

企业数字化基石

阿里巴巴云计算基础设施实践

高山渊 蔡德忠 赵晓雪 刘礼寅 刘水旺 陈义全 徐波◎编著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京•BEIJING

内 容 简 介

在互联网行业中，云计算基础设施技术具有非常重要的作用与影响，一方面，在电商、金融科技、云计算、大数据、AI等重要战略领域发展的过程中，云计算基础设施技术的重要支撑作用已经无可替代；另一方面，云计算基础设施技术已经成为许多类型业务的直接竞争力，甚至在云计算、AI等领域中，计算能力、存储能力、网络能力都成为业务的一部分。本书将详细地阐述阿里巴巴在基础设施上的实践细节及先进技术，包括数据中心、网络、服务器、计算硬件、存储硬件，以及智能化运营与自动化运维等内容。

本书是由AIS（Alibaba Infrastructure Service）组织编写的，历时三年，AIS是负责阿里巴巴集团所有基础设施的研发、运营、维护等工作的部门。本书梳理了基础设施演进过程中的思路、得失、最佳实践、未来路径规划等，可以让IT企业的管理者、软件工程师、测试工程师、运维工程师、软件架构师、技术经理能够更清晰地知道基础设施的根本在哪里，而且还可以让IT企业客户对基础设施的发展和未来有一定的了解，以便更好地使用基础设施提供的技术和服务，让阿里巴巴在基础设施上的经验成为国家和行业基础设施发展的参考。

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

企业数字化基石：阿里巴巴云计算基础设施实践 / 高山渊等编著. —北京：电子工业出版社，2020.1

（阿里巴巴集团技术丛书）

ISBN 978-7-121-37388-6

I . ①企… II . ①高… III . ①云计算—应用—电子商务—商业企业管理—中国 IV . ①F724.6-39

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第201707号

责任编辑：孙学瑛

印 刷：

装 订：

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：720×1000 1/16 印张：22 字数：438千字

版 次：2020年1月第1版

印 次：2020年1月第1次印刷

定 价：109.00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 zlt@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：010-51260888-819，faq@phei.com.cn。

致 谢

第 1 章：张世长

第 2 章：蒋林泉 陈 绪

第 4 章：沈烨烨 杜 鹏 陈 贇 王 锋 周天宇 闫 昆 薛国庆

第 5 章：谢崇进 姚志平 王海勇 程 刚 曹 捷 席永青 陈俊耿
包贵新 曾 军 周道龙 王 超 朱芳波

第 6 章：文芳志 郭 锐 钟杨帆 曹洪浩 刘向东 张 胜 吴剑锋
严 勇 王式文 方海宾 王 波 张学刚 黄 征 李人可
宋文俊 赵 兵

第 7 章：徐凌杰 蒋晓维 虞旭林 韩 天 王文强

第 8 章：李 舒 王一静 黎安宇 朱 峰 张 袁

第 9 章：朱婉怡 金伟安 陆增义 黄江伟 张 铭 何 诚 李 湛

推荐序1

本书作为阿里巴巴集团技术丛书中的一部专著，系统地讲述了阿里巴巴云计算基础设施技术的发展史，同时也是阿里经济体成长过程中对基础设施需求的演进史。

基础设施技术伴随了阿里巴巴的整个发展历程。在业务发展的早期，我们以电商、支付为主，采用的是当时业界较为流行的“IOE 架构”（指 IBM、Oracle 和 EMC 的产品），然而随着阿里巴巴业务的蓬勃发展，我们发现这样的架构无论从技术可扩展性还是从成本效率维度考量，都无法支撑我们走得更远。于是在多年前我们启动了“去 IOE”项目，本质上意味着小型机时代的终结，也同时成为阿里巴巴集团云计算基础设施技术发展的开端。

如今，阿里巴巴经济体的业务涵盖了电子商务、在线支付、云计算、物流、视频娱乐、移动导航等诸多领域，也带来了不同的挑战，尤其是云计算的蓬勃发展，不但对基础设施提出了稳定性、成本的要求，还提出了具备持续的高性能计算能力、存储能力、网络互联能力，以及用户几乎无感知的调度能力的要求。我们在定制计算、异构计算、自研存储、大规模网络架构、自研交换机、自建数据中心等方面进行了一系列的实践，积累了一定的经验。

在架构上，2016 年，我们提出了存储计算分离、在离线计算混部；2018 年，我们提出了阿里巴巴核心系统全面上云，2019 年的“双 11”以 54.4 万笔/秒的峰值交易能力、顺畅的用户体验，完美地宣告了目标的达成、架构的成功。

阿里巴巴不仅是一家商业公司，同时也是一家技术公司。我认为本书对阿里巴巴在基础设施领域的工程技术实践进行了一个有益的回顾与总结，不仅有助于我们自身精益求精，也为业界同仁提供了一个可供借鉴和评判的参考，让我们能够共同为云计算基础设施技术演进添砖加瓦，推动技术革新并促进互联网业务发展。

张建锋（行癫）

阿里巴巴集团 CTO 兼阿里云智能事业群总裁

2019 年 12 月于杭州

推荐序2

阿里巴巴基础设施的前身可以追溯至 2009 年，振飞（今阿里巴巴合伙人、高德总裁）作为救火队员奉命组建淘宝技术保障部，那一年是天猫“双 11”的首创之年，也是阿里云成立的元年。那时候，振飞面临的是焦头烂额的稳定性问题，淘宝交易的可用率还不到 3 个 9，当时“IOE 架构”在可扩展性、成本效率、故障颗粒度方面，已难以满足淘宝和支付宝蓬勃发展的需求。在 2010 年预算会议上，王坚博士要求在开篇 PPT “2010 年不增加小型机”的基础上，增加一个“再”字，成为“2010 年不再增加小型机”，启动了阿里巴巴“去 IOE”的进程，我参与其中并于 2013 年 5 月亲自见证了支付宝最后一台 IBM 小型机下线。这标志着阿里巴巴小型机时代的终结和基础设施新时代的开篇。

云计算业务的快速发展，为基础设施带来的挑战越来越大。2011 年 9 月至 2013 年年初，以淘宝技术保障部为基础，分期将阿里云、B2B 及支付宝运维团队整合为阿里巴巴技术保障部，为阿里巴巴集团基础设施技术的大统一奠定了基础。2014 年 1 月，基础设施技术峰会首次召开，主题是“从传统走向未来”，奠定了阿里巴巴基础设施技术发展的策略。2014 年 7 月，阿里巴巴技术保障部更名为 AIS（Alibaba Infrastructure Service），意味着基础设施的定位已从保障业务稳定性的部门升级为技术驱动的商业基础设施服务商，从保障转型为研发和运营，成为云计算的“大底座”。同年我们启动了全球人才招聘，正式在人才和组织上要向世界一流水平看齐。

“拼命搞技术！”“快来不及了（影响云业务）！我们（基础设施技术发展）最多还有 1 ~ 2 年时间”，这两句话一直环绕在我的心头，从最开始在河北省张北县自建数据中心、自研 AliFlash，AIS 人沿着技术研发的道路，从白盒化到架构一体化，经过 5 年的努力，无论是在数据中心、服务器、网络方面，还是在计算、存储、互联方面，我们在各个专业领域都有了长足的进步。从底层的机房电力设备到网络通信的硅光模块，到数据中心的网络架构、自研交换机和 OS，到计算芯片、存储控制器，再

到运维管控的“3 分钟故障恢复”（1 分钟故障发现、1 分钟故障定位、1 分钟故障恢复），再到数据中心的运营大脑（包括供应链等），我们收获了不少的成功，也有很多血和泪的教训。

技术基础设施是如此的重要，遗憾的是，因为专业领域众多，一直没有一本跨领域、跨专业的书，因此，我们决定在公司内部材料基础设施白皮书的基础上，编撰一本适合公开出版发行的书。本书也融入了这些年来我们在关键技术决策中的思考与实践，也有许多沉淀的经验。期望本书的出版能够给业界带来一块璞玉，以供雕琢，同时也鞭策我们自己在未来更进一步。



阿里巴巴集团副总裁基础设施事业部负责人

2019 年 12 月于杭州

推荐序3

随着越来越多的用户选择云而不是自建基础设施，云计算基础设施技术已经成为各类业务的直接竞争力，得到了社会各界的广泛关注，而阿里巴巴作为国内最大的云服务供应商，无疑在云计算基础设施方面有着丰富的经验和思考。随着众多云服务的出现和各种新技术的层出不穷，云计算基础设施技术如何定义和发展，毫无疑问会成为众多企业，包括阿里巴巴未来业务能否成功的关键因素。

本书从数据中心 TCO 建模和能效的分析入手，针对供配电、制冷、网络架构、服务器、计算硬件、存储硬件、智能化运营、一体化等，从多个维度详细地讲述了基础设施技术的组成和架构，每一项技术都体现了阿里巴巴云计算基础设施技术专家们的实践、思考、创新和沉淀。

在本书中，不仅有对 20 年逐渐成熟沉淀下来的云计算基础设施技术的解读，也包含了浸没式液冷、AI 技术、异构技术、量子通信等新技术的研究和布局，更展望了未来 5 年可能出现的新业务场景、新挑战，描绘了阿里巴巴未来 5 年的奋斗目标，更表现出阿里巴巴对云计算基础设施技术的深刻思考和长远布局。希望阿里巴巴这 20 年云计算基础设施技术上的理论和实践经验，能够为行业和国家，乃至世界的云计算基础设施技术发展提供一个参考。

“不谋万世者，不足谋一时；不谋全局者，不足谋一域。”阿里巴巴作为一家“要活 102 年”（马云原语）的好公司，不仅要做好自己的云计算基础设施技术，更要推动世界云计算基础设施技术的蓬勃发展。为了实现这一目标，不但要结合阿里巴巴特有的业务场景去提高云计算基础设施技术的综合竞争力，更要不断地探索实践、努力创新，提前对“黑天鹅”类技术进行布局和研究，才能保持活力和实现目标。这本书无疑表现了阿里巴巴在长远技术发展的深刻思考和谋略，对当前国内外云计算基础设施技术发展具有里程碑式的指导意义。

何良安

中国信息通信研究院云计算与大数据研究所所长

开放数据中心委员会名誉主席

2019 年 12 月于北京

前言

随着云计算的广泛应用，特别是为创新企业带来的低成本、高效率赋能创新的优势，云计算基础设施技术成为当下创新非常活跃的领域。

为什么写本书

阿里巴巴的云计算基础设施技术的演进和发展，是阿里巴巴集团整体发展的一部分，也是阿里巴巴未来业务能否成功的核心因素。在这个过程中，我们有很多思考和实践、尝试和创新，以及经验和教训，并取得了一定的成果，面向未来也有了越来越明确的思路 and 规划。我们希望通过这本书将云计算基础设施技术的过去、现在和将来呈现给读者，让阿里巴巴在云计算基础设施技术上的实践经验成为国家和行业云计算基础设施发展的重要参考。

本书主要内容

本书针对云计算基础设施技术的各方面做了概要性的介绍和说明，包括互联网数据中心（IDC）、网络、服务器计算、存储、智能化等。这些方面的每一项都是一个非常专业和复杂的技术领域，本书力图能简明扼要地加以说明。

第1章 基础设施架构综述，简要介绍云计算基础设施技术的范围、价值、挑战等。

第2章 TCO 建模，介绍 TCO 的概念，数据中心、服务器、网络设备的 TCO 组成，以及如何在系统层面进行 TCO 分析和建模，并做出最优的选择。

第3章 数据中心能效，介绍如何系统地评估数据中心能效水平，如 PUE、SPUE、IUE 等。

第4章 数据中心，介绍狭义数据中心的核​​心技术，包括供电、制冷等的挑战、发展趋势。

第5章 数据中心网络架构和关键技术，介绍阿里巴巴数据中心的网络架构和关键技术，包括历史回顾、架构理念、高性能网络、网络可视化等。

第6章 服务器技术，介绍服务器的硬件组成、演进、挑战等。

第7章 计算硬件技术，介绍通用计算、异构计算、总线互联等。

第8章 存储硬件技术，介绍内存、HDD、SSD 及阿里巴巴自研存储产品 AliFlash 等。

第9章 基础设施智能化运营与自动化运维，介绍大规模云计算基础设施的运营和运维的自动化、数据化、智能化等内容。

第10章 IDC、网络、服务器的一体化，介绍如何在技术演进中让 IDC 建筑、网络大集群、服务器协同发展，并提供最优的解决方案。

第11章 总结及展望，面向未来，云计算基础设施技术如何进一步提升能力、支持创新。

致谢

本书从策划到成稿，再到出版经历了三年多的时间，前后有百余位同事参加了规划、构思、写作、校对等工作，署名的作者及致谢名单未能将每一位参与者一一列出，在这里一并致谢。

感谢在本书写作过程中基础设施事业部的各位管理者给予的支持，给予本书大方向的把控及人力上的支持。

感谢电子工业出版社的认可，让本书得以出版，感谢孙学瑛老师及其团队细致、艰苦的工作，让本书最终能够与读者见面。

由于作者水平有限，书中不足及错误之处在所难免，敬请专家和读者给予批评指正。

高山湖

2019 年 12 月



读者服务

微信扫码回复：37388

- 获取博文视点学院 20 元优惠券。
- 获取免费增值资源。
- 加入读者交流群，与更多读者互动。
- 获取精选书单推荐。

目 录

第1章 基础设施架构综述 / 1

- 1.1 基础设施的概念 / 1
- 1.2 基础设施作为技术驱动力 / 3
- 1.3 基础设施的技术价值 / 7
 - 1.3.1 技术安全 / 8
 - 1.3.2 稳定性 / 9
 - 1.3.3 TCO / 10
 - 1.3.4 稳定性、性能、成本的平衡 / 11
 - 1.3.5 追求效率、标准化、规范化 / 11
- 1.4 基础设施的核心竞争力特征 / 12

第2章 TCO建模 / 13

- 2.1 静态TCO模型 / 14
 - 2.1.1 数据中心CapEx / 15
 - 2.1.2 服务器及网络设备CapEx / 16
 - 2.1.3 OpEx / 16
 - 2.1.4 产能/TCO / 16
- 2.2 动态TCO模型 / 17
- 2.3 TCO最优 / 18

第3章 数据中心能效 / 22

- 3.1 数据中心电能利用率 / 22
- 3.2 数据中心服务器电能利用率 / 30
 - 3.2.1 服务器电源的能效 / 31
 - 3.2.2 服务器风扇的能效 / 33
- 3.3 数据中心基础设施使用率 / 35
- 3.4 小结 / 37

第4章 数据中心 / 39

- 4.1 数据中心面临的挑战 / 39
 - 4.1.1 中国能源供给结构对数据中心的影响 / 39
 - 4.1.2 新政策环境下数据中心面临的技术升级挑战 / 41
 - 4.1.3 云计算业务给数据中心带来的机遇与挑战 / 41
- 4.2 数据中心技术的发展趋势 / 43
 - 4.2.1 数据中心技术演进的路线与趋势 / 43

4.2.2 阿里巴巴数据中心的演进路线 与趋势 / 46	4.8 阿里巴巴数据中心冷却工程 实践案例 / 103
4.3 数据中心能源与供电技术 / 49	4.8.1 千岛湖数据中心 / 103
4.3.1 数据中心能源的选择与引入 / 49	4.8.2 张北新风自然冷数据中心 / 105
4.3.2 数据中心电气系统架构演进的 趋势与路线 / 54	第5章 数据中心网络架构和关键 技术 / 112
4.3.3 数据中心电气关键技术与设备 / 59	5.1 超大规模数据中心网络概述 / 112
4.4 阿里巴巴数据中心供电工程 实践案例 / 68	5.1.1 超大规模数据中心的网络架构 及其技术演变 / 112
4.4.1 分布式不间断供电和集中式 不间断供电的比较 / 68	5.1.2 超大规模数据中心网络的未来 发展趋势 / 115
4.4.2 240V+PSU集中供电系统 / 70	5.2 阿里巴巴数据中心网络 / 118
4.4.3 天蝎BBS / 71	5.2.1 云计算对数据中心网络的核心 要求 / 118
4.4.4 服务器BBU / 73	5.2.2 阿里巴巴数据中心网络架构 演进 / 120
4.4.5 机柜DPS / 74	5.2.3 阿里巴巴数据中心网络HAIL 架构的设计理念 / 122
4.5 数据中心制冷技术 / 76	5.2.4 阿里巴巴数据中心网络HAIL 架构简介 / 130
4.5.1 数据中心制冷系统架构的选择 与设计 / 76	5.2.5 阿里巴巴数据中心交换机 / 131
4.5.2 连续制冷 / 89	5.2.6 阿里巴巴 vSwitch / 138
4.5.3 制冷系统的节能措施 / 91	5.2.7 阿里巴巴数据中心网络光互联 技术 / 141
4.6 面向下一代IT系统的冷却技术 / 96	5.3 数据中心网络协议和高性能 网络 / 142
4.6.1 液冷技术简介 / 96	5.3.1 数据中心网络互联协议 / 142
4.6.2 冷板式液冷技术 / 98	5.3.2 高性能网络 RDMA技术 / 145
4.6.3 浸没式液冷技术 / 99	
4.6.4 不同冷却技术对比 / 100	
4.7 数据中心制冷技术的发展 趋势 / 102	

5.4 可编程芯片和高性能网关平台 / 146	6.2.6 服务器测试及性能评估体系 / 191
5.4.1 基于x86高性能软件网关平台Netframe / 146	6.3 软硬件优化 / 197
5.4.2 基于可编程交换机与SDN技术的硬件交换平台 / 147	6.4 服务器演进展望 / 198
5.5 网络可视化技术 / 148	6.4.1 阿里巴巴的服务器演进 / 198
5.5.1 网络可视化前端技术 / 149	6.4.2 计算/存储分离和部件化 / 199
5.5.2 网络可视化后端技术 / 150	6.4.3 进一步解耦CPU-Storage, CPU-GPU, CPU-MEM和架构一体化 / 201
5.6 城域网光传输技术 / 151	6.5 硬件安全体系 / 203
5.6.1 城域网架构简介 / 151	6.5.1 可信计算 / 204
5.6.2 光传输技术 / 154	6.5.2 可信执行环境 / 205
第6章 服务器技术 / 159	6.5.3 内存安全 / 208
6.1 服务器简介 / 159	6.5.4 构建完善的硬件安全体系 / 209
6.1.1 服务器系统分级 / 160	第7章 计算硬件技术 / 211
6.1.2 服务器行业生态 / 161	7.1 通用计算 / 212
6.1.3 服务器应用场景 / 162	7.1.1 x86 / 212
6.1.4 服务器面临的挑战 / 162	7.1.2 Non-IA / 215
6.1.5 服务器设计考虑 / 163	7.1.3 Non-IA与x86的比较 / 218
6.2 服务器研发和技术体系 / 164	7.1.4 典型业务与通用计算 / 219
6.2.1 数据中心服务器研发模式 / 165	7.2 异构计算 / 221
6.2.2 数据中心服务器工程技术之主板 / 167	7.2.1 GPU / 221
6.2.3 数据中心服务器工程技术之散热技术 / 170	7.2.2 FPGA / 225
6.2.4 服务器结构工程技术 / 174	7.2.3 ASIC / 227
6.2.5 服务器监控及运维体系 / 189	7.2.4 CPU、GPU、FPGA、ASIC简单比较 / 230
	7.3 边缘计算 / 230

7.4 总线互联 / 233	8.6 自研存储产品AliFlash / 269
7.4.1 QPI/UPI / 233	8.6.1 双模式SSD / 269
7.4.2 NV-Link / 234	8.6.2 开放通道模式 / 270
7.4.3 CAPI / 234	8.6.3 开放通道模式的应用路径 / 272
7.4.4 CCIX / 235	8.6.4 AliFlash与业务软硬件结合 / 273
7.5 计算与业务软硬件结合 / 236	8.7 存储路径 / 276
7.6 小结 / 238	8.7.1 传统文件系统 / 276
第8章 存储硬件技术 / 239	8.7.2 KV存储 / 278
8.1 内存 / 240	8.7.3 SPDK / 279
8.1.1 DDR / 240	8.8 NVMoF / 280
8.1.2 NVDIMM与UltraDIMM / 241	8.9 近存储计算 / 283
8.1.3 AEP / 243	8.9.1 本地近存储计算 / 283
8.1.4 HBM与HMC / 243	8.9.2 远端近存储计算 / 285
8.2 HDD / 245	8.10 小结 / 288
8.2.1 基本原理 / 245	第9章 基础设施智能化运营与 自动化运维 / 289
8.2.2 大容量硬盘应用 / 247	9.1 基础设施资源运营智能化 / 290
8.2.3 HDD的发展趋势 / 251	9.1.1 需求预测 / 291
8.3 SSD / 251	9.1.2 数据中心机架位容量规划 / 293
8.3.1 NAND Flash / 254	9.1.3 智能制造的发展趋势 / 295
8.3.2 2D/3D NAND / 254	9.2 基础设施资源交付自动化 / 296
8.3.3 SSD的使用 / 259	9.2.1 通过带外网络实现的远程自动 开关机 / 296
8.4 新型存储介质 / 261	9.2.2 服务器操作系统自动化安装 / 297
8.4.1 3D XPoint / 261	9.2.3 自动化部署遇到的问题及解决 方案 / 300
8.4.2 ReRAM / 264	9.3 基础设施智能监管控 / 300
8.4.3 NVMe / 265	
8.5 新型存储介质应用 / 265	

9.3.1 可用性监控分析 / 301	10.2 整机架交付：OCP、天蝎与AliRack / 322
9.3.2 电热异常感知 / 301	10.3 面向业务的一体化解决方案：HPC、超算、AI / 323
9.3.3 能效优化 / 304	10.4 系统技术分层与协作 / 327
9.4 物理机自动化维修 / 305	10.5 全系统模拟器 / 328
9.4.1 故障发现 / 305	
9.4.2 故障预测 / 307	
9.4.3 故障维修 / 307	
9.5 集群自动化运维 / 309	第11章 总结及展望 / 330
9.5.1 集群自动化运维的主要设计思想 / 309	11.1 2022年——世界第一的基础设施 / 330
9.5.2 物理机集群智能自愈系统 / 311	11.2 基础设施5.0——AI、异构、智能化 / 332
9.6 网络智能变更系统 / 314	11.3 基础设施6.0——一体化最优基础设施架构 / 332
9.6.1 变更稳定性挑战 / 314	11.4 五年之后的基础设施——创新的机制保障 / 333
9.6.2 解决方案 / 315	11.4.1 NASA与达摩院——阿里巴巴的科技创新 / 333
9.6.3 网络智能化变更系统 / 316	11.4.2 AIS的创新机制 / 333
9.7 无人值守的数据中心 / 317	11.4.3 前瞻布局与战略拖动 / 334
第10章 IDC、网络、服务器的一体化 / 319	11.5 量子与未来 / 334
10.1 基础设施的最优化匹配 / 319	11.5.1 量子通信 / 334
10.1.1 大集群与业务的最优匹配 / 319	11.5.2 量子计算 / 335
10.1.2 IDC建筑、网络大集群、服务器的宏观优化 / 320	
10.1.3 机架功耗、服务器功耗、网络端口利用率的微观优化 / 321	

基础设施架构综述

从办公数字化和社会数字化到万物数字化，数据驱动的智能化应用，小到和天猫精灵的一次对话、淘宝的一次商品搜索、一个包裹的运送，大到智慧城市、智慧交通、智慧医疗、智慧工业、智慧农业、新兴金融服务等，无一不是构建在大数据基础之上的。随着技术的进步和对数据的深度挖掘融合，数据量出现了爆炸式的增长。最近五年全球的数据增长量就可能超过过去所有数据的总和，而且增长的速度还在不断加快。

因此，数据的存储、计算和传输等服务就成了数字经济时代的基础设施。如果说数据是信息时代的血液，那么为所有这些数据的计算、存储和传输提供服务的“躯干”就是“基础设施”。

1.1 基础设施的概念

广义上，基础设施（Infrastructure）是指为社会生产和居民生活提供公共服务的物质工程设施，是用于保障国家或地区社会经济活动正常进行的公共服务系统。它是社会赖以生存发展的一般物质条件，包括交通、邮电、水、电、煤气、园林绿化、环境保护、文化教育、卫生事业等市政公用工程设施，以及公共生活服务器设施等。

基础设施具有以下特点：

- 先行性和基础性。

- 不可贸易性。
- 整体不可分割性（规模）。
- 准公共物品性。

对于一个互联网企业来说，这些公共服务包括数据中心、网络、服务器、计算、存储等。随着云计算的发展，“基础设施即服务（Infrastructure as a Service, IaaS）”正在将这些互联网基础设施变成全社会的基础设施。

云计算作为社会的基础设施具有以下特点：

- 规模化。
- 可获得性。
- 先进性。

构建统一基础设施架构，整体数据中心从软件层面抽象为以下 6 个部分，如图 1-1 所示。

- 平台层软件，包括固件、驱动、操作系统、虚拟化等。
- 资源管理，主要是统一资源调度系统。
- 硬件抽象层，例如统一的分布式文件系统。
- 部署和维护，例如 Microsoft 的 AutoPilot。
- 编程框架，例如 MapReduce 等。
- 应用层软件，例如搜索、数据库、机器学习等。



图 1-1 整体数据中心核心技术分层

进一步细分，以阿里巴巴为例，将基础设施核心组件结合阿里巴巴的技术和业务现状，可以得到如图 1-2 所示的技术分层。

- 数据中心：包含风、火、水、电、土地等物理资源及其管理平台。

- **基础技术**：包含计算平台和数据平台。
- **调度平台**：统一提供各种任务需求与计算，负责存储资源的协调和管理。
- **计算**：包含计算硬件设备、操作系统和虚拟化软件及其提供的不同资源形态。
- **存储**：包含存储硬件设备、分布式存储软件及其所提供的服务接口。
- **网络**：包含交换机、网卡、线缆等设备及其运维管理和应用平台。
- **DC 大脑**：针对计算、存储、网络、数据中心、资源供应等整体的智能化运营和决策体系。

数据中心							
基础技术	MapReduce	Streaming	Mlib	Search	SQL/NoSQL		DC大脑
	计算平台（ODPS、Spark）			数据平台			
调度平台	SIGMA	Zeus	Syreo	Suez	Fuxi		部署
计算	物理机		VM（KVM）	容器（Docker）		JVM	SCM
	OS/Virtualization						监控
	计算服务器/裸金属、加速器						
存储	Block Device	SDK/Lib	POSIX（FUSE、NFS）		RESTful（S3、Swift）		预警
	DFS						PIPA
	存储硬件（HDD、SSD、NVMe）						
网络	Connectivity、Performance、QoS			OVS/vNIC		Contiv	容量
	NOS/Network virtualization						测量
	Fabric、Switch、NIC、SmartNIC						
DC大脑	DCOS						数据
	物理资源						

图 1-2 阿里巴巴基础设施技术分层

1.2 基础设施作为技术驱动力

基础设施技术的发展一直是互联网、大数据、AI 等技术领域的驱动力，例如计算能力的极大发展促使了已经诞生 60 年的 AI 技术的再次爆发，如图 1-3 和图 1-4 所示。

对于一家大型互联网企业而言，一方面，在电商、金融科技、云计算、大数据、AI 等重要战略领域发展过程中，云计算基础设施技术对其支持的重要性已经无可替代；另一方面，云计算基础设施技术已经成为许多类型业务的直接竞争力，甚至在云计算、AI 等领域中，计算能力、存储能力、网络能力都成为业务的一部分。

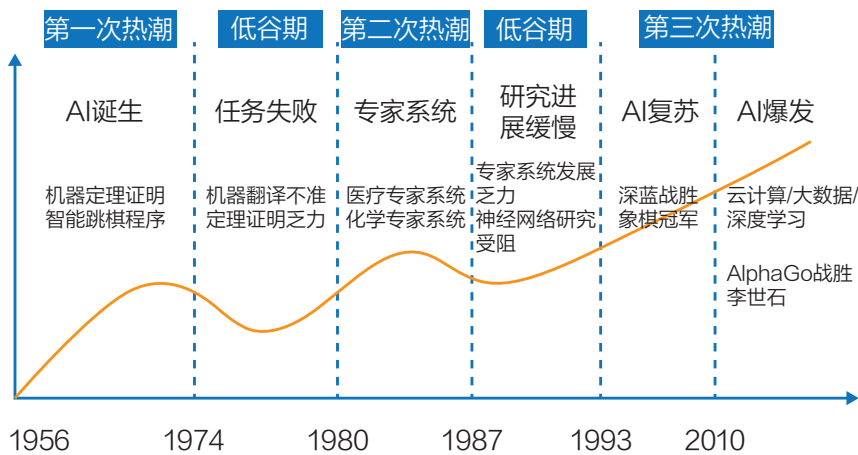


图 1-3 人工智能发展的三次热潮

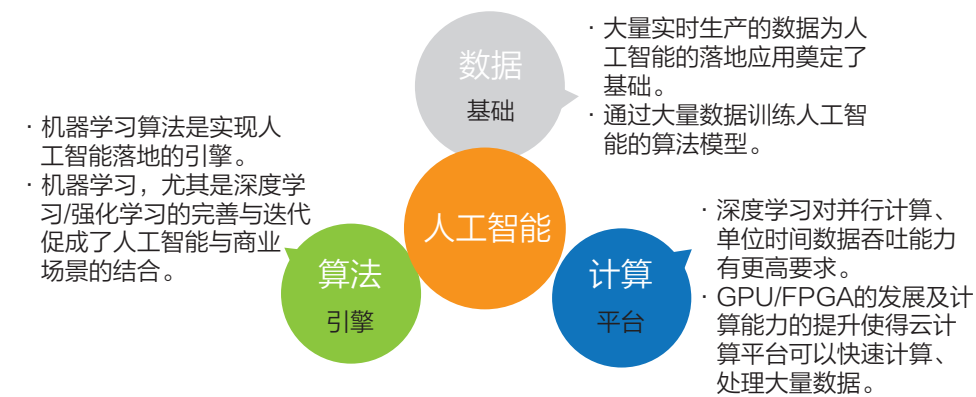


图 1-4 人工智能第三次崛起的三大基石

衡量基础设施的竞争力的性能指标在很大程度上是计算 / 存储能力。在最近几十年的发展历程中，得益于半导体产业的飞速发展，特别是在“摩尔定律”的驱动下，算力的发展保持稳健的大跨度向前发展的趋势。

摩尔定律是由 Intel 公司创始人之一戈登·摩尔（Gordon Moore）提出来的，即当价格不变时，集成电路上可容纳的元器件的数目，约每隔 18 ~ 24 个月便会增加一倍，性能也将提升一倍，如图 1-5 所示。换言之，每一美元所能买到的电脑性能，将每隔 18 ~ 24 个月翻一倍以上。可以说，这四十多年半导体工业技术的持续进步，是推动科技进步的非常重要的驱动力之一。

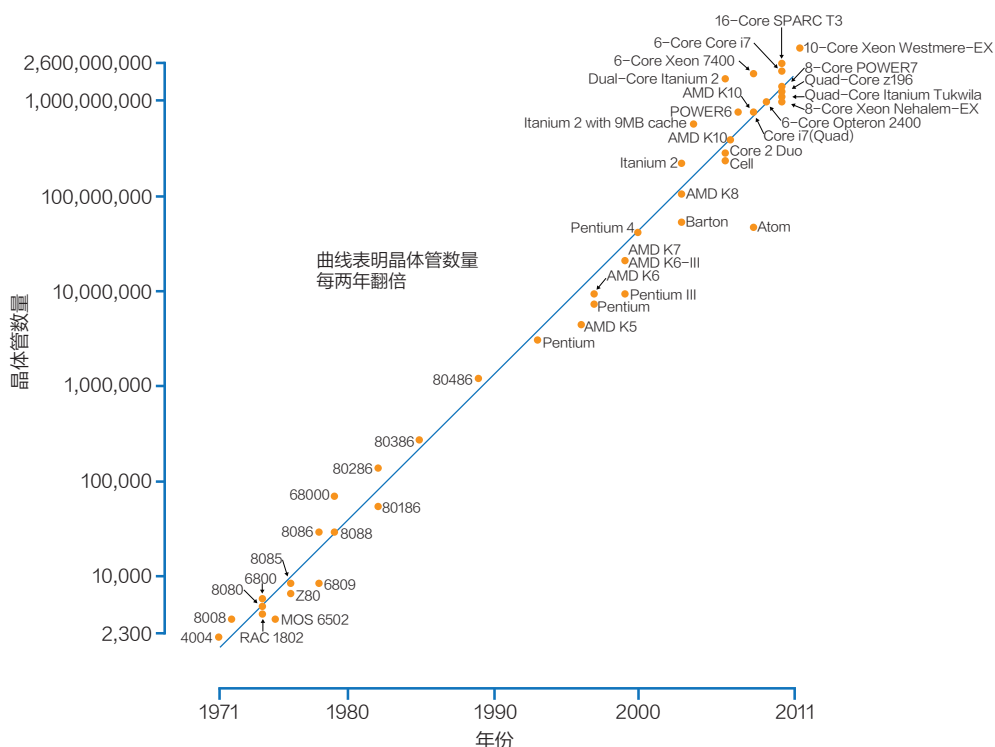


图 1-5 摩尔定律示意图

然而时至今日，这一经验规律已经面临巨大挑战，各界纷纷预测摩尔定律将在不久的将来因面临工艺、材料等方面的物理限制而终结（如图 1-6 所示），可以说“The Free Lunch Is Over”，表现出来的迹象就是：

- 因为半导体工艺升级带来的计算性能的提升不再像以前那么快，业界领头羊 Intel 公司 CPU 的发展步伐慢了下来，从 2016 年起，已弃用了原先的 Tick-Tock 技术演进模式（如图 1-7 所示），而采用了 PAO（Process-Architecture-Optimization）的演进模式（如图 1-8 所示），即在同一个制程节点上，跨度三年出三代处理器芯片。因此，互联网行业单纯依靠站在芯片行业的肩头获取摩尔定律红利已经无法满足自身的需求。
- 在摩尔定律作用减缓后，为了追求更高的计算性能，另一个发展方向是堆积更多的计算单元，但是这导致的功耗及发热量问题，成为非常重要的关注点，如图 1-9 所示。

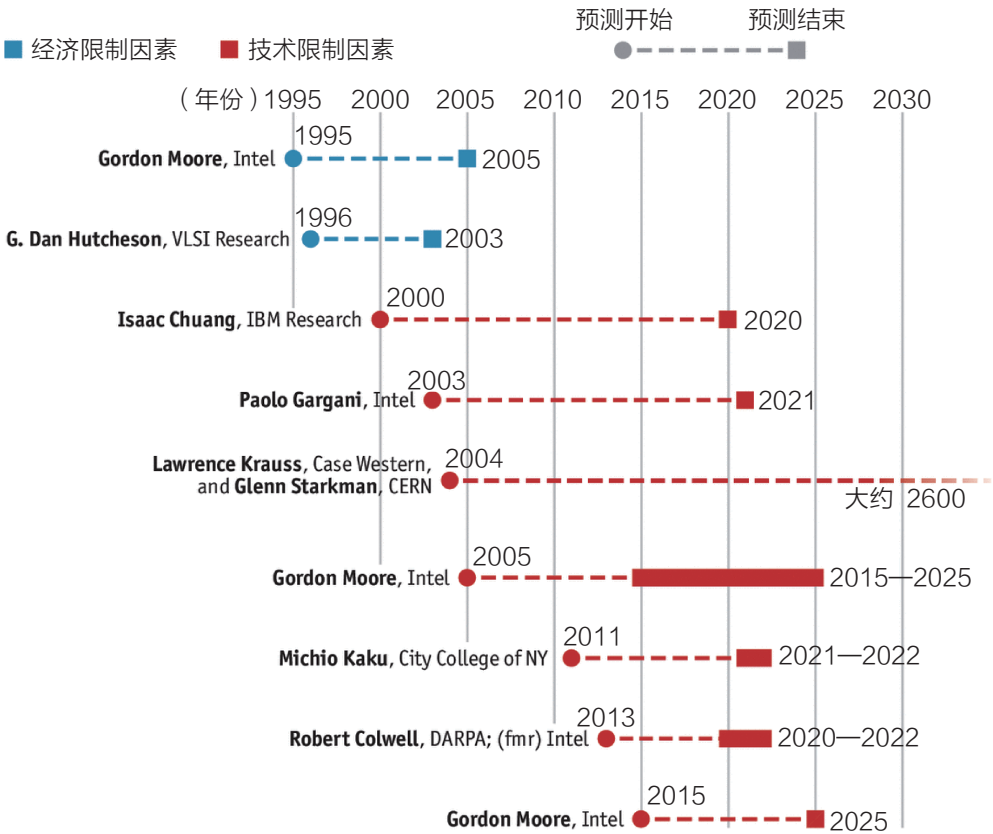


图 1-6 Faith No Moore. 引自 *Press Reports: The Economist*

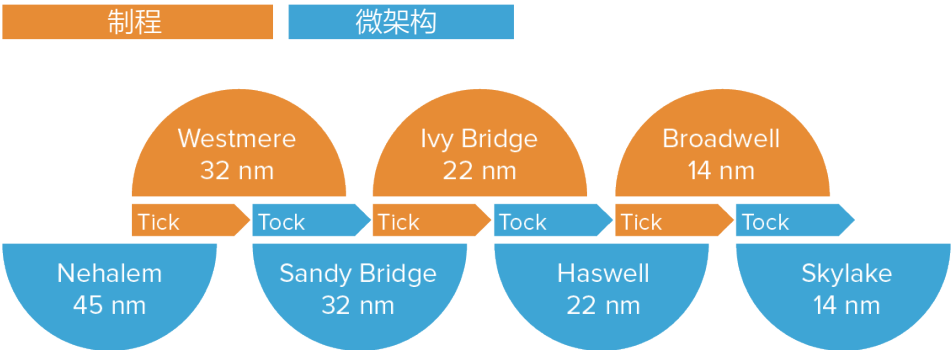


图 1-7 Intel Tick-Tock 技术演进模式

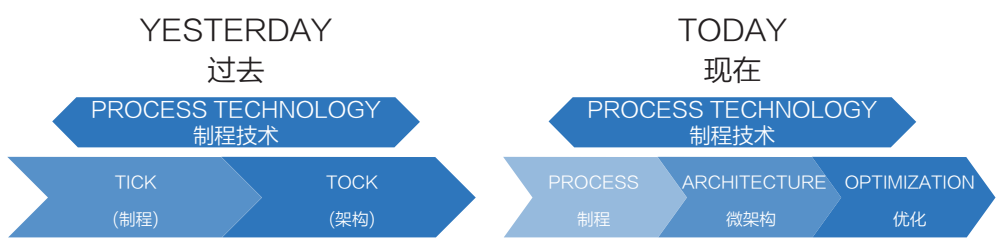


图 1-8 Intel PAO 技术演进模式

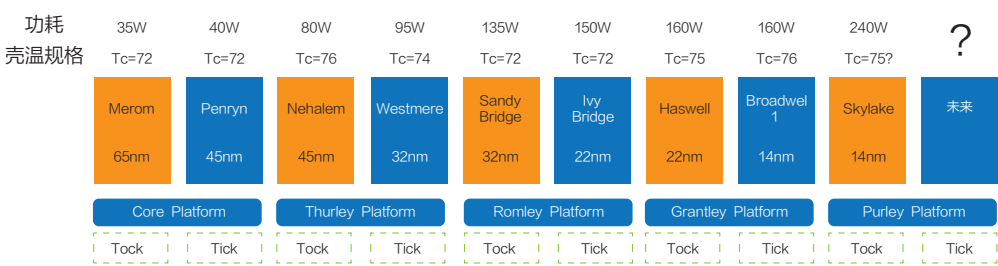


图 1-9 Intel CPU 功耗增长趋势

我们将会经常碰到各个领域因为摩尔定律作用减缓所带来的挑战。

1.3 基础设施的技术价值

基础设施的技术价值层次如图 1-10 所示。



图 1-10 基础设施的技术价值层次

- **基本价值**：实现专业技术的基本价值，例如，网络对于业务的基本价值是网络传输数据的价值，体现在连通性、可靠性、带宽等方面。
- **架构价值**：当某项技术成为决定技术变化的核心的时候，我们就认为其不仅发挥基本价值，还发挥了架构价值，例如，Flash 存储技术的成熟，让阿里巴巴能够以分布式技术替代原先需要高端存储和计算才能完成的海量数据库业务支持，从而成就了去 IOE 的成功。
- **业务价值**：当一项技术变得人人都可以随时使用的时候，这项技术必然产生业务价值，例如，计算和虚拟化技术的发展，让租用计算能力成为云计算的核心模式和竞争力。
- **成本价值**：当一项技术趋于完全成熟时，成本就成为考量这一技术竞争力的最后一个指标，甚至有些时候，成本会成为一项业务的核心竞争力，例如，常见的互联网业务在业务发展前期都会以低价、亏本、免费的方式吸引客户，这时候，成本是否足够低，就成为业务能否生存、吸引客户的关键因素。

回顾最近互联网相关技术的发展，云计算、大数据、AI 等无疑一方面是技术创新最活跃的领域，另一方面也都成为新的业务方向。基础设施技术的持续创新，为它们提供了更多机遇。

基础技术研发要充分考虑技术的这四个价值层次。本书将围绕基础设施技术及其技术价值体现做细节探讨。

1.3.1 技术安全

当基础设施技术成为核心竞争力和发动机的时候，技术安全成为一个必须要面对的课题。

基础设施技术安全考虑以下几个方面。

- 关键技术 / 资源，不受单一供应商绑定，不被竞争对手领先。
- 符合行业 / 国家 / 地区规定和国家技术安全。
- 技术不足严重影响公司业务发展，如果阿里巴巴在过去没有做去 IOE (IBM, Oracle, EMC)，就不可能有电商、金融甚至云计算业务的成功。
- 技术不足导致竞争劣势，成本差距无法承受 (比如成本差距 >10%)。
- 技术发展导致业务被颠覆。
- 核心技术泄露导致丧失竞争优势。

- 唯一、稀缺资源的获取，产生更多的业务想象力，同时形成竞争优势。

如何应对技术安全问题，是基础设施技术发展过程中需要始终重点考虑。

1.3.2 稳定性

基础设施作为支持和运行业务的重要生产资料之一，其稳定性也极大地影响着业务的稳定性。

基础设施特别是硬件类设备一定会存在故障，云计算将基础设施的不稳定作为基本假设来设计系统——这一点也成为云计算区别于传统设备供应商的核心竞争力之一——因此会在业务层设计容灾措施，例如阿里巴巴电商类业务的同城双活、异地多活架构就降低了对基础设施的依赖。但是并非所有业务都拥有完善的架构来应对基础设施故障，因此基础设施的稳定性 SLA（Service Level Agreement）/OLA（Operational Level Agreement）仍然是一个长期的挑战。

同时，稳定性的 SLA/OLA 并非越高越好，针对某些特定业务，我们适当降低 SLA/OLA 的要求可以有效提高成本优势和效率，这将在后面各章节详细展开。

IDC

Uptime Institute 和 TIA 都将数据中心分为四个等级，即 Tier I ~ Tier IV，直观来说，等级越高的数据中心稳定性越好。

中国质量认证中心（CQC）的标准 GB50174-2008 将数据中心分为 A、B、C 三个等级，其中 A 级为最高。

IDC 作为底层的基础设施，出问题之后影响面也往往最大，同时稳定性的挑战也最大。一般来说，IDC 触发的故障都是非常严重的故障，例如，2015 年 6 月 21 日阿里云中国香港机房故障导致的业务中断超过 12 小时的严重事件：

“6 月 21 日上午 9 点 37 分，阿里监控系统发现阿里云中国香港 IDC 运营商名气通机房出现访问异常，名气通机房反馈的原因为供电系统故障导致数据中心大楼整体断电，并触发消防报警。根据当地的消防规定，必须彻底排查隐患并完全消除后，才能获准进场做电力抢修。21 点 22 分，机房正式恢复稳定供电，阿里立即执行既定预案逐项恢复服务，21 点 32 分，安全防护服务恢复正常，各项服务陆续恢复，截至 23 点 39 分全部服务恢复。”

因此，IDC 作为底层的基础设施，稳定性是重中之重。

网络

作为连通所有服务器、所有服务与用户的管道，网络稳定与否将第一时间影响业务及用户，因此也被提出非常高的稳定性要求，特别是要杜绝大规模故障。

网络稳定性的典型表征是故障多、影响大、排查难、恢复慢。

在影响业务的严重故障中，网络的原因也经常有，2015 年 5 月 27 日支付宝故障就是非常典型的例子：

“杭州市萧山区某地光纤被挖断，造成目前少部分用户无法使用支付宝，运营商正在抢修，支付宝工程师正在紧急将用户请求切换至其他机房，受影响的用户正在逐步恢复。用户的资金安全并不会因此受到任何影响。如果出现交易信息不同步的情况，在修复后会恢复同步。”

传统网络作为一套封闭系统，涉及复杂的软硬件及多厂商设备、协议等兼容性问题，非常容易触发稳定性问题。小到一台接入交换机（ToR Switch/ASW），大到核心交换机、路由器及运营商网络和光纤，都可能出现轻微或非常严重的问题。

对于网络稳定性，如何做到架构上冗余、出问题快速发现乃至自动恢复是未来网络的重点课题，这部分，我们将在第 5 章及第 10 章重点探讨。

服务器

成熟的互联网应用是基于硬件的不可靠性这一基本假设来设计的，对单一服务器的稳定性要求不高。但是对服务器稳定性的挑战有以下两个方面：

- 批次性问题：损失超出了业务设计的容忍范围或者多余的人力投入。
- 资源售卖型云计算服务对单机的可靠性依赖。

如何从服务器的设计、研发、生产、交付、运营各个环节系统化地避免服务器的批次性问题，是服务器研发的重要挑战，我们将在第 6 章做相关探讨。

1.3.3 TCO

任何有竞争力的产品对用户来说都应该是 TCO（Total Cost of Ownership）最优的。在基础设施领域，TCO 也是稳定性之外最重要的衡量指标，或者极端地说，任何不能降低 TCO 的创新都是假创新。

TCO 的核算是一个非常复杂和困难的课题，比如阿里巴巴之前以单笔交易（或支付）成本作为衡量指标来评估基础设施水平。但是由于业务的不断发展、业务类型

不断丰富、用户体验提升、安全对抗加剧、市场容量饱和等因素，需要全局的成本建模，这会在第2章详细阐述。

1.3.4 稳定性、性能、成本的平衡

任何事情都有两面性，就像 RFC1925 的 12 条中的第 7 条说的一样，基础设施的特性决定了基础设施研发和创新的困难：

- 稳定性、性能、成本平衡困难（如图 1-11 所示）。
- 复杂的系统工程，领域众多、依赖度高、牵一发而动全身。
- 硬件研发和迭代周期长，投入资源量巨大。



图 1-11 稳定性、性能、成本

要应对这些困难和挑战，做到基础设施的宏观架构与微观架构统一，需要科学的方法论和实践，更需要 AI 等技术的加持，才能求得基础设施的最优解，详见第 9 章和第 10 章的相关内容。

1.3.5 追求效率、标准化、规范化

因为大规模系统在建设、采购、交付和运营各个环节都要保证效率最大化，所以对规范、标准方面的要求就成为提升效率的最有效抓手，且规范和标准也是提升稳定性的有效手段之一。

例如如何做到大规模情况下服务器交付效率的提升，已经成为当前阶段的重要课题。互联网行业的最佳实践是采用整机柜交付模式，这一交付模式本身就要求机架层面的规范化和标准化，以实现以机柜为单位的可复制，来提升交付效率。

僵化的规范与标准可能会成为阻碍创新的绊脚石，我们要能够根据技术发展、业务变化快速地更新优化规范与标准。

1.4 基础设施的核心竞争力特征

基础设施在整体架构和效能、技术先进性和前瞻性等方面的挑战总结为以下三点。

- 基础设施的体系架构不统一：架构一体化与基础设施单元化，例如：
 - 随着服务器功耗的快速上升，IDC 并没有及时更新迭代，导致单机架服务器密度越来越低，造成网络的成本大量浪费。
 - IDC 资源规划不足导致大量的服务器搬迁。

我们将在第 10 章重点讨论基础设施的架构一体化问题。

- 运营效率低下：整体基础设施的运营效率的高低，最终会成为检验基础设施竞争力的重要标准。例如：
 - 整体运营尚处于比较原始的手工作坊阶段，不能满足未来更大规模的要求。
 - 资源规划多为静态规划方式，没有形成数据驱动的良好互动。
 - 服务器交付周期长、流程不标准导致交付质量不达标。

我们将在第 9 章重点讨论智能化运营问题。

- 全链条技术和资源掌控能力有待进一步加强：技术专业化、技术和资源安全。
 - 在存储计算分离大架构的挑战下，IDC、服务器、网络、操作系统等技术要协同。
 - 要在 AI 领域有所积累，从而具备对业务创新的支持能力。

我们将在第 4 章到第 8 章分别讨论 IDC、网络、服务器、计算硬件、存储硬件的技术专业化问题。

总结起来，我们提出以下基础设施的技术分层及各领域技术的核心竞争力特征：

- 大规模的、可扩展的数据中心。
- 架构简单、高速的物理网络。
- 规模化、一体化、规格收敛的服务器。
- 可软件定义的虚拟化解决业务灵动问题。
- 调度系统解决资源的利用率问题。
- DC 大脑智能化解决运维问题。

第 2 章

TCO建模

如第 1 章所述，降低 TCO 是技术进步的重要衡量指标。系统地管理 TCO，需要科学系统的方法。

首先，整个数据中心的 TCO 要打破服务器、网络、IDC 的界限，以全局视角来考察，TCO 核算的常见误区是只考虑了单一专业的成本。

其次，对整体 TCO 要建立系统的分析和优化方法，分析 TCO 的指导原则如下所示：

- 图 2-1 展现影响 TCO 的各个因素的作用大小，我们称之为微笑曲线。

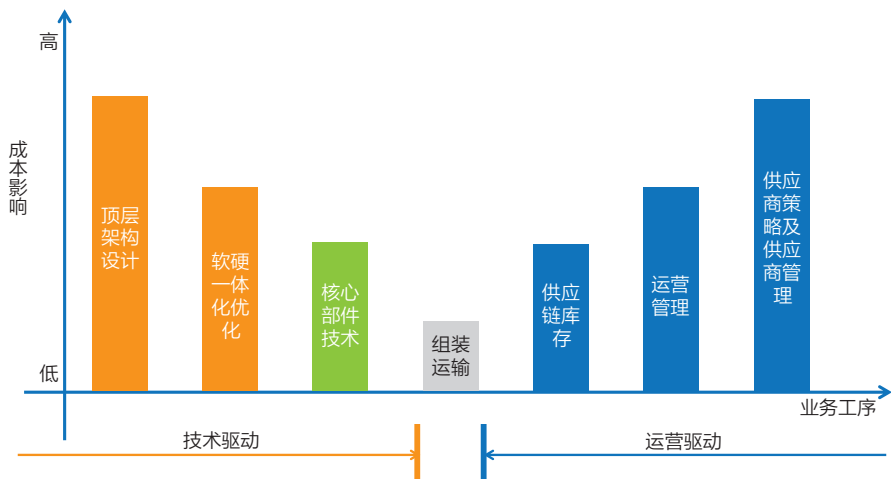


图 2-1 影响 TCO 因素的微笑曲线

- 影响 TCO 最大的因素不光是技术，也包括很多非技术因素。

2.1 静态 TCO 模型

静态 TCO 模型反映的是基于某个特定条件下的成本情况，比如在一个 5kW 机柜的数据中心，基于 10Gbit/s，1:2 收敛的网络架构，满部署服务器下，其总体成本的情况，简单讲分为固定投资 CapEx（Capital Expenses）及运营成本 OpEx（Operational Expenses）。CapEx 是指必须提前做投资，然后在一定时间内折旧的支出，如修建一个数据中心或者采购一批服务器，都属于固定支出。而运营成本是指在折旧之外，一个固定时间内运营设施所需要的成本，比如水费、电费、维修费用、人员成本等。因此，静态 TCO 可以以一个较为简单的公式展现出来

$$\text{TCO} = \text{Server CapEx} + \text{Server OpEx} + \text{Network CapEx} + \text{其他费用（如网络带宽成本等）} + \text{IDC CapEx} + \text{IDC OpEx}$$

图 2-2 是某数据中心在一定的生命周期内所支付的所有费用按照各个要素的占比分析图，从中可以看出服务器占比一半以上，其次是电费，接下来是网络设备和网络成本。对于数据中心来说，电费远远超过其他设施（如机电、土建）的占比，努力提高能效、降低 PUE 是实现数据中心成本下降的关键路径，这也是为什么在数据中心行业如此强调 PUE，并且国内外先进公司都致力于优化和降低数据中心 PUE 的原因。

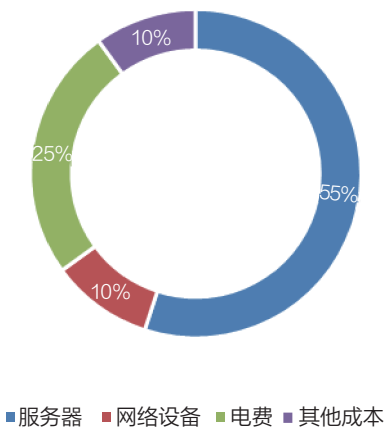


图 2-2 静态 TCO 比例

2.1.1 数据中心 CapEx

数据中心 CapEx 指的是数据中心一次性建设的投入成本，通常会按照至少以 10 年为周期进行折旧。按照设备和系统类型将其分为土建、电气、空调、柴油发动机机组、市电引入等主要要素。图 2-3 是某数据中心基础设施建设过程中各个要素的 CapEx 占比，从中可以看出市电 + 柴油发动机机组与电气系统设备约占整体投资的一半左右，工程相关费用约占整个 CapEx 投资的四分之一，其他设施加起来约占整个 CapEx 投资的剩余四分之一。

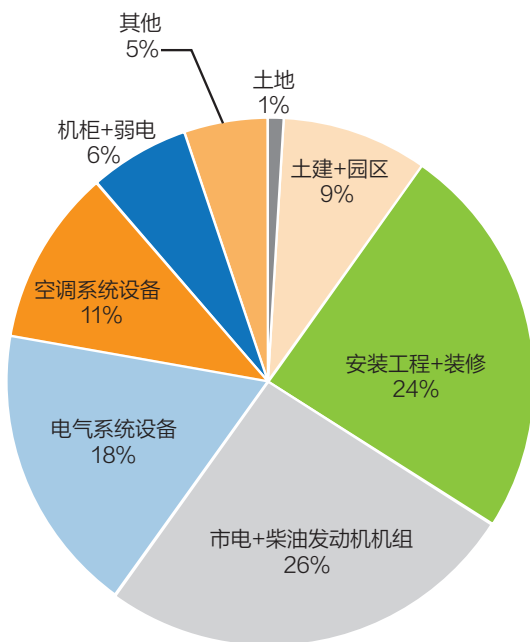


图 2-3 数据中心 CapEx 分析

根据数据中心 CapEx 各项投资的构成及比例，可以得出数据中心一次性建设投资的主要优化方法。

首先对于市电 + 柴油发动机机组，可以考虑采用 $N+1$ 代替 $2N$ 系统，以及其他提高系统利用率的方法，最终实现这部分投资比例的下降。对于电气系统设备和空调系统设备，主要采用降低系统冗余度和降低设备品牌依赖度的方法。面对国内日益增长的工程费和人工费用，采用工厂化和预制化的方法，减少现场工作量，并通过自动化和工业化提高工作效率。

2.1.2 服务器及网络设备 CapEx

从图 2-2 显示，服务器的 CapEx 在生命周期 TCO 中占比最大，其组成包含了服务器整机及其相关配件，通常来讲包含 CPU、内存、存储设备、网卡、服务器系统等。在不同的场景下，其成本的各自占比不同，典型服务器的静态 TCO 构成如图 2-4 所示。

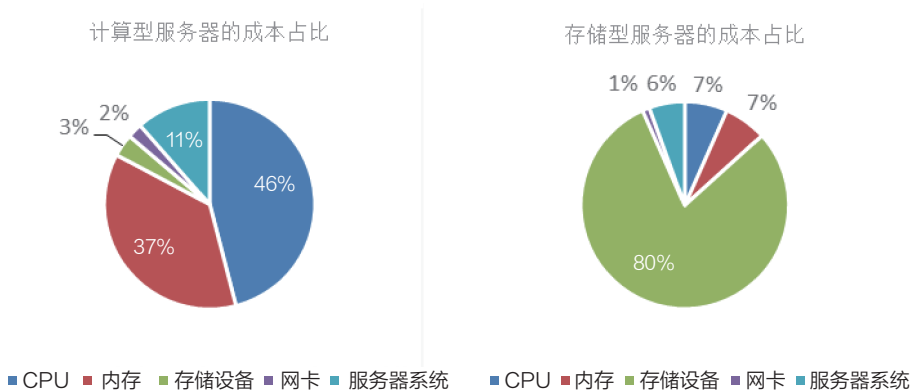


图 2-4 典型服务器的静态 TCO 构成

相比数据中心 10 年的折旧周期，服务器的折旧周期通常在 3 ~ 5 年。在一套数据中心中，网络设备的成本包含交换机、网络布线、光模块等设备分摊的成本。

2.1.3 OpEx

运营成本是指在折旧之外，一个固定时间内运营设施所需要的成本，比如水费、电费、维修费用、人员成本等。其中又分为数据中心的 OpEx 及服务器的 OpEx，其中数据中心的 OpEx 包含数据中心的电费（与 PUE 强相关）、人工等费用，该费用和运营水平、数据中心设计、规模、地点、气候和地理环境、当地税率等强相关；同样，服务器的 OpEx 也可以分为服务器的功耗费用（电费）及其维护成本。其中电费和服务器设计、应用场景、运行环境强相关，维护成本与服务器类型、要求的运维标准强相关。在静态 TCO 模型中，我们通常把数据中心和服务器的 OpEx 归一到单位 W 的成本上面，便于计算。

2.1.4 产能 /TCO

静态 TCO 实际上是一个成本数据，而对于用户来讲，实际上更关注的是单位成本下其基础设施所承载的业务能力，称为单位成本的产能。产能可以是计算能

力，也可以是存储能力，还可以是网络转发能力。比如一个承担搜索业务的集群，其整体静态 $TCO=A$ ，产生的能力为 10000 QPS (Query Per Second)，则其关注点为单位 QPS 的成本 $A/10000$ ；又比如一个承载虚拟机服务的集群，其集群 $TCO=B$ ，可产生的 4 core 8GB mem 的虚拟机实例的个数为 10000 个，那么其单位产能的成本则为 $B/10000$ 。又比如一个做对象存储的服务器集群，其 TCO 为 C ，提供的存储空间为 100 PB，其单位产能成本则为 $C/100$ 。

2.2 动态 TCO 模型

阿里巴巴曾经以单笔交易 / 支付成本来衡量基础设施的整体架构水平，其优点是从财务上能够直接从资本投入和销售额的角度给出端到端的投资收益比，然而交易额的产生不仅依赖于基础设施 (IaaS 层) 的架构水平，与中间件 (PaaS 层) 及业务平台 (SaaS 层) 的业务逻辑设计及软件架构水平也紧密相关。

在此，我们试图定义一个涵盖数据中心整体、跟实际业务使用情况、反映基础设施架构水平的 TCO 模型。我们期望该模型能够给业务方提供直观的单位业务量所需成本，驱动基础设施架构的代际演进并真实观测到每代数据中心 TCO 的不断下降。

数据中心的整体成本需要综合考量 IDC、网络及服务器的初期一次性固定投资 (CapEx) 及后续运营成本 (OpEx)。以任何单一专业成本的角度来衡量 TCO 都将是有偏的估计，例如从服务器的角度出发，将网络端口成本、电力成本、运维人员成本折合到总成本中，由于涉及网络收敛比、服务器在线数量变化等复杂因素影响，人们倾向于将网络端口成本和运维成本按照固定比例进行折算，使得 TCO 沦为一个一成不变的固定值。然而我们期望 TCO 是能够动态反映单位业务量所产生的总体成本，它应当是一个根据不同采样时段动态变化的值，而非静态值。因此，我们建议在衡量数据中心总体成本时，能够脱离单一领域的限制，从财务的角度分别计算各领域的 CapEx，按照既定的折旧模型再加上 OpEx 之后，计算出每年数据中心的整体拥有成本。当然，这只是我们期望模型的一个方面。

我们期望 TCO 模型能够贴近实际业务模型，展现出提供单位业务量所需的总体成本。这给我们提出了严峻的挑战，实际的互联网业务形态丰富多样，并且仍在快速增长当中，针对每个业务形态定制一个 TCO 模型，显然是徒劳的。因此，我们期望抽象出极少量的业务形态来衡量 TCO ，并以此指导业务方根据各自的业务逻辑进行转化和映射，评估出适合具体业务方的能力指标。例如，针对计算集中型业务，我

们可以提出一个 TCO 模型，其成本方面的考量可按照上述方法统计，而产能方面则可通过一个抽象的工具进行测量，例如阿里巴巴有一套面向计算集群的测试套件，其功能是通过多个单项压力测试的方法，加权评估集群的总体计算能力。

最终，我们获取数据中心某一时段的资本成本，并且测量到该时段基于典型场景的业务量，便可以计算出产生单位计算量所需的总体成本。这个比值则是我们需要的 TCO，使得 TCO 可以摆脱具体业务形态的依赖，而抽象出一套适合基础设施层面的架构水平衡量准则。

2.3 TCO 最优

在满足业务性能要求的前提下，如何做到总体 TCO 最优，包括 CapEx 和 OpEx 总体最优，是业务关注的核心问题。TCO 最优不仅要考虑产品本身的 CapEx 和 OpEx，还要考虑业务产品的市场竞争力，能够将业界最先进的产品和技术快速应用于上层业务中，充分挖掘技术红利。

因此，对最终用户来说，如何提供满足业务需要的计算、存储解决方案是非常大的挑战。我们需要能够根据不同业务特点，提供最适合业务诉求的解决方案，不仅包括计算、存储、网络等，也包含实现方式，是选择自建数据中心，还是选择混合云部署，或是完全放在公共云上。

从全世界范围内云计算的实践来讲，公共云已经深入人心，并在切实地推动各个行业的数字化转型。公共云是一种商业，更是一种基础设施的资源，客户从公共云厂商买的不是设备，不是机房，而是 IT 能力，让更专业的云服务商来做基础计算、运营维护的工作。

从财务的角度来看，自建基础设施和使用公共云计算，就类似于 CapEx 和 OpEx 的区别。从企业经营的角度看，CapEx 一次性投入大，不确定性强，且由于 IT 设备的生命周期所限，技术研发也必须跟上投入，而 OpEx 支出稳定，按需付费，不浪费资源，所以企业更倾向于将 CapEx 转为 OpEx，改善企业的现金流，这种逻辑不论对中小客户还是企业级客户，都是成立的，其本质是将 CapEx 投资的风险转嫁给公共云服务商，而对自己就是财务最优的配置。风险本身在于该公共云服务商体量是否够大，是否能够持续发展，是否能够提供稳定可靠的大规模服务，因此很多决策者选择头部公共云服务商，也是这个考量。

另外一个考量是稳定性，用户关注服务的不间断性，而公共云厂商提供的就是永不停机的计算服务，这是自建基础设施无法达到的，在省钱的基础上保证服务的永

续。所以公共云计算永不停机，让客户降低了服务中断的损失，也是成本的降低。

因此，最终用户在考虑如何搭建基础设施满足业务需求的时候，不仅考虑物理成本、运维成本，同时还需要关注资源利用效率、弹性、扩容效率和能力，以及容灾成本等全链条的综合因素。

例如，图 2-5 描述了一个通常的资源规划，平时日常需求计算量小，但一旦有新特性上线、营销活动、大促等，就必须要有足够的资源满足业务需求。这其实非常典型地反映了现代企业对计算资源需求的两个趋势——长期的向上增长，以及突然的爆发。在过去 20 年中，阿里巴巴是典型的企业代表，深切地感受到这一点。在没有云的时候，公司技术架构只能自建 IT 基础设施，需要有非常前瞻性的规划，如在前一年就要规划好后一年的容量规划，既能满足业务的需求，又不能过于超前，让基础设施产生大量闲置。

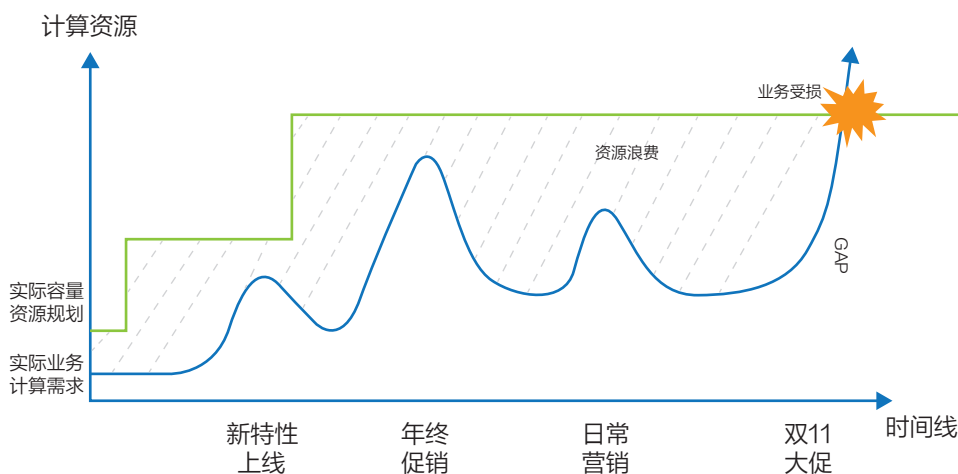


图 2-5 计算资源与业务曲线的弹性需求

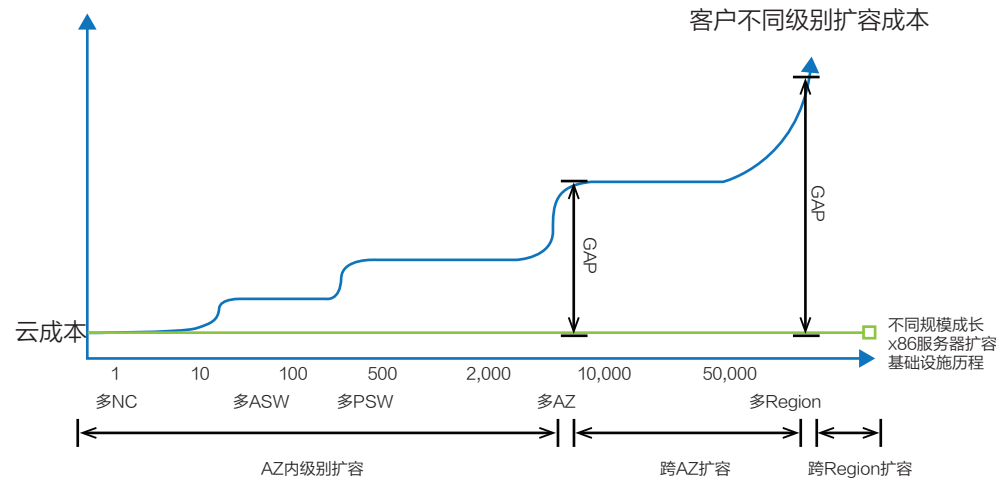
一般企业技术部门经历的实际情况是，为了满足业务的高峰需求，必须多买设备，即使这些设备很多时候只能闲置，同时，业务的增长速度和时点往往会超过所有人的估计，很多时候会击穿资源的上限，造成服务中断或延误。这样，计算力的曲线和业务的曲线永远是一对矛盾，企业当然希望两者之间差别越小越好，但实际的生产中要么发现 CPU 利用率极低，要么资源被“打爆”。原因来自两个方面：业务的增长很多时候是无法预测的，业务的需求并不是线性的，很多时候会因为促销或者过节而大幅度波动。

自建基础设施面临的问题是随着规模扩大，边际成本很难降低，而容灾成本急剧

提升，在使用公共云的情况下，可以获得由于极大规模带来的直接红利，使得基础设施的资源成本可控，同时可以弹性使用资源，因此平均使用成本保持不变，同时不为用不上的资源付费。

在涉及具体业务扩容的实际场景中，随着服务器规模的增加，扩容和容灾的成本不可避免地由于网络架构的扩张 / 升级、数据中心的扩张，甚至地域的扩张而在不同阶段存在阶梯式的上升，如图 2-6 所示。公共云的出现实际上解决了不同规模的

单位x86扩容成本



不同级别容灾基础设施成本

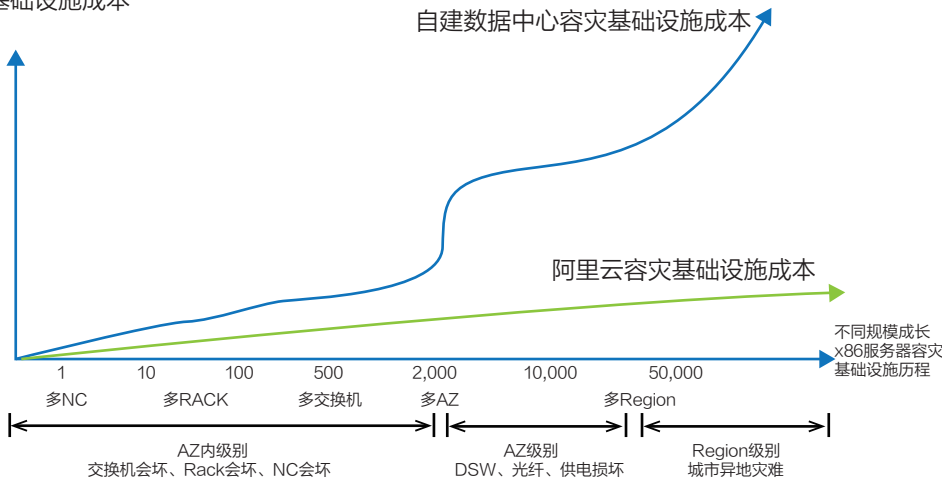


图 2-6 资源规划