



开放数据中心委员会

Open Data Center Committee

[编号 ODCC-2022-0500A]

数据中心算力碳效白皮书

开放数据中心标准推进委员会

2022-10 发布

版权声明

ODCC（开放数据中心委员会）发布的各项成果，受《著作权法》保护，编制单位共同享有著作权。

转载、摘编或利用其它方式使用 ODCC 成果中的文字或者观点的，应注明来源：“开放数据中心委员会 ODCC”。

对于未经著作权人书面同意而实施的剽窃、复制、修改、销售、改编、汇编和翻译出版等侵权行为，ODCC 及有关单位将追究其法律责任，感谢各单位的配合与支持。

编制说明

本报告由中国信息通信研究院云计算与大数据研究所牵头撰写，并在撰写过程中得到了多位专家的大力支持。

编写单位：

中国信息通信研究院

项目经理：

张一星 zhangyixing@caict.ac.cn

前言

2020 年 3 月，中共中央政治局常务委员会召开的会议上明确提出要加快 5G 网络、数据中心等新型基础设施建设进度。在数据中心加快建设部署的大背景下，总耗能也呈增长趋势。开放数据中心委员会 ODCC 测算数据显示，2020 年中国数据中心能耗总量为 939 亿千瓦时，碳排放量为 6464 万吨。预计到 2030 年，中国数据中心能耗总量将达到 3800 亿千瓦时左右，碳排放增长率将超过 300%。

数据中心中，服务器是最主要的业务耗能设备。在应对气候变化和践行“碳达峰”“碳中和”目标的大背景下，构建数据中心服务器碳效模型、降低其能耗及碳排放对于数据中心实现绿色发展和落实双碳目标具有重大意义。本《白皮书》梳理了全球主要国家的碳中和目标及数据中心降碳政策，分析了数据中心和服务器产业龙头企业的降碳路径，总结了服务器及芯片产业的节能降碳热点技术。同时，本《白皮书》首次定义了服务器算力碳效的概念，并构建了碳效模型，根据测试结果得出：随着服务器性能的提升，碳排放总量呈上升的趋势，但性能提升的速度超过碳排放增加的速度，单位算力的相对碳排在降低；不同产品技术不同，碳效存在一定差异，性能与碳排放呈现出的特点不同，在服务器使用周期为 5 年的情况下，单位性能得分的碳排放量在 20-60KG 之间。相关数据和结论将为数据中心根据业务需求选择性能与碳效最佳的服务器、降低数据中心整体碳排放量提供参考。

内容概览

1. 世界主要国家都宣布了碳中和目标，提出了严格的减排措施要求，国际碳中和行动的规模 and 影响日益扩大。互联网和数据中心龙头企业大都提出了 2030 年实现碳中和的目标，碳减排行动部署领先于其他行业。

2. 数据中心企业的碳减排工作聚焦于核心能耗设备（IT、制冷和供配电等），当前制冷和供配电方面已采取多项节能措施，PUE 持续降低，但能耗占比最高的 IT 设备节能降碳关注度较低，缩小制程和高阶封装技术是服务器及芯片企业的研究重点。

3. 为统筹兼顾服务器的碳排放量和算力性能，《白皮书》构建了 X86 架构 CPU 服务器的算力碳效模型，并提出了算力碳效概念：服务器使用周期内产生的碳排放与所提供的算力性能的比值。根据实测，在 5 年使用周期中，单位算力性能（单位 SPEC 得分）的碳排放量一般在 20-60KG 之间，能效水平较好的 CPU 排放可达到 30KG 以下。

4. 多样化的业务场景激发了服务器性能提升，同时也带来了碳排放总量增加。但服务器单位性能提升的速度超过单位碳排放量增加的速度，单位算力的相对碳排放在降低。

5. 算力碳效或将成为服务器设备设计、选型的重要指标。为提升算力碳效，除在服务器部件设计、制造、运行等各环节开展技术研究外，还需丰富不同架构（X86、ARM 等）不同需求（高性能计算、边缘计算、智能计算）的业务场景下，算力碳效的模型构建和测试分析方法，在理论上为数据中心碳中和奠基。

目 录

版权声明	I
编制说明	II
前言	III
内容概览	IV
一、 低碳政策背景	1
(一) 国际主要国家碳中和目标	1
(二) 国际主要国家数据中心降碳政策	2
(三) 中国碳中和目标	3
(四) 中国数据中心降碳政策	4
二、 数据中心和服务器低碳发展分析	6
(一) 国际数据中心龙头企业	6
(二) 国内数据中心龙头企业	6
(三) 服务器及芯片企业	9
三、 数据中心算力绿色低碳技术分析	12
(一) 服务器绿色低碳技术趋势	12
(二) CPU 绿色低碳技术	14
四、 服务器算力碳效模型研究	20
(一) 服务器耗能概述	20
(二) 服务器算力、能耗的相关研究	21
(三) 服务器算力碳效模型研究	23
(四) 服务器算力碳效模型实验与测试结果分析	25
五、 发展展望	29

（一） IT 设备能耗是未来节能降碳的核心要素 29

（二） 服务器设备选型时应考虑算力碳效 29

（三） 加强与业务场景匹配的碳效模型研究 29

一、低碳政策背景

（一）国际主要国家碳中和目标

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）测算，若要实现《巴黎协定》2℃控温目标，全球必须在 2050 年达到二氧化碳净零排放（又称“碳中和”），即每年二氧化碳排放量等于其通过植树等方式减排的抵消量；在 2067 年达到温室气体净零排放（又称“温室气体中和或气候中性”），即除二氧化碳外，甲烷等温室气体的排放量与抵消量平衡。目前，全球已有超过 120 个国家和地区提出了碳中和目标。其中，大部分计划在 2050 年实现，如欧盟、英国、加拿大、日本、新西兰、南非等。

欧盟在低碳转型方面较为积极，发展低碳能源的力度在全球也是处于领先水平，设定了到 2020 年所有新建筑都需接近零能源消耗的目标，并且需要 2050 年完成在《绿色协议》制定的整个欧盟的净零排放目标。2021 年 7 月 14 日，欧盟提出了一套系统完整的应对气候变化的提案，提出到 2030 年可再生能源占欧盟最终能源消耗 40%、2030 年新增燃油车销售较 2021 年减少 55%，到 2035 年将不再有新的燃油车销售以及 2026 年开始设立碳边境税等具体目标。美国能源新政总的目标是，到 2035 年，通过向可再生能源过渡实现无碳发电；美国政府承诺到 2030 年，温室气体排放水平比 2005 年减少 50%-52%，最终到 2050 年，使美国实现碳中和。为了实现建成“脱碳化”社会的目标，日本在 2021 年将其 2020 年 12 月发布的《绿色增长战略》更新为《2050 碳中和绿色增长战略》，提出在 2030 年之前将日本排放量在 2013 年基础上削减 46%。韩国也在 2020 年 10 月宣布到 2050 年实现碳中和，并在绿色新政中制定了碳中和路线图。新加坡 2021 年 2 月制定了一份可持续发展蓝图，强调了提高资源效率的必要性，包括能源效率、回收率和水的使用，希望通过减少污染、增加绿色空间和用于休闲目的的水道通道，促进可持续的流动性，提高宜居性。

（二）国际主要国家数据中心降碳政策

欧盟率先提出 ICT 行业的降碳目标，计划在 2030 年达到气候中性。并通过 2020 年欧盟数据中心能源效率行为准则的最佳实践指南和欧洲数据中心能源效率现状白皮书进一步细化和规范了数据中心 PUE、SUE、DCiE 等绿色指标。美国政府通过 2016 年提出的 DCOI 数据中心优化倡议、2014 年制定的 FITARA 联邦政府信息技术采购改革法案和 2010 年发起的 FDCCI 美国联邦数据中心整合计划等一系列举措，以整合和关闭数据中心、资源虚拟化、可用性、设定数据中心 PUE 及服务器使用率具体标准、退役老旧机器的方式，实现了数据中心数量减少 7000 个，大约占比 50%；数据中心 PUE 从平均 2.0 以上下降到近一半大型数据中心达到 1.5 甚至 1.4 以下，部分服务器使用率从 5%提升到 65%以上。新加坡在 2014 年发布了《绿色数据中心技术路线图》，基于国情，提供了新型节能数据中心未来的改进方向和指导意见，指出需在不影响系统性能和安全要求的情况下尽可能降低数据中心能源消耗，并建议研究提高冷却设备效率、IT 设备温湿度耐受能力、数据中心的资源调度和负荷分配集成优化能力。2021 年 1 月，日本相关主管部门（经济产业省）发布了《绿色增长战略》，提出“数据中心市场规模从 2019 年的 1.5 万亿日元提升到 2030 年的 3.3 万亿日元，届时实现将数据中心的能耗比 2019 年降低 30%”的目标。并将重点任务放在扩大可再生能源电力在数据中心的应用，打造绿色数据中心上。

表1 全球低碳数据中心相关政策规划

国家/地区	政策	内容
美国	DCOI 数据中心优化倡议 FDCCI 美国联邦数据中心 FITARA 联邦政府信息技术采购改革法案等	整合和关闭数据中心、资源虚拟化、可用性、设定数据中心 PUE 及服务器使用率具体标准、退役老旧机器的方式，实现了数据中心数量减少 7000 个，大约占比 50%；数据中心 PUE 从平均 2.0 以上下降到近一半，大型数据中心达到 1.5 甚至 1.4 以下，部分服务器使用率从 5%提升到 65%以上。

欧盟	《2020 年欧盟数据中心能源效率行为准则的最佳实践指南》 《欧洲数据中心能源效率现状白皮书》 《塑造欧洲的数字未来》	进一步细化和规范了数据中心 PUE、SUE、DCiE 等绿色指标。ICT 基础设施和数据中心应确保在 2030 年之前达到气候中性，在 2050 年成为世界第一个实现气候中性的大陆。
新加坡	《绿色数据中心技术线路图》	需在不影响系统性能和安全要求的情况下尽可能降低数据中心能源消耗，并提出提高冷却设备效率、IT 设备温湿度耐受能力、数据中心的资源调度和负荷分配集成优化能力等建议。
日本	《绿色增长战略》	发展目标：将数据中心市场规模从 2019 年的 1.5 万亿日元提升到 2030 年的 3.3 万亿日元，届时实现将数据中心的能耗降低 30%； 重点任务：扩大可再生能源电力在数据中心的应用，打造绿色数据中心等。

（三）中国碳中和目标

温室气体排放导致全球气候变化，带来海平面上升、地球极端天气灾害频发、生物多样性等问题，这使得控制温室气体排放成为了全球共识，中国作为发展中大国，积极应对气候变化。2020 年 9 月 22 日，国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话，宣布中国将“努力争取 2060 年前实现碳中和”的目标。中国努力争取实现碳中和目标的提出，对推进世界各国齐心协力控制全球变暖以及应对气候变化具有重要意义。

为规范企业温室气体的排放，限制碳排放量，国家出台了一系列核算和测评标准。2017 年 12 月，国家发展和改革委员会发布《关于做好 2016、2017 年度碳排放报告与核查及排放检测计划制定工作的通知》制定企业碳排放补充数据核算报告模板、企业排放监测计划模板。2021 年 3 月，生态环境部编制了《企业温室气体排放报告核查指南（试行）》，对企业温室气体排放的核查工

作进行规范，明确了核查程序、核查要点、核查工作流程、技术服务机构要求等。

考虑到不同行业的环保性质区别，国家也积极开展重点行业碳排放权交易试点工作，持续推进碳排放权交易市场建设。2011 年 10 月，国家发展和改革委员会发布《国家发展改革委办公厅关于开展碳排放权交易试点工作的通知》，推动在 7 个省市开展碳排放权交易试点工作。2015 年 1 月，国家发展和改革委员会发布《碳排放权交易管理暂行办法》，明确了我国统一碳排放权交易市场的基本框架。2020 年 12 月，生态环境部发布《碳排放权交易管理办法（试行）》，对碳排放配额分配和清缴，碳排放权登记、交易、结算，温室气体排放报告与核查等活动做出规定。2021 年 7 月，上海环境能源交易所发布公告，根据国家总体安排，全国碳排放权交易于 7 月 16 日开市，共纳入发电行业重点排放单位 2162 家，覆盖约 45 亿吨二氧化碳排放量。

（四）中国数据中心降碳政策

在碳达峰碳中和战略的大背景下，数据中心加速向绿色低碳发展。2021 年 7 月，工信部发布《新型数据中心发展三年行动计划（2021-2023）》，提出了“到 2021 年底，全国新建大型及以上数据中心 PUE 降低到 1.35 以下，到 2023 年底，新建大型及以上数据中心 PUE 降低到 1.3 以下，严寒和寒冷地区力争降低到 1.25 以下”的目标。2021 年 10 月 18 日，国家发改委等五部门出台《国家发展改革委等部门关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》，提出“新建大型、超大型数据中心原则上布局在国家枢纽节点数据中心集群范围内”；“对于在国家枢纽节点之外新建的数据中心，地方政府不得给予土地、财税等方面的优惠政策”，政策趋严，进一步明确优化数据中心总体建设布局的严控措施；2021 年 11 月，国管局、国家发展改革委、财政部和生态环境部等发布《深入开展公共机构绿色低碳引领行动促进碳达峰实施方案》，明确要求“新建大型、超大型数据中心全部达到绿色数据中心要求，绿色低碳等级达到 4A 级以上，电能利用效率（PUE）达到 1.3 以下。鼓励申报绿色数据中心评价，发挥示范引领作用”；2021 年 12 月，发改委、国家能源局发布《贯彻落

实碳达峰碳中和目标要求推动数据中心和 5G 等新型基础设施绿色高质量发展实施方案》，立足新发展阶段，构建新发展格局，明确提出全国新建大型、超大型数据中心平均电能利用效率降到 1.3 以下，国家枢纽节点进一步降到 1.25 以下，绿色低碳等级达到 4A 级以上。旨在有序推动以数据中心、5G 为代表的新型基础设施绿色高质量发展，发挥其“一业带百业”作用，助力实现碳达峰碳中和目标。

地方层面，2021 年 4 月，北京市经济和信息化局发布《北京市数据中心统筹发展实施方案（2021—2023 年）》，要求推进北京市数据中心绿色化、智能化、集约化发展。根据《实施方案》要求，各区需严格执行数据中心分区分类管理要求，结合第三方专业评测，摸清区域内数据中心运行情况，形成关闭、腾退、改造、新建清单，建立清单动态管理和部门联合监管信息共享机制，统筹推进数据中心发展。上海市 2021 年 4 月发布《数据中心建设导则（2021）》，要求新建数据中心综合 PUE 不高于 1.3，WUE 不高于 1.4。江苏省 2021 年 12 月发布《江苏省新型数据中心统筹发展实施意见》，要求“全省新建（扩建）大型及以上数据中心应达到绿色数据中心要求，PUE 低于 1.3，绿色低碳等级达到 4A 级以上。中小型数据中心 PUE 应不高于 1.5”。

二、数据中心和服务器低碳发展分析

（一）国际数据中心龙头企业

遏制全球变暖是应对气候变化的核心方向，当务之急是控制温室气体排放，为此，全球各数据中心企业在智能节能、可再生能源开发、资源回收利用等方面不断探索，力图降低数据中心的碳排放量。

微软计划在 2030 年实现碳负排放，预计 2050 年可清除公司自 1975 年成立以来直接或通过电力产生的所有碳排放。可再生能源使用方面，微软计划 2025 年实现数据中心、建筑、园区 100%采用可再生能源供应。亚马逊在 2019 年与 Global Optimism 组织共同发布了《气候宣言》，目标在 2040 年实现所有业务线净零碳排放。数据中心方面，亚马逊使用节能服务器，致力于提高设施和设备的能效，在服务器、存储和网络设备的设计和制造方面持续创新以减少能耗。Facebook 计划到 2030 年，其供应链、员工通勤和商务旅行将实现净零排放。2020 年，Facebook 运营均由 100%可再生能源支持，已达到净零排放。自 2007 年，谷歌宣布实现了碳中和，主要通过使用新能源、采购绿电等进行碳抵消，达到了碳排放量为零，并计划到 2030 年实现全天候无碳能源运营。同时，谷歌设计了使用寿命更长、更易复用的服务器，从旧服务器拆取零件再利用，或改造旧服务器以做新服务器使用，或把旧服务器的历史数据清除以做二手服务器卖掉。

（二）国内数据中心龙头企业

我国数据中心的参与者主要包括电信运营商、第三方数据中心运营商和互联网企业等。目前我国三大基础电信运营商仍占据主要市场，截至 2020 年三大基础电信运营商共占我国 IDC 市场约 54%的份额。此外，第三方服务商是除基础电信运营商外的重要组成部分，也占据较大市场份额。同时，基于长远的技术、业务发展需要，大型互联网企业逐渐规划自建数据中心，也成为一类数据中心持有和运营主体。

中国移动 2021 年发布《碳达峰碳中和行动计划》，提出到“十四五”期末，将企业碳排放控制在 5600 万吨以内，并提出了“六绿”的节能路径，分别为：以绿色架构、节能技术为驱动打造绿色网络；以能源消费电气化、绿电应用规模化为目标推进绿色用能；以科学制定设备节能技术规范、完善绿色采购制度为保障建设绿色供应链；以线上化、低碳化为方向倡导绿色办公；以拓展信息服务应用、推广“智慧环保”解决方案为依托深化绿色赋能；以加强宣贯教育、弘扬绿色低碳理念为抓手创建绿色文化。

中国联通为推进绿色数据中心发展，做出了许多努力：一是做好布局工作，将重点放在分类引导上，将数据中心选址在寒冷地区或靠近海水、湖水的地区，充分利用冷空气或冷水等自然冷源；二是绿色科技助力节能减排，包括搭建数据中心能耗管理平台，对机房内温度、湿度等指标进行统一监控监管；三是采用绿色能源。

中国电信 2021 年 8 月发布了碳达峰、碳中和“1236”行动计划，将重点从三个方面推进“双碳”工作，其中涉及数据中心的包括：建设绿色新云网，打造绿色新运营；构建绿色新生态，赋能绿色新发展；催生绿色新科技，筑牢绿色新支撑。

万国数据是国内首家同时提出在 2030 年实现碳中和及 100%使用可再生能源的数据中心企业。以 100%使用绿色电力为目标，万国数据提出通过提高可再生能源使用比例、建设绿色数据中心和提升运营效率来最大限度地减少对环境造成的影响。通过积极参与绿色电力交易、加强新能源投资与探索新兴技术等组合模式，不断降低数据中心的碳排放。

秦淮数据计划到 2030 年，将实现中国运营范围内所有新一代超大规模数据中心 100%采用可再生综合能源解决方案，直接参与投资的清洁能源装机容量将不少于 2GW。绿色数据中心部署方面包括新一代算力算法、数据中心选址、IT 设备、制冷系统、电力配网架构、供配电系统以及照明系统等设施。秦淮数据在数据中心的全生命周期进行节能降碳。

世纪互联坚持引领数据中心走高效、低碳、集约、循环的绿色发展道路，不断推进在可再生能源利用、节能方案评估、高效绿色运维、能效指标分级评估等方面的探索和创新，并将环保融入数据中心设计、建设等全生命周期的各个环节。

随着互联网的迅猛发展，行业对数据中心的计算能力和规模要求逐渐提高，在“碳中和碳达峰”背景下，互联网企业的低碳发展也逐渐受到重视。

阿里巴巴承诺 2030 年前实现自身运营碳中和，为降低数据中心产生的碳排放量，其实现“碳中和”有 4 个路径：从内部提高数据中心效率，降低 PUE；市场化采购可再生能源；投资建设分布式和大型集中式项目；采购绿证以及 CCER 等项目。服务器方面，阿里巴巴通过服务器全浸没液冷降低碳排放，同时，改配翻新旧服务器，循环使用备件。

腾讯承诺不晚于 2030 年实现自身运营及供应链的全面碳中和，同时实现 100%绿色电力。腾讯秉承“减排和绿色电力优先，抵消为辅”的原则，推进自身运营和供应链碳中和的实现。能源效率方面，降低运营中的单位能耗，提高资源效率；可再生能源方面，大幅提高可再生能源的使用比例，积极参与绿色电力交易并探索新能源项目投资开发；采用碳抵消等手段中和其余无法完全减排的部分。

百度在数据中心、办公楼宇、碳抵消、智能交通、智能云、供应链六个方面，全面构建 2030 年碳中和目标的科学实现路径，通过使用清洁低碳能源、提高能效来降低数据中心的碳排放。服务器方面，数据中心淘汰的服务器，核心零部件通常都被拆解回收再利用，其余无法复用的部分则由经筛选的回收商 100%回收处置。

京东提出到 2030 年，京东的碳排放量与 2019 年相比减少 50%。通过低碳设计，绿色采购、能源管理、高效的资源利用以及日常绿化运营等方面，推动数据中心绿色低碳发展。

（三）服务器及芯片企业

服务器是数据中心的核⼼部分，在数据中心硬件设备耗电量中所占⽐重最⾼，⽽服务器能耗⼜以 CPU 为主，其主要设计厂商包括 AMD、华为、Intel、NVIDIA 等，这些企业也通过多种措施，持续推动服务器及芯片行业的绿色低碳发展。

1. AMD

AMD 为减少二氧化碳排放，最大限度地降低供应链对环境的影响，进⾏了一系列技术创新以适应芯片在各应⽤场景下的性能和节能要求。下表是 AMD 目前在运营、供应链和产品⽤途⽅⾯的⽬标和完成情况。数据中心层⾯，提出在 2020 年到 2025 年内，将⽤于⼈⼯智能训练和⾼性能计算的 AMD 处理器和加速器的能效提⾼ 30 倍。

表 2 AMD 节能降碳⽬标及完成情况

阶段	运营	供应链	产品用途
完成情况	2014-2020 年，AMD 运营的温室⽓体排放量减少 38%	与行业平均⽔平相⽐，2020 年 AMD 晶圆生产的直接温室⽓体排放减少 73%	2014-2020 年，移动处理器的能效提⾼ 31.7 倍
⽬标	2020-2030 年，AMD 运营的温室⽓体绝对排放量减少 50%	到 2025 年，AMD 制造供应商都公开温室⽓体减排⽬标，80% 的供应商都使⽤可再⽣能源	2020 - 2025 年，将应⽤于⼈⼯智能训练和⾼性能计算的 AMD 处理器和加速器的能效提⾼ 30 倍

除聚焦产品技术革新，通过提供医疗、教育、制造、科学研究和其他关键需求的高性能计算解决方案助力节能降碳外，AMD 也积极参与采购可再⽣能源、号召员⼯和供应商参与环保⾏动。2020 年，AMD 在美国（Green-E 认证风能）和中国（iRECs 风能）采购了 3400 万千瓦时的可再⽣能源证书，占 AMD 全球能源使⽤量的 28%，足以为美国⼤约 4420 个家庭提供⼀年的电⼒。

2. Intel

Intel 承诺到 2040 年实现全球业务的温室气体净零排放，并制订具体目标，以提升 Intel 产品和平台的能源效率并降低碳足迹。将于 2030 年，在全球业务中 100% 使用可再生电力，并投资约 3 亿美元用于设施节能，以实现累计 40 亿千瓦时的能源节约。

能源使用方面，Intel 提出到 2030 年，水资源全部有效利用（节约共 600 亿加仑水资源）、100% 可再生能源使用率、零废弃物填埋量（60% 制造废物循环）、节约 40 亿千瓦时能源。并且，Intel 已经开发出相关解决方案，可集成到现有的能源网基础架构中，打造可适应能耗需求不断变化的电网。

技术升级方面，Intel 正与数据中心合作液浸式散热试点部署。该方案应用了新的原理，例如通过液浸式散热进行热量回收和再利用。温水态可捕获 IT 设备所产生热量的 99%，基本上没有能量损失。Intel 也开发了环保的可编程硬件和开放式软件，已在日本电信运营商 KDDI 的 5G 通信设施的数据中心内试验，使用的 Intel® 至强® 可扩展处理器、Intel 综合电源管理、人工智能功能，可根据需求调整功耗。

3. NVIDIA

NVIDIA 暂未公布实现碳中和的时间，但其为节能降碳做出了一系列努力。能源使用上，NVIDIA 计划到 2025 年，全球 100% 的电力使用来自可再生能源。技术革新上，加快研发 GPU 并推广应用，其拳头产品液冷 GPU 可加速提高效率，如果将全球所有运行 AI 和 HPC 的 CPU 服务器换为液冷 GPU，每年可节省高达 11 太瓦时的能源，相当于两座燃煤电厂的发电量，或道路上 170 万辆汽车的消耗¹；同时，也可以节约用水和用电，在实验室中引入液冷 GPU，借助液冷技术，系统仅需对封闭系统中的少量液体进行循环利用。此外，同等性能，液冷 GPU 耗电更少，NVIDIA 估计，液冷数据中心的 PUE 可能达到 1.15，远低于风冷的 PUE 1.6。

¹ 数据来源：《2021 NVIDIA 企业社会责任报告》

4. 华为

自 2019 年华为提出“让科技与自然共生”的绿色环保理念以来，华为持续积极应对气候和环境挑战，基于 ICT 技术，重点围绕“减少碳排放、加大可再生能源使用、促进循环经济”采取行动，用科技创新守护人类共同的家园。

为全面减少碳排放，华为制定了绿色环保相关政策，主要涵盖绿色运营、绿色产品和绿色供应链。可再生能源使用上，一方面，华为在自身运营中持续加大引入可再生能源。另一方面，华为数字能源已助力客户累计绿色发电 4,829 亿度，节约用电 142 亿度，相当于减少 2.3 亿吨碳排放。技术升级上，通过芯片技术升级、光交换实现设备能效显著提升，传统架构中，光模块通过 Serdes 与设备芯片连接，走线较长，功耗较大，共封装光学（CPO）把光收发器与设备芯片集成在一个 CMOS 衬底上，省去 CDR、DFE/CTLE/FFE 等功能，可有效提高能效，降低碳排放。

三、数据中心算力绿色低碳技术分析

（一）服务器绿色低碳技术趋势

服务器作为 IT 基础设施中最基本的算力设备，需承担的计算量越来越大。服务器运算能力提升的同时，服务器能耗也在成倍增长，性能提升增加了服务器的处理能力，但能耗增长给数据中心的维护难度和支出成本都带来了不少的压力。从数据中心技术层面看，如何在计算密集型工作负载和低能耗运行的矛盾之间找到解决方案，如何在满足技术需求的基础上尽可能降低碳排放，业界开展了大量技术研究和探索。

1. 整机柜技术

整机柜服务器是按照模块化设计思路打造的服务器解决方案，系统架构由机柜、网络、供电、服务器节点、集中散热、集中管理 6 个子系统组成，是对数据中心服务器设计技术的一次重大变革。整机柜服务器将供电单元、散热单元池化，通过节约空间来提高部署密度，其部署密度通常可以翻倍。集中供电和散热的设计，使整机柜服务器仅需配置传统机柜式服务器 10% 的电源数量就可满足供电需要，电源效率可以提升 10% 以上，且单台服务器的能耗可降低 5%。

当前，无论是互联网还是传统行业，超大规模还是中小规模，数据中心都面临有限空间、高效交付、便捷运维等挑战，作为服务器产品的新型交付形态和解决方案，整机柜产品可利用自身特性应对挑战。整机柜服务器的节能优势主要体现在两个方面：

散热方面，单机配置独立风扇进行散热。单台机器一般配置 6 个系统风扇来保障散热，48 台服务器所需要的风扇数量将达到 288 个，通过集中散热，将每个服务器节点的散热风扇移除，整合成一个散热风扇墙，布局在整个机柜的后部，48 个节点仅需 18 个风扇，数量减少 93% 以上，散热功耗降低 25% 以上。

电源方面，以单机作为服务器的最小组成单元，考虑系统的供电冗余，需要配置双电源模块以支撑。按照 48 台传统机架服务器来计算，需要 96 个电源

模块来实现双路供电，供电配置过高造成电源负载率过低，使得电源转换效率仅能达到 85% 左右，集中供电，单个机柜仅需 8 个 2400W 电源模块，即可满足 48 节点的供电，转换效率高达 94%，减少 90% 的电源数量，供电系统效率提升 9%。

2. 液冷技术

液冷服务器技术是采用特种或经特殊处理的液体，直接或近距离间接换热冷却芯片或者 IT 整体设备，具体包括冷板式冷却、浸没式冷却和喷淋式冷却 3 种形态。

液冷服务器可以针对 CPU 精确定点冷却，精确控制制冷分配，能真正将高密度部署带到前所未有的更高层级（例如 20kW~100kW 高密度数据中心），是数据中心节能技术的发展方向之一。

液冷散热的优点主要有：一方面风冷限制了单机箱功率密度增长，而液冷可大幅增加单机柜部署密度，节省机房空间；另一方面液冷配置能大幅提高散热效率，降低数据中心 PUE。

3. 高密技术

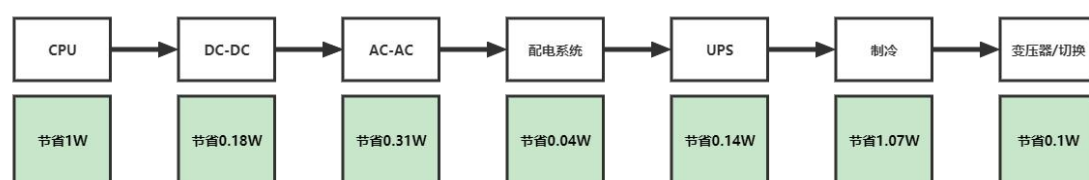
数据规模的持续增长及土地、电力资源集约化发展推动高密度数据中心发展。通过扩大机架和服务器规模来提高算力会导致数据中心运营成本的增加和数据中心场地空间的浪费。尤其在发达地区，这种扩大规模的建设模式难以实施，建设高密度数据中心成为推动数据中心算力提升的重要举措，高密度数据中心能够进一步增加数据中心功率密度和数据中心“每平方米”的计算能力，更好地满足大数据场景下的计算与存储需求。

高密度服务器部署将显著提升数据中心单位面积算力，降低数据中心运营成本。建设高密度数据中心的关键是部署高密度服务器，一方面降低了机体的重量和空间占用，提升数据中心单位面积算力，另一方面能够提升电源和散热系统的使用效率，降低数据中心运营成本。目前，IBM、思科、华为、浪潮、曙

光等国内外知名的互联网硬件厂商纷纷加速推进高密度服务器的产品设计与市场布局。

（二）CPU 绿色低碳技术

CPU 是服务器中的核心部件，一方面，服务器能耗 70%来自于 CPU，其自身能源消耗量较大；另一方面，CPU 的能耗将影响其他辅助设备，研究发现服务器 CPU 能耗降低 1W，由此带来自身及其他相应辅助设备的总能耗将降低 2.84W。如图 1 所示，我们可以从 CPU 出发，深入分析 CPU 绿色节能技术，以达到节能目的。



数据来源：服务器各部件功耗以及节能技术²

图 1 CPU 能耗路径

1. CPU 产品设计节能减排

实现低功耗必须采用覆盖技术、设计、芯片架构和软件的全面性方法。目前，业界最低功耗的处理器和系统级芯片开发人员不仅透过最佳化架构和材料来实现优势，也采用协同设计封装、电源、射频电路和软件来降低功耗。

在 CPU 产品设计阶段，协同设计成为发展趋势。设计的第一步是从性能和功耗出发，来确认产品的目标，并选择适合的制程技术，电子设计自动化（Electronic Design Automation, EDA）工具或将成为实现功耗目标的关键，

² 童琳.服务器各部件节能技术分析[J].通信与信息技术,2015(03):86-88+104.

但传统 EDA 工具进行功耗估计只在接近设计周期结束时才比较精确。未来，须在设计周期初期便进行精确的功耗估算。

在芯片设计时采用更高迁移率的新材料也能降低功耗，如在标准半导体产品线中加入磁性材料，使用碳纳米管和石墨烯等新材料等。Enpirion 公司在其半导体产品线中导入磁性材料，通过整合不同的金属合金，磁性材料可在很高的频率下执行作业，同时还能保持高能效。Semiconductor Research 公司资助 IBM 和美国哥伦比亚大学共同进行了一项研究计划——将电感整合于处理器上。这项研究可以透过芯片稳压功能在奈秒级时间内调节供电电压，实现工作负载匹配，因而使能耗降低。乔治亚理工学院 (Georgia Tech) 的实验室中证明石墨烯的互连性能超过铜。IBM 公司研究表明使用碳纳米管或石墨烯材料，可制造出低功耗、超高速的电晶体。

2. CPU 生产工艺节能减排

CPU 生产的工艺过程包括硅原料提纯、切割晶圆、影印、蚀刻、重复和分层、封装、测试。硅提纯是将原材料硅熔化，放进石英熔炉并加入晶种，以形成单晶硅。切割晶圆是将硅锭造整型成圆柱体再切割成片状的晶圆。一般来说，晶圆切得越薄，相同量的硅材料能够制造的 CPU 成品就越多。影印是用紫外线通过印着 CPU 复杂电路结构图样的模板照射硅基片，被紫外线照射的地方光阻物质溶解，不需要被曝光的区域被遮罩遮蔽。蚀刻使用的是波长很短的紫外光并配合大镜头，短波长的光透过石英遮罩的孔照在光敏抗蚀膜上，使之曝光，曝光的硅将被原子轰击，使得暴露的硅基片局部掺杂，从而改变区域导电状态，以制造出 N 井或 P 井。重复、分层是加工新的一层电路，再次生长硅氧化物，然后沉积一层多晶硅，涂敷光阻物质，重复影印、蚀刻过程，得到含多晶硅和硅氧化物的沟槽结构，重复多遍即可形成一个 3D 的结构。封装是将晶圆形态的 CPU 封入一个陶瓷的或塑料的封壳中，以便被安装到电路板上。最后是对 CPU 进行多次测试，以检查是否出现差错，以及这些差错出现的步骤。生产环节的节能技术主要以下两个热点。

①先进工艺制程

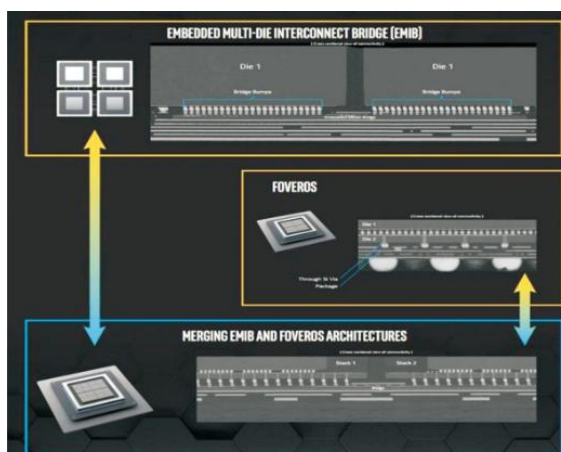
制程是指特定的半导体制造工艺及其设计规则。不同的制程意味着不同的电路特性。通常，制程节点越小意味着晶体管越小、速度越快、能耗表现越好。我们常说的 7nm, 3nm 等，是指的晶体管内部控制电子流动的栅极长度。一个晶体管是由源极(source)、漏极(Drain)、栅极(Gate)组成，电流从源极经栅极流向漏极，就代表晶体管导通，栅极就是控制导通与否的开关。而先进的制程就是将这个开关做的尽量窄，当栅极做窄之后，所需要的控制电压对应也会降低，从而整体降低了晶体管开关的功耗以及发热问题。目前，Intel 仍在使用 14nm 工艺，AMD 则使用了更为先进的 GlobalFoundries 的 12nm 工艺和台积电的 7nm 工艺。采用 7nm 技术意味着 AMD 可以构建更廉价、更快、更密集的芯片，集成更多核心的同时依然保持功耗在特定的范围内。

②先进封装技术

随着集成电路的集成度和复杂度不断提高，传统的片上系统(System on Chip, SoC)的设计和制造费用急剧攀升，导致摩尔定律难以维持，先进封装技术 chiplet 受到更多人的重视，该技术具有高效率、规模化程度高的特点，可以在降低生产成本的同时，提高芯片运转过程的工作速度。

Chiplet 技术是 SoC 集成发展到一定程度之后的一种新的芯片设计方式，它通过将 SoC 分成较小的裸片，再将这些模块化的小芯片(裸片)互联起来，采用新型封装技术，将不同功能不同工艺制造的小芯片封装在一起，成为一个异构集成芯片。目前，各芯片厂家针对 Chiplet 技术都有一定研究。

Intel 公司 2019 年利用一种名为 Foveros 的芯片互连方法，推出了 3D CPU 平台，为 CPU 处理器引入 3D 堆叠设计，可以实现芯片上堆叠芯片，而且能整合不同工艺、结构、用途的芯片。



图片来源：Intel

图2 Intel 公司使用 Intel bridge 和 Foveros 技术的 2.5D 和 3D 封装

AMD 公司第一代 EPYC 有一到四个同构的处理器芯片，通过增减 CPU 数量和缓存的容量划分不同的产品型号，2019 年开始使用 chiplet 生产第二代 EPYC（Rome）采用了异构设计，将 CPU 和缓存与所有的包括存储器控制器的 I/O 功能分离，8 个 CPU 通过 Infinity Fabric 技术与位于中央的 I/O 芯片相连。第二代 EPYC 计算复杂芯片的 86% 采用 CPU 和 L3 SRAM 存储器，使用了 7nm 技术、模拟电路和 I/O 单元，是高性能台式机和服务器的处理器的重要代表。目前，AMD 使用的技术叫做“3D V-Cache”（3D 堆叠技术），是在微凸点 3D (Micro Bump 3D) 技术的基础上，结合硅通孔 (TSV)，应用了混合键合技术 (Hybrid Bonding) 的理念，最终使得微凸点之间的距离只有 9 微米。

台积电将其前端芯片堆叠技术和后端封装技术整合到一个新的系统级集成项目中，并注册为 3D Fabric。在前端，台积电同时提供圆片上芯片 (chip-on-wafer, CoW) 和圆片上圆片 (wafer-on-wafer, WoW)，即集成芯片上系统 (SoIC)。在后端，台积电的 LSI (局部硅互连) 类似于 Intel 的 EMIB 或嵌入式多芯片互连桥。

日前，Intel、AMD、ARM、高通、台积电、三星、日月光、谷歌、Meta、微软等行业巨头成立 Chiplet 标准联盟，制定了通用 Chiplet 的高速互联标准

“Uni-versal Chiplet Interconnect Ex-press”（以下简称“UCIe”），旨在共同打造 Chiplet 互联标准、推进开放生态。

3. CPU 绿色低碳运行

计算机系统通过操作系统来管理硬件资源，实现系统资源分配与调度。目前计算机系统能效的软件优化技术主要在操作系统层面来实现，比较常见的技术有 DPM(动态电源管理)技术和 DVFS(动态电压频率调度)技术。DPM 技术是针对传统计算机系统电源管理系统只有挂起(suspend)和恢复(resume)两种状态，所有的硬件设备只能同时关闭或开启的缺点，可以根据设备运行状态（空闲或运行中）来动态管理外设，如只需 CPU 运行时关闭显示器等设备，以此达到节能目的。DVFS 则是根据计算机运行计算任务时，所需的计算力不同，按需调整处理器频率和系统电压，避免一刀切模式的频率调度模式造成的计算资源浪费以及因此导致的能耗。DPM 和 DVFS 的能效优化思路是一致的，都是通过对硬件资源的按需调度与分配实现，但是在实现细节上有些不同之处。

表 3 动态电源管理 DPM 与动态电压频率调整 DVFS 的异同

优化技术	动态电源管理 DPM	动态电压频率调整 DVFS
不同点	管理包括显示器、CPU、GPU、存储系统等多个外设，优化粒度较粗，优化效果较差 将系统外设组合为不同的性能状态集合，根据系统状态、用户交互动作切换外设状态，切换速度快(10ms 以内)	针对 CPU 频率及电压进行调度管理，能够在很细的粒度上进行优化，优化效果好 根据处理器负载变化，调整频率 level，负载采样间隔较大（系统默认 80ms）
相同点	在操作系统层面实现硬件资源管理，将硬件资源注册为操作系统的统一接口，通过系统调用来改变硬件状态	

①电源管理

一般地，供电电压和时脉速度越低，功耗就越低，但性能也受到影响。因此，最新的微控制器开始运用智能电源管理单元，自动调整工作电压与时脉速度来搭配工作负载。电源管理的基本思路是调整芯片不同部分的供电电压和时脉速度，以便在任何特定时间点都能匹配其工作负载，同时关闭未使用的电路。电源管理单元通常以状态机模组的方式建置，能够选择性地降低非关键功能的电压和时脉速度。

②动态节能技术

CPU 动态节能技术是用于降低服务器功耗的主流技术之一，一方面，通过选择系统空闲状态不同的电源管理策略，可以实现不同程度降低服务器功耗；另一方面，更低的功耗策略意味着 CPU 唤醒更慢，对性能影响较大，对于时延和性能要求高的应用，可通过软件停止 CPU 内部主时钟、总线接口单元和高级可编程中断控制器 (Advanced Programmable Interrupt Controller, APIC)，但仍然保持全速运行。

四、服务器算力碳效模型研究

（一）服务器耗能概述

开放数据中心委员会 ODCC 研究数据显示。2020 年中国数据中心能耗总量为 939 亿千瓦时，碳排放量为 6464 万吨。预计到 2030 年，中国数据中心能耗总量将达到 3800 亿千瓦时左右，碳排放增长率将超过 300%。服务器作为数据中心能耗的重要部分，其碳排放量不容小觑。据中国信通院统计，2021 年全国数据中心服务器数量 1900 万台，耗电量达 1100 亿千瓦时，每台服务器一年的碳排放量约 2600KG。

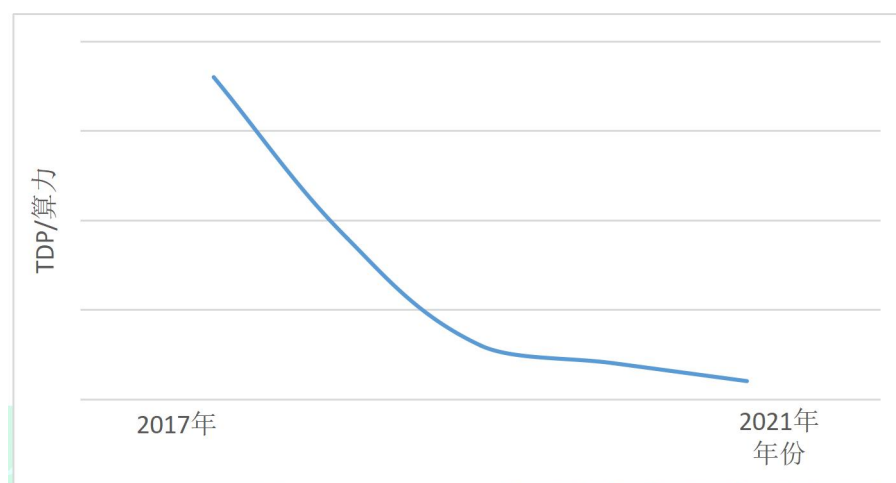
碳排放量与服务器功耗强相关，分析碳排放与算力的关系时，可先将算力与功耗结合来看，本项目研究团队统计了 2017-2021 数据中心服务器市场上的主流型号并根据市场份额计算出年均服务器热设计功耗 (Thermal Design Power, TDP) 及算力水平，并计算了单位算力 TDP 值。

$$\text{CPU}_{\text{理论浮点算力}} = \text{CPU 核数} \times \text{CPU 主频} \times \text{每时钟周期内执行的浮点操作数}$$
$$\text{单位算力 TDP 值} = \text{服务器 TDP} / \text{CPU}_{\text{理论浮点算力}}$$

$\text{CPU}_{\text{理论浮点算力}}$ 由服务器 CPU 相关参数计算得出，服务器 TDP 来源于主流服务器芯片厂商的官网。

对不同年份单位算力 TDP 值分析，可以看出：一方面，随着服务器性能的提升，单位算力 TDP 呈逐渐下降趋势；另一方面，服务器制造和芯片技术的

升级虽降低了服务器能耗，但其作用效果有限，服务器单位算力 TDP 的下降速度逐渐变慢。



数据来源：中国信息通信研究院

图 3 2017-2021 年服务器能源消耗情况

（二）服务器算力、能耗的相关研究

算力性能测试方面，SPEC 服务器应用性能测试是一个全面衡量服务器性能的基础测试，该测试是目前业界标准的、权威的基准测试之一。能耗测试研究方面，数据中心应用最广的服务器设备的能耗模型主要有加性模型和基于系统利用率模型。

加性模型指的是将整个服务器的能耗形式化成服务器子结构的能耗之和，核心思想是将拟合后的局部非参量函数组合在一起以建立目标模型，因此加性模型可以简单地看作是一种线性回归的改良版本，该模型的简单版本是考虑了 CPU 和内存的能耗，其模型为：

$$E(A) = E_{\text{CPU}}(A) + E_{\text{memory}}(A)$$

其中， $E_{\text{CPU}}(A)$ 和 $E_{\text{memory}}(A)$ 分别表示运行算法 A 时 CPU 和内存的能耗。稍复杂的模型对此进行了细化和完善，主要着眼于将更多的服务器能耗部件考虑进

模型，比如磁盘、I/O 设备、网卡等。此外，还有一些研究也将服务器主板的能耗考虑进去，或者干脆直接将这部分能耗看作一个常量加到模型中。

除了加性模型之外，另一类最常用的服务器能耗模型是基于系统利用率的模型。通常服务器系统能耗由静态能耗与动态能耗两部分组成，考虑到 CPU 是服务器各个子系统中能耗最大的部件，通常将 CPU 的利用率作为服务器系统能耗模型的变量，这类模型最早是将 CPU 的运行时钟频率作为变量纳入能耗模型中进行计算，可以看作基本数字电路级功率模型的一个扩展，将 CPU 的能耗形式化为：

$$P=C_0+ACV^2f$$

其中， C_0 为 CPU 的静态功率， ACV^2f 是其动态功率， A 为转换系数， C 为电容， V 为电压， f 为时钟频率。对于特定的硬件 A 、 C 、 C_0 均为常数。而 V 与 f 成正比，所以 CPU 的动态能耗可以认为是与其时钟频率成 3 次方关系，又因为 f 与系统运行速度 s 成正比例关系³，因此建立了动态功率 P 与运行速率 s ($s>0$) 之间的关系为：

$$P(s)=\sigma+\mu s^{\alpha}$$

其中， σ 为静态功率， μ 和 α 为常数，与具体的硬件设备有关， $\alpha>1$ ，此类模型另一个常用的方式是通过预估系统各个部件的功率情况，采用线性回归的手段得到服务器与各种资源利用率的函数关系。然而，这种基于回归分析的方法需要针对特定的服务器做大量的实验，以得到相应服务器的能耗参数。除上面 2 种模型，还有一种广泛应用的基于利用率的功率模型，模型提出者发现，线性功耗模型可以更加精确地追踪服务器系统的功率使用情况。在假设服务器处于关闭状态下功率近似为 0 的条件下，可以将任何一台服务器在任意 CPU 利用率 u 情况下的全系统功率形式化为表达式：

$$P_u=(P_{max}-P_{idle})\mu+P_{idle}$$

³ 王继业, 周碧玉, 张法, 等. 数据中心能耗模型及能效算法综述[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(8):17.

其中， $P_{\max}$ 和 P_{idle} 分别代表服务器在全速率工作和空闲状态的平均功率。

本次测算使用的评价模型中包含了 CPU、内存和存储三个主要部件，同时也考虑了不同负载下的运行工况，是将加性模型和利用率模型的综合，可以全面的测量服务器运行过程中的能效，进而计算出碳排放。

（三）服务器算力碳效模型研究

1. 服务器碳效模型设计

目前，尚无针对服务器算力碳效的模型基础，大多数研究聚焦在服务器能效模型的构建、节能方式的选择上，本文创新性的提出了服务器算力碳效的概念，并构建了以“服务器算力性能和碳排放量”为核心的碳效模型。服务器算力碳效的定义是服务器使用周期内产生的碳排放与所提供的算力性能的比值，即服务器单位算力性能的碳排放量。具体碳效模型如下。

$$\text{CEPS} = C/S$$

其中 C 是碳排放量； S 是服务器算力性能。

2. 服务器碳排放量定义

$$C = \eta * E_{\text{使用}}$$

碳排放量 C 是服务器使用寿命（以五年为基准）的功耗与碳排放因子的乘积。

η 是碳排放因子，根据国家气候战略中心发布的《2011 年和 2012 年中国区域电网平均二氧化碳排放因子》，取 η 为 0.6808KGCO₂/kWh。 $E_{\text{使用}}$ 是服务器在指定负载压力情况下的功耗。根据《数据中心服务器碳核算指南》中关于服务器使用阶段功耗的计算方法，同时考虑服务器通用基准测试场景，采用涵盖服务器 CPU、内存、存储 I/O 等三大基础部件在指定负载压力情况下的功耗数据，采用 Bench SEE 能效测试基准工具测试服务器在 7 种 CPU 通用负载、2 种内存通用负载、2 种存储 I/O 读写通用负载，从而计算出其全生命周期的能源消耗量，其计算公式如下：

$$E_{\text{使用}} = P_{\text{server}} * 24 * 365 * 5 * C_n$$

服务器能效测试负载工具 BenchSEE (Benchmark of Server Energy efficiency)，是由中国标准化研究院资源与环境分院主导开发的一款针对服务器产品能效测试的基准软件。Bench SEE 基准的设计参考了全球众多服务器厂家、芯片厂家、能效认证机构和 IT 节能领域科研机构的意见，可满足服务器市场应用对能效测评的需求。 P_{server} 可根据 BenchSEE 7 种 CPU 通用负载、2 种内存测试通用负载、2 种存储 IO 读写通用负载共 11 种通用负载工况下，各种负载情况下的能耗之和 $W_{\text{电耗}}$ （单位为 kWh）与测量时间之和 T （单位为 h）计算，通过 $W_{\text{电耗}}/T$ 计算得到 P_{server} 。基准周期为 5 年。

3. 服务器算力性能定义

根据服务器算力碳效的概念——服务器算力碳效的定义为产生的碳排放与服务器所提供的算力性能的比值，即服务器单位算力性能的碳排放量。针对服务器算力性能，本《白皮书》先从理论上计算了服务器使用寿命（以五年为基准）的算力性能，用其 50% 的理论峰值浮点算力表征，具体如下式：

$$S_{\text{理论}} = \text{CPU}_{\text{理论浮点算力}} * 60 * 60 * 24 * 365 * 5 * 50\%$$

再测试了服务器算力实际值，用 SPEC（一套行业标准的 CPU 密集型基准测试套件，可测试用户使用不同应用程序时的计算性能，并综合打分）进行测试。使用 SPECrate 2017 测试整型并发速率和浮点并发速率，SPECrate 2017 Integer 和 SPECrate 2017 Floating 得分，并将二者按 50%、50% 的比例加权平均得到的一个表征计算性能的得分，具体公式如下：

$$S_{\text{测试}} = 50\% * \text{SPECrate 2017 Integer} + 50\% * \text{SPECrate 2017 Floating}$$

4. 测试范围

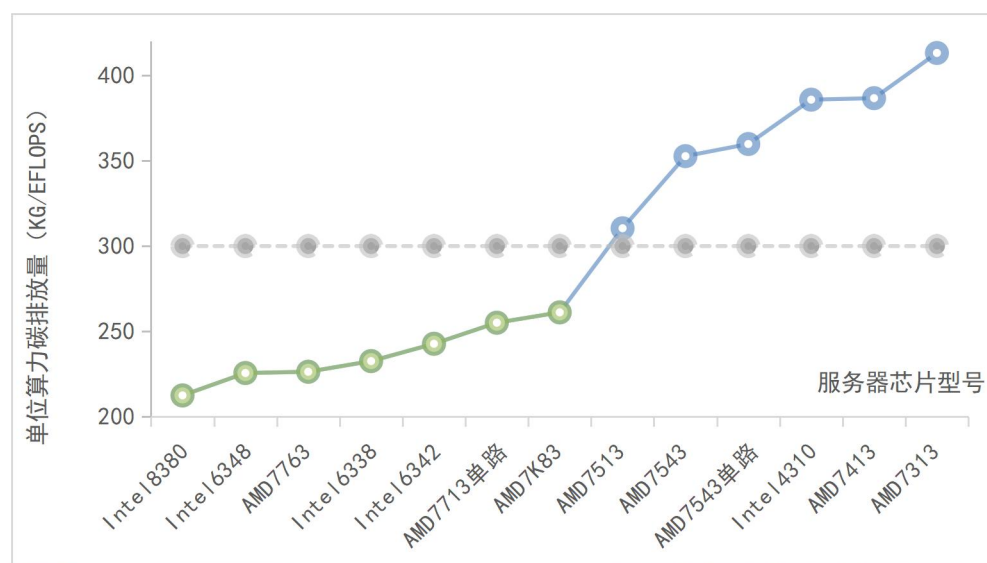
测试选取了业界主流的服务器芯片产品，《白皮书》选取了 AMD 和 Intel 的最新系列的不同型号服务器 CPU 的测试结果进行展示分析。具体服务器 CPU 型号及参数见下表。

表 4 Intel 和 AMD 的最新服务器 CPU 型号及参数

序号	厂家	型号	CPU核数	主频(GHz)
1	AMD	7713单路	64	2.0
2	AMD	7763x2	128	2.45
3	AMD	7513x2	64	2.6
4	AMD	7K83x2	128	2.45
5	AMD	7543单路	32	2.8
6	AMD	7413x2	48	2.65
7	AMD	7313x2	32	3.0
8	AMD	7543x2	64	2.8
9	Intel	6338x2	64	2.0
10	Intel	6348x2	56	2.6
11	Intel	8380x2	80	2.3
12	Intel	6342x2	48	2.8
13	Intel	4310x2	24	2.1

（四）服务器算力碳效模型实验与测试结果分析

1. 算力碳效理论值分析



数据来源：中国信息通信研究院

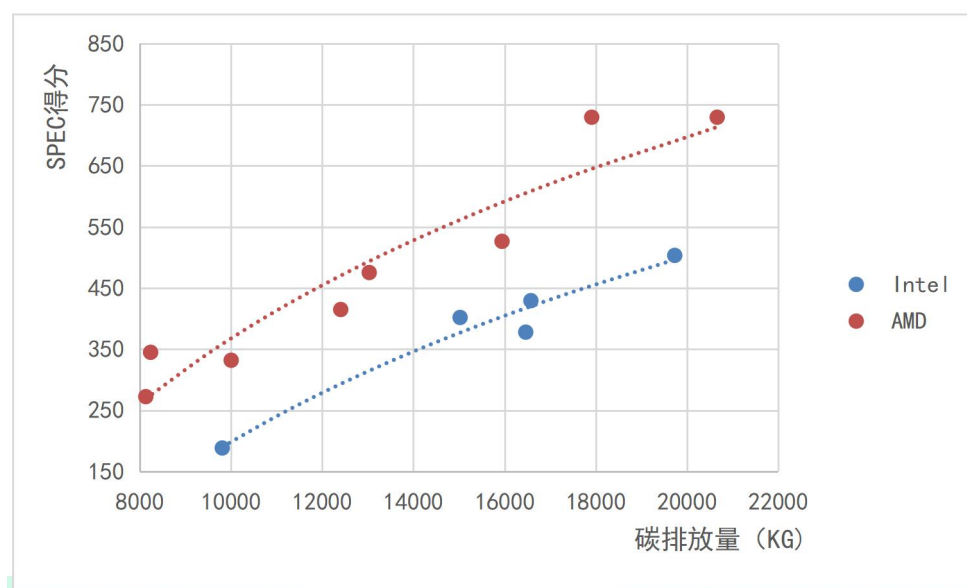
图4 服务器使用阶段内算力碳效理论值

根据测算，在服务器5年使用周期内，AMD和Intel的最新服务器的二氧化碳排放量在8吨到21吨之间，理论算力水平在22-93EFL0PS之间。分析服务器使用阶段的算力碳效理论值，如上图所示，可以看出：算力碳效的理论值在200-450KG/EFL0PS之间，高端产品的算力碳效理论值小于中低端产品；算力碳效理论值小于300KG/EFL0PS的产品中，Intel占比相对较大，这可能与当前AMD的服务器芯片不支持AVX-512指令集有关。根据Intel公开发布的文件资料显示，Intel的CPU在运行AVX512指令集时基频会一定程度降低，产业界对AVX512指令集环境计算CPU的理论算力性能的计算仍存在不同的看法。

2. 算力碳效实测值分析

FLOPS是服务器理论算力的代表，产业界在数据中心应用过程中，更多以实测值为参考，因此白皮书重点围绕实测值进行分析，建议以算力碳效实测值作为服务器实际应用分析的指标。

根据测试结果，挖掘SPEC分数和碳排放量之间的相关关系，如下图所示，可以看出：



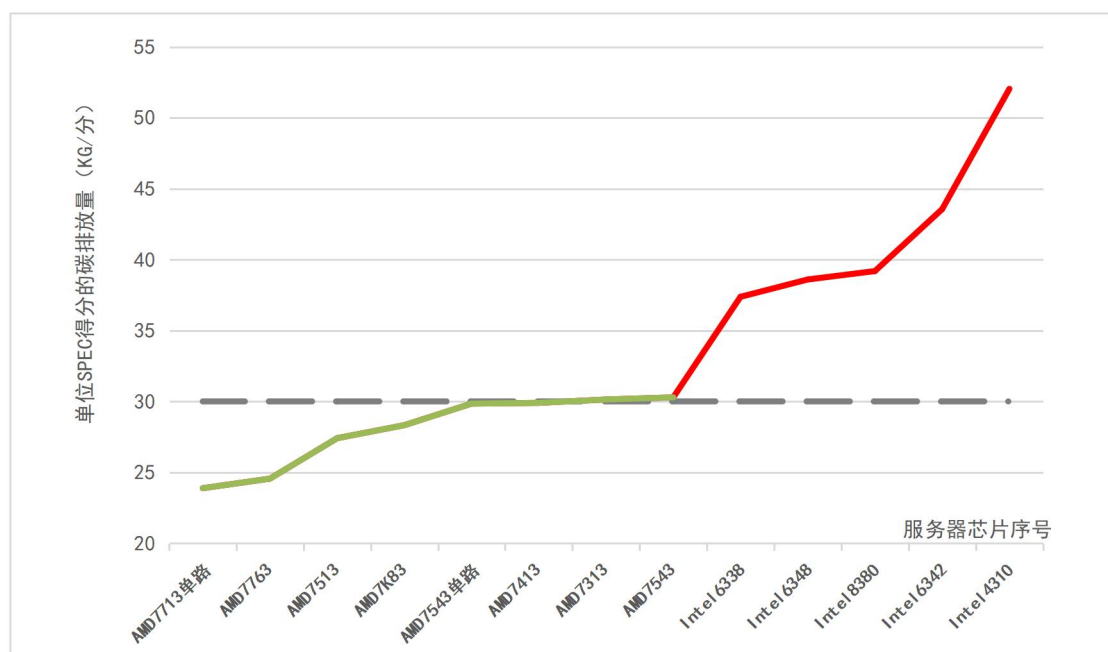
数据来源：中国信息通信研究院

图 5 服务器使用阶段 SPEC 分数⁴与碳排放量的相关关系

1. 随着 SPEC 分数的提升，碳排放总量呈上升的趋势，但性能增加的速度超过碳排放增加的速度，即性能得分与碳排放量相关关系曲线的斜率越来越小。数据中心可根据自身业务需求配备性能适宜的服务器，尽量降低数据中心整体碳排放量。以 SPEC 得分 8,000 为例，在更新换代时，21 台 Intel® 至强® Gold 6342 可使用 16 台 Intel® 至强® Platinum 8380 或 11 台 AMD EPYC™ 7763，服务器台数最多可减少 10 台，其使用周期内的碳排放量最多减少 43%，相当于 8100 多棵树一年吸收的碳排放量。

2. 不同厂商因使用的技术不同，产品存在一定差异，性能与碳排放的关系呈现出的特点不同。芯片厂商都致力于推动计算向绿色节能方向发展，在满足计算性能要求的同时兼顾绿色低碳，相同性能表现情况下，目前，AMD 产品的碳排放量基本低于 Intel 的产品。

⁴ 分数取值来源于 SPEC 官网公开数据，具体材料可参见 <https://www.spec.org/>



数据来源：中国信息通信研究院

图 6 服务器使用阶段内算力碳效实测值

结合测算结果，从服务器算力碳效定义出发，发现 CPU 性能越好，可提供的计算能力更优越，所消耗的能量也越多，带来的温室气体排放越多，但服务器算力碳效即单位算力性能的碳排放量反而会降低。根据测试结果，在服务器使用周期为 5 年的情况下，单位算力性能得分的碳排放量在 20-60KG 之间，其中 AMD 服务器单位算力性能得分的碳排放量相对更低，大都低于 30KG。

五、发展展望

（一）IT 设备能耗是未来节能降碳的核心要素

数据中心能效衡量标准主要是 PUE，目前被国内外数据中心行业广泛使用，其定义为数据中心的总能耗与 IT 设备能耗的比值，PUE 值越低，说明数据中心用于 IT 设备以外的相对能耗越低。但是，PUE 指标直接反映的是数据中心总能耗和 IT 设备之间相对比值的大小，无法反映出数据中心的总用电量是否降低。通过对数据中心的 IT 设备能耗、制冷系统能耗、供配电及辅助照明能耗占比分析，可得 IT 设备能耗在数据中心中能耗占比在 60%至 70%左右，IT 设备能效提升，IT 设备本身的耗电量将降低，其相应的供电和散热设备能耗也会随之下降，进而带来数据中心总能耗下降，实现数据中心的降本增效。

（二）服务器设备选型时应考虑算力碳效

当前数据中心在进行服务器设备选择时都更侧重于计算性能指标，以确保设备可提供业务需要的算力资源，服务器性能的提升也带来更高的功耗和碳排放。服务器产品作为运营过程中核心的 IT 设备，其生命周期的碳足迹和算力碳效表现对总体运营温室气体排放控制是至关重要的。当前，政府机构、社会组织和企业投资方已经逐渐将对环境的量化影响作为核心评价指标之一。经测算服务器能耗占数据中心 IT 设备的 90%以上。未来需对服务器各个部件（CPU、内存、风扇、磁盘、网卡、主板元器件等）进行工艺和功耗智能管理等方面研究，寻找各环节突破点，提高服务器算力碳效水平进而最大程度的降低数据中心碳排放。

（三）加强与业务场景匹配的碳效模型研究

算力资源已渗透到生活的方方面面，其内涵也逐渐丰富起来，算力基础设施的应用涵盖了高性能计算、边缘计算、智能计算、通用计算等场景。基于目前市场出货量情况，本次研究主要通过 BenchSEE 和 SPEC 两款测试基准软件对 X86 架构 CPU 服务器的通用场景开展研究和分析，后续将对 ARM 等其他架构服

务器进行测试和分析。两款软件针对 CPU、内存、存储设计了几十种不同的压力场景，但是依然不能完全满足目前多样化应用需求，在实际使用时基于这两种测试基准的性能分和碳排放数据无法实际体现所有场景下服务器的表现。未来，通过对不同业务场景的数据中心碳效模型研究，可从理论上为数据中心能效优化打下基础。