

中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2019

中国制冷学会数据中心冷却工作组 组织编写

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

责任编辑：张文胜

责任校对：

**中国数据中心冷却技术年度发展研究报告
2019**

中国制冷学会数据中心冷却工作组 组织编写

*

中国建筑工业出版社出版、发行（北京海淀三里河路9号）

各地新华书店、建筑书店经销

北京鸿文瀚海文化传媒有限公司制版

印刷

*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张： 字数： 千字

2020 年 月第一版 2020 年 月第一次印刷

定价： 元

ISBN 978-7-112-

(35799)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

（邮政编码 100037）

编 写 人 员

第 1 章 陈焕新

- 1.1 陈焕新 谭时锴
- 1.2 陈焕新 唐小谦
- 1.3 李正飞 程亨达
- 1.4 李正飞 程亚豪

第 2 章 陈焕新

- 2.1 陈焕新 王誉舟
- 2.2 陈焕新 刘 倩
- 2.3 李正飞 刘 倩

第 3 章 诸 凯

- 3.1 诸 凯
- 3.2 魏 杰
- 3.3 魏 杰
- 3.4 魏 杰
- 3.5 诸 凯 魏 杰
- 3.6 魏 杰 诸 凯
- 3.7 魏 杰
- 3.8 魏 杰
- 3.9 诸 凯

第 4 章 李红霞

- 4.1 李红霞 程 序 张 弢
- 4.2 罗海亮 李 印
- 4.3 肖后强 夏春华 马 德

第 5 章 邵双全

- 5.1 邵双全
- 5.2 邵双全 余 钦 谢晓云 才 华 赵 策
- 5.3 黄 翔 田振武 金洋帆 谢晓云 才 华 赵 策
- 5.4 王 飞

第 6 章 李 震

6.1 李 震

6.2 何智光 习浩楠

6.3 王建民 于谋川

第 7 章 张玉燕 郑竺凌

7.1 雷建军 谢 光

7.2 吕 楠 李程贵 候晓雯

7.3 窦海波 张晓辉 杨宜楠

7.4 宋晓昕 李国强

7.5 李 震 何智光

第 8 章 赵国君

8.1 董丽萍 张晓宁 王云鹏

8.2 吴延鹏

前 言

云计算、5G 移动通信、边缘计算、物联网、人工智能等产业迅猛发展带动数据中心持续高速增长的同时，IT 设备使用量和服务器密度与日俱增，这对数据中心的运载能力、节能能力等方面提出了更大的挑战！

旨在全面总结我国数据中心冷却技术的发展现状与趋势，中国制冷学会“数据中心冷却工作组”连续三年出版了《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告》系列，备受业界关注，得到了同行的高度认可。为进一步总结数据中心冷却技术的发展现状，工作组再次组织国内外专家、学者及其企业编写《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2019》，此版报告吸收了前三版报告的精华之处，修正了存在的问题，更加全面地梳理了国内数据中心冷却的产业现状、发展趋势、技术热点、高效设备、相关政策等，以供产业界参考。

本书通过对我国当前数据中心冷却行业的相关调研，详细总结了我国数据中心的发展现状与趋势，对我国数据中心能耗进行了合理的预测。针对数据中心冷却系统能耗提出了综合 COP 评价指标，可以更加准确且全面地反映数据中心冷却系统的能效情况。液冷技术作为数据中心冷却技术的后起之秀，逐渐得到了广泛的应用，在本书的第 3 章中介绍了液冷及技术的基本理念、构成、应用与思辨。第 4 章和第 5 章是对前三版报告内容的升华，融合了前者的经典之处，并对空调空气冷却形式和冷源技术与设备做出了全新的介绍。为了更全面地介绍数据中心冷却设备，本书新增了系统调试与故障分析章节，详细介绍了冷却系统的典型故障和调试方式。数据中心冷却工作组组织相关专家学者对我国数据中心运行维护案例进行了评选，并在此版报告中对典型高效冷却数据中心作出了详细介绍，为相关企业提供了参考。此外，本书最后一章更新了国家及地方关于数据中心建设的相关政策走向。全书内容丰富详实，图文并茂，数据准确，为了解我国数据中心冷却技术发展状况和趋势提供了最新的具有较高参考价值的资料。

中国制冷学会数据中心冷却工作组成员单位对本书编写工作提供了的大力支持与辛勤付出，在此表示衷心的感谢！

书中若有错漏之处，恳请读者批评与指正！

目 录

第 1 章 数据中心及数据中心冷却概况	1
1.1 我国数据中心发展现状	1
1.1.1 我国数据中心市场发展现状	1
1.1.2 我国大规模数据中心区域分布情况	5
1.1.3 我国数据中心新建数量、规模及态势分析	8
1.2 我国数据中心发展趋势	11
1.2.1 我国数据中心规模和数量增长迅速	12
1.2.2 我国数据中心能耗效率不断提高	13
1.2.3 数据中心产业由中心城市向中西部地区转移	15
1.2.4 在网登记部分数据中心统计分析	16
1.3 我国数据中心冷却系统概况	23
1.3.1 数据中心评价方法及能效现状	23
1.3.2 数据中心冷却系统综合 COP 评价指标的建立	25
1.3.3 综合 COP 评价指标的参考标准	26
1.4 我国数据中心冷却系统运行存在的共性问题	26
1.4.1 产业规模增长迅速,旧有设备能效水平较低	27
1.4.2 早期建设机房局部热点现象突出	27
1.4.3 新建机房设备设计与运行负荷不均衡	28
1.4.4 部分小型机房扩容导致室外机散热环境恶劣	29
1.4.5 运维经验不足导致制冷系统故障	29
本节参考文献	30
第 2 章 数据中心冷却理念及思辨	32
2.1 数据中心冷却重要性分析	32
2.2 冷却排热机理	34
2.3 常用冷却形式	40
本节参考文献	43
第 3 章 数据中心液体冷却技术	45
3.1 服务器芯片风冷散热技术存在的问题	45
3.1.1 传热效率相对较低	45
3.1.2 风冷散热器成本较高	45
3.1.3 风冷冷散器的散热极限	46
3.2 服务器液冷散热方式的提出	46
3.3 数据中心液冷方式的技术现状	48

3.4	液冷方式应用的基本理念	49
3.5	服务器芯片液冷散热的形式	50
3.5.1	间接式热管水冷散热技术	51
3.5.2	散热器直接贴附 CPU 芯片表面散热	52
3.5.3	导热型水冷散热器应用技术现状	52
3.6	服务器整体浸没式冷却	54
3.7	对应于高密度封装技术的快速发展, 提高从芯片到装置的高热流冷却能力	56
3.8	对应于不断提高的能源利用效率要求, 降低 ICT 装置和设施环境冷却用电力消费	59
3.9	液/气双通道散热数据中心(中国移动南方基地)典型案例介绍 ^[3-19]	61
	参考文献	63
第4章	空调空气冷却形式	64
4.1	空气冷却系统类型及特点	64
4.1.1	房间级冷却方式	64
4.1.2	列(行)间级冷却方式	67
4.1.3	机柜级冷却方式	68
4.2	冷却输配系统及冷源排热过程分析	69
4.2.1	空调末端换热	69
4.2.2	冷冻水供回水温度	70
4.2.3	板式换热器换热	71
4.2.4	冷却塔换热	71
4.3	冷却系统设计中节能思路	72
4.3.1	冷水主机、输配系统(水泵、冷却塔)、末端设备配置	72
4.3.2	空调系统节能设计运行	77
第5章	高效冷源技术与装备	82
5.1	综述	82
5.2	高效制冷机组	82
5.2.1	磁悬浮离心冷水机组	82
5.2.2	变频离心高温冷水机组	84
5.2.3	变频螺杆高温冷水机组	85
5.2.4	冷水机组+自然冷却系统	86
5.3	高效蒸发冷却系统	96
5.3.1	蒸发冷却制取冷风技术	97
5.3.2	蒸发冷却制取冷水技术	100
5.3.3	蒸发冷却制取冷媒技术	105
5.3.4	小结	106
5.4	高效热管冷却系统	106
5.4.1	回路热管冷却系统思辨	106

5.4.2 重力型回路热管	110
5.4.3 液泵辅助驱动回路热管冷却系统	113
5.4.4 气泵（压缩机）驱动回路热管冷却系统	118
5.4.5 小结	124
5.5 总结展望	125
参考文献	125
第六章 冷却系统调试与故障分析	127
6.1 冷却系统调试	127
6.1.1 调试的目的	127
6.1.2 风冷系统调试	127
6.1.3 水冷系统调试	131
6.1.4 假负载测试	132
6.2 设备及系统故障分析	136
6.2.1 冷水机组故障	136
6.2.2 冷却塔故障	139
6.2.3 精密空调末端故障	140
6.2.4 加湿机组故障	141
6.3 运行与维护	142
6.3.1 运行维护基本要求	142
6.3.2 冷却系统的运行管理	143
6.3.3 冷却系统的维护管理	146
本章参考文献	148
第七章 高效冷却数据中心典型案例	149
7.1 东江湖数据中心	149
7.1.1 数据中心简介	149
7.1.2 冷却系统概述	149
7.1.3 测试数据	151
7.1.4 小结	152
7.2 中国移动（呼和浩特）数据中心	153
7.2.1 数据中心简介	153
7.2.2 冷却系统概述	153
7.2.3 测试数据	159
7.2.4 小结	162
7.3 中国联通深汕云数据中心	162
7.3.1 数据中心简介	162
7.3.2 冷却系统概述	163
7.3.3 测试数据	167
7.3.4 小结	171
7.4 廊坊华为云数据中心	171

7.4.1 数据中心简介	171
7.4.2 冷却系统概述	172
7.4.3 测试数据	177
7.4.4 小结	179
7.5 中石油吉林数据中心示范机房	179
7.5.1 数据中心简介	179
7.5.2 冷却系统概述	179
7.5.3 测试数据	185
7.5.4 小结	188
第8章 国家及地方对数据中心建设相关政策走向及相关标准	189
8.1 2019 国家相关部门发布的有关数据中心建设及管理相关政策、规范等 部分内容介绍	189
8.2 地方相关政策	192
8.3 《数据中心能效监测与评价技术导则》	194
附录 A (资料性附录)	197
附录 B (资料性附录)	198
附录 C (资料性附录)	199

第 1 章 数据中心及数据中心冷却概况

1.1 我国数据中心发展现状

1.1.1 我国数据中心市场发展现状

互联网数据中心（Internet Data Center，IDC）起源于 20 世纪 90 年代中期，当时 IDC 存在的意义只是对大型主机进行维护和管理。随着进入到信息化发展的新阶段，云计算、大数据、物联网、人工智能、5G 移动通信等信息技术快速发展，同时传统产业也在经历数字化的转型，数据量呈现几何级增长，因此 IDC 流量和带宽也成指数增长。IDC 的发展由普通服务器机房向大规模数据中心演进。

据中国产业信息网《2018 年全球数据中心建设行业发展趋势及市场规模预测》指出，全球数据总量将从 2016 年的 16.1ZB 增长到 2025 年的 163ZB（约合 180 万亿 GB），十年 10 倍的增长，复合增长率为 26%。

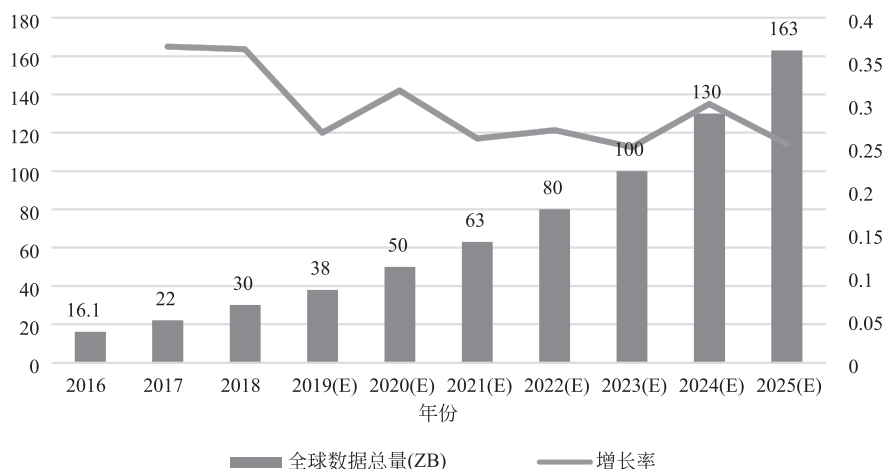


图 1.1-1 全球数据总量预测 2016-2025

注：图中 E 表示预测值。

2016 年到 2025 年，全球数据总量总体平稳地增长，不过增速略有下降，从 2017 年的 35% 左右下降到 2025 年的 25% 左右。

数据量的快速增长使得数据中心的存在越来越重要，推动着数据中心的发展。同时也要求数据中心需要越来越强大的处理能力，使数据中心向大规模的方向发展。

中国产业信息网《2018 年全球数据中心建设行业发展趋势及市场规模预测》指出，随着云计算的集中化趋势扩大，预计到 2020 年，超大规模数据中心将占到全部数据中心

数据运算能力的 68%、数据存储量的 57%、数据传输量的 53% 和服务器数量的 47%。

另外，华经情报网《2018 年全球及中国数据中心建设情况分析，互联网发展驱动 IDC 市场规模增长》指出，到 2021 年，超大规模数据中心将占全部数据中心服务器安装量的 53%，占公共云服务器安装量的 85%，占公有云负载总量的 87%。到 2021 年，超大规模数据中心内部流量或将增加 4 倍，占有 IDC 内部流量的 55%。

而在 2016 年，超大规模数据中心的数据运算能力占全部数据中心的 39%，数据储存量占全部数据中心的 49%，数据传输量占全部数据中心的 34%，服务器数量占全部数据中心的 21%。四年时间，数据运算能力占比增长了 29%，数据存储量占比增长了 8%，数据传输量占比增长了 19%，服务器数量占比增长了 26%。可以看到，超大规模数据中心的数据运算能力和服务器数量都有较大的增长，可以猜测是由于数据量增长及云计算的集中化趋势等原因导致。

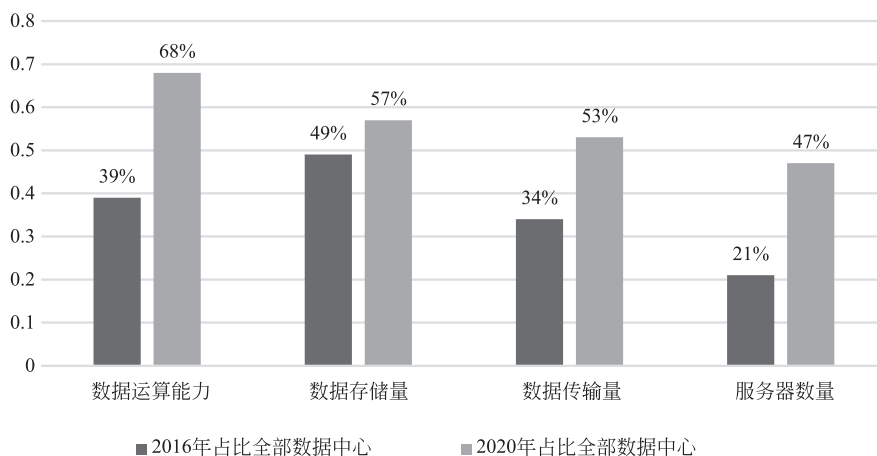


图 1.1-2 2016 年、2020 年超大规模数据中心规模对比

《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2018》指出，2015 年全球共建有 259 个超大型数据中心，其中将近 70% 的数据中心分布在欧美，29% 分布在亚太。到 2016 年 12 月，全球超大规模数据中心数量已近 300 个，45% 分布在美国，中国仅占 8% 的份额，日本、英国、澳大利亚、加拿大等的份额在 4%~7% 之间。

中国产业信息网《2018 年全球数据中心建设行业发展趋势及市场规模预测》指出，2017 年超大规模数据中心新增 90 个，总量从 2016 年的近 300 家增加到 390 家。绝大多数超大规模数据中心仍位于美国，占比 44%；中国位居第二，占 8%；其次是日本和英国，分别占 6%；澳大利亚、德国紧随其后，占比 5%。2017 年底在建的项目有 69 个，按照目前的速度，到 2019 年年底全球超大规模数据中心的数量有望突破 500 个，2020 年有望突破 600 个，超大规模数据中心的市场规模也将从 2016 年的 202.4 亿美元增长到 2020 年的 490 亿美元，复合增长率为 24.7%。

从以上数据中可以得出，未来超大规模数据中心将在 IDC 数据的传输、存储、运算等方面发挥越来越重要的作用。

全球数据中心的市场规模一直呈现增长趋势。2017 年全球数据中心市场规模近 534.7 亿美元（仅包括数据中心基础设施租赁收入，不包括云服务等收入），相比 2016 年增长

18.3%，2018 年全球数据中心市场规模达到 630.4 亿美元，相比 2017 年增长 17.9%。2016 年到 2018 年，全球数据中心市场规模的增长率一直保持在 18% 左右，可以预见，在未来几年，全球数据中心市场规模仍将平稳增长。

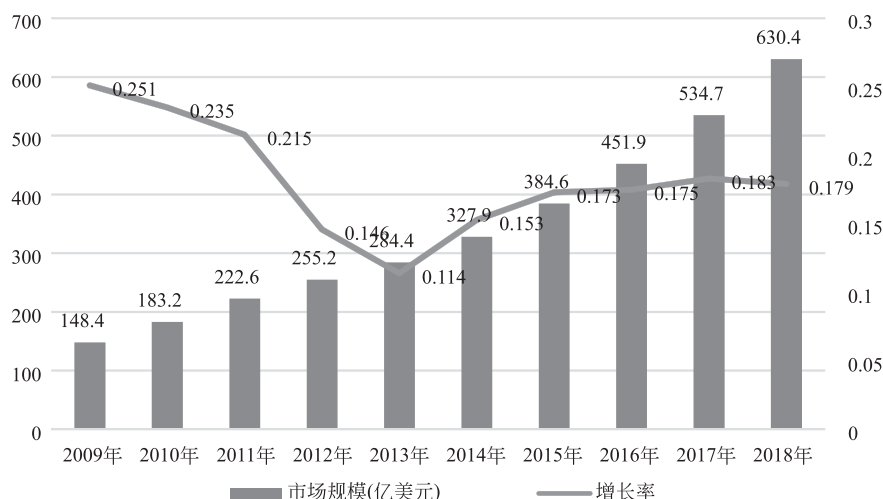


图 1.1-3 2009~2018 年全球数据中心市场规模（亿美元）

根据前瞻产业研究院发布的《中国 IDC 行业市场前景与投资战略规划分析报告》指出，2017 年中国 IDC 市场总规模为 946.1 亿元，同比增长 32.4%。

据科智咨询（中国 IDC 圈）最新发布的《2018—2019 年中国 IDC 产业发展研究报告》显示，2018 年，中国 IDC 业务市场总规模达 1228 亿元，同比增长 29.8%，增速放缓 2.6 个百分点，较 2017 年增长超过 280 亿元。

中国的 IDC 市场规模也一直保持增长趋势，总体来说增速有所放缓，但是对比 2009~2018 年全球数据中心的市场规模趋势，可以看到，在中国互联网行业的高速发展下，中国的 IDC 市场规模增速远高于全球平均水平。

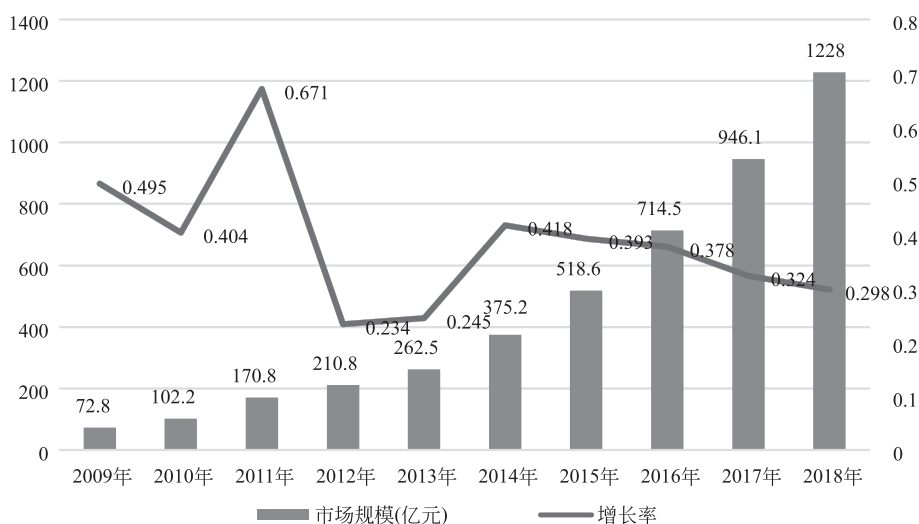


图 1.1-4 2009~2018 年中国数据中心市场规模（亿元）

从行业上来看，IDC 业务可以分为传统 IDC 业务和云服务业务。根据 2015 年工信部发布《电信业务分类目录（2015 年版）》，传统 IDC 业务包括数据中心租赁、服务托管等，将互联网资源写作服务（IaaS 和 PaaS）纳入了 IDC 云服务业务。而在行业结构中，网络视频行业和电子商务行业 IDC 业务需求增长明显。

前瞻经济学人《2018 年中国数据中心发展现状分析 数量和规模双增长》指出，2017 年我国传统 IDC 业务收入为 512.8 亿元，占 IDC 全行业收入的 78.8%；云服务收入 137.6 亿元，占比 21.2%，比 2016 年提高 2.8%。随着“企业上云”行动实施，2018 年我国传统 IDC 业务收入占 IDC 全行业收入比重下降为 76.4%，而云服务收入占 IDC 全行业收入比重上升为 23.4%（见图 1.1-5）。

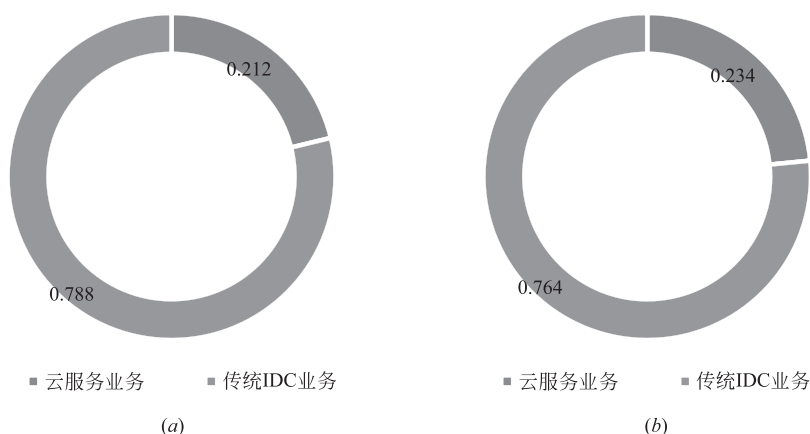


图 1.1-5 2017 年和 2018 我国 IDC 收入结构

(a) 2017; (b) 2018 年

可以预计，未来云服务收入在我国 IDC 业务收入中的占比会进一步增加，而传统 IDC 业务收入在我国 IDC 业务收入中的占比会进一步减少。由于受“互联网+”、大数据战略、数字经济等国家政策指引以及移动互联网快速发展的驱动，我国 IDC 市场规模仍将快速增长，新一代信息技术，比如 5G、物联网、人工智能、VR/AR 等，将会对数据中心的发展产生重要影响。据《数据中心白皮书（2018 年）》指出，预计 2020 年我国 IDC 市场收入规模有望突破 1500 亿元。

华经情报网《2018 年全球及中国数据中心建设情况分析，互联网发展驱动 IDC 市场规模增长》指出，目前市场上主要有三类公司在参与数据中心的建设，分别是运营商、规模较大的互联网企业、专门从事细分领域的数据中心第三方提供商。

运营商单个 IDC 机柜数量一般在 200~1000 个，全球主要企业有 Verizon、DT (Deutsche Telekom) 等，中国主要企业有中国电信集团公司、中国移动通信集团公司、中国联合网络通信集团有限公司。

互联网企业单个 IDC 机柜数量一般在 4000~10000 个，全球主要企业有 Amazon、MS 等，中国主要企业有阿里巴巴、腾讯、华为。

第三方 IDC 企业单个 IDC 机柜数量一般在 200~3000 个，全球主要企业有 DigitalReality 等，中国主要企业有光环新网、万国数据、网宿科技。

数据中心行业内三类企业对比

表 1.1-1

企业类型	单个 IDC 机柜数量	全球主要企业	中国主要企业
运营商	200~1000	Verizon、DT 等	中国电信、移动、联通
互联网企业	4000~10000	Amazon、MS 等	阿里巴巴、腾讯、华为
第三方 IDC 企业	200~3000	DigitalRealty 等	光环新网、万国数据、网宿科技

1.1.2 我国大规模数据中心区域分布情况

我国大规模数据中心区域分布大致有以下几个特点：

(1) 我国数据中心的区域分布最主要的特点是广而不均

我国数据中心分布地非常广。我国幅员辽阔，大陆面积近 960 万平方公里。气候条件方面，我国自北向南跨越亚寒带、中温带、暖温带、亚热带、热带，黑龙江冬天能达到 -40°C ，而重庆夏季温度超过 40°C ，气候环境变换巨大。另外也有各种各样的自然灾害，比如四川地震频发，沿海一带台风肆虐，但数据中心都能在这些地区建设起来。这些数据中心为当地人民带来了生活水平的提高，也推动了经济发展。

而目前，我国数据中心的分布仍然严重不均。一个地区数据中心的数量依旧和该地区的经济发展程度成正相关的关系，主要体现在大型及以上数据中心上。我国的大型数据中心主要还是集中在北京、上海、广东；新疆、西藏和青海等经济不发达地区目前还没有大型数据中心。究其原因，也就是一个地区的经济水平高低决定了建设数据中心的吸引力。经济水平越高，建设数据中心的吸引力就越强。

(2) 数据中心的布局逐渐向发达地区的周边区域延伸

出现这一现象的原因是多方面的，其一是北上广等地区相继出台了相关的禁限政策；其二是在一线城市周边，相对于市内，土地更为充足、租金更低、电价成本更低，同时又因为靠近一线城市，可以通过拉光纤专线来解决带宽问题。

这一现象主要体现在互联网公司建设数据中心的选址方面。如今，许多互联网公司倾向于在一线城市周边建设数据中心。比如阿里巴巴在张北县和南通市建设数据中心，百度在南京和阳泉建设数据中心。

上市公司数据中心分布

表 1.1-2

公司	机柜数	机房地点
宝信软件	20000	上海
万国	22000	北京、上海、深圳、广州等
数据港	8600	上海、杭州、张家口
光环新网	23000	北京、上海、河北
鹏博士	30000	北京、上海、广州等
网宿科技	7000	北京、上海、深圳、河北等
科华恒盛	10000	北京、上海、广州
奥飞数据	1500	广州、深圳、海南

(3) 许多非一线城市地区的数据中心建设吸引力有所提高

这些地区的经济发展水平基本在全国经济发展的中等水平。这些地区建设数据中心可以有效地减轻北京、上海和广州这三个城市的数据中心建设压力。

近年来，许多地方政府纷纷大力建设数据中心，为增强在当地建立数据中心的吸引力，出台了许多优惠的减税政策。希望通过数据中心带动当地经济。地方政府主要引入运营商和第三方数据中心服务提供商。

例如，四川就引入了中国联通和中国电信，建设了十几个大型数据中心，包括中国联通国家数据中心、中国电信四川成都第二枢纽中心、四川电信莲花枢纽中心、四川电信天府热线数据中心等；山东引入了中国联通，建设有山东青岛二枢纽数据中心、潍坊联通 IDC 数据中心、济南联通云数据中心、济南二枢纽数据中心等；浙江引入中国移动，建设有宁波移动 IDC、杭州移动三墩西湖科技园数据中心等。

第三方数据中心服务提供商方面，包括有武汉新软件数据中心，国际电联电信云计算数据中心（河南），企业在线商务京东数据中心（河北），浙江绿谷云数据中心等。这些第三方数据中心也可以向外提供机房和机柜租赁业务，对于运营商是一个有益补充。

（4）欠发达地区，比如西北、西南等，数据中心市场也在逐步发展起来。近年来，在西部的一些地区，建立了几个超大型的数据中心。数据中心市场的发展可以有效地改善当地信息发展水平。

欠发达的西部地区发展数据中心主要促进因素包括：政策因素、西部地区电价和土地价格更便宜、西部地区具有可再生资源方面的优势。

不过，西部地区数据中心的发展仍然存在一些问题，比如西部地区的科技发展相对较为滞后。一方面高科技产业不发达，另一方面相关的技术、管理人才也相对较少。

另外，西部地区数据中心的发展还存在网络资源匮乏的问题。这严重限制了数据中心客户的进入。数据中心由大型存储服务器和通信设备组成，它用于企业在线存储海量数据。它需要高速，可靠的内部和外部网络环境。而目前，西部地区所提供的网络环境仍然较差，宽带跟不上，网速较慢，网络稳定性较差。

《点亮绿色云端——中国数据中心能耗与可再生能源使用潜力研究》以各地区 GDP 数据及浙江省发布的数据中心数量并结合不同规模数据中心的占比，对中国各地区大型及以上规模、大型以下规模数据中心现状进行了估算。各省市大型及以上数据中心分布比例见图 1.1-6。

可以看到，广东、上海和北京三个地区仍然是大型及以上规模数据中心的主要分布的地区。大型及以上规模数据中心的比例分别为 20.8%、12.8%和 9.6%。比例排序紧随其后的是内蒙古、浙江、江苏、贵州，大型及以上规模数据中心在内蒙古的数量占到了全国的 8%，贵州也占到了 4.8%。因此，数据中心的建设在中部地区、西部地区也有了不错的发展。

根据《点亮绿色云端——中国数据中心能耗与可再生能源使用潜力研究》对各地区数据中心机架数的统计，各主要地区数据中心能耗如图 1.1-7 所示：

从该图可以得到以下几点结论：

1) 广东、上海、北京三地的数据中心能耗在全国领先，特别是广东，数据中心的能耗远远超过其他数据中心发展较差的地区。

2) 内蒙古的大型及超大型数据中心的能耗排在第 5，说明西北地区的数据中心也有了

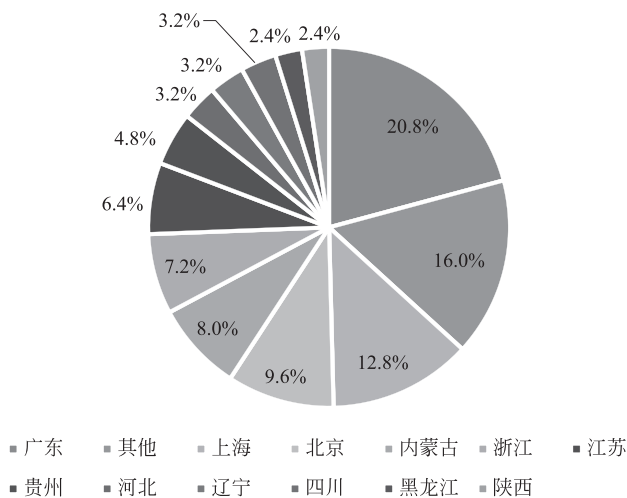


图 1.1-6 2018 年中国大规模数据中心区域分布情况

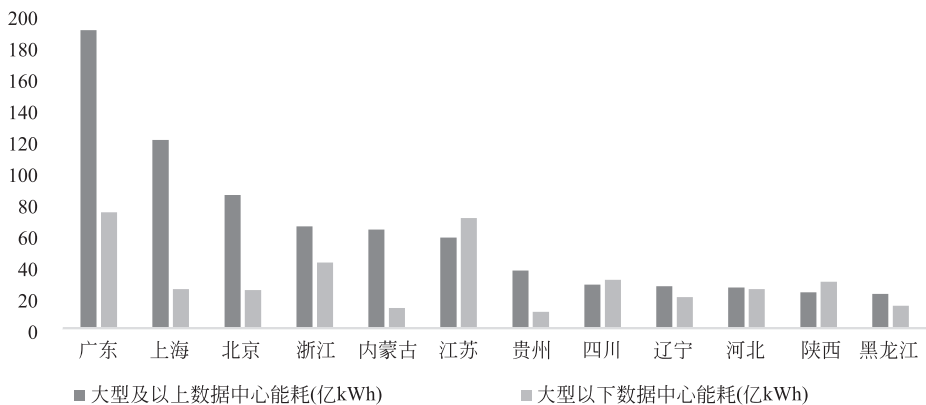


图 1.1-7 2018 年中国主要地区数据中心能耗

不错的发展。

3) 在所有的省市中，基本上大型及超大型数据中心的能耗总量都会大于中小型数据中心的能耗总量，除了江苏、四川、陕西。这说明在江苏等地，中小型数据中心的市场要大于大型及超大型数据中心的市場。

4) 在经济发达的北京和上海，中小型数据中心的市場却相对于广东、浙江、江苏等地较小，可能是由于上海和北京的行政面积、人口、产业规划、政策等多方面的因素导致。

工信部信息通信发展司《全国数据中心应用发展指引（2018）》给出了北京及周边地区、上海及周边地区、广州及周边地区、中部地区、西部地区和东北地区这 6 个地区在 2016 年的在用机架数、2017 年的在用机架数、2018 年的可用机架数以及 2019 年的预测可用机架数，数据如图 1.1-8 所示。

这里，全国六个地区包含的省市、自治区是指：
北京及周边地区包括北京、天津、河北、内蒙古；

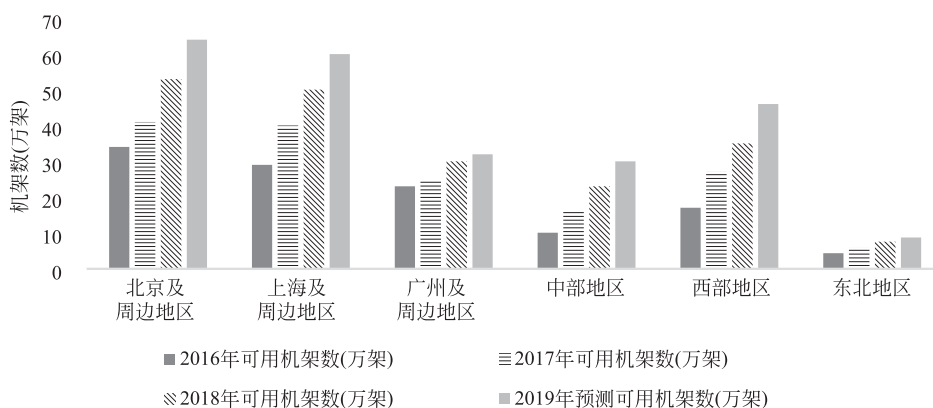


图 1.1-8 2016~2019 年全国各地区机架数

上海及周邊地区包括上海、浙江、江苏；

广州及周邊地区包括广东、福建；

中部地区包括安徽、湖北、湖南、河南、江西、山西；

西部地区包括广西、宁夏、新疆、青海、陕西、甘肃、四川、西藏、贵州、云南、重庆；

东北地区包括黑龙江、吉林、辽宁；

从图 1.1-8 中可以看出，全国各地区的机架数都有所增长。其中，北京及周邊地区、上海及周邊地区继续保持较快的增长速度，西部地区由于一系列的优势，数据中心的发展也相当可观。相比来说，广州及周邊地区的数据中心发展似乎达到了饱和，增长较慢。中部地区数据中心发展也较快，大有超过广州及周邊地区的趋势。

1.1.3 我国数据中心新建数量、规模及态势分析

据《全国数据中心应用发展指引（2017）》指出，截至 2016 年底，我国在用数据中心共计 1641 个。中国信通院《数据中心白皮书（2018 年）》指出，到 2017 年底，我国在用数据中心总体数量达到 1844 个。2016 年到 2017 年增长个数为 203 个。由于近几年我国的数据中心市场一直稳步发展，按照 2018 年数据中心新建数量仍为 203 个计算，可以估计截至 2018 年，我国在用数据中心总体数量为 2047 个左右。

根据工业和信息化部信息通信发展司发布的 2018 年度《全国数据中心应用发展指引》，截至 2016 年底，我国在用数据中心的机架总规模达到了 124 万架（实际为 124.4 万架，这里四舍五入），规划在建的数据中心的机架总规模达到了 125 万架。截至 2017 年年底，我国在用数据中心的机架总规模达到了 166 万架，规划在建的数据中心的机架总规模达到了 107 万架。

根据上图对 2018~2019 年我国数据中心规模区域分布及增长趋势的分析（数据来源于工业和信息化部信息通信发展司发布的 2018 年度《全国数据中心应用发展指引》），将全国 6 个地区的测算可用机架数相加可得，2018 年全国 6 个地区在用数据中心的机架总规模达到了 204.2 万架，但是这 6 个地区并没有包括山东和海南。另根据中国信通院的统计数据，2018 年国内数据中心机架数将超过 210 万架。认为 2018 年国内数据中心机架数约

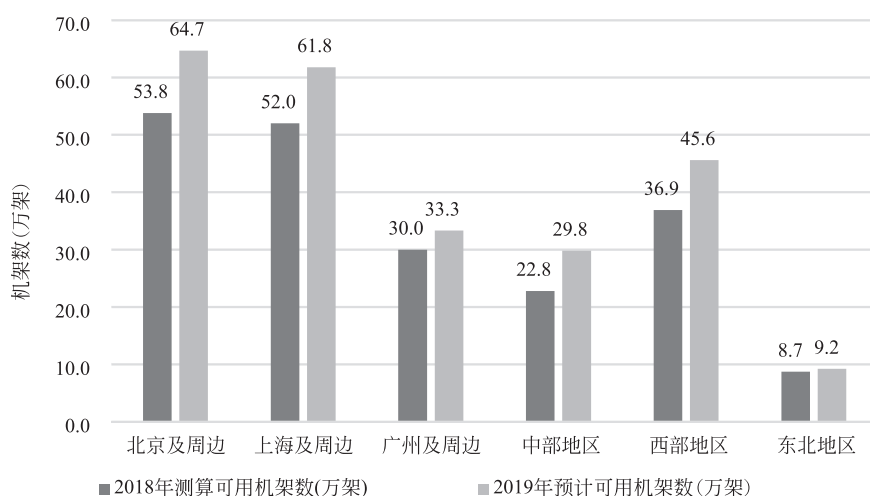


图 1.1-9 2018~2019 年我国数据中心规模区域分布及增长趋势

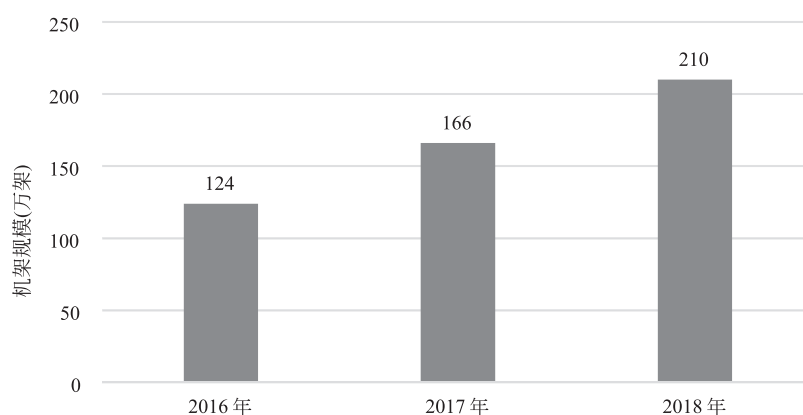


图 1.1-10 2016~2019 年我国在用数据中心规模

为 210 万架基本合理。由此可得 2016~2018 年我国在用数据中心规模。

可以看到，近几年我国的数据中心规模一直稳步增长。2017 年新增 42 万架，2018 年新增 44 万架。预计未来数据中心规模仍将保持稳步增长的趋势。

根据工业和信息化部发布的《全国数据中心应用发展指引》，截至 2016 年，全国中小型数据中心机架数为 75.1 万架，大型数据中心机架数为 35.2 万架，超大型数据中心机架数为 14.1 万架；截至 2017 年，全国数据中心中小型数据中心机架数为 83.2 万架，大型数据中心机架数为 54.5 万架，超大型数据中心 28.3 万架。又根据中国信通院的统计数据，大型和超大型数据中心总机架数超过中小型数据中心机架数。以下根据 2016 年、2017 年三种不同规模的数据中心的机架总数合理推测 2018 年三种不同规模的数据中心的机架总数。

2017 年相较 2016 年，数据中心规模总增长为 41.6 万架，其中，中小型数据中心规模增长 8.1 万架，大型和超大型数据中心规模分别增长 19.3 万架、14.2 万架。由于我国数据中心往大规模方向发展，可以估计，2018 年中小型数据中心的规模的增长应该也只保

持在 8 万架左右。而 2018 年规模总增长为 44 万架，因此大型和超大型数据中心的规模增长为 36 万架，根据 2017 年大型和超大型的数据中心的增长规模的比例，求得 2018 年大型和超大型的数据中心的增长规模分别为 20.7 万架、15.3 万架。由增长数量，可以求得截至 2018 年全国中小型数据中心机架数为 91.2 万架，大型数据中心机架数为 75.2 万架，超大型数据中心机架数为 43.6 万架。如图 1.1-11 所示。

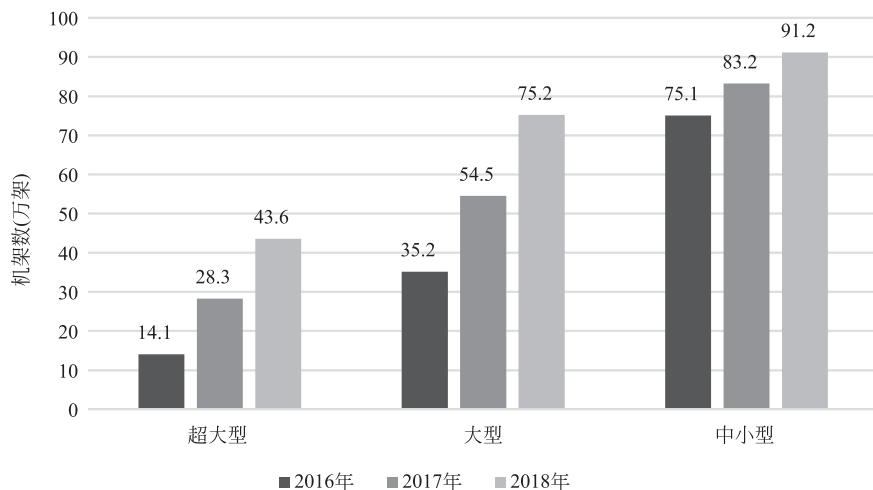


图 1.1-11 2016~2018 年我国三种规模数据中心的机架数

我国数据中心规模的发展态势，总的来说是，大型和超大型数据中心的增长占主要部分，我国数据中心往大规模方向发展。其中的原因是多方面的，主要包括信息产业的发展使得数据量飞速地增长，还有云计算的集中化趋势扩大等原因，造成数据中心所需要的服务器数量快速增长，并且推动了数据中心的数据处理能力的增长以及着数据中心网络不断向大带宽低时延方向演进。可以预计，未来大型和超大型数据中心将在 IDC 数据、流量及处理能力方面发挥越来越重要的作用。

前瞻经济学人《2018 年中国数据中心发展现状分析》指出，截至 2017 年年底，我国超大型数据中心上架率为 34.4%，大型数据中心上架率为 54.87%，与 2016 年相比均提高 5% 左右，全国数据中心总体平均上架率为 52.84%。

另外《数据中心深度报告：IDC 投资快速增长，坚定看好 2 个核心标的》一文中提到，截至 2016 年底，我国超大型数据中心上架率为 29.01%，大型数据中心上架率为 50.16%，全国数据中心总体平均上架率为 50.69%。可以看到，超大型和大型数据中心的上架率与 2017 年相比分别相差 5.39% 和 4.71%，与相差 5% 左右这一说法基本吻合，可以认为这个数据是合理的。

再根据上架率的增长率推出 2018 年数据中心的上架率。2016 年到 2017 年，全国数据中心总体平均上架率增长 2.15%，按照这个增长率，2018 年全国数据中心总体平均上架率应该为 54.99%，超大型和大型数据中心的上架率应该分别为 39.79% 和 59.58%（见图 1.1-12）。

超大型数据中心的上架率比全国总体水平低了 15%~20%，所以超大型数据中心的利用率还有很大的发展空间，不过超大型数据中心的上架率增长还是比较快的；而大型数据

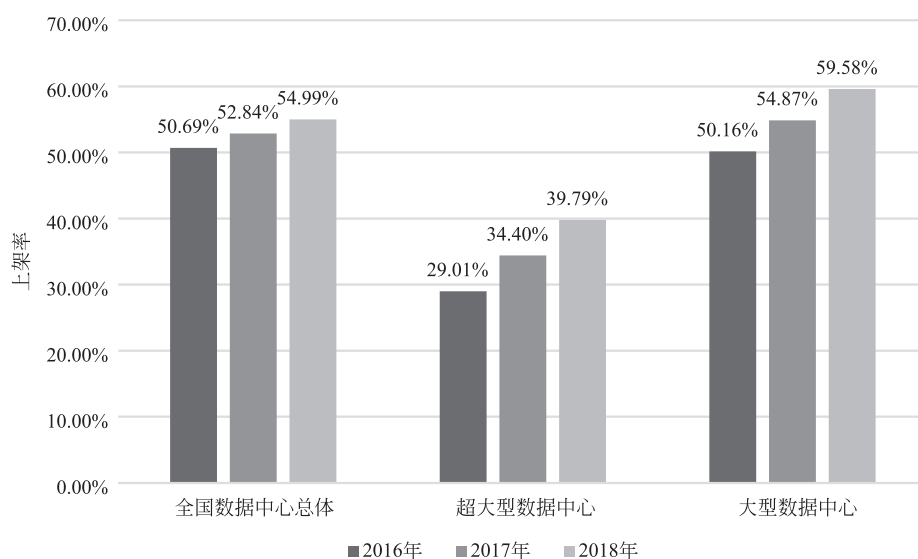


图 1.1-12 2016~2018 年我国数据中心上架率

中心的上架率比全国总体水平要高一些，说明大型数据中心的利用率还是比较好的。

在地域分布上，除北上广深等一线城市，河南、浙江、江西、四川、天津等地区上架率提升到 60% 以上，西部地区多个省份上架率由 15% 提升到 30% 以上（根据《2018 年中国数据中心发展现状分析》）。由此看来，我国数据中心上架率仍可进一步提高，不过还是在往平衡的方向发展的。

1.2 我国数据中心发展趋势

2018 年互联网产业继续保持高速发展，通信业发展蓬勃迅速。国家运行监测协调局统计数据显示，2018 年我国规模以上互联网和相关企业业务收入达到 9562 亿元，相比去年增长 20.3%。核心一线城市增长迅速，大部分地区继续保持良好增长态势。互联网业务收入前三位的广东、上海、北京，分别增长 26.5%、20% 和 25.2%。截至 12 月底，我国互联网企业的服务器数量达 141 万台，相比 2017 年增长 31.8%。互联网数据中心业务完成收入 158 亿元，相比 2017 年增长 8.0%。互联网接入业务完成收入 146 亿元，相比 2017 年下降 11.8%。据中国信息通信研究院统计，2018 年我国电信业务总量达到 65556 亿元（按照 2015 年不变单价计算），相比 2017 年增长 137.9%，增速同比提高 61.2%。电信业务收入累计完成 13010 亿元，相比 2017 年增长 3.0%。

物联网、云计算、人工智能、区块链、大数据、5G 等产业的迅速发展使得 IT 设备使用量和服务器密度与日俱增，数据中心产业规模高速增长。人工智能、5G、物联网等新兴技术不断地涌现和快速发展，对数据中心的运载能力、节能能力等方面提出了更大的挑战，使得数据中心产业布局逐步优化，能效水平总体提升。建设高效节能的数据中心，成为未来绿色发展的主要方向和趋势，企业也越来越重视数据中心的能耗问题以及增加空间容量使用，不断有优秀的绿色数据中心涌现，大型和超大型数据中心所占到

的比例也逐年升高。

1.2.1 我国数据中心规模和数量增长迅速

2013 年，工业和信息化部、国家发展改革委、国土资源部、国家电力监管委员会、国家能源局共同出台的《关于数据中心建设布局的指导意见》（简称《意见》），将数据中心按大小规模划分为超大型、大型、中小型三个类别，以推进数据中心产业合理发展和布局。

《意见》中按照标准机架数量和功率对数据中心规模的分类（此处以标准机架为换算单位，以功率为 2.5kW 为一个标准机架），如表 1.2-1 所示。《意见》将标准机架数量转化为标准机架功率作为判断数据中心规模的标准，标准机架功率小于 7500kW 的数据中心被称为中小型数据中心，标准机架功率处于 7500kW 与 25000kW 的数据中心分类为大型数据中心，标准机架功率大于或等于 25000kW 的数据中心为超大型数据中心。

按照标准机架数量和机架功率对数据中心规模的分类 表 1.2-1

类别	超大型	大型	中小型
标准机架数量	≥ 10000	3000~10000	< 3000
标准机架功率(kW)	≥ 25000	7500~25000	< 7500

截至 2017 年年底，我国数据中心总机架数达到 166 万架，规划在建 107 万架，其中大型、超大型数据中心为增长主力，同比 2016 年的 124.4 万架，增长 41.6 万架（来源：中国信息通信研究院和开放数据中心委员会），根据工信部发布的《全国数据中心应用发展指引》，如图 1.1-11 所示，2016 年全国中小型数据中心机架数为 75.1 万架，大型数据中心机架数为 35.2 万架，超大型数据中心机架数为 14.1 万架；2017 年全国中小型数据中心机架数为 83.2 万架，大型数据中心机架数为 54.5 万架，超大型数据中心机架数为 28.3 万架。可以发现，大型及超大型数据中心机架数的增长速率远远超过了中小型数据中心。根据中国信息通信研究院统计数据，2018 年国内数据中心机架数将超过 210 万架，大型和超大型数据中心总机架数将超过中小型数据中心机架数。

近几年，随着 5G 的快速发展，网络服务提供商和运营商开始部署下一代网络设备。5G 技术的到来意味着更快、更密集的数据流，这一技术也将推动对数据中心容量更大的需求，届时 5G 将成为数据中心行业发展的主要驱动力。5G 网络通信可能意味着用户对大型和超大型数据中心的需求逐渐放缓，取而代之的是更靠近网络塔台的本地数据中心，而这些数据中心以中小型数据中心居多，但对于中小型数据中心来说，随着数据量的大幅增加，处理边缘数据所需的数据中心将无法满足不同 5G 的需求。因此，5G 通信的到来使得大型和超大型数据中心的建设增速可能会放缓，但对中小型数据中心的需求可能会越来越大，这可能会使得中小型数据中心机架数的增速有所回升。

数据中心的迅速发展和其数量规模的不断壮大也引起了巨大的能源消耗。图 1.2-1 为 2014~2019 年全国数据中心耗电量。根据工业和信息化部的数据，2014 年我国数据中心年耗电量约为 829 亿 kWh，占全国总用电量的 1.5%；2015 年我国数据中心电力消耗达到 1000 亿 kWh，相当于三峡水电站的年发电总量；2016 年我国数据中心年耗电量超过 1108

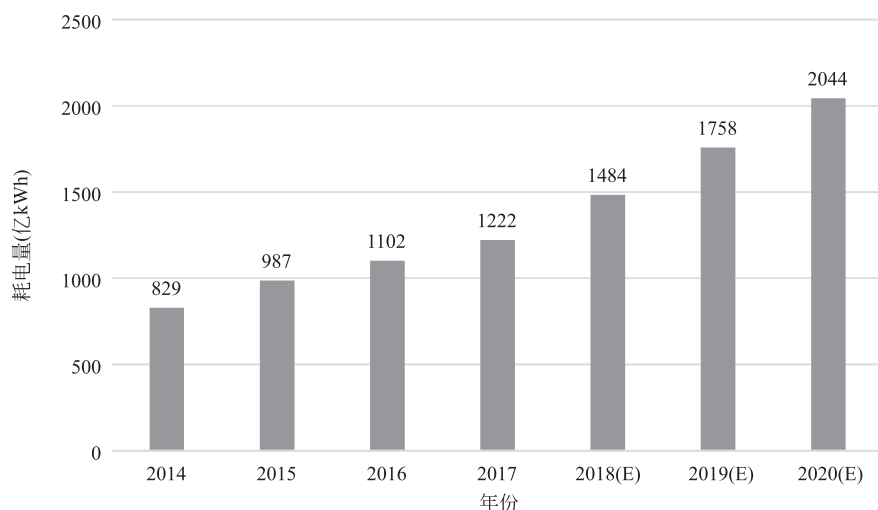


图 1.2-1 2014~2020 年全国数据中心耗电量及预测

注：图中 E 表示预测值。

亿 kWh，占全国总用电量的 2% 左右，和农业的总耗电量相当；2017 年达到 1250 亿 kWh，这个数字超过了三峡大坝 2017 年全年发电量（976.05 亿 kWh）和葛洲坝电厂发电量（2017 年葛洲坝电厂发电量为 190.5 亿 kWh）之和。

对于 2018 年、2019 年、2020 年数据中心的总能耗预测基于以下假定：据中国信息通信研究院统计数据 displays，2018 年国内数据中心机架数将超过 210 万架，而《点亮绿色云端：中国数据中心能耗与可再生能源使用潜力研究》报告的数据，中国在用数据中心总机架数预计达到 271.06 万个（增长率达 63.25%）。根据《数据中心白皮书 2018》，2016 年底中国在用数据中心机架总体规模达到 124.4 万架，2017 年底中国在用数据中心机架总体规模达到 166 万架（增长率达 33.44%），规划在建数据中心规模 107 万架，以上报告中所预计的数据显然不合理，取 2018 年机架数为 210 万架（增长率为 26.5%，较为合理）。数据中心总机架数保持平稳增长，分别取 2019 年、2020 年全国数据中心总机架数为 256 万架（新增 46 万架）、304 万架（新增 48 万架）。随着上架率的提高，以及数据中心单机架的算力逐渐提升，致使单机架功率升高，假定未来新建数据中心中大型及以上数据中心单机架功率为 6kW（略高于目前的 5kW），大型以下数据中心单机架功率为 2kW，结合以上分析，设 2019 年、2020 年新增数据中心平均 PUE 为 1.42，单机架平均功率为 4.8kW，单机架能耗为每年 4.2 万 kWh。根据前述假定大致估算，2019 年、2020 年数据中心总能耗值分别为 1758 亿 kWh、2044 亿 kWh。中国电子技术标准化研究院发布的《绿色数据中心白皮书》中对我国 2020 年数据中心总能耗的预测为 2023.7 亿 kWh，误差为 20.3 亿 kWh，基本合理。

1.2.2 我国数据中心能耗效率不断提高

根据《“十三五”国家信息化规划》，到 2018 年，新建大型云计算数据中心能耗效率（PUE）值降至 1.5 以下，图 1.2-2 为全国数据中心 PUE 情况（数据来源于工信部信息通信发展司），到 2020 年，信息通信网络全面应用节能减排技术，淘汰老旧的高能耗通信设

备，实现高效节能的目标。新建大型、超大型数据中心 PUE 值不高于 1.4，从而实现单位电信业务总量能耗与 2015 年底相比下降 10%，通信业能耗达到国际先进水平，全面推进电信基础设施建设绿色发展。截至 2017 年底，随着上架率的提高，全国在用超大型数据中心平均运行 PUE 为 1.63；大型数据中心平均 PUE 为 1.54，最高水平达到 1.2 左右。2018 年，超大型数据中心平均设计 PUE 为 1.41，大型数据中心平均 PUE 为 1.48，预计未来几年仍将进一步降低。

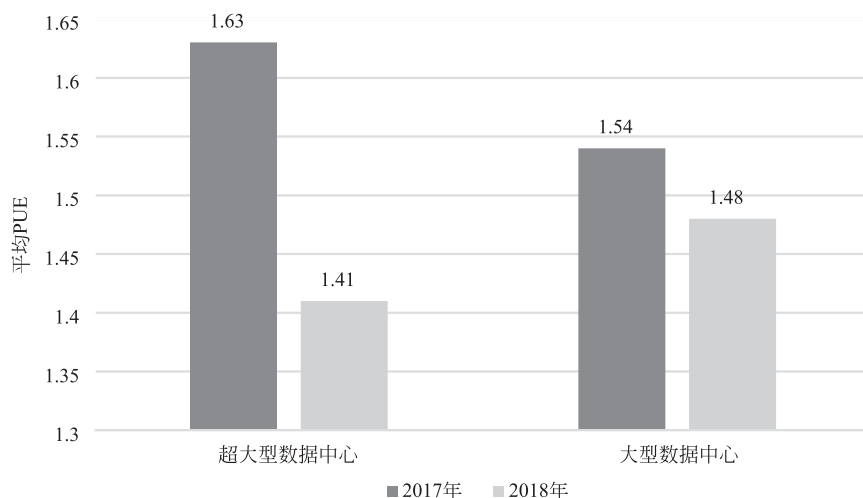


图 1.2-2 2017 年、2018 年全国数据中心 PUE 情况

“绿色计算”已成为当下 IT 基础设施的建设潮流。早在 2012 年，中科曙光便在“多元技术融合”“计算提效升级”等方面投入大量研发资源。如今，中科曙光已实现国内首个“冷板式液冷服务器”“浸没式液冷服务器”的大规模应用项目落地，中科曙光采用的“相变液冷”技术的服务器产品，PUE 值可降到 1.05 以下，处于世界领先水平。国内数据中心不断创新绿色节能应用，多个数据中心获得 TGG（绿色网格）与开放数据中心委员会联合认证的 5A 级绿色数据中心。如 2018 年阿里巴巴张北云联数据中心采用阿里云自主研发的飞天操作系统，采用电能限制管理等方式，提高 IT 设备效率。制冷系统采用无架空地板弥散送风、热通道密闭吊顶回风、预制热通道密闭框架、自然冷源最大化利用等技术。供配电采用一路市电+一路 240V 直流的供电方式，结合预制模块化，高效供电架构的设计减少了配电环节的能源消耗，提升能源效率，实现年均 PUE=1.23。图 1.2-3 为阿里液冷服务器集群，PUE 可逼近理论极限值 1.0。

市场研究机构 IDC 在“中国首届绿色计算高峰论坛暨绿色计算应用成果发布会”发布了《2019 中国企业绿色计算与可持续发展研究报告》，报告调查了 200 多家大型企业，其中超过 50%的企业已大规模部署并使用模块化数据中心、液体冷却等“绿色计算”技术。表 1.2-2 为受访企业数据中心的 PUE 值情况，可以发现中国企业数据中心 PUE 值有明显降低。PUE 值大于 2.0 的企业从 2012 年的 34.6%下降到 2019 年的 2%，而 PUE 值小于 1.5 的企业从 3.7%上升到 12.9%。但依然有 85%的受访企业数据中心的 PUE 在 1.5~2.0 之间，未来仍有很大的提升空间。

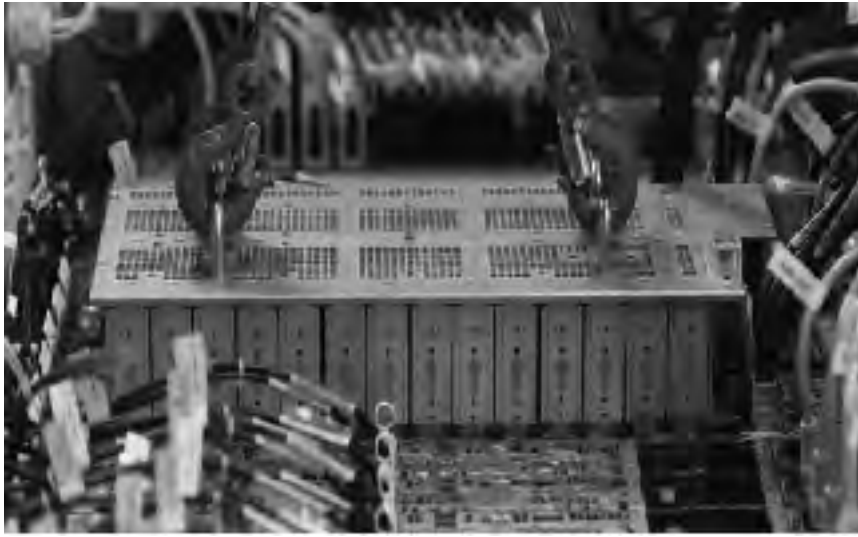


图 1.2-3 阿里液冷服务器集群

我国企业能效管理调查受访企业数据中心的 PUE 值

表 1.2-2

PUE	2012 年	2015 年	2019 年
<1.5	3.7%	8.1%	12.9%
1.5~1.8	23.4%	29.5%	39.1%
1.8~2.0	38.3%	37.2%	46%
>2.0	34.6%	25.2%	2%

1.2.3 数据中心产业由中心城市向中西部地区转移

我国大部分数据中心集中建在经济、科技发达的长三角、珠三角、京津冀、渤海湾等地区，这是我国数据中心空间分布最大的特点。信息化的高速发展使得对数据中心的需求增长过快，这大大加重了对这些地区的供电压力以及用地紧张的情况，影响城市的建设与发展。因此在广东、上海、北京为代表的数据中心分布最密集的东部地区，已经相继出台了限制新建数据中心 PUE 值的政策要求。限制数据中心规模和数量的同时，可再生能源应用情况也应成为新建数据中心的重要考核标准。2013 年政府发布《关于数据中心建设布局的指导意见》，鼓励数据中心向自然条件优越的地区发展，以降低建设和运营成本。2018 年工信部发布《全国数据中心应用发展指引》，我国数据中心总体布局逐渐趋于完善，新建数据中心，尤其是大型、超大型数据中心逐渐向西北地区以及一线城市周围地区转移。

我国数据中心布局逐渐趋于完善，西部地区数据中心占比逐步提升，截至 2017 年底，西部地区数据中心机架数占比由 2016 年的 20% 提高到 22%，截止 2017 年底，北京、上海、广东三个数据中心聚集区的机架数占比由 2016 年的 42% 降低到 37%。但受用户需求、网络条件等因素影响，新建数据中心仍趋向于东部地区。超大型数据中心上架率为 34.4%，大型数据中心上架率达 54.87%。随着周边地区数据中心的快速发展，北京、上

海、广州、深圳一线城市数据中心紧张问题逐步缓解，除了北上广深等一线城市，河南、江西、浙江、四川、天津等地区上架率均提高到 60% 以上。西部地区多个省份地区上架率由 15% 上升到 30% 左右，但与全国数据中心总体上架率 52.84% 相比仍有较大差距。

图 1.1-6 显示了各省市大型及大型以上数据中心分布比例，除了广东、上海、北京等地区占比较高外，内蒙古、贵州等内陆区域也占了很大的比例，西北地区近几年来成为各大运营商、互联网公司等重点开发之处。当地政府把推动大数据与实体经济深度融合，大力鼓励发展数据中心产业，开展大数据战略行动。电信、移动、联通三大运营商和华为、腾讯、阿里巴巴等很多有行业影响力的公司在新疆、陕西、宁夏等西北地区投资建设了一批数据中心。

内蒙古、宁夏、贵州等区域自然气候独特，可再生能源丰富，地方政府充分利用当地资源与气候优势，支持数据中心产业发展，出台了一系列有利于数据中心发展的政策，如 2018 年 6 月贵州发布《贵州省数据中心绿色化专项行动方案》，科学规划和严格把关数据中心项目建设，加强产业政策引导，推动数据中心持续健康发展，使新建数据中心能效值（PUE/EEUE）低于 1.4。同时部分地区也已经开展了一定程度的可再生能源市场化交易的试点，在促进本地消纳的同时，降低了用户采购电力的成本。因此，综合考虑气候、用电成本、可再生能源的应用潜力等因素，内蒙古、宁夏、贵州为代表的西部省份有望成为新建数据中心选址的热门地区。如 2018 年中旬，腾讯在贵州省贵安新区兴建的腾讯贵安七星数据中心开启试运行，该数据中心用地面积 52 万 m^2 ，隧洞面积 3 万 m^2 ，建设投资近 100 亿元，应用腾讯自主研发的 T-block 技术，实现快速拼装、节能绿色的目标。根据 2016 年 4 月 26 日工信部电信研究院测量，T-block 最小 PUE $\approx$ 1.0955，比国内其他主流数据中心节能 30%。腾讯七星数据中心是一个特高等级绿色高效灾备数据中心，未来将用于存储腾讯最核心的大数据。贵州有着得天独厚的自然条件，企业充分利用了贵州水利能源的优势，打造出高安全等级、高绿色的数据中心。

数据中心向中西部地区转移的过程中也存在诸多的问题，比如部分西部上架率相较于北上广深较低，空置资源主要集中于中西部地区。究其原因首要还是客户需求不足，用户更多集中在东部地区。因此中西部在规划建设数据中心时，应充分考虑市场需求，不可盲目。另一方面，政府也应加强扶持智慧教育、智慧医疗、智慧交通等建设和落地，带动当地数据中心的需求。

1.2.4 在网登记部分数据中心统计分析

为进一步了解我国数据中心发展的现状以及未来的发展趋势，本次测评统计了某网站登记的 557 个数据中心的基本情况，通过数据分析，评估了各个数据中心的工作的基本状况。

如图 1.2-4 所示，所统计的数据中心中除了三大运营商占到了 61%，民营自建的数据中心为 37%，也占到了很大的比例，说明三大运营商是数据中心的主要建设方，民营自建数据中心中，互联网企业占大多数。在新常态下，我国提出“互联网+”和“中国制造 2025”等战略，推动传统行业电子商务和移动互联网等行业保持稳定增长，这些领域的客户需求增长拉动了我国数据中心市场的发展。2018 年我国启动了“网络强国建设三年行动”，主要围绕城市和农村宽带提速、5G 网络部署、下一代互联网部署等领域，加大网络

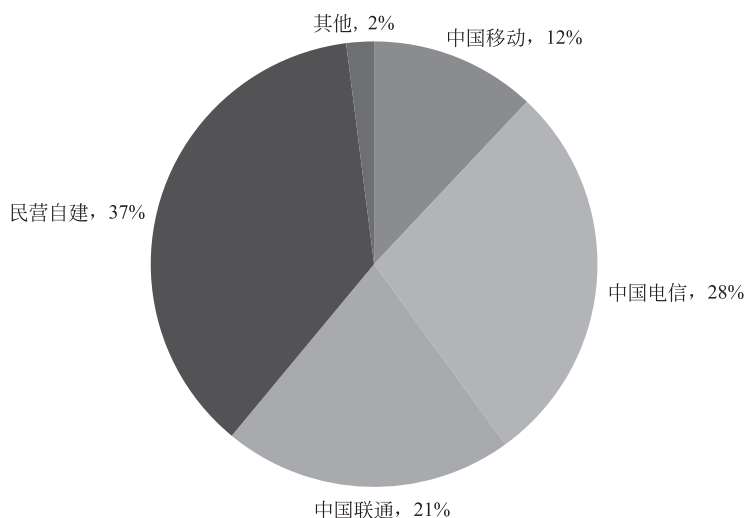


图 1.2-4 所统计数据中心所属运营商

基础设施建设力度。更全面的网络覆盖和更低的网络延时将进一步提升网民的用户体验，为数据中心市场的发展带来新的业务增长点，企业纷纷加强数据中心的建设，为打造云服务提供支持。

如图 1.2-5 所示，统计的数据中心中，机架数 3000 以下的数据中心占到总量的 85%，根据表 1.2-1 的分类标准，中小型数据中心占绝大多数，而这些中小型数据中心大部分分布在一线城市，主要因素是一线城市市场需求大，中小型数据中心可灵活部署来满足市场，而大型、超大型数据中心大部分分布在内陆、北方等地区，主要是由于内陆城市地价、电价相对较低，负荷小，而且较好的气候条件有利于大型、超大型数据中心的冷却，节约成本。可以预见在未来互联网企业不断兴起的时代，内陆地区大型、超大型数据中心的比例会进一步上升。

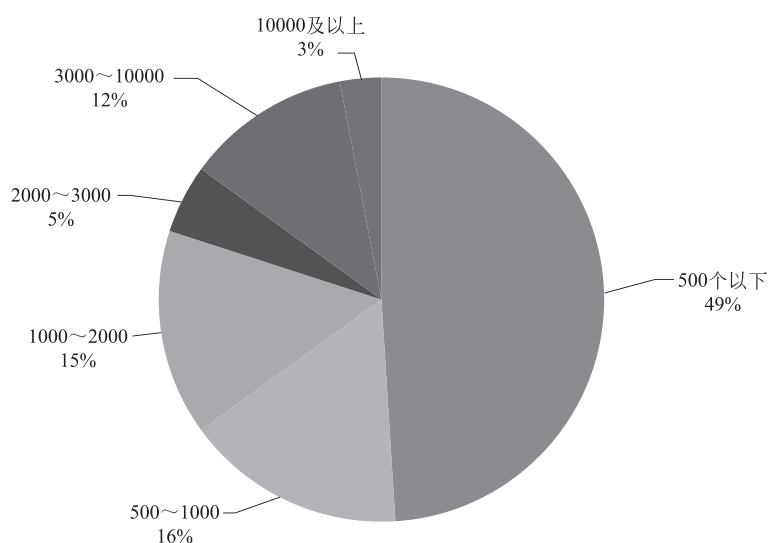


图 1.2-5 数据中心机架数分布

由图 1.2-6 可以看出调查样本数据中心的区域分布情况，从分布区域可以看出，我国目前大部分数据中心仍主要分布在北、上、广、深等一线城市，占比达 37.6%，但在图中可以发现另一个规律，那就是在这些一线城市的周围，如江苏、山东、浙江等省份数据中心也占到了很大一部分的份额。数据中心向一线城市周围地区迁移的趋势，原因是多方面的，一方面一线城市信息化程度高，市场有足够的信息需求度和资源就绪度，对数据中心需求最旺盛，而在中心一线城市数据中心已经较为饱和，增长过快的数据中心需求加重了这些地区的供电压力，提高了运营成本，而且还会加重中心城市负荷，造成城市热岛效应，影响城市的建设和发展。另一方面周围城市地价、电价相对便宜，运营成本较低，而且与一线城市相距不远，高校资源充足，不乏高新技术科技人才。这使得数据中心的发展向一线城市周围扩散。

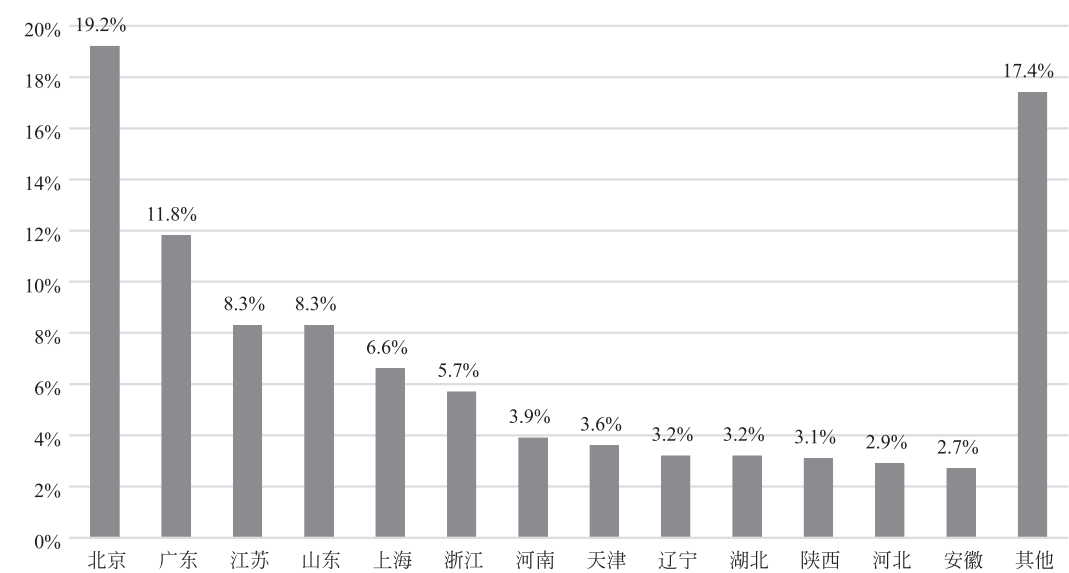


图 1.2-6 所统计数据中心区域分布情况

表 1.2-3 是统计的 557 个数据中心各年份时间段，新投入开放使用的数据中心的个数、平均设计机架数以及总功率（此处以标准机架为换算单位，以功率为 2.5kW 为一个标准机架）。

历年新建数据中心部分信息			表 1.2-3
年份	新建数据中心(个)	平均设计机架数(个)	总功率(kW)
1997	4	238	2380
1998	1	360	900
1999	2	132	660
2000	7	1024	17920
2001	7	375	6562.5
2002	8	748	14960
2003	5	361	4512.5

续表

年份	新建数据中心(个)	平均设计机架数(个)	总功率(kW)
2004	11	531	14602.5
2005	17	288	12240
2006	29	418	30305
2007	17	656	27880
2008	20	742	37100
2009	18	751	33795
2010	15	796	29850
2011	20	1893	94650
2012	29	938	68005
2013	26	885	57525
2014	32	5903	472240
2015	37	2951	272967.5
2016	41	2999	307397.5
2017	28	3330	233100
2018	7	2882	50435
2019	2	657	3285

由表 1.2-3 可知, 2000 年以前新建数据中心的个数很少, 增长平缓, 平均设计机架数也是在 500 个以下, 微型数据中心系统偏多且大多建在一线城市。步入 21 世纪以后, 新建数据中心个数有一个激增的过程, 数据中心的发展建设处于高速增长时期, 这也和软件与信息技术行业的快速发展有紧密的关系, 在国家政策的大力支持下, 制造、金融、能源、交通、电信等行业的迅猛发展使得对数据中心的需求也不断增大, 不断有新的数据中心兴建或升级来提高数据承载能力, 从而来扩大企业经营, 提高经营效率。这些都为数据中心行业的蓬勃发展提供了土壤。受 2008 年金融危机的影响, 2008 之后的近几年样本中新增数据中心的增速有了一个明显的降低, 在 2010 年后又重新回到高速增长的态势。2014 年全球经济复苏, 同时伴随着 5G、物联网、人工智能等计算科学技术的更新与进步, 人们对网络的需求快速增加, 数据量暴涨, 全球对数据中心的需求量增长。数据中心市场规模的增长率逐步提高, 但增速放缓。2016 年全球数据中心整体市场规模达到 451.9 亿美元, 增速为 17.5%。2017 年全球数据中心市场规模达到 534.7 亿美元, 增长率达到 18.3%, 提高了 0.8 个百分点。移动互联网、视频、网络游戏、物联网、AI 等持续驱动, 对数据中心基础设施的需求就将继续存在, 预计未来全球数据中心市场规模将持续上升。由于 2018 年、2019 年样本数过少, 没有太大的参考意义。

图 1.2-7 为历年新增数据中心个数图, 从 1997 年到 2006 年, 我国新建数据中心的个数有逐年增大的趋势, 但从 2006 年到 2010 年, 受金融危机的影响, 增速有所放缓, 但经济危机之后, 从 2010 年到 2016 年又是一个迅速增长的过程。预计在未来我国经济持续在平稳发展的形势下, 新建数据中心的个数仍将以一个平稳的态势增加。

图 1.2-8 为历年新建数据中心平均设计机架数的变化图, 从图中可以发现, 在 1997



图 1.2-7 历年新增数据中心个数

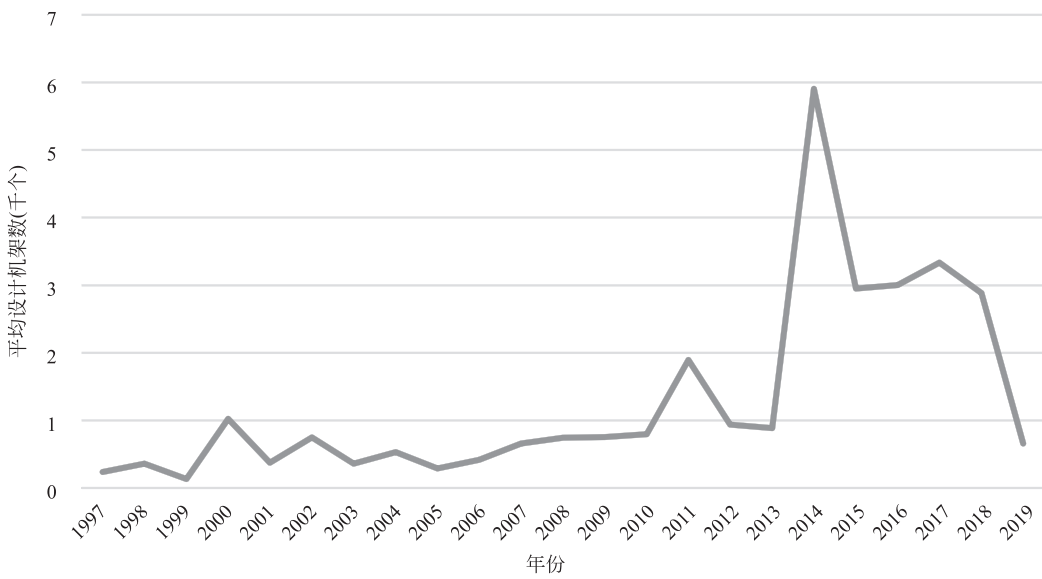


图 1.2-8 历年新建数据中心平均设计机架数

年到 2012 年新建数据中心的平均设计机架数大都不超过 1000，只有 1999 年和 2010 年超过了 1000 个，但还是在 1000~2000 个之间，也就是说，从 1997 年到 2012 年新建数据中心是以中小型数据中心为主，从 2013 年到 2017 年，新建数据中心平均设计机架数到了 3000 以上，根据《意见》中数据中心大小规模划分超大型、大型、中小型三个类别的标准，机架数大于 3000 小于 10000 为大型数据中心，所以在 2013 年到 2017 年所建数据中心以大型数据中心为主，超大型数据中心也开始增多。

图 1.2-9 为历年增加的数据中心总功率图，从 1997 年到 2010 年，新建数据中心总功率平稳增加。从 2011 年到 2017 年总功率呈现出激增的趋势，预计在未来对数据中心的需

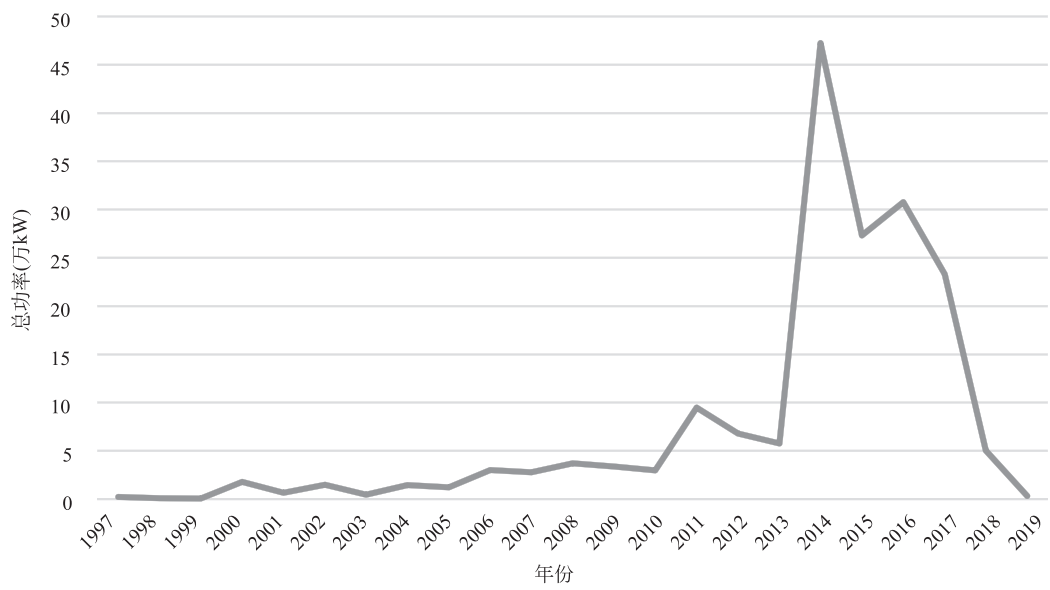


图 1.2-9 历年新建数据中心总功率

求进一步增大的趋势下，总功耗也将进一步增加。

表 1.2-4 为历年新建数据中心类型，如表所示，在 2006 年之前，新建数据中心平均设计机架数大多不超过 500 个，在 2006 年之后平均设计机架数均超过 500 个，2014 年甚至超过了 5000。由表 1.2.4 所示，在所统计的数据中心中，2007 年之前甚至没有一个数据中心设计机架数超过 3000 个，都属于中小型数据中心。从 2008 年到 2013 年开始出现设计机架数超过 3000 个的数据中心，且大型数据中心所占的比例也呈逐年上升的趋势，从 2014 年到 2017 年开始出现超大型的数据中心，大型数据中心和超大型数据中心在新建数据中心的总数中所占比例也大大增加。

历年新建数据中心类型 表 1.2-4

年份	中小型	大型	超大型
1997	2	0	0
1998	1	0	0
1999	2	0	0
2000	6	0	0
2001	4	0	0
2002	5	0	0
2003	5	0	0
2004	6	0	0
2005	12	0	0
2006	22	0	0
2007	15	0	0
2008	9	1	0

续表

年份	中小型	大型	超大型
2009	15	0	0
2010	10	1	0
2011	14	4	0
2012	24	3	0
2013	23	2	0
2014	19	9	3
2015	24	8	3
2016	31	6	3
2017	18	8	2
2018	4	3	0

表 1.2-5 为历年新建数据中心平均面积，分析可以得到，虽然新建数据中心的平均建筑面积、平均机房面积略有波动，但还是可以看出一个总体的趋势：随着新建大型、超大型数据中心的增多，数据中心的建筑面积、机房面积都大大增加，我国数据中心的发展呈现出大型化的趋势。

历年新建数据中心平均面积

表 1.2-5

年份	平均建筑面积(m ²)	平均机房面积(m ²)
1997	300	1500
1998	3000	2400
1999	1050	1500
2000	4033	833
2001	2433	2333
2002	3000	3519
2003	1000	2300
2004	10833	2220
2005	2656	1188
2006	3730	2214
2007	2243	2700
2008	2777	2827
2009	5396	4384
2010	8950	3704
2011	37428	6778
2012	4030	4884
2013	5174	4685
2014	51138	13499
2015	92666	33272

续表

年份	平均建筑面积(m ²)	平均机房面积(m ²)
2016	19613	8450
2017	114300	14395
2018	31872	5792

通过对在网登记的 557 个数据中心进行统计分析,可以得到以下几点结论:

(1) 所统计的数据中心中三大运营商占到了绝大多数,民营自建数据中心占比达到了 37%,也占到了较大的比例,通信行业是数据中心的主要建设方。

(2) 中小型数据中心占绝大多数,比例高达 85%,说明中小型数据中心仍是最主要的数据中心类型,大型、超大型数据中心在近几年迅速发展,新建数据中心的平均建筑面积、机房面积增速明显,数据中心发展呈大型化的趋势。

(3) 我国目前大部分数据中心仍主要分布在北、上、广、深等一线城市,占比达 37.6%,一线城市周边地区数据中心也占到了很大一部分的份额,内陆中西部地区数据中心的数量逐渐增多,数据中心有向一线城市周围地区以及内陆地区迁移的趋势。

1.3 我国数据中心冷却系统概况

1.3.1 数据中心评价方法及能效现状

数据中心冷却系统是一类具有特殊性的机房空调系统,属于工艺性空调。据不完全统计,数据中心冷却系统的耗电量占数据中心总能耗的 40%左右,是除 IT 设备能耗外耗能占比最大的能耗要素。在现存的部分能效较差的数据中心中,冷却系统的能耗甚至会超过 IT 设备的能耗。各厂商和用户一直致力于生产性能更优的数据中心冷却系统。因此,细致评价数据中心冷却系统的效率,建立评价数据中心冷却系统的效率评价标准显得尤为重要。

1.3.1.1 数据中心能效的 PUE 评价指标

为了研究数据中心的能效问题,在 ASHRAE 和绿色网格组织共同发布的能效测量计算指导原则 PUE: A Comprehensive Examination of the Metric 中,提出了一种目前影响力较广的能效指标 PUE (Power Usage Effectiveness, 用能效率)。PUE 也是我国数据中心能耗评价的主要指标。目前,我国国标规定数据中心达到合格标准是 PUE 要小于 2.0。总体上我国仍有许多数据中心 PUE 超过 2.0,它们今后将被改造或逐步关停。新建的数据中心基本可以满足 PUE 为 2.0 的要求,并产生了许多具有极低 PUE 的成功案例。

PUE 是目前影响力较广的数据中心能耗评价指标,其含义为数据中心消耗的所有能源与 IT 设备消耗的能源之比。数据中心 PUE 表达式如下:

$$PUE = \frac{\text{数据中心总设备能耗}}{\text{IT 设备能耗}}$$

为了更具有参考性的结果,PUE 计算通常应该以年度为单位,即采用全年中数据中心总设备耗电量及 IT 设备总耗电量进行计算。数据中心的设备总能耗主要包含 IT 设备能

耗、冷却系统能耗、配电设备能耗及其他能耗。其中，IT 设备能耗、冷却系统能耗、配电设备能耗的影响较大，这些能耗要素的变化可以引起 PUE 的显著变化。PUE 为 2.0 的标准机房能耗和目前我国机房能耗大致构成的饼图如图 1.3-1 所示。

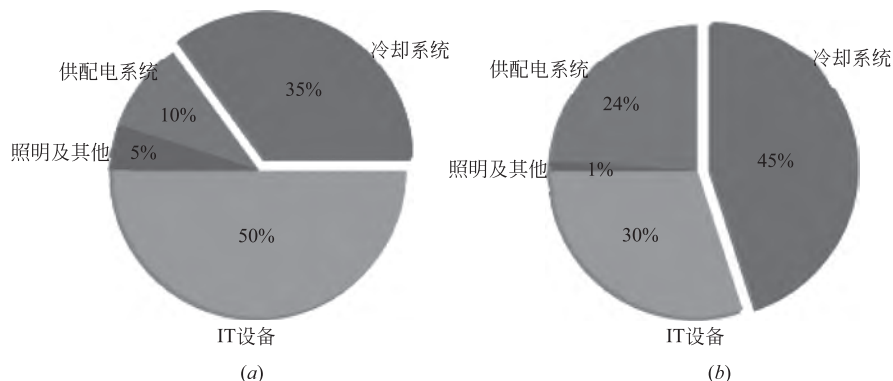


图 1.3-1 标准机房能耗及现有机房能耗大致构成
(a) 标准机房的能耗大致构成；(b) 现有机房的能耗大致构成

冷却系统能耗是 PUE 的重要影响因素，它主要受 IT 设备产生的热负荷影响。随着服务器集成密度的持续增高，服务器设备热密度越来越大，服务器机柜设备区就成为了机房内主要的热岛区域。数据中心冷却系统必须保证供给的冷量充足，能够使机柜内设备正常运行。因此，房间级冷却设备的能耗随着 IT 设备的能耗增大而显著增大。

配电设备能耗主要由配电损耗和 UPS 电源能耗组成，其大小与机房设计的安全等级密切相关。机房的安全等级越高需要 UPS 的数量就越多，UPS 设备的能耗也越大。在机房供电的电源质量足够好的情况下，通常采用后备式的方式配置 UPS 降低 UPS 自身能耗，从而降低 PUE。后备式工作方式中，只在市电停电时，才换成由 UPS 电池供电的供电模式。正常工作时，市电通过 UPS 的旁路直接给数据中心的负载进行供电，UPS 处于备份状态。

1.3.1.2 数据中心能效的 PUE 评价的不足

尽管目前 PUE 指标运用普遍，美国乃至整个国际对 PUE 的评价却褒贬不一。目前，业界公认 PUE 是一个片面的指标，在当前的实际应用中有标准规范欠缺、受测量标准和测量方法影响大、被严重商业化、无法体现设备效率、能源生产率和环境绩效等诸多问题与局限。

PUE 指标以 IT 设备能耗和设备总能耗的关系为研究对象，评价指标以 IT 设备能耗为核心出发点。PUE 指标变好的实际含义，是 IT 设备功耗以外的部分在数据中心总能耗中所占的比例减少。从根本而言，PUE 是一个必然大于 1 的比值。要使数据中心整体真正达到最佳能耗，不应仅追求数据中心 PUE 指标的下降，还应尽量使处理等量任务时的 IT 设备能耗尽量减小。

综上所述，PUE 实际上并不是一种用来评价数据中心冷却系统的指标。PUE 无法针对性评价数据中心冷却系统能效，并且难以满足冷却系统评价的使用需要。因此，建立一种不同于 PUE 的、针对数据中心冷却系统的能效评价指标，对实现数据中心冷却系统的合理评价具有重要的意义。

1.3.2 数据中心冷却系统综合 COP 评价指标的建立

传统空调系统中，COP（Coefficient of Performance，性能系数）是评价制冷设备的一项关键指标。制冷（热）工况下的 COP，等于制冷设备提供的冷（热）量与制冷（热）系统输入功率之比。冷却系统 COP 最基本情况下的定义式如下：

$$\text{COP} = \frac{\text{制冷系统提供的冷（热）量}}{\text{制冷系统消耗的总功率}}$$

用不同角度的 COP 评价空调系统效率的高低，已经成为暖通空调专业界的共识，并在绿色建筑节能设计标准中予以了肯定。因此，利用数据中心冷却系统综合 COP 评价其冷却系统的用能效率，是一种可行且与空调行业专业规范相符的做法。

然而，准确测量制冷系统提供的冷（热）量实际上十分困难。热量作为一种过程量，存在计量困难、测量误差大、修正因素等多种问题。测量制冷系统提供的冷（热）量难以操作，同时也难以统一测量条件和方法，从而无法保证结果具有可比较性。因此，应当基于传统 COP 的思想和数据中心冷却系统的特点，在建立评价指标时避免制冷系统提供的冷（热）量的复杂测算，才能提出一种更符合实际应用需要的数据中心冷却系统综合 COP 评价指标。

数据中心冷却系统形式多样，可以大致分为芯片级冷却系统、机柜级冷却系统、行间级冷却系统和房间级冷却系统，各类系统的原理、冷却设备、换热环节各有差别。虽然数据中心冷却系统存在多样的形式，但主要的耗能设备都是各类制冷装置的运转电机、制冷相关的风机和水泵，这些能耗的目标都是直接满足维持 IT 设备正常工作。因此，在制定能效评价标准时，可以将 IT 设备耗电量和数据中心冷却系统总能耗（由制冷设备、风机和泵的耗电量组成）作为主要研究对象，而忽略与维持 IT 设备工作无关的冷负荷。这种处理方法从 IT 设备工作需要的角度出发，可以更好的体现数据中心的建设目的，也能使不同数据中心冷却系统的评价结果更具有可比性。

值得补充的是，数据中心冷却系统除了给 IT 设备供冷之外，有时也为维持配电系统正常工作提供冷量，这也是维持 IT 设备正常工作的必要条件，可以视为数据中心冷却系统能耗的一部分。除此以外，其余辅助设施及其他房间的空调的能耗与维持 IT 设备工作无明显关系，因而不应计入数据中心冷却系统总能耗。

基于以上分析，在一般空调系统 COP 能效评价指标的启发下，结合数据中心冷却系统的实际情况及数据中心冷却系统评价工程需要，给出如下的数据中心综合 COP 定义式：

$$\text{COP}_{\text{dc}} = \text{E}_{\text{costIT}} / \text{E}_{\text{costcs}}$$

其中， COP_{dc} 为定义的数据中心冷却系统全年综合 COP 指标，用于评价数据中心冷却系统的能效； E_{costIT} 为数据中心内 IT 设备全年总耗电量。 E_{costcs} 为数据中心内为 IT 设备提供支撑的冷却系统的全年总耗电量； E_{costIT} 可通过各电柜的 IT 设备耗电量的全年连续计量值得到。若数据中心的机房配电柜中，配电柜没有计量 IT 设备外不间断电源系统、冷却系统的耗电，也可取配电柜总耗电量数据。 E_{costcs} 是直接为 IT 设备供冷的冷却系统的能耗，包括房间级空调 AHU、冷冻水泵和冷却水泵、制冷机、冷却塔、加湿器、除湿器等设备的耗电量，以及为不间断电源和变配电室等输配电系统供冷、通风的冷却系统耗电量。

与一般空调系统 COP 不同，数据中心冷却系统 COP_{dc} 采用 IT 设备全年耗电量 E_{costIT} 作为公式的分子进行计算。数据中心冷却系统的主要目标是保证 IT 设备的工作条件。IT 设备不对外输出有用功，其设备的发热量和其耗电量大致相等，而 IT 设备耗电量更易于测量，因而更容易在生产实际中推广。不仅如此，以 IT 设备耗电量为分子，令综合 COP_{dc} 具有了一种明确的含义，即单位数据中心冷却系统耗电量可以负担的 IT 设备机柜耗电量。因此，这种定义方式，是针对评价体系的实际应用需要，对 COP 概念合理化转用的结果。

与 PUE 相比，数据中心冷却系统综合 COP_{dc} 评价指标是更具有针对性的评价指标。它在建立时，即确定了针对性评价数据中心冷却系统的目标。综合 COP_{dc} 评价指标的研究内容更具体、更具有针对性，并具有明确与冷却系统相关的含义。可以量化的综合 COP_{dc} 指标数值直观体现了数据中心冷却系统的能效好坏，有助于分析冷却系统的优势和问题所在，并为冷却系统未来调整和改进提供方向。今后在数据中心冷却这一领域，应该把 COP_{dc} 作为设计和评价冷却系统能效的标准。

1.3.3 综合 COP 评价指标的参考标准

当数据中心进行自然冷却时，冷却系统直接或间接利用天然冷源向数据中心提供冷量，工作过程与机械制冷时显著不同，冷却系统设备的总耗电量与开启人工冷源相比，将显著减少。因此，数据中心冷却系统自然冷却的时间对 COP_{dc} 有决定性的影响。由于自然冷却时长主要由所在地的条件决定，不同气候分区 COP_{dc} 的参考值将会不同。

目前，PUE 相关研究中的统计数据较为丰富，可以初步给出不同气候分区 COP_{dc} 的参考值如下：

严寒地区 COP_{dc} 参考值为 1.01~5.08；寒冷地区 COP_{dc} 参考值为 3.51~4.85；夏热冬冷地区 COP_{dc} 参考值为 3.41~4.44；温和地区 COP_{dc} 参考值为 3.16~4.48；夏热冬暖地区 COP_{dc} 参考值为 2.81~4.15。在冷却系统能效更低时， COP_{dc} 值可能比参考值范围更小。冷却系统能效更高及自然冷却时间变得 longer 时， COP_{dc} 值可能比参考值范围更大。

这里提出的只是初步参考数值。如果只考虑 IT 设备及其冷却系统耗电时，存在 $COP_{dc}=1/(PUE-1)$ 的关系，用工具进行仿真计算 COP_{dc} 参考值时必须注意这一关系。实际上，如果当考虑 UPS 和非冷却系统的耗电量影响时，PUE 评价结果与 COP_{dc} 会偏离上述关系，此时 COP_{dc} 按上式计算得到的参考值比数据中心对应的实际数值更小。此外，此参考标准中对自然冷却过程的考虑还较浅。可以认为， COP_{dc} 实际是由两个 COP 组合而成，即开启冷水机组时的 COP（约为 4）和自然冷却 COP（约为 7~8），最终根据自然冷却时长与人工制冷时长的加权和得到 COP_{dc} 。相关的深入研究应在将来的研究中进行，从而得到更精细的不同地区 COP_{dc} 参考值。

1.4 我国数据中心冷却系统运行存在的共性问题

我国数据中心目前还处于高速发展期，新建数据中心较多，数据中心规模不断扩大，服务器散热密度日益增大，对于数据中心来说，高能耗不仅意味着耗电量的增多，同时还

需要更多性能更好的冷却设备、散热通风设备以及供电基础设施的支持。

随着计算机组件密度的增加,数据中心单位面积产生的热量不断提高,然而部分老旧数据中心存在配套的制冷系统老旧、运维人员经验不足等问题^[1],一些新建数据中心存在设计容量过大、运行负荷较低等问题。种种矛盾使得数据中心制冷系统的能效、局部热点、设计及运行负荷匹配、室外机散热、运维管理等问题逐步受到从业者的重视。

1.4.1 产业规模增长迅速,旧有设备能效水平较低

根据2019年5月8日于“2019中国绿色数据中心大会”上发布的2019年绿色数据中心白皮书显示,2017年,全球各地约有800万个数据中心(从小型服务器机柜到大型数据中心)正在处理数据负载。这些数据中心消耗了416.2太瓦时(1太瓦时等于10亿千瓦时)的电力,这相当于全球总用电量的2%,预计到2020年将高达全球用电量的5%。国内数据中心的建设同样呈现快速增长的趋势,金融、通信、石化、电力等大型国企、政府机构纷纷建设自己的数据中心和灾备中心。2017年,国内数据中心总耗电量达到120~130太瓦时,这个数字超过三峡大坝和葛洲坝电厂发电量之和。预计到2020年,中国数据中心耗电量为296太瓦时,2025年高达384.2太瓦时。

随着数据中心规模的不断变大,绿色节能数据中心已经由概念走向实际。越来越多的数据中心在建设时将PUE值列为一个关键指标,追求更低的PUE值已经成为业内共识。例如Google公司部分数据中心的PUE值已经降低到了1.11;2018年6月,微软在英国苏格兰奥克尼群岛附近的北部岛屿海底数据中心负载试运行,该数据中心可以使用深海海水提供随时且免费的高效冷却。而我们国内数据中心的PUE平均值为1.73,中小型机房的PUE值更高,大都在2.5以上。根据国际数据公司IDC发布的《2019中国企业绿色计算与可持续发展研究报告》表明,虽然中国企业数据中心能源使用效率(PUE)值明显改善,但依然有85%的受访企业数据中心的能源使用效率在1.5~2.0之间,未来仍有很大的提升空间。

国内大型数据中心往往更注重节能,其具有更高效的设备以及节能技术,并配以比较完备的管理、维护措施^[2]。例如腾讯贵安七星数据中心,坐落于贵州贵安新区两座山的山体中,总占地面积约为47万平方米,能存放30万台服务器,经过工信部实测,其极限PUE将达1.1左右。但是对于旧有小型数据中心,特别是规模很小的服务器设备间和机房,在设备、管理、运维和节能技术方面往往比较落后,能效水平通常更低。经过多年运行,机房负荷大都已接近满载,且机房建设成本较低,仅仅对楼板、墙壁、门窗进行过简单的加固、封闭及保温处理等。机房层高不足,有效静压箱高度较低;机房存在空调死角、气流无法有效流动等问题,PUE值往往较高,其空调系统用电量甚至超过IT设备用电量。据中国数据中心能耗现状白皮书显示,目前我国中小型数据中心数量已超40万个,年耗电量达1000亿kWh,平均每个数据中心1年耗电25万kWh。

1.4.2 早期建设机房局部热点现象突出

国内早期数据中心建设者对气流组织问题关注度较低,许多早期建成的IDC机房甚至忽略了气流组织的影响,局部热点现象严重。研究表明,如果气流不畅造成机架气流循

环,使得机架高温区增加 5℃时,制冷成本要增加 10%~25%^[3]。后期相关研究人员针对气流组织形式,对老旧的数据中心进行了改造,并且根据工程实际总结出了一些实际经验^[4],如

(1) 数据中心宜采用防静电地板架高形成静压箱送风,地板下架高度作为送风静压箱需保持在 400mm 以上,以减小气流阻力;

(2) 合理调节穿孔地板的数量及通孔率,控制地板出风速度,以避免某些区域冷量过大而某些区域冷量偏小的情况;

(3) 机柜宜采用“面对面,背对背”布置形式形成冷热通道,并采用盲板封闭机架上的空置区域,防止冷风和热风混合,降低制冷效率。

根据上述工程经验,现今多采用地板下送风方案作为数据中心气流组织的主流建设方案。该方案采用整个架高地板空间作为静压箱,将出风动压转化为静压后,均匀送到整个机房的各个角落,然后通过格栅地板出风,将冷空气导入服务器,从而达到控制服务器温度的目的。地板下送风可将冷空气送到较远的距离,且地板开孔率和地板开孔数量可随时调整,支持后期机房扩容或移动 IT 设备。

尽管该方案建设简单,调整灵活,但由于地板高度和风量、冷量的关系高度耦合,配置不当将会引起送风失衡,导致局部热点生成。此外,地板下送风方式不但要求地板架高形成静压箱高度,同时机房上部也需要回风空间,对机房层高有一定要求,在旧机房改造项目中也可能引起气流组织不畅,形成局部热点。

总结来说,数据中心产生局部热点的原因主要有以下 6 个方面:

(1) 单个机柜对应的穿孔地板的送风量与机柜内 IT 设备所需的风量不匹配造成机柜内温度升高。

(2) 机柜内空闲 U 位空隙造成机柜内温度升高。

(3) 同列相邻机柜间空隙造成机柜内温度升高。

(4) 机柜底部与静电地板间空间造成机柜内温度升高。

(5) 热负荷与投入制冷量的匹配不当造成机柜内温度升高。

(6) 机柜孔密度与设备风量的匹配造成机柜内温度升高。

1.4.3 新建机房设备设计与运行负荷不均衡

在决定数据中心的设计能力时,有许多相互竞争的因素会影响决策,担心设置得太小,运行的空间或电源只能维持几年。最近几年,对计算能力的需求和功率密度的增长使得许多数据中心在建立不到十年的时间内便已经过时。而且数据中心的制冷系统需要 24h 不间断运行,现代大型数据中心总冷量需求更是巨大,因此往往采用超大规模设计来降低这种风险,但同时也会降低能效。

数据中心的能效受正在使用的设计负荷的实际比例所直接影响,较之其涉及的最高效率,负载利用率越低,则其效率越低。而数据中心的负荷利用率受其出租率影响,一般而言,新建数据中心投产初期,IT 设备热负载很低,因此不少数据中心运营初期都存在设备设计容量与运行负荷不平衡导致能效降低的问题。此外,大多数数据中心从未达到 100% 的设计负载能力,主要用于确保设备的可靠性和保持正常运行时间。根据不同的企业文化,典型的系统操作不超过 80%~85% 的设计额定值(有些可能会达到 90%)。这是

相当必要的，但这也是可靠性与能效之间谨慎的妥协。

1.4.4 部分小型机房扩容导致室外机散热环境恶劣

从成本角度出发，建设者期望在有限的机房空间里，尽可能投入更多的设备运行，用较小的成本，创造更大的利润空间，因此原有的早期小型数据中心不断扩容，在仍使用风冷设计的情况下，空调室外机的安装空间捉襟见肘，多台空调室外机同时安装在一个狭小的空间，缺乏足够的气流给冷凝器散热。同时由于空间限制，可能出现冷凝器出风口近距离安装，后一排冷凝器出风口直接吹到前一排冷凝器上的问题（图 1.4-1），和其他空调设备混装，导致部分排风之间进入精密空调室外机（图 1.4-2）等。在夏季高温季节，空调容易频繁出现高压保护，给主设备的稳定运行带来极大的隐患。



图 1.4-1 室外机安装实景

冷凝器进风气流不足，会导致单位风量载热量减小，狭小的密闭空间内，只有一侧有新风进入，进风量小，导致没有足够的气流通过翅片进行热交换；冷凝器水平出风安装技术要求，通常为出风 4m 内无遮挡，百叶窗、防护栏等阻挡会使出风阻力变大，风量减小；后一排冷凝器出风口直接进入前一排冷凝器，风冷温差较小，散热量减小，冷凝温度与环境温度之差越小，其换热效率越低。

室外机的换热效率直接影响空调制冷效率，从而影响这个数据中心制冷系统能耗，过高的室外机进风温度将导致出风温度随之增高，导致空调机不节能。合理的改善现有风冷机组室外机散热环境，降低进风温度，是机房空调节能降耗的重要环节之一。



图 1.4-2 室外机布置实景

1.4.5 运维经验不足导致制冷系统故障

数据中心空调系统是一个错综复杂的系统，容易产生各种故障，因此客户对于维护速度、是否原厂维护都提出了较高的要求。尽管运维人员能避免一些常规故障，但由于操作

失误或其他偶然因素，故障依旧可能发生。

(1) 运维管理不当导致空调系统故障

在传统的风冷精密空调体系中，常规性的故障如压缩机损坏、风机损坏等，都可以通过日常的巡检维护发现隐患，如运转电流出现异常增大、运转声音出现异常等。但由于运维操作不当，也可能引起一些不易发现的故障。一个完整的数据中心机房，需要配备完整的维护，才能发挥其重要的作用。

数据中心机房在日常维护中应避免以下问题：运维管理人员不了解系统规划情况，主要工作局限在对设备的维护上；管理界限不清楚，只维护部分基础设施设备，忽略或不维护发电机和空调室外机等；只维护关键设备，对发电机、电池、配电、线缆长时间不做维护；发生事故时简单地归结为设备问题，不愿找出引发事故的真正原因，以至于故障修复后再发生故障，或诱发其他环节故障；管理制度不健全，缺乏维护操作流程，无严格的交接班制度等。

(2) 未及时检修排查导致设备运行故障

精密制冷空调就是数据中心内的重要制冷设备，除了精密地控制温度外，其自身还带有加湿装置，在调节温度的同时，确保机房有恒定湿度的空调。相比于常规空调，其配套设施更复杂，更容易出现突发故障。如空调出现“加湿电流大”的故障报警，原因可能有两个方面：加湿罐中水垢、杂质过多使导电电阻减小；由于加湿罐内注入的水过多使供电电极和水的接触面增大。空调低压报警，用压力表测量高低压，都远远低于正常值，一般为制冷系统缺氟所致。通常这种情况多为制冷管路有漏点。空调不定时出现“失风报警”，应重点检查室内主风机，看是否有主风机损坏、皮带过松、断裂等情况。这些设备运行故障都是可以通过定时检修来进行排查与避免的。

(3) 人为错误操作导致的系统故障

数据中心停机通常是由设备故障或突发事件的连锁反应引起的，但引起数据中心停机的主要原因是人为失误，据 Uptime 协会发起的一项研究显示，数据中心大约 70% 的问题都是人为错误引起的，可见人为错误对数据中心影响较大。例如数据中心管理人员疏于职守，不按照标准操作程序执行，忘记或直接跳过某些步骤，或是凭自己的记忆操作，无意中错误地关闭了某个设备；在紧急情况下错误地按下紧急关机按钮，导致整个数据中心的电力供应关闭；携带食品和饮料进入数据中心，导致液体进入系统设备中造成短路。数据中心是一个复杂庞大的系统，不可能一个人面面俱到都精通，当接触到自己不熟悉或不了解的地方，随意操作往往容易引发意想不到的结果，因此加强对人的管理尤为重要。在对数据中心做任何调整时，都要从全局考虑，集中最优秀的技术人员，将人为操作风险降低。

从以上几点可以看到，由于数据中心空调系统的复杂性，运维操作失误导致的故障时有发生，在与其他系统统筹安排时，不合理的设计也会导致故障出现，数据中心空调系统的可靠性依旧面临着复杂因素的挑战。

本节参考文献

- [1] 陈燕树. IDC 机房空调系统优化配置方法与综合节电分析 [J]. 机电信息, 2018, No. 549 (15): 162-163.
- [2] 刘婷婷, 田浩. IDC 机房空调节能改造工程 [J]. 节能技术, 2011, 29 (5): 466-469.

- [3] 严瀚. 气流组织对数据中心空调系统能耗影响的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [4] 魏蕤, 简弃非, 杨苹. 空调布局对数据机房内热环境影响的试验与仿真研究 [J]. 暖通空调, 2010, 40 (7): 91-94.
- [5] 王亮. 数据中心低负荷下制冷运行方案 [C] //2017 年中国通信能源会议论文集, 2017.
- [6] 钱存存. 华南地区办公建筑 IDC 机房空调系统优化 设计与节能改造方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.

第 2 章 数据中心冷却理念及思辨

2.1 数据中心冷却重要性分析

近年来，随着人工智能、物联网、第 5 代移动通信网络（5G）等高新技术和相关应用的不断发展，要求现代数据中心在工作负载、用户使用模式、资源利用率上增加系统的规模与多样性，但随之而来的是芯片功耗的急剧增加，服务器内置元器件功率密度不断提升，以及相同体积服务器与相同体积机柜的额定功率不断增加，从而引发更多的故障^[1]。

相关研究显示^[2]，CPU 内晶体管的封装数量基本按照平均每 18 个月增加一倍的规律，1997 年，Intel 公司推出的 Pentium II 芯片上有 750 万个晶体管，2006 年 1 月生产的 45nm 工艺静态 SRAM 芯片晶体管总数超过 10 亿，当今的发展已超过 130 亿个；芯片内布线和节点间距离（technology node），作为封装密度特征尺寸，也从数十纳米减小到当今的 10nm 左右。对于高性能 CPU 芯片来说，高密度的封装产生更大的电力消费，从而导致芯片更高的发热量和发热密度。2017 年，美国电力与电子协会（IEEE）下属的封装技术委员会对主要电子元件在今后十几年内有关封装密度和电力消费的发展趋势作出了具体的预测^[3]，部分预测内容如表 2.1-1 所示。

高性能 CPU 封装特性的预测 表 2.1-1

年份	2020	2022	2024	2026	2028	2030
CPU 核心	42	50	58	66	70	70
封装密度(nm)	7	5	3	2.5	2.1	1.5
传递速率(GHz)	3.10	3.30	3.50	3.70	3.90	4.1
芯片发热(W)	237	262	288	318	351	387

为了保障芯片的运行，必须将芯片的温度控制在一定范围内，这是数据中心冷却的核心需求，也是冷负荷的来源。只有在较低的温度下排出芯片产生的热量，才能保证各种元件及系统装置的正常运行和长期可靠。例如，对于单体芯片，一般要求芯片的最高温度低于 85~95℃；对于 Intel/CPU 芯片，根据封装构造不同，会要求其封装组件温度不高于 68~75℃^[4]。对于大型服务器或者超级计算机系统的冷却设计，基于对提高系统可靠性和降低电力消耗的考虑，往往会要求系统内所有 CPU 芯片甚至其他主要电子元件的温度低于上述单体温度要求，达到 60℃ 以下。

芯片等电子元件工作温度的设定对系统的可靠运行有重大影响，通过有效的冷却方式和相关技术来降低元件的工作温度，可以更加有效地提高元件和装置系统的可靠性。电子

元件包括材料扩散、相关腐蚀和电子迁移等几乎所有劣化的原因都涉及材料的热反应机理与相关因素，与元件的工作温度有直接关系。元件的劣化程度随其工作温度的降低呈现指数降低，其中，这一关系被简称为“10度2倍”法则，理论上工作温度每提高10℃，可能会导致元件材料2倍的劣化程度。而通过冷却将工作温度降低10℃，可缓解元件材料50%的劣化程度。

CPU芯片耗电包括有效电力和无效的漏电，芯片温度在85℃时，其无效的漏电占了将近总耗电的一半，可以通过降低芯片温度减少无效漏电，从而有效减少漏电部分的电力损耗，也可以大幅度减少其漏电电流，从而很大程度降低元件的耗电量，提高信号等电子传送效率。

把芯片产生的热量排出到某个热汇，可以把整个热量传递通道看成一个等效热阻，而其驱动力就是芯片内的温度与热汇温度之差。这样，热量、驱动温差和热阻之间的关系为

$$Q = R \cdot (T_{\text{芯片}} - T_{\text{室外}}) \quad (2-1)$$

热量 Q 由芯片工作状态决定，不可减少，传输通道的等效热阻由系统的冷却方式决定， R 可表示为

$$R = R_{\text{芯片内部}} + R_{\text{芯片表面到冷却媒介}} + R_{\text{冷却媒介到热汇}} \quad (2-2)$$

确定了系统形式和工作参数（冷却媒介循环流量等），这些相应的热阻 R 也就随之确定，从而根据 Q 与 R 就得到要求的驱动温差 $T_{\text{芯片}} - T_{\text{室外}}$ 。给定要求的芯片温度，也就得到要求的热汇温度。如果可以找到低于或等于要求的热汇温度的自然冷源接收热量，就可以实现这一冷却要求，实现自然冷却^[5]。如果找不到低于这一温度的自然冷源，就只能采用制冷设备，通过耗能制冷，提供人工冷源接收芯片排出的热量。

如何尽可能实现自然冷却，或在全年运行时间中尽可能多的时间内实现自然冷却，是数据中心冷却系统节能的关键。即使必须使用人工冷源，也希望尽可能提高要求的热汇温度，减少人工冷源需要提升的温差 ΔT 。人工制冷系统需要提供的能量 P_c 为

$$P_c = Q(\Delta T + Q \cdot R_c) / T\eta \quad (2-3)$$

式中， R_c 为人工冷源接入回路的等效热阻； T 为冷源温度（K）； η 为人工冷源制冷系统的热力学完善度。而这里的 ΔT 则是要求的热汇温度与可以得到的自然冷源温度之差，是自然冷源比要求的热汇温度高出的程度。所以，即使采用人工冷源，可以找到接收热量的自然冷源温度越低，人工冷源的能耗就越低。

为了有效地避免或减少人工冷源的使用，可以有如下两个途径：

(1) 提高芯片温度，但这将影响芯片工作的可靠性，提高故障率，同时还可能增加芯片功耗。因此芯片温度有上限要求（详见后面的讨论）。

(2) 减少热量传输通道的等效热阻 R （斜体），这与冷却系统的形式、参数和运行模式有关，也是本书讨论的主要内容。

尽可能寻找温度较低的自然冷源接收热量^[6]。一般采用室外空气接受热量，热汇温度为当地的室外空气温度，利用蒸发冷却技术，可以获得接近当地空气湿球温度的冷却水作为冷源，而采用间接蒸发冷却技术，则可以得到接近当地空气露点温度的自然冷源。在我国西部干燥地区，室外空气露点温度可以比空气干球温度低10K以上，是采用各种蒸发冷却技术的最佳地域。而如果可以找到低于当地空气温度的江、河、湖、海水（一般是深水区取水），也可以成为很好的自然冷源。

2.2 冷却排热机理

CPU 在运行过程中会产生大量热量,如果不能及时排除,将导致其表面温度升高,可能导致芯片过热炸裂,但是除非温度过高,一般并不会直接损伤 CPU,而是因为高温引起“电子迁移”,电子定向流动撞击金属原子,导致金属原子移动,进而损伤 CPU 内部芯片。“电子迁移”对芯片的伤害是一个缓慢的过程,如果芯片一直处于高温下工作,势必会造成核心内部电路短路,最后彻底损坏。热量在芯片处的累积将严重影响其稳定性和使用寿命,研究发现,单个电子元件的工作温度如果升高 10°C ,其可靠性则会减少 50%,55% 的 CPU 失效问题都是由于芯片过热引起的^[7]。

(1) 芯片的产热

数据中心热量产出最大的核心部件是服务器基板上的 CPU 芯片,CPU 的工作温度关系到计算机的运行稳定和使用寿命,必须保证 CPU 工作温度在合理的范围内。ALTERA 的 FPGA 分为商用级和工业级两种,商用级的芯片可以正常工作的结温范围为 $0\sim 85^{\circ}\text{C}$,而工业级芯片的范围是 $-40\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

目前在尖端研究开发领域,大型数据中心采用高性能计算机服务器才能提供更强大的数据处理能力。高性能服务器高热流密度器件产生巨大热量。例如 3.6G 的 Inter Pentium4 终极版处理器运行时产生的热量可达到 $40\text{W}/\text{cm}^2$,不能有效地排除这些热量,将导致温度急速升高,直接影响其运行性能和使用寿命。芯片产热中其内部温度分布不均匀,CPU 温度持续增高会导致能量分布不均匀,即在芯片表面出现局部温度过高的热点。热点将导致芯片表面上局部形成大的温度梯度,进而影响服务器运行的稳定性。目前高热流密度芯片的功率已达到 $60\text{W}/\text{cm}^2$ 以上,芯片内部个别结点处的热流密度将会更高,其热流密度可达整个芯片平均热流密度的 3~8 倍,其表面热点处的热流密度将达到 $1500\text{W}/\text{cm}^2$,温度达到上千度。田金颖等^[8]采用均匀与非均匀热量分布的两种热源对平板热管散热器在冷却电子芯片中的传热性能进行了实验研究。对比均匀加热条件,硅脂芯片作为热源可以更切实际的模拟计算机微机处理器的热源边界条件。非均匀热量分布的芯片设置了三个受热区,其中热点的最大热流密度为 $690\text{W}/\text{cm}^2$ 。

热点占整个芯片的极小一部分面积,但是芯片的大部分能量都集结在热点上。Hewlett Parckard PA-8700 处理器芯片表面出现不均匀的高热量分布以及较大的温度梯度的现象。随着对服务器性能要求的提高,CPU 的结构体系已经由传统的单一芯片向多核芯片发展,那么在芯片表面也就出现了更多的热点。优化热点分布将成为封装热控制研究中的重点所在。

(2) 芯片的散热

芯片的散热基于温差驱动使热量从内部热点向相对低温的表面传递,芯片散热的过程实际就是热量传递的过程。芯片产生的热量主要是传递给芯片外封装结构,如果封装结构外加散热片,则热量会由芯片外封装通过散热片胶传到散热片,最终由散热片将热量传递到环境中去。整个散热过程分为三步:芯片热量传递到散热板上,通过热传导的作用再将热量传递到散热器,最后通过空气对流将热量带走。

由于空气传热能力有限,所以还可以采用液冷形式,将热量从芯片表面通过吸热装置传

递到冷却液体中。液体的比热容远大于空气的比热容，液体在管路中的定向流动可以实现热量的定向转移。其优越性能可以避免 CPU 芯片温度骤升，获得比一般风冷更好的冷却效果。

还有一种方式是把具有很大传热能力的热管直接贴在芯片表面，从而直接通过热管导出芯片的热量。这时主要的热阻为芯片与热管之间的接触热阻。如果能够使热管与芯片表面良好地大面积接触，则可以获得接近液冷方式的冷却效果。

图 2. 2-1 展示了普通 CPU 及散热器的封装结构。其中芯片和散热板间、散热板和散热片间均以高热导率的金属 TIM 连接。芯片的热量通过散热板扩散到较大的空间，从而减小了其表面上的温度梯度及不均匀能量分布。散热板上的热量传递到散热器上，通过冷却介质将传递到散热片上的热量带走。散热器的散热过程可以分为吸热、导热和散热三个步骤，相对应的散热器需要具备包括吸热模块、导热模块和散热模块等三个部分，吸热模块是指散热器底部，需要尽可能的吸收芯片释放的热量。在芯片和散热板的连接处存在两部分热阻，即接触热阻和材料热阻。材料热阻的大小取决于材料种类和厚度等因素，表 2. 2-1 是几种常见金属的导热系数，导热性能越好，材料热阻越小。大多数散热器在与芯片相接触的部分采用热传导性能较好的材料，保证热量尽快传导出来。接触热阻的存在是由于芯片和散热板的连接处会存在间隙，间隙间填充了空气，空气的导热性能比较差，导致接触热阻的存在。表面平整度、紧固压力、材料厚度和压缩模量都会对接触热阻产生影响，这些因素又与实际应用条件有关，一般采取尽量保证接触面的平整度，减少空气间隙或者在两者间填充导热性能较好的材料以减小接触热阻。散热器的散热片是散热模块，需要较大的散热面积，相同材质的散热片的空气接触面积越大，散热效果越好，同时散热片的形状和结构也造成不同散热片的散热性能不同。

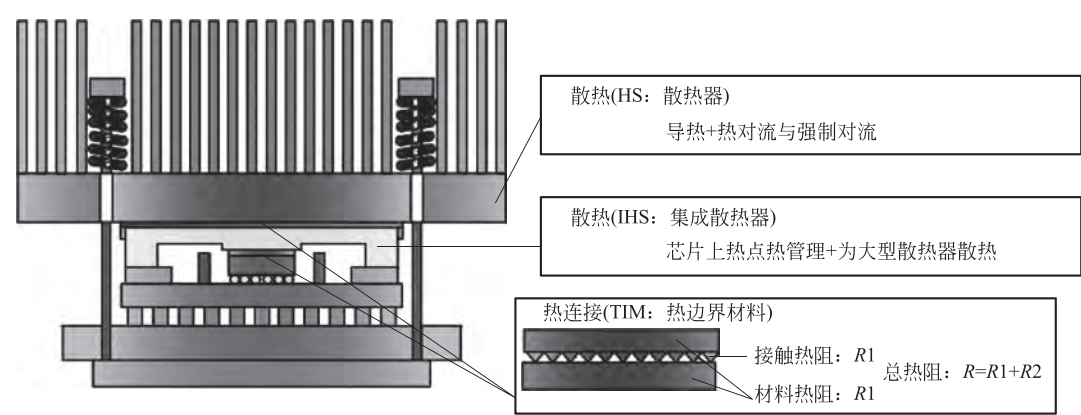


图 2. 2-1 普通 CPU 及散热器的封装结构

几种常见金属材料的导热系数 表 2. 2-1

金属材料	热传导系数(W/m·K)
银	429
铜	401
金	317
铝	237
铁	80

芯片表面相对于散热器底板表面两者面积相差悬殊，面积比过大造成芯片向散热底板的扩散热阻很大，CPU 芯片的热量会从散热器底部向上、向外传递至周围环境中，所以在散热器底部温度分布的特征是中心高四周低，使得散热器上部翅片的散热效率低下，如图 2.2-2 所示。一般情况下，芯片表面温度与经过散热器的空气温度之间的温差可达 40~50K，这一温差构成从芯片表面到了冷却系统热汇之间温差的最主要部分。同时由于芯片表面上存在局部温度过高的热点，热点占整个芯片极少一部分面积，但是芯片的大部分能量都集结在热点上。热点的存在导致温度分布不均匀，进而导致较大的温度梯度现象的出现，所以要提高散热器冷却效率，就要解决芯片表面温度不均匀问题，主要措施是将芯片表面的热量迅速铺展开。例如，在芯片与散热器之间增加一块均温板，解决芯片表面与散热器底板面积比相差较大的问题。对于风冷散热器，也可以使用高导热性材料，例如散热器的底部采用平板热管来减少扩散热阻，平板热管内壁为金属烧结形成的多孔材料。

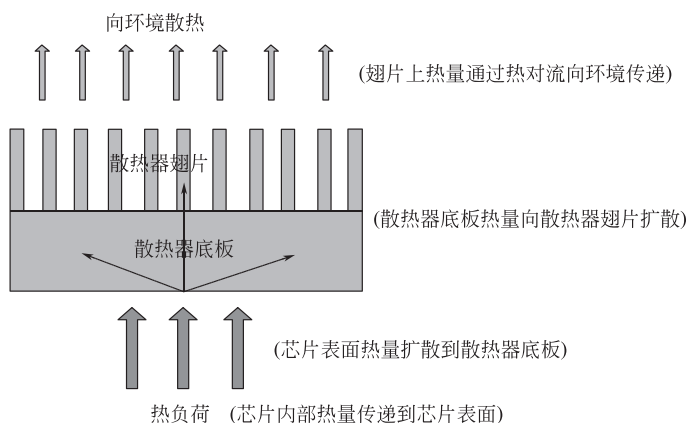


图 2.2-2 处理器及散热器热扩散示意图

热传导结合热对流保证 CPU 的有效散热，保证计算机稳定运行。芯片在实际运行中会出现短时间温度飙升的现象，若是不能及时散热，芯片温度过高会直接破坏芯片内部部件。目前芯片的散热方式主要是采用散热器，在图 2.1-2 的导热模型中，热传导遵循傅里叶传热定律。

傅里叶定律指在热传导过程中，在单位时间内，通过给定截面的热量正比于垂直该截面面积与温度变化率，用数学表达式表示为

$$q = \frac{Q}{F} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2-4)$$

式中： q 为热流密度，即单位时间内通过单位面积的热量，单位为 W/m^2 ； Q 为热流量，单位为 W ； F 为垂直于热流方向的截面面积，单位为 m^2 ；式中负号代表热量传递方向指向温度降低的方向； λ 为导热系数，单位为 $W/(m \cdot K)$ ，导热系数是表征材料导热性能优劣的参数； $\frac{\partial t}{\partial x}$ 代表温度 t 在 x 方向的变化率。

热阻 R 表示单位面积、单位厚度的材料阻止热量流动的能力，表示为

$$R = (T_1 - T_2) / Q \quad (2-5)$$

式中： T_1 、 T_2 为材料两侧的温度大小，单位为 K 。对于单一均质材料，材料的热阻与材

料的厚度成正比；对于非单一材料，总的趋势是材料的热阻随着材料的厚度增加而增大，但不是成线性关系。

传热过程中，假设通过各个环节的热流量都是相等的，则各串联环节的总热阻等于各个部分的热阻之和。在整个热传导过程中，总热阻 R 为

$$R = R_0 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (2-6)$$

式中： R_0 为 CPU 芯片内部热源到芯片表面之间的导热热阻；

R_1 为 CPU 表面与散热器底部的接触热阻；

R_2 为散热器底部到散热器翅片的导热热阻；

R_3 为翅片与冷却介质之间的传热热阻；

R_4 为冷却介质到热汇之间的传递热阻。

芯片热量传递到热汇以热阻方式给出的总传热模型如图 2.2-3 所示。

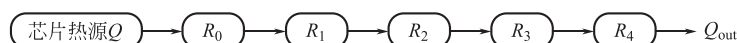


图 2.2-3 散热器等效传热模型

在整个芯片的传热过程中，热阻复杂，但是大部分热阻都是可以控制的。例如，目前多芯片模块技术广泛应用于具有复杂导热技术的高端性能服务器封装系统中，多芯片模块是四个 CPU 芯片，由四个 SiC 散热板贴敷于各个芯片之上，具有高热导率的热结合层放置在散热板与 CPU 之间，这种层叠设计可以减小导热热阻。下面主要分析不同冷却方式各个环节减少热阻的方法。

(1) 服务器芯片自然冷却

数据中心的传热过程主要是依赖于芯片与热源之间的温差来驱动，若是传热过程的温差很小，驱动温度大于热源和环境间进行传热所需的温差，则可以直接利用环境作为冷源对数据中心进行冷却。

自然冷却是将室外温湿度适宜的冷空气引入室内，或者通过使用换热器使得室外冷风与室内热风进行换热，或者直接利用自然环境中的低温地表水。因此散热器的翅片上的热量是直接传递给室内空气的。芯片内部热量传递到表面的热阻 R_0 是不可控制改变的，CPU 与散热器间的接触热阻主要是由于两者之间存在空隙，空隙间是空气，空气的导热效果较差，要减小 R_1 ，要尽量使散热器底面的平整度增加，比如采用铣和磨等工艺，或者在芯片表面和散热器接触间隙涂导热硅脂，增加芯片和散热器底面的接触面积，减少两者间的间隙。散热器内部导热热阻 R_2 取决于散热器形状结构及散热片所采用的材料，考虑到经济因素及制作工艺，大多数散热片采用纯铝制作，导热效果较好，可以有效减小导热热阻。热量到达翅片上时，通过热对流和热辐射将热量传递给室内空气，减小自然对流热阻 R_3 的方式主要有尽量保证室内空气流动不受阻碍、散热片尽量垂直放置、增大散热片的面积等。

(2) 服务器芯片风冷散热

目前数据中心服务器冷却散热多采用风冷的形式对芯片进行冷却，最为常见的是型材翅片加风扇的散热器。风冷散热在解决低温热源的散热问题上是最理想的散热方式，且风冷散热器与 CPU 的装配具有标准化的特征，有利于大规模生产。

风冷散热器的基本原理是利用循环空气带走芯片热量，芯片表面紧贴散热板，散热板

通过铜管将热量转移到散热翅片，然后利用风扇产生的强制对流加速对流，促进热量尽快传递到环境空气中去，从而降低芯片表面温度。其减少前面几个环节的热阻的方式参照自然冷却，除此之外，一般通过改善散热器底面结构和提高散热片表面传热系数，来提高散热器特别是长翅片散热器散热能力。可以在芯片与散热器底板之间增加热扩散板，促进散热器底板的热均匀，相变冷却散热装置如热管、平板热管在嵌入散热器底部时，可以有效提高散热器散热效果。与普通铝质相比，采用铝质底板嵌入热管结构的散热器，其冷却性能可提高 10%，但质量相应减少 15%。而在散热片向空气传递热量过程中可在散热器上加装风扇，强化对流，减小热阻 R_3 。翅片上的热量将通过热对流和辐射向周围的环境空气传递，风扇可以加速空气流动，受迫流动的空气与翅片之间可以进行更有效的热量交换，从而对芯片进行冷却散热。实验证明，如果芯片热流密度超过 $50\text{W}/\text{cm}^2$ ，即使增大风扇的转速，对芯片的冷却作用已不明显。

(3) 服务器芯片液冷散热

液冷相比于风冷更具优势，能够有效驱散高热密度服务器热量，降低系统 PUE，更符合当前绿色数据中心的发展趋势。目前国外数据中心已进入液冷时代。液体的比热要大于空气，采取液冷散热技术，可以将供水温度提升至 35°C ，不需要额外采用压缩机来制冷，可全年采用自然冷源，这样使得数据中心基础设施制冷系统的运行能耗降低 30%~40%，同时，数据中心的机房面积可减少 10%，或机房利用率提高 10%^[9]。

液冷散热与风冷散热的原理本质是相同的。液冷散热技术相比较风冷技术的区别是，液冷利用循环液将 CPU 的热量从水冷块中搬运到散热器上，代替了风冷中的均值金属或者热管，如图 2.2-4 所示，最终热量通过直接排入空气或深层湖水或者借助冷却塔排入室外空气。液体的比热容比较大，可以吸收大量热量而保持温度不发生明显变化，水冷系统中的 CPU 的温度能够得到较好的控制。

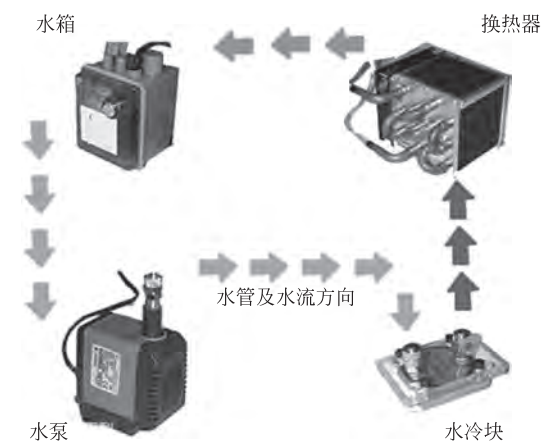


图 2.2-3 液冷散热模型（图源自网络）

水冷块作为吸热模块，将芯片热量传递给循环液，考虑水冷块的导热热阻，水冷块的材料应该尽量选择导热性能好的金属材料，比如纯铜或铝合金。水冷块内部水道改直流道为回转旋涡道，增加传热面积，强化对流传热^[10]。此外，影响液冷散热过程的热阻可以从流体的特性出发进行分析^[11]，无论是层流还是紊流，流体流经固体表面时，会在固体

表面形成速度边界层,同时除速度边界层外,还会形成一层具有温度梯度的温度边界层,在温度边界层内部,速度梯度较大,流速较低,热传导代替热对流成为主要的传热方式,传热速度低。提高流体流动时的雷诺数 Re 可以减小边界层厚度,增大对流换热系数,减小传热热阻。可以加大流体流动速度,使得底层层流厚度变薄,导热增强,当流体流速增加时,流体内部的对流换热也会增强,但是流体流速增加需要消耗更多的水泵功耗;对流热阻的大小取决于对流散热面积和对流换热系数两部分,对流换热面积增大,可以加强对流换热。

(4) 减少散热温差损失的分析

数据中心的冷却形式按照制冷系统末端形式的标准分类,可以分为机房级别、机柜级别和芯片级别这三种形式的冷却模式。对于不同热流密度的冷却对象,需要不同尺度的冷却思路和冷却末端。其中一种思路为考虑驱动温差。由前述牛顿冷却定律可知,传热过程的本质是在温差驱动下,将热量从高温物体传递到低温物体,从热源带到冷源,温差 ΔT 越小,在相同的热负荷 Q 下,则传热系数 h 越大,传热效果越好。数据中心的传热过程即符合这一传热本质。

对于数据中心热负荷 Q ,可从驱动温差 ΔT 的角度选择冷却方法。如果系统的热量传递过程消耗的温差之和小于或等于系统的驱动温差 ΔT (斜体),满足热源和环境之间的温差大于驱动温差,那么就不需要再额外采取制冷机,可以直接利用环境作为冷源进行传热,否则就需要通过热泵做功补充驱动温差的不足,额外制造温差来满足传热过程的条件。

早期冷却模式是在机房内部放置冷却末端吸热,以此来控制房间的总体温度。如今把冷却系统直接就近放置在热源附近,哪里有热量就从哪里带走。从本质上讲,这种精确化、微型化的趋势可以做到按需分配冷量,优化改善传热过程的气流组织,减少换热环节,从而减少传热过程的总温差,最终达到节能减排的目的。从减少系统散热温差的视角出发,减少各环节热量传递的温差消耗,有助于降低排热过程的总驱动力需求,从而改善整个数据机房热环境营造过程的能效水平。

减小芯片与室内空气间的换热损失。典型 CPU 风冷散热形式中,需要先将芯片热源的热量传递到室内空气,再经送风排出。室内空气经过芯片表面和散热器附近,与 CPU 热源发生热交换后,再掺混到室内空气中,这一过程中,会有两部分的换热损失:空气与热源表面的对流换热损失和被加热空气的掺混损失。这两部分的损失不可避免,但是可以减小两部分损失(核)。针对掺混温差损失,因为热源温度要高于室内温度水平,导致部分热量会先掺混到室内空气状态后再排除,减少这部分掺混损失主要是考虑对机房中服务器等热源采取就近排热。比如采用 CPU 液冷散热技术,将冷水等冷媒直接输送到热源处,再利用风-水换热器等就近与热源换热来实现对热量的采集;对于对流换热损失,是由于各个服务器芯片温度不均匀导致的,因此,可通过提高芯片温度的均匀性减小空气与热源表面的换热损失。同时需要增加空调送风温度的均匀性。

减小冷热流体掺混损失。绝大多数数据机房在实际应用过程中,存在冷热通道未完全隔离导致的空气掺混、冷空气短路以及热通道内热空气回流等掺混过程^[12]。从减少冷热掺混的角度出发,可采取的措施包括分隔冷热通道、采用列间空调就近送风形式、采用分布式送风的局部冷却方式等。现有存在显著掺混的排热方式中,需求的冷水温度通常在 10°C 以下,减少掺混损失并减少换热过程的不匹配损失,可使得需求的冷水温度提高至

15~20℃甚至更高。

提高送风温度均匀性^[13]。在实际应用中,热通道内压力一般高于冷通道,致使热空气通过机柜主板间空隙回流到冷通道,造成冷通道内局部温度的升高。消除热空气回流可避免冷通道内的冷、热空气掺混,提升冷通道内在高度方向上的温度均匀性,使得机柜不同位置上设备的进风温度均匀。此外,在满足排风温度要求的前提下,提高精密空调的送风温度,可以大幅提高冷源的需求温度。

末端排热充分利用自然冷源。在冷源设备环节,数据机房热环境营造过程应充分利用自然冷源。根据室外热汇温度的变化情况,数据机房的空调系统可以运行在不同的模式下。当室外热汇温度水平足够低时,室外热环境营造过程可全部利用自然冷源完成。通过上述减少排热过程温差损失的途径,可实现所需冷源温度的提高。通过减少室内热量采集过程、中间热量传输环节的温差消耗,尽量提高排热过程的冷源温度,有助于延长冷却塔等自然冷源应用时间,提高排热过程的能效水平。

2.3 常用冷却形式

数据中心服务器散热技术的发展大致上经过三个阶段:(1)1965~2000 年的技术萌芽阶段,散热技术发展缓慢,以传统风冷技术为主,同时出现液冷技术。(2)2001~2009 年为技术成熟阶段,随着散热要求逐渐提高,对风冷及液冷技术进行了改进提高,同时在冷却排热系统中加入了智能控制技术。(3)2010 年至今为第三个阶段,主要是对新散热材料在散热领域应用以及智能控制技术的研究。

CPU 散热技术主要分为两类,分别是主动式和被动式。主动式散热是芯片在运行过程中将所产生的热量以热辐射的方式散发出去,被动式散热是利用外部气流和芯片的自然对流,将热量从散热板或者散热孔等带走。在实际应用中,被动式散热方式更有效,应用更加广泛。在我国计算机领域中,绝大部分都是采用被动式散热方式来实现对计算机 CPU 的降温和散热处理。

数据中心机房的冷源选择,应尽量符合绿色节能要求,考虑机房所在地的气象条件和能源条件,尽可能的利用自然冷源,低温环境下采用自然冷却模式。

对于多芯片封装式结构的冷却散热处理方式,主要包括提高空冷冷却水平,提高导热材料导热率或者直接采用高导热率导热材料,同时考虑到可以将热电和相变冷却设备嵌入到集成散热器内。当今先进冷却技术,包括风冷冷却方式、采用高导热率材料、液冷冷却方式、热电模型及采用冷冻冷藏设备。考虑到导热热阻对整个系统散热冷却效果的影响,提出了对新一代高性能服务器采用微通道换热器,TIM 采用纳米材料以及对热电冷却设备的薄翅片采用超晶格或纳米材料。下面是几种常见的数据中心冷却散热技术^[14]。

(1) 风冷散热技术

风冷散热主要是靠空气流动与热元件强制对流进行热量交换,由空气带走热量,常用的方式有用风扇转动促进热量和空气间的对流或者利用导风罩按照特定的风道引导风的走向。在服务器机柜的上方和下方都安装大量的风扇,热量通过风扇产生的气流散失,而导风罩一般安装在服务器主板的电子元件上,前端接风扇入风口,后端设置于主板后端,为了形成对流,可以缩减出风口径,需要散热的电子元件刚好位于风道内,其产生的热量



图 2.3-1 普通 CPU 风冷散热

通过风道中的气流散失，使得热量得以迅速散播出去，降低计算机的整体运行温度。

风冷散热技术主要是通过对流换热进行热传递，对流换热传递过程所传递的能力，可按牛顿冷却方程来计算，其数学式为

$$\varphi = h_c A (t_w - t_f) \quad (2-7)$$

式中： h_c 为换热系数，表示单位面积温差为 1°C 时所传递的热量， $(\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ； A （斜体）为固体壁面换热面积， m^2 ； t_f 为流体温度， $^\circ\text{C}$ ； t_w 为固体壁面温度， $^\circ\text{C}$ 。对流换热系数的大小与对流换热过程中的许多因素有关，它不仅取决于流体的物性以及换热表面的形状、大小与布置，而且与流速有密切的关系。无论是理论分析还是实验研究，对流换热问题均应分类解决。根据实际工况选择不同的对流换热系数经验公式进行计算。

（2）液冷散热技术

液冷散热是利用热对流或热传导的方式，通过液体的浸没或流动将发热元件的热量带走，所以其散热能力取决于对流和传导两种方式共同的热传递能力。水冷散热系统一般由循环液、管道、水泵、水冷头、水箱或冷排组成。液冷散热技术具有良好的散热性能，因此一般会应用于各种台式计算机以及大型工作站，关于液体冷却方法的研究，主要集中于流道结构的改进以及冷却液替换的问题。

在相同制冷量的情况下，水冷冷水机组耗电量要比风冷冷水机组大，其中，空调系统能耗占比情况见图 2.3-2^[15]。

液冷散热器的水冷头是由铜或者铝制成的吸热金属块，可以吸收热源的热量，然后通过内置水道里的水将热量带走。其中循环液起到吸收热源热量而自身温度变化较小的作用，循环液可以为水，即水冷系统。循环液带走热量后，可以通过换热器进入散热片中，散热片的表面积大，散热效果好，风扇把热量以强对流的方式散入到空气中。液冷散热技术具有散热效果好、噪声低的优势，同时，由于液冷散热的方式需要安装许多管子，导致

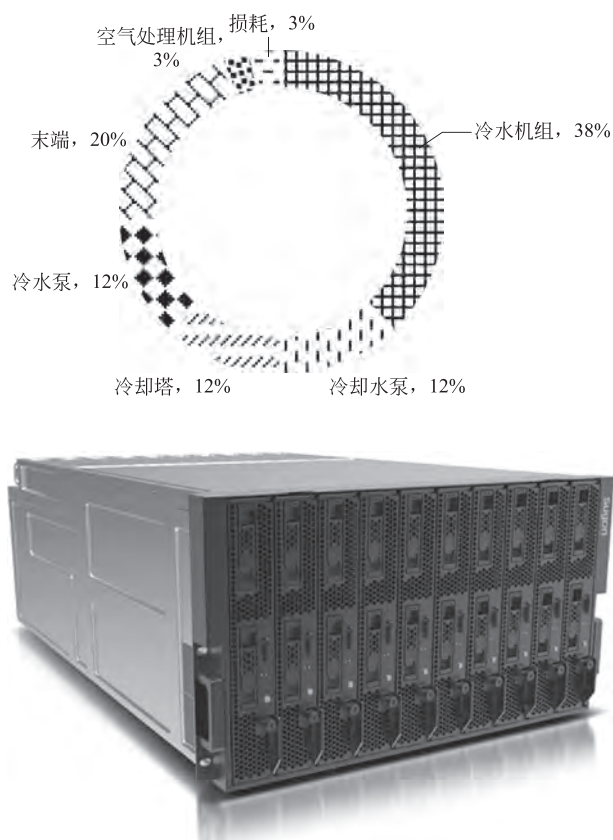


图 2.3-2 水冷系统的基本组成

占地面积庞大，经常出现漏水和结露问题，造价相对较高，会对数据中心的稳定运行造成安全隐患，但是水冷散热技术在大型的数据中心中应用广泛。

（3）热管散热技术

热管散热技术是一种比较新颖的散热技术，他利用了传导介质在密闭的容器中能够形成饱和状态，促使热管在受热的过程当中形成饱和状态，使得热管在受热的过程当中所产生的热量充分的被相关传导介质吸收，并产生汽化反应，形成蒸汽，最后再通过重力作用将蒸汽液体传导回去，从而排出计算机运行过程中的热量。该方法构成简单，是一种封闭式的真空结构。在使用过程中，需要将热管抽至真空状态，然后将相关的低沸点介质注入真空热管中。该技术目前还不够成熟，需要对其进一步的研究和创新。

诸凯等^[7]提出一种重力式热管散热器用于计算机基板 CPU 的散热，在不同风速、不同热流密度条件下，对其散热性能进行了实验研究，研究发现，芯片温度随着风速的增大而降低，但当风速增大到一定程度，芯片温度减小幅度有限，同时重力式热管散热器比平卧式热管散热器有着更低的热阻。

（4）微槽道散热技术

在较薄的硅片上或其他合适的基片上，用光刻、蚀刻及精准切削等方法，加工成截面尺寸仅有几十到上百微米的槽，换热介质在槽道中流过，槽道中放置易于导热的基体，使得槽道中的换热介质将热量传递给其他换热介质。



图 2.3-3 下压式热管散热器

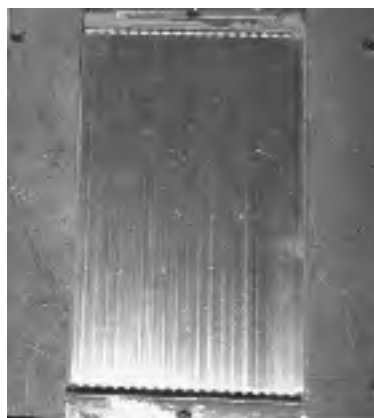


图 2.3-4 微槽道均热板

喻世平等对应用于高速歼击机行波管散热的微槽换热器进行了实验研究，圆满解决了行波管散热难题，近年来，更多在此领域的研究开始逐渐展开。胡学功等将微槽道蒸发型热沉技术用于电子芯片散热上，通过与主流的奔腾 4CPU 芯片风冷散热器的散热性能比较，在低于芯片容许上限温度的范围内，微槽群？蒸发器具有更高的散热热流密度。寇志海等设计制造出一种具有微槽群结构的平板热管换热器，通过数值模拟和实验研究，发现该换热器机械强度高，工艺简单，传热性能比无微槽群的热管高，同时该平板热管具有更好的均温特性，冷凝段温度分布均匀，该热管强化传热效果显著，其当量导热系数是壳体的 12.3 倍。

(5) 纳米微气流冷却技术

纳米微气流冷却技术是利用空气分子电离出来产生纳米级气流的新兴冷却技术，安装在计算机芯片上靠的较近电极产生离子，空气分子电离会产生微弱气流的纳米级脉冲，破坏芯片表面的传热边界层，大大地提高了芯片与外界的传热效率，纳米微气流冷却的阴极是用尖端直径只有 5 纳米的碳纳米管制成的。该技术具有较高的传热效率，其制冷设备没有运动部件，具有很高的系统可靠性，可借助制作纤巧芯片所使用的传统硅片生产工艺制造。

本节参考文献

- [1] Garraghan P, Yang R, Wen Z, et al. Emergent failures: Rethinking cloud reliability at scale [J]. IEEE Cloud Computing, 2018, 5 (5): 12-21.
- [2] Zhu K, Yang Y, Wang Y, et al. Heat Dissipation Performance Analysis of High Heat Flux Radiator [C]. Tianjin: 9th International Conference Green power, 2014.
- [3] Zhang T, Liu X H, Li Z, et al. On-site measurement and performance optimization of the air-conditioning system for a datacenter in Beijing [J]. Energy and Buildings, 2014, 71: 104~114.
- [4] 中国制冷学会数据中心冷却工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2018 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [5] Ponemon Institute. Cost of Data Center Outages [R] 2016, 1.
- [6] 中国制冷学会数据中心冷却工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2017 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

- [7] 田金颖, 诸凯, 李园园, 等. 高性能服务器 CPU 封装冷却技术 [J]. 能源研究与信息, 2008, 24 (1): 17-22.
- [8] 田金颖, 诸凯, 刘建林, 等. 冷却电子芯片的平板热管散热器传热性能研究 [J]. 制冷学报, 2007 (06): 18-22.
- [9] 侯晓雯, 杨培艳, 刘天伟. 液冷服务器在数据中心的研究与应用 [J]. 信息通信, 2019 (9): 48-51.
- [10] Ding T, He Z G, Hao T, et al. Application of separated heat pipe system in data center cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 207-216.
- [11] Tian H, He Z, Li Z. A combined cooling solution for high heat density data centers using multi-stage heat pipe loops [J]. Energy and Buildings, 2015, 94: 177-188.
- [12] 赵磊, 李宏鹏. 长三角地区某数据中心空调系统设计 [J]. 暖通空调, 2020, 1: 1-6.
- [13] 诸凯, 王彬, 王雅博, 等. 用于芯片冷却的重力式热管散热器实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38 (8): 1748-1752.

第3章 数据中心液体冷却技术

提及数据中心服务器的液态冷却技术，人们自然想到的是节能，因为液体换热要比空气换热效率高出许多倍。但是液冷技术的提出，首先要解决的是 CPU 芯片超高热流密度的散热问题，然后是考虑服务器机柜的冷却能耗问题。

从芯片吸热到环境放热，包括各个中间界面与过程的温度控制是实现高性能与高效率冷却设计的关键，温度设定对于元件性能、系统可靠性，乃至数据中心整体的能源利用效率都会产生决定性的影响。芯片产生热量的 90% 以上是通过各种中间结合层以高热流方式传导到散热元件上（如空冷散热器），其他 10% 以下的热量被传递到基板向设置环境放热。最终（通过空调或冷却塔系统）将热量排放到外部环境。保证 CPU 芯片等电子元件的正常工作和 ICT 装置及系统的运行可靠性是数据中心冷却设计的根本，其中，通过有效的冷却方式和相关技术来降低 CPU 芯片的工作温度则可以有效地提高元件和装置系统的可靠性。

目前，基于 CMOS 技术的电子元件已走向其工作性能的极限，需要有新的结构设计来降低元件的工作温度。基于此，数据中心冷却的核心是控制芯片的最高温度。

3.1 服务器芯片风冷散热技术存在的问题

目前数据中心大都采用风冷的形式对 CPU 芯片进行冷却，风冷结构的优点是可靠性很强，无论是服务器内部还是机房空调系统硬件的设计，其技术都比较成熟。尤其是近年对于机房送回风温度、送回风系统方式的优化设计，使得数据中心风冷散热的效率不断提高。此外，服务器基板 CPU 与散热器的配套设计具有标准化的模式，虽然散热器的种类形式各异，但是组装方法基本上可以做到标准化或规范化，有利于大规模生产，这给生产厂家带来极大的方便。

3.1.1 传热效率相对较低

目前风冷式芯片散热器的结构是，在铝质或铜质的散热器底板上镶有翅片，考虑到发热芯片与散热底板间的面积比相对较大（扩散热阻较大），在芯片与散热器之间增设一块热扩散板，又称为均温板。同时为了减小芯片与散热器之间的导热热阻，在其间装设有良好的导热材料。散热器翅片发出的热量通过机架或基板上的风扇以强迫对流的方式散到环境中，这种方式除了风扇产生极大的噪声外，风扇所产生的能耗约占冷却能耗的 30% 以上^[1]。

3.1.2 风冷散热器成本较高

为了减小风冷散热器的扩散热阻，散热器的底板一般采用铜质材料或是装有热管的铝质底板，翅片均采用铝质。由于铜质底板质量较重，造价也高。例如一个 24U 的服务器

机架要装 96 个散热器，规模中等的数据中心至少具有 100 个机柜以上，可以想象机架的承重以及成本都非常大。为了降低有色金属消耗和重量，可将铜质底板改为铝质，但铝质的导热系数比铜质的要小 1/3 左右。为了弥补导热热阻增大造成的缺陷，在铝质底板上加装热管。散热器底板排布热管并非直接用于 CPU 的散热，其主要目的是利用热管极高的导热能力，将 CPU 的热量快速分散至散热器整个底板。底板温度梯度越小，温度越均匀，这样可以显著提高翅片的散热效率^[2]。

这类风冷散热器的结构与传统方式的风冷散热器相比较，有效提高了散热效率，综合节能效果可达 10%~15% 以上，但相对提高了投资成本^[3]。

3.1.3 风冷散热器的散热极限

目前，数据中心服务器 CPU 的热流密度一般小于 $50\text{W}/\text{cm}^2$ ，如果热流密度进一步增大，可以进一步减低进风温度或提高风速。研究表明换热系数与风速关系为 $h \propto u^{0.8}$ ，压力损失与风速的关系为 $\Delta P \propto u^2$ ，产生的噪声与风速的关系为 $U \propto u^5$ 。实验研究也发现，如果芯片热流密度超过 $50\text{W}/\text{cm}^2$ 时，即使增大风速，对其冷却作用已经不明显^[4]。如果进一步降低进风的温度，除了增加制冷机组的能耗外，安装芯片的基板温度有可能降到露点温度，这将带来新的问题。

芯片温度是保证 CPU 正常工作和 ICT 装置系统可靠性的重要指标，对单体芯片来说，一般要求其最高温度低于 $85\sim 95^\circ\text{C}$ （根据芯片种类和工作特性不同）。例如 Intel/CPU 芯片，要求其封装组件温度不高于 $68\sim 75^\circ\text{C}$ ^[5]。针对大型服务器系统，会要求系统内所有 CPU 芯片甚至其他主要电子元件的温度远远低于上述单体温度要求，达到 60°C 以下。显然风冷散热器根本无法满足上述要求^[6]。

前已述及，基于 CMOS 技术的电子元件已走向其工作性能的极限，随着人工智能、物联网以及随之而来的 5G 等高新技术和相关应用的不断发展，对于支持这些高容量大数据信息传送与网络处理的信息与通信技术装置和数据中心系统来说，从架构设计到封装密度等许多方面都提出了新的要求。

众所周知，高性能的服务器除了带来 CPU 散热量持续增高以外，主要是加剧了芯片局部表面温度增高，从而形成更大的温度梯度，或者说芯片的大部分能量都集结在一些热点上，这是直接影响中央处理器稳定运行的主要因素。

尤其是随着对服务器性能要求的提高，CPU 的结构体系已经由单一芯片向多核芯片发展，那么在芯片表面也就出现了更多的热点。优化热点分布自然成为封装热控制研究中的关键问题，而且能耗与结点温度有直接的联系^[7]。

显然，该问题的出现已非风冷散热方式所能解决，因为风冷散热器的弊端是散热底板存在较大的温度梯度，均温板（包括热管）的加入虽然可以使温度梯度得到有效缓解，但是芯片、均温板、散热器底板三者间的较大的面积比以及导热热阻，都直接影响了散热器底板温度的均匀性^[8]。而水冷散热器底板的面积可以与 CPU 包括（组合）其他高热流密度元件的面积相等，所以这种冷却方式的效率是风冷散热器无法比拟的。

3.2 服务器液冷散热方式的提出

近年来，随着人工智能（Artificial Intelligence, AI）、大规模物联网（Internet of

Things, IoT, Internet of Everything/IoE) 和新一代移动通信网络 (the 5th Generation mobile networks/5G) 等高新技术及其相关应用的不断发展, 对于支持这些大规模高速数据处理和网络传送的高性能服务器等信息与通信技术装置 (Information and Communication Technology, ICT) 以及维护系统安全运行的数据中心 (Internet Data Center, IDC) 来说, 为了能够提供并保障更进一步的高性能和高效率运行, 在系统架构和封装密度, 以至冷却方式的设计等诸多方面都提出了新的要求。高性能需求继续推动着电子元件高密度封装技术的快速发展, 伴随对能源利用效率要求的不断提高, 如何解决随之产生的高热流冷却和高效率换热问题, 成为促进当前数据中心冷却技术发展的当务之急和所面临的最重要挑战, 也使得相关行业重新考虑包括液冷在内更加有效的冷却方式及其应用技术的推广。其中, 作为核心部件的高性能微处理器 CPU/GPU、大容量存储器 DRAM/HBM 以及高密度封装和低消费电力技术水平, 将继续引导从装置到系统的能力必须进一步提高。

与现有技术相比, 5 年后高性能服务器 CPU 芯片的封装密度将趋近于实现 3 纳米节点技术, 信号传送与计算处理能力将提升为现在的 1.5 倍。而在冷却与系统运行方面, 芯片的消费电力或者发热量将达到现在的 1.5 倍以上, 并且随着封装密度进一步的提高 (趋近于 1.0nm) 而显著增大。同时, 随着封装密度与工作性能的提高, 芯片自身的特征尺寸 (表面积等) 呈缩小趋势, 由此也将导致芯片表面热流密度的剧增。对于高性能服务器 CPU 芯片而言, 与当今 $20 \sim 50 \text{ W/cm}^2$ 相比, 今后芯片的平均表面热流密度将会达到 100 W/cm^2 以上, 进而对从元件到系统的冷却技术与运行方式均提出极大的挑战。

显然, 计算机软硬件的技术需求将水冷方式推到了前台。有关冷却技术的中期发展预测, 根据一项在 2014 年发表的对世界范围 800 多家数据中心相关行业和机构进行的技术调查^[9], 给出了液冷方式在高性能 ICT 及数据中心中的应用预测。如图 3.2-1 所示, 预计到 2025 年将有超过 60% 的高性能 ICT 装置及系统会考虑采用各种形式的液冷方式, 另有 20% 的系统将会引入包括环境送风在内的自然冷却方式, 而只有接近 20% 的装置及系统被认为将维持现有的依靠室内空调冷却的空冷方式。由此可见, 不仅是冷却能力和能源效率的提高, 液冷方式在降低设备与运行成本、促进排热利用和能量回收等诸多方面的潜在能力也正在得到相关行业的高度重视。

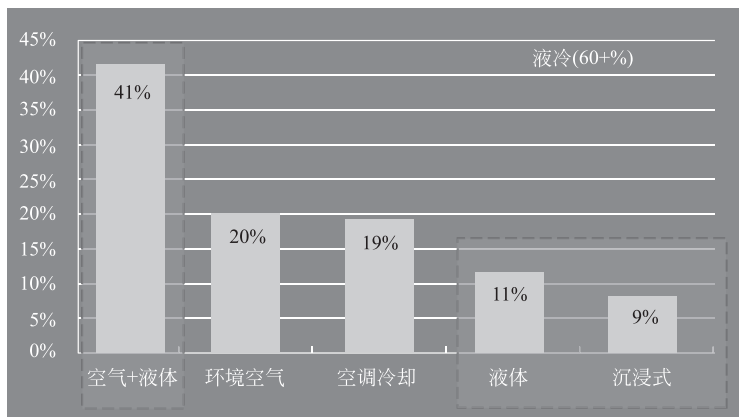


图 3.2-1 液冷方式在高性能数据中心中的应用预测

3.3 数据中心液冷方式的技术现状

对于设置在数据中心内的各种服务器及其他高性能 ICT 装置而言，其冷却方式的选择取决于包括从芯片到基板（CPU/GPU, board），从机柜到系统（cabinet/rack, system）等各个部分的架构设计、封装密度和能耗水平。与传统空气冷却方式（空冷方式）相对比，可以把应用于 ICT 装置的液体冷却（液冷方式）定义为将液态冷却液直接输送到装置内 CPU 芯片等电子元件或封装组件（packages）的表面，通过对流（包括单相或相变化）和导热而实现的传热方式，其特点是在液态冷却液和电子元件之间不存在任何以空气作为中介介质的换热过程^[10]。液冷方式虽然早在 20 世纪 60 年代以后就曾被应用于 IBM、Cray 以及 Fujitsu 的早期大型计算机系统，但时至今日，大多数的 ICT 装置及数据中心仍然维持着传统的空冷方式。除了对设备投资以及系统运行复杂性的考量之外，也由于微电子和封装技术的进步在很大程度上抑制了包括 CPU 在内的电子元件能源（电力）消费的高速增长，此外，大规模装置设计和数据中心运行的产业特点也决定了替代技术引入的周期，这些都可以被认为是当前影响液冷应用得到进一步推广的主要原因。

另一方面，特别是近十年以来，液冷方式在许多高性能计算（High Performance Computing, HPC）系统中的应用实践，及其在提高冷却能力和减少能源消费等方面的有效验证，已经得到包括装置设计和系统运行等相关行业的广泛关注，被认为是对应将来高热流冷却和高效率换热的主要技术方向。表 3.3-1 列出了国际超级计算机评审权威机构 SC（Super-Computer）TOP500 在 2019 年 11 月发表的最新世界最强超算排行榜中采用了液冷方式的代表性装置及系统，其中 TOP500 排名表示了系统的最高运算性能，Green500 排名表示了系统的能源（电力）利用效率，表中的各种装置均采用了冷却水强制循环的液冷方式。

液冷方式在世界最强超算系统中应用（2019 年 11 月）

表 3.3-1

装置系统	TOP500 排名	Green500 排名	运算性能	能源效率
Summit; IBM/USA	1	5	148.6 PF/s	14.7 GF/W
Sierra; IBM/USA	2	10	94.6	12.7
Sunway TaihuLight; NRCPC/China	3	35	93.0	6.5
ABCI; Fujitsu/Japan	8	6	20.0	14.4
AB4FX prototype; Fujitsu/Japan	159	1	2.0	16.9

近几年来，包括太湖之光、天河二号以及美国和日本推出的世界最高性能超算系统在内，液冷方式在高性能计算领域中的应用得到不断扩大，相关的技术创新和设计理念也正在逐渐被推广到 AI 及边缘计算（Edge Computing）等新型装置的开发和运行中。

作为针对液冷方式在高性能 ICT 装置及系统中应用探讨的技术概述，本章将在对冷却技术和行业要求进行综合调查的基础上，从工程应用角度对液冷方式的基本理念和设计思想做出概要性归纳，并根据实际开发和设计经验具体分析液冷方式的不同形态和技术特性，通过对系统案例和综合效果的说明，希望能够为相关技术探讨和发展预测提供参考。

3.4 液冷方式应用的基本理念

发生在数据中心内的冷却过程主要由两方面构成，即电子元件及装置的冷却和设施环境及设备的热管理，如图 3.4-1 所示，两者紧密结合又相互影响。冷却设计的目的是要在保障各种电子元件及装置系统可靠运行的同时，结合冷却介质与设施冷冻和空调设备间的各种流动及换热过程，实现向外界环境的放热并达到要求的能源（电力）利用效率^[11]。

在电子元件及装置的冷却方面，有关冷却能力的评价主要是针对芯片吸热和装置放热两个部分。如上所述，由于液冷方式是通过冷却液对流和结合层导热过程直接吸收 CPU 等电子元件产生的热量，基于冷却液自身良好的热物性和传热机理，在同样换热温差条件下，液冷方式的芯片级冷却能力可以达到空冷方式的数倍甚至数十倍以上。而且，由于冷却液的单位容积热量输送能力可以达到空气的 3000 倍以上，所以即使在相对低流量情况下，液冷方式的装置级放热能力也可以达到空冷方式的数倍以上。对于空冷方式来说，对应 CPU/GPU 等高热流电子元件的大尺度空冷散热器（heatsinks）在很大程度上影响了基板上和机柜内元件封装密度的提高，同时，风力损失和噪声及可靠性（风扇转速等）因素也限制了装置内冷却风量的增大。相关行业一般将数据中心内标准机柜（幅宽 19 英寸）的装置级空冷能力规定在 15~25kW 范围，而同等条件下的液冷能力则可以被设计在 100~200kW 甚至更高。

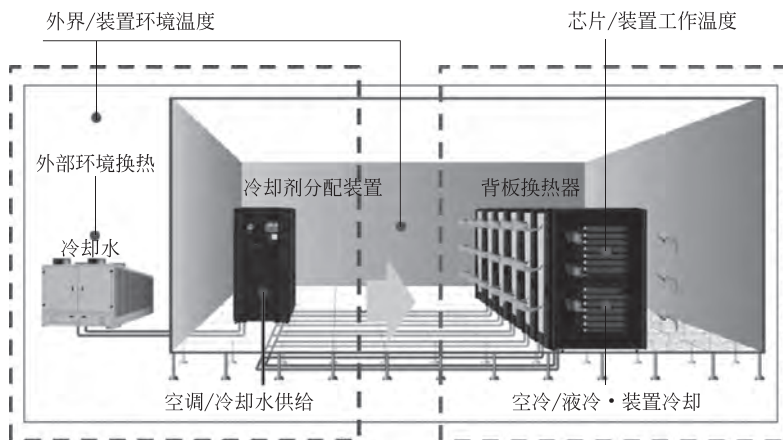


图 3.4-1 数据中心内装置冷却与系统热管理的基本构成

在设施环境及设备的热管理方面，由于大幅度减少甚至消除了室内空调和机柜内冷却用风扇的设置，而且在同样换热要求下驱动液冷循环（液体泵等）所需的电力远远低于空冷换热时各级风扇的耗电，与空冷相比，液冷方式在设置环境和装置冷却方面可以大量减少冷却用电力消费，实现很高的电力利用效率。设定 1 台 20kW 放热要求的装置机柜，表 3-2 中分别给出了空冷、水冷和混合冷却（水冷 50%+空冷 50%）设计时所需要冷却风量、冷却水量和相应电力消费的预测。如上所述，高效率热量传输特性使得液冷方式所需的冷却水容积流量只有空冷风量的千分之一，所产生的耗电也只是空冷的十分之一以下，因此，即使在同样冷冻设施条件下，液冷方式预计可以减少 40% 以上的冷却用电力消费。

另一方面，在实际冷却设计中，要达到表 3.4-1 中所示 100m³/min，机柜风量的空冷极限将是非常困难的，而使用高温液冷方式则可以在达到空冷以上冷却效果的同时，大幅度降低甚至消除冷冻设施的电力消费，这些也都从不同方面说明了应用液冷方式可以大幅度超越空冷的能力极限，并为进一步推动 ICT 装置的高性能化和提高数据中心能源利用率做出贡献。

针对 20kW 装置/机柜的冷却方式与能效分析 表 3.4-1

冷却方式	冷却要求	室内空调/冷却水		机柜风扇	冷冻设施
		风量/流量	消费电力	消费电力	消费电力
空冷 100%	20kW/机柜 -冷媒进出口温差 空冷 10℃ 水冷 5℃ -冷冻设施 COP5	90~100m ³ /min	2.5~3.0kW	1.5~2.5kW	4.0kW
水冷 100%		0.06~0.1m ³ /min	0.1~0.2kW	—	4.0kW
水冷 50%+空冷 50%		50m ³ /min	1.5kW	1.0kW	4.0kW

综合上述说明，对于数据中心内大规模 ICT 装置和系统来说，选择液冷方式的推动力及其应用效果可以归纳为以下几个主要方面：

- （1）对应于不断提高了能源利用效率要求，降低 ICT 装置和设施环境冷却用电力消费。
- （2）提供稳定的冷却与温度环境，提高装置性能、系统可靠性和运行效率。
- （3）推动数据中心的排热利用和能源回收，促进相关技术的创新和应用推广。
- （4）优化数据中心内服务器等 ICT 装置的设置，改善运行环境，降低投资及运行费用。

此外，随着在 HPC 领域中的应用得到不断扩大，液冷方式也在对应 AI 与边缘计算、恶劣环境与地区选择以及减少室内与环境热排放等诸多方面都表现出明显优于空冷方式的特性和应用潜力，相关技术创新和设计理念正被逐渐推广并应用到新型装置和系统的开发中。

3.5 服务器芯片液冷散热的形式

风冷与液冷散热的形式，是按照芯片散出的热量由机柜服务器进入制冷机组冷却水系统的方式而不同，风冷利用机组与循环空气换热带走芯片热量，水冷则直接通过循环冷却水带走热量。

对应于前述冷却理念与应用效果的分析，液冷方式的设计是根据装置构成和设置环境的特点，通过各种换热过程及冷却结构的结合来实现的，其中，作为设计核心部分的针对 CPU 芯片等高热流密度电子元件的冷却从大类上可分类为导热型传热（Conductive）和浸没型传热（Immersive）两种方式（图 3.5-1），区别在于冷却液是否与电子元件或其封装体发生直接性的物理接触。

根据国内液冷技术的应用现状，其中导热型传热又分为间接式和直接式。需要说明的是，在所述的液冷方式中并不是所有的发热元器件均采用液体冷却，一般都是对 CPU 芯片进行液冷，其他如内存条等仍然采用风冷。由于 CPU 是服务器机柜最主要也是冷却能

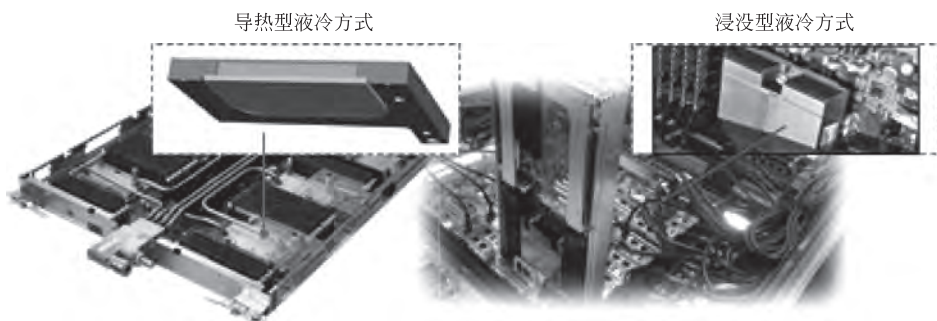


图 3.5-1 液冷方式的分类：导热型和浸没型液冷方式

耗最大的单元，而其他发热元件所需的风机的能耗（包括噪声）非常小，所以这类服务器机柜也称为液冷/风冷混合式冷却系统。

3.5.1 间接式热管水冷散热技术

这种间接式热管水冷散热器，其原理是利用环路热管进行间接冷却，热管的蒸发器相当于是一个液-空气换热器；热管的冷凝器相当于液-水换热器。蒸发器与冷凝器之间用2~3根铜管封闭连接构成环路热管，铜管内充灌冷却介质。热管蒸发器的一端贴附于CPU芯片，冷凝器通过铜管引到服务器机架外，冷却介质在蒸发器吸热蒸发将CPU的热量传至冷凝器，冷却介质在冷凝器放热，外部冷却循环水将冷凝器的热量带走^[12]。即外部的冷却循环水通过一组环路热管与CPU间接进行换热。其结构如图3.5-2、图3.5-3所示。



图 3.5-2 间接式热管水冷散热器

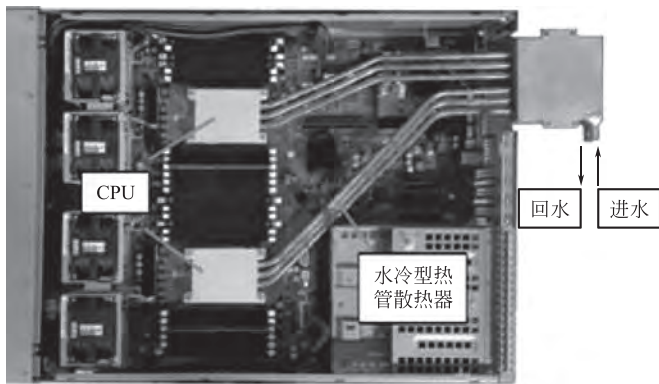


图 3.5-3 间接式热管水冷散热器应用实例

但出于几个方面的考虑，目前间接式热管水冷技术在国内一些数据中心得到推广应用。主要原因在于：（1）水冷泄露的弊端使得部分运营商难以接受（其实按照目前的技术水平已经不是主要的问题）；（2）厂商可以将服务器作为一个独立的整体出售，与外部的冷却水系统完全隔开，以此保证服务器内的“安全性”；（3）由于服务器基板与外部的冷却水系统通过一个快速插拔式接头隔开，即冷却水不进入服务器机架，当然也就不存在冷却水泄露问题，维护也比较方便；（4）机房冷却水系统的维护维修（水质更换、监测）也

可独立进行等等^[13]。

该散热器虽然也属于液冷方式，但外部冷却循环水并不是与 CPU 芯片直接换热，而是利用环路热管超强的导热能力将热量传给热管的冷凝器，外部冷却水再与冷凝器换热最终将热量传出。这种方式对 CPU 芯片的冷却效率明显高于风冷散热，但是相对于将水冷换热器直接与 CPU 芯片表面接触效果要差很多。

3.5.2 散热器直接贴附 CPU 芯片表面散热

相对于间接式水冷技术，直接式水冷散热是一种间壁式结构的换热器，将一个水-空气（或水-水）热交换器直接贴附在 CPU 芯片的表面，“冷板”直接与芯片换热。目前有多种形式结构的单体水冷散热器。不同散热器配有不同形式的封盖，冷却水从上盖进入散热器本体，进水、流向以及喷射方式也具有多种选择^[14]。

水冷散热器一般不单体使用，都是采用多个并联（亦可串联）固定在服务器基板上对芯片直接进行冷却，其中槽道式水冷散热器应用于基板 CPU 芯片冷却举例如图 3.5-4 所示。



图 3.5-4 并联式槽道水冷散热器服务器基板

水冷散热方式具有很高的散热性能，而且目前在国内外方案设计也日臻成熟，虽未大面积普及应用，但在市场上也占有一定的份额。例如：中国曙光的 TC4600E-LP G3 产品是曙光液冷的主力，是第三代升级产品，其内部增加了更多的散热冷板，特别是对于内存条也提供了散热的支持，在液冷介质的接口上采用了无滴漏快速接头，应用更安全。这种水冷服务器在国内尚未成规模应用于数据中心 CPU 的冷却，许多运营商除存在液体泄露的顾虑外，关键的问题是水冷技术方案必须针对服务器基板器件重新设计，目前，与风冷技术相比，它尚不能做到成规模的规范化设计生产，其中有技术问题，也有设计理念的创新问题，而且后者要通过一定的时间加以解决。

3.5.3 导热型水冷散热器应用技术现状

导热型（液冷式散热器的统称）冷却是当前高性能 ICT 装置中应用最广泛的液冷方式，由于冷却液与电子元件不发生直接接触，通常采用冷却水或高性能冷却工质通过不同

形式的冷板（液冷元件）导热吸收来自冷却对象（电子元件）的热量，而浸没型冷却则是采用非导电绝缘性冷却液（包括氟流体或油基工质等）与电子元件或其封装体表面的直接接触，通过对流换热（包括单相或相变过程）吸收电子元件的放热，由于不需要冷板联结等复杂的管路及密封构造，在特定条件下适用于更高密度封装电子元件及装置的冷却应用。当然，选用低沸点冷却工质实现液体界面的相变（沸腾）换热，可大幅度提高表面对流传热系数并减少所需的冷却工质循环量，加上被抑制的冷却液自身的温度升高，与单项换热相比这些因素都可以有力促进上述液冷方式冷却能力的提高。

从芯片吸热到环境放热，依据中间过程热量传送方法的不同，液冷方式往往会由不同的换热过程构成并表现出不同的冷却特性和效果，以导热型液冷为例，表 3.5-1 归纳了开放式与封闭式冷却液循环过程不同的换热构成。对于开放式循环，ICT 装置内的冷却液是由设置在机房内的冷水换热器或者直接由数据中心冷却设施（包括冷水机或冷却塔）提供，其特点是从芯片吸热到环境放热的各个热交换过程都是通过冷却水或不同的冷却液循环来实现的，中间没有以空气作为冷却介质的换热过程，从而在实现高冷却能力的同时，可以达到很高的换热效率。

导热型液冷的冷却液循环方式与换热过程 表 3.5-1

导热型液冷方式	芯片/基板冷却	装置换热	机房换热	数据中心换热	环境换热
开放式冷却液循环	冷却水， 水系冷却液等	—	1 次冷水(CDU)	设施冷水机组， 冷冻设备等	室外冷却塔， 换热器等
封闭式冷却液循环		室内空调	1 次冷水(CRAH)		

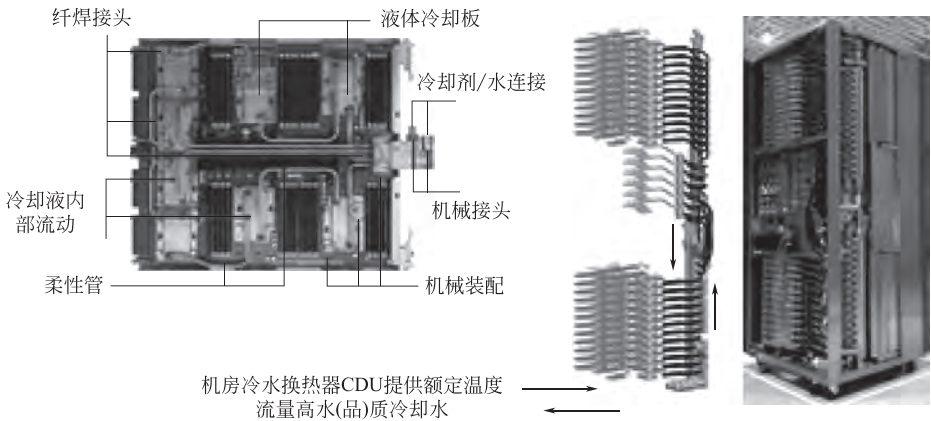


图 3.5-5 导热型液冷开放式冷却水循环系统的设计

在图 3.5-5 所示的设计案例中，由机房冷水换热器 CDU 提供的冷却水通过机柜内的分配系统被输送到各基板，通过装载在各个 CPU 等高发热电子元件上的冷板（Cold plate）吸收热量，被加热的冷却水回到 CDU 与机房低温冷水进行热交换后，再被提供给装置构成冷却水强制对流循环。

在封闭式冷却液循环中，如图 3.5-6 的设计案例所示，在冷板内吸收热量后的冷却液被输送到设置在基板或机柜内的空冷换热器中，通过外部强制空冷降温后再被送回冷板，冷却液的循环和包括放热在内的热交换过程仅限于基板或机柜内进行。这种方式的特点是不需要机房或外部冷却设施提供低温冷水，由于从 ICT 装置整体来看等同于传统的空冷方

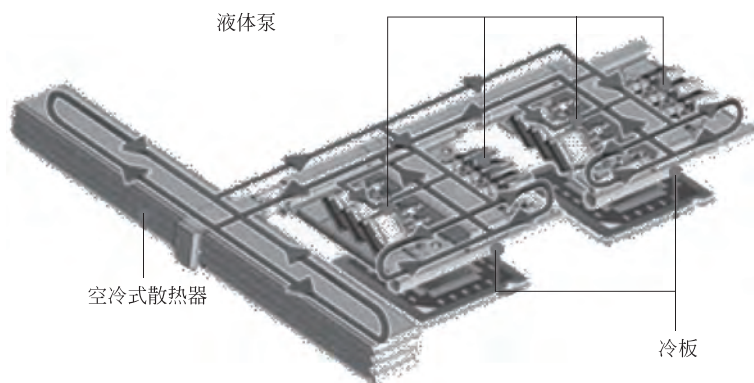


图 3.5-6 导热型液冷封闭式冷却液循环系统的设计

式，因此在减少空调负荷提高能源利用效率方面无法得到改善。但采用冷却液传输热量的方法可以大幅度增加高性能电子元件及相应基板的封装密度，将热量从狭小空间输送到装置内其他余裕部分实施集中换热，可以在改善空冷换热效率的同时提高装置整体的封装密度或空间利用率。对于图中基板间距小于 30mm、CPU 芯片沿风向纵列封装的情况来说，采用上述局部液冷方式可以将空冷散热器（heat sink）冷却极限由约 150W/CPU 提高到 350W/CPU 以上。

在导热型液冷基础上，由包括液冷和空冷共同组成的混合型冷却方式在许多高性能 ICT 装置和超算系统中得到应用。如图 3.5-7 所示，在一块高密度封装的导热型液冷基板上，除 CPU 芯片等高发热电子元件是通过冷板进行液冷外，存储卡等其他低发热元件是通过空气强制对流方式进行冷却的。

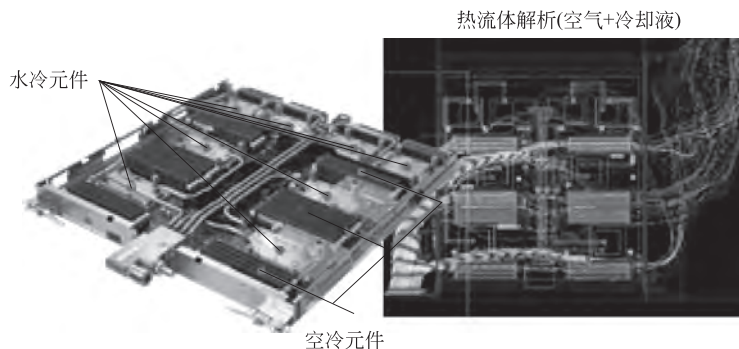


图 3.5-7 液冷+空冷混合型冷却方式

与完全液冷相比，这种混合型冷却方式的最大特点是可以在很大程度上减少液冷系统构造的复杂性，在改善装置封装密度的同时，提高冷却效率并降低冷却元件的制造和维护成本，但由于空冷系统热阻的增加，相关液冷方式的应用效果也会在一定程度上受到削弱。

3.6 服务器整体浸没式冷却

关于服务器基板全浸没式液体冷却早已成为热门话题，也是未来发展的重要技术。与

技术相对成熟的导热型水冷散热方式不同，目前全浸没式液冷仍然被认为处于初级阶段，也是各大企业研发的主要方向。针对大型 ICT 装置的应用往往是将各类基板和包括存储、通信和供电在内的各种元件及装置完全浸没在装满非导电绝缘工作液体的冷却槽内。日本富士通研发的高端全浸没非相变液冷散热器，将计算、存储、网络等多种模块直接浸没在一个容器里，服务器的外壳是一个盆状的容器，如图 3.6-1 所示。



图 3.6-1 日本富士通—高端浸没非相变液冷散热器

浸没式与前述液冷技术相比，全浸没具备体积小、密度高的特性，而且无需更多体积更大的服务器机柜。中科曙光提出一款 I620-M20 的全浸没式液冷服务器，已经交付商用系统。更进一步，如果能够实现冷却液在电子元件或封装表面的相变（沸腾）传热，将大幅度提高浸没方式的冷却能力，这就是带有相变的全浸没式液冷，图 3.6-2 给出了该液冷方式的系统结构。通过冷却液在电子元件或封装体表面的强制对流（液体单项对流或相变沸腾等）直接吸收热量达到冷却目的。被加热后的冷却液通过强制循环管路被送到装置外的机房冷水换热器 CDU 内进行降温冷却后再被送回到冷却槽内，或者可以将机房冷水换热器（冷水盘管）直接设置在冷却槽内实现对冷却液的降温换热。浸没型液冷的主要特点是便于实现对装置的完全液冷，除了装置不需要冷却风扇之外，数据中心内的设置环境也不需要针对装置热负荷的空调设施。所述这些都会很大程度降低数据中心的冷却电力消费，进而改善系统能源利用效率。

全浸没的液冷技术和超级计算机给数据中心冷却技术带来了全新的设计理念。未来，随着超级计算机或负荷较大的数据中心系统能耗的巨幅攀升，浸没式冷却的散热方式必将受到越来越多用户的青睐。

目前全浸没液冷技术尚未得到推广应用原因很多，归纳起来主要表现在成本与运行效率和系统泄漏两个方面：

（1）成本与运行效率。服务器等置于备有绝缘冷却液专用的箱体中，真正发挥冷却作用的液体只是与发热元件接触的部分，其他部分的冷却液只是为了保证液面高度，所以无

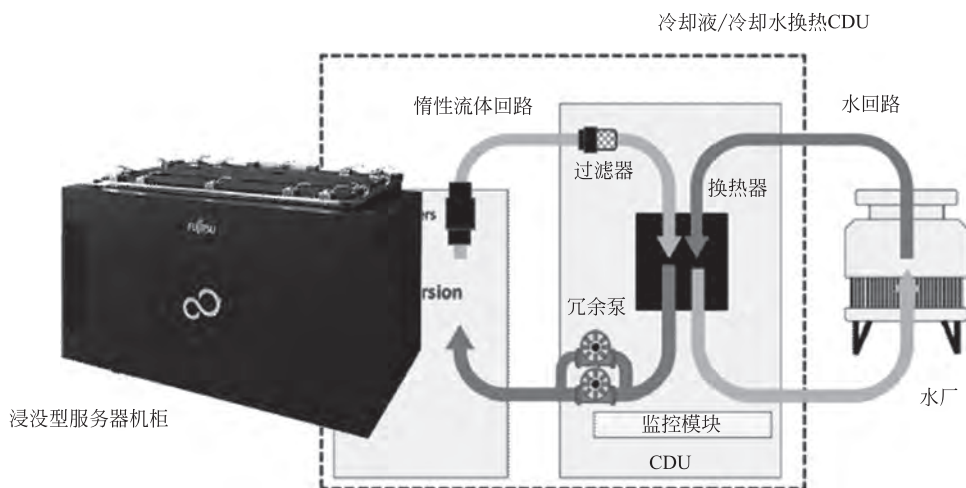


图 3.6-2 浸没型液冷方式的系统构成

效空间占据了密封冷却箱一定的体积。绝缘冷却液目前用得比较多的是 3M 公司的 FC3283，价格较为昂贵。对于 IT 设备总功率在 200kW 以上的大型数据中心来说，尚不能满足无效空间的填充，以保证较少的氟化液能达到较高的页面高度。而且这种液体要自然蒸发消耗。日本高端全浸没非相变液冷散热器冷却液的蒸发速度相当慢，即便如此一年的损耗也在千分之五左右，因此浸没式冷却系统的投资较为巨大。

(2) 仓内压力不稳导致系统泄漏。两相浸没式原理在于发热元件使冷却液沸腾，需要设置工质泵进行箱体内外冷却液的循环。然而如何实现冷却液的循环和工况稳定，包括仓内压力变化与泄露问题的控制，在封闭环境中表现得更加困难。只有 CPU 负载恒定不变时，才能够保证密封系统的压力不变进而保证零压而消除泄漏问题，这当然是非常困难的。服务器的负载总是要随任务的变化而不断变化，从而导致密封仓内的压力时而为正、时而为负，进而导致出现泄漏的可能性，同时带来装置封装密度不足而产生的高价冷却液的大量使用。

所以从实际应用的考虑出发，浸没型液冷在适用范围，系统维护以及冷却与成本效率等方面还存在着许多需要进一步考察并确认的课题。如对应于光传输和机械式存储等元件的浸没限制（适用范围），以及由于浸没均温而产生的针对某些低温要求元件的冷却限制（可靠性验证）等。

3.7 对应于高密度封装技术的快速发展，提高从芯片到装置的高热流冷却能力

高密度封装技术分为芯片级和装置级两个方面，所产生的高热流冷却问题也主要来自这两方面的挑战。首先是高集成度 CPU/GPU 等高性能电子元件自身产生的芯片级高热流密度发热，其次是由这些高性能芯片和其他大容量存储、电源、控制和网络等元件高密度封装后产生的装置级容积型高密度放热。