

数据中心低碳冷却技术

数据中心冷却技术研究与应用进展

邵双全

2024-4-9

华中科技大学

1. 研究背景和意义

新基建：数据中心建设是新型基础设施建设的核心内容

- 是人工智能、工业互联网等其他“新基建”的基石
- 是我国数字经济发展的引擎和载体 (45.5万亿/39.8%@2021, 50.2万亿/41.2%@2022)



大数据中心



人工智能



工业互联网



5G基站



城际高铁与城市轨道交通



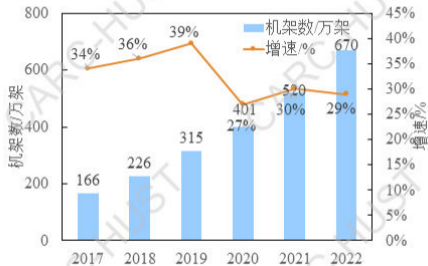
特高压



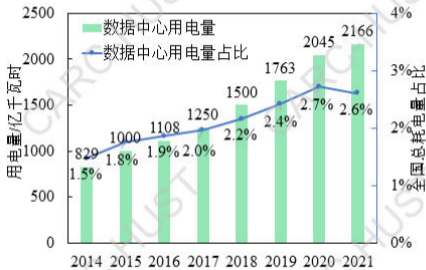
新能源汽车充电桩

1. 研究背景和意义

新基建：数据中心建设是新型基础设施建设的核心内容



数据中心机架规模



数据中心能耗

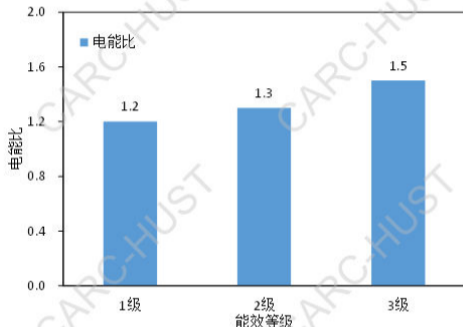
数据中心被列入了高耗能行业之一

工信部“工业节能监察”：数据中心能效专项监察**270家（2021）、370家（2022）**

1. 研究背景和意义

数据中心能效要求不断提高

- 工信部《新型数据中心发展三年行动计划（2021-2023年）》：2023年底，新建大型数据中心PUE降低到1.3以下，严寒和寒冷地区力争降低到1.25以下。
- 2019年4月，深圳市《关于数据中心节能审查有关事项的通知》：对于PUE低于1.25的数据中心，新增能源消费量可给予实际替代量40%及以上的支持
- 2020年6月《广东省5G基站和数据中心总体布局规划（2021-2025年）》：到2022年PUE值不超过1.3；到2025年，PUE值不超过1.25



我全国数据中心能效要求

来源：GB40879-2021《数据中心能效限定值及能效等级》

1. 研究背景和意义

“东数西算”实施方案

- 到2025年，全国新建大型、超大型数据中心平均电能利用效率（PUE）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。
- 8个算力网络枢纽、10个数据中心集群的PUE要求并不相同。
- 张家口集群、韶关集群、长三角生态绿色一体化发展示范区集群、芜湖集群、天府集群、重庆集群的PUE水平要控制在1.25以内。和林格尔集群、贵安集群、中卫集群、庆阳集群的PUE水平要控制在1.2以下。



1. 研究背景和意义

人工智能迅猛发展：算力和能耗的挑战

- 2020年 Alpha Fold
- 2023年 ChatGPT
- 2024年 Sora
-

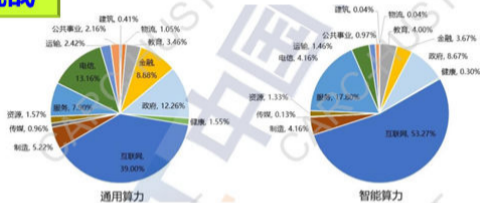
上海新政：智能算力目标一年涨6倍、PUE1.25以下

到2025年，上海市智能算力规模将超过80EFlops，占总算力的50%以上。



广东：到2025年，算力规模38E，智算50%，国产算力70%

存储总量超过260EB，打造“城市内1ms、韶关至广东3ms、韶关至全省5ms”...



➤ 能耗需求激增

年份	芯片	功耗/W
2024E	NVIDIA B200系列	1000+
2022	NVIDIA H100系列	700
2022	NVIDIA H800系列	700
2021	AMD MI200系列	560
2022	NVIDIA GeForce RTX 4090	450
2021	NVIDIA GeForce RTX 2090 Ti	450
2020	NVIDIA A100系列	400
2020	NVIDIA A800系列	400



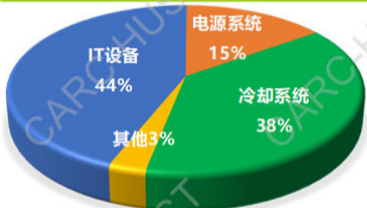
训练一次消耗

- 耗电128.7万kWh
- 冷却用水70万升
- CO₂排放550吨
- 耗费120-140万美元



1. 研究背景和意义

冷却系统是数据中心节能减排的突破口



PUE	GCOP
2.3	1.6
1.5	3.0
1.3	4.6
1.2	7.3

$$PUE = \frac{E_{total}}{E_{IT}}$$

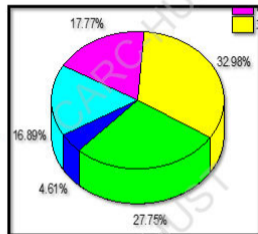
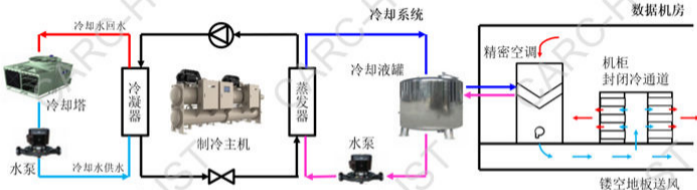
$$GCOP = \frac{E_{total} - E_{cooling}}{E_{cooling}}$$



2 数据中心冷却技术研究与应用进展

数据中心冷却系统典型形式与能耗分配

● 传统数据中心冷却系统及其构成：



- 数据中心冷却系统在保障数据中心内部IT设备、电源设备等高效工作所需的温湿度环境的同时，自身的能量消耗占数据中心的总能耗的30~40%。

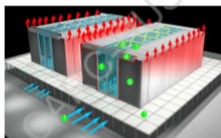
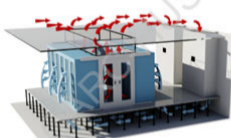
● 冷却系统能效提升方法：

- 充分利用自然冷却：直接利用、间接利用；构建蒸气压缩制冷与自然冷却的复合冷却系统；
- 优化末端冷却：采用抬高地板、封闭冷热通道的房间级冷却、列间级冷却，采用热管背板等机柜级冷却，服务器浸没冷却等芯片级冷却。

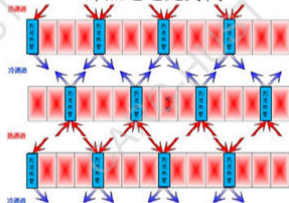
2 数据中心冷却技术研究与应用进展

室内末端

- 水冷型/直膨型
- 冷风短路/热风回流
→ 冷/热通道封闭
- 降低输配能耗
- 自然冷能利用

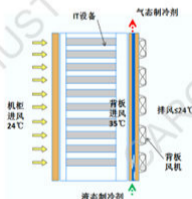


- 冷热通道无封闭



- 列间空调

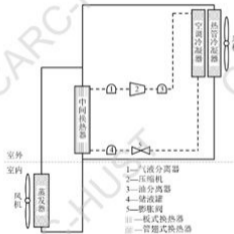
- 地板下送风，热通道封闭/热通道



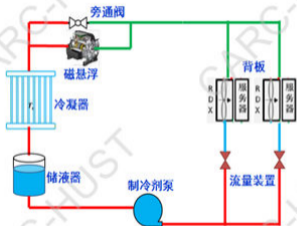
- 机柜级空调（背板冷却）

2 数据中心冷却技术研究与应用进展

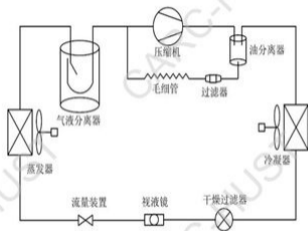
自然冷却：制冷系统+回路热管



重力热管



液泵热管



气泵热管

2 数据中心冷却技术研究与应用进展

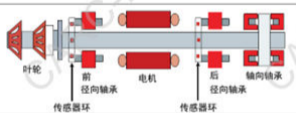
数据中心 负荷特征

- 冷负荷大、湿负荷小 → 高温冷水机组 ($7^{\circ}\text{C} \rightarrow 16^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{+}\text{C}$)
- 内部负荷大、围护结构负荷小 → 负荷变化小
- 全年制冷运行，室外温度变化跨度大 → 压比变化大

提高供水
温度

磁悬浮离心机组

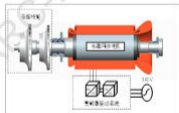
- 磁悬浮：
→ 提高压缩机性能
- 无油润滑：
→ 提高系统运行性能



磁悬浮离心压缩机

高温离心机组

- 小压比降低压机能耗：
→ 降低冷凝温度
→ 提升蒸发温度
- 双级压缩机：变压比



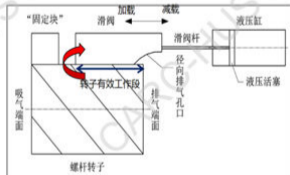
双级离心压缩机

高温螺杆机组

- 变转速：调节制冷量 **解耦控制**
- 调滑阀：变压比运行



压焓图



螺杆压缩机

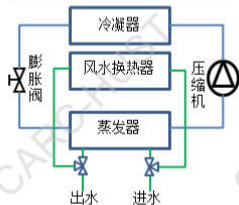
2 数据中心冷却技术研究与应用进展

风冷冷水机组
空气干球温度

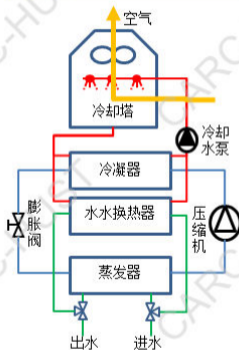
干球温度全年时长

湿球温度全年时长

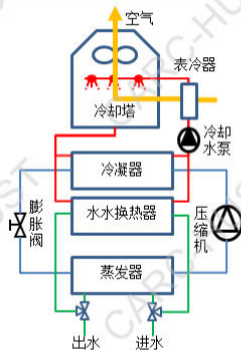
露点温度全年时长



冷机+直接蒸发冷却
空气湿球温度



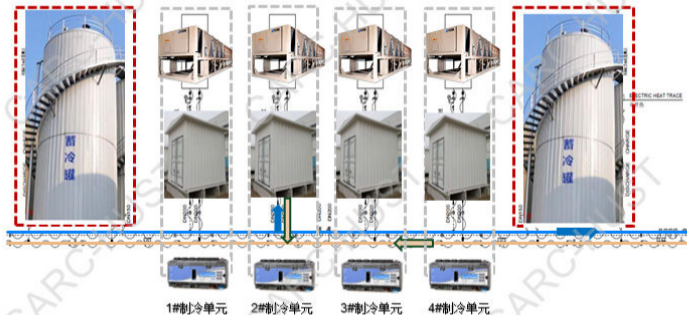
冷机+间接蒸发冷却
空气露点温度



蒸发冷却：提高自然冷能利用率

2 数据中心冷却技术研究与应用进展

数据中心蓄冷



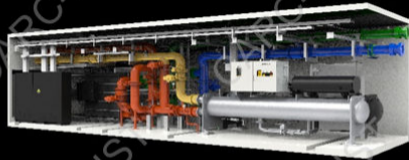
- **增加蓄冷量**：提高数据中心冷却系统保障能力
- **用户侧蓄能**：提高电网可靠性、提高可再生能源利用率
- **分时电价**：降低运行成本

- ✓ 国家发展改革委印发《关于进一步完善分时电价机制的通知》，部署各地进一步完善分时电价机制
- ✓ 系统峰谷差率超过40%的地方，峰谷电价价差原则上不低于4:1，其他地方原则上不低于3:1

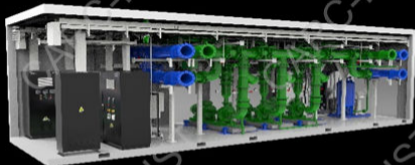
2 数据中心冷却技术研究与应用进展

数据中心冷却系统预制模块化

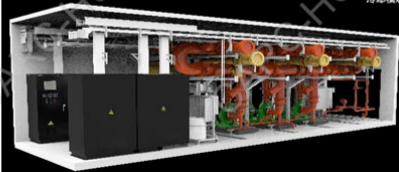
冷源模块



冷冻模块



冷却模块



液冷模块



2 数据中心冷却技术研究与应用进展

智能运维：运行节能

可靠



物联网数据监控



人工智能控制算法优化

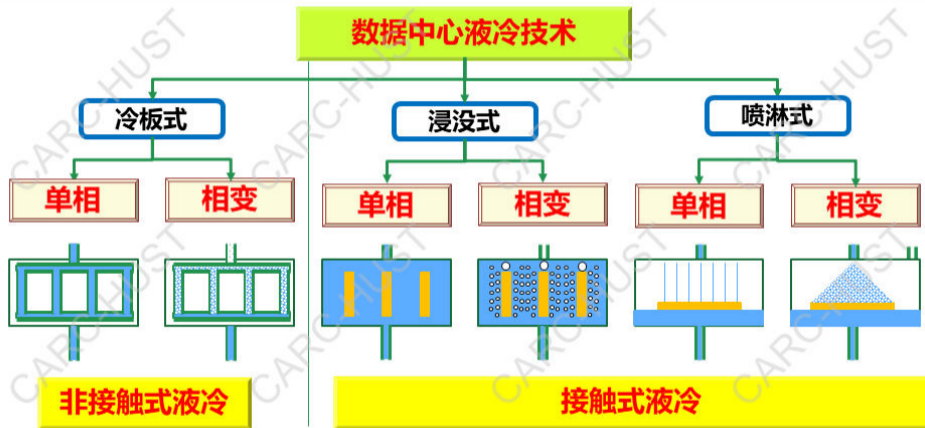
节能

- 全年运行模式控制
- 部分负荷节能策略
- 人工智能优化控制



某公司所有大规模数据中心PUE变化

2 数据中心冷却技术研究与应用进展



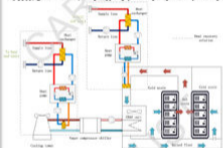
2 数据中心冷却技术研究与应用进展

数据中心余热回收技术

不同冷却系统:

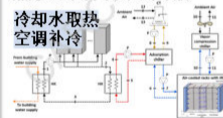
风冷式系统: (成熟度与规模优势)

热源: 高温回风、冷却水、冷冻水



液冷式系统: (技术与发展优势)

热源: 冷却回水、冷却液



液冷适应发展潮流, 余热品位优良

不同余热消费者:

余热回收的应用场景:

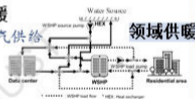
• 有机朗肯发电

直接补偿耗电量
受限于热源温度



• 区域供暖

热水/暖气供给



• 机房补冷

余热驱动制冷
补偿冷却负荷



• 冷热联供

区域供暖主导, 优化邻域能耗

热回收制冷直接降低冷却能耗

不同余热回收技术:

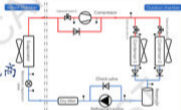
耦合冷却系统的余热回收技术:

• 有机朗肯循环

自然取冷耦合热泵热回收

• 蒸汽压缩式热泵

技术成熟,
多用于风冷式, 能耗高



• 热管式(热泵辅助)

适用于自然冷却良好的环境

吸收式热泵热回收制冷

• 吸附式制冷

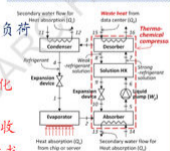
COP约0.4, 补偿冷却负荷

• 吸收式制冷/热泵

• 新型工质对+系统优化

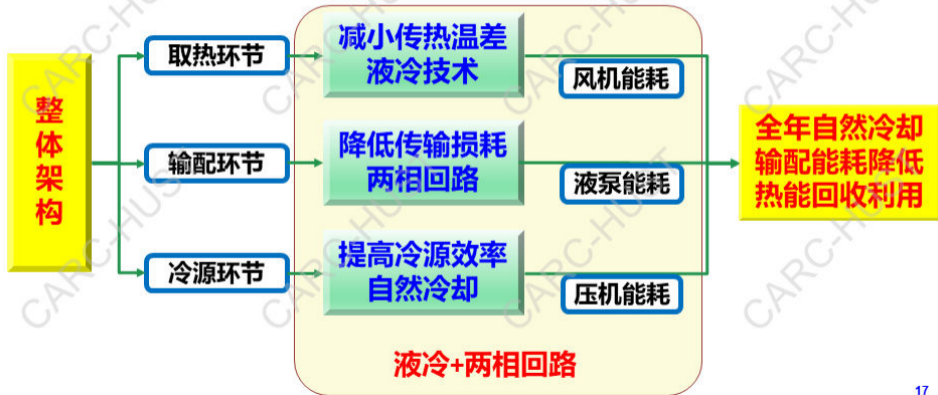
↓
高效的低品位余热回收

• 满足制冷、供热多需求



2 数据中心冷却技术研究与应用进展

- ◆ 数据中心的快速发展、高功率密度化、高能效要求同步到来
- ◆ 匹配需求、因地制宜与精细管理是数据中心节能减排的根本途径





邵双全

13051252727

shaoshq@hust.edu.cn