.0 奠定了坚实的技术基础。2015年10月29日，在《广东省教育发展“十三五”规划（2016—2020年）》编制座谈会上，我们建议“十三五”期间继续推进“粤教云”工程建设，完善“粤教云”公共服务体系。2016年8月4日，广东省教育厅赵康巡视员主持召开“粤教云”工程专题研讨会，我们汇报了“粤教云”2.0 总体设计、系统架构、技术标准及建设方案，会上明确了“十三五”期间“粤教云”工程的目标与任务，定位为广东省教育信息化总抓手。2017年1月，《广东省教育发展“十三五”规划（2016—2020年）》正式发布，提出以“粤教云”为总抓手，积极发展“互联网+教育”。当前，工业互联网已成为推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合的关键抓手，PaaS 是工业互联网平台发展的聚焦点和突破口，“粤教云”工程的成功实践，对工业互联网平台及其他行业云建设具有示范引领作用。

能有机会谋划并组织实施“粤教云”工程，我们深感荣幸，也倍感责任重大。“粤教云”工程从论证、立项、研发到示范应用，让我们有一种如履薄冰、如临深渊的感觉，毕竟这不是一件容易的事情。正是“粤教云”工程重大应用需求，倒逼我们在云计算关键技术及行业云解决方案研究上不懈努力，从“粤教云”工程发现和凝练科学问题，成果回归实际应用，实现关键技术创新性突破，科研成果从实验室迅速走向示范工程，这是我们在云计算研究方面的特色和优势。工程技术强调团队合作和集体攻关，合作不仅是一种态度，更是一种能力。“粤教云”工程是一项大工程，需要多家单位共同合作完成。由我们牵头，联合广东省教育技术中心等8家单位共同承担广东省重大科技专项计划项目“云计算若干关键技术及产业化与‘粤教云’工程”，拉开了大联合、大协作的序幕。随着项目的不断推进，更多单位加入“粤教云”工程建设，示范应用规模也在不断扩大，充分体现了大团队同心筑梦的力量和开拓创新的勇气。“粤教云”工程是坚持政府统筹引导、鼓励多方参与、产学研用协同创新的成果，是项目各参与单位大团结、大协作的

产物。在此，感谢广东省教育厅原厅长罗伟其、巡视员赵康、副厅长朱超华、副厅长王创以及“粤教云”工程领导小组各位领导的关心与支持！感谢广东省教育技术中心原主任彭红光、主任唐连章和副主任李昶、云永先、许力的支持与配合！感谢中国工程院院士倪光南研究员、中国科学院院士张景中教授以及“粤教云”工程专家组各位专家的鼓励与指导！感谢所有以不同方式为“粤教云”工程做出贡献的同志和朋友们！

2018 年是我国改革开放 40 周年。改革开放的好政策为我们提供了干一番事业的舞台和机会，躬逢其盛，是一种幸运。我们选择计算机这个行业，把自己的兴趣爱好变成职业，也是一种幸运。在我们看来，科研是工作，更是一种爱好，快乐做人，开心做事，一路走来，水到渠成。我们特别感谢各级领导的关心与支持、各位专家的鼓励与指导以及同事们的合作与帮助！

感谢清华大学史美林教授将我们带入计算机网络与分布式系统研究前沿领域。从网格计算到云计算研究经历了清华大学和华南师范大学两个研发时期，感谢我们团队的同事向勇、李玉顺、王桂玲、王冬青、任光杰、韩后，他们为项目研究做出了重要贡献，本书凝聚了他们的真知灼见，部分内容引用了团队共同承担的相关项目研究报告。感谢不同时期由项目各参与单位组成的大团队的各位同事和朋友们！正是他们的支持、帮助与配合，项目研究才得以顺利实施，由于篇幅所限，这里无法一一列举他们的名字。真实的感谢永远只存于内心，我们永远铭记大家的支持与帮助，我们一起走过的日子将成为美好的回忆。项目研究成果固然重要，但团队成员之间的友谊更加珍贵，一项成果领先不了多长时间，但友谊地久天长。

早在 2001 年，我们合著的第一部专著《IT 技能测评自动化——理论·技术·应用》在科学出版社出版，随后在 2003~2008 年，我们在科学出版社出版了《面向服务的网格计算——新型分布式计算体系与中间件》等 3 部专著。时隔 10 年，承蒙科学出版社的厚爱，本书又在科学出版社出版，这也是一种缘分。

本书写作过程中参阅了大量国内外文献资料，我们尽可能详细地注明了这些文献的出处，以方便读者查阅。在此，对这些文献的作者表示感谢！

由于我们的学识与能力有限，对一些新概念和新技术的理解可能不尽准确，在某些问题上只能说是一孔之见，不妥和错误之处在所难免，诚恳期待各位专家和读者朋友不吝赐教，我们深为感激。

许骏 柳泉波

2018 年 12 月

目 录

绪论	1
0.1 研究视角	1
0.2 科学问题与前沿研究课题	2
0.3 分布式系统的“大”问题与应用示范工程	5
第 1 章 网格计算与协同服务	10
1.1 网格计算	10
1.1.1 网格计算概念	11
1.1.2 网格体系结构	14
1.2 协同服务网格	19
1.2.1 协同服务框架	20
1.2.2 协作感知服务	24
1.2.3 协作上下文服务	32
1.2.4 网格 workflow 服务	39
1.3 P2P 网格	45
1.3.1 P2P 网格资源发现	49
1.3.2 对等科研协作网络	51
1.4 教育服务网格	60
1.4.1 教育服务网格概述	61
1.4.2 教育服务网格体系结构	65
1.4.3 教育服务网格核心中间件	69
第 2 章 云计算与“粤教云”工程	80
2.1 云计算概述	80
2.2 “粤教云”工程	83
2.2.1 迈出第一步，共看云起时	84
2.2.2 聚焦“总抓手”，更上一层楼	88
2.3 “粤教云”公共服务平台	91
2.3.1 云数据中心	94
2.3.2 云平台共性服务	96

2.4	“粤教云”核心应用服务	111
2.4.1	学习内容管理云服务	111
2.4.2	学习管理云服务	116
2.5	教育智能终端	123
2.5.1	研发目标与任务	124
2.5.2	智能终端设备	126
2.5.3	基础软件与服务	128
2.5.4	应用软件与服务	139
第3章	云原生计算与教育云	145
3.1	云原生计算概述	145
3.1.1	云应用生命周期管理	146
3.1.2	分布式系统关键问题	149
3.1.3	云原生计算概念	153
3.2	云原生应用引擎	160
3.2.1	云原生应用引擎体系架构	161
3.2.2	云原生应用引擎关键技术	168
3.3	云原生计算教育应用	179
3.3.1	“粤教云”2.0	179
3.3.2	智能教育云	187
参考文献		198
附录		205
附录1	云原生应用引擎作业规范简表	205
附录2	最坏情况网络包往返时间估算	206
附录3	“粤教云”工程大事记	207

绪 论

按照“解读技术演进与发展轨迹，介绍前沿问题与关键技术研究最新进展，展示重大示范应用工程成果”的写作思路，作者试图勾画计算机网络与分布式系统研究领域的发展脉络与趋势，揭示网格计算、面向服务体系架构、对等网络、自组织网络、云计算和云原生计算等关键技术背后的本质问题，系统总结作者及其领导的团队所做的相关研究工作和取得的成果。

0.1 研究视角

通常从基础设施（infrastructure）、平台（platform）和应用（application）三个层面考察计算机网络与分布式系统研究，即 IPA 研究视角，如图 0-1 所示。其中，平台层类似于单机系统的操作系统，其核心功能是资源管理和应用管理。具体来说，平台层向下管理分布式基础设施资源的生命周期，实现资源共享，提高资源利用率；向上管理分布式应用的生命周期，支持不同应用协同工作，构建开放融合的应用生态。为了降低应用开发和运维的难度，平台层还提供托管的各类共性服务，包括领域无关和领域相关两大类。衡量一项分布式系统研究的价值，主要看它在 IPA 三层所做的工作及其创新水平。

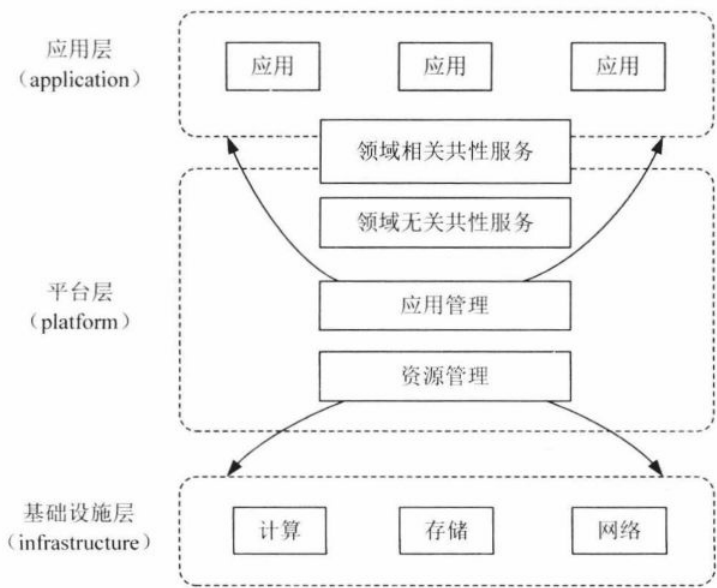


图 0-1 IPA 研究视角

0.2 科学问题与前沿研究课题

分布式系统的组成节点通常是市场上通用的软硬件产品，存在一定的失效概率，各个节点的时钟并不同步；连接节点的计算机网络有可能因为连通性、延迟和带宽限制而出现数据或报文包乱序、重复和丢失等情况，严重时整个分布式系统分裂成多个互不相通的网路分区。因此，分布式系统研究的主要科学问题是如何屏蔽计算节点、存储节点和网络通信的不可靠性，最大程度地保证分布式应用的高可用和一致性。对于异构、广域分布和动态变化的大规模分布式系统，问题变得尤其复杂。

聚焦分布式系统研究的主要科学问题，作者及其领导的团队大约每 5 年确定一项研究主题——从早期网格计算到云计算，再到现在的云原生计算和智能云计算，始终处于技术发展前沿，如图 0-2 所示。这些研究主题之间相互衔接，相关研究连续获得国家和广东省重大、重点科技计划项目支持。研究工作持续深入且系统完整，始终贯穿分布式系统研究的目标——高效可靠的分布式资源管理和分布式应用管理。不同的研究主题，像云计算、云原生计算和智能云计算，并非彼此取代的关系，而是技术的持续创新、发展和提高，推动整体技术解决方案进入更加通用和智能的新阶段。

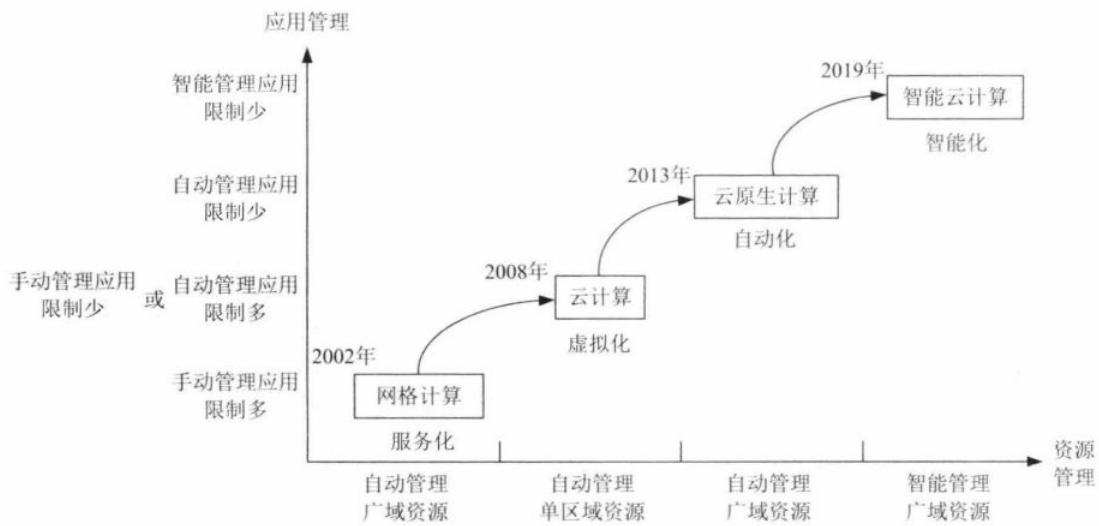


图 0-2 不同时期的前沿研究主题

网格计算（grid computing）主要研究在分布、异构、自治的网络资源环境动态建构虚拟组织，实现跨组织计算资源、数据资源和服务资源的有效聚合与按需共享，支持大规模计算、数据密集处理和群组协同工作为特征的应用。2002~2005 年，作者带领团队承担国家自然科学基金重大研究计划重点项目“网格计算环境

下的协同工作理论与关键技术研究”，解决了网格计算与协同服务若干理论与技术问题，提出三维协作感知模型、动态数据聚合模型及其算法，建构了相似关系可计算判定和度量的理论与算法，出版了学术专著《网格计算与 e-Learning Grid——体系结构·关键技术·示范应用》和《协作社群形成与演化机制——理论与算法》。2005~2008 年，作者带领团队承担国家自然科学基金项目“对等科研协作网络研究”和广东省科技计划项目“教育服务网格关键技术与示范工程”和“移动自组织网络体系结构与先进路由技术研究”，提出融合网格计算、对等计算和自组织网络优势的新型网格体系结构，出版了学术专著《面向服务的网格计算——新型分布式计算体系与中间件》。

随着计算机网络和分布式系统应用的深入和技术的进步，网格计算的不足日益凸显。网格计算管理的基础设施资源分别属于不同的管理域，部署专有的网格操作系统，主要运行专门的科学计算应用，应用类型有限。基础设施层、平台层和应用层之间紧密耦合，由系统管理员和开发人员手动管理应用。云计算管理位于单一区域数据中心的普通服务器，将云主机集群聚合成为按需使用的动态资源池，支持用户透明访问，部署通用操作系统，运行通用应用。因此，云计算得到持续高速的发展，而网格计算研究热潮已经逐渐消退。凭借在计算机网络与分布式计算领域的扎实工作基础与研究积累，作者带领团队从 2008 年开始布局云计算研究，2009 年牵头组建广东高校计算机网络与信息系统工程技术研究中心，聚焦云计算关键技术攻关、云服务创新应用和重点行业云建设，中心建设获得广东省教育厅立项支持。2012 年获批广东省重大科技专项“云计算若干关键技术及产业化与‘粤教云’工程”项目。“粤教云”是广东省人民政府《关于加快推进我省云计算发展的意见》（粤府办〔2012〕84 号）确定的七大重点行业云之一。2013 年，广东省科技厅批准由作者牵头组建广东省教育云服务工程技术研究中心，作为“粤教云”工程协同创新平台，受广东省教育厅委托，作者团队负责“粤教云”工程总体设计、技术标准和实施方案研究。

云计算明确了基础设施即服务（Infrastructure as a Service, IaaS）、平台即服务（Platform as a Service, PaaS）和软件即服务（Software as a Service, SaaS）三种服务模式，但其发展一直呈现“两头大、中间小”的态势，即 IaaS 和 SaaS 发展迅猛，PaaS 研发及应用一直徘徊不前，主要原因是早期的 PaaS 缺乏通用性，仅支持专有的编程框架、运行时、应用软件包格式和部署方式，支持的云应用类型有限。

随着云计算技术的发展和应用的普及，多云混合的云基础设施已经成为常态，微服务架构和无服务器架构等新型云应用崛起，大数据和分布式机器学习等应用领域不断拓展，对通用 PaaS 的需求日益迫切。以容器和容器云为标志，云计算发展进入云原生计算时代，构建通用 PaaS 的技术瓶颈不复存在。广义云原生计算包含可编程基础设施、云原生应用引擎和云原生应用，其中云原生应用引擎向上自

动管理一般分布式应用的生命周期，向下自动管理多云混合的云主机集群，支持多应用混合部署和开放融合服务生态建设。从2013年开始，作者带领团队开展容器云研究，“容器云关键技术及产品研发与示范应用”项目获广东省重大科技专项支持，突破跨数据中心大规模集群管理、共享状态乐观调度算法等云应用引擎关键技术，提供行业云通用整体解决方案、容器编排等云计算技术标准填补国内空白，正在转化为地方工业标准和行业技术标准。相关成果首先在“十三五”粤教云工程建设中实际应用，承担了广东省应用型科技研发重大项目“面向‘粤教云’教育资源大数据云服务平台建设及规模化应用”。

以云原生计算为基础，智能云计算初见端倪。智能云计算是由人工智能(artificial intelligence, AI)、大数据(big data)和云原生计算(cloud native computing)驱动，涵盖基础设施、平台和应用三个层面的新型云计算，即以云原生计算为基础，从基础设施层、平台层和应用层获取数据，集成分布式存储、大数据、人工智能和机器学习等共性服务，形成一个完整的智能流水线，如图0-3所示，实现基础设施、平台和应用三个层面的描述、检测、预测和优化，无论是资源管理还是应用管理，能够从积累的运行数据中学习，动态、自适应地调整系统运行参数和规则，提高系统智能化程度。

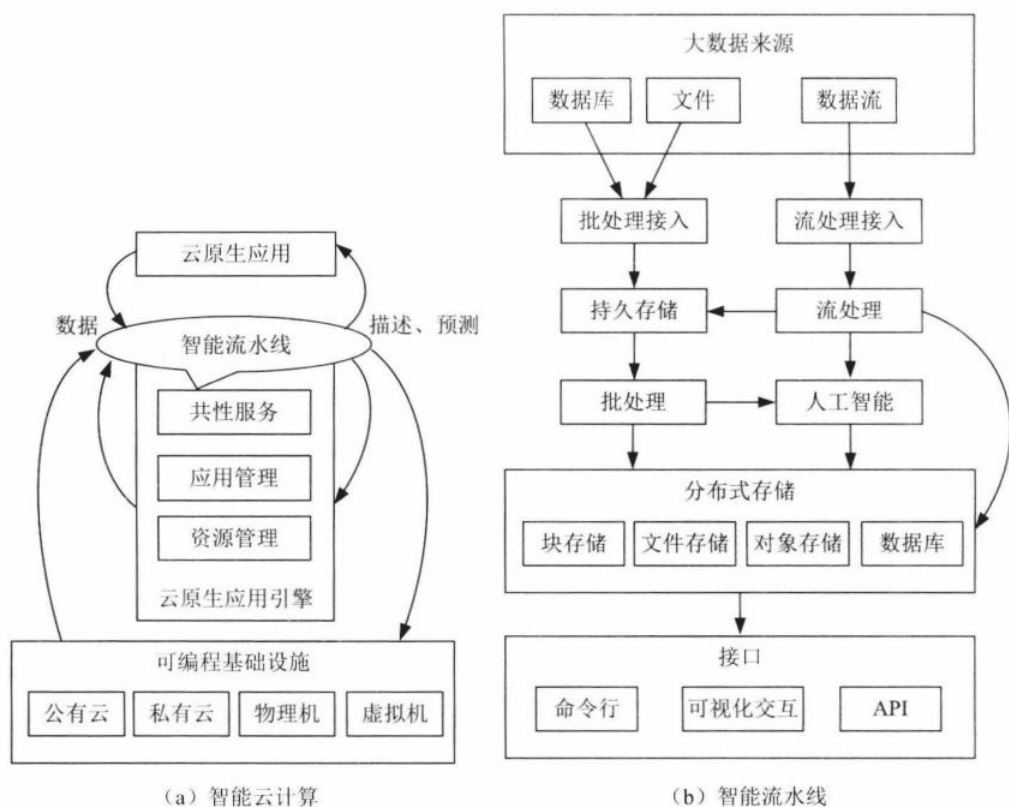


图 0-3 智能云计算与智能流水线

纵观不同时期计算机网络与分布式系统研究领域的若干前沿研究主题，可以看出：突破通用、智能化平台共性关键技术是重中之重。通用、智能化平台解除了分布式基础设施和分布式应用之间的耦合，系统管理员和软件开发人员各司其职，互不干扰；自动化（进而智能化）管理广域分布、异构、大规模和动态基础设施资源，减少人为错误，提高资源利用率；自动化（进而智能化）管理分布式应用生命周期，提供托管的共性服务，降低应用开发和运维难度，开发者专注于业务创新。将通用、智能化平台细分为内核、领域无关共性服务和领域相关共性服务，大大拓展了平台的行业应用领域，从根本上解决了各行各业构建分布式系统的大问题。对于每一个行业，充分利用云原生计算和智能云计算的技术优势，保持平台内核和领域无关共性服务不变，只需开发领域相关的共性服务和典型行业应用。从这个意义上讲，通用、智能化平台是真正的大平台，或者说是“平台的平台”，即以此为基础，构建面向不同行业的大规模分布式计算平台。

通用、智能化大平台体现了最先进的分布式计算技术，有利于打造精准有效监督、市场决定资源配置的开放服务生态系统。平台细粒度监控资源和应用的使用情况，实现精准有效监督和精细化管理，同时部署满足准入条件的多个同类资源或应用服务，经过实际竞争达到“优胜劣汰”，用户从市场上按需购买或停用资源和应用服务将成为常态。确立“以开发者为中心，聚焦应用生态建设”的理念，以平台为核心构建开发者社区，解决了谁是应用服务提供者这一根本问题，因为最终用户需求的满足和基础设施的价值体现，完全取决于开发者设计和实现的应用服务的质量，应当鼓励有能力的软件开发企业开放应用的关键数据和能力，成为领域相关共性服务提供商。因此，通过标准研制和技术突破，部署面向开发者用户的云应用引擎，就成为行业信息化建设的关键。

0.3 分布式系统的“大”问题与应用示范工程

分布式系统的“大”问题表现为大工程和大平台，研究工作挑战大、技术难度高，一旦取得创新性突破，成果应用价值巨大。作者带领团队面向国家或行业重大应用需求，聚焦计算机网络与分布式系统前沿问题与关键技术研究，致力于从根本上解决分布式系统研究普遍存在的“大”问题，以重大工程为依托，积极推进服务创新与行业应用，无论是面向全球最大的现代远程教育系统——中央广播电视大学的数字教育服务网格示范工程，还是《广东省云计算发展规划（2014—2020年）》（粤府办〔2014〕17号）社会服务领域重点项目“粤教云”工程，都属于大工程和大平台，社会经济效益显著。首先，基础设施资源和用户分布广、规模大。中央广播电视大学分校遍布全国，广东省各级各类学校及教育管理机构也分布在全省各地。与之相对应，基础设施资源多种多样，分布在全国或全省各地，中央广